VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Kristina BAZIENĖ

KOLMATACIJOS PROCESŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR LĖTINIMO PRIEMONIŲ TAIKYMAS SĄVARTYNAMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (04T)

VGTU
LEIDYKLA
TECHNIKA
Vilnius 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Saulius VASAREVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2134-M mokslo literatūros knyga
http://leidykla.vgtu.lt

ISBN 978-609-457-486-3

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2013
© Kristina Bazienė, 2013
kristina.baziene@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Kristina BAZIENĖ

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF CLOGGING PROCESSES AND IMPLEMENTATION OF MITIGATION MEASURES IN LANDFILLS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (04T)

VGTU
LEIDYKLA TECHNIKA
Vilnius 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Saulius VASAREVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama komunalinių atliekų sąvartyno filtrato drenažo sluoksnio kolmatacijos problema. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti komunalinių atliekų sąvartyno filtrato savybes, kurios apibūdina kolmatacijos procesus drenažo sluoksnyje, surasti tyrimų metu naudojamo drenažo užpildo efektyvią sudėtį, kuri išlaiko laidumo funkciją ir mažiau kenkia aplinkai.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: nustatyti komunalinių atliekų sąvartyno filtrato cheminiai elementai, kurie turi įtakos drenažo sluoksnio kolmatacijai; naudojant komunalinių atliekų sąvartyno filtratą atlikti drenažo sluoksnio, kolonėlės tyrimai su skirtingos sudėties medžiagomis ir nustatyti kolonėlių užpildų poringumo pokyčiai, nustatyta tinkamą naudojamų medžiagų (skaldos ir smulkintų naudotų padangų) sudėtis drenažo sluoksnio užpildui formuoti.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, formuluojamas darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Pirmas skyrius skirtas literatūros analizei. Šiame skyriuje nagrinėjami kolmatacijos procesai, vykstantys komunalinių atliekų sąvartynuose. Skyriuje apžvelgti iki šiol pasaulyje atlikti kolmatacijos tyrimai, išanalizuoti gauti jų rezultatai. Skyriaus pabaigoje formuluojami disertacijos darbo uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikiamos skirtingų medžiagų kolmatacijos tyrimų metodikos. Taip pat pateikta parametrų, turinčių įtakos kolmatacijos procesams, nustatymo metodika.

Trečiame skyriuje pateikiama atliktų tyrimų rezultatų analizė. Skirtingiems užpildams išmatuoti ir apskaičiuoti pagrindiniai kolmatacijos procesus apibūdinantys parametrai: poringumas ir poringumo koeficientas. Eksperimentinių tyrimų metu gauti tiek užpildų, tiek ir filtrato koncentracijų kaitos rezultatai panaudoti prognostiniams poringumo mažėjimo vertinimams.

Disertacijos tema yra paskelbti 6 moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, referuojamuose ISI Web of Science duomenų bazėje, vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į kitas duomenų bazes, vienas – konferencijų medžiagoje, referuojamoje ISI Proceedings duomenų bazėje, du – recenzuojamoje Lietuvos konferencijos medžiagoje, įtrauktoje į Index Copernicus duomenų bazę.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trijose respublikinėse ir dviejose tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Abstract

The thesis examines the causes for the clogging problem of municipal landfill leachate collection system. The main aim of the work is to research clogging processes in different fillings by using municipal waste leachate, evaluate the leachate chemical compound concentration changes, and, based on the results of researches, to maintain the conductivity function.

In the graduation thesis, several basic objectives are being solved: to perform column research of the fillings, by using municipal waste landfill leachate, and to identify parameters, identifying the clogging processes of fillings: porosity and porosity coefficient, as well as to analyse their changes; to analyse the concentrations of chemical compounds leachate, having an impact on drainage layer clogging; to evaluate, by applying modelling software, the column filling porosity changes over a period of time.

The thesis consist of an introduction, three chapters, general conclusions, list of references used as well as the list of the author's publication on the dissertation topic.

The introductory chapter discusses the study problem, the relevance of the work, presents the description of the research object, formulation of the aim and objectives of the work, description of the research methodology, scientific novelty of the work, the practical significance of results, and defensive statements.

The first chapter is the review of literature, as well as examination of: clogging processes in municipal landfill leachate collection system. There is looked over the others World scientists work of clogging research and analysed their results. The chapter ends with conclusions and revision of thesis objectives.

The second chapter presents the research methodology of: porosity of different fillings, and the measure of leachate parameters causing drainage clogging. There is also presented the methodology of modelling during long term.

The fourth chapter presents the results of experimental research and their analysis. The main parameters describes clogging are porosity and coefficient of porosity, which measured for different fillings. There is presented a landfill drainage layer construction formatting of drainage rubble ant tired shreds layers. The layers are of the different thickness.

6 articles have been published on the topic of thesis: two – in the compendium of articles, included into *Web of Science ISI* database; one – in scientific journal referred in international databases, one – in international Lithuanian conference material, included into Index Copernicus databases; two – in reviewed Lithuanian Conference material.

Žymėjimai

Simboliai

A – cilindro skerspjūvio plotas, cm^2;
a – zonos ilgis; cm;
B – drenažo sluoksnio storis šalia filtrato surinkimo vamzdžių, m;
c_{L2} – kalcio koncentracija filtrate, mg/l;
D – didžiausių dalelių skersmuo, mm;
ET – išgaruojančios drėgmės kiekis; mm;
e – poringumo koeficientas;
f_{Ca} – kalcio frakcijos masė teršiančioje medžiagoje; g;
h – cilindro aukštis; cm;
k_{SM} – skendinčių medžiagų koncentracija, mg/l;
M – ėminio masė, g;
m – cilindro su užpildu masė, g;
m_2 – prisotinto vandeniu mėginio masė, g;
m_c – tuščio cilindro masė, g;
m_f – švaraus filtro masė, g;
m_s – filtro masė po filtravimo, g;
n – užpildo poringumas, %;
n_b – užterštos medžiagos poringumas, %;
L – maksimalaus srauto kelio ilgis į filtrato surinkimo vamzdį; m;
$PERC$ – filtrato kiekis, m^3;

P – kritulių kiekis; mm;
RO – šlaitinis vandens debitas, cm^3;
ρ_t – užpildo piltinis tankis, g/cm^3;
S – atliekų drėgmė, g;
t – laikas, s;
t_c – laidumo sumažėjimo laikas; s;
V – cilindro tūris; cm^3;
V_p – pilno cilindro tūris, cm^3;
V_v – vandens tūris sunaudotas užpildo prisotinimui, cm^3;
r – cilindro spindulys; cm;
q_0 – vidutinė vertikali filtracija į drenažo sluoksnį, $m^3/m^2/a$;
Q – vandens tūris, cm^3.

Santrumpos

ChDS – cheminis deguonies sunaudojimas;
DS – granitinė drenažo skalda;
DSA – drenažo skaldos ir 30 % asfalto atliekų mišinys;
DSP – drenažo skaldos ir 30 % smulkintų padangų mišinys;
ES – Europos Sąjunga;
SM – skendinčios medžiagos;
Ž – Lietuvos karjeruose kasamas žvyras;
ŽP – žvyro ir 30 % smulkintų padangų mišinys.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 2
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 3
Tyrimų metodika 3
Darbo mokslinis naujumas 3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 4
Disertacijos struktūra 5

1. KOLMATACIJOS TYRIMŲ LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ 7
1.1. Filtrato surinkimo sistemos konstrukcija 8
1.2. Kolmatacijos susidarymas 19
1.3. Laidumo sumažėjimo drenažo sluoksnyje lauko tyrimai 23
1.4. Laboratoriniai kolmatacijos procesų tyrimai 26
1.5. Poringumo kaitos matematiniai modeliai 30

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 33

2. KOLMATACIJOS TYRIMŲ METODIKA 35
2.1. Užpildų kolmatacijos tyrimų metodika 36
2.2. Filtrato sudėties kaitos nustatymo metodika 44
2.3. Kolonėlės užpildo poringumo mažėjimo modeliavimo metodika 49
2.4. Antrojo skyriaus išvados 54

3. KOLMATACIJOS TYRIMŲ REZULTATAI 55
3.1. Užpildų kolmatacijos tyrimų rezultatų analizė 56
3.2. Filtrato sudėties kaitos tyrimai ir jų analizė 72
3.3. Kolonėlės užpildo poringumo mažėjimo modeliavimo rezultatų analizė 89
3.4. Smulkintų padangų naudojimas mažinant drenažo sluoksnio kolmataciją 97
3.5. Trečiojo skyriaus išvados 100

BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJA 103

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....105

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 115

Contents

INTRODUCTION 1
Problem of the work 1
Topicaly of the work 2
Object of the research 3
Aim of the work 3
Task of the work 3
Methodology of research 3
Scientific novelty of the work 3
Practical value of the work 4
Defended propositions 4
Approbation of the scientific work 4
Structure of the scientific work 5

1. LITERATURE REVIEW OF CLOGGING INVESTIGATIONS 7
1.1. Design of leachate collection system 8
1.2. Formation of clogging 19
1.3. Conductivity decrease in the drainage layer of field studies 23
1.4. Laboratory study of clogging processes 26
1.5. Mathematical model of porosity change 30

1.6. Conclusions of the first chapter and formulation of dissetation tasks 33

2. METHODOLOGY OF CLOGGING INVESTIGATION.....35
2.1. Methodology of fillings clogging.....36
2.2. Methodology of leachate change composition 44
2.3. Modeling methodology of column filling of porosity loss.....49
2.4. Conclusions of the second chapter 54

3. INVESTIGATION AND ANALYSIS OF COLMATATION 55
3.1. Research and analysis of fillings clogging 56
3.2. Research and analysis of leachate change composition 72
3.3. Simulation results analysis of column filling porosity reduction 89
3.4. Tired shreds use for reducing clogging of the landfill drainage layer 97
3.5. Conclusions of the third chapter.....100

GENERAL CONCLUSIONS AND RECOMMENDATION 103

REFERENCES 105

LIST OF THE AUTHOR'S PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION 115

Įvadas

Problemos formulavimas

Atliekų tvarkymas – viena pagrindinių aplinkos apsaugos problemų, atsiradusi vos įsikūrus pirmosioms gyvenvietėms ir tapusi ypač aktuali dabar. Labiausiai paplitęs komunalinių atliekų tvarkymo būdas yra jų išvežimas ir šalinimas komunalinių atliekų sąvartynuose. Sąvartynuose per atliekų masę besisunkiantys atmosferos krituliai suformuoja filtratą, kuris surenkamas drenažo sistemos pagalba. Filtrato surinkimo sistemos sudarytos iš drenažo sluoksnio, kurio sudedamosios dalys (daugiausia nominalaus 32–60 mm dalelių dydžio) skalda bei perforuoti vamzdžiai, kuriais filtratas surenkamas. Filtrato kiekiai sąvartyne tiesiogiai priklauso tiek nuo atliekų drėgmės, tiek ir nuo atmosferos kritulių kiekio.

Surenkant filtratą drenažo sistemomis per ilgą sąvartyno eksploatavimo laiką drenažo užpildo sluoksnyje dėl daugiakomponentinės filtrato sudėties vyksta kolmatacijos procesai. Kolmatacija – labai smulkių dalelių įplovimas į poringus gruntus sumažinant filtracijos galimybes. Smulkios dalelės nusėda ant drenažo sudedamųjų medžiagų paviršiaus. Didėjant nuosėdų kiekiui formuojasi vienalytė medžiaga be porų. Filtrato sudėtis turi tiesioginės įtakos kolmatacijos

procesams. Filtrato sudėtis priklauso nuo sąvartyno amžiaus, įrengimo technologijos, klimatinių sąlygų, šalinamų atliekų sudėties. Kolmatacijos procesai sąlygoja drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimą dėl dalelių susicementavimo.

Apibendrinant galima teigti, kad didžiausią įtaką kolmatacijos procesams turi skendinčios medžiagos, geležies bei kalcio junginiai. Yra sukurta įvairių priemonių, apsaugančių drenažo sluoksnį nuo kolmatacijos, pvz.: geotekstilės, geosintetinio drenažo sluoksnio naudojimas, surinkimo drenų išdėstymas. Tačiau, nepaisant to, yra pastebimas drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimas, ypač ten, kur komunalinių atliekų sąvartynai eksploatuojami ilgiau kaip 10–15 metų.

Darbo aktualumas

Daugelyje pasaulio šalių didėjant vartojimui nuolat didėja ir susidarančių komunalinių atliekų kiekiai, kurie dažniausiai deponuojami sąvartynuose. Daugėjant atliekų kiekiui sąvartynuose formuojasi sudėtingos sudėties filtratas, kuris tekėdamas per drenažo sluoksnį veikia pastarojo funkcionavimą. Dėl drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimo sąvartynuose susiformuoja mažesni filtrato debitai, atsiranda atliekų kaupo nuošliaužos, atliekų kaupo paviršiuje dėl drėgmės pertekliaus susiformuoja vandens sankaupos – tai pagrindinės drenažo sluoksnio kolmatacijos pasekmės.

Surenkant filtratą drenažo sluoksnis per ilgesnį eksploatacijos laiką yra veikiamas kolmatacijos procesų, kurių įtakoje sumažėja sluoksnio laidumas. Atliekant stebėjimus komunalinių atliekų sąvartynuose buvo nustatyta, kad filtrato surinkimo sistemos veikia ribotą laiką, sumažėja jų funkcionalumas. Smulkios (dumblo ir smėlio) dalelės nusėda ant užpildą sudarančios medžiagos dalių, todėl mažėja porų dydis. Tokie procesai nagrinėjami kaip drenažo sluoksnio užsiteršimas, kuris sąlygoja filtrato laidumo sumažėjimą. Šiais klausimais pasaulyje pradėta domėtis tik atsiradus problemai, kada atliekos šalinamos sąvartynuose kelis dešimtmečius.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – komunalinių atliekų sąvartyno drenažo užpildas ir jame vykstantys kolmatacijos procesai.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – ištirti kolmatacijos procesus skirtinguose užpilduose, naudojant komunalinių atliekų sąvartyno filtratą, įvertinti filtrato cheminių junginių koncentracijų pokyčius bei, remiantis tyrimų rezultatais, pasiūlyti efektyvią drenažo užpildo sudėtį.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti skirtingos sudėties užpildus, naudojant komunalinių atliekų sąvartyno filtratą ir nustatyti kolmatacijos proceso eigos dėsningumus.

2. Nustatyti užpildų kolmatacijos procesus apibūdinančius parametrus: poringumą ir poringumo koeficientą bei įvertinti jų kitimą.

3. Ištirti komunalinių atliekų sąvartyno filtrato cheminių junginių, turinčių įtakos drenažo sluoksnio kolmatacijai, koncentracijas.

4. Taikant modeliavimo programą įvertinti kolonėlės užpildo poringumo pokyčius laiko bėgyje.

Tyrimų metodika

Užpildų poringumui nustatyti taikytas tūrio metodas. Geležies koncentracijoms filtrate nustatyti naudotas fotometrinis cheminės analizės metodas, o kalcio koncentracijoms filtrate nustatyti taikyta titrametrinė cheminės analizės metodika. Skendinčių medžiagų koncentracijai nustatyti naudota filtravimo metodika. Užpildų poringumo pokyčiams per 30 metų laikotarpį įvertinti naudotas *Bioclog* programinės įrangos paketas.

Darbo mokslinis naujumas

Tai kompleksiniai teoriniai bei eksperimentiniai komunalinių atliekų sąvartyno filtrato drenažo užpildo kolmatacijos tyrimai, įvertinant skirtingų medžiagų panaudojimo galimybes šio sluoksnio formavimui. Rengiant disertaciją buvo gauti šie aplinkos inžinerijos mokslui nauji tyrimų rezultatai:

1. Kompleksiškai ištirtos ir įvertintos kolmatacijos procesų sąvartynų drenažo sluoksnio užpilde mažinimo galimybės.

2. Pasiūlytas naujas komunalinių atliekų sąvartynų filtrato drenažo užpildas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Ištyrus komunalinių atliekų sąvartyno filtrato komponentinę sudėtį (skendinčių medžiagų, kalcio ir geležies kiekio kaitą) po filtravimo per skirtingus užpildus, pasiūlyta tinkama medžiaga komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sluoksnio užpildui. Tyrimų rezultatus galima taikyti projektuojant ir įrengiant komunalinių atliekų sąvartynų filtrato drenažo sluoksnį.

Ginamieji teiginiai

1. Ženklią įtaką sąvartyno drenažo užpildo kolmatacijos procesams turi filtrate esantys skendinčių medžiagų, kalcio ir geležies junginiai.
2. Smulkintų padangų ir skaldos mišinio panaudojimas įrengiant sąvartyno drenažo sluoksnį sulėtina kolmatacijos procesus.
3. Ilgamečius kolmatacijos procesus komunalinių atliekų sąvartyne galima prognozuoti taikant modeliavimo programą Bioclog.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 6 moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, referuojamuose ISI Web of Science duomenų bazėje (Bazienė *et al.* 2012; 2013), vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į kitas duomenų bazes (Bazienė ir Vasarevičius 2012), vienas – konferencijų medžiagoje, referuojamoje ISI Proceedings duomenų bazėje (Bazienė ir Vasarevičius 2011), du – recenzuojamose Lietuvos konferencijos medžiagose, įtrauktose į Index Copernicus duomenų bazę (Bazienė ir Vasarevičius 2010; 2011).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 3-ose respublikinėse ir 2-ose tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje *„Mokslas – Lietuvos ateitis“* 2010 m. Vilniuje;

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje *„Mokslas – Lietuvos ateitis“* 2011 m. Vilniuje;

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje *„Mokslas – Lietuvos ateitis“* 2012 m. Vilniuje;

Tarptautinėje konferencijoje *„The 8th International Conference Environmental engineering“* 2011 Vilniuje;

Tarptautinėje konferencijoje *„The 7th Intercontinental Lanfill Research Symposium“* 2012 m. Lulea (Švedijoje).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacija.

Darbo apimtis 116 puslapių, panaudota 12 numeruotų formulių, 59 paveikslai ir 8 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 119 literatūros šaltinių.

1

Kolmatacijos tyrimų literatūros šaltinių analizė

Atliekų problema yra aktuali nuolatos, nes augant gamybos mastams susidaro vis didesni atliekų kiekiai. Nors pastaraisiais metais vis intensyviau diegiamos beatliekės ir švaresnės gamybos technologijos, tačiau kol kas gamybos ir vartojimo proceso metu atliekų visuomet susidaro. Atliekų tvarkymas – vienas svarbiausių aplinkos apsaugos prioritetų (Denafas ir kt. 2003).

Esant nepageidaujamam aplinkos užterštumui, kuris neigiamai veikia augmeniją, gyvūniją ir svarbiausia žmogaus sveikatą, svarbu stengtis apsaugoti juos nuo didesnio pavojaus ir pašalinti esančius teršalus. Taip pat labai svarbu nustatyti priežastis, sukėlusias taršą, ir stengtis jas pašalinti. Viena iš tokių pasekmių – netvarkingai, nesistemingai ir be priežiūros tvarkomų komunalinių atliekų sąvartynuose išsiskiriantis filtratas. Norint sumažinti filtrato poveikį aplinkai, besiribojančiai su sąvartynu, reikia išsamiai nagrinėti priežastis, lemiančias filtrato susidarymą, bei jo sudėtį. Kadangi tik naujuose, pagal modernias technologijas projektuojamuose ir įrengiamuose sąvartynuose stengiamasi sumažinti tiek filtrato kiekį, tiek ir jo poveikį aplinkai, filtrato valymas vis dar plačiai nagrinėjamas. Tiriamos įvairios filtrato valymo technologijos, analizuojamos jau įdiegtos ne vienerius metus veikiančiuose sąvartynuose.

Atliktus kolmatacijos tyrimų literatūrinę analizę, galima juos suskirstyti į lauko, mezokosmoso bei laboratorinius kolonėlių tyrimus. Brunet ir kt. (1991) atliko keletą lauko tyrimų Vokietijos komunalinių atliekų sąvartynuose, kuriuose buvo pastebėti ryškūs kolmatacijos procesai. Mokslininkai taip pat atliko ir laboratorinius kolonėlių tyrimus su įvairiomis drenažą formuojančiomis medžiagomis. Kanadoje mokslininkai septynerius metus atliko eksperimentus, kurių metu tyrė Keyle Valley (Keyle Slėnio) sąvartyno drenažo sistemą. Fleming ir kt. (1999) plačiai tyrinėjo mezokosmoso procesus, bei anaerobinėmis sąlygomis vykstančius kolmatacijos procesus.

1.1. Filtrato surinkimo sistemos konstrukcija

Sąvartynai aplinkosaugos požiūriu yra grėsmingi objektai. Ypač aplinką neigiamai veikia filtratas ir sąvartynų dujos. Netinkamas sąvartynų įrengimas bei tvarkymas turi įtakos didėjančiai vandens ir atmosferos taršai. Nemaža dalis sąvartynų pasaulyje buvo bei yra įrengiami netinkamose vietose, dažniausiai buvusiuose karjeruose, tiesiog ant grunto, be nepralaidaus ekrano. Dažnai tokios atliekų saugojimo vietos yra prie naudojamų ar potencialių požeminių (gruntinių) vandens šaltinių, kur nėra tinkamos dugno izoliacijos, filtrato surinkimo sistemos. Tokiose vietose nėra ir filtrato valymo ar kitokio apdorojimo įrenginių, taip pat nėra sąvartynų eksploatacijos planų, atliekų kontrolės ir registracijos. Atliekų saugojimo problema sąvartynuose plačiai nagrinėjama pasaulyje, tačiau visada atsiranda problemos, nes ilgas eksploatavimo laikas išryškina klaidas, padarytas projektuojant sąvartynus. Daugelyje šalių stengiamasi mažinti atliekų kiekius jas rūšiuojant, deginant, kada išgaunama energija, tačiau ir toliau išlieka populiariausias ir pigiausias atliekų šalinimas sąvartynuose.

Komunalinių atliekų sudėtis labai skiriasi dėl socialinių ir ekonominių sąlygų, vietos, sezono, atliekų surinkimo ir šalinimo būdų, bandinių ėmimo vietų ir rūšiavimo procedūrų. Atliekų sudėties skirtumai, kurie turi įtakos ir filtrato sudėčiai, išsivysčiusių ir besivystančių šalių pastebimai skiriasi (Parkes *et al*. 2007). Filtratas yra sudarytas iš komplekso įvairių organinių ir neorganinių cheminių junginių (Svensson *et al*. 2005), priklauso nuo atliekų sudėties, be to sudėties pakitimai atsiranda dėl komunalinių atliekų sąvartyno senėjimo, kada keičiasi tiek fizinės, tiek cheminės parametrų vertės (Lynikienė ir Jaskelevičius 2008). Susidarančio filtrato kiekis pirmiausia priklauso nuo komunalinių atliekų drėgmės kiekio, saugojimo ir laikymo sąlygų, tokių kaip temperatūra, drėgmė bei ventiliacija (Hurt and Hong 2000).

Visapusiška komunalinių sąvartynų sudėties analizė gali suteikti detalią ir aiškią informaciją apie cheminių elementų atsiradimą bei jų likimą.

Sudedamosios atliekų dalys labai įvairuoja tarp skirtingų komunalinių atliekų sąvartynų atspindėdamos skirtingus vartojimo būdus. 1.1 lentelėje pateikiamos skirtingų komunalinių atliekų sąvartynų sudedamosios dalys. Procentinė atliekų dalis skiriasi ir priklauso nuo vartotojų papročių, šalies ekonominio išsivystymo lygio, vykdomos aplinkosaugos politikos, kuri daro įtaką ir gyventojų įpročiams. Didžiausia procentinę komunalinių atliekų dalį sudaro biologiškai degraduojančios atliekos, kurios ir yra pagrindinis atliekų skysčio šaltinis, nes juose yra daugiausia drėgmės (77–77 %) (Selice *et al*. 2006). Mažiausiai į komunalinių atliekų sąvartynus patenka metalo gaminių – apie 2 %, tačiau jų daroma žala aplinkai bei žmogaus sveikatai turi didžiausią poveikį. Popierius ir jo gaminiai, plastikas bei stiklas ir keramika sudaro nedidelę procentinę dalį atliekų masėje. Pagrindinės priežastys, lemiančios tokį pasiskirstymą: žemesnio ekonominio išsivystymo lygio šalyse tai pagrindiniai komponentai, kuriuos gyventojai renka, rūšiuoja ir priduoda supirkimo įmonėms, už ką gauna atlygį; labiau išsivysčiusiose valstybėse vykdomos ekologinio švietimo programos bei mokesčių už atliekas politika gyventojus skatina rūšiuoti buitines atliekas. Kadangi Vokietijoje komunalinių atliekų tvarkymas priklauso savivaldybių kompetencijai, todėl privatus sektorius nėra suinteresuotas vykdyti atliekų rūšiavimą ir perdirbimą (Selice *et al*. 2006).

Sąvartynai yra pagrindinis komunalinių atliekų tvarkymo metodas Kinijoje, tačiau nemažas jų skaičius neatitinka nacionalinių taršos standartų. Sąvartynuose nėra įrengta dujų surinkimo įrenginių. Didesni reikalavimai buvo pritaikyti naujai statomiems sąvartynams: patiesta aukšto slėgio polietileno geomembrana, apsauganti gruntinį vandenį nuo teršalų, filtrato surinkimo ir išvalymo sistema bei dujų surinkimo sistema. Tokie naujos konstrukcijos sąvartynai sudaro 1/3 visų sąvartynų (Huang *et al*. 2006).

Tokių ir panašių pavyzdžių galima pateikti labai daug, tačiau mokslininkai (Abu–Zeid *et al.* 2004; Barone *et al.* 1997; Choleva *et al.*2010; Deng and Englehart 2007; Elvidge and Reymond 2001; Khattabi and Aleya 2007) stengiasi kuo plačiau išnagrinėti visas problemas ir siūlyti galimus sprendimus. Vienas iš pagrindinių tokių problemų yra sąvartyno dugno konstrukcija. Pats dugnas turi būti kaip pagrindinis barjeras, sustabdantis bet kokių teršalų patekimą į aplinką. Kuriant technologijas, padedančias apsaugoti aplinką nuo filtrato, reikia gerai suvokti jo susidarymo sąlygas. Taip pat labai svarbi ir pati filtrato sudėtis bei jos kaita ir priklausomybė nuo gamtinių sąlygų, nes sąvartynai yra atviros antropogeninės kilmės sistemos, sukurtos gamtinėje aplinkoje.

Filtrato sudėtis yra sąvartyno atliekų masėje vykstančių biocheminių procesų indikatorius. Sąvartyno filtrato sudėtis laikui bėgant kinta dėl buitinių atliekų degradacijos stadijų pasikeitimo (Gasiūnas ir kt. 2002).

Iki 50 % į sąvartynus šalinamų atliekų sudaro organinės biologiškai degraduojančios atliekos, kurių šalinimas sąvartynuose turi būti nuolatos mažinamas, nurodoma Europos Sąjungos atliekų sąvartynų direktyvoje. Šios atliekos yra pagrindinis šaltinis metano dujoms susidaryti, bei pagrindinis atliekų drėgmės šaltinis. Žemiau pateiktoje 1.1 lentelėje išsiskiria Švedija su labai mažu biologiškai skaidžių atliekų kiekiu. Šioje šalyje daugiau kaip dvidešimt metų vykdoma švietimo atliekų tvarkymo buityje programa duoda gerus rezultatus. Panaši atliekų sudėtis yra Kinijoje, Indijoje ir Lietuvoje – apie 40 % biologiškai skaidžios atliekos sudaro viso atliekų, patenkančių į sąvartynus, kiekio.

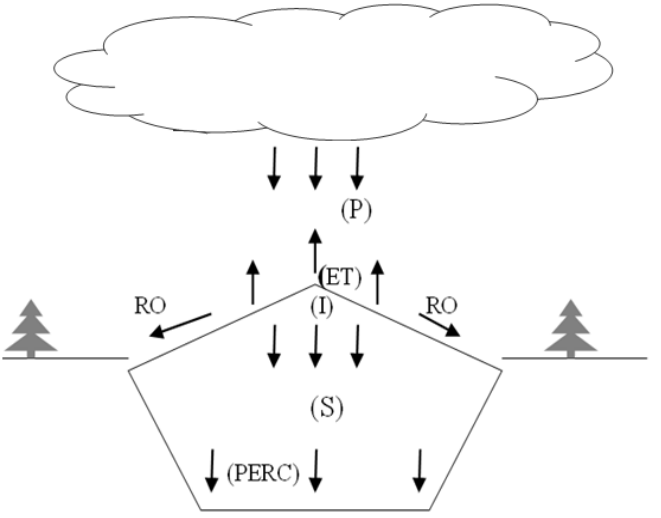
1.1 lentelė. Komunalinių atliekų sudedamųjų dalių kiekiai procentais skirtingų valstybių sąvartynuose (Hogland *et al.* 2004; Selice *et al.* 2006; Lund 2001; Reji and Herat 2002; Aplinkos ministerija 2011; Enviroment 2011)
Table 1.1. Amound in percentage of municipal waste composition in landfills of different countries (Hogland *et al.* 2004; Selice *et al.* 2006; Lund 2001; Reji and Herat 2002; Aplinkos ministerija 2011; Enviroment 2011)

Atliekų sudedamosios dalys	Komunalinių atliekų dalių kiekiai, %					
	Švedijoje Masalycke	Kinijoje Guilin	Anglijoje Pitsea	Indijoje Gazipur	Lietuvoje Kariotiškių	Kanadoje Keley Valley
Popierius ir kartonas	7,31	7,94	25	19,9	14	37,5
Plastikas	8,12	8,03	7,5	5,4	9	8,3
Tekstilė, odos gaminiai	1,43	4,58	7,6	3,7	7	8,3
Metalas	2,09	0,25	13	2,0	3	8,3
Stiklas ir keramika	0,32	4,01	3,5	2,0	12	6,7
Mediena	11,5	1,4	7,2	0,4	2	6,3
Žemė, smėlis, akmenys	68,6	32,3	13,4	34,0	11	6,7
Biologiškai degraduojančios atliekos	0,54	41,4	22,8	32,6	42	17,9

Atliekos sąvartyne kaupiamos tam tikrą laiką ir tas gali tęstis 20 ar daugiau metų. Atsižvelgiant į skaidymosi procesą bei jo trukmę, skirtingose sąvartyno dalyse vyksta skirtingi skaidymosi procesai.

Komunalinių atliekų sąvartyno filtratas formuojasi, kada krituliai patenka per atliekas į sąvartyno vidų, susijungia su atliekų skysta faze, turinčia pakankamai didelį drėgmės kiekį. Drėgmė, patenkanti į sąvartyną, susijungia su

drėgme, esančia pačiose atliekose, ir kartu infiltruojasi įgaudama naują cheminė sudėtį.



1.1 pav. Filtrato susidarymo schema (RO – šlaitinis nubėgimas, ET –garavimas, I – infiltracija, S – atliekų drėgmė, P – krituliai, PERC – filtratas) (El–Fadel *et al.* 2002)
Fig. 1.1. Scheme of leachate formation (RO – run off, ET – evaporation, I – infiltration, S – humidity of waste, P – precipitation, PERC – leachate) (El–Fadel *et al*. 2002)

1.1 paveiksle pateikiamas apibendrintas filtrato formavimosi modelis. Pavaizduotus komponentus galima sudėlioti į tokią eilės seką:

- dalis kritulių (*P*), pasiekiančių žemės paviršių, dėl tam tikro nuolydžio nubėga šlaitu ir sudaro šlaitinį nubėgimą (*RO*),
- dalis kritulių (*P*) infiltruojasi *(I*) į paviršinį sluoksnį (neuždengtos, dalinai uždengtos ar pilnai uždengtos atliekos),
- patekusios ant paviršiaus drėgmės dalis išgaruoja (*ET*), o likęs kiekis persisunkia per vegetatyvinį sluoksnį, jei toks egzistuoja,
- likusi drėgmės dalis po infiltracijos *(I*) juda žemyn per atliekas formuodama filtratą (*PERC*), kol pasiekia nelaidų sluoksnį.

Analizuojant visus procesus remiamasi vandens balanso lygtimi, kuri atlikus įvairius pakoregavimus, naudojama paviršinio vandens modeliavimui hidrologijoje. Vandens balanso algebrinė išraiška galima būtų užrašyti tokia formule:

$$PERC = P - RO - ET + I + S. \quad (1.1)$$

Visapusiškai teisingai ir tiksliai apskaičiuoti filtrato tekėjimą yra sudėtinga, kadangi neapibrėžta ir neįvertinta laiko trukmė. Didžioji dalis formulių ir metodų yra empiriniai. Dalis pagrindinių duomenų yra scholastiniai (temperatūra, šilumos indeksas, krituliai, vėjas, vegetacinis vystymasis), o kiti – mažai charakterizuojantys (šlaitinio nubėgimo koeficientas) (El–Fadel *et al*. 2002).

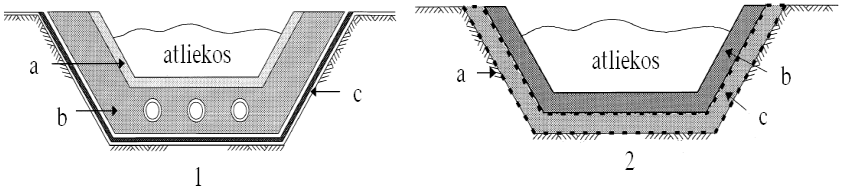
Parenkant sąvartyno vietą, kaip nurodoma ES direktyvoje (Dėl atliekų sąvartynų), būtina atsižvelgti į reikalavimus, susijusius su:

a) atstumu nuo sąvartyno ribų iki gyvenamųjų ar poilsio vietų, vandens kelių ir telkinių, kitų žemės ūkio bei miesto vietovių;

b) požeminių vandenų, jūros pakrančių ar saugomų gamtos teritorijų, esančių tame rajone, kuriame yra sąvartynas;

c) rajono geologinėmis ir hidrogeologinėmis sąlygomis;

d) potvynių, žemės įgriuvų, nuošliaužų ar griūčių pavojumi rajone.

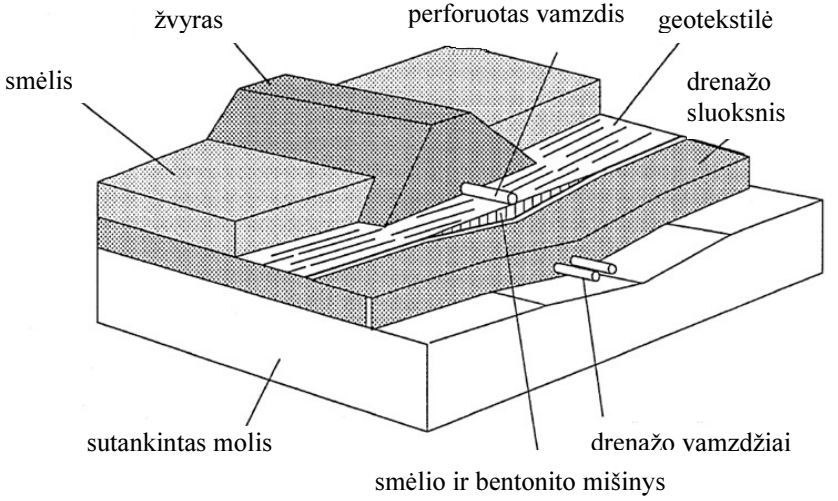


1.2 pav. Komunalinių atliekų sąvartyno dugno įrengimo pavyzdys: 1 – Austrijoje: (a) – filtracinis dirvožemis, b) – drenažo sluoksnis, c) – geomembrana; 2 – Šveicarijoje: a) – geotekstilė, b) – drenažo sluoksnis, c) – mineralinis barjeras) (Bouazza and Van Inpe 1998)

Fig. 1.2. Example of designe of municipal landfill waste bed: 1 – Austria: (a) – filtration soil, b) – drainage layer, c) – geomembrana; 2 – Switzerland: a) – geotextile, b) – drainage layer, c) – mineral barrier) (Bouazza and Van Inpe 1998)

Pasaulyje yra atlikta daugybė įvairiausių tyrimų ir pateikta daug pavyzdžių, kaip galima būtų suformuoti sąvartynų dugną, kad kaupiant atliekas būtų kuo mažesnis neigiamas poveikis aplinkai. 1.2 pav. ir 1.3 pav. pateikiami skirtingų dugno izoliavimo pavyzdžiai, kur matyti, kad visada yra paklojamas skysčiui nepralaidus sluoksnis. Svarbu pastebėti, kad pateikiami pavyzdžiai yra iš aukštesnį pragyvenimo lygį turinčių šalių. Griežti reikalavimai dėl sąvartyno dugno pakloto sudėties ryškiai išsiskiria į dvi grupes: JAV bei Vakarų Europos šalys griežtai pasisako dėl izoliacinių medžiagų naudojimo, o pietinės Europos šalys bei nemaža dalis Azijos šalių dėl to labai atsilieka (Bouazza and Van Inpe 1998; Hudson *et al.* 2009; Van Gerven *et al.* 2009). Statant naujus sąvartynus stengiamasi, kad jų dugnas būtų nepralaidus. Susidariusį filtratą labai svarbu

efektingai pašalinti iš sąvartynų. Jei pirmieji sąvartynų projektai sudaryti iš paprasto drenažo sluoksnio, tai vėliau sukurtos filtrato surinkimo sistemos su perforuotais vamzdžiais. Vakarų Europoje statyti įrengti su dviejų aukštų drenažo sistemomis (Zhang *et al*. 2008).

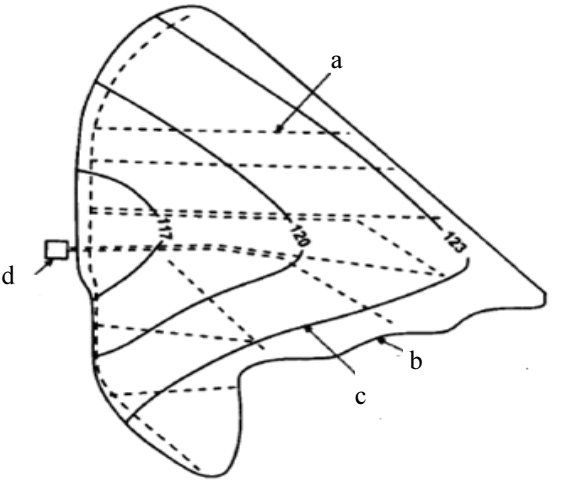


1.3 pav. Sąvartyno dugno sudedamųjų dalių fragmentas panaudotas Ghent Harbour sąvartyne Belgijoje (Zhang *et al*. 2008)
Fig. 1.3. Design fragment of Ghent Harbour municipal landfill waste bed in Belgium (Zhang *et al*. 2008)

Eksploatuojant tipinį komunalinių atliekų sąvartyną, atliekos yra talpinamos ir pakeliamos į 2–5 metrus bei uždengiamos plonu, dažniausiai smėlio ir smulkintų statybinių atliekų, sluoksniu. Naujos atliekos talpinamos šalia uždengto ploto. Užpildžius teritoriją atliekos toliau talpinamos ant ankščiau uždengtų atliekų. Per tokius skirtingu laiku sukauptų atliekų sluoksnius sunkiasi krituliai, išplaudami daug įvairių cheminių elementų. Kartu su krituliais migruoja ir didelė dalis kietųjų netirpių dalelių, kurios nusėda drenažo sluoksnyje (Mor *et al.* 2006).

Geotekstilė yra panaudojama filtrato surinkimo sistemų konstrukcijoje, atskiriant atliekas nuo pagrindinio drenažo užpildo ir, kai kuriais atvejais, sumažinant skendinčių medžiagų kiekį filtrate. Tokiu būdu yra ribojamas smulkių medžiagų patekimą į drenažo sluoksnį. Geotekstilės naudojimas abiem atvejais – ir atliekų atskyrimo, ir filtravimo funkcijos – reikalingas, sumažinant masę, kuri gali patekti į drenažo sistemą. Patenkanti medžiaga, tiek kietos, tiek koloidinės būsenos, bakterijų pagalba užpildo tuščias drenažo medžiagos erdves,

dėl ko sumažėja laidumas. Toks geotekstilės panaudojimas yra palankiai vertinamas, mažinant drenažo sluoksnio užteršimą. Dauguma tokio filtro/separatoriaus panaudojimo metodų yra plačiai aprašomi literatūroje (Giroud *et al*. 2004; Gounaris *et al*. 1993; Reddy and Marella 2001; Rowe 1998; Rowe 1999; Rowe *et al*. 2004).

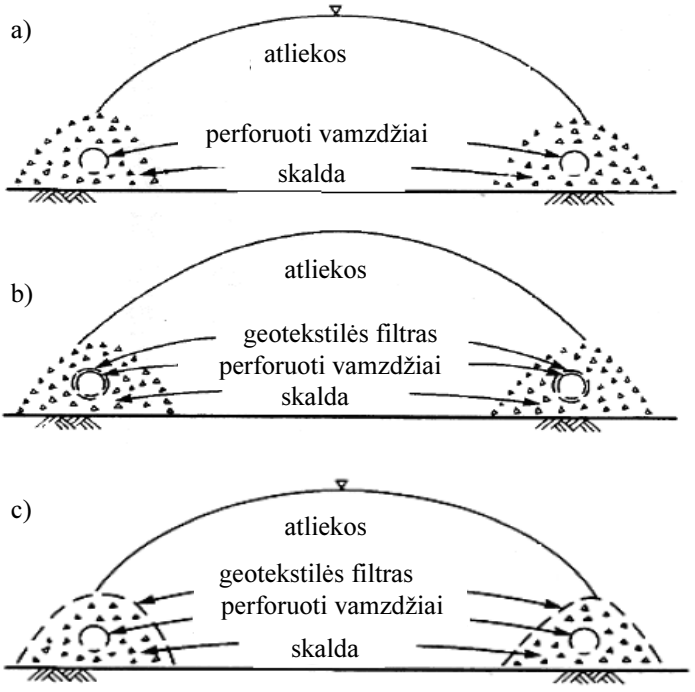


1.4 pav. Sąvartyno drenažo sistemos (vamzdžių) išdėstymo planas (a – filtrato surinkimo vamzdžiai, b – sąvartyno riba, c – horizontalės, d – siurblinė (Paksy *et al*. 1998))
Fig. 1.4. Designe of landfill drainage system (a – leachate collection pipes, b – border of landfill, c – horizontales, d – pump (Paksy *et al.* 1998))

1.4 pav. pavaizduota filtrato surinkimo sistema, susidedanti iš drenažo, kurį sudaro perforuotos drenos, išdėstytos granuliuotoje medžiagoje kas 50–200 metrų visame sąvartyno plote. Mokslininkas K. Rowe keliuose straipsniuose išanalizavo įvairius filtrato surinkimo sistemos modelius (1.5 paveikslas). Įrengiant komunalinių atliekų sąvartynų drenažo sistemą, naudojama geotekstilė, į kurią įsukami perforuoti filtrato surinkimo vamzdžiai bei geotekstilė paklojama virš drenažo sluoksnio. Tokios sudėtingos drenažo sistemos plačiai tyrinėjamos ir analizuojamos kitų mokslininkų.

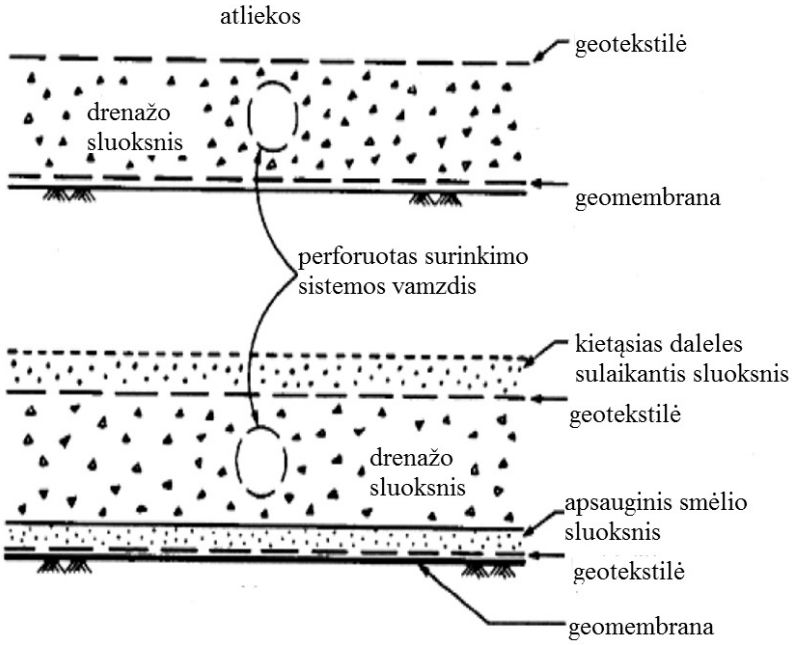
Filtrų ir granuliuotų medžiagų užteršimas priklauso nuo srovės greičio į ploto vienetą. Tokiu būdu didėja organinių, neorganinių ir skendinčių medžiagų masė per laiko vienetą, kas sukelia geotekstilės ir drenažo užpildo kolmatacijos proceso vystymąsi. Srauto tekėjimas ir filtravimasis per geotekstilę, padėtą aplink filtrato surinkimo vamzdį, yra intensyvesnis, nei pro geotekstilę, paklotą ant drenažo sluoksnio paviršiaus. Dėl minėtos priežasties geotekstilės užteršimas

įvyksta greičiau apsuktame vamzdyje. Didėjant atliekų pylimo kaupui, didėja ir filtrato srautas į surinkimo drenas. Taip pat padidėja srautas per pagrindinį vamzdį, o tai labai svarbu projektuojant sąvartynus (Rowe *et al*. 2004).



1.5 pav. Skirtingi filtrato surinkimo sistemos modeliai: a) be geotekstilės filtro, b) filtrato surinkimo vamzdžiai susukti į geotekstilę, c) geotekstilės filtras patiestas tarp atliekų ir drenažo sluoksnio (Rowe *et al*. 2004)
Fig. 1.5. Models of different leachate collection system: a) without geotextile filter, b) pipes wrapped in geotextile, c) geotextile barrier used between waste and drainage layer (Rowe *et al.* 2004)

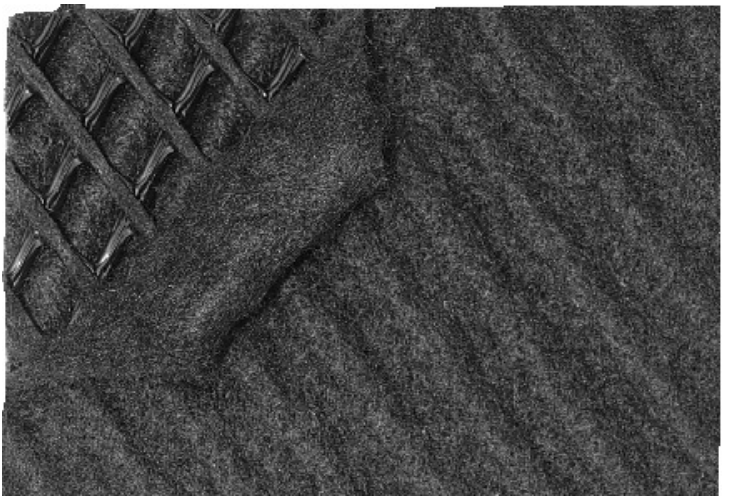
Ankščiau filtrato surinkimo sistemos buvo projektuojamos su smėlio filtru, kuris ypač greitai jas užteršdavo. Vėliau buvo projektuojamos daugiasluoksnės sistemos, susidedančios iš granuliuotos medžiagos ir įvairaus storio geotekstilės filtrų (1.6 pav.).



1.6 pav. Schematiškai pavaizduota skirtingų sąvartynų klojamas dugnas, susidedantis iš įvairių sluoksnių
Fig. 1.6. Schematics show in examples of blanket leachate collection system designs including a geotextile filter layer and uniform

Jungtinėse Amerikos Valstijose, stengiantis maksimaliai sumažinti drenažo sistemos užimamą tūrį sąvartyne, sukurtas geosintetinis drenažo tinklas (geonet) 1.7 paveikslas (Giroud *et al*. 1998). Tokios medžiagos eksploatavimo trukmė nėra gerai žinoma. Sąvartyne skaidymosi procesai vyksta šimtmetį, o kartais ir ilgiau. Geonet, kaip naujai sukurtos medžiagos, galimybės išlaikyti drenavimo sistemos funkcijas nėra plačiai ištyrinėtos. Priešingai, stambaus žvyro ar skaldos (19–32 mm frakcijos) panaudojimas drenažui formuoti žinomas nuo antikos laikų.

Atliekant filtrato sudėties bei kiekio tyrimus buvo pastebėta, kad vykstant kolmatacijai sumažėja filtrato kiekis. Toks sumažėjimas – tai drenažo sistemos laidumo mažėjimo padarinys (Brune *et al.* 1991; Cullimore 1993; Paksy *et al*. 1995; Paksy *et al.* 1998; Rowe *et al.* 1997). Praėjus dešimtmečiui ir toliau buvo atliekami sąvartynų drenažo sistemų laidumo mažėjimo tyrimai (McIsaac *et al.* 2000; Paksy 2002; Powrie and Robinson 2000; Rowe and McIsaac 2005).



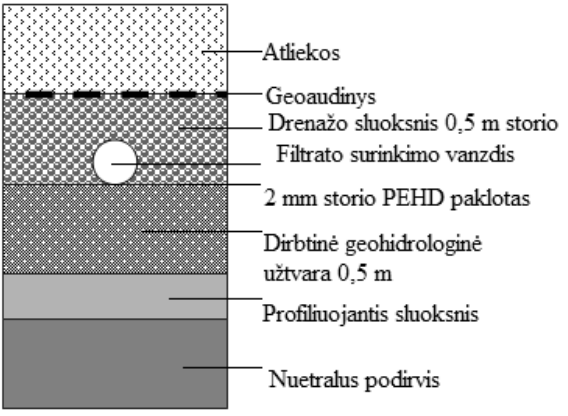
1.7 pav. Geosintetinis drenažo tinklas (geonet) (Giroud *et al*. 1998)
Fig. 1.7. Geosynthetic drainage net (geonet) (Giroud *et al*. 1998)

Nepaisant kylančių abejonių dėl geotekstilės naudojimo, yra ir toliau naudojami smulkios granuliometrinės sudėties žvyro filtrai, o geotekstilės filtrai suteikia papildomą erdvę atliekų talpinimui ir yra lengvai paklojami. Kaip anksčiau paminėta, užteršimas filtro sluoksnyje įvyksta, tačiau nėra atlikta daug tyrinėjimų, nustatančių sąsajas tarp mikrobinio vystymosi ir neorganinio nusėdimo geotekstilės viduje ar dirvožemio sluoksnyje. Taip pat svarbūs ir esantis spaudimas, ir medžiagos tipas. Šie veiksniai turi būti plačiau nagrinėjami, analizuojant filtrų užsiteršimą filtrato surinkimo sistemose (Brachman and Sabir 2010; Rittman *et al*. 1996; Rowe and Booker 1998; Tatsi and Zouboulis 2002).

Lietuvoje yra parengti ir įgyvendinti projektai, pagal kuriuos yra panaikinti maži ir nelegalūs rajoniniai sąvartynai. Vietoje jų įsteigta 11 naujų, kurie atitinka visus ES reikalavimus. Nelaukiant, kad natūralusis podirvis tenkintų laidumo reikalavimus, yra įrengta dirbtinė geohidrologinė užtvara. Mineralinė medžiaga yra paklota ant sutankinto pagrindo. Dirbtinė geohidrologinė užtvara yra mažiausiai 0,5 m storio. Tokiai užtvarai įrengti dažniausiai naudojamas molis. Jo pakaitalu gali būti mineralinis sluoksnis iš smėlio bentonito. Šiuo atveju smėlis klasifikuojamas nuo vidutiniškai smulkaus iki vidutiniškai stambaus. Bentonito kiekis turi būti 5–8 % esant 30–50 cm storio sluoksniui. Kita galima alternatyva – trisoplastas, susidedantis iš smėlio, bentonito ir polimero. Tenkinant laidumo reikalavimus trisoplasto sluoksnio storis gali būti sumažintas iki 10 cm.



1.8 pav. Vilniaus Kazokiškių sąvartyno dugno įrengimas (Principinis Vilniaus...2009)
Fig. 1.8. Installation of Kazokiškės landfill bottom in Vilniaus (Principinis Vilniaus...2009)



1.9 pav. Komunalinių atliekų sąvartyno deponavimo aikštelės dugno sudėtis Vilniaus regioniniame komunalinių atliekų sąvartyne (Principinis Vilniaus...2009)
Fig. 1.9. The composition of the deposit site in the bottom of Vilnius regional municipal waste landfill (Principinis Vilniaus...2009)

Pirminis izoliacinis sluoksnis sąvartyno struktūroje, skiriantis sukauptas atliekas ir dirbtinę hidrologinė užtvarą, yra 2,0 mm storio (didelio tankio polietilenas) paklotas, ar jo atitikmuo (1.8 paveikslas). Siekiant apsaugoti

paklotą nuo mechaninio sugadinimo sąvartyno statybos ir eksploatavimo metu, ant dirbtinio sandarinančio pakloto turi būti įrengtas geoaudinys. Šio apsauginio geoaudinio storis priklauso nuo drenažo sluoksnio medžiagos. Jeigu drenažo sluoksniui naudojamas žvyras, nepinto audinio tankis turi būti 500 g/m^2 (Principinis Vilniaus...2009). Įrengiant sąvartyno dugną, formuojama filtrato surinkimo sistema iš perforuotų vamzdžių, užpiltų drenažo skalda (19–32 mm frakcija). Šis sluoksnis gali būti ne mažesnis kaip 0,5 metro (1.9 pav.). Tam, kad apsaugoti drenažo sistemą nuo atliekų patekimo, yra klojamas geoaudinys. Taip įrengtas sąvartyno dugnas apsaugo aplinką nuo teršalų patekimo į ją, tačiau pačiame sąvartyne dėl ilgo eksploatavimo atsiranda konstrukciniai pokyčiai, kurie ne visada buvo įvertinti projektuojant sąvartyną.

1.2. Kolmatacijos susidarymas

Komunalinių atliekų sąvartyne drenažo sluoksnio pralaidumo sumažėjimas atsiranda dėl kolmatacijos. Kolmatacija – (pranc. *de colmatege*) labai smulkių dalelių įplovimas į poringus gruntus, sumažinant filtracijos galimybes. Anglų kalboje naudojamas žodis „clogging“ (užsikimšimas). Lietuvoje statybos techniniame reglamente „Gruntinių medžiagų užtvankos“ kolmatacija apibūdinama kaip geofiltracijos metu filtro ir panašių porų užsipildymas smulkiomis dalelėmis; tai kaip viena iš grunto filtracinių deformacijų rūšių. Sluoksnio pralaidumo sumažėjimas yra kolmatacijos procesų pasekmė.

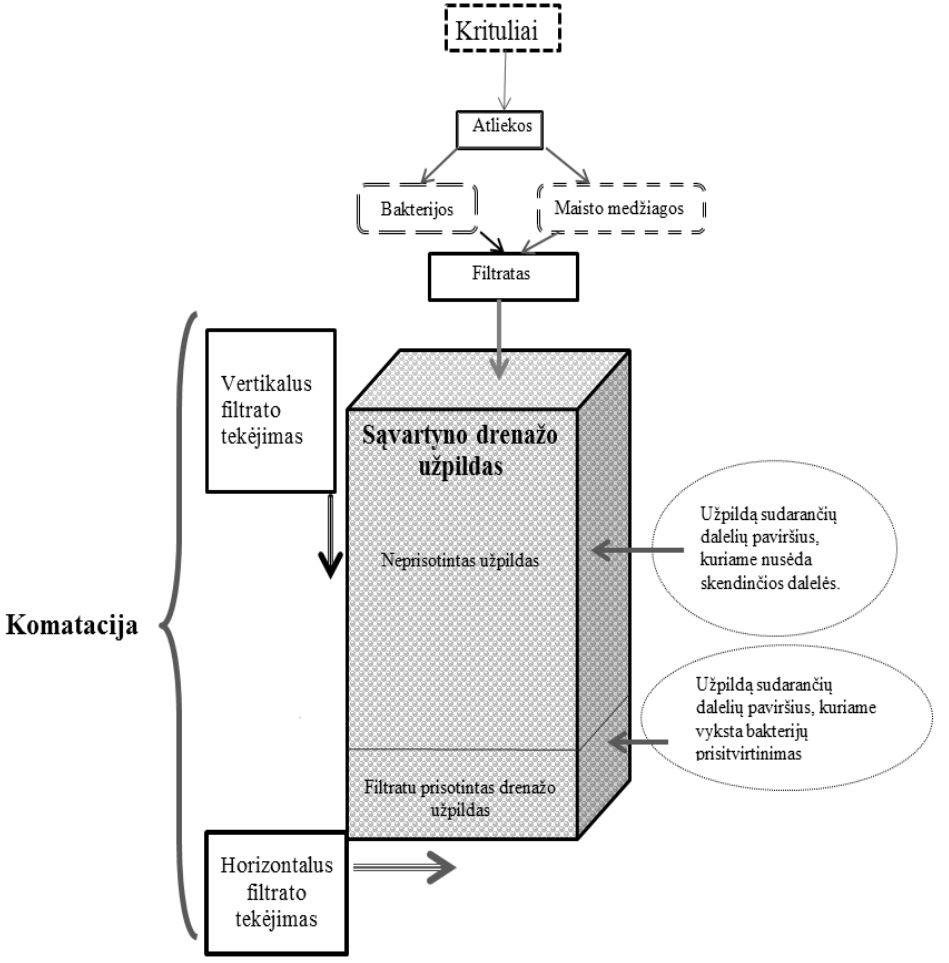
Filtrato surinkimo sistema viena iš susidedamųjų yra granuliuotas drenažo sluoksnis, per kurį sunkdamasis filtratas patenka į filtrato surinkimo vamzdžius. Daugelis modernių sąvartynų turi tokias filtrato surinkimo sistemas, sukurtas kaip inžinierinius barjerus. Vykstant filtravimuisi per ilgą laiką atsiranda sistemų laidumo sumažėjimas.

Kolmatacijos procesai komunalinių atliekų sąvartynuose surinkimo sistemose vyksta dėl įvairių priežasčių: įvairios atliekų sudėties, drenažo sluoksnį sudarančios medžiagos sudėties, oksidacinės – redukcinės aplinkos kaitos (Linsley *et al.* 1958; Paksy *et al.* 1998; Powrie *et al.* 1997; Rowe *et al.* 1997). Nagrinėjant drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimą yra svarbus ir užpildo poringumas. Filtrato surinkimo sistemų laidumas yra apibrėžtas Europos Sąjungos sąvartynų direktyvoje 1999/31/EC. Hidrogeologijoje tai vienas iš svarbesnių ir sudėtingesnių nagrinėjamų elementų. Drenažo sistemos sluoksnio laidumas sąvartynuose ypatingai svarbus, nes jam sumažėjus, galimas neigiamas poveikis aplinkai. Filtrato susilaikymas atliekų masėje suformuoja palankias sąlygas susidaryti atliekų kaupo nuošliaužoms.

Komunalinių atliekų sąvartynas – tai vienas iš daugelio inžinerinių statinių, kurio eksploatavime dalyvauja ne tik žmogus, bet ir gamta. Nors projektuojant

sąvartynus stengiamasi, kad jie kuo mažiau veiktų aplinką, tačiau dėl pačiose atliekose vykstančių procesų, sąvartynai tampa gamtos dalimi. Didelė dalis skendinčių medžiagų kartu su krituliais ir atliekų drėgme migruoja vertikaliai filtrato surinkimo sistemos link. Susidurdamos su drenažo sluoksnį sudarančia medžiaga, suspenduotų dalelių dalis nusėda ant drenažą sudarančios medžiagos paviršiaus. Atliekos yra sudarytos iš įvairiausių sudedamųjų dalių, kuriose gausu mikropasaulio individų (bakterijos, virusai) bei jiems vystytis ir funkcionuoti reikalingų maisto medžiagų. Krituliams sunkiantis per atliekas kartu migruoja ir bakterijos, kurios įsikuria ten, kur yra palankiausios sąlygos (pakankamas drėgmės kiekis, vidutinė teigiama temperatūra 25–30 ºC ir pakankamas maistinių medžiagų kiekis). Dėl didelio maistinių medžiagų kiekio drenažo sluoksnyje intensyviai vystosi dideli kiekiai bakterijų, kurios suformuoja bioplėvelę. Kadangi bakterijos turi ir savo gyvavimo laiką, tai negyvos bakterijos tampa skendinčiomis medžiagomis filtrate, kurios taip pat nusėda ant drenažą sudarančių dalelių paviršiaus. Tokiu būdu susiformuoja kolmatacija drenažo sluoksnyje (1.10 pav.). Visame drenažo sluoksnyje kolmataciją galima suskirstyti į keletą tipų: fizikinę, cheminę ir biologinę. Nors bendrai kolmatacijos procesai vyksta visame drenažo užpilde, tačiau esant tinkamoms sąlygoms intensyviau vystosi viena iš kolmatacijų kuri, kartu sukuria palankias sąlygai kito tipo kolmatacijai. Kiekvieną kolamatacijos tipą apibūdina intensyviausiai vykstantys procesai: fizikinės kolmatacijos metu dėl skirtingų medžiagų sąlyčio intensyviausiai vyksta skendinčios medžiagos akumuliacija. Cheminė kolmatacija vyksta dėl cheminių procesų, kurie ypatingai skatinami esant ir biologiniams procesams. Dėl šios priežasties esant + 25 ºC ir aukštesnei temperatūrai cheminė kolmatacija vystosi intensyviau. Jei fizikinei kolmatacijai atsirasti pakanka sąlyginai paprastų sąlygų (kartu su skysčiu migruojančios kietosios medžiagos kontaktuojant su kieta medžiaga susilaiko ant tos medžiagos paviršiaus), tai biologiniai kolmatacijai vystytis reikalinga palanki terpė bakterijoms vystytis (pakankama teigiama temperatūra ir pastovi drėgmė). Biologinė kolmatacija komunalinių atliekų sąvartynuose vystosi apatinėje drenažo sluoksnio dalyje, kur yra pastovus horizontalus filtrato tekėjimas, ir susiformavusi filtratu prisotinta terpė. Toks filtrato tekėjimas susidaro dėl sąvartyno dugno $\geq$ 1 laipsnio polinkio kampo, kad filtratas geriau būtų surenkamas į drenažo vamzdžius. Biologinę kolmatacijos plačiau nagrinėjo mokslininkas R. McIsaak (McIsaac and Rowe 2008), kuris teigia, kad biokolmatacijos tyrimai yra vieni sudėtingiausių iš visų kolmatacijos tyrimų, kadangi jų metu persipina ir cheminė kolmatacija ir fizikinė kolmatacija. Didžiausia problema – tai tinkamų laboratorinių sąlygų sukūrimas ir labai daug laiko sąnaudų reikalaujantys tyrimai. Vien tam, kad bakterijos, esančios filtrate, pradėtų daugintis ir kurti kolonijas ant drenažo užpildą sudarančios medžiagos,

joms reikia apie 8–11 mėnesių adaptacijos periodo. Dėl šios priežasties biologinės kolmatacijos tyrimai trunka ne vienerius metus.



1.10 pav. Kolmatacijos susidarymas sąvartyne
Fig. 1.10. Formation of clogging in landfill

Kolmatacijos procesai drenažo sluoksnyje priklauso nuo kelių pagrindinių faktorių:

- drenažo sluoksnį sudarančios medžiagos dalelių dydžio (tyrimais įrodyta, kad tinkamiausia naudoti ne mažesnė kaip 32 mm

nominalaus dydžio (Cooke *et al*. 2001; Fleming 1999; Fleming *et al*. 1999; Ismail and Raymond 2002; Rowe *et al*. 2000));

- sąvartyno atliekų sudėties, kuri lemia ir filtrato sudėtį ir temperatūrą sąvartyno dugne (pvz.: aliuminio kasybos atliekų temperatūra siekia iki 95 ºC , o tuo tarpu komunalinių atliekų sąvartynuose apie 30 ºC);
- susidarančio filtrato kokybinių bei kiekybinių parametrų (esant didesniam filtrato kiekiui, susidaro didesnė tėkmė, kuri sumažina bakterijų prisitvirtinimą prie dalelių paviršiaus);
- sąvartyno amžiaus (pirminėse sąvartyno eksploatavimo stadijose filtrate yra daug didesnis skendinčių medžiagų kiekis nei vėlyvose stadijose, nes pradžioje labai intensyviai vyksta biodegradacijos procesai);
- atliekas perdengiančios medžiagos sudėties (dažniausiai naudojamas smėlis, kuris ir yra pagrindinis skendinčių medžiagų šaltinis filtrate).

Filtrato lygio pakilimas yra pagrindinė kolmatacijos drenažo sistemoje pasekmė. Kadangi teršalų koncentracijos per ilgą laiką mažėja, yra numatoma, kad surinkimo sistemos turėtų funkcionuoti tiek laiko, kol filtrate visų teršalų kiekis pasiekia tokį lygį, kuris neturėtų neigiamo poveikio aplinkai. Kada filtrato surinkimo sistemos funkcionavimas sutrinka, galimas nenumatomas neigiamas poveikis (teršalų patekimas į aplinką, gruntinio bei požeminio vandens užteršimas, teršalų pasklidimas dirvožemyje, gamtinės aplinkos išnykimas).

1.2 lentelė. Temperatūros T poveikis difuzijos koeficientui D_T, filtracijos koeficientas k_T sąvartyno dugne (Rowe and Booker 1998)
Table 1.2. Effect of temperature on diffusion coefficient, D_T, hydraulic conductivity, k_T, in a liner at temperature T (Rowe and Booker 1998)

Temperatūra, ºC	D_T	k_T
10	1,0	1,0
20	1,4	1,3
25	1,6	1,5
35	2,0	1,8
50	2,7	2,4
65	3,5	2,9

Rowe ir Booker (1998) sukūrė metodiką, kuria galima apskaičiuoti sąvartyno eksploatavimo laiką atsižvelgiant į filtrato surinkimo sistemos funkcionavimo sutrikimą, įvykus teršalų migracijai į vandeningus sluoksnius.

Kolmatacijos pasekmės – ne tik filtrato patekimas į aplinką dėl padidėjusio filtrato lygio surinkimo sistemose, bet ir padidėjusi temperatūra. Pastaroji ypač

neigiamai veikia izoliacinį sluoksnį. Padidėjus temperatūrai pasikeičia sutankinto molio (1.2 lentelė), kuris dažnai naudojamas kaip barjeras, filtracijos koeficientas. Taip pat labai sutrumpėja geomembranos funkcionavimo laikas (esant +15 ºC funkcionavimo laikas trunka 200 metų, o esant + 33 ºC laikas sutrumpėja iki 70 metų). Atsiradus pažeidimams pagrindiniuose barjeruose, sąvartynas tampa pavojingas supančiai aplinkai.

1.3. Laidumo sumažėjimo drenažo sluoksnyje lauko tyrimai

Nemažą mokslininkų susirūpinimą visame pasaulyje sukėlė didelis teršalų kiekis, patenkantis iš komunalinių atliekų sąvartynų į aplinką. Buvo pradėta domėtis ir tyrinėti tuos sąvartynus, kurie yra sukonstruoti su nepralaidžiu dugnu, naudojant natūralų molį ar geosintetinį paklotą. Pastebėjus, kad teršalai patenka į aplinką, nors ir yra nelaidus sluoksnis, pradėta nagrinėti filtrato surinkimo drenažo sistema.

Brune ir kt. (1991) aprašė lauko tyrimus, atliktus 29 Vokietijos sąvartynuose. Tyrimų metu buvo stengtasi suvokti, kaip vyksta kolmatacija drenažo sistemoje. Daugiau nei pusėje tyrinėtų sąvartynų aptikta susicementavusi drenažo sluoksniui naudojama medžiaga. Taip pat buvo pastebėta ir surinkimo vamzdžių užsikimšimas. Ypatingai svarbus atradimas – ypatingai didelis dumblo ir nuosėdų sluoksnis, susidaręs virš vamzdžio. Toks susicementavęs sluoksnis visiškai užblokuoja filtrato patekimą į surinkimo sistemą. Net 40 % tirtų objektų vanduo nebesisunkdamas per atliekas tekėjo šlaitu žemyn suformuodamas paviršiaus nuošliaužas. Aštuonių sąvartynų viršuje buvo aptikta vandens. Tokių padarinių atsiradimas sukėlė daug klausimų, todėl net septyniuose sąvartynuose iškasta iki drenažo sistemos. Mokslininkų nuostabai aptiktas susicementavęs drenažo sistemos sluoksnis visiškai nelaidus vandeniui. Padaryta išvada, kad filtrato surinkimo sistemos susicementavimas susiformuoja dėl dviejų priežasčių: dėl mikrobiologinio aktyvumo ir dėl kietųjų dalelių patekimo į sistemą. Biologinė ir cheminė pluta gali formuotis drenažo sluoksnio viduje sukeldama kolmataciją, kuri sumažina galimybę skysčiui patekti į surinkimo vamzdžius. Atlikti išsamūs tyrimai lėmė šias išvadas:

- didelė koncentracija anaerobinių mikroorganizmų filtrate dalyvauja nusodinant ir pritvirtinant skendinčias medžiagas drenažo sluoksnyje;
- didžiausią susicementavusios medžiagos dalį sudaro kalcio ir geležies jungiai su karbonatais ir sulfatais;
- greitai užpildant sąvartyną susidaro agresyvus filtratas su cheminis deguonies sunaudojimu – 50 000 mg/l ir Ca^{2+} – 3 500 mg/l kiekiu;

- priešingai (kitaip) formuojasi filtratas, kai sąvartynas lėtai pildomas atliekomis, perdengiami atskiri atliekų sluoksniai (filtrato cheminiu deguonies sunaudojimas – 1 000 mg/l, o Ca^{2+} – 13 mg/l), visiškai nenustatyta kolmatacija.

Brune ir kt. (1991) pateikė hipotezę, kad lokalizuotoje aplinkoje apie anaerobines bakterijas susidaro šarminė terpė, kuri turi įtakos nusodinant sulfidų ir karbonatų junginius. Atlikti tyrimai autorių palčiai aprašomi, tačiau nebuvo bandoma racionaliai nustatyti kokybės ar pagrįsti hipotezę.

Fleming ir kt. (1999) atliko lauko tyrimus Keele Slėnio sąvartyne (Keele Valley Landfill). Eksperimento metu buvo iškastas filtrato surinkimo vamzdis. Perforuotas vamzdis išbuvo 4 metus drenažo surinkimo sluoksnyje, sudarytame iš 50 mm dydžio dolomito klinčių akmenų. Tyrimo metu buvo nagrinėjama filtrato cheminė sudėtis bei kaita. Kalcio koncentracija filtrate per septynerius metus sumažėjo. Pirmus trejus metus buvo stebimos stabilios pH ir cheminio deguonies sunaudojimo (ChDS) reikšmės, tačiau vėliau didėjant pH mažėjo ChDS. Tokie pokyčiai yra susiję su filtrato chemine sudėtimi ir mikrobiniais procesais (Rittmann *et al*. 2003).

Kadangi sąvartynų „teršimo trukmė“ gali tęstis dešimtmečiais ar šimtmečiais dideliuose plotuose (Rowe and Fleming 1998), filtratas turi būti surenkamas ir nukreipiamas į valymo įrenginius sąvartyno eksploatacijos metu ir net po jo uždarymo. Didelės įvairių medžiagų koncentracijos tekant filtratui per drenažą neišvengiamai sudaro sąlygas mikrobinei veiklai, kuri ilgainiui veikia drenažo funkciją. Mikrobinė veikla gali apimti įvairias formas, tokias kaip gleivių susidarymas, atsirandantis dėl biologiškai paveiktų mineralų nusėdimų, suformuojant suaugimus ir užteršiant drenažo sistemą (Fleming *et al.* 1999).

Drenažo užpildas po 4 metų sąvartyno dugne rasti padengti minkštu, juodu plonu bioplėvelės sluoksniu (1.11 pav.). Bioplėvelė užėmė didelę dalį porų. Tyrimo metu buvo išmatuota drenažo medžiagos užimamas tūris. Po 4 metų užimamas tūris pakito nuo 50 % apatinėje prisotintoje sluoksnio dalyje ir 30 % viršutinėje, neprisotintoje drenažo sluoksnio dalyje. Taip pat buvo išanalizuota ir poras užpildžiusios medžiagos elementinė sudėtis. Kaip ir Vokietijos sąvartynuose, taip ir Kanados sąvartyne net 50 % sudedamosios sudaro $CaCO_3$. Analizuojant drenažo sluoksnį, pastebėta, kad tose vietose, kur atliekos buvo atskirtos geotekstile, kolmatacija drenažo sluoksnyje buvo labai nežymi. Tiriant filtrato surinkimo vamzdžius, kurie nebuvo valyti per 4 metus, rasta susicementavusios medžiagos vamzdžių viduje, o angos, pro kurias filtratas patenka į vamzdžius, visai užsikimšę. Nustatę tokį filtrato poveikį mokslininkai padarė išvadą, kad mineralinės bei biologinės kietosios medžiagos nusėdimas, vykstantis filtrato surinkimo sistemoje, gali būti panaudojamas kuriant natūralią filtrato valymo technologiją.



a)



b)

1.11 pav. Drenažo sluoksnis po 4 metų eksploatacijos Kanados sąvartyne (a) – prieš sąvartyno eksploataciją; b) – po 4 eksploatacijos metų) (Fleming *et al*. 2004)
Fig. 1.11. Drainage layer after 4 years operate in Canada landfill (a) – before landfill operation; b) – after 4 years landfill operation) (Fleming *et al*. 2004)

Floridoje Craven ir kt. (1999) atliko šešis metus sąvartyno eksploatavimo tyrimus. Sąvartyne nebuvo pastebėta kolmatacija, tačiau teko tvarkyti filtrato surinkimo šulinius. Tyrimo metu buvo paimti filtrato mėginiai. Analizuota jo sudėtis, taip pat buvo paimti drenažą sudarančios medžiagos bei filtrato surinkimo vamzdžių pavyzdžiai. Tiriant kolmataciją, labai svarbi mėginių paėmimo metodika, kuria nesinaudojo minėti mokslininkai. Dėl šios priežasties drenažo medžiagoje atsiradęs net ir mažiausias akmenų susicementavimas buvo suardytas. Kolmatacija, anot mokslininkų, nebuvo pastebėta. Išmatavę laidumą,

mokslininkai pastebėjo, kad jis sumažėjęs vidutiniškai 20 %. Jeigu mėginys būtų nesuardytas, laidumo sumažėjimas tikrai būtų didesnis (McIssac and Rowe 2008). Vizualiai kolmatacija nebuvo pastebėta. Vis dėlto išmatavus organinę dalį drenažo medžiagoje, pastebėta, kad organinės dalies padidėjo nuo 0,22 % (švarioje medžiagoje) iki 0,44 % (filtruojant filtratą 6 metus). Taip pat buvo nustatytos labai padidėjusios Ca, Fe ir Mg koncentracijos tiriamoje drenažo medžiagoje, lyginant su švarios medžiaga. Todėl mokslininkai padarė išvadą, kad filtrato tekėjimas turėjo įtakos šių elementų atsiradimui drenažo medžiagoje, kuri plačiau turėtų būti analizuojama laboratorinėmis sąlygomis.

Geotekstilė, kurioje buvo suvynioti filtrato surinkimo vamzdžiai, buvo pasidengusi juodu sluoksniu, kuriame buvo įsiterpęs smėlis. Atlikus palyginimus skvarbos tyrimus, nustatyta, kad skvarba sumažėjo 48 %, palyginus su nauja, nenaudota geotekstile (Craven *et al*. 1999).

Kolmatacijos lauko tyrimai atlikti sąvartynuose paskatino mokslininkus plačiau pasidomėti susidarančiomis laidumo sumažėjimo problemomis ir atlikti detalesnius tyrimus laboratorijos sąlygomis.

1.4. Laboratoriniai kolmatacijos procesų tyrimai

Filtrato drenažo sistemos kimšimasis yra dažna problema, kuri formuojasi dėl smulkių dalelių daugėjimo drenažo sistemoje. Nagrinėjant įvairius tyrimų rezultatus, galima daryti išvadas, kad drenažo sistemos dalių kolmatacija sąlygojama kelių veiksnių: fizinių, cheminių bei biologinių. Atlikus lauko eksperimentinius kolmatacijos tyrimus, mokslininkai sukūrė ne vieną eksperimentinį stendą laboratorijose. Laboratorijos sąlygomis galima detaliau išnagrinėti kolmatacijos procesus, išsiaiškinti jos priežastis.

Brune ir kt. (1991) paraleliai filtrato lauko tyrimams atliko ir laboratorinius kolmatacijos tyrimus. Eksperimentai buvo atliekami 12 plastikinių 200 mm skersmens ir 1000 mm aukščio kolonėlių. Kiekvienos kolonėlės viršuje buvo sudėtas 15 cm storio atliekų sluoksnis ir 30 cm stiklo granulių sluoksnis. Kolonėlėse buvo palaikoma +30 ºC temperatūra. Tyrimo metu buvo nagrinėjami parametrai, kurie turi įtakos kolmatacijai:

- dalelių dydis (eksperimento metu naudoti penki skirtingų stiklo granulių dydžio kolonėlių užpildai: 1–32 mm, 2–4 mm, 2–8 mm, 8–16 mm ir 16–32 mm);
- srovės debitas (natūralus filtratas, buvo paimtas iš sąvartyno ir filtruojamas per visas kolonėles, leidžiant 6,8 l/parą, ir 15,2 l/parą);
- filtrato sudėtis (devynios kolonėlės buvo veikiamos agresyvaus filtrato, kuris pasižymi dideliais organinių ir neorganinių junginių

kiekiais, būdingais pradinėse sąvartyno eksploatavimo metais; bei trys kolonėlės buvo veikiamos metaniniu filtratu, kuris pasižymi daug mažesnėmis įvairių junginių koncentracijomis).

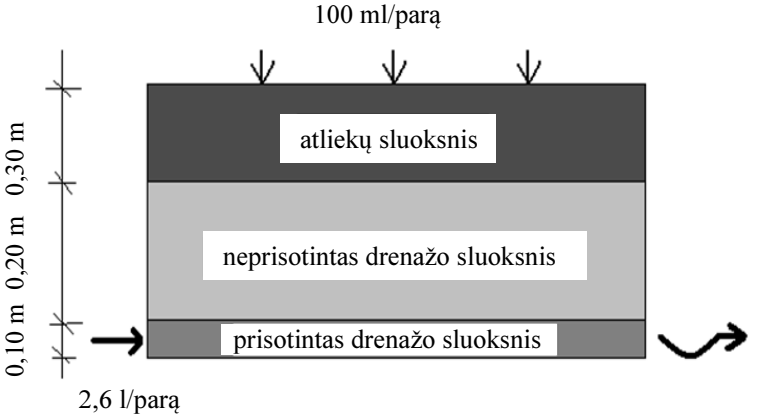
Eksperimentas buvo atliekamas 365 paras, kurio metu pastebėta, kad kolonėlėse, užpildytose smulkiomis stiklo granulėmis (1–32 mm, 2–4 mm, 2–8 mm), įvyko kolmatacija ir porų tūris sumažėjo iki 20 %. Perpus mažiau (5–10 %) poringumas pasikeitė 8–16 mm ir 16–32 mm nominalaus dydžio stiklo granulėmis užpildytose kolonėlėse. Mokslininkai aprašė ir rezultatus, gautus kolonėlėse (užpildo granulių dydis 8–16 mm ir 16–32 mm), per kurias buvo filtruojamas mažos koncentracijos filtratas: kolmatacija nepastebėta nė vienoje kolonėlėje.

Išanalizavus susicementavusios medžiagos sudėtį nustatyta, kad, ir lauko tyrimų ir laboratorinių tyrimų metu, didžiausią dalį sudaro kalcio, geležies, karbonatų ir sulfatų junginiai. Projektuojant drenažo sluoksnį nustatyta praktinė šio eksperimento reikšmė: a) stambaus dydžio drenažo medžiagos dalelės turi didesnes poras ir b) labiausiai sumažėjo laidumas medžiagos, sudarytos iš smulkesnių nei 16 mm dydžio granulių.

Paksy ir kt. (1998) ir Peeling ir kt. (1999) laboratorinių eksperimentų metu tyrė įvairių granulių dydžių, tekmės greičio, prisotintų/neprisotintų sąlygų poveikį kolmatacijos procesams naudojant sintetinį filtratą. Eksperimentui buvo sumontuotos stendas iš 230 mm skersmens ir 900 mm ilgio kolonėlės. Tyrimai buvo atliekami 400–700 parų. Kolonėlės buvo užpildytos skirtingo dydžio kalkakmeniais (5–10 mm, 10–20 mm, 20–40 mm). Tyrimo metu buvo naudojamas sintetinis filtratas su mažomis kalcio (Ca^{2+} 200mg/l) ir geležies (Fe 100 mg/l) koncentracijomis. Analizuojant gautus tyrimo rezultatus pastebėta, kad didžiausia bakterijų kolonija susiformavo už 10–20 cm nuo filtrato įleidimo. Čia aptiktos didžiausios geležies sulfido ir kalcio junginių koncentracijos susicementavusioje medžiagoje. Buvo nustatytas 7 % poringumo sumažėjimas viso tyrimo laikotarpiu per visą kolonėlės ilgį, o 12 % poringumo sumažėjimas nustatytas ties filtrato įtekėjimu. Išmatuotas poringumo pokytis šio tyrimo metu yra žymiai mažesnis nei Brune ir kt. (1999), Amstrong ir Rowe (1999), kadangi buvo naudojamas neagresyvus filtratas su maža kalcio koncentracija. Gautus rezultatus mokslininkai panaudojo sukuriant prognostinį modelį, kuris leidžia apskaičiuoti kolmatacijos procesų vystymąsi.

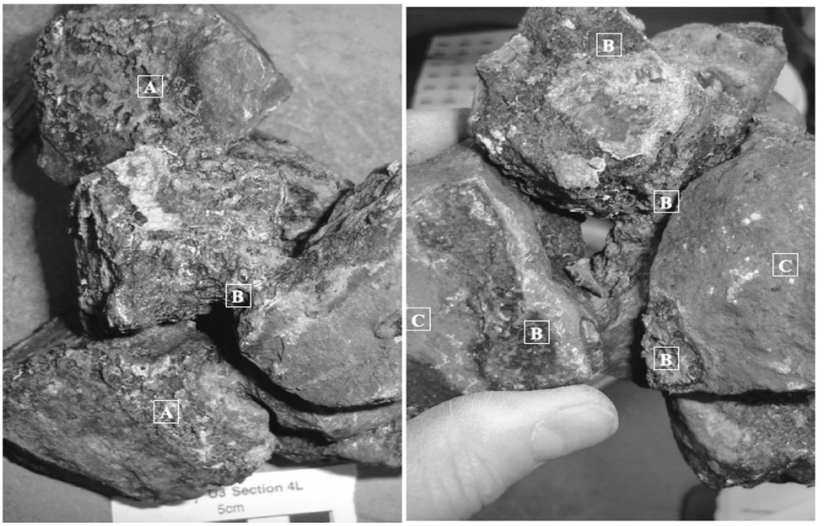
Paksy ir kt. (1998) ir Peeling ir kt. (1999) laboratoriniai tyrimai parodė, kad projektuojant drenažo sluoksnius sąvartynams, reikia atkreipti dėmesį, kad pastarasis yra kaip anaerobinis bioreaktorius, kuriame vyksta didelis filtrato valymas. Tokios rekomendacijos sukėlė nemažai klausimų dėl filtrate skendinčių medžiagų akumuliacijos (Rowe *et al.* 2000; Rowe and Van Gluck 2001). Šių tyrimų metu gautus rezultatus galima pagrįsti tuo, kad buvo naudojamas sintetinis filtratas su mažu skendinčių medžiagų kiekiu. Tai pat

eksperimentas buvo vykdomas trumpą laiką, tačiau kolmatacijos procesai yra ilgalaikiai reiškiniai ir tik per ilgą laiką galima pastebėti drenažo sistemos laidumo pokyčius.



1.12 pav. Mezokosmoso tyrimo schema (McIsaac and Rowe 2008)
Fig. 1.12. Scheme of mesocosm (McIsaac and Rowe 2008)

Amstrong ir Rowe (1999) naudodami Kanados sąvartyno filtratą atliko kolonėlės tyrimus. Tyrimų metu buvo stebėta, kaip kolmatacijos procesus veikia srovės greitis, temperatūra ir dalelių dydis anaerobinėmis sąlygomis. Kolonėlės buvo užpildytos skirtingo dydžio stiklo granulėmis (4, 6 ir 15 mm dydžio). Eksperimentas atliktas palaikant + 27 ºC temperatūrą, skirtingais debitais filtruojant filtratą. Gauti rezultatai parodė, kad intensyviausiai kolmatacijos procesai vyksta esant mažiausiam srovės debitui filtrato įtekėjimo vietoje. Skirstant pagal dalelių dydį, labiausiai laidumas sumažėjo kolonėlėse, užpildytose su smulkiausiomis (4 mm) stiklo granulės. Kaip ir kiti taip ir Kanados mokslininkai nustatė, kad pagrindinė kolmataciją suformavusi medžiaga yra sudaryta iš kalcio karbonato junginių. Palyginus gautus lauko bei laboratorijoje tyrimų rezultatus, aiškiai matyti, kad pagrindinis dominuojantis kolmataciją formuojantis komponentas – kalcis bei jo junginiai. Lauko tyrimų metu rasta didelis silicio kiekis, tačiau laboratorijoje išmatuoti labai maži pastarojo elemento kiekiai. Silicis į drenažo sluoksnį patenka iš smėlio atliekų ir dumblo dalelių ir susilaiko drenažo sistemos užpilde.



A – susicementavimas iš viršaus
B – kolmatacija intensyviau vyksta kai mažesnis atstumas tarp granulių
C – mažiausia kolmatacija apatinėje granulių dalyje

1.13 pav. Kolmatacija drenažo sluoksnyje po 1825 parų filtrato poveikio (McIsaac and Rowe 2008)
Fig. 1.13. Clog in drainage layer after 1825 days of leachate effect (McIsaac and Rowe 2008)

Pastarasis tyrimas atliktas prisotintoje terpėje išryškino dar vieną klausimą: koks bus filtrato kiekis bei lygis drenažo sistemoje, neprisotintoje terpėje, atsiradus kolmatacijai. Ieškodami atsakymų, McIsaac ir Rowe (2007) atliko mezokosmo (laboratorinėmis sąlygomis imituoti ekosistemų komponentai (tiksliau atspindimos natūralios aplinkos sąlygos: temperatūra, krituliai ir pan.) tyrimą (1.12 pav.). Jei ankstesni mokslininkų tyrimai buvo atliekami su stiklo granulėmis, tai pastarieji pasirinko visiškai analogiškas sąlygas bei medžiagas kaip sąvartyne. Buvo sumontuotas 0,6 m aukščio, 0,25 m pločio ir 0,7 m ilgio konteineris. Jame buvo sukurtos identiškos sąlygos kaip sąvartyne. Filtratas buvo leidžiamas ir iš šono (toks filtrato judėjimas vyksta drenažo sluoksnyje link surinkimo vamzdžių), ir iš viršaus, kada filtruojasi per atliekų sluoksnį. Drenažo sluoksnis buvo užpildytas 19–38 mm dydžio dolomitine skalda. 1.13 paveiksle pateiktas iš neprisotinto sluoksnio gautas rezultatas po 1825 parų. Tyrimas parodė, kad ankstesnių mokslininkų nustatyti filtrato sudėties pokyčiai atitinka pastarojo tyrimo rezultatams.

Tie patys mokslininkai atliko ir smulkintų padangų panaudojimo drenažo sluoksniui formuoti tyrimą (McIsaac and Rowe 2005). Smulkintos padangos

(100*50*10 mm dalių parametrai) taip buvo patalpintos į 287 mm skersmens ir 813 mm aukščio kolonėlę, tačiau jos buvo papildomai suspaustos 150 kPa slėgiu, kadangi sąvartyne didėjant atliekų kaupui didėja ir slėgis spaudžiantis sąvartyno dugną. Pastarojo tyrimo metu nustatyta, kad smulkintos padangos, kaip ir drenažo akmenys, yra veikiami kolmatacijos. Padangų sluoksnis veikiamas netgi greičiau nei akmenys, nes jas suspaudus labai sumažėja poringumas. Nors eksperimentas parodė, kad kolmatacija vyksta padangų sluoksnyje, tačiau mokslininkai rekomenduoja naudoti smulkintas padangas, tačiau filtrato surinkimo vamzdžiai turi būti montuojami stambios (32–65 mm frakcijos) skaldos sluoksnyje.

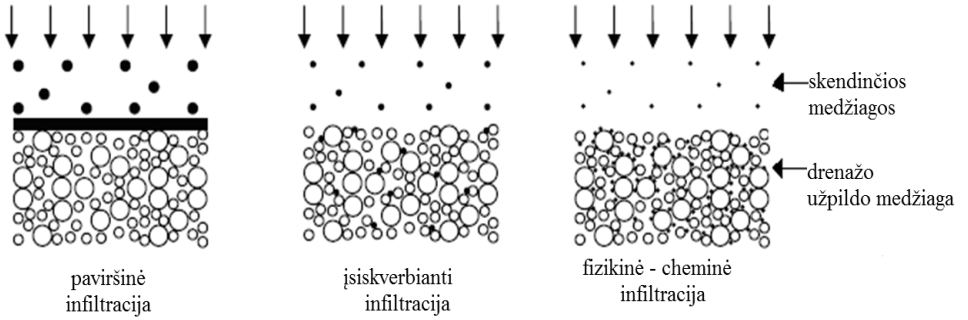
Atlikti laboratoriniai tyrimai suteikė papildomai žinių, kurios padeda išsamiau suprasti kolmatacijos procesus ir toliau juos nagrinėti drenažo sluoksniui panaudojant alternatyvias skaldai medžiagas. Nors ir atlikta nemažai drenažo sistemos tiek laboratorinių, tiek ir lauko tyrimų, tačiau dėl nuolat kintančių atliekų sudėties, nuolat keičiasi ir filtrato sudėtis bei jo kiekis. Drenažo sluoksnio užpildo kolmatacija išlieka aktuali problema, nes tiesioginis pačių užpildo mėginių paėmimas ir ištyrimas ir dabar išlieka problema, nes nėra sukurtos tikslios metodikos. Mokslinius tyrimus apsunkina ir sąvartynų operatoriai, nes jie nėra suinteresuoti viešinti problemas. Laboratorinėmis sąlygomis atliktų eksperimentų rezultatai tik iš dalies apibūdina vykstančius procesus.

1.5. Poringumo kaitos matematiniai modeliai

Prognostiniai modeliai reikalingi, kad padėtų įvertinti filtrato surinkimo sistemos funkcionavimo laiką. Modeliuojant komunalinių atliekų sąvartyno filtrato procesus naudojamos įvairios diferencialinės lygtys, įvertinančios teršalų masės pernašos procesus (Yildiz *et al*. 2004; Kalyuzhnui *et al*. 1998; Taylor and Brown 1967; Wang and Banks 2006; Straub and Lynch 1982).

Nagrinėjant poringumo kaitą, svarbus išanalizuoti ir filtrato sudėtį bei jos kaitą. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) modelis – dviejų dimensijų hidrologinis modelis, kuris leidžia atlikti vandens balanso analizę sąvartyne, kai atliekos yra izoliuotos uždengiant danga (Mualem 1976). Modelis naudoja oro, dirvožemio ir sąvartyno projektavimo duomenis ir suskaičiuoja galutinį rezultatą. Programa labai išsamiai įvertina visus galimus veiksnius, kurie turi įtakos vandens judėjimo srautams: sniego tirpimo, filtracijos, išgaravimo, paviršinio sulaikomojo sluoksnio, augalinio sluoksnio, susilaikiusios dirvožemio drėgmės, šoninio paviršinio drenažo, filtrato cirkuliacijos, neprisotinto vertikalaus drenažo, geomembranos ar sudėtingo dugno pagrindo. Modelio HELP yra sukurta kelios versijos, kurios suteikia

papildomas galimybes nagrinėti sąvartyno filtratą. Pirminis modelio tikslas buvo skirtingų sąvartyno planavimų palyginimui. Programoje yra įvesta oro ir dirvožemio duomenų rinkmena su nurodytais duomenų šaltiniais. Modeliuojant galima redaguoti pateiktus duomenis bei palyginti duomenų patikimumą iš skirtingų šaltinių. HELP programos versija palengvina metrinių vienetų naudojimą ir projektuoja su geosintetinėmis medžiagomis.



1.14 pav. Skendinčių medžiagų filtracijos mechanizmo schema (Rajagopalan and Tien 1976)
Fig. 1.14. Schematic of suspended solids filtration mechanisms (Rajagopalan and Tien 1976)

Rajagopalan ir Tien (1976) pasinaudojo Yao et al. (1971) atliktu darbu ir parengė naują metodą, kurį galima pritaikyti filtravimosi metu skendinčių dalelių užsilaikymui drenaže modeliuoti. Šis filtravimo metodas taikomas atliekant skaičiavimus vieno surinkimo segmento efektyvumui nustatyti, kuris išreiškiamas per sustabdytų dalelių frakciją, kai dalelės susiduria su drenažo medžiaga. Skendinčių dalelių dydis ir jų tankumas bei filtruojamo sluoksnio dalelių dydis – tai du šio metodo apibrėžtis. Rajagopalan ir Tien (1976) sukurtas metodas apima išsisklaidymo, užkirtimo, sedimentacijos, hidrodinaminio uždelsimo ir dalelių sulaikymo procesus (1.14 pav.). Kiek vėliau Reddi ir Bonala (1997) pasinaudojo Rajagopalan ir Tien patobulintu metodu, apskaičiuojančiu dalelės nusėdimą. Pastarojo modelio pagrindė bazė yra „švari“ vidutiniškai poringa medžiaga su apribotu skendinčių dalelių nusėdimu ant paviršiaus. Granuliuotos drenažo medžiagos poringi paviršiai ilgainiui neišlieka „švarūs“, kadangi praėjusi per atliekas drėgmė (filtratas) turi didelę skendinčių medžiagų koncentraciją (įvairių dydžių). Filtrato organinės ir neorganinės skendinčios medžiagos migruodamos per drenažo sluoksnį gali jame susilaikyti nepriklausomai nuo filtrų ir drenažo sluoksniui formuoti naudojamų medžiagų (Gounaris *et al*. 1993; Jensen and Christensen 1998). Tokiu būdu, ilgainiui akumuliuosjasi sustabdytos medžiagos, kurios prisideda prie porų erdvės

sumažėjimo. Filtrato tėkmei tekant per drenažo sluoksnio medžiagas poringumas ir medžiagos laidumas sumažėja ir yra trukdomas filtrato patekimas į surinkimo vamzdį.

Rowe ir Fleming modelis. Filtrato savybės ir kolmatacijai turinčių įtaką faktorių visuma bei mezokosmoso bandymai ir lauko tyrimai (Brune *et al*. 1991; Fleming and Rowe 2004), buvo apjungti, įvertintas filtrato surinkimo sistemos veikimo laikas, naudojant vienoda žvyro frakciją drenažo sluoksniui formuoti (Rowe and Fleming 1998). Modelis gali būti panaudojamas, palyginant skirtingų filtrato surinkimo sistemų eksploatacines savybes. Modelio pagrindinė sąlyga – $CaCO_3$ yra dominuojanti medžiaga užteršimo susidaryme. Kalcis toliau dalyvauja kitų nusėdančių medžiagų susidaryme, kurios susijungdamos nusėda drenažo sluoksnio viduje (t. y. magnis, geležis, silicis). Modelis priima, kad visas kalcis, patenkantis į drenažo sluoksnį, susilaiko granuliuotame sluoksnyje akimirksniu. Laikas laidumui sumažėti (t_c) yra apskaičiuotas pagal formulę:

$$t_c = \frac{(1+2a/L)B\rho_c f_{Ca} v_f}{3q_0 c_{L2}} - \frac{(c_{L1}-c_{L2})(T1+T2)}{2c_{L2}}, \qquad (1.2)$$

čia a yra zonos ilgis, kur užteršimas vystysis per visą drenažo storį, Rowe ir Fleming (1998) naudojo a = 5 (m); L (m) yra maksimalaus srauto kelio ilgis į filtrato surinkimo vamzdį; B (m) yra drenažo sluoksnio storis šalia filtrato surinkimo vamzdžių, išdėstytų sluoksnyje, kuris užsiteršęs, neleistų filtratui sunktis į perforuotą vamzdį; ρ_c (mg/m^3) yra teršiančios medžiagos tankumas; f_{Ca} yra kalcio frakcijos masė teršiančioje medžiagoje; v_f yra poringumo sumažėjimas, reikalingas sukelti užteršimą, ir yra lygus skirtumui tarp n_o ir n_b; n_o (yra pradinis poringumas); n_b yra užterštos medžiagos poringumas; q_o yra vidutinė vertikali filtracija į drenažo sluoksnį; c_{L1} (mg/l) yra vidutinė kalcio koncentracija filtrate per laiką $t \leq T1$. Po laiko T1, manoma, kad kalcio koncentracija sumažėja iki c_{L2} vertės (mg/m^3) per $T2$ laiką. Laiko skaičiavimus, kaip užsiterš drenažo sistema 50 mm frakcijos vienodas žvyras, aprašo Rowe ir Fleming (1998).

Pavyzdiniai pralaidumo sumažėjimo modeliai suteikia papildomą galimybę, kuri leidžia įvertinti laiką ir filtrato surinkimo sistemos užsikimšimą. Tačiau tokie modeliai neįvertina mikrobinių ir cheminių procesų, kietųjų dalelių prisitvirtinimo, ir pasitiki apribotais lauko matavimų duomenimis, įvertindami užteršimą drenažo sistemos viduje.

Atkreipiant dėmesį į šias problemas, skaitmeninis modelis, pavadintas BIOCLOG, buvo sukurtas ir naudojamas filtrato surinkimo sistemos užsiteršimo greičiui nustatyti (Cooke and Rowe 2008; Rowe *et al*. 1997; Van Gulck *et al*. 2003; Van Gulck and Rowe 2004). Galutinis tikslas – modelis naudojamas numatant užteršimo normą sąvartyne, kad optimizuoti surinkimo sistemos

projektavimą ir išnagrinėti naujų sąlygų įvedimo galimybes (pavyzdžiui filtrato recirkuliacija). Kai kurios detalės, lemiančios kliūties susidarymą, yra susumuojamos modeliavimo metu.

BIOCLOG modelis toliau tobulinamas ir yra sukurta papildomas 2D modelis, kuris numato ir apskaičiuoja drenažo sluoksnio poringumo ir filtracijos koeficiento kintamumą, kuriam turi įtakos didėjantis atliekų kaupas. Šis patikslinimas įvertina ir vykstančius biologinius ir fizinius procesus komunalinių atliekų sąvartyno filtrato surinkimo sistemose. Modelis apima srauto modeliavimą per dinamišką paviršių, transportuojant ištirpusius devynis cheminius junginius, labiausiai turinčius įtakos kolmatacijai. Taip pat skaičiuojamas kolmatacijos medžiagos apimties padidėjimas. Filtrato surinkimo sistemoje poringumas ir filtracijos koeficientas keičiasi ir erdvėje, ir laike. Naudodamas lauko parametrus modelis parodo, kad priklausomai nuo gamtinių natūralių medžiagų, panaudotų drenažo sluoksnyje, užteršimas gali sukelti filtracijos koeficiento mažėjimą. Modelis suteikia galimybę ištirti skirtingus kolmataciją sąlygojančius faktorius: drenažo surinkimo sistemos išdėstymą, drenažo sluoksnį sudarančių medžiagų reikšmę, ir filtrato savybių įtaką (Rowe and Cooke 2008).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą, nustatyta, kad komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimas periodiškai tiriamas, siūlomi įvairūs sprendimo būdai, tačiau problema išlieka. Per ilgą sąvartynų eksploatacijos laiką kinta komunalinių atliekų sudėtis, sąlygojanti ir filtrato savybės, kurios tiesiogiai daro įtaką kolmatacijos procesams.
2. Mokslinėje literatūroje randama, kad lauko tyrimų metu nustatyta, kad kolmatacija prasideda dar sąvartyno eksploatavimo pradžioje. Pagrindinės šio proceso priežastys – didelis filtrate skendinčių medžiagų kiekis bei aukšta jame esančių kalcio ir geležies junginių koncentracija, palanki bakterijoms vystytis temperatūra.
3. Literatūros analizė parodė, kad laboratorinių tyrimų metu stiklo granulių užpilduose kolmatacijos intensyvumas tiesiogiai priklausė nuo naudoto filtrato savybių. Per 365 paras sluoksnio laidumas sumažėjo iki 2 kartų. Per 860 parų, naudojant metaninį seno sąvartyno filtratą, kolmatacijos procesai nepasireiškė, buvo stebimas tik nedidelis stiklo granulių

užpildo vizualinis pakitimas. Tai įrodo, kad kolmatacijos procesai aktyviausi viduriniu komunalinių atliekų sąvartyno eksploatavimo laikotarpiu (10–15-ais eksploatavimo metais).

4. Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą, nustatyta, kad drenažo užpildo medžiagos granuliometrinė sudėtis turi lemiamą įtaką šio sluoksnio užsiteršimui. Laboratoriniai tyrimai įrodė, kad šiurkšti drenažo medžiaga (19–32 mm frakcija) turi mažiau porų bei erdvės, todėl joje kolmatacijos procesai vyksta greičiau. Tuo tarpu glotnesnėje ir gerai išrūšiuotoje drenažo užpildo medžiagoje (stiklo granulių 20–32 mm frakcija) stebimas didesnis laidumas.
5. Literatūros analizė parodė, kad kolmatacijos procesus filtrate spartina skendinčios medžiagos bei jame esantys kalcio ir geležies junginiai. Visų šių medžiagų didžiausi kiekiai rasti užpildo granules surišančioje medžiagoje. Minėti elementai filtrate turėtų būti detaliau išnagrinėti, kadangi jų kaitos mažėjimas parodo, jog ženkli jų dalis susilaiko drenažo užpildą sudarančioje medžiagoje.
6. Išanalizavus mokslinę literatūrą nustatyta, kad smulkintų padangų ir asfalto atliekų kaip vienų iš sudedamųjų panaudojimas sąvartynų drenažo sluoksnio formavimui iki šiol mažai nagrinėtas. Todėl būtina atlikti išsamesnius pastarųjų medžiagų panaudojimo drenažo sistemoje tyrimus.

Todėl šiame darbe nuspręsta atlikti kompleksinius kolmatacijos tyrimus, apimančius užpildų ir komunalinių atliekų sąvartyno filtrato savybių laboratorinius tyrimus. Gautų tyrimų rezultatų prognozei ir patikimumui nustatyti naudotas *Bioclog* matematinis modelis, įvertinantis kolmatacijos procesus komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sluoksnyje.

2

Kolmatacijos tyrimų metodika

Eksperimentiniams laboratoriniams tyrimams pasirinktos skirtingos sudėties medžiagos, iš kurių yra suformuojamas drenažo sluoksnis. Tyrimams pasirinkta dvi gamtinės kilmės medžiagos (skalda ir žvyras) bei skirtingos kilmės medžiagų mišiniai (skaldos ir smulkintų padangų atliekų, skaldos ir asfalto atliekų, žvyro ir smulkintų padangų mišiniai). Naudojama skalda yra 32–65 mm frakcijos, nes reikalingas kuo geresnis laidumas. Tokios pačios frakcijos žvyras savo sudėtyje turi iki 50 % kalcinių uolienų. Sukurti skirtingos kilmės medžiagų mišiniai suteikia galimybę atliekomis tapusias medžiagas (asfalto ir smulkintų padangų atliekas) pritaikyti antriniam panaudojimui.

Šiame skyriuje aprašomi eksperimentiniai kolonėlės fizikinės kolmatacijos tyrimai bei minėtų medžiagų poringumo tyrimai, atliekami matavimo tūriniu metodu.

Šių tyrimų tikslas – filtruojant komunalinių atliekų sąvartyno filtratą per skirtingais užpildais pripildytas eksperimentinio stendo kolonėles nustatyti užpildų poringumo pokytį per tam tikrą laikotarpį. Eksperimentinis stendas sukurtas ir sumontuotas Vilniaus Gedimino technikos universitete Aplinkos apsaugos katedroje. Įvairiose šalyse atliktų tyrimų metu pastebėta, kad daugiausia poras teršianti medžiaga susideda iš didelių kiekių geležies, kalcio bei karbonato junginių. Labai svarbų vaidmenį kolmatacijos vystymuisi atlieka

skendinčios medžiagos. Nors šių elementų junginiai patys nėra pavojingi, tačiau jie sudaro sąlygas pavojingiems, ypač sunkiesiems metalams, paplisti aplinkoje.

Norint vizualiai pamatyti kolmatacijos procesų rezultatus, reikalingi ilgalaikiai ir išsamūs tyrimai. Komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sistemų pralaidumo sumažėjimas pasireiškia ne anksčiau, kaip po penkerių eksploatavimo metų, o kartais ir dar vėliau. Dėl šios priežasties labai svarbu atlikti laidumo sumažėjimo modeliavimą.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autorės straipsniai (Bazienė ir Vasarevičius 2010; 2011; 2012; Bazienė *et al.* 2012).

2.1. Užpildų kolmatacijos tyrimų metodika

Drenažo sluoksnis komunalinių atliekų sąvartyne atlieka vieną svarbiausių funkcijų – perfiltruoja ir surenka filtratą, kuris susiformuoja iš per atliekas persisunkiančių kritulių, kurie susijungia su atliekų drėgme.

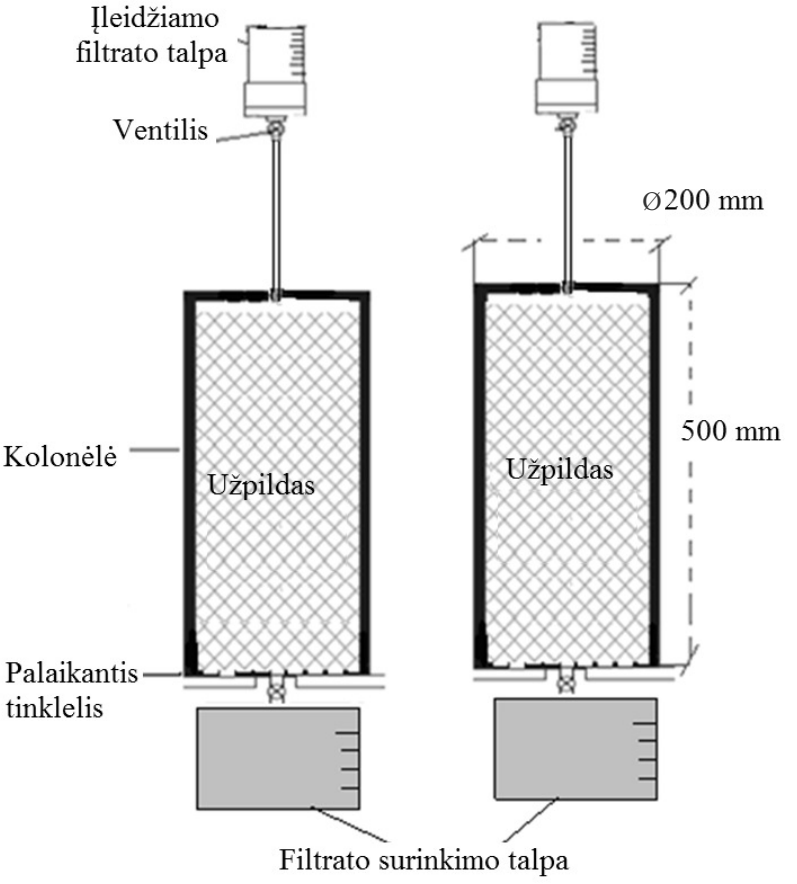
Kolmatacija apibūdinama kaip smulkių dalelių įsiterpimas į grunto sluoksnį. Komunalinių atliekų sąvartyne filtratas surenkamas per drenažo sistemas. Didėjant akumuliuotų medžiagų kiekiui, atskiros drenažo užpildo dalys susicementuoja ir tampa mažiau laidžios filtratui. Šiuo metu dedama nemažai pastangų surasti geriausius variantus, kad būtų galima sumažinti drenažo sluoksnio kolmatacijos procesus, nedidinant išlaidų ir kartu nedarant neigiamo poveikio gamtinei aplinkai.

Laboratorinis kolonėlių testas, esantis viso tyrimo dalimi, yra atliekamas specialiose sumontuotose kolonėlėse (2.1 pav.). Eksperimentinis stendas sudarytas iš 200 mm skersmens ir 500 mm ilgio polivinilchlorodo cilindro. Apatinė cilindro dalis apjuosta poliuretano tinklu, kurio porų dydis 20x20 mm. Tinklelio paskirtis – palaikyti drenažo sluoksnį ir kartu praleisti filtratą. Atliekamo tyrimo kolonėlių diametras pasirinktas atsižvelgiant į nagrinėjamų sluoksnių frakcijos dydį (32–65 mm). Kolonėlės aukštis atitinka sąvartyne naudojamo sluoksnio storį. Per visus užpildus filtruojamas iš Kazokiškių regioninio komunalinių atliekų sąvartyno filtrato surinkimo šulinio paimtas filtratas. Atliekant kolamtacijos laboratorinius tyrimus su skirtingais užpildais labai svarbu tinkamai parinkti filtrato debitą. Ventiliu galima reguliuoti ir nustatyti filtrato srovės greitį. Pasirinktas filtrato debitas – 3,65 l/mėn. Naudojamas filtrato kiekis pasirinktas remiantis mokslininkų McIsaak ir Rowe (2008) atliktu tyrimu.

Penkios kolonėlės užpildytos tiriamomis medžiagomis: sąvartyno drenažo skalda (DS), sijotu žvyru (Ž), sąvartyno drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišiniu (DSP), sąvartyno drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišiniu (DSA) ir sijoto žvyro ir smulkintų padangų mišiniu (ŽP). Kolmatacijos eksperimentiniai

tyrimai atlikti ir kolonėlės užpildus suformuojant iš skirtingų medžiagų sluoksnių: sąvartyno drenažo skaldos ir smulkintų padangų skirtingų aukščių sluoksnių.

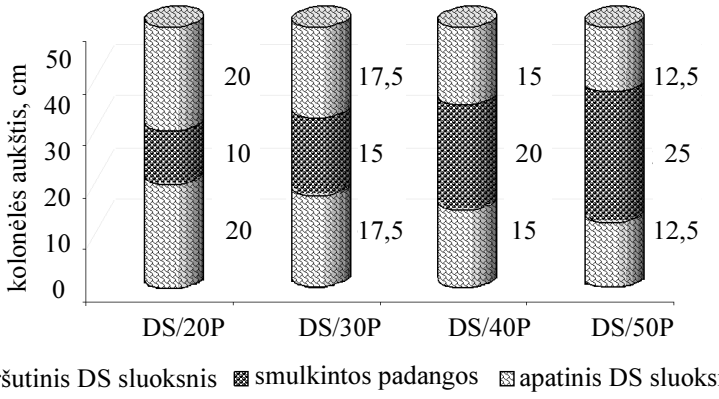
Kolonėlių tyrimas atliekamas 16–22 ºC temperatūroje. Esant tokiai temperatūrai ir pakankamam drėgmės kiekiui po 8–11 mėnesių prasideda mikrobiologiniai procesai, kurie skatina bakterijų kolonijų dauginimąsi ir prisotintoje terpėje vystosi biologinė kolmatacija.



2.1 pav. Eksperimentinis kolmatacijos tyrimų stendas
Fig. 2.1. Stand of experimental studies of clogging

Eksperimentas, atliekant kolonėlių tyrimą, kuriuo nustatomas kolmatacijos lygis (poringumo pokytis per metus), vykdomas visose kolonėlėse vienodai tokia tvarka:

- išmatuojami tiriamo užpildo granuliometrinė sudėtis ir poringumas bei apskaičiuojamas poringumo koeficientas;
- filtratas, paimtas iš Kazokiškių sąvartyno, leidžiamas per kolonėles 120 ml/parą debitu. Metodika pasirinkta vadovaujantis jau atliktais darbais (McIsaak and Rowe 2008);
- matuojama cheminių junginių: geležies ir kalcio bei skendinčių medžiagų (SM) kiekiai filtrate prieš filtraciją pro užpildą ir po filtracijos. Junginių koncentracijų kaita leidžia spręsti apie jų užsilaikymą kolonėlės užpilde, kas sąlygoja kolmatacijos procesus;
- eksperimento pabaigoje išmatuojamas tirtų medžiagų, trijuose skirtinguose kolonėlės aukščiuose poringumas bei filtrato geležies, kalcio ir skendinčių medžiagų pokyčio priklausomybė, leidžianti spręsti apie kolmatacijos potencialą.



2.2 pav. Drenažo skaldos ir smulkintų padangų sluoksnio išdėstymo schema (DS/20P – 80 % drenažo skalda ir 20 % smulkintos padangos; DS/30P – 70 % drenažo skalda ir 30 % smulkintos padangos; DS/40P – 60 % drenažo skalda ir 40 % smulkintos padangos; DS/50P – 50 % drenažo skalda ir 50 % smulkintos padangos)

Fig. 2.2. Scheme of drainage rubble and tired shreds layout (DS/20P – 80 % of drainage rubble and 20 % of tired shreds; DS/30P – 70 % of drainage rubble and 30 % of tired shreds; DS/40P – 60 % of drainage rubble and 40 % of tired shreds; DS/50P – 50 % of drainage rubble and 50 % of tired shreds)

Atliekant tyrimą su smulkintomis padangomis, buvo suformuotas skirtingo storio sluoksnis ir įterptas į skaldos užpildą. Tokiu būdu kolonėlės užpildas suformuotas iš trijų sluoksnių: drenažo skaldos, smulkintų padangų ir drenažo

skaldos. Smulkintų padangų sluoksnio aukštis parinktas skirtingo dydžio (2.2 pav.).

Smulkintų padangų sluoksnis į kolonėles buvo supiltas laisvai, papildomai jų nesuspaudžiant, kad būtų didesnis smulkintų padangų sąlyčio su filtratu paviršius. Suspaudus smulkintas padangas, sumažėja poringumas 10 %, tačiau Jungtinės Karalystės mokslininkų grupės (Hudson *et al.* 2007) atlikti tyrimai parodė, kad spaudžiant smulkintas padangas skirtingais slėgiais, poringumas pakito vienodai (sumažėjo 2–5 %) po 365 parų filtruojant per jas filtratą. Skirtingai poringumas kito tik naudojant skirtingos frakcijos smulkintų padangų užpildus. Toks užpildų poringumas sumažėjo iki 10 %. Smulkintų padangų kaip užpildo fizikinės savybės išmatuotos skirtingomis sąlygomis:

- esant 300 kPa apkrovai,
- neveikiant medžiagos apkrova.

Paprastas smulkintų padangų sudėjimas į kolonėles pasirinktas ir dėl to, kad kitų mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad suspaudus padangas 200 kPa bei 500 kPa slėgiu poringumas sumažėja iki 10 %, tačiau po dviejų metų eksperimento poringumas abiejuose mėginiuose pakito 2–3 % (Hudson *et al.* 2009). Smulkintų padangų poringumas buvo išmatuotas suspaudus jas 300 kPa slėgiu. Tokiu slėgiu yra veikiamas drenažo užpildas esant 30 metrų atliekų sluoksniui (Hudson *et al.* 2003). Suspaudus smulkintas padangas buvo išmatuotas poringumas. Skirtumas nuo anksčiau pateiktos metodikos – jei pradžioje tyrimo poringumas buvo nustatomas tik pačių medžiagų bendrai ir tada užpildytos kolonėlės, tai po filtravimo tyrimo buvo matuotas visų sluoksnių poringumas atskirai, nes mokslininkai (McIsaac and Rowe 2007; VanGluck and Rowe 2004) pateikė duomenis, kad kolmatacijos procesai vykta nevienodai visame sluoksnyje, bet skirtingu laiku skirtinguose sluoksniuose (pradžioje viršutiniuose sluoksniuose, o vėliau slenka žemyn).

Eksperimento pradžioje buvo išmatuotos ir apskaičiuotos kiekvienos užpildo medžiagos bendrosios fizikinės savybės: poringumas, poringumo koeficientas. Nustatant drenažo užpildo poringumą, poringumas apskaičiuojamas pagal LST 1361:7.1995 standartą, kuriame nurodytas bandinių ėmimo, matavimo ir natūralių akmenų bei birių mineralinių medžiagų poringumo apskaičiavimas. Užpildą sudarančių mechaninių elementų paviršiai neprigula vienas prie kito – susiliečia tam tikri taškai. Dėl to tokioje medžiagoje susidaro įvairaus dydžio tuštumų, tarpelių, kuriais skverbiasi susidaręs filtratas. Bendras visų tarpelių ir porų tarp užpildo dalelių tūris užpildo tūrio vienete yra vadinamas poringumu. Drenažo užpildo bendrąjį poringumą sudaro visų esančių tuštumų, tarpelių, porų, užpildytų dujomis bei vandeniu, tūris užpildo tūrio vienete. Jis labai priklauso nuo užpildo kietosios fazės tankio (tiksliau mineralų bei organinės medžiagos, sudarančios kietąją dalį, tankio bei užpildo susiklojimo pobūdžio, purumo, glūdumo, struktūringumo). Užpildo bendrąjį poringumą

reikia žinoti įvertinant drenažo sluoksnio struktūringumą, nustatant aeracijos poringumą, vandentalpą bei drėgmės režimą. Kolmatacijai tirti svarbu žinoti poringumą, nes po užteršimo drenažo užpildo poringumas kinta, iš ko galima spręsti apie kolmatacijos lygį (Amšiejus ir kt. 2006; Dickinson *et al.* 2010; Powrie 1999; Šimkus 1984).

Bendras poringumas struktūringuose gruntuose (prie tokių galima priskirti ir drenažui naudojamą užpildą) siekia 55–65 %, kartais net 70 %.

Atsižvelgiant į sąvartyno drenažo sluoksniui keliamus reikalavimus Europos Sąjungos direktyvoje dėl atliekų sąvartynų (sąvartyno filtrato drenažo sluoksnis turi būti $\geq 0{,}5$ m), pasirinktos skirtingos drenažo sluoksnį sudarančios medžiagos. Pasirinktas kolonėlių užpildo granulių dydis, remiantis atliktais tyrimais (Powrie *et al.* 1997) , kur nustatyta, kad esant didesnėms ertmėms tarp užpildo medžiagos, toks sluoksnis ilgiau neužsiteršia, ir ilgiau eksploatuojamas. Užpildų frakcijos naudotos, atsižvelgiant į pasaulio mokslininkų rekomendaciją (McIsaac and Rowe 2007; Powrie *et al.* 1997), kurie siūlo atlikti kolmatacijos tyrimus su ne mažesnės kaip 32–35 mm frakcijos medžiagomis. Kolonėlės yra užpildytos šiais užpildais:

- sijotas (35–62 mm frakcija) žvyras,
- žvyras (35–62 mm frakcija) su smulkintų padangų atliekomis (2×70×100 mm frakcija),
- skalda (32–65 mm frakcija) su smulkintų padangų atliekomis (2×70×100 mm frakcija),
- skalda (32–65 mm frakcija) su asfalto atliekomis (32–70 mm frakcija),
- granitinė drenažo skalda (32–65 mm frakcija).

Drenažo užpildo poringumas nustatomas tūrio matavimo metodu. Drenažo sluoksnio užpildo poringumas (*n*) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100, \tag{2.1}$$

čia V_v – porų tūris, cm^3; V_t – užpildo tūris cm^3 (Gurskis 2008; Saturated ...2010).

Apskaičiuojant poringumą naudojamas cilindras (2.3 pav.), iš pradžių apskaičiuojamas jo tūris pagal formulę:

$$V_c = \pi \times r^2 \times h, \tag{2.2}$$

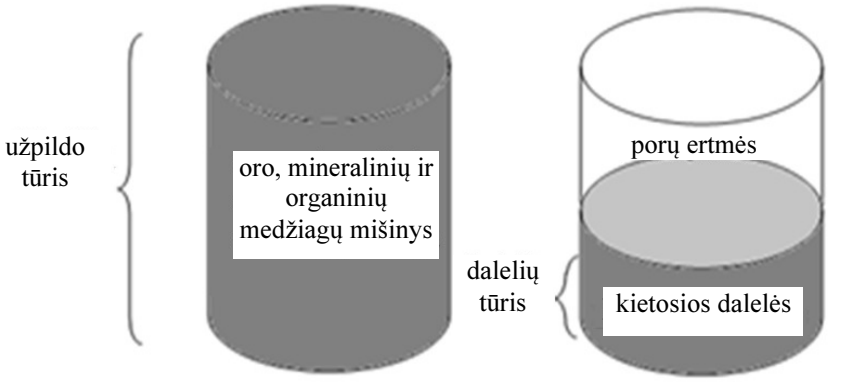
čia V_c – cilindro tūris, cm^3; π – matematinė konstanta; r – cilindro spindulys, cm; h – cilindro aukštis, cm.

Nustatant užpildo poringumą imami du vienodo tūrio cilindrai. Vienas pripildomas sauso užpildo. Sausas užpildas beriamas į cilindrą, nuolat jį sukratant, kad natūraliai susiklotų. Kitas cilindras pripildomas vandeniu.

Į pripildytą cilindrą su užpildu pilamas vanduo iš antro cilindro. Sunaudoto vandens tūris, kuris parodo porų tūrį, užpildui prisotinti apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę. Vandens tūris sunaudotas užpildui prisotinti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_v = V_c - V_L, \tag{2.3}$$

čia V_v – porų tūris, cm^3; V_c – cilindro tūris, cm^3; V_L – likusio cilindre vandens tūris, cm^3.



2.3 pav. Užpildo ir dalelių (kietosios fazės) tankio užimami tūriai
Fig. 2.3. Volumes of occupied density of filling and particles (solid phase)

Kolmatacijos tyrimuose, nustatant drenažo sluoksnio poringumą, sprendžiama apie užterštumo lygį keičiantis poringumo procentiniam lygiui. Nors kolmatacijos procesas yra ilgai besitęsiantis procesas, tačiau ir mažas poringumo pasikeitimas turi įtakos užpildo laidumo mažėjimui.

Išmatavus poringumą pagal 2.4 formulę apskaičiuojamas poringumo koeficientas (*e)*, kuris tiesiogiai priklauso nuo užpildo poringumo.

$$e = n/(1-n). \tag{2.4}$$

Drenažo sluoksnio poringumas atliekant eksperimentą yra apskaičiuojamas prieš tyrimą bei po tyrimo trijose kolonėlės aukščiuose (po 365 parų). Po kolonėlės tyrimo užpildo poringumas matuotas iš trijų (vienodai padalinus bendrą kolonėlės ilgį po 16,7 cm) skirtingų kolonėlės aukščių. Kitų mokslininkų

teigiama, kad kolmatacija intensyviausiai vystosi viršutinėje zonoje, ties filtrato įtekėjimu, todėl ir išmatuoti skirtingų aukščių poringumai.

Paklaida, kurią lemia atsitiktinės priežastys, yra vadinama atsitiktine. Tuomet, matuojant tą patį dydį keletą kartų, gaunamos vis skirtingos jo vertės x_1, x_2, x_3, …x_n , kurių vienos yra mažesnės už tikrąją vertę, o kitos – didesnės. Tokiems matavimams galioja statistiniai dėsniai (Siegmund 1970). Iš jų išaiškėja, kad ieškomojo dydžio x vertę patikimai nusako visų matavimo verčių aritmetinis vidurkis:

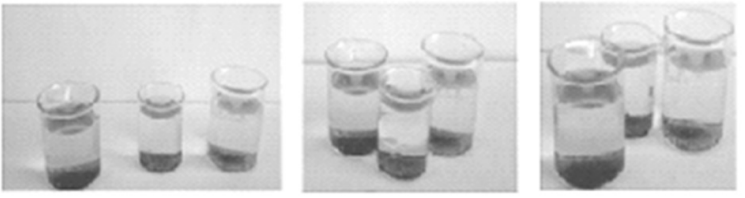
$$\langle \bar{x} \rangle = \frac{\sum x_i}{n}, \; i=1, 2, 3,....n. \tag{2.5}$$

Kadangi užpildai sudaryti iš stambių granulių, tai labai svarbu teisingai pasirinkti ėminio kiekį. Analizuojant per mažą mėginį bus netiksliai nustatytas jo poringumas, o tai ypač svarbu, nes per tiriamą laiko tarpą kolmatacijos procesai pradeda vystytis ir poringumas pakinta nedaug.

Nustatant poringumą, pavieniai ėminiai imami atsitiktinumo principu iš skirtingų užpildų, kuriems turi atstovauti ėminės, dalių. Ėminio mažiausia masė apskaičiuojama pagal 2.6 formulę:

$$M = 6\sqrt{D} \times \rho_t, \tag{2.6}$$

čia M – ėminio masė, g; D – didžiausių dalelių skersmuo, mm; ρ_t – piltinis tankis, mg/m^3.



a) b) c)

2.4 pav. Nusėdusios medžiagos bandinių ruošimas elementinei sudėčiai nustatyti naudojant dejonizuotą vandenį: a) nuo skaldos granulių paviršiaus, b) nuo žvyro granulių paviršiaus, c) nuo smulkintų padangų paviršiaus

Fig. 2.4. Samples of the accumulation materials to determinate the elemental composition using deionized water: a) from the surface of rubble granules, b) from the gravel grain surface, c) from the surface of the ground by the tire shreds

Kai tikrinamas didelis medžiagos kiekis, sumaišius reikiamą kiekį pavienių ėminių, sudaromas jungtinis ėminys. Mėginys turi būti sudarytas atsižvelgiant į dalelių stambumą ir dydį. Pasirenkant visų užpildų granuliometrinę sudėtį, ji buvo apskaičiuota kiekvieno užpildo atskirai. Kadangi granulių dydis turi įtakos poringumui, tai visuose tirtose medžiagose granulių dydžiai paskirstyti vienodai. Nors užpildai buvo formuojami naudojant vienodas frakcijas, tačiau nustačius poringumą, jis skyrėsi. Skirtumui atsirasti įtakos turėjo skirtingos granulių formos, nes tiek granitinės skaldos, tiek ir žvyro bei asfalto atliekų granulių forma netaisyklinga.

Dažnai tiesiogiai išmatavus vienus dydžius iš jų apskaičiuojamas ieškomas dydis. Pavyzdžiui, poringumas n apskaičiuojamas tiesiogiai išmatavus V_t – užpildo tūrį, ir V_v – porų tūrį (2.1 formulė). Tuomet netiesiogiai išmatuoto dydžio pati paprasčiausia paklaidos formulė gaunama apskaičiuojamą dydį diferencijuojant pagal visus tiesiogiai matuotus dydžius. Visų parametrų nustatymui kiekvienas dydis matuojamas tris kartus, kad būtų galima apskaičiuoti matavimų tikslumą.



2.5 pav. Rentgeno spindulių spektometras INCAx – sight
Fig. 2.5. X-ray spectrometer INCAx – sight

Ant užpildo paviršiaus susidariusių nuosėdų elementinei sudėčiai nustatyti buvo naudotas rentgeno spindulių dispersinės analizės metodas. Rentgeno spindulių dispersinė analizė yra kiekybinė analizė, kuri leidžia nustatyti dominuojančius elementus, kai jų kiekiai tiriamos medžiagos sudėtyje yra didesni nei 0,5 %. Matavimai atlikti skleidžiamuoju elektroniniu mikroskopu EVO 50, sujungtu su dispersinės energijos Rentgeno spindulių spektrometru INCAx – sight (2.5 pav.). Buvo naudojamas antrinių elektronų detektorius,

greitinanti įtampą – 20 keV, darbinis atstumas – 10 mm. Elementinė sudėtis analizuota pagal L ir K spektrų linijas. Prieš atliekant nusėdusios medžiagos elementinę sudėtį, akumuliavusi medžiaga ant užpildo granulių paviršiaus nuplaunama dejonizuotu vandeniu 2.4 paveikslas ir mėginiai paliekami medžiagų nusėdimui. Gautos nuosėdos išdžiovinamos ir gautuose mėginiuose elektroninės dispersinės spektroskopijos pagalba išmatuojama elementinė sudėtis. Analizė remiasi principu, kad kiekvienas elementas turi savitą atominę struktūrą.

Bandinio struktūra tiriama pasitelkiant rentgeno spindulius. Rentgeno spinduliai gaunami bandinį apšaudant didelės energijos elektronų pluoštu. Kiekvienas elementas išspinduliuoja skirtingą energijos kiekį. Analizuojant šias energijas galima nustatyti elementinę medžiagos sudėtį.

Medžiagos masės ir tūrio santykiu (tankiu) išreiškiamas gravitacijos poveikis medžiagoms. Šiuo rodikliu apibūdinamos visos medžiagos ar kūnai, nes kiekviena medžiaga užima tūrį ir turi tam tikrą masę.

Laidumo sumažėjimo tyrimus atliko Brune ir kt. (1994), akumuliacinės medžiagos susidarymą drenažo sluoksnyje nagrinėjo Rowe ir kt. (1997). Atliekant tyrimus buvo stebima akumuliacijos įtaka kolmatacijos procesams drenažo užpilde. Užpildų poringumas išmatuojamas prieš kolonėlės tyrimą ir po jo, kuris atliekamas eksperimentinio tyrimo metu sukurtume stende (2.1 pav.).

Visų tyrimų kompleksas bei gautų rezultatų analizė – tai pagrindinės priemonės kolmatacijos procesų tyrimams.

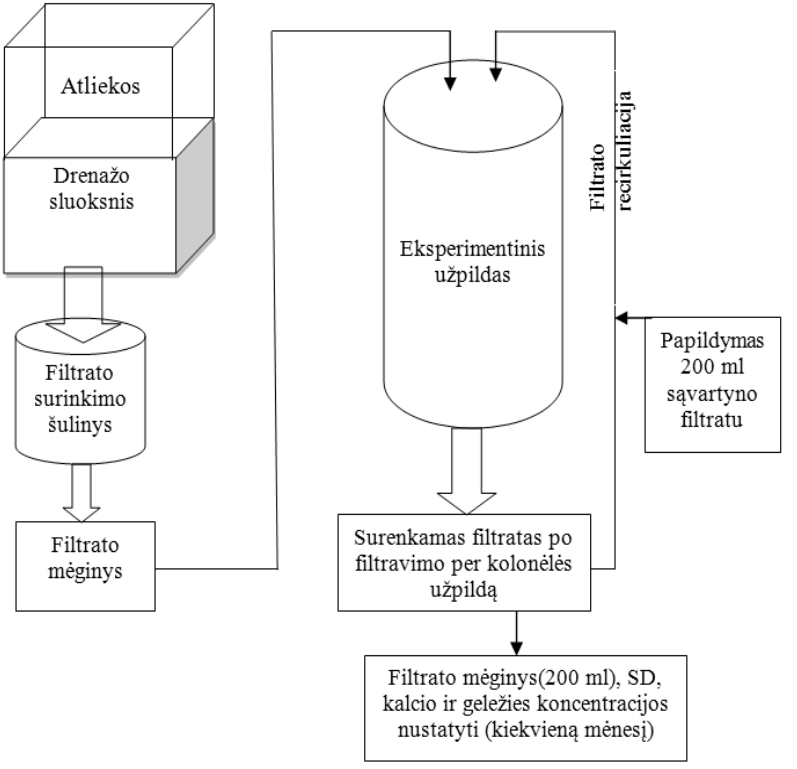
2.2. Filtrato sudėties kaitos nustatymo metodika

Filtrato cheminę sudėtį svarbu nustatyti prieš atliekant eksperimentinius tyrimus bei perfiltravus per drenažo sluoksnį. Žinant elementų koncentracijų pasikeitimus, galima būtų nagrinėti pokyčio priežastis, kurios daugiausiai turi įtakos drenažo sluoksnyje vykstantiems procesams.

Siekiant nustatyti skirtingų drenažo sluoksnį sudarančių medžiagų poveikį kolmatacijai, šiame skyriuje pateikiama filtrato savybių kaita, priklausanti nuo skirtingų medžiagų (skaldos, naudoto asfalto, smulkintų padangų ir sijoto žvyro bei minėtų medžiagų mišinių). Atliekant laboratorinius bandymus svarbu nustatyti tiek filtrato sudėtį prieš tyrimus, tiek ir po jų, nes tada galima nustatyti, kokie cheminiai elementai daugiausia dalyvauja kolmatacijos procese.

Dėl labai sudėtingos komponentinės sudėties filtrate vyksta įvairios cheminės reakcijos, jungiasi bei skyla cheminiai junginiai. Kolmatacijos procesai sąvartynų drenažo sluoksnyje yra ypač suintensyvėję dėl

biodegradacijos procesų metu susidarančios aukštos temperatūros (+25 ºC ir daugiau). Tokiomis sąlygomis intensyviausiai vyksta mikrobiologinė kolmatacija.



2.6 pav. Filtrato leidimo per eksperimentinį stendą schema
Fig. 2.6. Scheme of leachate leaching through experimental test

Eksperimentui filtratas yra paimtas iš komunalinių atliekų sąvartyno filtrato surinkimo šulinio (2.6 pav.). Kolonėlės tyrimo pradžioje yra nustatomos kalcio, geležies ir skendinčių medžiagų koncentracijos filtrate. Filtratas leidžiamas per skirtingus kolonėlių užpildus ir surenkamas po kiekviena kolonėle atskirai. Kiekvieną mėnesį paimamas 120 ml mėginys iš po kiekvienos kolonėlės ir matuojama filtrato pagrindinių kolmataciją sąlygojančių elementų koncentracijos. Visas filtratas papildomas 220 ml iš sąvartyno paimtu filtratu, nustatomos pradinės koncentracijos ir vėl filtratas leidžiamas per kolonėlę. Kiekvieną mėnesį papildoma sąvartyno filtratu, kadangi nustatant skendinčias medžiagas pagal metodiką imamas 100 ml mėginys. Filtrato recirkuliacija

atliekama kas 30 parų. Tokiu metodu, galima stebėti, kaip keičiasi kalcio, geležies ir skendinčių medžiagų koncentracijos. Mažėjant jų kiekiams filtrate, galima daryti prielaidą, kad jie susilaikė drenažo užpilde nusėsdami ant užpildą sudarančios medžiagos paviršiaus. Tokiu būdu mažėja laisvos poros, mažėja poringumas ir vyksta kolmatacija (Powrie and Robinson 2000).

Kalcio jonų nustatymo metodika. Kalcio jonai – pagrindiniai paviršinio vandens katijonai, kurių nemaži kiekiai randami ir filtrate. Daug kalcio jonų patenka dūlėjant uolienoms su silikatų, metalurgijos, stiklo pramonės atliekomis. Duomenys apie kalcio jonų koncentracijas aktualūs tiriant karbonatinės sistemos būseną, sedimentacijos procesus.

Atliekant tyrimo procedūrą imama 100 ml mėginio filtrato (kadangi filtratas neskaidrus, tai imama 5 ml ir praskiedžiama iki 100 ml) ir perkeliama pipete į 200–250 ml kūginę kolbą. Į kolbą su analiziniu mėginiu įpilama 2 ml 2 mol/l natrio hidroksido tirpalo ir įberiama 10–15 mg sauso mureksido ir natrio chlorido (santykiu 0,2:100) mišinio. Intensyviai maišant analizinis mėginys titruojamas 0,01 mol/l ekvivalentų Na_2H_2R (tritono B) tirpalu, kol kolbos turinio spalva iš purvinai žalios tampa mėlyna. Gautas rezultatas apskaičiuojamas :

$$C_{masė}(Ca^{2+})=(C(Na_2H_2R)\times V_1\times 40,08\times 1000)/V, \quad (2.7)$$

čia $C_{masė}(Ca^{2+})$ – kalcio jonų masės koncentracija, mg/l; $C(Na_2H_2R)$ – ekvivalentų Na_2H_2R (tritono B) tirpalo koncentracija, mol/l; V – analizinio mėginio tūris, cm^3; V_1 – suvartoto analiziniam mėginiui titruoti ekvivalentų Na_2H_2R (tritono B) tirpalo tūris, cm^3.

Gautas analizės rezultatas – tai trijų bandinių koncentracijos kiekio aritmetinis vidurkis, kai skirtumas neviršija 0,5 %. Priešingu atveju bandiniuose koncentracijos yra nustatomos pakartotinai.

Geležies nustatymo metodika. Metodo principas: pilant 1,10 – fenantrolino tirpalą į tiriamąjį mėginį susidaro oranžinis kompleksinis junginys, kurio spalvos intensyvumas nustatomas fotometriškai 510 nm bangos ilgyje.

Nustatant visą geležies kiekį, taip pat ir visą ištirpusios geležies kiekį, geležis (III) redukuojama į geležį (II) hidroksilamino chloridu. Jeigu geležis yra netirpios formos, geležies oksidų arba kompleksinių junginių pavidalu, tai tie junginiai suardomi ir ištirpinami.

Geležies (II) ir 1,10 – fenantrolino kompleksas stabilus (2,9–9) pH intervale. Spalvos intensyvumas tiesiog proporcingas geležies (II) kiekiui. (0–5,0) mg/l geležies koncentracijų intervale pasireiškia priklausomybė tarp geležies koncentracijos ir absorbcijos dydžio. Absorbcijos maksimumas randasi 510 nm bangos ilgyje.

Tyrimo metu imama 50,0 ml parūgštinto vandens mėginio. Parūgštinama 0,5 ml sieros rūgštimi. Maksimalus tiriamojo mėginio tūris, kuriame galima nustatyti geležies koncentraciją iki C = 2,0 mg/l, yra 50 ml.

Oksidacija. Į vandens mėginį įpilama 5 ml kalio persulfato tirpalo ir 40 minučių virinama, stebint, kad tirpalo tūris nepasidarytų mažesnis kaip 20 ml. Jeigu dėl oksidacijos mėginys susidrumstė, jis filtruojamas per membraninį filtrą ir perpilamas į matavimo kolbą. Ataušintas tirpalas perpilamas į 50 ml matavimo kolbą.

Redukcija į geležį (II). Įpilama 1 ml hidroksilamino chlorido tirpalo ir gerai sumaišoma. Po to įpilama 2 ml acetatinio buferio, kuris tirpalo pH palaiko 3,5–5,5 intervale (tinkamas pH – 4,5). Absorbuojančio junginio susidarymas. Į tirpalą įpilama 2 ml 1,10 – fenantrolino tirpalo ir 15 min. laikoma tamsoje.

Fotometrinis matavimas. Tirpalo absorbcija išmatuojama spektrometru 510 nm bangos ilgyje, naudojant 20 mm optinio sluoksnio storio kiuvetę. Kaip palyginamasis tirpalas imamas tuščiasis mėginys.

Tuščiasis bandymas (nulinis). Vietoj tiriamojo tirpalo imama 50 ml distiliuoto vandens ir atliekamos visos tos pačios procedūros (LST ISO 6333:1995).

Skendinčių medžiagų (SM) nustatymo metodika, filtravimo metodu. Kiekvieną mėnesį buvo nustatomas skendinčių medžiagų koncentracija. Naudojamas stiklo pluošto filtras (poros – 1,6 μm), kurio analizės metu gaunamas skendinčių medžiagų kiekis. Dabartiniu metu galioja tarptautinis standartinis metodas skendinčių medžiagų nustatymui naudojant košimą pro stiklo pluošto koštuvą (ISO 11923:1997). Taip pat apie skendinčiųjų medžiagų nustatymą kalba Europos Norma EN 872.

Ėminys nufiltruojamas per membraninį filtrą. Filtras džiovinamas 105 °C temperatūroje ir svėrimo būdu pagal filtro masių skirtumą nustatoma skendinčių medžiagų masė (skendinčių medžiagų gramai vienam kubiniam metrui). Skendinčios medžiagos nustatomos ± 5 % glaudumu ir apskaičiuojamos ± 10 % tikslumu.

Atliekant matavimus ėminiai ne trumpiau kaip valandą laikomi patalpoje, kurioje bus analizuojami, kad pasiektų patalpos oro temperatūrą. Filtras laikomas arti svarstyklių, kad įgautų drėgmės pusiausvyrą su svėrimo patalpos oru, ir sveriamas 0,1 mg tikslumu analitinėmis svarstyklėmis. Filtras įdedamas į piltuvą savaime filtruojasi. Nenaudojamas vakuumo prietaisas, nes dėl didelių skendinčių medžiagų koncentracijos filtras greitai užsiteršia ir toliau nebevyksta filtravimasis. Indas su ėminiu stipriai suplakamas ir į matavimo cilindrą tuoj pat įpilamas reikiamas ėminio tūris. Ėminio tūris parenkamas toks, kad nuosėdos ant

filtro būtų tiksliausiose masės nustatymo ribose. Ėminio tūris matuojamas ± 2 % ar didesniu tikslumu.

Ėminys nufiltruojamas, matavimo cilindras praskalaujamas nedideliu kiekiu distiliuoto vandens ir juo plaunamas filtras ir vidinės filtro piltuvo sienelės. Filtras atsargiai su dviem pincetais išimamas iš piltuvo, sulankstomas, patalpinamas į džiovinimo biuksą ir džiovinamas džiovinimo spintoje 105 °C ± 2 °C temperatūroje iki stabilaus svorio. Filtras išimamas iš džiovinimo spintos, leidžiama nusistovėti pusiausvyrai su oru ir sveriama, kaip prieš analizę buvo sveriamas tuščias (be nuosėdų) filtras.

Skendinčių medžiagų koncentracija apskaičiuojama pagal formulę 2.8.

$$k_{SM}=\frac{1000(m_s-m_f)}{V}, \qquad (2.8)$$

čia k_{SM} – skendinčių medžiagų koncentracija, mg/l; m_s – filtro masė po filtravimo, mg; m_f – švaraus filtro masė, mg. V – paimto analizei ėminio tūris, cm^3. Filtratas turi savyje daug skendinčios medžiagos, todėl 100 ml filtrato filtruojama per 2–3 filtrus. Visų filtrų masės sudedamos ir gaunamas bendras skendinčios medžiagos keikis iš 100 ml. Tyrimo pabaigoje tikslesniems rezultatams gauti buvo atliekami trys filtravimai po 100 ml.

Savybių kaitos analizė atliekama naudojant Spirmano koreliacijos koeficientą. Nors ši analizė atliekama tik analizuojant filtrato sudėtį, tačiau nuo filtrato sudėties kaitos priklauso ir kitų procesų vystymasis sąvartyne. Esant mažesnėms SM kalcio geležies junginių koncentracijos filtrate, mažėja ir kolmatacijos vystymosi greitis, taip pat ilgėja drenažo sistemos funkcionavimo laikas. Koreliacijos koeficientas įvertina tiesinio ryšio stiprumą. Jis gali būti naudojamas, kai stebimų atsitiktinių dydžių x ir y skirstiniai yra normalieji (reikšmės yra išmatuotos intervalų arba santykių skalėje). Dviejų atsitiktinių dydžių x ir y tiesinio ryšio stiprumą įvertina koreliacijos koeficientas (R).

Ryšys bus tuo stipresnis, kuo |R| reikšmė bus arčiau 1. Jei R>0, tai didėjant vieno atsitiktinio dydžio reikšmėms, kito reikšmės tiesiškai didėja. Jei R<0, tai didėjant vieno atsitiktinio dydžio reikšmėms, kito reikšmės tiesiškai mažėja. Kuo didesnė imtis, tuo R yra arčiau nežinomo koreliacijos koeficiento. Empirinio koreliacijos koeficiento, kaip ir visų taškinių verčių tikslumas ir patikimumas mažėja, kai mažėja imties didumas. Matuojamas kiekybinių kintamųjų tiesinio ryšio stiprumas (Box *et al.* 2005; Mann 2007).

Stipri koreliacija – didelės šio koeficiento reikšmės, nežiūrint ar jos teigiamos (tiesioginė priklausomybė), ar neigiamos (atvirkštinė priklausomybė). Silpna koreliacija – mažos reikšmės. Jei koreliacija yra nereikšminga, tai nereiškia, kad koreliacijos koeficientas tiksliai lygus nuliui. Užtenka, kad

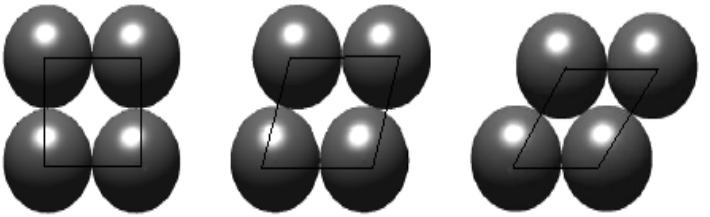
koeficiento reikšmė būtų arti nulio. Stipri koreliacija tiek atvirkštinė tiek ir tiesioginė parodo, kad vienas kintamasis priklauso nuo kito kintamojo kitimo.

2.3. Kolonėlės užpildo poringumo mažėjimo modeliavimo metodika

Skyriuje pateikiama metodika taikyta kolonėlės užpildo porų mažėjimui apskaičiuoti, naudojant *BioClog* modelį. Programoje įvertinama, per kokį laiko tarpą vyksta porų užsipildymas ir sumažėja poringumas. Poringumo mažėjimas įvertinamas pagal susikaupusios ant porų paviršiaus medžiagos kiekį. Sprendžiat poringumo kaitos uždavinį į programą įvedami parametrai:

- kolonėlės aukštis ir skersmuo;
- užpildo granulių dydis;
- užpildo pradinis poringumas;
- filtrato kiekis per vieną parą;
- kalcio koncentracija filtrate;
- skendinčių medžiagų koncentracija.

Atlikus išsamius skaičiavimus gauti rezultatai grafiškai pateikiami pasitelkiant *SigaPro 8.0* programą.



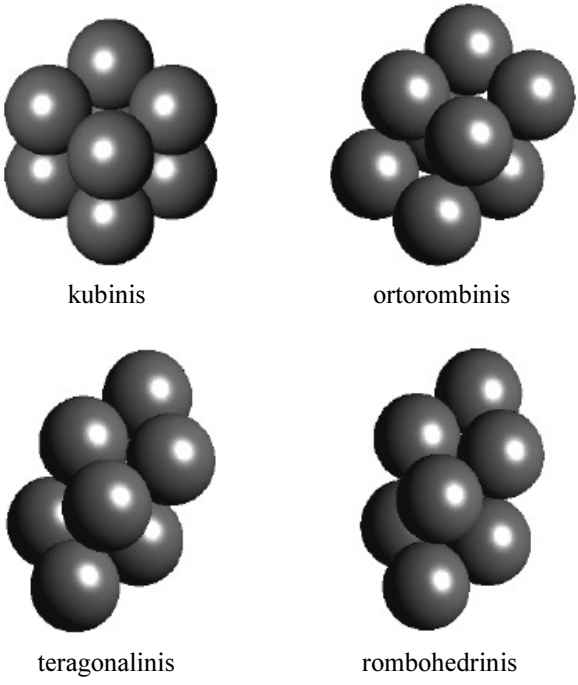
2.7 pav. Paviršių išsidėstymas plokštumoje pagal Graton and Fraser
Fig. 2.7. Surface location of the plane by Graton and Fraser

BioClog modelis sukurtas modeliuoti biologiškai suformuotą laidumo sumažėjimą dviem skirtingomis sąlygomis:

- 1D sąlygos, kai modeliuojama kolonėlės testas, kur stebima kolmatacija prisotintoje terpėje vertinant skendinčių dalelių bei kalcio kiekio kaitą filtrate (Cooke *et al*. 2001);

• 2D sąlygos, kai modeliuojamas mezokosmo elementas (laboratorinėmis ar lauko sąlygomis imituoti ekosistemų komponentai, tiksliau atspindimos natūralios aplinkos sąlygos), kur prognozuojamas galimas laidumo sumažėjimas ir jo plitimas tame elemente, įvertinant filtrato skendinčių medžiagų bei kalcio kaitą, esant prisotintai terpei (Cooke and Rowe 2008).

Modelis remiasi Graton ir Fraser (1935) sukurtu matematiniu modeliu, kuriame esant vienodam poringumui nustatoma vienodo lygaus paviršiaus skersmens (d_g) sferinis išsidėstymas (Rowe and Babcock 2007). Programoje skaičiavimams naudojami trys skirtingi dalelių išsidėstymai plokštumoje: kvadratas, rombas ir ypatingas rombas (2.7 pav.). Kiekviena dalelė turi liestis su kita mažiausiai dviem sąlyčio taškais vienoje plokštumoje.



2.8 pav. Sferinis išsidėstymas pagal Graton and Fraser
Fig. 2.8. Spherical configuration by Graton and Fraser

Bioclog modelis skaičiuoja naudodamas keturis skirtingus medžiagos gardelės sferinius išsidėstymus: kubinį, ortorombinį, tetragonalinį ir rombohedrinį (2.8 pav.) trimatėje sistemoje. Kubinis yra sudarytas iš trijų

kvadratų, ortorombinis – sudarytas iš dviejų kvadratų ir vieno rombo, tetragonalinis susideda iš dviejų rombų ir ypatingojo rombo bei rombohedrinis sudarytas iš trijų rombų. Visos plokštumos yra nagrinėjamos trimatėje sistemoje, kadangi pati poringa medžiaga yra sferinė.

Atliekant skaičiavimus labai svarbus vienos plokštumos su kita plokštuma (m) susilietimo taškų skaičius, kadangi suformuotoje sferoje didesnis susilietimo taškų skaičius reiškia didesnį medžiagos tankumą. Savitai išsidėstę kiekvienoje sferoje sąlyčio taškai sukuria skirtingą tuščią erdvę tarp dalelių poringoje medžiagoje ir turi įtakos poringumo pasikeitimui. Bendrą sferos tūrį sudaro kietoji dalis bei tuštuma, kuri apskaičiuojama kaip susijungimo koeficientas (a_m). 2.1 lentelėje pateikiama visų modelyje naudojamų sferinių formų susilietimo taškų skaičius, vieno elemento masė, poringumas bei susijungimo koeficientas.

2.1 lentelė. Skirtingų sferinių formų charakteristikos (Cooke and Rowe 1999)
Table 2.1. Characteristics of different packing with uniform spheres (Cooke and Rowe 1999)

Sfera	Susijungimo taškų skaičius	Vieno elemento masė	Poringumas	Susijungimo koeficientas a_m
Kubinė	6	d_g^3	47,64	1
Ortorombinė	8	$\frac{\sqrt{3}}{2d_g^3}$	39,54	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
Tetragonalinė	10	$0{,}75d_g^3$	30,19	0,75
Rombahedrinė	12	$\frac{\sqrt{2}}{2d_g^3}$	25,95	$\frac{\sqrt{2}}{2}$

Visi šie parametrai yra apskaičiuoti Deb (1969) pateiktais poringumo skaičiavimais, paremtais geometriniu modeliu (Rowe and Cooke 2008). Naudojantis 2.9 formulę apskaičiuojamas kiekvienos sferos sudedamosios dalies poringumas n_T. Ši formulė buvo pagrindas toliau tobulinti poringumo mažėjimo tendencijas analizuojant keturias sferas.

$$n_T=1-\frac{\pi}{a_m}\left[\frac{2-m}{12}\left(\frac{2L_t}{d_g}\right)+\frac{4-m}{8}\left(\frac{2L_t}{d_g}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{2L_t}{d_g}\right)+\frac{1}{6}\right], \qquad (2.9)$$

čia a_m – susijungimo koeficientas, m – susilietimo taškų skaičius, L_t – sluoksnio storis sferos paviršiuje, mm; d_g – sferos skersmuo, mm.

Sluoksnio storiui didėjant ant porų paviršių medžiagoje, formuojasi skirtingas jo storis bei formos.

Bioclog modelyje yra pakoreguoti ir įvesti papildomi koeficientai, siekiant tiksliau apskaičiuoti poringumo kaitą. Spendžiant uždavinį naudojami poringumo rezultatai ir sunormintas apibrėžtas paviršius su skirtingu sluoksnio storiu, kurie yra pateikiami 2.9 paveiksle. Poringumas palaipsniui sumažėja iki nulio kiekvienam sferiniame išsidėstyme, kada sluoksnio storis virš sferinio paviršiaus padidėja iki visiškai laisvų porų erdvės užpildymo.

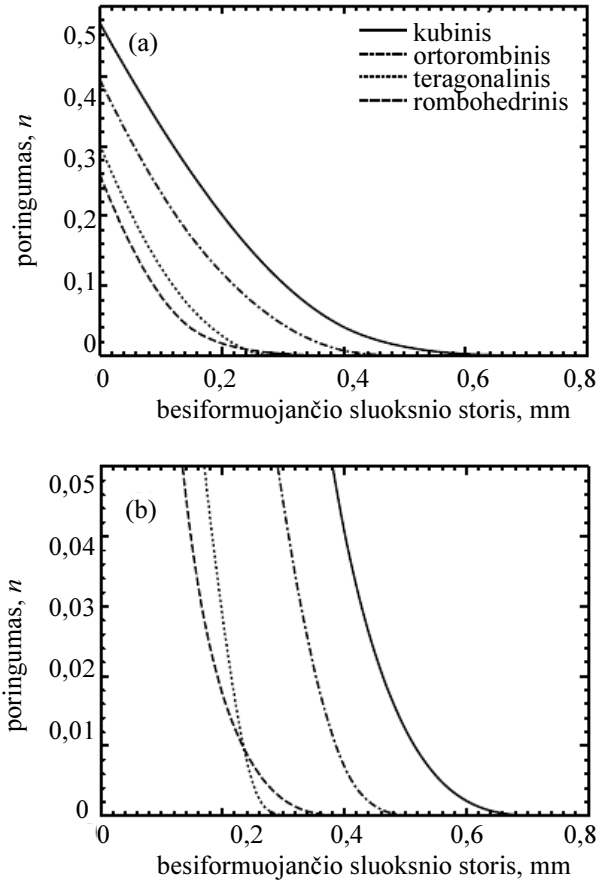
Atliekant modeliavimą vienas iš svarbiausių faktorių yra pradinis tiriamos medžiagos poringumas, pagal kurį programa parenka vieną iš sferų ir apskaičiuoja, per kiek laiko užsipildytų porų tarpai. Taip pat svarbūs ir kiti parametrai: skendinčių medžiagų kiekis, kalcio koncentracijos kaita filtrate bei srovės debitas.

Skendinčių medžiagų judėjimas ir jų nusėdimas apskaičiuojami pagal 2.10 formulę. Ištirpusios medžiagos dispersinio judėjimo lygtis apibūdina ne tik skysčio judėjimą poringoje terpėje, bet kartu atskaičiuojama ir skendinčių medžiagų gravitaciją (Cooke and Rowe 2008).

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t}=D_{xx}\frac{\partial(nC)}{\partial x^2}+D_{zz}\frac{\partial^2(nC)}{\partial z^2}+D_{xz}\frac{\partial^2(nC)}{\partial x\partial z}+D_{zx}\frac{\partial^2(nC)}{\partial z\partial x}-$$

$$-\frac{\partial(v_{x,a}C)}{\partial x}-\frac{\partial(v_{z,a}C)}{\partial z}+w_s\frac{\partial(nC)}{\partial z}+S_R, \qquad (2.10)$$

čia C – elementų koncentracija, n – poringumas, t – laikas, s; D_{xx}, D_{zz}, D_{xz}, D_{zx} – dispersijos koeficientai, $v_{x,a}$ ir $v_{z,a}$ – atitinkamai Darsy greitis x ir z plokštumose, w_s – skendinčių medžiagų nusėdimo greitis, priklausantis nuo gravitacinės traukos, m/s; S_R – skendinčių medžiagų nusėdimo trukmė, priklausanti nuo biocheminių procesų, s.



2.9 pav. Priklausomybė tarp poringumo ir bioplėvelės storio skirtinguose sferiniuose išsidėstymuose (a) viso intervalo poringumas; b) poringumas iki 0,05)
Fig. 2.9. Complete relationship for the change in porosity with film thickness for four different packing arrangements (a) full range porosity; b) porosity less then 0.05)

Naudojantis *Bioclog* modeliu yra apskaičiuota ir *SigmaPro* programos pagalba pateikta poringumo kaita nuo vienerių metų iki 30 metų. Taip pat apskaičiuotas ir prognozuojamas bendras nuosėdų kiekis ant užpildo sudedamųjų paviršiaus bei neorganinių nuosėdų kiekis po 5 ir 10 metų. Įvedus į programą eksperimento metu gautus duomenis: pradinį poringumą, užpildą sudarančios medžiagos granuliometrinę sudėtį, skendinčių medžiagų kiekį, kalcio kiekį, kolonėlių parametrus, filtrato kiekį per parą, programa per pasirinktą laikotarpį apskaičiuoja anksčiau minėtus parametrus. Skendinčios

medžiagos filtrate susideda iš organinės biomasės ir kietosios dalies. Abi skendinčiųjų sudedamosios modeliujant tampa kietosiomis dalelėmis, kadangi organinė masė, vykstant puvimo procesams, skyla ir susidaro kietoji dalis, kuri nusėda ant sferinių paviršių. Modeliuojant kiekvienas kolonėlės užpildas buvo nagrinėjamas atskirai, pateikiami gauti duomenys *x* ir *z* ašyse, t. y. išilginis pjūvis – kolonėlės aukštis ir skersmuo (metrais).

Bioclog programa ir toliau yra tobulinama Kanados mokslininkų, stengiamasi atlikti kuo daugiau laboratorinių tyrimų, kad būtų galima įvesti kuo tikslesnius koeficientus, nes kolmatacijos procesai yra sudėtingi, ypač naudojant įvairias drenažo sluoksnio medžiagos.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Tiriant kolmatacijos procesus medžiagose, kurias galima panaudoti sąvartyno drenažo sluoksniui formuoti, reikalinga nustatyti pagrindinius parametrus: poringumą ir jo koeficientą. Šių dydžių kaita parodo kolmatacijos vystymosi intensyvumą laike.
2. Užpildo poringumas nustatomas cilindro metodu. Tokios granuliometrinės sudėties medžiagoms tai tinkamiausias tyrimo metodas.
3. Kolonėlės tyrimas atliekamas naudojant skirtingus užpildus ir per juos leidžiant filtratą. Taip galima nustatyti tiek užpildo poringumą, tiek kalcio bei geležies junginių koncentracijų kaitą filtrate.
4. Kolmatacijos procesai komunalinių atliekų sąvartyne vyksta esant daugiakomponentei filtrato sudėčiai. Kolonėlės tyrimo metu buvo stebima dalies filtrato sudedamųjų dalių (skendinčių medžiagų, kalcio bei geležies junginių) koncentracijų kaita, kurią būtina detaliau išanalizuoti.

3

Kolmatacijos tyrimų rezultatai

Komunalinių atliekų sąvartynų filtrato sudėties tyrimai plačiai atliekami. Surinkimo sistemomis surenkamas filtratas persifiltruoja pro drenažo sluoksnį, kuriame nusėda tam tikros medžiagos, sudarydamos sankaupas ir sukurdamos pasipriešinimą laidumui. Užpildo poringumo kaita ir poringumo koeficiento pokytis analizuojami šiame skyriuje.

Daugiausia poras teršianti medžiaga susideda iš didelių kiekių geležies, kalcio bei karbonato junginių. Labai svarbų vaidmenį kolmatacijos eigoje atlieka skendinčios dalelės, kurios filtrate sudaro skendinčių medžiagų koncentraciją. Modeliavimo programa skirtinguose užpilduose atliktas poringumo kaitos apskaičiavimas, bei pateiktas grafinis vaizdas. Modeliavimo programa leidžia ne tik atlikti gautų laboratorinių tyrimų rezultatų palyginimą, bet kartu ir suteikia galimybę prognozuoti. Šiame skyriuje pateikiami gauti modeliavimo rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbti trys autorės straipsniai (Bazienė ir Vasarevičius 2010; 2011; 2012; Bazienė *et al.* 2012; 2013).

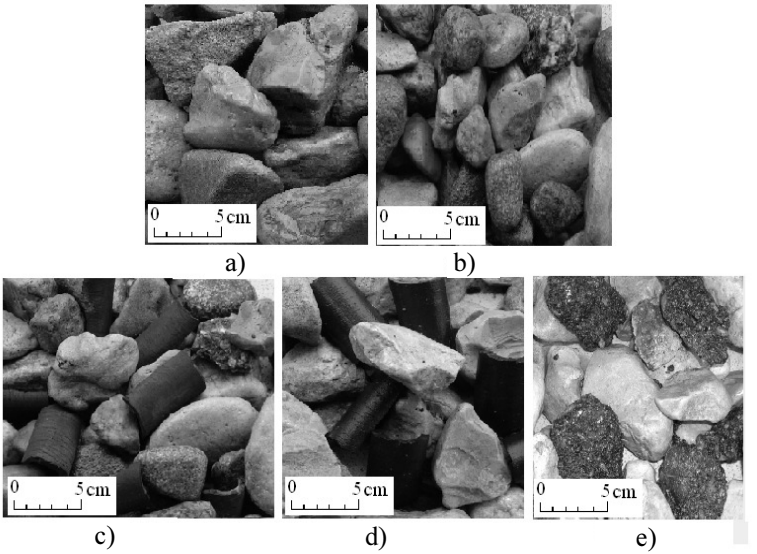
Šiame skyriuje atliktas gautų tyrimų rezultatų modeliavimas tarptautinės stažuotės Karalienės universiteto (Queen‘s university) Civilinės inžinerijos fakultete, Kingstone Kanadoje. Stažuotė buvo finansuojama iš Lietuvos mokslo tarybos projekto „Studentų mokslinės veiklos skatinimas“ (VP1-3.1-ŠMM-01-V-02-003) pagal Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksmų programos 3 prioritetą

„Tyrėjų gebėjimų stiprinimas“ iš Europos socialinio fondo ir Lietuvos Respublikos valstybės biudžeto lėšų.

3.1. Užpildų kolmatacijos tyrimų rezultatų analizė

Drenažo sluoksnį sudarančių mechaninių elementų paviršiai neprigula vienas prie kito – susiliečia tam tikri taškai. Dėl to drenažo užpilde susidaro įvairaus dydžio tuštumų, tarpelių, kuriais skverbiasi susidaręs filtratas. Kuo didesnis bendras visų tarpelių ir porų tarp užpildo dalelių tūris, tuo ilgesnis laikas, per kurį gali sumažėti poringumas.

Siekiant nustatyti drenažo užpildą sudarančių skirtingų medžiagų poveikį kolmatacijai, šiame skyriuje pateikiama užpildų bendrųjų fizikinių savybių kaita.



3.1 pav. Kolonėlių užpildams naudojamos medžiagos:
a) drenažo skalda naudojama sąvartynuose (DS); b) Lietuvos karjeruose kasamas žvyras (Ž); c) žvyro ir smulkintų padangų mišinio (ŽP);
d) drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinio (DSP); e) drenažo skaldos ir asfalto mišinio (DSA)

Fig. 3.1. Materials used in the filling of columns: a) rubble used in landfill (DS), b) gravel mined at Lithuanian quarries (Ž); c) mixture of gravel and tired shreds mixture (ŽP); d) mixture of drainage rubble and tired shreds (DSP);
e) mixture of drainage rubble and asphalt (DSA)

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti su penkiais skirtingais kolonėlių užpildais trimis etapais:

I. Pirmuoju etapu išmatuotos visų pasirinktų medžiagų bei mišinių fizikinės savybės, kurios turi įtakos kolmatacijai.
II. Antruoju etapu, užpildytos eksperimentinio stendo kolonėlės užpildais. Per užpildus leidžiamas iš komunalinių atliekų sąvartyno paimtas filtratas. Stebima filtrato skendinčių dalelių, kalcio bei geležies junginių koncentracijų kaita. Tyrimo trukmė – 365 paros.
III. Trečiuoju etapu pakartotinai išmatuotos visų pasirinktų medžiagų bei mišinių fizikinės savybės po kolonėlės tyrimo ir apskaičiuojamas jų pokytis.

3.1 paveiksle pateikti visi kolonėlių užpildams naudotų medžiagų pavyzdžiai. Norima išsiaiškinti, kokios sudėties užpildas geriausia naudoti komunalinių atliekų sąvartyno filtrato drenažo sluoksnyje.

3.1 lentelė. Užpildo charakteristikos
Table. 3.1. Characteristics of columns filling

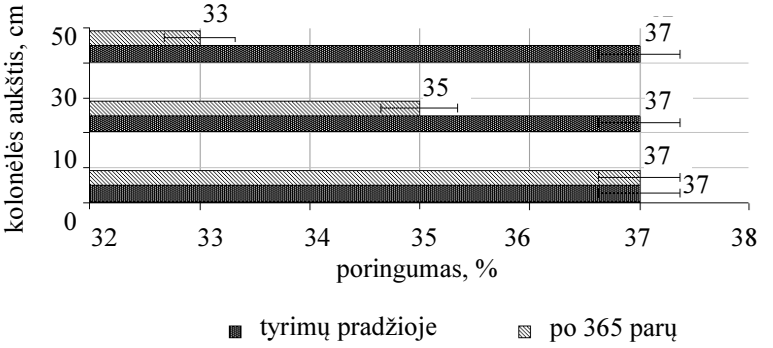
Užpildas	Frakcija, mm
Granitinė drenažo skalda	32–65
Sijotas (35–62 mm frakcijos) žvyras	35–65
Skalda 70 % su asfalto liekanomis 30 % (tūrio)	Skalda 32–65
	Asfalto atliekos 20–50
Skalda 70 % su smulkintomis padangomis 30 % (tūrio)	Skalda 32–65
	Smulkintos padangos 70–100
Žvyras 70 % su smulkintomis padangomis 30 % (tūrio)	Žvyras 35–65
	Smulkintos padangos 70–100

Viena iš nagrinėjamų medžiagų, kuri ir dabar naudojama komunalinių atliekų sąvartyne drenažo sluoksnio užpildui suformuoti, drenažo skalda, kuri gaminama iš granito. Tokia skalda naudojama todėl, kad pastarojoje yra <10 % kalcio junginių dalis. Tokios sudėties skalda naudojama, kad sumažintų laidumo sumažėjimo pavojų. 3.1 lentelėje pateikiama nagrinėtų užpildų granuliometrinė

sudėtis. Kiekvienas užpildas formuojamas iš 60 % stambiausios frakcijos dalies ir 40 % kitų frakcijų.

Kiekviena pasirinkta medžiaga toliau detaliau aprašyta. Granitas – magminė uoliena, susidariusi iš sustingusios magmos. Stambiagrūdės uolienos susidarė lėtai vėsdamos Žemės plutoje, kai kristalai spėjo išaugti iki 2 mm ilgio (užauga gerokai didesnių). Sudėtinės dalys – feldšpatai, kvarcas, mažas žėručio kiekis su kitais mineralais. Kietumas sudaro apie 5–7 (pagal Moso skalę deimantas 10). Vandens įgeriamumas sudaro 0,2–0,5 % (stambiagrūdžio granito įgeriamumas didesnis). Uolienos atsparumo savybės puikios. Kai kurios granito rūšys turi geležies junginius, kuriems traukiant drėgmę, kinta granito mineraloginė sudėtis, nublunka spalva, atsiranda dėmių. Visos granito kaip pagrindinės pamatinės uolienos fizikinės charakteristikos – kietumas, mažas vandens įgeriamumas – tinkamos sąvartyno drenažo užpildui.

Drenažo sluoksniui naudojama granitinė skalda (3.1 (a) pav.), pasirinkta dėl geros mineraloginės sudėties, joje yra minimali dalis kalcinių uolienų. Visos dalelės yra 32–65 mm dydžio, kas atitinka kitų mokslininkų atliktų eksperimentų rekomendacijas (Beaven 2009; Gunjan *et al.* 2010; Kjeldsen *et al.* 2002).

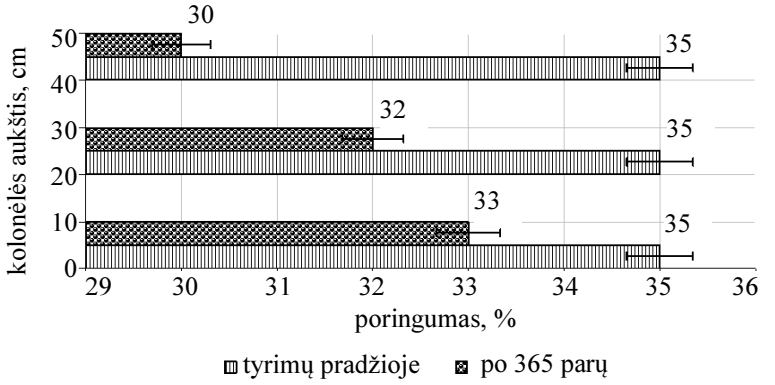


3.2 pav. Drenažo skaldos užpildo poringumo kaita skirtinguose kolonėlės aukščiuose
Fig. 3.2. The change of porosity filling of drainage rubble of different height of column

Kolmatacijos tyrimo metu išmatuotas granito skaldos poringumas (3.2 pav.) po 365 parų sumažėjo 4 % viršutinėje kolonėlės dalyje ir visai nepakito apatinėje kolonėlės dalyje. Toks poringumo pokytis patvirtina kitų mokslininkų gautus rezultatus. Jungtinėje Karalystėje bei Vokietijoje atlikti kolonėlės tyrimai naudojant stiklo granules (6–12 mm diametro) parodė, kad greičiausiai laidumas sumažėja ties įtekėjimu (Brachman and Sabir 2010; Beaven 2009).

Sijotas žvyras, pasirinkta vietinė žaliava, kurios naudojimas sąvartynų drenažo sluoksniui sumažintų ekonominius kaštus. Sijotas žvyras naudojamas todėl, kad dalelių dydis turi atitikti tyrimais nustatytus dydžius t. y. 32–65 mm dydžio (3.1 (b) pav.). Viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl žvyras nenaudojamas sąvartynų drenažo sluoksniui formuoti – didelė kalcinių uolienų dalis (20–50 %). Kalcinės uolienos pagreitina kolmatacijos procesus.

Sąvartynų eksploatavimo pradžioje susidarantis filtratas yra daugiau rūgštinis, todėl naudojant žvyrą, dalis uolienų tirptų bei būtų išplautos į gilesnius drenažo sluoksnius. Esant rūgštinei terpei, kalcinių uolienų tirpimo proceso metu padaugėtų kalcio kiekis filtrate, kurio didžioji dalis nusėstų tiek gilesniuose sluoksniuose, tiek ir filtrato surinkimo vamzdžiuose, o tai sumažintų laidumą. 3.1 lentelėje pateikiamos fizinės sijoto žvyro savybės.



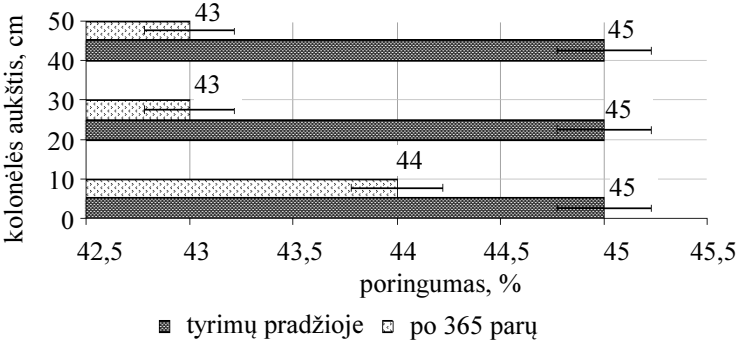
3.3 pav. Žvyro užpildo poringumo kaita skirtinguose kolonėlės aukščiuose
Fig. 3.3. The change of porosity filling of gravel of different height of column

Nustatant žvyro poringumą prieš kolonėlės tyrimą buvo išmatuotas tik bendras užpildo poringumas. 3.3 paveiksle matyti, kaip skirtinguose kolonėlės aukščiuose pasikeitė poringumas. Viršutinėje kolonėlės dalyje, pro kur buvo leidžiamas filtratas, poringumas sumažėjo daugiausiai nuo 35 % iki 30 %. Kiek mažiau poringumas sumažėjo kolonėlės viduryje, t. y. trimis procentais. Kaip ir buvo tikėtasi mažiausiai pasikeitė toliausiai nuo filtrato įtekėjimo esantis užpildas.

Eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo pasirinkta ne tik natūraliai gamtoje iškasamos medžiagos, bet ir medžiagų mišiniai (3.1 (c, d, e) pav.). Mišiniams buvo renkamasi pasaulyje eksperimentuose naudotos medžiagos: smulkintų padangų atliekos bei asfalto atliekos. Mišinių procentinės dalys pasirinktos pagal tūrį, kadangi svarbus yra sluoksnio laidumas, kuris yra apibrėžtas įstatymais (Hudson *et al.* 2001). Asfalto atliekos perdirbamos ir naudojamos keliams tiesti, tačiau galima būtų naudoti ir drenažui formuoti.

Smulkintų padangų atliekos drenažui formuoti naudojamos mažiau dėl savo lankstumo. Guma nesuformuoja stabilaus kieto pagrindo ir didina virš jos esančio sluoksnio amortizaciją. Komunalinių atliekų sąvartyne tai nėra problema, svarbiausia, kad būtų pakankamas laidumas ir neužkimštų porų.

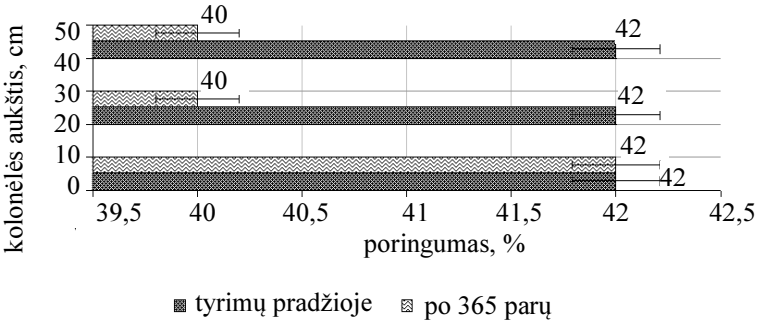
Atliekant drenažo užpildo kolmatacijos tyrimus svarbu stebėti ne tik atskirų elementų ar procesų eigą, bet ir išanalizuoti jų tarpusavio priklausomybę: kiek vienas parametras turi įtakos kitam parametrui, (Mann 2007). Žvyro užpildo poringumo pokytis tiesiogiai priklauso nuo išsidėstymo kolonėlėje (3.3 pav.), kuo arčiau filtrato įtekėjimo vietos, tuo intensyviau vyksta poringumo mažėjimas bei kolmatacijos vystymasis.



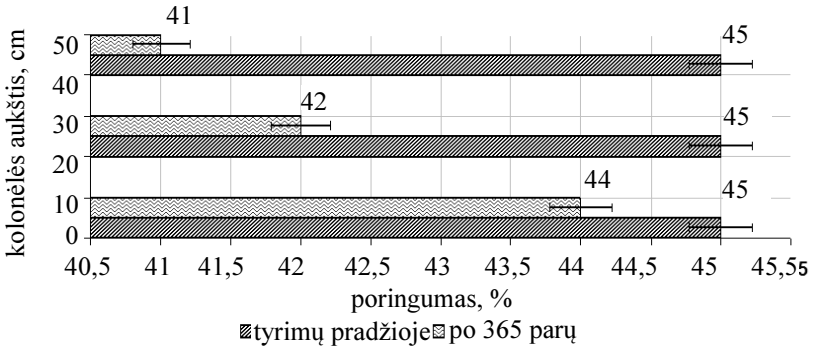
3.4 pav. Drenažo skaldos ir smulkintų padangų užpildo poringumo kaita skirtinguose kolonėlės aukščiuose

Fig. 3.4. The change of porosity filling of drainage rubble and tired shreds mixture of different height of column

Tiek skaldos, tiek ir žvyro užpildų poringumas mažėjo laipsniškai ir tolygiai visuose kolonėlių aukščiuose. 3.2 ir 3.3 paveiksluose matyti, kad poringumas sumažėjo po 2 % kiekviename kolonėlės aukštyje, tačiau įmaišius smulkintų padangų, poringumas mažėjo tiek viršutiniame tiek ir viduriniame kolonėlės sluoksnyje bendrai 2 %. Kolonėlės apačioje poringumas pakito mažiausiai – 1 % smulkintų padangų ir drenažo skaldos mišinio (3.4 pav.) ir visai nepakito smulkintų padangų ir žvyro mišinio (3.5 pav.). Palyginus gautus rezultatus su drenažo skaldos ir žvyro užpildų poringumo sumažėjimo tendencijomis, galima teigti, kad smulkintos padangos pagerina užpildo savybes, kurios sulėtina porų sumažėjimą ir kolmatacijos vystymąsi.

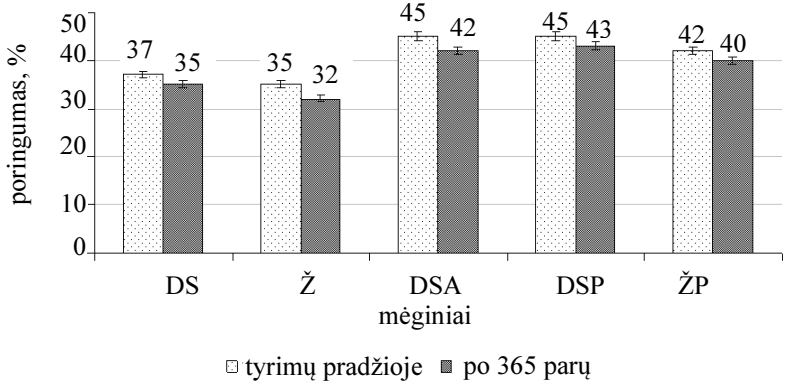


3.5 pav. Žvyro ir smulkintų padangų užpildo poringumo kaitos priklausomybė nuo išsidėstymo aukščio kolonėlėje
Fig. 3.5. The change of porosity filling of gravel and tired shreds mixture of different height of column



3.6 pav. Drenažo skaldos ir asfalto atliekų užpildo poringumo kaitos priklausomybė nuo išsidėstymo aukščio kolonėlėje
Fig. 3.6. The change of porosity filling of drainage rubble and asphalt waste mixture of different height of column

Nagrinėjant mišinių su smulkintomis padangomis poringumo kaitą, 3.4–3.6 paveiksluose, matyti, kad poringumo kaita nuo padėties kolonėlėje mažiau priklauso nei tik žvyro užpildo. Viršutinėse kolonėlių užpildų dalyse (DSP ir ŽP) poringumas sumažėjo vienodai nuo 45 % ik 43 % drenažo skaldos ir smulkintų padangų užpilde ir nuo 42 % ik 40 % žvyro ir smulkintų padangų užpilde. Tiek viename, tiek ir kitame užpilduose poringumas sumažėjo dviem procentiniais punktais. Tokie rezultatai rodo, kad smulkintos padangos sumažina akumuliacijos greitį užpilde, o tai sulėtina ir tolygiau paskirsto kolmataciją. Tuo tarpu apatinėje kolonėlės dalyje, užpildytoje DSP mišiniu, poringumas sumažėjo tik vienu procentu, o ŽP užpilde poringumas visai nepakito.



3.7 pav. Skirtingų medžiagų poringumas prieš ir po tyrimo (DS – drenažo skalda; Ž – sijotas žvyras; DSA – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys; DSP – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; ŽP – žvyro ir smulkintų padangų mišinys)

Fig. 3.7. The porosity of different materials before and after experiment (DS – rubble used in landfill; Ž – gravel mined at Lithuanian quarries; DSA – mixture of drainage rubble and asphalt waste; DSP – mixture of drainage rubble and tired shreds; ŽP – mixture of gravel and tired shreds mixture)

Kadangi talpos užpildytos skirtingos sudėties medžiagomis, prieš supilant į kolonėles išmatuotas ir apskaičiuotas bendras medžiagos poringumas (3.7 pav.). Poringumas išmatuotas ir pasibaigus tyrimui po 365 parų kolonėlių eksperimento. Po eksperimento matuotas poringumas skirtinguose kolonėlės aukščiuose, o vėliau apskaičiuotas bendras užpildo poringumas. Lyginant poringumą prieš tyrimą, galima pastebėti, kad daugiausia oro tarpų turi DSP mišinys. Nors ir buvo pasirinktas žvyras, kurio frakcija atitiko skaldos frakcijai, tačiau jo poringumas 2 % mažesnis nei skaldos. Lyginant tik poringumą, galima būtų teigti, kad smulkintų padangų įmaišymas į žvyrą pagerina medžiagos pralaidumą, nes poringumas padidėjo nuo 35 % iki 42 %. Taip pat poringumas padidėjo ir DS medžiagos, kai buvo įmaišyta asfalto atliekų nuo 37 % iki 45 %. Atliekant tyrimus kompleksiškai, svarbu įvertinti ir filtrato cheminių elementų koncentracijų pokyčius, nes drenažo sluoksnis yra nuolat veikiamas filtrato. Dėl pastarojo poveikio sumažėja medžiagos laidumas.

Atlikus poringumo skaičiavimus, išryškėja (3.7 pav.) drenažo skaldos ir gumos mišinio didžiausias poringumo procentas – 45 %, kas leidžia spręsti apie potencialią šio mišinio panaudojimo galimybę. Iš literatūros šaltinių žinoma (Baveye *et al.* 1998, Powrie *et al.* 1997, Rowe *et al.* 2000, Rowe and Van Gluck

2001), kad esant didesnėms poroms tarp uolienų išlieka mažesnė tikimybė sluoksnio laidumo sumažėjimui, todėl galima teigti, kad suformuoti skaldos ir smulkintų padangų, skaldos ir asfalto atliekų bei žvyro ir smulkintų padangų mišiniai geriausiai atitinka poringumui keliamus reikalavimus.

Visuose tyrime naudotuose mišiniuose reikšmingi poringumo pasikeitimai pastebimi per trumpą laiką – 365 paras. Komunalinių atliekų sąvartynui toks laikotarpis tesudaro 1/50 dalį ar dar mažiau laiko. Laboratoriniais tyrimais nustačius, kad drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimas per vienerius metus gali turėti neigiamos įtakos, tai galima daryti prielaidą, kad per ilgesnį eksploatacijos laiką tikrai formuojasi kolmatacijos procesai. Poringumo pokytis (sumažėjimas) skirtinguose užpilduose apskaičiuotas nuo 2 % DSP mišinio (45 % prieš tyrimą iki 43 % po 365 parų) iki 7 % sijoto žvyro mėginio (35 %, prieš tyrimą iki 32 % po 365 parų), tačiau pokytis pirmame mišinyje sudaro tik 5 %, o antrame net 9 % mažiau pradinės vertės. Esant didesnei tiriamos medžiagos poringumo vertei, leistinas didesnis vertės sumažėjimas, todėl 2 % punktais vertės sumažėjimas prie 45 procentų yra mažiau pavojingas nei esant 35 %. Per vienerius metus poringumas sumažėjo 6 %. Toks pokytis nėra didelis, nes tiriant drenažo sluoksnį, kurio dalelių dydis siekia 19 mm (Fleming and Rowe 2004), poringumas per 6 mėnesius sumažėjo 10 %. Toks pokytis parodo, kad smulkios frakcijos (19 mm) užpildas užteršiamas tris kartus greičiau, nei stambesnės (32 mm). Sąvartynuose naudojama parinkta skalda atitinka keliamus drenažo užpildo reikalavimus.

Atliktų tyrimų (Rowe *et al*. 2000; Rowe *et al*. 2002) rezultatai parodo ir tai, kad laidumo sumažėjimo procentas yra tuo mažesnis, kuo didesnis poringumas, tačiau per dideli drenažą sudarantys akmenys nesuformuos tinkamo paviršiaus, pro kurį lengvai patektų atliekos, todėl tinkamiausias variantas 32–65 mm akmenų dydis. Pats sluoksnio poringumas priklauso ne tik nuo dalelių dydžio, bet ir nuo dalelių geometrinės formos (kuo taisyklingesnė forma (Cooke and Rowe 1999; West *et al.* 2004), tuo mažiau taškų susiliečia, tuo mažiau pasipriešinimo srovės tekėjimui, bei galimybių kolmatacijos procesams). Tačiau natūraliai gamtoje tokia medžiaga gali būti tik upių ar jūrų dugnuose esantys nugludinti akmenys. Tačiau ši medžiaga nėra tinkama naudoti dėl kalcio junginių kiekio juose. Taip pat dėl trinties tarp vandens ir smėlio tokie akmenys tampa ne rutulio formos, o plokšti, o tai sumažina laidumą.

Komunalinių atliekų sąvartynų drenažo sluoksnio laidumo sumažėjimas – pasaulyje jau daugelį metų tiriama problema. Atlikta įvairių tyrimų (Brune *et al.* 1991; Fleming *et al.* 1999; Hudson *et al.* 2001; Rowe *et al.* 2000; Paksy 2002) su įvairios granuliometrinės sudėties sluoksniais. Tyrimų, atliktų Kanadoje, naudojant 19–36 mm drenažo dalelių dydį, rezultatai parodo poringumo kaitą per tam tikrą laiką perfiltruojant skirtingą filtrato kiekį. Iš atlikto tyrimo matyti, kad didesnis kiekis filtrato per trumpesnį laiką turi mažiau įtakos, kadangi jis

greičiau prateka per sluoksnį. Esant didesniam greičiui, susidaro didesnė srovė, kuri lengviau perneša tiek tirpias, tiek ir netirpias medžiagas. Kadangi sąvartynuose susidarančio filtrato kiekiai yra nedideli lyginant su plotu, tai ir srovė dėl didelio atliekų pasipriešinimo susidaro nedidelė, greitis dažnai siekia 0,02 m/s (McIsaac and Rowe 2007). Toks pavyzdys parodo, kad greičio didinimas atliekant eksperimentą nėra tikslingas, nes natūralioje aplinkoje greičiai yra labai maži ir sukuria palankesnę terpę kolmatacijos procesų vystymuisi.

Kolmatacija – viena iš pagrindinių problemų, atsirandančių daug vėliau, nei pradedamas eksploatuoti sąvartynas. Tai labai ilgas procesas, besitęsiantis keliolika metų, ir tik ateityje sukelia problemas: paplovimus, dėl kurių įvyksta atliekų kaupo nuošliaužos. Viena iš galimybių mažinti kilusiais problemas – spręsti naudojamo drenažo sluoksnio kolmatacijos procesų stabdymą. Naudojant sijotą žvyrą, kaip drenažo medžiagą, bei įmaišius smulkintų padangų galima pagerinti sluoksnio poringumą, taip pat padidinti pralaidumą. Sukurti mišiniai iš gamtinės ir antropogeninės kilmės medžiagų turi geresnes charakteristikas: poringumas didesnis nei 40 %. Nors mišiniai yra sukurti iš atliekų, tačiau tinkamai panaudotos medžiagos leidžia efektyviai jas pritaikyti antriniam naudojimui. Atlikus poringumo nustatymą galima daryti prielaidą, kad DSP ir ŽP mišiniai yra tinkamiausi naudoti drenažo sluoksniui formuoti. Tai parodo 3.2 lentelė, kur pateiktas santykinis poringumo sumažėjimas.

3.2 lentelė. Užpildų santykinis poringumo sumažėjimas per 365 paras
Table. 3.2. Decrease of the porosity of different fillers after the 365 days

Užpildas	Santykinis sumažėjimas, %
Drenažo skalda (32–65 mm)	6
Sijotas (35–65 mm frakcijos) žvyras	9
Skalda 70 % su asfalto liekanomis 30 % (tūrio)	7
Skalda 70 % su smulkintomis padangomis 30 % (tūrio)	5
Žvyras 70 % su smulkintomis padangomis 30 % (tūrio)	7

Mažiausia pasikeitė poringumas kolonėlėje, užpildytoje DSP ir ŽP mišiniu. Toks naudotų padangų panaudojimas sumažintų atliekų kiekius.

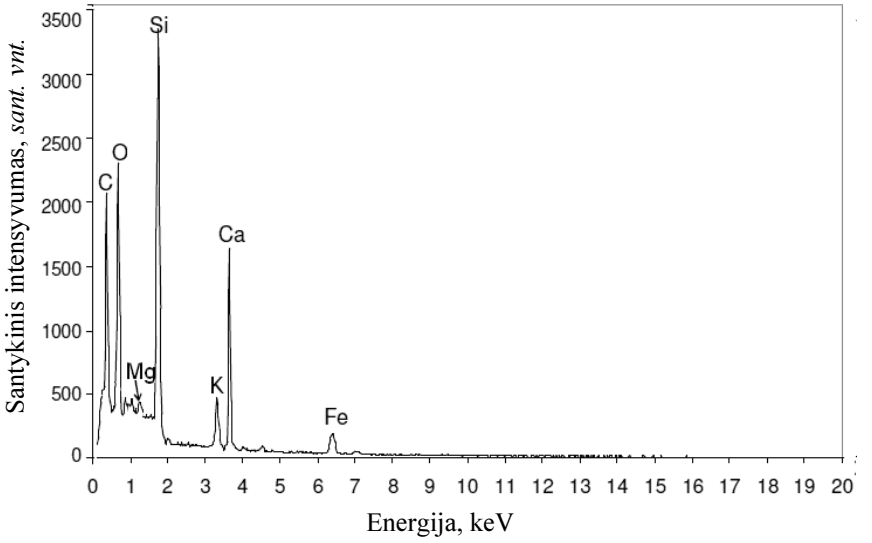
3.3 lentelė. Užpildų poringumo koeficientas (a, b, c – skirtinguose kolonėlės aukščiuose atitinkamai viršutinio, vidurinio bei apatinio)
Table. 3.3. Coefficient of porosity of different fillers (a, b, c – different high of column at top, middle and bottom)

Užpildas	Poringumo koeficientas eksperimento pradžioje	Poringumo koeficientas po 365 tyrimo parų
Drenažo skalda (32–65 mm)	0,58	a) 0,492 b) 0,538 c) 0,587
Sijotas (35–65 mm frakcijos) žvyras	0,538	a) 0,428 b) 0,471 c) 0,492
Skalda 70 % su asfalto liekanomis 30 % (tūrio)	0,818	a) 0,695 b) 0,724 c) 0,785
Skalda 70 % su smulkintomis padangomis 30 % (tūrio)	0,818	a) 0,754 b) 0,754 c) 0,785
Žvyras 70 % su smulkintomis padangomis 30 % (tūrio)	0,724	a) 0,667 b) 0,667 c) 0,724

Kolmatacijos procesus apibūdina ir poringumo koeficientas, kuris tiesiogiai priklauso nuo poringumo, tačiau jis detaliau nurodo užpildo poringumo pokyčius. Visų užpildų poringumo koeficientai pateikiami 3.3 lentelėje, kurioje matyti, kad esant mažesniam poringumui ir poringumo koeficientas yra mažesnis. Poringumo koeficientas parodo laisvų porų ir kietos medžiagos santykį. Didžiausias poringumo koeficientas 0,818 DSA ir DSP mišinių eksperimento pradžioje. Tai parodo, kad pastarieji mišiniai turi didžiausią kiekį laisvų porų, kuriomis laisvai migruoja skystis (sąvartynų drenažo sluoksnyje filtratas). Mažiausias poringumo koeficientas 0,538 sijoto žvyro užpildo, kuris daugiausia sumažėjo ir po kolonėlės tyrimo – iki 0,428. Poringumo koeficientas tiesiogiai priklauso nuo užpildo poringumo, tačiau apskaičiuojant koeficientą pagal 2.4 formulę, koeficiento reikšmės kaita didesnė nei poringumo skaitinės vertės kaita.

Atlikus kolonėlės tyrimus, buvo nustatyta nusėdusios ant granulių paviršiaus medžiagos elementinė sudėtis. Nustatant nuosėdų sudėtį svarbu, kokie

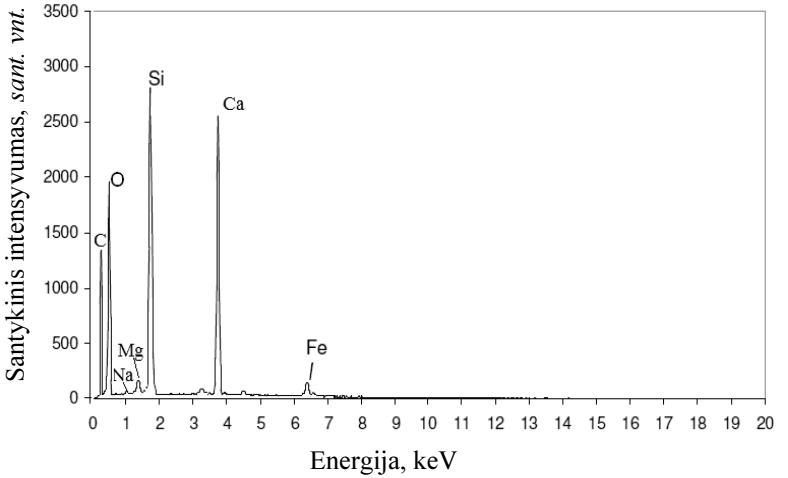
pagrindiniai elementai bei jų junginiai kaupiasi. Tyrimo metu prietaisas nustato atskirus elementus, tačiau visi elementai yra junginiuose. Atlikus Rentgeno spinduliu dispersinę analizę, gauti EDX (Rentgeno spindulių dispersija) spektrai, kurie leidžia nustatyti pagrindinius mėginių sudėties elementus. Bangos ilgio (arba energijos, kuri išsiskiria, kai elektronai su keletu kilovoltu energijos smūgiuoja kietą bandinį) matavimai leidžia nustatyti, kokie pagrindiniai elementai įeina į mėginio sudėtį, t. y. buvo atlikta kokybinė analizė (Lee and Yeh 2008).



3.8 pav. Rentgeno spindulių dispersijos spektras ant žvyro granulių susidariusiose nuosėdose

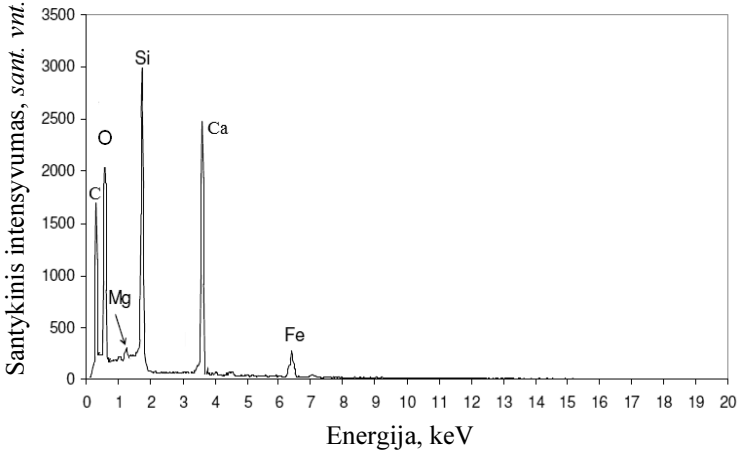
Fig. 3.8. The X-ray spectrum of the dispersion of the sediments on gravel granular

Kaip matyti iš 3.8–3.10 paveikslų, dominuojantys elementai, nustatyti visuose nuosėdų pavyzdžiuose, yra silicis ir kalcis, taip pat rasti mažesni natrio, magnio, kalio ir geležies kiekiai. Išsiskirianti deguonies ir anglies smailės yra stebimos visų pavyzdžių spektruose. Pastarieji elementai įeina į įvairių junginių sudėtį, todėl jų procentinė dalis yra pakankamai reikšminga: deguonis sudaro vidutiniškai 20 % ir anglis 29 % nuo visos nusėdusios medžiagos kiekio. Deguonis yra pagrindinis elementas oksidų junginiuose. Dideli anglies kiekiai daugiausiai patenka iš organikos, kuri atliekose sudaro vidutiniškai apie 30 %.



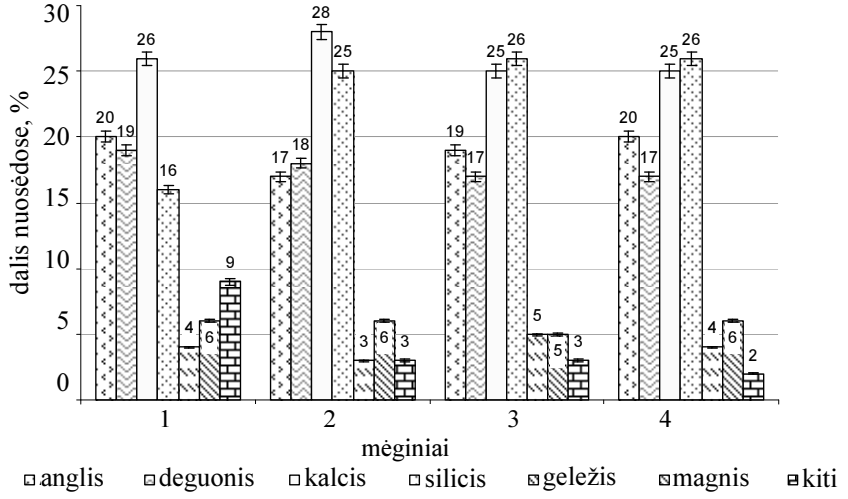
3.9 pav. Rentgeno spindulių dispersijos spektras nuosėdų susidariusių ant drenažo skaldos

Fig. 3.9. The X-ray spectrum of the dispersion of the sediments on drainage rubble granular



3.10 pav. Rentgeno spindulių dispersijos spektras nuosėdų, susidariusių ant smulkintų padangų paviršiaus

Fig. 3.10. The X-ray spectrum of the dispersion of the sediments on the tired shreds surface



3.11 pav. Nusėdusios ant užpildų paviršiaus medžiagos sudėtis: 1 – ant drenažo skaldo; 2 – ant smulkintų padangų; 3 – ant žvyro, 4 – dolomitinės skaldos (McIsaak and Rowe 2007)

Fig. 3.11. Composition of accumulation material on surface of fillings: 1 – on rubble; 2 – on tired shreds; 3 – on gravel, 4 – on limestone rubble (McIsaak and Rowe 2007)

Gauti rezultatai patvirtina ir kitų mokslininkų pateikiamas išvadas, kad pagrindiniai kolmataciją sąvartynų drenažo sluoksnyje sąlygojantys elementai sudaryti iš Si, Ca ir Fe junginių (silicio ir geležies oksidai, bei kalcio karbonatai).

Atliktas tyrimas nustatant nuosėdų sudėtines dalis parodo, kad svarbu nagrinėti silicio, kuris yra pagrindinė skendinčių medžiagų sudedamoji dalis, kalcio, geležies junginių koncentracijų kaitą filtrate. Kaip pateikiama 3.11 paveiksle, matyti, kad didžiausią dalį nuosėdinėje medžiagoje sudaro silicio junginiai, kurių dalis didesnė nei 24 %. Tiek šio tyrimo metu, tiek ir mokslininko R. McIssak gauti rezultatai parodo, kad kalcio junginių dalis bendrame nuosėdų kiekyje sudaro nuo 26 % ant smulkintų padangų ir 25 % ant žvyro granulių. Daug mažesnė dalis yra nustatyta geležies ir magnio, kuri svyruoja nuo 3 iki 6 %. Palyginus visus rezultatus galima teigti, kad kolmatacijos procesams komunalinių atliekų sąvartynuose įtakos turi filtrato sudėtis ir ypač kalcio, geležies junginių bei skendinčių medžiagų koncentracijos.

Tokie rezultatai parodo, kad pasirinkta užpildų granuliometrinė sudėtis yra tinkama sąvartynų drenažo sluoksniui formuoti. Tokios sudėties sluoksnyje

kolmatacijos procesai vystytųsi lėčiau, tačiau šiems tyrimams labai svarbus ir prognostinis modeliavimas, kuris pateiktas 3.3 poskyryje.

Viena iš ilgam aplinką užteršiančių atliekų yra netinkamos naudoti padangos. Guma yra pagrindinė šių atliekų sudedamoji dalis, kurios savybės, net ir pasibaigus padangų eksploatavimo laikui, nedaug pakinta. Guma yra plastiška medžiaga, o jos panaudojimas sąvartynų drenažo sluoksniui formuoti sumažintų pavojų pažeisti geomembraną, apsauginį, nepralaidų skysčiams barjerą. Dėl šios priežasties yra tikslinga panaudoti padangas kaip antrinę žaliavą. Atsižvelgiant į jau naudotas drenažo užpildui tirti metodikas, buvo atliekami skirtingų sluoksnių smulkintų padangų ir DS panaudojimo kolonėlių užpildų tyrimai. Plačiai išanalizavus kitų mokslininkų atliktus darbus (Hudson *et al.* 2001; McIsaac and Rowe 2005; Warith *et al.* 2004), pastebėta, kad mokslininkai nagrinėjo tik pačias padangas, tačiau nenagrinėjo galimybės tik daliai drenažo sluoksnio panaudoti smulkintas padangas. Kanados mokslininkai (McIsaac and Rowe 2008; Rowe *et al.* 2000,) pateikia drenažo užpildo su skirtingais mišiniais pavyzdžių. Jų gauti rezultatai parodė, kad tinkamiausias santykis būtų 1 dalis antrinės medžiagos ir 3 dalys skaldos. Remiantis šiais tyrimais buvo atlikta kolonėlės užpildų tyrimas su skirtingais mišiniais naudojant siūlomą santykį.

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami pasirinkus skirtingus smulkintų padangų sluoksnio storius (2.2 pav.). Tokį sluoksnių išdėstymą ir aukštį lėmė keletas veiksnių:

- tiriant skirtingus sluoksnių storius galima nustatyti tinkamą variantą,
- smulkintų padangų sluoksnis įterpiamas tarp dviejų skaldos sluoksnių, nes tvirtesnis pamatas stabiliau palaiko viršuje esančią masę, o iš viršaus apsaugo nuo papildomo atliekų patekimo,
- naudojama smulkintų padangų frakcija (70–100 mm) yra daug stambesnė nei DS.

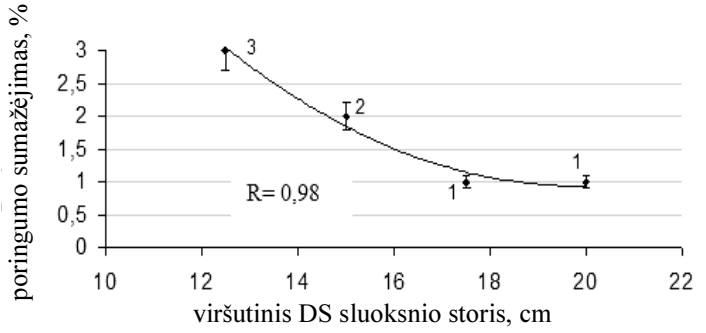
Smulkintų padangų frakcija pasirinkta neatsitiktinai, nes tiek smulkesnės, tiek ir stambesnės frakcijos dalys daugiau susispaudžia ir taip sumažėja poringumas (Hudson *et al.* 2001).

Eksperimentas buvo atliekamas šešis mėnesius, poringumas buvo nustatytas atskirai kiekvieno sluoksnio pradžioje kolonėlių tyrimo ir po jo. Taip pat kiekvieno mėnesio gale buvo nustatinėjama SM, kalcio ir geležies koncentracija filtrate.

Laboratorinis tyrimas atliktas su 10, 15, 20 ir 25 cm storio smulkintų padangų sluoksniu, kuris įterptas tarp drenažo skaldos užpildo. Tai atitinka 20, 30, 40 ir 50 % viso drenažo sluoksnio storio. Pasirinkti keli skirtingi variantai, kurie leido įvertinti ir išskirti geriausią pasirinkimą. Nors daugelis mokslininkų teigia, kad reikia naudoti gumos ne daugiau kaip 30 %, tačiau gauti rezultatai

rodo, kad ir 40 % smulkintų padangų sluoksnis yra tinkamas ir efektyvus naudojimui.

Nagrinėjant gautus rezultatus labai svarbu išskirti kolonėlės viršutinėje dalyje esančios medžiagos poringumo pokytį. Įprastai filtruojant skystį per pasirinktą medžiagą visada įvairių medžiagų nusėdimas vyksta sluoksnio viršutinėje dalyje. Dėl šios priežasties, ypač ir dėl trumpo tyrimų laiko, svarbu buvo išnagrinėti užpildo pokyčius viršutinę kolonėlės dalį.

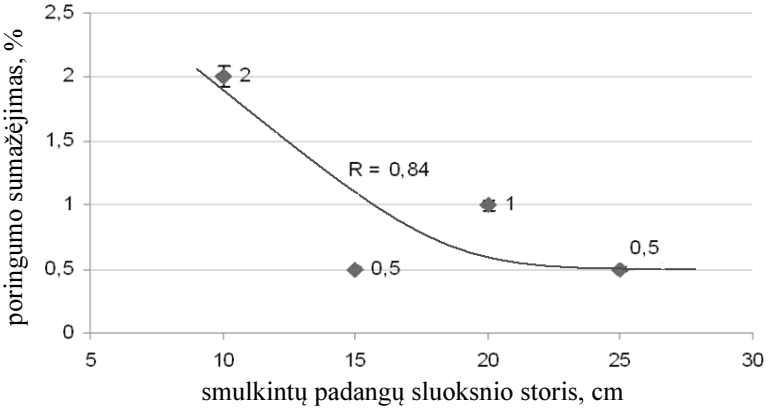


3.12 pav. Viršutinio kolonėlės sluoksnio poringumas po 180 parų skirtingose mėginiuose (DS – drenažo skalda)
Fig. 3.12. Porosity of the top layer after 180 days in different samples (DS – drainable rubble)

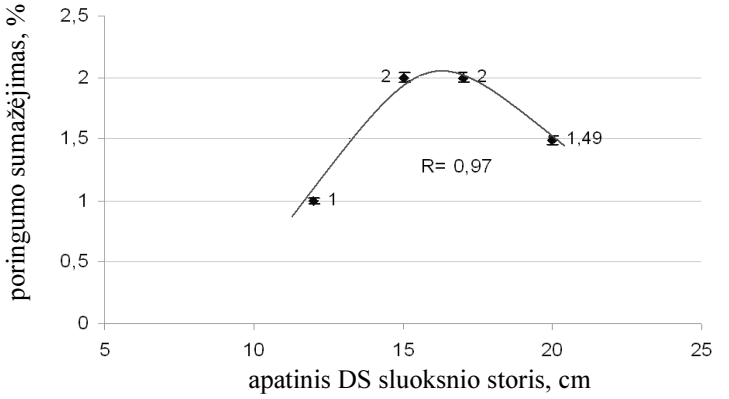
Išmatavus poringumą viršutiniame sluoksnyje pastebėta, kad daugiausiai jis pasikeitė 3 % kolonėlėje su didžiausiu smulkintų padangų sluoksniu, kuris buvo 50 % (3.12 pav.). Tuose mėginiuose, kur smulkintos padangos sudarė 20 % – 30 %, poringumas pasikeitė 1 %. Nors pokytis yra nežymus, tačiau labai aiškiai matyti tendencija, kad nuo sluoksnio aukščio priklauso ir poringumas. Didėjant viršutinio sluoksnio storiui, mažiau keičiasi poringumas per visą sluoksnio storį. Naudojant 30 % ir mažiau smulkintų padangų mažiausiai pakinta viršutinio DS sluoksnio poringumas – 1 % per pusę metų. Sluoksnio aukščio ir poringumo sumažėjimas yra ryškus – pradžioje akumuliacija daugiau vyksta viršutinėje kolonėlės dalyje. Kadangi sluoksniai skirtingų aukščių, tai ištyrus visą sluoksnį, aiškiai matyti, kad kuo plonesnis sluoksnis, tuo greičiau per vienodą laiko tarpą jame sumažėja porų laidumas.

Pasiekus filtratui smulkintas padangas, kolmatacijos procesai sulėtėja, kadangi jų poringumas daug didesnis nei DS. Po šešių mėnesių tyrimo, poringumo pokyčio ir sluoksnio storio polinominė priklausomybė siekia 0,7 (3.13 pav.). Sluoksnio oro tarpų kiekis sumažėjo 2 % tik kolonėlėje su didžiausiu gumos sluoksniu, kadangi pratekėjęs filtratas pro DS pastarojoje

greičiausiai pasiekė smulkintų padangų sluoksnį. Tai parodo koreliacijos koeficiento reikšmė, kuri lygi 0,98. Nustačius skirtingas reikšmes tos pačios medžiagos, kurios skyrėsi tik tūrinė išraiška, išryškėja kolmatacijos proceso eiga ir vystymasis per tam tikrą laiką tam tikroje erdvėje. Tekant filtratui žemyn per tiriamą medžiagą, kuria užpildytos kolonėlės, įvairių dalelių akumuliacija vyksta iš viršaus žemyn kryptimi.



3.13 pav. Smulkintų padangų sluoksnio poringumo pokyčio po 180 parų priklausomybė nuo sluoksnio storio
Fig. 3.13. Dependency of thickness of the tired shreds and porosity in 180 days



3.14 pav. Apatinis kolonėlės sluoksnio poringumas po 180 parų skirtingose mėginiuose (DS – drenažo skalda)
Fig. 3.14. Porosity of the bottom layer after 180 days in different samples (DS – drainable rubble)

Išanalizavus kolonėlių apatinius sluoksnius nustatyta, kad jų storis neturėjo įtakos poringumo pokyčiui (3.14 pav.). Apatinio DS sluoksnio užpildo poringumas sumažėjo mažiausiai iki 1 % esant mažiausiam ir didžiausiam DS sluoksniams. Nors polinominės funkcijos koreliacijos koeficientas yra 0,97, tačiau tai parodo, kad esant mažiausiam apatinio DS sluoksnio storiui mažiausiai sumažėja poringumas. Daugiausiai sumažėja poringumas prie 17,5 ir 20 cm DS sluoksnio storio iki 2 % per 180 parų. Taip pat mažiausia pakito ir 20 cm DS sluoksnio storio poringumas, kadangi akumuliacija ant užpildo medžiagos turėjo didesnį sklaidos plotą. Tokia situacija susiklostė, nes akumuliacijos procesai per tiriamąjį laikotarpį nepasiekė apatinio kolonėlių sluoksnio. Čia pastebėtas labai nežymus pokytis dviejose kolonėlėse, kur smulkintos padangos sudarė 30–40 %, jis siekia 1 %. Toks nežymus pasikeitimas rodo, kad reikalingi daug ilgesni ir išsamesni tyrimai, nes kolmatacija yra ilgalaikis procesas.

Skirtingi visų tirtų sluoksnių paskaičiuoti korealiacijos koeficientai patvirtina Kanados mokslininko R. McIsaak vykdytus kolmatacijos tyrimus (McIsaac and Rowe 2007). Pastarasis tyrinėjo, kaip sluoksnio laidumo sumažėjimas vyksta skirtinguose aukščiuose ir nustatė, kad porų sumažėjimas vyksta iš kolonėlės viršaus į apačią filtrato tekėjimo kryptimi. Tokia pati tendencija buvo nustatyta ir atlikto tyrimo metu, bei atlikus duomenų analizę, paskaičiavus visų sluoksnių koreliacijos koeficientus.

3.2. Filtrato sudėties kaitos tyrimai ir jų analizė

Komunalinių atliekų sąvartynuose susidarantis filtratas formuojasi veikiamas iškrentančių kritulių, atliekų drėgmės ir atliekų sluoksnio. Esant didesniam kritulių kiekiui filtratas būna mažiau koncentruotas nei esant mažesniam kiekiui, tačiau susidaro didesni filtrato kiekiai bei didesnis filtrato debitas. Dėl įvairių elementų didelių koncentracijų filtratas tampa pavojingas tiek gamtinei, tiek ir žmogaus aplinkai.

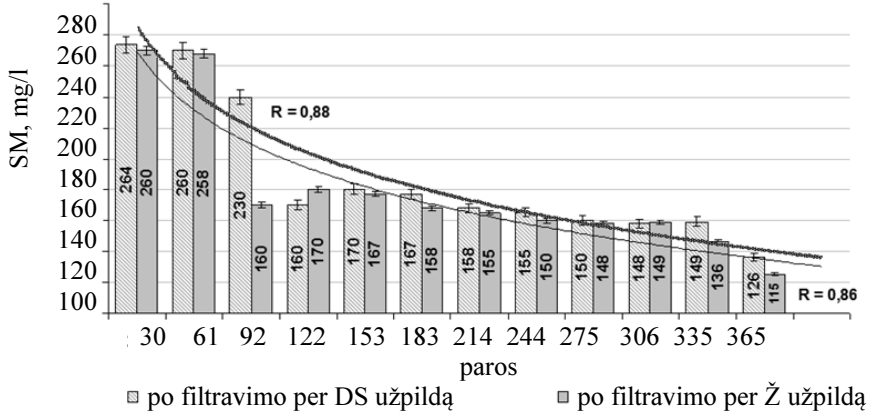
Krituliai sunkdamiesi per atliekų masę išplauna daug pavojingų elementų (sunkieji metalai, įvairios organinės medžiagos), kurių natūralioje gamtoje aptinkamos mažos koncentracijos, todėl filtratas neigiamai veikia aplinką.

Kolmatacijos procesus drenažo sluoksnyje sukelia gamtinei aplinkai nepavojingi kalcio ir geležies junginiai (Banar *et al.* 2006; Brune *et al*. 1991; Osaki *et al*. 2006; Peeling *et al*. 1999; Rowe *et al.* 2000; Thomas and Barlaz 1999; Zhang *et al.* 2008), tačiau pastarųjų elementų kiekiai svarbus tiriant drenažo sluoksnio laidumo pokyčius. 3.4 lentelėje pateikti tiriamų elementų kiekiai prieš eksperimentą ir po eksperimento. Šių elementų pokytis leidžia spręsti apie jų akumuliaciją filtruojamame užpilde. Skirtingos sudėties užpildai nevienodai turi įtakos ir filtrato sudėčiai.

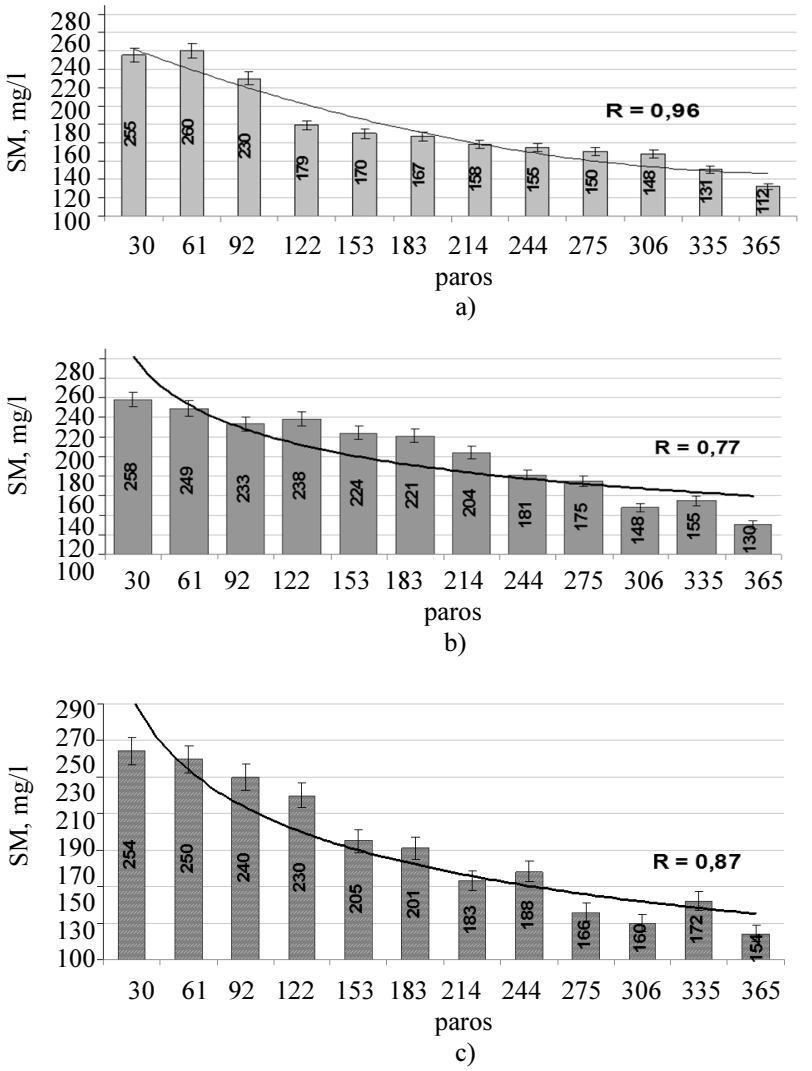
3.4 lentelė. Tiriamų elementų kiekis pradiniame filtrate
Table 3.4. Quantity of test elements in the primary leachate

Užpildas	Eksperimento pradžioje		
	Skendinčios medžiagos, mg/l	Kalcis, mg/l	Geležis, mg/l
Drenažo skalda (DS)	264	454	6,27
Sijotas žvyras (Ž)	264	454	6,27
Drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys (DSA)	264	454	6,27
Drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys (DSP)	264	454	6,27
Žvyro ir smulkintų padangų mišinys (ŽP)	264	454	6,27

Vienas iš pagrindinių drenažo sluoksnio teršėjų yra skendinčios medžiagos. Jų sudėtis yra labai įvairi, nuo silicio junginių, kurie patenka iš perdengiamos atliekas medžiagos, taip pat koloidinėje būsenoje iš biologiškai skaidžių atliekų, iki bakterijų, kurios dažniausiai susilaiko drenažo sluoksnyje. Silicis – tai vienas plačiausiai aptinkamų elementų ir jo junginių Žemėje. Jis randamas dviejų atmainų: kristalinis ir amorfinis.



3.15 pav. Skendinčių medžiagų koncentracijos (SM) kaita filtrate po filtravimo per drenažo skaldos (DS) ir žvyro (Ž) užpildus
Fig. 3.15. Change of volume of suspended solids (SM) in the leachate after filtering through drainage rubble (DS) and gravel (Ž) fillings



3.16 pav. Skendinčių medžiagų (SM) koncentracijos kaita filtrate po filtravimo per sukurtus užpildus (a) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys; b) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys; c) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys)
Fig. 3.16. Change of volume of suspended solids (SM) in the leachate after filtering through created fillings (a) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; b) – mixture of gravel and tired shreds mixture; c) – mixture of drainage rubble and tired shreds)

Kristalinis SiO_2 dažniausiai aptinkamas kvarco pavidalu. Smulkūs kvarco grūdeliai – paprastas smėlis. Nors silicis kaip elementas nėra pavojingas, tačiau kolmatacijos procesams sąvartynų drenažiniame sluoksnyje jis daro neigiamą įtaką. Silicio junginiai, ypač SiO_2 grūdelių pavidalu esantys atliekų sluoksnyje, filtruojantis skysčiui išplaunami iš atliekų į drenažinį sluoksnį, kuriame akumuliuojasi. Tai, kad silicio junginių yra daug SM sudėtyje, rodo atlikti tyrimai. Susicementavusioje medžiagoje yra net 33 % silicio junginių (Brune *et al.* 1991; Fleming and Rowe 2004; Paksy *et al.* 1998).

Atliekant tyrimą leidžiant filtratą per skirtingus kolonėlių užpildus buvo stebima skendinčių dalelių kaita filtrate. 3.15 paveiksle pateikta SM koncentracijos kaita perfiltruojant filtratą per sąvartyne naudojamos skaldos ir žvyro sluoksnį. Iš pateiktų stebėjimų matyti, kad staigus kiekio sumažėjimas stebimas po trijų mėnesių, o kiek vėliau, ketvirtą bei kitus mėnesius SM kiekio kritimas sumažėja. Per 90 paras SM kiekis sumažėjo nuo 254 mg/l iki 220 mg/l drenažo skaldos kolonėlėje ir 138 mg/l žvyru užpildytoje kolonėlėje. Sijotas žvyras viena iš vietinių žaliavų, natūrali, gamtinės kilmės eksperimente naudojama medžiaga. Pasibaigus sąvartyno eksploatacijos laikui, atliekų kaupas dar daug metų funkcionuoja, jame vyksta biodegradacijos procesai, dujų išsiskyrimas ir, suprantama, susidaro filtratas. Žvyras, kaip natūraliai susiformavusi medžiaga, aplinkai tikrai nebūtų pavojinga, tačiau dėl savo mineralogines sudėties nėra labai tinkama drenažiniam sluoksniui. Tyrimo metu tokia tendencija tik pasitvirtina. SM kiekio mažėjimas yra pakankamai ryškus tiek pradžioje, tiek ir tęsiantis tyrimui. Nors po 180 parų skendinčių medžiagų koncentracija mažėjo nežymiai, po 10 mg/l per mėnesį, tačiau paskutinį tyrimo mėnesį nukrito 30 mg/l. Nors iš rezultatų matyti, kad tiek žvyras, tiek ir skaldos užpildai SM kiekiui turėjo panašų poveikį, tačiau staigūs pasikeitimai ryškesni žvyro užpilde.

Eksperimento metu stebimas kiekvienoje kolonėlėje supiltos medžiagos poveikis SM kiekybinių verčių pokyčiui. 3.16 pav. pateiktame grafike matyti skirtumas tarp sukurtų mišinių. Didžiausias SM kiekio sumažėjimas buvo kolonėlėje, užpildytoje drenažo skaldos ir asfalto mišiniu, iki 108 mg/l po 365 parų. Svarbu pastebėti, kad atliekant eksperimentą, buvo stebima tik elementų akumuliacija sukurtomis laboratorinėmis sąlygomis. Natūralioje aplinkoje, komunalinių atliekų sąvartynuose, filtravimosi sąlygos yra kitokios, jos daug labiau skatina akumuliacijos procesus, todėl ir kolmatacija vyksta daug sparčiau.

Gumos panaudojimas sąvartynų drenažiniam sluoksniui formuoti yra rekomenduojama medžiaga (Hudson *et al.* 2007), ką rodo ir atlikti tyrimai. 3.16 paveiksle aiškiai matyti, kad SM kiekis, ypač eksperimento pradžioje, labai nežymiai kito, tik po keturių mėnesių pradėjo mažėti. Tai leidžia daryti prielaidas, kad esant tokiam nedideliam pasikeitimui, 20 mg/l gumos

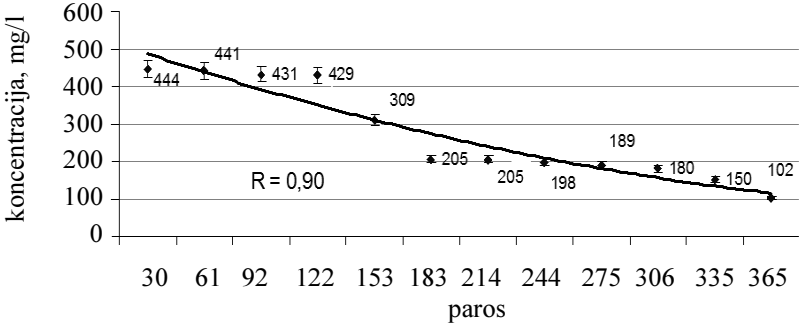
panaudojimas yra tikslingas. Palyginus 3.15 ir 3.16 paveiksluose pateiktus grafikus, aiškiai matyti, kad smulkintos padangos nepadidino SM nusėdimo, o SM kiekis išliko didesnis po filtracijos per minėtus mišinius. Pasirenkant asfaltą drenažo sluoksniui buvo pasinaudota įvairių medžiagų pasirinkimo galimybėmis formuojant drenažo sluoksnį. Viena iš alternatyvų – asfalto atliekos. Asfalto atliekos sumažino SM kiekį iki 14 mg/l daugiau nei skaldoje be priemaišų.

Kitas analizuojamas elementas yra kalcis. Jo nemaži kiekiai randami gamtinėje aplinkoje, jis yra vienas iš penkių labiausiai paplitusių elementų Planetoje. Gamtoje randamas tik mineralų pavidalu. Kalcis yra būtinas organizmų gyvybinėms funkcijoms. Jo yra visuose augalų ir gyvūnų audiniuose ir skysčiuose. Augalai ima kalcį iš dirvožemio, gyvūnai ir žmogus gauna su maistu ir vandeniu. Kalcis nėra pavojingas elementas, jis net naudingas, tačiau kaip ir SM turi neigiamą poveikį kolmatacijos procesams.

Susikristalizavusios drenažo dalelės turi įtakos pralaidumo sumažėjimui drenažinio sluoksnyje. Ištyrinėjus tokios medžiagos sudėtį, paaiškėja, kad viena iš pagrindinių ją sudarančių medžiagų – kalcio junginiai (Fleming and Rowe 2004; Rowe and Van Gluck 2001), kurie sudaro iki 50 % visos masės. Tai vienas iš svarbiausių elementų, lemiančių kolmatacijos procesus, nes jis ne tik nusėda ant paviršiaus, bet kartu yra ir viena pagrindinių bakterijoms funkcionuoti reikalingų medžiagų. Bakterijos kaip gyvi organizmai turi gyvavimo pradžią ir pabaigą, todėl negyvos bakterijos taip pat nusėda ant paviršių, jos nėra pašalinamos iš drenažo sluoksnio. Tokiu būdu susidaro dar palankesnės sąlygos kalciui akumuliuotis, nes mažėja porų ertmės, o daugėja kliūčių skysčio judėjimui. Dėl šios priežasties kiekvieno užpildo kalcio koncentracijos kaita išnagrinėta atskirai, nes svarbu paanalizuoti, ar skirtinga užpildų sudėtis turi įtakos kolmatacijai. Vykdant eksperimentą kalcio kiekio sumažėjimas stebimas visose drenažo užpilduose. Tyrimo metu Ca koncentracija kito netolygiai. Pirmus keturis mėnesius mažėjo labai iš lėto – po 10 mg/l per mėnesį, tačiau vėliau pastebėtas staigus kritimas. Nors visi užpildai sudaryti iš skirtingų medžiagų, tačiau tendencijos visur išliko vienodos. Po pusės metų tyrimo kalcio koncentracija nukrito 200 mg/l. Tokius pokyčius nėra sudėtinga paaiškinti, nes didelę dalį kalcio sunaudoja bakterijos, o kaip tik po pusės metų, jos jau visiškai prisitaikė prie sąlygų ir pradėjo intensyviau daugintis daugiau sunaudodamos kalcio junginių (McIsaac and Rowe 2005; Moon and Hong 2000; Paksy 2002; Parkin and Owen 1996).

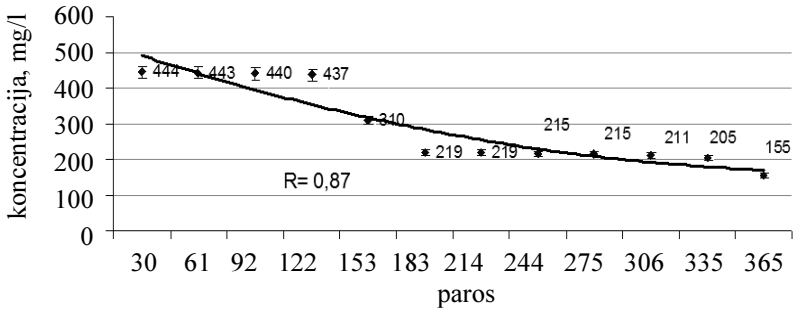
Filtrato mėginyje, kuris buvo filtruojamas per DS užpildą, kalcio kiekis pasikeitė nuo 454 mg/l iki 130 mg/l. Didžiausias sumažėjimas (3.17 pav.) pastebimas po183 parų iki 207 mg/l, t. y. sumažėjo 189 mg/l per 45 paras. Tokį staigų kalcio kiekio kritimą galima paaiškinti bakterijų adaptacijos periodo pasibaigimu ir tolesniu jų kolonijų augimu. Kalcis ne tik paprastai akumuliuojasi ant paviršiaus, bet papildomai jį pritraukia ir bakterijos, esančios drenažo

sluoksnyje. Vėliau atliekant tyrimą kalcio kiekis nebekito staigiais šuoliais, o mažėjo tolygiai, tai rodo, kad jis ir toliau kaupėsi drenažo sistemoje, tik jau be didesnių pokyčių. Tyrimo pabaigoje kalcio koncentracija filtrate, filtruojant per DS užpildą, sumažėjo iki 130 mg/l, t. y. pasidarė tris kartus mažesnė nei tyrimo pradžioje. Tokie rezultatai parodo, kad net esant nepalankiai temperatūrai akumuliacijos procesai vystosi, dėl jų suformuoja kolmatacija.



3.17 pav. Filtrato Ca koncentracijos kaita, perfiltravus per kolonėlę su drenažo skaldos užpildu
Fig. 3.17. Change of calcium concentration of leachate after leaching through the column with drainage rubble filler

Mėginyje, kuris buvo filtruojamas per žvyro užpildą, kalcio koncentracijos kiekis kito panašiai kaip ir anksčiau aptartame drenažo skaldos užpilde. Nors kritimo taškai išsidėstę tokiu pačiu laiku: po 180 ir 306 parų, tačiau koncentracijos sumažėjimas yra didesnis nei filtrate, perfiltruotame per drenažo skaldos užpildą. Po pusės metų tyrimų kalcio kiekis filtrate sumažėjo 240 mg/l, o dar po 180 parų sumažėjo dar 100 mg/l (3.18 pav.). Per vienerius metus kalcio kiekis sumažėjo keturis kartus, t. y. nuo 454 mg/l iki 103 mg/l. Palyginus 3.17 ir 3.18 paveikslų kreives aiškiai matyti, kad kalcio kiekio mažėjimo tendencijos yra panašios, tik pats pokytis yra kitoks. Keturis mėnesius kalcio kiekis abiem atvejais nesumažėjo 50 mg/l. Tiek viename, tiek ir kitame mėginyje didžiausias mažėjimas buvo po pusės metų, t. y. po 180 eksperimento parų. Galima daryti prielaidą, kad žvyro užpilde nusėdimo procesai vyksta intensyviau, todėl ir kalcio koncentracija labiau sumažėjo nei drenažo skaldos mėginyje.

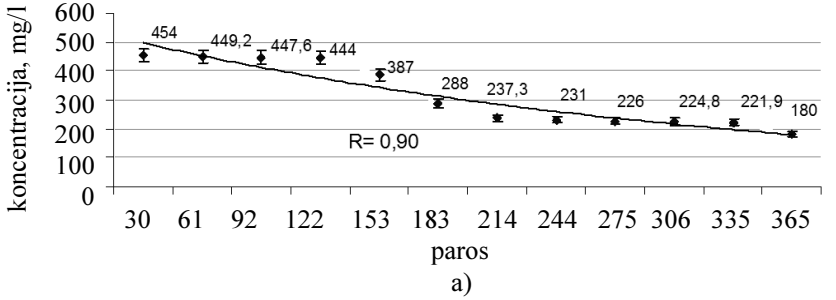


3.18 pav. Kalcio koncentracijos kaita filtrate po filtravimo per kolonėlę su sijoto žvyro užpildu
Fig. 3.18. Change of calcium concentration of leachate in the column with gravel filler

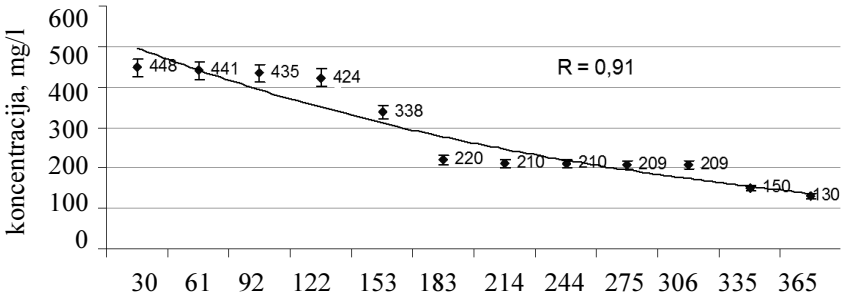
Pasirenkant skirtingus kolonėlių užpildus, per kuriuos buvo filtruojamas filtratas, buvo bandoma surasti medžiagas, tinkamas antriniam panaudojimui. Išanalizavus poringumo pokyčius, nustatyta, kad smulkintos padangos ir asfalto atliekos nesumažina užpildo pralaidumo, o tai svarbiausia drenažo sistemos sluoksnio funkcija. Kompleksiškai nagrinėjama ir filtrato koncentracijų kaita esant pastarosioms medžiagoms.

Tiek natūralios medžiagos, tiek ir sukurti mišiniai filtrato kalcio koncentracijos pokyčiui turėjo vienodą poveikį, tačiau įmaišytos smulkintos padangos mažiau skatina kolmatacijos procesus. Iki 10 mėnesių bendros kalcio kiekio mažėjimo tendencijos išlieka visiems sluoksniams vienodai. Po 122 parų filtrate kalcio kiekis sumažėjo 40 mg/l visuose mėginiuose, skirtumas – tik keli vienetai. Mišinių kolonėlėse po pusės metų taip pat stebimas staigus kritimas (3.19 pav.). Pagrindinis skirtumas tarp mažėjimo atsiranda tik po 10 mėnesių, kada kalcio koncentracija filtruojant filtratą per ŽP užpildą ir toliau kas mėnesį mažėjo po 30 mg/l (3.19 (b) pav.). Per metus sumažėjo nuo 454 mg/l iki 115 mg/l.

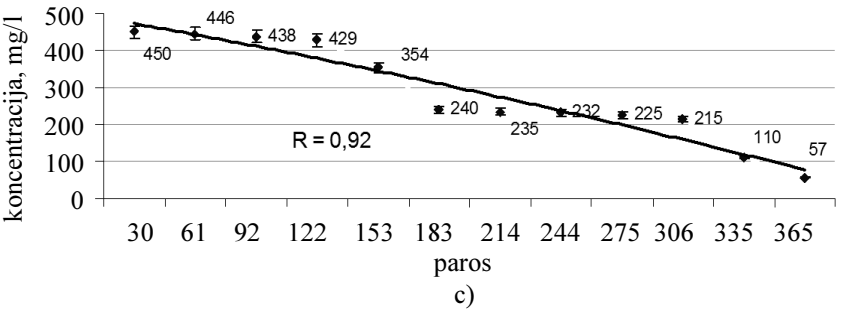
Drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinyje (3.19 (a) pav.) nustatyta kalcio koncentracijos sumažėjimas 174 mg/l, kuris yra mažiausias iš visų užpildų. Tyrimų pradžioje filtrato kalcio kiekis filtruojant per pastarąjį mišinį kito taip pat, kaip ir kituose mėginiuose, tačiau po 306 parų nusistovėjo nedidelis iki 20 mg/l kritimas kas mėnesį. Po atlikto tyrimo ir gautų rezultatų galima teigti, kad smulkintos padangos ne tik pagerino sluoksnio poringumą, bet ir mažiausiai turi įtakos kolmatacijos procesams vystytis.



a)



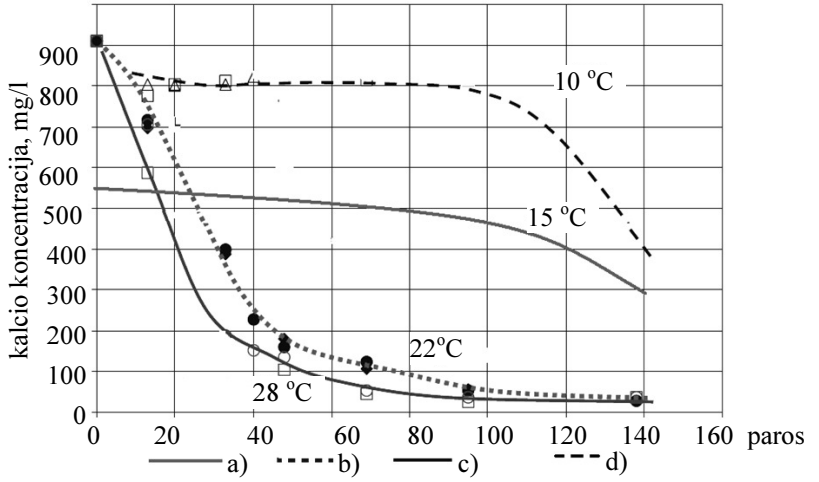
b)



c)

3.19 pav. Kalcio koncentracijos kaita filtrate kolonėlėje su: a) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys; b) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; c) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys

Fig. 3.19. Change of concentration calcium of leachate in the column with: a) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; b) – mixture of drainage rubble and tired shreds; c) – mixture of gravel and tired shreds mixture



3.20 pav. Komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sistemos kalcio kiekio kaitos laboratorinių tyrimų rezultatai: a) – tiriamuoju laikotarpiu; b), c), d) – Kanados mokslininkų (Fleming and Rowe 2004)

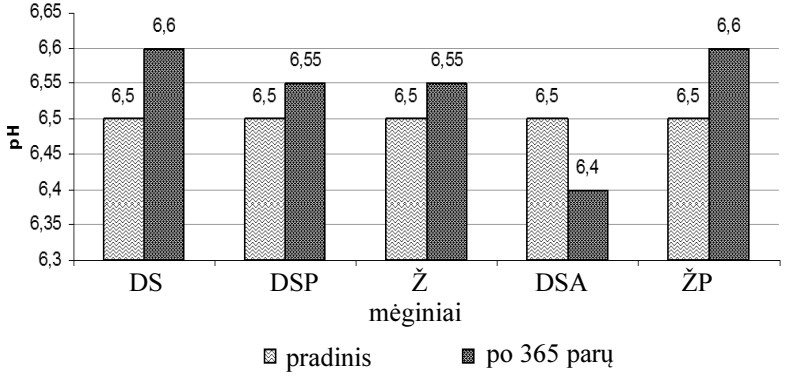
Fig. 3.20. Laboratory studies of clogging of landfill leachate collection and drainage systems: a) – during the investigation period; b), c), d) – scientists of Canada (Fleming and Rowe 2004)

Kiek kitoks kalcio kiekio mažėjimas stebimas drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišiniu užpildytoje kolonėlėje. Tyrimo pradžioje, kaip anksčiau minėta, mažėjimas visuose mėginiuose buvo vienodas, tačiau po 10 mėnesių pastarajame mėginyje stebimas labai staigus kalcio kiekio mažėjimas. Per du paskutiniuosius mėnesius nukrito 175 mg/l, todėl visas filtrato kiekis per tyrimo laikotarpį sumažėjo 6 kartus, kai tik 3,5 karto DS, Ž ir ŽP mėginiuose ir 2,5 karto DSP mėginyje. Tokie rezultatai rodo, kad dalis kalcio galėjo akumuliuotis drenažo sluoksnyje. Tokia prielaidą galima daryti, kadangi asfalto atliekos yra sudarytos iš mažos frakcijos uolienų, sumaišytų su naftos atliekomis. Esant trinčiai tarp uolienų asfalto atliekų dalis gali sutrupėti. Dėl tokios priežasties susidaro smulkios frakcijos dalelės, ant kurių dėl didelio paviršiaus ploto lengviau akumuliuojasi kitos medžiagos. Kalcio kiekio sumažėjimui galėjo turėti įtakos ir ant sukonstruotos kolonėlės sienelių nusėdęs kalcis. (Hudson *et al.* 2001).

Išmatavus kalcio kiekį filtrate ir išanalizavus gautus rezultatus labai svarbu juos palyginti su kitų mokslininkų atliktais rezultatais. 3.20 paveiksle pateikiama Kanados mokslininkų ir tiriamojo laikotarpio rezultatų palyginimas. Kaip matyti, visuose vienodos kalcio mažėjimo tendencijos, išskyrus tai, kad tiriamuoju laikotarpiu filtrato kalcio koncentracija buvo 1,6 karto mažesnė nei Kanados filtrato. Taip pat labai svarbu paminėti, kad Kanados mokslininkai

atliko tyrimus su 6–32 mm dydžio stiklo granulėmis. Tokios granuliometrinės sudėties medžiagos buvo tiriamos, kad būtų nustatyta, ar vyksta kolmatacija. Tiriamuoju laikotarpiu tyrinėjamos medžiagos, kurios naudojamos sąvartynuose.

Mažėjant kalcio koncentracijai filtrate buvo išmatuotas ir filtrato pH (3.21 pav.). Iš sąvartyno paimto filtrato pH = 6,5. Pasibaigus eksperimentui visuose mėginiuose filtrato pH pasikeitė labai nežymiai, tačiau drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys daugiausiai turėjo įtakos filtrato pH kaitai, nes jei visuose mėginiuose pH padidėjo, nors ir nežymiai, tai per DSA filtruoto filtrato pH sumažėjo iki 6,4. Tokie rezultatai parodo, kad kalcio kiekis daugiausiai sumažėjo filtrate, kuris buvo filtruojamas per DSA mišiniu užpildytą kolonėlę.

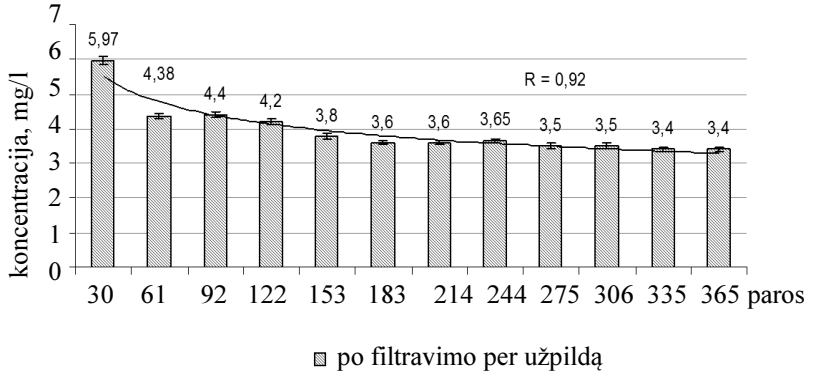


3.21 pav. Filtrato pH kaita filtruojant per skirtingus kolonėlių užpildus (DS – drenažo skalda; Ž – sijotas žvyras; DSA – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys; DSP – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; ŽP – žvyro ir smulkintų padangų mišinys)

Fig. 3.21. Change of leachate pH during leaching through different column fillers (DS – rubble used in landfill; Ž – gravel mined at Lithuanian quarries; DSA – mixture of drainage rubble and asphalt waste; DSP – mixture of drainage rubble and tired shreds; ŽP – mixture of gravel and tired shreds mixture)

Geležis – gausiausias metalas Žemėje. Geležis yra būtina medžiaga visiems gyviems organizmams, išskyrus kai kurias bakterijas. Dažniausiai geležis kaupiama metalo proteinuose, nes grynos formos turėtų įtakos laisvųjų radikalų, kurie yra nuodingi organizmui, kūrimuisi.

Kaip ir kalcio, geležies didžiausia dalis nustatyta kolmatacijos paveiktame drenažiniame sluoksnyje (Fleming *et al.* 1999). Geležis vienas iš vyraujančių elementų. Nustatyti geležies kiekiai nėra dideli, tačiau kolmatacijos procesuose gana aktyviai dalyvauja.

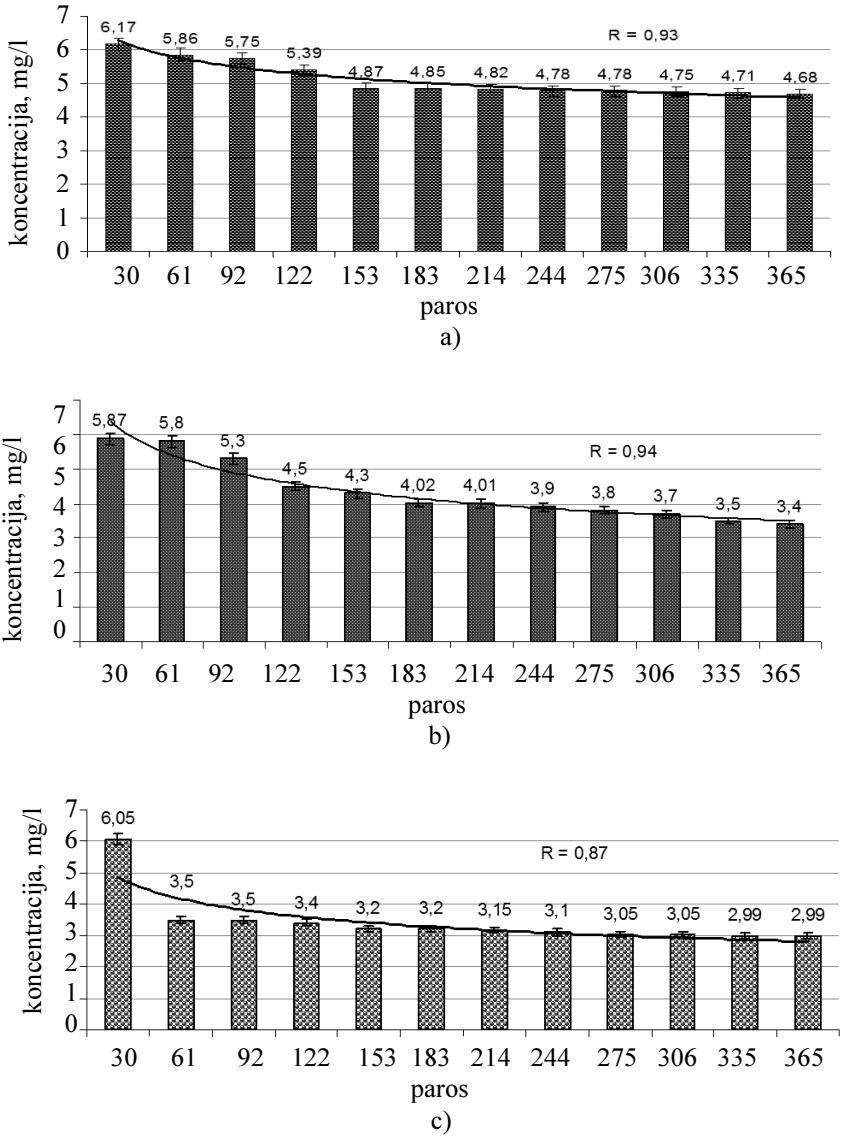


3.22 pav. Geležies koncentracijos kaita filtrate perfiltravus per drenažo skaldos kolonėlės užpildą
Fig. 3.22. The change of iron concentration in leachate after filtration through the drainage rubble column filler

Atliekant eksperimentą nustatyta, kad geležies kiekis filtrate (3.22 pav.) po 122 parų sumažėjo iki 1,88 mg/l. Tyrimo pradžioje buvo staigus sumažėjimas. Vėliau geležies koncentracija mažėjo lėčiau ir po metų buvo 3,84 mg/l.

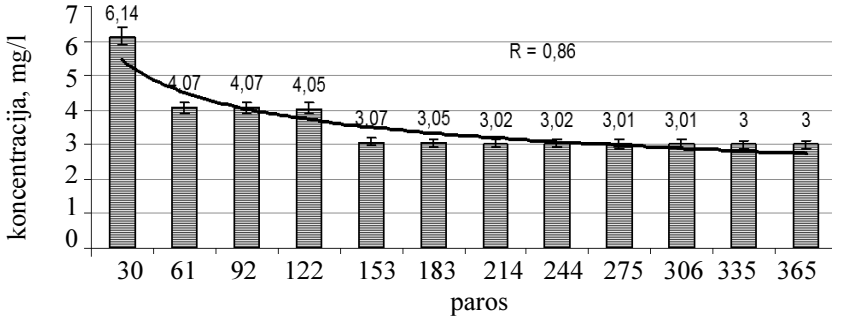
Naudojant tos pačios skaldos ir smulkintų padangų mišinį (3.23 (a) pav.), geležies koncentracija sumažėjo 1,4 mg/l. Geležies kaita filtrate vyksta palaipsniui tolydžiai per visą tyrimo laikotarpį. Iki 180 parų stebimi neryškūs svyravimai, didžiausias koncentracijos kritimas penktą mėnesį – iki 4,91 mg/l. Likusį eksperimento laiką geležies kiekis labai mažai pakito, o per visą tyrimo laiką sumažėjo 1,3 karto.

Nors paprastai kuriant mišinius, su kuriais atliekami tyrimai, tikimasi teigiamų rezultatų, tačiau ne visada pasiteisina pasirenkami komponentai. Asfalto atliekų panaudojimas sąvartyno drenažo sluoksniui stebint geležies kaitą (3.23 (c) pav.) nėra sėkmingas, nes jau eksperimento pradžioje pastebimas labai didelis geležies koncentracijos sumažėjimas nuo 6 mg/l iki 3,5 mg/l, manoma, kad įtakos tokiems pokyčiams turi ir asfalto sudėtis. Naudojamos asfalto atliekos, kuriose yra nemažos įvairių metalų junginių koncentracijos bei asfalto medžiaginė sudėtis, leidžia daryti išvada, kad dalis filtrate esantys metalų junginių vykstant cheminėms reakcijoms akumuliuojasi užpilde. Vykdant eksperimentą toliau nebuvo pastebėta žymesnių pasikeitimų. Geležies kiekis filtrate tolygiai mažėjo iki 2,9 mg/l, t. y. 2,2 karto.



3.23 pav. Skirtingų užpildų: a) drenažo skaldos ir smulkintų padangų, b) žvyro ir smulkintų padangų ir c) drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinių poveikis geležies kiekiui filtrate

Fig. 3.23. The effect of different fillers: a) mixture of drainage rubble and tired shreds, b) mixture of gravel and tired shreds mixture and c) mixture of drainage rubble and asphalt waste on the amount of iron in the leachate

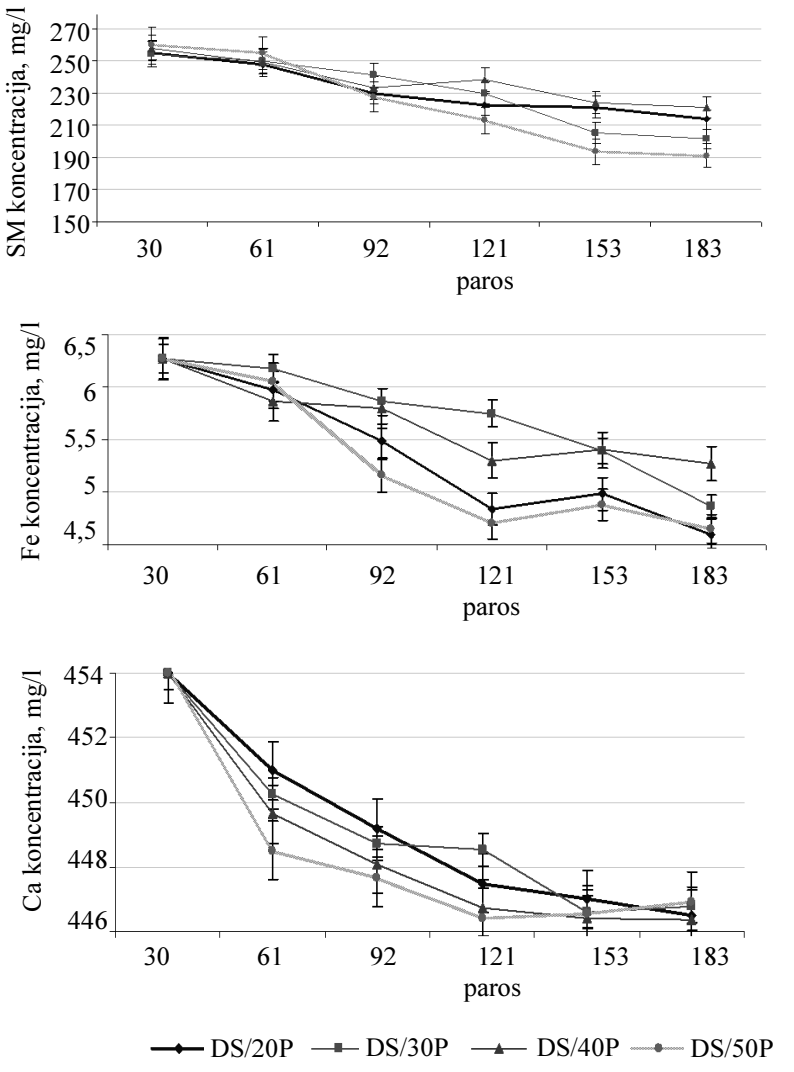


3.24 pav. Geležies koncentracijos kaita filtrate po filtravimo per žvyro ir smulkintų padangų mišinio užpildą
Fig. 3.24. The change of iron concentration in the leachate after filtering over mixture of gravel and tired shreds mixture filler

Analizuojant gautus rezultatus, pastebėta, kad smulkintų padangų įmaišymas į žvyrą, suteikė teigiamų savybių. Jei filtrato sudėtis daugiau kito po filtracijos per žvyro užpildą (3.24 pav.), tai mišinyje ŽP geležies koncentracija keitėsi panašiai kaip ir DSP užpildytoje kolonėlėje (3.23 (b) pav.). Filtrato geležies koncentracija po filtravimosi per ŽP užpildą per 365 paras sumažėjo 1,7 karto ir tyrimo pabaigoje sudarė 3,65 mg/l.

Mėginyje, kuris buvo filtruojamas per Ž užpildą, geležies sumažėjimas yra vienas didžiausių – iki 3,01 mg/l. Toks sumažėjimas pastebėtas ir DSA užpildo, tačiau stebint visą laikotarpį, Ž užpildas filtrato sudėčiai turėjo didesnę įtaką. Po dviejų eksperimentų mėnesių stebimas staigus geležies kiekio kritimas – nuo 6,02 mg/l iki 4,05 mg/l. Kitas staigus geležies kiekio pasikeitimas įvyko po penkių tyrimo mėnesių – nuo 4,03 mg/l iki 3,03 mg/l. Visą kitą eksperimento laiką geležies koncentracija išsilaikė vienoda ir po 365 parų siekė 3,01 mg/l, kas sudaro 2,1 karto mažesnę nei tyrimo pradžioje.

Kolmantacijos procesai yra ilgai trunkantys reiškiniai, tačiau ir po vienerių metų tyrimų ryškėja tendencijos. Tiek užsienio mokslininkų tiek ir tiriamuoju laikotarpiu gauti rezultatai parodė, kad tendencijos vienodos. Atliekant tyrimą pagrindinių kolmataciją sąlygojančių filtrato cheminių elementų junginių koncentracijos mažėjo. Nors pasirenkant įvairių medžiagų mišinius visada tikimasi geresnių rezultatų, tačiau turimi duomenys leidžia teigti, kad ne visi pasirinkti mišiniai yra teisingos sudėties.



3.25 pav. Filtrato SM (skendinčių medžiagų), Ca (kalcio) ir Fe (geležies) koncentracijų kaita per 180 parų (DS/20P – 80 % drenažo skalda ir 20 % smulkintos padangos; DS/30P – 70 % drenažo skalda ir 30 % smulkintos padangos; DS/40P – 60 % drenažo skalda ir 40 % smulkintos padangos; DS/50P – 50 % drenažo skalda ir 50 % smulkintos padangos)

Fig. 3.25. Changes of concentration of SM (suspended solids), Ca (calcium) and Fe (iron) in leachate during 180 days (DS/20P – 80 % of drainage rubble and 20 % of tired shreds; DS/30P – 70 % of drainage rubble and 30 % of tired shreds; DS/40P – 60 % of drainage rubble and 40 % of tired shreds; DS/50P – 50 % of drainage rubble and 50 % of tired shreds)

Kompleksiškai buvo atliekamas skendinčių medžiagų, kalcio bei geležies kiekio kaitos nustatymas, leidžiant filtratą per kolonėlių užpildus, kolonėlės tyrimo metu su smulkintų padangų sluoksniu. Atliekant tyrimą su skirtingais smulkintų padangų sluoksnių storiais pastebėta, kad visų kolmataciją veikiančių elementų kiekiai filtrate sumažėjo, tačiau labai nežymiai (3.25 pav.). Daugiausiai pasikeitė SM kiekis, bet tai ir tikėtina, nes SM koncentracijos yra daugiau nei, pavyzdžiui, geležies. Per tiriamąjį laikotarpį taip pat sumažėjo ir kalcio kiekis nuo 454 mg/l iki 447 mg/l tai sudaro 2 %. Palyginus atliktus eksperimentus su mišiniais, matyti, kad smulkintų padangų sluoksnis nepablogino rezultatų. Pastarasis tyrimas parodo, kad nėra staigaus SM kiekio kritimo ir mažėja tolygiai. Mažiausiai SM kiekis pasikeitė DS/40P iki 228 mg/l. Gauti rezultatai parodo, kad tinkamiausias smulkintų padangų sluoksnis, kai smulkintos padangos užima 40 % viso tūrio.

Geležies junginių koncentracijos vidutiniškai pasikeitė tik 8 %. Mažiausia koncentracija pasikeitė DS/40P kolonėlėje, t. y. 20 %. Daugiausia geležies koncentracija pasikeitė kolonėlėje, užpildytoje 20 % smukintomis padangomis.

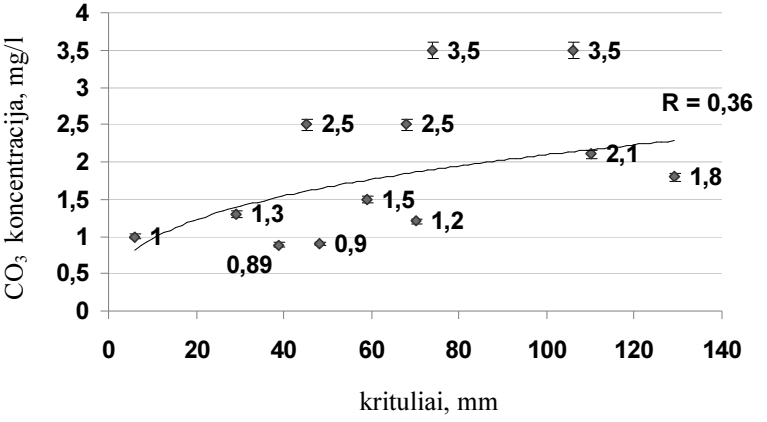
Mažiausiai pakito kalcio koncentracija, vidutiniškai sumažėjo apie 2 %. Kalcis aktyviai dalyvauja mikrobiologiniuose procesuose, kai vystosi bakterijos, tačiau 180 parų yra per trumpas laikotarpis, nes bakterijos tik prisitaiko ir pradeda vystymosi periodą. Tai patvirtina ir anksčiau atlikti rezultatai su įvairios sudėties mišiniais.

Labai panašiai kito ir geležies kiekis visose kolonėlėse. Per pirmus tris mėnesius geležies kiekis vidutiniškai sumažėjo 17 %, o likusius mėnesius procesai sulėtėjo.

Detali informacija apie sezoninius drėgmės bei temperatūros svyravimus, veikiančius sąvartynų filtrato savybes, yra esminė ir svarbi projektuojant filtrato valymo įrenginius. Kolmatacijos procesams svarbi ne tik drenažo sluoksnio medžiagos sudėtis, bet ir filtrato sudėtis bei jos kitimas. Tyrimų rezultatai parodė, kad labai svarbi ir filtrato sudėtis bei jo kaita, nes esant didesnėms kalcio geležies koncentracijoms didėja pralaidumo sumažėjimas. Vieni pagrindinių kalcio junginių, kurie daugiausiai nusėda ant drenažo sluoksnį sudarančios medžiagos dalių paviršių, yra karbonatai (Van Gluck *et al.* 2003). Kadangi filtrato sudėčiai turi įtakos keletas faktorių (atliekų sudėtis, atliekų drėgmė, granuliometrinė sudėtis ir kt.), greičiausiai kintančių (kritulių ir atmosferos temperatūros) įtaka analizuojama remiantis statistine analize, skaičiuojant Spirmano koreliacijos koeficientą. Ypatingai svarbus kritulių kiekis, kadangi tai pagrindinis filtrato susidarymo faktorius. Esant didesniam kritulių kiekiui susidaro didesnis filtrato kiekis, tačiau kartu jis filtruojasi didesne srove, o tai sumažina akumuliacijos galimybes. Esant didesnei srovei kolmatacijos procesai ir turėtų sulėtėti, tačiau susidarantis didesnis filtrato kiekis taip pat nėra teigiamas reiškinys. Nors daugelyje sąvartynų diegiamos filtrato recirkuliacinės

sistemos, tačiau, koks jų poveikis kolmatacijai, sąvartyno dugno apsauginiams sluoksniams, nėra ištirta (Celiad *et al.* 2000; Ettler 2008; Petraitis 2009; Sinan *et al.* 2006; Vasarevičius *et al.* 2005).

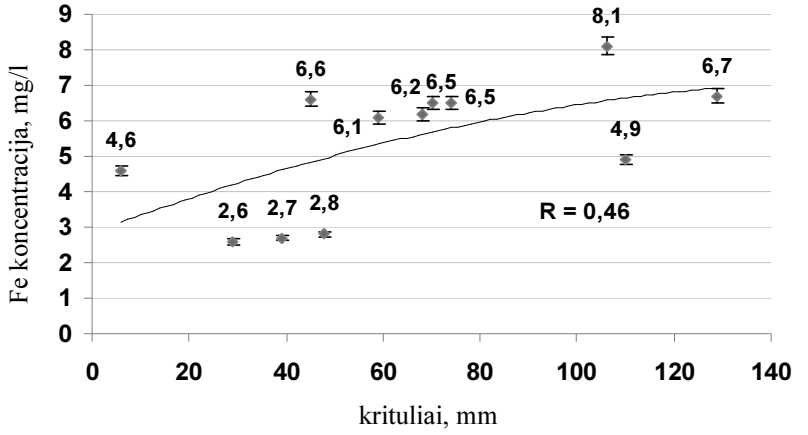
Filtrato kalcio, geležies ir karbonatų koncentracijų kaitos priklausomybės nuo kritulių analizei buvo naudojama komunalinių atliekų sąvartyno aplinkos monitoringo bei meteorologinių stebėjimų, atliktų šalia sąvartyno esančioje meteorologinėje stotelėje, duomenys. Atliekant skaičiavimus iš filtrato monitoringo duomenų parinkti kolmatacijos procesus lemiantys parametrai (karbonatai, kalcio ir geležies junginiai), bei kritulių suma per mėnesį. Filtrato mėginiai imami kiekvieną mėnesį, todėl galima stebėti savybių kaitą ir priklausomybę nuo klimato. Dažnai pagrindiniai filtrato kaip teršalo parametrai įvardijami kaip turintys didelę sunkiųjų metalų koncentraciją, tačiau pastarieji nedaro įtakos kolmatacijos procesams, nes jų yra maži kiekiai (palyginus su kalcio koncentracijomis). Esant didesniam kritulių kiekiui sunkiųjų metalų koncentracijos, kaip ir buvo tikėtasi, mažėja, nes filtratas prasiskiedžia. Kadangi kolmatacijos procesų eigoje sunkieji metalai neturi didelės įtakos, tai šie elementai detaliau neanalizuoti.



3.26 pav. CO_3 (karbonatų) ir kritulių kiekio kaitos priklausomybė
Fig. 3.26. Dependency in change of rainfall and CO_3 (carbon)

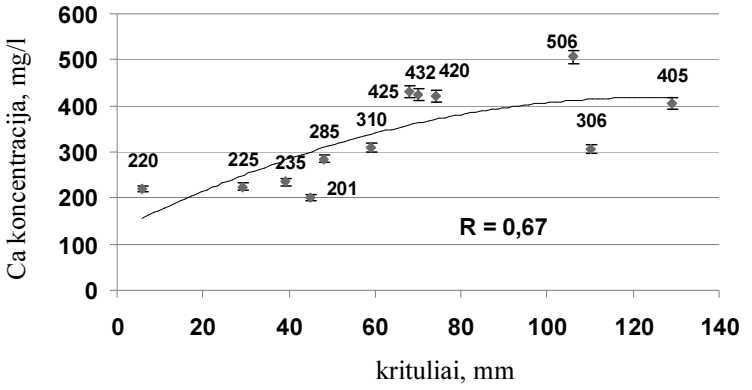
Atlikus koreliacijos koeficiento skaičiavimus galima pastebėti, kiek meteorologinių stebėjimų parametrų kaita turi įtakos komunalinių atliekų sąvartyno filtrato savybėms. Kaip vienas iš aktyviausių junginių, veikiančių kolmatacija, yra karbonatai. Jie jungdamiesi su kalciu ar natriu sudaro kristalines nuosėdas, kurios kaupiasi drenažo sluoksnyje. 3.26 paveiksle parodyta, kaip karbonatų kiekis priklauso nuo kritulių, kurių koeficientas yra lygus 0,36. Panašus koreliacinis ryšys (koeficientas lygus 0,46) pastebėtas ir su geležies

koncentracijomis (3.27 pav.). Tai rodo, kad tarp kritulių kiekio ir karbonatų bei geležies kiekio kaitos yra vidutinio stiprumo ryšys. Esant didesniam kritulių kiekiui mažėja karbonatų koncentracija filtrate, tačiau dėl intensyvesnio išplovimo iš atliekų, didesnė dalis karbonatų junginių turi galimybės susilaikyti drenažo sluoksnyje. Nors geležies koncentracijos nėra didelės analizuojamame filtrate, tačiau jos, kaip ir sunkiųjų metalų kiekiai, intensyviai praskiedžiami didesnio vandens kiekio.



3.27 pav. Fe (geležies) ir kritulių kiekio kaitos priklausomybė
Fig. 3.27. Dependency in change of rainfall and Fe (iron)

Vienas iš pačių svarbiausių analizuojamų elementų – kalcis. Jo koncentracijų pasikeitimai ypatingai reikšmingi. Išanalizavus duomenis matyti, (3.28 pav.), kad kalcio kiekio filtrate ir kritulių priklausomybė yra didesnė nei vidutinė ir koreliacijos koeficientas yra lygus 0,67. El – Fadel *et al.* (2002) teigia, kad kalcio kiekio filtrate kaitai daugiau įtakos turi atliekų sudėtis bei medžiagos atliekoms uždengti panaudojimas. Esant didesnei nei vidutinei korealiacinei priklausomybei išryškėja, kad ne tik metalai, bet ir kalcio junginiai yra išplaunami iš atliekų su atmosferos krituliais. Pats elementas nėra pavojingas aplinkai, tačiau jo sankaupos sudaro barjerus įvairiems procesams (filtravimuisi per drenažinį sluoksnį, užkemša filtratu surinkimo vamzdžio angas, nusėda ir kaupiasi filtrato surinkimo vamzdžiuose (Brachman *et al.* 2010; Raymond 2002)). Kalcis kaip vienas iš pagrindinių elementų, turinčių įtakos kolmatacijos procesams.



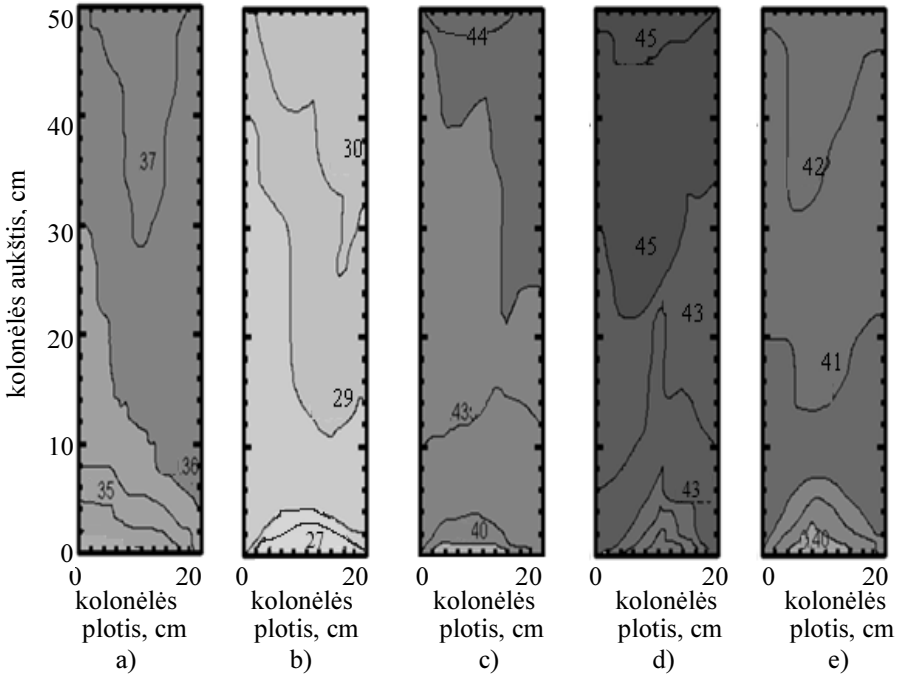
3.28 pav. Ca (kalcio) ir kritulių kiekio kaitos priklausomybė
Fig. 3.28. Dependency in change of rainfall and Ca (calcium)

Kritulių kiekis kalcio junginių migracijoms bei koncentracijų kaitai turi daugiau įtakos, nei karbonatų ar geležies, tačiau žinant, kaip kinta bendra filtrato sudėtis, galima, naudojant prognozinius modelius, apskaičiuoti, kokiu greičiu vystysis kolmatacija. Skirtingu metų laiku iškrentantys nevienodi kritulių kiekiai lemia ir sąvartyne susiformuojančio filtrato sudedamųjų dalių kiekį, ir filtrato bendrą kiekį. Dėl padidėjusio kritulių kiekio esant stipresnei filtrato srovei kolmatacijos procesai vystosi lėčiau (Rowe *et al.* 2004), tačiau susidaro didesnis filtrato kiekis, kurį reikia valyti. Sąvartynas yra labai sudėtinga sistema, kurioje labai svarbu ne tik kompleksiškai paanalizuoti visus procesus, bet ir detaliai nagrinėti kiekvieną iš elementų ir jų tarpusavio ryšius.

3.3. Kolonėlės užpildo poringumo mažėjimo modeliavimo rezultatų analizė

Modeliavimo programa *Bioclog* gali modeliuoti ir laboratorijos kolonėlės eksperimentus ir filtrato drenažo sistemas sąvartynuose. Cooke *et al.* (2005) nustatė, kad pastaroji modeliavimo programa tiksliai paskaičiuoja rezultatus lyginant juos su laboratorijoje vykdytų eksperimentų gautais duomenimis. Pagrindinė modelio paskirtis – apskaičiuoti nusėdantį medžiagos kiekį, kai vykstant filtrato judėjimui per poringą medžiagą, formuojasi poras užteršianti masė. Susidariusi medžiaga prisitvirtina prie granulių paviršiaus ir mažina poras. Kai mažėja poros, mažėja užpildo laidumas ir formuojasi kolmatacija.

Modeliuojant programa, apskaičiuojama kaip besikaupianti medžiaga nusėda ant granulių paviršiaus per ilgą laiko tarpą ir mažėja užpildo poringumas.

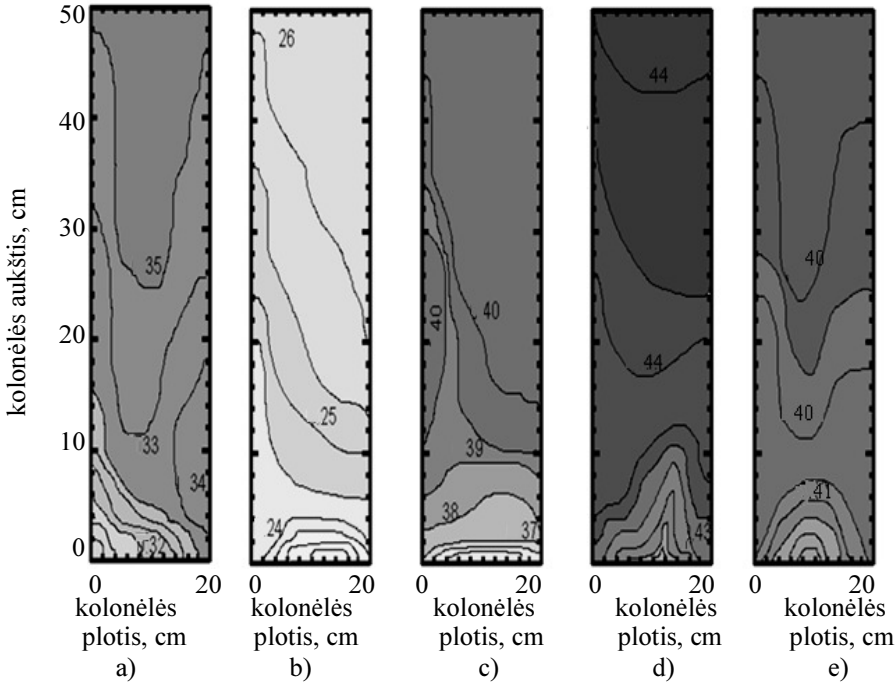


3.29 pav. Poringumas po vienerių metų skirtinguose užpilduose: a) – drenažo skalda; b) – sijotas žvyras; c) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys d) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; e) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys

Fig. 3.29. Porosity after one year in different fillers: a) – rubble used in landfill; b) – gravel mined at Lithuanian quarries; c) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; d) – mixture of drainage rubble and tired shreds; e) – mixture of gravel and tired shreds mixture

Iš 3.29 paveikslo matyti, kad skirtinguose užpilduose poringumas kinta nevienodai. Jau po vienerių metų poringumas daugiausiai sumažėjo nuo 35 % iki 27 % žvyro užpilde. Atliekant kolonėlės tyrimą ir kartu lyginant gautus modeliavimo rezultatus matyti, kad programos *Bioclog* apskaičiuotų ir laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatai lyginant skirtingus užpildus turi vienodą tendenciją. Smulkintų padangų įmaišymas į drenažo skaldą bei žvyrą pagerino užpildo poringumą, kuriame lėčiau vystosi sluoksnio laidumo sumažėjimas. Nors atliekant laboratorinius tyrimus asfalto atliekos nedavė gerų rezultatų, nes

poringumas po 365 parų sumažėjo iš 45 % iki 42 %, tačiau modeliuojant programoje buvo įvestas tik pradinis poringumas, o į tai, kad asfalto atliekos neatsparios spaudimui, nebuvo atsižvelgta.



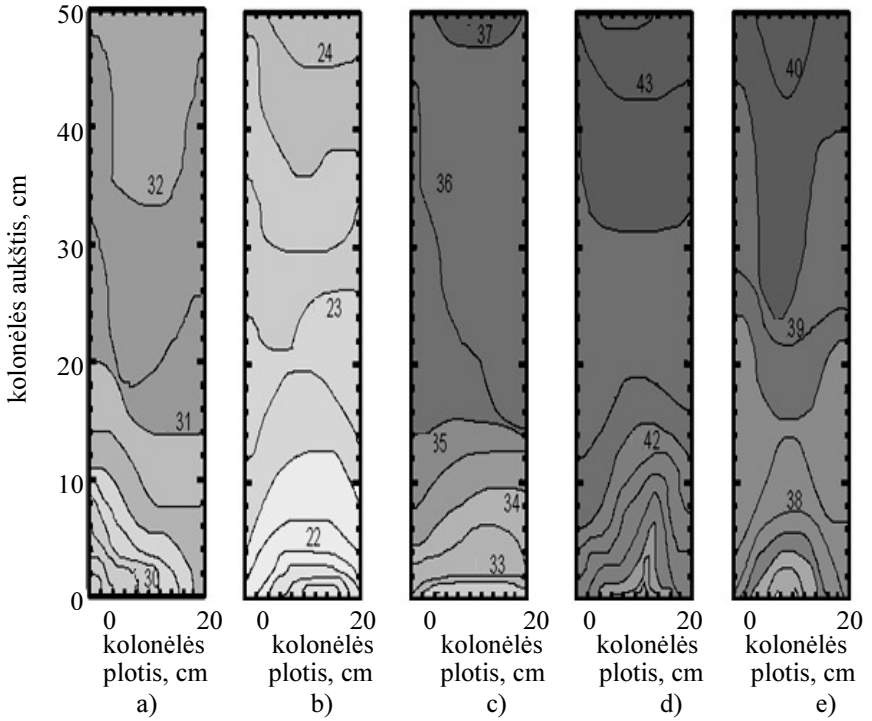
3.30 pav. Poringumas po 5 metų skirtinguose užpilduose: a) – drenažo skalda; b) – sijotas žvyras; c) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys d) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; e) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys

Fig. 3.30. Porosity after 5 years in different fillers: a) – rubble used in landfill; b) – gravel mined at Lithuanian quarries; c) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; d) – mixture of drainage rubble and tired shreds; e) – mixture of gravel and tired shreds mixture

3.29 paveiksle išryškėja filtrato tekėjimo kryptis. Nors pagrindinė filtrato tekėjimo srovė yra iš viršaus, tačiau didžiausias poringumo mažėjimas efektyviausiai vyksta ties filtrato ištekėjimu. Pastarasis reiškinys yra visiškai priešingas gautiems tyrimo rezultatams, nes atliekant laboratorinius tyrimus poringumas daugiausiai kito viršutinėje kolonėlės dalyje, o modeliuojant atvirkščiai – apatinėje. Toks skirtumas stebimas visais atlikto modeliavimo laikotarpiais. Viena iš pagrindinių tokių rezultatų priežasčių – *Bioclog* modelis, sukurtas modeliuoti esant prisotintai terpei. Tokios sąlygos sąvartynuose

paprastai formuojasi prie filtrato surinkimo vamzdžių, todėl ir atsiranda poringumo sumažėjimo nesutapimas.

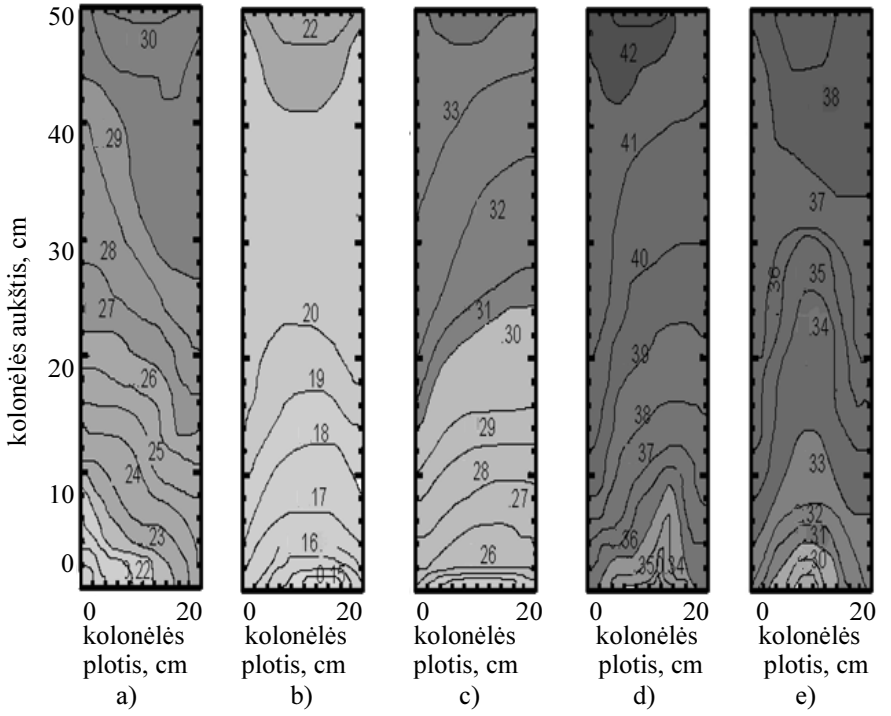
Kolonėlių tyrimas buvo atliekamas 365 paras, modeliavimo programa galima apskaičiuoti ir modeliuoti kolmatacijos proceso vystymąsi po 5 ir daugiau metų. Prognostinio modelio panaudojimas leidžia detaliau išnagrinėti pralaidumų sumažėjimą įvairiose medžiagose. Kaip pateikta 3.30 paveiksle, poringumo mažėjimas sulėtėja, nes ir po penkerių metų DSP užpilde jis mažai pakinta – iki 43 %, ŽP užpilde – 41 %, tai sudaro 6 % nuo pradinio medžiagos poringumo. Kiek kitaip yra su DS ir Ž užpildais, kuriuose yra natūralios medžiagos, ir juose per 5 metus poringumas sumažėja DS 5 %, o Ž net 10 %.



3.31 pav. Prognozuojamas poringumas po 10 metų skirtinguose užpilduose: a) – drenažo skalda; b) – sijotas žvyras; c) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys d) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; e) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys

Fig. 3.31. Predicted porosity after 10 years in different fillers: a) – rubble used in landfill; b) – gravel mined at Lithuanian quarries; c) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; d) – mixture of drainage rubble and tired shreds; e) – mixture of gravel and tired shreds mixture

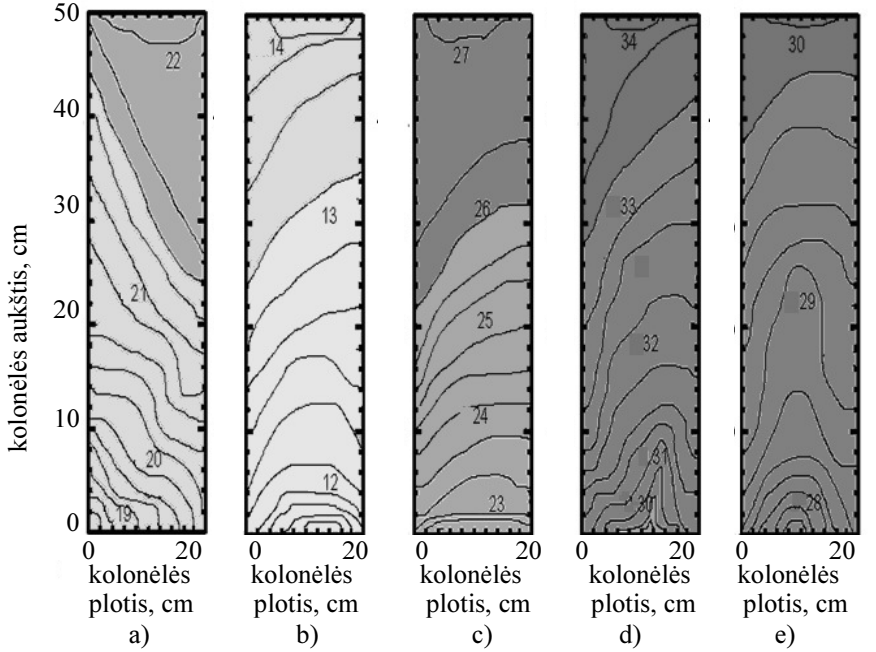
Iš 3.31 paveikslo matyti, kad sluoksnio pralaidumas visuose užpilduose nuolat mažėja. DS užpildo per 10 metų poringumas sumažėja iki 30 %, o tai sudaro 15 %. Tokie modeliavimo metu gauti rezultatai nėra optimistiniai, nes sąvartynuose kolmatacijos procesai turėtų suaktyvėti po 10 ir daugiau metų. Didžiausias poringumo pasikeitimas vyksta žvyro užpilde, kuriame poringumas per 10 metų sumažėjo iki 22 %. Kaip ir po penkerių metų, taip ir po dešimties, išlieka vienodos mišinių pralaidumo tendencijos. Juose poringumas mažėja daug lėčiau ir sudaro 3 % DSP ir 5 % ŽP užpildų.



3.32 pav. Prognozuojamas skirtingų medžiagų poringumas po 15 metų filtruojant komunalinių atliekų sąvartyno filtratą: a) – drenažo skalda; b) – sijotas žvyras; c) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys d) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; e) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys

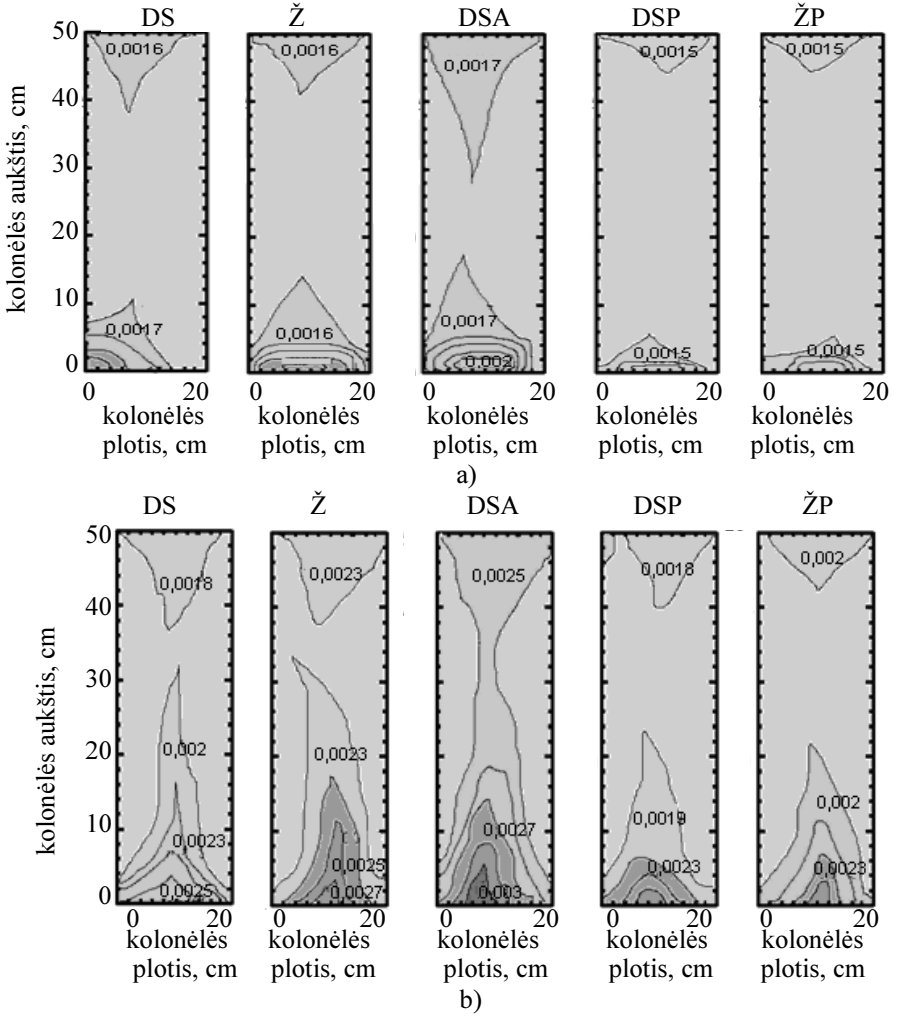
Fig. 3.32. Predicted porosity of different materials after 15 years of filtration of municipal waste landfill leachate: a) – rubble used in landfill; b) – gravel mined at Lithuanian quarries; c) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; d) – mixture of drainage rubble and tired shreds; e) – mixture of gravel and tired shreds mixture

Modeliuojant programa buvo pasirinktas skirtingas laiko tarpas. Vienas iš laikotarpių – tai pusė sąvartyno eksploatavimo laiko t. y. 15 metų. Gauti modeliavimo duomenys yra tik prognostiniai, tyrimais patikrinti yra labai sudėtinga, nes reikėtų juos atlikti 15 metų, o tai reikalauja didelių laiko sąnaudų. Tačiau gautus rezultatus galima palyginti su vienerių metų rezultatais ir darant prielaidas spręsti apie būsimas pasekmes. 3.32 paveiksle pateikiami rezultatai rodo, kad žvyro užpildo poringumas sumažėja iki 15 %. Didžiausias poringumas išlieka DSP ir ŽP užpilduose ir per 15 metų sumažėja atitinkamai nuo 45 % ir 42 % iki 34 % ir 30%. Tokie rezultatai rodo, kad pastarųjų sluoksnių pralaidumas per 15 metų sumažėja DSP – 25 % ir ŽP – 29 %, tuo tarpu DS – 48 %, o Ž – net 70 %.



3.33 pav. Prognozuojamas sąvartyno drenažo sluoksnio poringumas po 30 eksploatacijos metų: a) – drenažo skalda; b) – sijotas žvyras; c) – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys d) – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; e) – žvyro ir smulkintų padangų mišinys

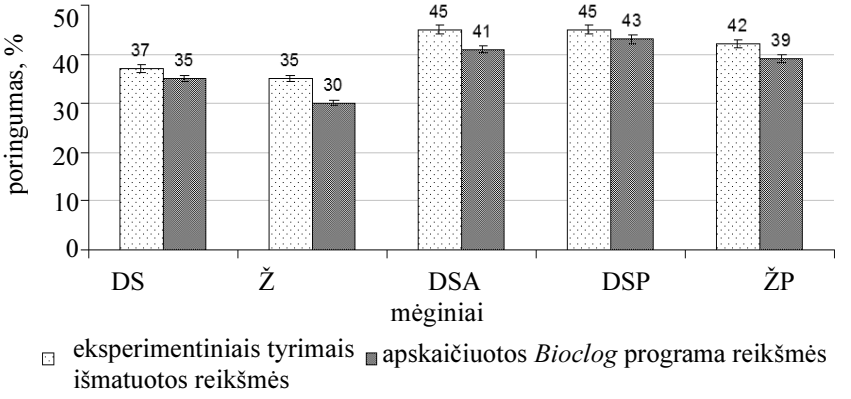
Fig. 3.33. Predicted porosity of landfill drainage layer after 30 years of operation: a) – rubble used in landfill; b) – gravel mined at Lithuanian quarries; c) – mixture of drainage rubble and asphalt waste; d) – mixture of drainage rubble and tired shreds; e) – mixture of gravel and tired shreds mixture



3.34 pav. Sluoksnio (susiformavusio iš nusėdusių daleliu, kuriame dominuoja kalcio karbonatas) storis (mm) ant užpildo po a) 5 metų, b) 10 metų (DS – drenažo skalda; Ž – sijotas žvyras; DSA – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys; DSP – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; ŽP – žvyro ir smulkintų padangų mišinys)

Fig. 3.34. Thickness (mm) of film (predominately calcium carbonate) on the filler after a) 5 year, b) 10 year (DS – rubble used in landfill; Ž – gravel mined at Lithuanian quarries; DSA – mixture of drainage rubble and asphalt waste; DSP – mixture of drainage rubble and tired shreds; ŽP – mixture of gravel and tired shreds mixture)

Kadangi numatomas sąvartynų naudojimo laikas yra 30 metų, todėl modeliuojant pasirinktas toks pats laikas. Nors atliekos turėti būti nebepilamos į sąvartynus, tačiau visa susikaupusi masė ir toliau saugoma toje pačioje vietoje, kur ir toliau formuojasi filtratas, kuris renkamas per filtrato surinkimo sistemą. Dėl šios priežasties svarbu žinoti, kaip toliau funkcionuoja drenažas, ar pakankamas jo pralaidumas. Iš 3.33 paveikslo matyti, kad poringumas visuose užpilduose ir toliau mažėja, tačiau žymiai lėčiau. Jei per 15 metų DS sluoksnyje poringumas sumažėja 48 %, tai per kitus 15 metų – tik 2 %. Panašūs pokyčiai vyksta ir kituose užpilduose. Per 30 metų poringumas mažiausiai sumažėja DSP mišinyje, tai sudaro 40 % nuo pradinės vertės. Žymiai lėtesnį poringumo mažėjimą vėlesniu laikotarpiu galima paaiškinti tuo, kad mažėja visų filtrato sudedamųjų medžiagų kiekiai. Tačiau pasibaigus sąvartyno eksploatacijai svarbu, kad ir toliau būtų efektyviai surenkamas filtratas, nes jis ir toliau susidaro atliekų masėje vykstant biologiniams cheminiams procesams.



3.35 pav. Modeliavimo ir tyrimo rezultatų palyginimas (DS – drenažo skalda; Ž – sijotas žvyras; DSA – drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinys; DSP – drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinys; ŽP – žvyro ir smulkintų padangų mišinys)

Fig. 3.35. Comparison of simulation and investigation results (DS – rubble used in landfill; Ž – gravel mined at Lithuanian quarries; DSA – mixture of drainage rubble and asphalt waste; DSP – mixture of drainage rubble and tired shreds; ŽP – mixture of gravel and tired shreds mixture)

Matematinis modelis *Bioclog,* sukurtas modeliuoti sluoksnio pralaidumo sumažėjimui, apskaičiuoja ir pateikia ne tik poringumo pokyčius, tačiau ir kitus parametrus, kurie lemia kolmataciją. Labai svarbus medžiagų, nusėdusių ant drenažo granulių paviršiaus, sluoksnio storis, kuris parodytas 3.34 paveiksle.

Kadangi kolmatacijos procesai vystosi ilgą laiką, todėl juos išmatuoti laboratoriniais tyrimais sudėtinga, o programa galima sumodeliuoti ir gauti rezultatus. Iš 3.34 (a) paveikslo matyti, kad po penkerių metų susidarytų 0,0015 mm storio sluoksnis, tačiau dar po penkerių metų (3.34 (b) pav.) padidėtų iki 0,0026 mm. Detaliau nagrinėjat 3.34 paveikslą išryškėja tendencija, kad, jei per penkerius metus susiformavo vidutiniškai 0,0015 mm sluoksnis, tai dar po penkerių metų sluoksnis padidėjo vidutiniškai iki 0,002 mm, t. y. 0,001 mm mažiau, nei per pirmus penkerius metus. Kadangi šiame sluoksnyje dominuoja kalcio karbonatas, tai galima daryti prielaidą, kad mažėjant pastarųjų junginių kiekiams filtrate, ypač skendinčių dalelių koncentracijai, turėtų sulėtėti ir jų akumuliacija. Dėl palankių sąlygų drenažo sluoksnyje kaupiasi ne tik skendinčios dalelės, kartu su filtratu migruojančios bakterijos prisitvirtina prie drenažo granulių paviršiaus. Jeigu mažėjant kalcio kiekiui filtrate lėčiau didėja ir neorganinio sluoksnio storis, tai bendras sluoksnis tiek per penkerius metus, tiek ir vėliau didėja vienodai, vidutiniškai po 0,005 mm kas 5 metai.

Apibendrinant modeliavimo rezultatus galima teigti, kad *Bioclog* programa detaliai apskaičiuoja visus drenažo sluoksnyje vykstančius procesus ir pateikia rezultatus, artimus tyrimo metu išmatuotam poringumui (3.35 pav.). Visuose užpilduose programa apskaičiuotas poringumas iki 5 % skyrėsi nuo matavimo rezultatų. Didžiausias skirtumas tarp tyrimų metu išmatuotų ir programa apskaičiuotų nustatytas tiriant žvyro užpildą. Mažiausias skirtumas tarp apskaičiuoto ir išmatuoto poringumo yra 2 % drenažo skaldos bei drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinio. Palyginus tiek tyrimų, tiek modeliavimo metu gautus rezultatus, galima teigti, kad tikslinga naudoti *Bioclog* programą kolmatacijos procesų modeliavimui, nes galima tiksliai apskaičiuoti procesus, vykstančius sąvartynų drenažo sluoksnyje.

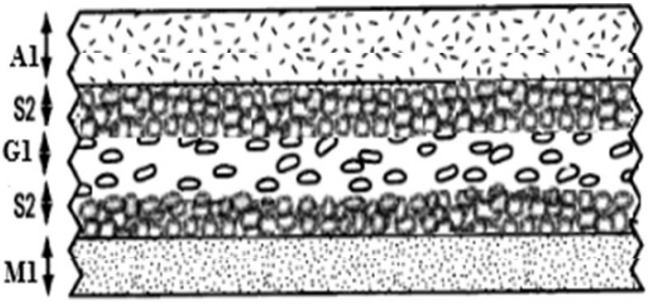
3.4. Smulkintų padangų naudojimas mažinant drenažo sluoksnio kolmataciją

Komunalinių atliekų sąvartyno filtrato surinkimo sistema yra viena iš svarbiausių sąvartyno projektavimo dalių. Įrengiant sąvartyną svarbus jo sudedamųjų dalių ilgalaikis funkcionavimas. Filtrato susidarymas ir jo šalinimas svarbus ne tik sąvartyno eksploatacijos metu, bet ir po sąvartyno uždarymo.

Filtratui tekant per drenažo sluoksnį dalis jo sudedamųjų (SM, kalcio ir geležies elementų junginiai) nusėda drenažo sluoksnyje. Tokia akumuliacija vyksta redukcinėje aplinkoje. SM nusėda sluoksnio užpilde kontaktuodamos su medžiagos kietosiomis dalelėmis. Kietoji fazė atlieka barjero funkciją drenažo sluoksnyje. Tokiu būdu daugėjant užpilde nuosėdų, mažėja medžiagos porų dydis, o tai sukelia pralaidumo sumažėjimą.

Pagrindinė drenažinio sluoksnio funkcija – skysčių surinkimas ir pašalinimas iš sąvartyno. Aukštas drenavimo laipsnis pasiekiamas, kai užpilde pusė tūrio sudaro tuštumos, kuriomis migruoja skystis. Porų sumažėjimas sudaro sąlygas filtrato lygiui pakilti sąvartyne. Taip pat sumažėja surenkamo filtrato kiekis, nes dalis medžiagų nepersifiltruoja ir kaupiasi atliekų masėje. Tokiomis sąlygomis susiformuoja atliekų masės paplovimo galimybė, atliekų kaupo nuslinkimas. Mažinant galimus neigiamus pavojus svarbu, kad filtrato surinkimo sistema funkcionuotų ne trumpiau, nei eksploatuojamas sąvartynas.

Įprastai drenažo sistemų užpildo (skaldos) dalelės turi būti vienodo dydžio, kad pagerintų sąvartyno drenažo sluoksnio pralaidumą dėl tangentinio sferų taškų susilietimo. Tokių medžiagų kaip iškasenų gamtoje nėra randama, jos turi būti gaminamos, tačiau tai susiję su didelėmis išlaidomis. Tiek komunalinių atliekų sąvartynų operatoriai, tiek ir sąvartyną statančios įmonės nėra suinteresuoti mokėti papildomai. Todėl siūloma naudoti smulkintas padangas. Esant 20 metrų atliekų sluoksnio storiui nominaliai paviršius veikiamas 200 kPa slėgiu. Tokį spaudimą geriau išlaiko skalda, nes nesusispaudžia ir nesumažina erdvės, kuri išlieka nepakitusi. Nors naudotos smulkintos padangos prie 200 kPa spaudimo sumažina poringumą, tačiau laidumas (filtracijos koeficientas) išlieka 0,3 m/s. Esant tokiam laidumui drenažo sluoksnis visiškai atlieka savo funkciją: surenka susidariusį sąvartyno filtratą į filtrato surinkimo vamzdžius.



3.36 pav. Siūloma sąvartyno drenažo sluoksnio konstrukcija (M1 – sutankintas pagrindas, S2 – drenažinė skalda, G1 – smulkintos padangos, A1 – atliekų masė)
Fig. 3.36. Construction of the proposed landfill drainage layer (M1 – compacted clay base, S2 – rubble of drainage, G1 – tired shreds, A1 – mass of waste)

Yra sukurta speciali medžiaga, pagaminta iš poliuretano – sintetinis drenažinis sluoksnis su palaikomomis tuštumomis, (JAV patentas (JAV. Nr. 7309188 B2), skirtas sąvartynų drenažo sluoksniui formuoti. Sintetinė medžiaga, naudojama drenažo sistemai formuoti, efektingai surenka sąvartyne susiformuojantį filtratą. Persifiltravęs skystis patenka į sintetinį drenažinį sluoksnį,

kuriame yra surenkamas ir patenka į filtrato surinkimo talpas. Tačiau panaudojant nebrangias medžiagas galima patobulinti sąvartyno drenažo sluoksnio konstrukciją nesumažinant jos pralaidumo. Smulkintų padangų panaudojimas sumažintų galimybę pažeisti geomembraną spaudžiant atliekas kompaktoriumi.

Konstrukcija (3.36 pav.) sudaryta iš sutankinto molio sluoksnio (M1), kurio bendras laidumo koeficientas ≤ 1,0x10 – 9 m/s, storis ≥1 m. Siekiant užtikrinti, kad filtratas nepatektų į aplinką, virš sutankinto molio sluoksnio klojama geomembrana. Tiek atmosferos krituliai, tiek ir atliekų drėgmė filtruojasi per drenažinį sluoksnį, kuris sudarytas iš trijų sluoksnių:

– drenažo skaldos (dalelių 32–60 mm dydžio) 150 mm storio sluoksnis (S2),
– smulkintų (70x100 mm) padangų 200 mm storio sluoksnis (G1),
– drenažo skaldos (dalelių 32–60 mm dydžio) 150 mm storio sluoksnis (S2).

Drenažo skaldai keliamas pagrindinis reikalavimas, kad jos sudėtyje būtų kuo mažesnis kalcio junginių kiekis. Siūlomas sluoksnių pasiskirstymas sumažina kolmatacijos galimybes (mažiausiai sumažėja poringumas). Taip pat efektyviai būtų panaudojamos eksploatavimui netinkamos padangos. Smulkintų padangų sluoksnis, įterptas į drenažo skaldos sluoksnį, padidina bendrą medžiagos poringumą nuo 37 % iki 45 %, t. y. aštuoniais procentais. Per vienerius metus sluoksnio poringumas sumažėja nežymiai, kaip pateikiama 3.5 lentelėje, tačiau poros tarp smulkintų padangų sumažėja 1 % (du kartus mažiau nei drenažo skaldoje be smulkintų padangų).

3.5 lentelė. Poringumo pokytis per 365 paras
Table 3.5. Changes of porosity during 365 days

drenažo medžiaga	poringumas, %	
	pradinis	po 365 parų
drenažo skalda (32–62 mm dalių dydis)	37	35
drenažo skaldos ir smulkintų padangų sluoksniai (150x200x150 mm)	45	44

Drenažo sluoksnio efektyvumas priklauso nuo jį sudarančios medžiagos dalelių skersmens bei tarpų tarp tų dalelių dydžio. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad esant didesnėms tuštumoms, sluoksnio pralaidumo efektyvumas didėja. Dėl to padidėja laidumas bei sumažėja kolmatacijos laipsnis drenažo sluoksnio oro porose. Naudojant smulkintas padangas jų susmulkinimo laipsnis parenkamas remiantis atliktais tyrimais, kuriais nustatyta, kad tinkamiausia

naudoti 70x100 mm frakciją, nes smulkesnė frakcija sumažina poringumą bei sumažėja oro porų dydis, kas sumažintų užpildo laidumą.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Išmatavus pasirinktų medžiagų, naudojamų kolonėlių užpildui, poringumą, pastebėta, kad geriausias yra sąvartyno skaldos ir smulkintų padangų mišinys (santykis 3:1).
2. Laboratorinėmis sąlygomis atlikto eksperimento metu mažiausiai (5 %) pasikeitė smulkintų padangų ir drenažo skaldos mišinio (santykis 1:3) poringumas. Ženkliausiai poringumas sumažėjo (9 %) žvyro (32–65 mm frakcija) mėginyje. Tai leidžia daryti prielaidą, kad pastaroji medžiaga netinkama naudoti komunalinių atliekų sąvartyno drenažui formuoti.
3. Poringumo koeficientas nuo 0,538 iki 0,428 per 365 paras ženkliai sumažėja drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinio viršutiniame kolonėlės užpildo sluoksnyje. Tai rodo, kad naudojant pastarąjį užpildą kolmatacijos procesai vystytųsi greičiausiai.
4. Stebint poringumo sumažėjimą drenažo skaldos ir smulkintų padangų bei žvyro ir smulkintų padangų mišiniuose, per 2/3 kolonėlės ilgio poringumo koeficientas sumažėjo 0,06 vertės. Tai rodo, kad naudojant pastaruosius užpildus kolmatacijos procesai vystytųsi lėčiausiai.
5. Ant užpildų paviršiaus nusėdusios medžiagos kokybinės sudėties analizė parodė, kad silicio, kalcio ir geležies junginiai daro didžiausią įtaką kolmatacijos procesams.
6. Remiantis tyrimų rezultatais, pastebėta, kad filtrato skendinčių medžiagų koncentracija vidutiniškai 50 % (t. y. 130 mg/l) sumažėjo per 365 tyrimo paras. Ženkliausiai skendinčių medžiagų kiekis sumažėjo leidžiant filtratą per drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinio užpildą (nuo 264 mg/l iki 108 mg/l), o mažiausiai šis kiekis pasikeitė naudojant drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinio užpildą (nuo 264 mg/l iki 154 mg/l). Tai leidžiant teigti, kad asfalto atliekų, kaip užpildo sudėtinės dalies, panaudojimas buvo pasirinktas netinkamai. Tuo tarpu smulkintų padangų panaudojimas šiam tikslui davė akivaizdžius teigiamus rezultatus. Tuo galima įsitikinti stebint žvyro bei žvyro ir smulkintų padangų mišinio skendinčių medžiagų sumažėjimą nuo 264 mg/l iki atitinkamai 126 mg/l ir 142 mg/l.

7. Analizuojant filtrato sudedamąsias dalis, darančias įtaką kolmatacijos procesams, buvo pastebėta jų kaita filtrate po perfiltravimo per suformuotus įvairios sudėties užpildus. Ženkliausias stebėtas pokytis – kalcio koncentracijos kiekio sumažėjimas, kadangi tai vienas iš labiausiai nusėdančių elementų. Ypatingai ženklus kalcio junginių koncentracijos sumažėjimas (nuo 454 mg/l iki 75 mg/l) filtrate buvo stebimas leidžiant jį per drenažo skaldos ir asfalto mišinio užpildą. Šis pokytis sudaro iki 83 %. Mažiausia kalcio junginių kiekio kaita filtrate pastebėta leidžiant jį per drenažo skaldos ir smulkintų padangų mišinio užpildą (nuo 454 mg/l iki 174 mg/l). Šis pokytis sudaro iki 62 %.
8. Atlikus eksperimentinį tyrimą, išmatuota geležies junginių koncentracijos kaita, kurios ženkliausias sumažėjimas (20 %) buvo stebimas kolonėlėje, kur drenažo užpildas suformuotas iš drenažo skaldos ir asfalto atliekų mišinio, todėl toks mišinys nerekomenduotinas naudoti drenažo sluoksnio užpildui. Pratekant filtratui per skaldos ir smulkintų padangų mišinį, geležies koncentracija skystyje pakito mažiausiai – tik 10 %, todėl tokios sudėties medžiaga rekomenduotina komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sluoksnio užpildui formuoti.
9. Komunalinių atliekų sąvartyno filtrato savybių kaitos statistinės duomenų analizės metu išryškėjo didžiausia kalcio priklausomybė nuo kritulių (koreliacijos koeficientas 0,67). Tai leidžia daryti išvadą, kad dėl kritulių susidarant didesniam filtrato kiekiui iš atliekų daugiau išplaunama kalcio, kuris nespėja nusėsti drenažo sluoksnio užpilde. Tai lėtina kolmatacijos procesus, tačiau didina filtrato kiekį bei jo valymo kaštus.
10. Smulkintų padangų sluoksnis, įterptas į skaldos užpildą, sulėtina kolmatacijos procesus. Per kolonėles, užpildytas drenažo skalda su įterptu į ją smulkintų padangų sluoksniu, leidžiant filtratą, visuose jo mėginiuose pastebėta bendra teigiama tendencija – ribotas filtrato sudedamųjų dalių koncentracijų mažėjimas.
11. Kompiuterine modeliavimo programa *Bioclog* apskaičiuotas kolonėlių užpildų poringumas po 365 parų kito nuo 30 % iki 42 % (priklausomai nuo medžiagos). Drenažo skaldos, drenažo skaldos ir asfalto, drenažo skaldos ir smulkintų padangų bei žvyro ir smulkintų padangų užpildų poringumas matematiškai apskaičiuotas 2–5 % (priklausomai nuo medžiagos) didesnis nei nustatytas laboratorinių tyrimų metu.
12. Komunalinių atliekų sąvartyno drenažo sistemos užpildą formuojant iš skaldos ir smulkintų padangų, jo poringumas padidėja 8 % lyginant su užpildu, sudarytu vien tik iš skaldos. Siūlomas užpildas gali būti

efektyviai naudojamas komunalinių atliekų sąvartynų filtrato drenažo sistemoms formuoti. Jis pasižymi geresnėmis filtravimo savybėmis bei sulėtina kolmataciją.

Bendrosios išvados ir rekomendacija

Bendrosios išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą nustatyta, kad komunalinių atliekų sąvartynų filtrato drenažo sluoksnio užpildo kolmatacijos procesai sparčiausiai vystosi esant smulkioms drenažo užpildo granulėms (19–32 mm frakcija) ir ji ženkliai lėtesnė kai naudojamos didesnės (32–65 mm frakcija) granulės. Kolmatacijos procesų greičiui įtakos turi ir komunalinių atliekų sąvartyno eksploatavimo laikas: naujame sąvartyne filtratas bus daug agresyvesnis ir jame intensyviau vyks kolmatacijos procesai nei dvidešimties metų ar senesniame sąvartyne.

2. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad sumaišius skaldą (32–65 mm frakcija) su smulkintomis padangomis (70–100 mm frakcija), drenažo užpildo poringumas padidėja nuo 37 % iki 45 %. Smulkintų padangų panaudojimas drenažo užpildo įrengimui sulėtina kolmatacijos procesus užpildo sluoksnyje. Užpildui naudojant 30 % smulkintų padangų ir 70 % skaldos, poringumo mažėjimas sulėtinamas 1 % per 365 paras.

3. Ant drenažo užpildų paviršiaus nusėdusios medžiagos, susidedančios iš kalcio, silicio bei geležies junginių, turi lemiamą įtaką kolmatacijos procesams. Didžiausia dalis minėtų junginių į užpildą patenka su filtratu ir jame nusėda suformuodami vientisą konglomeratą.

4. Tyrimų metu nustatyta, kad skendinčių medžiagų, kalcio ir geležies koncentracijų kiekio sumažėjimas žymiausias filtrate, kuris buvo leidžiamas per kolonėlę, užpildytą drenažo skaldos ir smulkintų padangų užpildu. Tai įrodo, kad smulkintos padangos yra efektyvi medžiaga komunalinių atliekų sąvartynų filtrato drenažo sluoksniui formuoti.

5. Atlikus tyrimus nustatyta, kad ženkliausiai sumažėjo sijoto žvyro užpildo poringumas (9 % per 365 paras). Tai įrodo, kad sijotas žvyras nėra tinkama medžiaga komunalinių atliekų sąvartyno filtrato drenažo sluoksniui formuoti.

6. Modeliavimui naudojant kompiuterinę programą Bioclog nustatyta, kad per 30 sąvartyno eksploatacijos metų mažiausiai poringumas sumažėja (24 %) drenažinį sluoksnį formuojant iš skaldos ir smulkintų padangų mišinio. Didžiausias poringumo sumažėjimas (62 %) per tą patį laikotarpį apskaičiuotas sijoto žvyro užpilde.

7. Tiek eksperimentinių tyrimų, tiek ir kompiuterinio modeliavimo rezultatai patvirtina išvadą, kad smulkintos padangos yra rekomenduotina medžiaga komunalinių atliekų sąvartynų filtrato drenažo sluoksniui formuoti.

Rekomendacija

Siekiant sulėtinti komunalinių atliekų sąvartyno filtrato drenažo sluoksnio užpildo kolmatacijos procesus rekomenduojama minėtą sąvartyno filtrato drenažo sluoksnio užpildą formuoti iš skaldos (32–65 mm frakcija) ir smulkintų padangų (70–100 mm frakcija) sluoksnių. Viršutinį sluoksnį siūloma formuoti iš ≥150 mm skaldos, vidurinįjį sluoksnį – iš ≥200 mm smulkintų padangų ir apatinį sluoksnį – iš ≥150 mm skaldos.

Literatūra ir šaltiniai

Abu–Zeid, N.; Bianchini, G.; Santarato, G.; Vaccaro, C. 2004. Geochemical characterisation and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy*). Environmental Geology,* 45: 439–447.

Alkalay, L. D.; Guerrero, J. M.; Lema, R.; Chamy, M. 1998. Anaerobic treatment of municipal sanitary landfill leachates: the problem of refractory and toxic components. *World Journal of Microbiology & Biotechnology.* 14: 309–320.

Al–Tarazi, E.; El–Naqa, A.; El–Waheidi, M.; Abu Rajab, J. 2006. Electrical geophysical and hydrogeological investigations of groundwater aquifers in Ruseifa municipal landfill, Jordan. *Environmental Geology.* 50: 1095–110.

Armstrong, M. D.; Rowe, R. K. 1999. Effect of landfill operations on the quality of municipal solid waste leachate. *Water Air Soil Pollution.* 132: 81–88.

Amšiejus, J.; Mackevičius, R.; Medzvieckas, J.; Sližytė, D.; Stragys, V. 2006. *Gruntų fizinės ir mechaninės savybės. Laboratoriniai darbai.* Vilnius: Technika, 155–164.

Banar, M.; Ozkan, A.; Kurkcuoglu, M. 2006. Characterization of the leachate in an urban landfill by physicochemic analysis and solid phase microextraction-gc/ms. *Environmental Monitoring and Assessment.* 121: 439–459.

Barone, F. S.; Costa, J. M. A.; Ciardullo, L. 1997. Temperatures at the base of a municipal solid waste landfill*. In Proceedings of the 50th Canadian Geotechnical Conference, May 5–9, Ottawa, Canada* 2: 236–245.

Baveye, P.; Vandervivere, P.; Hoyle, B. L.; DeLeo, P. C.; Lozada, D. S. 1998. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical reviews in Environmental Science and Technology.* 28(2): 123–191.

Beaven, R. P. 2009. A challenge to modellers to predict the performance of a landfill cell. *In Proceedings of the12th International Landfill Symposium, 5–9 October Cagliari, Italy 2009*, (published on CD only).

Brachman, R. W. I.; McLeod, H. A.; Moore, I. D.; Take, W. A. 2010. Three-dimensional ground displacements from static pipe bursting in stiff clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 47(4): 439–450.

Bonala, M. V. S.; Reddi, L. N. 1998. Physicochemical and biological mechanisms of soil clogging-an overview. *Filtration and Drainage in Geotechnical/Geoenvironmental Engineering.* 78: 43–68.

Bouazza, A.; Van Inpe, W. F. 1998. Liner design for waste disposal site. *Environmental Geology*. 35: 41–54.

Brune, M.; Ramke, H. G.; Collins, H.; Hanert, H. H. 1991. Incrustations process in drainage systems of sanitary landfills. *In Proceedings of the 3rd International Landfill Symposium, Cagliari, Italy*, 999–1035.

Brachman, R. W. I.; Sabir, A. 2010. Geomembrane puncture and strains from stones in an underlying clay layer. *Geotextiles and Geomembranes*. 28(4): 335–343.

Celiad, A.; Earle, A.; Rhue, D. R.; Chynoweth, D. P. 2000. Partitioning of mercury among solid, liquid and gas phases following anaerobic decomposition of a simulated solid waste. *Water, Air, and Soil Pollution.* 121: 189–203.

Cheminiai analizės metodai. 1994. *Unifikuoti nuotekų ir paviršinių vandenų kokybės tyrimo metodai.* D.I. Vilnius. 223 p.

Cholewa, J. A.; Brachman, R. W. I.; Moore, I. D. 2010. Effectiveness of viscoelastic models for prediction of tensile axial strains during cyclic loading of high density polyethylene pipe. *ASCE Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 1(2): 77–83.

Cooke, A. J.; Rowe, R. K.; Rittmann, B .E.; Van Gulck, J.; Millward, S. 2001. Biofilm growth and mineral precipitation in synthetic leachate columns. *ASCE Journal of. Geotechnical Geoenvironmental Engineering*. 127(10): 849–856.

Cooke, A. J.; Rowe, R. K. 1999. Extension of porosity and surface area models for uniform porous media for studying clogging of landfill collection systems. *ASCE Journal of Environmental Engineering.* 125(2): 126–145.

Cooke, A. J.; Rowe R. K. 2008. 2D modelling of clogging in landfill leachate collection systems. *Canadian Geotechnical Journal*. 45: 1393–1409.

Craven, W.; Townsen, T. D.; Vogel, K.; Laux, S. 1999. Field investigation of landfill leachate collection system clogging. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 3(1): 2–9.

Cullimore, D. R. 1993. *Practical manual of Groundwater Microbiology*. Lewis publishers. Chelsea, Michigan, USA. 562 p.

Denafas, G.; Rimaitytė, I.; Seeger, H.; Urban, A.; Račys, V. 2003. Energetiškai naudingo buitinių atliekų deginimo Lietuvoje galimybės. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management.* 11(2): IIa–IIi.

Deng, Y.; Englehardt, J. D. 2007. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Management*. 2007: 380–388.

Dickinson, S.; Brachman, R. W. I.; Rowe, R. K. 2010. Thickness and hydraulic performance of geosynthetic clay liners overlying a geonet. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* 136(4): 552–561.

El–Fadel, M.; Bou–Zeid, E.; Chahina, W.; Alayli, B. 2002. Temporal variation of leachate quality from pre – sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*. 22: 269–282.

Elvidge, C.; Raymond, G. P. 2001. Maximized Bearing Capacity from a Single Geosynthetic Reinforcement Layer. In P*roceedings 54th Canadian Geotechnical Conference, Calgary, Alberta*. 475–480.

Ettler, V.; Mihaljevic, M.; Matura, M. 2008. Temporal variation of trace elements in waters polluted by municipal solid waste landfill leachate. *Bull Environ Contam Toxico.* 80:274–279.

Fleming, I. R. 1999. Biogeochemical processes and clogging of landfill leachate collection systems. *Ph.D. Thesis, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada*. 586 p.

Fleming, I. R.; Rowe, R. K.; Cullimore, D. R. 1999. Field observations of clogging in a landfill leachate collection system. *Canadian Geotechnical Journal*. 36(4): 289–296.

Fleming, I. R.; Rowe, R. K. 2004. Laboratory studies of clogging of landfill leachate collection and drainage system. *Canadian Geotechnical Journal.* 41: 134–153.

Gasiūnas, V.; Strusevičius, Z.; Steponavičius, A. 2002. Sąvartynų filtrato tyrimai ir poveikis aplinkai. *Vandens ūkio inžinerija.* T21(43): 34–37.

Gibson, R. F. 2011. Principes of composite material mechanics. New York. 576 p.

Gounaris, V.; Anderson, P. R.; Holsen, T. M. 1993. Characteristic and environmental significance of colloids in landfill leachate. *Environmental Science Technology.* 27: 1381–1387.

Gunjan, B.; Arvind, K.; Ajay, B. 2010. Performance of Scrap Tire Shreds as a Potential Leachate collection Medium. *Geotechnical Geological Engineering*. 28: 661–669.

Hage, J. E.; Mulder, E. 2004. Preliminary assessment of three new European leaching tests. *Waste Management.* 24: 165–172.

Hellweg, S.; Hofstetter, T. B.; Hungerbuhler, K. 2001. Modelling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland. *Environmental Modelling and Assessment.* 6: 219–235.

Hogland, W.; Marques, M.; Nimmermark, S. 2004. Landfill mining and waste characterization: a strategy for remediation of contaminated areas. *Journal of Material Cycles Waste Management*. 6: 119–124.

Huang, Q.; Qi, W.; Lu, D.; Beidou, Xi. 2006. The current situation of solid waste management in China. *Cycles Waste Management.* 8: 63–69.

Hurt, M.; Hong, K. S. 2000. Combined adsorption and chemical precipitation process for pretreatment or post-treatment of landfill leachate. *Korean Chemical Engineering.* 17(4): 433–437.

Hudson, A.; Beaven, R. P.; Knox, K.; Powrie, W. 2009. Investigation of clogging of landfill tyre drainage layers. *In proceedings: of the 12th International Waste Management and Landfill Symposium, 5–9 October 2009, Sardinia* (published on CD only).

Hudson, A.; Beaven, R. P.; Powrie, W. 2001. Interaction of Water and Gas in Saturated Household Waste in Large Scale Compression cell. *CISA publisher, Cagliari, Italy* 3: 585–594.

Hudson, A. P.; Beaven, R. P.; Powrie, W. 2003. Bulk compressibility and hydraulic conductivity of used tyres in landfill drainage applications. *Sardinia 2003: Proceedings of the Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6–10 October 2003,* (published on CD only).

Ismail, I.; Raymond, G. P. 2002. Investigation into the Behaviour of Crushed Aggregate when Loaded Repeatedly. *In Proceedings 55th Canadian Geotechnical Conference, Niagara Falls*. Ontario: 73–80.

Yildiz, D. E.; Unlu, K.; Rowe, R. K. 2004. Modelling leachate quality and quantity in municipal solid waste landfills. *Waste Management & Research.* 22(2): 78–92.

Yao, K. M.; Habibian, M. T.; O'Melia, C. R. 1971. Water and waste water filtration: concepts and applications. *Environmental Science Technology.* 5(11): 1105–1112.

James, R.; Raymond, G. P. 2002. Strain/Load on Geogrid Reinforcement of Aggregates Below Shallow Footings. *In Proceedings 55th Canadian Geotechnical Conference, Niagara Falls.* Ontario: 783–790.

Jensen, D. L.; Christensen, T. H. 1998. Colloidal and dissolved metals in leachates from four Danish landfills. *Water Resources*. 33(9): 2139–2147.

Kalyuzhnui, S.; Fedorovich, V.; Lens, P.; Hulshoffpol, L.; Lettinga, G. 1998. Mathematical modelling as a tool to study population dynamics between sulphate reduction and methanogenic bacteria. *Biodegradation.* 9: 187–199.

Kjeldsen, P.; Barlaz, M. A.; Rooker, P. A.; Baun, A.; Ledin, A.; Christensen, H. T. 2002. Present and long–term composition of MSW landfill leachate. *Environmental Science and Technology.* 32(4): 297–336.

Khattabi, H.; Aleya, L. 2007. The Dynamics of Macroinvertebrate Assemblages in Response to Environmental Change in Four Basins of the Etueffont Landfill Leachate (Belfort, France). *Water Air Soil Pollutants.* 185: 63–77.

Lee, V. G.; Yeh, T. H. 2008. Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics. *Materials Science and Engineering*. 485: 5–13.

Lynikienė, V.; Jaskelevičius, B. 2008. Sąvartynų filtrato įtaka požeminiams vandenims. Iš *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininku konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 3 d., pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 134–140.

Linsley, R. K.; Kohler, M. A.; Paulhus, J. H. 1958. *Hydrology for Engineers.* McGraw-Hill: NewYork 456 p.

LST EN 1361.7:1995 Mineralinės automobilių kelių medžiagos. Bandymo metodai. Tankio, vidutinio tankio, tankio koeficiento ir poringumo nustatymas.16 p.

LST EN 1360.8:1995. Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Vandens laidumo nustatymas.18 p.

LST EN 13450:2003. Geležinkelio balasto skalda. 33 p.

Lund, H. F. 2001. *Recycling Handbook*. McGraw–Hill, New York. 653 p.

Mclsaac, S. R.; Rowe, R. K.; Fleming, R. I.; Armstrong, M. D. 2000. Leachate collection system design and clog development. *In Proceedings 6th Environmental Engineering Specialty Conference of the CSCE, June 7 – 10,Ottawa, Canada.* 658–678.

McIsaac, R.; Rowe, R. K. 2007. Clogging of gravel drainage layers permeated with landfill leachate. *ADCE, Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering.* 56: 256–278.

McIsaac, R.; Rowe, R. K. 2005 Change in leachate chemistry and porosity as leachate permeates through tire shreds and gravel. *Canadian Geotechnical Journal*. 42: 1173–1188.

McIsaac, R.; Rowe, R. K. 2008. Effect of filter separators on the clogging of leachate collection systems. *Canadian Geotechnical Journal*. 43(7): 674–693.

Mlynarek, J.; Rollin, A. L. 1995. Bacterial clogging of geotext concerns, *In Proceedings Geosynthetics '95, June 5–8, Ottawa, Canada.* 177–188.

Mor, S.; Ravindra, K. R.; P. Dahiya, R. P.; Chandra, A. 2006. Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental Monitoring and Assessment.* 118: 435–456.

Moon, H. J.; Hong, K. 2000. Combined adsorption and chemical precipitation process for pretreatment or post – treatment of landfill leachate. *Korean Journal Chemical Engineering.* 17: 433–437.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research.* 12(3): 513–522.

Osaki, K.; Kashiwada, S.; Tatarazako, N.; Ono, Y. 2006. Toxicity testing of leachate from waste landfills using Medaka (Oryzias Latipes) from monitoring environmental safety. *Environmental Monitoring and Assessment.* 117: 73–84.

Paksy, A.; Peeling, L.; Robinson, J. P.; Powrie, W.; White, J. K. 1995. Landfill drainage as affixed bed bioreactor. *In Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, CISA publisher, Cagliari, Italy*. 681–690.

Paksy, A.; Powrie, W.; Robinson, J. P.; Peeling, L. 1998. A laboratorian investigation of Microbial clogging in granular landfill drainage media. *Geotechnique*. 43:389–401.

Paksy, A. 2002. *Microbial clogging of landfill drainage systems – experimental and theoretical studies.* PhD thesis. Queen Merry and Westfield College, University of London. 452 p.

Parkes, D. S.; Jolley, D. F.; Wilson, S. R. 2007. Inorganic nitrogen transformations in the treatment of landfill leachate with a high ammonium load: A case study. *Environmental Monitoring Assessment.* 124: 51–61.

Parkin, G. F.; Owen, W. F. 1996. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludge. *Journal of Environmental Engineering*. 112(5): 867–920.

Peeling, L.; Paksy, A.; Robinson, J. P. 1999. Removal of volatile acids from synthetic landfill leachate by anaerobic biofilms on drainage aggregates: a laboratory study. *Waste Management Research*. 17: 141–149.

Petraitis, E. 2009. Investigation of the Jerubaičiai landfill leachate. *Ekologija.* 1:86–92.

Principinis Vilniaus apskrities regioninio sąvartyno dugno pakloto struktūros skerspjūvis. 2010. [Žiūrėta 2009 m. lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą: http://www.vaatc.lt/index.phpid=104.

Powrie, W.; Paksy, A.; Robinson, J. P.; Peeling, L. 1997. Pilot scale fields trials of landfill drainage systems. *In Proceedings Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium*, CISA publisher, Cagliari, Italy: 373–382.

Powrie, W. 1999. Preface. Proceeding of institution of civil engineers. *Geotechnical Engineering.* 137: 179–180.

Powrie, W.; Robinson, J. P. 2000. The sustainable landfill bioreactor – a flexible approach to solid waste management. Sustainable Solid Waste Management in the Southern Black Sea Region. *Kluwer Academic Publishers.* 113–240.

Raymond, G. P. 2001. Failure/Reconstruction of a Gantry Crane Ballasted Track. *Canadian Geotechnical Journal*. 38: 507–529.

Raymond, G. P. 2002. Reinforced Ballast Behaviour subjected to Repeated Load. *Geotextiles and Geomembranes*. 20: 39–61.

Rajagopalan, R.; Tien, C. 1976. Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere in a cell porous media model. *Journal of Chemical Engineering*. 22(3): 523–533.

Rajiv, K.; Herat, S. 2002. A cost-effective microbial slurry technology for rapid composting of municipal solid wastes in waste dump sites in India and its feasibility for use in Australia. *The Environmentalist.* 2: 9–12.

Reddi, L. N.; Bonala, V. S. 1997. Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters. *ASCE Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering.* 123: 1143–1152.

Reddy, K. R.; Marella, A. 2001. Properties of different size scrap tire shreds: Implications on using as drainage material in landfill cover systems. *In: Proceedings of the Seventeenth International Conference on Solid Waste Technology and Management, October 2001, Philadelphia, PA*, USA. 1–19.

Rittmann, B. E.; Banaszak, J. E.; Cooke, A.; Rowe, R. K. 2003. Biogeochemical Evaluation of mechanisms controlling $CaCO_3$ precipitation in landfill leachate collection systems. ASCE *Journal of Environmental Engineering.* 129 (8): 733–730.

Rittmann, B. E.; Fleming, I. R.; Rowe, R. K. 1996. Leachate chemistry: its implications for clogging. *In: Proceedings of the North American Water and Environment Congress '96, June 1996. American Society of Civil Engineers, Anaheim, California* (CD-ROM).

Rollin, A. L. 1996. Bacterial clogging of geotextiles. *In: Proceedings Geofilters '96, Montreal, Quebec.* 125–134.

Rowe, R. K. 2001. *Barrier Systems, Chapter 25 of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook.* Kluwer Academic Publishing, Norwell, U.S.A. 739–788.

Rowe, R. K.; Cooke, A. J.; Rittmann, B. E.; Fleming, I. R. 1997. Some considerations in numerical modelling of leachate collection system clogging. *In: Lead Lecture, 6th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Montreal, Que., July.* 277–282.

Rowe, R. K. 1998. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. *In: Proceedings 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, IFAI, St .Paul.* 1: 27–103.

Rowe, K. R.; Armstrong, M. D.; Cullimore, D. R. 2000. Particle size and clogging of granular drainage media permieted with leachate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* 126(9): 775–786.

Rowe, R. K.; Booker, J. R. 1998. Modelling impacts due to multiple landfill cells and clogging of leachate collection systems. *Canadian Geotechnical Journal*. 35(1): 1–14.

Rowe, R. K. 1999. Solid waste disposal facilities for urban environments, *Proc XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engine Brazil*. 89–11.

Rowe, R. K.; Cooke, A. J. 2008. Modelling Landfill Leachate Induced Clogging of Field scale Test Cells (mesocosms). *Canadian Geotechnical Journal*. 45(11): 1497–1513.

Rowe, R. K.; Armstrong, M. D.; Cullimore, D. R. 2000. Mass loading and the rate of clogging due to municipal solid waste leachate. *Canadian Geotechnical Journal*. 37: 355–370.

Rowe, R. K.; Fleming, I. R. 1998. Estimating the Time for Clogging of Leachate Collection Systems. *In: Proceedings 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbon.* 1: 23–28.

Rowe, R. K.; McIsaac, R. 2005. Clogging of tire shreds and gravel permeated with landfill leachate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (6): 682–693.

Rowe, R. K.; Quigley, R. M.; Brachman, R. W. I.; Booker, J. R. 2004. *Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*. London: Taylor & Francis Books Ltd, 587 p.

Rowe, K. R.; Van Gluck, J. 2001. Clogging of leachate collection systems: from laboratory and field study to modelling and precipitation. *In: Proceedings GeoEnvironmental Conference, Smith, Futyus and Allman.* 158–179.

Rowe, R. K.; Van Gulck, J.; Millward, S. C. 2002. Biologically induced clogging of a granular medium permeated with synthetic leachate. *Journal Environmental Engineering Science*. 1: 135–156.

Saturated Hydraulic Conductivity: Water Movement Concepts and Class History [interaktyvus]. 2010. [Žiūrėta 2010 09 20]. Prieiga per internetą: http://soils.uSMa.gov/technical/technotes/note6.html#fig2.

Selice, E.; Wang, C.; Boes, N.; Herbell, J. D. 2006. Biodegradability of leachates from Chinese and German municipal solid waste. *Journal of Zhejiang University.*102: 309–321.

Siegmund, B. 1970. *Statistical and Computational Methods in Data Analysis.* INC. New York, 498 p.

Sinan Bilgili, M.; Demir, A.; Ozkaya, B. 2006. Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid waste. *Journal of Hazardous Materials.* 143: 177–183.

Spruogis, A.; Jeskeliavičius, B. 2000. *Atliekos ir jų tvarkymas.* Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 210 p.

Straub, W. A.; Lynch, D. R. 1982. Models of landfill leaching: Moisture flow and inorganic strength. *Journal of Environmental Engineering*. 108(2): 231–250.

Svensson, B. M. L.; Mathiasson, L. L.; Martensson, L.; Bergstrom, S. 2005. Artemia salina as test organism for assessment of toxicity of leachate water from landfills. *Environmental Monitoring and Assessment.* 102: 309–321.

Šimkus, J. 1984. *Gruntų mechanika, pagrindai ir pamatai.* Vilnius: Mokslas, 271 p.

Tatsi, A. A.; Zouboulis, A. I. 2002. A field investigation of quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece). *Advances in Environmental Research*. 6: 207–219.

Taylor, R. L.; Brown, C. B. 1967. Darcy flow solution with a free surface. *Journal of the Hydraulics Division*. 93(2): 25–33.

Thomas, C.; Barlaz, M. 1999. Production of Non-methane Organic Compounds During Refuse Decomposition in a Laboratory-scale Landfill. *Waste Management & Research.* 17: 462–475.

Xiao–lan, Z.; Wen–chuan, D.; Teng–rui, L.; Lei–lei, Z.; Cheng–bao, L. 2006. Influence of landfill structures on stabilization of fully recycled leachate. *Central South University of Technology.* 13(3): 353–357.

Van Gerven, T.; Cornelis, G.; Vandoren, E.; Vandecasteele, C. 2007. Effects of carbonation and leaching on porosity in cement-bound waste. *Waste Management*. 27: 977–985.

Van Gulck, J. F.; Rowe, R. K. 2004. Influence of Landfill Leachate Suspended Solids on Clog (Biorock) Formation. *International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology*. 24:723–738.

Van Gulck, J. F.; Rowe, R. K.; Rittmann, B. E.; Cooke, A. J. 2003. Predicting biogeochemical calcium precipitation in landfill leachate collection systems. *Biodegradation*. 14: 331–346.

Vasarevičius, S.; Čegariova, J.; Sližytė, D. 2005. Investigation and evaluation of landfill leachate permeability in the soil. *Journal of Engineering and Landscape Management.* 13(3): 108–115.

Wang, Z.; Banks, Ch. 2006. An investigation into the microbial clogging potential of selected filter media as a result of biodegradation of a high strength sulphate rich alkaline leachate. *Biodegradation.* 17: 415–422.

Warith, M. A.; Evgin, E.; Benson, P. A. S. 2004. Suitability of shredded tires for use in landfill leachate collection systems. *Waste Management.* 24: 967–979.

West, M. R.; Kueper, B. H.; Novakowski, K. S. 2004. Semi-analytical solutions for solute transport in fractured porous media using a strip source of finite width. *Advances in Water Resources*. 27:1045–1059.

Zhang, H.; He, P.; Shao, L.; Xin–Jie, L. 2008. Leaching behaviour of heavy metals from municipal solid waste incineration bottom ash and its geochemical modelling. *Journal of Material Cycles Waste Management.* 10: 7–13.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Bazienė, K.; Vasarevičius, S.; Baltrėnas, P.; Baltrėnaite, E. 2013. Influence of total precipitation and air temperature on the composition of municipal landfill leachate. *Environmental Engineering and Management Journal.* 12(1): 175–182. ISSN 1582-9596. IF= 1,004. (Thomson ISI Web of Science).

Bazienė, K.; Vasarevičius, S.; Siddiqui, A. 2012. Clogging test of different landfill drainable fillers. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(4): 301–306. ISSN 1648-6897 print, ISSN 1822-4199 online. IF=1,958. (Thomson ISI Web of Science).

Bazienė, K.; Vasarevičius, S. 2012. Analysis of a municipal landfill drainage layer using tyre shreds and rubble. *„Mokslas – Lietuvos ateitis" Aplinkos apsaugos inžinerija.* ISSN 2029-2341. 4(5): 430–434 (Index Copernicus).

Straipsniai kituose leidiniuose

Vasarevičius, S.; Bazienė, K. 2011. Effect of precipitation on leachate parameters causing colmatation of landfill drainage layer, *The 8th International conference*

„Enviromental engineering“ selected papers, May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania. Vilnius:Technika, ISBN 978-9955-28-831-2. 1: 432–436 (ISI Proceedings).

Bazienė, K.; Vasarevičius, S. 2011. Skirtingos sudėties drenažinio sluoksnio poveikis sąvartyno filtrato sudėčiai. *Aplinkos apsaugos inžinerija, 14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ straipsnių rinkinys (2011 m. balandžio 14 d.).* Vilnius: Technika. ISSN 2029-5456. ISBN 978-9955-28-956-2. 95–99 (Index Copernicus).

Bazienė, K.; Vasarevičius, S. 2010. Komunalinių atliekų sąvartyno filtrato susidarymo ir sudėties įvertinimas. *Aplinkos apsaugos inžinerija: 13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ straipsnių rinkinys (2010 m. kovo 25 d.).* Vilnius: Technika. ISSN 2029-5456. 146–151.

Kristina BAZIENĖ

KOLMATACIJOS PROCESŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR LĖTINIMO PRIEMONIŲ TAIKYMAS SĄVARTYNAMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija (04T)

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF CLOGGING PROCESSES AND IMPLEMENTATION OF MITIGATION MEASURES IN LANDFILLS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (04T)

2013 05 09. 10,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius