



**VILNIAUS UNIVERSITETAS
CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS
GEOMOKSLŲ INSTITUTAS
HIDROGEOLOGIJOS IR INŽINERINĖS GEOLOGIJOS KATEDRA**

Rytis Lažaunikas

Hidrogeologija ir inžinerinė geologija
Magistro baigiamasis darbas

**MORENINIŲ SMULKIŲ GRUNTŲ NEDRENUOTO
KERPAMOJO STIPRIO ĮVERTINIMAS LABORATORINIAIS IR
GEOFIZINIAIS TYRIMO METODAIS**

Darbo vadovas (-ė)
doc. dr. Saulius Gadeikis

Vilnius 2025



VILNIUS UNIVERSITY
FACULTY OF CHEMISTRY AND GEOSCIENCES
INSTITUTE OF GEOSCIENCES
DEPARTMENT OF THE HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

Rytis Lažaunikas
Hydrogeology and engineering geology
Master thesis

**EVALUATION OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF
FINE-GRAINED MORaine SOILS USING LABORATORY AND
GEOPHYSICAL INVESTIGATION METHODS**

Scientific adviser
Assoc. prof. dr. Saulius Gadeikis

Vilnius 2025

TURINYS

IVADAS.....	5
1. Grunto stiprumo samprata.....	6
1.1 Nulinio vidinės trinties kampo $\varphi_u = 0$ metodas.....	7
1.2 Laboratoriniai nedrenuoto kerpamojo stiprio nustatymo metodai	8
1.2.1 Gniuždymo bandymas, kai šoninės deformacijos nėra varžomos	8
1.2.2 Kišeninio penetrometro bandymas	10
1.2.3 Triašio gniuždymo bandymas.....	11
1.3 Lauko metodai skirti nustatyti nedrenuotą kerpamąjį stiprį.....	16
1.3.1 Išskaičiavimas iš statinio zondavimo metu gaunamo kūginio stiprio rodiklio q_c , MPa	16
1.3.2 Išskaičiavimas iš sekliosios seismikos metodu gaunamo skersinės bangos greičio V_s , m/s.....	18
1.3.3 Išskaičiavimas iš sekliosios seismikos metodu gaunamo išilginės bangos greičio V_p , m/s	19
2. Seisminių bangų sklaidimo grunte teorinė apžvalga.....	21
2.1.1 Seisminių tyrimų istorija ir raida.....	21
2.1.2 Tūrinių bangų apžvalga	22
2.1.3 Paviršinių bangų teorinė samprata.....	23
2.1.4 Skersinės bangos, sklindančios grunte, skilimas	23
2.1.5 Seisminių bangų anizotropijos apžvalga	24
2.1.6 Grunto fizikinių savybių įtaka seisminių bangų greičiams.....	27
2.2 Kiti geofiziniai metodai, skirti nustatyti seisminių bangų greičius.....	28
3. Tyrimo metodika	35
3.1 Lauko tyrimo metodai.....	35
3.2 Laboratoriniai metodai.....	37
3.3 Geofizinių duomenų analizė ir seisminių bangų greičių nustatymas.....	37
3.4 Duomenų imties statistinis apdorojimas atrandant imties neatitinkančias vertes	39
4. Tirtų gruntų geotechninės savybės.....	48
4.1 Bendra tirtų gruntų savybių apžvalga	48
4.2 Smėlingo molio ir dulkio fizikinės ir mechaninės savybės.....	50
4.3 Smėlingo molio fizikinės ir mechaninės savybės	52
5. Tyrimų rezultatai ir analizė	54
5.1 Grunto granuliometrinės sudėties įtaka skersinės bangos greičiui	54
5.1.1 Bendra skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties.....	54
5.1.2 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties smėlingame molyje ir dulkėje	55
5.1.3 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties smėlingame molyje	56

5.1.4	Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties viršutinio Nemuno Baltijos posvitės g III bl gruntuose.....	57
5.1.5	Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties Grūdų posvitės g III gr gruntuose.....	58
5.1.6	Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties pagrindinės morenos g III nm ₃ genezės gruntuose	59
5.1.7	Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties kraštinių darinių gt III nm ₃ genezės gruntuose	59
5.2	Regresinių lygčių sudarymas pagal sekliosios seismikos bandymu ir laboratoriniais metodais nustatytus rodiklius	60
5.2.1	Pagrindinės morenos g III nm ₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	60
5.2.2	Kraštinių darinių gt III nm ₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	62
5.2.3	Pagrindinės morenos g III nm ₃ smėlingo molio ir dulkių SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	64
5.2.4	Kraštinių darinių gt III nm ₃ smėlingo molio ir dulkių SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	65
5.2.5	Baltijos posvitei g III bl priklausančio smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio įvertinimas.....	67
5.2.6	Baltijos posvitės g III bl smėlingo molio ir dulkių SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	68
5.2.7	Grūdų posvitės g III gr smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	70
5.2.8	Grūdų posvitės g III gr smėlingo molio ir dulkių SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas.....	71
	IŠVADOS	74
	LITERATŪROS SĄRAŠAS:	75
	SANTRAUKA	79
	SUMMARY	80
	PRIEDAI	81
	1 priedas	82
	2 priedas	83
	3 priedas	84
	4 priedas	85

IVADAS

Apie 58 % Lietuvos teritorijos sudaro moreniniai smulkūs gruntai, kurie dažnai tampa statinių pamatų pagrindu. Projektuojant bei statant įvairius inžinerinius objektus būtina turėti informaciją apie gruntų fizikines ir mechanines savybes. Vienas iš svarbiausių mechaninių rodiklių yra nedrenuotas nekonsoliduotas kerpamasis stipris c_u , kuris ypač svarbus projektuojant pamatus, kai grunto pagrindą sudaro vandeniu įsotinti, lėtai filtruojantys sluoksniai, o jų apkrovimas vyksta greitai, nesant laiko natūraliai konsolidacijai.

Nedrenuotojo kerpamojo stiprio c_u vertės gali būti nustatomos tiek laboratoriniais, tiek lauko bandymais. Kadangi šių metodų principai, bandymo sąlygos ir procedūros skiriasi, gautos c_u reikšmės dažnai nėra tiesiogiai palyginamos ir gali skirtis net to paties grunto atveju. Tarp dažniausiai taikomų metodų laboratorinėmis sąlygomis išskirtini: triašio gniuždymo bandymas, neapriboto gniuždymo bandymas ir kišeninio penetrometro bandymas. In-situ sąlygomis c_u paprastai nustatomas taikant statinio zondavimo metodą ar paskaičiuojant c_u naudojant seismines bangas.

Tyrimų, nagrinėjančių analogišką tematiką, kai siekiama prognozuoti nedrenuotą kerpamąjį stiprį c_u remiantis granuliometrine sudėtimi, skersinės bangos greičiu ar kitomis fizikinių savybių kombinacijomis, gruntų atžvilgiu praktiškai nėra. Didžioji dalis anksčiau atliktų tyrimų orientuoti į uolienų savybių ir stiprio parametrų nustatymą, tačiau ne į gruntų, o tuo labiau į Lietuvoje sutinkamų smulkių moreninių gruntų analizę, pasižyminčių ypatinga sudėtimi, analizę.

Darbo tikslas – nustatyti ir įvertinti tiriamų smulkių moreninių gruntų fizines ir mechanines savybes laboratoriniais metodais, atlikti lauko sekliosios seismikos bandymus, įvertinti smulkaus moreninio grunto granuliometrinės sudėties įtaką skersinės bangos greičiui, sudaryti daugianares koreliacines lygtis.

Darbo uždaviniai:

1. Laboratoriniais metodais nustatyti tiriamųjų gruntų fizines ir mechanines savybes.
2. Lauko sekliosios seismikos metodu nustatyti skersinės ir išilginės bangų greičius.
3. Įvertinti grunto granuliometrinės sudėties įtaką skersinės bangos greičiui.
4. Sudaryti daugianares koreliacines lygtis, aprašančias ryšį tarp nedrenuoto kerpamojo stiprio ir grunto fizikinių savybių bei seisminių bangų greičių.

Dėkoju savo baigiamojo magistrinio darbo vadovui doc. dr. Sauliui Gadeikiui už pagalbą, patarimus, idėjas, kantybę bei paskirtą laiką. Už pagalbą renkant mėginius dėkoju UAB „Geotestus“ kolektyvui. Už pagalbą atliekant laboratorinius tyrimus dėkoju VU Gruntų mechanikos laboratorijos kolektyvui.

1. GRUNTO STIPRUMO SAMPRATA

Tiriant įvairias statybines konstrukcines medžiagas, jų stiprumas suprantamas kaip maksimali gniuždymo ar tempimo įtempio riba, kurios viršijimas lemia medžiagos vientisumo praradimą. Tokiu atveju joje atsiranda plyšių, įtrūkimų, ir ji suyra – šis reiškinys vadinamas trapiu suirimu. Tačiau kai kuriais atvejais stiprumo riba nesukelia akivaizdaus irimo, o lemia dideles plastines deformacijas, kurios perauga į medžiagos tekėjimą. Tai - ribinė plastinė deformacija. Skirtingai nei šios medžiagos, dauguma gruntų – sudėtingos daugiakomponentės sistemos, sudarytos iš kietųjų dalelių, vandens ir oro – dažnai suyra kitokiu būdu nei anksčiau minėtos medžiagos.

1779 metais Čarlzas Kulonas bandymų metu nustatė, kad dalelėms persistumiant viena kitos atžvilgiu įvyksta grunto suirimas. Bandymų rezultatai aprašyti tiesine lygtimi (1):

$$\tau_{rib} = \sigma \times \tan \varphi \quad (1)$$

kur

τ_{rib} – ribinis pasipriešinimas šlyčiai, kN/m^2

σ – normalinis įtempis, kN/m^2

$\tan \varphi$ – vidinės trinties kampas, [-]

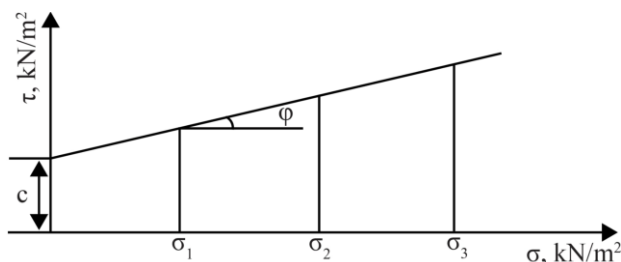
Kiek sudėtingesnė priklausomybė nustatyta moliniams gruntams – juose veikia silpni cementaciniai ir vandens – koloidiniai ryšiai. Vandens – koloidinių ryšių stiprumą lemia atstumas tarp jonų sudėties, grunto dalelių, jų paviršių elektrinių krūvių bei vandens kiekio grunto porose. Šie ryšiai nėra stiprūs, juos lengva suardyti ir jie greitai atsistato. Nuosėdų formavimosi metu atsiranda cementaciniai ryšiai. Jie susidaro, kai iš porų tirpalų ant dalelių paviršiaus susiformuoja plėvelės, kurios suauga gruntą sudarančių dalelių kontakto vietose. Šie ryšiai yra trapūs, suirę neatsistato arba atsistato tik po didelio laiko tarpo. Šių dviejų ryšių kombinacija sukuria sankabumą tarp gruntą sudarančių dalelių. Todėl Kulono lygtyje atsiranda sankabumo dedamoji c (2):

$$\tau_{rib} = \sigma \times \tan \varphi + c \quad (2)$$

Kur

c – sankiba, kN/m^2

2 lygties grafinė išraiška parodyta 1 pav.



1 pav. Kulono lygties grafinė išraiška

1925 metais austrų mokslininkas Karlas von Terzaghi į šią lygtį įvedė efektyviųjų įtempių sąvoką (3):

$$\sigma = \sigma' - u \quad (3)$$

kur

σ – suminis įtempis, kN/m^2

σ' – efektyvusis įtempis, kN/m^2

u – porinis slėgis, kN/m^2

Efektyvieji įtempiai atsiranda tik tarp kietų grunto dalelių, dėl to Kulono lygtis pagal efektyviuosius įtempius pasikeičia į tokią formą (4):

$$\tau_{rib} = \sigma' \times \tan \varphi' + c' \quad (4)$$

Efektyvioji sankiba c' smėliuose ir normaliai konsoliduotuose moluose lygi 0 (Day, W. D, 1992). Tačiau, kai molis yra pertankintas ar moreninis, tada efektyviosios sankibos vertė gali būti didesnė nei 0.

Remantis Kulono lygtimi, visi joje naudojami įtempiai bei iš jos gaunami stiprumo parametrai apibūdina tik tas įtempių būsenas, kurios susidaro tik tarp atskirų grunto dalelių. Todėl, modeliuojant grunto ir pamato pado sąveiką, daroma prielaida, kad gruntas yra visiškai konsoliduotas ir perteklinis vanduo pasišalino.

Tačiau realiomis statybų sąlygomis teorinės prielaidos dažnai nebūna pasiekiamos. Statybų darbai vyksta sparčiai, gruntas apkraunamas greitai, nesuteikiant jam laiko konsoliduotis ar užtikrinti tinkamą vandens drenavimąsi iš jo. Tokiu atveju skaičiavimai turi būti atliekami naudojant suminių įtempių metodą. Pavyzdžiui, Eurokodas 7 „Geotechninis projektavimas. 1 dalis“ (LST EN 1997-1) numato, kad dulkingų ir molingų gruntų pagrindų leistinos apkrovos turi būti vertinamos atsižvelgiant į suminius įtempius.

1.1 Nulinio vidinės trinties kampo $\varphi_u = 0$ metodas

1948 metais anglų profesorius A. W. Skemptonas sukūrė metodą, taikomą vandeniui prisotintiems molingiems gruntams, kurie apslėgiami greitai. Šio metodo esminė idėja – greitojo kirpimo metu trintis tarp dalelių labai sumažėja ir vėliau tampa lygi 0. Šios teorinės prielaidos metu Kulono formulėje lieka tik sankiba, kuri dar vadinama nedrenuotu kerpamuoju stipriu c_u arba tariamąja sankiba. Šis rodiklis nustatomas nedrenuotu ir nekonsoliduotu bandymu (UU). Įvairūs laboratoriniai bei lauko (in-situ) metodai taikomi norint nustatyti nedrenuotą kerpamąjį stiprį.

1.2 Laboratoriniai nedrenuoto kerpamojo stiprio nustatymo metodai

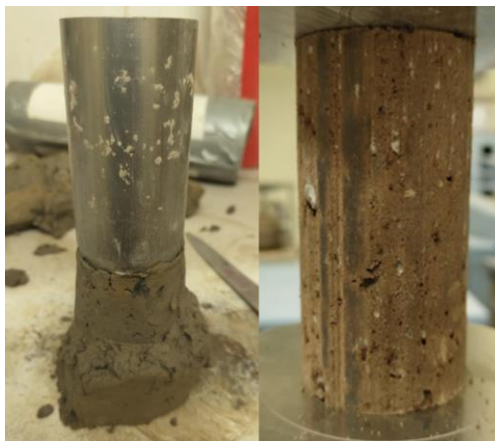
Nedrenuotas kerpamasis stipris c_u laboratorijoje nustatomas šiais metodais:

- Gniuždymas, kai šoninės deformacijos nėra varžomos
- Kišeninio penetrometro bandymas
- Triašio gniuždymo bandymas

1.2.1 Gniuždymo bandymas, kai šoninės deformacijos nėra varžomos

Nevaržomo gniuždymo bandymas yra nekonsoliduotas ir nedrenuotas laboratorinis metodas, taikomas molingų gruntų stipruminėms savybėms tirti. Šio bandymo pagrindinis tikslas – nustatyti nevaržomą gniuždomąjį stiprį q_u , kuris naudojamas nedrenuoto grunto kirpimo stipriui įvertinti esant nekonsoliduotoms ir nedrenuotoms sąlygoms. Vadovaujantis ASTM standartu, nevaržomas gniuždomasis stipris apibrėžiamas kaip maksimalus ašinės apkrovos dydis, sukeliantis grunto bandinio suirimą nevaržant šoninių deformacijų. Bandymas grindžiamas elementariu ašinio gniuždymo principu ir gali būti atliekamas tiek triašio kirpimo įrenginiu, tiek specializuotu vienašiu spaudimo prietaisu.

Cilindrinis bandinys išpjaunamas iš molinio grunto monolito. Jo skersmuo 50 mm, aukštis 100 mm, pradinis skerspjūvio plotas $A = 19,63 \text{ mm}^2$, tūris $V = 196,25 \text{ mm}^3$. Svarbu paruošus bandinį vizualiai įvertinti jo būklę prieš bandymą – jame neturi būti pažeidimų, įskilimų. Abu bandinio galai privalo būti lygiagretūs, lygūs. 2 paveiksle pavaizduotas ruošiamas ir paruoštas bandinys.



2 pav. Smėlingo molio grunto bandinys ruošiamas kairėje ir paruoštas dešinėje vienašiam gniuždymo bandymui.
Autoriaus nuotrauka

Bandymas gali būti atliekamas naudojant mechaninį, automatinį arba hidraulinį presą – tai priklauso nuo turimos laboratorinės įrangos. Taikomos apkrovos dydis registruojamas dinamometru arba hidrauliniu manometru, užtikrinant tikslų jėgos vertinimą bandymo metu. Grunto mėginys yra kruopščiai įtvirtinamas preso ašyje, siekiant užtikrinti vienodą apkrovos pasiskirstymą. Norint tiksliai fiksuoti vertikalios deformacijos eigą bandymo metu, naudojamas indikatorinio tipo deformacijų matuoklis, montuojamas tiesiogiai virš mėginio arba ant specialios atramos sistemos.

Gniuždymas vykdomas vienodu tolygiu greičiu. Trukmė – 4 – 10 min. Fiksuojami vertikali deformacija ir vertikalūs įtempiai. Šis bandymas atliekamas tol, kol bandinys suyra. Kai sutinkama

plastinė deformacija, tokiu atveju iki tol, kol bandinys įgauna statinės formą ir santykinė deformacija viršija 15%.

Neapribotas gniuždomasis stipris q_u apskaičiuojamas pagal formulę (5) (Tsuchida ir kt., 2020):

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Kur

A – bandinio skerspjūvio plotas, m^2

P – bandymo metu išmatuojama perduodama ašinė apkrova į bandinį, kN.

Gniuždomasis stipris dažnai priklauso nuo molingo grunto konsistencijos I_c . Ši priklausomybė parodyta 1 lentelėje.

1 lentelė. Gniuždomojo stiprio ir grunto konsistencijos priklausomybė (Saputra ir kt. 2020)

Grunto konsistencija I_c	Gniuždomasis stipris q_u , kN/m ²
Labai minkšta	25 – 50
Minkšta	50 – 100
Kieta	100 – 200
Standi	200 – 400
Labai standi	> 400

Jei bandinys susigniuždo kaip statinė ir jo galai išlaiko pradinį skerspjūvio plotą, tada bandinio kintantis plotas skaičiuojamas pagal 6 formulę:

$$A = \frac{A_0}{4} \times \left(3 \times \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon}} \right)^2 \quad (6)$$

Jei bandinio paviršiaus plotas šiek tiek padidėja keičiantis apkrovos dydžiui, tokiu atveju jis apskaičiuojamas pagal 7 formulę:

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon} \quad (7)$$

Kur

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas, m^2

ε – santykinė vertikali deformacija, vnt. d.

Santykinė vertikali deformacija ε apskaičiuojama pagal 8 formulę:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (8)$$

Kur

ΔL – deformacijos pokytis, m

L_0 – pradinis bandinio aukštis, m.

Apskaičiavus gniuždomojo stiprio vertę q_u pagal 9 formulę nustatoma nedrenuotas kerpamasis stipris c_u :

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (9)$$

Teoriškai, nedrenuotojo kirpimo stiprio c_u reikšmės, gautos taikant neapriboto gniuždymo bandymą ir nekonsoliduotą nedrenuotą (UU) triašio kirpimo bandymą, turėtų būti identiškos, kadangi abu metodai grindžiami prielaida, jog šoninė deformacija yra lygi nuliui. Vis dėlto, praktiniai tyrimai rodo kitaip – c_u reikšmės, nustatytos pagal neapriboto gniuždymo bandymą, dažniausiai yra šiek tiek mažesnės nei tos, kurios gaunamos taikant UU tipo triašio bandymo metodiką (Das, 2006).

1.2.2 Kišeninio penetrometro bandymas

Jėga, reikalinga prietaisui įstumti ar įspausti į gruntą, yra grunto skvarbumo matas. Siekiant įvertinti šią savybę, į gruntą buvo spaudžiami įvairūs prietaisai. Handy R. L. 1985 metais aprašė labai paprastus grunto skvarbumo bandymus – nuo nykščio iki bato kulno naudojimo. Jie pažymi, kad seniausias žinomas metodas yra nykštys, kurį energingai spaudžiant į gruntą galima apytiksliai įvertinti molio nedrenuotą kerpamąjį stiprį arba laikomąją galią.

Grunto skvarbumas matuojamas prietaisu, kuris vadinasi penetrometru (3 pav.). Penetrometras susideda iš strypo arba veleno su plokščiu galu, išplatintu kūgio formos antgaliu arba išplėstu plokščiu pagrindu. Penetrometrai su plokščiu galu dažniausiai naudojami tiriant netoli žemės paviršiaus esančio grunto stiprumą. Penetrometro duomenys paprastai pateikiami kaip pasipriešinimas įsiskverbimui, išreikštas jėga, tenkančia ploto vienetui. Šis pasipriešinimo slėgis dar vadinamas kūgio indeksu. Nedrenuotas kerpamasis stipris apskaičiuojamas pagal 10 formulę:

$$c_u = \frac{Q}{N} \quad (10)$$

Kur

Q – penetrometro rodmuo, N arba kN

N – penetrometro antgalio plotas, cm^2 arba mm^2 , priklauso nuo dydžio



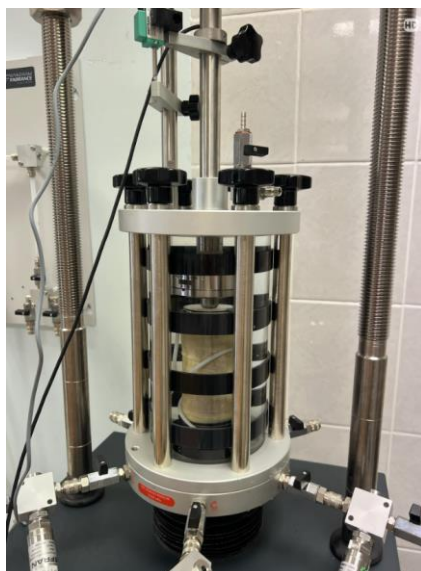
3 pav. Grunto penetrometras. Autoriaus nuotrauka

Tiek penetrometro geometriniai ypatumai, tiek grunto savybės turi įtakos grunto suirimo pobūdžiui. Durgunoglu ir Mitchell, 1975 apžvelgė siūlomus statinės penetracijos suirimo mechanizmus. Santykinai homogeniškuose gruntuose įsiskverbimo pasipriešinimas didėja su gyliu iki kritinio gylio, kuris priklauso nuo grunto kietumo ir antgalio skersmens. Dažniausiai tai siekia 3 penetrometro antgalio skersmenis (Barley ir kt., 1965). Po šio kritinio gylio suirimo mechanizmas keičiasi – nuo vien tik kirpimo prie mišraus kirpimo ir gniuždymo. Tuo metu pasipriešinimo didėjimo tempas sumažėja arba visai stabilizuojasi. Gniuždymas tuo metu vyksta dviejose pagrindinėse zonose – plastinio suirimo zonoje, supančioje antgalį, ir ją supančioje elastingo gniuždymo zonoje (Farrell ir Greacen, 1966). Pasipriešinimą, kuris vyksta spaudžiant penetrometą į gruntą, sudaro du komponentai: slėgio komponentas, reikalingas ertmei išplėsti, ir antgalio trinties komponentas, kuris priklauso nuo zondo formos, paviršiaus savybių bei grunto ypatybių.

Grunto savybės, turinčios įtakos įsiskverbimo pasipriešinimui, apima gamtinę drėgnį w , kietų dalelių tankį ρ_s , grunto kompresines ir stiprumo savybes, struktūrą, granulimetrinę sudėtį, ypatingai molio ir smėlio kiekį. Šiuo klausimu buvo atlikta daugybė tyrimų. Taylor ir Gardner, 1963 parodė, kaip vandens kiekis, tankis, porų dydis, grunto tekstūra ir struktūra daro įtaką grunto stiprumui ir kūgio indeksui. Byrd ir Cassel, 1980 straipsnyje aprašė reikšmingus kūgio indekso skirtumus, priklausomai nuo smėlio kiekio ir grunto porinio vandens slėgio. Kūgio indekso reikšmės didėjo, mažėjant grunto poriniam slėgiui. Kūginio pasipriešinimo ir antgalio trinties reikšmės didėja, kai grunte yra cementacijos požymių (Puppala ir kt., 1995). Vepraskas M. J., 1984 aprašė bandymus su dulkingais smėliais, kurie rodo, kad didėjant grunto drėgmės kiekiui, įsiskverbimo pasipriešinimas mažėja.

1.2.3 Triašio gniuždymo bandymas

Triašio gniuždymo bandymas yra vienas iš plačiausiai taikomų metodų mechaninėms gruntų savybėms nustatyti visame pasaulyje. Šio bandymo universalumas leidžia gautus duomenis pritaikyti sprendžiant įvairias inžinerines ir geotechnines problemas. Pagrindinis triašio bandymo pranašumas – galimybė tiksliai kontroliuoti pagrindinius įtempių ir deformacijų komponentus, taip pat drenavimo sąlygas bei porinio slėgio pokyčius. Šis bandymas dažniausiai taikomas molingiems ir dulkingiems gruntams. Triašio gniuždymo bandymo metu yra tiksliai žinomi ir kontroliuojami pagrindiniai įtempiai, o drenavimo režimas gali būti modifikuojamas, siekiant nustatyti grunto stiprumo charakteristikas tiek drenuotomis, tiek nedrenuotomis sąlygomis. Aparatas pavaizduotas 4 paveiksle.



4 pav. Triašio gniuždymo aparatas. Autoriaus nuotrauka

Šis bandymas vienas iš plačiausiai naudojamų patikimiausių metodų, leidžiančių nustatyti grunto kerpamąjį stiprį, kadangi:

- Bandymo metu imituojamos gamtinės sąlygos, todėl bandinys deformuojasi per pačią silpniausią vietą.
- Kontroliuojami deformacijų ir pagrindinių įtempimų dydžiai, matuojamas porinis slėgis, kontroliuojamos drenavimosi sąlygos.
- Gaunama informacija kaip pasiskirsto įtempiai.

Pačioje pradžioje tokio tipo kirpimo bandymai buvo klasifikuoti pagal kirpimo greitį – tiesioginis kirpimas ir triašis vertintas kaip greitas ir lėtas bandymas. Tačiau bėgant metams buvo nustatyta, kad svarbiausias aspektas, apibūdinantis šį bandymą, yra drenavimosi sąlygos. Todėl dabar klasifikacija pasikeitė į drenuotą ir nedrenuotą bandymą (Ortigao ir kt., 1996).

Triašio slėgio bandymą galima atlikti trimis būdais:

- Nekonsoliduotas nedrenuotas (UU)
- Konsoliduotas drenuotas (CD)
- Konsoliduotas nedrenuotas (CU)

1.2.3.1 Nekonsoliduotas nedrenuotas (UU) bandymas

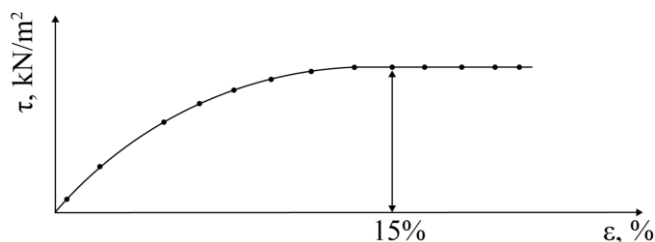
Nekonsoliduoto nedrenuoto bandymo metu gruntui drenuotis nėra leidžiama, ašinis įtempis greitai didinamas. Greitis negali būti per didelis, kitu atveju gali atsirasti inercijos efektas.

Šis triašio bandymo metodas skirtas nustatyti kerpamąjį stiprį, kai sąlygos yra nedrenuotos – gamtinis drėgnis negali kisti tiek bandinio paruošimo metu, tiek ir kirpimo metu. Porinis slėgis nematuojamas – rezultatai išreiškiami suminiais įtempiais.

Šis gniuždymo tipas paremtas prieš tai minėta $\phi_u = 0$ teorija. Testui naudojami trys skirtingi bandiniai, kiekvieno bandymo metu kinta normalinio įtempio vertė. Bandinys yra 10 cm aukščio ir 5 cm skersmens, išpjauamas iš nesuardytos sandaros grunto monolito. Prieš bandymą uždedama nepralaidi membrana, bandinys įstatomas į aparatą, užsukama ir pripildoma kamera distiliuotu vandeniu. Membrana svarbi tuo, kad neleidžia gruntui drenuotis, kai užduodamas normalinis įtempis.

Nedrenuoto nekonsoliduoto bandymo metu normalinis įtempimas vertinamas kaip mažiausias bendrasis įtempis ($\sigma_2 = \sigma_3$), o ašinis įtempis – kaip didžiausias bendrasis įtempis (σ_1). Šio tipo bandymo metu normalinis įtempimas išlaikomas pastovus – jo vertė nekinta. Bandymo metu specialių indikatorių pagalba registruojama vertikali jėga, kuria spaudžiamas bandinys, taip pat fiksuojama bandinio deformacija. Ašinė deformacija vyksta gana greitai ir tęsiama tol, kol gruntas suyra. Jei suirimo plokštuma aiškiai neišryškėja arba bandinys deformuojasi į statinės formą, bandymas tęsiamas iki tol, kol pasiekama 20 % santykinė deformacija. Tokiu atveju suirimo tašku laikomas momentas, kai santykinė deformacija yra 15 %.

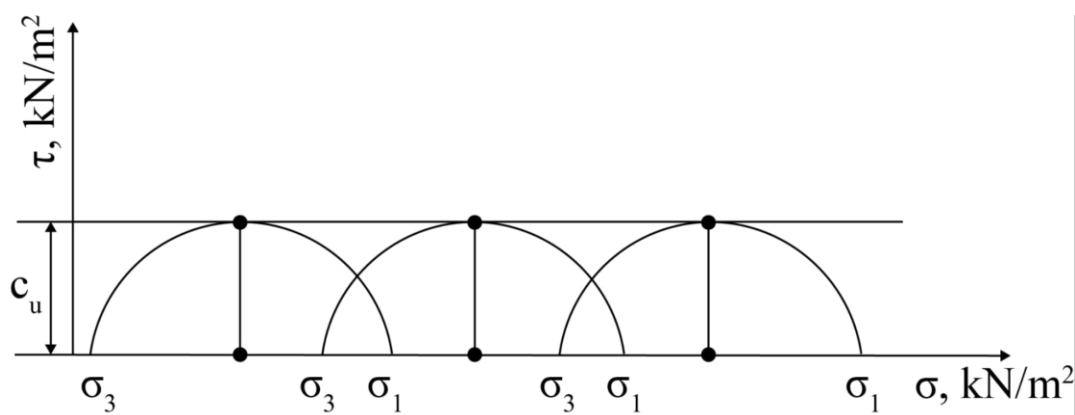
Pagal gautus duomenis sudaroma santykinės deformacijos ir kerpamojo stiprio grafikas (5 pav.).



5 pav. Kerpamojo stiprio – santykinės deformacijos priklausomybės grafikas

Bandymą verta atlikti su trimis mėginiais iš to pačio monolito, kai keičiamos σ_1 ir σ_3 vertės.

Deviatorinis įtempis suirimo metu ($\Delta\sigma$) išlieka beveik vienodas, nepriklausomai nuo bandymo metu nustatyto normalinio įtempio triašio aparato kameroje. Tokiu atveju maksimalus kirpimo įtempis $\tau_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$ yra pastovus, todėl grafike ji vaizduojama kaip horizontali linija (6 pav.).



6 pav. Nedrenuotas nekonsoliduotas kerpamasis stipris Moro apskritimų grafike

Bandymo metu kintant apkrovai vyksta mėginio deformacija, todėl privaloma perskaičiuoti mėginio skerspjūvio plotą A (10):

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (10)$$

Kur

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas, m^2

ε – santykinė vertikalioji deformacija, vnt. d.

Vertikalios deformacijos pokytis leidžia apskaičiuoti santykinę deformaciją, kuri parodo, kiek bandinys deformavosi bandymo metu (11):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (11)$$

Kur

ΔL – deformacijos pokytis, m

L – pradinis aukšis, m

Turint visas reikiamas savybes galima paskaičiuoti kerпамąjį stiprį (12):

$$\tau = c_u = \frac{1}{2} \times \frac{P}{A} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (12)$$

Kur

P – vertikali jėga, kN

A – koreguotas bandinio plotas, m²

σ_1 – vertikalus pagrindinis įtempimas, kN/m²

σ_3 – normalinis įtempimas, kN/m²

1.2.3.2 Konsoliduotas drenuotas (CD) bandymas

Konsoliduoto drenuoto gniuždymo metu bandinys triašio aparato kameroje veikiamas visapusišku (normaliniu) įtėpiu σ_3 . Staiga padidinus šį įtėpį, porinis vandens slėgis bandinyje išauga. Tačiau leidžiant vandeniui laisvai drenotis, porinis slėgis palaipsniui sumažėja ir galiausiai tampa lygus nuliui – tokiu būdu įvyksta bandinio konsolidacija. Konsolidacijos metu, jei bandinys yra prisotintas vandeniu, fiksuojamas jo tūrio sumažėjimas. Šį tūrio pokytį galima nustatyti išmatuojant nusidrenavusio vandens tūrį.

Bandymo pradžioje iš nesuardytos sandaros grunto monolito išpjunami trys cilindriniai grunto bandiniai, kurie yra konsoliduojami taikant skirtingas įtėpių reikšmes. Tiek konsolidacijos, tiek vėlesnio kirpimo metu bandiniams leidžiama laisvai drenotis. Konsolidacija kiekvienam bandiniui vykdoma palaipsniui didinant įtėpimus – vienodai visomis kryptimis. Šis procesas tęsiamas tol, kol įvyksta porinio slėgio disipacija - visiškai išsisklaido porinis slėgis, o tai paprastai užtrunka nuo 24 iki 48 valandų. Konsolidacijos metu fiksuojamas bendras bandinio tūrio pokytis.

Po konsolidacijos bandiniai gniuždomi pastoviu greičiu. Deformacijos greitis parenkamas pakankamai mažas, kad nesusidarytų perteklinis porinis slėgis – dėl to visas bandymas gali užtrukti net kelias savaites. Gniuždymo metu nuolat matuojami vertikalūs įtėpimas ir bandinio tūrio pokytis, o horizontalūs įtėpimas išlaikomas pastovus.

Bandymas tęsiamas iki grunto suirimo. Jei suirimo požymiai nėra aiškiai matomi, bandymas vykdomas tol, kol pasiekiamas 20 % santykinė deformacija. Tokiu atveju suirimo tašku laikomas momentas ties 15 % santykinė deformacija.

Baigus visus tris bandymus braižoma Moro ratų diagrama, iš kurios skaičiuojamas efektyvusis vidinės trinties kampas φ' ir efektyvioji sankiba c' – tam panaudojami efektyvieji įtėpimai.

1.2.3.3 Konsoliduotas nedrenuotas (CU) bandymas

Konsoliduotas nedrenuotas gniuždymo bandymas naudojamas įvairiems tikslams. Šio tipo bandymu galima nustatyti bendruosius arba efektyviusius grunto stiprumo parametrus – nuo to priklauso bus ar nebus matuojamas porinis slėgis. Paprastai bandymas vykdomas trimis pagrindiniais etapais: bandinio prisotinimu, konsolidacija ir vėlesniu gniuždymu.

Bandinys turi būti pilnai įsotintas vandeniu ir jame negali likti porų su oru. Įsotinimo procesas vykdomas didinant porinį slėgį iki tokio lygio, kad vanduo įsiskverbtų į tuštumas ir išstumtų jose esantį orą. Tuo pačiu metu didinamas ir visapusis slėgis, siekiant išlaikyti nedidelį teigiamą įtempimą bandinyje.

Jeigu bandinyje esančio oro nepavyksta pašalinti, neįmanoma tiksliai išmatuoti porinio vandens slėgio dėl skirtingų paviršiaus įtempimų. Oro buvimas neigiamai veikia matavimo sistemą – sukelia duomenų uždelsimą ir netikslumus reaguojant į slėgio pokyčius.

Įsotinimas dažniausiai atliekamas leidžiant gruntui brinkti prieš taikant vertikalų slėgį. Vertikalusis slėgis perduodamas per tūrio pokyčio indikatorių tiesiai į bandinio viršų, o šiek tiek didesnis visapusis slėgis veikia bandinį iš visų pusių. Abi įtempimų rūšys – tiek visapusis, tiek vertikalusis – didinamos palaipsniui, tam tikrais laiko intervalais, iki pasiekama jų stabilizacija.

Vernay ir kt. 2020 metų straipsnyje mini 13 formulę, kuri panaudota skaičiuojant Skemptono įsotinimo koeficientą B :

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (13)$$

Kur

Δu – porinio slėgio pokytis, kai buvo užsiduoti σ_1 bei σ_3 parametrai, kN/m²

$\Delta \sigma$ – slėgio pokytis, kN/m²

Åhnberg H., 2004 metų straipsnyje pažymėjo, kad eksperimentų metu kai kurių gruntų konsolidacijos metu poriniam slėgiui sumažėjus iki atmosferinio lygio, iš porinio vandens gali pradėti išsiskirti anksčiau jame ištirpęs oras – jis formuoja smulkius oro burbuliukus. Dėl to bandinys praranda visišką įsotinimą ir neigiamai paveikia rezultatus. Siekiant to išvengti Åhnberg H. panaudojo atgalinio slėgio sistema. Ji leido palaikyti tokią slėgio aplinką, kurioje ištirpęs oras lieka tirpale ir neišsiskiria burbuliukų pavidalu. Taip išvengiama įsotinimo lygio pokyčių ir užtikrinama stabili efektyviųjų įtempimų būseną bandinyje.

Konsolidacijos metu į bandinį vienu metu veikia šoninis ir atgalinis slėgis. Šių slėgių perdavimo metu tūrio pokyčiai stebimi naudojant specialų indikatorių – biuretę, esančią atgalinio slėgio sistemoje. Tūrio pokytis ir jo kitimo greitis priklauso nuo kelių veiksnių (Brandon ir kt., 1990): taikomo slėgio intensyvumo, grunto konsolidacijos koeficiento bei drenavimosi sąlygų per bandinio sienelės. Visapusis ir atgalinis slėgiai didinami laipsniškai – tam tikrais laiko tarpais, kol sistema stabilizuojasi.

Kai grunto bandinys yra visiškai konsoliduotas, drenavimo sistema uždaroma – norima, kad kirpimo metu bandinys nesidrenuotų ir nebūtų papildomo vandens nutekėjimo.

Nors bandinys deformuojamas esant nedrenuotoms sąlygoms, gniuždymas turi būti atliekamas labai lėtai, nes dėl vertikalios apkrovos susidaręs porinio slėgio padidėjimas galėtų tolygiai pasiskirstyti visame bandinyje.

Germaine ir Ladd, 1998 metų straipsnyje nustatė, kad daugeliui molingo grunto bandinių taikomas kirpimo greitis yra apie 0,05 mm/min, todėl visas deformacijos (kirpimo) etapas gali trukti iki maždaug 3 valandų.

Skirtingai nei konsoliduotame drenuotame bandyme, suminiai ir efektyvieji įtempiai yra skirtingi. Šio bandymo metu porinis slėgis yra matuojamas, todėl bendrasis šoninis slėgis yra σ_3 , efektyvusis – $\sigma_3' = \sigma_3 - (\Delta u)$. Bendrasis deviatorinis įtempis mėginio suirimo metu – $\sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta \sigma)$, efektyvusis įtempis – $\sigma_1' = \sigma_1 - (\Delta u)$ (Giger ir kt., 2018).

1.3 Lauko metodai skirti nustatyti nedrenuotą kerpamąjį stiprį

Nedrenuotą kerpamąjį stiprį c_u lauko sąlygomis (in-situ) galima nustatyti šiais metodais:

- Išskaičiavimas iš statinio zondavimo metu gaunamo kūginio stiprio rodiklio q_c , MPa
- Išskaičiavimas iš sekliosios seismikos metodu gaunamo skersinės bangos greičio V_s , m/s
- Išskaičiavimas iš sekliosios seismikos metodu gaunamo išilginės bangos greičio V_p , m/s

1.3.1 Išskaičiavimas iš statinio zondavimo metu gaunamo kūginio stiprio rodiklio q_c , MPa

Kūginio stiprio koeficiento N_k panaudojimas Lietuvoje

Lietuvoje taikomuose norminiuose dokumentuose nėra pateikta viena konkreti kūginio stiprio koeficiento N_k vertė. Vietoje to laikomasi Eurokodo principo – projektuotojai turi remtis lokalia patirtimi ar prieš tai atliktų bandymų duomenimis. Dėl šios priežasties N_k koeficientas gali skirtis priklausomai nuo individualių inžinerinių geologinių sąlygų. Atsižvelgiant į lokalią patirtį, Lietuvoje smulkiems gruntams kūginio stiprio koeficientas yra lygus 20.

Metodų, leidžiančių apskaičiuoti nedrenuotą kerpamąjį stiprį iš statinio zondavimo metu gaunamo kūginio stiprio q_c , apžvalga

Statinio zondavimo metodas plačiai taikomas norint nustatyti inžinerinių geologinių sluoksnių ribas bei gruntų deformacines ir stiprumines savybes. Atliekant šį tyrimą, zondas, pritvirtintas prie štangų galo, mechaninėmis staklėmis tolygiu greičiu spaudžiamas į gruntą. Bandymo metu nuolat registruojamas kūgio spraudos q_c , šoninė trintis f_s ir porinis vandens slėgis u . Nustatyti rodikliai vėliau panaudojami nedrenuoto kerpamojo stiprio nustatymui ir koreliacijai

Empiriniai metodai naudojami nustatyti koreliaciją tarp nedrenuoto kerpamojo stiprio ir kūgio spraudos. Patikimumas pateikiamas regresinėmis lygtimis (Gebreselassie ir kt., 2003).

Rémai, Z., 2013 metų straipsnyje aprašo kelis panašius metodus, kuriais galima nustatyti c_u . Minima, kad didžioji dalis formulių kyla iš tos pačios teorinės lygties (14), tik keičiasi panaudojimas:

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_0}{N_c} \quad (14)$$

Kur

q_c – kūginis stipris, kN/m²

σ_0 – suminis horizontalus, vertikalus ar vidutinis įtempis, kN/m²

N_c – empirinis kūgio koeficientas

Išvestos teorinės lygtys parodė, kad galima rasti patikimą koreliaciją tarp nedrenuoto kerpamojo stiprio ir kūginio stiprio, jeigu atsižvelgiama į esamą įtempių būseną in-situ sąlygomis. Šios išraiškos tapo teoriniu pagrindu vėlesnėms empirinėms arba pusiau empirinėms priklausomybėms, kurios dažniausiai išreiškiamos ta pačia lygčių forma. Tačiau siekiant atskirti jas nuo teorinių sprendimų, empirinis kūgio koeficientas žymimas simboliu N_k (15).

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (15)$$

Kur

N_k – empirinis kūgio koeficientas

σ_{v0} – vertikalus slėgis, kN/m²

Atlikus daug tyrimų nustatytos tipinės kūgio koeficiento N_k reikšmės skirtingiems grunto tipams. Lunne ir Kleven, 1982 nustatė, kad N_k vertė normaliai konsoliduotiems Skandinavijos jūriniams moliams, naudojant lauko sparnuotės bandymą kaip atskaitos metodą, svyravo nuo 11 iki 19, o vidutinė reikšmė buvo 15. Jörss (1998) atlikęs bandymus rekomenduoja naudoti $N_k = 20$ jūriniams, o $N_k = 15$ – ledyninės kilmės moliams. Gebreselassie (2003) pagal apibendrinto tyrimus Vokietijoje ir pateikė, kad N_k faktoriaus vertė gali variuoti nuo 7,6 iki 28,4 priklausomai nuo grunto tipo.

Minėta formulė buvo šiek tiek modifikuota ir performuluota, naudojant kūgio spraudos vertes q_t , koreguotas pagal porinio slėgio poveikį, kai CPTU bandymų taikymas tapo plačiau paplitęs (16).

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (16)$$

q_t – koreguotas kūginis stipris, kN/m²

N_{kt} – koreguoto kūginio stiprio koeficientas

Koreguoto kūginio stiprio naudojimas ypatingai svarbus, kai dirbama su minkštais moliais, kadangi porinis slėgis gali būti savo verte beveik lygus kūginiam stipriui, todėl skirtumas tarp q_c ir q_t tokiu atveju gali būti reikšmingas.

Nkt reikšmės, panašiai kaip ir N_k , gali labai skirtis – nuo 4 iki 20. Straipsniuose nurodoma, kad kūgio koeficientas gali būti tam tikrų grunto savybių – plastiškumo indekso, perkonsolidavimo santykio, porinio slėgio – funkcija. Tačiau vėlesni tyrimai tokio ryšio nepatvirtino. Todėl gana sudėtinga apibrėžti vieną grunto savybę, kuri lemtų reikšmę, tikėtina dėl to, kad šiam koeficientui įtakos turi daugybė veiksnių.

Kitas metodas, kuriuo galima apskaičiuoti nedrenuotą kerpamąjį stiprį, yra panaudojant efektyvų kūginį stiprį (17) $q_E = q_t - u_2$.

$$c_u = \frac{q_E}{N_{ke}} = \frac{q_t - u_2}{N_{ke}} \quad (17)$$

Kur

q_E – efektyvusis kūginis stipris, kN/m²

N_{ke} – efektyvaus kūginio stiprio koeficientas

u_2 – išmatuotas porinis slėgis, kN/m²

Efektyvus kūginis stipris sėkmingai taikomas ir kitose geotechnikos srityse, tokiose kaip grunto klasifikavimas (Eslami ir Fellenius, 1997) bei polių laikomosios galios prognozavimas (Mahler, 2007). Tai rodo, kad esti gera koreliacija tarp šios savybės ir nedrenuoto kerpamojo stiprio.

Minkštų molių atveju išmatuotos q_c vertės yra santykinai mažos, todėl net ir nedidelės paklaidos gali reikšmingai paveikti rezultatus. Dėl šios priežasties labai minkštiems moliams patikimesnei koreliacijai nustatyti geriau naudoti perteklinį porinį vandens slėgį (18).

$$c_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} = \frac{u_z - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (18)$$

Kur

$N_{\Delta u}$ – porinio slėgio pokyčio kūginio stiprio koeficientas

Δu – porinio slėgio pokytis, kN/m^2

u_0 – in-situ porinis slėgis, kN/m^2

Lunne ir kt., 1986 straipsnyje nustatė, kad kūgio koeficientai šiuo atveju svyruoja nuo 4 iki 10, o Abbaszadeh, 2016 pastebėjo, jog $N_{\Delta u}$ reikšmės yra tarp 6 ir 8. Naujausiuose tyrimuose pateikiami panašūs rezultatai – $N_{\Delta u}$ santykis svyruoja nuo 4 iki 9 (Hong ir kt., 2010). Nustatyta, kad $N_{\Delta u}$ gerai koreliuoja su porinio slėgio santykiu B_q . Tai reiškia, kad kūgio koeficientą $N_{\Delta u}$ galima tiksliau prognozuoti, o tai leidžia tiksliau įvertinti nedrenuotą kerpamąjį stiprį.

1.3.2 Išskaičiavimas iš sekliosios seismikos metodu gaunamo skersinės bangos greičio V_s , m/s

Skersinės bangos greitis yra naudingas rodiklis tiriant gruntų fizines savybes. Seisminės bangos sklidimas reaguoja tik į grunto skeleto standumą, o jos greitis priklauso nuo efektyviojo įtempio ir grunto tankio. Todėl skersinės bangos greičiui daugiausiai įtakos turi poringumo koeficientas e – mažėjant poringumo koeficientui, skersinės bangos greitis didėja, nes tuo pačiu didėja medžiagos tankis bei efektyvusis įtempis (Santamarina ir kt., 2001).

Naudojant šias savybes, skersinės bangos greičio metodą galima taikomas minkštų molių konsolidacijos laipsniui įvertinti, taip pat grunto atsparumui praskydimui vertinti (Andrus ir Stokoe, 2000).

Blake ir Gilbert (1977) bandė nustatyti galimus ryšius tarp nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u ir skersinės bangos greičio V_s normaliai konsoliduotiems moliams, remdamiesi statistine analize. Chang ir Cho (2010) vėlesniais tyrimais nustatė koreliaciją tarp šių dviejų parametrų po gausesnių laboratorinių bandymų.

Oh ir kt. (2017) nustatė stiprius koreliacinius ryšius tarp nedrenuoto kerpamojo stiprio ir skersinės bangos greičio. Svarbi savybė, lėmusi koreliaciją, buvo poringumo koeficientas.

Skersinių bangų greitis gali būti siejamas su poringumo koeficientu per efektyviuosius įtempius. Pagal konsolidacijos teoriją žinoma, kad didėjant efektyviajam įtempiui, poringumo koeficientas mažėja. Skersinės bangos sklidimo greitis taip pat didėja, didėjant efektyviajam įtempiui.

Jeigu laikoma, kad šoninė deformacija yra lygi nuliui – taikoma vienmatė gniuždymo sąlyga, tuomet grunto skersinių bangų greitį galima išreikšti per vertikalųjį efektyvųjį įtempį, kaip siūlė Hardin ir Richart (1963) (19):

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_v}{p_r} \right)^\beta \quad (19)$$

Kur

V_s – skersinės bangos greitis, m/s

α – empirinė konstanta, m/s

β – empiriškai nustatytas eksponentas, kuris priklauso nuo grunto skeleto kontakto

P_r - referencinis slėgis, kN/m²

σ' – efektyvus įtempis, kN/m²

Santamarina ir kt. (2001) tyrė, kaip α ir β koeficientai koreliuoja su medžiagomis, kurios susideda iš sąlyginai stambių dalelių. Į šią grupę pateko ir gruntai. Jie nustatė, kad moliams, pasižymintiems didelio plastiškumo indeksu, būdingas didesnis β laipsnio rodiklis ir mažesnė α reikšmė lyginant su smėlingais gruntais.

Ohta ir Goto (1978) nurodo, kad skersinės bangos greitis ir nedrenuotas kerpamasis stipris susijęs per poringumą. Atlikę laboratorinius tyrimus pateikia formulę, kuria ir galima apskaičiuoti c_u (20):

$$c_u = c_1 \times \frac{A}{\beta} \log \left(\frac{V_s}{\alpha} \right) - c_1 \times e_r + c_2 \quad (20)$$

Kur

c_u – nedrenuotas kerpamasis stipris, kN/m²

c_1 – empirinė konstanta, kuri sumažina nedrenuoto kerpamojo stiprio vertę didėjant poringumo koeficientui

c_2 – empirinė konstanta, kuri apibūdina idealios medžiagos, turinčios poringumo koeficientą lygų nuliui, nedrenuotą kerpamąjį stiprį.

1.3.3 Išskaičiavimas iš sekliosios seismikos metodu gaunamo išilginės bangos greičio V_p , m/s

Sarkar ir kt., (2012) laboratoriniais tyrimais nustatė empirinį ryšį tarp išilginės greičio V_p ir nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u gruntuose. Kiekvienas mėginys tirtas laboratorijoje, taikant, siekiant nustatyti grunto tankį, vienašį gniuždomąjį stiprį ir išilginės bangos greitį. Išilginės bangos greitis buvo nustatytas naudojant ultragarso impulsų perdavimo metodą, o kiti rodikliai įvertinti taikant įprastus bandymus. Gavus rezultatus atlikta statistinė analizė, kurių tikslas - nustatyti ir įvertinti koreliacijas tarp P bangos greičio ir kitų matuotų savybių. Sudarytos empirinės lygtys leidžia prognozuoti tankį ir c_u . Koreliacijų patikimumas įvertintas naudojant statistinius testus – Stjudento t testas ir F testas.

Nustatyta, kad tarp tirtų savybių egzistuoja stiprūs linijiniai ryšiai, leidžiantys teigti, jog šis metodas gali būti patikima alternatyva laboratoriniams metodams.

Sarkar ir kt., (2012) pateikta lygtis (21):

$$c_u = 0,039 \times V_p - 50,01 \quad (21)$$

Kur

c_u – nedrenuotas kerpamasis stipris, kPa

V_p – išilginės bangos greitis, m/s

Inoue ir Ohomi (1981) tyrė kietesnius gruntus norėdami nustatyti sąsajas tarp vienašio gniuždomojo stiprio, išilginės bangos greičio ir tankio. Atlikę lauko ir laboratorinius tyrimus jie pateikė bendrą formulę (22)

$$c_u = k\rho V_p^2 + A \quad (22)$$

Kur

ρ – grunto tankis, g/cm³

V_p – išilginės bangos greitis, km/h

k ir A – empiriniai koeficientai

Vėlesniais metais Yasar ir Erdogan (2004) atliko vienašio gniuždomojo stiprio nustatymo bei ultragarsinius bandymus su įvairiais gruntais iš Ankaros apylinkių ir nustatė, kad vienašį gniuždomąjį stiprį bei šių gruntų tankį galima apskaičiuoti pagal jų išilginės bangos sklaidimo greitį, naudojant išvestas lygtis (23, 24).

$$V_p = 0,0317 \times c_u + 2,0195 \quad (23)$$

$$V_p = 0,0937 \times E_s + 1,7528 \quad (24)$$

Kur

E_s – statinis Jungo modulis, GPa

Kahraman (2001) pasiūlė dar vieną netiesinę lygtį, kuri gali leisti apskaičiuoti gruntų gniuždomąjį stiprį c_u (25):

$$c_u = 9,95 \times V_p^{1,21} \quad (25)$$

Galima matyti, kad skaičiavimas pagal išilginės bangos greitį yra sudėtingesnis lyginant su skersinės bangos greičiu.

2. SEISMINIŲ BANGŲ SKLIDIMO GRUNTE TEORINĖ APŽVALGA

2.1.1 Seisminių tyrimų istorija ir raida

Sekliųjų seisminių tyrimų ištakos siekia XX a. 4-ąjį dešimtmetį. Apie 1930 m. pradėti pirmieji nedidelių gylių seisminiai bandymai, taikant seisminės refrakcijos metodą. Šio laikotarpio tyrimuose nuo paviršiaus sukeltos seisminės bangos registruojamos keliose tolyn nuo šaltinio išdėstytose geofonų stotyse, o refrakcijos metodas leido apskaičiuoti negiliai esančių sluoksnių išilginės bangos sklidimo greičius bei įvertinti sluoksnių storį ir uolienu pasikeitimo gylį. Vis dėlto ankstyvaisiais metais refrakcijos metodų taikymas buvo ribotas – juos ribojo aukštos įrangos kainos ir menkos duomenų apdorojimo galimybės. Dėl šių priežasčių kiti seisminiai metodai, tokie kaip seisminio atspindžio ar paviršinių bangų technikos, tuo metu negalėjo įsitvirtinti ir plėtėsi gerokai lėčiau negu refrakcijos tyrimai. Refrakcijos metodas išliko vienas iš dažniausiai taikomų seklių tyrimų būdas, nes buvo gana paprastas ir galėjo būti atliekamas su to meto įranga.

Po Antrojo pasaulinio karo seisminės technikos sparčiai tobulėjo gilesnių Žemės gelmių žvalgymuose, ypač naftos pramonėje. Maždaug XX a. 6-ajame dešimtmetyje įsitvirtino bendrojo vidurio taško kaupimo principas – vadinamasis CMP (angl. Common Midpoint) seisminio atspindžio metodas. Ši technologija leido iš kelių skirtingų atstumų užregistruotų atspindžių taikyti normalizuoto poslinkio (NMO) pataisas ir juos sumuoti, tokiu būdu išryškinant silpnus atspindžius iš gilesnių sluoksnių. CMP metodas sėkmingai naudojamas naftos ir dujų žvalgyboje giliuose sluoksniuose, tačiau iki ~8-ojo dešimtmečio pabaigos jo pritaikymas sekliems seisminiams tyrimams buvo ribotas. Pagrindinės kliūtys – brangi daugiakanalė įranga bei didelių duomenų apdorojimo pajėgumų stygius. Analogišku laikotarpiu negiliuose tyrimuose toliau vyravo refrakcijos metodai, naudojami, inžineriniuose geologiniuose tyrimuose grunto kontakto su uoliena gyliui nustatyti. Seisminio atspindžio technika sekliems tikslams retai naudota dėl mažo dažnių ruožo – analoginės aparūros ribojo registruojamų signalų dažnį iki ~30–60 Hz – bei dėl intensyvaus paviršinių bangų trikdžio. Taigi iki skaitmeninės eros pradžios sekliųjų seisminių metodų raida vyko lėtai, apsiribojant paprastesnėmis refrakcijos technologijomis.

Nuo 9-ojo dešimtmečio prasidėjo skaitmeninės registravimo ir apdorojimo įrangos era, atnešusi esminį lūžį sekliųjų seisminių tyrimų plėtroje. Tobulėjant nešiojamiems daugiakanaliams seismografams ir atsiradus kompiuteriams, tapo įmanoma efektyviai registruoti ir apdoroti didelius duomenų kiekius lauko sąlygomis. Šis technologinis šuolis leido aukštos raiškos seisminio atspindžio metodams sparčiai išplisti negilių tyrimų srityje – dabar jau geologiniai sluoksniai iki ~30 m gylio galėjo būti sėkmingai tiriami atspindžio būdu. Šiuo laikotarpiu pritaikytas standartinis CMP metodas sekliems tyrimams, taip pat sukurtas specialiai negiliam žvalgymui pritaikytas mažesnių sąnaudų pastovaus šaltinio–imtuvo atstumo metodas (angl. Common-Offset, CO). CO metodu buvo siekiama supaprastinti duomenų rinkimą: naudojant fiksuotą optimizuotą šaltinio ir geofonų atstumą, profiliuojama vietovė gaunant vieno padengimo atspindžių seką. Nors CO metodas vėliau prarado populiarumą dėl sumažėjusios daugiakanalės įrangos kainos ir ribotų triukšmų slopinimo galimybių, 9–10 dešimtmečiais jis buvo svarbi ekonomiškai alternatyva mažo gylio seisminiams tyrimams.

Seisminės bangos atsiranda dėl natūralių reiškinių, tokių kaip žemės drebėjimai, vėjo poveikis reljefui ar augmenijai, vandenyno bangos arba ciklonai, taip pat dėl žmogaus veiklos – sproginų, besisukančių ar vibruojančių mechanizmų bei transporto. Seisminės bangos skirstomos į dvi pagrindines rūšis: tūrinės bangos – išilginės bei skersinės – ir paviršinės bangos – Relėjaus ir Lovo bangos. Tūrinės bangos sklinda visomis kryptimis nuo šaltinio ir keliauja Žemės gelmėse, tuo tarpu

paviršinės bangos juda beveik lygiagrečiai Žemės paviršiui ir tiesiogiai neįsiskverbia į gilesnius sluoksnius. Seisminės bangos yra labai naudingos tiek geofizikams, tiek projektuotojams, nes jos perduoda vertingą informaciją apie grunto savybes. Geofizikai jau seniai naudoja šias bangas Žemės mantijos tyrimams, o pastaraisiais dešimtmečiais seisminių bangų analizė tapo svarbi ir geotechnikams – tiek aikštelių tyrimams vietoje, tiek laboratoriniams gruntų savybių nustatymams.

Aikštelės charakterizavimas apima grunto sluoksnių išsidėstymo ir savybių įvertinimą. Vis dažniau tokiuose tyrimuose taikomi geofiziniai metodai. Dauguma šių metodų remiasi seisminių bangų naudojimu. Augant statybos ir infrastruktūros plėtros tempams, didėja poreikis greitam, tiksliam ir ekonomiškam aikštelių tyrimui. Didžiausias geofizinių metodų pranašumas – jie leidžia neinvaziniu, greitu ir ekonomišku būdu nustatyti grunto savybes ir apimti dideles tiriamas teritorijas.

Inžinerinėje geologijoje geofiziniai bandymai ypač vertingi tuo, kad leidžia tirti gruntą in situ nepažeidžiant struktūros. Paprastai lauko geofizinius tyrimus galima suskirstyti į dvi grupes: paviršinius metodus – refrakcija, refleksija, paviršinių bangų analizė – ir giluminius metodus – kai seisminis šaltinis yra ant žemės paviršiaus, o matavimo prietaisas gręžinyje arba kai seisminis šaltinis yra gręžinyje, o matavimo prietaisas yra ant žemės paviršiaus, sekliosios seismikos bandymas tarp gręžinių, statinio zondavimo metodą su seisminių bangų matavimu. Paviršiniai metodai yra neinvaziniai, jų atlikimui nereikia gręžti gręžinių.

Tolesniuose skyriuose bus aptariamos seisminės bangos ir jų savybės.

2.1.2 Tūrinių bangų apžvalga

Išilginė banga (P-banga ar kompresinė banga) sukuria kintantį susispaudimą ir išsiplėtimą (dilataciją) sklidimo kryptimi. Skersinė banga (S-banga ar šlyties banga) apibūdinama kaip sinusoidinės šlyties deformacijos statmenos bangos sklidimui. Išilginė banga sukelia elementų judėjimą bangos sklidimo kryptimi, skersinė banga sukelia elementų judėjimą, kuris yra statmenas bangos kryptčiai. Jei skersinė banga sklinda horizontaliai, jos skersinis judėjimas gali būti išskaidytas į horizontalų S_{hh} ir vertikalų S_{hv} komponentus. Tai ypatingai svarbu, jei skersinė banga sklinda anizotropinėje terpėje, nes horizontalus ir vertikalus komponentai bus skirtingi.

Azimian ir kt. (2014) pateikė išilginės bangos sklidimo greičio V_p formulę (26):

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{\rho \times (1 - 2\nu) \times (1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \times M} \quad (26)$$

Kur

V_p – išilginės bangos greitis, m/s

ρ – grunto tankis, g/cm³

μ, λ – Lamo konstantos, apibūdinančios grunto elastingumą

E – Jungo modulis, GPa

ν – Puasono koeficientas, [-]

M – spūdos modulis, kN/m²

Tas pats tyrėjas pateikia ir skersinės bangos sklidimo greičio V_s apskaičiavimo formulę (27):

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho \times 2 \times (1 + \nu)}} \quad (27)$$

Išilginės ir skersinės bangų greičiai yra susieti Puasono santykiu ν (28, 29). Tai yra skersinių ir išilginių deformacijų santykis. Jungo modulis E yra išreikštas kaip išilginės ir skersinės bangų santykis $(\frac{V_p}{V_s})$ (30):

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2 \times (1 - \nu)}{1 - 2 \times \nu}} \quad (28)$$

Arba

$$\nu = \frac{(\frac{V_p}{V_s})^2 - 2}{2 \times [(\frac{V_p}{V_s}) - 1]} \quad (29)$$

Kur

$$E = V_s^2 \times \rho \times \frac{3 \times (\frac{V_p}{V_s})^2 - 4}{(\frac{V_p}{V_s})^2 - 1} \quad (30)$$

Dinaminis šlyties modulis G dažnai naudojamas geotechnikoje kaip maksimalus šlyties modulis $G_{max} = \rho \times V_s^2$. Šis modulis įgauna didžiausią vertę, kai įtempiai yra itin maži. Didėjant įtempiams modulio vertė mažėja. Šlyties modulis yra pastovus, kai šlyties deformacijos mažesnės nei $10^{-3}\%$.

2.1.3 Paviršinių bangų teorinė samprata

Paskutinės duomenų rinkimo prietaisą pasiekia paviršinės bangos. Šios bangos sklinda paviršiumi. Relėjaus bangos sklinda išilgai grunto paviršiumi ir apima išilginių ir skersinių bangų judesių derinį, kuris turi pasikartojančių fazių, kurios lemia regresuojantį elipsinį dalelių judėjimą. Šių bangų amplitudė rodo nuo bangos ilgio priklausomą dažnį (skirtingi dažniai sklinda skirtingu greičiu) ir eksponentinį mažėjimą didėjant gyliui. Relėjaus banga priklauso nuo elastinių grunto savybių ir jos greitis mažesnis nei skersinės bangos.

Liovo bangos sklinda paviršiniuose sluoksniuose, esančios virš pusiau apribotos erdvės, todėl dalelės juda skersai lygiagrečiai paviršiui. Dispersyvios Liovo bangos rodo greitį tarp paviršiuje sklindančios skersinės bangos greičio ir giliau sklindančios skersinės bangos greičio.

Bandymų metu gali susidaryti Stonelio, Šiolto ar Stonelio-Šiolto banga, kuri sklinda gręžinyje esančiu skysčiu. Ši banga sklinda mažesniu greičiu nei skersinė ar purvo bangos (angl. *mud wave*). Stonelio banga yra dispersyvi ir rodo nuo bangos dažnio priklausomą amplitudės mažėjimą didėjant gyliui. Bangos, pasižyminčios aukštesniais dažniais, rodo greitą amplitudės mažėjimą didėjant atstumui nuo gręžinio sienelės. Žemesniais dažniais pasižyminčios bangos, kai bangos ilgis panašus į gręžinio skersmenį, rodo mažą amplitudės mažėjimą didėjant atstumui nuo gręžinio sienelės. Esant pakankamai žemiems dažniams amplitudė gali išlikti pastovi, taip sukurdamą vamzdžio bangą (angl. *tube wave*).

2.1.4 Skersinės bangos, sklindančios grunte, skilimas

Skersinė banga, kurios sklidimo metu grunto dalelės juda statmenai bangos sklidimo kryptiai, yra jautrios terpės anizotropijai. Kai tokia banga sklinda per anizotropišką terpę – molingą gruntą, kurį sudaro kryptingai orientuoti molio mineralai – ji gali patirti bangos skilimą (angl. *shear wave splitting*). Kai šis reiškinys įvyksta, pradinė skersinė banga skyla į greitesniąją skersinę bangą (angl. *fast S-wave*) bei lėtesniąją skersinę bangą (angl. *slow S-wave*). Jos abi sklinda skirtingu greičiu.

Paprastai greitesnė banga yra lygiagreti didžiausio horizontalaus įtempio kryptiai (Park ir Ishii, 2018).

Poliarizacija suteikia naudingos informacijos apie gruntą – apie jo prisotinimą vandeniu ar anizotropijos laipsnį. Skilimas aprašomas skilimo kampų φ , kuris nurodo greičiau sklindančios bangos poliarizacijos kryptį, bei laiko skirtumu δt tarp greitesnės ir lėtesnės bangos atvykimo į matavimo prietaisą. Poliarizacijos laipsnis gali būti įvertintas 31 formule (Zhao ir kt., 2023):

$$\text{Anizotropijos stiprumas} = \frac{\delta t}{t} \quad (31)$$

Kur

δt – dviejų poliarizuotų bangų atvykimo laiko skirtumas, s

t – bendras skersinės bangos sklidimo laikas, s.

2.1.5 Seisminių bangų anizotropijos apžvalga

Medžiaga vadinama anizotropiška, jei viena ar daugiau jos savybių kinta priklausomai nuo krypties. Anizotropija skiriasi nuo heterogeniškumo tuo, kad anizotropija reiškia savybių reikšmių kitimą skirtingomis kryptimis viename taške, o heterogeniškumas – tai reikšmių skirtumai tarp dviejų ar daugiau taškų.

Istorinių tyrimų apžvalga

Anizotropijos reiškinys pirmą kartą buvo pripažintas XIX amžiuje, remiantis elastingųjų bangų sklidimo teorija. George'as Greenas 1838 metais bei lordas Kelvinas 1856 metais išleistuose straipsniuose apie bangų sklidimą atkreipė dėmesį į anizotropiją. Kitas garsus mokslininkas, geofizikas Maurycy Rudzki XIX a. pabaigoje į seismologiją įtraukė bangų anizotropiją. Nuo 1898 m. iki savo mirties 1916 m. Rudzki stengėsi plėtoti anizotropijos teoriją: 1898 m. mėginta nustatyti skersai izotropinės terpės bangos frontą, o 1912 ir 1913 m. rašė apie paviršines bangas skersai izotropinėje pusilnėje terpėje ir apie Fermat principą anizotropinėse terpėse.

Nepaisant visų šių pasiekimų, anizotropijos tyrimų vystymasis vis tiek vyko lėtai – per pirmuosius 30 metų (1920–1950) šia tema išleisti tik keli straipsniai. Vėliau daugiau darbų atliko keli mokslininkai – Helbig (1956 m.), kuris atlikdamas seisminius tyrimus devono skalūnuose pastebėjo, kad bangų sklidimo greitis sluoksniuotumo kryptimi buvo apie 20 % didesnis nei skersai sluoksniuotumui. Tačiau susidomėjimas anizotropija ženkliai išaugo, kai Crampin (1987 m.) pasiūlė naują modelį, paaiškinantį, kaip anizotropija gali susidaryti iš pradžių izotropinėje terpėje. Vienas pagrindinių Crampino teiginių buvo tas, kad trijų komponentų skersinių bangų poliarizacija suteikia unikalios informacijos apie uolienos vidinę struktūrą, per kurią jos sklinda, o skersinių bangų skilimas gali atskleisti duomenis apie plyšių orientacijų pasiskirstymą.

Pastaraisiais metais bangų anizotropija tapo vienu iš dažniausiai tiriamų objektų seismikoje. Zhang ir kt. (2023) tyrė koks yra grunto anizotropijos poveikis kasinėjimų metu atsirandantiems efektams. Wei ir kt. (2023) nagrinėjo anizotropijos įtaką tunelių ir kitų požeminių statinių projektavimui ir statybai. Perić ir kt. (2017) vertino grunto anizotropijos poveikį polinių pamatų projektavimui. Šiame tyrime nustatyta, kad gruntas prie itin mažų deformacijų pasižymi anizotropinėmis savybėmis. Bentil ir kt. (2023) analizavo itin mažų deformacijų šlyties modulio G_{max} anizotropiją panaudodamas Benderio elemento bandymą. Tačiau net ir atlikus daugybę bandymų

grunto anizotropija vistiek lieka viena iš svarbiausių temų tarp tyrėjų dėl sudėtingumo – tiek tiriant pačią anizotropiją, tiek seismines apkrovas ir jų tarpusavio sąveiką.

Grunto dinaminio modelių aprašymas

Informacija apie grunto anizotropiją taikoma sudarant grunto dinaminio modelius. Dinaminiai grunto modeliai, pagal įtempių perdavimą ir dalelių tarpusavio sąveiką, gali būti suskirstyti į suminio įtempio bei efektyvaus įtempio modelius (Wang ir kt., 2024). Efektyvaus įtempio modelis pasižymi geresnėmis galimybėmis sprendžiant praskydimo problemą. Tačiau, jei problema susijusi su seisiniu grunto atsaku, tyrėjai dažniausiai analizėje taiko suminio įtempio metodą – tai gali būti elastingą – plastinį modelį, nelineinį modelį arba ekvivalentiškai linijinį modelį (Schnabel P. B (1972), Chen ir kt., (2021), Markham ir kt., (2016)). Tradiciniai elastoplastiniai modeliai, tokie kaip Moro – Kulono ar Druckerio – Pragerio modeliai, gali būti siejami su ribine medžiagos paviršiaus sąsajos teorija ar kinematinio kietėjimo teorija, siekiant nustatyti ciklinės apkrovos poveikį gruntui. Nors elastoplastinių modelių teorija veiksmingai aprašo grunto histerezės savybes ir nelineiškumą, dėl skaičiavimų sudėtingumo ir didelės darbo apimtys ji tampa nepraktiška taikyti inžinerinėje veikloje. Todėl tyrėjai naudoja nelineinius modelius, pagrįstus Masingo kriterijais, siekdami pavaizduoti grunto nelineiškumą ir histerezės savybes. Nors šie nelineiniai modeliai supaprastina elastoplastiniams modeliams būdingą darbo kiekį, jie vis tiek išlieka pakankamai sudėtingi (Elbadawy ir kt., 2022). Pereinant prie linijinio modelio, jis pasižymi nedideliu sudėtingumu, leidžiančiu atsižvelgti į grunto nelineiškumą ir histerezės savybes taikant ekvivalentiškumo teoriją. Todėl šiuo metu plačiausiai taikomas metodas yra ekvivalentiškai linijinis modelis, kuris išsivystė iš linijinių modelių.

Pastebimi anizotropijos efektai grunte

Įprastai anizotropinės medžiagos žymėjimo sistema numato, kad y ašis (vertikali kryptis) žymi anizotropijos kryptį, o x , z plokštuma yra izotropijos plokštuma. Tai reiškia, kad medžiagos savybės yra vienodos x ir z kryptimis (plokštumoje), tačiau skiriasi y kryptimi – statmenai tai plokštumai. Todėl anizotropinės medžiagos įtempių–deformacijų prieaugių lygtis gali būti išreiškiama matricos pavidalu (32):

$$\begin{pmatrix} \delta \varepsilon_x \\ \delta \varepsilon_y \\ \delta \varepsilon_z \\ \delta \gamma_{xy} \\ \delta \gamma_{yz} \\ \delta \gamma_{zx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & \frac{1}{E_v} & -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & \frac{1}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hh}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \sigma_x \\ \delta \sigma_y \\ \delta \sigma_z \\ \delta \sigma_{xy} \\ \delta \sigma_{yz} \\ \delta \sigma_{zx} \end{pmatrix} \quad (32)$$

Kur

E_v ir E_h – Jungo modulis vertikalia ir horizontalia kryptimi

ν_{hh} ir ν_{vh} – Puasono koeficientas horizontaliems įtempiams, kai gruntas apkraunamas horizontalia ir vertikalia kryptimi.

ν_{hv} – Puasono koeficientas vertikaliems įtempiams, kai gruntas apkraunamas horizontaliai.

G_{vh} ir G_{hv} – šlyties modulis vertikalioje plokštumoje

G_{hh} – šlyties modulis horizontalioje plokštumoje

Anizotropijos santykiai AR_G ir AR_E , skirti šlyties moduliui bei Jungo moduliui, gali būti apskaičiuoti pagal 33 ir 34 formules:

$$AR_G = \frac{G_{hh}}{G_{vh}} \quad (33)$$

$$AR_E = \frac{E_h}{E_v} \quad (34)$$

Šie santykiai padeda įvertinti grunto anizotropijos lygį pagal elastingumo parametrus.

Kai vyrauja nedrenuotos sąlygos, Puasono santykiai tarp deformacijų kypčių turi atitikti fizinius apribojimus dėl grunto tūrio nekintamumo (35) (Teng ir kt., 2014):

$$\nu_{vh} = 0,5 \text{ ir } \nu_{hh} + \nu_{hv} = 1 \quad (35)$$

Kur

$\nu_{vh} = 0,5$ – Puasono koeficientas, kai gruntas spaudžiamas vertikalia kryptimi, todėl jis plečiasi horizontalioje ašyje taip, kad bendras tūris nepasikeitų. Tai yra įprasta sąlyga vandeniui prisotintame grunte, kuriame vanduo negali pasišalinti iš porų.

$\nu_{hh} + \nu_{hv} = 1$ – simetrijos ir energijos išsaugojimo sąlyga, būdinga izotropinėms medžiagoms nedrenuotomis sąlygomis.

Nurodyti Puasono koeficientai gali būti apskaičiuoti pagal sekančias lygtis (36, 37, 38, 39):

$$\nu_{hh} = 1 - \nu_{hv} = 1 - AR_E \times \nu_{vh} \quad (36)$$

$$\nu_{hv} = \frac{E_h}{E_v} \times \nu_{vh} = AR_E \times \nu_{vh} \quad (37)$$

$$G_{hh} = \frac{AR_E \times E_v}{2(2 - AR_E \times \nu_{vh})} \quad (38)$$

$$G_{vh} = G_{hv} = \frac{1}{AR_G} \frac{AR_E \times E_v}{2(2 - AR_E \times \nu_{vh})} \quad (39)$$

Visi anizotropijos atvejai lemia nuo krypties priklausomus seisminių bangų greičius ir modulius. Taikoma apkrova gali pakeisti izotropinę terpę į anizotropinę.

Schnaid F. (2005) mini molio mineralus ir jų ypatumus, turinčius įtakos elastingumui grunto savybėms ir anizotropijai:

- Molio pasiskirstymas – struktūrinis, laminuotas, dispersinis
- Didelė molio mineralų įvairovė
- Molio mineralų vidinės anizotropinės savybės
- Cheminė ir fizinė sąveika tarp molio ir skysčių
- Sutankinimo efektas

2.1.6 Grunto fizikinių savybių įtaka seisminių bangų greičiams

Seisminių bangų greičiams grunte įtaką daro didelis geologinės sluoksnių kintamumas:

1. Litologija, mineralogija

Grunto mineraloginė sudėtis ir struktūra lemia jos tūrinį modulį, šlyties modulį ir tankį – šie parametrai apibrėžia išilginės ir skersinės bangų greičius (Paoletti, V., 2012). Įprastai, magminės ir metamorfinės uolienos pasižymi didesniais seisminių bangų greičiais, lyginant su nuosėdinėmis uolienomis ir gruntais. Kuo gruntai mažiau konsoliduoti, tuo mažesniais greičiais pasižymi. Minėtos uolienos deformuojasi esant itin dideliam slėgiui ir įtempiams, todėl joms būdingi didesni tūriniai ir šlyties moduliai (Paoletti, V., 2012). Smiltainiuose ir gruntuose sutinkami molio mineralai labiausiai lemia bangų greičių sumažėjimą. Didėjant smulkių dalelių kiekiui, sumažėja ir šlyties modulio vertė (Mews ir kt., 2024).

2. Tankis

Grunto tankis lemia seisminių bangų greitį. Didėjant jo vertei, auga ir bangų greitis. Tankio svyravimai atsiranda dėl didelių įtempių, poringumo ir mineralogijos (Leong ir Cheng, 2016).

3. Grunto poringumas

Poringumas rodo atvirkštinį proporcingumą išilginei bangai V_p . Porų gausa grunte mažina išilginės bangos greitį (Hardin ir Drnevich, 1972). Didelis slėgis ir molio kiekis lemia poringumo pasiskirstymo netiesiškumą. Molio kiekio didėjimas sumažina išilginės bangos greitį dėl poringumo. Dideliu poringumu pasižyminčiame grunte išilginės bangos greitis yra labiau priklausomas nuo prisotinimo vandeniu laipsnio lyginant su mažą poringumą turinčiu gruntu (Mews ir kt., 2024).

4. Grunto drėgnis

Vanduo grunte nepalaiko skersinės bangos sklidimo, jų šlyties modulis $G = 0$. Poras užpildančio vandens įtaka priklauso nuo vandens tankio. Vandenyje sklindančios bangos greitis ir suspaudžiamumas priklauso nuo cheminės sudėties, slėgio ir temperatūros (Park ir Kim, 2023). Vanduo turi įtakos ir pačių porų savybėms bei veikti dalelių kontaktus.

Skirtumas tarp išilginės bangos greičio sausame ir prisotintame grunte didėja, didėjant poringumui. Iš dalies prisotintame grunte elastingumas priklauso nuo tamprų grunto savybių ir vandens tankio bei ribinių jėgų poveikio (Park ir Kim, 2023). Nevienodas prisotinimo vandeniu laipsnio pasiskirstymas gali lemti tai, kad žemais dažniais pasižyminčios išilginės bangos gali paskatinti porų drenavimąsi bei sumažinti seisminės bangos greitį (Park ir Kim, 2023). Esant seisminėms bangos, turinčioms aukštus dažnius, vandens relaksacijos laikas yra didelis, artėja prie seisminių bangų periodo, todėl drenavimasis nevyks, kas lems didesnę išilginės bangos greitį V_p .

5. Geostatinis slėgis

Seisminių bangų greitis yra efektyvaus įtempio funkcija. Įprastai, didėjant slėgiui, didėja ir seisminių bangų greičiai (Clariá ir Rinaldi, 2007). Bangų greičiai didėja dėl mažėjančio poringumo bei didėjančio kontaktų tarp gruntą sudarančių dalelių kiekio.

Pagrindiniai veiksniai, lemiantys įtempių pasiskirstymo kaitą geotechnikoje, yra pagrindo apkrovimas (statiniai) bei pagrindo nukrovimas (iškasa). Iškasos sumažina išilginės bangos greitį dėl radialinio įtempio išsiskyrimo (Clariá ir Rinaldi, 2007).

Didėjant efektyviam įtempiui, poringumas mažėja ir tūrinis modulis K padidėja labiau nei šlyties modulis G . Padidėja ir Puasono koeficientas. Šis poveikis pastebimas ir yra didesnis sausesniuose gruntuose nei pilnai prisotintuose vandenių gruntuose.

6. Temperatūra

Dėl ledo susidarymo pilnai prisotintuose vandenių gruntuose seisminių bangų greitis gali padidėti 20-50% lyginant su įprasta grunto temperatūra (Zimmerman ir King, 1986). Mažėjant prisotinimo vandenių laipsniui, poveikis bangų greičiams irgi mažėja. Įdomu tai, kad mažiausios poros užšąla vėliausiai dėl mažiau palankaus ploto/tūrio santykio.

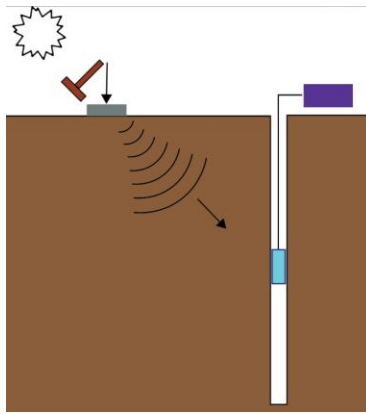
2.2 Kiti geofiziniai metodai, skirti nustatyti seisminių bangų greičius

Geofiziniai metodai gali būti skirstomi į tris kategorijas: invazinius, neinvazinius bei laboratorinius. Invaziniams metodams būtinas gręžimas į gruntą. Prie dažniausiai taikomų invazinių metodų priskiriami: bandymas gręžinyje (*angl. downhole arba uphole*), bandymas tarp gręžinių (*angl. crosshole*), seisminis dilatometro bandymas (SDMT) ir seisminis statinis zondavimas (SCPT). Neinvaziniams metodams nereikia atlikti gręžimo, dažniausiai bangos matuojamos žemės paviršiuje išdėliojant geofonus. Laboratoriniams metodams dažniausiai reikalingas nesuardytos sandaros grunto bandinys, todėl šių metodų grupė labiau priskiriama prie invazinių metodų. Skirtumas čia yra tas, kad bandymai atliekami laboratorijoje su paruoštu bandiniu. Toliau bus aptarti geofiziniai metodai.

Invaziniai metodai:

1. Bandymas gręžinyje

Bandymas gręžinyje, kai seisminis šaltinis yra žemės paviršiuje, o matavimo prietaisas – gręžinyje, yra vienas iš plačiausiai naudojamų ir patikimiausių invazinių geofizinių tyrimo būdų, skirtų skersinės ir išilginės bangos greičiui grunte nustatyti (7 pav.). Tyrimas atliekamas gręžinyje, į kurį nuleidžiamas trijų komponentų geofonas, fiksuojantis bangų atvykimo laiką skirtinguose gyliuose (Hardee ir kt., 1987). Bandymas gręžinyje gali būti atliekamas ir priešingu būdu – kai bangų šaltinis yra gręžinyje, o matavimo prietaisas – žemės paviršiuje. Žemės paviršiuje, šalia gręžinio, sukuriamas seisminis impulsas – dažniausiai naudojant kūjį ir plieninę plokštę ar kitą specialų smūginį įrenginį. Bangų greitis apskaičiuojamas pagal atvykimo laiko ir atstumo skirtumus tarp jutiklių padėčių. Šis metodas leidžia gauti intervalinius V_s ir V_p greičius, kurie yra be galo svarbūs vertinant grunto dinamines savybes ar projektuojant inžinerinius statinius (Hardee ir kt., 1987). Vienas iš pagrindinių metodo privalumų – tai, kad greičiai nustatomi realiomis sąlygomis (in situ), o rezultatai pasižymi dideliu tikslumu. Be to, šiuo metodu galima tirti skersinės bangos anizotropiją gruntuose. Tokia anizotropija atsiranda dėl grunto sudarančių dalelių orientacijos formavimosi metu arba dėl veikiančių įtempių.



7 pav. Bandymo gręžinyje schema, kai seisminis šaltinis paviršiuje, o matavimo prietaisas – gręžinyje

2. Bandymas tarp gręžinių

Bandymas tarp gręžinių leidžia tiesiogiai išmatuoti išilginės bangos arba skersinės bangos greitį gręžiniuose, kurie įrengiami grunte (8 pav.). Tam tikruose pasirinktuose gyliuose į gręžinį nuleidžiamas seisminis šaltinis, kuris generuoja seisminę bangą. Jutikliai kituose, lygiagrečiuose gręžiniuose fiksuoja bangų atvykimą. Rekomenduojamas atstumas tarp gręžinių šiame bandyme yra 3–6 metrai (Butler ir Curro, 1981). Atstumas tarp gręžinių konkrečiame gylyje nustatomas naudojant gręžinio nuokrypio matavimus, kad būtų užtikrintas tikslumas. Seisminis šaltinis gręžinyje prijungiamas prie duomenų registravimo sistemos, kuri fiksuoja jutiklių atsaką ir registruoja bangų sklaidimo laiką nuo šaltinio iki imtuvų.

Seisminių bangų greitis apskaičiuojamas pagal 40 formulę (Butler ir Curro, 1981):

$$V = \frac{d}{\Delta t} \quad (40)$$

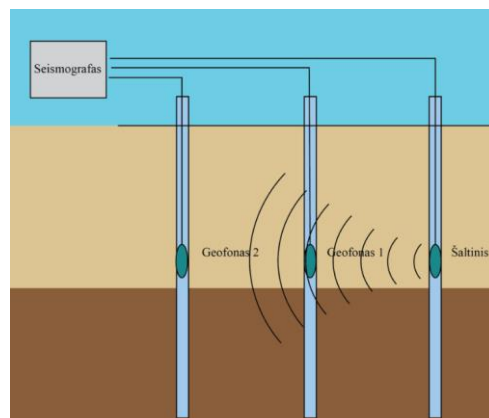
Kur

V – skersinės arba išilginės bangos greitis, m/s

D – atstumas tarp šaltinio ir imtuvo, m

Δt – bangos sklaidimo laikas, s

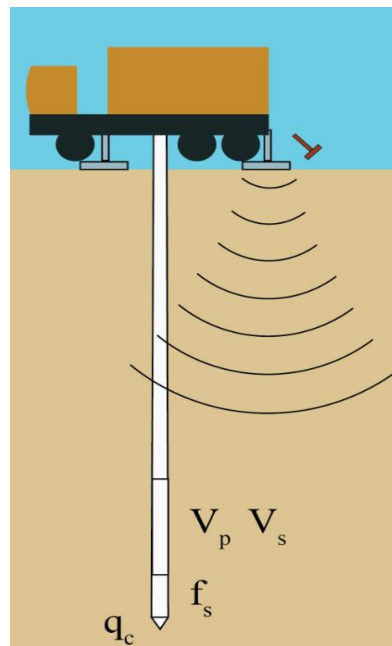
Šis seisminis metodas yra tinkamas tirti homogenišką grunto stovymę, kurioje gruntas tarp gręžinių yra pastovus arba kiek įmanoma panašesnis. Pagrindinis trūkumas – reikalingi keli gręžiniai, kurių įrengimas reiklus laikui ir lėšoms.



8 pav. Seisminio bandymo tarp gręžinių schema

3. Seisminis statinis zondavimas (SCPT)

Statinis zondavimas (CPT) yra vienas iš populiariausių in situ metodų geotechniniams tyrimams. Campanella ir Robertson (1984) pirmieji panaudojo šį metodą skersinės bangos greičiui matuoti, įrengdami horizontalų seisminį daviklį už kūgio viršūnės (9 pav.). Poliarizuotas skersines bangas sukuriantis šaltinis įrengiamas žemės paviršiuje. Seisminis kūgis spaudžiamas į gruntą kas 0,5 arba 1 metrą, o skersinės bangos greitis nustatomas pagal atvykimo laiko skirtumus tarp signalų. Gauta informacija gali būti naudojama įvertinant ar koreguojant skirtingos litologinės sudėties gruntų storį ar gylį. Metodo privalumas – visada išlaikomas geras kontaktas tarp grunto ir zondo, tokiu būdu užtikrinama gera duomenų kokybė. Tačiau yra iš trūkumų. Pagrindinis – statinio zondavimo bandymas apribojamas itin kietų (stiprių, tankių) gruntų, į kuriuos per stipriai įsirėmus galima nulaužti zondą.



9 pav. Seisminio statinio zondavimo schema

4. Seisminis dilatometras (SDMT)

Seisminis dilatometro bandymas (SDMT) yra standartinio Marchetti dilatometro (DMT) ir seisminio modulio derinys, skirtas skersinės bangos greičiui V_s matuoti in situ sąlygomis. Šis metodas yra panašus į seisminio statinio zondavimo bandymą (SCPT) (10 pav.). SDMT pirmą kartą pristatė britų mokslininkas P. Hepton 1988 metais, o vėliau jis buvo patobulintas Džordžijos Tech universitete, JAV (Martin ir Mayne, 1998). Neseniai Italijoje sukurtas naujas SDMT sistemos variantas su seisminiu moduliu. Seisminis modulis – tai cilindrinis elementas, esantis virš dilatometro mentės, kuriame yra du horizontalūs imtuvai, nutolę vienas nuo kito 0,5 m atstumu. Signalas sustiprinamas ir skaitmeniniu būdu apdorojamas tyrimo gylyje. Naudojant tikrojo intervalinio matavimo konfigūraciją su dviem imtuvais, išvengiama netikslumų, kylančių dėl pradinio laiko nustatymo, kuris dažnai pasitaiko pseudo-intervalinėse sistemose su vienu jutikliu (Mayne P. W., 2001). Be to, du seisminiai įrašai, gauti tuo pačiu gyliu iš to paties smūgio, leidžia užtikrinti didesnę matavimų tikslumą – skirtingai nei sistemose, kuriose naudojami skirtingi smūgiai, kurie gali būti nevienodi. Tokiu būdu V_s matavimų pakartojamumas žymiai pagerėja – įprasta V_s paklaida nesiekia 1–2 %.

Skersinės bangos greitis V_s apskaičiuojamas (41):

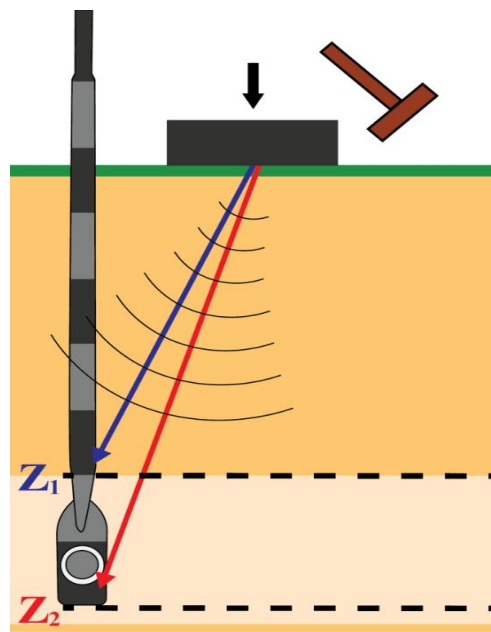
$$V_s = \frac{S_1 - S_2}{\Delta t} \quad (41)$$

Kur

S_1, S_2 – atstumas tarp jutiklių,

Δt – seisminės bangos pirmo pasirodymo laiko skirtumas

Matavimai atliekami kas 0,5 metro. Paviršiaus seisminės bangos šaltinis dažniausiai siekia 10 kg masę. Kūju horizontaliai smūgiuojama į plieninę stačiakampę plokštę, prispaustą prie grunto transporto priemonės svoriu. Plokštė orientuota taip, kad jos ilgoji ašis būtų lygiagreti jutiklių ašiai, užtikrinant maksimalų jautrumą sugeneruotoms skersinei bangai.



10 pav. Seisminio dilatometro schema

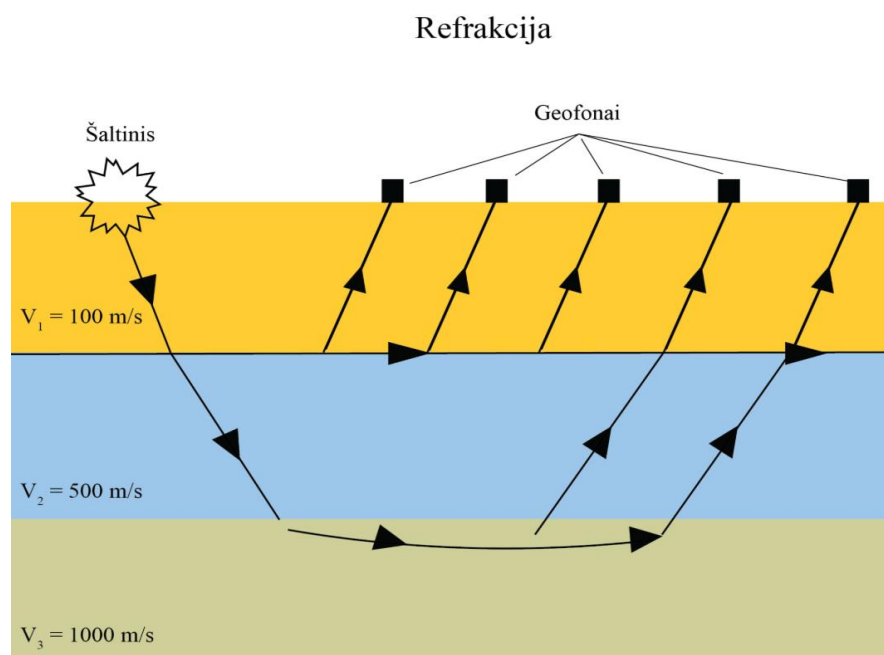
Neinvaziniai metodai:

Bandymai, naudojant paviršines bangas, gali būti skirstomi į dvi pagrindines kategorijas pagal bangų šaltinį: aktyvų ir pasyvų. Aktyvus šaltinis – tai dirbtinis sužadinimo šaltinis – kūjis ar vibratorius. Pasyvus šaltinis naudoja aplinkos seismines vibracijas. Vienas iš aktyvios paviršinių bangų metodikos variantų yra SASW (*angl. Spectral Analysis of Surface Waves*) metodas, kuris naudoja smūginį šaltinį – sunkų kūjį. Paprastai šiam metodui naudojami tik du geofonai, todėl bandymą dažnai reikia kartoti daug kartų, kad būtų surinktos skirtingo dažnio paviršinės bangos ir sumažintas atsitiktinių trikdžių poveikis. Kitas metodas – MASW (*angl. Multi-Channel Analysis of Surface Waves*) metodas buvo sukurtas siekiant pašalinti kai kuriuos SASW metodo trūkumus (Anderson ir kt., 2007). Pagrindinis skirtumas tarp MASW ir SASW yra naudojamų geofonų skaičius – MASW dažniausiai naudoja dvylika ar daugiau jutiklių. MASW metodu paviršinės bangos, sužadintos smūginiu šaltiniu, yra vienu metu registruojamos kelių geofonų. Tokiu būdu signalai gali būti analizuojami laike ir erdvėje, pasitelkiant dvigubą Furjė transformaciją.

Pereinant prie pasyvių metodų – CSW (*angl. Continuous Surface Wave*) metodas naudoja pastovaus veikimo vibratorių, kuris gali generuoti skirtingo dažnio paviršines bangas (Heymann G., 2007). Šio metodo pagrindinis privalumas – dažnio kontrolė ir didelė dažnio raiška. Tačiau tyrimo gylis šiuo metodu yra ribojamas naudojamo energijos šaltinio stiprumo.

Refrakcinis bangų metodas

Refrakcinis metodas, taikomas paviršiniam gruntų sluoksniui tirti (11 pav.) (tiek išilginėms, tiek skersinėms bangoms), yra plačiai aprašyti mokslinėje literatūroje. Skersinės bangos refrakciniame tyrime dažniausiai naudojami žemo dažnio – mažesni nei 14 Hz – horizontalūs geofonai, orientuoti statmenai tyrimo linijai (Aziman ir kt., 2016). Toks metodas vadinamas SH režimu. Kadangi vėjo ir aplinkos triukšmas patenka į dominančių dažnių diapazoną, būtina užtikrinti gerą jutiklių sąlytį su gruntu – tai galima pasiekti geofonus užkasant ar papildomai apkraunant. Geofonų grupės signalai yra registruojami seismografu, kuris leidžia skaitmeniniu būdu sujungti kelis smūgius ir keisti geofonų poliarizumą. Tipinis poliarizuotos skersinės bangos šaltinis, naudojamas šiuose tyrimuose, yra į gruntą įleistas plieninės sijos gabalas, į kurį iš abiejų pusių mušama įvairios masės kūju. Masė priklauso nuo norimo pasiekti gylio – įprastai ji siekia apie 7,5 kg. Tokiu būdu sukuriamas poliarizuotas SH banga. Šis šaltinis daugeliu atvejų yra pakankamas, kai atstumas tarp šaltinio ir geofono siekia iki 200 metrų. Norint pasiekti didesnę skverbimosi gylį, naudojamas gręžinyje sprogmuo. Nors tai yra taškinis impulsinis šaltinis, dažniausiai taikomas išilginėms bangoms, jis taip pat sukuria pakankamai energijos, kuri leidžia susidaryti skersinei bangai. Tačiau tokio tipo šaltinis nesuteikia galimybės kontroliuoti skersinės bangos poliarizavimo (Addo ir Robertson, 1992).



11 pav. Refrakcinio tyrimo schema

Skersinės bangos refrakcijos metodas suteikia galimybę neinvaziniu būdu nustatyti skersinės bangos greičio priklausomybę nuo gylio grunte. Šių metodų taikymui būdingas apribojimas – greitis turi didėti su gyliu. Vis dėlto daugeliu atvejų normaliai konsoliduoti molingi gruntai, susiformavę holoceno ar pleistoceno laikotarpiu, pasižymi skersinės bangos greičio didėjimu su gyliu, todėl įprastai refrakciniai metodai gali būti sėkmingai taikomi.

Šio metodo privalumas – nesuardo aplinkos, nereikia gręžinio, todėl tinkami naudoti urbanizuotuose erdvėse.

Svarbu suprasti, kad naudojant refrakcinį metodą skersinės bangos greitis matuojamas horizontalia kryptimi, todėl koreliacija tarp šio ir kitais metodais gaunamų seisminių bangų greičių yra negalima, jei grunte egzistuoja horizontali – vertikali anizotropija

Laboratoriniai metodai:

1. Benderio elementų testas

Benderio elementų bandymas – tai vienas iš naudojamų laboratorinių metodas, skirtų skersinės bangos greičiui V_s nustatyti mažų deformacijų lygyje. Šis metodas naudingas, kai siekiama įvertinti dinaminį šlyties modulį G_{max} (Jovičić ir kt., 1996). Bandyme naudojami du pjezoelektriniai jutikliai – vienas veikia kaip bangos siųstuvas, o kitas – kaip imtuvas. Abu jutikliai montuojami priešingose mėginio pusėse – cilindrinio molio ar smėlio mėginio galuose. Siųstuvas generuoja aukšto dažnio horizontaliai poliarizuotą skersinę bangą, kuri sklinda per mėginį ir fiksuojama imtuvo.

Šis metodas pasižymi aukštu jautrumu, leidžia tiksliai matuoti greitį labai mažų deformacijų metu ir yra ypač tinkamas palyginimui su lauko duomenimis. Benderio elementai gali būti kaip priedas atliekant triašį bandymą. Vis dėlto bandymo tikslumas priklauso nuo atvykimo laiko nustatymo tikslumo, signalo kokybės bei mėginio paruošimo – pažeidimų nebuvimo (O'Donovan ir kt., 2015).

2. Rezonansinės kolonos bandymas

Rezonansinės kolonos metodas pradėtas taikyti grunto dinaminėms savybėms nustatyti dar 1930-aisiais, tačiau plačiai paplito tik po 1960-ųjų metų. Pirmą kartą šį metodą pritaikė Ishimoto ir Lida 1937 metais. Vėliau tokie mokslininkai kaip Hall ir Richart (1963) bei Hardin ir Black (1968) toliau tobulino šį įrenginį, siekdami nustatyti gruntų dinamines savybes (Onur ir kt., 2012). Po reikšmingų patobulinimų ir konstrukcinių pakeitimų rezonansinės kolonos įrenginys tapo plačiai naudojamas tyrėjų visame pasaulyje. Šis metodas leido standartizuoti mažų deformacijų grunto analizę laboratorinėmis sąlygomis ir iki šiol išlieka vienu iš tiksliausių būdų vertinant gruntų elgseną veikiant dinaminiams apkrovimams.

Rezonansinės kolonos bandymas yra vienas iš laboratorinių metodų, naudojamų skersinės bangos greičiui V_s nustatyti bei kitoms grunto dinaminėms savybėms įvertinti, kai gruntas tiriamas prie itin mažų deformacijų. Bandymo principas grindžiamas cilindrinio grunto mėginio sužadinimu nustatytu dažniu, kol pasiekiamas jo natūralus (rezonansinis) dažnis (Camacho-Tauta ir kt., 2011). Šioje būsenoje atsiranda maksimalus virpesių atsakas, leidžiantis tiksliai įvertinti grunto elastingumo parametrus. Priklausomai nuo įrenginio konfigūracijos, gali būti atliekamas sukamasis arba lenkiamasis rezonansinis bandymas.

Skersinės bangos greitis apskaičiuojamas pagal 42 formulę (Bennell ir Smith, 1991):

$$V_s = 2\pi f_n L \quad (42)$$

Kur

f_n – rezonansinis dažnis, Hz

L – mėginio ilgis, m

Rezonansinės kolonos bandymas leidžia ištirti grunto dinaminį savybių kintos priklausomybę nuo apkrovos amplitudės, konsoliduojančių įtampų ir mėginio drėgnumo. Šis metodas dažnai naudojamas kartu su benderio elementų bandymu norint palyginti rezultatus ir įvertinti signalo vientisumą.

3. TYRIMO METODIKA

3.1 Lauko tyrimo metodai

Lauko tyrimo metodai, kuriais tirti smėlingo molio bei smėlingo molio ir dulkio gruntai, susideda iš dviejų dalių – statinio zondavimo ir sekliosios seismikos bandymų.

Statinio zondavimo bandymas atliktas vadovaujantis ISO 22476-1:2022 nurodytais reikalavimais. 12 pav. pavaizduotas laukuose atliekamas statinio zondavimo bandymas. Bandymui palyginta aikštelė, kad zondavimo technika stovėtų horizontaliai žemės paviršiui. Bandymo metu į gruntą tolygiu greičiu spaudžiami geležinės štangos, kurių diametras siekia 36 mm. Zonde esantys matavimo prietaisai fiksuoja grunto pasipriešinimą spaudimui q_c bei šoninę trintį f_s . Tokiu būdu išbandoma visa grunto storymė iki 30 m arba tol, kol pasiekiamas labai tankaus ar labai stipraus grunto sluoksnis, kurio praspauti nepavyksta. Statinis zondavimas atliktas 77 tyrimų taškuose.



12 pav. Telšių rajone atliekamas statinio zondavimo bandymas. Autoriaus nuotrauka

Šalia statinio zondavimo atliekamas gręžimas koloniniu būdu (13 pav.) Royal Eijkelpkamp CompactRotoSonic 140 agregatu. Tyrimo metu naudota vibro technologija. Sonic gręžimas naudoja aukšto dažnio – apie 150 Hz – rezonansinę energiją įvairių grunto sluoksnių gręžimui. Gręžimo galvoje esantis osciliatorius generuoja aukšto dažnio virpesius, kurie nukreipiami žemyn į gręžinį. Ši energija derinama su sukimu, užtikrinančiu tolygų energijos pasiskirstymą visoje gręžimo įrangoje ir pačiame gręžte. Sonic gręžimo galva sukuria daugiau nei 150 virpesių per sekundę, kurių vertikaliosios svyravimo amplitudės neviršija 10 mm. Sumažėjus trinčiai, padidėja gręžimo greitis ir palengvėja gruntotraukio ištraukimas. Ištraukti aukštos kokybės nesuardytos sandaros grunto mėginiai įdedami į specialius vamzdžius ir apsukami plėvele norint apsaugoti nuo fizikinių savybių

pokyčių. Pabaigus gręžimą ištraukti apsauginiai vamzdžiai ir įleistas bei įtvirtintas PVC vamzdis geofiziniui bandymui.



13 pav. Nesuardytos sandaros bandinių ėmimas ir gręžinio sekliškai seismikai paruošimas naudojant Royal Eijkelpkamp CompactRotoSonic 140 agregatą. Autoriaus nuotrauka

Lauko geofiziniai bandymai atlikti pagal ASTM D7400 standartą (14 pav.). Koloniniu būdu išgręžiamas gręžinys, paimami nesuardytos sandaros grunto bandiniai laboratoriniams bandymams. Baigus gręžimą įleidžiamas PVC vamzdis, kurio diametras yra 88 mm. Jo dugnas inkaruojamas su paruoštu iš betono išlietu cilindru. Tarpas tarp vamzdžio ir gręžinio sienučių užpildomas bentonito ar portlandcemento, žvyro ir smėlio mišiniu. Į paruoštą, gręžinyje esantį PVC vamzdį, įleidžiamas seismines bangas fiksuojantis prietaisas – geofonas. Bandymas pradedamas nuo 1,5 m nuo vamzdžio viršaus ir kartojamas kas 0,5 m. Skersinių bangų šaltinis – prie geležinių kojų pritvirtinti 20 kg masės kūjai, nuo gręžinio nutolę per 2,5 m – atstumas gali šiek tiek keistis, jei pagrindas nėra lygus. Smūgiuojant kūjus sukuriama skersinė banga, o skirtingose pusės leidžia gauti poliarizuotą bangą. Išilginė banga sukurama smūgiuojant plastikiniu plaktuku, kurio masė 5 kg, per geležinę plokštę, nutolusią per 3 m nuo gręžinio. Atstumas buvo koreguojamas, jei P-banga ateina per anksti. Bandymų metu pastebėta, kad geriausi rezultatai gauti, kai atstumas iki gręžinio viršijo 2,5 m. Sukurtos seisminės bangos sklinda per gruntą ir pasiekia geofoną, kuris užfiksuoja jas bei išsiunčia į seismografą, kuris, apdorojęs gautą informaciją, duomenis perkelia į duomenų rinkimo prietaisą – nešiojamąjį kompiuterį.

Tokiu būdu bandymas atliekamas kol pasiekiamas gręžinio dugnas. Įranga susirenkama ir išmatuojami atstumai tarp skersinių ir išilginių bangų šaltinių bei gręžinio. Vėliau šie matavimai bus naudojami koreguojant pirmų pasirodymų laiką.



14 pav. Pasiruošimas sekliosios seismikos bandymui Naujosios Akmenės tyrimų aikštelėje. Autoriaus nuotrauka

3.2 Laboratoriniai metodai

Laboratoriniai tyrimai atlikti 244 nesuardytos sandaros bandiniams nustatant gamtinį tankį ρ , kietų dalelių tankį ρ_s , gamtinį drėgnį w , granulimetrinę sudėtį, nedrenuotą kerpamąjį stiprį c_u . Atliekant laboratorinius bandymus vadovautasi šiais ISO standartais:

Gamtinio tankio nustatymas - LST EN ISO 17892-2:2015 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 2 dalis. Tūrinio tankio nustatymas (ISO 17892-2:2014)“.

Kietų dalelių tankis – LST EN ISO 17892-3:2016 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 3 dalis. Dalelių tankio nustatymas (ISO 17892-3:2015)“.

Gamtinio drėgno nustatymas - LST EN ISO 17892-1:2015 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 1 dalis. Vandens kiekio nustatymas (ISO 17892-1:2014)“.

Smulkaus grunto granulimetrinės sudėties nustatymas - Granulimetrinė sudėtis. LST EN ISO 17892-4:2017 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 4 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas (ISO 17892-4:2016)“.

Atterbergo ribų nustatymas - LST EN ISO 17892-12:2018 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 12 dalis. Takumo ir plastiškumo ribų nustatymas (ISO 17892-12:2018)“.

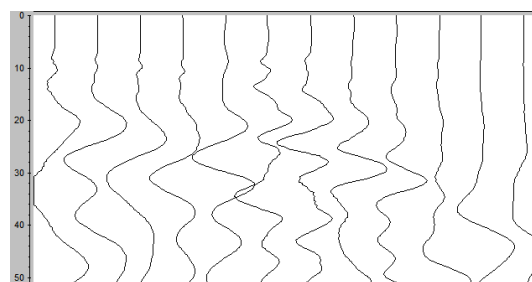
Vienaašio gniuždymo bandymas - LST EN ISO 17892-7:2018 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 7 dalis. Vienaašio gniuždymo bandymas (ISO 17892-7:2017)“.

3.3 Geofizinių duomenų analizė ir seisminių bangų greičių nustatymas

Duomenų analizė pradama importuojant lauko darbų metu gautus duomenis į Reflexw 2D-dataanalysis modulį. Atsidarius pirmo kanalo MINUS skersinę bangą patikrinama, ar joje išraiškingai, be duomenų suprastėjimo galima užfiksuoti pirma pasirodymo laiką. Jei taip, tada tokiu pačiu būdu tikrinama PLUS banga. Pabaigoje šios abi vienodų seisminių kanalų bangos atidaros kartu ir, dėl poliarizacijos atsiradimo, nustatomi pirmo pasirodymo laikai. Sudėtingiau nustatomas išilginės

bangos pirmo pasirodymo laikas, nes iki 10 m gylio ją galima sumaišyti su skersine banga. Be to, išilginei bangai nustatyti naudojamas tik vienas smūgis.

Kartais lauko duomenys neatitinka reikalaujamos kokybės (15 pav.). Todėl reikia pritaikyti filtrus, kurie padeda išskirti pirmą pasirodymo laiką. Dažniausiai tokio tipo sekliosios seismikos bandymo duomenų koregavimui naudojamas dažnių juostos filtras (angl. *Bandpassfrequency*). Dažnių juostos filtras – tai filtras, kuris praleidžia tik tam tikrą dažnių intervalą, o kitus dažnius slopina – pašalina arba susilpnina. Šis filtras pasižymi dviem pagrindinėmis ribomis: apatiniu dažniu, žyminčiu žemiausią praleidžiamą dažnį, ir viršutiniu dažniu, nusakančiu aukščiausią praleidžiamą dažnį. Dažnių juostos filtras leidžia praeiti vidutinio dažnio signalus, tuo pačiu slopindamas labai žemo ir labai aukšto dažnio komponentes. Šio filtro naudojimas padeda paryškinti dominuojantį signalą.



15 pav. Blogos kokybės seisminiai duomenys

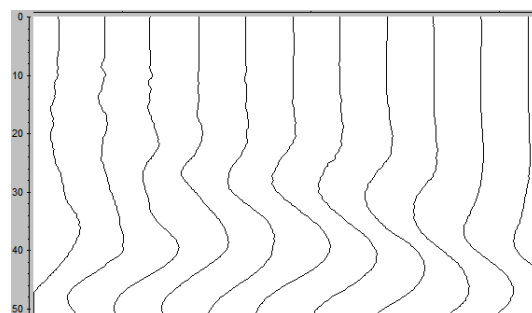
Atliekant šio tiriamojo darbo seisminių duomenų filtravimą užsiduotos ribos, dažniausiai tinkančios visoms skersinėms bangoms:

- Apatinė riba – 35 – 45 Hz;
- Viršutinė riba – 75 – 80 Hz.

Sutinkamos išimtys, kurioms reikia taikyti kitokius filtravimo intervalus, pakelti amplitudę, kurios mažumą lėmė per silpnas smūgis arba labai minkšti ar organiniai gruntai, kurie sugėrė mechaninių bangų energiją. Be šių filtrų, dar pritaikoma energijos praradimo funkcija, leidžianti pašalinti numanomą seisminės bangos energijos praradimą dideliame gylyje, kuris gali atsirasti dėl energijos sklaidos įvairiomis kryptimis bei dėl grunto neapibrėžtumo 3D erdvėje. Tokiu atveju ribos nustatomos tokios:

- Apatinė riba – 43 – 55 Hz;
- Viršutinė riba – 80 – 85 Hz;
- Amplitudės pakėlimo koeficientas – 2,63;
- Energijos praradimo koeficientas – 1,1438.

Po filtravimo skersinė banga pavaizduota 16 paveiksle.



16 pav. Filtrų pagalba pataisyti lauko seisminiai duomenys

Išilginė banga, gebanti sklisti visomis terpėmis, nėra filtruojama – užtenka pritaikyti 2-3 koeficientą amplitudei. Laba retais atvejais pritaikyta starto laiko pakeitimo funkcija dėl per arti gręžinio esančio seisminių bangų šaltinio – su tokia problema susidurta iki 6-7 m gylio.

Baigus duomenų taisymą įsikėliami seisminio kanalo duomenys ir naudojama seisminio laiko pasirinkimo funkcija, leidžianti pasirinkti vietas, kuriose pirmą kartą pasirodančios bangos ima svyruoti. Kryžiuokais pažymėjus šias vietas duomenys eksportuojami tolesniai analizei į Reflex Win CMP-vel analysis modulį.

Paskutinis žingsnis duomenų analizėje – vertikalaus seisminio profilio (VSP) sudarymas. Įsikėlus duomenis bei žinant inžinerių geologinių sluoksnių ribas įvedami gylio parametrai, leidžiantys gauti seisminių bangų greičius iš intervalų, iš kurių paimti nesuardytos sandaros bandiniai. Tokiu būdu atlikta seisminių duomenų analizė 77 gręžiniuose ir gauti skersinės bei išilginės bangų greičiai monolitų paėmimo intervaluose.

3.4 Duomenų imties statistinis apdorojimas atrandant imties neatitinkančias vertes

Baigiamajame darbe susidurta su dideliu laboratorinių ir lauko tyrimų duomenų kiekiu, todėl siekiant užtikrinti analizės tikslumą bei pašalinti galimus rezultatus iškraipančius taškus, buvo būtina atlikti pirminį duomenų filtravimą. Tam pasitelktas standartinio nuokrypio metodas, kuris leidžia nustatyti statistiškai išsiskiriančias nuo vidurkio reikšmės neadekvačiai nutolusias reikšmes. Šiame tyrime pasirinkta laikyti reikšmes neatitinkančiomis, jei jos viršija 2 standartinių nuokrypių ribas nuo imties vidurkio. Toks kriterijus leidžia patikimai identifikuoti galimus anomalinius duomenis, tuo pačiu išlaikant pakankamą statistinės imties reprezentatyvumą.

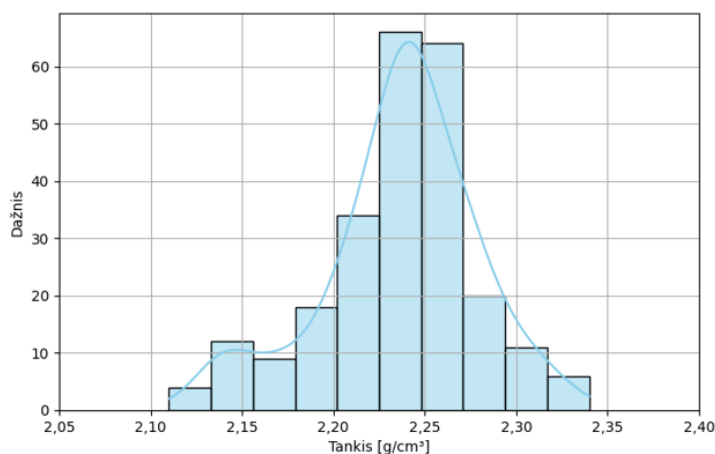
Duomenų filtravimui panaudota 43 formulė:

$$df_{cleaned} = df[(df['savybė'] \geq (mean - 3 * std_dev)) \& (df['savybė'] \leq (mean + 2 * std_dev))] \quad (43)$$

Duomenų filtravimo standartinio nuokrypio metodu rezultatai

1. Grunto tankis ρ

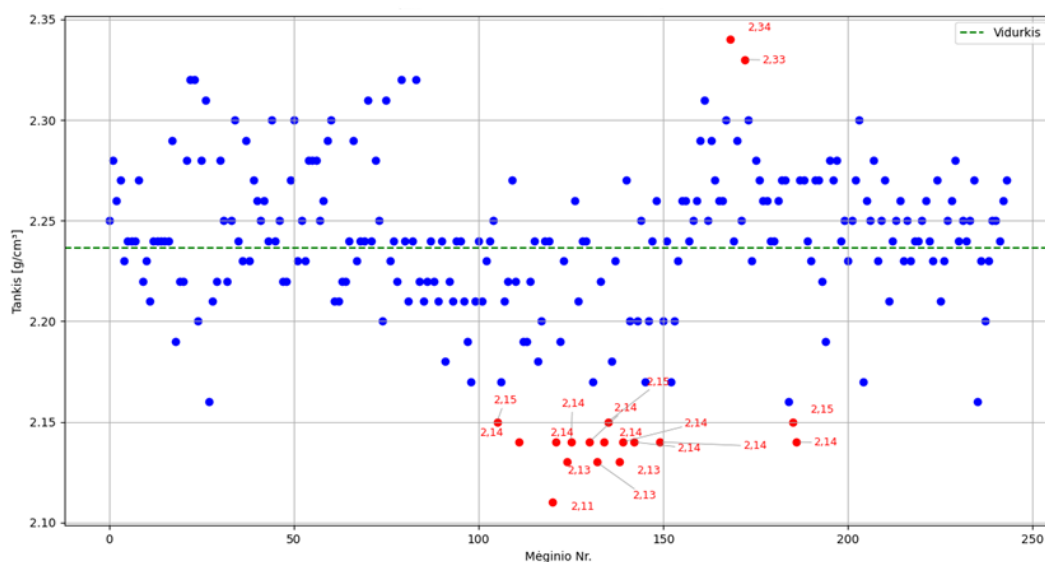
17 paveiksle pateikta natūralaus grunto tankio histograma su glotnia pasiskirstymo kreive. Histogramos duomenys rodo, kad natūralaus tankio reikšmės yra susitelkusios aplink vidurkį – 2,236 g/cm³, o standartinis nuokrypis sudaro 0,042 g/cm³. Duomenų imtis $n = 244$. Nors pasiskirstymas vizualiai primena normalųjį, statistiniai testai (Shapiro–Wilk $p = 0,00005$, D’Agostino–Pearson $p = 0,001$, Anderson–Darling) rodo reikšmingus nukrypimus nuo normalaus skirstinio – visų p -vertės $< 0,05$, todėl galima teigti, kad tankis nėra pasiskirstęs normaliai. Tai gali būti siejama su duomenų asimetrija, lokalizuotais smailumo pakitimais ar galimomis išskirtimis.



17 pav. Natūralaus grunto tankio histograma

18 pav. pavaizduotos natūralaus grunto tankio reikšmės, išdėstytos pagal mėginių eiliškumą tyrimo imtyje ($n = 244$). Žalia punktyrinė linija žymi tankio aritmetinį vidurkį, mėlynais taškais pateiktos visos pradinės duomenų reikšmės. Siekiant identifikuoti statistškai reikšmingai nuo bendrojo pasiskirstymo nukrypstančius taškus, taikytas standartinio nuokrypio metodas. Šiuo atveju nustatytos 2 standartiniai nuokrypiais nuo vidurkio nutolusios reikšmės.

Remiantis šiuo kriterijumi, iš viso identifikuota 18 išskirčių. Jos grafike pavaizduotos raudonai. Didžioji dalis šių taškų patenka į apatinę tankio reikšmių skalės dalį – intervalą nuo 2,11 iki 2,15 g/cm³, kelios nutolusios reikšmės yra viršutinėje dalyje ($\geq 2,33$ g/cm³). Toks pasiskirstymas leidžia daryti prielaidą apie galimus tankio variacijos šaltinius – tiek natūralią gruntų įvairovę, tiek galimai blogai paimtą bandinį.



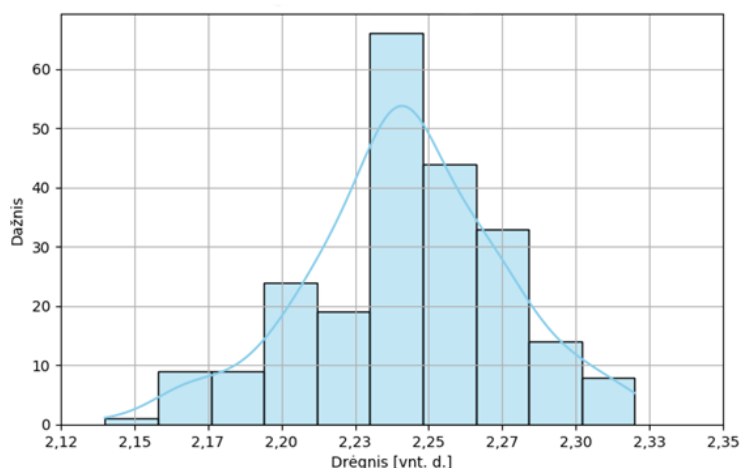
18 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios natūralaus grunto tankio vertės

2. Grunto drėgnis w

19 paveiksle pateikta natūralaus grunto drėgnio pasiskirstymo histograma su papildoma glotnia drėgnio funkcijos kreive. Duomenys išreikšti santykinėmis dalimis (vnt. d.), o imties dydis siekė $n = 244$. Aritmetinis drėgnio vidurkis yra 0,119 vnt. d., standartinis nuokrypis – 0,028 vnt. d., moda –

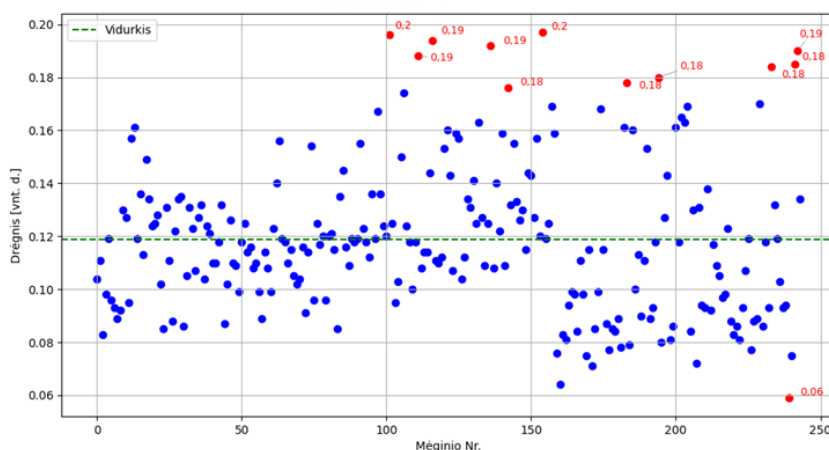
0,12 vnt. d. Histogramoje matomas asimetriškas pasiskirstymas, pasviręs į dešinę. Tai rodo, kad didesnės drėgnio reikšmės pasitaikė rečiau, bet vis dar žymiai paveikė pasiskirstymo formą.

Normalumo hipotezę įvertinta taikant tris skirtingus testus: Shapiro–Wilk, D’Agostino–Pearson bei Anderson–Darling. Visi trys testai rodo, kad drėgnio reikšmės statistiškai nesilaiko normaliojo skirstinio: Shapiro–Wilk p-vertė lygi $8,54 \times 10^{-6}$, D’Agostino–Pearson p-vertė – 0,00038, o Anderson–Darling testu gauta statistika (2,53) viršija įprastas kritines reikšmes. Tokie rezultatai leidžia atmesti H_0 hipotezę apie normalųjį skirstinį. Šis statistinis neatitikimas taip pat matomas vizualiai – pasiskirstymas nėra simetriškas ir rodo teigiamą asimetriją.



19 pav. Natūralaus grunto drėgnio histograma

Analizės metu nustatyta 11 reikšmių, kurios priskirtos prie statistinių išskirčių: 11 jų yra viršutinėje skalės dalyje (0,18–0,20 vnt. d.), o viena reikšmė – apatinėje (0,06 vnt. d.) (20 pav.). Išskirtys pažymėtos raudona spalva. Drėgnio pasiskirstymas gali būti paveiktas litologinės sudėties ar netinkamo grunto drėgnio bandinio paėmimo.



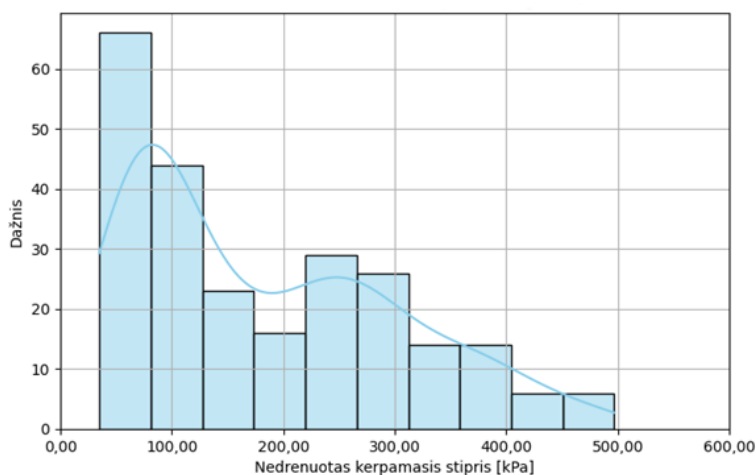
20 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios natūralaus grunto drėgnio vertės

3. Nedrenuoto kerpamojo stiprio vertės c_u , iškrentančios iš imties

21 paveiksle pateikta nedrenuoto kerpamojo stiprio reikšmių histograma su papildomai atvaizduota glotnia funkcijos kreive. Analizės imtį sudarė $n = 244$ mėginiai. Apskaičiuotas vidurkis

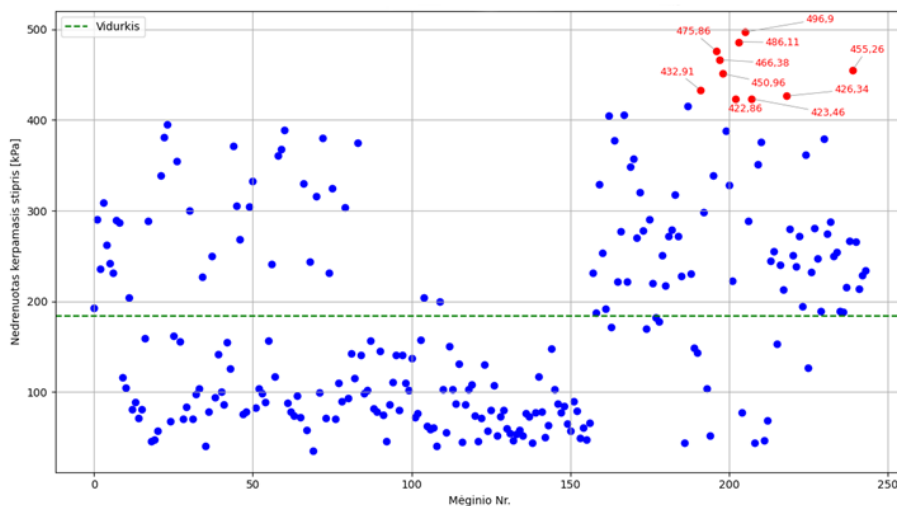
siekia 183,5 kPa, standartinis nuokrypis – 117,8 kPa, kas rodo reikšmingą reikšmių išsibarstymą. Histogramoje matomas skirstinio asimetriškumas į dešinę – teigiama asimetrija.

Statistinė normalumo analizė atlikta taikant tris nepriklausomus testus: Shapiro–Wilk ($p = 4,88 \times 10^{-11}$), D’Agostino–Pearson ($p = 5,42 \times 10^{-6}$) ir Anderson–Darling – statistinė reikšmė = 7,53. Visų testų rezultatai leidžia atmesti nulio hipotezę apie normalaus skirstinio atitikimą, nes p reikšmės yra žymiai mažesnės nei 0,05, o Anderson–Darling testas rodo aiškų nukrypimą nuo normalumo ribų.



21 pav. Nedrenuoto kerpamojo stiprio histograma

Siekiant identifikuoti galimas statistines išskirtis, taikytas $\pm 2\sigma$ kriterijus, pagal kurį reikšmės, viršijančios 419,1 kPa ($183,5 + 2 \times 117,8$), buvo laikomos iškrentančiomis (22 pav.). Remiantis šiuo kriterijumi, nustatyta 10 statistiškai nutolusių verčių, kurios grafike pavaizduotos raudona spalva. Visos išskirtys pateko į aukštesnių reikšmių pusę – tai rodo stiprią teigiamą asimetriją, patvirtintą ir normalumo testais. Tokį pasiskirstymą galima paaiškinti nedrenuoto kerpamojo stiprio vertės didėjant su gyliu ar netinkamai paėmus bandinį.

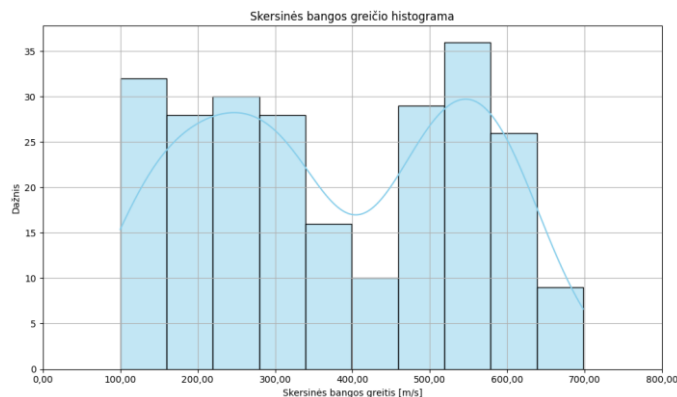


22 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios nedrenuoto kerpamojo stiprio vertės

4. Skersinės bangos greitis V_s

23 paveiksle pateikta skersinės bangos greičio V_s pasiskirstymo histograma su papildoma glotnia kreive. Duomenys apima skersinės bangos greičius nuo 100 m/s iki 698 m/s, imties aritmetinis vidurkis siekia 375,82 m/s. Pastebima gana didelė dispersija – standartinis nuokrypis sudaro 171,89 m/s. Vizualiai stebimas pasiskirstymas yra daugiamodinis, su bent dviem ryškiomis modomis – ties ~200 m/s ir ~550 m/s. Tai leidžia manyti, jog duomenys sudaryti iš kelių gruntų tipų ar geologinių aplinkų, turinčių skirtingą bangų greitį.

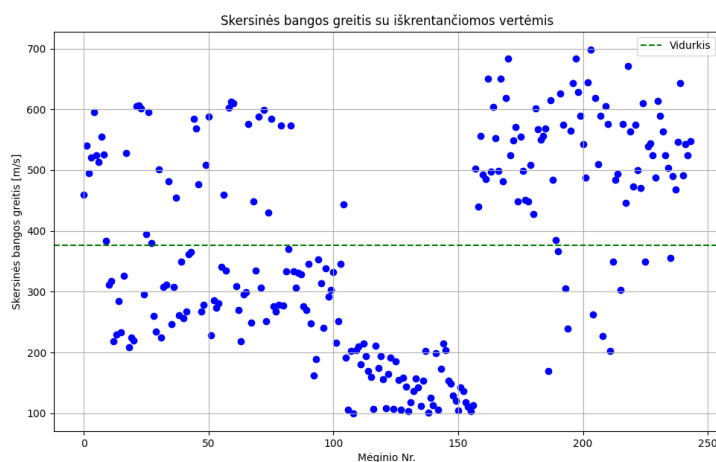
Statistiniai testai, įvertinantys skirstinio normalumą, rodo reikšmingą nukrypimą nuo normaliojo skirstinio: Shapiro–Wilk $p = 5,92 \times 10^{-9}$, D’Agostino–Pearson $p = 2,43 \times 10^{-96}$, Anderson–Darling statistika = 5,37.



23 pav. Skersinės bangos greičio histograma

Remiantis ± 2 standartinių nuokrypių nuo vidurkio kriterijumi ($\sigma = 171,89$ m/s), galima tikėtis, kad reikšmės, viršijančios ribinį intervalą, galėtų būti laikomos statistinėmis išskirtimis (24 pav.). Tačiau šiame grafike išskirtys nėra atskirai pažymėtos. Jų nebuvimas viršutinėje ar apatinėje riboje leidžia daryti prielaidą, jog reikšmės lieka statistiškai priimtinos ribose pagal pasirinktą kriterijų.

Pasiskirstymo forma bei statistiniai rodikliai rodo, kad duomenų aibė susideda iš dviejų ar daugiau populiacijų – minkštensių ir kietesnių gruntų skirtinguose regionuose. Toks duomenų pasiskirstymas būdingas geofiziniams duomenims, kai seisminių bangų greitis priklauso nuo tiriamo grunto tipo, tankio, drėgnio ir kitų savybių.



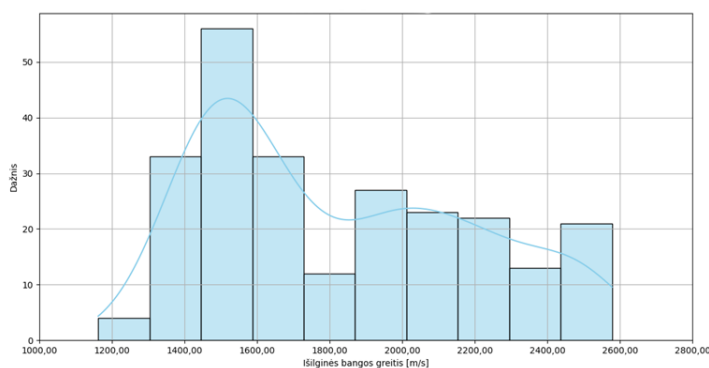
24 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios skersinės bangos greičio vertės

5. Išilginės bangos greitis V_p

25 paveiksle pateikta išilginės bangos greičio histograma. Išilginės bangos greitis duomenų pasiskirstymas vertintas imčiai, kurioje vidutinė reikšmė siekė 1824,19 m/s, o standartinis nuokrypis – 366,30 m/s – tai rodo didelę verčių sklaidą. Dažniausiai pasitaikančios reikšmės koncentravosi ties 1500–1600 m/s intervalu.

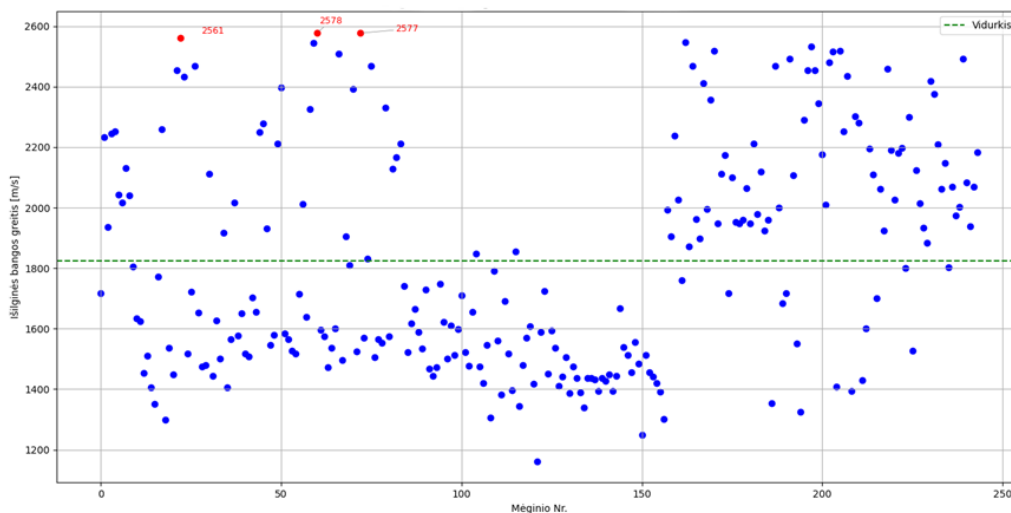
Histogramoje matomas pozityviai asimetriškas, į dešinę pasviręs pasiskirstymas, būdingas mišrios geologinės sandaros gruntams, kur egzistuoja reikšmingi fizinių savybių skirtumai tarp sluoksnių. Naudojantis kreive galima identifikuoti bent dvi modas – tai lemia skirtingų amžių ir genezės grunta.

Statistiniai normalumo testai (Shapiro–Wilk $p = 1,05 \times 10^{-9}$, D’Agostino–Pearson $p = 4,21 \times 10^{-14}$, Anderson–Darling statistika = 6,43) rodo, kad duomenys reikšmingai skiriasi nuo normaliojo skirstinio, todėl hipotezė apie normalaus pasiskirstymo atitikimą yra atmestina.



25 pav. Išilginės bangos greičio histograma

Analizės metu identifikuotos trys reikšmės – 2561, 2578 ir 2577 m/s – kurios viršija šią ribą ir laikytinos statistinėmis iškrentančiomis vertėmis (26 pav.). Jos pavaizduotos raudona spalva. Tai leidžia daryti prielaidą, kad duomenų aibėje egzistuoja izoliuoti atvejai, susiję su geologiškai išskirtiniais sluoksniais – Naujojoje Akmenėje ir Anykščiuose sutinkamais itin stipraus grunto sluoksniais.

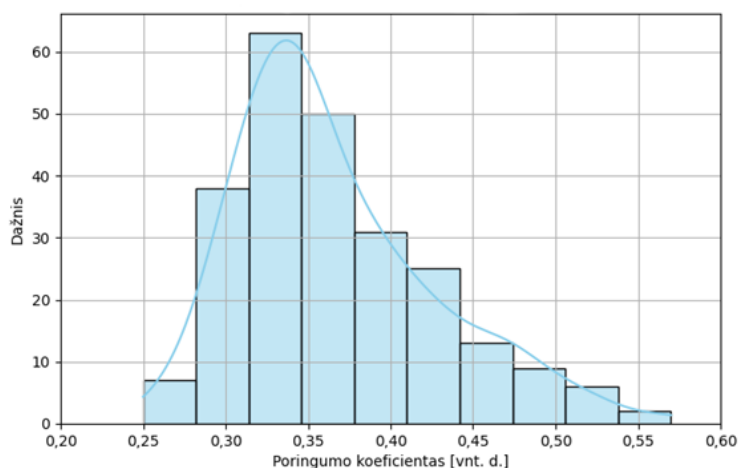


26 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios išilginės bangos greičio vertės

6. Poringumo koeficientas e

27 paveiksle pateikta poringumo koeficiento e pasiskirstymo histograma su papildoma glotnia kreive. Poringumo koeficiento duomenų imties vidurkis yra 0,366, standartinis nuokrypis 0,060. Didžiausias duomenų susitelkimas stebimas 0,32–0,36 intervale. Glotni kreivė leidžia vizualiai identifikuoti pasiskirstymo pobūdį, kuris yra asimetriškas, pasviręs į dešinę.

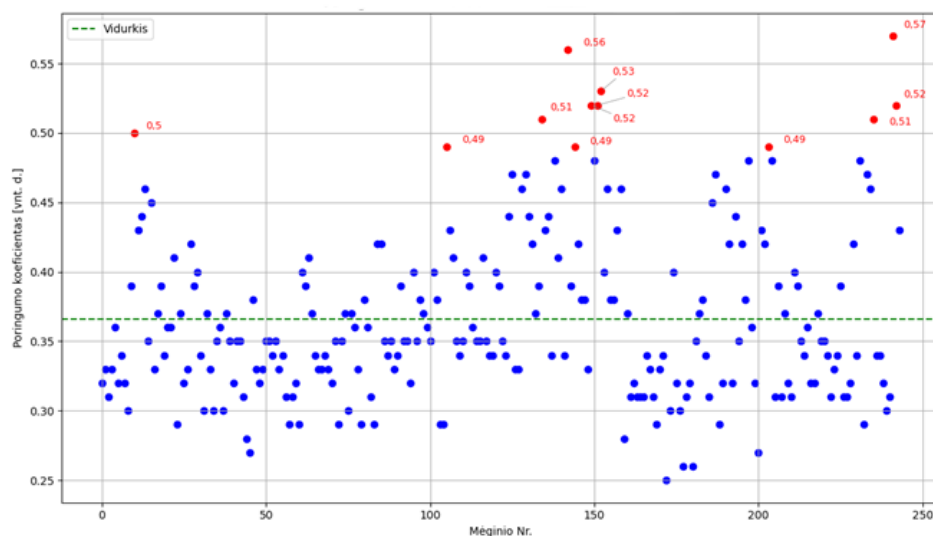
Normalumo prielaidai įvertinti taikyti trys statistiniai testai: Shapiro–Wilk ($p = 8,35 \times 10^{-9}$), D’Agostino–Pearson ($p = 4,84 \times 10^{-7}$) bei Anderson–Darling testas (statistika = 5,36). Visų testų rezultatai patvirtina, kad duomenys reikšmingai nukrypsta nuo normaliojo skirstinio, todėl nulinė hipotezė apie duomenų normalumą atmetama.



27 pav. Poringumo koeficiento verčių histograma

Iš viso nustatyta 12 statistinių išskirčių, kurios grafike pažymėtos raudonais taškais. Visos išskirtys patenka į aukštesnę pasiskirstymo dalį – tai rodo pozityvią asimetriją.

Duomenų pasiskirstymo forma rodo, kad didesni poringumo koeficiento dydžiai yra retesni ir greičiausiai siejami su mažesnio tankio arba silpnesnės struktūros gruntų sluoksniais, kurių tyrimų vietovėse beveik nepasitaikė.

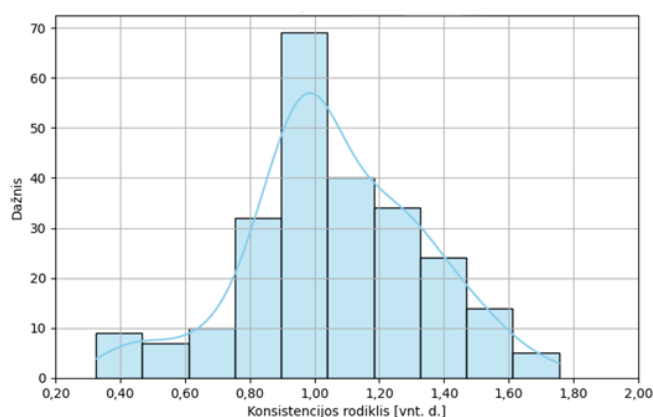


28 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios poringumo koeficiento vertės

7. Konsistencijos rodiklis I_c

29 paveiksle pateikta konsistencijos rodiklio I_c reikšmių histograma su uždėta glotnia KDE (tankio funkcijos įvertinimo) kreive. Analizės duomenų imtis 244, vidurkis – 1,063, standartinis nuokrypis 0,274. Didžiausias mėginių dažnis stebimas ties $I_c \approx 1,0$. Pasiskirstymo forma rodo nedidelę teigiamą asimetriją, su ilgesne uodega didesnių reikšmių kryptimi.

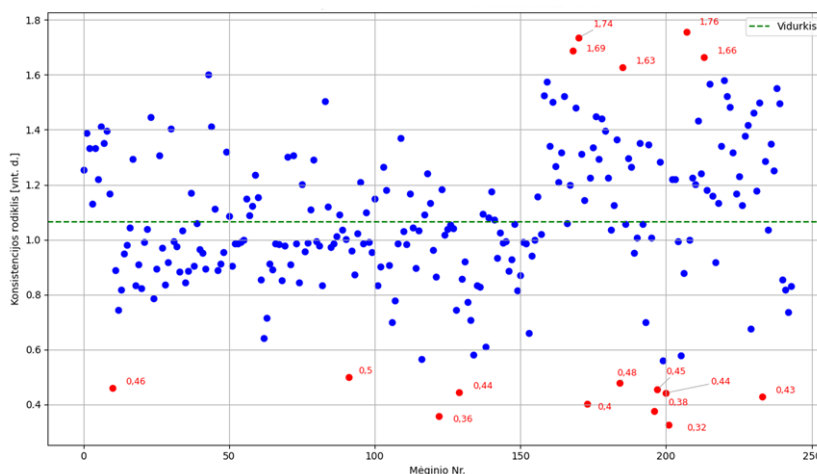
Normalumo prielaidai įvertinti taikyti trys statistiniai testai: Shapiro–Wilk ($p = 0,0216$), D’Agostino–Pearson ($p = 0,608$) ir Anderson–Darling (statistika = 1,124). Shapiro–Wilk testas rodo reikšmingą nukrypimą nuo normaliojo skirstinio ($p < 0,05$), tačiau kiti testai to nepatvirtina, todėl galima teigti, kad duomenys gali būti artimi normaliajam skirstiniui, tačiau galimi ir nedideli nukrypimai.



29 pav. Konsistencijos rodiklio histograma

Konsistencijos rodiklis yra vienas iš svarbiausių rodiklių, leidžiančių įvertinti smulkių gruntų plastiškumo būseną. Dauguma duomenų pasiskirstę intervale tarp 0,8 ir 1,4, o reikšmės viršijančios $I_c > 1,5$ pasitaiko retai, rodančios labai standžius.

Nustatyta 16 mėginių, patenkančių už ribų, ir yra laikytini išskirtimis – 8 jų priklauso žemutinei skirstinio daliai, o 6 – viršutinei (30 pav.). Šios vertės grafike pažymėtos raudonai kartu su tiksliomis I_c reikšmėmis.



30 pav. Statistiškai atrinktos duomenų imties neatitinkančios konsistencijos rodiklio vertės

2 lentelėje pateikti apibendrinti visa statistiškai apdorotų grunto savybių suvestinė informacija.

2 lentelė. Suvestinė statistiškai apdorotų duomenų lentelė

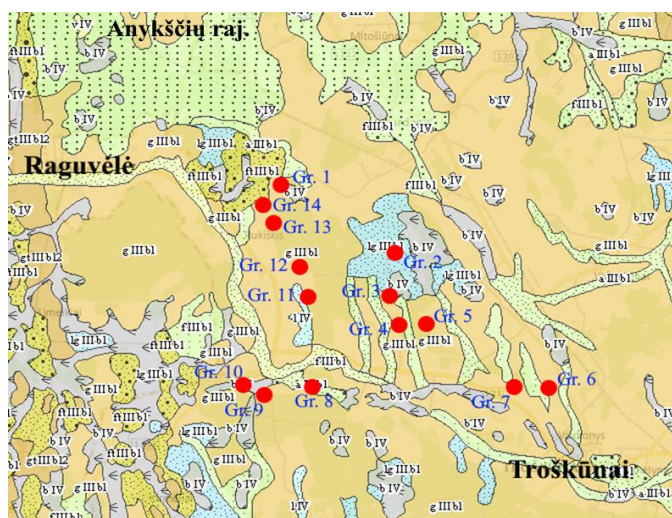
Savybė	Vidurkis	Standartinis nuokrypis	Išskirčių skaičius
Tankis ρ	2,236	0,042	18
Drėgnis w	0,119	0,028	11
Poringumo koeficientas e	0,366	0,060	12
Konsistencijos rodiklis I_c	1,063	0,274	16
Nedrenuotas kerpamasis stipris c_u	183,5	117,8	10
Skersinės bangos greitis V_s	375,82	171,89	0
Išilginės bangos greitis V_p	1824,19	366,3	3

4. TIRTŲ GRUNTŲ GEOTECHNINĖS SAVYBĖS

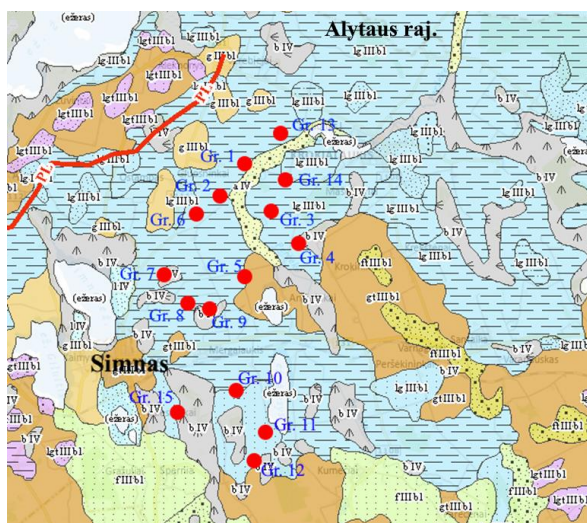
4.1 Bendra tirtų gruntų savybių apžvalga

Magistriniame darbe analizuoti viršutinio pleistoceno vėlyvojo Nemuno ledynmečio glacialinės nuogulos – smėlingas molis bei smėlingas molis ir dulkis. Laboratiniai tyrimai – gamtinio tankio ρ , gamtinio drėgnio w , kietų dalelių tankio ρ_s , granulimetrinės sudėties, Atterbergo ribų nustatymo bandymai – atlikti iš 244 nesuardytos sandaros grunto bandinių, kurie paimti iš 14 gręžinių Anykščių (31 pav.), 15 gręžinių Alytaus (32 pav.), 26 gręžinių Telšių (33 pav.) ir 22 gręžinių Naujosios Akmenės (34 pav) rajonuose slūgsančių gruntų. Iš viso 244 nesuardytos sandaros bandiniai iš 77 gręžinių. Bandinių gylis kinta nuo 1,0 iki 30,0 m. Laboratoriniai tyrimai atlikti Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto gruntų mechanikos laboratorijoje. 1 – 4 prieduose pateikti kiekvieno tirti rajono inžineriniai geologiniai pjūviai.

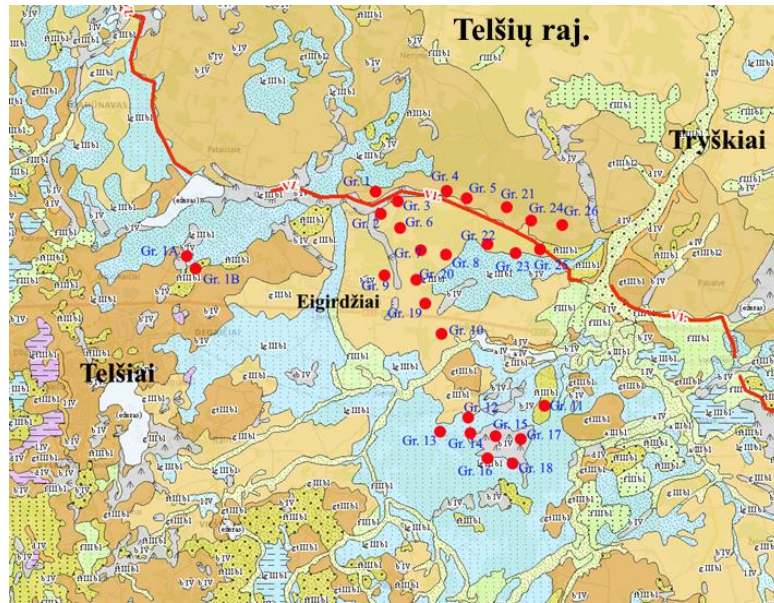
Magistriniam darbui, kaip ir buvo aprašyti darbo metodikos skyriuje, buvo atlikti gamtinio tankio, kietų dalelių tankio, gamtinio drėgnio, granulimetrinės sudėties, Atterbergo ribų nustatymas bei smulkaus grunto vienaašio gniuždymo bandymas.



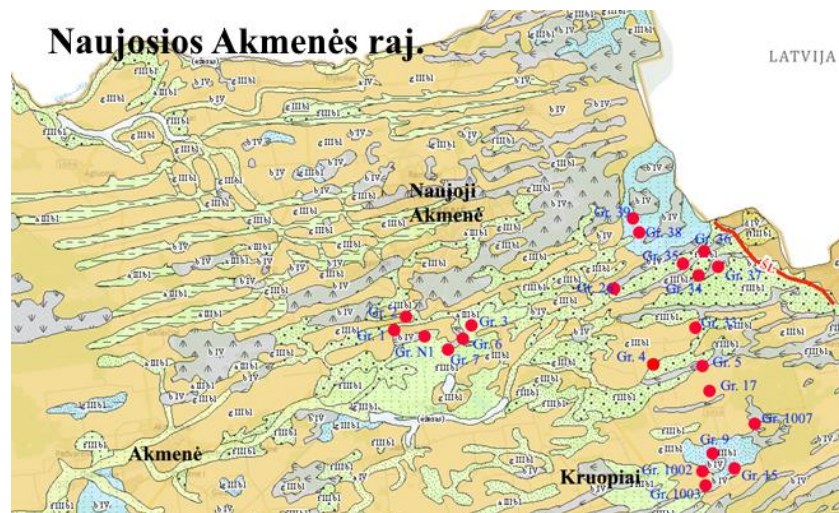
31 pav. Anykščių rajone esantys tyrimo taškai M1:200 000 (šaltinis: www.lgt.lt)



32 pav. Alytaus rajone esantys tyrimo taškai M1:200 000 (šaltinis: www.lgt.lt)



33 pav. Telšių rajone esantys tyrimo taškai M1:200 000 (šaltinis: www.lgt.lt)



34 pav. Naujosios Akmenės rajone esantys tyrimo taškai M1:200 000 (šaltinis: www.lgt.lt)

Pagal petrografinę sudėtį, kuri nustatyta granuliometrinės analizės hidrometro metodu metu, išskirti tik 2 grunto tipai:

- Smėlingas molis (SaCl);
- Smėlingas molis ir dulkis (SaSiCl).

Laboratoriniai tyrimai parodė, kad didžioji dalis bandinių priskiriami smėlingam moliui (185), mažiau – smėlingam moliui ir dulkiui (59). Pagal plastingumą – didžiąją dalį bandinių sudaro mažo plastingumo (229), mažiau vidutinio plastingumo (15) grunto bandiniai.

Pagal amžių tirti gruntai priklauso viršutinio pleistoceno viršutinio Nemuno Baltijos posvitės gIII bl (192) ir Grūdų posvitės g III gr (52) glacialinėms nuoguloms.

Pagal genezę tirti gruntai priklauso kraštiniais dariniams gt nm₃ (74) ir pagrindinei morenai g III nm₃ (170).

3 lentelėje apžvelgta tirtų gruntų granuliometrinė sudėtis.

3 lentelė. Tirtų gruntų granulimetrinės sudėties suvestinė lentelė

Statistiniai parametrai	Dalelių kiekis (%)								Grunto pavadinimas
	Molis	Dulkis (%)			Smėlis (%)			Žvyras	
		Smulkus	Vidutinis	Rupus	Smulkus	Vidutinis	Rupus		
		<0,002	0,001-0,0063	0,0063-0,02	0,02-0,063	0,063-0,2	0,2-0,63		
Minimali	1,8	2,2	2,5	7,1	1,1	0,0	0,0	0,0	Smėlingas molis ir dulkis
Maksimali	20,23	26,0	47,0	37,1	66,2	25,0	10,7	13,8	
Vidurkinė	10,3	10,0	12,5	16,9	27,3	8,6	3,4	3,1	
Minimali	2,0	2,1	5,2	6,3	0,8	0,1	0,0	0,0	Smėlingas molis
Maksimali	17,3	20,0	49,7	47,4	58,4	22,0	15,1	15,3	
Vidurkinė	10,5	8,8	12,3	17,4	30,2	10,5	4,1	4,2	

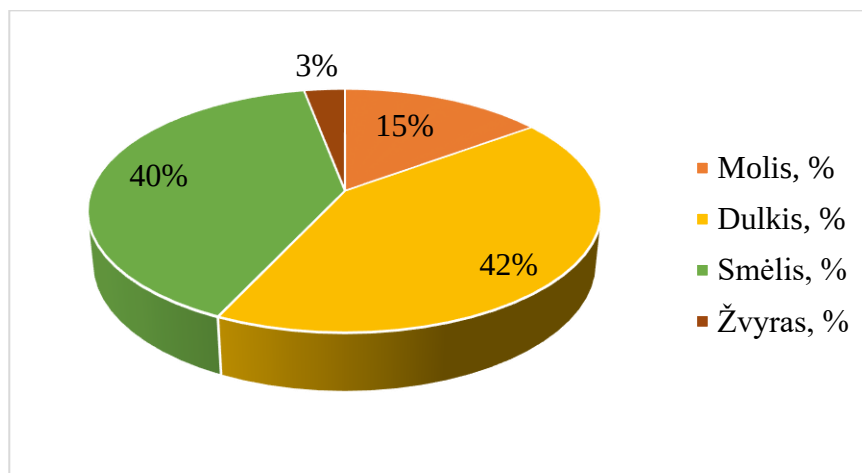
Tiriamajame darbe gruntas klasifikuotas pagal konsistencijos rodiklį I_c . Tarp smėlingo molio didžiąją dalį bandinių sudaro labai standi konsistencija (100), standi (71) bei kietos (9) ir minkštos (5) konsistencijos grunta. Tarp smėlingo molio ir dulkių daugiausiai bandinių pateko į labai standžios konsistencijos ribas (33), mažiau standžios (14) ir kietos bei minkštos konsistencijos bandinių tirta po lygiai (6). 4 lentelėje apžvelgtas bandinių pasiskirstymas pagal konsistenciją.

4 lentelė. Pagal grunto konsistenciją I_c suklasifikuoti bandiniai

	Bandinių kiekis			
	Minkšta	Kieta	Standi	Labai standi
Smėlingas molis	5	9	71	100
Smėlingas molis ir dulkis	6	6	14	33
Viso	11	15	85	133

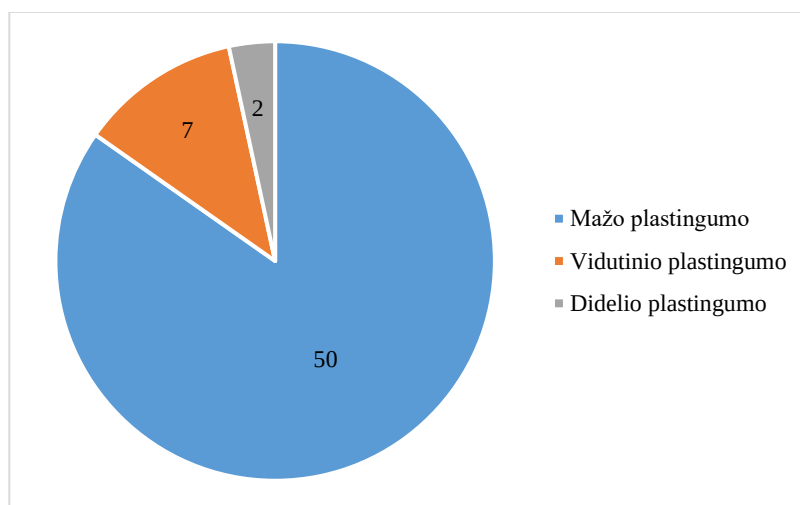
4.2 Smėlingo molio ir dulkių fizikinės ir mechaninės savybės

Smėlingo molio ir dulkių granulimetrinė analizė parodo, kad molio frakcijos tirtuose grunto mėginiuose sudaro 5-15%, dulkių – 19-76%, smėlio – 1-71%, žvyro – 0-14%. Vidurkinis frakcijų pasiskirstymas pavaizduotas 35 paveiksle.



35 pav. Smėlingo molio ir dulkių granulimetrinė sudėtis

Smėlingas molis ir dulkis pagal plastingumo rodiklį klasifikuojamas nuo mažo iki didelio plastiškumo (36 pav.). Mažo plastingumo bandinių šioje gruntų grupėje sutikta 50 vienetų, vidutinio plastiškumo – 7, o mažiausiai – 2 didelio plastingumo bandiniai.



36 pav. Smėlingo molio ir dulkių pasiskirstymas pagal plastingumo rodiklį I_p

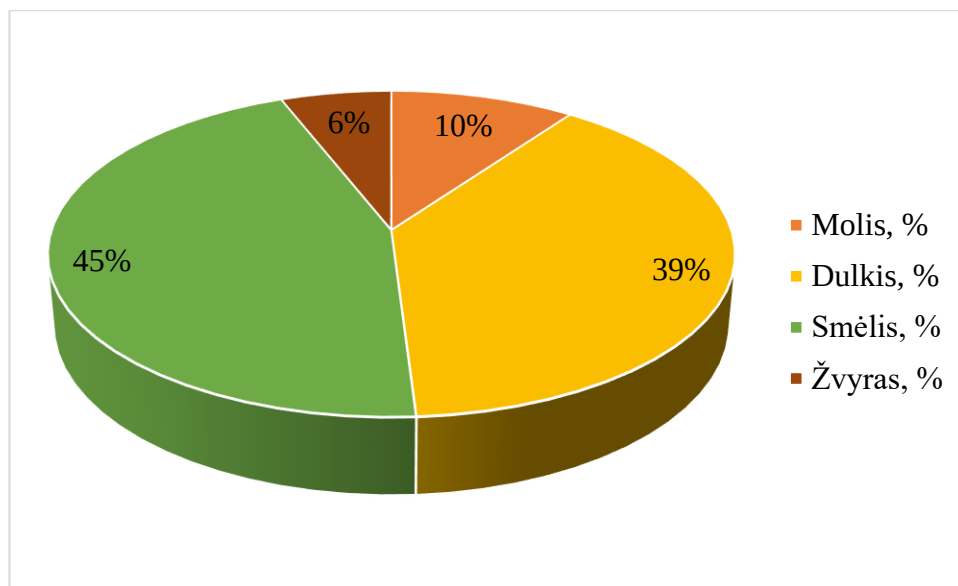
Grunto tankis šioje gruntų grupėje svyruoja nuo 2,11 iki 2,30 g/cm³, vidutinis – 2,23 g/cm³. Drėgnis svyruoja nuo 0,059 iki 0,196 vnt. d., vidutinis – 0,122 vnt. d.. Plastingumo rodiklio vertės kinta nuo 0,185 iki 0,301 vnt. d., vidutinis 0,223 vnt. d.. Konsistencijos rodiklio vertės svyruoja nuo 0,325 iki 1,755 vnt. d., vidutinis – 1,045 vnt. d.. Poringumo koeficiento vertės kinta nuo 0,270 iki 0,570 vnt. d., vidutinis – 0,391 vnt. d.. Stiprumas gniuždant kinta nuo 88,66 iki 993,81 kPa, vidurkis – 446,37 kPa. Nedrenuoto kerpamojo stiprio vertės tarp smėlingo molio ir dulkių gruntų svyruoja nuo 44,33 iki 496,91 kPa, o vidurkis – 223,19 kPa. Skersinės bangos greitis kinta nuo 101 iki 698 m/s, vidutinis greitis – 405 m/s. Išilginės bangos greitis kinta nuo 1162 iki 2577 m/s, o vidutinis greitis – 1936 m/s. Pagal lauko ir laboratorinių bandymų rezultatus galima matyti, kad tirti gruntai pasižymėjo varijuojančiomis geotechninėmis savybėmis. 5 lentelėje pavaizduota šių savybių suvestinė.

5 lentelė. Suvestinė smėlingo molio ir dulkių fizikinių ir mechaninių savybių lentelė

	Tankis	Drėgnis	Plastingumo rodiklis	Konsistencijos rodiklis	Poringumo koeficientas	Stiprumas gniuždant	Nedrenuotas kerpamasis stipris	Skersinės bangos greitis	Išilginės bangos greitis
	ρ	w	I_p	I_c	e	q_u	c_u	V_s	V_p
	g/cm ³	vnt. d.	vnt. d.	vnt. d.	vnt. d.	kPa	kPa	m/s	m/s
Minimali	2,11	0,059	0,185	0,325	0,270	88,66	44,33	101	1162
Maksimali	2,30	0,196	0,301	1,755	0,570	993,81	496,91	698	2577
Vidurkis	2,23	0,122	0,223	1,045	0,391	446,37	223,19	405	1936

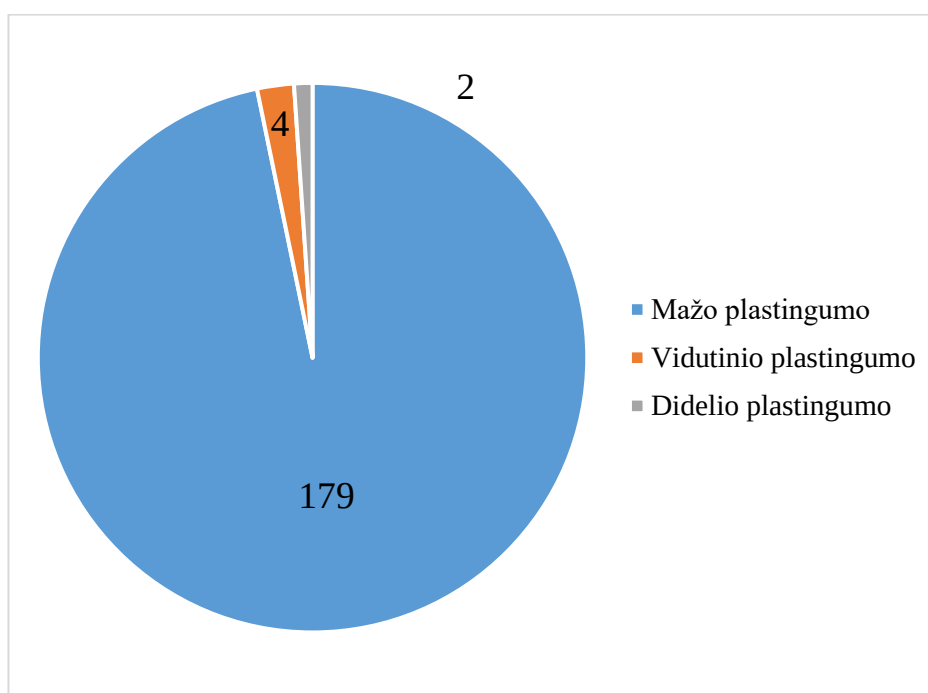
4.3 Smėlingo molio fizikinės ir mechaninės savybės

Smėlingo molio granulimetrinė analizė demonstruoja, kad molio frakcijos tirtuose grunto mėginiuose sudaro 2-28%, dulkių – 19-84%, smėlio – 1-65%, žvyro – 0-15%. Vidurkinis frakcijų pasiskirstymas pavaizduotas 37 paveiksle.



37 pav. Smėlingo molio granulimetrinė sudėtis

Smėlingas molis pagal plastingumo rodiklį klasifikuojamas nuo mažo iki didelio plastiškumo (38 pav.). Mažo plastingumo bandinių šioje gruntų grupėje sutikta 179 vienetų, vidutinio plastiškumo – 4, o mažiausiai – 2 didelio plastingumo bandiniai.



38 pav. Gruntų pasiskirstymas pagal plastingumo rodiklį I_p

Grunto tankis šioje gruntų grupėje svyruoja nuo 2,13 iki 2,34 g/cm³, vidutinis – 2,24 g/cm³. Drėgnis svyruoja nuo 0,064 iki 0,197 vnt. d., vidutinis – 0,118 vnt. d.. Plastingumo rodiklio vertės kinta nuo 0,189 iki 0,241 vnt. d., vidutinis 0,350 vnt. d.. Konsistencijos rodiklio vertės svyruoja nuo 0,402 iki 1,688 vnt. d., vidutinis – 1,069 vnt. d.. Poringumo koeficiento vertės kinta nuo 0,250 iki 0,530 vnt. d., vidutinis – 0,358 vnt. d.. Stiprumas gniuždant kinta nuo 69,84 iki 852,68 kPa, vidurkis – 341,70 kPa. Nedrenuoto kerpamojo stiprio vertės tarp smėlingo molio gruntų svyruoja nuo 34,92 iki 426,34 kPa, o vidurkis – 170,85 kPa. Skersinės bangos greitis kinta nuo 104 iki 671 m/s, vidutinis greitis – 367 m/s. Išilginės bangos greitis kinta nuo 1250 iki 2578 m/s, o vidutinis greitis – 1792 m/s. Lauko tyrimai ir laboratoriniai bandymai rodo, kad tirtas smėlingas molis pasižymėjo varijuojančiomis geotechninėmis savybėmis. 6 lentelėje pavaizduota šių savybių suvestinė.

6 lentelė. Suvestinė smėlingo molio fizikinių ir mechaninių savybių lentelė

	Tankis	Drėgnis	Plastingumo rodiklis	Konsistencijos rodiklis	Poringumo koeficientas	Stiprumas gniuždant	Nedrenuotas kerpamasis stipris	Skersinės bangos greitis	Išilginės bangos greitis
	ρ	w	I_p	I_c	e	q_u	c_u	V_s	V_p
	g/cm ³	vnt. d.	vnt. d.	vnt. d.	vnt. d.	kPa	kPa	m/s	m/s
Minimali	2,13	0,064	0,189	0,402	0,250	69,84	34,92	104	1250
Maksimali	2,34	0,197	0,241	1,688	0,530	852,68	426,34	671	2578
Vidurkis	2,24	0,118	0,350	1,069	0,358	341,70	170,85	367	1792

5. TYRIMŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ

5.1 Grunto granuliometrinės sudėties įtaka skersinės bangos greičiui

Grunto granuliometrinė sudėtis lemia skersinės bangos greitį. Murray ir kt. (2011) pažymi, kad didėjant frakcijos dydžiui, didėja ir skersinės bangos greitis, o didžiausias greitis sutinkamas gruntuose, kurie savo sudėtimi artėja prie optimalaus mišinio verčių. Todėl ir šiame baigiamajame darbe svarbu įvertinti kokia granuliometrinės sudėties įtaka seisminiams greičiams.

5.1.1 Bendra skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties

39 paveiksle vaizduojama skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo granuliometrinės sudėties 3 skirtingose grupėse:

1. Genezė – pagrindinė morena g III nm₃ ir kraštiniai dariniai gt III nm₃
2. Grunto tipas – smėlingas molis SaCl ir dulkis bei smėlingas molis SaSiCl
3. Amžius – viršutinio pleistoceno viršutinio Nemuno Grūdų posvitė ir Baltijos posvitė.

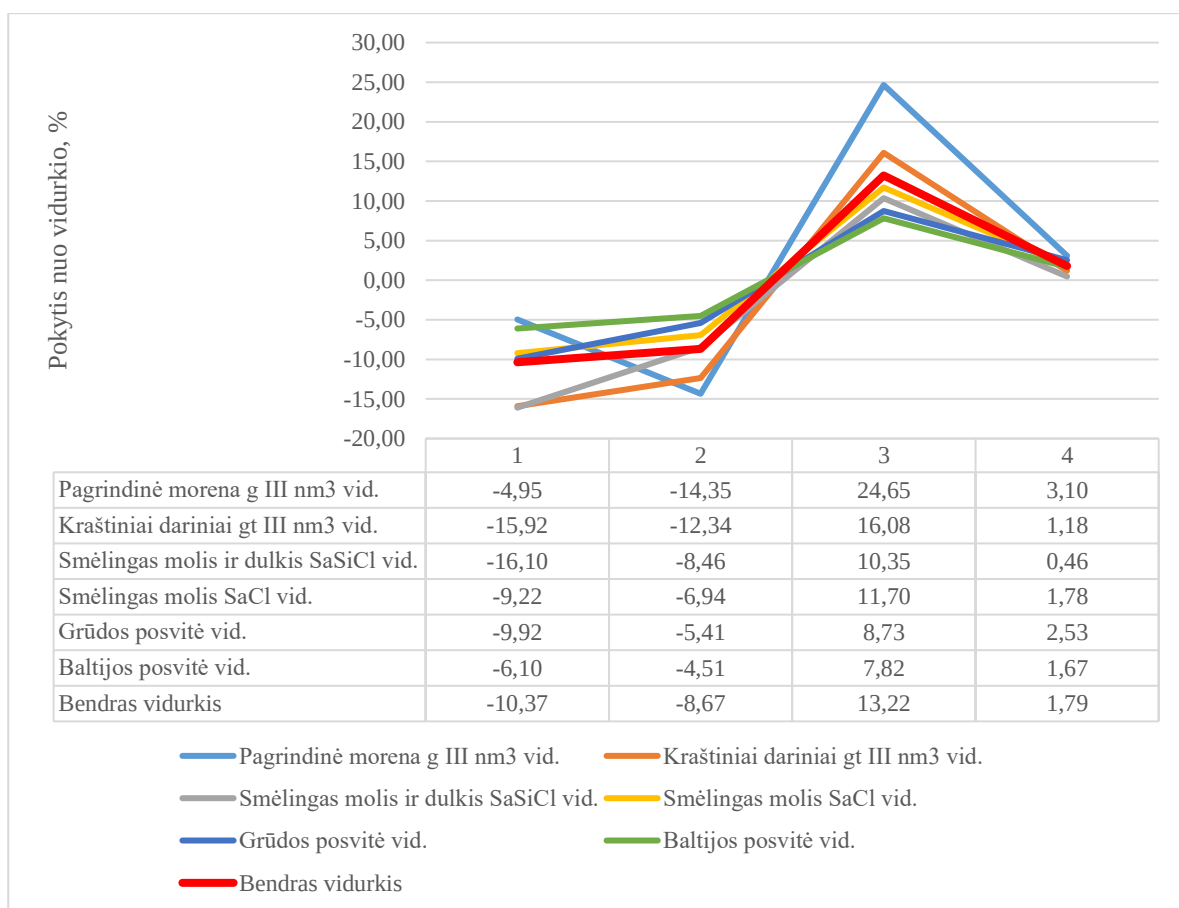
Analizuotas procentinis V_s pokytis, priklausantis nuo pagrindinių frakcijų dominavimo – molio, dulkių, smėlio ir žvyro.

Tendencija visų gruntų atveju yra vienareikšmiška: smėlio frakcijos dominavimas lemia ryškų V_s padidėjimą, o didžiausias pokytis fiksuotas pagrindinėje morenoje (+24,65 %) ir smėlingame molyje ir dulkyje (+20,45 %). Grūdų ir Baltijos posvitės gruntai rodo mažesnę, bet vis tiek aiškų V_s didėjimą (~11–13 %). Vidutiniškai smėlio frakcija padidina V_s +13,22 %.

Molio ir dulkių frakcijos mažina skersinės bangos greičiui. Labiausiai šis poveikis išreikštas kraštinuose dariniuose (–15,92 % moliui ir –12,34 % dulkių), smėlingame molyje (–16,10 % moliui) ir smėlingame molyje ir dulkyje (–16,10 % moliui). Šie rezultatai patvirtina, kad smulkios frakcijos lemia didesnę poringumo koeficiento vertę, plastines savybes.

Žvyro frakcija daro mažiausią poveikį V_s pokyčiui. Ši frakcija nuosaikiai didina skersinės bangos greitį visuose grunto tipuose (nuo +0,46 % iki +4,96 %), išskyrus smėlingą molį, kur pokytis vos +0,99 %. Tai leidžia daryti prielaidą, kad žvyras neveikia bangos sklaidimo taip efektyviai kaip smėlis.

Tolimesniuose skyriuose, išskaidžius kiekvienos grupės gruntuos pagal skersinės bangos greitį, bus pateikti greičių pokyčiai nustatytuose intervaluose pagal grunto grupavimo tipą ir V_s greitį.



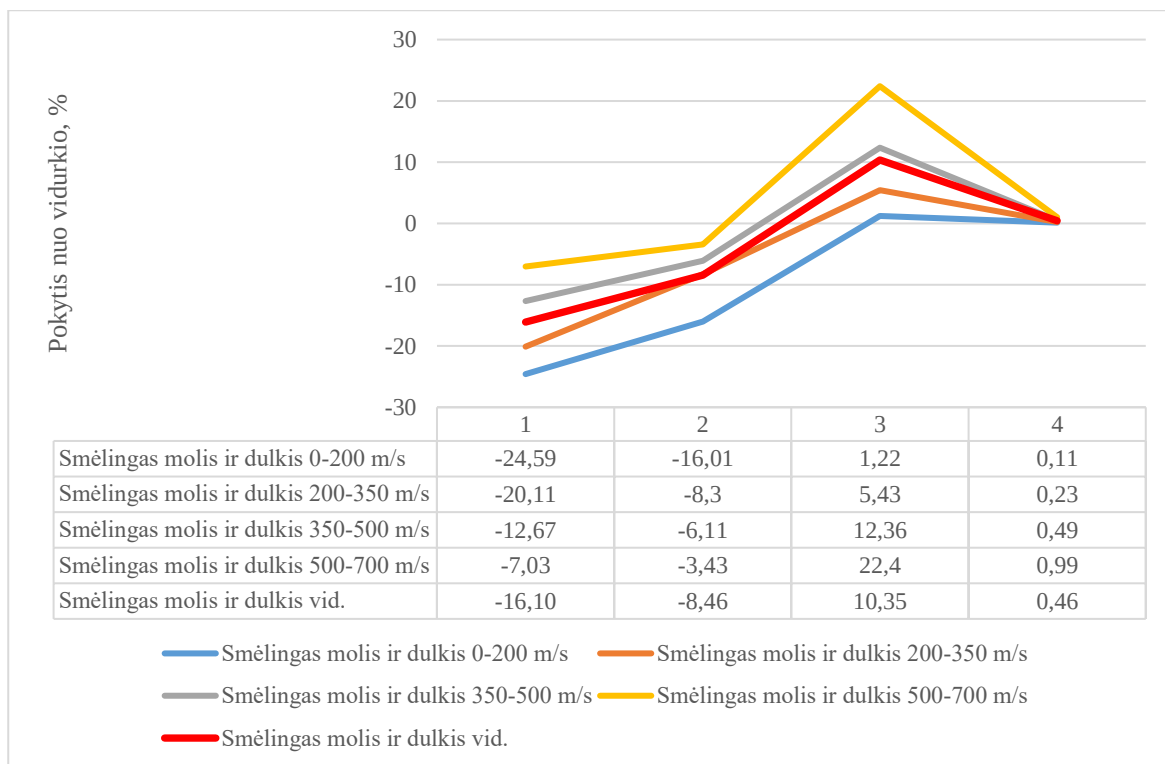
39 pav. Bendra skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties

5.1.2 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties smėlingame molyje ir dulkėje

40 paveiksle pateikta skersinės bangos greičio V_s procentinė priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties, kuriuose vyrauja smėlingas molis ir dulkis. Analizė suskirstyta pagal keturis greičio intervalus, o kiekvienos frakcijos įtaka įvertinta lyginant pokyčius nuo bendros vidutinės V_s reikšmės.

Rezultatai atskleidžia aiškią tendenciją – smėlio frakcija reikšmingai didina skersinės bangos greitį visose greičio kategorijose. Didžiausias teigiamas pokytis fiksuotas intervale 500–700 m/s (+22,44 %), o vidutiniškai smėlio frakcija lemia +10,35 % padidėjimą. Tai rodo, kad didesnis smėlio kiekis mišinyje gerina dalelių kontaktinę struktūrą ir didina grunto standumą.

Molio ir dulkių frakcijos koreliuoja su reikšmingai mažesniais V_s – ypač molio atveju (iki –24,59 % mažiausio greičio intervale). Žvyro frakcijos įtaka išlieka minimali, tačiau dažniausiai teigiama.



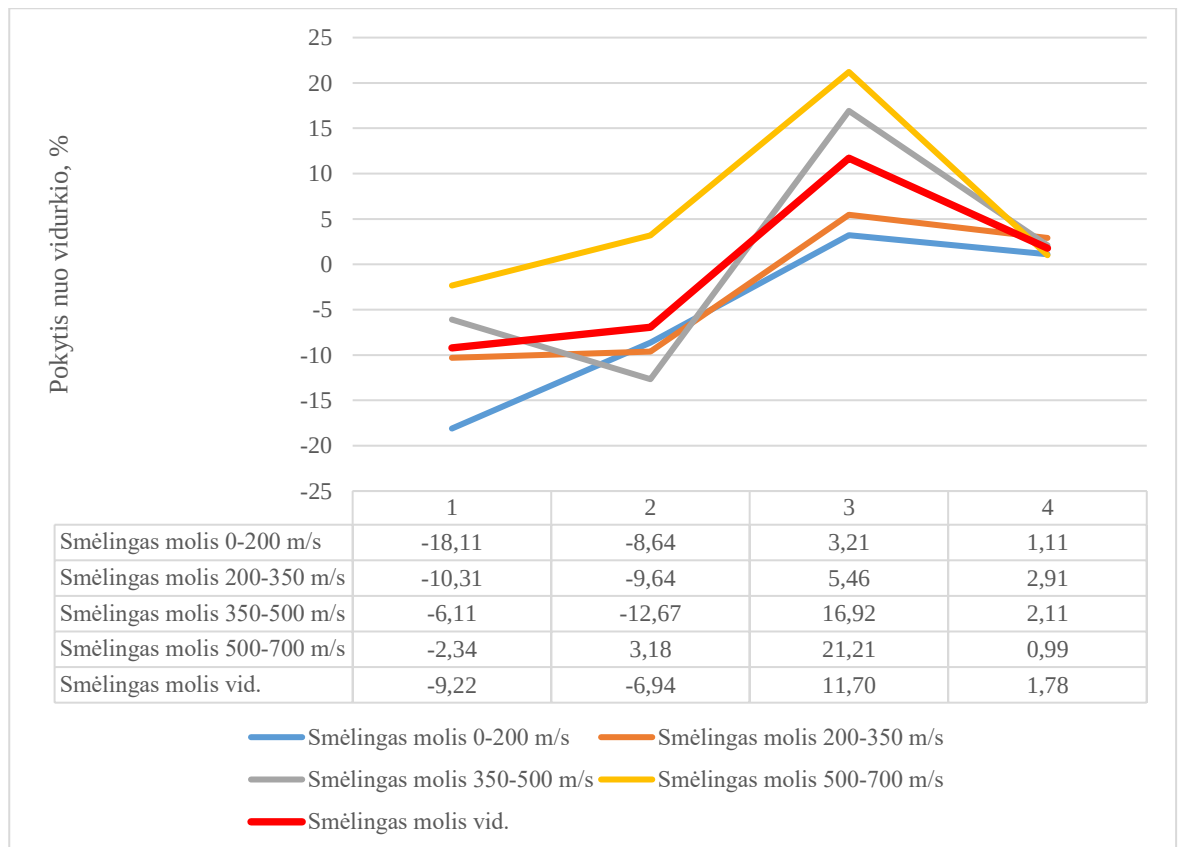
40 pav. Skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties smėlingame molyje ir dulkėje

5.1.3 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties smėlingame molyje

41 paveiksle pavaizduota skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo granulometrinės sudėties smėlingame molyje. X ašyje nurodytos skirtingos grunto frakcijos (1 – molis, 2 – dulkis, 3 – smėlis, 4 – žvyras), o Y ašyje – V_s pokytis, išreikštas procentiniu nuokrypiu nuo bendro vidurkio. Analizuojami penki greičio intervalai: 0–200 m/s, 200–350 m/s, 350–500 m/s, 500–700 m/s ir visų duomenų vidurkis.

Rezultatai rodo, kad didėjant smėlio frakcijos kiekiui grunte, skersinės bangos greitis ryškiai padidėja – visose V_s kategorijose fiksuojamas teigiamas nuokrypis – iki +21,21 %. Tuo tarpu molio ir dulkių frakcijų dominavimas dažniausiai lemia neigiamą pokytį, ypač žemiausiame greičio intervale – –18,11 % molio frakcija esant $V_s = 0–200$ m/s intervale.

Didžiausias skersinės bangos greičio padidėjimas pastebimas vyraujant smėlio frakcijai, o žvyro frakcijos poveikis minimalus, tačiau dažniausiai teigiamas. Artėjant grunto sudėčiai link optimalaus mišinio dalelės susispaudžia tankiau, todėl seisminė banga gali sklirti greičiau.

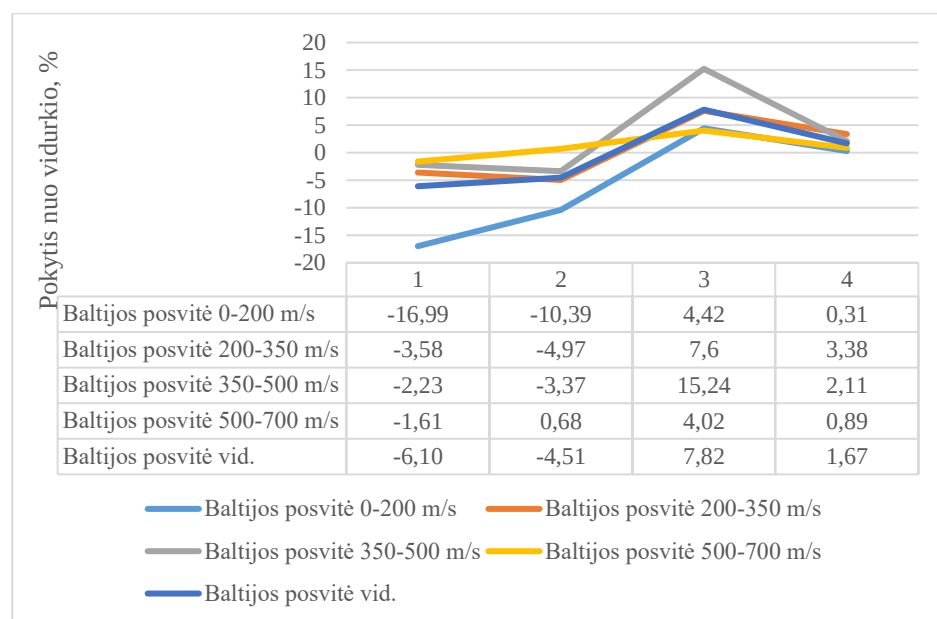


41 pav. Skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties smėlingame molyje

5.1.4 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granulometrinės sudėties viršutinio Nemuno Baltijos posvītės g III bl gruntuose

42 paveiksle pavaizduota skersinės bangos greičio V_s procentinio nuokrypio nuo vidutinės vertės priklausomybė nuo granulometrinės sudėties viršutinio Nemuno Baltijos posvītės gruntuose. X ašyje nurodytos pagrindinės frakcijos: 1 – molis, 2 – dulkis, 3 – smėlis, 4 – žvyras, Y ašyje – V_s pokytis procentais nuo vidurkio. Analizuojami keturi greičio intervalai: 0–200 m/s, 200–350 m/s, 350–500 m/s, 500–700 m/s, pateikta bendra tendencija.

Duomenys atskleidžia aiškią tendenciją: smėlio frakcija lemia reikšmingą skersinės bangos greičio padidėjimą visose greičio kategorijose iki +15,24 % esant $V_s = 350\text{--}500$ m/s intervale. Smėlingesnė grunto sudėtis susijusi su didesniu grunto standumu ir tankumu. Tuo tarpu molio frakcija siejama su ryškiu V_s sumažėjimu, ypač mažiausio greičio intervale (–16,99 %), o tai atspindi mažesnę standumą molinguose gruntuose. Dulkio frakcija irgi pasižymi neigiamu poveikiu, tačiau ne tokiu ryškiu kaip molis. Žvyro frakcijos įtaka dažniausiai teigiama, bet nedidelė - nuo +0,31 % iki +3,38 %.

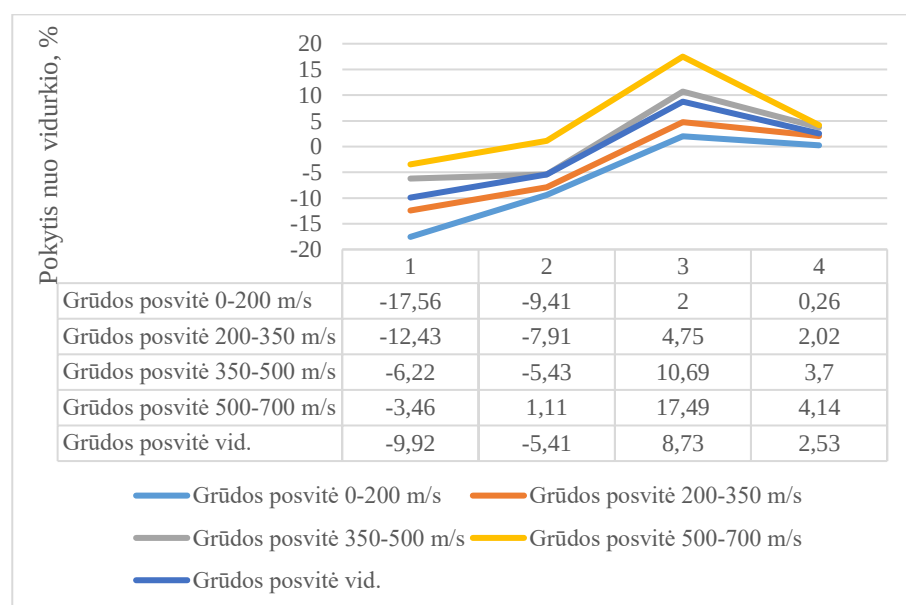


42 pav. Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties – Baltijos posvitės gruntai

5.1.5 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties Grūdų posvitės g III gruntuose

43 paveiksle atvaizduota skersinės bangos greičio V_s procentinė priklausomybė nuo granuliometrinės sudėties viršutinio Nemuno Grūdų posvitės gruntuose. Kiekviena linija žymi V_s intervalą: 0–200 m/s, 200–350 m/s, 350–500 m/s, 500–700 m/s, o X ašyje pateiktos pagrindinės grunto frakcijos: molis (1), dulkis (2), smėlis (3), žvyras (4).

Rezultatai rodo aiškią tendenciją: smėlio frakcija daro didžiausią teigiamą poveikį V_s visose greičio kategorijose. Esant $V_s = 500–700$ m/s, bangos greitis padidėja net +17,69 %, o vidutiniškai – +8,73 %. Žvyro frakcija taip pat rodo teigiamą, tačiau kiek mažesnę poveikį. Molio ir dulkių frakcijos siejamos su žymiu V_s sumažėjimu. Ypač tai ryšku mažiausio greičio intervale: –17,56 % ties molio ir $V_s = 0–200$ m/s, kas atspindi mažesnę šių frakcijų grunto standumą.

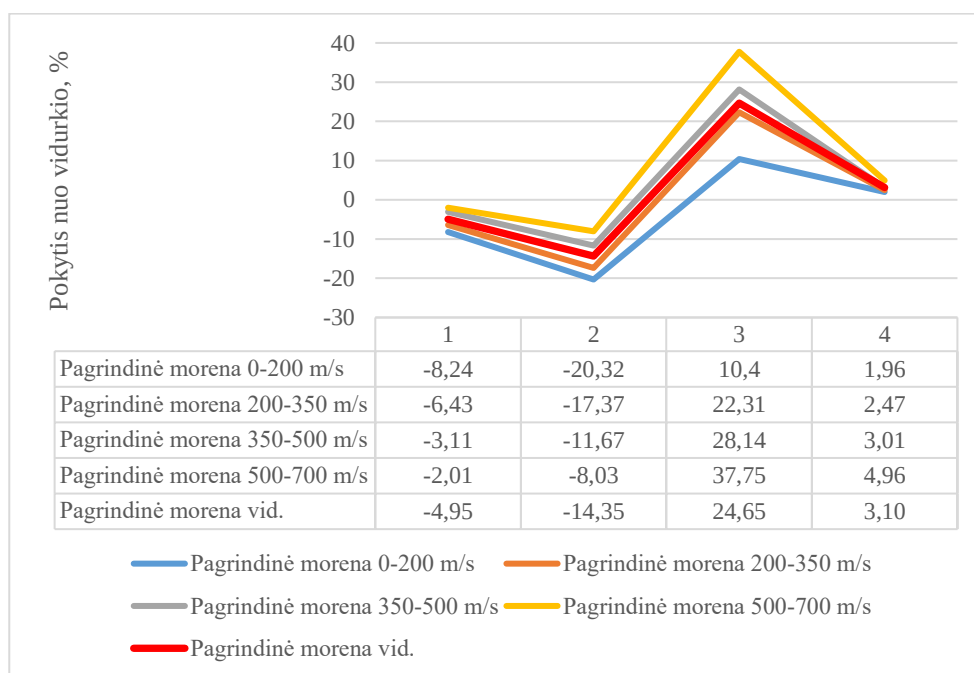


43 pav. Skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties – Grūdų posvitės gruntai

5.1.6 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties pagrindinės morenos g III nm₃ genezės gruntuose

44 paveiksle pavaizduota skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo pagrindinės morenos granuliometrinės sudėties. Duomenys pateikti procentiniu nuokrypiu nuo vidurkio, atskirai išskiriant skirtingus greičio intervalus: 0–200 m/s, 200–350 m/s, 350–500 m/s, 500–700 m/s. X ašyje pateiktos pagrindinės frakcijos: molis (1), dulkis (2), smėlis (3), žvyras (4).

Analizė atskleidžia itin ryškią smėlio frakcijos įtaką skersinės bangos greičio didėjimui: visose V_s kategorijose fiksuojamas teigiamas pokytis, kuris intervale 500–700 m/s pasiekia +37,56 %, o vidutinis pokytis – +24,65 %. Dominuojant molio ir dulkių frakcijoms grunte pastebimas neigiamas V_s pokytis – ypač dulkių atveju (iki –20,32 % ties $V_s = 0–200$ m/s). Žvyro frakcija visuose intervaluose išlaiko nuosaikų teigiamą poveikį (+1,96–+4,96 %), tačiau ne tokį ryškų kaip smėlis.



44 pav. Skersinės bangos greičio V_s priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties - pagrindinė morena

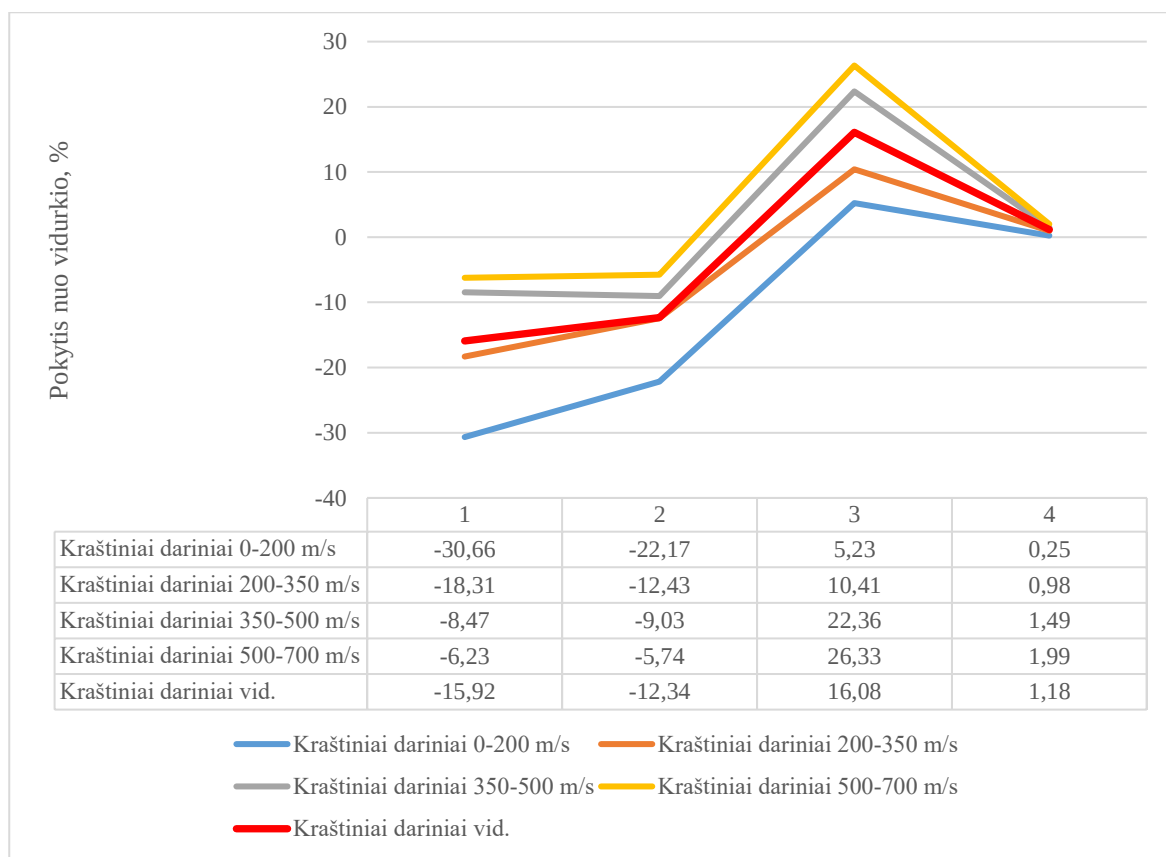
5.1.7 Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties kraštinių darinių gt III nm₃ genezės gruntuose

45 paveiksle pavaizduotas skersinės bangos greičio V_s nuokrypis nuo vidutinės reikšmės priklausomai nuo granuliometrinės sudėties kraštiniuose dariniuose. Analizė suskirstyta pagal keturis greičio intervalus 0–200 m/s, 200–350 m/s, 350–500 m/s, 500–700 m/s, pateikiant kiekvienos frakcijos (molio, dulkių, smėlio, žvyro) įtaką atskirai.

Rezultatai rodo, kad molio frakcija turi stipriausiai neigiamą įtaką skersinės bangos greičiui – mažiausio greičio intervale $V_s = 0–200$ m/s V_s sumažėja –30,66 %, o vidutiniškai – –15,92 %. Dulkių frakcija turi kiek mažesnę neigiamą poveikį. Smėlio frakcija pasižymi aiškiai teigiama įtaka, ypač intervale 500–700 m/s, kur V_s pokytis siekia +26,33 %. Žvyro frakcija turi nežymų, bet dažniausiai teigiamą poveikį – iki +1,90 %.

Galima teigti, kad labiausiai veikia skersinės bangos greitį, nes gruntas sudaro tankesnę terpę, kuri palankesnė seisminei bangai skliti. Tuo tarp smulkesnės dalelės, ypač molis, susijusios su

didesniu poringumu, dėl ko V_s vertės smarkiai mažėja. Kraštinių darinių genezės gruntuose šis kontrastas ypatingai gerai išreikštas, rodantis didesnę grunto jautrumą granuliometrinei sudėčiai.



45 pav. Skersinės bangos greičio priklausomybė nuo grunto granuliometrinės sudėties - kraštiniai dariniai

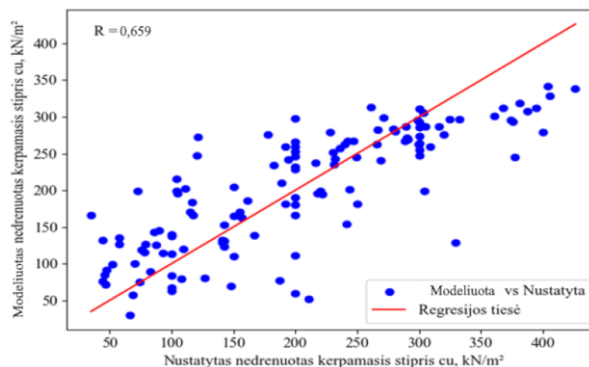
5.2 Regresinių lygčių sudarymas pagal sekliosios seismikos bandymu ir laboratoriniais metodais nustatytus rodiklius

Šiame skyriuje siekta sudaryti regresines lygtis, leidžiančias prognozuoti nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u vertes, remiantis kitais paprasčiau nustatomais grunto parametrais. Tokios lygties sudarymas aktualus, kai tiesioginiai laboratoriniai bandymai negalimi arba riboti. Analizuojami duomenys gauti iš įvairių gruntų tipų, vertinant ryšius tarp c_u ir skersinės bangos greičio, granuliometrinės sudėties ar drėgnio w . Regresijos metodu siekiama nustatyti statistškai reikšmingas priklausomybes ir sukurti prognozinčius modelius, kurie padėtų tiksliai įvertinti grunto stiprumą inžinerinėje praktikoje.

5.2.1 Pagrindinės morenos g III nm₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

46 paveiksle pavaizduota laboratoriniais metodais nustatyto ir regresiniu modeliu prognozuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u priklausomybė atrinktuose duomenyse pagal genezę (pagrindinė morena) ir grunto tipą (smėlingas molis). Horizontalioje ašyje pateikiamos vienašio gniuždymo bandymu nustatytos reikšmės, o vertikalioje – prognozuotos reikšmės. Mėlynais taškais žymimi konkretūs duomenų taškai, o raudona linija vaizduojama tiesinė regresija tarp šių dviejų kintamųjų.

Koreliacijos koeficientas $R=0,659$ rodo vidutiniškai stiprų teigiamą tiesinį ryšį tarp nustatyto ir prognozuoto c_u . Tai leidžia teigti, kad pasirinktas regresinis modelis pakankamai gerai prognozuoja c_u reikšmes tiriamame gruntų intervale. Nors tam tikrose srityse, ypač esant mažesnėms vertėms nei 100 kN/m^2 , pastebima didesnė duomenų sklaida, tačiau bendra tendencija rodo pakankamą modelio patikimumą.



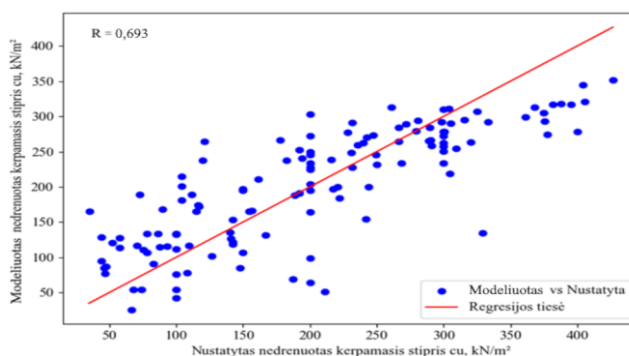
46 pav. Pagrindinės morenos g III nm₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir prognozuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Sudaryta regresinė formulė, tinkama pagrindinės morenos smėlingo molio nedrenuoto kerpamojo stiprio nustatymui (43).

$$c_u = 0,694 \times V_s + 431,71 \times \rho - 429,7 \times w + 242,7 \times e - 0,642 \times \text{molis, \%} - 0,291 \times \text{dulkis, \%} - 1,264 \times \text{smėlis, \%} + 0,999 \times \text{žvyras, \%} - 17,35 \times I_c \quad (43)$$

Daugiausiai įtakos nedrenuoto kerpamojo stiprio vertei daro skersinės bangos greitis. Šio parametro t kriterijaus reikšmė siekia 8,817, P reikšmė – 0,000. Mažesniu reikšmingumo pasižymi tankis ρ , grunto drėgnis w , molio ir smėlio frakcijos kiekis. Šių rodiklių t kriterijaus reikšmė svyruoja tarp -2,843 iki 1,709. Parametrai nėra labai reikšmingi, tačiau pašalinti iš galutinės prognozės jų negalima.

Pašalinus iš regresinio modelio dulkių ir žvyro frakcijos kieki, pastebimas nežymus koreliacijos koeficiento padidėjimas – nuo 0,659 iki 0,693. Tačiau padidėja grunto drėgnio w ir poringumo koeficiento e įtaka prognozuojamai nedrenuoto kerpamojo stiprio vertei – ji pakinta nuo 0,028 drėgniui ir 0,041 poringumo koeficientui iki 0,013 drėgniui bei 0,016 poringumo koeficientui. 47 pav. vaizduojamas atnaujintas modelis be dulkių ir žvyro frakcijos.



47 pav. Optimizuota pagrindinės morenos g III nm₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Pašalinus šiuos 2 parametrus iš lygties gaunama šiek tiek geresniu koreliacijos koeficientu pasižyminti regresinė lygtis (43):

$$c_u = 0,692 \times V_s + 430,76 \times \rho - 434,5 \times w + 230,8 \times e - 0,258 \times \text{molis, \%} - 1,485 \times \text{smėlis, \%} - 17,54 \times I_c \quad (43)$$

7 lentelėje pateikti statistiniai parametrai prieš ir po formulės optimizavimo.

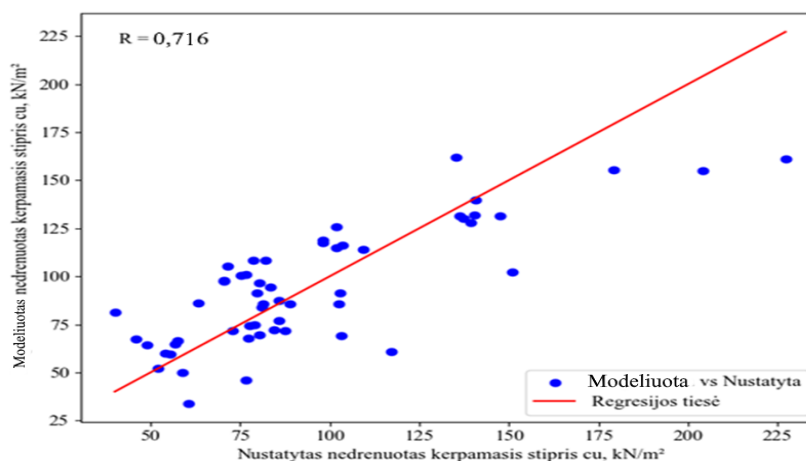
7 lentelė. Statistiniai parametrai prieš ir po korecinės lygties optimizavimo

Grunto savybė	p reikšmė ($P> t $) prieš	p reikšmė ($P> t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,000	0,000	207,26
Tankis ρ	0,009	0,008	0,021
Drėgnis w	0,028	0,013	0,009
Poringumo koeficientas e	0,041	0,016	0,042
Konsistencijos rodiklis I_c	0,042	0,046	0,038
Molio kiekis, %	0,043	0,039	0,530
Dulkio kiekis, %	0,066	Nelieka	1,230
Smėlio kiekis, %	0,014	0,010	1,093
Žvyro kiekis, %	0,311	Nelieka	0,319

5.2.2 Kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

Kita tirto grunto grupė – kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingas molis. Koreliacijos koeficientas – 0,716. Daugiausiai įtakos nedrenuoto kerpamojo stiprio vertei daro skersinės bangos greitis. Šio parametro t kriterijaus reikšmė siekia 6,270, P reikšmė – 0,000. Mažiau reikšmingi parametrai – grunto drėgnis w , molio frakcijos kiekis ir smėlio frakcijos kiekis. Šių rodiklių t kriterijaus reikšmė svyruoja tarp -1,851 iki 1,517. Parametrai nėra labai reikšmingi, tačiau turi įtakos galutinei prognozei vertei.

Pagrindinis skirtumas tarp kraštinių darinių ir pagrindinės morenos modelių yra tas, kad kraštiniuose dariniuose mažiau reikšmingas parametras yra poringumo koeficientas e . Mažiausiu reikšmingumu formulėje pasižymi dulkio ir žvyro frakcijos, %. Šių parametru P reikšmė viršija nustatytą 0,05 ribą. 48 paveiksle pavaizduota koreliacinė kreivė.

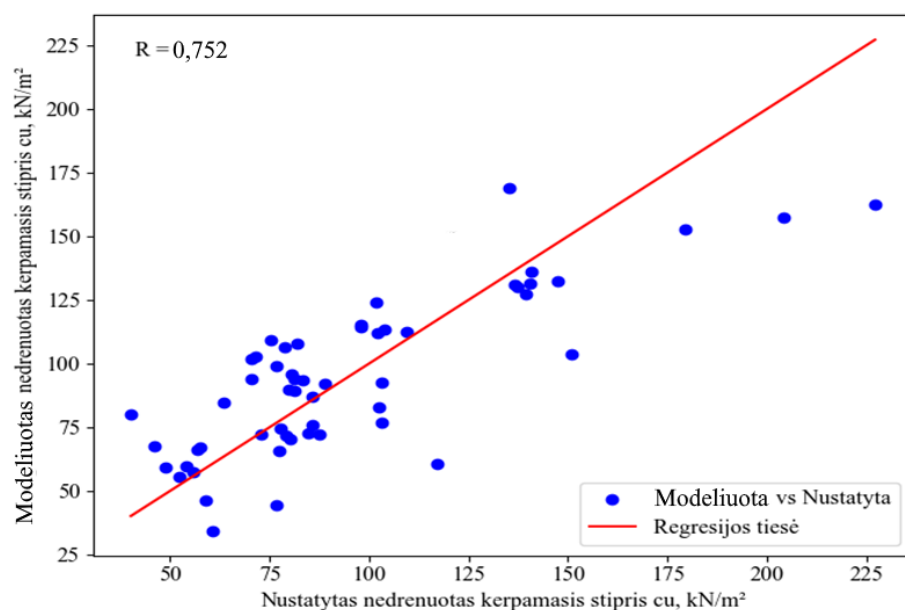


48 pav. Kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Sudaryta koreliacinė lygtis, tinkama nedrenuotam kerpamajam stipriui gauti kraštinių darinių smėlingame molyje (44):

$$c_u = 0,314 \times V_s + 313,42 \times \rho - 272,27 \times w + 92,06 \times e + 1,09 \times \text{molis, \%} - 0,194 \times \text{dulkis, \%} - 0,186 \times \text{smėlis, \%} - 2,72 \times \text{žvyras, \%} + 76,20 \times I_c \quad (44)$$

Iš regresinio modelio pašalinus dulčio ir žvyro frakciją, nežymiai pakilo koreliacijos koeficiento vertė – iš 0,716 iki 0,752, pakilo grunto drėgnio reikšmingumas – nuo 0,042 iki 0,016, nukrito molio frakcijos reikšmingumas prognozuoto kerpamojo stiprio vertei – nuo 0,022 iki 0,049. 49 pav. vaizduojamas atnaujintas modelis. 8 lentelėje pateikti statistiniai parametrai.



49 pav. Optimizuota kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Optimizuota koreliacinė lygtis, tinkama kraštinių darinių smėlingo molio gruntui (45):

$$c_u = 0,281 \times V_s + 286,63 \times \rho - 327,41 \times w + 117,36 \times e + 1,19 \times \text{molis, \%} - 0,279 \times \text{smėlis, \%} + 74,92 \times I_c \quad (45)$$

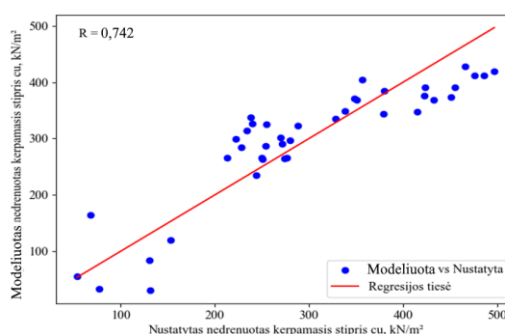
8 lentelė. Statistiniai parametrai prieš ir po formulės optimizavimo

Grunto savybė	p reikšmė ($P > t $) prieš	p reikšmė ($P > t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,000	0,000	27,01
Tankis ρ	0,012	0,011	0,006
Drėgnis w	0,042	0,016	0,004
Poringumo koeficientas e	0,031	0,029	0,009
Konsistencijos rodiklis I_c	0,022	0,021	0,042
Molio kiekis, %	0,022	0,049	0,771

Dulkio kiekis, %	0,217	Nelieka	1,720
Smėlio kiekis, %	0,008	0,008	1,310
Žvyro kiekis, %	0,341	Nelieka	0,328

5.2.3 Pagrindinės morenos g III nm₃ smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

Analizuoja grupę, sudaryta iš pagrindinės morenos smėlingo molios ir dulkio gruntų (50 pav.). Atlikus regresinę analizę, gauta lygtis, kurios koreliacijos koeficientas $R=0,742$. Reikšmingiausias rodiklis – skersinės bangos greitis ($P=0,000$), šiek tiek mažiau – tankis ρ ($P=0,014$). Mažiausiai reikšmingi – dulkio ir žvyro frakcija bei konsistencijos rodiklis. Šių parametų P vertės – atitinkamai 0,980, 0,840 ir 0,698.

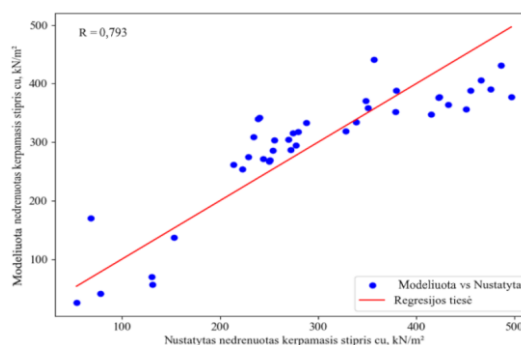


50 pav. Pagrindinės morenos g III nm₃ smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Sudaryta regresinė formulė (45):

$$c_u = 0,632 \times V_s + 871,26 \times \rho - 411,34 \times w - 232,52 \times e - 2,38 \times \text{molis, \%} - 0,07 \times \text{dulkis, \%} - 0,54 \times \text{smėlis, \%} - 5,34 \times \text{žvyras, \%} - 27,87 \times I_c \quad (45)$$

Optimizavus modelį pagerėja jo kokybė – koreliacijos koeficientas pakyla iki $R=0,793$ (51 pav.). Reikšmingiausiu rodikliu išlieka V_s , tačiau drėgnio P vertė kyla nuo 0,044 iki 0,032, rodanti išaugusį rodiklio reikšmingumą. Kiti parametrai patiria mažą pokytį. Tankio reikšmingumas sumažėja iki 0,035. 9 lentelėje pateikta suvestinė statistinių parametų informacija.



51 pav. Optimizuota pagrindinės morenos g III nm₃ smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Atnaujinta regresinė formulė, tinkanti pagrindinės morenos smėlingo molio ir dulkio nedrenuoto kerpamojo stiprio vertei apskaičiuoti (46):

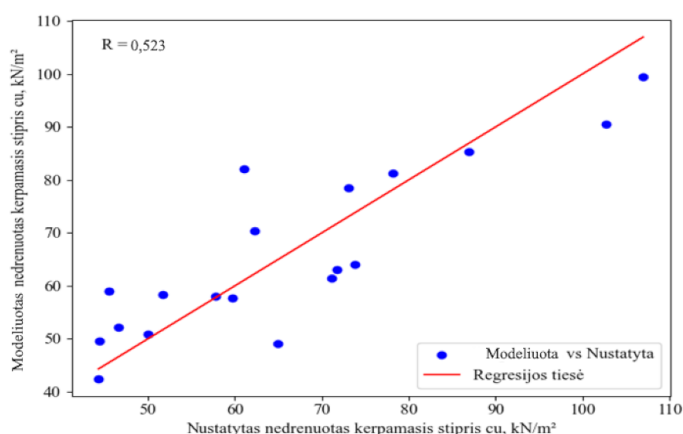
$$c_u = 0,641 \times V_s + 868,33 \times \rho - 278,82 \times w - 255,62 \times e - 0,104 \times \text{molis, \%} - 0,385 \times \text{smėlis, \%} \quad (46)$$

9 lentelė. Kraštiniuose dariniuose sutinkamo smėlingo molio ir dulkio statistinių parametų suvestinė lentelė prieš ir po optimizavimo

Grunto savybė	p reikšmė ($P> t $) prieš	p reikšmė ($P> t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,000	0,000	59,11
Tankis ρ	0,014	0,035	0,006
Drėgnis w	0,044	0,032	0,007
Poringumo koeficientas e	0,039	0,041	0,012
Konsistencijos rodiklis I_c	0,698	Nelieka	0,066
Molio kiekis, %	0,031	0,021	1,132
Dulkio kiekis, %	0,980	Nelieka	2,001
Smėlio kiekis, %	0,027	0,019	0,999
Žvyro kiekis, %	0,840	Nelieka	0,416

5.2.4 Kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

Analizuojant kraštinių darinių smėlingo molio ir dulkio sudaryta daugianarė koreliacinė lygtis. Lygties koreliacijos koeficientas $R=0,523$. Reikšmingiausias rodiklis – skersinės bangos greitis ($P=0,001$), mažiau reikšmingi – molio frakcijos kiekis ($P=0,023$) ir konsistencijos rodiklis ($P=0,031$). Mažiausiai reikšmingi – dulkio ($P=0,753$), žvyro ($P=0,690$) frakcijos bei poringumo koeficientas ($P=0,904$). Šio tipo duomenų imtis yra maža ($n=19$). 52 paveikslas rodo smėlingo molio ir dulkio nustatyto ir prognozuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio koreliacinę kreivę.

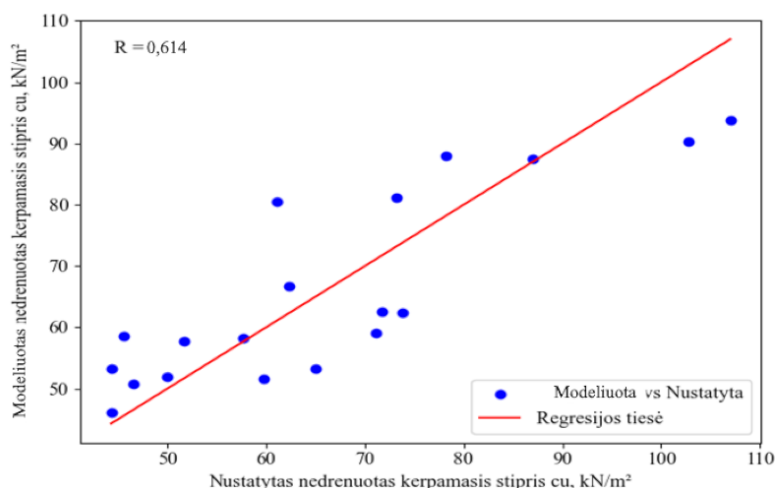


52 pav. Kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

47 formulė aprašo daugianarę koreliacinę lygtį:

$$c_u = 0,157 \times V_s + 75,17 \times \rho - 114,59 \times w - 8,72 \times e - 1,12 \times \text{molis, \%} + 0,171 \times \text{dulkis, \%} + 0,150 \times \text{smėlis, \%} - 1,87 \times \text{žvyras, \%} + 29,50 \times I_c (47)$$

Optimizuojant šį modelį pašalinami mažiausiai reikšmingi rodikliai (53 pav.). Koreliacijos koeficientas pakyla iki $R=0,614$. Pakinta molio frakcijos P vertė – nuo 0,023 iki 0,011. Skersinės bangos P vertė nekinta – išlieka svarbiausiu parametru lygtyje ($P=0,000$). 10 lentelėje pateiktos statistinės analizės vertės.



53 pav. Optimizuota kraštinių darinių gt III nm₃ smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Atnaujinta koreliacinė lygtis, skirta kraštinių darinių smėlingo molio ir dulkio nedrenuoto kerpamojo stiprio apskaičiavimui (48):

$$c_u = 0,126 \times V_s + 67,61 \times \rho - 94,40 \times w - 1,02 \times \text{molis, \%} + 0,02 \times \text{smėlis, \%} + 26,73 \times I_c (48)$$

10 lentelė. Suvestinė statistinių parametų lentelė

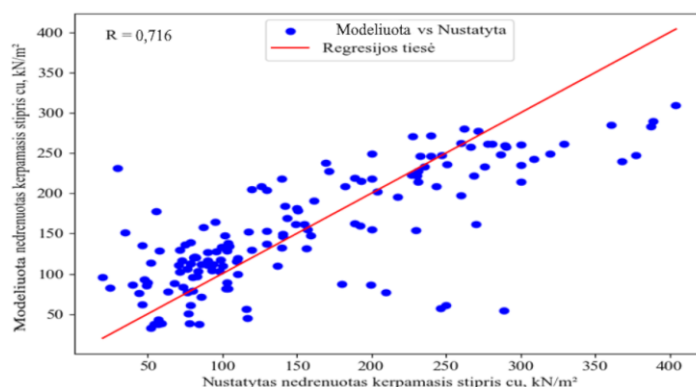
Grunto savybė	p reikšmė ($P> t $) prieš	p reikšmė ($P> t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,001	0,000	21,46
Tankis ρ	0,009	0,024	0,009
Drėgnis w	0,036	0,028	0,011
Poringumo koeficientas e	0,904	Nelieka	0,010
Konsistencijos rodiklis I_c	0,024	0,016	0,071
Molio kiekis, %	0,023	0,011	0,921
Dulkio kiekis, %	0,753	Nelieka	3,160
Smėlio kiekis, %	0,017	0,025	1,473
Žvyro kiekis, %	0,690	Nelieka	0,556

5.2.5 Baltijos posvitei g III bl priklausančio smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio įvertinimas

Kita analizės grupė – Baltijos posvitės smėlingas molis. Sudaryto modelio koreliacijos koeficientas $R=0,716$ (54 pav.). Modelio tikslumui daugiausiai įtakos daro skersinės bangos greitis. Jos t reikšmė siekia 9,503, o reikšmingumas – 0,000. Mažiau reikšmingas parametras – tankis – pasižymi t testo verte 2,950, o P vertė – 0,004. Mažiausiu reikšmingumu šioje gruntų kategorijoje pasižymi dulquio frakcijos kiekis. Jo P reikšmė siekia vos 0,736, t statistikos rodiklis – -1,587.

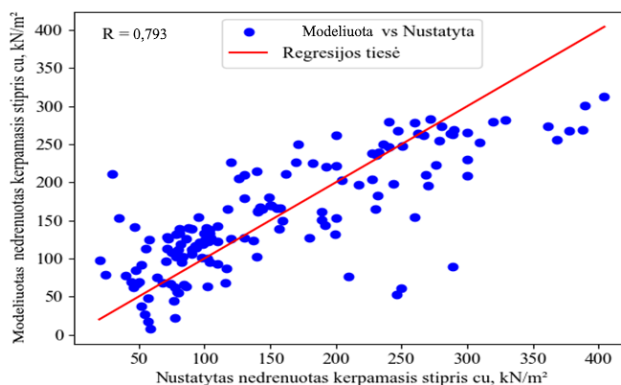
Sudaryta daugianarė koreliacinė formulė Baltijos posvitės smėlingo molio gruntui, leidžianti rasti nedrenuoto kerpamojo stiprio vertę (49):

$$c_u = 0,579 \times V_s + 217,77 \times \rho - 454,26 \times w + 144,63 \times e + 1,86 \times \text{molis, \%} - 0,80 \times \text{dulgis, \%} - 0,05 \times \text{smėlis, \%} - 1,32 \times \text{žvyras, \%} + 1,69 \times I_c \quad (49)$$



54 pav. Baltijos posvitės g III bl smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Iš regresinio modelio pašalinus dulquio, smėlio ir žvyro frakcijos kieki, pakilo koreliacijos koeficiento vertė – iš 0,768 iki 0,793, smarkiai pakilo grunto drėgnio reikšmingumas – nuo 0,049 iki 0,006. Tačiau nukrito molio frakcijos ir skersinės bangos greičio reikšmingumas – moliui nuo 0,012 iki 0,039, o V_s – nuo 0,000 iki 0,009. 55 pav. vaizduojamas atnaujintas modelis be smėlio. 11 lentelėje pateikta suvestinė statistinė informacija apie modelį.



55 pav. Optimizuota Baltijos posvitės g III bl smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Šiuo atveju dauginarė lygtis keičiasi į (50):

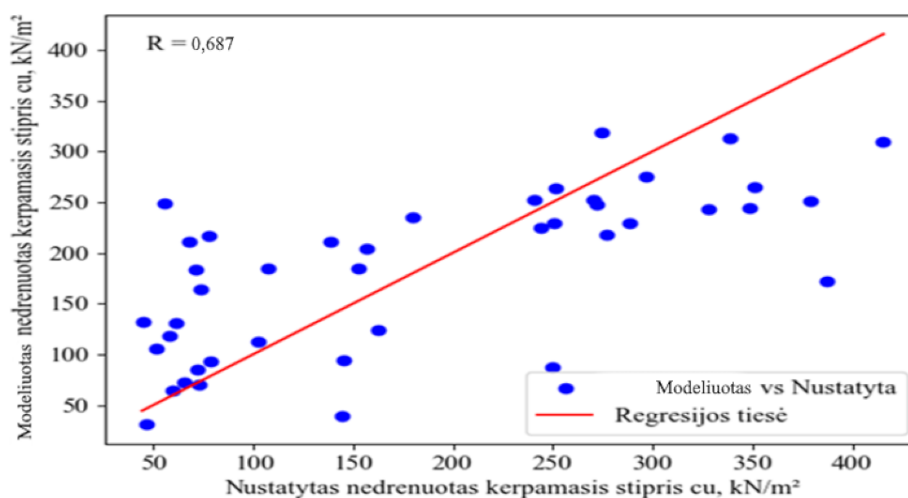
$$c_u = 0,571 \times V_s + 234,88 \times \rho - 452,79 \times w + 193,36 \times e + 1,38 \times \text{molis, \%} - 0,70 \times \text{smėlis, \%} + 6,36 \times I_c \quad (50)$$

11 lentelė. Statistiniai parametrai

Grunto savybė	p reikšmė ($P> t $) prieš	p reikšmė ($P> t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,000	0,009	51,31
Tankis ρ	0,004	0,009	0,004
Drėgnis w	0,049	0,006	0,003
Poringumo koeficientas e	0,031	0,016	0,009
Konsistencijos rodiklis I_c	0,044	0,031	0,061
Molio kiekis, %	0,012	0,039	0,875
Dulkio kiekis, %	0,412	Nelieka	1,496
Smėlio kiekis, %	0,036	0,022	3,112
Žvyro kiekis, %	0,056	Nelieka	0,941

5.2.6 Baltijos posvitės g III bl smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

Šioje grupėje analizuoti Baltijos posvitės smėlingo molio ir dulkio duomenys. Modelio koreliacijos koeficientas $R=0,687$ rodo tiesišką vidutiniškai stiprų ryšį. Didžiausias reikšmingumas – V_s , P reikšmė – 0,000, mažiau reikšmingi – molio frakcija ir tankis, atitinkamai 0,011 ir 0,020. Mažiausiai įtakos turi dulkis, žvyras ir konsistencijos rodiklis – atitinkamai 0,039, 0,041 ir 0,049. 56 paveikslas vaizduoja sudarytą modelį.

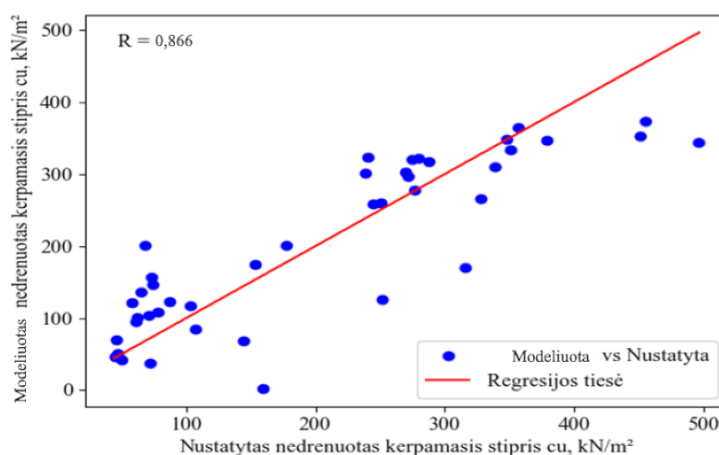


56 pav. Baltijos posvitės g III bl smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Regresijos metodu sudaryta formulė (51):

$$c_u = 0,701 \times V_s - 226,97 \times \rho - 407,70 \times w + 74,85 \times e - 0,52 \times \text{molis, \%} + 0,23 \times \text{dulkis, \%} - 0,86 \times \text{smėlis, \%} - 6,56 \times \text{žvyras, \%} - 62,21 \times I_c \quad (51)$$

Norint pagerinti modelio tikslumą atsisakyta 3 rodiklių – dulquio ir žvyro frakcijų bei konsistencijos rodiklio I_c . Naujai sudarytas regresinis modelis pavaizduotas 57 paveiksle. Koreliacijos koeficientas pakilo iki $R=0,866$. Reikšmingiausiu rodikliu išlieka skersinės bangos greitis su P verte 0,000. Nukrenta poringumo koeficiento reikšmingumas – nuo 0,013 iki 0,045. Atnaujintame modelyje matoma sąlyginai didelė duomenų sklaida (57 pav.).



57 pav. Baltijos posvitės g III bl smėlingo molio ir dulquio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Naujai sudaryta 52 formulė, leidžianti įvertinti nedrenuoto kerpamojo stiprio vertę Baltijos amžiaus smėlingame molyje ir dulkėje. 12 lentelė vaizduoja statistinę informaciją.

$$c_u = 0,656 \times V_s - 338,38 \times \rho - 201,71 \times w - 50,15 \times e - 0,25 \times \text{molis, \%} + 0,03 \times \text{smėlis, \%} \quad (52)$$

12 lentelė. Optimizuoto modelio statistiniai parametrai

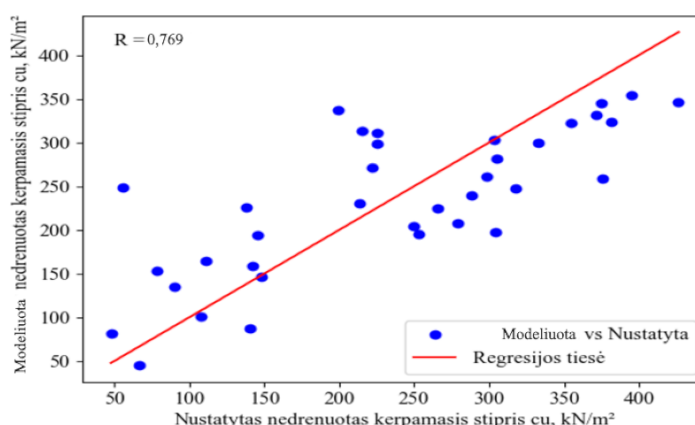
Grunto savybė	p reikšmė ($P> t $) prieš	p reikšmė ($P> t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,000	0,000	23,96
Tankis ρ	0,011	0,012	0,005
Drėgnis w	0,036	0,041	0,008
Poringumo koeficientas e	0,013	0,045	0,014
Konsistencijos rodiklis I_c	0,049	Nelieka	0,024
Molio kiekis, %	0,020	0,019	0,079
Dulquio kiekis, %	0,039	Nelieka	2,043
Smėlio kiekis, %	0,012	0,021	2,941
Žvyro kiekis, %	0,041	Nelieka	1,000

5.2.7 Grūdų posvitės g III gr smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

Kita analizuota gruntų grupė – Grūdų posvitei priklausantis smėlingas molis. Regresinio modelio koreliacijos koeficientas $R=0,769$. Šiame modelyje didžiausią reikšmingumą turi skersinės bangos greitis – jis siekia 0,001, mažiausią – dulvio ($P=0,906$) ir žvyro ($P=0,866$) frakcijos. Modelyje pastebimas didesnis taškų išsibarstymas aplink kreivę (58 pav.).

Sudaryta daugianarė koreliacinė lygtis (53):

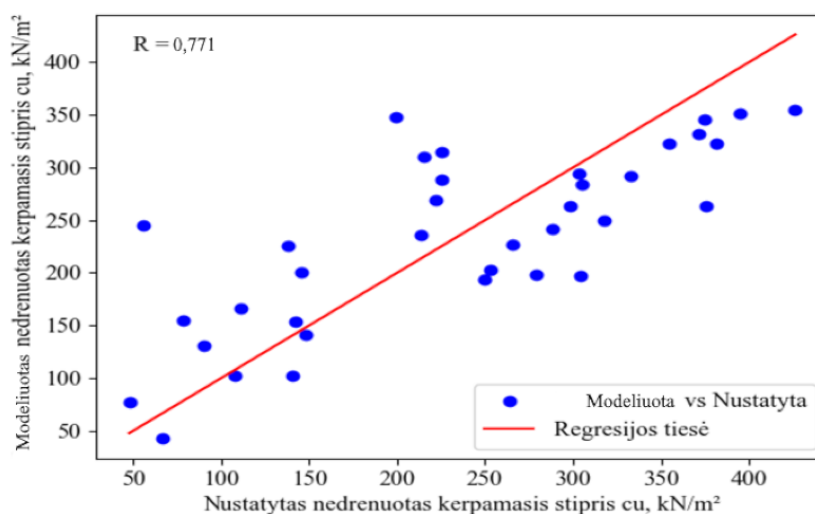
$$c_u = 0,669 \times V_s - 206,09 \times \rho - 388,70 \times w + 242,79 \times e - 0,01 \times \text{molis, \%} - 1,54 \times \text{dulkis, \%} - 1,66 \times \text{smėlis, \%} - 1,30 \times \text{žvyras, \%} + 20,06 \times I_c \quad (53)$$



58 pav. Grūdų posvitės g III gr smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Koreguojant formulę atsisakoma dulvio ir žvyro frakcijų – šiek tiek pakyla regresijos koeficiento vertė – nuo $R=0,769$ iki $R=0,771$. Pakyla molio frakcijos reikšmingumas – nuo 0,049 iki 0,021. Tačiau sumažėja poringumo koeficiento reikšmingumas – nuo 0,022 iki 0,039. 13 lentelėje aprašyta suvestinė statistinė informacija apie sudarytą modelį.

59 paveikslas vaizduoja atnaujintą modelį.



59 pav. Optimizuota Grūdų posvitės g III gr smėlingo molio SaCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Optimizuota formulė, tinkama Grūdų posvities smėlingo molio gruntų nedrenuoto kerpamojo stiprio apskaičiavimui (54):

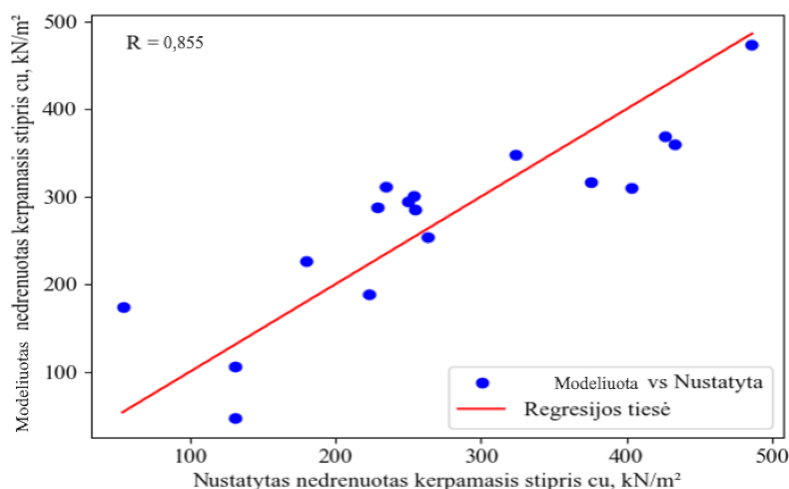
$$c_u = 0,670 \times V_s + 182,65 \times \rho - 489,89 \times w + 317,75 \times e + 1,40 \times \text{molis, \%} - 0,48 \times \text{smėlis, \%} + 18,18 \times I_c \quad (54)$$

13 lentelė. Statistinė informacija

Grunto savybė	p reikšmė ($P > t $) prieš	p reikšmė ($P > t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,001	0,000	31,92
Tankis ρ	0,012	0,013	0,005
Drėgnis w	0,021	0,016	0,006
Poringumo koeficientas e	0,022	0,039	0,009
Konsistencijos rodiklis I_c	0,032	0,016	0,016
Molio kiekis, %	0,049	0,021	0,842
Dulkio kiekis, %	0,906	Nelieka	3,196
Smėlio kiekis, %	0,010	0,009	2,110
Žvyro kiekis, %	0,866	Nelieka	0,833

5.2.8 Grūdų posvities g III gr smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u įvertinimas

Kita analizės grupė – Grūdų posvitei priklausantis smėlingas molis ir dulkis (60 pav.). Regresinio modelio koreliacijos koeficientas $R=0,855$. Didelė vertė atsiranda dėl mažo bandinių kiekio, kuris siekia vos $n=17$. Šiam modeliui reikšmingiausias yra skersinės bangos greitis, jo P reikšmė siekia 0,022. Mažiau reikšmingi molio ir smėlio frakcijos, jų P vertė atitinkamai 0,041 ir 0,043. Mažiausią įtaką šio modelio tikslumui turi žvyro frakcijos ir tankio vertės.

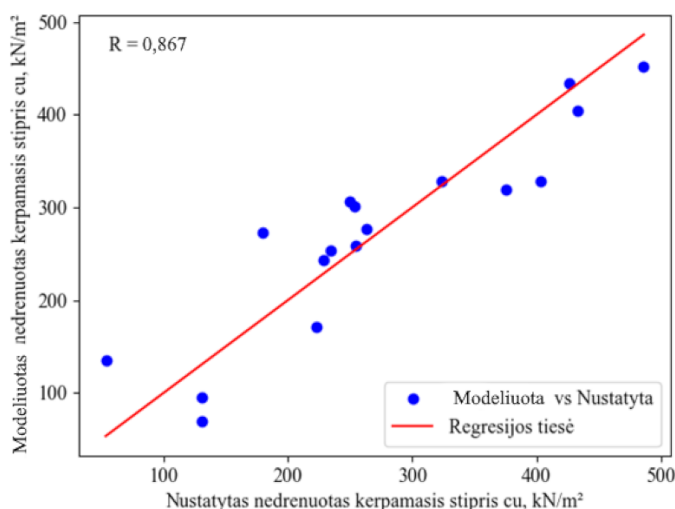


60 pav. Grūdų amžiaus g III gr smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

55 formulė rodo Grūdų posvitės smėlingo molio ir dulkio koreliacinę lygtį.

$$c_u = 0,629 \times V_s + 1248,67 \times \rho - 100,41 \times w - 362,67 \times e + 1,94 \times \text{molis, \%} - 0,23 \times \text{dulkis, \%} - 0,24 \times \text{smėlis, \%} + 7,88 \times \text{žvyras, \%} - 12,46 \times I_c \quad (55)$$

Norint optimizuoti šią lygtį, reikia iš jos pašalinti žvyro frakciją ir tankį. Sudarius modelį, kuris pavaizduotas 42 paveiksle, be šių parametrų koreliacijos koeficientas pakyla iki $R=0,867$. Pasikeičia ir kintamųjų reikšmingumas. V_s lieka kaip reikšmingiausias narys, tačiau padidėja poringumo koeficiento svarba – iš 0,046 iki 0,033. Todėl galima teigti, kad šiame grunto tipe poringumo koeficientas yra vienas iš svarbesnių parametrų. 14 lentelėje pateiktos suvestinės statistinės modelio vertės.



61 pav. Optimizuota Grūdų posvitės g III gr smėlingo molio ir dulkio SaSiCl nustatyto ir modeliuoto nedrenuoto kerpmojo stiprio c_u koreliacinė kreivė

Koreliacinė lygtis transformuojasi į tokią (56):

$$c_u = 0,725 \times V_s + 46,36 \times w - 548,79 \times e + 2,28 \times \text{molis, \%} - 1,47 \times \text{dulkis, \%} \pm 1,20 \times \text{smėlis, \%} + 13,38 \times I_c \quad (56)$$

14 lentelė. Suvestinė statistinių parametrų lentelė

Grunto savybė	p reikšmė ($P> t $) prieš	p reikšmė ($P> t $) po	Standartinė paklaida
Skersinės bangos greitis V_s	0,022	0,009	12,63
Tankis ρ	0,441	Nelieka	0,005
Drėgnis w	0,015	0,008	0,005
Poringumo koeficientas e	0,046	0,033	0,008
Konsistencijos rodiklis I_c	0,024	0,045	0,014
Molio kiekis, %	0,041	0,032	0,148
Dulkio kiekis, %	0,036	0,031	3,395
Smėlio kiekis, %	0,043	0,039	1,972
Žvyro kiekis, %	0,681	Nelieka	0,842

15 lentelė. Visų daugianarų koreliacinių lygčių suvestinė lentelė

Panaudojimas	Koreliacinė lygtis	Koreliacijos koeficientas
Pagrindinės morenos smėlingam moliui	$c_u = 0,692 \times V_s + 430,76 \times \rho - 434,5 \times w$ $+ 230,8 \times e - 0,258 \times molis, \%$ $- 1,485 \times smėlis, \%$ $- 17,54 \times I_c$	0,693
Kraštinių darinių smėlingam moliui	$c_u = 0,281 \times V_s + 286,63 \times \rho - 327,41 \times w$ $+ 117,36 \times e + 1,19 \times molis, \%$ $- 0,279 \times smėlis, \%$ $+ 74,92 \times I_c$	0,752
Pagrindinės morenos smėlingam moliui ir dulkiui	$c_u = 0,641 \times V_s + 868,33 \times \rho - 278,82 \times w$ $- 255,62 \times e$ $- 0,104 \times molis, \%$ $- 0,385 \times smėlis, \%$	0,793
Kraštinių darinių smėlingam moliui ir dulkiui	$c_u = 0,126 \times V_s + 67,61 \times \rho - 94,40 \times w$ $- 1,02 \times molis, \%$ $+ 0,02 \times smėlis, \%$ $+ 26,73 \times I_c$	0,614
Baltijos posvitės smėlingam moliui	$c_u = 0,503 \times V_s - 390,2 \times w + 108,7 \times e$ $- 0,696 \times molis, \%$ $+ 1,49 \times smėlis, \%$ $+ 307,62 \times \rho + 20,14 \times I_c$	0,793
Baltijos posvitės smėlingam moliui ir dulkiui	$c_u = 0,656 \times V_s - 338,38 \times \rho - 201,71 \times w$ $- 50,15 \times e - 0,25 \times molis, \%$ $+ 0,03 \times smėlis, \%$	0,866
Grūdų posvitės smėlingam moliui	$c_u = 0,670 \times V_s + 182,65 \times \rho - 489,89 \times w$ $+ 317,75 \times e + 1,40 \times molis, \%$ $- 0,48 \times smėlis, \%$ $+ 18,18 \times I_c$	0,771
Grūdų posvitės smėlingam moliui ir dulkiui	$c_u = 0,725 \times V_s + 46,36 \times w - 548,79 \times e$ $+ 2,28 \times molis, \%$ $- 1,47 \times dulkis, \%$ $- 1,20 \times smėlis, \%$ $+ 13,38 \times I_c$	0,867

IŠVADOS

1. Magistro baigiamajame darbe aptarta grunto stiprumo samprata, lauko ir laboratoriniai tyrimo metodai, kuriais nustatytomas nedrenuotas kerpamasis stipris c_u , seisminių bangų sklidimo grunte teorinė apžvalga.
2. Smėlingame molyje skersinės bangos greitis patenka į 104-671 m/s intervalą, išilginės bangos greitis – 1250-2578 m/s. Smėlingame molyje ir dulkėje skersinės bangos greitis varijuoja tarp 101 ir 698 m/s, išilginės bangos greitis – 1162 iki 2577 m/s.
3. Nustatyta bendra tendencija, kad didėjant smėlio frakcijos kiekiui ir mažėjant molio frakcijos kiekiui skersinė banga grunte sklinda greičiau. Kitimas priklauso nuo grunto tipo, jo amžiaus ir genezės. Pagrindinės morenos kilmės grunte smėlis lemia +24,65% skersinės bangos greičio padidėjimą. Molio frakcija smėlingo molio ir dulkio tipo grunte lemia -16,10% V_s sumažėjimą.
4. Sudarytos koreliacinės lygtys leidžia apskaičiuoti nedrenuotą kerpamąjį stiprį neatliekant laboratorinio bandymo. Rezultatų tikslumą lemia tinkamai pasirinkta formulė pagal turimą geologinę informaciją. Iš regresinių formulių pašalintos dulkio ir žvyro frakcijų kintamieji didina lygties koreliacijos koeficientą.
5. Ateities tyrimai galėtų orientuotis į molio mineralų poveikį seisminėms bangoms smulkiame moreniniame grunte, požeminio vandens, ypatingai spūdinio vandens, įtaką seisminių bangų sklidimo greičiams, apimti didesnę gruntų genezės įvairovę, rezultatų tarp smulkių ir rupių gruntų palyginimą.

LITERATŪROS ŠARAŠAS:

- Abbaszadeh Shahri, A. (2016). An optimized artificial neural network structure to predict clay sensitivity in a high landslide prone area using piezocone penetration test (CPTu) data: a case study in southwest of Sweden. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 745-758.
- Addo, K. O., & Robertson, P. K. (1992). Shear-wave velocity measurement of soils using Rayleigh waves. *Canadian geotechnical journal*, 29(4), 558-568.
- Åhnberg, H. (2004). Effects of back pressure and strain rate used in triaxial testing of stabilized organic soils and clays. *Geotechnical testing journal*, 27(3), 250-259.
- Anderson, N., Thitimakorn, T., Ismail, A., & Hoffman, D. (2007). A comparison of four geophysical methods for determining the shear wave velocity of soils. *Environmental & Engineering Geoscience*, 13(1), 11-23.
- Andrus, R. D., & Stokoe II, K. H. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(11), 1015-1025.
- Aziman, M., Hazreek, Z. A. M., Azhar, A. T. S., & Haimi, D. S. (2016, April). Compressive and shear wave velocity profiles using seismic refraction technique. In *Journal of physics: Conference series* (Vol. 710, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- Azimian, A., Ajalloeian, R., & Fatehi, L. (2014). An empirical correlation of uniaxial compressive strength with P-wave velocity and point load strength index on marly rocks using statistical method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 205-214.
- Barley, K. P., Farrell, D. A., & Greacen, E. L. (1965). The influence of soil strength on the penetration of a loam by plant roots. *Soil Research*, 3(1), 69-79.
- Bennell, J. D., & Smith, D. T. (1991). A review of laboratory shear wave techniques and attenuation measurements with particular reference to the resonant column. *Shear waves in marine sediments*, 83-93.
- Bentil, O. T., Zhou, C., Zhang, J. H., & Liu, K. (2023). Cross-anisotropic stiffness characteristics of a compacted lateritic clay from very small to large strains. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(12), 1954-1967.
- Byrd, C. W., & Cassel, D. K. (1980). The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. *Soil Science*, 129(4), 197-204.
- Blake, W. D., & Gilbert, R. B. (1997, May). Investigation of possible relationship between undrained shear strength and shear wave velocity for normally consolidated clays. In *Offshore technology conference* (pp. OTC-8325). OTC.
- Brandon, T. L., Duncan, J. D., & Cadden, A. W. (1990). Automatic Back-Pressure Saturation Device for Triaxial Testing. *Geotechnical Testing Journal*, 13(2), 77-82.
- Butler, D. K., & Curro Jr, J. R. (1981). Crosshole seismic testing—Procedures and pitfalls. *Geophysics*, 46(1), 23-29.
- Camacho-Tauta, J., Cascante, G., Santos, J. A., & Viana Da Fonseca, A. (2011). Measurements of shear wave velocity by resonant-column test, bender element test and miniature accelerometers. In *2011 Pan-Am Geotechnical Conference*.
- Campanella, R. G., & Robertson, P. K. (1984). A seismic cone penetrometer to measure engineering properties of soil. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984* (pp. 138-141). Society of Exploration Geophysicists.
- Chang, I., & Cho, G. C. (2010). A new alternative for estimation of geotechnical engineering parameters in reclaimed clays by using shear wave velocity. *Geotechnical Testing Journal*, 33(3), 171-182.
- Chen, G., Wang, Y., Zhao, D., Zhao, K., & Yang, J. (2021). A new effective stress method for nonlinear site response analyses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(6), 1595-1611.
- Clariá Jr, J. J., & Rinaldi, V. A. (2007). Shear wave velocity of a compacted clayey silt. *Geotechnical Testing Journal*, 30(5), 399-408.

- Day, R. W. (1992). Effective cohesion for compacted clay. *Journal of geotechnical engineering*, 118(4), 611-619.
- Durgunoglu, H. T., & Mitchell, J. K. (1973). Static penetration resistance of soils (No. SSL-SER-14-ISSUE-24).
- Elbadawy, M. A., Zhou, Y. G., & Liu, K. (2022). A modified pressure dependent multi-yield surface model for simulation of LEAP-Asia-2019 centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 154, 107135.
- Eslami, A., & Fellenius, B. H. (1997). Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 886-904.
- Farrell, D. A., & Greacen, E. L. (1966). Resistance to penetration of fine probes in compressible soil. *Soil Research*, 4(1), 1-17.
- Gebreselassie, B. (2003). Experimental, analytical and numerical investigations of excavations in normally consolidated soft soils. Kassel University Press.
- Gebreselassie, B., Kempfert, H. G., & Raithel, M. (2003). Correlation of cone resistance with undrained strength of some very soft to hard cohesive clays. *Field Measurements in Geomechanics*, 45-52.
- Germaine, J. T., & Ladd, C. C. (1988). Triaxial testing of saturated cohesive soils. *Advanced triaxial testing of soil and rock*, 421-459.
- Giger, S. B., Ewy, R. T., Favero, V., Stankovic, R., & Keller, L. M. (2018). Consolidated-undrained triaxial testing of Opalinus Clay: Results and method validation. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 14, 16-28.
- Handy, R. L. (1985). The arch in soil arching. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(3), 302-318.
- Hardee, H. C., Elbring, G. J., & Paulsson, B. N. P. (1987). Downhole seismic source. *Geophysics*, 52(6), 729-739.
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of the Soil mechanics and Foundations Division*, 98(7), 667-692.
- Hardin, B. O., & Richart Jr, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 33-65.
- Heymann, G. (2007). Ground stiffness measurement by the continuous surface wave test. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese*, 49(1), 25-31.
- Hong, S. J., Lee, M., Kim, J., & Lee, W. (2010). Evaluation of undrained shear strength of Busan clay using CPT. In *Proc. 2nd Int. Symposium on Cone Penetration Testing, CPT (Vol. 10)*.
- Yasar, E., & Erdogan, Y. (2004). Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 871-875.
- Inoue, M., & Ohomi, M. (1981, September). Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock. In *ISRM International Symposium (pp. ISRM-IS)*. ISRM.
- Jörß, O. (1998). Erfahrungen bei der Ermittlung von cu-Werten mit der Hilfe von Drucksondierungen in bindigen Böden. *geotechnik*, 21(1), 26-27.
- Jovičić, V., Coop, M. R., & Simić, M. (1996). Objective criteria for determining G max from bender element tests. *Géotechnique*, 46(2), 357-362.
- Kahraman, S. A. İ. R. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 981-994.
- Leong, E. C., & Cheng, Z. Y. (2016). Effects of confining pressure and degree of saturation on wave velocities of soils. *International Journal of Geomechanics*, 16(6), D4016013.
- Lunne, T., & Kleven, A. (1982). Role of CPT in North Sea foundation engineering.
- Lunne, T., Christoffersen, H. P., & Tjelta, T. I. (1986). Engineering use of piezocone data in North Sea clays. *Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt*, (163).

- Mahler, A. (2003). Use of cone penetration test in pile design. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 47(2), 189-197.
- Mayne, P. W. (2001, May). Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. In *Proc. Int. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories*, Bali (pp. 27-47).
- Markham, C. S., Bray, J. D., Macedo, J., & Luque, R. (2016). Evaluating nonlinear effective stress site response analyses using records from the Canterbury earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, 84-98.
- Martin, G. K., & Mayne, P. W. (1998). Seismic flat dilatometer tests in Piedmont residual soils. *Geotechnical site characterization*, 2, 837-843.
- Mews, K. S., Lozovyi, S., Stenebråten, J. F., Giger, S. B., & Holt, R. M. (2024). Experimental study of seismic dispersion: influence of clay mineral content. *Geophysical Journal International*, 236(3), 1545-1566.
- O'Donovan, J., O'sullivan, C., Marketos, G., & Muir Wood, D. (2015). Analysis of bender element test interpretation using the discrete element method. *Granular Matter*, 17, 197-216.
- Oh, T. M., Bang, E. S., Cho, G. C., & Park, E. S. (2017). Estimation of undrained shear strength for saturated clay using shear wave velocity. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(2), 236-244.
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 6(2), 167-187.
- Onur, M. N., Tuncan, M., Tuncan, A., Umu, S. U., & Okur, D. V. (2012, June). An experimental comparison between the shear and the plane waves by using resonant column test. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- Ortigao, J. A., Kochen, R., Farias, M. M., & Assis, A. P. (1996). Tunnelling in Brasilia porous clay. *Canadian geotechnical journal*, 33(4), 565-573.
- Paoletti, V. (2012). Review article" Remarks on factors influencing shear wave velocities and their role in evaluating susceptibilities to earthquake-triggered slope instability: case study for the Campania area (Italy)". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), 2147-2158.
- Park, J., & Kim, J. (2023). Role of Temperature-Dependent Interfacial Tension on Shear Wave Velocity for Energy Geosystems. *Sensors*, 23(21), 8709.
- Park, S., & Ishii, M. (2018). Near-surface compressional and shear wave speeds constrained by body-wave polarization analysis. *Geophysical Journal International*, 213(3), 1559-1571.
- Perić, D., Tran, T. V., & Miletić, M. (2017). Effects of soil anisotropy on a soil structure interaction in a heat exchanger pile. *Computers and Geotechnics*, 86, 193-202.
- Puppala, A. J., Acar, Y. B., & Tumay, M. T. (1995). Cone penetration in very weakly cemented sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(8), 589-600.
- Rémai, Z. (2013). Correlation of undrained shear strength and CPT resistance. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57(1), 39-44.
- Saputra, N. A., & Putra, R. (2020, April). The correlation between CBR (California Bearing Ratio) and UCS (Unconfined Compression Strength) laterite soils in palangka raya as heap material. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 469, No. 1, p. 012093). IOP Publishing.
- Sarkar, K., Vishal, V., & Singh, T. N. (2012). An empirical correlation of index geomechanical parameters with the compressional wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 469-479.
- Schnabel, P. B. (1972). SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley.
- Schnaid, F. (2005). Geo-characterisation and properties of natural soils by in situ tests. In *Proceedings of the 16th international conference on soil Mechanics and Geotechnical engineering* (pp. 3-45). IOS Press.
- Taylor, H. M., & Gardner, H. R. (1963). Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science*, 96(3), 153-156.

- Teng, F. C., Ou, C. Y., & Hsieh, P. G. (2014). Measurements and numerical simulations of inherent stiffness anisotropy in soft Taipei clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 237-250.
- Tsuchida, T., Kitade, K., Tanaka, M., Kang, G. O., & Kaya, K. (2020). Evaluation of design shear strength of intermediate soil for construction of breakwater at Port of Sakai. *Soils and Foundations*, 60(1), 239-256.
- Vepraskas, M. J. (1984). Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1220-1225.
- Vernay, M., Morvan, M., & Breul, P. (2020). Evaluation of the degree of saturation using Skempton coefficient B. *Geomechanics and Geoengineering*, 15(2), 79-89.
- Wang, Z. Z., Zhang, J., & Huang, H. (2024). Interpreting random fields through the U-Net architecture for failure mechanism and deformation predictions of geosystems. *Geoscience Frontiers*, 15(1), 101720.
- Wei, F., Wang, H., Zeng, G., & Jiang, M. (2023). Seepage flow around twin circular tunnels in anisotropic ground revealed by an analytical solution. *Underground Space*, 10, 1-14.
- Zhang, J. Z., Huang, H. W., Zhang, D. M., & Phoon, K. K. (2023). Experimental study of the coupling effect on segmental shield tunnel lining under surcharge loading and excavation unloading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140, 105199.
- Zhao, Q., Zhigang, C., Hui, M., Xing, S., Yan W., et al. (2023). A S-wave Spectral Decomposition Hydrocarbon Detection Method Based on P-wave and S-wave Source and Its Application. *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*, 11(2), 47-52.
- Zimmerman, R. W., & King, M. S. (1986). The effect of the extent of freezing on seismic velocities in unconsolidated permafrost. *Geophysics*, 51(6), 1285-1290.

SANTRAUKA

VILNIAUS UNIVERSITETAS CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS

Rytis Lažaunikas

Moreninių smulkių gruntų nedrenuoto kerpamojo stiprio įvertinimas laboratoriniais ir geofiziniais tyrimo metodais

Šio darbo tikslas – nustatyti pagrindinius skirtingo amžiaus, genezės ir tipo grunto parametrus (fizikines ir mechanines savybes, seisminių bangų greičius) bei, remiantis gautais duomenimis, sukurti daugianares koreliacines lygtis, kurios leistų prognozuoti nedrenuoto kerpamojo stiprio reikšmes.

Anykščių, N. Akmenės, Telšių, Alytaus rajonuose paimti nesuardytos sandaros bandiniai, vėliau tame pačiame gręžinyje atlikti sekliosios seismikos bandymai skersinės ir išilginės bangų nustatymui.

Atlikus bandymus laukuose ir laboratorijoje nustatyta, kad granuliometrinė sudėtis lemia skersinės bangos greičio pokytį – smėlis vidutiniškai greitį didina +24,65% nuo vidurkio, tuo tarpu molis skersinės bangos greitį mažina -16,10%. Žvyro ir dulkio frakcijos lemia greičio pakitimą, bet jis nėra pakankamai ženklus. Sudarytos koreliacinės kreivės leidžia įvertinti nedrenuoto kerpamojo stiprio c_u vertę pagal turimas grunto savybes ir papildomą informaciją – genezę, amžių ir grunto tipą. Didžiausią reikšmingumą regresiniuose modeliuose turi skersinės bangos greitis, tankis, molio ir smėlio frakcijų kiekis. Mažiausią reikšmingumą visose lygtyse turi dulkio ir žvyro frakcija, pašalinus šiuos parametrus koreliacijos koeficientas padidėja, modelis tampa tikslesnis.

SUMMARY

VILNIUS UNIVERSITY FACULTY OF CHEMISTRY AND GEOSCIENCES

Rytis Lažaunikas

Evaluation of undrained shear strength of fine-grained moraine soils using laboratory and geophysical investigation methods

The aim of this study is to determine the key parameters (physical and mechanical properties, seismic waves velocities) of soils of different age, genesis, and type, and, based on the obtained data, to develop multiple regression equations that would allow for the prediction of undrained shear strength c_u values.

Undisturbed soil samples were collected in the districts of Anykščiai, Naujoji Akmenė, Telšiai, and Alytus, and shallow seismic tests were conducted in the same boreholes to determine shear and compressional waves velocities.

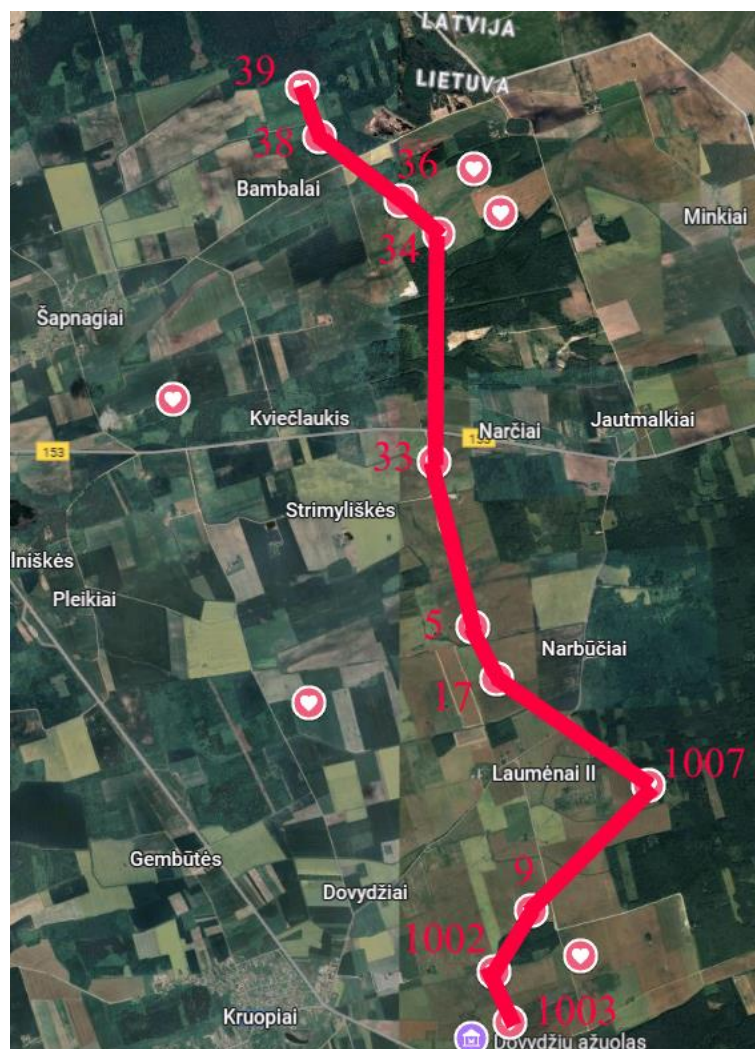
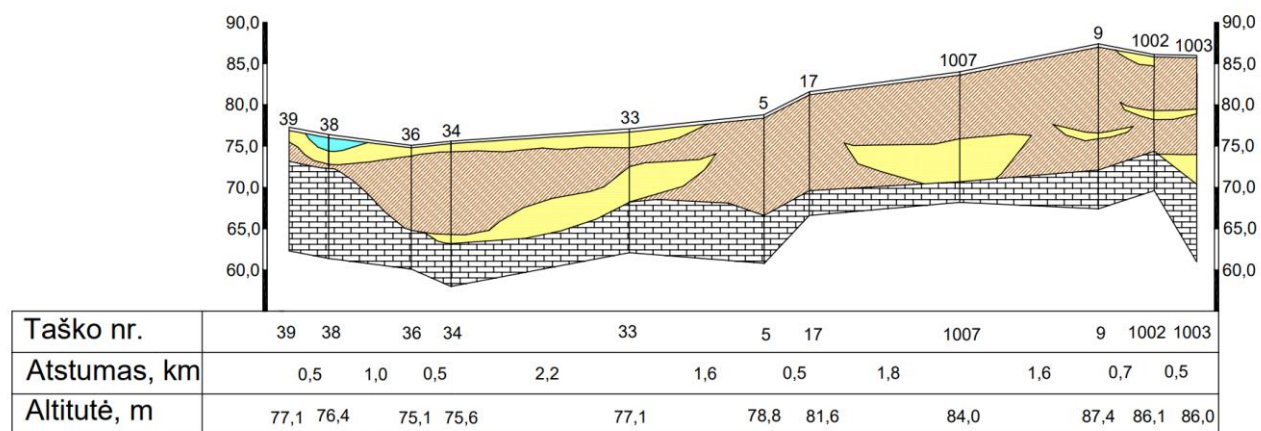
Field and laboratory testing revealed that the soil particle distribution influences the variation in shear wave velocity—sand, on average, increases the velocity by +24,65% from the mean, while clay decreases it by -16,10%. Gravel and silt fractions also affect the velocity, but the impact is less significant.

The established correlation curves allow the estimation of undrained shear strength c_u based on known soil properties and additional information—genesis, age, and soil type. Shear wave velocity, density, and the content of clay and sand fractions showed the highest significance in the regression models. The silt and gravel fractions were the least significant; when these parameters were removed, the correlation coefficient increased, and the model became more accurate.

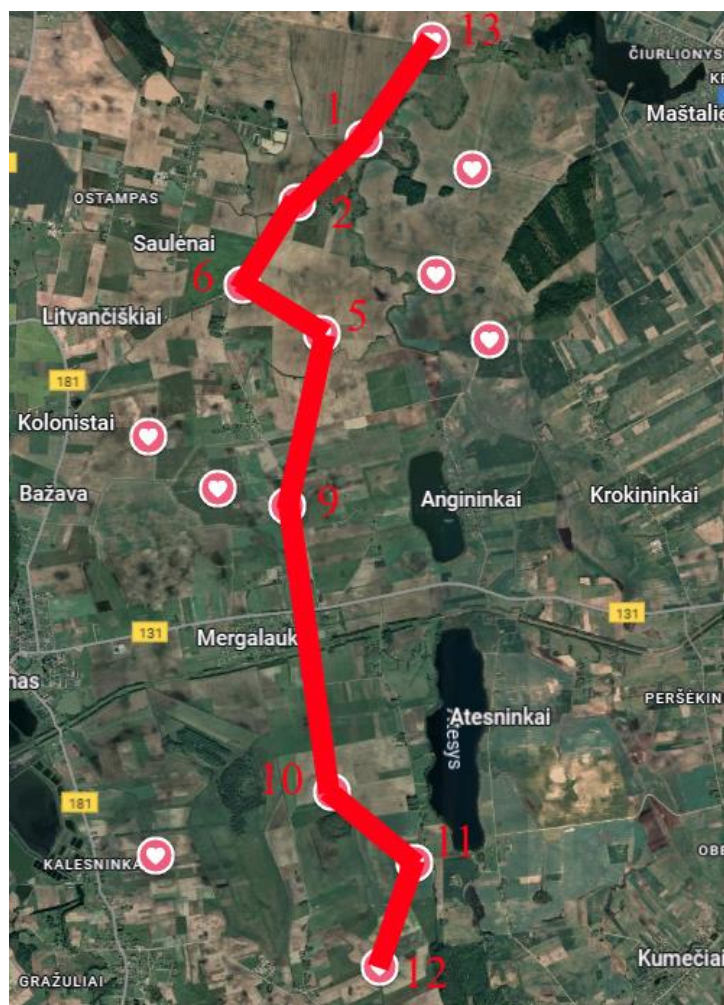
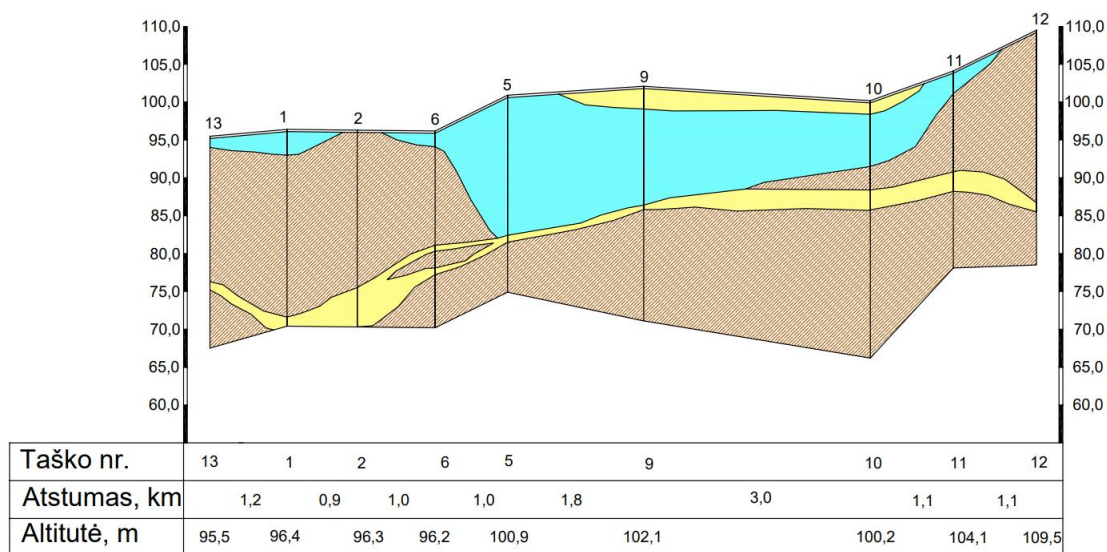
PRIEDAI

1. 1 priedas. Tiriamojo Naujosios Akmenės rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje
2. 2 priedas. Tiriamojo Alytaus rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje
3. 3 priedas. Tiriamojo Telšių rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje
4. 4 priedas. Tiriamojo Anykščių rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje

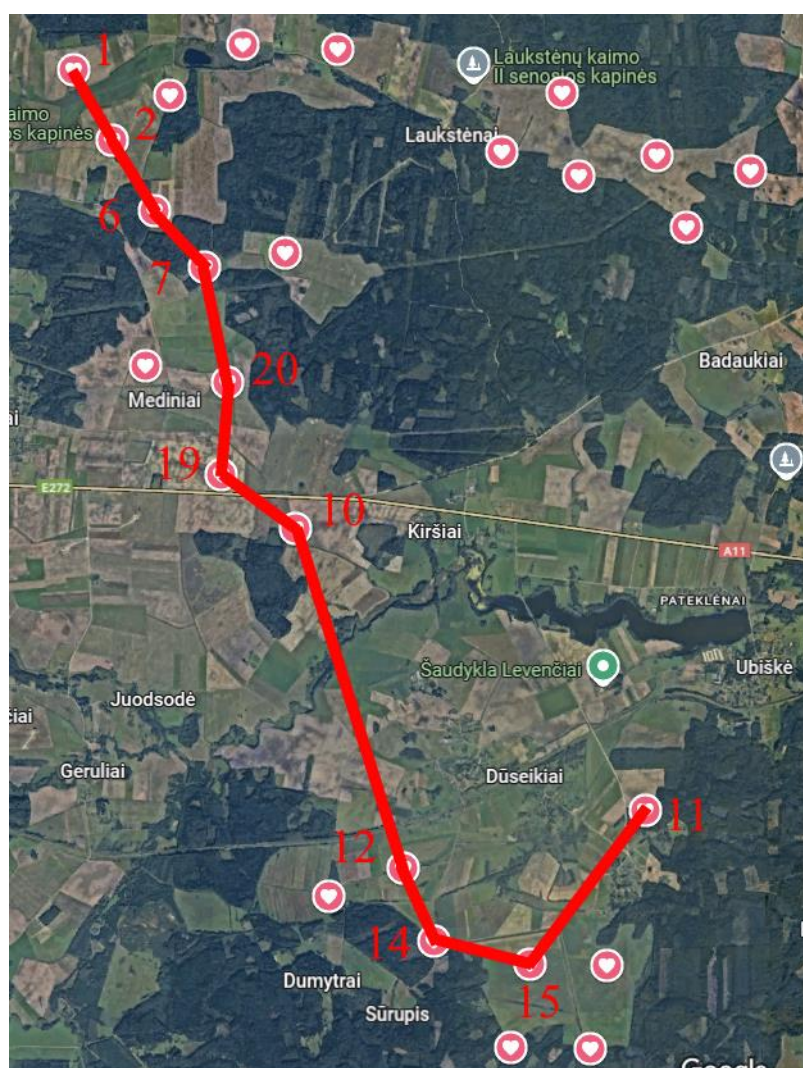
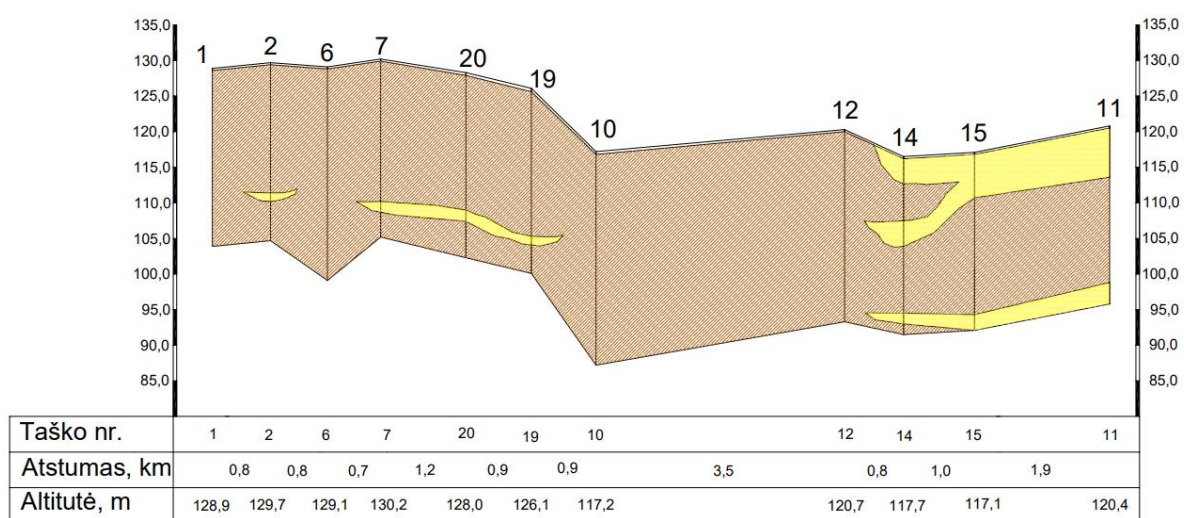
Tiriamąo Naujosios Akmenės rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje



Tiriamąojo Alytaus rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje



Tiriamąojo Telšių rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje



Tiriamojų Anykščių rajono inžinerinis geologinis pjūvis ir pjūvio linija žemėlapyje

