VILNIUS TECH

STATYBOS FAKULTETAS

GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Dovydas Čepulis

SMĖLINIO GRUNTO STABILIZAVIMAS NEORGANINIAIS TIRPALAIS

STABILIZATION OF SANDY SOIL WITH INORGANIC SOLUTIONS

Baigiamasis magistro darbas

Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX038

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)
Juozas Valivonis
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Dovydas Čepulis

Smėlinio grunto stabilizavimas neorganiniais tirpalais

Stabilization of sandy soil with inorganic solutions

Baigiamasis magistro darbas

Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX038
Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vadovas _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lektorė Lina Rutkienė _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Technologijos mokslų sritis

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 621EX038

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)

Juozas Valivonis
(vardas, pavardė)

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS
Nr. GGM-RM-2019-1
Vilnius

Studentui **Dovydui Čepuliui**
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema **Smėlinio grunto stabilizavimas neorganiniais tirpalais**

patvirtinta 2021 m. kovo 9 d. dekano įsakymu Nr. 79st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2021 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

atlikti smėlinio grunto stabilizavimo neorganiniais tirpalais analizę, apžvalgą, pasirinkti natrio silikato tirpalą, kietiklį ir koncentraciją. Nustatyti stabilizuojančio tirpalo geliacijos laiką, stabilizuoto tirtamanio medžiagomis smėlinio grunto tankį, stiprį vienaašiam gniuždymui esant ir vandens aplinkoje, šių parametrų kitimą laike.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: Magistro baigiamajam darbui konsultantė - Lina Ratkienė (Lietuvių kalbos konsultantė)
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas (parašas) Rimantas Mackevičius
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)
technikos mokslų daktaras, docentas

Užduotį gavau
(parašas)
Dovydas Čepulis
(vardas, pavardė)

2019-09-15
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Dovydas Čepulis, 20146892
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Statybos fakultetas
(Fakulteto)
Geotechnika, Gfm-19
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2021 m. gegužės 31 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Smėlinio grunto stabilizavimas neorganiniais tirpalais" patvirtintas 2021 m. kovo 09 d. dekano potvarkiu Nr. 79st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Rimantas Mackevičius.

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

(Parašas) Dovydas Čepulis
(Vardas ir pavardė)

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

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra

Antrosios pakopos studijų **Geotechnikos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Smėlinio grunto stabilizavimas neorganiniais tirpalais**

Autorius **Dovydas Čepulis**

Vadovas **Rimantas Mackevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama smėlinio grunto mechaninių savybių gerinimas bei laidumo vandeniui mažinimas naudojant chemines medžiagas: natrio silikatą ir kietiklį — fosforo rūgštį. Šia tema atlikta literatūros analizė, parengta laboratorinių darbų metodika, atlikti laboratoriniai tyrimai įvairiais laiko tarpais bei parengta gautų rezultatų analizė ir išvados.

Smėlinių gruntų stabilizavimas yra dažnai taikomas pagrindų stiprinime, tačiau šio metodo detalės mažai aprašomas literatūros šaltiniuose, todėl eksperimentiniais bandymais nustatinėjama natrio silikato ir fosforo rūgšties gelio susidarymo laikas, jų racionalus santykis ir smėlinio grunto tvirtumas sumaišius su cheminėmis medžiagomis po tam tikro laiko.

Tiriamojoje dalyje nustatomos naudojamų gruntų savybės ir stabilizuoto smėlinio grunto vienaašis gniuždomasis stipris po 7, 28 parų ir 6 mėnesių. Pagal gautus rezultatus pateikiamos išvados ir pasiūlymai.

Šį baigiamąjį magistro darbą sudaro 7 dalys: įvadas, teorijos apžvalga, bandymų metodika, bandymų metodika ir rezultatų analizė, išvados bei pasiūlymai, literatūros sąrašas.

Prasminiai žodžiai: Filtracija, fosforo rūgštis, gelis, gniuždomasis stipris, natrio silikatas, smėlinis gruntas, stabilizavimas.

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics

Master Degree Studies **Geotechnics** study programme Master Graduation Thesis

Title **Stabilization of sandy soil with inorganic solutions**

Author **Dovydas Čepulis**

Academic supervisor **Rimantas Mackevičius**

Thesis language:

Lithuanian

Annotation

In this master thesis enhancement of mechanic qualities of sandy soil and conductivity of water using chemical materials: sodium silicate and hardener- phosphoric acid, are analized. Researching this topic, analysis of literature was prepared, laboratory work methodology and various laboratory researches in different periods of time were completed, analysis of results and conclusions were summarized and presented.

Stabilization of sandy soils are frequently used while reinforcing bases, but details of this process are rarely described in literature, therefore the time for formation of sodium silicate and gel of phosphoric acid, rational correlation and solidity of mixture of sandy soil and chemical materials were examined in various experimantal tests.

Qualities of sandy soils and uniaxial compressive strength of stabilized soil are determined after periods of 7 days, 28 days and 6 months. According to the results, conclusions and suggestions are stated.

This master's thesis contains of 7 parts: introduction, review of the theory material collected, analysis and results of methodology of laboratory works, conclusions and suggestions, references.

Keywords: Compressive strength, gel, filtration, phosphoric acid, sandy soil, sodium silicate, stabilization.

Turinys

Paveikslų sąrašas 8
Lentelių sąrašas 9
Įvadas 10
1. Grunto stiprinimo injekcijomis tipai 12
1.1. Žemo slėgio injekcija (porų injekcija) 13
1.2. Gruntų stiprinimo žemo slėgio injekcija būdai 13
1.2.1. Silikatizacija 13
1.2.2. Gruntų stiprinimas sintetinėmis dervomis 15
1.2.3. Grunto stiprinimas naudojant cemento suspensiją 15
1.2.4. Grunto stiprinimas naudojant molio skiedinį 15
1.2.5. Elektrocheminis grunto stiprinimas 15
1.3. Porų injekcijos atlikimo seka 16
1.4. Vandens pralaidumas ir cheminės injekcijos naudojimo ribos 17
1.5. Tvirtinamo grunto forma 17
1.5.1. Tvirtinimo forma vienarūšiame grunte 17
1.5.2. Tvirtinimo forma nevienarūšiame grunte 18
1.6. Sutvirtinimo spindulys 20
1.7. Porų injekcijos parametrai ir injektavimo technologija 21
1.8. Įrenginiai ir gamybos mechanizacija 24
2. Cheminės medžiagos grunto stabilizavimui 26
2.1. Natrio silikatas 26
2.2. Fosforo rūgštis 28
3. Bandymų metodika 30
3.1. Bandymų eiga 30
3.2. Gelio susidarymas 31
3.3. Tiriamas smėlis 34
3.4. Vienaašio gniuždomojo stiprio nustatymas 37
4. Rezultatų analizė 40
4.1. Bandinių tankis 40
4.2. Vienaašis gniuždomasis stipris 41
4.3. Suirimo plokštuma 44
4.4. Stabilizavimo kaina 47
5. Išvados ir pasiūlymai 48
6. Literatūros šaltiniai 49

Paveikslų sąrašas

1 pav. Aukšto slėgio ir porų injekcijos palyginimas (Lamirit, 2012) 12
2 pav. Gelio susidarymo laikas, kai naudojamas natrio silikatas ir formamidas (Chemical composition and process for soil stabilization. 1962) 14
3 pav. Smėlinio grunto bandymas su natrio silikatu bei natrio aliuminatu (Chemical composition and process for soil stabilization, 1962) 14
4 pav. Porų injekcijos atlikimo seka (Keller, 2010) 16
5 pav. Injektoriaus išdėstymo schema, norint gautisustiprintą grunto masyvą. Injektavimas vykdomas tada, kai šalia esančiame injektoriuje pilnai yra užbaigtas injektavimas 22
6 pav. Injektavimo mechanizmas ir injektoriaus pjūvis (Keller, 2018) 23
7 pav. Pagrindų stiprinimo, silikatizuojant gruntą vienu tirpalu arba stabilizuojant jį sintetinėmis dervomis, principinė chema (Keller, 2010) 24
8 pav. Pamato pagrindo tvirtinimas naudojant žemo slėgio injekciją (Keller, 2010) 25
9 pav. Natrio silikato struktūra (Chemsrc, 2005) 26
10 pav. Fosforo rūgšties struktūra (Lerochem, 2018) 28
11 pav. Skysčio tankio nustatymas areometru 30
12 pav. Fosforo rūgšties tankio nustatymas po skiedimo su vandeniu 31
13 pav. Gelio susidarymo laikas pagal cheminių medžiagų santykį (1 dalis natrio silikato ir 2,0-4,0 dalys fosforo rūgšties). 32
14 pav. Gelio susidarymo proceso stebėjimas 33
15 pav. Naudojamas smėlis bandiniams 34
16 pav. Sietai nustatyti granuliometrinei sudėčiai nustatyti 36
17 pav. Granuliometrinės sudėties kreivė 37
18 pav. Bandinio pastatymas į vienaašį gniuždymo presą 38
19 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio grafikas 39
20 pav. Nustatytas bandinių tankis 40
21 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio rezultatai, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5 41
22 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio rezultatai, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0 42
23 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio rezultatai, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0 43
24 pav. Suirimo plokštuma, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,5 44
25 pav. Suirimo pjūvis, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0 45
26 pav. Suirimo pjūvis, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5 45
27 pav. Suirimo plokštuma ir pjūvis, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5 46

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Tvirtinimo spindulio priklausomybė nuo grunto filtracijos koeficiento 20
2 lentelė. Gelio susidarymo laikas priklausomai nuo cheminių medžiagų santykio..... 32
3 lentelė. Bandiniai pagal cheminių medžiagų proporcijas ir laikymo terpę..... 33
4 lentelė. Bandinių matmenų nustatymas..... 38
5 lentelė. Nustatytas bandinių tankis..... 39
6 lentelė. Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5 41
7 lentelė. Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0 42
8 lentelė. Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,5 43

Įvadas

Pagrindų ir pamatų rekonstrukcija – viena aktualiausių šiuolaikinės geotechnikos problemų. Statant papildomus pastato aukštus ant senų pamatų, įrengiant giliąsias pamatų duobes greta esančių pastatų, likviduojant pernelyg didelius ir netolygius pastatų ant silpno pagrindo nuosėdžius, tiesiant tunelius sudėtingomis hidrogeologinėmis sąlygomis ir daugeliu kitų atvejų tenka specialiomis priemonėmis paveikti pagrindo gruntą, kad šis taptų tvirtesnis, nelaidus vandeniui ir atitiktų tuos reikalavimus, kurie keliami sudėtingose sąlygose įrengiamiems pagrindams ir pamatams (Sandia National Laboratories, 1994).

Šiame baigiamajame magistro darbe nagrinėjama smėlinio grunto mechaninės savybės, po stabilizavimo neorganiniais tirpalais.

Gruntų stabilizavimas atliekamas injekcijomis, kurios skirstomos į šiuos tipus: porų injekcija (žemo slėgio injekcija) ir srautinė injekcija (aukšto slėgio injekcija).

Porų injekcija – tai senesnis metodas, išsivysčiusių ekonominiu požiūriu šalių statyboje (ypač pagrindų ir pamatų rekonstrukcijoje bei požeminėje statyboje) plačiai naudojamas nuo dvidešimto amžiaus trečiojo dešimtmečio, kai inžinieriaus Jostenas (Josten) pasiūlė smėlinio grunto silikatizaciją dviem tirpalais būdą.

Pagal naudojamas medžiagas yra skiriama porų injekcija cemento suspensija, neorganiniais daugiamolekuliniais junginiais (natrio silikato pagrindu) ir orgnaniniais polimerais (sintetinėmis dervomis) (Raymond W. Henn, 1996).

Šio baigiamojo magistro darbo tikslas – ištirti smėlinio grunto stabilizavimo neorganiniais tirpalais dėsningumus.

Smėlinis gruntas tai labai birus gruntas, kurio dalelių dydis svyruoja nuo 0,063 mm iki 2 mm. Kadangi sausas smėlis yra visiškai birus ir nestabilus, o tai pamatų pagrindams ar sudėtingiems statiniams dažnais atvejais netinka. Todėl su cheminėmis medžiagomis siekiama pagerinti smėlinio grunto savybes, pvz.: filtracijos koeficientą, mechaninį suspaudžiamumą ir panašiai. Šiame baigiamojo magistro darbe apžvelgiama ir ištiriama, kaip gali kisti smėlinio grunto savybės po stabilizavimo natrio silikato ir fosforo rūgšties tirpalais, kai susidaro nelaidus silicio rūgšties gelis.

Fosforo rūgštis – tai silpna neorganinė bei netoksiška rūgštis, kuri būdama 100 %, kambario temperatūroje ir normaliame slėgyje yra kietos formos. Ji naudojama maisto pramonėje, metalų apdirbime, medicinoje, žemės ūkyje bei chemijos pramonėje.

Natrio silikatas, geriau žinomas, kaip skystas stiklas. Labai plačiai naudojamas statybose, kur reikia sumažinti betono poringumą, o tai leidžia sumažinti vandens įsiskverbimą. Taip pat naudojamas plovimo pramonėje, vandens valyme, maisto apdirbime, geologijoje ir t. t.

Šios medžiagos gruntų stabilizavimui bei filtracijos koeficientui sumažinti, buvo pasiūlytos labai seniai ir tik vieno autoriaus (Sokolovich, V., 1981), todėl eksperimentiniais bandymais patikrinama, kaip reaguoja cheminės medžiagos ir, kaip pasikeičia smėlinio grunto stiprumas.

Baigiamajam darbui keliami toki uždaviniai:

1. Parinkti chemines medžiagas smėlinio grunto stabilizavimui ir jas ištirti.
2. Nustatyti bandinių gniuždomąjį stiprį atliekant bandymus po 7, 28 ir 6 mėnesių nuo bandinių paruošimo
3. Nustatyti kokią įtaką gniuždomajam stipriui daro cheminių medžiagų santykis.
4. Nustatyti kaip priklauso gelio susidarymo laikas nuo natrio silikato ir fosforo rūgšties santykio.

1. Grunto stiprinimo injekcijomis tipai

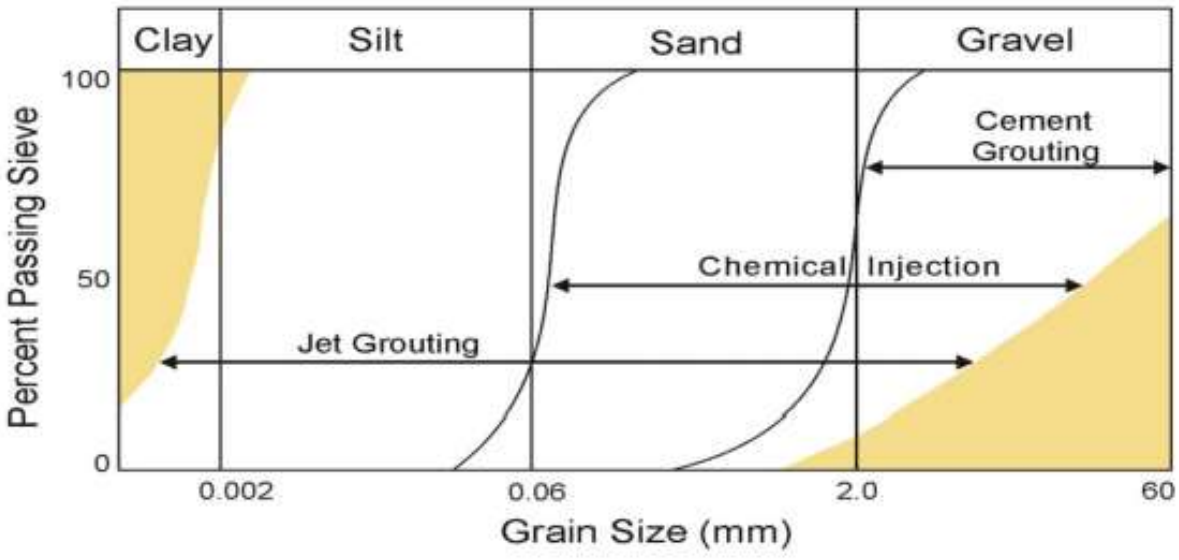
Skiriami du grunto injekcijos tipai: porų injekcija (žemo slėgio injekcijos) ir srautinė injekcija (aukšto slėgio injekcija).

Porų injekcija ir srautinė injekcija paremtos skirtingais principais. Porų injekcijos metu tvirtinantis gruntą tirpalas, kurio klampumas artimas vandens klampumui, specialiai įspaudžiamas į poras kuo mažesniu slėgiu, kad nesuardytų natūralios grunto struktūros, o tik užpildytų esančias poras (tuštumas) ir jose sukietėtų, suklijuodamas atskiras grunto kietąsias daleles i vientisą monolitą. (Michael, J. et al., 1995)

Srautinė injekcija, priešingai, ardo esamą grunto struktūrą ir vėliau paverčia cemento skiedinio ir grunto mišinį tvirtu gruntbetoniu.

Porų injekcijos pranašumas: šiuo metodu nė viename etape gruntas nepraranda stabilumo. Naudojant srautinę injekciją, tai neišvengiamai įvyksta toje pagrindo dalyje, kurioje atliekama injekcija: srovė suardo esančius grunto struktūrinius ryšius, o vėliau, veikiant cemento suspencijai, susidaro nauji – srovės suardytas gruntas susicementuoja, pavirsdamas į gruntbetonį.

Kaip matyti iš grafiko, cemento injekcija galima tik esant dideliems grunto filtracijos koeficientams. Cheminė injekcija galima tvirtinti ir didesnę dalį smėlio gruntų, o srautinė injekcija gali būti pritaikoma bet kokios dispersijos gruntui stiprinti. Palyginti su porų injekcija (žemo slėgio injekcija), ji leidžia sutvirtinti ne tik įvairaus stambumo smėlį, dulkį (dulkingą smėlį), bet ir molinį gruntą netgi kietai plastišką priemolį paverčia uoliena su tvirtais kristaliniais ryšiais (Sližytė, D. et al. 2012)



1 pav. Aukšto slėgio ir porų injekcijos palyginimas (Lamirit, 2010)

1.1. Žemo slėgio injekcija (porų injekcija)

Porų injekcija (angl. $Grouting$) – tai pagrindų stiprinimo metodas, kai žemu slėgiu pro skylutes injektoriuje į gruntą įšvirkščiamas mažo klampumo laipsniškai kietėjantis tirpalas neardydamas natūralios grunto struktūros, ją stabilizuoja, suteikdamas tvirtus kristalinius ryšius.

1802 metais prancūzų inžinierius Charlesas Berigny išrado gruntų injekcijos metodą ir juo pirmą kartą sutvirtino giliai slūgsantį žvyrą cemento suspensija.

1.2. Gruntų stiprinimo žemo slėgio injekcija būdai

1.2.1. Silikatizacija

1886 metais Vokietijoje Jezerskis užpatentavo laidžių vandeniui uolienų stiprinimo metodą, pagal kurį į rupų arba vidutinio rupumo smėlinį gruntą paeiliui injektuodamas natrio silikato (skystojo stiklo) ir kalcio chlorido tirpalai. Sąveikaudami grunto porose, šie tirpalai sudaro tvirtą silicio rūgšties gelį, kuris suteikia smėliui stiprumo ir ne laidumo vandeniui.

1926 metais G. Joostenas patobulino Jezerskio pasiūlytą būdą, kuris nuo tol pasauliui žinomas kaip **Josteno metodas**. 1927 m. metais Vokietijoje šis metodas buvo panaudotas sustiprinti po polių padais tarp vandensparų (nelaidžių vandeniui grunto sluoksnių) buvęs vandens prisotintas smulkus smėlis. Po šio įvykio Josteno metodas plačiai paplito Vokietijoje, Anglijoje, Prancūzijoje, Čekoslovakijoje, Lenkijoje ir buvo naudojamas stiprinti smėlinį gruntą. Šis metodas buvo pritaikytas tiesiant metro tunelius Paryžiuje, Hamburge, Londone. Tokiose šalyse kaip Anglija Josteno metodas ilgą laiką buvo vienas pagrindinių būdų stiprinti gruntą. Net gi ir dabar šiuo ekologiškai švariu metodu stabilizuojami silpni gruntai (Mackevičius, R. 2009).

Greta Josteno metodo ketvirtame dešimtyje ekonomiškai išsivysčiusiose šalyse buvo naudojami ir kiti injekciniai pagrindų stiprinimo būdai: Francois metodas (naudojama natrio silikatas ir aliuminio sulfato mišinys), Rodio (naudojama skystas stiklas ir kalkių pienas) ir kiti.

1932 metais Sovietų Sąjungoje inžinierius B. Ržancynas, bendradarbiaudamas su žymiais to laikotarpio sovietų mokslininkais chemikais, sukūrė grunto silikatizacijos dviem tirpalais metodą, panašų į jau pritaikytą Josteno. Šis metodas buvo pritaikytas Maksvoje, kuomet buvo kasama metro tuneliai, po jau įrengtais namai, kurie stovėjo ant smėlinių pagrindų.

1939 metais rusų mokslininkas V. Sokolovičius pasiūlė silikatizaciją vienu tirpalu metodą smėliniams gruntams, kurių filtracijos koeficientas mažesnis kaip 2 m/parą.

Pagrindinis skirtumas tarp silikatizacijos dviem tirpalais ir vienu tirpalu yra tas, kad pirmuoju atveju reakcijoje dalyvaujantys tirpalai į gruntą injektuojami paeiliui ir reakcija prasidėdavo grunte. Antruoju atveju tirpalai sumaišomi dar prieš injektavimą ir gelio susidarymo reakcija prasideda specialiame įrenginyje, kuris maišydavo komponentus, ir tik tuomet buvo injektuojama į gruntą, kuriame ir susidarydavo galutinis gelis.

Penktajame dešimtmetyje greta pirmosios injekcinio pagrindų stabilizavimo krypties, paremtos daugiamolekulinių neorganinių junginių (tai polimerų, kurių molekulės turi neorganines pagrindines grandines ir neturi organinės kilmės šoninių radikalų) taikymu, atsirado antroji. Ji buvo paremta organinių polimerų (sintetinių dervų) naudojimu.

Įmirkyto smėlio laboratoriniai tyrimai parodė, kad natrio silikato gelis su 16,5% vandens bei kietikliu buvo 5-8 kartus stipresnis nei su 45% vandens, to pačio gelio.

Susidariusi gelio bei smėlio junginys iki 5 dienų sustiprėja maždaug iki 25-28 Psi (172,3 kN/m^2 – 193,1 kN/m^2)

Silicate, Ml.	Form-amide, Ml.	Water, Ml.	Gel Time, Minutes
50	2	28	300
50	4	26	89
50	6	24	84
50	8	22	52
50	10	20	30
50	12	18	16
50	14	16	6

2 pav. Gelio susidarymo laikas, kai naudojamas natrio silikatas ir formamidas (Chemical composition and process for soil stabilization. 1962)

Test cylinders (1"/32" dia. x 3" high) of sand are prepared using —60 mesh Ottawa silica sand, the compositions and strengths being as follows:

Composition of Gelable Liquid, Percent by volume				Sand (g.)	Liq. (ml.)	Compressive strength (p.s.i.)
Formamide	Sodium Aluminate, 75 g.p.l.	Water, Ml.	Sodium Silicate [1]			
2	15	23	60	252	58	43.7
2	20	18	60	260	50	39.4
8	10	22	60	260	50	51.6
4	10	26	60	260	50	52.9
14	5	21	[2] 60	260	50	341.7
15	0	22.5	[2] 62.5	260	50	542.7

3 pav. Smėlinio grunto bandymas su natrio silikatu bei natrio aliuminatu (Chemical composition and process for soil stabilization, 1962)

1.2.2. Gruntų stiprinimas sintetinėmis dervomis

Sintetinės dervos – tai santykinai nedidelės molekulinės masės organiniai polimerai (oligomerai), kurie kietėdami virsta netirpiais ir nelydžiais erdvinės struktūros polimerais.

Dervų vienas pagrindinių pliusų tai, kad karštos injektuojamos į gruntą jos su vandeniu nesąveikauja, o susilietusios su juo sudaro plėvelę, kuri nepraleidžia vandens. Derva pasklinda dideliame plote, nes ilgai vėsta.

Tačiau yra ir didelių trūkumų. Kuomet grunto masyve yra didelis vandens slėgis, jis išspaudžia dervas iš didelių porų, o vėliau ir iš mažesnių porų. Taip pat nustatyta, kuomet dervos vėsta, jos traukiasi, o tai turi įtakos vandens pralaidumui. Todėl šis būdas beveik nebenaudojamas.

Vandens ne pralaidumui grunte buvo sugalvotas šaltų dervų injektavimas. Eksperimentais nustatyta, kad derva patenka į visas grunto poras, nes jos dalelių skersmuo yra 25–35 kartus mažesnis nei vidutinis grunto dalelių dydis.

Gruntams stiprinti labiausiai tinka akrilinės, karbamidinės, furaninės, rezorcininės ir uretaninės sintetinės dervos.

1.2.3. Grunto stiprinimas naudojant cemento suspensiją

Grunto stiprinimas, cemento arba cemento – molio skiediniu naudojamas, kai reikia užpildyti tuštumas, stambias poras ar plyšius stambiagrūdžiame grunte. Taip pat, kai norima, jog sąlyginai brangios medžiagos sąveikautų su smulkaus grunto dalelėmis, o ne tik užpildyt stambius plyšius tarp jų. Tokiu atveju pirma injektuojamas cemento skiedinys ir tik paskui silikatai ir dervos. Pavyzdžiui, dėl grunto nuosėdžių po pamato padu gali atsirasti tuštumos, kurias galima užpildyti injektuojant cemento skiedinį, kuris po tam tikro laiko sukietėja ir virsta kieta cemento – molio ar cemento medžiaga, panašia į akmenį (Dayakar, P. et al., 2012). Šiuo būdu pasiekiama didesnė grunto laikomoji galia ir ji atsiranda po visu pamato padu. Gruntui stiprinti gali būti naudojama cemento - molio, cemento – smėlio ar cemento skiediniai (Mollamahmutogiu, M. ir Yilmaz, Y., 2010).

1.2.4. Grunto stiprinimas naudojant molio skiedinį

Šis būdas naudojamas, kai reikia užpildyti karstinius plyšius. Tačiau dirvožemis turi būti sausas, kad gruntas galėtų ištraukti vandenį iš molio suspensijos. Skiedinio tankis 1,2–1,3 g/cm^3. Injekcija atliekama esant 2 MPa slėgiui.

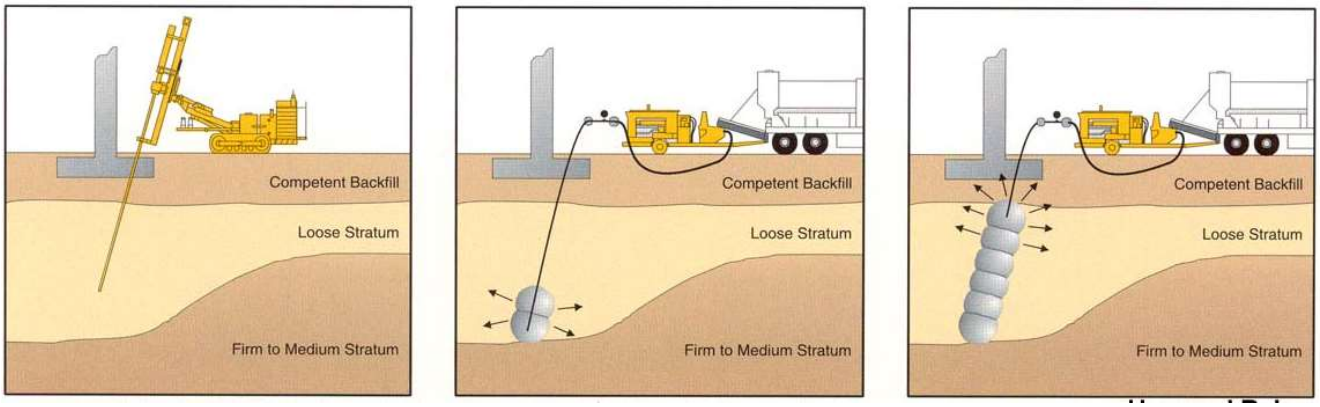
1.2.5. Elektrocheminis grunto stiprinimas

Anksčiau aprašyti grunto stiprinimo metodai yra atliekami injekcijos būdu, todėl juos galima naudoti tik esant didesniam nei 0,2 m/parą filtracijos koeficientui. Esant mažesniam filtracijos koeficientui galima naudoti elektrocheminį būdą (Prostov, S. M. ir Nikulin, N. Tu., 2015).

Eksperimentais nustatyta, kad grunte, stipriname elektrocheminiu metodu, vyksta šie procesai:

1. Elektroosmosas, kurio metu gruntas sausėja ir tankėja;
2. Vyksta mainų reakcija;
3. Susiformuoja struktūra, susidaro aliumogelis.

Taip pat lauko ir laboratoriniais eksperimentais nustatyta, kad 1 m^3 grunto sustiprinti reikia 40–100 kWh, o atstumas tarp elektrodų 0,5–1,0 m. esant 50–100 V įtampai.



4 pav. Porų injekcijos atlikimo seka (Keller, 2010)

1.3. Porų injekcijos atlikimo seka

Cheminį grunto stiprinimo procesą sudaro viena arba dvi cheminių mišinių injekcijos. Mišinys injektuojamas į gruntą per įgręžtų injektorių sistemą. Cheminis mišinys sklisdamas grunte užpildo ne tik jo poras, bet ir susilietęs su dalelių paviršiumi kartu pradeda reaguoti. Vykdant silikatizacija ypač aktyviai reaguoja kvarcinis gruntas.

Sustiprinus gruntą chemine injekcija dalelė persidengia cementuojančia medžiaga, todėl gretimos dalelės tarpusavyje susijungia ir toks gruntas gali atlaikyti sąlyginai dideles apkrovas, ko negali padaryti natūralus gruntas.

Paviršiaus plotas, kurį padengia cementuojanti medžiaga skirtingiems gruntams yra skirtinga. Dalelių suminis paviršiaus plotas yra tuo didesnis, kuo smulkesnis gruntas. Tai yra labai svarbus parametras, nes pagal jį galima apskaičiuoti sutvirtinto grunto stiprį (yra vienas iš skaičiuojamųjų parametrų).

Darant prielaidą, kad cementuojanti medžiaga padengia 50% dalelės paviršiaus, galima apytiksliai apskaičiuoti cementuojančios medžiagos plėvelės storį. Dalelės forma daro įtaką grunto stipriui. Savaime aišku, kad dalelės forma turi įtakos kapiliarų dydžiui, kuriais juda cheminis mišinys. Tačiau dalelės forma turi mažesnės įtakos stipriui negu dalelės dydis.

Apie smėlio grunte esančias molio priemaišas yra susidariusi nuomonė, kad tai yra kenksminga. Kadangi jos yra didelės dispersijos, tai ir suminis paviršius yra didelis, todėl jos akty-

viau dalyvauja reakcijoje. Cheminiu požiūriu molingose dalelėse yra daug aliumosilikatų (Narloch, P., 2020).

Didėjant molio priemaišų kiekiui, didėja ir sustiprinto grunto stipris. Duomenys taip pat rodo, kad stiprį įgauna jau pačioje pradžioje. Gauti duomenys parodo, kad molio priemaišos ne tik fiziškai pagerina grunto kokybę, bet ir chemiškai aktyviai dalyvauja reakcijoje. Tačiau tai nereiškia, kad labai molingą gruntą galima tvirtinti tokiu būdu, nes viskas priklauso nuo technologijos. Didžiausią įtaką turi filtracijos koeficientai ir grunto porų dydis. Čia aptarta, kai naudojamas silikatizavimas. O gruntus tvirtinant dervomis, molio priemaišos yra žalingos. Kai priemaišos sudaro daugiau kaip 3 % iš karto gruntas susilpnėja.

1.4. Vandens pralaidumas ir cheminės injekcijos naudojimo ribos

Cheminių mišinių injektavimas galimas tik grunte, kurie turi reikalingą vandens laidumą. Todėl vandens laidumas yra viena iš svarbiausių grunto rodiklių.

Grunto vandens laidumą rodo filtracijos koeficientas, kuris nustatomas pagal Darsi dėsnį. Hidrologijos praktika rodo, kad filtracijos koeficientas gerai nusako grunto savybes. Taigi ir grunto stiprinimo ribos nustatytos pagal filtracijos koeficientą turi būti pripažintos racionaliomis. Yra aišku, kad grunto cheminė injekcija susijusi su grunto vandens hidraulika.

Nustatyti žemiausias ribas, kuriomis esant dar galima naudoti dvitirpalinį silikatizavimą, galima gana tiksliai. Praktikoje yra pasitaikę atvejų, kai grunto buvo neįmanoma sustiprinti chemine injekcija - dėl jo žemo filtracijos koeficiento. Nes norint injektuoti, padidinus slėgį, mišinys grunte padarydavo plyšius ir tekėdavo jais. Todėl naudojant dvitirpalinį silikatizavimo būdą nerekomenduojama stiprinti gruntų, kurių filtracijos koeficientas mažesnis nei 2 – 2,5 m/parą.

Netikslinga naudoti šio metodo, kai filtracijos koeficientas didesnis už 80 m/parą. Tai susiję su tuo, kad prie labai mažo injektuojamo slėgio susidaro didelis stiprinimo spindulys. Mažas slėgis grunte sudaro poringą masę, o ne tvirtą hidrogelį. Todėl yra mažas stiprumas. Taip pat mažas dalelių paviršinis plotas duoda mažą skeleto stiprumą. Analogiškai nustatoma vientirpalinės silikatizacijos ir stiprinimo dervomis ribos.

1.5. Tvirtinamo grunto forma

1.5.1. Tvirtinimo forma vienarūšiame grunte

Mišinio judėjimas grunte lemia paviršinio grunto savybės, slėgis, kuriuo injektuojamas mišinys, mišinio klampumas ir grunto savybės, t. y. Jo filtracijos koeficientas, vandens prisotinimas, vienarūšingumas.

Esant vienarūšiam gruntui, jį sustiprinus susidaro taisyklingos geometrijos figūra, kurios gali būti teoriškai apskaičiuotos. Figūros formai patikslinti buvo atlikti dviejų tipų bandymai.

Pirmas, nustatyti formą, kai injektuojama viename taške, o antras – kai injekcija atliekama pagal liniją. Vienas ir kitas atvejis, dažnai pasitaikantys praktikoje, chemiškai stiprinant gruntus, arba injektuojama per atvirą injektoriaus galą, arba per perforuotą dalį.

Pirmu atveju injektuojant mišinys teoriškai turi į visas puses grunte pasiskirstyti vienodai ir turėtų susidaryti rutulio formos. Tačiau veikiamas dar sunkio jėgos forma kinta. Ir ji kinta tuo labiau, kuo injekcija atliekama ilgiau ir mišinys yra skystesnis. Laboratoriškai tiriant buvo naudojamas natrio silikatas, t. y. Mišinys labai didelio klampumo ir injektuojama aukštu slėgiu. Tokiu atveju, sunkio jėga įtakos figūros formai beveik neturi. Laboratoriškai tai ir pasitvirtino.

Teoriškai per perforuotą dalį injektuojant turėtų susidaryti elipsoidas. Tam patvirtinti taip pat buvo atlikti bandymai ir gautos figūros – elipsoidai.

Galima dar išskirti tai, kad mišinys beveik vienodai nutolsta į visas puses nuo injektoriaus linijos. Abiejuose linijos galuose mišinys sudaro pusiau sferos formą, kurios centras yra galutinis linijos taškas.

1.5.2. Tvirtinimo forma nevienarūšiame grunte

Labai klampiam skysčiui įsiskverbiant į gruntą didelės įtakos jo formai turi skirtingos grunto rūšys. Toliau aptariant įvairius gruntus, skirsime į dvi rūšis:

1. Poringus;
2. Nevienarūšius susisluoksniavusius.

Poringumas – esant tai pačiai granuliacijai yra skirtingos zonos. Vienos sutankėjusios, kitos – poringos.

Nevienarūšis susisluoksniavimas – tai, kai pagal granuliometrinę sudėtį yra susisluoksniavęs gruntas.

Poringas gruntas - judant mišiniui grunte, didesnis prasiskverbimo gylis bus ten, kur gruntas poringesnis. Atvirkščiai tankiame grunte, kuriame mišinys prasiskverbs negiliai. Tai galima sakyti, kad mišinio judėjimo greitis ir įsiskverbimo gylis priklauso nuo grunto poringumo. Bet pasirodo, kad mišinio skverbimasis į gruntą labai kinta, jeigu vanduo yra pakeičiamas silikatu ar kitu mišiniu. Tokiu atveju, esant klampiam mišiniui ir nemažam slėgiui, nevienarūšiame grunte susidaro tarpai ir jais pradeda tekėti stiprinamasis skystis. Taigi galima sakyti, kad mišinys „ieško“ grunte skirtingo poringumo ir, esant slėgio skirtumui, jame susidaro plyšius ir jais juda.

Tad klampus mišinys visada siekia grunte sudaryti sau praėjimus ir tai jam geriau pavyksta, kai gruntas yra sausesnis, smulkesnis, poringesnis ir kuo didesnis slėgis, injektuojant mišinį.

Nevienarūšio grunto susisluoksniavimas - tai svarbus faktorius, turintis įtakos stiprinimo masyvo formai. Ir turi būti nustatytas dar prieš vykdant darbus.

Toks nevienarūšiškumo pavyzdys yra skirtingo tipo gruntų susisluoksniavimas. Atsižvelgiant į grunto sluoksnio storį, galimas mišinio injektavimas per injektoriaus perforuotą dalį iškart dvejuose skirtinguose sluoksniuose. Aišku, kad lengviau injektuosis į gruntą su didesniu filtracijos koeficientu. Tad mišinio kiekis, patenkantis į gruntą, bus skirtingas skirtinguose sluoksniuose ir priklausys nuo filtracijos koeficientų, ir nuo perforuotos dalies santykinio ilgio, esančio kiekviename sluoksnyje.

Pagal esamus duomenis galima padaryti tokias išvadas:

1. Didėjant mišinio klampumui ir injektuojamam slėgiui, grunto poringumas pasireiškia rečiau. Mišinys ieško išpurento grunto ir, radęs tokį, jame suformuoja plyšius. Tada stiprinamasis skystis pasidaręs plyšius gali nueiti didelius atstumus.
2. Esant nevienarūšiam gruntui sukeliamas toks dalykas, kaip nevienodas mišinio prasiskverbimas į skirtingus sluoksnius. Nevienodas prasiskverbimas priklauso nuo tų sluoksnių.filtracijos koeficientų santykio.
3. Į gruntą injektuoto mišinio pasiskirstymo charakteris nusako gauto masyvo formą ir vienalytiškumą.

Iš šių išvadų galima sakyti, kad išpurento grunto praktiškai neįmanoma sustiprinti. Esant skirtingo grunto sluoksniams, tokį gruntą sustiprinti galima. Šiuo atveju galima rekomenduoti tokią stiprinimo schemą, kai pradedame stiprinti gruntą nuo sluoksnio su dideliu filtracijos koeficientu ir baigti sluoksniu su mažiausiu filtracijos koeficiento sluoksniu.

1.6. Sutvirtinimo spindulys

Esant dvitirpalinio silikatizavimo atveju natrio silikato tirpalo pasiskirstymo spinduliui turi įtakos, grunto filtracijos koeficientas, mišinio klampumas, skiedinio stingimo laikas, slėgis ir injektavimo trukmė. Spindulio didumas labai padidėja, didėjant injektavimo laikui ir slėgio gradientui.

Praktika rodo, kad gruntas sutvirtėja tik nedideliu atstumu nuo injektoriaus, o dideliu atstumu nuo jo gruntas sutvirtėja silpnai. Pagrindine priežastimi ribojančia sutvirtinimo spindulį yra cheminiai procesai vykstantys grunte skirtingai prie injektoriaus ir toli nuo jo. Kalcio chlorido tirpalas paprastai injektuojamas toje pačioje vietoje, kur ir natrio chloridas. Injektuojant antrą tirpalą (kalcio chloridą) reakcijos metu susiformuoja silicio rūgštis (hidrogelis) ir kalcio nuosėdos, p natrio chloridas, susimaišęs su vis injektuojamu į gruntą kalcio chloridu, dalinai išnešamas į išorę. Dėl to natrio chlorido kiekis nuo centro didėja (Cheng, W. et al., 2018).

Būdas elektrolitas natrio chloridas sukelia natrio silikato išsisluoksniavimą, bet tik esant didelei jo koncentracijai. Esant mažai koncentracijai, NaCl tik atskiedžia natrio silikatą, tai ir sukelia sumažintą stiprumą toliau nuo injektoriaus.

Ištyrę tirpalo judėjimą grunte, pamatėme, kad kalcio chloridas, išeidamas iš injektoriaus, iš porų išstumia natrio silikatą, juda jomis ir sudaro nenutraukiamą tėkmės liniją. Veikiamas slėgio mišinys juda artimiausiu keliu, kuris negali būti tiesus dėl sutinkamų grunto dalelių. Esant tokiam judėjimui mišinys nepapuola į visas poras, todėl sustiprinto grunto paviršius nėra lygus.

Buvo manoma, kad gruntas sutvirtėja ne tolygiai, o šuoliškai, bet laboratoriškai ir praktiškai, tai buvo paneigta. Lauko darbų patirtis parodė, kad esant natūraliam gruntui sustiprinimas gaunamas dar tolygesnis. Kur nepatenka kalcio chloridas, ten reakcija tarp jo ir natrio silikato vyksta difuzijos principu.

Iš viso, kas pasakyta, galima daryti išvadą, kad gauti didelio spindulio sutvirtinimo grunto koloną neleidžia neigiamas natrio chlorido poveikis. Jo kiekis yra tuo didesnis, kuo suminis dalelių paviršiaus plotas yra didesnis, t. y. Kuo didesnis paviršių susilietimo plotas tarp pirmo ir antro mišinio paviršių.

Bandymais buvo nustatyta mažiausi spinduliai gruntams su įvairiais filtracijos koeficientais.

1 lentelė. Tvirtinimo spindulio priklausomybė nuo grunto filtracijos koeficiento

Filtracijos koeficientas, m/parą	2–5	5–10	10–20	20–50	50–80
Tvirtinimo spindulys, m	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0

Pagal bandymų duomenis gauta empirinė formulė, kuria galima naudotis skaičiuojant sutvirtinimo spindulį r, m. naudojant dvitirpalinį silikatizavimo atvejį.

$$r = 0{,}25 \cdot \sqrt[3]{k_f}; \quad (1)$$

k_f- filtracijos koeficientas, m/parą.

Tvirtinant gruntą vientirpaliniu silikatizavimu ir dervomis praeina tam tikras laiko tarpas, po kurio prasideda tirštėjimas, o vėliau injektuoto mišinio kietėjimas, Todėl tvirtinimo spindulys taip pat priklauso nuo grunto filtracijos koeficiento, o po to nuo mišinio klampumo ir gelio susidarymo laiko.

1.7. Porų injekcijos parametrai ir injektavimo technologija

Sustiprinto grunto formos ir monolitiškumui išsiaiškinti buvo atlikta labai daug bandymų. Buvo išsiaiškinta priklausomybė tarp injektuojamo mišinio kiekio ir sustiprinto grunto.

Norint apskaičiuoti reikiamą injektuojamo mišinio kiekį N, vienarūšio smėlio tvirtinimui galima naudotis šia formule:

$$N = 5 \cdot V \cdot n; \quad (2)$$

V – tvirtinamo grunto tūris, m3;

N – grunto poringumas, %.

Nevienarūšiame ir stambiame smėlyje mišinio kiekis sumažėja 60 % negu gauname apskaičiavę pagal formulę. Taip pat buvo nustatyta, kad injektuodami tirpalus per kelis injektorius, tarp kurių tarpas mažesnis negu du tvirtinimo spinduliai, gauname monolitinį masyvą su tolygiu stiprumu (Celik, F., 2019).

Masyvas, kurį sustiprina vienas injektorius, yra sukimosi elipsoido formos. Taip yra todėl, kad slegiamas tirpalas nuo perforuotos injektoriaus dalies plinta ne tik į šonus (horizontaliai), bet ir vertikaliai, tai yra į viršų ir į apačią nuo viršutinio ir apatinio injektoriaus galo. Todėl, kad būtų galima gauti cilindro formos sutvirtintą masyvą, tarp perforuotų grandžių (sutvirtinimo etapų) yra paliekamas 0,5r intervalas. Tirpalo perteklius pasklinda ir yra gaunamas cilindro formos masyvas.

Injektorių išdėstymo plane žingsnį priimta imi mažiau dviejų spindulių. Injektoriai išdėstomi šachmatine tvarka, kad nebūtų nesutvirtintų vietų. Taip pat injektorius reikia išdėstyti trikampio kampuose atstumu, ne didesniu kaip:

$$d = 1{,}73 \cdot r; \quad (3)$$

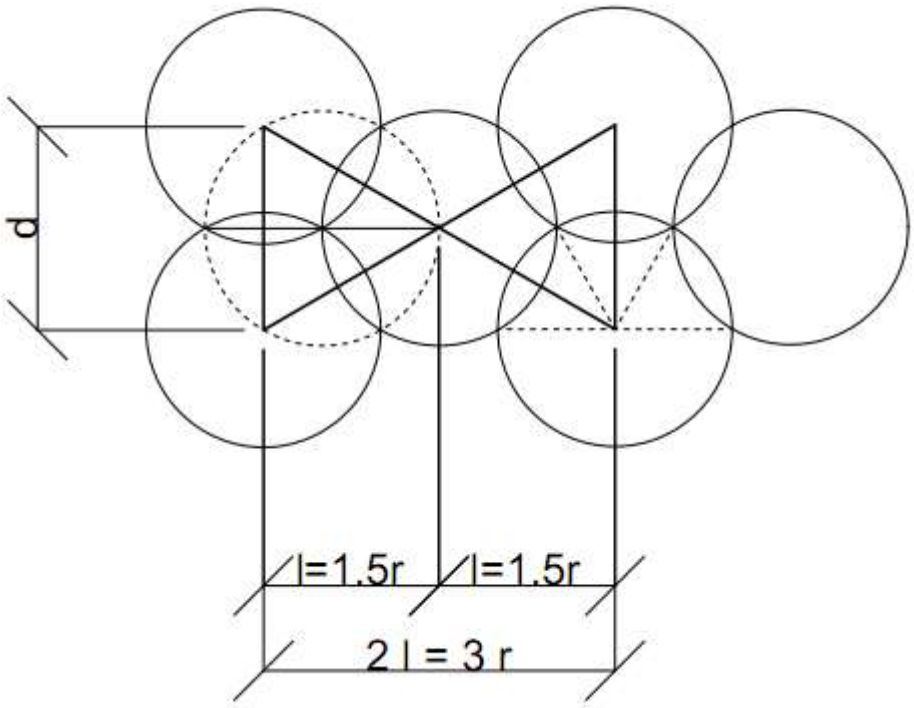
r - tvirtinimo spindulys nuo vieno injektoriaus.

Atstumas nuo injektoriaus eilių apskaičiuojamas pagal formulę:

$$l = 1{,}5 \cdot r. \quad (4)$$

Vienarūšiame grunte norint gauti monolitinį masyvą injektuojama palaipsniui iš apačios į viršų arba iš viršaus į apačią. Jei nevienarūšiai gruntai, tai pradedama nuo sluoksnių su didžiausiu filtracijos koeficientu, o baigiama su mažiausiu filtracijos koeficientu.

Stiprinimo gylis priklauso nuo injektoriaus įgilinimo, grunto vienarūšiškumo ir charakteristikų. Mišiniui injektuoti leidžiama, kai stiprinamo grunto temperatūra ne žemesnė, kaip +1°C, pašildžius mišinį iki 60°C.



5 pav. Injektoriaus išdėstymo schema, norint gauti sustiprintą grunto masyvą. Injektavimas į smėlinį gruntą vykdomas tada, kai šalimais esančiame injektoriuje pilnai yra užbaigtas injektavimas.

Tvirtinant silikatizavimu arba dervomis, į smėlį mišiniai injektuojami pradžioje per pirmą injektavimo eilę, o po to per antrą ir t.t. Eilėse injektuojama vienu injektoriumi.

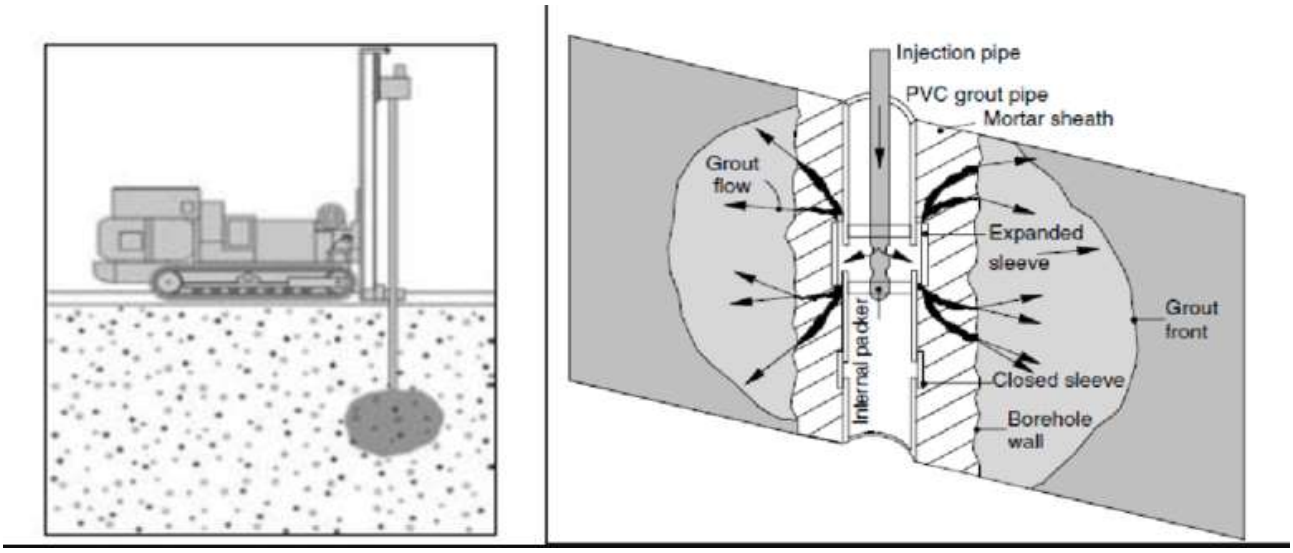
Esant dvitirpaliniam silikatizavimui, natrio silikato ir kalcio chlorido mišiniai injektuojami pirmiausia per nelygines injektorių eiles, o po to per lygines. Kalcio chlorido tirpalą reikia kuo greičiau injektuoti po natrio silikato injektavimo. Tarpas tarp pirmo ir antro mišinio injektavimo esant gruntų filtracijos koeficientui 0 m/parą turi būti ne didesnis, kaip 24 h, o 0,5 m/parą – 6 h, 1,5 m/parą – 2 h, 3 m/parą – 1 h.

Dvitirpalinis injektavimas vykdomas dviem siurbliais, kiekvienas mišinys injektuojamas atskiru siurbliu. Neleidžiama mišiniams susimaišyti bakuose arba žarnose. Panaudoti įrenginius, kuriais buvo injketuojama anksčiau, galima tik gerai išplovus karštu vandeniu.

Nustatymui ribinio injektavimo slėgio daromi bandomieji injektavimai. Pati injekcija vykdoma žemesniu negu ribinis slėgiu, kad išvengtume grunte plyšių susidarymo ir prasiveržimo į grunto paviršių.

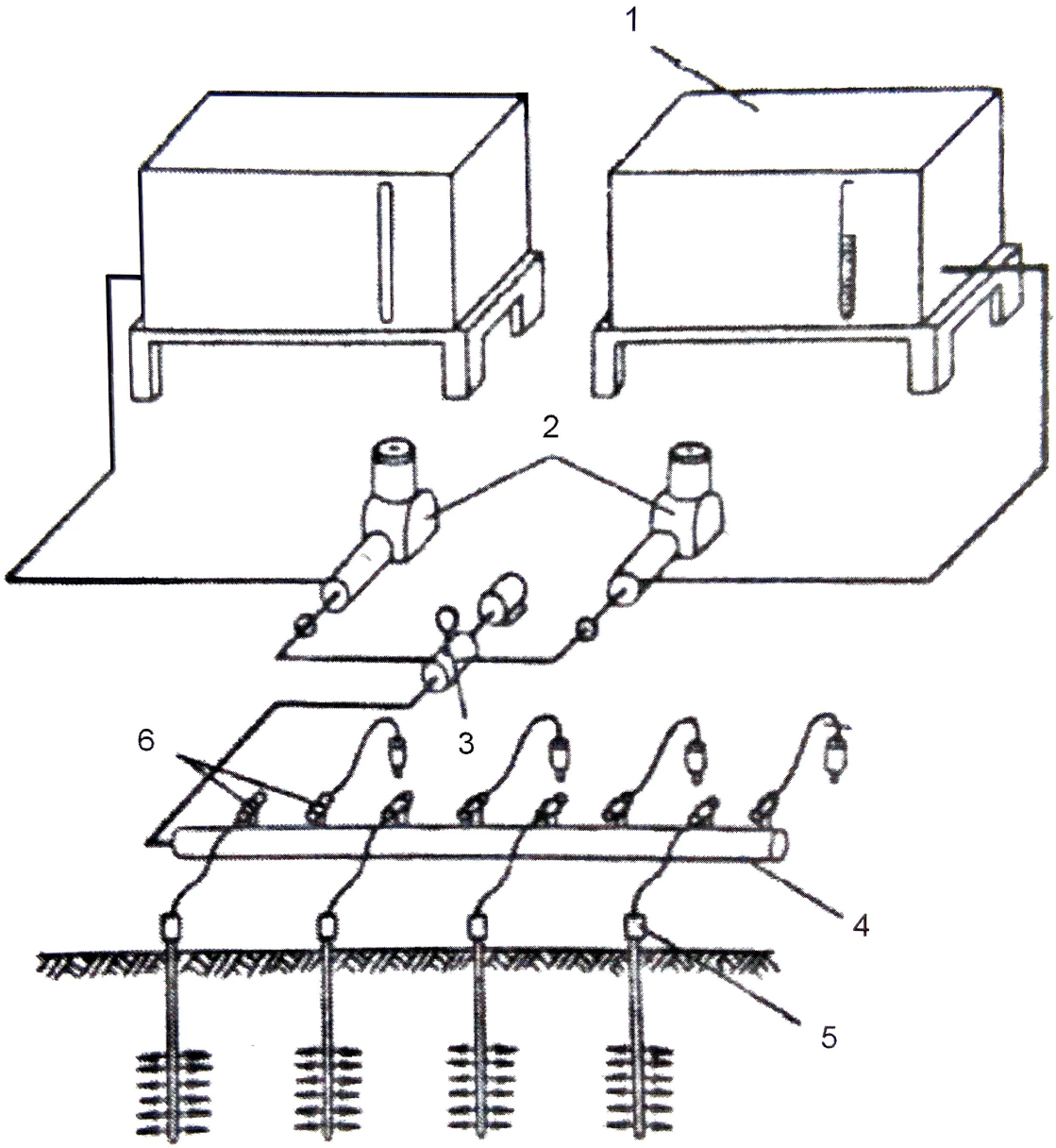
Didelę reikšmę injektuojant mišinį į gruntą turi slėgis. Kaip buvo nustatyta esant dvitirpaliniam silikatizavimui slėgis turi neviršyti 1,5 MPa, vientirpalinėje silikatizacijoje ir tvirtinant gruntus dervomis slėgis neturi viršyti 1,0 MPa.

Jeigu mišinys prasiveržia į paviršių, tai reiškia, kad buvo viršytas injektuojamasis slėgis arba mišinys pateko į išpurentą grunto dalį arba tuštumą. Pasitaikius tokiam atvejui reikia nutraukti darbus ir užsandarinti tuos plyšius cemento arba molio – cemento skiediniu. Injektavimo slėgį reikia sumažinti lėtai, kad neužsikimštų injektorius.



6 pav. Injektavimo mechanizmas ir injektoriaus pjūvis (Keller, 2018)

Stiprinant gruntą vieno tirpalo injekcija jis paruošiamas specialiose talpose ir sumaišomas žemės paviršiuje. Gelio susidarymo laikas parenkamas 40–60 min., kad per tą laiką būtų suspėta tirpalą įpurkšti į gruntą. Antraip želatinizacija (gelio susidarymas) įvyktų įrangos viduje ir vietoje to, kad sustiprintų gruntą, sukietėjęs tirpalas užkimštų injektorių, siurblį, skaitliukus, injektavimo žarną ir kitą įrangą (Kirsch, K. ir Bell, A., 2013).



7 pav. Pagrindų stiprinimo silikatizuojant gruntą vienu tirpalu arba stabilizuojant jį sintetinėmis dervomis principinė schema. 1. Tvirtinančios medžiagos tirpalo ir jos kietiklio talpos. 2. Siurbliai. 3. Maišyklė. 4. Paskirstymo vamzdis. 5. Injektorius. 6. Injektuojamo tirpalo tūrio skaitikliai (Keller, 2010)

1.8. Įrenginiai ir gamybos mechanizacija

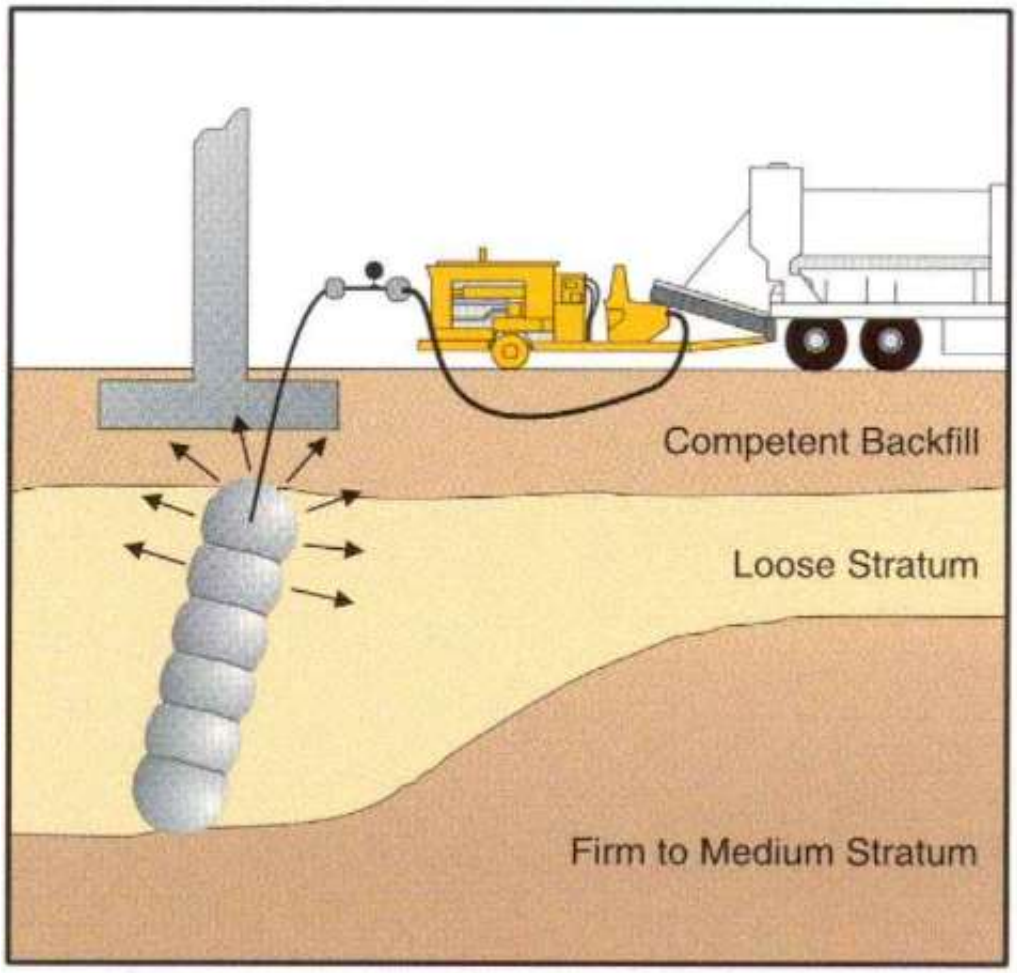
Gruntas stiprinamas chemiškai injektuojant į jį tam reikalui skirtus cheminius tirpalus. Injektavimui atlikti reikalingi tokie įrenginiai: įrengimai injektoriams įspausti ir cheminiams tirpalams paruošti, siurbliai, paskirstymo tinklas, aprūpintas monometrais ir skaitikliais. Statybos aikštelė turi būti aprūpinta elektra, vandeniu ir suspaustu oru.

Darbo metu turi būti kontroliuojama tirpalo ir stiprinamo grunto kokybė. Injektoriaus ir jo įspaudimo mechanizmo konstrukcija priklauso nuo stiprinamo grunto savybių. Stiprinant gruntą iki 20 m. gylio, naudojami injektoriai, kurie susideda iš antgalio, perforuoto vamzdžio ir jungiančių dalių.

Kad mažiau susitrauktų gruntas ir pagerėtų tirpalo injektavimas, perforuota dalis yra mažesnio skersmens negu uždara dalis. Įspaudžiant injektorių, antgalis laikinai dedamas be detalių, per kurias tiekiamas tirpalas. Injektoriams įspausti naudojami perforatoriaus tipo mechanizmai su pneumatine įranga, pavyzdžiui gręžimo įrenginys su pneumoplaktuku SBU-100, sumontuoto ant SBU-2 važiuoklės, poliakalės.

Chemiškai tvirtinant gruntus 50–150 m gylyje prasigręžiama visu gyliu ir gręžinys užpildomas molio suspensija, kad neužgriūtų sienelės. Po to į gręžinį įleidžiamas injektorius su guminėmis tarpinėmis dengiančiomis skylutes, kad jos neužsiterštų. O toliau vyksta cheminė injekcija.

Paskirstymo tinklo paskirtis – teikti komponentus reikiamu kiekiu ir slėgiu iš siurblių į injektorius. Paskirstymo tinklas susideda iš žarnų arba vamzdžių, skirstiklių, skaitiklių, sujungimo movų, čiaupų ir įmovų.

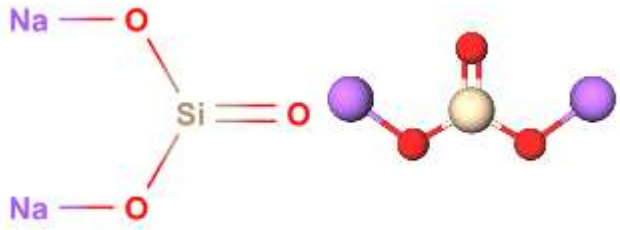


8 pav. Pamato pagrindo tvirtinimas naudojant žemo slėgio injekciją (Keller, 2010)

2. Cheminės medžiagos grunto stabilizavimui

2.1. Natrio silikatas

Natrio silikatas (skystas stiklas) yra neorganinis junginys, kurio tankis $\rho = 1{,}40\ g/cm^3$. Šios cheminės medžiagos formulė: $Na_2O(SiO)_2$



9 pav. Natrio silikato struktūra (Chemsrc, 2005)

Natrio silikatas plačiai naudojamas tiek statybose, tiek pramonėje, maisto apdirbime ir geologijoje, akinių gaminime (Huang, Ch. ir Cormack, A. N., 1990). Natrio silikatas statybose naudojamas betono apdirbimui bei daugumoje mūro gaminių padeda sumažinti poringumą. Dėl padidėjusio poringumo sumažėja vandens įsiskverbimas į medžiagą. Cheminė reakcija vyksta su perteklinių kalcio hidroksidu ($Ca(OH)_2$), esančio betone, kuris visam laikui susieja silikatus su paviršiumi, todėl jie yra daug tvirtesni ir žymiai atsparesni vandeniui. Taip pat galima sutvirtinti kalkinių betonų paviršių užtepus skystą stiklą ant jo. Tačiau reikia saugoti nuo lietaus, nes kol skystas stiklas neišdžiūvęs, lietus išplauna skystą stiklą (Keun-Heyok Yang, 2008).

Skystas stiklas naudojamas plovimo pramonėje, kaip pagalbinis komponentas, kuris padidina ploviklio granulių šiurkštumą. Taip pat natrio silikatas padengia plaunamus paviršius mikro plėvele, kuri apsaugo audinius nuo agresyvesnių komponentų pažeidžiamojo poveikio.

Vandens valyme natrio silikatas naudojamas nuotekų valymo įrenginiuose. Natrio siliktas prisijungia prie koloidinių molekulių, susidaro didesni užpildai, kurie nusėda į dugną.

Maisto pramonėje skystas stiklas buvo naudojamas kiaušinių konservavime. Natrio silikatas padengia kiaušinius danga, kuri neleidžia bakterijoms patekti prie kiaušinių. Šis metodas leisdavo kiaušiniams išlikti iki penkių mėnesiu šviežiems.

Automobilių remonte natrio silikatas taip pat naudojamas kaip išmetimo sistemos jungčių ir įtrūkimų sandariklis, skirtas duslintuvams, rezonatoriams, išmetimo vamzdžiams ir kitiems išmetimo komponentams remontuoti, su ar be stiklo pluoštu sustiprinančiomis juostomis. Šiam tikslui natrio silikatas (60–70 %) įprastai sumaišomas su kaolinu (40–30 %), aliuminio silikato mineralu, kad natrio silikato „priklijuota“ jungtis būtų nepermatoma. Natrio silikatas veikia kaip aukštos temperatūros klijai, o kaolinas naudojamas tik kaip aukštos temperatūros dažiklis. Natrio silikatas gali būti naudojamas norint užpildyti tarpus tarp cilindrų galvutės tarpinių. Dažniausiai

naudojamas aliuminio lydinio cilindrų galvutėms, kurios yra jautrios šilumą sukeliančioms paviršiaus deformacijoms. „Skystasis stiklas“ (natrio silikatas) į sistemą įpilamas per radiatorių ir leidžiamas cirkuliuoti. Natrio silikatas suspenduojamas aušintuve, kol jis pasiekia cilindro galvutę. Esant 100–105 °C temperatūrai (212–221 °F), natrio silikatas praranda vandens molekules, kad susidarytų stiklines plombas, kurios lydymosi temperatūra viršija 810 °C (1490 °F). Natrio silikatas naudojamas kartu su magnio silikatu, naudojamas montavimo pastai gaminti. Ištirpinus vandenyje, tiek natrio silikatas, tiek magnio silikatas sudaro storą pastos pavidalo medžiagą, kurią lengva naudoti. Kai vidaus degimo variklio išmetimo sistema įkaista iki savo darbo temperatūros, šiluma išstumia visą pastos perviršį. Likę silikato junginiai turi stiklo tipo savybių, todėl tai laikinas, trapus remontas. Natrio silikatas gali būti naudojamas kaip regeneracinių pastų sudedamoji dalis.

Atsparių ugniai medžiagų gamyboje Natrio silikatai pasižymi savybe pūstis (plėstis) kai yra veikiami karščio. Besiplečiantis natrio silikatas apsaugo padengtą medžiagą nuo karščio. Skystas stiklas yra naudojamas kietųjų medžiagų, tokių kaip vermikulitas ir perlitas, rišiklis. Kai skystas stiklas sumaišomas su minėtais lengvais užpildais, gautą užpildą galima naudoti sunkioms, aukštos temperatūros ugniai atsparioms izoliacinėms plokštėms, pasyviai priešgaisrinei apsaugai ir aukštoms temperatūros izoliacinėms medžiagoms, pvz., formuojant vamzdžių izoliaciją. Sumaišant su smulkiai suskaidytais mineraliniais milteliais, pvz., Vermikulito dulkėmis, galima gaminti aukštos temperatūros klijus.

Geologijoje natrio silikatas dažnai naudojamas gręžimo skysčiuose, siekiant stabilizuoti gręžinių šulinius ir išvengti gręžinio sienų sutrūkinėjimo. Tai ypač naudinga, kai gręžiniai prasiskverbia per molingas struktūras, kuriose yra tirpių molio mineralų, tokių kaip smektitas arba montmorilionitas. Natrio silikatas su priedais buvo įšvirkščiamas į žemę, kad ją sukietintų, ir tokiu būdu išvengti tolesnio labai radioaktyvaus vandens nuotėkio iš Fukušimos Daiichi atominės elektrinės Japonijoje 2011 m.

Keramikoje natrio silikatas yra naudojamas kaip deflokuliantas liejant, kad sumažintų klampumą ir molio minkštinimui reikalingą vandens kiekį. Jis taip pat naudojamas keramikos plyšio efekto sukūrimui. Tai taip pat yra pagrindinis „magiškojo vandens“ agentas, kuris naudojamas sujungiant molines dalis, ypač jei abiejų dalių drėgmės lygis skiriasi.

Dažyme natrio silikato tirpalas naudojamas kaip fiksatorius rankiniam dažymui reaktyviais dažikliais, kuriems reikia aukšto pH, kad galėtų reaguoti su tekstilės pluoštu.

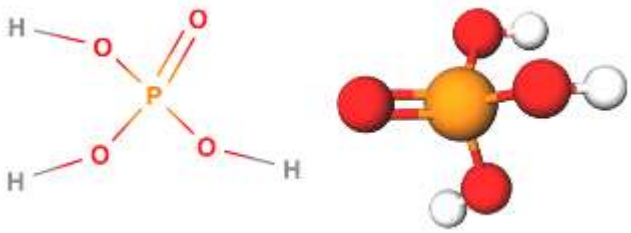
Mokyklose naudojamas greitam kristalų auginimui, spalvotų nuosėdų sudarymui.

Šaunamųjų ginklų kasečių (apkabų) gamyboje natrio silikatų lipnių savybių naudojimas yra „Colt's Manufacturing Company“ gaminamų juodųjų miltelių revolverių popierinių kasečių gamyboje nuo 1851 m. iki 1873 m., ypač per Amerikos pilietinį karą. Natrio silikatas buvo naudojamas sandariai deginti nitratuotą popierių, kad būtų sudaryta kūgio formos popieriaus kasetė,

kurioje būtų laikomi juodi milteliai, taip pat cemento švino rutulys arba kūgio formos kulka atvirame popieriaus kasetės gale. Tokios natrio silikato cementuotos popierinės apkabos buvo dedamos į revolverių cilindrus, taip pagreitinant juodųjų miltelių revolverių „cap-and-ball“ užtaisymą. Šis naudojimas iš esmės baigėsi Colt revolverių įdiegimu, naudojant vario korpusus nuo 1873 m.

2.2. Fosforo rūgštis

Fosforo rūgštis, tai silpna neorganinė rūgštis, kurios cheminė formulė H_3PO_4. Tai netoksiška rūgštis, kuri būdama 100% kambario temperatūroje ir normaliame slėgyje (1 atm.) yra kietos formos. Fosforo rūgšties tankis $\rho = 1{,}84\ g/cm^3$ (Becker, P., 1983).



10 pav. Fosforo rūgšties struktūra (Lerochem, 2018)

Maisto pramonėje fosforo rūgštis naudojama kaip maisto papildas, žymimas E numeriu – E338. Rūgštis naudojama maisto produktų ir gėrimų bei džemų rūgštinimui, suteikiant jiems aštrų arbą rūgštų skonį. Alaus ar vyno gamyboje naudojama pH (rūgštingumo) reguliavimui, rauginimo/brandinimo indų plovime siekiant pašalinti alaus/vyno akmenį. Fosforo rūgšties druskos, tokios kaip monokalcio fosfatas, naudojamos kaip rauginimo medžiagos.

Metalų apdirbime fosforo rūgštis naudojama rūdžių šalinimui nepažeidžiant geležinių paviršių. Rūgštis gali būti tiesiogiai naudojama ant rūdijančios geležies, plieninių įrankių ar kitų paviršių. Galima naudoti skystą rūgštį, bet dažniausiai yra naudojamas rūgšties gelis. Gali prireikti kelių valymų, kad būtų pašalintos visos rūdys. Taip pat gali būti naudojamas elektrocheminiam suvirinimo siūlų valyme. Fosforo rūgštis gali būti naudojama geležinių paviršių apdirbime siekiant juos pasyvuoti (fosfatavimo procesui). Galima ją naudoti kaip pliusą litavimo procese. Fosforo rūgštis yra naudojamas kaip tirpalas ar vienas iš pagrindinių tirpalo komponentų anodavimo procese. Vario apdirbime, kaip elektrolitas vario elektropoliravimo procese, atplaišų pašalinimui.

Medicinoje fosforo rūgštis naudojama odontologijoje ir ortodontijoje kaip ėsdinamasis tirpalas, reikalingas išvalyti ir sušvelninti danties paviršių prieš jį tvarkant. Fosforo rūgštis taip pat yra nereceptinių vaistų nuo pykinimo komponentas, kuriuose taip pat yra daug cukraus (gliukozės ir fruktozės). „Cola“ tipo gaiviuosiuose gėrimuose esanti ortofosforo rūgštis padeda sureguliuoti virškinimo procesą. Ši rūgštis taip pat naudojama daugelyje dantų baliklių.

Žemės ūkyje fosforo rūgštis naudojama kaip laistymo vandens pH reguliatorius, ir tuo pačiu kaip fosforo šaltinis. Ypač tinka rūgščią dirvą mėgstančių augalų (šilauogių, aviečių, braškių ir kt.). Taip pat gali būti naudojama augalų žydėjimo metu kaip papildomas fosforo šaltinis (Gilmour, R., 2014).

3. Bandymų metodika

3.1. Bandymų eiga

Darbo tikslas – ištirti smėlinio grunto stabilizavimo neorganiniais tirpalais dėsningumus. Stabilizuoto grunto bandiniai paruošti maišant smėlį, natrio silikatą (skystą stiklą) bei fosforo rūgštį. Bandinių tyrimams ir gamybai buvo naudojami standartiniai metodai.

Cheminės medžiagos, kurios naudojamos stabilizuoti smėlinį gruntą, turi būti tam tikro tankio (Sokolovich, V., 1981):

Natrio silikatas $\rho = 1{,}20\ g/cm^3$;

Fosforo rūgštis $\rho = 1{,}025\ g/cm^3$

Todėl pirmiausia nustatomas šių medžiagų tankis su areometru (9 pav.). Kadangi tiek natrio silikato, tiek ir fosforo rūgšties tankiai yra per dideli bandymams, juos reikia skiesti.



11 pav. Skysčio tankio nustatymas areometru

Nustatytas natrio silikato tankis $\rho = 1{,}40\ g/cm^3$, todėl jį reikia skiesti su vandeniu ($\rho = 1{,}00\ g/cm^3$) proporcingai 1:1.

Fosforo rūgšties nustatytas tankis $\rho = 1{,}820\ g/cm^3$, todėl ją reikia skiesti su vandeniu atitinkamai 1:5.



12 pav. Fosforo rūgšties tankio nustatymas po skiedimo su vandeniu

3.2. Gelio susidarymas

Maišant natrio silikatą ir fosforo rūgštį susidaro gelis. Gelis koloidas, dispersinė sistema (paprastai drebučių pavidalo), kuri dėl sandaros turi kieto kūno savybių. Gelį sudaro mažiausiai dvi fazės. Viena fazė yra skysta (tirpiklis, paprastai – vanduo), kita – disperguota medžiaga. Geliai susidaro koaguliuojant ir koalescionuojant poliams, kai disperguotosios medžiagos molekulės sudaro trimatį tinklą. Gelių konsistencija gali būti nuo minkštų drebučių iki tvirtos elastingos medžiagos. Džiūdami geliai negrįžtamai suyra (Hamouda, A. et al., 2014).

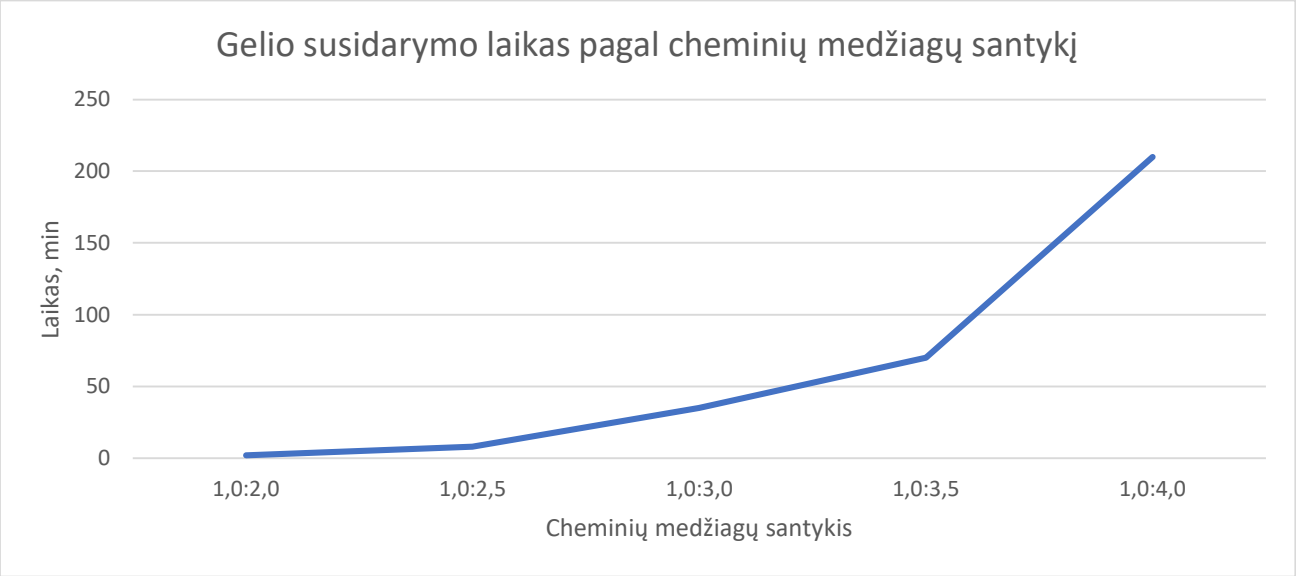
Nustačius cheminių medžiagų (natrio silikato ir fosforo rūgšties) tankius ir jas paruošus naudojimui, privalu nustatyti kokiu santykiu maišyti šias medžiagas. Nuo to priklauso gelio susidarymo laikas. Kadangi srautinėse injekcijose gelio susidarymo laikas yra labai svarbus, nes jis negali susidaryti dar neinjektuotas į žemę. Todėl reikia nusistatyti per kokį laiko tarpą susidarys gelis, nuo maišymo pradžios.

Eksperimentais nustatyta, kad tinkamas sustingimo laikas yra maišant skystą stiklą ir fosforo rūgštį santykiu 1:3 atitinkamai. Didinant ar mažinant santykį galima keisti gelio susidarymo

laiką. 2 lentelėje pateikiami duomenys iš bandymų per kokį laiko tarpą susidaro gelis atitinkamai nuo santykio.

2 lentelė. Gelio susidarymo laikas priklausomai nuo cheminių medžiagų santykio

Medžiagų santykis (skystas stiklas ir fosforo rūgštis)	Gelio susidarymo laikas
1:1	15 sek
1:2	2 min
1:2,5	8 min
1:3	30–40 min
1:3,5	60–80 min.
1:4	3–4 val.
1:5	1–2 paros



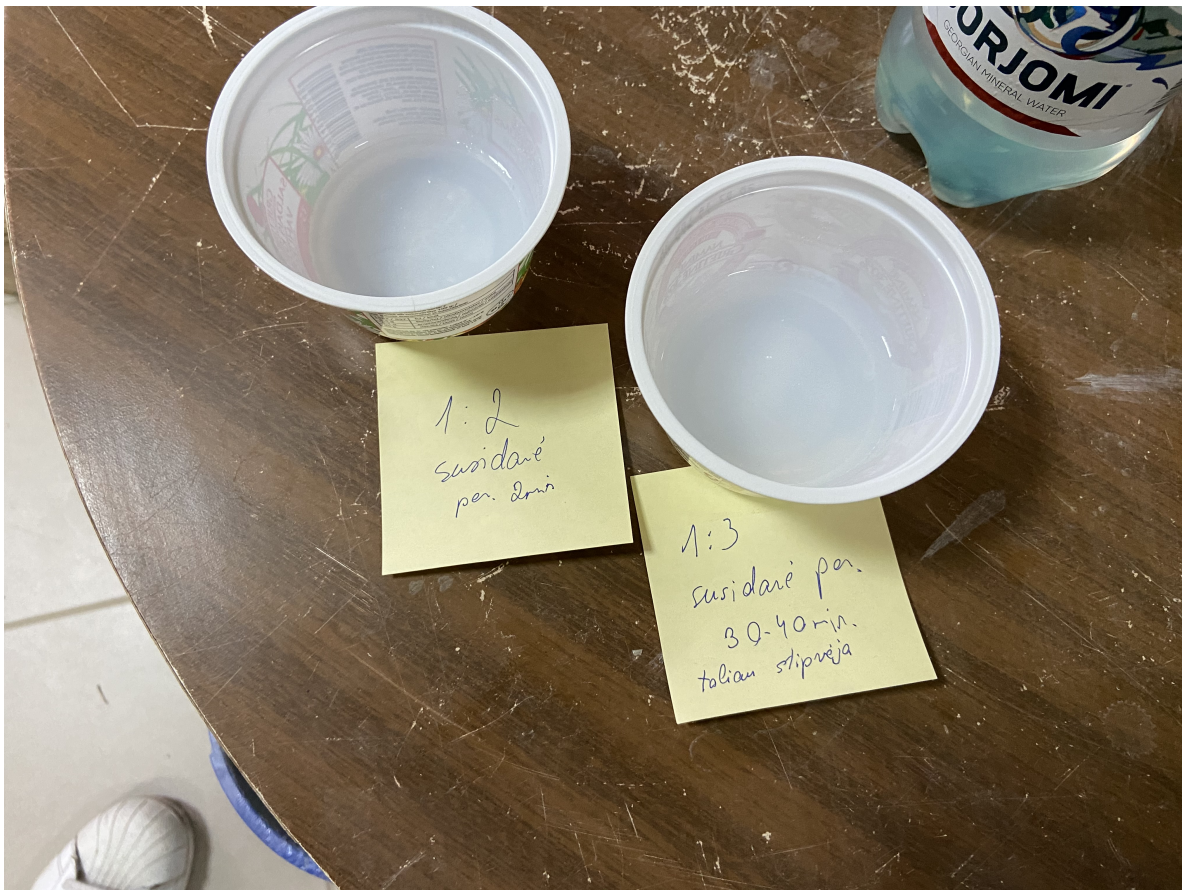
13 pav. Gelio susidarymo laikas pagal cheminių medžiagų santykį (1 dalis natrio silikato ir 2,0-4,0 dalys fosforo rūgšties).

Didinant natrio silikato ir fosforo rūgšties proporciją, atitinkamai didėja ir gelio susidarymo laikas. Fosforo rūgštis yra kietiklis, nuo kurio kiekio priklauso kaip greitai susidaro gelis, po šių medžiagų sumaišymo. Kuo didesnis fosforo rūgšties kiekis, tuo ilgėja gelio susidarymo laikas (

Kiekvienai skirtingai mišinio sudėčiai paruoštos trys cilindro formos partijos bandinių, kurių skersmuo 3,5 cm, aukštis 7,0 cm (santykis 1/2). Bandinių formos pagamintos iš PVC vamzdžių. Iš viso bandymuose tirta 3 skirtingi cheminių medžiagų santykiai ir laikyta dvejose terpėse (3 lentelė).

3 lentelė. Bandiniai pagal cheminių medžiagų proporcijas ir laikymo terpę

Eil. Nr.	$Na_2O(SiO)_2$ kiekis (dalimis)	H_3PO_4 kiekis (dalimis)	Laikymo sąlygos
1.	1	2,5	Vandenyje ir ore
2.	1	3	Vandenyje ir ore
3.	1	3,5	Vandenyje ir ore

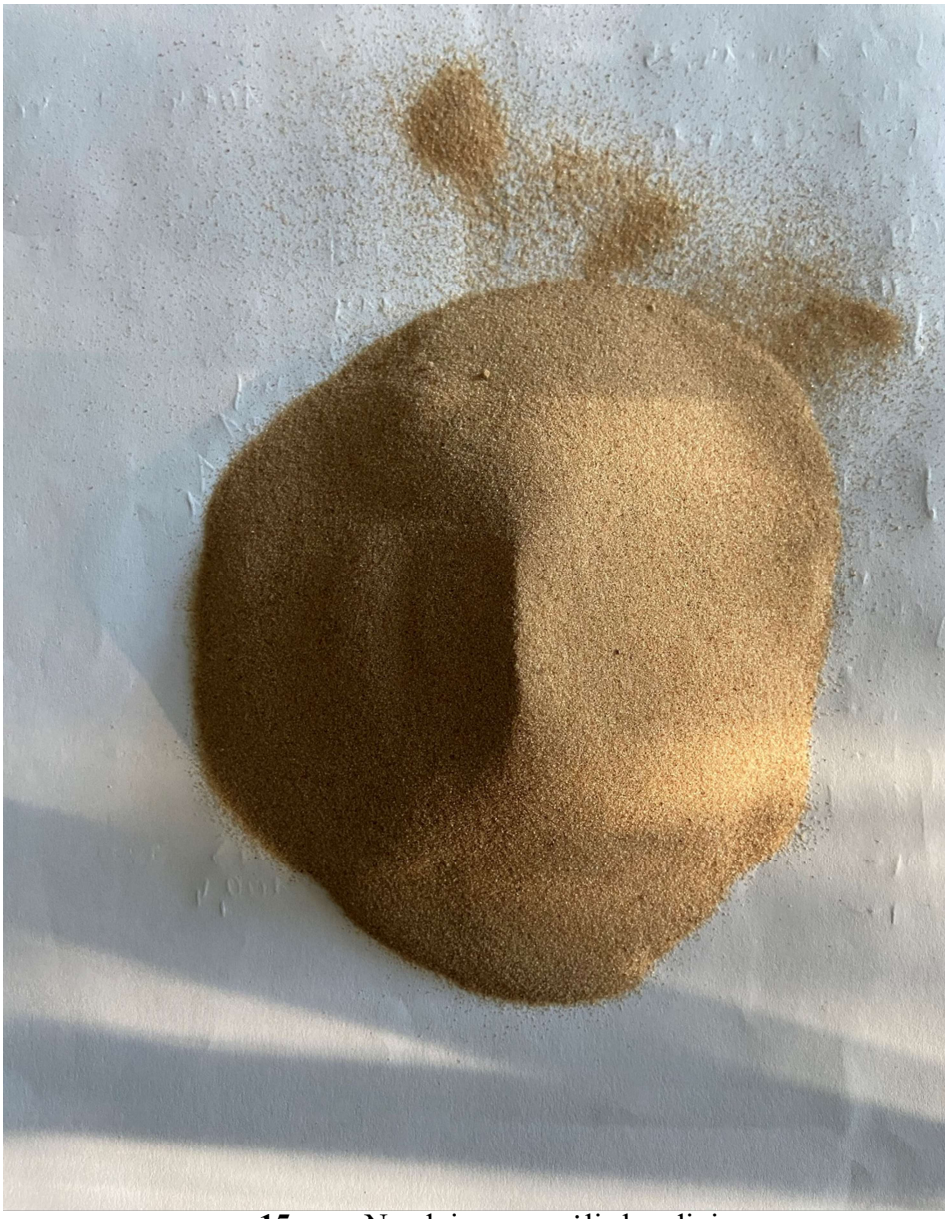


14 pav. Gelio susidarymo proceso stebėjimas

Bandiniai po 24 valandų išimami iš formų ir laikomi eksikatoriuose dvejose skirtingose terpėse. Pirma aplinka - vanduo, o kita – ore (eksikatoriuose vandens nėra). Jiems nustatytas tankis ir gniuždomasis stipris po 7, 28 parų ir 6 mėnesių.

3.3. Tiriamas smėlis

Smėliu vadinama biri natūrali arba dirbtinė akmens medžiaga sudaryta iš 0,125 (0,16)–4(5) mm dydžio dalelių. Smėlio tankis didesnis kaip 1,8 g/cm3.



15 pav. Naudojamas smėlis bandiniams

Skaitinė smėlio stambumo charakteristika yra jo stambumo modulis. Pagal stambumo modulį smėlis skirstomas į:

1. Labai stambų;
2. Stambų;
3. Vidutinio stambumo;
4. Smulkų;
5. Labai smulkų.

Gruntų granuliometrinė sudėtis. Gruntų granuliometrinė sudėtis – gruntų dalelių dydžio ir jų kiekio nustatymas, išreiškiamas procentais nuo bendros visų frakcijų masės (Amšiejus, J. et al., 2006). Pagal granuliometrinę sudėtį nustatomas grunto pavadinimas. Smėlio granuliometrinė sudėtis nustatoma vadovaujantis LST CEN ISO/TS 17892-4:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) reikalavimais.

Atlikus grunto granuliometrinės sudėties bandymą sudaro jo granuliometrinės sudėties kreivė. Pagal šią kreivę apskaičiuojamas grunto vienodumo koeficientas $C_u$ir granulioetrinės kreivės koeficientas C_c.

Tikslas – nustatyti smėlinio grunto granuliometrinę sudėtį pagal liekanas ant sietų, sijojant sausą smėlį pro standartinius sietus.

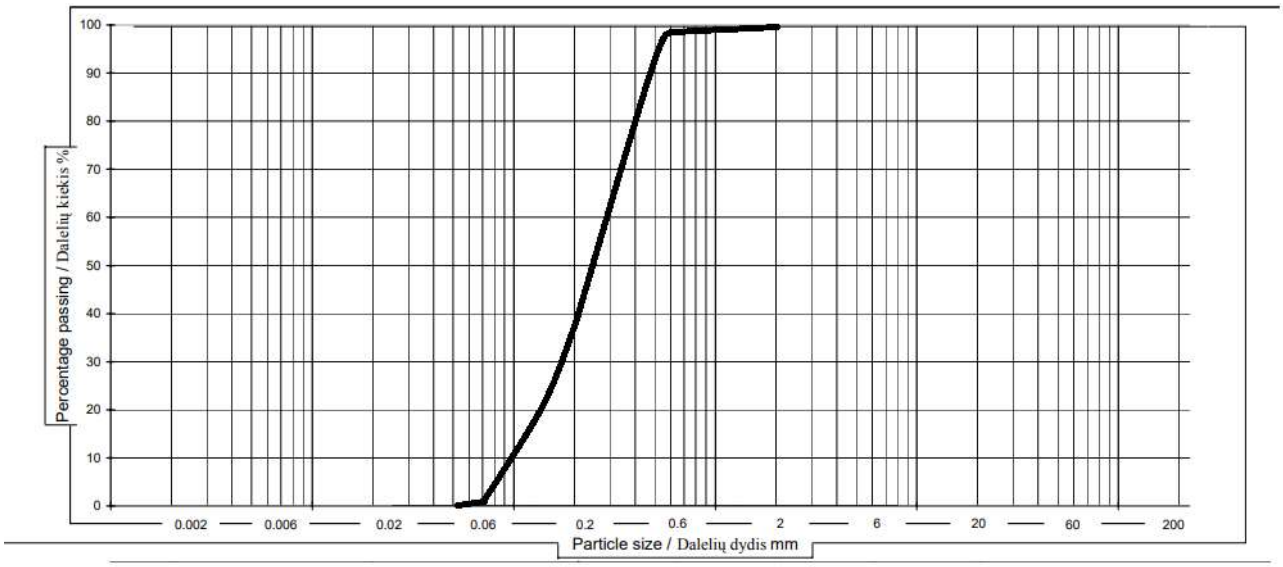
Naudojama įranga:

1. ***Džiovinimo spinta***. Palaikoma temperatūra nuo $105°C \pm 5°C$ ir $50°C \pm 5°C$.
2. ***Svarstyklės***. Svarstyklių tikslumas, skaičiuojant nuo sauso bandinio masės, turi būti 0,3%, o skaičiuojant nuo sauso bandinio masės – 0,1%
3. ***Sietai.*** Turi būti pagaminti iš metalinio tinklelio arba iš perforuotos metalinės plokštės pagal ISO 565:1990 reikalavimus (14 pav.).



16 pav. Sietai nustatyti granuliometrinei sudėčiai nustatyti

Smėlinio grunto bandinys išdžiovinamas ir pasveriama 500 g smėlio. Pasvertas smėlis automatiniu sijotuvu sijojamas pro standartinių sietų koloną. Nustačius likutį ant kiekvieno sieto, braižoma smėlio granuliometrinės sudėties kreivė (17 pav.). Bandymas kartojamas keturis kartus.



17 pav. Granuliometrinės sudėties kreivė

Apskaičiuojamas grunto vienodumo koeficientas C_u:

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 0{,}29/0{,}1 = 2{,}9. \quad (5)$$

Apskaičiuojamas granuliometrinės kreivės koeficientas C_c:

$$C_c = (d_{30})^2/(d_{60} \cdot d_{10}) = (0{,}18)^2/(0{,}29 \cdot 0{,}1) = 1{,}12. \quad (6)$$

Išvada: Remiantis granuliometrine kreive ir apskaičiuotais grunto vienodumo koeficientu ir granuliometrinės kreivės koeficientu nustatyta, kad gruntas yra vienodos sanklodos smulkus smėlis.

3.4. Vienaašio gniuždomojo stiprio nustatymas

Vienaašis gniuždomasis stipris – tai medžiagos, kuri suyra veikiama gniuždymo apkrovos, stiprumo riba. Dažniausiai šis bandymas atliekamas betonui norint nustatyti betono stiprumo klasę. Bandymas atliekamas vadovaujantis LST EN 12390-3:2009 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009) reikalavimais.

Tikslas – nustatyti stabilizuoto smėlio vienaašį gniuždomąjį stiprį.

Naudojama įranga:

1. Slankmatis, kurio tikslumas 0,01 mm;
2. Elektroninės svarstyklės, kurių tikslumas 0,01 g;
3. Skaitmeninis gniuždymo presas.

Bandymo eiga:

Stabilizuoto grunto bandiniai išimami iš eksikatorių, išmatuojami matmenys, pasveriami. Aukštis matuojamas trijose vietose o skersmuo matuojamas 6 kartus – skirtingomis kryptimis bandinio viršuje, viduryje, apačioje. Išvedami išmatuotų reikšmių vidurkiai, apskaičiuojamas skerspjūvio plotas.

4 lentelė. Bandinių matmenų nustatymas

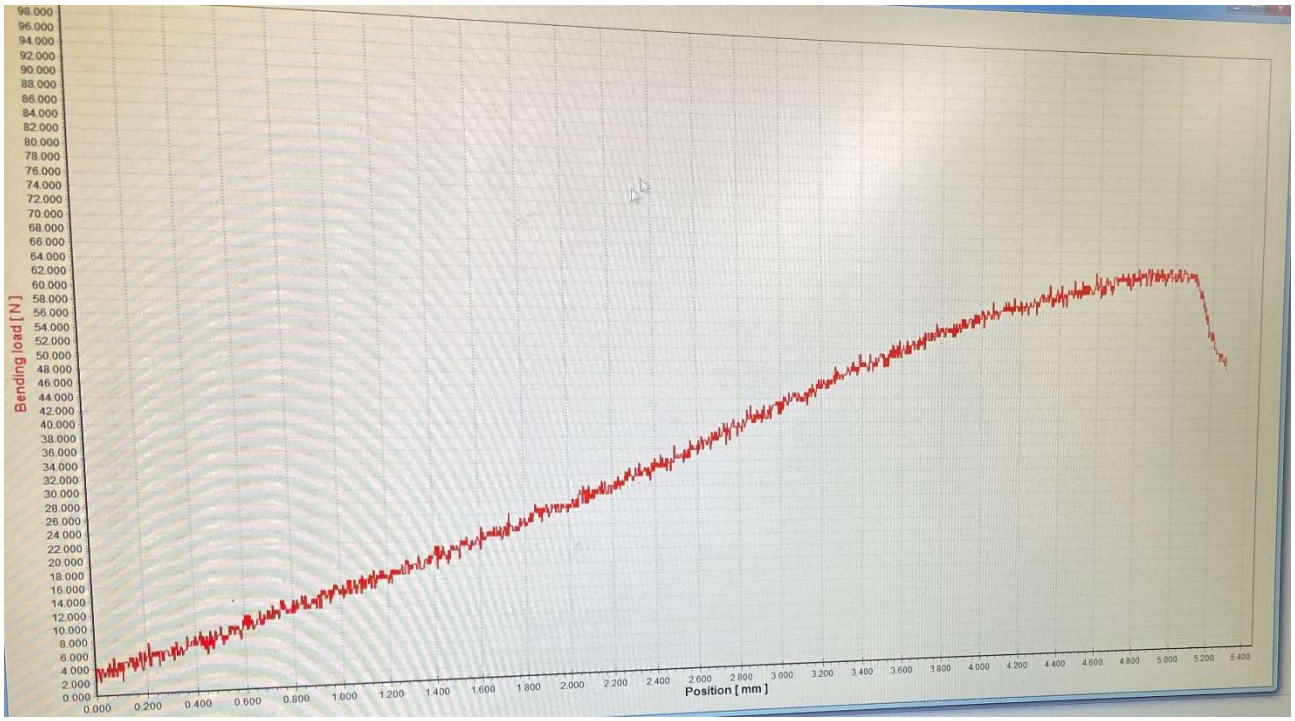
Nr.	Skersmuo, mm.							Aukštis, mm				Plotas
	1	2	3	4	5	6	Vidurkis	1	2	3	Vidurkis	Cm2
1	36	37	37,1	36	37	36,5	36,6	70	70	70	70	10,5
2	37	36,5	36,5	37	37,1	37	36,9	70	70	70	70	10,7
3	36,5	36	35,9	35,8	36,3	37	36,3	70	70	70	70	10,3
4	36	36,5	36	36,5	36,7	36,5	36,4	70	69	70	69,7	10,4
5	36,9	36,5	36	36,1	36	36,2	36,3	69	69	68,5	68,9	10,3
6	37	36,5	36,8	36,5	36,8	36,5	36,7	69,5	69,5	69,5	69,5	10,6

Išmatuoti ir pasverti bandiniai statomi į presą. Svarbiausia, kad cilindro formos bandiniai būtų pastatomi centre. Preso viršutinė atrama yra su lanksčia jungtimi, kad presas bandinį apspaustų kuo didesniu plotu, dėl bandinių netiesiškumo (18 pav.).



18 pav. Bandinio pastatymas į vienaašį gniuždymo presą

Bandinių apkrovimo greitis 3 mm/min ir tęsiama, kol bandiniai suyra arba gniuždomojo jėga pradeda kristi (19 pav.).



19 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio grafikas

Vienaašis gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R = F/A. \quad (7)$$

Čia F – suardymo apkrova;

A – bandinio skerspjūvio plotas.

Gniuždomasis stipris nustatomas kiekvienos rūšies mišiniams 3 kartus ir išvedamas vidurkis.

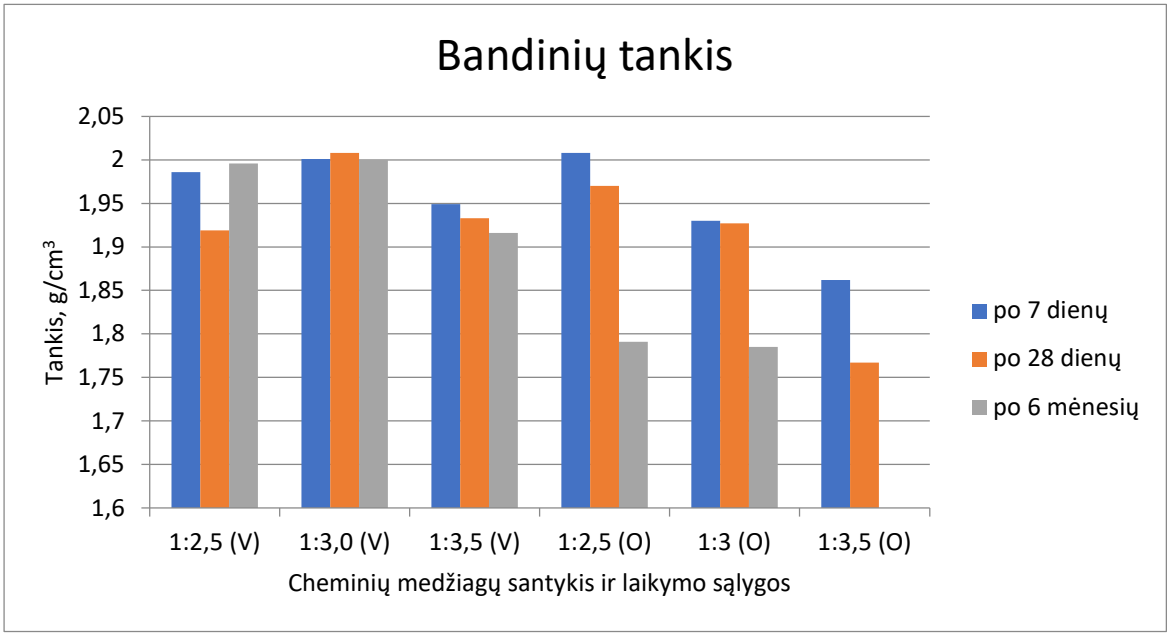
4. Rezultatų analizė

4.1. Bandinių tankis

Prieš apspaudžiant ir suardžius bandinius, nustatomas jų tankis (20 pav.). Jis gaunamas matuojant bandinių matmenis (plotis bei aukštis) ir juos pasveriant. Tankis tarp tos pačios sudėties bandinių ir laikymo sąlygų, tačiau pasvertų po skirtingo laiko tarpo yra skirtingas. Natūralus smėlio tankis lygus 1,45 g/cm^3. Laikytų bandinių vandenyje tankis vidutiniškai skiriasi 2,4 %, o didžiausias skirtumas 3,2 %, o bandinių, kurie stovėjo savitoje drėgmėje vidutiniškai 9,9 %, didžiausias skirtumas 4,0 %. Matomas akivaizdus skirtumas tarp vandenyje ir savitoje drėgmėje laikomų bandinių tankio. Mažiausias tankis gautas prie 1:3,5 santykio cheminių medžiagų, kuris lygus 1,767 g/cm^3. Jis buvo pasiektas po 28 parų. Didžiausias tankis lygus 2,008 g/cm^3, kuris buvo pasiektas 1:3.0 cheminių medžiagų santykio po 28 paros. Taip pat matomas mažėjantis tankis bėgant laikui bandinių, kurie laikomi savitoje drėgmėje.

5 lentelė. Nustatytas bandinių tankis.

Laiko tarpas / Santykis	Tankis po 7 dienų, g/cm^3	Tankis po 28 parų, g/cm^3	Tankis po 6 mėnesių, g/cm^3
1:2,5 (Vand.)	1,968	1,919	1,996
1:3,0 (Vand.)	2,001	2,008	2,0
1:3,5 (Vand.)	1,949	1,933	1,916
1:2,5 (Ore)	2,008	1,97	1,791
1:3,0 (Ore)	1,93	1,927	1,785
1:3,5 (Ore)	1,862	1,767	-



20 pav. Nustatytas bandinių tankis

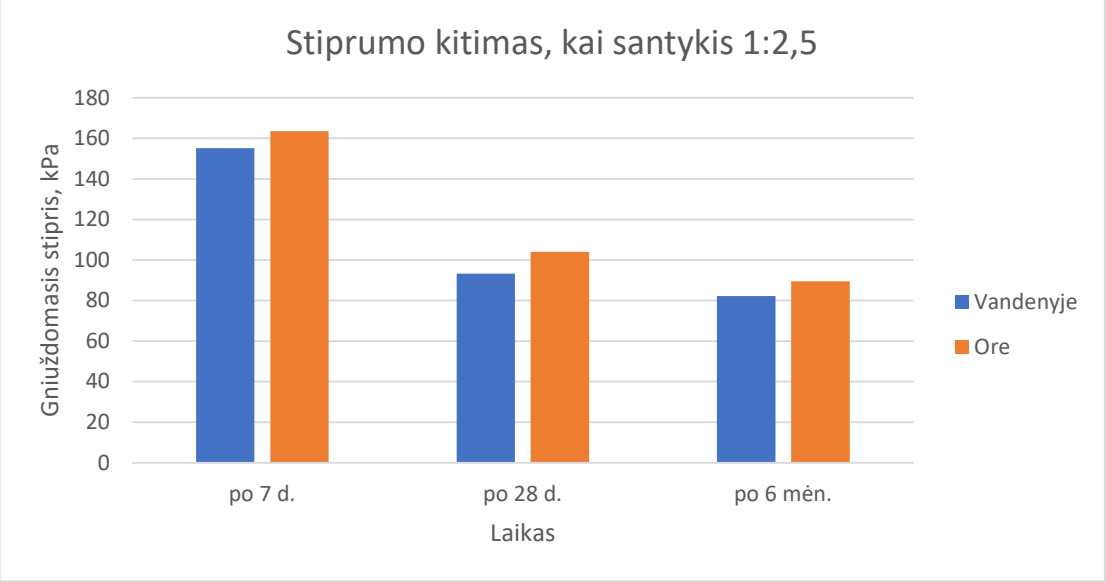
4.2. Vienaašis gniuždomasis stipris

Vienaašis gniuždomasis stipris didžiausias visais atvejais pasiekiamas po 7 parų ir vėliau silpnėja. Tik kai santykis 1:3,5, po 6 mėnesių sustiprėja lyginant su rezultatai po 28 parų. Tvirčiausi bandiniai su didžiausiu atsparumu gniuždymui yra po 7 parų, kurie kietėjo ore. Vienaašis gniuždomasis stipris lygus 164 kPa. Silpniausi bandiniai (19,64 kPa) gavosi po 28 dienų, kur cheminių medžiagų santykis yra 1:3,5.

Vienaašis gniuždomasis stipris, kai santykis 1:2,5 ir bandiniai laikomi vandenyje, nuo pradinės reikšmės (155 kPa) sumažėjo 39,88 % ir 47,02 % atitinkamai po 28 parų ir 6 mėnesių. Ore laikomi bandiniai sumažėjo 36,41 % ir 45,26 % (nuo 163,54 kPa iki 89,52 kPa) (6 lentelė). Taip pat bandiniai laikyti ore yra vidutiniškai 8,57 % stipresni nei laikyti vandenyje.

6 lentelė. Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5

	Laikymo terpė	Po 7 parų	Po 28 parų	Po 6 mėnesių
Apkrova, N	Vandenyje	162,9	98,3	86,7
	Ore	170,5	109,5	94,7
Skersmuo b, mm	Vandenyje	36,57	36,64	36,65
	Ore	36,44	36,63	36,71
Plotas, mm2	Vandenyje	1049,6	1053,8	1054,4
	Ore	1042,6	1053,0	1057,9
R, kPa	Vandenyje	155,2	93,28	82,22
	Ore	163,53	103,99	89,52



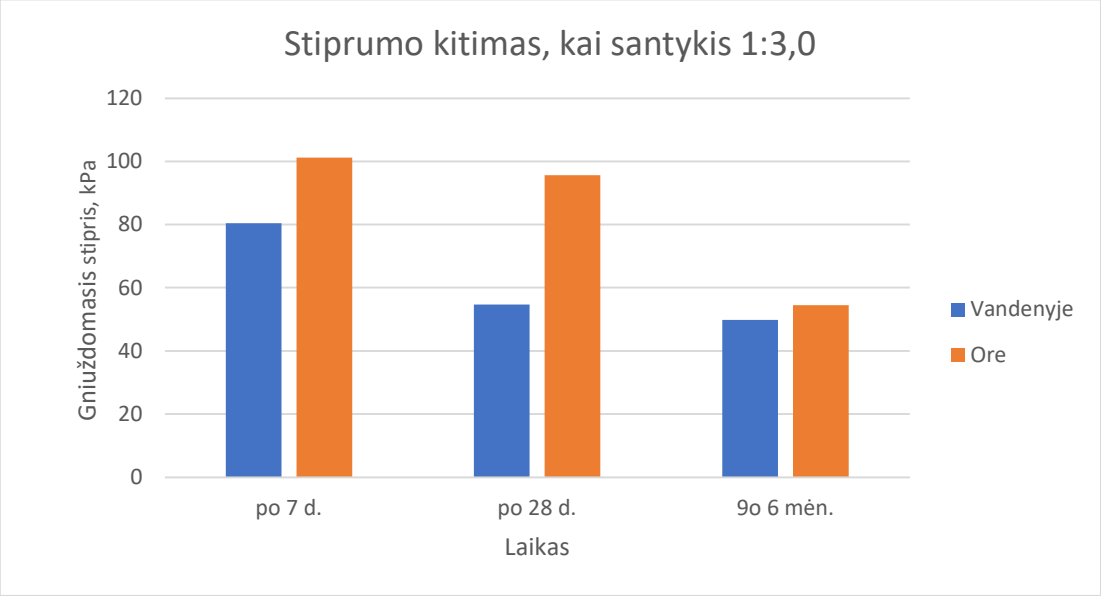
21 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio rezultatai, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5

Vienaašis gniuždomasis stipris, kai santykis 1:3,0 ir bandiniai laikomi vandenyje, nuo pradinės reikšmės (80,4 kPa) sumažėjo 31,97 % ir 38,06 % atitinkamai po 28 parų ir 6 mėnesių. Ore

laikomi bandiniai sumažėjo 5,49 % ir 46,14 % (nuo 101,17 kPa iki 54,49 kPa) (7 lentelė). Taip pat bandiniai laikyti ore yra vidutiniškai 22,14 % stipresni nei laikyti vandenyje.

7 lentelė. Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0

	Laikymo terpė	Po 7 parų	Po 28 parų	Po 6 mėnesių
Apkrova, N	Vandenyje	83,7	57,2	52,6
	Ore	105,5	100,6	57,3
Skersmuo b, mm	Vandenyje	36,42	36,5	36,68
	Ore	36,45	36,61	36,6
Plotas, mm2	Vandenyje	1041,2	1045,8	1056,3
	Ore	1042,8	1052,1	1051,6
R, kPa	Vandenyje	80,39	54,69	49,79
	Ore	101,17	95,62	54,49

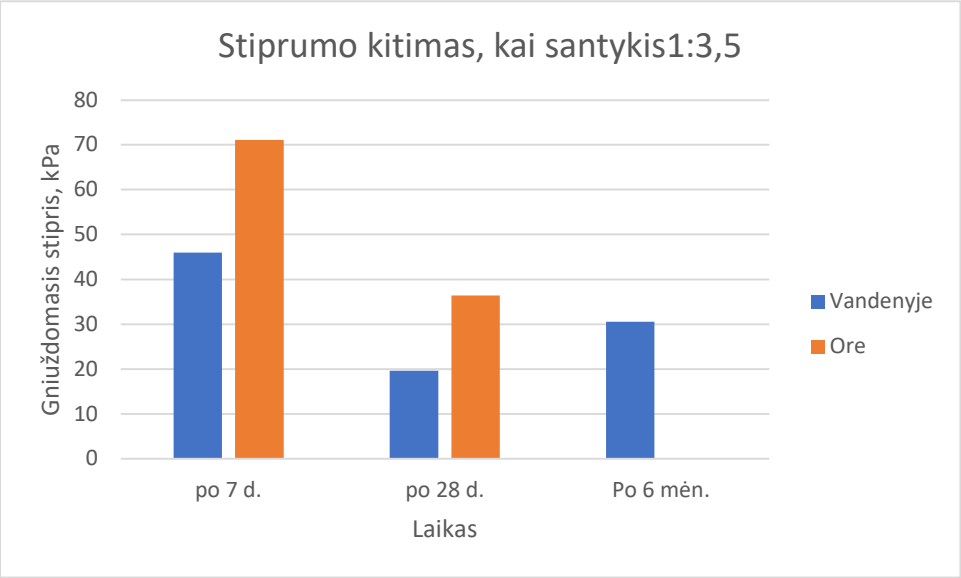


22 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio rezultatai, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0

Vienaašis gniuždomasis stipris, kai santykis 1:3,5 ir bandiniai laikomi vandenyje, nuo pradinės reikšmės (45,94 kPa) sumažėjo 57,25 % ir 30,58 % atitinkamai po 28 parų ir 6 mėnesių. Ore laikomų bandinių sumažėjo 45,76 % (nuo 74,08 kPa iki 36,42 kPa) (8 lentelė). Taip pat bandiniai laikyti ore yra vidutiniškai 52,01 % stipresni nei laikyti vandenyje. Tačiau tik prie šio santykio po 6 mėnesių nustatytas sustiprėjimas lyginant su rezultatais po 28 parų.

8 lentelė. Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,5

	Laikymo terpė	Po 7 parų	Po 28 parų	Po 6 mėnesių
Apkrova, N	Vandenyje	47.0	20,3	32,3
	Ore	74,9	38,3	-
Skersmuo b, mm	Vandenyje	36,1	36,28	36,68
	Ore	36,64	36,60	-
Plotas, mm2	Vandenyje	1023,8	1033,4	1056,3
	Ore	1053,8	1051,6	-
R, kPa	Vandenyje	45,94	19,64	30,58
	Ore	71,08	36,42	-



23 pav. Vienaašio gniuždomojo stiprio rezultatai, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0

Atlikus eksperimentus ir palyginus rezultatus, nustatyta, kad po 7 dienų didžiausias gniuždomasis stipris pasiekiamas su cheminių medžiagų santykiu 1:2,5. Bandiniai laikyti ore po 7 dienų praranda 38,18 % ir 56,53 % stiprumo didinant cheminių medžiagų santykį, o laikyti vandenyje – 48,2 % ir 70,4 % atitinkamai. Todėl galima nustatyti, jog prie šio santykio bandiniai laikyti vandenyje vidutiniškai apie 12 % silpnesni, nei laikyti ore.

Kai bandiniai išbandomi po 28 parų ir laikomi ore, jų vienaašis gniuždomasis stipris taip pat sumažėja 8,05 % ir 64,98 %, o vandenyje – 41,37 % ir 78,95 %. Apskaičiavus vidutinį sumažėjimą, gaunasi, kad bandinių stiprumas sumažėjo 23,65 %, o tai yra dvigubai daugiau nei lyginant su 7 parų rezultatais.

Išlaikius bandinius 6 mėnesius ir nustačius gniuždomuosius stiprius, apskaičiuota, kad taip pat didėjant cheminių medžiagų santykiui mažėja jų gniuždomasis stipris. Tačiau grafikuose matosi (21-23 pav.), kad mažėjimas jau nėra toks staigus, kaip po 7 dienų mažėjo iki 28 parų.

4.3. Suirimo plokštuma

Suardžius bandinius, galima nustatyti natrio silikato ir fosforo rūgšties santykio įtaką suirimo plokštumai.

Keičiantis santykiui, keičiasi ir bandinių suirimo pobūdžiai. Kai cheminių medžiagų santykis 1:3,5, akivaizdi plokštuma beveik nesimato, dažniausiai suyra tik bandinio viršutinis sluoksnis (24 pav.).



24 pav. Suirimo plokštuma, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,5

Mažinant santykį stiprėja cilindro formos bandinių stiprumas ir didėja tankis, tai ir keičiasi suirimo forma ir jos matomumas. Kai santykis 1:3,0, įtrūkimas didėja bei geriau matoma suirimo plokštuma (25 pav.).



25 pav. Suirimo plokštuma, kai cheminių medžiagų santykis 1:3,0

Geriausiai suirimo plokštuma matosi, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5 (26 pav. ir 27 pav.). Akivaizdžiai matoma plokštuma ir pjūvis. Eksperimento metu pradeda atsiverti ryškūs įtrūkimai ir didėja iki kol bandiniai suyra pilnai. Tai lemia didesnis tankis bei pačių bandinių stiprumas.



26 pav. Suirimo pjūvis, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5



27 pav. Suirimo plokštuma ir pjūvis, kai cheminių medžiagų santykis 1:2,5.

4.4. Stabilizavimo kaina

Šio stabilizavimo būdo santykinai kaina nėra didelė, nes pačios cheminės medžiagos nėra sudėtingos ir retos. Todėl galima paskaičiuoti, kiek kainuoja pagerinti 1 m^3 smulkaus smėlinio grunto savybes, kai naudojamas 1:3,0 santykis. Taip pat reikia atsižvelgti, kad rupaus smėlio stabilizavimo kaina gali skirtis, nes tai priklauso nuo grunto porų dydžio.

Vieno bandinio, kuris buvo naudojamas eksperimentuose, kaina:

- Fosforo rūgštis: ši medžiaga skiedžiama su vandeniu santykiu 1:5, todėl naudojama 4 ml rūgšties ir 16,2 ml vandens. 4 ml fosforo rūgšties kainuoja apie 0,02 EUR., o 16,2 ml vandens — 0,00001 EUR.
- Skystas stiklas: ši medžiaga skiedžiama su vandeniu santykiu 1:2, todėl naudojama 3,4 ml skysto stiklo, kurio kaina — 0,003 EUR., o vandens — 0,000002 EUR.

Bandinių tūris vidutiniškai buvo 73 cm^3, tad gauname, kad pagaminti vieną bandinį kainuoja 0,023 EUR. Taigi 1 m^3 eksperimento metu naudoto stabilizuoto smėlinio grunto kaina gaunasi apie 315,2 EUR.

5. Išvados ir pasiūlymai

Atlikus literatūros šaltinių analizę, eksperimentinius bandymus ir išanalizavus bandymų rezultatus, galima daryti tokias išvadas:

1. Literatūros šaltinių analizė rodo, kad ekologiniu požiūriu smėlinio grunto cheminiam stabilizavimui ir ne laidumo vandeniui užtikrinimui yra racionalus natrio silikato ir fosforo rūgšties tirpalų (nebrangių ir lengvai gaunamų reagentų) mišinys, leidžiantis gauti stabilizuojantį gruntą silicio rūgšties gelį.
2. Tiriant smėlinio grunto stabilizavimo natrio silikato ir fosforo rūgšties tirpalais dėsningumus, buvo sukurta laboratorinių darbų metodika. Tyrimui buvo parinkti 36 mm skersmens ir 70 mm aukščio stabilizuoto grunto bandiniai. Tirtas smulkiojo smėlio stabilizavimas.
3. Laboratorijoje tirtas cheminių medžiagų mišinio gelio susidarymo laikas priklausomai nuo komponentų proporcijos. Didinant natrio silikato tirpalo kietiklio (fosforo rūgšties) kiekį stabilizuojančiame tirpale, silicio rūgšties gelio susidarymo laikas trumpėja. Pagal gelio susidarymo laiką buvo parinktos reagentų proporcijos.
4. Cheminių medžiagų santykis turi įtakos smėlinio grunto bandinių tankiui. Kuo mažesnis natrio silikato ir fosforo rūgšties santykis, tuo didesnis tankis. Ištyrus tankio kitimą laike (6 mėnesius), nustatyta, kad tankis yra 2,001 – 2,0 vandenyje ir 1,93 – 1,785 ore. Cheminių medžiagų tankio tyrimas svarbus, nes, kaip parodė atlikti pirminiai tyrimai, esant per dideliam tankiui nesusidaro silicio rūgšties gelis.
5. Buvo pagaminti ir išbandyti vienaašiu gniuždymu 54 bandiniai (po 18 bandinių išlaikius uždaruose eksikatoriuose vandenyje arba ore 7 dienas, 28 dienas ir 6 mėnesius). Bandinių vienaašis gniuždomasis stipris po 6 mėnesių laikymo vandenyje arba ore siekia 49,79 kPa ir 54,79 kPa atitinkamai.
6. Cheminių medžiagų santykis taip pat turi įtakos bandinių suirimo plokštumai. Mažėjant natrio silikato ir fosforo rūgšties tirpalų santykiui, atsiranda aiškesnė suirimo plokštuma.
7. Atlikus laboratorinius bandymus nustatyta, kad rekomenduojamas natrio silikato (1,2 g/cm^3 tankio) ir fosforo rūgšties (1,025 g/cm^3 tankio) tirpalų santykis yra 1:3,0, kuris leidžia pasiekti stabilų, nelaidų vandeniui smėlinio grunto sustiprinimą, o gelio susidarymo laikas (35 minučių) yra tinkamas silikatinio tirpalo injekcijai į gruntą.
8. Tiriamos receptūros komponentų kaina yra nedidelė palyginus su kitomis cheminio grunto stiprinimo receptūromis, ypač organinių polimerų pagrindu. Natrio silikato ir fosforo rūgšties kaina 1 m3 grunto sustiprinti yra 315,2 EUR.

6. Literatūros šaltiniai

Amšiejus, J., Mackevičius, R., Medzvieckas, J., Sližytė, D. ir Stragys, V. (2006). Gruntų fizinės ir mechaninės savybės. Laboratoriniai. Vilnius: Technika 164 p

Becker, P. (1983). Phosphate and phosphoric. 588. https://www.researchgate.net/profile/Venkat-K-2/publication/270183020_Study_on_Permeation_Grouting_Using_Cement_Grout_In_Sandy_Soil/links/568a87ee08ae1e63f1fbd20f/Study-on-Permeation-Grouting-Using-Cement-Grout-In-Sandy-Soil.pdf

Celik, F. (2019). The observation of permeation grouting method as soil improvement technique with different grout flow models. Geomechanics and Engineering17(4). 367-374. https://www.researchgate.net/publication/331893539_The_observation_of_permeation_grouting_method_as_soil_improvement_technique_with_different_grout_flow_models

Cheng, W., Ni, J., Shen, J. ir Wang, Z. (2018). Modeling of Permeation and Fracturing Grouting in Sand. Journal of Testing and Evalution 46 (5), 58. https://www.researchgate.net/publication/317039971_Modeling_of_Permeation_and_Fracturing_Grouting_in_Sand_Laboratory_Investigations

Dayakar, P. ir Venkat Raman, K. (2012). Study on Permeation Grouting Using in Sandy Soil. 6.

Dwyer, B. P. (1994). Feasibility of permeaation grouting for constructing subsurface barriers. 49. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1275391/

Gilmour, R. (2014). Phosphoric And Purfication, Uses, Technology, and Economics. 364.

Hamouda, A. ir Akhlaghi Amiri, A. (2014). Factors Affecting Alkaline Sodium Silicate Gelation for In-Depth Reservior Profile Modification. 586-590. https://www.mdpi.com/1996-1073/7/2/568

Huang, Ch. Ir Cormack, A. N. (1990). The structure of sodium silicate glass. The Journal of chemical Physicss 93(11). https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.459296

Hurley, H., Thomas, H. (1972). Sodium Silicate Stabilization of soils: A review of the literature (47-79). https://trid.trb.org/view/12188

Yang, K. H., Song, J.K., Ashour, F., Lee, E.T. (2008). Properties of cementless mortars activated by sodium salicate. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061807001845

Krisch, K. ir Bell, A. (2013). Ground Improvement. 498. https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=NkzLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA169&dq=permeation+grouting+specification&ots=c0ujExer_R&sig=ag5U-

ETSV8azSp3TUd3gppCzUt8&redir_esc=y#v=onepage&q=permeation%20grouting%20specification&f=false

Mackevičius, R. (2009). Geotechnikos naujosios technologijos. Vilnius: Technika.

Michael J. Byle, Roy H. Borden (1995). Verification of Geotechnical Grouting. San Diego, California.

Moaydil, H., Bujang, B. K., Kazemian, S. ir Daneshmand, S. (2012). Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout. https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-abstract/6CDE7DC18987

Mollamahmutoglu, M. ir Yilmaz, Y. (2010). Engineering Properties of Medium to Fine Sands Injected with Microfine Cement Grout. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1064119X.2010.517715

Peeler, E. C. (1959). Chemical composition and process for soil stabilization. https://patents.google.com/patent/US2968572A/en

Prostoy, S. M. ir Nikulin N. Yu. (2017). Mechanism of change in physical properties of soil under experimental electrochemical reinforcement. https://link.springer.com/article/10.1134/S1062739115050076

Raymond W. Henn (1996). Practical Guide to Grouting of Underground Struktures. 191, 5-64. https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784411322

Sližytė, D., Medzvieckas, J. ir Mackevičius, R. (2012). Pamatai ir Pagrindai. Vilnius: Technika.