



**Kauno technologijos universitetas**  
Statybos ir architektūros fakultetas

**Savaime susitankinančio grunto savybių tyrimai ir  
panaudojimo galimybių analizė**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Žilvinas Lapinskas**  
Projekto autorius

**Prof. dr. Žymantas Rudžionis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Savaime susitankinančio grunto savybių tyrimai ir panaudojimo galimybių analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Žilvinas Lapinskas**

Projekto autorius

**Prof. dr. Žymantas Rudžionis**

Vadovas

**Lekt. dr. Gediminas Stelmokaitis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Žilvinas Lapinskas

## **Savaime susitankinančio grunto savybių tyrimai ir panaudojimo galimybių analizė**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Žilvino Lapinsko, baigiamasis projektas tema „**Savaime susitankinančio grunto savybių tyrimai ir panaudojimo galimybių analizė**“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Lapinskas Žilvinas. Savaimė susitankinančio grunto savybių tyrimai ir panaudojimo galimybių analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas / prof. dr. Žymantas Rudžionis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir Architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: Gruntas, savaiminis sutankėjimas, grunto tyrimai.

Kaunas, 2020. 46 p.

## Santrauka

Magistro baigiamojo projekto tikslas - Ištirti plastiškojo molio ir smulkiagrūdžio grunto tinkamumą panaudoti savaimė susitankinančių modifikuotų gruntų gamybai ir nustatyti esmines pagaminto produkto savybes. Magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

1. Pagaminti nesisluoksniuojantį, nesegreguojantį ir neturintį vandens atsiskyrimo požymių savaimė susitankinančio grunto mišinį;
2. Ištirti savaimė susitankinančio grunto savybių kitimą esant skirtingiems smėlio/molio santykiams grunte;
3. Atlikti savaimė susitankinančių gruntų su skirtingais smėlio/molio santykiais grunte mikrostruktūrinę analizę;
4. Nustatyti savaimė susitankinančių gruntų pakartotinės iškasos gebą;

Tyrimo metu buvo pagaminti 6 skirtingų sudėčių savaimė susitankinančio grunto mišiniai. SSG mišiniams buvo nustatytos pasklidos ir klampumo klasės, o sukietėjusiems bandiniams buvo atlikti stiprumo gniuždant, tamprumo modulio, pakartotinės iškasos gebos nustatymo tyrimai po 7, 14, 28, 56, 112 parų kietėjimo. Buvo nustatyti bandinių drėgniai ir tankiai. Taip pat buvo atlikta mikroskopinė analizė ir energijos dispersijos spektroskopija. Nustatytos mišinių pasklidos atitiko SF1 ir SF2 klases, klampa – VS1 klasę. Išmatuoti bandinių drėgniai 14,5% - 68,2%, tankiai 1580,53 - 1954,92 kg/m<sup>3</sup>. Gauti bandinių stiprumai gniuždant buvo 0,16 - 1,15 MPa, tamprumo moduliai 51,36 – 307,5 MPa. Pagaminti SSG bandiniai buvo sunkiai, vidutiniškai ir lengvai pakartotinai iškasami. Ištirta, kad didėjant smėlio/molio santykiui grunte didėja stiprumas gniuždant, tamprumo modulis, tankis, bei sunkėja pakartotinės iškasos geba. Atlikus mikroskopinę analizę pastebėta, kad didėjant smėlio/molio santykiui grunte, mišiniai gaunami homogeniški. Pastebėta, kad smėlio dalelės sumaišius su moliu suveikia kaip abrazyvinė medžiaga ir išskaido molio flokulus, todėl rekomenduojama gaminant savaimė susitankinantį gruntą iš molio į gruntą įmaišyti bent 40% smėlio.

Magistro baigiamąjį darbą sudaro 17 vnt. lentelių, 37vnt. paveikslų, 15 literatūros šaltinių.

Lapinskas Žilvinas. Investigation of self-compacting soil properties and application possibilities analysis. Master's Final Degree Project / supervisor / prof. dr. Žymantas Rudžionis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05).

Keywords: Soil, self compacting, soil research.

Kaunas, 2020. 46 p.

### Summary

The purpose of the Master's thesis - Investigate the suitability of plastic clay and fine-grained soils for the production of self-compacting modified soils and identify the essential characteristics of the produced product. Tasks of Master's final project:

1. Produce a self-compacting soil that is non-layered, non-segregating and does not exhibit water separation characteristics;
2. Investigate the change of self-compacting soil properties at different sand / clay ratios in soil;
3. Perform microstructural analysis of self-compacting soils with different sand / clay ratios in soil;
4. Determine the re-excavation ability of self-compacting soils.

During the research 6 different compositions of self-compacting soil were prepared. Diffusion and viscosity classes were determined of the self-compacting soil mixtures. Hardened specimens were subjected to compression strength, modulus of elasticity, and re-excavation tests, after 7, 14, 28, 56, 112 days of curing. The observed dispersions of the mixtures corresponded to classes SF1 and SF2, viscosity - to class VS1. The moisture content of the samples was 14.5% - 68.2%, densities 1580.53 - 1954.92 kg/m<sup>3</sup>. The obtained compressive strengths of the specimens were 0.16 - 1.15 MPa, elastic modulus 51.36 - 307.5 MPa. The produced self-compacting soil specimens were difficult, moderate and easy to re-excavate. It has been investigated that as the sand / clay ratio increases, the compression strength, modulus of elasticity, density increases and the ability of re-excavation getting worse. After proceeding microscopic analysis it was observed that with increasing sand / clay ratio in the soil the mixtures are getting more homogeneous. Have been found that sand particles act as an abrasive when mixed with clay and decompose the clay flocculant, so it is recommended to mix at least 40% sand in self-compacting soil mixture.

Master's Final Degree Project consist of 17pcs. of tables, 37pcs. of images, 15 references.

.

## Turinys

Lentelių sąrašas .....	7
Paveikslų sąrašas .....	8
Santrumpų ir terminų sąrašas .....	9
1. Įvadas.....	10
2. Literatūros apžvalga .....	12
3. Magistro baigiamojo projekto tikslai ir uždaviniai.....	23
4. Naudotos medžiagos ir tyrimų metodai.....	24
5. Rezultatai.....	34
Išvados .....	45
Literatūros sąrašas .....	46

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Pasklidimo ir klampos $t_{500}$ klasės [5]. .....	14
<b>2 lentelė.</b> Savaimė susitankinančio grunto tankio klasifikacijos ribos.....	15
<b>3 lentelė.</b> Savaimė susitankinančio grunto klasifikavimas pagal deformacijų modulio gautas reikšmes [6]. .....	15
<b>4 lentelė.</b> Savaimė susitankinančio grunto vandens pralaidumo markės ir jų apibūdinimas [6]. .....	15
<b>5 lentelė.</b> Savaimė susitankinančio grunto stiprėjimo ribos $f_z$ rodiklio vertės ir CBR $f_z$ rodiklio savaimė susitankinančio grunto produkto pakartotinos iškasos gebos įvertinimui [6]. .....	16
<b>6 lentelė.</b> Dozavimo parametrai, pagal kuriuos nustatytos sklaidos priklausomybės [1] .....	18
<b>7 lentelė.</b> Savaimė susitankinančio grunto sklaidos tyrimo rezultatai įtraukiant fibras į mišinį [2].	20
<b>8 lentelė.</b> Stiprumo gniuždant rezultatai [2]. .....	21
<b>9 lentelė.</b> Stiprumo gniuždant rezultatai (Savaimė susitankinančio grunto bandiniai su fibromis) [2]. .....	22
<b>10 lentelė.</b> Smėlio granulimetrinė sudėtis .....	24
<b>11 lentelė.</b> Carbofill bandinių bandymų rezultatai .....	24
<b>12 lentelė.</b> Naudotų medžiagų kiekiai mišiniuose.....	24
<b>13 lentelė.</b> Savaimė susitankinančio grunto mišinio pasklida.....	34
<b>14 lentelė.</b> Bandinių drėgniai, tankiai ir stiprumas gniuždant.....	34
<b>15 lentelė.</b> Bandinių jungo moduliai .....	38
<b>16 lentelė.</b> Energijos dispersijos spektroskopijos rezultatai.....	41
<b>17 lentelė.</b> $F_z$ rodiklio skaičiavimų rezultatai .....	44

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Kauno Technologijos Universiteto Statybos ir Architektūros fakulteto pamato hidroizoliacijos darbai naudojant SSG .....	10
<b>2 pav.</b> Bremeno uosto užteršto grunto panaudojimo kratinių sutvirtinimui darbai.....	11
<b>3 pav.</b> Savaime susitankinančio grunto panaudojimas vamzdynų tiesime .....	12
<b>4 pav.</b> Savaime susitankinančio grunto panaudojimas nuotekų valymo įrenginių įrengime .....	13
<b>5 pav.</b> Grunto gniuždymo stiprio klasifikavimas pagal pakartotinės iškasos gebą [6] .....	16
<b>6 pav.</b> Savaime susitankinančio grunto gamybos technologija atliekant tyrimus laboratorijoje [2] .....	17
<b>7 pav.</b> Mašina naudojama savaime susitankinančio grunto gamybai statybos darbų aikštelėje [7] .	17
<b>8 pav.</b> Sklaidos priklausomybė nuo vandens ir grunto santykio [1] .....	18
<b>9 pav.</b> Sklaidos priklausomybė nuo vandens ir cemento santykio [1] .....	18
<b>10 pav.</b> Sklaidos priklausomybė nuo vandens ir grunto su cementu santykio [1] .....	19
<b>11 pav</b> Sklaidos priklausomybė nuo superplastiklio ir cemento santykio [1].....	19
<b>12 pav</b> Sklaidos priklausomybė nuo cemento ir grunto santykio [1].....	19
<b>13 pav</b> Savaime susitankinančio grunto stiprumo gniuždant priklausomybė nuo vandens ir cemento santykio [1] .....	20
<b>14 pav</b> Savaime susitankinančio grunto stiprumo gniuždant priklausomybė nuo sklaidos [1] .....	21
<b>15 pav</b> Savaime susitankinančio grunto stiprumo gniuždant priklausomybė nuo laiko [2] .....	21
<b>16 pav</b> Savaime susitankinančio grunto mišinys .....	25
<b>17 pav</b> Savaime susitankinančio grunto mišinio pasklidos matavimas .....	26
<b>18 pav</b> Savaime susitankinančio grunto bandiniai .....	26
<b>19 pav</b> Drėkinimo kameroje sandėliuojami į maišus sudėti savaime susitankinančio grunto bandiniai. ....	27
<b>20 pav</b> Svarstyklės KERN PCB 6000-1 [10] .....	28
<b>21 pav</b> Žemos temperatūros krosnis SNOL 200/200 LSN11 [11].....	28
<b>22 pav</b> Elektroninis slankmatis QSTEXPRESS.....	29
<b>23 pav</b> Gniuždomas savaime susitankinančio grunto bandinys Toni Technik įranga. ....	29
<b>24 pav</b> Jėgos ir deformacijos kreivė programoje testXpert.....	30
<b>25 pav</b> Bandiniai paruošti atlikti mikroskopinę analizę .....	31
<b>26 pav</b> Daugiafunkcinis švytuoklinis įrankis Makita TM3010CX2J.....	31
<b>27 pav</b> Skenuojantis elektroninis mikroskopas Hitachi S-3400N [12] .....	32
<b>28 pav</b> EDS detektorius Bruker Quad 5040 .....	32
<b>29 pav</b> Stiprio gniuždant priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte po 7, 14, 28, 56, 108 parų kietėjimo .....	35
<b>30 pav</b> Medžiagos tankio priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte.....	36
<b>31 pav</b> Visų bandinių stiprumo gniuždant priklausomybės nuo kietėjimo laiko .....	37
<b>32 pav</b> Tamprumo modulio priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte, po 7 parų kietėjimo .....	38
<b>33 pav</b> Tamprumo modulio priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte, po 54 parų kietėjimo .....	38
<b>34 pav</b> SSG bandinio su 0% smėlio, 100% molio grunte EDS rezultatai.....	40
<b>35 pav</b> SSG bandinio su 100% smėlio, 0% molio grunte EDS rezultatai.....	40
<b>36 pav</b> SSG bandinių su 0%, 40%, 60%, 100% smėliu grunte vaizdai priartinti 150 kartų .....	42
<b>37 pav</b> SSG bandinių su 100% ir 0% smėlio grunte vaizdai priartinti 4000 kartų. ....	43



## **Santrumpų ir terminų sąrašas**

### **Santrumpos:**

SSG – Savaiame susitankinantis gruntas

## 1. Įvadas

Neapdirbta žemė nuo senovės buvo naudojama mūro gamybai, kuri apima saulėje džiovintas plytas, suspausto grunto sluoksnius tarp formų ir suspaustus žemės blokus. Medžiagos sukurtos iš grunto neturi atsparumo vandens poveikiui ir tokių gaminių matmenys yra labai skirtingi, nestabilūs. Tačiau šios savybės gali būti stipriai pagerintos naudojant hidraulinius rišiklius tokius kaip cementą ir kalkes. Sutankinto grunto mišinių gamybai paprastai naudojamos optimalios drėgmės mišinys, kuris gaunamas atliekant prokatorių testą. Šis testas leidžia parinkti mišinį maksimalaus tankio ir maksimalaus stiprumo.

Literatūroje yra tik keletas mokslinių straipsnių apie savaime susitankinantį gruntą. Tai yra naujovė, kuri dar labai mažai išnagrinėta. Praktikoje savaime susitankinantis gruntas jau naudojamas. Tačiau įmonės atlikusios tyrimus ir naudojančios šią technologiją, nesidalina informacija.

Savaime susitankinantis gruntas buvo panaudotas renovuojant Kauno Technikos Universiteto Statybos ir Architektūros fakultetą. SSG mišiniu buvo užpilti atkasti pamatai. Praėjus tik 1 parai mišinys jau buvo sukietėjęs, tam nereikėjo jokių papildomų tankinimų. Po paros su mini ekskavatoriumi buvo suformuota nuožulna ir taip sukurta hidroizoliacija pamatams.



**1 pav.** Kauno Technologijos Universiteto Statybos ir Architektūros fakulteto pamato hidroizoliacijos darbai naudojant SSG

Savaime susitankinantis gruntas buvo panaudotas sustiprinant Bremeno ir Turko uostų krantines. SSG buvo maišomas statybvietėje. Iš uosto ekskavatoriaus kaušu buvo išsemiamas dumblis. Šiuose uostuose vanduo buvo smarkiai užterštas. Išsemtuose dumbluose buvo matyti įvairių šiukšlių, tarp jų net padangų. Visas šis išsemtas dumblis buvo išpilamas į keltą. Iš kelto mažesniu kaušu buvo imami dumbliai ir kraunami į SSG gaminančią mašiną. Mašinoje dumblis buvo sumaišomas su priedais ir išpilamas atgal į uosto krantą. Tokiu būdu buvo sustiprinta krantinė ir stabilizuotas taršus gruntas.



**2 pav.** Bremeno uosto užteršto grunto panaudojimo kratinių sutvirtinimui darbai

## 2. Literatūros apžvalga

Savaime susitankinantis gruntas (SSG) – grunto, cemento, vandens, lakiųjų pelenų ir superplastiklių mišinys. Savaime susitankinantis gruntas šiuo metu yra inovacija ir dar nėra pilnai ištirtas objektas, bei nėra plačiai naudojamas. SSG būtų galima pagerinti atliekant optimaliausios sudėties paieškos tyrimus, tyriant SSG padarytus su skirtingomis proporcijomis medžiagų, bei papildomai įmaišant propileno fibrų. Kol kas plačiai naudojamas tik Vokietijoje, Lietuvoje dar visai nenaudojamas dalykas. Savaime susitankinantis gruntas panaudojamas:

- kanalizacijos vamzdynų tiesimui;
- dujų vamzdynų tiesimui;
- komunikacijų tranšėjų užpylimui;
- hidrotechniniuose statiniuose;
- pamatų pagrindų sustiprinimui;
- kelių statyboje;
- šlaitų sutvirtinimui;
- užteršto grunto kenksmingų priemaišų imobilizavimas;
- ertmių užpildymui.

Savaime susitankinančio grunto privalumai:

- nereikia vibruoti klojant ir tankinant;
- greičiau atliekami statybos darbai;
- galimas antrinis grunto panaudojimas;
- mažina žemės darbų kaštus;
- galimybė produktą paruošti gamykloje arba statybų aikštelėje
- galimybė imobilizuoti užterštus gruntuos;
- mažos tūrinės deformacijos;
- apsaugos komunikacijas nuo augalų;



**3 pav.** Savaime susitankinančio grunto panaudojimas vamzdynų tiesimui.



**4 pav.** Savaiame susitankinančio grunto panaudojimas nuotekų valymo įrenginiams

Savaiame susitankinantis gruntas pasižymi geromis sklaidos, apkrovos atlaikymo, perdirbimo, savybėmis. Statybos darbų metu savaiame susitankinančio grunto nereikia tankinti naudojant vibracinę ar kitokią tankinimo įrangą, todėl išvengiama apkrovų vamzdžiams. Savaiame susitankinantis gruntas yra vandenį išstumianti medžiaga, bei apsauganti vamzdžius nuo augalų šaknų įsiskverbimo. Ši medžiaga taip pat mažina darbų sąmatas tiesiant vamzdynus po keliais, kadangi reikia suardyti mažiau kelio dangos, nei tiesiant vamzdynus įprastiniu būdu.

## **2.1. Medžiagos naudojamos savaiame susitankinančio grunto gamybai**

### **2.1.1. Gruntas**

Savaiame susitankinančio grunto gamybai gali būti naudojami gruntai esantys viršutinėje žemės plutos dalyje iš diskretiškų dalelių susidariusios nuogulos (taip pat dėl žmogaus ūkinės ar gamybinės veiklos susiformavusios tvirtos atliekos), sudarančios daugiakomponentinę sistemą iš kietųjų dalelių, vandens ir oro. Savaiame susitankinančio grunto gamybai gali būti panaudotas ir statybos proceso metu iškasami gruntai, bei įvairios gamybos atliekos (atsijos susidariusios gamybos metu, trupintų uolienu liekanos, pelenai, šlakai ir kt.).

### **2.1.2. Rišikliai**

Savaiame susitankinančio grunto mišinių gamybai gali būti naudojami cemento, kalkių rišikliai, arba hidraulinis kelių rišiklis HRB E 4, arba jų pagrindu pagaminti mišrūs rišikliai.

Cementas – hidraulinė rišamoji medžiaga, gaunama į miltelius sumalant klinkerį, kuris gaunamas iškaitinant iki sukepimo tam tikros sudėties žaliavų mišinį, užtikrinant reikiamą klinkerio mineralinę sudėtį. Cemento gamybos metu klinkerio malimo procese gali būti įdedama priedų, tokių kaip gipso rišimosi trukmei reguliuoti ir aktyviųjų mineralinių priedų – šlakų, pelenų, pucolaninių priedų ir kt. [3].

Hidraulinis kelių rišiklis HRB E 4 – naudojamas kelio, geležinkelio, oro uosto ar kitų infrastruktūros objektų pagrindo sluoksniams ir pasluoksniams bei sankasos viršutiniams sluoksniams, taip pat žemės darbų medžiagoms apdoroti. Hidraulinio kelių rišiklio HRB E 4 eksploatacinės savybės:

- ankstyvasis gniuždymo stipris -  $\geq 16,0$  MPa;

- standartinis gniuždymo stipris –  $\geq 32,5 \text{ MPa} \leq 52,5 \text{ MPa}$ ;
- rišimosi pradžia – 60min;
- tūrio pastovumas -  $\leq 10\text{mm}$ ;
- sulfatų (SO<sub>3</sub>) kiekis -  $\leq 4\%$  [4].

Kalkės – orinė rišamoji medžiaga, gaunama išdegant iki sukepimo kalcio karbonatines uolienas: klintis, dolomitizuotas klintis, mergelingas klintis, dolomitą, kreidą. Degimo metu (900-1200 °C temperatūroje) klintys dekarbonizuojasi ir virsta kalcio oksidu t.y. negesintomis kalkėmis. Pagal MgO kiekį sudėtyje ir žaliavos cheminę sudėtį klintys skirstomos į:

- kalcitines, kai MgO yra iki 5%;
- magnezines, kai MgO yra 5-20%;
- dolomitines, kai MgO yra 20–40%. [3].

### 2.1.3. Kitos medžiagos

Savaime susitankinančio grunto mišiniams paruošti gali būti naudojami priedai – lakieji pelenai, superplastikliai.

Lakieji pelenai – gaunami kaip šalutinis produktas deginant anglį arba bio-kurą.

Superplastikliai – priedai didinantys mišinio plastiškumą (klojumą) arba mažinantys mišinio užmaišymui reikalingą vandens kiekį, esant tam pačiam mišinio plastiškumui. Plastifikuojantys priedai yra paviršių aktyvinančios medžiagos, kurios sumažina mišinio skystosios fazės (plastiklio tirpalo vandenyje) paviršiaus įtempį ir padidina kietosios fazės drėkinimą. Dėl to atsiranda dispergavimo efektas ir taip sumažėja mišinio klampumas.

## 2.2. Pagrindinės savaime susitankinančio grunto savybės

### 2.2.1. Reologinės savaime susitankinančio grunto savybės

Pasklidimas ir klampa– viena pagrindinių savaime susitankinančio grunto reologinių savybių. Nuo mišinio pasklidimo ir klamos priklauso mišinio panaudojimo galimybės. Mišinio pasklidimas ir klampa nustatoma pagal standartą LST EN 12350-8. Pasklidimo ir klamos klasės:

**1 lentelė.** Pasklidimo ir klamos  $t_{500}$  klasės [5].

Pasklidimo klasės	Pasklida naudojant standartinį kūgį, mm	Klamos $t_{500}$ klasės	Stiliaus naudojimo aprašymas Pasklidimo iki 500mm laikas $t_{500}$ , s
SF1	550...650	VS1	<2
SF2	660...750	VS2	$\geq$
SF3	760...850		

### 2.2.2. Fizikinės – mechaninės savaime susitankinančio grunto savybės

Tankis – nustatomas vadovaujantis standartu LST EN 12390-7.

**2 lentelė.** Savaime susitankinančio grunto tankio klasifikacijos ribos.

Klasė pagal tankį	D1.4	D1.6	D1.8	D2.0	D>2.0
Tankis, kg/m <sup>3</sup>	≤1400	>1400 ≤1600	>1600 ≤1800	>1800 ≤2000	>2000

Stiprumas gniuždant – nustatomas pagal standartą LST EN 13286-41 arba LST EN 12390-3. Preso tikslumas turi būti toks, kad būtų galimybė išmatuoti apkrovą 1% tikslumu. Savaime susitankinančio grunto stiprumo gniuždant bandymams atlikti tinkami presai atitinkantys standarto LST EN 12390-4 reikalavimus. Pagal sukietėjusio savaime susitankinančio grunto gniuždomąjį stiprį, produktą galima klasifikuoti į:

- pakartotinai iškasamą iki 1,2 MPa;
- mažo stiprio gniuždant iki 1,2-2 MPa;
- vidutinio stiprumo gniuždant 2-5 MPa;
- stiprus savaime susitankinantis gruntas > 5 MPa.

Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklis (CBR) – nustatomas vadovaujantis standartu LST EN 13286-47. Grunto stiprumas įvertinamas CBR rodikliu, apskaičiuotu esant 2,5mm arba 5mm šampo įspaudu gyliui. Rezultatas (CBR rodiklis) pateikiamas procentine išraiška, kuris nusako tiriamojo (išbandyto) savaime susitankinančio grunto produkto procentinę atitiktį standartinio grunto vertei, kuri yra prilyginta 100% [6].

Deformacijos modulis – nustatomas statinės plokštės metodu, vadovaujantis standartu LST 1360-5.

**3 lentelė.** Savaime susitankinančio grunto klasifikavimas pagal deformacijų modulio gautas reikšmes [6].

Savaime susitankinančio grunto produkto klasė pagal $E_{v2}$ reikšmę.	$E_{v2}$ reikšmė, MPa (MN/m <sup>2</sup> )	Savaime susitankinančio grunto produkto apibūdinimas
$3E_{v2}$	$E_{v2} \geq 45$	Stabilus pagrindo sluoksnis
$2E_{v2}$	$20 < E_{v2} < 40$	Vidutinio stabilumo pagrindo gruntas
$1E_{v2}$	$E_{v2} \leq 20$	Mažo stabilumo pagrindo sluoksnis

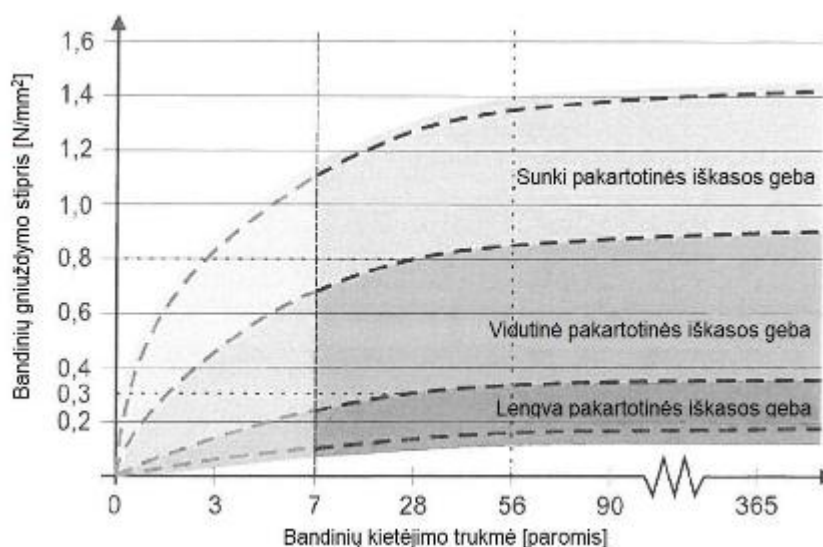
Pralaidumas vandeniui – nustatomas pagal standartą LST EN ISO 17892-11.

**4 lentelė.** Savaime susitankinančio grunto vandens pralaidumo markės ir jų apibūdinimas [6].

Savaime susitankinančio grunto produkto vandens pralaidumo markė	Savaime susitankinančio grunto vandens pralaidumo apibūdinimas	Pralaidumo vandeniui koeficiento k reikšmė, m/s
K <sub>1</sub>	Labai stipriai pralaidus vandeniui	$K_1 > 10^{-2}$ m/s
K <sub>2</sub>	Stipriai pralaidus vandeniui	K <sub>2</sub> nuo $10^{-2}$ m/s iki $10^{-4}$ m/s
K <sub>3</sub>	Pralaidus vandeniui	K <sub>3</sub> nuo $10^{-4}$ m/s iki $10^{-6}$ m/s
K <sub>4</sub>	Silpnai pralaidus vandeniui	K <sub>4</sub> nuo $10^{-6}$ m/s iki $10^{-8}$ m/s
K <sub>5</sub>	Labai silpnai pralaidus vandeniui	$K_5 < 10^{-8}$ m/s

Pakartotinės iškasos geba – parametras nurodantis grunto iškasimo sudėtingumo lygį. Šį parametraž reikia įvertinti tokiais atvejais, kada reikia vengti nepageidaujamo savaime susitankinančio grunto ilgalaikio stiprėjimo kietėjimo metu t.y. atvejais kai produktas naudojamas užpildant komunikacijų tranšėjas ar užpildant likusias ertmes po statybos darbų, pro kurias nutiestos miesto komunikacijos.

Kaip pagalbinė priemonė įvertinant savaime susitankinančio grunto pakartotinės iškasos gebą, nustatoma produkto gniuždymo stipris po 7 ir 56 parų kietėjimo [6].



5 pav. Grunto gniuždymo stiprio klasifikavimas pagal pakartotinės iškasos gebą [6]

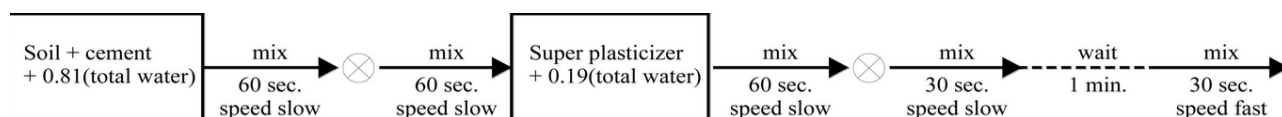
5 lentelė. Savaime susitankinančio grunto stiprėjimo ribos  $f_z$  rodiklio vertės ir CBR  $f_z$  rodiklio savaime susitankinančio grunto produkto pakartotinės iškasos gebos įvertinimui [6].

	Savaime susitankinančio grunto vid. Bandinių gniuždymo stipris po 28 parų kietėjimo, MPa (N/mm <sup>2</sup> )		
Gniuždymo stipris	Iki 0,3 N/mm <sup>2</sup>	Nuo 0,3 iki 0,8N/mm <sup>2</sup>	Nuo 0,8 iki 1,2 N/mm <sup>2</sup>
Pakartotinės iškasos geba	Lengva (LPIG)	Vidutinė (VPIG)	Sunki (SPIG)
	Rankiniu būdu	Galimi lengvi įrankiai	Būtinai įrankiai
Naudoti įrankiai	Semtuvas, kastuvas	Kirtiklis, mini ekskavatoriaus kaušas	Ekskavatoriaus kaušas, suspausto oro arba hidraulinis kaltas
	Savaime susitankinančio grunto kietėjimo trukmė 7-56 paros.		
Gniuždymo stipris $f_z$	< 0,15 N/mm <sup>2</sup>	< 0,2 N/mm <sup>2</sup>	-
CBR $f_z$ vertė	< 12 %	< 15 %	-

Jautrumas šalčiui – nustato įvertinus CBR rodiklio reikšmę. Jautrumas šalčiui klasifikuojamas į 3 klases [6]:

1.  $F_{g1}$  - > 30 (CBR reikšmė %) – nejautrus šalčiui;
2.  $F_{g2}$  – 8-30 (CBR reikšmė %) – vidutiniškai jautrus šalčiui;
3.  $F_{g3}$  – 8 (CBR reikšmė %) – labai jautrus šalčiui.

### 2.3. Savaime susitankinančio grunto gamybos technologija



⊗ removing material adhering on the wall and mixing blades



**6 pav.** Savaimė susitankinančio grunto gamybos technologija atliekant tyrimus laboratorijoje [2]

Savaimė susitankinančio grunto gamybos technologija skirstoma į dvi grupes:

- produktas gaminamas gamykloje;
- produktas gaminamas statybos darbų aikštelėje.

Abiem gamybos atvejais yra sumaišomas sausas gruntas su rišikliu, išmaišius sausas medžiagas, pilama apie 80% viso vandens kiekio ir maišoma iki kol mišinys tampa vienalytis. Tada pridedami priedai, superplastikliai ir mišinys dar kartą išmaišomas. Išmaišius mišinį dar kartą, nustatoma mišinio sklaida. Jei reikia mišinio su didesne sklaida, pilamas vanduo ir maišoma dar kartą. Procedūra kartojama kol gaunama reikiama mišinio sklaida.

Savaimė susitankinantį gruntą gaminant gamykloje visos medžiagos sumaišomos gamykloje ir po to specialiomis autotransporto priemonėmis produktas gabenamas į statybų aikštelę ir išpilamas į reikiamą vietą. Kai produktas gaminamas statybos aikštelėje, naudojamas statybvietyje iškastas gruntas. Specialiomis mašinomis iškastas gruntas vietoje yra papildomas reikiamu kiekiu rišiklio, priedų bei vandens. Viskas gerai išmaišoma ir supilama atgal į reikiamą vietą.



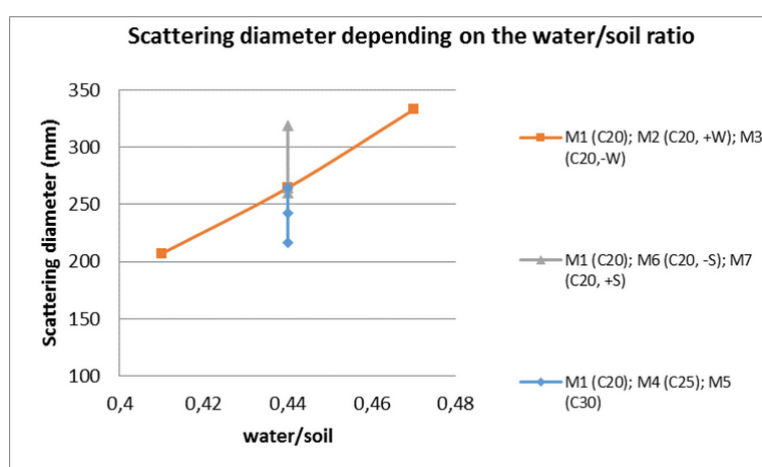
**7 pav.** Mašina naudojama savaimė susitankinančio grunto gamybai statybos darbų aikštelėje [7]

#### **2.4. Atlikti savaimė susitankinančio grunto moksliniai tyrimai**

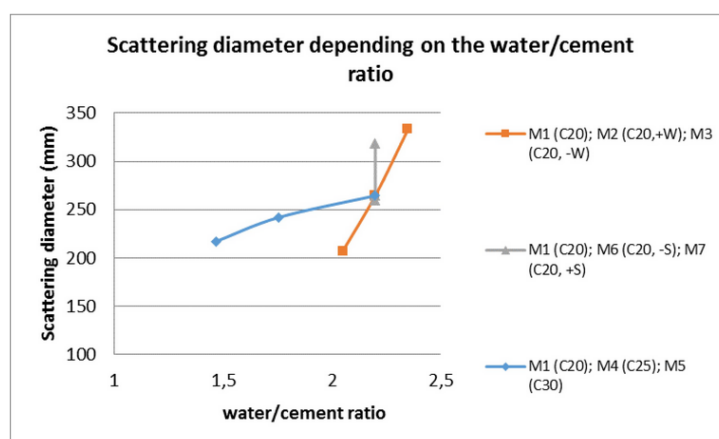
Marco Antônio de Morais Alcantara, Sandra Conceição Barbosa Nunes, João Filipe Meneses Espinheira Rio ir Dario Cardoso de Lima atliko savaimė susitankinančio grunto tyrimą, gautus rezultatus pateikė straipsnyje: *Reologinės ir mechaninės savybės savaimė susitankinančio grunto-cemento*<sup>[1]</sup>. Savaimė susitankinančio grunto sklaidos priklausomybės:

**6 lentelė.** Dozavimo parametrai, pagal kuriuos nustatytos sklaidos priklausomybės [1]

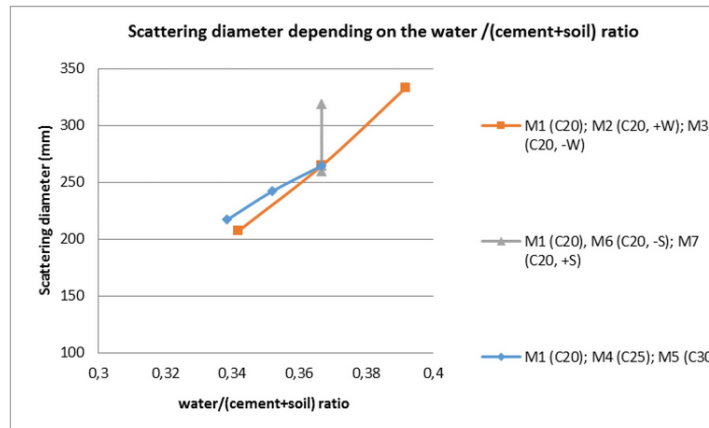
Parametrai	Mišinys						
	1 M1 (C20)	2 M2 (C20,+W)	3 M3 (C20,- W)	4 M4 (C25)	5 M5 (C30)	6 M6 (C20,-S)	7 M7 (C20,+S)
Vanduo/cementas	2,2000	2,3500	2,0500	1,7567	1,4667	2,2000	2,2000s
Vanduo/(cementas+gruntas)	0,3667	0,3917	0,3417	0,3519	0,3385	0,3667	0,3667
Vanduo/gruntas	0,4400	0,4700	0,4100	0,4400	0,4400	0,4400	0,4400
Superplastiklis/cementas	0,0400	0,0400	0,0400	0,0319	0,0267	0,0331	0,0464
Cementas/gruntas	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000



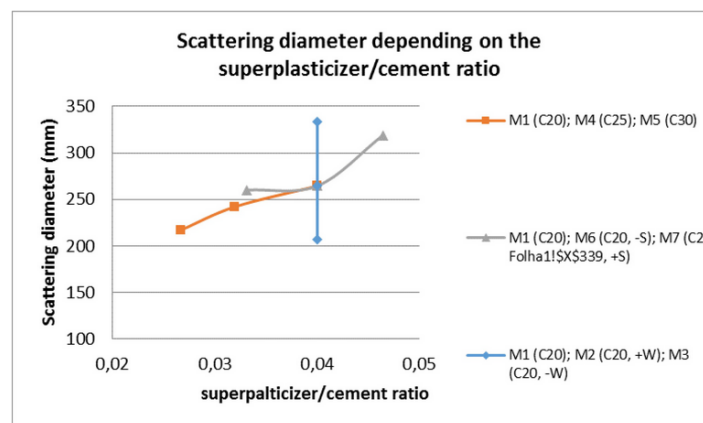
**8 pav.** Sklaidos priklausomybė nuo vandens ir grunto santykio [1]



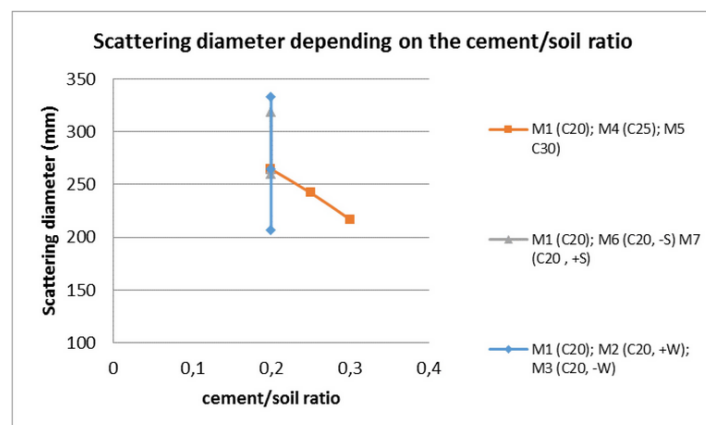
**9 pav.** Sklaidos priklausomybė nuo vandens ir cemento santykio [1]



10 pav. Sklaidos priklausomybė nuo vandens ir grunto su cementu santykio [1]



11 pav. Sklaidos priklausomybė nuo superplastiklio ir cemento santykio [1].



12 pav. Sklaidos priklausomybė nuo cemento ir grunto santykio [1].

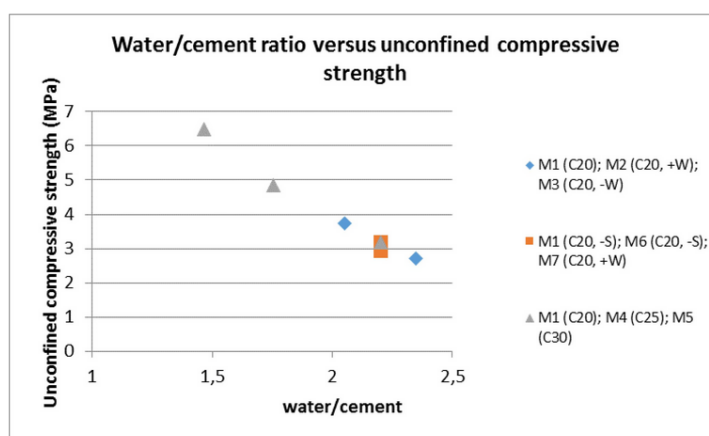
Analogišką tyrimą atliko ir Rio de žaneiro universiteto dėstytojai Adriana Martins, Flavio de Andrade Silva ir Romildo Dias Toledo Filho. Šie dėstytojai papildomai į tyrimą įtraukė fibras. Rezultatus paskelbė straipsnyje: *Savaime susitankinančio grunto-cemento fibrų kompozito mechaninės savybės*<sup>[2]</sup>.

7 lentelė. Savaimė susitankinančio grunto sklaidos tyrimo rezultatai įtraukiant fibras į mišinį [2].

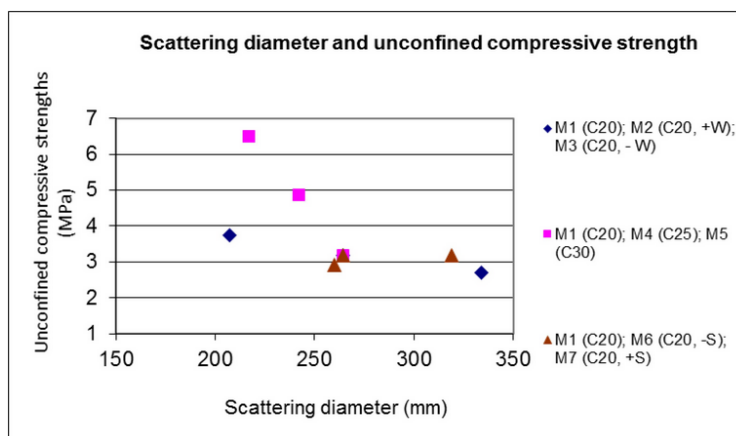
Fibrų kiekis, %	Fibrų ilgis, mm	SP kiekis, %	Pasklida, mm
0,0	-	2,5	600
0,5	20	3,0	600
1,0	20	3,5	695
1,5	20	5,0	600

Pastebėta, kad vanduo, super plastikliai ir cementas atliko skirtingas roles sklaidos teste. Vanduo ir super plastikliai suveikė kaip sklaidą skatinantys priedai, o cementas priešingai – pagerina klampumo savybes savaimė susitankinančiame grunte. Fibros SSG mišinyje veikia, kaip klampumą didinantis priedas, tačiau didinant fibrų kiekį ir tuo pačiu didinant super plastiklio kiekį, vandens ir cemento santykį išlaikant pastovų, gaunama tokia pat sklaida, kaip ir nenaudojant fibrų.

Kita labai svarbi savaimė susitankinančio grunto savybė – stiprumas gniuždam. Naudojant savaimė susitankinantį gruntą vamzdžių tiesime savaimė susitankinančio grunto stiprumas gniuždam išlaiko vamzdžius, neleidžia jiems nusėsti. Savaimė susitankinančio grunto stiprumo priklausomybės pateiktos straipsnyje: *Reologinės ir mechaninės savybės savaimė susitankinančio grunto-cemento*<sup>[1]</sup>.

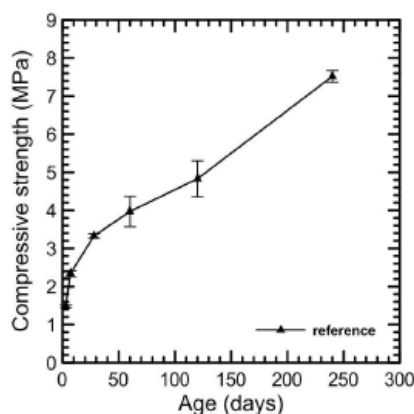


13 pav Savaimė susitankinančio grunto stiprumo gniuždam priklausomybė nuo vandens ir cemento santykio [1]



14 pav. Savaiame susitankinančio grunto stiprumo gniuždant priklausomybė nuo sklaidos [1]

Didinant vandens ir cemento santykį stiprumas gniuždant (po 28 parų kietėjimo) mažėja. Nustatyta, kad sklaidos diametro padidėjimas, nesudaro reikšmingų pokyčių savaiame susitankinančio grunto stiprumui gniuždant.



15 pav. Savaiame susitankinančio grunto stiprumo gniuždant priklausomybė nuo laiko [2]

8 lentelė. Stiprumo gniuždant rezultatai [2].

Mišinys	$\sigma_{max}$ , MPa	$\epsilon_{rupt}$ , $\mu\epsilon$	E, Gpa	$T_{rupt}$ , J
Ref-28d	3,33 (0,05)	14666,75 (1723,43)	3,15 (0,04)	4,09 (0,59)
Ref-60d	4,03 (0,40)	10272,22 (1151,82)	3,77 (0,15)	3,59 (0,70)
Ref-120d	4,66 (0,47)	7984,42 (2814,42)	4,05 (0,56)	3,15
Ref-240d	7,52 (0,15)	6008,91 (1208,54)	5,01 (0,30)	3,60 (0,78)

Ref-28d – bandinys po 28 parų kietėjimo; Ref-60d – bandinys po 60 parų kietėjimo; Ref-120d – bandinys po 120 parų kietėjimo; Ref-240d – bandinys po 240 parų kietėjimo;  $\epsilon_{rupt}$  – maksimalūs įtempiai; E – jungo modulis;  $T_{rupt}$  – kietumas iki maksimalios apkrovos

Išanalizavus savaime susitankinančio grunto stiprumo gniuždant priklausomybę nuo laiko, bei gniuždymo testo rezultatus, matyti, kad stiprumas gniuždant po 120 dienų pasiekė 4,03MPa stiprumą gniuždant. Kintant laikui nuo 120 dienų iki 240 dienų stiprumas padidėjo iki 7,52MPa. Didelis stiprumo gniuždant prieaugis atsirado dėl pucolaninių reakcijų tarp lakiųjų pelenų ir metakoalino. Ši reakcija vyko lėčiau nei cemento hidratacijos reakcija. Kintant laikui padidėjęs stiprumas, dėl padidėjusio kietumo (padidėjo tamprumo modulis). Tamprumo modulis nuo 28dienos iki 240dienos padidėjo 59%.

**9 lentelė.** Stiprumo gniuždant rezultatai (Savaime susitankinančio grunto bandiniai su fibromis) [2].

Fibrų kiekis, %	$\sigma_{rupt}$ , MPa	$\epsilon_{rupt}$ , $\epsilon$	$T_{rupt}$ , J	$T_{def=34.000\mu\epsilon}$ , J	$T_{def=50.000\mu\epsilon}$ , J	E, GPa
0,0	3,33 (0,05)	14666,7 5 (1723,43 )	4,09 (0,59)	8,50 (1,19)	-	3,15 (0,04)
0,5	2,82 (0,11)	10218,3 0 (2427,37 )	2,42 (0,67)	7,99 (0,60)	10,53 (1,16)	2,01 (0,21)
1,0	3,32 (0,31)	12645,4 7 (2175,47 )	3,54 (0,91)	10,07 (1,04)	14,28 (1,69)	1,84 (0,07)
1,5	3,13 (0,06)	11447,1 4 (1287,10 )	3,00 (0,34)	9,03 (0,51)	12,26 (0,69)	2,3 (0,10)
$\sigma_{rupt}$ – maksimalūs įtempiai; $\epsilon_{rupt}$ – maksimalūs įtempiai; $T_{rupt}$ – kietumas pagal $\epsilon_{rupt}$ ; $T_{def=34.000\mu\epsilon}$ kietumas kai įtempiai 34.000 $\mu\epsilon$ ; $T_{def=50.000\mu\epsilon}$ kietumas kai įtempiai 50.000 $\mu\epsilon$ ; E – jungo modulis.						

Lyginant nearmuotą mišinį su armuotu, matyti, kad stiprumas ženkliai nekito. Tamprumo modulis kito ženkliai (SSG suminkštėjo). Nearmuotame mišinyje atsivėrė didesni įtrūkimai.

### **3. Magistro baigiamojo projekto tikslai ir uždaviniai**

Magistro baigiamojo projekto tikslas - Ištirti plastiškojo molio ir smulkiagrūdžio grunto tinkamumą panaudoti savaime susitankinančių modifikuotų gruntų gamybai ir nustatyti esmines pagaminto produkto savybes.

Magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

1. Pagaminti nesisluoksniuojantį, nesegreguojantį ir neturintį vandens atsiskyrimo požymių savaime susitankinančio grunto mišinį;
2. Ištirti savaime susitankinančio grunto savybių kitimą esant skirtingiems smėlio/molio santykiams grunte;
3. Atlikti savaime susitankinančių gruntų su skirtingais smėlio/molio santykiais grunte mikrostruktūrinę analizę;
4. Nustatyti savaime susitankinančių gruntų pakartotinės iškasos gebą.

#### 4. Naudotos medžiagos ir tyrimų metodai

Šio eksperimento metu atlikau savaime susitankinančio grunto tyrimus, išlaikant rišiklio ir grunto santykį mišinyje vienoda, tik su skirtingais gruntais t.y. skirtingais smėlio ir molio santykiais. Tyrimai buvo atliekami su 100% smėliu, 20% smėliu 80% moliu, 40% smėliu 60% moliu, 60% smėliu 40% moliu, 80% smėliu 20% moliu ir 100% moliu.

Tyrimo metu naudotos medžiagos:

- vanduo;
- smėlis 0.1mm frakcijos;
- molis;
- gruntų rišiklis „Carbofill“.

Smėlį tyrimams pristatė įmonė UAB „Virmalda“. Smėlis paimtas iš Zatyšių karjero.

10 lentelė. Smėlio granulimetrinė sudėtis

Sietų akučių dydis mm.	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	0	viso
Liekana ant sieto g.	4.79	3.77	5.63	13.19	140.92	484.89	40.7	6.53	700.42
Liekana ant sieto proc.	0.68	0.54	0.8	1.88	20.12	69.23	5.81	0.94	100

Carbofill – vokiečių gamintojo hidraulinis gruntų rišiklis. Tikslī sudėtis neatskleidžiama. Medžiaga buvo ištirta sumaišius normalaus tirštumo tešlą, suformavus bandinius ir atlikus bandinių stiprumo gniuždant ir lenkiant bandymus po 7, 14, 28 parų kietėjimo. Normalaus tirštumo tešlai paruošti reikėjo 43,5% vandens. Mišinio (carbofill + vanduo) rišimosi pradžia 4 val. 30 min., rišimosi pabaiga 6 val. 10min..

11 lentelė. Carbofill bandinių bandymų rezultatai

Kietėjimo trukmė, paros	Stiprumas gniuždant, MPa	Stiprumas lenkiant, MPa
7	2,09	26,5
14	2,00	37,6
28	2,20	47,58

#### 4.1. Medžiagų kiekis mišinyje ir sumaišymas

12 lentelė. Naudotų medžiagų kiekiai mišiniuose

Bandinio Nr.	Smėlis kg/m <sup>3</sup> , (%)	Molis kg/m <sup>3</sup> , (%)	Rišiklis, kg/m <sup>3</sup>	Vanduo, l/m <sup>3</sup>	Tankis kg/m <sup>3</sup>
I	1157.6 (80%)	289.5 (20%)	134.4	385.6	1967.4
II	838.6 (60%)	558.8 (40%)	129.7	382.0	1909.6
III	493.7 (40%)	740.9 (60%)	114.6	503.9	1853.1
IV	259.2 (20%)	1035.1 (80%)	120.1	475.6	1890.8
V	1531.9 (100%)	-	122.8	288.1	1943.7
VI	-	1039.7 (100%)	96.5	464.5	1600.6



Magistrinio baigiamo projekto eksperimento metu savaime susitankinančio grunto mišinio medžiagos buvo maišomos 30 litrų talpos indas, skirtas mišiniams maišyti. Maišymui buvo naudota maišyklė MAKITA UT1400. Maišyklės techniniai parametrai:

- galingumas – 1300W;
- greitis be apkrovos (min-1) – 0-580;
- maksimalus sukimo momentas – 15,0 Nm;
- ašies sriegis – M14;
- IEC apsaugos klasė – II;
- tarptautinė apsaugos klasė – IP20;
- svoris be kabelio – 5,2 kg.

Mišinio maišymo procesas pradėtas nuo sausų medžiagų išmaišymo. Kai sausos medžiagos išmaišomos, pilamas vanduo ir mišinys maišomas kol gaunamas vienodas sudedamųjų dalių pasiskirstymas ir vienoda savaime susitankinančio grunto konsistencija.



**16 pav.** Savaime susitankinančio grunto mišinys

#### **4.2. Mišinio pasklidos nustatymas**

Mišinio pasklidos nustatymas reikalingas tam, kad galėtume įvertinti savaime susitankinančio grunto mišinio paslankumą ir klampą. Savaime susitankinančio grunto mišinio pasklida (paslankumas) nustatomas pagal LST EN 12350-8 standartą. Buvo išmatuotas vidutinis standartinio slankumo kūgio pasklidimo skersmuo ir pasklidimo laikas  $t_{500}$ .

Pasklidimo laikas  $t_{500}$  nustatomas fiksuojant laiką nuo slankumo kūgio pakėlimo iki kada mišinys kerta 500mm skersmens ribą.



**17 pav** Savaiame susitankinančio grunto mišinio pasklidos matavimas

### **4.3. Bandinių formavimas ir sandėliavimas**

Savaiame susitankinančio grunto mišinys buvo supilamas į formavimo formas 100x100x100 mm. Prieš supilant mišinį į formas, formos buvo nuvalytos ir suteptos formų tepimo alyva. Bandiniai iš formų buvo išimti po 7 parų kietėjimo. Išimti bandiniai buvo pažymimi. Viso buvo padaryti 60 bandinių.



**18 pav** Savaiame susitankinančio grunto bandiniai

Bandiniai buvo sandėliuojami drėkinamoje kameroje. Bandiniai buvo sudėti į polietileno ir polipropileno audinio maišus, siekiant užtikrinti aukštesnę bandinių drėgnį. Temperatūra drėkinimo kameroje - 20°C, drėgmė daugiau kaip 95%.



**19 pav** Drėkinimo kameroje sandėliuojami į maišus sudėti savaime susitankinančio grunto bandiniai.

#### **4.4. Bandinių matavimai**

Tyrimo metu buvo nustatytas visų naudotų medžiagų ir sugniuždytų bandinių drėgniai. Drėgnis nustatytas pagal standartą LST 1360.3 džiovinant krosnyje. Drėgnis buvo nustatytas po kiekvieno stiprumo gniuždant bandymo. T.y. bandinių drėgniai buvo nustatyti po 7, 14, 28, 56, 108 parų kietėjimo sandėliavimo zonoje.

Drėgnio skaičiavimo formulė:

$$W_m = \left( \frac{m_1 - m}{m} \right) \cdot 100$$

Čia:  $m_1$  – drėgnos medžiagos masė, g;

$m$  – išdžiovintos medžiagos masė, g.

Medžiagų bei bandinių svėrimui naudotos svarstyklės KERN PCB 6000-1. Svarstyklių techninės specifikacijos [10]:

- maksimali svėrimo riba: 6000 g
- padalos vertė: 0,1 g
- atsikartojamumo vertė: 0,1 g
- tiesiškumas:  $\pm 0,3$  g
- minimali masė (naudojant skaičiavimo funkciją): 0,2 g
- svėrimo lėkštutės matmenys: 150 x 170 mm
- stabilizavimo trukmė: 3s



**20 pav** Svarstyklės KERN PCB 6000-1 [10]

Medžiagų bei bandinių džiovinimui naudota žemos temperatūros krosnis SNOL 200/200 LSN11.

Techniniai krosnies duomenys [11]:

- naudingas tūris: 200 litrų
- pastovi darbinė temperatūra: +10 - 200 °C
- maksimali temperatūra: 200 °C
- darbo kameros aplinka: oras (su karšto oro ventiliatoriumi)
- oro srautas – horizontalus
- maksimali (be krovimo) įkaitimo iki 200 °C temperatūros trukmė: 45 minutės
- temperatūros svyravimas kaitinimo kameroje kaitinimo metu:  $\pm 1^{\circ}\text{C}$



**21 pav** Žemos temperatūros krosnis SNOL 200/200 LSN11 [11]

Bandinių matmenys išmatuoti elektroniniu slankmačiu QSTEXPRESS. Slankmačio techniniai duomenys:

- matavimo diapazonas: 0 – 150mm
- minimalus išmatuojamas dydis: 0.1mm



**22 pav** Elektroninis slankmatis QSTEXPRESS

#### **4.5. Bandinių stiprumo gniuždant nustatymas**

Savaime susitankinančio grunto bandinių stiprumas gniuždant nustatomas pagal standartą LST EN 12390-3. Bandiniai gniuždymui buvo naudota Toni Technik firmos įranga. Įranga kontroliuojama ir rezultatai apdorojami kompiuterine programa testXpert. Gniuždymo/lenkimo įrangos techniniai duomenys:

Tikslumo klase: 1 atitinkanti standartus EN ISO 7500-1 / DIN 51220.

Maksimali gniuždymo jėga: 300kN



**23 pav** Gniuždomas savaime susitankinančio grunto bandinys Toni Technik įranga.

#### 4.6. Jungo modulio nustatymas

Atliekant stiprumo gniuždant bandymus, kompiuterinėje programoje „testXpert“ buvo stebima ne tik apkrova, bet ir bandinių deformacijos. Kad užtikrint tikslesnius bandinių deformacijų grafikus, bandinio apkrovimo greitis buvo sumažintas iki 1kN/min. Gavus deformacijų priklausomybės nuo apkrovos grafikus, buvo apskaičiuotas jungo modulis. Jungo modulio skaičiavimui imtos apkrovos ir deformacijos vertės nuo 10% iki 40% maksimalios jėgos. Jungo modulis apskaičiuotas pagal formulę:

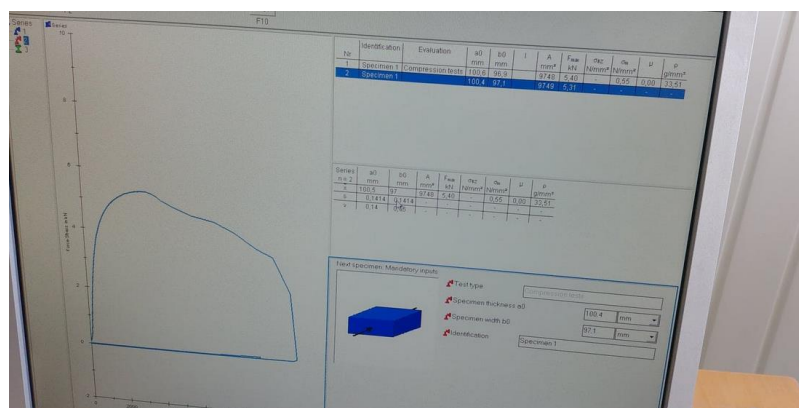
$$E = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{F}{S}$$

Čia:  $l$  – pradinis ilgis;

$\Delta l$  – ilgio pokytis;

$F$  – jėga;

$S$  – skerspjūvio plotas.



24 pav Jėgos ir deformacijos kreivė programoje testXpert

#### 4.7. Bandinių mikroskopinė analizė.

Prieš atliekant mikroskopinę analizę, reikėjo tam paruošti bandinius. Bandiniai turėjo turėti lygų paviršių ir nepažeista struktūrą. Bandinių plotas 10x10mm storis iki 5mm. Nuo jau sugniuždyto savaiame susitankinančio grunto bandinių peiliu ir daugiafunkciniu švytuokliniu įrankiu Makita TM3010CX2J buvo atpjauti bandiniai.



**25 pav** Bandiniai paruošti atlikti mikroskopinę analizę

Daugiafunkcinio švytuoklinio įrankio Makita TM3010CX2J techniniai duomenys:

- galingumas - 320 W
- griebtuvas - OIS tvirtinimas, beraktis
- judesio kampas - 3,2 laipsniai
- judesių skaičius per minutę - 6000 - 20000
- vibracijos stiprumas 2,5 m/sek<sup>2</sup>
- reguliuojamas greitis
- triukšmo lygis 74 dB(A)
- ergonomiška gumuota rankena
- svoris - 1,4 kg

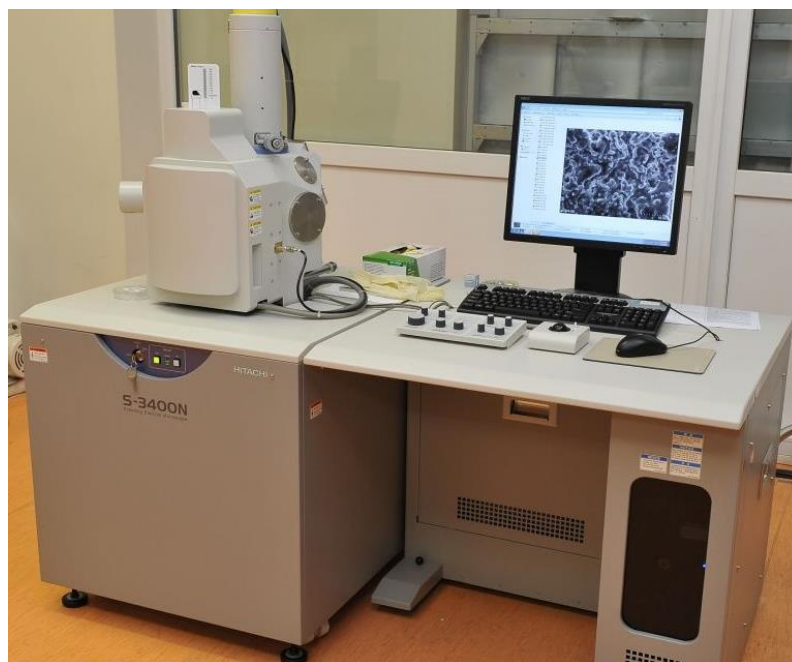


**26 pav** Daugiafunkcinis švytuoklinis įrankis Makita TM3010CX2J

Mikroskopinė analizė ir energijos dispersijos spektroskopija buvo atlikta skenuojančiu elektroniniu mikroskopu Hitachi S-3400N. Buvo atliktos bandinių nuotraukos didinant vaizdą 50, 150, 300 ir 4000 kartų. Išdidintuose vaizduose buvo ieškota susidariusių kristalų, grunto flokulų ar kitų bandinio defektų. Energijos dispersijos spektroskopija (EDS) atlikta siekiant nustatyti esamas medžiagas bandinyje.

Skenuojančio elektroninio mikroskopo (SEM) Hitachi S-3400N techniniai parametrai [12]:

- antrinių elektronų (secondary electrons) vaizdų skiriamoji geba: ne blogesnė kaip 3 nm, aukštame vakuume, kai greitinančioji įtampa: 30 kV; ne blogesnė kaip 10 nm, aukštame vakuume, kai greitinančioji įtampa: 3 kV.
- atspindėjusių elektronų (backscattered electron) vaizdų skiriamoji geba, ne blogesnė kaip 4 nm, aukštame ir žemame vakuume kai greitinančioji įtampa: 30 kV
- SEM turi pilnai automatinę siurblių ir vožtuvų kontrolės sistemą, kuri užtikrina aukšto vakuumo režimo matavimų metu  $\leq 1,5 \times 10^{-3}$  Pa slėgį bandinio kameroje, o žemo vakuumo režimo matavimų metu slėgis bandinio kameroje reguliuojamas 10-270 Pa ribose.
- SEM turi aukštos kokybės antrinių bei atspindėjusių elektronų detektorius, atskirus specialiai žemam vakuumui skirtus detektorius, IR-CCD kamerą bandinio apžvalgai. Jame yra įmontuotas Bruker Quad 5040 EDS detektorius
- didelė pilnai motorizuota penkių ašių valdymo eucentrinė bandinių aikštelė  
Aukštos kokybės ne mažesnio kaip 4096x3536 maksimalaus taškų skaičiaus nuotraukos saugomos JPEG, TIFF, BMP formatais.



27 pav Skenuojantis elektroninis mikroskopas Hitachi S-3400N [12]



28 pav EDS detektorius Bruker Quad 5040



#### 4.8. Pakartotinės iškasos gebos tyrimas

Pakartotinės iškasos geba buvo nustatyta pagal stiprumo gniuždant rezultatus ir pagal grafikus bei lenteles pateiktas 2.2.2 punkte. Siekiant įvertinti nepageidaujamą ilgalaikį savaime susitankinančio grunto produkto stiprėjimą kietėjimo metu buvo  $f_z$  reikšmė:

$$f_z = \frac{f_{c,t2} - f_{c,t1}}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$$

Čia:  $f_z$  – kietėjimo eigos vertinimo rodiklis;

$t_1$  – bandinio kietėjimo trukmė 7 paros;

$t_2$  – bandinio kietėjimo trukmė  $\geq 56$  paros;

$f_{c,t1}$  – bandinio gniuždymo stipris po  $t_1$  kietėjimo trukmės;

$f_{c,t2}$  – bandinio gniuždymo stipris po  $t_2$  kietėjimo trukmės.

## 5. Rezultatai

### 5.1. Pasklida

**13 lentelė.** Savaiame susitankinančio grunto mišinio pasklida

Mišinio nr.	Mišinio sudėtis	Pasklida	Pasklidimo klasė	Klampos $t_{500}$ klasė
1	Smėlis 100%, molis 0%	65	SF1	VS1
2	Smėlis 80%, molis 20%	65	SF1	VS1
3	Smėlis 60%, molis 40%	70	SF2	VS1
4	Smėlis 40%, molis 60%	60	SF1	VS1
5	Smėlis 20%, molis 80%	64	SF1	VS1
6	Smėlis 0%, molis 100%	65	SF1	VS1

Pagal standartą LST EN 12350-8 visi mišiniai, išskyrus mišinį nr.3, atitinka pasklidimo klasę SF1. Mišinys nr.3 atitinka pasklidimo klasę SF2. Naudojant standartinį nusėdimo kūgį, visi mišiniai pasiekė 500mm skersmens ribą greičiau nei per 2sekundes, todėl visi mišiniai atitinka VS1 klamos  $t_{500}$  klasę.

### 5.2. Drėgnis, tankis, gniuždomasis stipris

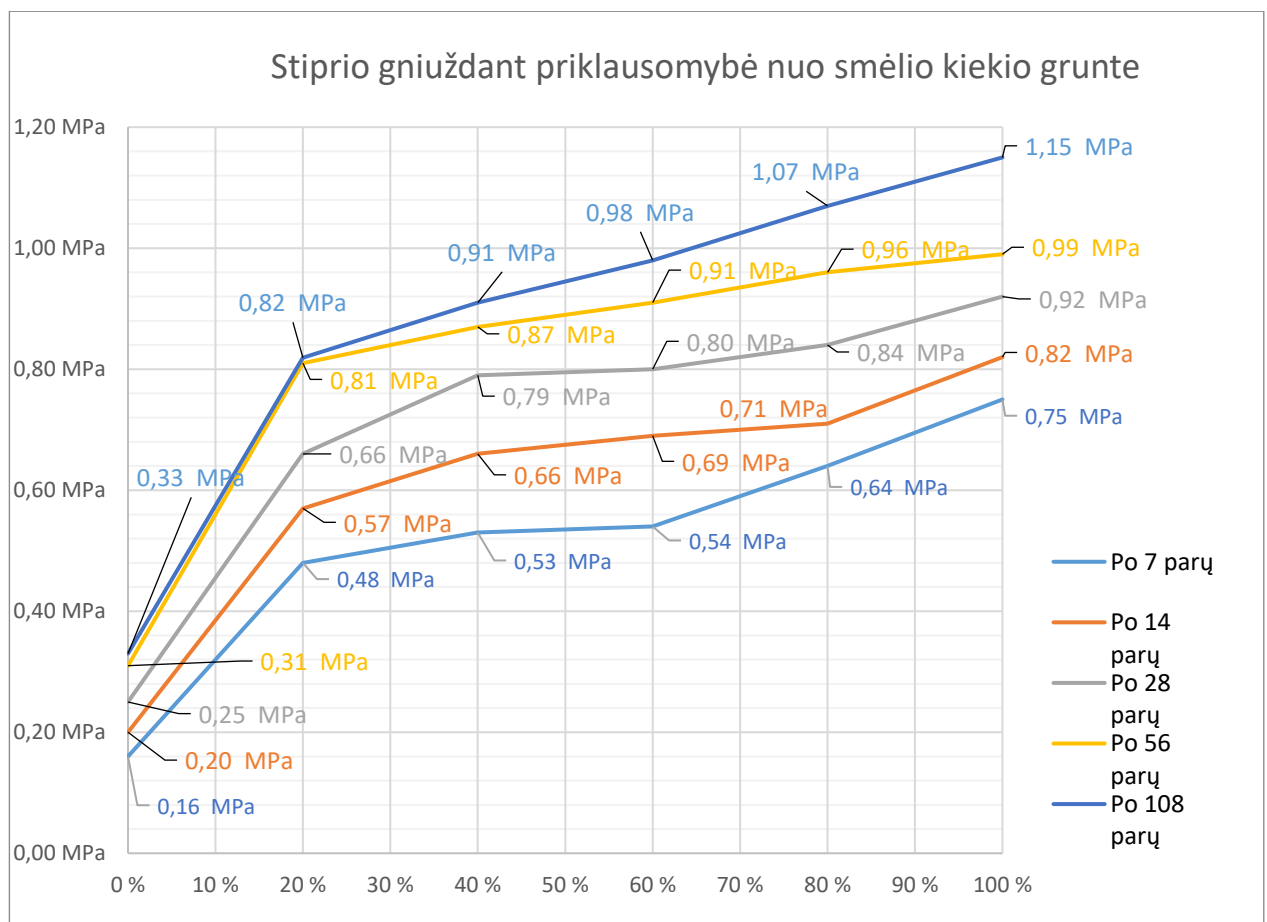
**14 lentelė.** Bandinių drėgniai, tankiai ir stiprumas gniuždant

Bandinio sudėtis	Kietėjimo laikas, paros	Tankis, $\text{kg/m}^3$	Gniuždomasis stipris, Mpa	Bandinių drėgnis, %
Smėlis 100%, molis 0%	7	1949.61	0.75	25,1
Smėlis 80%, molis 20%		1986.31	0.64	23,56
Smėlis 60%, molis 40%		1847.67	0.54	27,97
Smėlis 40%, molis 60%		1787.92	0.53	32,37
Smėlis 20%, molis 80%		1798.64	0.48	31,67
Smėlis 0%, molis 100%		1577.50	0.16	68,2
Smėlis 100%, molis 0%	14	1974.74	0.82	25,2
Smėlis 80%, molis 20%		1855.03	0.71	25,79
Smėlis 60%, molis 40%		1894.18	0.69	25,88
Smėlis 40%, molis 60%		1759.01	0.66	37,37
Smėlis 20%, molis 80%		1924.28	0.57	32,66
Smėlis 0%, molis 100%		1570.85	0.20	63,8
Smėlis 100%, molis 0%	28	1953.40	0.92	24,5
Smėlis 80%, molis 20%		1993.57	0.84	23,46
Smėlis 60%, molis 40%		1789.02	0.80	21,63
Smėlis 40%, molis 60%		1743.85	0.79	34,5
Smėlis 20%, molis 80%		1801.50	0.66	31,39
Smėlis 0%, molis 100%		1582.44	0.25	67,50

Smėlis 100%, molis 0%	56	1949.61	0.99	26,4
Smėlis 80%, molis 20%		1984.54	0.96	23,61
Smėlis 60%, molis 40%		1852.08	0.91	24,26
Smėlis 40%, molis 60%		1766.58	0.87	30,14
Smėlis 20%, molis 80%		1743.53	0.81	26,86
Smėlis 0%, molis 100%		1586.12	0.31	65,0
Smėlis 100%, molis 0%	108	1947.23	1.15	24,1
Smėlis 80%, molis 20%		1930.66	1.07	22,82
Smėlis 60%, molis 40%		1769.98	0.98	22,59
Smėlis 40%, molis 60%		1627.48	0.91	21,84
Smėlis 20%, molis 80%		1460.30	0.82	14,8
Smėlis 0%, molis 100%		1585.74	0.33	64,4

Bandinių drėgniai svyruoja nuo 14,8% iki 68,2%. Taip yra dėl šių priežasčių:

- skirtingos bandinių sandėliavimo sąlygos. Visi bandiniai buvo sandėliuojami drėkinimo kameroje, tačiau vieni buvo įpakuoti į polietileningus maišus, o kiti į polipropileno audinio maišus. Polietileningi maišai geriau išlaikė drėgmę;
- skirtingas pradinis medžiagų drėgnis.



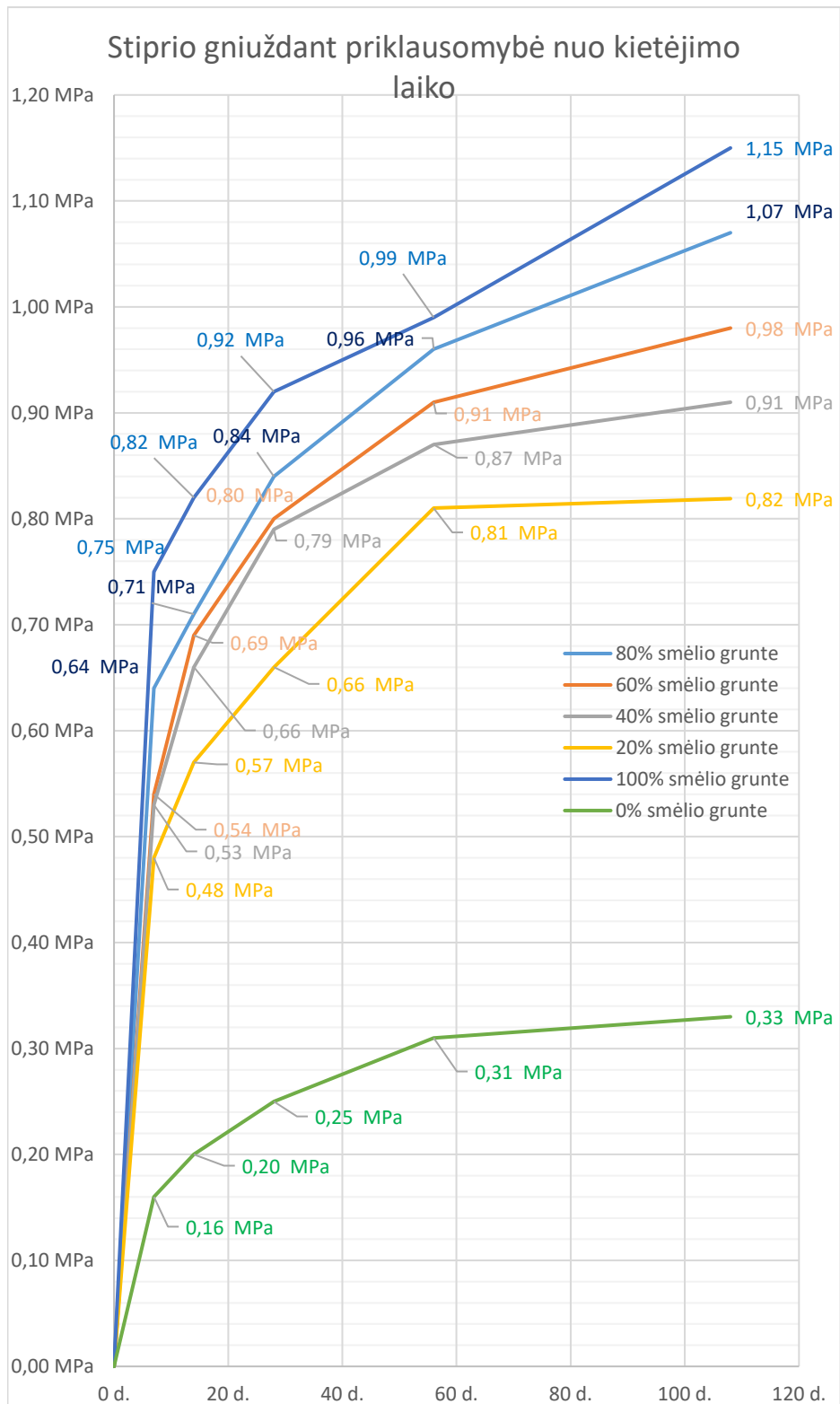
**29 pav** Stiprio gniuždant priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte po 7, 14, 28, 56, 108 parų kietėjimo

Tirtame savaime susitankinančiame grunte stipris gniuždant yra proporcingas smėlio kiekiui grunte. Kuo didesnis smėlio/molio santykis tuo didesnis stiprumas gniuždant.



**30 pav** Medžiagos tankio priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte

Savaime susitankinančio grunto tankis didėja didėjant smėlio/molio santykiui grunte. Daugiau smėlio – didesnis tankis. Taip yra dėlto, kad smėlis yra tankesnis už molį.



**31 pav** Visų bandinių stiprumo gniuždant priklausomybės nuo kietėjimo laiko

Visų savaiame susitankinančio grunto bandinių stipris gniuždant didėjo ilgėjant bandinio kietėjimo laikui. Bandinio su 0% smėlio grunte stipris gniuždant vidutiniškai 2,716 karto mažesnis nei bandinio su 20% smėlio grunte. Taip yra ne tik dėl mažesnio smėlio kiekio grunte, bet ir dėl vidutiniškai 2,602 karto didesnio drėgnio.

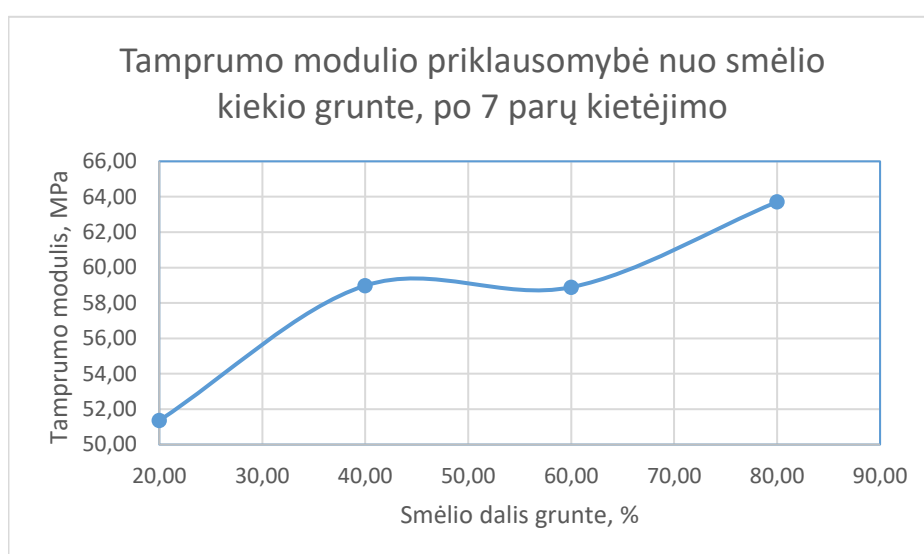
### 5.3. Jungo modulis

Bandinių jungo moduliai

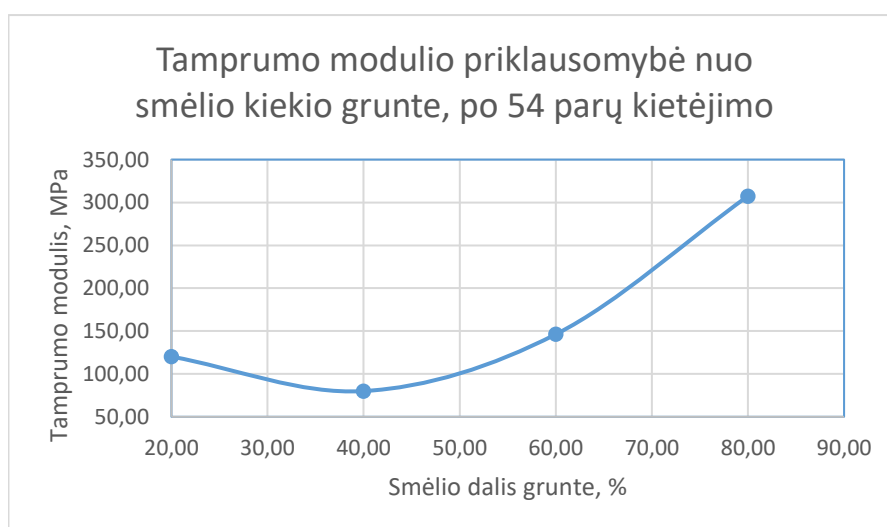
15 lentelė. Bandinių jungo moduliai

Bandinio Nr	Jungo modulis, po parų kietėjimo, Mpa			
	7.00	14.00	28.00	54.00
I	63.71	84.30	196.00	307.50
II	58.89	74.30	97.77	146.25
III	58.98	82.55	53.16	80.00
IV	51.36	84.87	100.50	120.22

Lentelėje matyti, kad visu bandinių jungo moduliai didėja ilgėjant bandinių kietėjimo laikui.



32 pav Tamprumo modulio priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte, po 7 parų kietėjimo

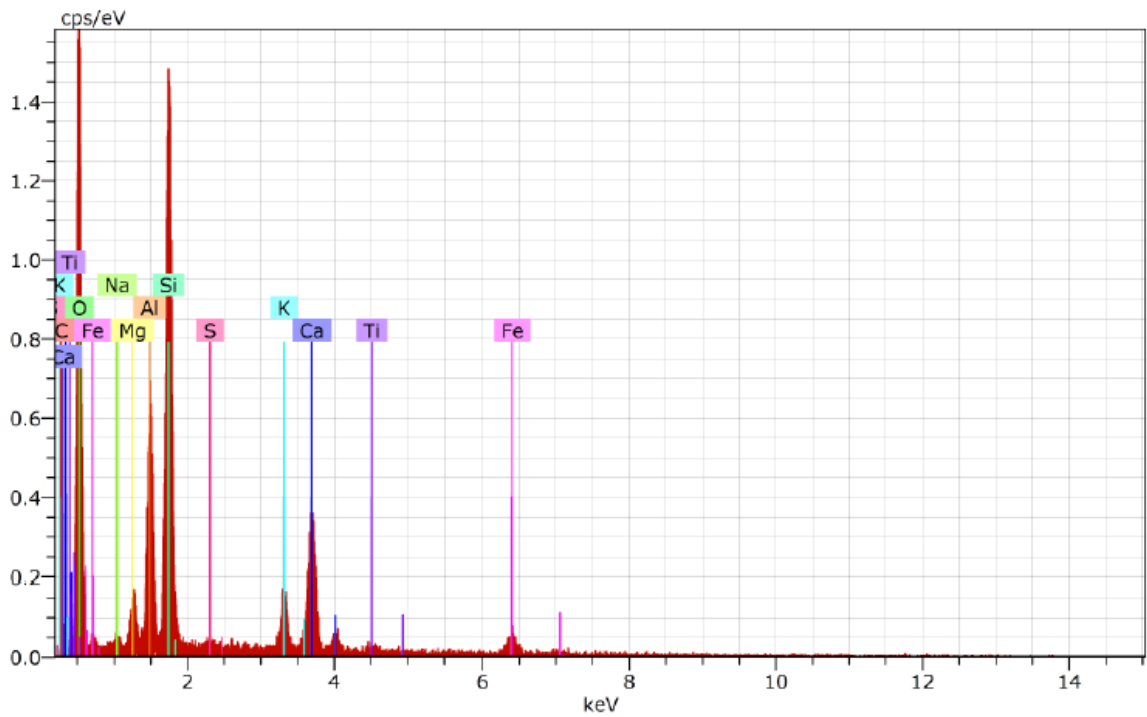


33 pav Tamprumo modulio priklausomybė nuo smėlio kiekio grunte, po 54 parų kietėjimo

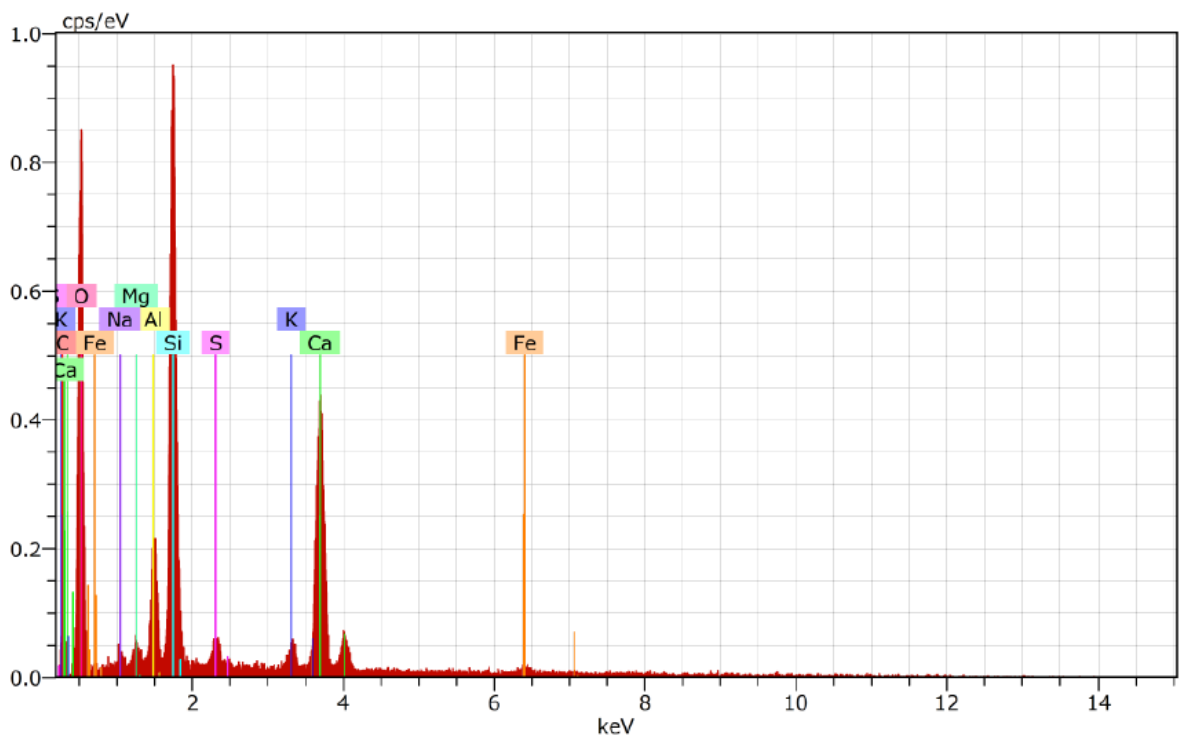
Tamprumo modulio priklausomybės nuo smėlio kiekio grunte grafikuose matome, kad didėjant smėlio/molio santykiui grunte, didėja ir tamprumo modulis.

## 5.4. Mikroskopinės analizės ir EDS rezultatai

Energijos dispersijos spektroskopija



34 pav SSG bandinio su 0% smėlio, 100% molio grunte EDS rezultatai



35 pav SSG bandinio su 100% smėlio, 0% molio grunte EDS rezultatai



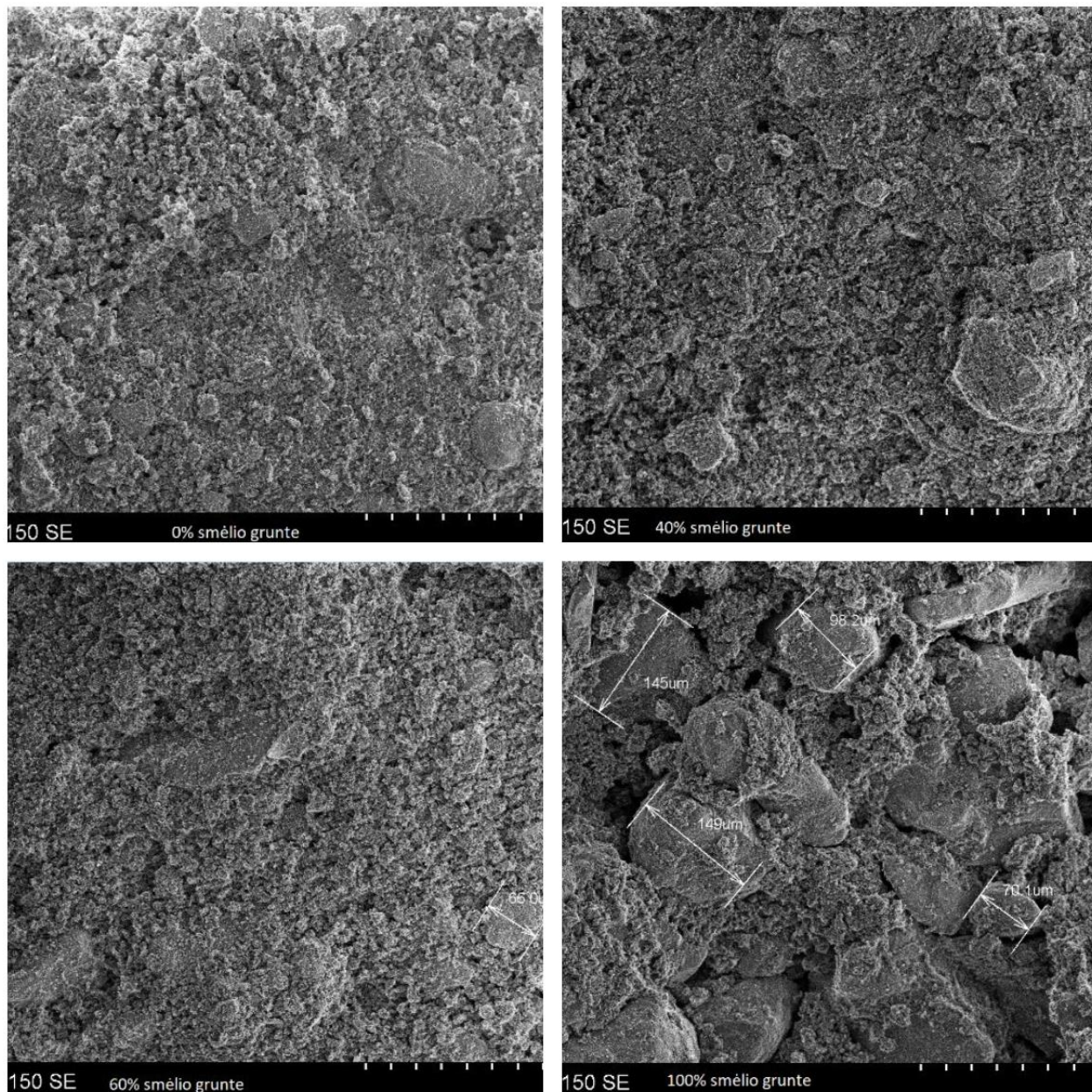
**16 lentelė.** Energijos dispersijos spektroskopijos rezultatai

	<b>SSG su 0% smėlio, 100% molio grunte</b>	<b>SSG su 100% smėlio, 0% molio grunte</b>
<b>Elementas</b>	<b>Atom. C [at.%]</b>	<b>Atom. C [at.%]</b>
Anglis	1,21	5,71
Deguonis	64,53	65,44
Kalcis	64,53	10,92
Kalis	2,14	1,22
Geležis	1,90	1,17
Magnis	1,51	0,54
Aliuminis	6,24	3,40
Silicis	15,26	10,92
Siera	0,26	0,07
Natris	0,35	0,61
Titanas	0,47	0
Viso:	100	100

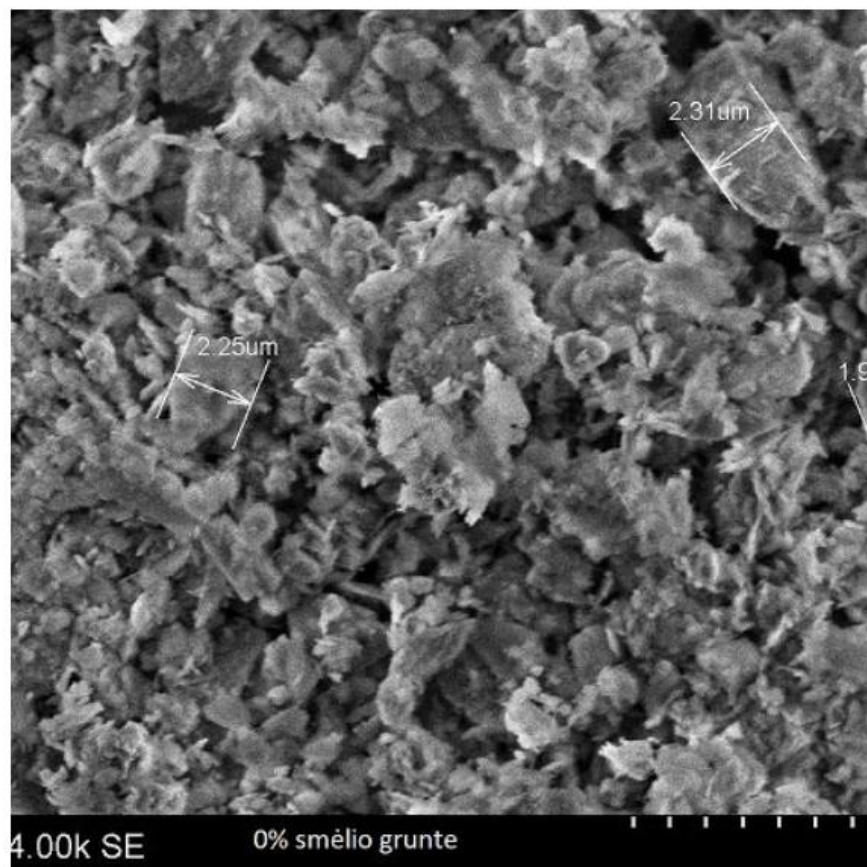
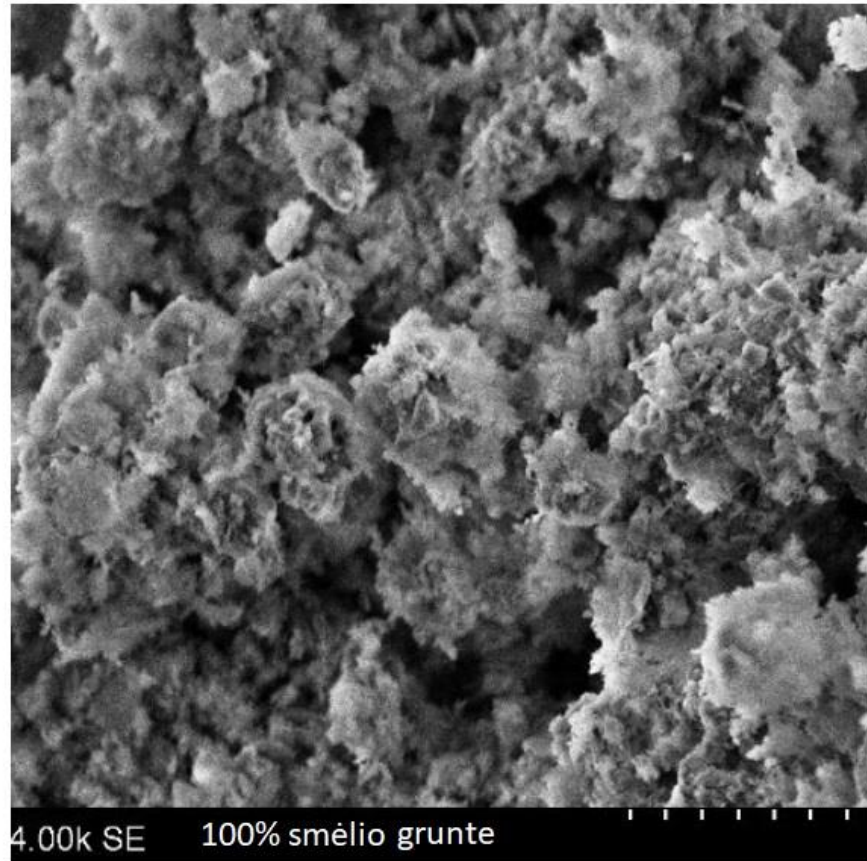
Bandinyje su 100% smėlio ir 0% molio grunte daugiausia yra silicio ir deguonies atomų, šie atomai sudaro silicio dioksidą – kvarcinį smėlį. Taip pat matyti Kalcio karbonatai, kurie į mišinį patenka su smėliu (balti akmenukai smėlyje). Aliuminio atomai – rišiklis. Tiriant gruntų rišiklį „Carbofill“ buvo aptikta trikalcio aluminatai. Geležis patenka kartu su gruntų rišikliu ir smėliu. Taip pat gruntų rišiklyje rasta magnio ir natrio junginių, kas daro įtaką tolimesnei šarminei korozijai.

Bandinyje su 0% smėlio ir 100% molio yra daugiau aliuminio atomų. Aliuminio atomai į mišinį patenka su moliu. Taip pat šiame bandinyje rasta titano atomų. Titano atomai į mišinį patenka su moliu.

## Elektroskopinė analizė



**36 pav** SSG bandinių su 0%, 40%, 60%, 100% smėliu grunte vaizdai priartinti 150 kartų



37 pav SSG bandinių su 100% ir 0% smėlio grunte vaizdai priartinti 4000 kartų.

Atlikus mikroskopinę analizę matyti, kad smėlis tvarkingiau apaugęs rišiklio kristalais nei molis. Todėl gaunami didesni stiprumai gniuždant. Taip pat pastebėta, kad didėjant smėlio kiekiui grunte, mažėja molio flokulų kiekis. Smėlis veikia kaip abrazyvinė medžiaga ir išskaido molio flokulas. Todėl patartina į molinius mišinius, darant savaime susitankinantį gruntą, įdėti smėlio. Tai padeda geriau, homogeniškiau išmaišyti mišinį.

### 5.5. Pakartotinės iškasos geba

17 lentelė. Fz rodiklio skaičiavimų rezultatai

Smėlio kiekis grunte, %	fz, po 56 parų kietėjimo	fz, po 112 parų kietėjimo	Pakartotinės iškasos geba po 56 parų kietėjimo	Pakartotinės iškasos geba po 112 parų kietėjimo
100	0.808	0.673	sunki	vidutinė
80	0.354	0.357	sunki	vidutinė
60	0.498	0.365	sunki	vidutinė
40	0.199	0.266	vidutinė	lengva
20	0.432	0.265	sunki	lengva
0	0.166	0.141	vidutinė	lengva

Gautus skaičiavimų rezultatus palyginus su 2.21 punkte pateiktu grafiku ir lentele matyti, kad didėjant smėlio kiekiui grunte, pakartotinės iškasos geba sunkėja. Taip pat matyti, kad kintant kietėjimo laikui nuo 56 parų iki 108 parų savaime susitankinančio grunto pakartotinės iškasos geba lengvėja. Bandiniai kurie po 56 parų kietėjimo iškasami su ekskavatoriaus kaušais ar hidrauliniiais kaltais, po 108 parų kietėjimo būtų iškasami su mini ekskavatoriaus kaušais ar kirtikliais. Bandiniai kurie po 56 parų iškasami kirtikliais ar mini ekskavatoriaus kaušais, po 108 parų kietėjimo būtų iškasami semtuvais, kastuvais.

## Išvados

1. Pagaminti savaime susitankinančio modifikuoto grunto mišiniai su skirtingais smėlinio ir plastiškojo molio kiekiais (100 proc. smėlio, 80/20 proc. smėlio/molio santykiu, 60/40, 40/60, 20/80 atitinkamai ir 100 proc. plastiškojo molio). Visi mišiniai buvo homogeniški, nesisluoksniuojantys ir neturintys vandens atsiskyrimo požymių. Gautos mišinių pasklidos 60-70cm, kurios atitinka SF1 ir SF2 pasklidos klases. Galime teigti, kad didėjant plastiškojo molio kiekiui modifikuotame SSG mišinyje, vandens poreikavimas tos pačios pasklidos mišiniui gauti ženkliai didėja (iki 74,9 proc.). Tai galima paaiškinti, kad plastiškojo molinio grunto dalelės yra ženkliai smulkesnės nei smėlinio grunto.
2. Atlikus tyrimus matyti, kad savaime susitankinančio grunto savybės priklauso nuo smėlio/molio santykio grunte ir vandens poreikavimo tai pačiai konsistencijai (pasklidai) gauti. Stiprumas gniuždant didėja didėjant smėlio/molio santykiui grunte. Pagal gautus stiprumo gniuždant rezultatus po 7, 14, 28, 56, 112 parų kietėjimo, matyti, kad stiprumas gniuždant tarp SSG, kuriame gruntas 100% smėlis, ir SSG, kuriame gruntas 100% molis, vidutiniškai skiriasi 4,022 karto. Savaime susitankinančio grunto tamprumo modulis taip pat didėja, didėjant smėlio/molio santykiui grunte. SSG tankis didėja didėjant smėlio/molio santykiui grunte. Taip yra todėl, kad smėlio tankis yra didesnis už plastiškojo molio grunto ir vandens kiekis naudojamas tos pačios konsistencijos mišiniui paruošti yra didesnis iki 74,9 proc..
3. Atlikus mikrostruktūrinę savaime susitankinančio grunto analizę skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, matyti, kad SSG bandiniuose, kuriuose 80-100% grunto sudarė molis, susidarė molio flokulos. Gauti mišiniai nebuvo tokie homogeniški, kaip mišiniai kuriuose buvo naudota 40% ir daugiau smėlio. Smėlis mišinyje suveikė kaip abrazyvinė medžiaga, kuri išskaidė molio flokulą ir gauti mišiniai buvo gauti homogeniški. Galima daryti išvadą, kad gaminant savaime susitankinančio modifikuoto grunto mišinį iš molinio grunto žaliavos, reikia papildomai įmaišyti ne mažiau 40% smėlio, siekiant pagaminti homogenišką SSG mišinį.
4. Atlikus pakartotinės iškasos gebos skaičiavimus pastebėta, kad pakartotinis iškasumas gerėja mažėjant smėlio/molio santykiui grunte. Taip pat pastebėta, kad kintant bandinių kietėjimo trukmei nuo 56 iki 112 parų pakartotinė iškasa lengvėja. Galima teigti, kad siekiant sukurti savaime susitankinantį gruntą, kuris būtų naudojamas vamzdynų, komunikacijų trąsų užpylimui ar kituose objektuose, kur reikalaujama, kad gruntą būtų galima pakartotinai iškasti, būtina naudoti gruntą, kurio paruošimui naudojame daugiau kaip 60% molio SSG mišinio gamybai, tuomet SSG galima priskirti prie lengvai pakartotinai iškasamos gebos grunto grupės.
5. Savaime susitankinančių modifikuotų gruntų technologijos panaudojimas statybos procesuose leidžia tausoti gamtinio žvyro resursus, mažinti transporto išlaidas ir žmoniškųjų išteklių poreikius bei technologijos principai pasižymi darnumo bei draugiškumo aplinkai požymiais.

## Literatūros sąrašas

1. ALCANTARA, MARCO and SANDRA NUNES. Rheology and mechanical aspects of a self-compacting soil-cement in the fresh state. *Matéria (Rio de Janeiro)* [interaktyvus]. 2017, **22**(3), [žiūrėta 2019-10-11]. ISSN 1517-7076. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170003.0210>
2. MARTINS, ADRIANA and FLAVIO SILVA. Mechanical Behavior of Self Compacting Soil-Cement-Sisal Fiber Composites. *Sustainable Construction Materials* [interaktyvus]. 2015, **634**, 421-432 [žiūrėta 2019-09-21]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.421>
3. SKRIPKIŪNAS, Gintautas. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės* [interaktyvus]. Kaunas, 2012 [žiūrėta 2019-10-25]. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/359/statybiniu-konglomeratu-struktura-ir-savybes/> ;
4. *Hidraulinio kelių rišiklio HRB E4 eksplotacinių savybių deklaracija Nr. -2268-CPR-122-LT* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2019-09-10]. Prieiga per: <http://cementas.lt/index.php?id=335> ;
5. *LST EN 12350-8:2019 en. Betono mišinio bandymai. 8 dalis. Susitankinantis betonas. Slankumo bandymas naudojant standartinį kūgį = Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test: Lietuvos standartas*. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019;
6. *IST 134906131.01:2019 Savaimė susitankinančio grunto mišinių, modifikuojančių grunto savybes, įmonės standartas*. Kaunas, MB „Virmalda“, 2019;
7. *Machines for screening and mixing and to produce fluidised soil and concrete* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2019-12-10]. Prieiga per: <https://backers.de/en/news/machines-screening-and-mixing-and-produce-fluidised-soil-and-concrete> ;
8. *Makita UT1400 power mixer* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-12-10]. Prieiga per: [http://www.makita.ae/tools/drilling\\_mixing/power\\_mixer/UT1400.html](http://www.makita.ae/tools/drilling_mixing/power_mixer/UT1400.html) ;
9. IVANAUSKAS, Ernestas, Algirdas AUGONIS, Ramūnas GEČYS ir Vitoldas VAITKEČIČIUS. *Statybinių medžiagų laboratoriniai darbai* [interaktyvus]. Kaunas, 2011 [žiūrėta 2019-10-25]. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/271/statybiniu-medziagu-laboratoriniai-darbai/> ;
10. *Precision balance PCB* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2019-10-13]. Prieiga per: <https://www.kern-sohn.com/shop/en/laboratory-balances/precision-balances/PCB/> ;
11. *Žemos temperatūros krosnies SNOL 200 techninės specifikacijos* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2019-10-09]. Prieiga per: <http://snol.com/lt/product/snol-200200-lsn11/> ;
12. *Skenuojantis elektroninis mikroskopas Hitachi S-3400N* [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta 2019-10-10]. Prieiga per: <http://apc.lei.lt/lt/iranga-ir-paslaugos/energijos-akumulavimas/vandenilio-energetika/1/skenuojantis-elektroninis-mikroskopas-sem-83> ;
13. *LST 1360.3. Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Drėgnio nustatymas: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1995;
14. *LST EN 12390-3:2019. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždomasis stipris: Lietuvos standartas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019;
15. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Metallic materials – calibration and verification of static uniaxial testing machines. Part 1. Tension/compression testing machines – Calibration and verification of the force-measuring system* 5th ed. [Geneva, Switzerland]: International Organization for Standardization, 2018. International standard, ISO 7500-1.