



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
APLINKOS APSAUGOS IR VANDENS INŽINERIJOS KATEDRA

Rytis Jocys

VANDENTIEKIO TINKLO PLOVIMO TYRIMAI
RESEARCH ON WATER NETWORK FLUSHING

Baigiamasis magistro darbas

Vandens ūkio inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX035

Vandens ūkio inžinerijos specializacija

Aplinkos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

APLINKOS APSAUGOS IR VANDENS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Raimondas Grubliauskas
(Vardas, pavardė)

(Data)

Rytis Jocys

VANDENTIEKIO TINKLO PLOVIMO TYRIMAI
RESEARCH ON WATER NETWORK FLUSHING

Baigiamasis magistro darbas

Vandens ūkio inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX035

Vandens ūkio inžinerijos specializacija

Aplinkos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Mindaugas Rimeika
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas dr. Aušra Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
APLINKOS APSAUGOS IR VANDENS INŽINERIJOS KATEDRA

Aplinkos inžinerijos studijų kryptis

Vandens ūkio inžinerijos studijų programa

Valstybinis kodas 6211EX035

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Raimondas Grubliauskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2021-03-02 Nr. 21-2

Vilnius

Studentui: Ryčiui Jociui

Baigiamojo darbo tema: Vandentiekio tinklo plovimo tyrimai

patvirtinta 2022 m. balandžio 12 d. dekanų potvarkiu Nr. 72ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2022 m. gegužės mėn. 18 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti literatūros apžvalgą apie vandentiekio tinkluose susidarančias nuosėdas, jų susidarymo priežastis, daromą žalą tinklams, vartotojams ir infrastruktūrai; susipažinti su taikomomis apsaugos ir prevencinėmis priemonėmis, bei galimais nuosėdų mažinimo tinkluose variantais.

Parengti tyrimų metodiką nuosėdų paėmimui iš eksploatuojamų vandentiekio tinklų Vilniaus mieste, bei laboratorines metodikas nuosėdų charakteristikoms nustatyti. Atlikti nuosėdų plovimo tyrimus ne mažiau kaip trijose nepriklausomose miesto vandentiekio tinklo dalyse. Nustatyti kritinius vandens tekėjimo greičius, kurių metu gali būti išplautos susidariusios nuosėdos. Panaudojant vandentiekio tinklo hidraulinį modelį įvertinti praktikoje naudojamą vandentiekio tinklų plovimą.

Pasiūlyti inžinerines priemones, kurios apsaugotų vandentiekio tinklus nuo nuosėdų susidarymo naujose ir senose sistemose.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: lietuvių kalbos konsultantas dr. Aušra Žemienė.

Vadovas



dr. Mindaugas Rimeika

Užduotį gavau

(Parašas)

Rytis Jocys

(Vardas, pavardė)

2021-03-03

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Vandens ūkio inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas

Vandentiekio tinklo plovimo tyrimai

Autorius

Rytis Jocyš

Vadovas

Mindaugas Rimeika

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas vandentiekio tinklo plovimas. Atlikta literatūros apžvalga apie vandentiekio tinkluose susidarancias nuosėdas, jų susidarymo priežastis. Tyrime nagrinėti Žemųjų Panerių, Naujosios Vilnios, Aukštągių, Tupatiškių mikrorajonai (Vilniaus miestas). Nustatyta vandentiekio tinklo plovimo vandenyje esančių nuosėdų granulimetrinė sudėtis, tai pat nuosėdų tankis $2150 \pm 150 \text{ kg/m}^3$. Atlikti skaičiavimai nuosėdų kritiniams stabilumo ir ardymo greičiams nustatyti. Panaudojant hidraulinį vandentiekio tinklo modelį išanalizuoti praktikoje vykdomi plovimai. Pateiktos rekomendacijos, kurios neleistų nuosėdoms kauptis vandentiekio tinkle ir kaip efektyviai šalinti nuosėdas iš eksploatuojamų vamzdinių.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo objektas ir metodika, tyrimo rezultatai, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 67 p. teksto be priedų, 62 iliustr., 4 lent., 50 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai

Prasminiai žodžiai: vandentiekio tinklas, vandentiekio tinklo plovimas, nuosėdos, kritiniai greičiai, granulimetrinė sudėtis.

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Environmental Engineering Department of Environment Protection and Water Engineering		ISBN Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Water Engineering study programme Master Final Thesis Title Research on Water Network Flushing Author Rytis Jocys Academic supervisor Mindaugas Rimeika		
Thesis language: Lithuanian		
Annotation The final master's thesis deals with the flushing water network. A literature review was carried out on the deposits generated in water supply networks, the reasons for their formation. The study examined the microdistricts of Lower Paneriai, Naujoji Vilnia, Aukštągiris, Tupatishkiai (Vilnius city). The granulometric composition of the sediments in the water supply network flushing water has been determined, as well as the sediment density of 2150 ± 150 kg/m³. Calculations have been made to determine the critical stability and fracturing speeds of sediment. Using the hydraulic model of the water supply network, washes carried out in practice are analyzed. Recommendations have been made to prevent sediment from accumulating in the water supply network and how to dispose of sediment efficiently from existing pipelines. The work consists of 5 parts: introduction, literature review, subject and methodology of the study, research results, conclusions and recommendations, list of literature. The scope of the work is 67 p. text without annexes, 62 illustrations, 4 boards, 50 bibliographic sources. Separately attached work accessories		
Keywords: water supply network, water network flushing, sediment, critical speeds, granulometric composition.		

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rytis Jocys, 20163748

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Vandens ūkio inžinerija, VImf-20

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2022 m. birželio 02 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Vandentiekio tinklo plovimo tyrimai“ patvirtintas dekanų potvarkiu Nr. , yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: docentas daktaras Mindaugas Rimeika. Mano darbo vadovas docentas daktaras Mindaugas Rimeika.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Rytis Jocys
(Vardas ir pavardė)

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1. Nuosėdų susidarymo tinkle priežastys	13
1.1.1. Ištirpusio deguonies koncentracija	13
1.1.2. pH ir šarmingumas	13
1.1.3. Temperatūros įtaka	13
1.1.4. Bioplėvelės formavimosi ypatumai	15
1.2. Vamzdžių korozija.....	16
1.3. Nuosėdų hidrauliniai parametrai	17
1.4. Vilniaus miesto vandentiekio tinklai	22
1.5. Tinklo plovimo būdai	22
1.5.1. Mechaninis tinklo plovimas vandeniu įprastas ir vienakryptis	23
1.5.2. Tinklo plovimas vanduo–oras metodu	25
1.5.3. Vilniaus miesto vamzdynų plovimas vanduo–oras metodu	27
1.5.4. Kamščio stūmimas.....	28
1.5.5. Hidrodinaminis tinklo plovimas	30
1.5.6. Cheminis tinklo plovimas.....	31
1.6. Hidraulinio modeliavimo informacinė sistema „WaterGEMS“	32
1.7. Vandens kokybės modeliavimas	33
1.8. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	36
2. TYRIMO OBJEKTAS IR METODIKA	37
2.1. Tyrimo objektas	37
2.2. Tyrimo metodika	38
2.2.1. Skendinčių medžiagų koncentracija	38
2.2.2. Vandens drumstumo nustatymas	38
2.2.3. Debito matavimas mėginių ėmimo vietoje.....	39
2.2.4. Plovimo vandens dalelių granulimetrinės sudėties nustatymas.....	39
2.2.5. Dalelių tankio nustatymas	41
2.2.6. Kritinių stabilumo ir ardymo greičių apskaičiavimas	41
2.2.7. Dalelių hidraulinio stambumo apskaičiavimas.....	42
2.2.8. Plovimo modeliavimas	42
3. TYRIMO REZULTATAI	44
3.1. Mėginių ėmimo vietos, plovimo schemas.....	44
3.2. Tinklo plovimo dalelių granulimetrinės sudėties rezultatai	53

3.3. Nuosėdų kiekis vandentiekio tinkle	55
3.4. Kritiniai dalelių greičiai ir hidraulinis stambumas	57
3.5. Dalelių sėdimo efektyvumas	59
3.6. Hidraulinio modeliavimo plovimo skaičiavimai.....	63
IŠVADOS	68
REKOMENDACIJOS	69
LITERATŪROS SĄRAŠAS	70

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Vandens temperatūros kitimas vamzdžiuose.....	14
1.2 pav. Tyrimų principinė schema	14
1.3 pav. Vamzdžių korozija.....	17
1.4 pav. Jėgos veikiančios nešmenų dalelę.....	18
1.5 pav. Greičiai (a) laminarinėje ir (b) turbulentinėje tėkmėje	19
1.6 pav. Geležies ir spalvos koreliacija	20
1.7 pav. Tiriamo miesto vandentiekio schema	21
1.8 pav. Vilniaus vandentiekio tinklų medžiagiškumas	22
1.9 pav. Vilniaus vandentiekio tinklų amžius.....	22
1.10 pav. Tinklo plovimo schema	23
1.11 pav. Tinklo plovimo „vanduo–oras“ principinė schema	25
1.12 pav. Tinklo plovimas	26
1.13 pav. Plovimo schema Nr.1.....	27
1.14 pav. Plovimo schema Nr.2.....	28
1.15 pav. Kamščiai	29
1.16 pav. Kamščio naudojimas.....	29
1.17 pav. Kamščio judėjimas vamzdyje	30
1.18 pav. Plovimas hidrodinaminiu būdu.....	30
1.19 pav. Programėlės vaizdas	34
1.20 pav. Modeliavimo rezultatai	35
2.1 pav. Mėginių paėmimo vietos Vilniaus mieste	37
2.2 pav. Mėginys iš Riovonių g.....	38
2.3 pav. Elektromagnetinis debitmatis	39
2.4 pav. Išdžiovintos nuosėdos	40
2.5 pav. Dalelės pagal granulimetrinę sudėtį.....	40
2.6 pav. Piknometrinis tankio nustatymas	41
2.7 pav. Plovimo modeliavimo veiksmų eiliškumas	43
3.1 pav. Nugalėtojų gatvės plovimo schema	44
3.2 pav. Vandens kiekis tekantis Nugalėtojų g.....	45

3.3 pav.	Vandens greičiai vamzdyne tipine diena.....	45
3.4 pav.	Vaduvos gatvės tinklo plovimo schema.....	46
3.5 pav.	Debitas tekantis plauna atkarpa įprastą dieną.....	47
3.6 pav.	Vandens greičio padidėjimas plovimo metu	47
3.7 pav.	A. Kojelavičiaus gatvės plovimo schema	48
3.8 pav.	Vandens kiekis tekantis A. Kojelavičiaus gatve	48
3.9 pav.	Greičiai plovimo metu.....	49
3.10 pav.	Riovonių gatvės plovimo schema	49
3.11 pav.	Vandens kiekis Riovonių g.....	50
3.12 pav.	Džiaugsmo gatvės tinklo plovimo schema.....	51
3.13 pav.	Vandens kiekis tekantis Džiaugsmo gatve	51
3.14 pav.	Įprasta diena vandens kryptys nagrinėjamoje atkarpoje.....	52
3.15 pav.	Linksmosios gatvės atkarpos plovimo schema	52
3.16 pav.	Debitas tekantis Linksmojoje gatve	53
3.17 pav.	Greitis plovimo metu.....	53
3.18 pav.	Dalelių dydžio pasiskirstymas skirtinguose mėginiuose.....	54
3.19 pav.	Visų mėginių granulimetrinė sudėtis.....	55
3.20 pav.	Nuosėdų kiekis ketiniuose vamzdžiuose	56
3.21 pav.	Nuosėdų kiekis viename kilometre	57
3.22 pav.	Kritiniai stabilumo ir ardymo greičiai	58
3.23 pav.	Dalelių sėdimo greičiai laminariniame ir turbulentiame tekėjime	58
3.24 pav.	Džiaugsmo gatvės tėkmės režimai	59
3.25 pav.	Linksmosios gatvės tėkmės režimai	59
3.26 pav.	Sėdimo efektyvumas iš 274 mm gylio	60
3.27 pav.	Sėdimo efektyvumas iš 103 mm gylio	61
3.28 pav.	Drumstumas iš 274 mm.....	62
3.29 pav.	Drumstumas iš 103 mm.....	62
3.30 pav.	SM koncentracijos priklausomybė nuo drumstumo.....	63
3.31 pav.	Standartinio tinklo plovimo rezultatai.....	64
3.32 pav.	Vamzdynai, kuriuose palankios sąlygos nuosėdoms susidaryti.....	64
3.33 pav.	Vamzdynai, kuriuose palankios sąlygos nuosėdoms susidaryti.....	65
3.34 pav.	Vandentiekio tinklo plovimo būdo parinkimas	66
3.35 pav.	Veiksniai nuosėdų šalinimui iš vandentiekio tinklo.....	67

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė.	Plaunamų vamzdžių atkarpos	24
1.2 lentelė.	Koeficientų reikšmės	33
3.1 lentelė.	Granulimetrinė sudėtis.....	54

3.2 lentelė. Ketinių vamzdžių ilgiai.....	55
--	-----------

IVADAS

Vilniaus mieste metalinių vamzdžių naudojimo pradžia sietina su dujų fabriko Vilniuje statyba, kai 1863 metais pirklys iš Peterburgo A.Lalansas iš miesto dūmos gavo monopoliją organizuoti Vilniaus miesto gatves apšviesti dujų žibintais. Fabrikas pradėjo veikti 1864 m., metaliniai vamzdžiai buvo naudojami ne tik dujoms, tačiau ir vandentiekui, taigi šią datą galima laikyti ir metalinių vamzdžių naudojimo pradžia.

Daugelį metų vandens tiekimo įmonės vertino vandens, išvalyto vandens gerinimo įrenginių, bet vartotojų dar nepasiekusio vandens kokybę. Šiomis dienomis vis labiau atkreipiamas dėmesys ir į vandens, tekančio jau iš vartotojų čiaupų, kokybę. Tam tikri rodikliai, pavyzdžiui, geriamojo vandens spalva, skonis ir kvapas, vandens vartotojų atžvilgiu yra svarbiausi. Dažniausias skundas, kurį gauna vandenį tiekiančios įmonės, yra vandens spalvos pasikeitimas, kuris nepriimtinas vartotojui. Su šia problema susiduria visos pasaulio vandens tiekimo įmonės. Spalvos pasikeitimas neigiamo poveikio sveikatai neturi, tačiau jis gali turėti neigiamą įtaką santechnikos įrenginiams. Spręsdamos šią problemą vandens tiekimo įmonės įprastai naudoja hidrantą, išleidamos vandenį iš tinklo (Dan Ellison, 2003).

Dėl sparčios miestų plėtros nuolat didėja reikiamo tiekti vartotojams vandens kiekis, bet dėl ribotų žmoniškųjų ir finansinių išteklių, vandens tiekimo įmonės nepajėgia užtikrinti pakankamo tinklų atnaujinimo darbų masto. Lietuvoje tiekiamo vandens kokybė atitinka higienos normas, tačiau didžiuosiuose miestuose vandens kelias nuo vandenvietės iki vartotojo dažniausiai siekia ne vieną dešimtį kilometrų.

Geriamasis vanduo, tiekiamas į miesto vandentiekio tinklą nėra tokios geros kokybės, kaip tas, kuris ką tik buvo paruoštas vandens gerinimo įrenginių. Vandeniui tenka įveikti daug kilometrų vamzdžio kol jis pasiekia vartotoją ir per tą laiką jis gali stipriai pakeisti savo savybes. Vandenyje gali atsirasti daug įvairiausių bakterijų, tačiau dauguma iš jų nepavojingos žmogui. Didelis mikroorganizmų augimas gali sukelti tam tikrų problemų, pvz., vandens spalvos, kvapo, skonio pasikeitimai (El-Chakhtoura et al., 2018).

Lietuvoje vandens saugos ir kokybės reikalavimus nustato Lietuvos higienos norma HN 24:2017.

Tikslas

Tikslas – atlikti vandentiekio tinkle susidarančių nuosėdų tankio, tūrio, kiekio, granulimetrinės sudėties nustatymus, įvertinus gautus tyrimų duomenis ir modeliavimo rezultatus pateikti rekomendacijas optimaliems tinklo plovimo rezultatams užtikrinti.

Tyrimo uždaviniai

- Išanalizuoti įvairius tinklo plovimo būdus pagal jų efektyvumą ir praktinį panaudojimą.
- Nustatyti nuosėdų išplovimo iš vandentiekio tinklo kritinius greičius.
- Nustatyti nuosėdų kiekius vamzdyne.
- Palyginti faktinius matavimus su hidrauliškai sumodeliuotais.
- Pateikti rekomendacijas, kurios leistų efektyviau atlikti tinklo plovimo darbus.

Tyrimo naujumas

Darbe atliekama išplaunamų nuosėdų iš vandentiekio tinklo analizė. Vilniaus miesto vandentiekio tinklo hidraulinio modelio panaudojimas tinklo plovimo uždaviniams spręsti.

Darbo aktualumas

Vilniaus mieste per parą patiekama apie 89 tūkst. kub. metrų vandens, mieste paklotų vandentiekio vamzdžių ilgis apie 1719 km. Tinkama tinklų eksploatacija svarbi, siekiant tiekti aukščiausios kokybės vandenį. Vamzdžių būklė susijusi su vandens kokybe. Vienas iš būdų išsaugoti paruošto ir tiekiamo vartotojams vandens kokybę – tinklų plovimas. Tinkamas tinklo

plovimas ne tik užtikrina vandens kokybės rodiklius, bet ir ilgina tinklo eksploatacijos laikotarpį.

Darbo tyrimų metodai

Nuosėdų granuliometrinės sudėties nustatymas skirtas apibūdinti tinkle esančių dalelių dydį ir kiekį. Dalelių tankis nustatomas piknometrinio būdu. Modeliavimo uždaviniams spręsti naudojama „WaterGEMS“ programa.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Nuosėdų susidarymo tinkle priežastys

1.1.1. Ištirpusio deguonies koncentracija

Iš seniau atliktų tyrimų žinoma, kad korozijos greitis didėja padidinus ištirpusio deguonies koncentraciją. Mokslininkai atliko tyrimus ištirpusio deguonies poveikiui seniems stipriai korozijos paveiktiems vamzdžiams. Nustatė, kad tekančiame vandenyje išsiskyrė mažiau geležies, nei stovinčiame vandenyje. Taip pat, tyrimai patvirtino, kad padidinus ištirpusio vandens koncentraciją ir palaikant pastovias tekėjimo sąlygas, galima sumažinti geležies išsiskyrimą iš vamzdžių (Sarin et al., 2004).

Deguonies tirpumas mažėja esant aukštesnei temperatūrai. Kai slėgis lygus atmosferos slėgiui, deguonies tirpumas esant 25 °C yra 8,26 mg/l, o kai temperatūra siekia 5 °C tirpumas padidėja iki 12,77 mg/l. Toks deguonies tirpumas, esant skirtingoms temperatūroms daro poveikį korozijai. Esant didesnei temperatūrai ištirpusio deguonies vandenyje yra mažiau, todėl sulėtėja korozija. Taip pat, svarbu paminėti, kad deguonis svarbus oksiduojant geležį ir geležies junginius (McNeill & Edwards, 2002).

1.1.2. pH ir šarmingumas

Siekiant nustatyti mangano koncentracijos tirpale kitimą, atlikti eksperimentiniai tyrimai. Bandymas buvo atliekamas trijose skirtingose pH terpėse pH 6, 7, ir 8. Pradinė mangano koncentracija tirpaluose buvo 18, 20 ir 15 µg/l. Eksperimento metu nustatyta, kad trumpiau nei per 2 h mangano koncentracija viršijo 100 µg/l, kai tirpalo pH buvo 6 ir 7. Maždaug per 4 h koncentracija pasiekė 100 µg/l, kur tirpalo pH buvo 8. Mangano išsiskyrimo pusiausvyrą nusistovėjo po 96 valandų, kai Mn koncentracija tirpaluose pasiekė 671, 530 ir 336 µg/l. Tai parodo, kad mangano išsiskyrimas vyksta didesniu greičiu ir pasižymi didesniu tirpumu, kai tirpalo pH mažesnis (Zhang et al., 2021).

1.1.3. Temperatūros įtaka

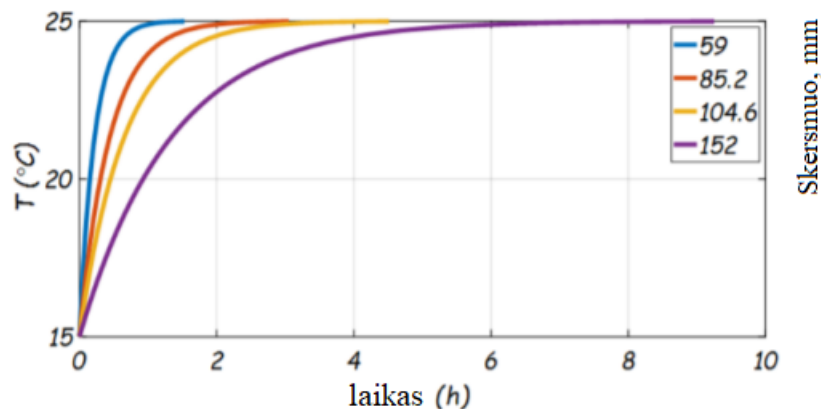
Temperatūra vamzdžiuose gali pagreitinti bioplėvelės augimą. Daugumoje sistemų vandens temperatūros reguliuoti, praktiškai, neįmanoma. Vertinant kitus kontroliuojamus parametrus vamzdžiuose, pavyzdžiui, nusprendžiant kada plauti vamzdyną ar užtikrinti chloro likučio kiekį vandenyje, reikėtų atkreipti dėmesį ir į temperatūros poveikį. Dauguma komunalinių paslaugų teikėjų, tinklus plauna pavasarį, kol temperatūra vamzdynuose nepadidėjo ir nepragreitėjo bioplėvelės augimas, plovimo metu pašalinant nuosėdas ir maistines medžiagas būtinas bioplėvelės augimui (Dan Ellison, 2003).

Temperatūros pokytis vandens tiekimo sistemoje gali paveikti fizikines vandens savybes. Medžiagų tirpumas vandenyje gali pagreitinti korozijos procesą. Mokslininkų atliktais tyrimais nustatyta, jog vamzdis, esant 25 °C temperatūrai, turės daugiau problemų dėl korozijos, nei esant 5 °C temperatūrai. Taip pat svarbu paminėti, kad vamzdis bus skirtingai paveiktas korozijos per tą patį laiką, jeigu vamzdis bus veikiamas kintančios ir tos pačios temperatūros (McNeill & Edwards, 2002).

Vandentiekio vamzdžiai užkasami žemėje ir juos veikia pastovi aplinkos temperatūra, tačiau tekančio vandens temperatūra vamzdžiais gali kisti, priklausomai nuo sezono. Atlikti tyrimai parodė, jog mažiau vartotojų skundų dėl pasikeitusio tiekiamo vandens spalvos sulaukiama žiemą (McNeill & Edwards, 2002).

Vandens temperatūra kinta nuo išgavimo šaltinio iki vartotojo čiaupo. Vandentiekio tinklai įrengiami žemiau grunto įšalo gylio. Centrinėje Europoje tinklai klojami dažniausiai nuo 0,8–1,5 metro, Suomijoje tinklai įrengiami ne mažiau nei 2,5 m. Šalyse, kuriose nėra pavojaus dėl vamzdžių užšalimo klojami apie 1 metro gylyje apsaugant juos nuo išorinių transporto apkrovų, po šaligatviais reikalaujama kloti ne mažiau nei 0,6 nuo žemės paviršiaus. Tokios sąlygos (pvz., temperatūra, saulės spinduliai, žemės danga, dirvožemio tipas) lemia vandens

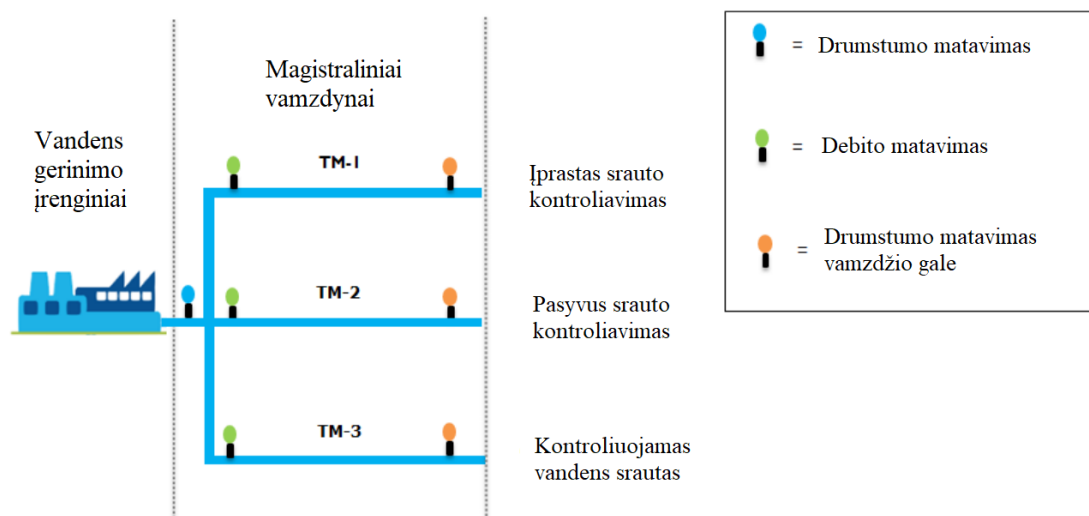
temperatūros didėjimą vamzdyne. Atsižvelgiant į vamzdžio skersmenį, sienelės storį ir vandens srautą, per keletą valandų vandens temperatūra gali pasiekti jį supančio grunto temperatūrą. Mokslininkai Blokker, E.J.M. ir Pieterse-Quirijns nustatė priklausomybių grafiką (1.1 pav.).



1.1 pav. Vandens temperatūros kitimas vamzdžiuose

Ištirta, kad polietileno ir asbestcemento vamzdžiai sunkiau praleidžia šilumą ir vandens išilimo laikas yra ilgesnis lyginant su ketaus vamzdžiais, kai vanduo įkaista nuo 15 iki 25 °C. Atlikti tyrimai parodė, kad skirtingose šalyse vandens temperatūra matuojama nesistemiškai, vienos šalys matuoja atitekėjusio vandens temperatūrą iš gręžinių, taip pat vandens gerinimo įrenginiuose, tačiau retai temperatūra stebima vartotojų čiaupuose. Mokslininkai gilinasi į ryšį tarp geriamojo vandens temperatūros ir kokybės, tačiau šis ryšys nėra plačiai išnagrinėtas. Pasaulio sveikatos organizacijos gairėse rekomenduojama didžiausia šalto vandens temperatūra iš čiaupo 25 °C. Aukštesnė vandens temperatūra skatina mikroorganizmų augimą, bioplėvelės formavimąsi, bakterijų koli ir legionelės dauginimąsi. Esant aukštesnei vandens temperatūrai gali atsirasti skonio, kvapo, spalvos pakitimai (Agudelo-Vera et al., 2020).

Mokslininkai ištyrė sezoninių temperatūros svyravimų poveikį vandens spalvos pasikeitimo rizikai trijuose labai panašiuose magistraliniuose vamzdynuose. Vanduo į vandentiekio tinklą tiekiamas iš tų pačių vandens gerinimo įrenginių. Matavimai vandentiekio tinkluose buvo vykdomi ilgiau nei metus laiko. Buvo taikomi du darbo metodai. Vienas iš jų dviejuose TM-1 ir TM-2 vamzdžiuose periodiškai valdant hidraulinius įvykius ir išmatuojant atsaką į atliktus veiksmus. Antras metodas tai nuolatinio vandens srauto kontroliavimas TM-3 vamzdyje (1.2 pav.).



1.2 pav. Tyrimų principinė schema (Sunny et al., 2018)

Nustatyta, kad esant aukštesnei temperatūrai ant vamzdinių sienelių nusėda daugiau medžiagų ir jos gali būti transportuojamos, jeigu atsirastų didesnis šlyties įtempis nei įprastai. Gauti rezultatai, kad esant vandens temperatūrai apie 15 °C bendra organinės anglies koncentracija buvo apie 3 mg/l, o kai vandens temperatūra nukrisdavo iki 4 °C bendra organinės anglies koncentracija vandenyje sumažėdavo iki 1 mg/l. Gautas ryšys tarp organinės anglies koncentracijos ir temperatūros, parodė, kad temperatūros poveikis susijęs su mikrobiologiniu organizmų elgesiu. Tyrimais įrodyta, kad temperatūra svarbus elementas reguliuojant vandens drumstumą tinkle ir prognozuojant spalvos pasikeitimo riziką (Sunny et al., 2018).

1.1.4. Bioplėvelės formavimosi ypatumai

Bioplėvelė sudaryta iš mikroorganizmų, kurie susiformuoja sukibdami ir augdami ant vamzdinių sienelių. Bioplėvelė – darinys susijungusių bakterijų viena su kita. Daugumos bioplėvelės sudedamųjų medžiagų yra 10 % sausos masės, o likusi 90 % sudaryta iš tarpląstelinės medžiagos (G. Liu et al., 2017).

Nuosėdų dalelės gali patekti į vandentiekio tinklą, kaip organinės ar neorganinės medžiagos iš vandens gerinimo įrenginių tokios, kaip smėlio dalelės, geležies likučiai. Nuosėdos gali atsirasti dėl vamzdžių ar kitos vandentiekio tinklo armatūros korozijos. Labiausiai paplitęs ir svarbiausias bioplėvelės susidarymo aspektas yra pasisavinamos organinės anglies vandenyje arba iš vamzdžio sienelės. Susidarymo procesas ir augimas prastai ištirtas, nes tai sudėtingas procesas. Daromos prielaidos, kad svarbiausi veiksniai, kontakto laikas, kontaktuojančio paviršiaus būklė (I. J. H. G. Vreeburg & Boxall, 2007).

Norint išanalizuoti dalelių sklaidimą tinkle reikia išsiaiškinti jų elgesį skirtingose hidraulinėse sąlygose. Atlikti tyrimai parodė, kad dalelių dydžio pasiskirstymas nepriklauso nuo tinkle esančių sąlygų. Vyraujančių mažiausių dalelių dydis apie 0,050 mm, vidutinis dydis maždaug 0,010 mm, o didžioji dalis dalelių mažesnė nei 0,005 mm. Analizė įrodė, kad vien tik gravitacinio nusistovėjimo neužtenka tokioms dalelėms kauptis, nes turbulencinės jėgos, kurias sukelia net mažiausi vandens tekėjimo srautai, pakankami gravitacijos nusistovėjimo jėgoms įveikti. Kai vanduo teka nuolatiniu ir nusistovėjusiu srautu vamzdyje, dalelės prisitvirtinusios prie vamzdžio sienelių lieka savo vietose. Tačiau, jeigu vandens srautai, o tuo pačiu ir greitis padidėja, dalelės gali būti mobilizuojamos, taip sukeldamos nepageidaujama vandens spalvą (I. J. H. G. Vreeburg & Boxall, 2007).

Bioplėvelės atsiradimą lemia bakterijos, kurios gali augti vandentiekio tinkluose. Požeminis vanduo, kuriame yra ištirpusios geležies ir sieros, geras maisto šaltinis. Šis maisto šaltinis tinkamas maitintis dviejų bakterijų rūšims, kurios paveikia vandens spalvą ir kvapą. Bakterijos gali gerai prisitvirtinti prie vidinių vamzdžių sienelių, o jų medžiagų apykaitos produktai padidina atsparumą ir apsaugo bakterijas nuo dezinfekavimo priemonių. Bakterijų biologinis aktyvumas gali padidinti korozijos reiškinį. Dezinfekavimo priemonės, tokios kaip chloras, jų nenaikina. Bakterijos prisitaikiusios prie mažo maistinių medžiagų kiekio, todėl jos atsparesnės dezinfekavimo priemonėms. Bioplėvelės augimą skatina: temperatūra, nuosėdos tinkle, tinklo medžiaga, vandens amžius, mažas dezinfekuojančių medžiagų kiekis, nepakankamas tinklo plovimas, organinių medžiagų kiekis. Šalinant bioplėvelę vien tik dezinfekavimo priemonių negana, reikalingi kompleksiški sprendimo būdai. Reikalinga tinklo stebėseną, priežiūrą, tinklo plovimą (O'Connor, 2002).

Atlikti mokslininkų tyrimai nagrinėjant ketinių ir polietileno vamzdžių plovimą, rodo, kad ant ketinių vamzdžių sienelių susidaro didesnis sluoksnis nuosėdų ir tas sluoksnis jautresnis vandens srauto pokyčiams vamzdyje. Ketiniuose vamzdžiuose tai siejama su korozijos reiškiniu. Taip pat, nustatyta, kad mikrobu bendrijų augimą skatina ketaus vamzdžiai, o augimas yra 10–45 kartų didesnis lyginant su mikrobu augimu polietileno vamzdyje. Didesnė bakterijų įvairovė, nustatyta nuosėdose paimtose iš polietileningų vamzdžių, o didesnis kiekis gautas iš ketinių tinklų (Douterelo et al., 2014).

Viena iš priežasčių, kodėl vandens kokybė tiekimo sistemoje blogėja yra bakterijų augimas ant vamzdžių sienelių. Nustatyta, jog kiekviena vandens tiekimo sistema linkusi į

bioplėvelės susidarymą. Bakterijų augimas ir vandens kokybės pokyčiai priklauso nuo vamzdžio vidinės sienelės paviršiaus reakcijų, korozijos, dezinfekavimo priemonių rūšies. Tarpusavyje vykstančios sąveikos sudėtingos, tai lemia, jog bioplėvelės augimą sunku prognozuoti ir tam turintys poveikio veiksniai gali būti specifiniai. Didesnė tikimybė susidaryti bioplėvelei tose vamzdžių atkarpose, kuriose vandens amžius didesnis negu įprastai ir mažas dezinfekuojančių medžiagų kiekis. Perteklinis bioplėvelės augimas gali sumažinti vamzdyno pralaidumą, padidinti nuostolius vamzdžiuose (Council, 2007b).

Žinoma, kad bioplėvelė sudaryta iš kelių sluoksnių: pagrindinio, minkšto viršutinio ir apatinio subrendusio sluoksnio. Tinklo plovimo metu bioplėvelės viršutinis sluoksnis lengvai atsiskiria nuo vamzdžio sienelės, o apatinis ir pagrindinis pasižymi atsparumu tinklui plauti. Plovimu metu, praktiškai, neįmanoma atskirti visos bioplėvelės sluoksnio nuo vamzdžių (J. qing Liu et al., 2017).

Mokslininkai nustatė, kad vamzdžio medžiaga ir vandens srauto hidrodinamika daro poveikį bioplėvelės vystymuisi. Rezultatai parodė, jog bioplėvelės kiekis buvo didesnis kur vandens srautas nedidelis ir šlyties jėgos mažos. Tyrimais nustatyta, jog paviršiaus savybės, ypač polietileninių vamzdžių šiurkštumas turi didelį poveikį mikrobų prikibimui prie sienelių ir vystymuisi. Taip pat nustatyta, kad medžiagos paviršiaus šiurkštumo poveikis yra didesnis nei hidrodinamikos poveikis esant šlyties įtempiams nuo 0,13 iki 0,24 N/m² (Cowle et al., 2019).

1.2. Vamzdžių korozija

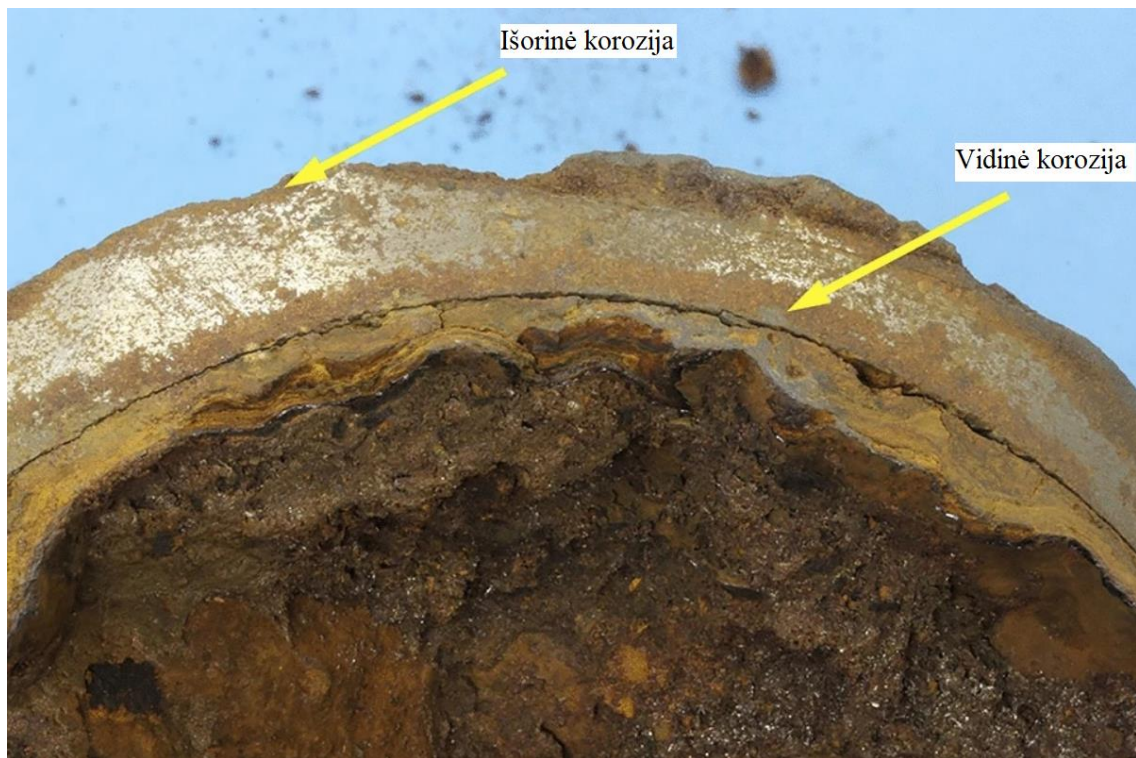
Vamzdžių korozija sudėtingas procesas, šiam procesui poveikį turi daug veiksnių, tokių kaip: tekanti vandens kokybė, tekėjimo sąlygos, pH, ištirpęs deguonis (McNeill & Edwards, 2002).

Ištirta sąveika tarp korozijos paveiktų vamzdžių ir vandens kokybės. Tirti senesni nei 20 metų kaulaus ketaus vamzdžiai ir cinkuoti ketaus vamzdžiai, tikslas – nustatyti korozijos poveikį ir kaip tai paveikia tiekiamo vandens kokybę. Mokslininkai nustatė, kad vamzdžių medžiaga daro didelę įtaką fiziniams ir cheminėms korozijos savybėms, taip pat ir vandens kokybės pokyčiams. Išanalizuota, kad korozijos produktai yra netaisyklingos formos. Cinkuoti vamzdžiai, turi didesnę patikimumą tiekiamos vandens kokybės atžvilgiu, tačiau reikia įvertinti, jog vandenyje gali padidėti cinko koncentracija. Didžiausias geležies dalelių išsiskyrimas nustatytas, kai vandenyje padidėjęs ištirpusio deguonies kiekis ir sumažėjęs pH (Li et al., 2016).

Teigiama, kad susikaupusios cheminės medžiagos ant vidinės vamzdžio sienelės 56,8 % sudarė geležis. Atlikti tyrimų rezultatai rodo, kad vamzdžiuose susikaupusi geležis atsirado dėl korozijos procesų, o ne dėl dalelių patekusių į vandens tiekimo sistemą. Manoma, kad tyrimų metu nustatytos mažos Zn vertės dėl galvanizuotų vamzdžių. Korozijos susidarymo eiliškumas yra toks, jog Fe yra oksiduojamas vandenyje ištirpusio deguonies iki Fe²⁺, tada jis toliau oksiduojamas iki Fe³⁺ suformuodamas kietą Fe(OH)₃, kuris gali prikibti ir kauptis prie vidinės vamzdžio sienelės. Fe(OH)₃ laikui bėgant keičiasi į kita geležies oksidą FeOOH (Lin et al., 2001).

Koroziją pagreitinantys veiksniai: žemas arba aukštas pH, padidėjusi vandens temperatūra, ištirpusios kietosios medžiagos, chlorido ir sulfato masės santykis. Be estetinių problemų, dėl korozijos proceso geriamajame vandenyje taip pat gali būti metalų, tokių kaip aliuminio, chromo, vario, švino, cinko. Korozijos procesas gali padidinti šių metalų koncentraciją vandenyje (Oram, 2014).

Galima įsivaizduoti, jog 1 metro vamzdyno atkarpa 100 mm skersmens, gali turėti 1–2 kg korozijos produktų (1.3 pav.). Šie rodikliai gauti iš labai korozijos paveiktų vamzdžių (Nawrocki et al., 2010).



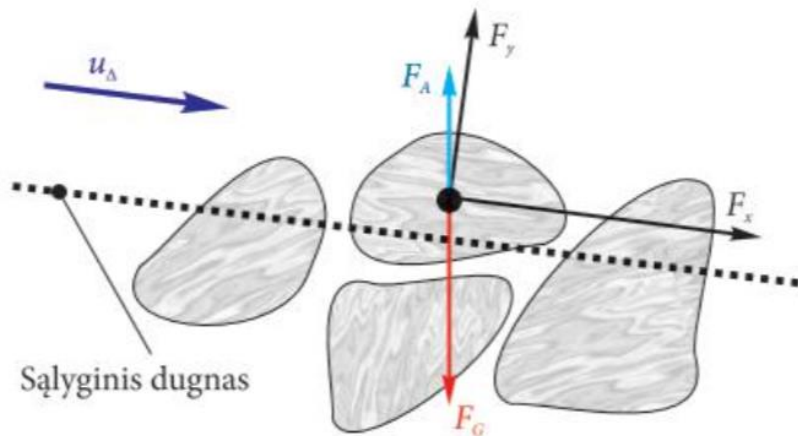
1.3 pav. Vamzdžių korozija (Jur et al., 2021)

Kanadoje, Ontarijuje dauguma vandentiekio tinklų pagaminti iš: kaliojo ketaus, ketaus, plieno. Dažniausiai vandentiekio tinkluose susiduriama su tinklų korozijos problema. Korozija sukelia ne tik vamzdžių sienelių plonėjimą ir silpnėjimą, bet sumažina ir vandens slėgį vamzdyne, o tai padidina vandens išbuvimo laiką tinkle, kas sukelia dar didesnę koroziją. Šalutiniai korozijos produktai pakeičia vandens spalvą. Senuose tinkluose dėl korozijos reiškinių didėja avarių skaičius, susidaro didesni vandens nuostoliai, tačiau korozija nedaro poveikio geriamojo vandens saugumui (O'Connor, 2002).

1.3. Nuosėdų hidrauliniai parametrai

Literatūroje nešmenų hidraulinis stambumas apibūdinamas, kaip dalelių tolygusis sėdimo greitis ramioje terpėje. Kiekvieną nuosėdos dalelę patekusią į vandenį veikia Archimedo jėga. Dažniausiai dalelės tankis būna didesnis nei vandens ir hidrostatinė keliamoji jėga veikianti dalelę mažesnė už sunkio jėgą, todėl dalelė skęsta. Dalelės skendimo greitis nusistovi, kai sunkio ir dalelės pasipriešinimo jėgos išsilygina. Hidraulinis dalelių stambumas priklauso nuo jų formos. Išskiriami dviejų tipų dalelių sėdimo greičiai: laminarinis ir turbulentinis (Šaulys, 2016).

Vandens srautui veikiant nešmenų daleles veikiančios jėgos apibūdinamos (1.4 pav.).



1.4 pav. Jėgos veikiančios nešmenų dalelę (Šaulys, 2016)

Dalelės stūmimo/vilkimo jėga veikianči nešmenį žymima F_x , dinaminė keliamoji jėga dėl slėgio skirtumų į apatinę ir viršutinę dalelės dalį žymima F_y , sunkio jėga paveiksle pažymėta F_G , Archimedo keliamoji jėga F_A .

Įvertinus jėgas ir aprašius jas veikiančių jėgų momentų pusiausvyros lygtimis, gaunamas vidutinis kritinis srauto greitis:

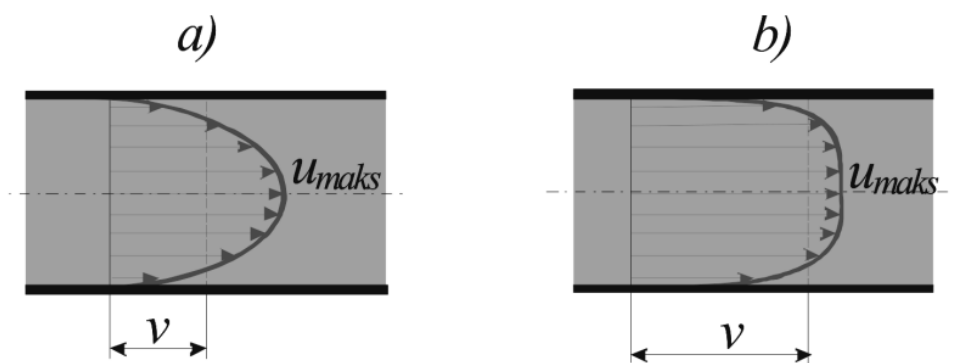
$$v_k = \lg \frac{6,15h}{\Delta} \sqrt{\frac{2g(\rho_n - \rho)d}{\alpha\rho}} \quad (1.1)$$

Čia v_k – vidutinis kritinis srauto greitis, m/s; h – srauto gylis, m; Δ – absoliutusias nešmenų šiukštumas; ρ_n – sėdančios dalelės tankis, kg/m³; ρ – skysčio (vandens) tankis, kg/m³; g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s²; d – nešmenų dalelės stambumas, m; α – koeficientas, nustatomas natūriniais ir laboratoriniais tyrimais.

Tačiau pažymima, kad praktinės reikmės naudojamos tik dvi kritinio greičio ribos, tai kritinis stabilumo greitis, kuriam esant dalelė stabili ir ardymo greičio dar nepasiekė ir kritinis ardymo greitis, kuriam esant dalelė atplėšiama nuo dugno (Šaulys, 2016).

Nustatyta, kad esant mažiems skysčio tekėjimo greičiams, kol jie neviršija tam tikros reikšmės, skysčio dalelės juda tarpusavyje nesimaišydamos, lygiagrečiomis trajektorijomis. Toks tekėjimo režimas vadinamas laminariniu. Jeigu tėkmės greičiai padidėja ir skysčio dalelės pradeda tarpusavyje maišytis, tėkmėje atsiranda sūkurių užuomazgos, o skysčio dalelių trajektorijos tampa nelygiagrečios. Toks tekėjimas vadinamas pereinamuoju arba neapibrėžtuoju. Esant dideliems tėkmės greičiams, skysčio dalelės dėl atsiradusių sūkurių pradeda intensyviai tarpusavyje maišytis. Toks tekėjimo režimas vadinamas turbulentiniu (Šikšnys, 2008).

Kriterijus, kuris leidžia teoriškai nustatyti skysčio tekėjimo režimą, yra vadinamas Reinoldso skaičiumi. Reinoldso skaičius neturi dimensijos. Remiantis daugelio mokslininkų tyrimais priimta, kad $Re < 2320$ – tekėjimo režimas laminarinis. Pereinamasis arba neapibrėžtasis tekėjimo režimas, kai $2320 < Re < 4000$. Turbulentinis tekėjimo režimas, kai $Re > 4000$. Apvalaus skerspjuvio vamzdyje laminarinės tėkmės greičiai pasiskirsto ypač netolygiai (1.5 pav.).



1.5 pav. Greičiai (a) laminarinėje ir (b) turbulentinėje tėkmėje (Šikšnys, 2008)

Kai tėkmė laminarinė prie vamzdžio sienelių greičiai artimi nuliui, o vamzdžio ašyje didžiausi. Turbulentiniam režimui tėkmės greičiai skerspjūvyje pasiskirstę tolygiau, o greičių epiūros forma artimesnė stačiakampiui. Dažniausiai praktikoje aptinkamas turbulentinis tekėjimo režimas, pavyzdžiui: tekėjimas vamzdžiuose, kanaluose, upėse. Laminarinio tekėjimo pavyzdys – vandens tekėjimas grunto poromis. (Šikšnys, 2008)

Remiantis Lietuvos higienos norma HN 24:2017 „Geriamojo vandens saugos ir kokybės reikalavimai“ vandens drumstumas turi būti priimtas vartotojams ir be nebūdingų pokyčių. Vertinant matavimo vienetais ne daugiau nei 4 nefelometriniai drumstumo vienetai (NTU). Drumstumas apskaičiuojamas pagal LST EN ISO 7027-1 standartą.

Drumstumo nustatymo kiekybiniai metodai, remiantis LST EN ISO 7027-1 standartu apibrėžiami, kaip: vandenyje ištirpusios medžiagos silpnina pro mėginį besiskverbiančią spinduliuotę, taip pat netirpios dalelės nevienodai išskaido spinduliuotę visomis kryptimis. Difuzinės spinduliuotės intensyvumas tiesiogiai proporcingas nuo krintančios spinduliuotės bangos ilgio, matavimo kampo, vandenyje skendinčių dalelių formos, dydžio. Bendras spektrinio slopinimo koeficientas yra spektrinio difuzijos koeficiento ir spektrinės absorbcijos koeficiento suma:

$$\mu(\lambda) = s(\lambda) + \alpha(\lambda) \quad (1.2)$$

Čia: $\mu(\lambda)$ – spektrinio slopinimo koeficientas;

$s(\lambda)$ – spektrinis difuzijos koeficientas;

$\alpha(\lambda)$ – spektrinės absorbcijos koeficientas.

Spektrinės absorbcijos koeficientas gali būti gaunamas pašalinant neištirpusias medžiagas filtruojant. Pažymima, kad suspenduotų dalelių masės negalima apskaičiuoti pagal drumstumo vertę (LST EN ISO, 2016).

Didelis drumstumas vandenyje atrodo neestetiškai. Drumstumas gali būti maisto šaltinis ir „prieiglobstis“ patogenams. Drumstumas viena iš priežasčių, kuri gali sukelti vandenyje plintančių ligų protrūkių, kurie sukelia žarnyno ligas, daugiausiai tokių pavyzdžių užfiksuota JAV. Žinoma, kad drumstumas nesukelia didelės rizikos sveikatai, tačiau atlikti tyrimai rodo ryšį tarp drumstumo iš pirmuonių pašalinimo. Skendinčios dalelės vandenyje sumažina dezinfekuojančių medžiagų poveikį. Tačiau vandens gerinimo įrenginiai gali lengvai pašalinti drumstumą (Swanson & Baldwin, 1965).

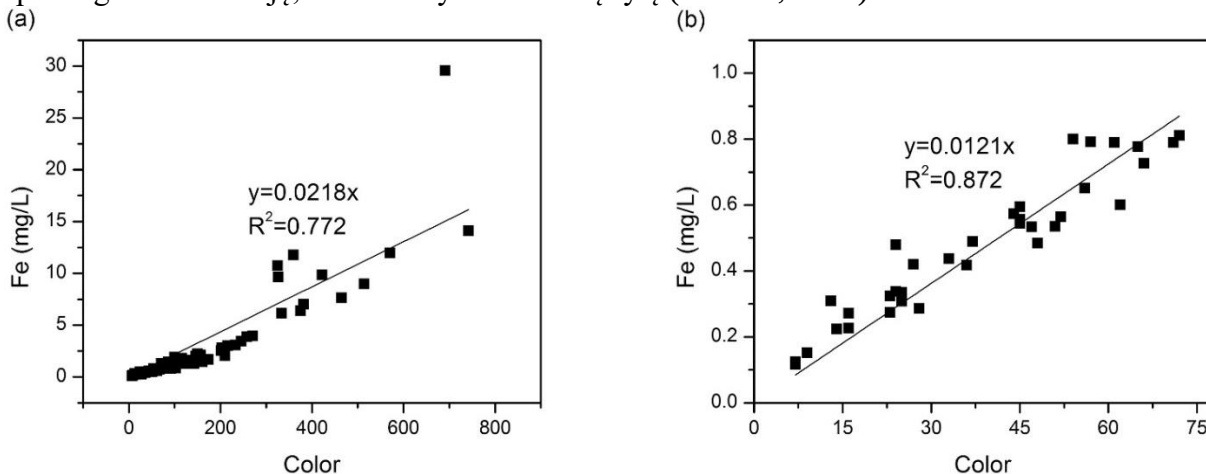
Vandenyje esančios dalelės, kai vanduo teka mažu greičiu gali nusėsti ant vamzdžių sienelių. Nuosėdos gali būti maisto šaltinis bakterijoms ir aplinka prisitvirtinti. Ilgainiui gali pablogėti vandens savybės, skonis, kvapas, spalva. Vandens pakitimai dažniausiai pastebimi, po vandentiekio sistemos išleidimo ir užpildymo arba pasikeitus tekės kryptims (Council, 2007a).

Nustatytos dvi pagrindinės „raudono“ vandens rūšys. Pirma, kai deguonis oksiduoja geležį nuo metalinių, dažniausiai ketinių ar plieninių vamzdžių paviršiaus. Antra, kai geležis, kuri yra ištirpusi vandenyje, dėl slėgio ir cheminių medžiagų pagalbos, daugiausiai chloro, iškrenta į nuosėdas. Problemos sprendimas yra naudoti polietileno vamzdžius, bet, jeigu vandens drumstumas atsirastų tik nuo metalinių vamzdžių sienelių oksidacijos. Tačiau, jeigu geležis iškrenta iš vandens, toks sprendimo būdas nepadės (Chan Ahn et al., 2011).

Nuosėdos geriamojo vandens sistemoje atsiranda iš kelių šaltinių. Atlikti tyrimai parodė, jog tai didžioji nuosėdų sudarytos iš geležies oksidų. Nuosėdos sistemoje patenka arba susidaro dėl vamzdinių korozijos. Sistemoje esančios nusėdusios dalelės paskatina bioplėvelės augimą, koroziją, drumstumą. Tinklo plovimas šalinant nuosėdas iš tinklo reikalingas norint užtikrinti tinkamos kokybės vandenį vartotojams (Dan Ellison, 2003).

Geriamojo vandens spalvos pasikeitimas vienas iš dažniausių vartotojų skundų dėl geriamojo vandens kokybės. Spalvos pasikeitimą sukelia hidraulinis nuosėdų dalelių atsiskyrimas nuo vidinio vamzdžio paviršiaus. „Juodas vanduo“ viena iš spalvos pakitimo rūšių, siejamas su mangano buvimu vandenyje. Užsienio šalyse atlikti tyrimai rodo, jog manganas yra viena daugiausiai nuosėdų sudaranti medžiaga geriamojo vandens tinkle. Siekdamas sumažinti „juodo vandens“ atsiradimą tiekiamame vandenyje vartotojams, keletas šalių ir organizacijų priėmė mangano kiekius tiekiamame vandenyje, Pasaulio sveikatos organizacija, Japonija ir Jungtinių Amerikos Valstijų aplinkos apsaugos agentūros priėmė 50 µg/l, o Kanada priėmė 20 µg/l. Tačiau mangano nusėdimas tinkle buvo aptiktas, kai koncentracija mažesnė net už 10 µg/l (Zhou et al., 2020).

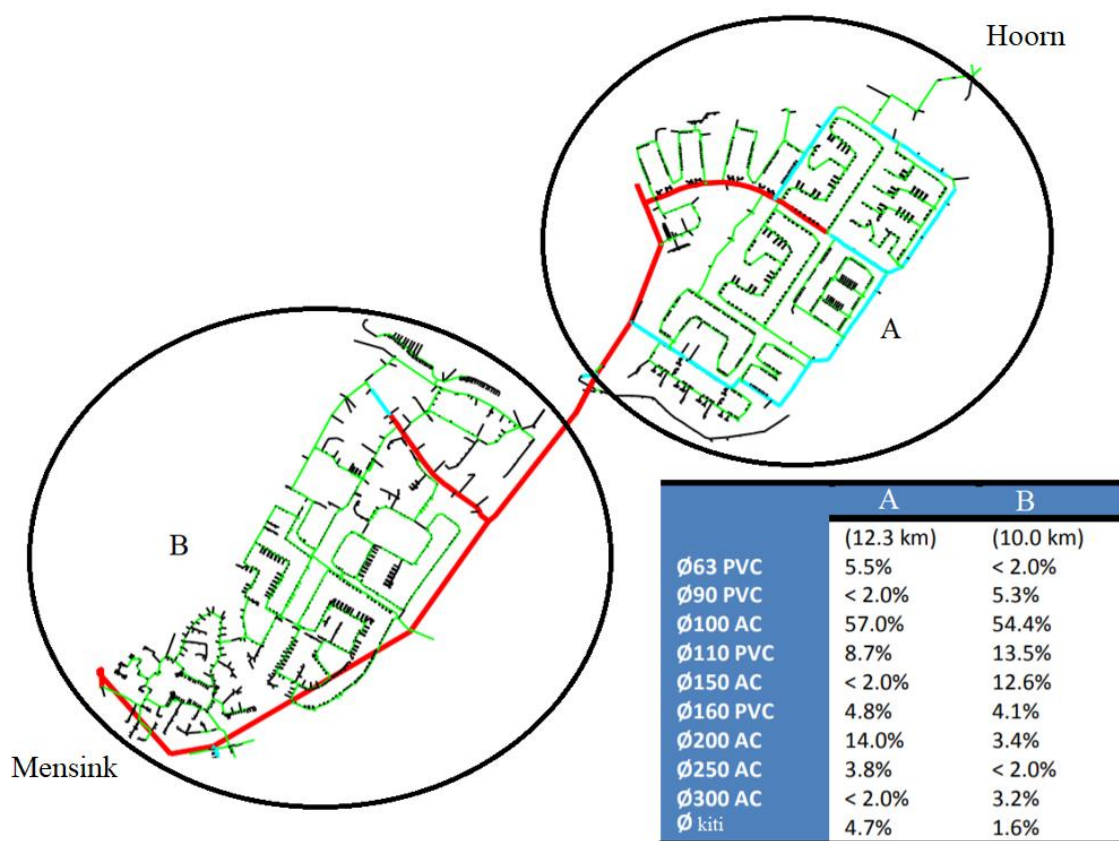
Geležies išsiskyrimo ir vandens spalvos koreliacija (1.6 pav.). Geležies kiekis ir vandens spalva glaudžiai susiję, šis reiškinys turi tiesinį ryšį (Li et al., 2016).



1.6 pav. Geležies ir spalvos koreliacija (Li et al., 2016)

Mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad nuosėdų sudėtis vamzdžiuose neorganinė, 20–40 % sudaro minkštos prikibusios dalelės ir 60–80 % neorganinės prikibusios kietos dalelės. Atliekant pakartotinius tinklo plovimus dalelių pasiskirstymas išliko toks pats. Organinių medžiagų dalis tinklo nuosėdose skirtinguose miestuose tokiuose kaip: Monrealyje, Kvebeke, Kanadoje svyravo 43–65 %, Prancūzijoje organinių medžiagų dalis užfiksuota 76 %. Vyraujantys metalai nuosėdose buvo geležis ir aliuminis, nedidelis kiekis mangano ir vario. Manoma, kad dalis geležies nuosėdose susidaro iš jau paruošto vandens gerinimo įrenginiuose, tačiau didžioji geležies dalis priskiriama korozijos rezultatui (Mussared et al., 2019).

Olandijoje Purmerend mieste buvo tiriamos dvi vandentiekio zonos, siekiant išsiaiškinti vandens spalvos pasikeitimų priežastis (1.7 pav.). Abi zonos tirtos 6 metus, jos aptarnauja apie 2000 namų, vamzdžių ilgis apie 10 km, vandens išbuvimo trukmė A ir B zonose panaši apie 6 valandos (Blokke & Schaap, 2015).



1.7 pav. Tiriamo miesto vandentiekio schema (Blokker & Schaap, 2015)

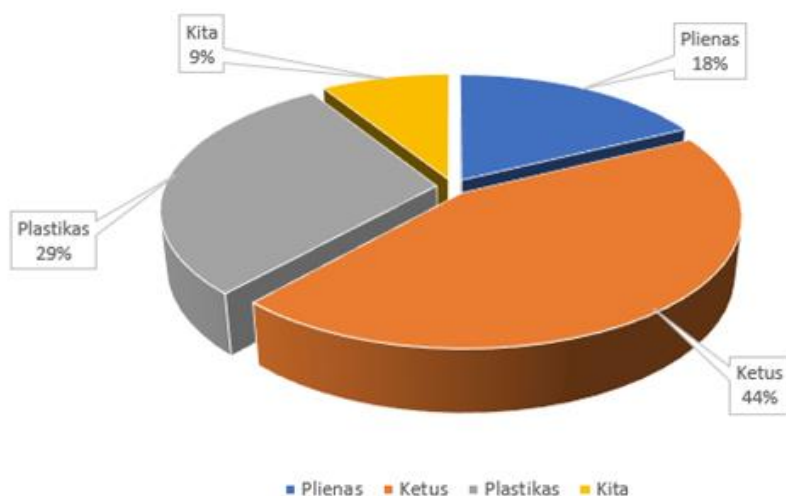
Zonomis vandenį gali tiekti dvi siurblynės, viena jų yra šiaurėje pavadinimu Hoorn, kita pietuose Mensink. Mensink stotis tiekia truputį mažiau drumstą vandenį lyginant su Hoorn. Esant skirtingam vandens poreikiui, vandens srautai persiskirsto, iš Hoorn siurblynės vanduo patenka į B zoną, toks vandens persiskirstymas pastebėtas kiekvieną dieną. A zona 95 % aprūpinama iš Hoorn siurblynės. Vamzdžiuose, kuriais vanduo tiekiamas į zonas buvo matuojamas drumstumas 5 dienas, 5 sekundžių dažniu. Nustatyta, kad į B zoną patenkantis vandens kiekis buvo 25 % mažesnis lyginant su A. Pastovi patenkančio vandens kokybė į A zoną sudaro pastovų nuosėdų kaupimosi greitį, B zonoje nuosėdų kaupimosi greitis kintantis. Tai leido daryti išvadą, kad palyginus panašaus dydžio vandentiekio tinklus, didžiausia įtaką nuosėdų kaupimuisi sudaro patenkančio vandens kokybė į vamzdyną. Taip pat, nuolatiniai drumstumo stebėjimai leidžia nustatyti poreikį tinklui plauti (Blokker & Schaap, 2015).

Mokslininkai ilgą laiką siekė išsiaiškinti nuosėdų susidarymą vandentiekio tinkle, buvo nagrinėjami mažų dalelių matematiniai modeliai, tačiau tai nedavė aiškių rezultatų. Nagrinėjant nuosėdų dalelių kaupimąsi ir spalvos pasikeitimą buvo išsiaiškinta, jog dalelės kaupiasi aplink visą vamzdžio skersmenį. Taip pat, kad mažos dalelės sukimba viena su kita ir susidarant pakankamai dideliems dalelių dariniams, kai jėgos veikiančios žemyn būna didesnės nei veikiančios aukštyn, gali nusėsti ant vamzdžių sienelių. Greitis vandentiekio tinkle, kai dalelės gali sukibti viena su kita ir gali formuotis didesnių nuosėdų dariniai yra mažesnis už 0,06 m/s (Husband & Boxall, 2016).

Taip pat S. Husband ir J. Boxall tyrimais nustatė pagrindinių vandentiekio magistralių vandens srauto pasikeitimus ir drumstumo padidėjimo ryšį, tai yra didėjančio hidraulinio šlyties įtempio ir magistralinių vamzdynų vandens spalvos pasikeitimus. Tyrimais įrodyta, kad nuosėdų dalelės mobilizuojamos nuo vamzdynų sienelių tik tada, kai viršijamas didžiausias debitas tekantis vamzdynu. Tyrimais nustatyta, kad vandens srauto padidėjimas gali būti panaudotas siekiant veiksmingai ir efektyviai sumažinti magistraliniuose tinkluose spalvos pasikeitimo riziką, nereikalaujant papildomų išlaidų. Spalvos pasikeitimo rizika tinkle teoriškai gali būti valdoma, keičiant hidraulines sąlygas vamzdynuose (Husband & Boxall, 2016).

1.4. Vilniaus miesto vandentiekio tinklai

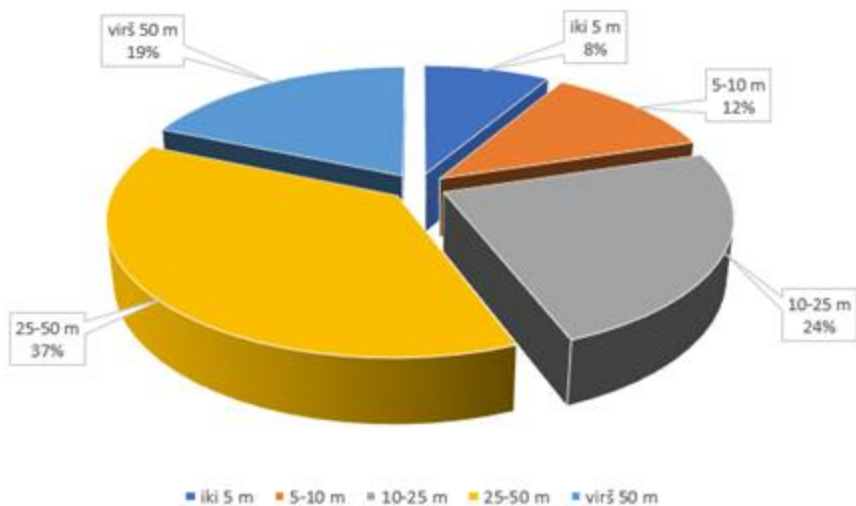
Vilniaus miestui vanduo tiekiamas vamzdynais, kurių bendras ilgis su įvadais į pastatus yra apie 1730 km. Tinklų medžiagiškumą sudaro: plienas – 18 %, ketus – 44 %, polietilenas (polivinilchloridas) – 29 %, kitos medžiagos – 9 % (1.8 pav.).



1.8 pav. Vilniaus vandentiekio tinklų medžiagiškumas

Remiantis duomenimis apie tinklų medžiagiškumą, 62 % viso Vilniaus vandentiekio sudaro metaliniai vamzdžiai, siekiant užtikrinti tinkamą jų eksploataciją, būtini nuolatiniai tinklų priežiūros darbai.

Eksploatuojamų vandentiekio tinklų gyvavimo trukmė nuo statybos metų pateikta intervalais 0–5 m., 5–10 m., 10–25 m., 25–50 m., virš 50 m. % (1.9 pav.).



1.9 pav. Vilniaus vandentiekio tinklų amžius

Vandentiekio tinklų amžius negali tiksliai apibūdinti vamzdžio būklės, tinklų amžius tik viena iš sudedamųjų dalių, kurios gali padėti įvertinti tinklo būklę. Nustatant vamzdžio būklę svarbu atsižvelgti į: medžiagiškumą, slėgio vertę eksploatacijos metu, vamzdį supančio dirvožemio chemines savybes, tekančio vandens vamzdinyje chemines savybes, temperatūros pokyčius veikiančius vamzdį (Brett Walton, 2016).

1.5. Tinklo plovimo būdai

Vandens spalvos pasikeitimus sukelia nuosėdos, tai viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl žmonės skundžiasi tiekiamo vandens kokybe. Galimi trys nuosėdų mažinimo būdai. Pirmas būdas neleisti medžiagoms sudarančioms nuosėdas patekti į vamzdinius. Antras būdas neleisti medžiagoms kauptis vandentiekio sistemoje, suprojektuoti savaime išsiplaukiančius

vamzdynus, kuriuose greičių pokyčiai užtikrina, kad nuosėdos nesikaupytų. Jau įrengtuose tinkluose pirmo ir antro būdo įgyventi praktiškai neįmanoma, todėl naudojamas trečias, dažniausiai vandens tiekimo įmonių naudojamas būdas, tinklų plovimas. Nuosėdų kaupimasis tinkle nėra vienodas, vienos tinklo atkarpose tai vyksta greičiau, kitose lėčiau (Blokker & Schaap, 2015).

Tinklo plovimas gali būti pasyvus ir aktyvus. Pasyvų plovimą galima apibūdinti, kai iš tinklo išleidžiamas kokybės neatitinkantis vanduo. Pasyvaus plovimo metu vamzdynuose vandens greitis ir debitas neviršija paros didžiausių verčių. Aktyvus tinklo plovimas, kai plaunant vamzdyje užtikrinamas reikalingas greitis pašalinti nuosėdas iš tinklo. Atliktų matavimų vandentiekio tinklo plovimo metu nustatyta, kad drumstumas auga eksponentiškai. Toks drumstumo eksponentinis augimas siejamas su kintamo stiprumo nuosėdų sluoksniais ant vidinių vamzdžių sienelių. Plovimo metu geležies koncentracijos kitimas vandenyje tiesiogiai susijęs su drumstumu. Iš tinklo pašalintų nuosėdų vidutinis dalelių dydis 10 μm (Boxall et al., 2003).

Tinklas dažniausiai plaunamas dviem atvejais. Vienas iš jų, kai norima pradėti eksploatuoti naujai pastatytą tinklą. Antras atvejis eksploatuojant tinklą po remonto darbų arba dėl suprastėjusios tiekiamo vandens kokybės tinkle. Nuo nuosėdų kiekio vandentiekio tinkle priklauso tinklo plovimo trukmė. Kai plovimo vandenyje nelieka nuosėdų plovimas laikomas sėkmingai užbaigtu. (Sakalauskas, 2016).

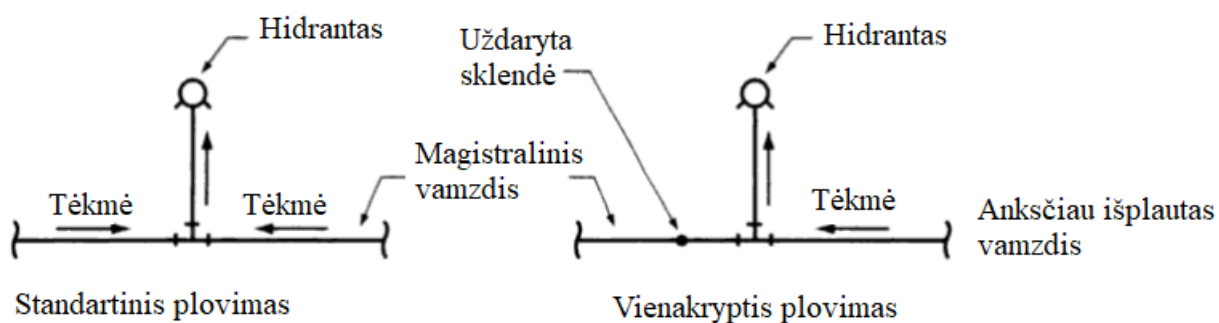
Vamzdžių ilgaamžiškumas priklauso nuo jų priežiūros. Vandentiekio tinklo plovimo būdas pasirenkamas pagal: vamzdžio tipą, turimą įrangą. Dažniausiai tinklui plauti naudojamas vanduo. Tai nebrangus būdas ir jam nereikalinga speciali įranga, todėl plovimas vandeniū nereikalauja didelių išlaidų (Daniel Ogwoka Siringi et al., 2014).

Dažniausiai tinklas plaunamas tik vandeniū. Toks būdas, vamzdynus plaunant vandeniū, gali būti trumpalaikis sprendimas ir nuosėdos gali sukelti vandens spalvos pasikeitimą. Tinklo plovimas lyginant su vamzdyno rekonstrukcija gali kainuoti nuo 10 iki 100 kartų daugiau, nei plovimas (Dan Ellison, 2003).

1.5.1. Mechaninis tinklo plovimas vandeniū įprastas ir vienakryptis

Standartinis tinklo plovimas

Įprastas tinklo praplovimas pavaizduotas (1.10 pav.), kurį naudoja dauguma pasaulio įmonių, teikiančių komunalines paslaugas, tai labiausiai paplitęs ir visiems žinomas tinklo plovimo būdas. Įprasto plovimo vandeniū metu padidinamas vandens srautas vamzdyje, o tai sukelia greičio padidėjimą. Greičio padidėjimas išjudina prie vamzdynų lengvai prikibusias nuosėdas, kurios pašalinamos su plovimo vandeniū. Vandens srauto padidėjimas sukuriamas atidarius hidrantą, plaunamo tinklo atkarpoje. Plovimas vykdomas atsižvelgiant į ištekančio plovimo vandens iš tinklo drusmtumą (J. Vreeburg, 2007).



1.10 pav. Tinklo plovimo schema (Dan Ellison, 2003)

Tinklo plovimo sąlygos aprašytos techniniame statybos reglamente. Tinklo plovimo vandens išleistuvai turi būti tokio skersmens, kad plaunančio vandens tekėjimo greitis būtų

$\geq 1,1$ m/s. Plovimo vandens išleistuvai gali būti sutapdinti su paprastais vandens išleistuvais iš tinklo (*Dėl Statybos Techninio Reglamento STR 2.07.01:2003*).

Paprasčiausias ir dažniausiai naudojamas vandentiekio tinklo plovimo būdas yra plovimas vandeniu, naudojamas vamzdžiams iki DN 150 mm skersmens. Greitis vamzdyne tokio plovimo metu pasiekia 2–3 m/s, suvartojamo tinklui plauti vandens kiekis priklauso nuo tinklo skersmens. Dažniausiai jis didesnis 3–5 kartus už plaunamos atkarpos tūrį (Bolz, 2016).

Tinklo plovimas vandeniu yra seniausias ir gana efektyvumas vamzdžių plovimo būdas atsižvelgiant į kainą. Šis būdas padeda pašalinti dezinfekcijos likučius iš tinklo, nuosėdas. Taip pat tinklo plovimas vandeniu gerai išsprendžia problemas susijusias su skoniu ir kvapu. Vandentiekio tinklo plovimas vandeniu negali pašalinti visų bakterijų iš tinklo ir didelių nuosėdų koncentracijų (Daniel Ogwoka Siringi et al., 2014).

Mokslininkų eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad tinkle esančioms nuosėdoms, kurių skersmuo 0,25–4 mm, pašalinti reikalingas mažiausias plovimo greitis 0,8–0,9 m/s (Van Bel et al., 2019).

Tinklo plovimas gali sukelti bioplėvelės atsaką ir taip pabloginti tiekiamo vandens kokybę. Mokslininkų atlikti tyrimai, kurių metu naudoti kaliojo ketaus, pilkojo ketaus ir nerūdijančio plieno vamzdžiai. Nustatyta, kad vamzdžio medžiaga daro poveikį bioplėvelės atsiskyrimui nuo vamzdžio sienelių plovimo metu. Sunkiausiai bioplėvelė plovimo metu atsiskiria nuo kaliojo ketaus vamzdžių. Atsparumas tinklui plauti priklauso ne tik nuo bakterijų, bet ir nuo vamzdžio medžiagos prie kurios jos prisitvirtinusios (J. qing Liu et al., 2017).

Vienakryptis tinklo plovimas

Vamzdyno plovimas vandeniu skirstomas į du būdus: įprastas plovimas ir vienakryptis plovimas. Įprastas plovimas, kai paprasčiausiai atidaromas vienas ar keli hidrantai ir leidžiama vandeniui ištekti iš tinklo. Vykdam vienakryptį tinklo plovimą reikia uždaryti tam tikras tinklo atkarpas, kad vanduo tekėtų tik vienu pagrindiniu vamzdžiu ir nesišakotų į atšakas. Toks plovimo būdas sukelia didesnius greičius, todėl toks būdas yra efektyvesnis palyginus su paprastu plovimu. Į plaunamą tinklo atkarpą vanduo atiteka jau iš išplauto vamzdžio tai reiškia, kad vandentiekio tinklas plaunamas nuosekliai. Taip pat tokio plovimo metu sunaudojama mažiau vandens, lyginant su įprastu plovimu (Daniel Ogwoka Siringi et al., 2014).

Dažniausiai vienakryptis tinklo plovimas susideda iš trijų etapų. Pirmas etapas, kai uždaromos pasirinktos sklendės tinkle, kad vanduo galėtų tekėti tik į vien pusę. Antras etapas, kai atidaromi hidrantai, plaunamas tinklas, kol drumstumas sumažėja iki <1 NTU (angl. NTU stands for Nephelometric Turbidity unit). Trečias etapas uždaromas hidrantas ir atidaromos uždarytos sklendės, atnaujinamas vandens tiekimas (Carrière et al., 2005).

Mokslininkai atliko tyrimus nustatyti ir padidinti vienakrypčio tinklo plovimo efektyvumą, taip pat pritaikyti miesto vandentiekio tinklų plovimams. Tyrimams pasirinktos keturios vamzdžių atkarpos vandentiekio tinkle (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Plaunamų vamzdžių atkarpos

Vamzdžio Nr.	Vamzdžio medžiaga	Skersmuo, mm	Ilgis, m	Eksplotavimo pradžia
1	Kalusis ketus padengtas epoksidine derva	200	261	1982
2	Kalusis ketus padengtas epoksidine derva	150	393	1982
3	Kalusis ketus padengtas epoksidine derva	150	484	1982
4	Kalusis ketus padengtas cementu	150	218	1991

Efektyviam nuosėdų pašalinimui nuo vamzdžių sienelių, plovimo metu buvo keičiamos vamzdžio plovimo kryptys. Prisukamos ir pilnai atidaromos plovimo sklendės, taip plaunamame vamzdyje sukeliant daugiau vandens maišymosi. Pradinis vandens tekėjimo greitis vamzdyje 0,12 m/s. Plovimo metu pasiekti greičiai vamzdžiuose 1,07–2,78 m/s. Plovimo laikas apskaičiuojamas nuo plovimo pradžios iki kol pasiekama drumstumo riba. Vidutinis vandentiekio tinklų plovimo laikas buvo nuo 55 min iki 86 min. Pirmoje nagrinėjamoje tinklo atkarpoje pakeisti tinklo plovimo krypties pakeisti nepavyko dėl altitudžių skirtumo (Chan Ahn et al., 2011).

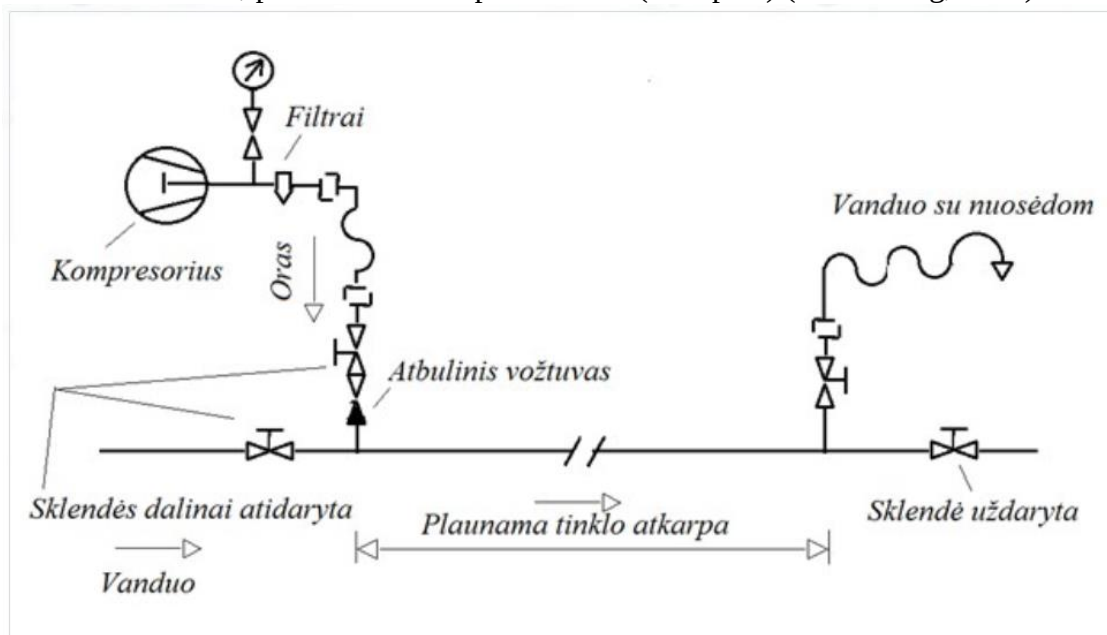
Mokslininkai nustatė, kad tinklo plovimo laikas priklauso nuo greičio plauname vamzdyje ir nuosėdų kiekio jame. Plovimo metu surinktos skendinčios medžiagos iš plovimo vandens nustatyta masė buvo 2,89 kg, 0,57 kg, 2,81 kg ir 0,93 kg. Nuosėdų šalinimą iš tinklo galima tiesiogiai susieti su drumstumu ir skendinčių medžiagų koncentracija vandenyje. Taip pat nustatyti skendinčių dalelių dydžiai. Vandens mėginiuose plauname vamzdyje prieš plovimą dalelių dydis 2–3 μm , o plovimo vandenyje daugiausiai buvo 3–8 μm dydžio nuosėdų, jos sudarė 80 % dalelių. Išanalizuota, jog vienakryptis tinklo plovimas efektyviausiai pašalina lengvai prisitvirtinusiems nuosėdams prie vamzdžių sienelių (Chan Ahn et al., 2011).

1.5.2. Tinklo plovimas vanduo–oras metodu

Vanduo–oras tinklo plovimas būdas efektyvesnis lyginant su tinklo plovimu vandeniu. Vanduo–oras pašalina lengvai prikibusiais nuosėdams prie vamzdžių sienelių ir išplauna stipriau prikibusius susidariusius korozijos produktus nuo vamzdžių sienelių. Taip pat plaunant tinklus vanduo–oras metodu plovimo metu sunaudoja mažiau vandens lyginant su tinklo plovimu tik vandeniu. Plovimo sąlygos, kurios privalomos išlaikyti plaunant vanduo–oras metodu:

- Pradinis greitis plauname vamzdyje 0,5 m/s.
- Oro slėgis privalo būti didesnis 0,5 baro nei vandens slėgis tinkle.
- Pučiamo oro ir vandens santykis lygus.

Atliktais tyrimais nustatyta, kai vandens tekėjimo greitis mažesnis už 0,5 m/s sunku pašalinti orą iš tinklo ir dalis oro gali likti vamzdynuose. Naudojant vanduo–oras plovimo metodą reikalinga uždaryti daugiau sklendžių, o tai padidina avarijų atsiradimo riziką. Taip pat pučiant orą į tinklą galimas tinklo užteršimas. Kompresoriumi suspaudžiamas oras mechaniniu būdu. Kompresorius privalo būti techniškai tvarkingas, išvengiant alyvos ar kitokių teršalų patekimo kartu su oru, plovimo schema pavaizduota (1.11 pav.) (J. Vreeburg, 2007).



1.11 pav. Tinklo plovimo „vanduo–oras“ principinė schema (www.vanduo.lt, 2021)

Taikant vanduo–oras plovimo būdą tinklas suskaidomas atkarpomis ir plaunama tik viena atkarpa. Į plaunamą atkarpą vanduo tiekiamas per pusiau atidarytą sklendę. Per hidrantą kompresorius pučia orą į vandentiekio tinklą. Plaunamo tinklo atkarpos pabaigoje esanti sklendė pilnai uždaryta, o plovimo vanduo su nuosėdomis išleidžiamas per hidrantą esantį prieš sklendę (J. Vreeburg, 2007).

Vanduo–oras plovimo būdas negali pašalinti nuosėdų nuo vamzdžių sienelių, jeigu tinkle žemas slėgis ir didelis debitas. Magistraliniuose vamzdynuose vanduo–ir vienakryptis tinklo plovimo metodai panašūs. Pagrindinis skirtumas tarp šių metodų, kad suslėgtas oras įvedamas per hidrantą plaunamos atkarpos pradžioje, taip pat plovimo metu sunaudojama 40 % mažiau vandens. Vanduo–oras efektyvesnis lyginant su vienakrypčiu plovimu, nes plovimo metu pasiekiami didesni greičiai plovimo vamzdžiuose. Didesni greičiai užtikrina didesnę pašalinamų nuosėdų kiekį nuo vamzdžių sienelių. Kai vamzdyje teka vanduo ir oras, tinkle atsiranda oro ir vandens mišinio „bangos“. „Bangos“ auga, tol kol užpildo visą vamzdžio skersmenį ir suformuoja kamštį. Didžiausias vanduo–oras plovimo trūkumas, kad naudojant tokį plovimą galima lengvai pažeisti tinklus, taip pat reikia daugiau pasiruošimo vykdyti plovimo darbus. Privaloma uždaryti įvadus į klientų namus, reikalinga numatyti laikina vandens tiekimą gyventojams. Dėl laikino vandens tiekimo užtikrinimo gyventojams išauga vanduo–oras plovimo kaina (Pourcel et al., 2017).

Vanduo–oras būdas naudojamas, kai tinklo skersmuo didesnis nei 150 mm ir neįmanoma pasiekti plovimo greičio tinkle. Galima išskirti du vanduo–oras plovimo tipus:

Pirmas, kai oras į tinklą tiekiamas pastoviu srautu. Taip užtikrinamas didesnis vandens tekėjimo greitis tinkle ir sunaudojama mažiau vandens tinklui plauti. Antras, kai oras į tinklą tiekiamas pulsuojančiai, taip susidaro didesnė jėga atplėšianti nuosėdas nuo vamzdžių sienelių, kuri užtikrina didesnę plovimo efektyvumą (Bolz, 2016).

Vanduo–oras tinklo plovimo privalumas, kad nereikia mechaniškai ardyti plaunamo tinklo, o tai palengvina pasiruošimo procesą (1.12 pav.). Galima plauti visų skersmenų tinklus. Plaunamos atkarpos gali turėti posūkių, tinklo skersmenų pasikeitimų (Bolz, 2016).



1.12 pav. Tinklo plovimas (Jocys, 2021)

Trūkumai vanduo–oras plovimo būdo, kad plaunami vandentiekio tinklai privalo turėti hidrانتus, jog per juos būtų galima tiekti orą į vamzdyną. Plaunant tinklus vanduo–oras metodu reikalinga speciali įranga, o ją valdyti turi gerai išmanantys darbuotojai. Taip pat reikėtų paminėti, kad už vanduo–oras efektyviau nuosėdas pašalina kamščio stūmimas vamzdynu (Bolz, 2016).

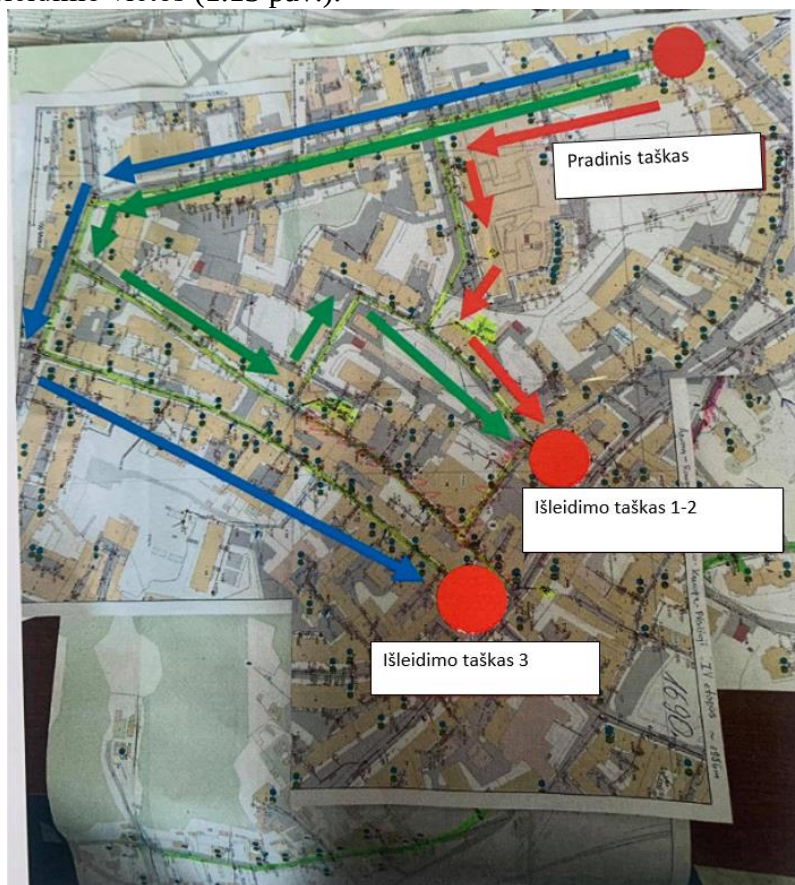
Mokslininkai palygino vanduo–oras ir vienakrypčio plovimo būdus. Tyrimai atlikti Kanadoje, septyniuose skirtinguose miestuose. Pasirinktos 32 vandentiekio tinklo atkarpos, 18 atkarpų plaunamos vienakrypčiu plovimu ir iškart plaunant vanduo–oras būdu. Likusios 14 atkarpų buvo plaunamos tik vienakrypčiu plovimu. Palyginti gauti vykdytų plovimo rezultatai, naudojant vanduo–oras metodą, išsiaiškinta, kad išplauti tą patį dalelių kiekį iš tinklo reikalingas 8 kartus mažesnis vandens kiekis. Vanduo–oras metodu galima išplauti didesnes vidutiniškai 57 % dalelių atplaišas nuo vamzdžių sienelių, nei vienakrypčiu plovimu. Vanduo–oras negali pakeisti labiau efektyvių nuosėdų ir dalelių šalinimo būdų, kaip kamščio stūmimas. Taip pat manoma, kad pašalinus nuosėdas iš vandentiekio tinklo ir sumažinus vamzdžių šiurkštumą sumažinami ir energijos nuostoliai palaikant reikalingą slėgį vartotojams. Nustatytas dalelių vidutinis kaupimosi greitis 0,60 g/m/metus, didžiausiais 2,09 g/m/metus. Ketaus vamzdžiuose dalelių kaupimosi greitis 0,61 g/m/metus lyginant su PVC 0,45 g/m/metus. Mokslininkai mano, kad PVC vamzdžiuose dalelės kaupiasi migruojant nuosėdoms iš ketinių vamzdžių (Pourcel & Duchesne, 2020).

1.5.3. Vilniaus miesto vamzdynų plovimas vanduo–oras metodu

Vilniaus mieste buvo atliktas dalies tinklo plovimas naudojant vanduo–oras metodą. Išplautų vamzdynų charakteristikos:

- 9 atskiros kvartalinių tinklų zonos;
- Tinklo skersmuo nuo DN 100 iki DN 400;
- Tinklo medžiaga plienas;
- Tinklo ilgis apie 12000 m.

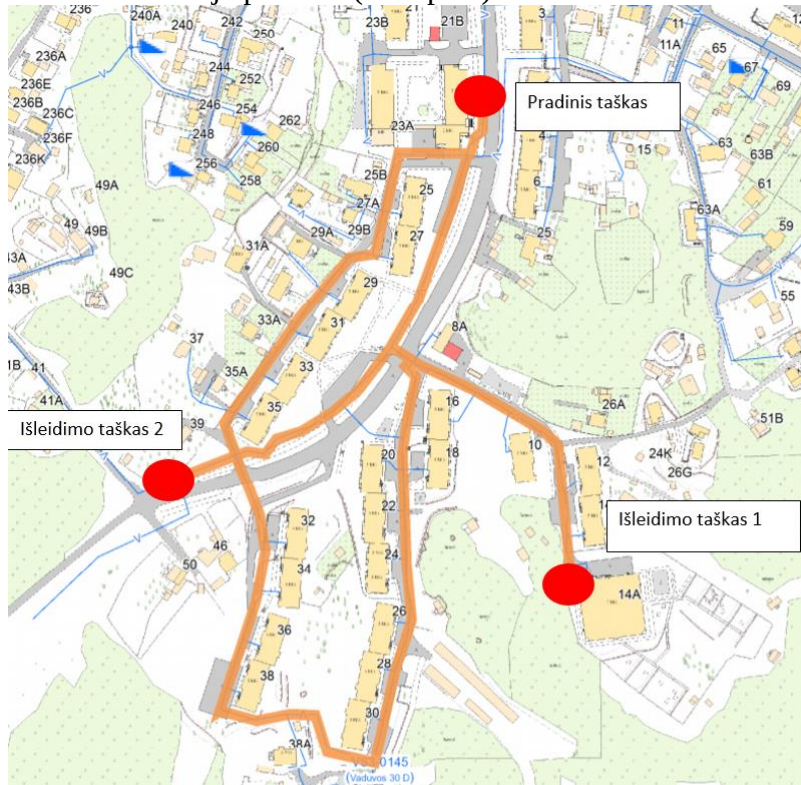
Kiekvienoje plovimo zonoje pradinis plovimo taškas hidrantas, vamzdynas plaunamas nuosekliai iki išleidimo vietos (1.13 pav.).



1.13 pav. Plovimo schema Nr.1(Report&Protokoll,2019)

Didžiausias slėgis plovimo pradžios hidrante siekė 2,1 bar. Plaunamos vandentiekio tinklų atkarpos: Aguonų g.–Raugyklos g.; Aguonų g.–Šv. Stepono g.; Kruopų g.–Plačioji g.

Plaunamos atkarpos ilgis 1690 m, skersmuo 100–150 mm, tinklo medžiaga geležis. Devintos plovimo zonos teritorija pateikta (1.14 pav.).



1.14 pav. Plovimo schema Nr.2(Report&Protokoll,2019)

Tinklo skersmuo šioje zonoje 150–250 mm, vamzdynų ilgis 1140 metrų. Tinklo plovimo metu buvo užfiksuota 548 FNU, po plovimo drumstumas siekė 1,50 FNU. Prieš atliekant tinklo plovimo darbus drumstumas tinkle buvo apie 50 FNU, po sėkmingo plovimo, bet kuriame zonos taške drumstumas neviršijo 3 FNU (Report&Protokoll, 2019).

Formazino nefelometrinis vienetas (FNU) yra panašus į nefelometrinį drumstumo vienetą (NTU). Matavimo principas pagrįstas išsklaidytos šviesos matavimu krintančios 90 laipsnių kampu nuo šviesos pluošto. FNU matuojamas infraraudonųjų spindulių šviesos šaltiniu pagal ISO 7027 metodą, o NTU – balta šviesa pagal EPA 180.1 metodą.

Didžiausias vanduo–oras plovimo trūkumas, kad reikalinga uždaryti tam tikras plaunamos zonos sklendes. Dažniausiai sklendžių uždarymas trunka nuo 2–4 valandų. Kai kurias sklendes sunku tinkamai uždaryti dėl jų būklės (Report&Protokoll, 2019).

Iš atliktų vandentiekio tinklo plovimo rezultatų išsiaiškinta, kad plovimo metu iš tinklų buvo pašalintos mangano ir geležies nuosėdos, o geriamojo vandens tinklas sėkmingai išplautas.

1.5.4. Kamščio stūmimas

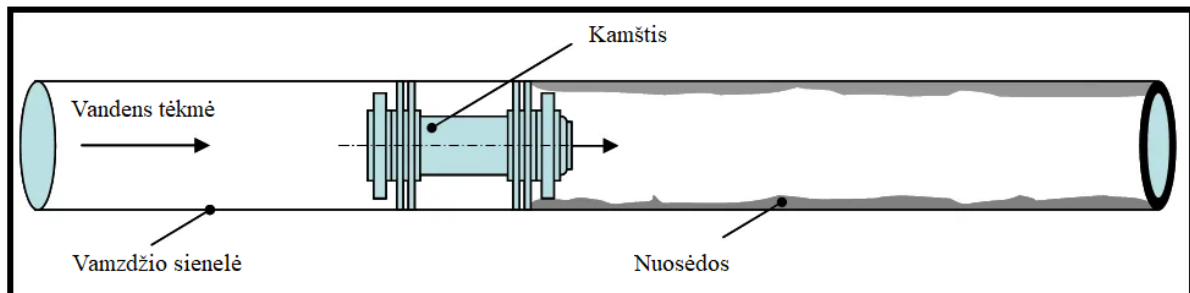
Kamštis dažniausiai būna kūgio formos. Gali būti pagamintas iš skirtingų medžiagų: plieno, polietileno, putplasčio, bet dažniausiai guminis, pakankamai tvirtas ir lankstus, saugus kontaktuoti su geriamuoju vandeniu (Satterfield, 2007).

Ekspluatuojant vamzdynus jų diametras sumažėja dėl nuosėdų. Naudojant kamščius galima atstatyti vamzdyno skersmenį, taip užtikrinant didesnę tinklo pralaidumą (1.15 pav.). Pašalinus nuosėdas, siurblių energijos suvartojimas sumažėja, dėl palaikoma mažesnio siurblinės išėjimo slėgio, nes atstatomas vamzdynų pralaidumas. Visi vamzdynai vidinėse sienelėse turi bioplėvelę, kuri gali pabloginti vandens kokybę. Indikatorius aktyvus bioplėvelės augimo pakitusi vandens spalva. Efektyviai pašalinti bioplėvelę paprasto plovimo neužtenka. Naudojant kamščius ir vandentiekio tinklo plovimą galima sumažinti arba visiškai panaikinti vamzdžių vidinių sienelių nuosėdas (Satterfield, 2007).



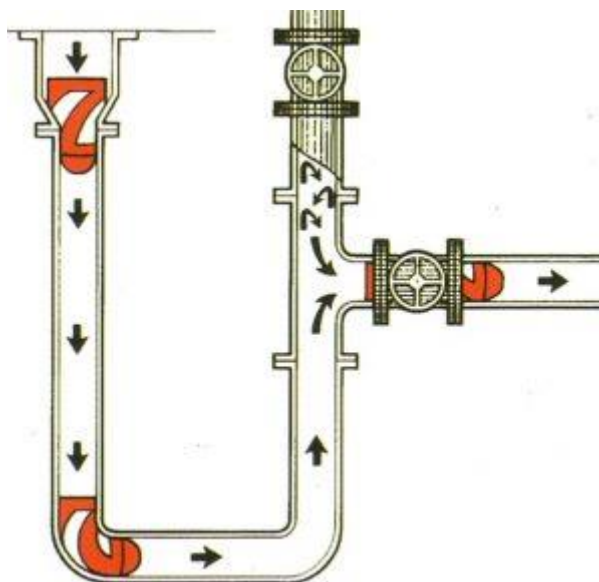
1.15 pav. Kamščiai (www.enggyclopedia.com, 2021)

Tinklui plauti naudojant elastingą kamštį reikiamas slėgis tinkle apie 1,1 Mpa, o kamščio judėjimo greitis privalo būti 0,3–1,0 m/s (1.16 pav.). Kamščio ilgis dvigubai ilgesnis nei plaunamo vamzdžio skersmuo, o skersmuo sudaro 1,2–1,3 vamzdžio skersmens. Kamščiai tinklams plauti naudojami tik tiesiuose tinklo ruožuose, taip pat posūkiuose iki 15 laipsnių. Būtina atkreipti dėmesį į vidines vamzdžių ar kitos armatūros sujungimų vietas, sujungimų vietas turi būti lygios, be išsikišimų, o sklendės plaunamoje atkarpoje pilnai atidarytos (Sakalauskas, 2016).



1.16 pav. Kamščio naudojimas (www.theprocesspiping.com, 2021)

Kamštis stumiamas vamzdžiu pašalina nuosėdas susikaupusias ant vidinės vamzdžių sienelės (1.17 pav.). Kamštis gali būti pagamintas iš polietileno ar putplasčio. Kamščio skersmuo yra didesnis nei vamzdžio, kamštis slinkdamas gremžia nuosėdas nuo sienelių. Stumiant kamštį gali būti pašalintos šiukšlės iš vamzdžio likusios nuo remonto ar statybos darbų. Kamščio stūmimas alternatyva dažniausiai naudojamiems plovimo būdams, nes jis pasižymi didesniu efektyvumu šalinant kliūtis vamzdyne ir sunaudoja mažiau vandens. Iš metalo pagamintiems vamzdžiams naudojami kieti kamščiai, nes minkštų kamščių dalys gali užsiklikti vamzdyne ir užkišti tinklą (J. Vreeburg, 2007).

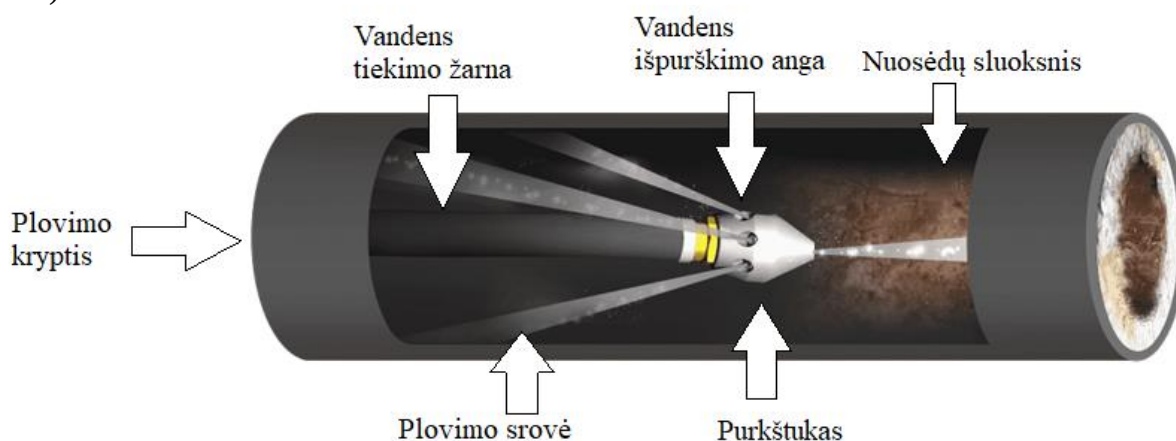


1.17 pav. Kamščio judėjimas vamzdyje (www.vecom-group.com, 2021)

Tobulėjant technologijoms, sukurta įvairių kamščių tipų, taip pat kamščiai suskirstyti pagal naudojimo paskirtį. Išmanūs kamščiai, kitaip dar vadinami tikrinimo kamščiai, gali rinkti informaciją apie vandens temperatūrą, slėgį vamzdyje, korozijos kiekį, vamzdžio įlinkimus, įtrūkimus, suvirinimo defektus. Informacijos rinkimui apie vamzdžio būklę išmanūs kamščiai naudoja du būdus. Pirmas būdas magnetinio srauto nuotėkis, siunčiant magnetinį srautą į vamzdžio sienelę. Antras būdas siunčiant ultragarsą į vamzdžio sienelę ir matuojant laiką per kurį garsas grįžta nuo vamzdžio sienelės iki jutiklio (www.theprocesspiping.com, 2021).

1.5.5. Hidrodinaminis tinklo plovimas

Tinklo plovimas aukšto slėgio srove, lyginant su standartiniu, vienakrypčiu, vanduo–oras ir cheminiu plovimu tinklo plovimu, pasižymi dideliu efektyvumu ir mažomis finansinėmis išlaidomis. Nuosėdos nuo vidinių vamzdžių sienelių šalinamos vandens srove išpurškta per purkštuko galvutę, o aukštą slėgį sukelia hidrodinaminės mašinos (1.18 pav.). Plovimu metu vidines sienelės veikia didesnis nei 100 bar slėgis, aukštas slėgis atskiria nuosėdas nuo vamzdžio. Nuosėdos iš tinklo pašalinamos per atidarytą sklendę plaunamos atkarpos gale (Bolz, 2016).



1.18 pav. Plovimas hidrodinaminiu būdu (www.antizhavin.ru, 2021)

Hidrodinaminis vandentiekio tinklo plovimo metodas, išreiškiamas vandens srovės jėga, kuri susidaro darbinio purkštuko galvutėje. Išplaunamų nuosėdų forma ir kiekis labiausiai priklauso nuo vandens purškimo lauko į vamzdžio sienelę, srovės tipo ir darbinio čiurkšlės ilgio. Atliktais tyrimais nustatyta, kad efektyviausias purkštuko judėjimo greitis vamzdyje

šalinant labai kietas nuosėdas nuo sienelių turėtų būti intervale nuo 1,5–3 m/min. Purkštuko antgalio parinkimas su jame išdėstytu angų skaičiumi priklauso nuo plaunamo vamzdžio nuosėdų storio ir vamzdžio skersmens.

Pagrindinės vandentiekio tinklo kietų nuosėdų sudedamosios dalys yra geležis, manganas, kalcis ir silicis. Šių medžiagų pašalinimas iš vamzdžių sienelių viena didžiausių vandentiekio tinklo plovimo problemų. Tinklo plovimas aukšto slėgio srove pasižymi dideliu efektyvumu koeficientu, nes nuosėdos pašalinamos iš 93–96 % vamzdžio vidinio ploto. Taip pat, toks tinklo valymo būdas pasižymi dideliu valymo greičiu apie 100 m/h ir mažu vandens suvartojimu. Dažniausiai vykdant tinklo plovimą aukšto slėgio srove suvartojama mažiau nei 6 m³/h. Hidrodinaminio tinklo plovimo būdu galima plauti visų skersmenų vamzdžius. Hidrodinaminis tinklo plovimo būdas pasižymi efektyvumu, dėl mažo vandens suvartojimo, didelio iki 96 % siekiančio nuosėdų pašalinimo iš vamzdžio. Taip pat šiuo būdu per valandą galima išplauti apie 100 metrų vandentiekio tinklo. (Borkowski, 2011).

Purkštukas yra svarbiausias plovimo įrangos elementas naudojant hidrodinaminį plovimą. Hidraulinės purkštuko savybės priklauso nuo konstrukcinių purkštuko parametrų. Hidraulinės purkštuko išpurškimo savybės lemia plovimo efektyvumą. Atlikti tyrimai nustatyti kūginio antgalio su tiesia atkarpa ir kūginio antgalio purkštukų hidraulinius rodiklius. Bandymais ir modeliavimais nustatyta, kad kūginio antgalio su tiesia atkarpa hidraulinės savybės geresnės nei kūginio purkštuko. Tai lemia, kūginio antgalio tiesi išleidimo dalis, kuri leidžia padidinti vandens srovės greitį. Atsižvelgiant į hidraulines purkštuko charakteristikas, jis rekomenduojamas plaunant tinklus labai aukštu slėgiu (Wen et al., 2019).

Didelis pavojus pažeisti vamzdžius naudojant hidrodinaminį tinklo plovimą, nes šiuo plovimo būdu sukuriama aukšta slėgis. Vamzdžio pažeidimai gali atsirasti ir nuo purkštuko kontakto su vamzdžio sienele. Dažniausiai pašalinamos nuosėdos ir korozijos produktai, kurie saugojo vamzdį iš vidaus nuo vandens išteklėjimo iš tinklo, per mažas skylutes ir įtrūkimus. Atlikti tyrimai, naudojant fiksuotos padėties ir besisukančius purkštukus, nustatytas plovimo poveikis vamzdžiams. Išsiaiškinta, kad didesnė tikimybė pažeisti vamzdį naudojant fiksuotos padėties purkštuko antgalį. Vandentiekio tinklo pažeidimai priklauso nuo darbinio išpurškimo slėgio, purkštuko judėjimo greičio, laiko kiek purkštukas išbūna vienoje vietoje, taip pat nuo čirukšlės atstumo iki plaunamos sienelės. Didžiausias pavojus apgadinti vamzdį, jeigu tinklas plaunamas 250 bar slėgiu ir purkštukas užlaikomas toje pačioje vietoje ilgiau nei 10 sekundžių. Plaunant mažesniu slėgiu, mažėja ir vamzdžio pažeidimo tikimybė. Nustatyta, kad iš purkštuko galvutės purškiant 105 bar ir naudojant besisukančią purkštuko galvutę reikia daugiau nei minutės, kad būtų pažeisti vamzdžiai (Wright et al., 2006).

1.5.6. Cheminis tinklo plovimas

Nuosėdos iš tinklo efektyviai pašalinamos naudojant chemines medžiagas. Svarbiausia taikant cheminį tinklo plovimą būdą žinoti nuosėdų cheminę sudėtį, parenkant tinkamą medžiagą vamzdžiams pripildyti. Nuosėdoms šalinti naudojamos organinės ir neorganinės rūgštys, kurios ardo geležies, mangano oksidus ir kalcio karbonatus. Oksiduojančios medžiagos tokios, kaip vandenilio peroksidas, acto peroksido rūgštis naudojamos organinių nuosėdų šalinimui (Bolz, 2016).

Cheminis tinklų plovimo metodas nėra plačiai naudojamas praktikoje dėl sudėtingo plovimo proceso. Toks vamzdžių valymo būdas pagerina vamzdžių pralaidumą, sumažina vandens stovumą, pagerina vandens dezinfekavimo procesą. Plovimo metu pašalinama ne tik bioplėvelė, bet ir dalis nuosėdų. Naudojamos rūgštys, kurios gali būti organinės: citrinų rūgštis ir šarminės medžiagos, tokios kaip kaustinė soda (www.hindmarshplumbing.com, 2021).

Cheminio plovimo trūkumai, gali būti naudojamos agresyvios medžiagos, reikalingas darbuotojų paruošimas dirbant su medžiagomis, tinkamos apsaugos priemonės. Plovimo metu reikia užtikrinti, jog plaunama atkarpa būtų uždaryta taip, jog plovimo vanduo nepasiektų gyventojų. Atlikus cheminį vandentiekio tinklo plovimą reikalingas didelis vandens kiekis praplaunant sistemą švariu vandeniu. Senuose tinkluose tinklo atkarpą gali sudaryti skirtingų

metalų vamzdžiai, kuriems cheminio plovimo poveikis gali skirtis, o tai sukelti daugiau drumsto vandens problemų (www.hindmarshplumbing.com, 2021).

Naudojant cheminį tinklo valymo būdą, vamzdynai pripildomi inhibitorine rūgštimi, rūgštis vamzdyne paliekama 24 h ar ilgesniam laikotarpiui. Vėliau vamzdynas ištuštinamas ir praplaunamas švariu vandeniu. Dažniausiai cheminis tinklo plovimo būdas taikomas ištirpinant kietos struktūros nuogulas sudarytas geležies, kalcio, magnio. Toks tinklų valymo būdas nerekomenduojamas komunalinio vandentiekio vamzdynams (Sakalauskas et al., 2016).

1.6. Hidraulinio modeliavimo informacinė sistema „WaterGEMS“

Bentley kompanijos sukurta vandentiekio tinklo analizavimo programa leidžia įvertinti esamos infrastruktūros pajėgumus, taip pat analizuoti vandentiekio tinklo plėtros planus plečiantis miestams. Pagrindinės informacinės modeliavimo sistemos bruožai:

Sistemos patikimumas užtikrinant vandens tiekimą. Tai svarbu miestams plečiantis ir augant vartotojų skaičiui efektyviai nustatyti tikėtinas tinklo problemines vietas. Programa leidžia tiksliau planuoti vandentiekio tinklo plėtros galimybes, įvertinant ateities perspektyvas.

Hidraulinio modeliavimo programa leidžia optimizuoti sistemą. Modeliuojant esamų siurblių išjungimus, operatyviau atlikti tinklų uždarymo darbus dėl planinių ar avarinių darbų. Tai sumažina nepatogumus, kuriuos gali patirti vartotojai. Naudojant „WaterGEMS“ galima lengviau prognozuoti reikiamų rekonstrukcijų vietas. Programa palengvina analizę lygindama įvairius kintamuosius, tai leidžia priimti optimaliausius sprendimus.

Hidraulinio modeliavimo programa galima naudoti:

- Gaisrų scenarijaus analizei. Teorinis gaisrinių hidrantų pralaidumo patikrinimas tinkle. Vamzdyno charakteristikos gaisro atveju analizė.
- Tinklo plovimo scenarijų kūrimas. Reikiamų greičių užtikrinti nustatymas. Optimaliausios vandentiekio tinklo plovimo schemos parinkimas.
- Energetiniai skaičiavimai. Sumažintos siurblių energijos sąnaudos, parenkant skirtingas siurblių veikimo kombinacijas, kurios leidžia sumažinti suvartojama energijos kiekį.
- Vandens nuostolių mažinimas. Nustatyti galimas nuotėkio vietas. Parinkti optimaliausią slėgį, kuris taip pat leistų sumažinti vandens nuostolius.
- Naujų arba renovuojamų vamzdynų skersmenų nustatymą/parinkimą.
- Sukalibruotą modelį prijungti prie „SCADA“ sistemos ir duomenis matyti modelyje realiu laiku. Tai leidžia stebėti sistemą ir atlikti jos koregavimo darbus dabartinėmis sąlygomis.

Pagrindiniai parametrai, kuriuos galima gauti naudojant programą: slėgis, debitas, vandens amžius, vandens tekėjimo kryptys, tekėjimo greičiai, slėgio nuostoliai, energijos sąnaudos (www.bentley.com, 2021).

Dažniausiai tinklo plovimas atliekamas atidarius vieną ar kelis hidrانتus vandentiekio tinkle. Tinklo operatoriai negali matyti, kokie greičiai ir vandens srautai yra plaunamuose vamzdynuose. Programa, atlikus skaičiavimus, pateikia teorinius greičius ir srautus plovimo metu. Srautų įvertinamas sudėtingas procesas, jeigu tinklas žiedinis, tada srauto kryptis ir greičius apskaičiuoti rankiniu būdu labai sudėtinga, modelio naudojimas visa tai palengvina.

Lengviausiai imituoti tinklo plovimą hidrauliniame modelyje, padidinus vandens suvartojimą. Dažniausiai vandens tiekimo įmonės nežino ir nėra matavusios, kiek vandens gali pratekėti iš konkretaus hidranto. Slėgis tinkle veikia vandens kiekį pratekantį pro hidranto išleidimo angą. Didelių skersmenų tinkle pagrindiniai slėgio nuostoliai susidaro tik hidrante, mažesnio diametro tinkluose dideli slėgio nuostoliai gali susidaryti vamzdyne iki atidaryto hidranto. Modeliuojant plovimą per hidrانتus turi būti atsižvelgta į slėgio sumažėjimą plovimo metu. Tiksliam modeliavimui reikia pateikti bendrą K koeficiento reikšmę, kuri apima slėgio nuostolius hidrante tiek ir slėgio kitimą į greitį. Energijos lygtį tarp slėgio matuoklio esančio prieš hidrantą ir hidranto išleidimo angos galima užrašyti:

$$\frac{v_p^2}{2g} + z_p + P_p = \frac{v_o^2}{2g} + z_o + P_o + C_f \left(\frac{Q}{k}\right)^2 \quad (1.3)$$

Čia: v_p – greitis prieš pat hidrantą (m/s);

g – gravitacinio pagreičio konstanta (m/s^2);

z_p – altitudė, kur matuojamas slėgis prie hidrantą;

P_p – slėgis prieš pat hidrantą (m);

v_o – greitis hidranto išleidimo angoje (m/s);

z_o – altitudė, hidranto išleidimo angos.

P_o – slėgis hidranto išleidimo angoje galima priimti atmosferiniu, todėl $P_o = 0$ (m);

C_f – perskaičiavimo koeficientas;

Naudojant išleidimo koeficientus, o ne tiesiogiai nurodant išleidžiamo vandens kiekį per hidrantą. Lentelėje 1.2 pateikiamos Šiaurės Amerikoje eksploatuojamų hidrantų koeficientų reikšmės.

1.2 lentelė. Koeficientų reikšmės

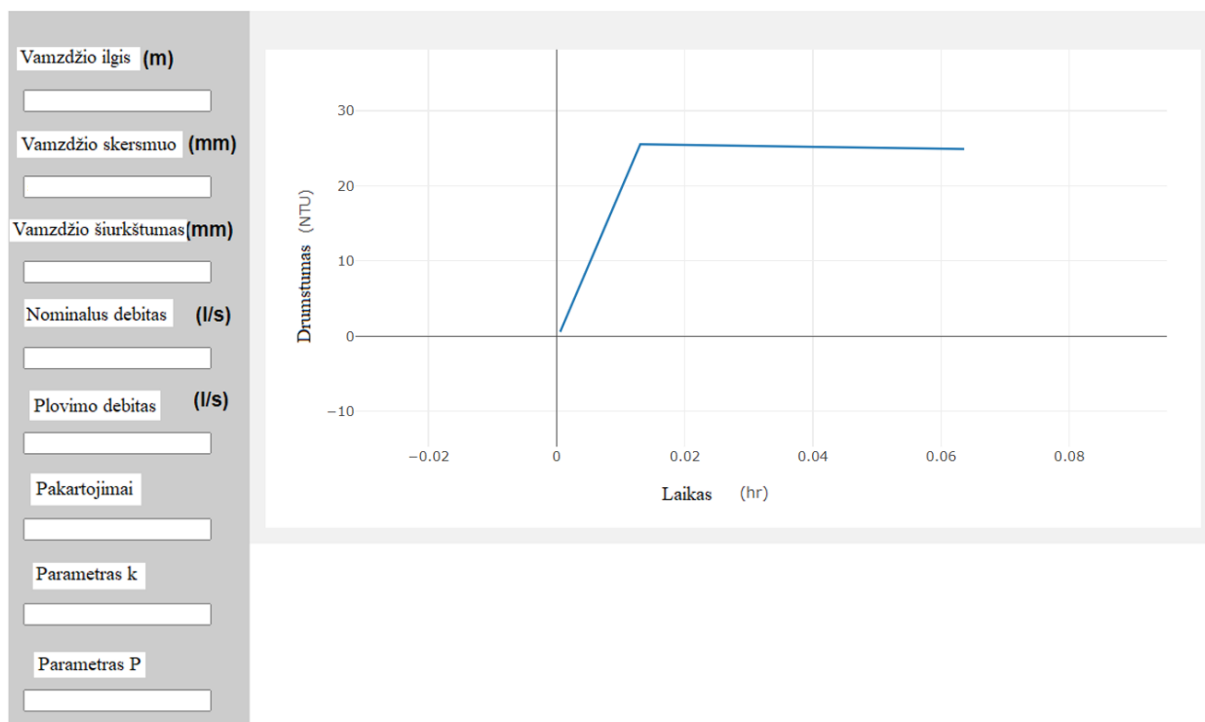
Išleidimo angos skersmuo, mm	Išleidimo koeficientas, (gpm/psi ^{0,5})	Išleidimo koeficientas (l/s/m ^{0,5})
63,5	150–180	11–14
Dvi angos po 63,5	167–185	13–15
114,3	380–510	30–40

Plovimas laikomas veiksmingu, kai pavyksta pasiekti plovimo greitį. Mažesnio skersmens vamzdynuose lengviau padidinti greitį lyginant su didesnių skersmenų vamzdžiais. Plovimo rezultatui pasiekti reikia plauti kol drumstas vanduo pašalinamas iš tinklo.

Tinklo plovimo kokybės rodikliams sekti modelyje galima naudoti chloro likučio sekimo funkciją, kuri imituoja plovimo efektyvumą. Naudojant hidraulinio modelio programą galima pamatyti, kaip seną vandenį pakeičia naujas, nustatyti, kiek reikia laiko plauti tinklą (Thomas M. Walski et al., 2004).

1.7. Vandens kokybės modeliavimas

Šefildo universiteto dėstytojai J. Boxall, S. Husband ir R. Collins sukūrė programėlę, kuri imituoja drumstumo atsaką į laipsnišką debito padidėjimą, tai yra plovimą (1.19 pav.).

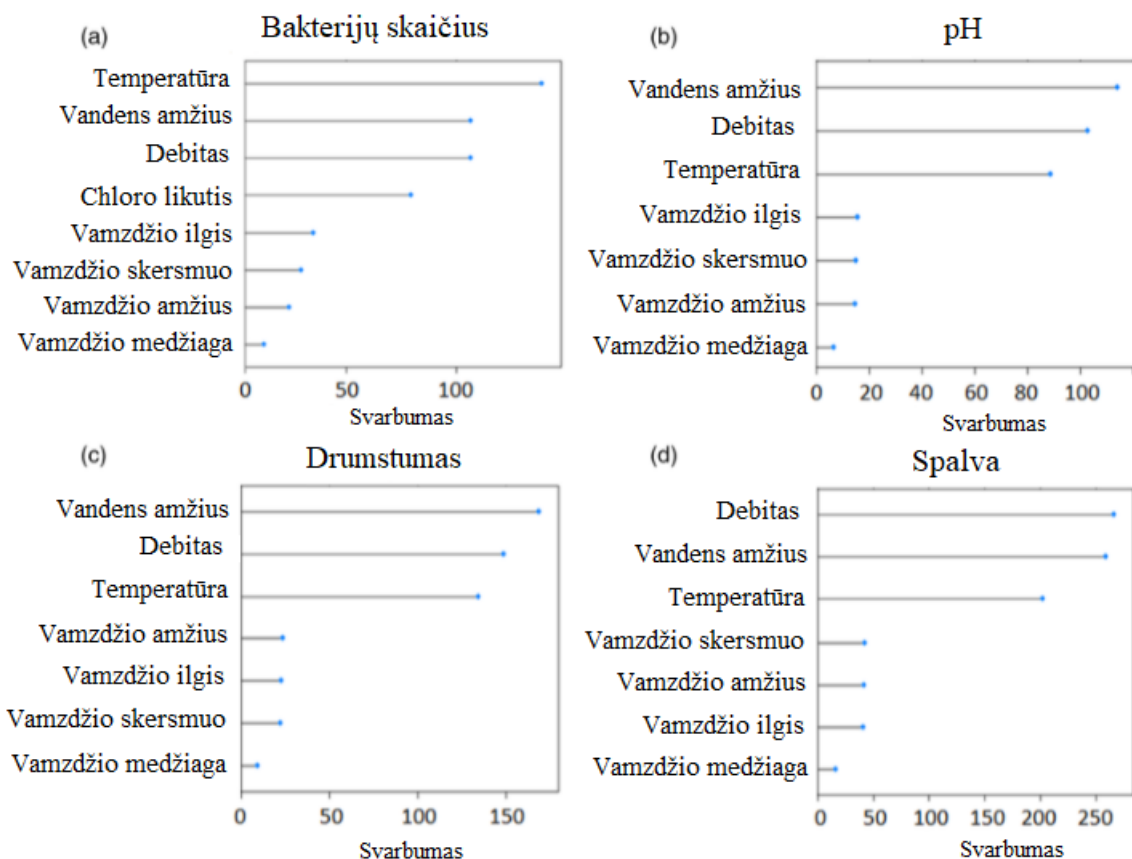


1.19 pav. Programėlės vaizdas

Į programėlę suvedami tokie parametrai kaip: vamzdžio ilgis, vamzdžio skersmuo, vamzdžio šiurkštumas, debitas tekantis tipine diena, plovimo debitas, pakartojimų skaičius ir parametrai k ir P .

Dalelių kaupimasis dviejuose vienodo skersmens vamzdžiuose gali stipriai skirtis, o tai lemia išorinių veiksnių poveikis vamzdžiams, tekančio vamzdžiu vandens cheminė sudėtis, vandens srautai vamzdžiuose. Drumstumo prognozavimas sudėtingas, dar tik pradėdama įtraukti šios prognozės galimybę į hidraulinių vandentiekio tinklo modelių programas. Sukurtos keletas pirmųjų versijų, kuriose mokslininkai programiškai apskaičiuotus rezultatus lygina su išmatuotais ir kalibruojant modelius, rezultatai sugretinami prie realių duomenų. Sukurti programų papildiniai šiuo metu nėra prieinami vartotojams. (<https://sites.google.com/sheffield.ac.uk/podds>)

Vis plačiau pasitelkiami hidrauliniai modeliai, kurie leidžia apibūdinti vandens kokybės pokyčius vandentiekio sistemoje. Modeliai padeda lengviau įvertinti atitinkamų drumstumo parametrų ir jų sąveikų poveikį. Mokslininkai savo darbuose nagrinėjo vandens temperatūros, vamzdinių charakteristikų ir hidraulinių sąlygų poveikį mikrobiologiniams, fiziniams ir cheminiams vandens kokybės parametrams. Tyrimams naudota Bayeso Dirichlet proceso linijinių modelių mišinį ir atsitiktinio miško metodas (angl. random forest method). Atsitiktinio miško metodas yra mašininio mokymosi metodas, naudojamas regresijos ir klasifikavimo problemoms spręsti. Bayeso neparametriniai modeliai dėl savo tikimybinio pobūdžio gali susidoroti su duomenų rinkinių apribojimais, atskleisti ir interpretuoti labai sudėtingus ryšius, kurių negali atskleisti tradiciniai statistiniai arba mašininio mokymosi modeliai. Tyrimų metu naudoti septynerių metų 2013–2019 metų savaitiniai vandens kokybės duomenys išmatuoti Norvegijos Alesundo miesto vandentiekio sistemoje. Visam miestui vanduo tiekiamas iš vienintelio vandens šaltinio Brudalsvatnet ežero. Matavimai buvo atlikti šių rodiklių: bendras bakterijų kiekis, pH, drumstumas, spalva, šarmingumas ir elektrinis laidumas. Bayeso Dirichlet metodu buvo sukurti du atskiri matuotų parametrų modeliai. Pirmajame modelyje įvesties kintamieji tokie kaip vamzdžio medžiaga, ilgis, skersmuo, vandens srautas, vandens amžius, temperatūra. Antrajame naudojamos įvesties parametrų sąveikos, tai buvo atliekama siekiant įvertinti, kaip įvairių prognozių sąveika veikia vandens kokybės pokyčius. Atsitiktinio miško modelio rezultatai pateikiami (1.20 pav.).



1.20 pav. Modeliavimo rezultatai

Taikant Bayeso Dirichlet ir atsitiktinio miško metodą nustatyta, kad temperatūra yra pagrindinis veiksnys, kuris kontroliuoja mikrobiologinį stabilumą tinkle. Lyginant vandens temperatūra tinkle nuo 3,35 iki 11,14 °C bakterijų atsiradimo tikimybė išaugo nuo 0,36 iki 0,95. Abu modeliavimo metodai patvirtino, kad vandens amžius ir debitas tekantis vamzdynu vieni svarbiausių veiksnių lemiančių vandens kokybę. Atsitiktinio miško metodo rezultatai parodė, kad vamzdžių charakteristikos gali turėti nedidelę poveikį vandens kokybei, tačiau Bayeso metodas atskleidė, kad šie parametrai yra svarbūs. Mokslininkai dar kartą patvirtino žinias apie tai, jog metaliniuose vamzdžiuose mikroorganizmų augimas vyksta greičiau lyginant su polietileno vamzdžiais. Tačiau pabrėžiamas metalinių vamzdžių ilgaamžiškumas, stiprumas ir mažesnis temperatūrų svyravimas juose (Mohammed et al., 2021).

1.8. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Apžvelgtuose mokslinės literatūros šaltiniuose išskiriamos šios nuosėdų susidarymo priežastys:

- Deguonies tirpumas vandenyje priklauso nuo jo temperatūros, esant didesnei vandens temperatūrai mažėję deguonies tirpumas, o tai sulėtina koroziją.
- Temperatūros įtaka, nors vamzdžiai užkasami žemėje tiekiamo vandens temperatūra keičiasi lyginant žiemą ir vasarą, mažiausiai vartotojų skundų dėl vandens kokybės sulaukiama žiema.
- Bioplėvelės augimas ne tik mažina vamzdinių hidraulinių pralaidumą, bet ir blogina tiekiamo vandens kokybę spalvos ir kvapo atžvilgiu.
- Mokslininkai tyrimais nustatė, kad virš 50 % ant metalinių vamzdžių vidinių sienelių susikaupusių nuosėdų dalį sudarė geležis atsiradusi dėl vidinės korozijos.

Vandentiekio tinklas dažniausiai plaunamas dviem atvejais, prieš pradedant naujo vamzdžio eksploataciją arba dėl suprastėjusios tiekiamo vandens kokybės. Nagrinėtoje literatūroje aptariamieji tinklo plovimo būdai:

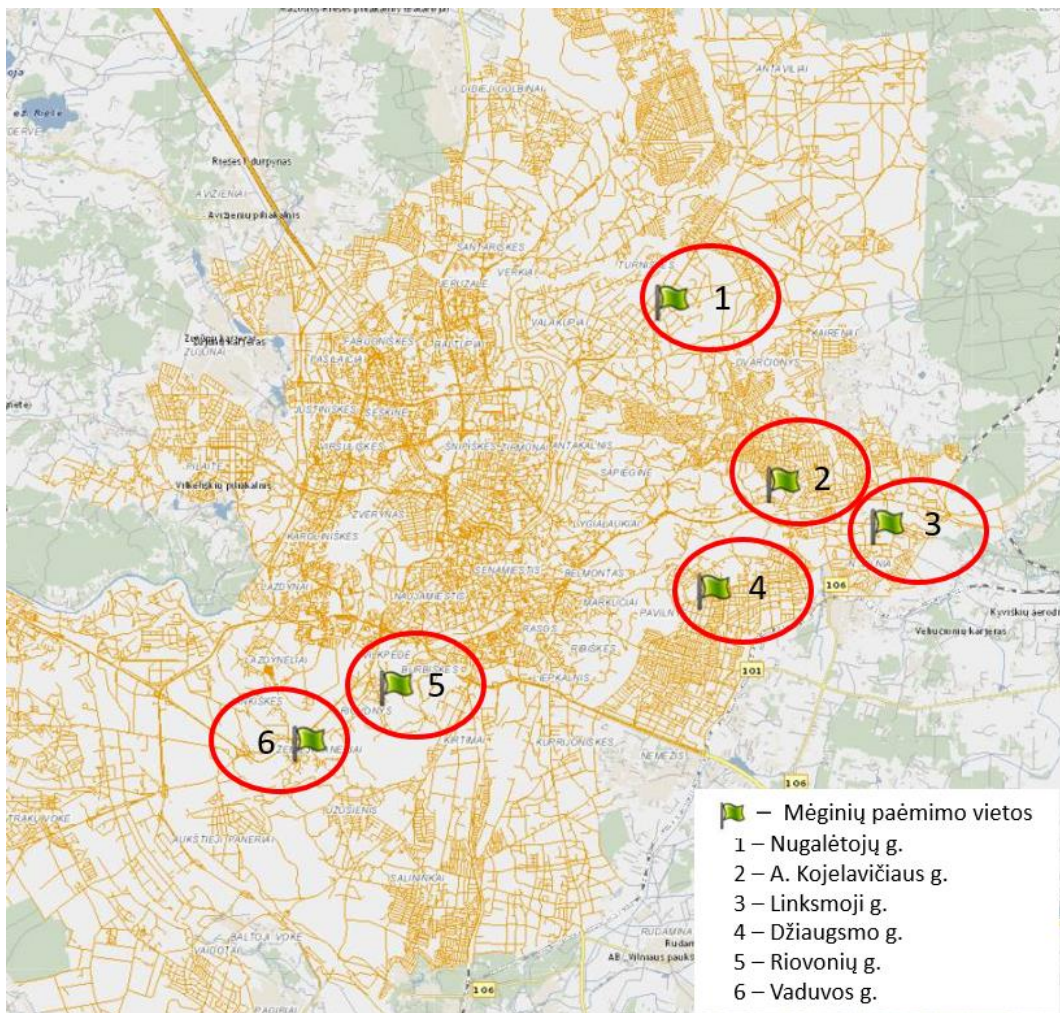
- Standartinis tinklo plovimas, kai atidaromas hidrantas ir išleidžiamas iš vamzdžio drumstas vanduo. Sunaudojama 3–5 kartus didesnis vandens tūris už plaunamos atkarpos tūrį.
- Vienakryptis tinklo plovimas reikalauja daugiau pasiruošimo lyginant su standartiniu tinklo plovimu, norint vykdyti vienakryptį tinklo plovimą, jeigu tai žiedinis tinklas, reikalinga uždaryti tam tikras sklendes. Taip pat tokio plovimo metu susidaro didesni greičiai lyginant su standartiniu, todėl šis būdas efektyvesnis.
- Vanduo–oras metodas tinkamas didesnių nei DN 150 skersmenų vamzdžiams plauti, kai plovimu tik vandeniu neįmanoma užtikrinti reikiamo greičio. Sunaudojama 40 % mažiau vandens lyginant su vienakrypčiu.
- Kamščio stūmimas efektyvumu lyginamas su vanduo–oras metodu, tinkamas būdas atstatyti sumažėjusį vidinių vamzdžių skersmenį ir taip padidinti vamzdžio pralaidumą. Trūkumai, jog šis būdas gali būti naudojamas tik tiesiose tinklo atkarpose, kuriose vamzdžio posūkiai neviršija 15 laipsnių.
- Hidrodinaminis tinklo plovimas, tai plovimas aukšto slėgio srove, kai srovė išpurškiama per purkštukus į vamzdžio sienelę. Toks tinklo plovimas pasižymi dideliu plovimo greičiu 100 m/h, mažu vandens suvartojimu. Taikant šį būdą vanduo išpurškiamas virš 100 barų slėgiu, todėl didelis pavojus pažeisti vamzdį.
- Cheminis tinklo plovimas pasižymi dideliu efektyvumu, tačiau reikia žinoti nuosėdų cheminę sudėtį, kad tinkamai pasirinkti plovimo medžiagą. Praktikoje vandens tiekimo įmonių nenaudojamas, nes vamzdžiai užpildyti plovimo medžiaga dažniausiai rūgštimi paliekami 24 valandoms ar ilgesniam laikotarpiui. Vykdyti tokį plovimo būdą gali tik gerai apmokyti ir išmanantys savo darbą darbininkai.

Apžvelgtos hidraulinio modeliavimo informacinės sistemos panaudos atvejų galimybės ir plovimo skaičiavimų teorija.

2. TYRIMO OBJEKTAS IR METODIKA

2.1. Tyrimo objektas

Tyrimo metu atlikti Vilniaus miesto vandentiekio tinklų plovimo vandens tyrimai – iš miesto vandentiekio tinklo plovimo metu arba vietose, kur keičiama tinklo armatūra, paimti vandens mėginiai. Atlikus tinklo darbus vandentiekio tinklas plaunamas. Analizuojami gauti laboratorinių tyrimų duomenys, toliau atliekamas jų įvertinimas, taip pat vykdomas hidraulinis modeliavimas. Mėginių paėmimo vietos pažymėtos (2.1 pav.).



2.1 pav. Mėginių paėmimo vietos Vilniaus mieste

Mėginiai paimti iš keturių skirtingų vandens tiekimo zonų: Antavilių, Naujosios Vilnios, Tupatiškių, Žemųjų Panerių. Antavilių vandens tiekimo zonos, kuri aprūpina apie 250 000 gyventojų ir sudaro apie 41 % viso patiekiamo vandens Vilniaus miestui. Naujosios Vilnios zona aprūpina apie 26 000 gyventojų, iš Tupatiškių zonos vanduo tiekiamas 62 500 gyventojams ir Žemųjų Panerių, kur vanduo pasiekia apie 4 300 gyventojų.

2.2. Tyrimo metodika

2.2.1. Skendinčių medžiagų koncentracija

Skendinčių medžiagų koncentracija nustatoma iš vandentiekio tinkle paimto vandens mėginių (10 litrų). Atsivežtas vanduo paliekamas laboratorijoje per naktį, kad vandens temperatūra pasiektų kambario temperatūrą.

Tiriamas vanduo pilstomas į 1 litro talpos cilindrus ir tuo pat metu nuolat maišomas, neleidžiant dalelėms nusėsti (2.2 pav.). Cilindro aukštis 342 mm, iš jo išsiurbiami 200 ml vandens, panardinus siurblio žarnelę į 274 mm ir 103 mm aukštyje, matuojant nuo cilindro dugno. Mėginiai paimami praėjus 10, 30, 60, 90 min. po to, kai vanduo buvo išpilstytas į cilindrus.



2.2 pav. Mėginys iš Riovonių g.

Filtro popieriui leidžiama pasiekti drėgmės pusiausvyrą su oru. Pasveriamas filtravimo popierius 0,1 mg tikslumu.

Filtravimui naudojamas vakuuminis siurblys. Filtravimas baigtas, kai nebelieka vandens koštuve, prieš tai dar keletą sekundžių palaikius įjungtą vakuuminį siurblį. Prieš dedant filtrą į džiovinimo lėkštelę filtras sulankstomas, kad išėmus mėginius iš džiovinimo krosnies, nuo filtravimo popieriaus nenukristų sausos dalelės.

Filtro popierius su nusėdusiomis dalelėmis dedamas į krosnį džiovinti. Mėginiai džiovinami apie 100 °C temperatūroje. Dėl didelio nusėdų storio ant filtro popieriaus džiovinimas trunka apie 4 h. Išjungus ir išėmus mėginius iš džiovinimo įrenginio, filtrams leidžiama atvėsti, toliau jie pasveriami, o skendinčių medžiagų koncentracija apskaičiuojama pagal formulę:

$$A = \frac{1000 \cdot (m_2 - m_1)}{V_b} \quad (2.1)$$

Čia C – skendinčių medžiagų koncentracija, mg/l;

m_2 – koštuvo masė po filtravimo, mg;

m_1 – koštuvo masė prieš filtravimą, mg;

V_b – bandinio tūris, ml.

2.2.2. Vandens drumstumo nustatymas

Vandens drumstumo nustatymas atliekas spektrometru, išmatuojant tiriamojo tirpalo absorbciją.

Naudojamas bangos ilgis 550 nm, kiuvetė 50 mm, faktorius (F) = 100.

Drumstumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$FDV = F \cdot A_{550} \quad (2.2)$$

Čia D – drumstumas, DV (drumstumo vienetai);

A – absorbcija;

F – faktorius, $F = 100$.

2.2.3. Debito matavimas mėginių ėmimo vietoje

Plovimo debitui nustatyti mėginių ėmimo vietose buvo naudojamas elektromagnetinis debitmatas „Siemens F M MAG 6000 CT“ (2.3 pav.).



2.3 pav. Elektromagnetinis debitmatas

Debitmatas jungiamas žarnomis prie plaunamo hidranto. Debitas fiksuojamas, kai plovimo hidranto uždoriai pilnai atidaromi ir srovė nusistovi.

2.2.4. Plovimo vandens dalelių granulimetrinės sudėties nustatymas

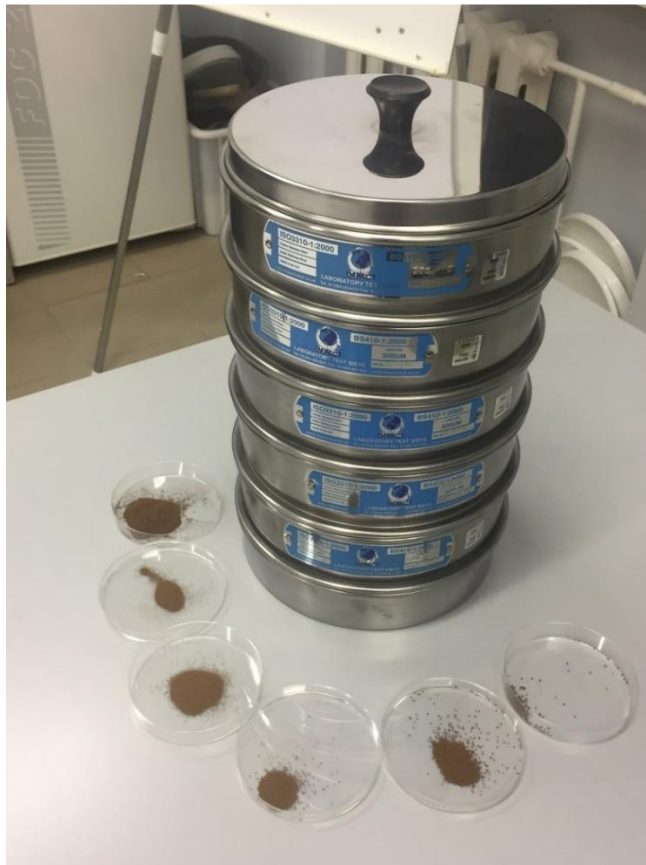
Dalelių dydžiui nustatyti mėginiai imami iš Vilniaus miesto vandentiekio tinklo (Žemųjų Panerių, Naujosios Vilnios, Aukštągirio, Tupatiškių) rajonų. Visose mėginių ėmimo vietose vamzdyno medžiaga – ketus, skersmuo 100, 150, 300 mm. Dalelių dydis buvo nustatomas imant vandenį iš vandentiekio tinklo plovimo vietoje, kai tinklas plaunamas atlikus remonto darbus tokius kaip: sklendės, hidranto keitimas. Tyrimams paimama 20 litrų pradžios plovimo vandens, kadangi jis labiausiai drumstas.

Paimtas mėginys paliekamas laboratorijoje 24 h, jog būtų galima atskirti daleles ir sumažinti garinamo vandens tūrį. Vandens ir nuosėdų mišinys, kurio tūris apie 50 ml džiovinamas Vilnius Tech mokomosios laboratorijos krosnyje. Džiovinama 100 °C apie 8–12 h, kai mėginys pilnai išdžiūvęs trinamas porcelianinėje lėkštelėje grūstuvėliu (2.4 pav.).



2.4 pav. Išdžiovintos nuosėdos

Sutrintas mėginys sijojamas per 0,8 mm, 0,6 mm, 0,5 mm, 0,3 mm, 0,2 mm sietus pagal ISO/TS 17892-4:2004 standartą (2.5 pav.). Sijojimas atliekamas rankomis, kol dalelės nebyra į žemiau esantį sietą. Likusios dalelės iš nuimamo sieto išberiamos ant lapo ir kruopščiai suberiamos į svėrimo lėkštutę.



2.5 pav. Dalelės pagal granulimetrinę sudėtį

Dalelės pasveriamos 0,0001 gramu tikslumu laboratorijoje esančiomis svarstyklėmis.

2.2.5. Dalelių tankio nustatymas

Dalelių tankiui nustatyti naudojamas piknometrinis tankio nustatymo metodas LST EN 12697-5:2019, 9.2 p. Tankio nustatymui naudojamas stiklinis indas 100 ml tūrio, laboratorinės svarstyklės (2.6 pav.). Būdas tinkamas nustatyti birių medžiagų tankį. Medžiagoms sverti naudojamos tikslios laboratorinės svarstyklės. Svarbu, kad užpildžius kolbą vandeniu, neliktų oro burbuliukų, kurie gali iškreipti medžiagos tūrio nustatymą. Burbuliukams iš kolbos pašalinti mėginys 10 min lėtai maišomas.



2.6 pav. Piknometrinis tankio nustatymas

Tankis apskaičiuojamas pagal tuščio ir užpildyto tūrio piknometro svorio skirtumą. Į piknometrą suberiamos pasvertos dalelės, likusi piknometro dalis iki žymos užpildoma vandeniu, kurio tankis pagal kambario temperatūrą žinomas.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

Čia: ρ – dalelių tankis, kg/m^3 ;

V – dalelių tūris, m^3 ;

m – mėginio masė, kg.

$$V = V_1 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_v} \quad (2.4)$$

Čia: V – dalelių tūris;

V_1 – kolbos tūris, m^3 ;

ρ_v – vandens tankis priklausomai nuo temperatūros kg/m^3 ;

m_1 – mėginio ir kolbos masė, kg;

m_2 – mėginio, kolbos ir pripildyto vandens masė, kg.

2.2.6. Kritinių stabilumo ir ardymo greičių apskaičiavimas

Apskaičiavus kritinį stabilumo greitį galima įvertinti ar dar nepasiektas ardymo greitis. Dalelių kritinis stabilumo greitis, kai dalelė išlieka stabili apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v_s = \lg \frac{8.8h}{d_s} \sqrt{\frac{2g(\rho_n - \rho)d}{3.5\rho}} \quad (2.5)$$

Čia: v_s – kritinis stabilumo greitis, m/s ;

h – pusė vamzdžio skersmens, m;

ρ_n – sėdančios dalelės tankis, kg/m^3 ;

ρ – skysčio (vandens) tankis, kg/m³;
 g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s²;
 d – nešmenų dalelės stambumas, m.

Dalelių ardymo greitis, kai dalelė atplėšiama nuo paviršiaus apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v_a = \lg \frac{8,8h}{d_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_n - \rho)d}{1,75\rho}} \quad (2.6)$$

Atlikus skaičiavimus nustatoma greičio vertė, kuriai esant prasideda ardymo procesai ir dalelė atplėšiama nuo vamzdžio paviršiaus ir transportuojama vamzdynu.

2.2.7. Dalelių hidraulinio stambumo apskaičiavimas

Dalelės hidraulinis stambumas, esant laminariniam sėdimo režimui:

$$\omega = \frac{(\rho_n - \rho)gd^2}{24\mu} \quad (2.7)$$

Čia: ρ_n – dalelės tankis, kg/m³;

ρ – vandens tankis, kg/m³;

g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s²;

d – dalelės stambumas, m;

μ – vandens dinaminės klampos koeficientas, skaičius imamas iš žinytų arba apskaičiuojamas pagal Puazeilio formulę.

Pagal Puazeilio formulę apskaičiuojamas vandens dinaminės klampos koeficientas:

$$\mu = \frac{0,00179}{1 + 0,0337t + 0,000221t^2} \quad (2.8)$$

Čia: t – vandens temperatūra, °C.

Dalelės hidraulinis stambumas esant turbulentiniam sėdimo režimui apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\omega_T = \sqrt{\frac{2g(\rho_n - \rho)d}{1,75\rho}} \quad (2.9)$$

Formulė leidžia įvertinti sunkio ir dalelės pasipriešinimo jėgas judant, kai jos išsilygina gaunamas sėdimo greitis.

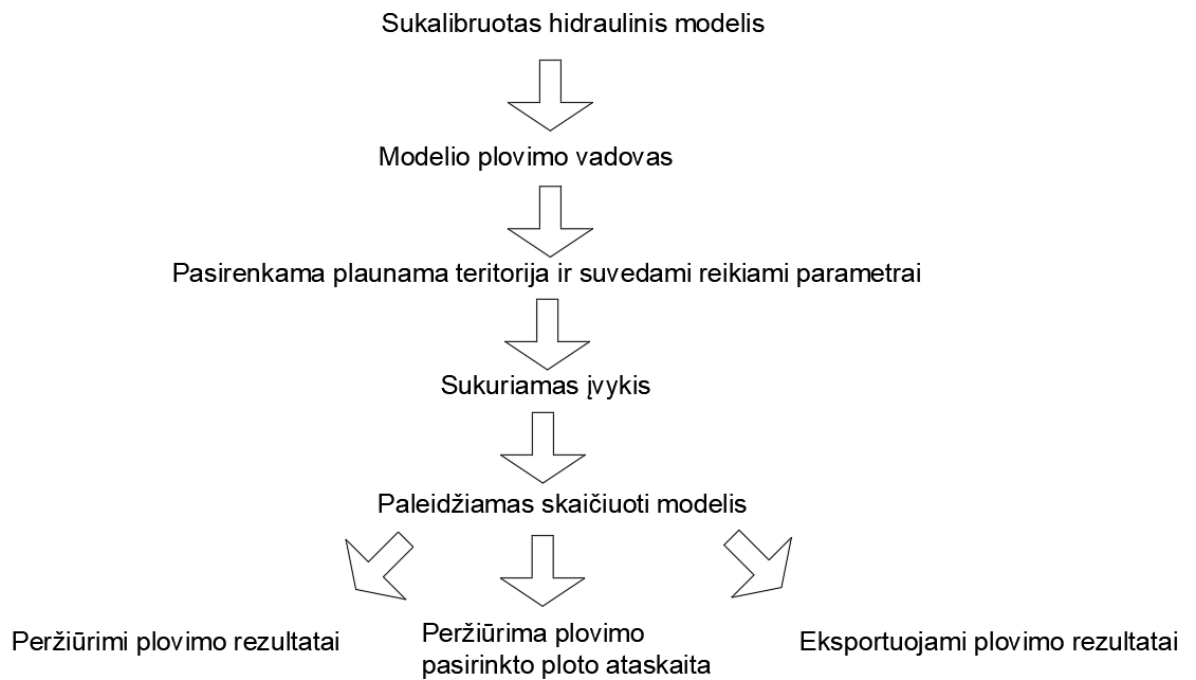
2.2.8. Plovimo modeliavimas

Naudojant Bentley „WaterGEMS“ programa galima imituoti plovimu būdus, kurie naudojami pagerinti vandens kokybę ir padidinti vamzdyno pralaidumą. Tinklo plovimas nagrinėjamas keletu modeliavimo atvejų:

- Standartinis plovimas, įvertinant reikiamo greičio užtikrinimą.
- Vienakryptis plovimas, įvertinant reikiamą greičio užtikrinimą.

Standartinis plovimas užtikrinant greitį tinkle, pasižymi paprastumu, nes tokio plovimo metu atidaromas tik vienas hidrantas ir jokios tinklo sklendės nėra uždaromos. Rekomenduojamas pasiekti greitis plovimo metu siekia nuo 0,6 m/s iki 2 m/s.

„WaterGEMS“ programos veikimo principai norint imituoti plovimą programinėje aplinkoje (2.7 pav.). Programos aplinkoje sukuriamas įvykis „event“. Sukurti įvykiai gali būti įprasti ir vienakryptiai. Naudojant įprastinio įvykio scenarijų reiškia, kad bus atidaromas vienas hidrantas be vožtuvų valdymo. Programos naudotojas gali pasirinkti vamzdyno plovimo mazgų norimus analizuoti kiekius ar konkrečius hidrانتus. Plovimo zona modelyje yra įvykių rinkinys, kuris susietas su tam tikra sistemos dalimi. „WaterGEMS“ programa gali apskaičiuoti rezultatus atkartojant dviejų tipų plovimus įprastą ir vienakryptį. Priklausomai nuo norimų pasiekti greičių ir tinklo išdėstymo pasirenkamas plovimo tipas. Rekomenduojama, imituojant plovimą pirmiausia sumodeliuoti situaciją įprasto plovimo ir vėliau kur plovimas neefektyvus, naudoti vienakryptį plovimą.



2.7 pav. Plovimo modeliavimo veiksmų eiliškumas

Atliekant skaičiavimus modelyje jis turi būti sukalibruotas ir atitinkantis realius gyventojų suvartojimus, taip pat sukalibruotas ir slėgis lyginant su realiais slėgio matavimais tinkle. Kai modelis atitinka šiuos reikalavimus galima atlikti kitus skaičiavimus. Svarbu įvertinti realybėje esančius veiksnius, tokius kaip vykdomos tinklų rekonstrukcijos, avarijos, kiti planiniai darbai, kurių tinkamai neįvertinus ir neįvedus į modelį gaunami klaidingi skaičiavimai.

Planuojant vienakryptį plovimą reikalingos uždaryti reikiamos sklendės modelyje, kad pasirinkta tinklo atkarpa būtų plaunama didesniu greičiu ir vanduo tekėtų tik viena kryptimi ir srautas neišsišakotų į tinklo atšakas. Šis būdas turėtų būti taikomas, kai standartinio plovimo metu negalima užtikrinti reikalingo greičio nuosėdoms pašalinti.

Remiantis literatūroje pateikta informacija drumstumą hidrauliniame modelyje galima sekti naudojantis chloro likučio stebėjimo funkciją vandentiekio sistemoje.

3. TYRIMO REZULTATAI

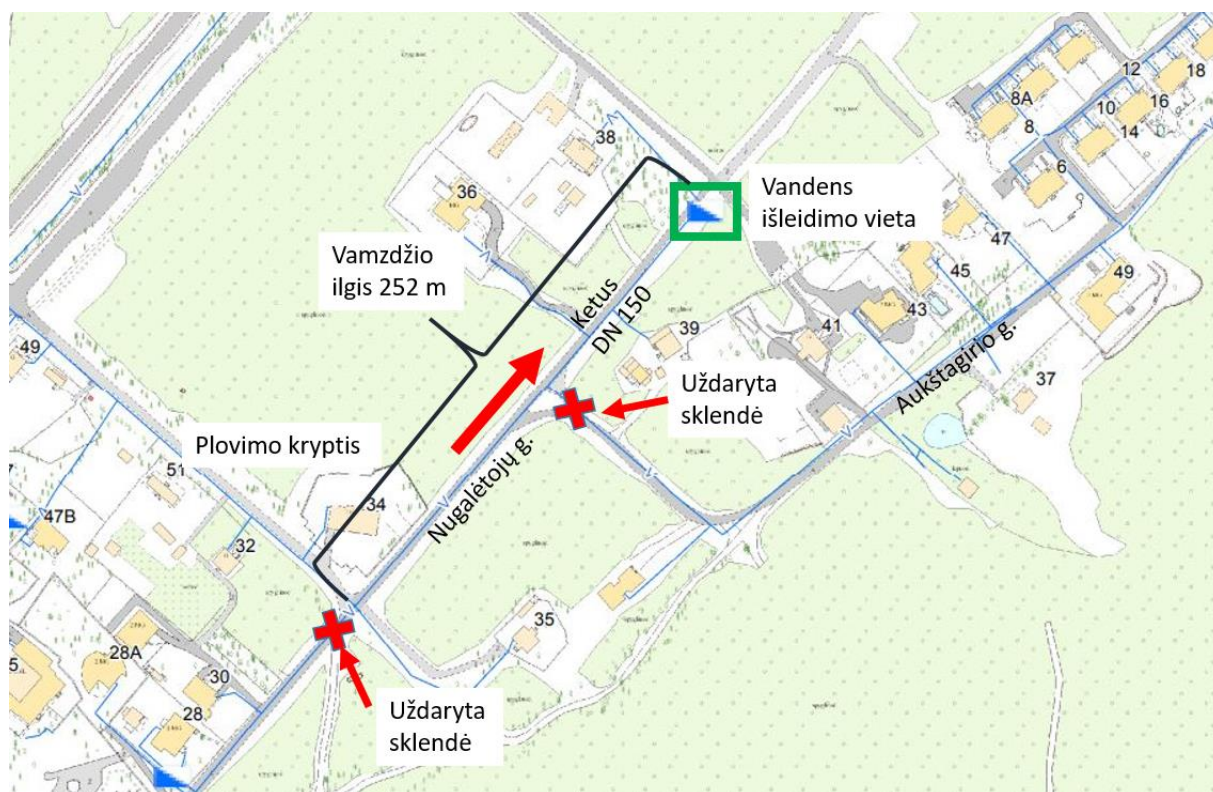
3.1. Mėginių ėmimo vietos, plovimo schemos

Pateiktose vandentiekio tinklo plovimo schemose nurodoma tinklo plovimo kryptis, plaunamo vamzdžio skersmuo, atkarpos ilgis, taip pat schemose pažymėtos plovimo metu uždarytos sklendės ir vandens išleidimo vietos. Vandentiekio tinklo plovimas laikomas sėkmingu kai plovimo metu užtikrinamas ne mažesnis nei 0,9 m/s (Van Bel et al., 2019).

Galimose vandentiekio tinklo vietose pamatuotas statinis slėgis prieš plovimą plaunamos atkarpos pradžioje ir išleidimo vietoje. Prieš atliekant tinklo modeliavimą atliekamas patikrinimas, ar modelis tinkamai sukalibruotas su realiai išmatuotomis slėgio reikšmėmis vandentiekio tinkle. Palyginus hidraulinio modelio rezultatus su išmatuotais pasitikrinama ar skirtumas tarp duomenų neviršija 10 %. Jeigu paklaida mažesnė, daroma prielaida, kad modelis tinkamai sukalibruotas ir atliekami plovimo skaičiavimų uždaviniai. Nustačius, jog nesutapimas didesnis nei 10 %, atliekamas hidraulinio modelio kalibravimas. Lyginant modelyje gautus rezultatus su realiai išmatuotais vandentiekio tinkle, nesutapimų įprastai atsiranda dėl nekorektiškai įvestų parametrų (pvz., siurblinės palaikomas slėgis zonoje, klaidingas vamzdynų jungimas, hidrauliniame modelyje klaidingai priskirto vandens vartotojo adreso).

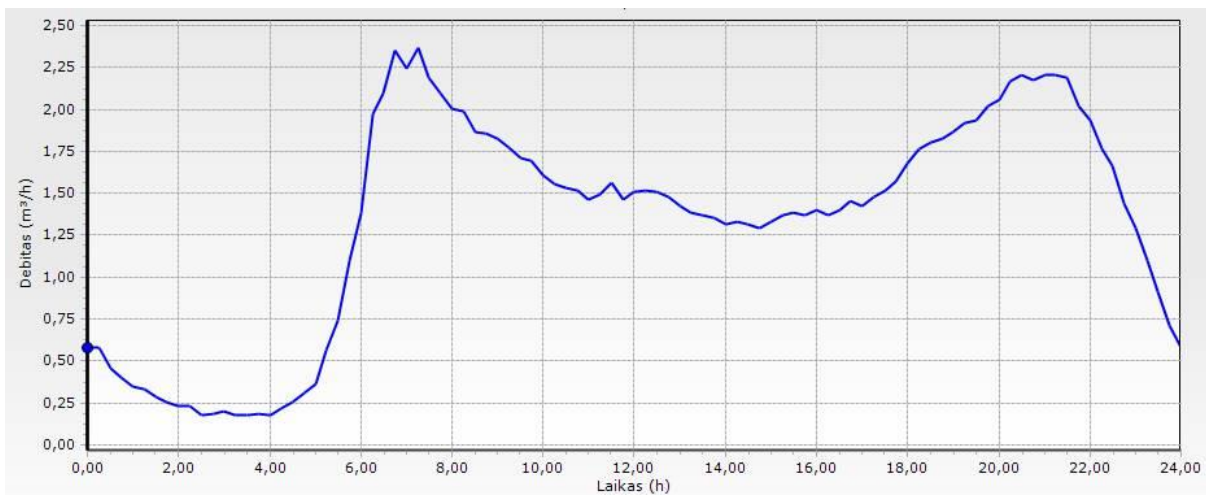
Nugalėtojų gatvė

3.1 paveiksle pateikta Nugalėtojų gatvės plovimo schema. Buvo plaunama įprastu būdu, tai yra, plaunant atkarpas vandens išleidimo vietoje atidarant hydrantą. Taip pat šią plovimo schemą galima būtų priskirti ir vienakrypčiam plovimui, nes uždarytos žiedinio tinklo sklendės priverčia vandenį tekėti tik viena kryptimi, kad į vamzdynus, besijungiančius su plaunamu vamzdžiu, nepatektų drumstas vanduo.



3.1 pav. Nugalėtojų gatvės plovimo schema

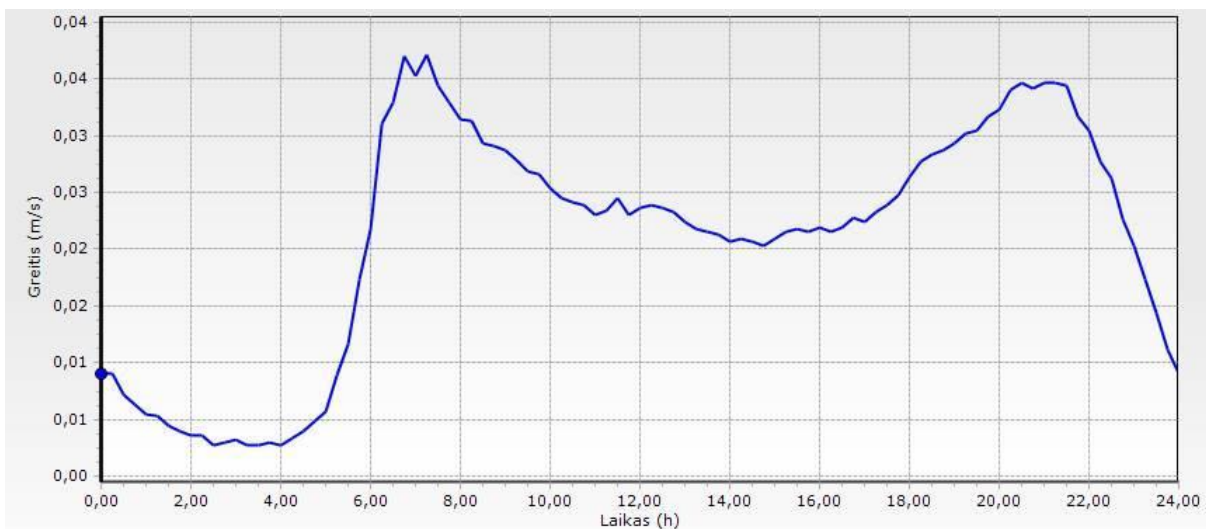
Plaunamos atkarpos medžiaga ketus, skersmuo DN 150. Vandentiekio tinklas įrengtas 1966 metais, o tai reiškia, kad vamzdžio amžius siekia 56 metus. Vanduo nagrinėjamoje atkarpoje tiekiamas iš Antavilių II kėlimo siurblinės. Vandens kiekis tekantis atkarpa pateiktas (3.2 pav.).



3.2 pav. Vandens kiekis tekantis Nugalėtojų g.

Faktinis išmatuotas statinis slėgis išleidimo vietoje, hidrante, yra 4,4 bar. Lyginant su hidraulinio modelio 4,44 bar, nesutampantis slėgis nėra žymus, paklaida nesiekia nei 1 % todėl daroma prielaida, jog hidraulinis modelis sukalibruotas tinkamai.

Kaip matoma iš 3.3 pav., paros metu, didžiausias valandinis debitas neviršija $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, tuomet greitis vamzdyje yra $0,04 \text{ m/s}$. Mažiausias debitas teka naktį, tuomet vandens greitis vamzdyje mažesnis nei $0,01 \text{ m/s}$ (3.3 pav.).

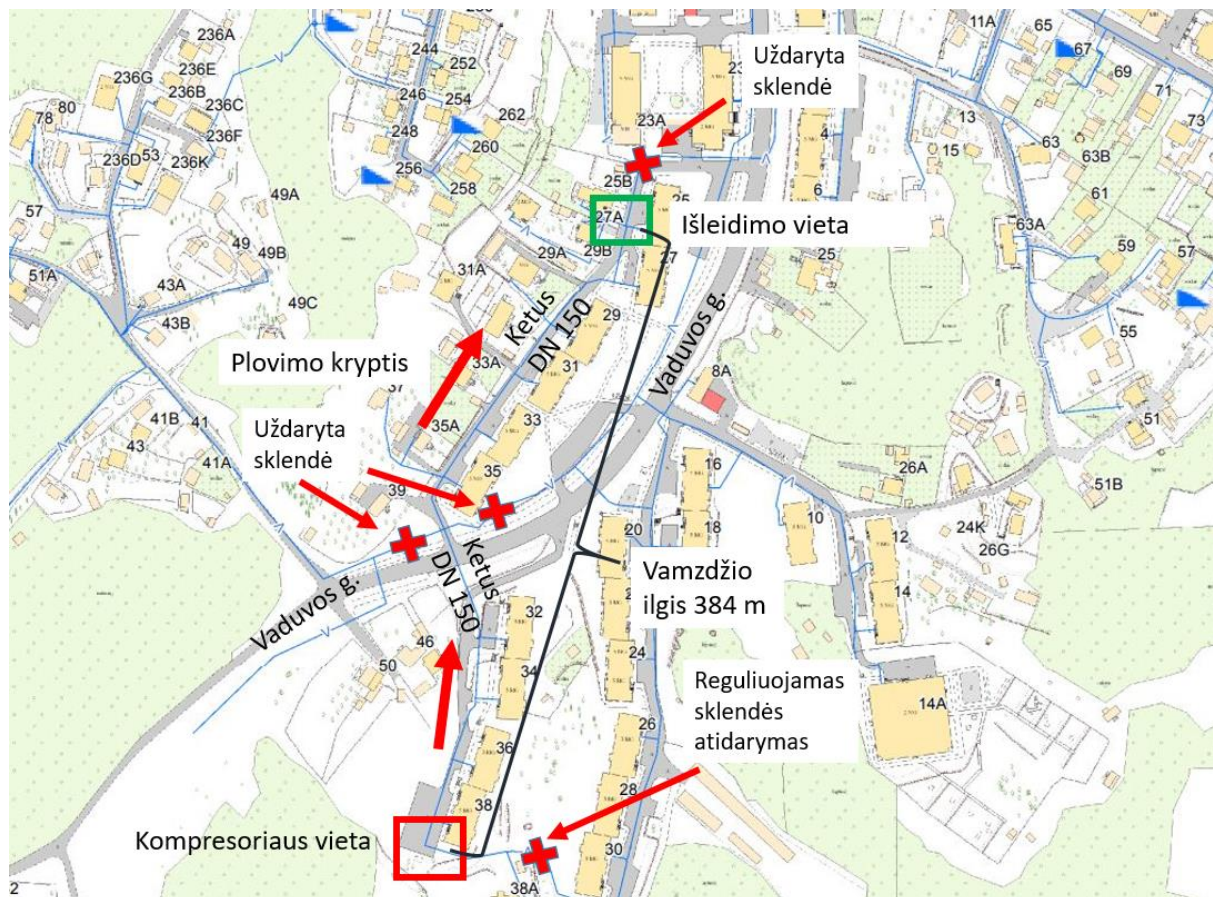


3.3 pav. Vandens greičiai vamzdyne tipine diena

Hidrauliniu modeliu nustatyta, jog didžiausias vandens kiekis, kurį galima išleisti per hidrantą, plaunamoje atkarpoje yra $16,6 \text{ l/s}$ arba $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Plovimo metu greitis atkarpoje padidėja iki $0,95 \text{ m/s}$, o vandeniui pasikeisti vamzdyne vieną kartą reikia apie 5 minučių. Įvertinant greičio padidėjimą ir jo pasiekiamą vertę galima teigti, kad toks plovimas sėkmingai pašalina nuosėdas nuo vamzdžių sienelių.

Vaduvos gatvė

Vaduvos gatvėje vandentiekio tinklo plovimas vykdytas vanduo–oras metodu, tai pat reikia pažymėti, kad siekiant efektyvesnio nuosėdų pašalinimo iš tinklo plovimas vykdytas priešinga kryptimi įprastinei vandens tekėjimo kryptčiai. Plovimo scheme pažymėtos uždarytos sklendės, kompresoriaus vieta, kurio pagalba oras tiekiamas į tinklą (3.4 pav.).

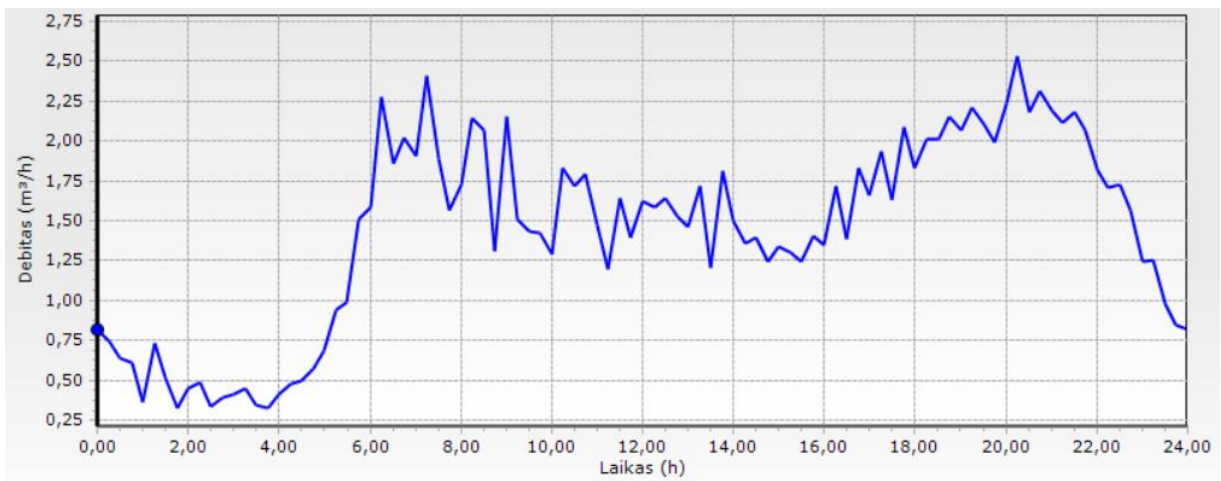


3.4 pav. Vaduvos gatvės tinklo plovimo schema

Plaunamos atkarpos medžiaga ketus, skersmuo DN 150. Dalies tinklo 177 metrų įrengimo metai 1992 metai, o likusi atkarpa 207 metrai pakloti 1998 metai.

Realiai išmatuotų statinių slėgių vertės nagrinėjamoje atkarpoje ir hidrauliškai sumodeliuotų skyrėsi 7,2 %, o tai neviršija 10 %, todėl priimama, kad modelis sukalibruotas tinkamai ir galima spręsti vandentiekio tinklo plovimo uždavinį.

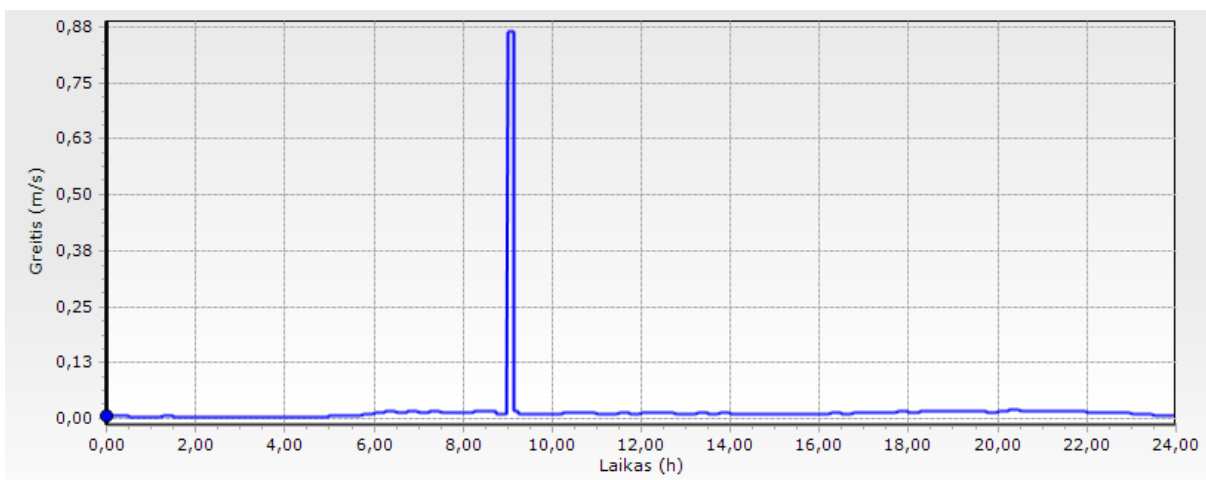
Grafike (3.5 pav.) pateiktas tipinės dienos metu tekantis vandens kiekis vamzdžiu.



3.5 pav. Debitas tekantis plauna atkarpa įprastą dieną

Didžiausios suvartojimo valandos debitas siekia, tik $2,50 \text{ m}^3/\text{h}$, greitis vamzdyne $0,04 \text{ m/s}$, o nakties valandomis apie $0,01 \text{ m/s}$.

Atkartoti hidrauliniam modelyje vanduo–oras būdu plaunamą vamzdyną nėra galimybės, kadangi programoje nėra funkcijų imituojančių kompresoriaus tiekiamo oro įvedimą į tinklą, todėl modeliuojama uždarinėjant sklendes kaip ir realaus plovimo metu sudarant vienakrypčio plovimo sąlygas. Žemiau (3.6 pav.) pateiktas greičio pokytis plovimo metu.

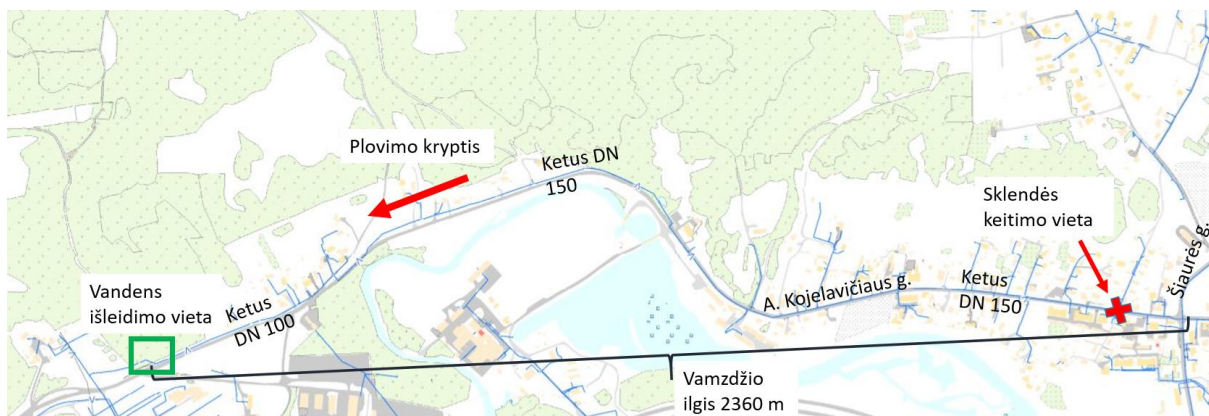


3.6 pav. Vandens greičio padidėjimas plovimo metu

Kadangi plovimas vykdomas priešinga kryptimi įprastiniam vandens tekėjimui, dėl reljefo pokyčių galimas vandens išleidimas per hidrantą tik apie 15 l/s arba $54 \text{ m}^3/\text{h}$. Plovimo metu greitis nuo įprastinio dienos greičio vamzdyne mažesnio nei $0,1 \text{ m/s}$, padidėja iki $0,85 \text{ m/s}$. Remiantis hidrauliniu modeliu vieną kartą pasikeisti vandeniui nagrinėjamame vamzdyne reikia 8 minučių.

A. Kojelavičiaus gatvė

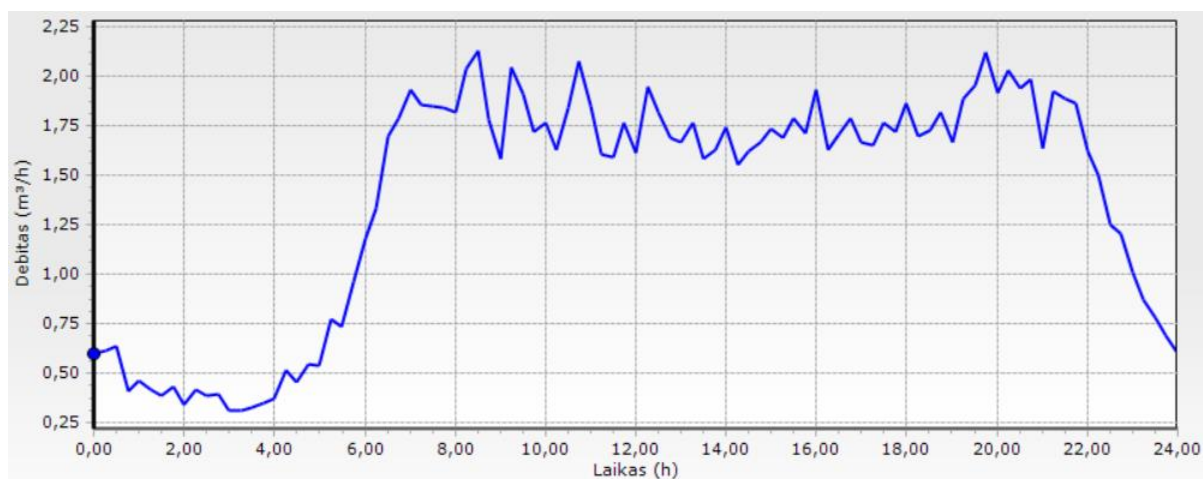
A. Kojelavičiaus gatvėje vandentiekio tinklo plovimas vykdytas standartiniu būdu. Plovimo schema pateikta (3.7 pav.), plaunamos atkarpos ilgis 2390 metrų iš jų 450 metrų sudaro DN 100 vamzdis statybos metai 1980 likusi tinklo atkarpa DN 150 skersmens.



3.7 pav. A. Kojelavičiaus gatvės plovimo schema

Prieš atliekant modeliavimą patikrinamas slėgių skirtumas tarp išmatuotų ir sumodeliuotų slėgių nagrinėjamoje atkarpoje. Realiai išmatuotas slėgis plovimo atkarpos pradžioje 5,6 baro, o išleidimo vietoje 5,5 baro. Palyginus hidrauliškai sumodeliuotą slėgį nagrinėjamos atkarpos pradžioje 5,67 bar ir 5,63 išleidimo vietoje gaunamas 2,3 % nesutapimas su faktiniais slėgiais, kuris priimtinas toliau atlikti skaičiavimus.

3.8 paveiksle pateiktas paros vandens kiekis tekantis vamzdynu, iš kurio matyti, kad didžiausio suvartojimo valandą debitas neviršija 2,25 m³/h.

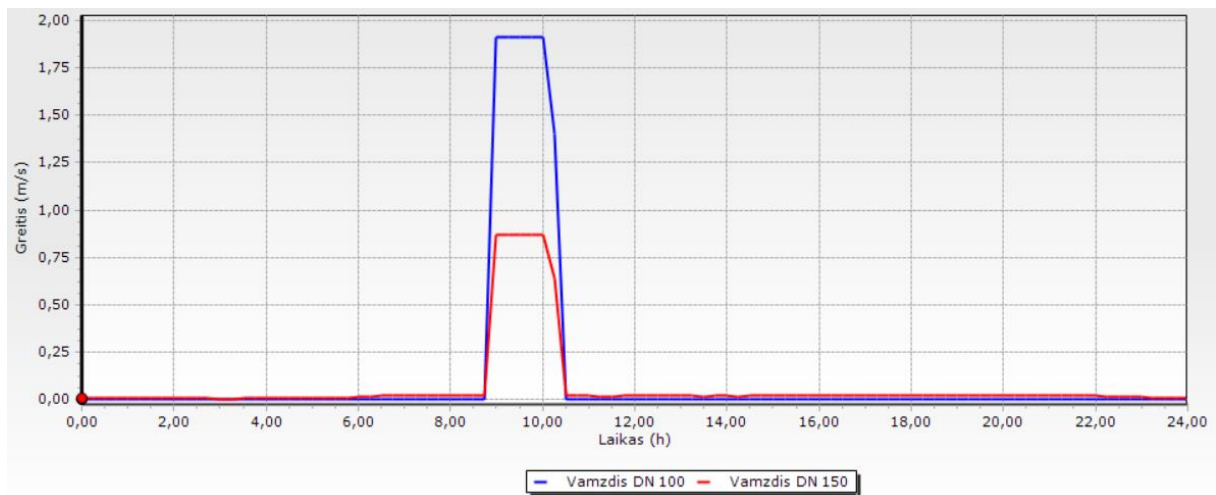


3.8 pav. Vandens kiekis tekantis A. Kojelavičiaus gatve

Kadangi tinklo skersmuo DN 150, o didžiausias vandens kiekis tekantis vamzdynus tik 2,25 m³/h, tuomet greitis tinkle 0,035 m/s, o nakties metu tik 0,01 m/s.

Plovimas modeliuojamas, kaip ir realiu laiku vykdytas 9:00 h. Hidrauliniam modelyje per atidarytą hidrantą vandens išleidžiama 15 l/s arba 54 m³/h.

Slėgis pradiniame plovimo taške atidarius hidrantą sumažėja tik 0,1 baro ir siekia 5,4 baro, nes matavimo taškas yra arčiausiai žiedinio tinklo. Greičiai vamzdynuose DN 100 ir DN 150 (3.9 pav.), kuriuose matomi greičio pokyčiai plovimo metu.

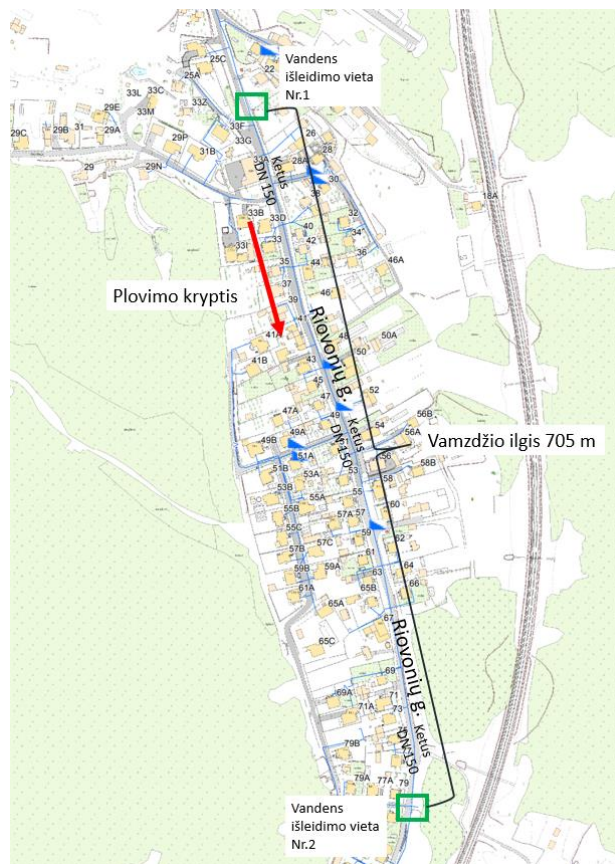


3.9 pav. Greičiai plovimo metu

Gauti rezultatai, kad plovimo metu greitis DN 150 vamzdyje padidėja iki 0,88 m/s, DN 100 skersmens atkarpoje išauga iki 1,91 m/s, kas leidžia užtikrinti tinkamą plovimo greitį, reikiamą pašalinti nuosėdų dalelėms. Hidraulinio modeliavimo rezultatai parodė, kad nuo plovimo taško pradžios iki išleidimo vietos, norint, kad vanduo vamzdyne pasikeistų reikia vykdyti plovimą 41 minutę.

Riovonių gatvė

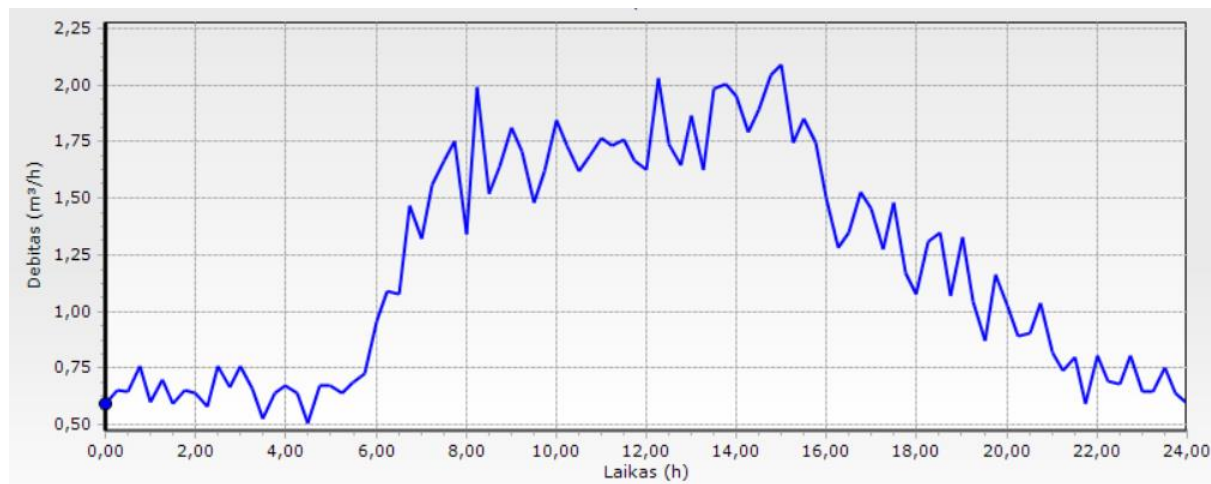
Riovonių gatvėje tinklo plovimas vykdytas standartiniu būdu išleidžiant vandenį plaunamos atkarpos pabaigoje (3.10 pav.). Šios plaunamos atkarpos ilgis 705 metrų, tinklo medžiaga ketus, skersmuo DN 150, tinklo įrengimo metai 1971.



3.10 pav. Riovonių gatvės plovimo schema

Realiai išmatuotas slėgis plovimo atkarpos pradžioje siekė 3,1 baro, o išleidimo vietoje statinis vandens slėgis buvo 1,9 baro. Lyginant su gautais slėgiais hidrauliname modelyje 2,95 baro nagrinėjamos atkarpos pradžioje ir 1,80 baro išleidimo vietoje. Gautas skirtumas tarp sumodeliuotų ir išmatuotų slėgių yra 5,3 %, toks skirtumas yra priimtinas ir galima atlikti plovimo skaičiavimo uždavinį.

Hidrauliname modelyje ties plovimo atkarpos pradžios tašku gautas gyventojų paros suvartojimo grafikas (3.11 pav.), jame matomas debito kitimas laike.



3.11 pav. Vandens kiekis Riovonių g.

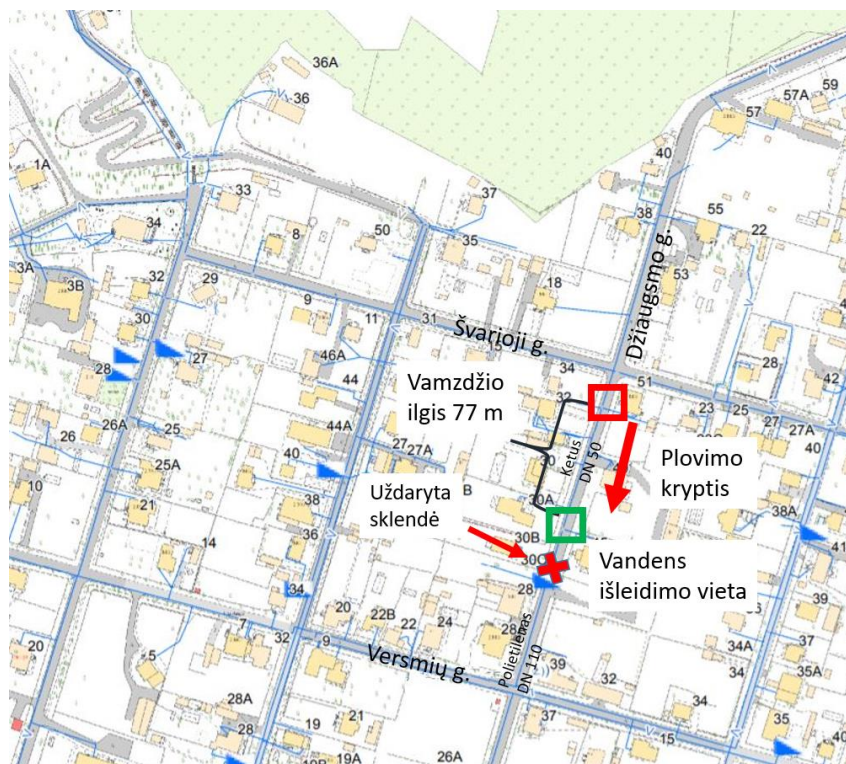
Iš grafiko matoma, kad debitas didžiausio suvartojimo valandomis neviršija $2 \text{ m}^3/\text{h}$, o tai reiškia, kad greitis vandentiekio vamzdyne $0,03 \text{ m/s}$, o nakties valandomis $0,01 \text{ m/s}$. Išmatuotas realus vandens kiekis išleidžiamas per hydrantą buvo $11,2 \text{ l/s}$ arba $40 \text{ m}^3/\text{h}$, duomenys suvedami į modelį.

Gauti rezultatai, jog plovimo metu greitis vamzdyne išaugo iki $0,63 \text{ m/s}$. Hidraulinio modeliavimo rezultatai parodė, jog vanduo vamzdyne pasikeistų vieną kartą reikia tinklą plauti 19 minučių.

Džiaugsmo gatvė

Džiaugsmo gatvėje vykdytas plovimas po planinių vandentiekio tinklo darbų, tai yra po uždaromosios armatūros pakeitimo. Plaunamos atkarpos tinklo skersmuo DN 50, statybos metai 1966, medžiaga ketus (3.12 pav.).

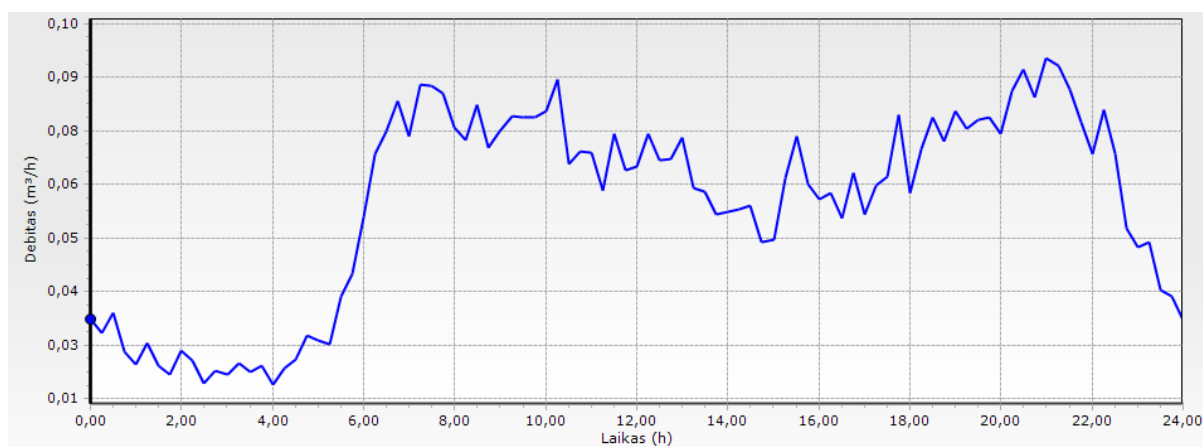
Džiaugsmo gatvės atkarpoje tarp Švariosios gatvės ir Versmių gatvės, tinklo skersmuo pusė šios atkarpos ketus DN 50 ir likusi atkarpos dalis polietilenas DN 110.



3.12 pav. Džiaugsmo gatvės tinklo plovimo schema

Atlikti realūs slėgio matavimai Švariosios gatvės ir Džiaugsmo gatvių sankirtoje esančiame hidrante, matavimų metu užfiksuotas 2,4 baro slėgis, o hidrauliniame modelyje gautas slėgis lygus 2,21 baro skirtumas tarp slėgių 7,9 %, kuris leistinas ir galima atlikti skaičiavimus. Taip pat išmatuotas slėgis išleidimo vietoje prieš plovimą realiai užfiksuota slėgio vertė buvo 2,5 baro o sumodeliuoto 2,31 baro nesutapimas 7,6 %, hidrauliniame modelyje ir realiai išmatuotame vandentiekio tinkle nesutapimai neviršija 10 % priimama, kad modelis sukalibruotas tinkamai.

Paveiksle (3.13 pav.) pateiktas vandens kiekis tekantis tipine diena, šis suvartojimo grafikas gautas hidrauliniame modelyje ties plovimo atkarpos pradžios tašku.



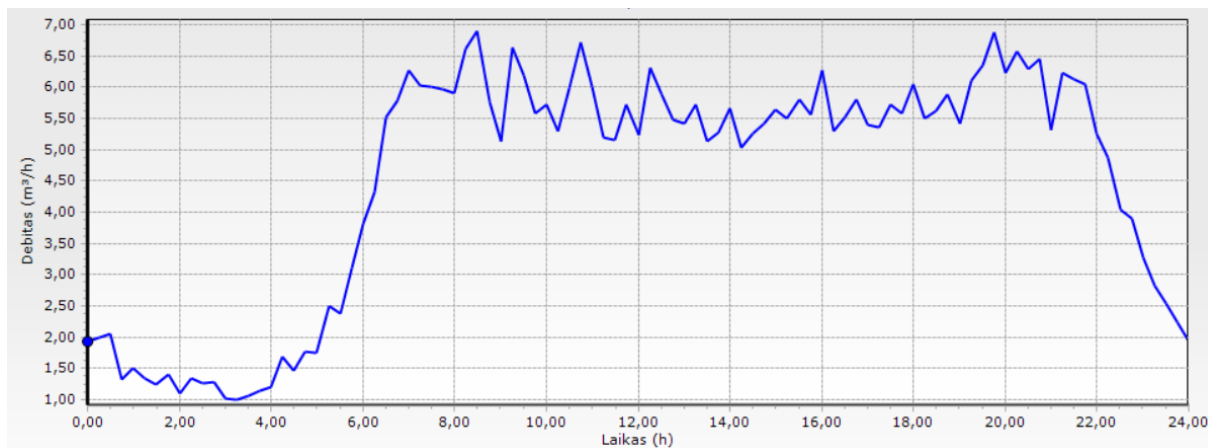
3.13 pav. Vandens kiekis tekantis Džiaugsmo gatve

Nagrinėjamo tinklo skersmuo tik DN 50, tačiau greičiai vamzdyne įprastos dienos vartojimo atveju neviršija 0,01 m/s.

Kadangi nagrinėjama atkarpa yra žiedinio tinklo dalis, remiantis hidrauliniu modeliu, kuriame vandens kryptys pažymėtos, jog Džiaugsmo gatvėje vanduo tiekiamas iš dviejų pusių, tai yra dalis gatvės vandenį gauna iš Švariosios g. likusi dalis iš Versmių g. (3.14 pav.).

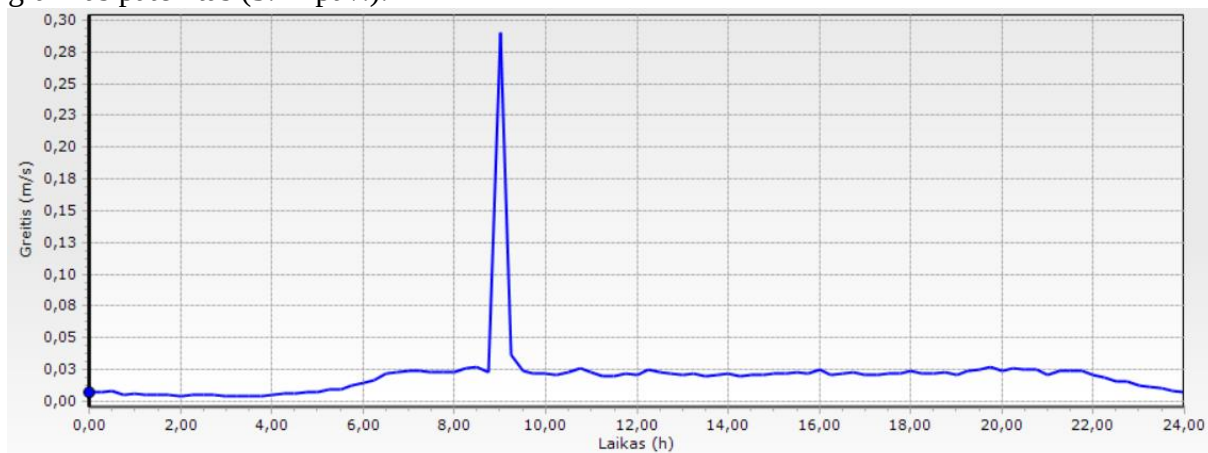
4 barai. Lyginant su sumodeliuotu slėgiu tipinę dieną nagrinėjamoje atkarpoje slėgiai buvo 4,24 baro plaunamos atkarpos pradžioje ir 3,9 baro išleidimo vietoje. Atsižvelgiant, jog realiai išmatuoto ir hidrauliškai sumodeliuoto slėgio skirtumas neviršija 10 % ir siekia tik 2,5 % priimama, kad galima atlikti plovimo modeliavimo uždavinį.

Analizuojamos atkarpos skersmuo DN 300, žvelgiant į sumodeliuotą dienos suvartojimą matoma, kad didžiausią suvartojimo valandą debitas nesiekia 7 m³/h, o tai reiškia vamzdyje susidaro tik 0,03 m/s greitis, nakties metu greitis vamzdyje 0,01 m/s (3.16 pav.).



3.16 pav. Debitas tekantis Linksmojoje gatve

Atsižvelgiant į didžiausią galimą išleisti vandens kiekį per hidrantą esant nagrinėjamo esančiam slėgiui priimama, jog per hidrantą išleidžiama 20 l/s arba 72 m³/h. Gaunamas greičių grafikas pateiktas (3.17 pav.).



3.17 pav. Greitis plovimo metu

Atliktas plovimo modeliavimas parodė, jog plaunant DN 300 vamzdį plovimo metu jame greitis nesiekė 0,30 m/s. Atsižvelgiant į susidariusio greičio vertę, toks plovimo būdas naudojant standartinį tinklo negalėjo užtikrinti reikiamo plovimo greičio ir nuosėdų pašalinimo nuo vamzdžių sienelių. Tokio plovimo metu buvo išleistas drumstas vanduo iš vamzdžio, tačiau nebuvo pašalintos prikibusios nuosėdos prie sienelių.

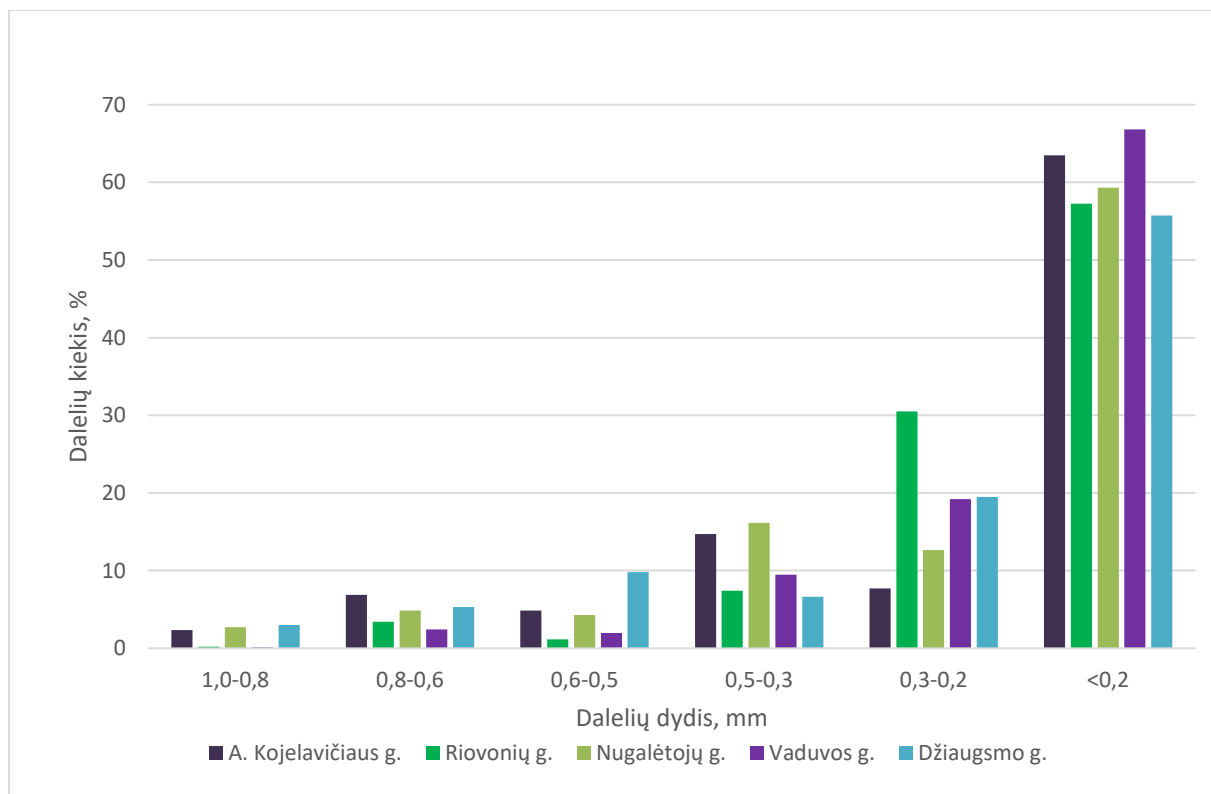
3.2. Tinklo plovimo dalelių granulimetrinės sudėties rezultatai

Nustatytas proporcinis dalelių kiekis ir pasiskirstymas frakcijomis skirtinguose plovimo vandens mėginiuose. Vandentiekio tinklo plovimo vandenyje esančių nuosėdų granulimetrinės sudėties rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Granulimetrinė sudėtis

Dalelių dydis, mm	Granulimetrinė sudėtis									
	A. Kojelavičiaus g.		Riovonių g.		Nugalėtojų g.		Vaduvos g.		Džiaugsmo g.	
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
> 1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0-0,8	0,0754	2,34	0,0041	0,22	0,0905	2,71	0,0023	0,13	0,0410	3,02
0,8-0,6	0,2218	6,87	0,0645	3,43	0,1619	4,85	0,0423	2,43	0,0723	5,33
0,6-0,5	0,1574	4,88	0,0218	1,16	0,1436	4,30	0,0342	1,96	0,1330	9,80
0,5-0,3	0,4748	14,71	0,1400	7,44	0,5388	16,14	0,1650	9,46	0,0901	6,64
0,3-0,2	0,2490	7,72	0,5740	30,52	0,4231	12,68	0,3350	19,22	0,2647	19,50
<0,2	2,0485	63,48	1,0766	57,24	1,9800	59,32	1,1646	66,80	0,7560	55,71
Suma	3,2269	100	1,8810	100	3,3379	100,00	1,7434	100,00	1,3571	100,00

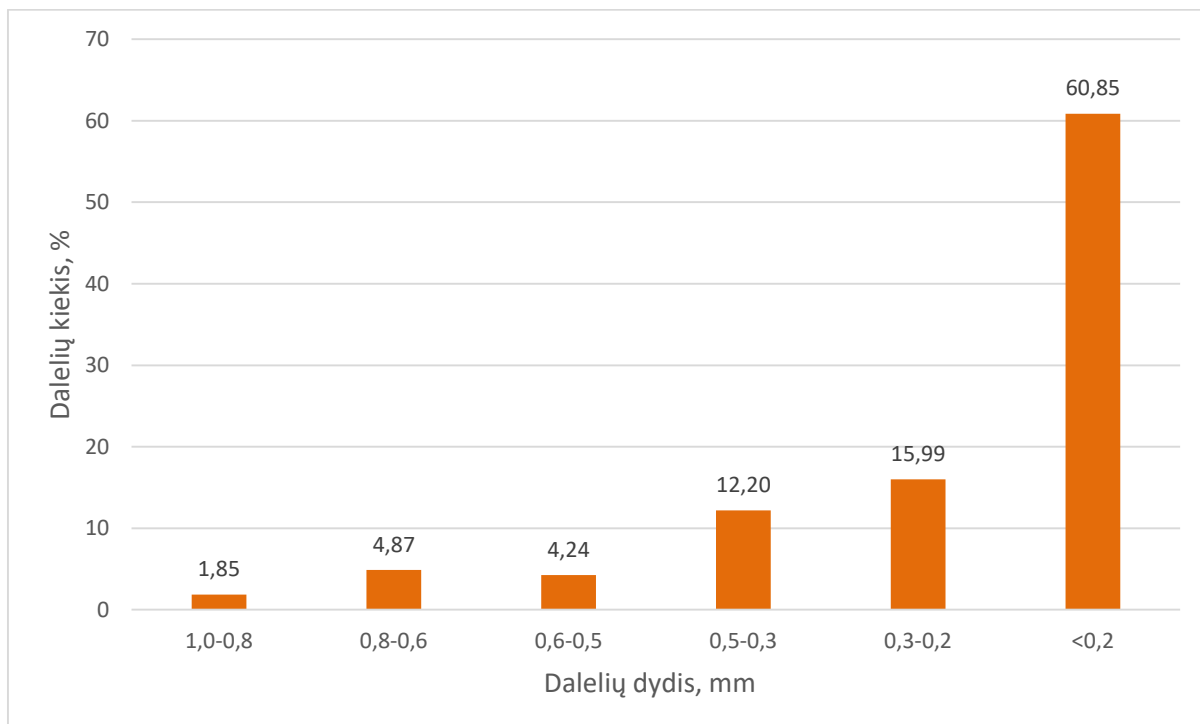
Iš gautų duomenų, kurie pateikti lentelėje matoma, kad didžiausia dalį plovimo vandenyje sudaro nuosėdų kurių dydis mažesnis nei 0,2 mm. Žemiau esančiame granulimetrinės sudėties grafike pateikta granulimetrinės sudėties atvaizdavimas skirtinguose mėginiuose (3.18 pav.).



3.18 pav. Dalelių dydžio pasiskirstymas skirtinguose mėginiuose

Analizuojant mėginių A. Kojelavičiaus g., Riovonių g., Aukštagirio g., Vaduvos g., Džiaugsmo g., dalelių granulimetrinę sudėtį matoma, kad dalelės, kurių dydis nuo 1,0 iki 0,8 mm visuose mėginiuose sudaro iki 3 %. Lyginant Riovonių g. ir Vaduvos g. su kitų gatvių mėginiais, kai dalelių dydis nuo 1,0 – 0,8 mm yra virš 10 kartų mažiau, o dalelių dydžiui 0,8 – 0,6 mm ir 0,6 – 0,5 mm skirtumai su kitomis gatvėmis svyruoja nuo 1,5 karto iki 8 kartų. Kai nuosėdų dalelių dydis 0,3 – 0,2 mm šiame intervale išsiskiria Riovonių gatvėje paimto mėginio sudaro dalelės 30 % lyginant su A. Kojelavičiaus gatve tai beveik 4 kartus daugiau nuosėdų, kurių dydis 0,3 – 0,2 mm.

Visų analizuotų mėginių dalelių granulimetrinės sudėties suma pateikta 3.19 paveiksle.



3.19 pav. Visų mėginių granulimetrinė sudėtis

Analizuojant visų paimtų mėginių dalelių granulimetrinę sudėties stambumo pasiskirstymą pastebimas dalelių kiekio augimas mažėjant jų dydžiui. Mažiausių dalelių, tai yra mažesnių už 0,2 mm bendras kiekis viršija 60 %, tai yra 3,5 karto daugiau nei 0,3–0,2 mm dydžio. Dalelių, kurių dydis nuo 0,5 iki 0,3 mm buvo nustatyta, kad yra 12,20 %, o nuo 0,8–0,6 mm ir 0,6–0,5 mm buvo gauta virš 4 %. Didžiausių dalelių kurių skersmuo 1,0–0,8 mm sudarė tik 1,85 % viso kiekio. Mažiausių ir didžiausių dalelių kiekis mėginyje skiriasi daugiau nei 32 kartus. Galima teigti, kad tinkle esančių nuosėdų dalelių kiekį sudaro daugiau nei pusė dalelių kurios yra mažesnės už 0,2 mm.

3.3. Nuosėdų kiekis vandentiekio tinkle

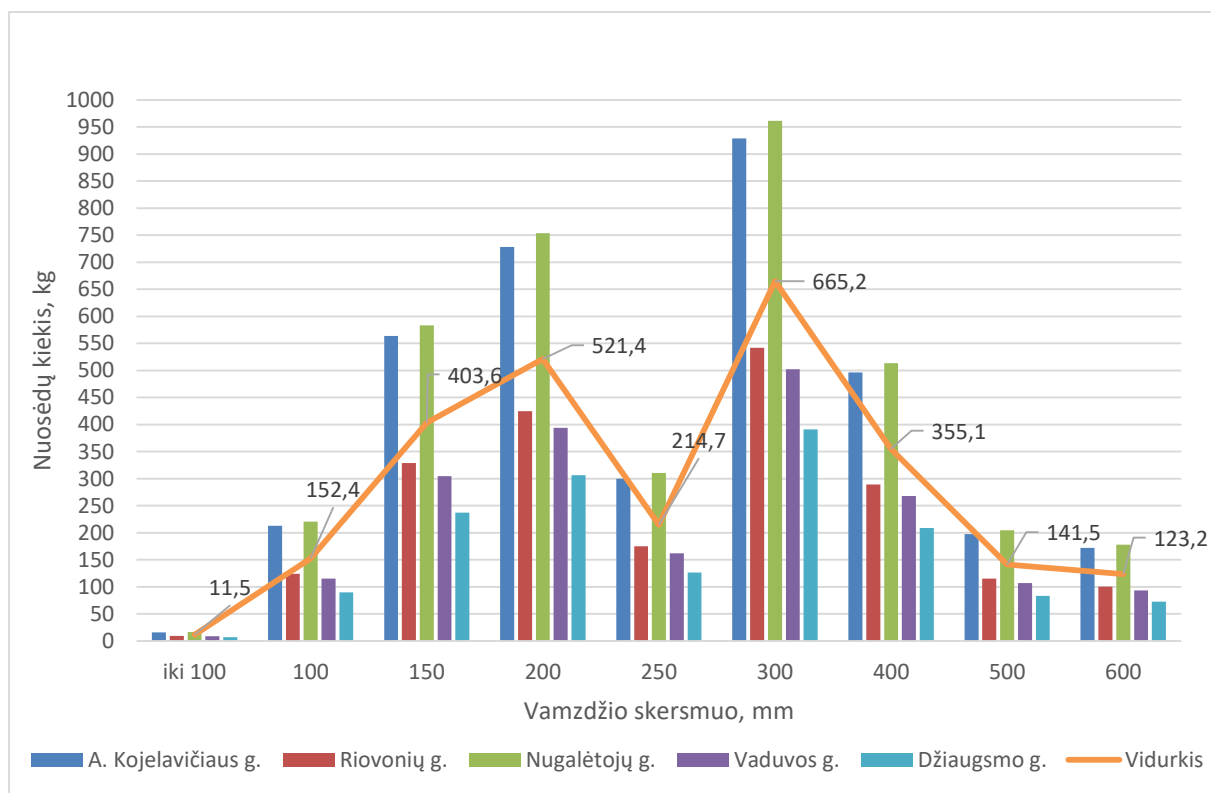
Vilniaus mieste yra paklota apie 1624 km vandentiekio tinklų iš jų 44 % ketus, tad 714 km tinklų Vilniaus mieste esančių vandentiekio tinklų sudaro ketiniai vamzdžiai. Tinklų pasiskirstymas pagal skersmenis, duomenys pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Ketinių vamzdžių ilgiai

Vamzdžio skersmuo, mm	Vamzdžio ilgis, km
iki 100	50,6
100	168,0
150	197,8
200	143,7
250	37,9
300	81,5
400	24,5
500	6,2
600	3,8

Pagal turimus duomenis matoma, kad DN 150 ketinių vamzdžių eksploatuojama daugiausiai 197,8 kilometrai, o mažiausiai DN 600 tik 3,8 kilometro.

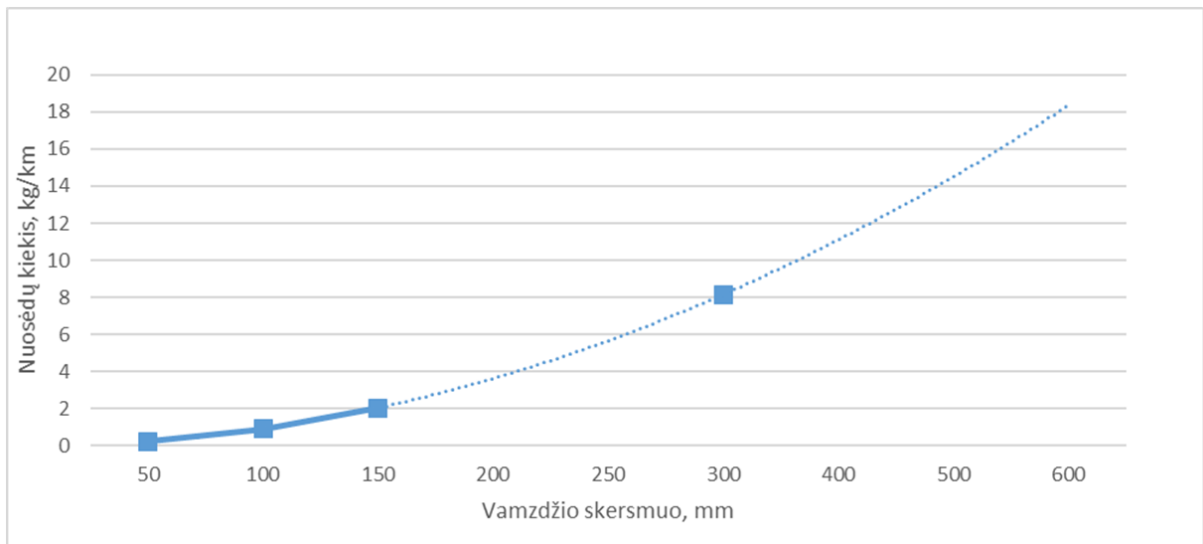
Ištirus plovimo vandens mėginius paimtus iš vandentiekio tinklo, žinoma, kiek nuosėdų yra išplaunama 20 litrų mėginyje, atlikus skaičiavimus gauti duomenys pateikti 3.20 paveiksle.



3.20 pav. Nuosėdų kiekis ketiniuose vamzdžiuose

Ištirti mėginiai, paimti iš ketinių vamzdžių, eksploatuojamų keturiose skirtingose vandens tiekimo zonose. Pagal gautus duomenis atlikti skaičiavimai ir nustatyti teoriniai nuosėdų kiekiai ketiniuose vamzdžiuose. Apskaičiuota, kad iš DN 100 vamzdinių gali būti išplauta nuo 89 iki 220 kg nuosėdų, o iš DN 150 didžiausias galimas pašalinti dalelių kiekis siekia 583 kg. Lyginant su DN 400 vamzdinio ilgiai skiriasi 3,3 karto, o galimų išplauti nuosėdų kiekiai beveik du kartus. Apskaičiuoti nuosėdų kiekiai DN 500 ir DN 600 vamzdiniuose, nors šių eksploatuojamų vamzdžių ilgiai skiriasi 1,7 karto, tačiau lyginant galimą išplauti nuosėdų kiekį iš šių skersmenų skirtumas siekia tik apie 13 %. 3.20 paveikslo grafike pateikta nuosėdų vidurkio suma. Matoma, jog didėjant vamzdinio diametro nuo DN 100 iki DN250 didėja ir išplaunamų nuosėdų kiekis. Tinklo, kurio skersmuo DN 250 vidutiniškai gali būti išplauta 214 kg. Didžiausia vidurkio reikšmė pasiekama, kai vamzdinio skersmuo DN 300 ir siekia 665 kg, žvelgiant į didesnius skersmenis DN 400, DN 500 ir DN 600 galima pamatyti, kad pastebimai mažėja ir išplaunamų nuosėdų vidurkio reikšmė.

Apskaičiuoti duomenys leido atlikti analizę įvertinant išplaunamų nuosėdų kiekius iš vieno kilometro vandentiekio tinklo atkarpos. Rezultatai pateikiami vamzdinių nuo DN 100 iki DN 600, o galimas išplautų nuosėdų kiekis pateiktas 3.21 paveiksle.



3.21 pav. Nuosėdų kiekis viename kilometre

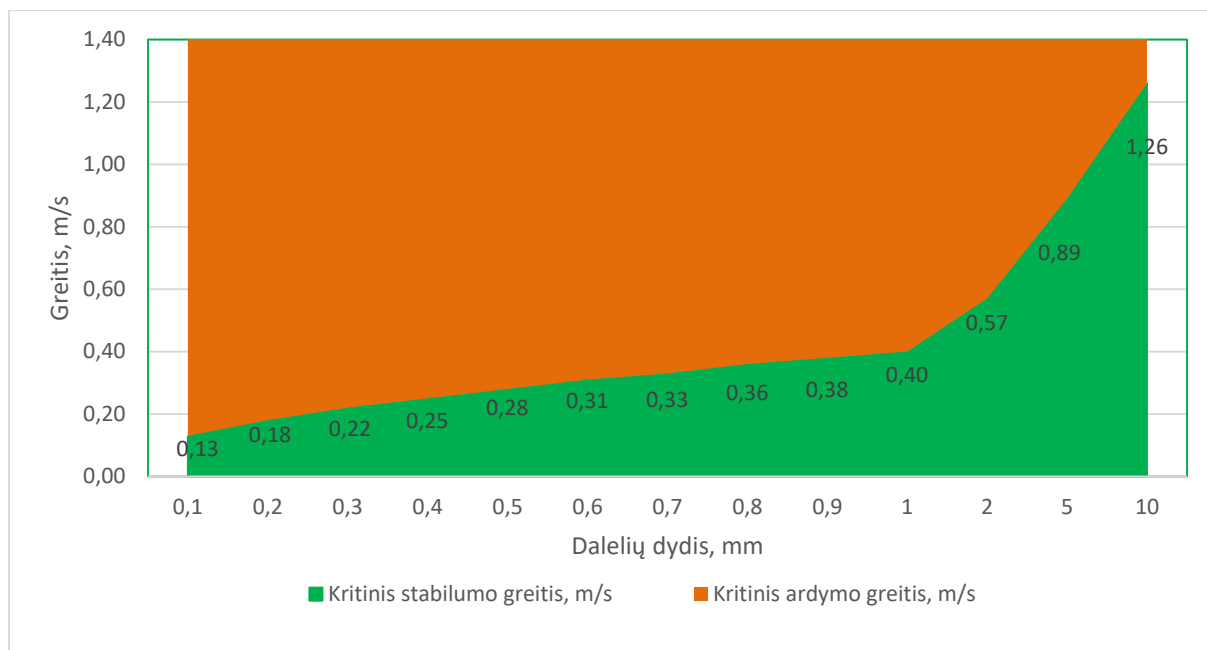
Pagal gautus rezultatus matoma, kad nuosėdų kiekis, kuris gali būti išplautas iš vieno kilometro vamzdino auga didėjant vamzdino skersmeniui.

Gauti duomenys leido atlikti analizę įvertinant išplaunamų nuosėdų kiekius iš vieno kilometro vandentiekio tinklo atkarpos. Iš vieno kilometro atkarpos DN 100 galima išplauti nuosėdų, kurių svoris lygus 0,9 kg, DN 150 skersmens galimas išplauti nuosėdų kiekis siekia 2 kg, DN 300 apie 8,2 kg. Nubrėžta tendencijos linija pagal gautus rezultatus, tuomet žinomas teorinis nuosėdų kiekis visų skersmenų vamzdynuose. Iš didžiausio eksploatuojamo vandentiekio tinklo ketinio vamzdino DN 600 daroma prielaida, jog bus išplauta apie 18,5 kg nuosėdų.

Apskaičiuota, kad išplovus visus Vilniaus mieste eksploatuojamus ketinius vandentiekio tinklus atsižvelgiant į skirtingus mėginius ir jų rezultatus, bendras galimų išplauti nuosėdų kiekis iš vamzdynų svyruoja nuo 1500 kg iki 3700 kg, o vidurkis 2600 kg.

3.4. Kritiniai dalelių greičiai ir hidraulinis stambumas

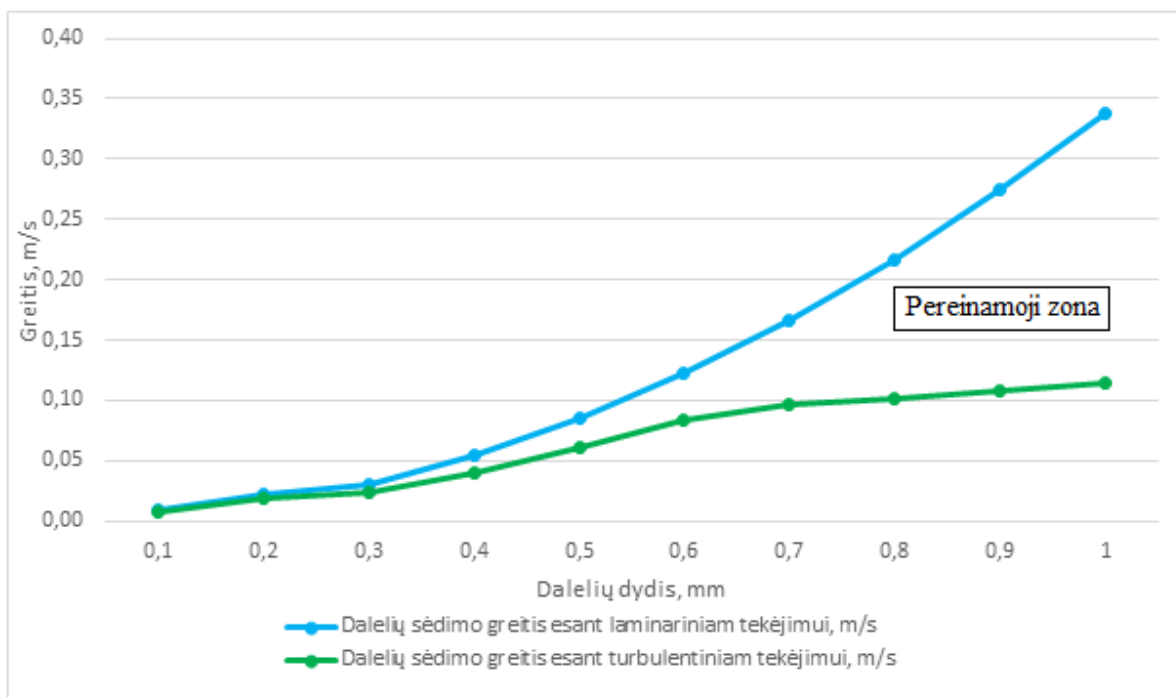
Tyrimo metu nustatytas nuosėdų dalelių tankis siekia $2150 \pm 150 \text{ kg/m}^3$. Turint šiuos duomenis apskaičiuotas nuosėdų kritinis ardymo ir kritinis stabilumo greitis. Nustatyti greičiai vamzdyne, kuriais remiantis galima daryti prielaidą, ar dalelė atplėšiama ir transportuojama vamzdynu. Gautos greičių reikšmės pateikiamos grafike (3.22 pav).



3.22 pav. Kritiniai stabilumo ir ardymo greičiai

Iš pateikto grafiko matyti, kad kritinis ardymo greitis ir kritinis stabilumo greitis didėja didėjant dalelių skersmeniui. Išanalizuota, kad 1 mm dalelei atplėšti reikalingas 0,4 m/s greitis. Lyginant su 0,1 mm dalelės išjudinimo greičiu, jis yra apie 3 kartus didesnis. Nuosėdoms 10 mm skersmens transportuoti reikalingas 1,26 m/s greitis. Lyginant su 100 kartų mažesniomis 0,1 mm skersmens dalelėmis, joms reikalingas 10 kartų mažesnis išjudinimo greitis, kuris siekia 0,13 m/s.

Išskiriami dviejų tipų dalelių sėdimo greičiai: laminarinis ir turbulentinis (Šaulys, 2016). Nuosėdų sėdimo greičiai vamzdyne esant laminariniam ir turbulentiniam tekėjimui pateikti 3.23 paveiksle.



3.23 pav. Dalelių sėdimo greičiai laminariniame ir turbulentiniame tekėjime

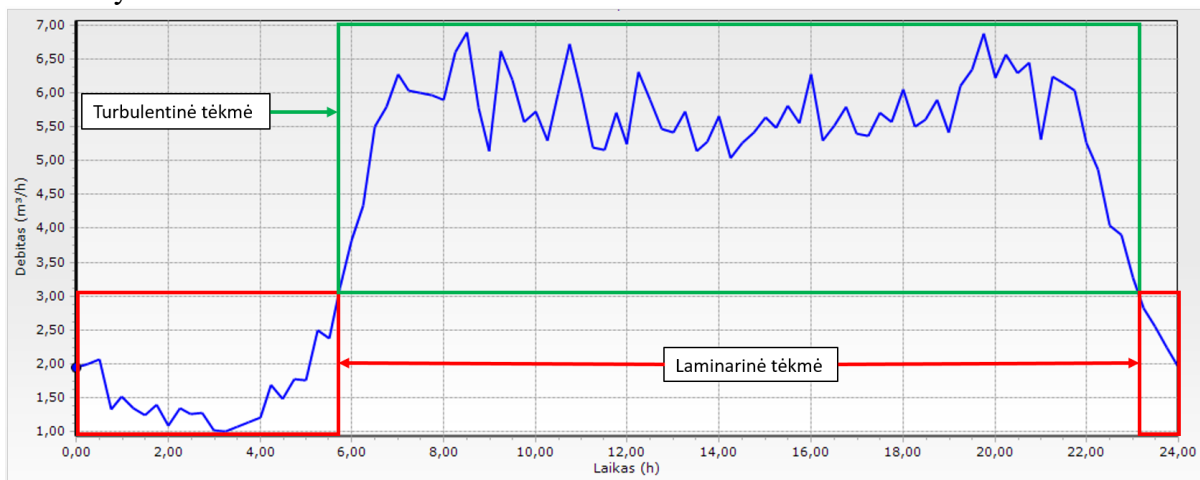
Pagal nuosėdų dalelių sėdimo grafiką, matoma, kad esant laminariniam tėkmės režimui 1 mm dydžio dalelės sėdimo greitis siekia 0,34 m/s, o esant turbulentiniam tėkmės režimui 1 mm dydžio dalelės sėdimo greitis siekia 0,11 m/s, tai yra 3 kartus lėčiau.

Reinoldso skaičius leidžia teoriškai nustatyti skysčio tekėjimo režimą (Šikšnys, 2008). Remiantis hidrauliniu modeliu nustatytu debitu tekančiu Džiaugsmo gatvė mėginio ėmimo vietoje. Vamzdyno skersmuo DN 50, laminarinio ir turbulentinio tėkmės režimai pažymėti paveiksle 3.24 paveiksle.



3.24 pav. Džiaugsmo gatvės tėkmės režimai

3.25 paveiksle pažymėti tekėjimo režimai Linksmojoje gatvėje. Nuo 23:15 valandos iki 5:45 valandos vamzdyje vyrauja laminarinė tėkmė, o nuo 5:45 iki 23:15 vamzdyje tėkmės režimas yra turbulentinis.

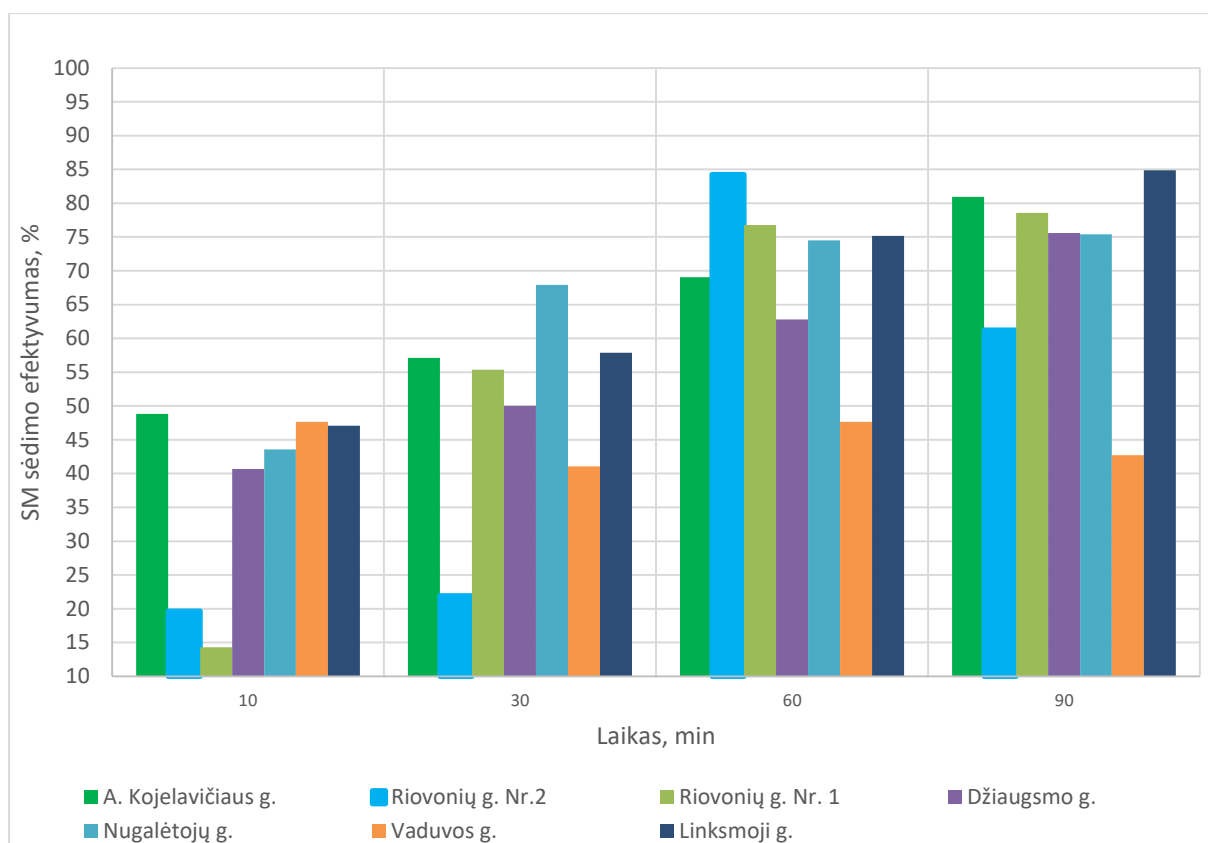


3.25 pav. Linksmosios gatvės tėkmės režimai

Remiantis tėkmės režimai galima nustatyti dalelių esančių vandentiekio tinkle sėdimo greičius pagal 3.23 paveikslo grafiką.

3.5. Dalelių sėdimo efektyvumas

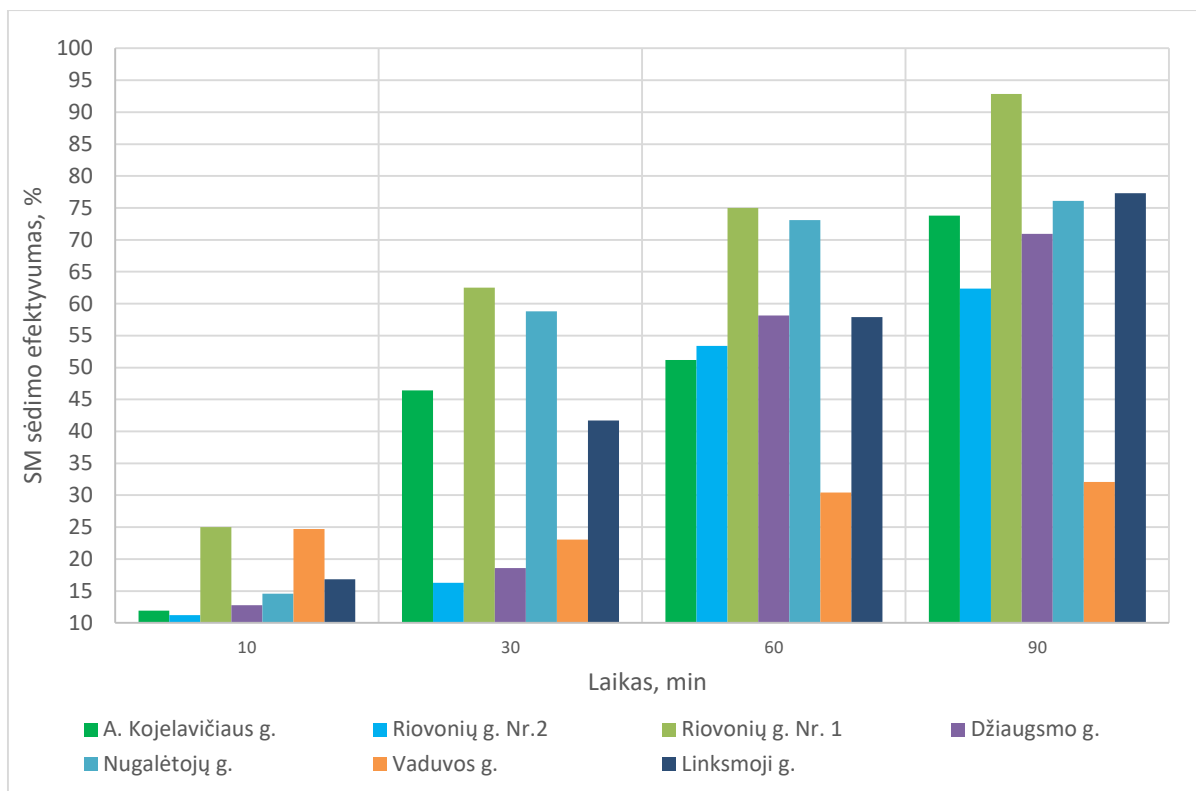
Tyrimo metu buvo nustatyta skendinčiųjų medžiagų koncentracija, taip pat plovimo vandenyje esančių skendinčiųjų medžiagų sėdimo efektyvumas. Grafike (3.26 pav.) pateiktas tirtas nuosėdų sėdimo efektyvumas 274 mm gylyje nuo cilindro dugno.



3.26 pav. Sėdimo efektyvumas iš 274 mm gylis

Atlikus tyrimus iš paimtų 7 mėginių gauti rezultatai, jog po 10 minučių Riovonių gatvės Nr.1 ir Nr.2 mėginiuose sėdimo efektyvumas neviršijo 20 % kitų 5 mėginių dalelių sėdimo efektyvumas svyravo nuo 40 % iki 50 %. Apskaičiavus skendinčių medžiagų koncentraciją ir jų sėdimo efektyvumo po 30 minučių 5 mėginių sėdimo efektyvumas buvo didesnis nei 50 %, tačiau Riovonių g. Nr. 2 mėginyje efektyvumas nebuvo didesnis nei 25 %. Lyginant rezultatus po 60 minučių ir po 90 minučių didžiausias dalelių sėdimo efektyvumas neviršijo 85 %, o A. Kojelavičiaus g., Riovonių g., Džiaugsmo g., Nugalėtojų g., Linksmoji g. nurodytose gatvėse skendinčių medžiagų sėdimo efektyvumas buvo didesnis nei 60 %, o pokytis tarp 60 minučių ir 90 minučių laikotarpio siekia iki 10 %. Iš paimtų mėginių galima būtų išskirti Vaduvos gatvę, kurios mėginyje dalelių sėdimo efektyvumas net po 90 minučių nepasiekė 50 %. Manoma, jog tai galėjo būti susiję dėl šioje gatvėje vykdyto oras–vanduo plovimo metodo, todėl išplautų nuosėdų sėdimo efektyvumas galėjo skirtis lyginant su kitų mėginių rezultatais.

Skendinčių medžiagų sėdimo efektyvumas taip pat buvo analizuojamas ir 103 mm gilyje nuo cilindro dugno. Grafike (3.27 pav.) pateikti iš gautų skendinčių medžiagų koncentracijų apskaičiuoti nuosėdų sėdimo efektyvumai.



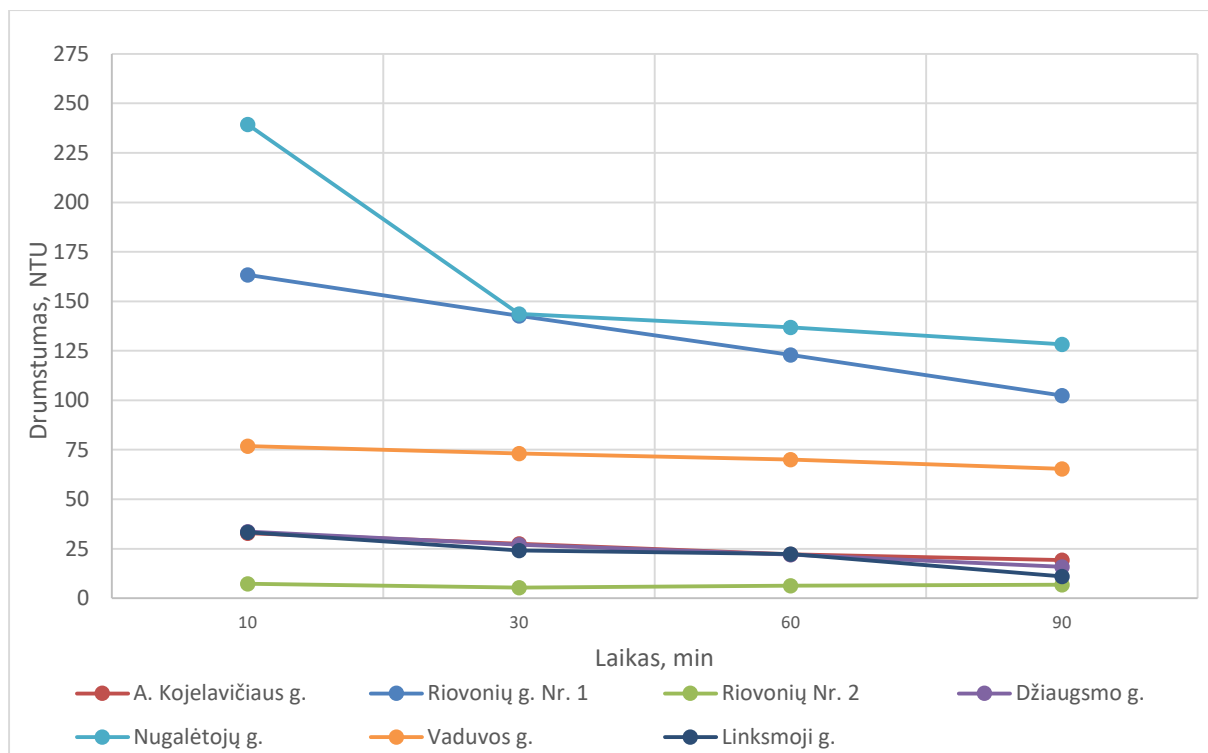
3.27 pav. Sėdimo efektyvumas iš 103 mm gylio

Analizuojant gautus rezultatus matoma, kad iš 103 mm gylio cilindro paimtų mėginių po 10 minučių sėdimo efektyvumas keturiuose mėginiuose, tai yra A. Kojelavičiaus g., Riovonių g. Nr. 2., Džiaugsmo g. ir Nugalėtojų gatvėje nesiekė 15 %, o Riovonių g. Nr. 1 ir Vaduvos g. nebuvo pasiektas 25 % sėdimo efektyvumas. Po pusvalandžio laiko keturiuose iš septynių mėginių nuosėdų sėdimo efektyvumas 103 mm padidėjo nuo 2,5 iki 4 kartų. Gauta, kad po 60 minučių nuo vandens supylimo į kolbas dalelių sėdimo efektyvumas visuose mėginiuose išskyrus Vaduvos g. buvo didesnis nei 50 %, o minėtoje Vaduvos gatvėje siekė tik 30 %. Taip pat, po 90 minučių mėginyje iš Vaduvos g. sėdimo efektyvumas padidėjo tik 1,7 %. Akivaizdūs skirtumai žvelgiant į Vaduvos gatvės dalelių sėdimo efektyvumo pastebėti jau anksčiau (3.26 pav.), manoma, jog priežastis galėjo būti, nes šio plovimo metu buvo naudotas tinklo plovimo metodas oras–vanduo. Matoma, jog po 1,5 valandos skendinčių nuosėdų sėdimo efektyvumas buvo labai aukštas, penkiuose iš septynių mėginių buvo didesnis nei 70 %.

Apibendrinant galima teigti, kad nejudančiame vandenyje po valandos laiko skendinčios dalelės iš 103 mm ir 274 mm nusėda daugiau nei 60 % efektyvumu. Po 90 minučių nuo tyrimo pradžios iš gylio 103 mm efektyvesnio nuosėdų sėdimo neužfiksuota, o iš gylio 274 mm dalelių sėdimas daugiausiai padidėjo iki 10 %. Nuosėdos tinkle gali sėkmingai nusėsti jau po 1 valandos.

Drumstumas

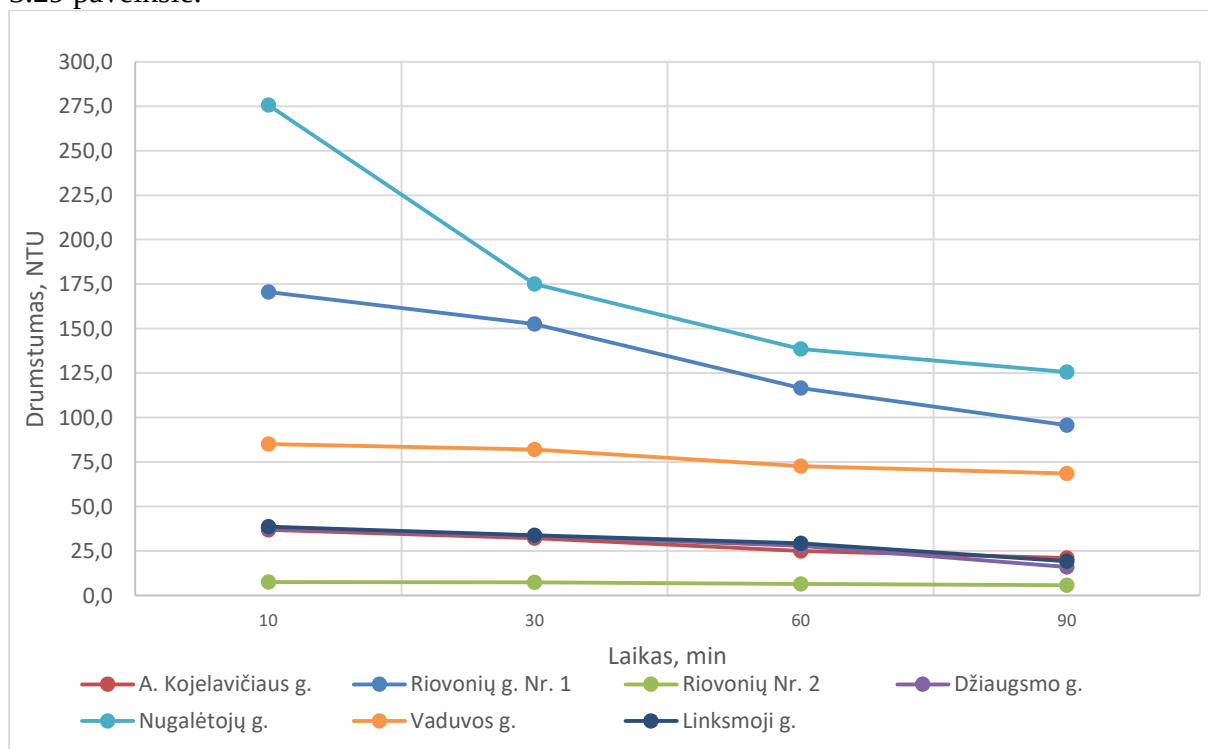
Buvo ištirta vandentiekio tinklo plovimo vandens drumstumo pokytis laiko atžvilgiu. Matuojamas drumstumas iš skirtingų vandens sluoksnių 103 mm ir 274 mm nuo matavimo cilindro dugno. Matavimai atliekami po 10, 30, 60 ir 90 minučių. Gauti rezultatai pateikiami 3.28 paveiksle.



3.28 pav. Drumstumas iš 274 mm

Iš gautų rezultatų matyti, kad iš visų tirtų mėginių išsiskyrė kelios gatvės, tai Nugalėtojų g., Riovonių g. Nr. 1, Vaduvos g. jose nustatytas drumstumas buvo didesnis keletą kartų lyginant su kitais mėginiais, Nugalėtojų g. plovimo vandenyje užfiksuotos drumstumo vertės siekė 240 NTU, o po 90 minučių drumstumas sumažėjo iki 125 NTU. Lyginant gautas pradines reikšmes su nustatytomis po 1,5 valandos drumstumas sumažėjo, o analizuojant skirtingus mėginius drumstumo pokytis buvo nuo 1,1 karto iki 3 kartų.

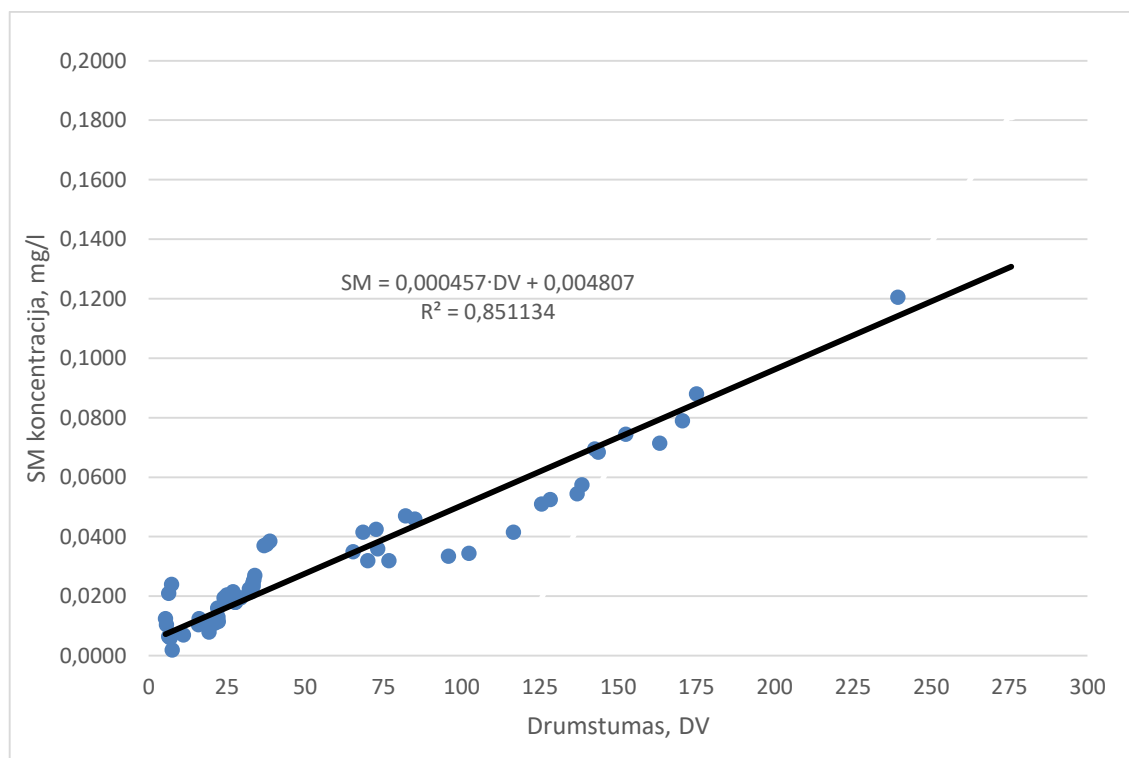
Gauti drumstumo rezultatai imant mėginius iš 103 mm gylio nuo cilindro dugno pateikti 3.29 paveiksle.



3.29 pav. Drumstumas iš 103 mm

Analizuojant gautus drumstumo rezultatus iš 103 mm gylio nuo cilindro dugno matoma, kad pokytis lyginant rezultatus 10 minučių nuo supilstymo į cilindrą ir po 90 minučių labai panašus į duomenis gautus iš 274 mm, kurie pavaizduoti 3.26 pav. Drumstumo sumažėjo iki 3 kartų. Atkreipiamas dėmesys, jog Riovonių gatvės pradžioje mėginys Nr. 2, kurio drumstumas 103 mm gylio buvo 7,5 NTU, o po 1,5 valandos sumažėjo tik iki 5,7 NTU tai yra 25 %, tokie patys rezultatai buvo gauti ir iš 274 mm gylio. Analizuojant šiuos Riovonių g. Nr.1 rezultatus gauta, jog kai pradinės drumstumo vertės nėra didelės ir neviršija 10 NTU, drumstumas net po 90 minučių pasikeičia iki 25 %.

Atlikus tyrimus, turint rezultatus skendinčių medžiagų koncentracija mėginiuose ir drumstumo vertes po 10, 30, 60 ir 90 minučių duomenys pateikti grafike (3.30 pav.).



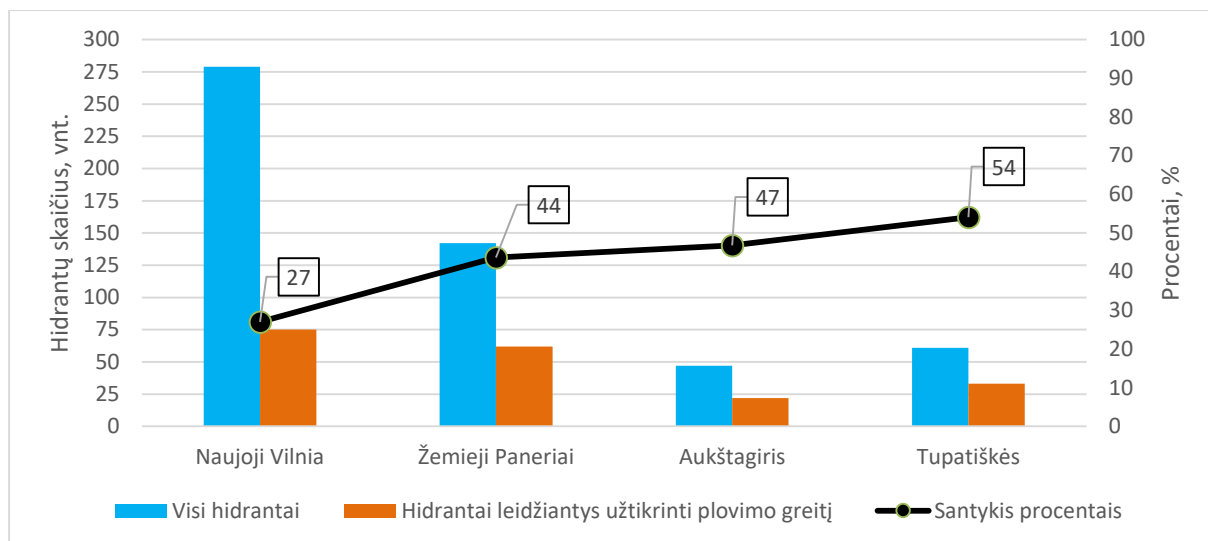
3.30 pav. SM koncentracijos priklausomybė nuo drumstumo

Iš grafiko matyti, kad skendinčių medžiagų koncentracija vandenyje priklauso nuo vandens drumstumo. Priklausomybė tarp skendinčių medžiagų ir drumstumo yra tiesinė, kurios lygtis $SM = 0,000457 \cdot DV + 0,004807$, čia DV – drumstumas (DV), SM – skendinčių medžiagų koncentracija (mg/l). Didėjant vandens drumstumui didėja ir skendinčių medžiagų koncentracija vandenyje.

Mokslininkų nustatyta, kad geležies kiekis ir vandens spalva glaudžiai susiję, šis reiškinys turi tiesinį ryšį (Li et al., 2016).

3.6. Hidraulinio modeliavimo plovimo skaičiavimai

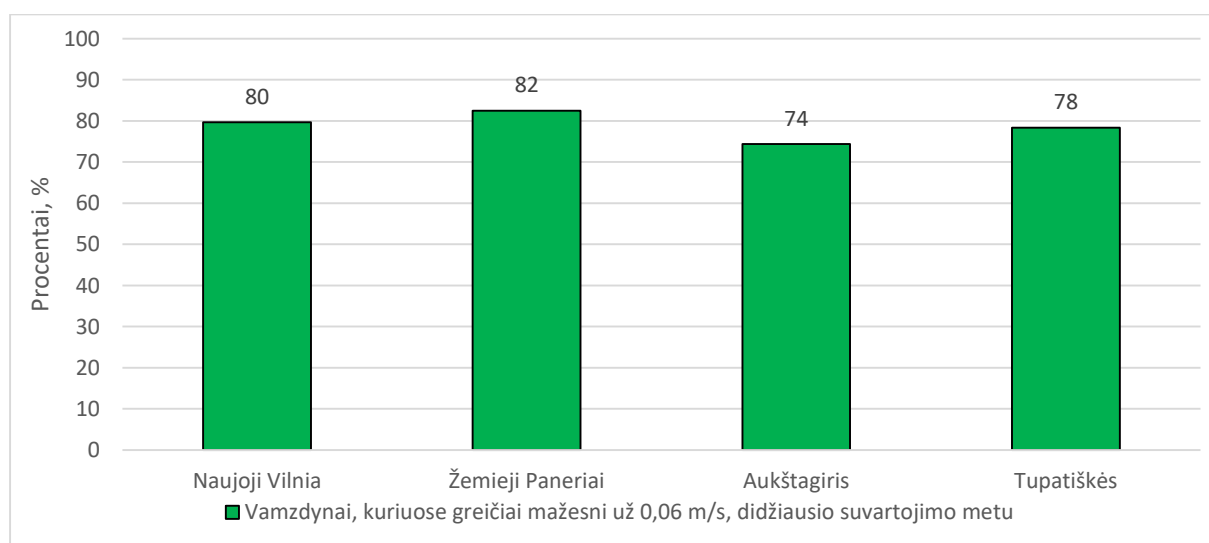
Hidrauliniam modelyje atliktas standartinio tinklo plovimo modeliavimas. Standartinio plovimo metu sklendės vandentiekio tinkle nėra uždaromos ar atidaromos, taip pat nenaudojama jokia papildoma įranga. Modelyje priimta, kad atidarius bet kurį tinkle esantį hidrantą per jį galima išleisti 54 m³/h. Mokslininkai nustatė, kad mažiausias reikiamas plovimo greitis pašalinti nuosėdas siekia 0,9 m/s (Van Bel et al., 2019). Priimama, kad plovimas laikomas sėkmingu, kai vamzdynuose pasiekama 0,9 m/s greitis. Rezultatai pateikti 3.31 paveiksle.



3.31 pav. Standartinio tinklo plovimo rezultatai

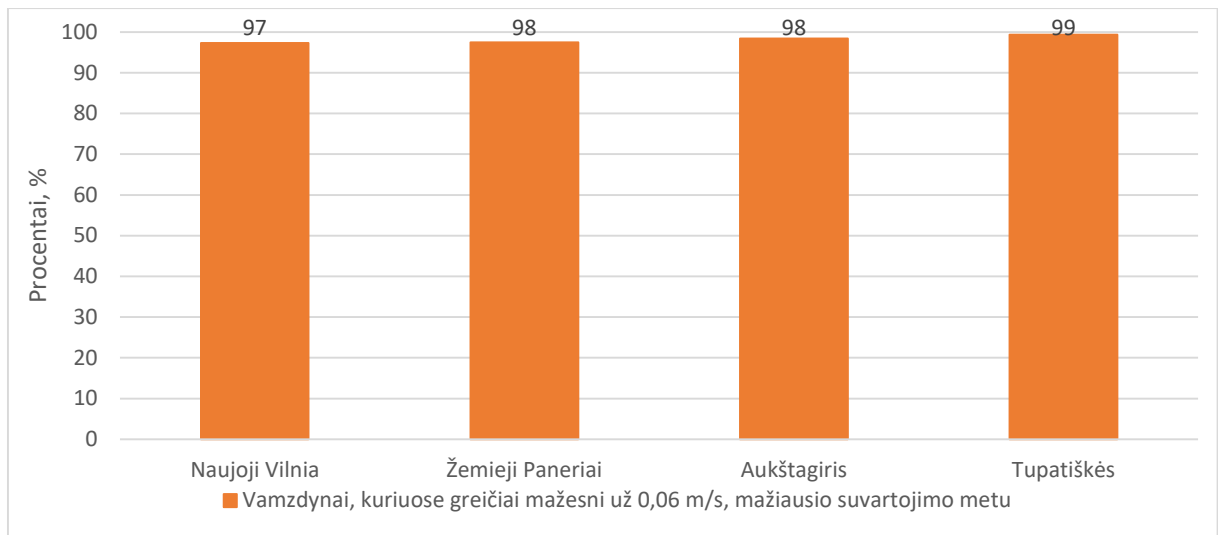
Atlikus skaičiavimus gauti rezultatai, kad iš Naujosios Vilnios zonoje esančių 279 vnt. vandentiekio hidrantų naudojant standartinį plovimą greitis užtikrinamas tik 75 vnt., o tai yra tik 27 % visų zonoje esančių hidrantų. Nedidelis efektyvaus hidrantų plovimo skaičius gautas, nes hidrantai įrengti šalia didelio skersmens kvartalinių vandentiekio tinklų, kuriuose neįmanoma užtikrinti mažiausio reikiamo plovimo greičio. Kitose nagrinėtose Žemųjų Panerių, Aukštagerio ir Tupatiškių zonose nustatyta, kad standartinis tinklo plovimas efektyvesnis ir siekia nuo 44 % iki 54 % zonoje esančių hidrantų. Šiose trejose zonose sumodeliuotas standartinis tinklo plovimas išleidžiant vandenį per hidrantą efektyvesnis dėl mažesnio skersmens kvartalinių vandentiekio tinklų. Naujosios Vilnios zoną lyginant su Žemųjų Panerių, Aukštagerio ir Tupatiškių zonomis, jose dalis hidrantų nutolę keliasdešimt metrų nuo žiedinio vandentiekio tinklo, o tai leidžia susidaryti didesniems greičiams vamzdynų plovimo metu.

Remiantis mokslininkų atliktais tyrimais nustatyta, kad esant mažesniai nei 0,06 m/s greičiui vamzdyne, dalelės gali sukibti viena su kita, sudarydamos didesnius nuosėdų darinius ir nusėdamos ant vidinės vamzdžio sienelės (Husband & Boxall, 2016). Hidrauliniu modeliu apskaičiuoti greičiai vamzdynuose didžiausio suvartojimo valandomis Naujosios Vilnios, Žemųjų Panerių, Aukštagerio, Tupatiškių zonose. Gauti rezultatai pateikti 3.32 paveiksle.



3.32 pav. Vamzdynai, kuriuose palankios sąlygos nuosėdoms susidaryti

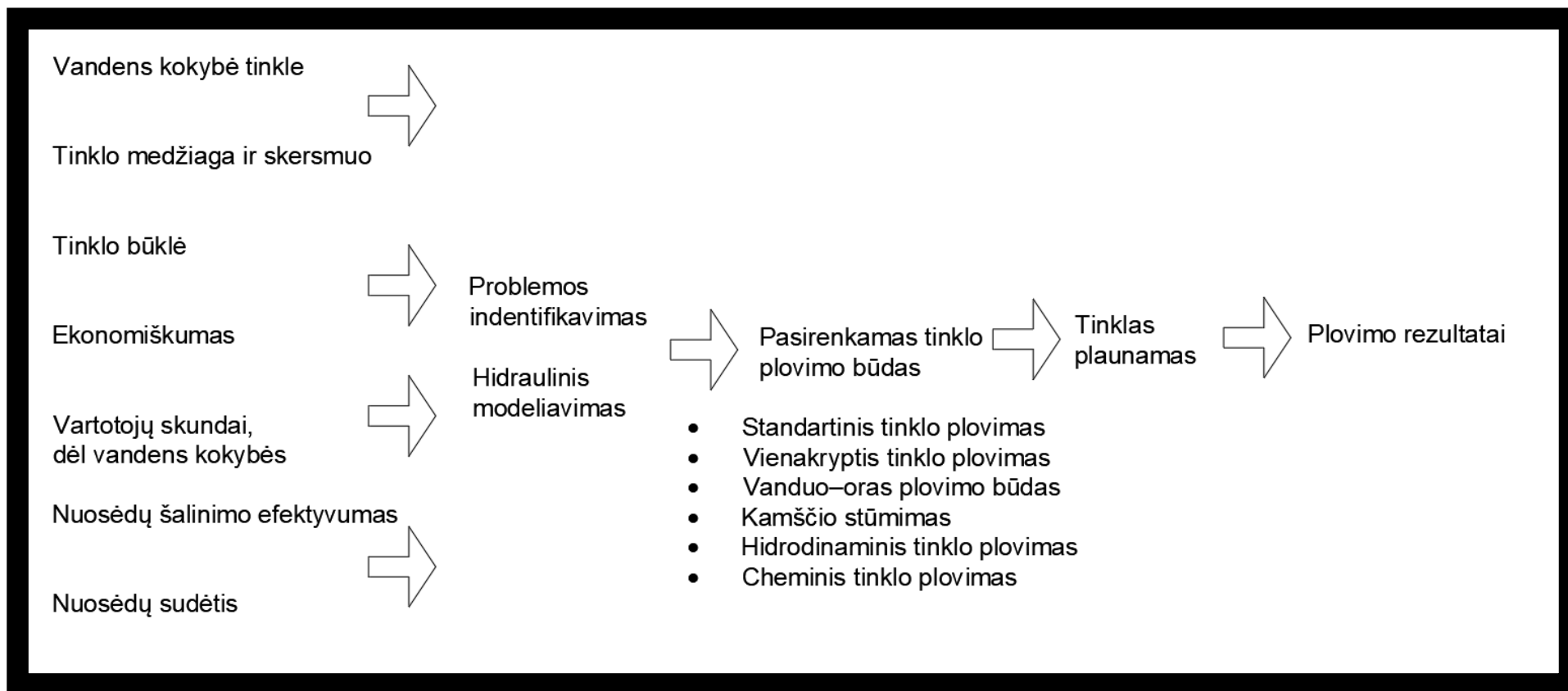
Išanalizuoti hidraulinio modelio rezultatai, nustatyta procentinė vamzdynų dalis, kuriuose didžiausio suvartojimo valandomis susidaro mažesni greičiai už 0,06 m/s. Atskirose zonose palankios sąlygos nuosėdoms nusėsti sudaro nuo 74–82 % visų vamzdynų.



3.33 pav. Vamzdynai, kuriuose palankios sąlygos nuosėdoms susidaryti

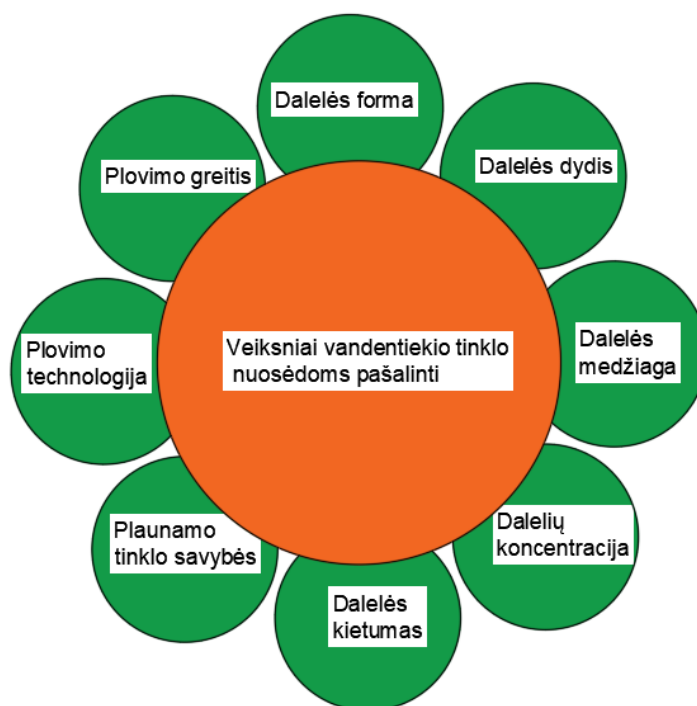
Išanalizuoti hidraulinio modelio rezultatai, nustatyta procentinė vamzdynų dalis, kuriuose mažiausio suvartojimo valandomis susidaro mažesni greičiai už 0,06 m/s. Atskirose zonose palankios sąlygos nuosėdoms nusėsti sudaro nuo 97–99 % visų vamzdynų.

Optimaliausio vandentiekio tinklo plovimo būdo pasirinkimo schema pateikta 3.33 paveiksle.



3.34 pav. Vandentiekio tinklo plovimo būdo parinkimas

Efektyviausio tinklo plovimo būdo pasirinkimas nepriklauso nuo sąnaudų, kurios patiriamos atliekant vandentiekio tinklo plovimo darbus. Esančių nuosėdų vandentiekio tinkle pašalinimui veiksniai pavaizduoti 3.34 paveiksle.



3.35 pav. Veiksniai nuosėdų šalinimui iš vandentiekio tinklo

Naudojant netinkamą tinklo plovimo būdą arba vykdant plovimo darbus neatsakingai, pavyzdžiui neuždarant reikiamų sklendžių žiediniame tinkle. Tinkle esančios nuosėdos gali būti ne tik nepašalintos, bet ir suprastėjusios kokybės vanduo pasiekti vartotojus. Svarbu įvertinti nuosėdų dalelių parametrus, įsigilinti į konkrečios plaunamos vandentiekio tinklo atkarpos ypatybes pasirenkant efektyviausia tinklo plovimo būdą.

IŠVADOS

1. Tyrime nagrinėti Žemųjų Panerių, Naujosios Vilnios, Aukštagirio, Tupatiškių mikrorajonai (Vilniaus miestas). Atlikti slėgio ir debito matavimai vandentiekio tinklo plovimo metu. Matavimų duomenys palyginti su hidraulinio modeliavimo rezultatais. Sukalibruotas hidraulinis modelis, skirtumas tarp faktinių ir sumodeliuotų slėgio ir debito rezultatų ne didesnis nei 10 %.
2. Atlikta išplaunamų nuosėdų iš vandentiekio tinklo granuliometrinės sudėties analizė. Nustatyta, kad daugiau nei 60 % plovimo vandenyje esančių nuosėdų mažesnės nei 0,2 mm.
3. Išplautų ketinių vamzdynų amžius 30–56 m, nustatytas nuosėdų dalelių tankis $2150 \pm 150 \text{ kg/m}^3$.
4. Apskaičiuota priklausomybė tarp dalelės skersmens ir kritinio ardymo greičio. Atplėšti 0,2 mm skersmens dalelei nuo vamzdžio sienelės reikalingas 0,18 m/s greitis, o 1 mm skersmens atplėšimo greitis 0,4 m/s.
5. Apskaičiuota priklausomybė tarp dalelės skersmens ir dalelės sėdimo greičio vamzdyje turbulentinio ir laminarinio tekėjimų režimų metu. Gauta, kad 0,2 mm dydžio dalelė laminarinio tekėjimo režimu vamzdyje sėda 0,022 m/s greičiu, o turbulentinio tekėjimo metu 0,018 m/s, o atitinkamai 1 mm dalelės sėdimo greitis skirtinguose tekėjimo režimuose lygus 0,34 m/s ir 0,11 m/s.
6. Tyrimais nustatytas vidutinis nuosėdų kiekis išplaunamas iš vandentiekio tinklų. Pavyzdžiui iš 1 kilometro ketinio vamzdyno DN 100 plovimo metu pašalinama apie 0,9 kg nuosėdų, o iš ketinio DN 400 vamzdyno apie 11 kg.
7. Nustatyta, kad teorinė nuosėdų masė, išplovus visus ketinius Vilniaus miesto vamzdynus, svyruoja nuo 1500 kg iki 3700 kg.
8. Tyrimo metu nustatyta plovimo vandens dalelių sėdimo efektyvumas. Nustatyta, kad efektyvus vandens skaidrinimas vyksta iki 60 minučių, nusodinimo efektyvumas siekia 85 %.
9. Didžiausio suvartojimo valandą, analizuotuose mikrorajonų vandentiekio tinkluose 79 % vamzdynų greitis yra mažesnis nei 0,06 m/s, o mažiausio suvartojimo valandą 98 % vamzdynų greitis mažesnis nei 0,06 m/s, todėl susidaro palankios sąlygos nuosėdoms nusėsti.
10. Analizuotose Žemųjų Panerių, Naujosios Vilnios, Aukštagirio, Tupatiškių mikrorajonuose naudojant standartinį vandentiekio tinklo plovimą būdą, atidarant vieną hidrantą, mažiau nei 50 % atvejų pasiekiamas mažiausias vandens tekėjimo greitis nuosėdoms iš vandentiekio tinklo pašalinti.

REKOMENDACIJOS

Nuosėdoms vandentiekio tinkle neleistų kauptis:

1. Polietileninių vamzdžių naudojimas, tinklų renovavimas senus vamzdynus pakeičiant naujais. Esamų plieninių ir ketinių vamzdžių renovavimas įveriant polietileninius vamzdynus, taip sumažinant vamzdžių skersmenis ir padidinant vandens tekėjimo greičius vamzdynuose. Plieninių ir ketinių vamzdžių padengimas iš vidaus cemento–skiediniu. Taip panaikinama vamzdynų korozijos galimybė, padidinamas vamzdyno sandarumas.
2. Kvartalinių vandentiekio vamzdynų optimalaus skersmens parinkimas. Skersmenys turi būti parenkami, kad didžiausio suvartojimo valandomis susidarytų ne mažesnis nei 0,4 m/s greitis vamzdyne. Užtikrinant greitį tinklai patys apsisaugotų nuo nuosėdų kaupimosi.
3. Elektrifikuotų sklendžių įrengimas akligatviuose, skirstomųjų tinklų galuose, sujungiant nuleidimo vamzdį prie lietaus ar nuotekų tinklų. Vandens išleidimas iš vamzdynų atidarant sklendes leistų iš dalies pašalinti nuosėdas iš tinklo.
4. Didžiausio suvartojimo valandomis sklendžių atidarymas/uždarymas žiediniuose tinkluose, sukeliant greičių padidėjimą vamzdynuose.

Siūlymai įrengtiems vandentiekio tinklams, kuriuose daug nuosėdų.

1. Vykdyti vandentiekio tinklo plovimą standartiniu, vienakrypčiu, vanduo–oras, hidrodinaminiu arba cheminiu būdu, atsižvelgus į tinklo skersmenį, būklę, medžiagą ir kt.
2. Išmaniai valdyti vandens poreikį didžiausio suvartojimo valandomis, nesukeliant didesnių nei įprastai greičių vamzdynuose, taip nuosėdos nebūtų išjudinamos ir transportuojamos vamzdynais.
3. Drumstumo matavimas vandentiekio tinkle realiu laiku. Tai leistų vandens tiekimo įmonėms greičiau reaguoti į vandens kokybės pasikeitimus ir nelaukti vartotojų skundų dėl pasikeitusios tiekiamos vandens kokybės.
4. Išimtiniais atvejais, kai nėra galimybės užtikrinti higienos normą atitinkančio vandens tiekimo vartotojams, rekomenduojama prieš vandens apskaitos mazgą įrengti mechaninį filtrą.
5. Šakotiniame vandentiekio tinkle efektyvus vamzdynų plovimas užtikrinamas atidarant vieną hidrantą. Plovimo greitis žiediniuose tinkluose nepasiekiamas atidarant du ar daugiau hidrantų, todėl plaunant žiedinius vandentiekio tinklus reikalinga uždaryti sklendes ar naudoti kitus tinklo plovimo būdus.
6. Panaudojant skaitmeninius hidraulinius modelius, galima tiksliau įvertinti potencialias atkarpas vandentiekio tinkle, kuriose gali kauptis nuosėdos.
7. Kompiuterinės vandentiekio modeliavimo programos turi būti naudojamos vandens tiekimo įmonėse. Atliekami skaičiavimai leidžia su mažesnėmis laiko sąnaudomis įvertinti vandentiekio tinklo pasikeitimus. Hidraulinio modelio naudojimas padeda tiksliau ir greičiau įvertinti reikiamas sąlygas vandentiekio tinklų plovimams.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Agudelo-Vera, C., Avvedimento, S., Boxall, J., Creaco, E., de Kater, H., Nardo, A. Di, Djukic, A., Douterelo, I., Fish, K. E., Rey, P. L. G., Jacimovic, N., Jacobs, H. E., Kapelan, Z., Solano, J. M., Pachongo, C. M., Piller, O., Quintiliani, C., Ručka, J., Tuhovčák, L., & Blokker, M. (2020). Drinking water temperature around the globe: Understanding, policies, challenges and opportunities. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041049>
2. Blokker, E. J. M., & Schaap, P. G. (2015). Particle Accumulation Rate of Drinking Water Distribution Systems Determined by Incoming Turbidity. *Procedia Engineering*, 119(1), 290–298. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.08.888>
3. Bolz, R. (2016). *Vandentiekio tinklą plovimo metodai*. <https://lvt.lt/images/Leidiny/Leidiny-Nr49.pdf>
4. Borkowski, P. (2011). *THEORETICAL AND EXPERIMENTAL BASIS OF WATER PIPELINE RENOVATION WITH HIGH-PRESSURE WATER JET TECHNIQUE*.
5. Boxall, J. B., Skipworth, P. J., & Saul, A. J. (2003). Aggressive flushing for discolouration event mitigation in water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(1–2), 179–186. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0101>
6. Brett Walton. (2016). *Infographic: The Age of U.S. Drinking Water Pipes — From Civil War Era to Today*. Water Main Ages Reflect the Nation's Growth. <https://www.circleofblue.org/2016/world/infographic-the-age-of-u-s-drinking-water-pipes-from-civil-war-era-to-today/>
7. Carrière, A., Gauthier, V., Desjardins, R., & Barbeau, B. (2005). *Evaluation of loose deposits in distribution systems through*.
8. Chan Ahn, J., Won Lee, S., Choi, K. Y., Yong Koo, J., & Jeong Jang, H. (2011). Application of unidirectional flushing in water distribution pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 60(1), 40–50. <https://doi.org/10.2166/aqua.2011.013>
9. Council, N. R. (2007a). Drinking water distribution systems: Assessing and reducing risks. In *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks*. <https://doi.org/10.17226/11728>
10. Council, N. R. (2007b). Drinking water distribution systems: Assessing and reducing risks. In *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11728>
11. Cowle, M. W., Webster, G., Babatunde, A. O., Bockelmann-Evans, B. N., & Weightman, A. J. (2019). Environmental Technology ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/tent20> Impact of flow hydrodynamics and pipe material properties on biofilm development within drinking water systems Impact of flow hydrodynamics and pipe material properties on biofilm development within drinking water systems. *ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY*, 2020(28), 3732–3744. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1619844>
12. Dan Ellison. (2003). *Investigation of Pipe Cleaning Methods - Dan Ellison - Google knygos*. https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=CAGE1lDiFMoC&oi=fnd&pg=PR9&dq=cleaning+water+pipe+flushing&ots=Q0ZNZEisM6&sig=SbT0tUSi3DIgSkB0XvwaXZZKpB8&redir_esc=y#v=onepage&q=cleaning water pipe flushing&f=false
13. Daniel Ogwoka Siringi, Patrick G. Home, & Enno Koehn. (2014). *Cleaning Methods for Pipeline Renewals*. <http://www.safe-jetting.co.uk/TubeandPipeCleaning.html>,
14. Douterelo, I., Husband, S., & Boxall, J. B. (2014). The bacteriological composition of

- biomass recovered by flushing an operational drinking water distribution system. *Water Research*, 54, 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.049>
15. El-Chakhtoura, J., Saikaly, P. E., Van Loosdrecht, M. C. M., & Vrouwenvelder, J. S. (2018). Impact of distribution and network flushing on the drinking water microbiome. *Frontiers in Microbiology*, 9(SEP). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02205>
 16. Husband, S., & Boxall, J. (2016). Understanding and managing discolouration risk in trunk mains. *Water Research*, 107, 127–140. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2016.10.049>
 17. ISO, L. E. (2016). *Drumstumo standartas (ISO 7027-2016).pdf*.
 18. Jur, T. A., Middleton, J. I., Yurko, A. A., Windham, R. L., & Grey, J. R. (2021). Case Studies in Graphitic Corrosion of Cast Iron Pipe. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(2), 376–386. <https://doi.org/10.1007/S11668-020-01097-0/FIGURES/21>
 19. Li, M., Liu, Z., Chen, Y., & Hai, Y. (2016). Characteristics of iron corrosion scales and water quality variations in drinking water distribution systems of different pipe materials. *Water Research*, 106, 593–603. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.044>
 20. Lin, J., Ellaway, M., & Adrien, R. (2001). Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe. *Corrosion Science*, 43(11), 2065–2081. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00016-6)
 21. Liu, G., Zhang, Y., Knibbe, W. J., Feng, C., Liu, W., Medema, G., & van der Meer, W. (2017). Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. In *Water Research* (Vol. 116, pp. 135–148). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>
 22. Liu, J. qing, Luo, Z. feng, Liu, K., Zhang, Y. fu, Peng, H. xi, Hu, B. lan, Ren, H. xing, Zhou, X. yan, Qiu, S. de, He, X. fang, Ye, P., Bastani, H., & Lou, L. ping. (2017). Effect of flushing on the detachment of biofilms attached to the walls of metal pipes in water distribution systems. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 18(4), 313–328. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1600316>
 23. McNeill, L. S., & Edwards, M. (2002). The importance of temperature in assessing iron pipe corrosion in water distribution systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 77(3), 229–242. <https://doi.org/10.1023/A:1016021815596>
 24. Mohammed, H., Tornyeviadzi, H. M., & Seidu, R. (2021). Modelling the impact of water temperature, pipe, and hydraulic conditions on water quality in water distribution networks. *Water Practice and Technology*, 16(2), 387–403. <https://doi.org/10.2166/WPT.2021.002>
 25. Mussared, A., Fabris, R., Vreeburg, J., Jelbart, J., & Drikas, M. (2019). The origin and risks associated with loose deposits in a drinking water distribution system. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(1), 291–302. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.073>
 26. Nawrocki, J., Raczyk-Stanisławiak, U., Świetlik, J., Olejnik, A., & Sroka, M. J. (2010). Corrosion in a distribution system: Steady water and its composition. *Water Research*, 44(6), 1863–1872. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.020>
 27. O'Connor, D. (2002). *Part Two Report of the Walkerton Inquiry: A Strategy for Safe Drinking Water*.
 28. Oram, B. (2014). *Water Research Center - Corrosive Water*. Pipe Corrosion Lead Pipe Metal Water Pipes Corrosive Drinking Water. <https://water-research.net/index.php/corrosive-water>
 29. Pourcel, F., & Duchesne, S. (2020). Comparative analysis of air scouring and unidirectional flushing of water distribution systems. *Journal of Water Supply:*

- Research and Technology-Aqua*, 69(6), 578–590.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2020.146>
30. Pourcel, F., Smith, I. E., & Duchesne, S. (2017). Slug Flow Simulation, A Way to Improve Air Scouring of Water Mains? *Procedia Engineering*, 186, 601–608.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.276>
 31. Report&Protokoll LW87Vilniaus vandenys (2019) Tinklų plovimo ataskaita, 1-65.
 32. Sakalauskas, A. (2016). Komunalinių vandentiekos įrenginių techninės eksploatacijos rekomendacijos. In *Komunalinių vandentiekos įrenginių techninės eksploatacijos rekomendacijos*. Vilnius Gediminas Technical University.
<https://doi.org/10.3846/1548-s>
 33. Sakalauskas, A., Diliūnas, J., Jankauskas, J., & Kisielis, V. (2016). Vandentieka. *Vandentieka*. <https://doi.org/10.20334/1527-S>
 34. Sarin, P., Snoeyink, V. L., Bebee, J., Jim, K. K., Beckett, M. A., Kriven, W. M., & Clement, J. A. (2004). Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: Effect of dissolved oxygen. *Water Research*, 38(5), 1259–1269.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.022>
 35. Satterfield, Z. (2007). *Line Pigging*. www.girardind.com
 36. Šikšnys, A. (2008). *Hidrostatika ir hidrodinamikos pagrindai*.
 37. STR 2.07.01:2003 "Vandentiekis ir nuotekų šalintuvas. Pastato i... (n.d.). Retrieved June 3, 2021, from <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.216857?jfwid=-wsolgn0ht>
 38. Sunny, I., Husband, S. P., & Boxall, J. B. (2018). *Seasonal Temperature and Turbidity Behaviour in Trunk Mains | WDSA / CCWI Joint Conference Proceedings*.
<https://ojs.library.queensu.ca/index.php/wdsa-ccw/article/view/11970>
 39. Swanson, H. A., & Baldwin, H. . (1965). *Turbidity and Water*. U.S. Geological Survey.
https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/turbidity-and-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
 40. Thomas M. Walski, Donald V. Chase, Dragan A. Savic, Walter Grayman, Stephen Beckwith, & Edmundo Koelle. (2004). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Advanced Water Distribution Modeling and Management.
https://www.researchgate.net/publication/221936180_Advanced_Water_Distribution_Modeling_and_Management
 41. Van Bel, N., Hornstra, L. M., van der Veen, A., & Medema, G. (2019). Efficacy of flushing and chlorination in removing microorganisms from a pilot drinking water distribution system. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/W11050903>
 42. Vreeburg, I. J. H. G., & Boxall, D. J. B. (2007). Discolouration in potable water distribution systems: A review. In *Water Research* (Vol. 41, Issue 3, pp. 519–529). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.09.028>
 43. Vreeburg, J. (2007). (PDF) *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*.
https://www.researchgate.net/publication/27349450_Discolouration_in_drinking_water_systems_a_particular_approach
 44. Wen, J., Qi, Z., Behbahani, S. S., Pei, X., & Iseley, T. (2019). Research on the structures and hydraulic performances of the typical direct jet nozzles for water jet technology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(12), 570.
<https://doi.org/10.1007/s40430-019-2075-2>
 45. Wright, D., Wolgamott, J., & Zink, G. (2006). *Waterjet Cleaning Of Steel Process Lines Without Damage To The Steel Wall*. [https://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/Jetnews 01-07/JetApr06.pdf](https://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/Jetnews%2001-07/JetApr06.pdf)

46. [www.bentley.com](https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems). (2021). *Water Distribution Analysis and Design Software - OpenFlows WaterGEMS*. Water Distribution Analysis and Design Software. <https://www.bentley.com/en/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems>
47. [www.hindmarshplumbing.com](https://www.hindmarshplumbing.com.au/chemical-cleaning-potable-water-systems/). (2021). *Chemical Cleaning of Potable Water Systems - Hindmarsh Plumbing*. Chemical Cleaning of Potable Water Systems. <https://www.hindmarshplumbing.com.au/chemical-cleaning-potable-water-systems/>
48. [www.theprocesspiping.com](https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-pigging-in-pipeline/). (2021). *Introduction to Pigging in Pipeline - The Process Piping*. The Process Piping. <https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-pigging-in-pipeline/>
49. Zhang, S., Tian, Y., Guo, Y., Shan, J., & Liu, R. (2021). Manganese release from corrosion products of cast iron pipes in drinking water distribution systems: Effect of water temperature, pH, alkalinity, SO₄²⁻ concentration and disinfectants. *Chemosphere*, 262, 127904. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127904>
50. Zhou, X., Kosaka, K., Nakanishi, T., Welfringer, T., & Itoh, S. (2020). Manganese accumulation on pipe surface in chlorinated drinking water distribution system: Contributions of physical and chemical pathways. *Water Research*, 184, 116201. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116201>

Priedas Nr. 1

Tyrimo Nr.	Koštuvo Nr.	Nusodinimo trukmė	Nusifonuoto sluoksnio gylis (mm) nuo dugno	Filtro popieriaus masė prieš filtravimą (g)	Filtro popieriaus masė po filtravimo ir džiovinimo	Skendinčių medžiagų masė (g)	SM koncentracija mg/l	Drumstumas, bangos ilgis 550
1 (Kojelavičiaus g.)	1	10 min	274	0,1118	0,1161	0,0043	0,0215	32,8
	2		103	0,1096	0,1170	0,0074	0,0370	36,9
	3	30 min	274	0,1113	0,1149	0,0036	0,0180	27,6
	4		103	0,1113	0,1158	0,0045	0,0225	32,2
	5	60 min	274	0,1107	0,1133	0,0026	0,0130	22,2
	6		103	0,1095	0,1136	0,0041	0,0205	25
	7	90 min	274	0,1112	0,1128	0,0016	0,0080	19,3
	8		103	0,1118	0,1140	0,0022	0,0110	21,1
2 (Riovonių g.) Nr. 1	1	10 min	274	0,1098	0,1241	0,0143	0,0715	163,3
	2		103	0,1106	0,1264	0,0158	0,0790	170,6
	3	30 min	274	0,1077	0,1216	0,0139	0,0695	142,6
	4		103	0,1088	0,1237	0,0149	0,0745	152,5
	5	60 min	274	0,1118	0,1208	0,0028	0,0140	122,9
	6		103	0,1125	0,1208	0,0083	0,0415	116,6
	7	90 min	274	0,1103	0,1172	0,0069	0,0345	102,4
	8		103	0,1105	0,1172	0,0067	0,0335	95,8
3 (Riovonių g.) Pradžia NRr. 2	1	10 min	274	0,1092	0,1140	0,0048	0,0240	7,3
	2		103	0,1093	0,1135	0,0042	0,0210	7,5
	3	30 min	274	0,1111	0,1136	0,0025	0,0125	5,4
	4		103	0,1107	0,1128	0,0021	0,0105	7,3
	5	60 min	274	0,1115	0,1128	0,0013	0,0065	6,4
	6		103	0,1111	0,1125	0,0014	0,0070	6,4
	7	90 min	274	0,1117	0,1129	0,0012	0,0060	6,9
	8		103	0,1118	0,1122	0,0004	0,0020	5,7
Džiaugsmo g.	1	10 min	274	0,1091	0,1142	0,0051	0,0255	33,6
	2		103	0,1086	0,1161	0,0075	0,0375	37,7
	3	30 min	274	0,1079	0,1122	0,0043	0,0215	27
	4		103	0,1104	0,1151	0,0047	0,0235	33,4
	5	60 min	274	0,1079	0,1111	0,0032	0,0160	22,1
	6		103	0,1112	0,1148	0,0036	0,0180	27,8
	7	90 min	274	0,1111	0,1132	0,0021	0,0105	15,9
	8		103	0,1098	0,1123	0,0025	0,0125	16,1
Nugalėtojų g.	1	10 min	274	0,1072	0,1313	0,0241	0,1205	239,4
	2		103	0,1075	0,144	0,0365	0,1825	275,6
	3	30 min	274	0,1079	0,1216	0,0137	0,0685	143,7
	4		103	0,1071	0,1247	0,0176	0,0880	175,1
	5	60 min	274	0,1074	0,1183	0,0109	0,0545	136,9
	6		103	0,1075	0,119	0,0115	0,0575	138,5
	7	90 min	274	0,1069	0,1174	0,0105	0,0525	128,3

Tyrimo Nr.	Koštuvo Nr.	Nusodinimo trukmė	Nusifonuoto sluoksnio gylis (mm) nuo dugno	Filtro popieriaus masė prieš filtravimą (g)	Filtro popieriaus masė po filtravimo ir džiovinimo	Skendinčių medžiagų masė (g)	SM koncentracija mg/l	Drumstumas, bangos ilgis 550
	8		103	0,1062	0,1164	0,0102	0,0510	125,6
Vaduvos g.	1	10 min	274	0,1081	0,1145	0,0064	0,0320	76,8
	2		103	0,1079	0,1171	0,0092	0,0460	85,1
	3	30 min	274	0,1086	0,1158	0,0072	0,0360	73,2
	4		103	0,1078	0,1172	0,0094	0,0470	82,1
	5	60 min	274	0,1085	0,1149	0,0064	0,0320	70
	6		103	0,1082	0,1167	0,0085	0,0425	72,7
	7	90 min	274	0,1075	0,1145	0,007	0,0350	65,3
	8		103	0,1056	0,1139	0,0083	0,0415	68,5
Linksmoji g.	1	10 min	274	0,1112	0,1161	0,0049	0,0245	33,3
	2		103	0,1086	0,1163	0,0077	0,0385	38,7
	3	30 min	274	0,1093	0,1132	0,0039	0,0195	24,1
	4		103	0,1105	0,1159	0,0054	0,0270	33,9
	5	60 min	274	0,1102	0,1125	0,0023	0,0115	22,3
	6		103	0,1098	0,1137	0,0039	0,0195	29,4
	7	90 min	274	0,1094	0,1108	0,0014	0,0070	11,1
	8		103	0,1111	0,1132	0,0021	0,0105	19,2