

<https://doi.org/10.15388/vu.thesis.594>

<https://orcid.org/0000-0003-0104-0605>

VILNIAUS UNIVERSITETAS
GAMTOS TYRIMŲ CENTRAS

Ieva Lekstutytė

Reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto savybių įvertinimas

DAKTARO DISERTACIJA

Gamtos mokslai,
Geologija (N 005)

VILNIUS, 2024

Disertacija rengta 2017–2024 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas – doc. dr. Saulius Gadeikis (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, geologija – N 005).

Gynimo taryba:

Pirmininkas – prof. dr. Petras Šinkūnas (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, geologija – N 005).

Nariai:

prof. dr. Albertas Bitinas (Gamtos tyrimų centras, gamtos mokslai, geologija – N 005),

dr. Viktors Haritonovs (Rygos technikos universitetas (Latvija), technologijos mokslai, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Kęstutis Jokšas (Gamtos tyrimų centras, gamtos mokslai, geologija – N 005),

doc. dr. Jurgis Medzvieckas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2024 m. gegužės 10 d. 10 val. Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto 214 auditorijoje. Adresas: M. K. Čiurlionio g. 21/27, LT-03101 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 239 8202; el. paštas info@chgf.vu.lt.

Disertaciją galima peržiūrėti Gamtos tyrimų centro ir Vilniaus universiteto bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu:

<https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

<https://doi.org/10.15388/vu.thesis.594>

<https://orcid.org/0000-0003-0104-0605>

VILNIUS UNIVERSITY
NATURE RESEARCH CENTRE

Ieva Lekstutytė

Assessment of Middle Pleistocene Terrain Forming Fine-Grained Till Soil Properties

DOCTORAL DISSERTATION

Natural Sciences,
Geology (N 005)

VILNIUS, 2024

The dissertation was prepared between 2017 and 2024 at Vilnius University.

Academic supervisor – Assoc. Prof. Dr. Saulius Gadeikis (Vilnius University, Natural Sciences, Geology – N 005).

This doctoral dissertation will be defended in a public meeting of the Dissertation Defence Panel:

Chairman – Prof. Dr. Petras Šinkūnas (Vilnius University, Natural Sciences, Geology – N 005).

Members:

Prof. Dr. Albertas Bitinas (The Nature Research Centre, Natural Sciences, Geology – N 005),

Dr. Viktors Haritonovs (Rigas Technical University (Latvia), Technology Sciences, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr. Kęstutis Jokšas (The Nature Research Centre, Natural Sciences, Geology – N 005),

Assoc. Prof. Dr. Jurgis Medzvieckas (Vilnius Gediminas Technical University, Technology Sciences, Civil Engineering – T 002).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 10 a.m. on the 10th of May 2024 in Meeting Room 214 at The Institute of Geosciences of Vilnius University.

Address: M. K. Čiurlionio st. 21/27, LT-03101 Vilnius, Lithuania, tel. +370 5 239 8202; e-mail: info@chgf.vu.lt.

The text of this dissertation can be accessed at the libraries of Nature Research Centre and Vilnius University, as well as on the website of Vilnius University:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

SANTRUMPOS IR SIMBOLIAI

<i>Santrumpa</i>	<i>Paaiškinimas</i>	<i>Explanation</i>
CPT	Kūginės penetracijos (statinio zondavimo) bandymas	Cone Penetration Test
CPTu	Kūginės penetracijos (statinio zondavimo) bandymas ir porinio slėgio matavimas	Cone Penetration Test with pore pressure (u)
DST	Tiesioginio kirpimo bandymas	Direct Shear Test
OED	Grunto kompresinio (oedometrinio) spūdumo bandymas	Oedometer test
OCR	Perkonsolidavimo santykis	Overconsolidation ratio
LOC	Mažai perkonsoliduotas	Light Overconsolidated
HOC	Labai perkonsoliduotas	Highly, Heavily Overconsolidated
MIS	Jūrinės izotopinės stadijos	Marine isotope stages
g, gt II md	Vidurinio pleistoceno Medininkų ledynmečio glacialinės nuogulos	Mid-Pleistocene glacial deposits of the Medininkai formation
g III nm ₃	Viršutinio pleistoceno viršutinio Nemuno svitos glacialinės nuogulos	Glacial deposits of the Upper Pleistocene of the Upper Nemunas formation
USCS	Bendroji gruntų klasifikavimo sistema	Unified Soil Classification System
ISO	Tarptautinė standartizacijos organizacija	International Organization for Standardization
SBT	Grunto elgsenos tipas	Soil Behaviour Type
SBTn	Normalizuotas grunto elgsenos tipas	Normalized Soil Behaviour
IB	Modifikuotas grunto elgsenos tipo indeksas	Modified Soil Behaviour Type Index
ISO	Tarptautinė standartizacijos organizacija	International Organization for Standardization

<i>Santrumpa</i>	<i>Paaiškinimas</i>	<i>Explanation</i>
FCt	Pereinamoji smulkiųjų dalelių zona (pereinamasis smulkiųjų dalelių kiekis)	Transition fines content
CCS	Molio tipo elgsenos susitraukiantys jautrūs	Clay-like – Contractive – Sensitive
CD	Molio tipo elgsenos dilatuojantys (išsiplečiantys)	Clay-like – Dilative
CC	Molio tipo elgsenos susitraukiantys (retrakcija)	Clay-like – Contractive
TD	Pereinamojo tipo elgsenos dilatuojantys (išsiplečiantys)	Transitional – Dilative
TC	Pereinamojo tipo elgsenos susitraukiantys (retrakcija)	Transitional – Contractive
SD	Smėlio tipo elgsenos dilatuojantys (išsiplečiantys)	Sand-like – Dilative
SC	Smėlio tipo elgsenos susitraukiantys (retrakcija)	Sand-like – Contractive
saCIL	Smėlingas mažo plastiškumo molis	Sandy low plasticity clay
saCIL/M	Smėlingas mažo ar vidutinio plastiškumo molis	Sandy low / medium plasticity clay
saCIL-SiL	Smėlingas mažo plastiškumo molis ir dulkis	Sandy low plasticity clay and silt
saSiL/M	Smėlingas mažo ar vidutinio plastiškumo dulkis	Sandy low / medium plasticity silt
saCIL/M – SiL/M	Smėlingas mažo ar vidutinio plastiškumo molis ir dulkis	Sandy low / medium plasticity clay and silt
clSa	Molingas smėlis	Clayey sand
siSa	Dulkingas smėlis	Silty sand
TT	Triašio slėgio (gniuždymo) bandymas	Triaxial Test
CD	Konsoliduotas drenuotas triašio slėgio (gniuždymo) bandymas	Consolidated Drained
CU	Konsoliduotas nedrenuotas triašio slėgio (gniuždymo) bandymas	Consolidated Undrained

<i>Santrumpa</i>	<i>Paaiškinimas</i>	<i>Explanation</i>
UU	Nekonsoliduotas nedrenuotas triašio slėgio (gniuždymo) bandymas	Unconsolidated Undrained
CTT	Vienpakopis triašio (gniuždymo) bandymas	Conventional Triaxial Test
MTT	Daukiapakopis triašio (gniuždymo) bandymas	Multistage Triaxial Test
RTC	Triašio slėgio (gniuždymo) bandymas, mažinant deviatoriaus slėgį	Reduced Triaxial Compression
TC	Triašio slėgio (gniuždymo) bandymas, palaikant nekintamą deviatoriaus slėgį	Triaxial compression
ESP	Efektyviųjų įtempių kelias	Effective stress path
TSP	Suminių įtempių kelias	Total stress path
SCU	Prisotintas konsoliduotas nedrenuotas	Saturated Consolidated Undrained
SCD	Prisotintas konsoliduotas drenuotas	Saturated Consolidated Drained
UCU	Neprisotintas konsoliduotas nedrenuotas	Unsaturated Consolidated Undrained
UCD	Neprisotintas konsoliduotas drenuotas	Unsaturated Consolidated Drained
UUU	Neprisotintas nekonsoliduotas nedrenuotas	Unsaturated Unconsolidated Undrained
FTMC	Fizinių ir technologijos mokslų centras	Center for Physical Sciences and Technology
GEOLIS	Valstybinė geologijos informacinė sistema	Geological Information System
SEM	Skenuojantis elektroninis mikroskopas	Scanning Electron Microscope
XRD	Rentgeno spindulių difrakcija	X-Ray diffraction
XRF	Rentgeno spindulių fluorescencija	X-Ray fluorescence

<i>Simbolis</i>	<i>Paaiškinimas</i>	<i>Explanation</i>
q_c	Kūginis stipris	Cone resistance
q_t	Koreguotas kūginis stipris	Corrected cone resistance
$Q_t (q_{cnorm})$	Normalizuotas kūginis stipris, atsižvelgiant į vertikalius įtempius	Normalized cone resistance taking account of the in-situ vertical stresses
Q_m	Normalizuotas kūginis stipris, atsižvelgiant į vertikalius įtempius ir įtempių eksponentę, kuri kinta nuo grunto tipo ir įtempių lygių	Normalized cone resistance taking account of the in-situ vertical stresses and where the stress exponent varies with soil type and stress level
f_s	Šoninės trinties stipris	Sleeve friction
F_r	Normalizuotas šoninės trinties stipris	Normalized sleeve friction
R_f	Trinties santykis	Friction ratio
R_{fnorm}	Normalizuotas trinties santykis	Normalized friction ratio
u	Porinis vandens slėgis	Pore pressure
u_2	Išmatuotas porinis vandens slėgis	Measured porewater pressure
u_0	Pusiausvyrinis porinis slėgis	Equilibrium pore pressure
Δu	Porinio slėgio pokytis	Change in pore pressure
Bq	Porinio slėgio koeficientas	The normalized pore pressure ratio
σ	Suminis įtempis	Total stress
σ_v	Suminis vertikalus įtempis	Total vertical stress
σ_{v0}	Suminis vertikalus įtempis prieš poveikį	Pre-insertion total vertical stress
σ'	Efektyvusis įtempis	Effective stress
σ'_v	Efektyvusis vertikalus įtempis	Effective vertical stress
σ'_{v0}	Efektyvusis vertikalus įtempis prieš poveikį	Pre-insertion effective vertical stress
σ_{atm}	Atmosferinis slėgis	Atmospheric pressure
σ'_l	Didžiausias svarbiausias efektyvusis įtempis	Effective vertical stress in triaxial test

<i>Symbolis</i>	<i>Paaiškinimas</i>	<i>Explanation</i>
σ'_3	Celės slėgis, mažiausias svarbiausias efektyvusis įtempis	Cell-confining pressure, minor principal stress
$\sigma'_1 - \sigma'_3$	Deviatoriaus įtempis	Deviator stress
p	Suminiai įtempiai (Cambridge q-p) koordinačių sistemoje	Mean total stress in (Cambridge q-p) coordinate system
p'	Pagrindiniai efektyvieji įtempiai (Cambridge q-p) koordinačių sistemoje	Mean effective stress in (Cambridge q-p) coordinate system
q	Deviatoriaus įtempis (Cambridge q-p) koordinačių sistemoje	Deviator stress in (Cambridge q-p) coordinate system
σ'_p	Perkonsolidavimo įtempis	Preconsolidation stress
τ	Tangentinis įtempis	Shear stress
τ'	Efektyvusis tangentinis įtempis	Effective shear stress
τ_u	Kerpamasis stipris	Shear strength
ε	Ašinė deformacija	Axial strain
ε_{svol}	Tūrinė deformacija šlyties metu	Volumetric strain during shear (expressed as a ratio)
c	Sankiba	Cohesion
c'	Efektyvioji sankiba	Effective cohesion
φ	Vidinės trinties kampas	Angle of internal friction
φ'	Efektyvusis vidinės trinties kampas	Effective angle of internal friction
φ'_N	Nustatytas efektyvusis vidinės trinties kampas	Determined effective angle of interval friction
φ'_s	Sumodeliuotas efektyvusis vidinės trinties kampas	Modeled effective angle of interval friction
E	Deformacijų modulis	Modulus of deformation
E_{50}	Kirstinis deformacijos modulis, tamprumo modulis, atitinkantis 50 proc. didžiausio šlyties stiprumo	Secant modulus of deformation, young's modulus of elasticity corresponding to 50% of the maximum shear strength
E_{oed}	Oedometrinis deformacijų modulis	Oedometer deformation modulus

<i>Symbolis</i>	<i>Paaškinimas</i>	<i>Explanation</i>
E_{Noed}	Nustatytas oedometrinis deformacijų modulis	Determined oedometer deformation modulus
E_{Soed}	Sumodeliuotas oedometrinis deformacijų modulis	Modeled deformation modulus
I_c	Grunto elgsenos tipo indeksas	Soil Behaviour Type Index
c_v	Konsolidacijos koeficientas	Coefficient of consolidation
c_c	Kompresijos rodiklis	Compression index
I_P	Plastiškumo rodiklis	Plasticity index
I_L	Takumo rodiklis	Liquidity index
w	Gamtinis drėgnis	Moisture content
w_P	Plastingumo drėgnis	Plastic limit
w_L	Takumo drėgnis	Liquid limit
w_{opt}	Optimalus drėgnis	Optimum moisture content
ρ	Gamtinis tankis	Bulk density
$\rho_{d, max}$	Didžiausias sauso grunto tankis	Maximum dry density
e	Poringumo koeficientas	Void ratio
S_r	Soties laipsnis	The degree of saturation
B	Skemptono rodiklis	Skempton coefficient
I_r	Standumo rodiklis	Rigidity index
k_f	Filtracijos koeficientas	Filtration coefficient
p	p reikšmė	P-value
R^2	Determinacijos koeficientas	Coefficient of determination
R	Koreliacijos koeficientas	Coefficient of correlation
z	Gylis	Depth
D	Skersmuo	Diameter
H	Aukštis	Height

TURINYS

ĮVADAS.....	14
1. VIDURINIO PLEISTOCENO MORENINIŲ NUOGULŲ TYRIMŲ APŽVALGA IR BENDRIEJI FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ DĖSNINGUMAI	18
1.1. Tiriamojo grunto amžius, genezė ir paplitimas.....	18
1.2. Vidurinio pleistoceno amžiaus įvertinimas ir išskyrimas Lietuvoje	23
1.3. Gruntų mechaninės elgsenos klasifikacijos, lauko ir laboratorinių tyrimų metu nustatytų rodiklių sąsajos	26
1.3.1. Gruntų mechaninės elgsenos klasifikavimo sistemos	26
1.3.2. Grunto tipo įvertinimas ir klasifikacija Lietuvoje	35
1.3.3. Grunto būvio ir tyrimų sąlygų įvertinimas ir pritaikymas.....	37
1.4. Fizikinių savybių įtaka grunto elgsenai ir mechaninių savybių rodikliams.....	42
1.4.1. Gruntų fizikinių savybių įtakos tyrimai	42
1.4.2. Gruntų dalelių dydžio ir kiekio įtaka	43
1.4.3. Gruntų gamtinio drėgnio ir plastingumo rodiklio įtaka.....	46
1.5. Veiksniai, darantys įtaką grunto mechaniniams rodikliams	47
1.5.1. Įtempių ir deformacijos ryšys, įtempiai grunte.....	47
1.5.2. Porinio slėgio įtaka ir jo kitimas	52
1.5.3. Perkonsolidavimo santykio įtaka	54
1.5.4. Soties laipsnio įtaka	56
1.6. Pirmosios dalies išvados.....	58
2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA	60
2.1. Tyrimų objektas	60
2.2. Darbo eiga.....	61
2.3. Lauko bandymai.....	63
2.4. Cheminė ir mineralinė sudėtis	63
2.5. Fizikinės savybės	65
2.6. Mechaninės savybės.....	65

2.7. Duomenų bazės sudarymas.....	69
2.8. Robertsono klasifikacinių schemų sudarymas	69
2.9. Regresinės analizės modelio sudarymas.....	70
2.10. Antrosios dalies išvados	71
3. TYRIMO DUOMENŲ ANALIZĖ IR REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	73
3.1. Amžiaus įvertinimas ir mineralinė bei cheminė sudėtis	73
3.1.1. Tiriamo grunto amžiaus įvertinimas	73
3.1.2. Mineralinė ir cheminė sudėtis.....	73
3.2. Klasifikacijos ir jų pritaikymas	78
3.2.1. Vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų fizikinės savybės ir sudėtis.....	78
3.2.2. Robertsono klasifikacijų palyginimas moreniniuose gruntuose	81
3.3. Mechaninių rodiklių priklausomybė nuo fizikinių savybių, atsižvelgiant į kūginio stiprio vertes	87
3.3.1. Įtaka oedometriniam deformacijos moduliui	87
3.3.2. Molio mišinių ir molio tipo elgsenos deformatyvumo analizė	89
3.3.3. Dulquio mišinių ir pereinamojo tipo elgsenos gruntų deformatyvumo analizė	93
3.3.4. Smėlio mišinių ir smėlio tipo elgsenos gruntų deformatyvumo analizė.....	96
3.3.5. Vidurinio pleistoceno moreninio grunto efektyviojo vidinės trinties kampo regresijos modelio sudarymas	99
3.4. Vidurinio pleistoceno moreninio grunto skirtingų bandymo sąlygų rezultatų įvertinimas triašio slėgio bandymo metu	102
3.4.1. Įtempių ir deformacijų priklausomybė	102
3.4.2. Drenuotų ir nedrenuotų tyrimo sąlygų apibendrinimas	107
3.4.3. Soties laipsnio įtaka rezultatams	108
3.4.4. Įtempių kelių analizė.....	111
3.4.5. Bandinio dydžio įtaka.....	114

3.4.6. Daugiapakopio ir vienkopio triašio bandymų įtaka	115
3.4.7. Pereinamojo tipo elgsenos grunto įvertinimas ir pritaikymas.....	118
3.5. Trečiosios dalies išvados	119
BENDROSIOS IŠVADOS	121
REKOMENDACIJOS, TAIKYMO GALIMYBĖS IR PRAKTINĖ REIKŠMĖ	122
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	123
SUMMARY	151
CURRICULUM VITAE	180
PADĖKA	180
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS	181
PRIEDAI.....	182

ĮVADAS

Darbo problematika. Moreninis smulkus gruntas – žvirgždo, smėlio, dulquio ir molio mišinys. Tai ledynų erozijos, transportavimo ir nusėdimo procesų produktas, dažniausiai paveiktas kelių ledyninių ciklų ir periglacialinių procesų. Moreninio smulkaus grunto sudėtis, struktūra ir savybės itin kaičios. Šio grunto sudėtis kompleksinė ir dėl jame pasitaikančio gargždo ar net pavienių riedulių. Paimti nesuardytos ir nepažeistos sandaros grunto mėginius lauko sąlygomis visada komplikuoja. Dėl išvardytų priežasčių moreninį smulkaus gruntą klasifikuoti ir tirti laboratorijoje taip pat sudėtinga. Moreninių gruntų susidarymo ir jų savybių apžvalga (Lee, 2018) rodo, kad šie sudėtiniai gruntai turėtų būti klasifikuojami papildomai atsižvelgiant į jų litologiją, susiejant juos paveikusius procesus su fizikinėmis savybėmis ir mechanine elgsena.

Darbo aktualumas. Glacialiniai gruntai susidarė kvartero periodo pleistoceno epochoje. Šis geologinis amžius apibūdinamas kaip reikšmingų klimato pokyčių ir nestabilumo laikotarpis visame pasaulyje, ypač Europoje (Banerji et al., 2022). Lietuvoje glacialiniai gruntai užima didžiausią šalies teritorijos dalį. Disertacijoje tiriami vidurinio pleistoceno glacialiniai dariniai aptinkami visoje Lietuvos teritorijoje, tačiau tik pietrytinėje šalies dalyje šie dariniai yra sudarantys reljefą, vėlesnių ledynų nuogulų nepadengti ir slūgso Žemės paviršiuje (Satkūnas & Bitinas, 1995; Satkūnas et al., 2008; Molodkov et al., 2002).

Gruntų amžius svarbus ne tik jiems identifikuoti, bet ir inžineriniu geologiniu aspektu. Inžinerinėje geologijoje įvertinti gruntų sudėtį, fizikines ir mechanines savybes bei sąveikas su taikomomis apkrovomis ar juos kitaip veikiant galima tik gerai ištyrus šių gruntų susidarymą (kilmę ir raidą) (Clarke, 2018). Skirtingo amžiaus moreninių nuogulų sudėtis tiesiogiai priklauso nuo slenkančių ledynų egzistacijos metu su savimi pernešamų prekvartero uolienų litologijos, taip pat pernešamų dalelių kiekio, paties ledyno slinkimo krypties ir greičio. Šis bendras visų procesų ryšys tampa esminiu identifikuojant įvairių laikotarpių morenines nuogulas (Paškauskaitė, 2014; Molén, 2023). Taigi, norint įvertinti grunto kilmę ir raidą, labai svarbūs tampa gruntų mineralinės ir cheminės sudėties tyrimai.

Kitas klasifikavimo žingsnis – grunto tipo išskyrimas. Dažniausiai naudojamos gruntų tipų klasifikavimo sistemos pagrįstos fizikinėmis (struktūrinėmis) charakteristikomis, tokiomis kaip granulimetrinė sudėtis ir plastiškumas (Moreno-Maroto et al., 2021). Vis dėlto tarp paprastų fizikinių rodiklių, nustatomų suardytuose grunto mėginiuose, ir tarp grunto elgsenos lauko sąlygomis egzistuoja reikšmingas neapibrėžtumas. Įprastinis grunto tipo

nustatymas, remiantis fizikinėmis savybėmis, yra laboratoriniai grunto bandymai. Siekiant įvertinti grunto elgsenos tipą apkrovos metu, naudojami lauko tyrimo metodai (CPT ir CPTu). Idealiu atveju gruntuos reikia klasifikuoti atsižvelgiant į pagrindines elgsenos charakteristikas, kurios susijusios su lauko sąlygomis grįsta grunto elgsena apkrovos metu. Kombinuota klasifikacija, pagrįsta tiek fizikinėmis, tiek elgsenos charakteristikomis, būtų labai naudinga, tačiau taikoma retai.

Pasaulyje labiausiai nagrinėjamos ir naudojamoms grunto elgsenos klasifikacijoms laikytinos Peterio K. Robertsono sukurtos ir nuolat atnaujinamos schemas. Naudojantis šiomis klasifikacijomis, gruntas skirstomas atsižvelgiant į jo elgseną (SBT) mechaninio poveikio metu. Lietuvoje gruntų klasifikacija paremta tik fizikinėmis savybėmis (granulimetrine sudėtimi ir plastiškumu).

Nuolat atnaujinami gruntų klasifikacijų standartai keičia gruntų pavadinimus (ypač smulkiojo grunto tipo). Lietuvoje grunto deformacijos modulio skaičiavimas vis dar paremtas pirminėmis koreliacijomis, išvestomis atsižvelgiant į jau nebegaliojančias klasifikavimo sistemas. Išvestų lygčių taikymas paremtas nustatyto grunto pavadinimu ir nėra koreguojamas pagal atnaujintas gruntų klasifikacijas. Taigi klasifikuoti gruntuos Lietuvoje gana problemiška, nes, remiantis skirtingais standartais, nustatomas neteisingas grunto pavadinimas, tada neteisingai ir netinkamai įvertinamas netiesioginis grunto deformacijos modulis (Tamošiūnas et al., 2022).

Grunto mechaninių rodiklių kitimą lemia ne tik grunto fizinis būvis, bet ir bandymų sąlygos (Saravanan et al., 2020). Gruntai veikiami įvairių išorinių veiksnių, įskaitant tam tikras bandymų sąlygas, veikiančius įtempius ir drenavimąsi. Suvokti, kaip tyrimo sąlygos gali paveikti gautus rezultatus, būtina, siekiant tinkamai interpretuoti gaunamus rezultatus.

Tyrimo tikslas – nustatyti ir įvertinti reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto sudėtį, fizikines ir mechanines savybes, atlikti grunto savybių kaitą lemiančių rodiklių koreliaciją tarpusavyje, nustatant pagrindinius veiksnius, turinčius įtakos savybių pokyčiams ir bendrajai grunto elgsenai.

Tyrimo objektas – reljefą sudarantis vidurinio pleistoceno moreninis smulkus gruntas, jo sudėtis, fizikinių ir mechaninių savybių rodikliai; mechaninės grunto elgsenos klasifikacija ir jos praktinis pritaikymas vidurinio pleistoceno moreniniam smulkiam gruntui; įvairių triašio gniuždymo bandymo sąlygų įtaka gaunamiems rezultatams.

Darbo uždaviniai:

1. Atrinkti, išanalizuoti ir susisteminti mokslinių tyrimų rezultatus vidurinio pleistoceno epochos amžiaus gruntų tematika, akcentuojant fizikinių

ir mechaninių savybių tarpusavio ryšius, įtaką grunto mechaninei elgsenai ir gruntų klasifikavimo svarbą.

2. Surinkti pavyzdžių ir sudaryti reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų duomenų bazę.

3. Paruošti atrinktus mėginius mineralinės ir cheminės sudėties tyrimams.

4. Pateikti rekomendacijų dėl tolesnių mineralinės ir cheminės sudėties tyrimų, siekiant nustatyti išskirtinumus.

5. Išanalizuoti gruntų mechaninės elgsenos klasifikacijas ir įvertinti jų pritaikomumą vidurinio pleistoceno moreniniams smulkiams gruntams.

6. Atlikti tiriamojo grunto fizikinių ir mechaninių savybių duomenų analizę, nustatant tarpusavio ryšius ir koreliacines priklausomybes bei įtaką mechaninei elgsenai. Papildomai atlikti bandymus triašio slėgio aparatu, esant skirtingoms bandymo sąlygoms, taip pat atlikti gautų rezultatų analizę, siekiant nustatyti pasirinktos metodikos įtaką gaunamiems rezultatams.

Mokslinis darbo naujumas:

1. Įvertinta reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų mineralinė ir cheminė sudėtis ir pateiktos išvalgos tirtam gruntui identifikuoti.

2. Atlikta mechaninių gruntų elgsenos klasifikacijų analizė. Laikantis klasifikacijos principų, pasiūlytas šių klasifikacijų galimas pritaikymas Lietuvos moreninių nuogulų mechaniniams rodikliams analizuoti.

3. Nustatytos sąsajos tarp tiriamojo grunto fizikinių ir mechaninių savybių, aprašant jas empirinėmis lygtimis; įvertintas vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto perkonsolidavimo santykis ir jo reikšmė.

4. Esant skirtingoms triašio slėgio bandymo sąlygoms, taikant įvairias metodikas įvertinta grunto elgsena ir rezultatų sklaida.

Praktinė darbo rezultatų reikšmė:

1. Papildyti reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto mineralinės ir cheminės sudėties tyrimų rezultatai, kurie gali būti naudojami analizuojant grunto granulometrinės sudėties pokyčius, vertinant fizikines ir mechanines savybes bei išskiriant amžiaus įvertinimo skirtumus.

2. Remiantis reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto pavyzdžiu, Robertsono klasifikacijų tyrimas gali būti pritaikytas inžineriniuose geologiniuose ir geotechniniuose tyrimuose, vertinant gruntą, atsižvelgiant į jo elgseną, ir atliekant mechaninių rodiklių koreliaciją.

3. Savybių lyginamosios analizės metu nustatytos fizikinių ir mechaninių rodiklių koreliacinės priklausomybės, patvirtintos eksperimentais, leidžia patikimiau analizuoti moreninius gruntuos inžineriniais tikslais.

4. Reljefą sudarančiam ir vėlesnių ledynų nepadengtam vidurinio pleistoceno moreniniam smulkiam gruntui galima taikyti mažai perkonsoliduotų pereinamųjų gruntų ($OCR < 4$) mechanikos principus.

Ginamieji teiginiai:

1. Pietrytinės Lietuvos reljefą sudarantis vidurinio pleistoceno moreninis smulkus gruntas mineraline ir chemine sudėtimi išsiskiria prekvartero uolienų egzaravimo metu perneštais didesniais to laikotarpio mineralų kiekiais ir jų sandaigomis. Įvardyta tirtu gruntu cheminė ir mineralinė sudėtis gali būti vienas iš šiame darbe tiriamo gruntu identifikavimo metodų.

2. Robertsono klasifikacijų pagrindu suklasifikavus ir tipizavus tiriamą vidurinio pleistoceno moreninį smulkų gruntą, nustatyta šio gruntu elgsena. Remiantis minėtomis klasifikacijomis, gruntą galima suskirstyti į grupes ir nustatyti priklausomybes tarp fizikinių ir mechaninių savybių rodiklių.

3. Tiriamo vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus gruntu, sudarančio reljefą, mechanines savybes galima vertinti remiantis gamtinio drėgniu, molio frakcijos kiekiu ir kūginio stiprio santykiu. Tai pagrindinės charakteristikos, turinčios įtakos mechaninių savybių vertėms.

4. Reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus gruntu sudėtis ir mechaninės savybės yra kaičios. Vertinant gruntu elgseną mechaninio poveikio metu, atsižvelgiant tiek į perkonsolidavimo rodiklio dydį, tiek į teorines prielaidas, galima taikyti mažai perkonsoliduotų gruntų ($OCR < 4$) mechanikos principus.

Darbo rezultatų aprobavimas. Remiantis disertacijos rezultatais, paskelbtos dvi publikacijos referuojamuose mokslo leidiniuose, parengti ir pristatyti keturi pranešimai tarptautinėse konferencijose.

Darbo struktūra. Disertaciją sudaro įvadas, mokslinės teorinės literatūros ir atliktų tyrimų apžvalga, darbo metodologija, tyrimų rezultatai, išvados, literatūros sąrašas, santrauka ir septyni priedai. Apimtis – 192 puslapiai. Disertacijoje panaudoti 304 mokslinės literatūros šaltiniai, pateikiama 30 lentelių ir 58 paveikslai. Disertacija parengta lietuvių kalba.

1. VIDURINIO PLEISTOCENO MORENINIŲ NUOGULŲ TYRIMŲ APŽVALGA IR BENDRIEJI FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ DĒSNINGUMAI

1.1. Tiriamojo grunto amžius, genezė ir paplitimas

Nuogulų stratigrafijos žinios svarbios ir būtinos nustatant įvykių raidos sekas. Šios žinios leidžia apibūdinti geologinius reiškinius. Siekiant atkurti praeities apledėjimo įvykių chronologinę aplinką, reikia tiksliai suvokti nuosėdų sudėtį, glacialitektonines struktūras, reljefo formas ir geologinius procesus. Visa tai gali padėti apibūdinti buvusių ledynų slinkimo elgseną, klimato kaitą ir visus mechanizmus, kurie paveikė ir veikia mūsų planetą (Lee, 2018). Atskleisdami geologiniuose dariniuose saugomus įvykius, galime įvertinti geologinių procesų greitį, trukmę ir jų elgseną inžinerinio poveikio metu.

Žemės pluta sudaryta iš dviejų pagrindinių geologinių sluoksnių: kristalinio pamato ir nuosėdinės dangos, kurios viršutinė dalis padengta kvartero nuogulomis. Kvartero laikotarpis (sudarytas iš pleistoceno ir holoceno epochų) prasidėjo prieš 2,58 mln. metų ir tęsiasi iki šių dienų. Būdingiausias kvartero reiškinys yra ritmiška klimato kaita – besikeičiantys ledynai ir tarpledynmečiai, formuojantys nuosėdų sluoksnius (Šinkūnas & Jurgaitis, 1998; Guobytė et al., 2001; Satkūnas et al., 2007; Elias, 2013). Šis geologinis amžius apibūdinamas kaip reikšmingų klimato pokyčių ir nestabilumo laikotarpis. Remiantis vien giliavandenių nuosėdų radiniais, kvartero laikotarpyje nustatyta apie 50 ledyninių ir tarpledyninių etapų (Williams et al., 1998; Banerji et al., 2022).

Kvartero periodu didžiausią įtaką apledėjimams Europoje turėjo Fenoskandijos žemyniniai ledo skydai, lėmę sudėtingas reljefo formas ir nuosėdų struktūras (Satkūnas & Molodkov, 2005; Stroeven et al., 2016).

Vidurinis pleistocenas (1.1 lentelė) yra viena iš trijų pleistoceno epochų (1.1 pav.). Tai ilgiausias kvartero geologinis laikotarpis, liudijantis ledyninių ir tarpledyninių ciklų dažnio kitimą, įvykusį per 1,2–0,4 mln. metų (Clark et al., 2006; Strani et al., 2021).

Vidurinio pleistoceno gruntai plačiai paplitę Europoje (1.1 lentelė): Estijoje, Latvijoje, Lenkijoje, Vidurio Europoje, Vakarų Vokietijoje, Anglijoje ir Ukrainoje (Satkūnas et al., 2007; Lindner et al., 2013; Šeirienė et al., 2015; Marks et al., 2016; Lang et al., 2018; Wachecka-Kotkowska et al., 2021). Plačiau aptarsime keletą šalių.

Estijos teritorijos paviršiuje atsidedgia prekvartero uolienos, tačiau vietomis aptinkama ir kvartero darinių (Sibul et al., 2017). Didžiausią kvartero darinių dalį sudaro glacialiniai moreniniai gruntai (Rattasa et al., 2010; Kalm

et al., 2011; Kasparinskis et al., 2017). Medininkų ledynmetis (est. *Ugandi*) skirstytinas į ankstyvąjį ir vėlyvąjį (Kalm et al., 2011), tačiau paviršiuje nėra aptinkamas.

Latvijoje kvartero dariniai dengia beveik visą teritoriją (iki 5–60 m gylio). Didžiąją kvartero dalį sudaro glacialinės vėlyvojo pleistoceno nuogulos (Zelčs & Markots, 2004; Zelčs et al., 2011; Zelčs & Nartišs, 2014; Kasparinskis et al., 2017; Lamsters et al., 2017). Latvijos vidurinio pleistoceno (latv. *Kurzeme*) nuogulos, prilyginamos Žeimenos ledynmečio nuoguloms, aptinkamos tik vakarinėje šalies dalyje (Zelčs et al., 2011).

Lenkijoje kvartero dariniai dengia visą paviršinę teritorijos dalį. Čia vidurinio pleistoceno Medininkų (lenk. *Wartanian*) ledynmečio darinių aptinkama Žemės paviršiuje, jie dengia nemažai teritorijos. Šio ledynmečio gruntai nusidriekę iki pietinės ir pietvakarinės teritorijos dalies. Medininkų ledynmetį daugiausia sudaro dugninės morenos (Marks, 2011; Marks et al., 2016, 2019; Gozhik et al., 2012; Lindner et al., 2013; Hrynowiecka & Winter, 2016).

Apibendrinus aptartų šalių glacialinių gruntų paplitimą (Ehlers et al., 2011), galima daryti išvadą, kad vidurinio pleistoceno glacialinių moreninių gruntų tyrimai svarbūs tarptautiniu požiūriu. Mūsų šalių kaimynių geologinė sandara iš dalies skiriasi nuo Lietuvos geologinės sandaros, tačiau šalis sieja bendri geologiniai laikotarpiai ir tam tikri geologinės sandaros bruožai.

1.1 lentelė. Dalinis supaprastintas pleistoceno nuogulų stratigrafinių schemų palyginimas tarp Lietuvos ir kitų šalių (regionų), turinčių jūrinės izotopines stadijas (MIS) (sudaryta autorės pagal: Satkūnas et al., 2007; Gaigalas, 2008; Lindner et al., 2013; Šeirienė et al., 2015; Marks et al., 2016; Lang et al., 2018; Wachecka-Kotkowska et al., 2021)

<i>Šalis (regionas)</i>		<i>Lietuva</i>	<i>Estija</i>	<i>Latvija</i>	<i>Lenkija</i>	<i>Vakarų Europa</i>	<i>Vakarų Vokietija</i>	<i>Anglija</i>	<i>Ukraina</i>				
<i>Stratigrafiniai padaliniai</i>													
<i>MIS</i>	<i>Amžius (Ma)</i>	<i>Skaidma</i>	<i>Skaičius</i>	<i>Svita</i>	<i>Posvitė</i>	<i>Svita ar posvitė</i>							
1					Holocenas								
2–5	0,13	Viršutinis	Nemunas	Nemunas (viršutinis, vidutinis, apatinis)	Jarva (vortsjarv, Savala, Valgjarve, Kelnase)	Baltija	Vistulian	Weichselian	Weichselian	Devensian	Valday		
5				Merkinė (tarpledynmetis)	Prangli / Rongu	Felicianova	Eemian	Eemian	Eemian	Ipswichian	Mikulianian		
6		Pleistocenas	Vidutinis	Medininkų ledynmetis	Ugandi (upper, middle, lower)	Kurzeme	Wartanian Odranian	Warthe Drenthe	Saalian-Complex	Warthe Drenthe	Wolostonian	Dnieperian	
7				Žeimena		Snaigupėlė	Pulvernieki	Lublinian		Saalian	Schöningen	Dömnitz	Holsteinian
8	0,43							Krznanian		–	Fuhne		
9									Zbójnian	Reinsdorf			
10				Žemaitija		Letiža	Liwecian	Fuhne	Elsterian				
11		Butėnai (tarpledynmetis)	–	Židini	Mazovian	Holsteinian	Cromerian Complex	Ruhme	Hoxnian	Likhvinian			
12–14		Dainava	Viršutinė / apatinė	–		Sanian 2	Elsterian	–	Anglian	Okian			

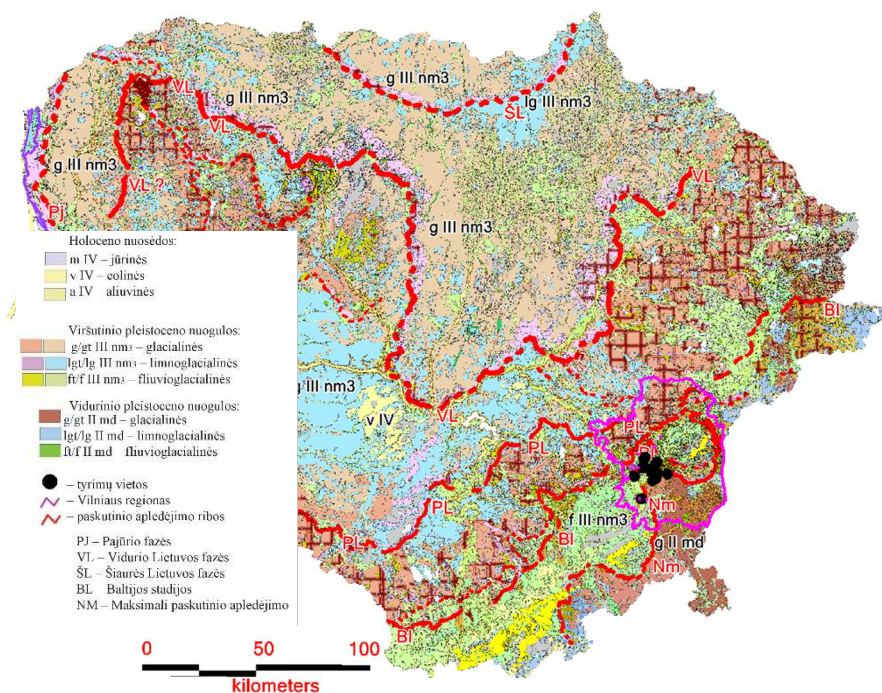
Lietuvoje nuosėdinės dangos storis svyruoja 300–2 500 m, o kvartero nuogulų storis vidutiniškai kinta 80–120 m (Bičkauskas et al., 2011; Guobytė & Satkūnas, 2011). Kvartero danga, kuri sudaro mūsų teritorijos geologinio pjūvio viršutinę dalį ir formuoja reljefą, labai svarbi ne tik dėl geologinių procesų raidos joje, bet ir inžineriniu požiūriu, nes čia vykdoma žmogaus ūkinė veikla. Taigi Lietuvos teritorijoje statyboms, keliams tiesti ir tiltams statyti didžiausią įtaką daro kvartero nuogulos, išskyrus šiaurės rytinėje šalies dalyje netoli Žemės paviršiaus aptinkamas prekvartero nuogulas (Grigelis et al., 1994; Šliaupa, 2004).

Būdingiausias kvartero reiškinys yra ritmiška klimato kaita. Minėtina, kad Lietuva keletą kartų buvo užklota ledynų, kurių nuogulos dengia visą mūsų šalies paviršių. Šių nuogulų vidutinis storis yra apie 100 m, o didžiausias storis siekia daugiau negu 315 m (Grigelis et al., 1994; Bičkauskas et al., 2011; Kavoliutė, 2012). Kvartero periodu Lietuvą taip pat dengė Fenoskandijos žemyninis ledo skydas (Satkūnas & Molodkov, 2005).

Atsižvelgiant į Lietuvos teritorijos kvartero pjūvius, ledyno paliktos nuosėdos ir reljefo formos rodo buvus šešis ledyninius ir aštuonis tarpledyninius laikotarpius (Satkūnas & Molodkov, 2005). Ledyno palikti dariniai labai įvairūs, jie skiriasi granulimetrine ir mineraline sudėtimi. Įvairiose vietose šie dariniai dengia nevienodo dydžio plotus, skiriasi tiek jų išsidėstymo pobūdis (tolygiai arba sancaupomis) teritorijoje, tiek sudėtis. Didžiausius plotus užima glacialinės kilmės nuogulos, suklostytos slenkančio ledyno pakraščiuose ir po jo danga. Ledyno tirpsmo vandenys suklostė smėlio, žvirgždo ir gargždo storymes. Prieledyniniuose ežeruose nusėdo juostuotas molis ir dulkis (Šinkūnas & Jurgaitis, 1998; Bičkauskas et al., 2011).

Remiantis kvartero paviršiaus nuogulų paplitimu Lietuvoje, galima teigti, kad glacialiniai gruntai užima didžiausią šalies teritorijos dalį (apie 41,35 proc. (Guobytė & Satkūnas, 2001), pagal kvartero paviršiaus nuogulų tūrinį paplitimą – apie 70,30 proc. (Putys et al., 2010)).

Atsižvelgiant į Lietuvos kvartero stratigrafinę schemą (Satkūnas, 2005), kuri remiasi gruntų formavimosi amžiumi, matyti, kad didžiausi šalies reljefo geomorfologiniai kompleksai susidarė viršutinio pleistoceno vidurinio Nemuno ledynmečio laikotarpiu (1.1 pav., 1.1 lentelė). Tik dalis vėlesnių ledynų nepadengtų, reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno laikotarpio nuogulų paviršiuje atsidendia Lietuvos pietrytinėje dalyje (Satkūnas & Bitinas, 1995; Molodkov et al., 2002; Satkūnas et al., 2008; Gregorauskienė & Bitinas 2017).



1.1 pav. Geomorfologinis Lietuvos žemėlapis (1:200 000) (Guobytė, 1999) (Geologijos informacinė sistema GEOLIS, žr. www.lgt.lt); žemėlapyje nurodytos analizuojamų reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno bandinių paėmimo vietos

Vidurinį pleistoceną Lietuvoje (1.2 lentelė) sudaro Dzūkijos, Dainavos ir Žeimosos (Žemaitijos–Medininkų) šaltojo tarpsnio ledynų vienetai. Turgelių tarpledynmetis skiria Dzūkijos ledyną nuo Dainavos, o Butėnų tarpledynmetis – Dainavos ledyną nuo Žeimosos (Satkūnas & Molodkov, 2005; Satkūnas et al., 2007, 2008; Šeirienė et al., 2015).

Vidurinio pleistoceno Medininkų ledynmetis datuojamas prieš 195–128 tūkst. m. Šio laikotarpio darinių aptinkama visoje Lietuvos teritorijoje, tačiau tik pietrytinėje šalies dalyje Medininkų ledynmetis slūgso Žemės paviršiuje vėlesnių ledynų nepadengtų glacialinių darinių (g, gt II md) pavidalu ir užima apie 1 459,6 km² (2,25 %) Lietuvos teritorijos (Satkūnas & Bitinas, 1995; Molodkov et al., 2002; Satkūnas et al., 2008). Susidariusių nuogulų ir nuosėdų vidutinis storis yra apie 30–40 m (Satkūnas et al., 2007). Šis ledynmetis suformavo vidutiniškai 30–40 m storio dangą. Didžiausias storis siekia 50–100 m (Kavoliūtė, 2012), vyraujantis sluoksnio storis – apie 10–30 m (Grigelis et al., 1994).

Medininkų formacijos arealinis stratotipas – pietryčių Lietuvos Medininkų aukštuma Ašmenos aukštumoje (Šeirienė et al., 2015). Medininkų ledynmečio glacialinių darinių randama virš Žemaitijos darinių ir, atrodo,

Medininkų ir Žemaitijos ledynmečių glacialiniai dariniai litologiškai ir geochemiškai nesiskiria tiek, kiek pasaulyje įvardijami *Saalian* dariniai skiriasi nuo *Elsterian* ir *Weichselian* (Satkūnas & Bitinas, 1995; Guobytė & Satkūnas, 2011).

1.2 lentelė. Vidurinio pleistoceno stratigrafinė schema (sudaryta autorės pagal Satkūnas, 2005)

<i>Sistema</i>	<i>Skaidma</i>	<i>Skirsnis</i>	<i>Svita</i>	<i>Posvitė</i>
Kvarteras	Pleistocenas	Vidurinis II	Žeimenos (žn) ledynmetis	Medininkų vėlyvasis ledynmetis: Pamario (pm), Medininkų (md), Vilkiškių (vl), Žemaitijos (žm).
			Butėnų (bt) tarpledynmetis	
			Dainavos (dn) ledynmetis	Viršutinė (dn ₂), apatinė (dn ₁).
			Turgelių (tr) tarpledynmetis	
			Dzūkijos (dz) ledynmetis	Viršutinė (dz ₂), apatinė (dz ₁).

Vidurinio pleistoceno amžius ir jo genezė Lietuvoje tyrinėta ir aptarta daugelyje darbų (Šinkūnas & Jurgaitis, 1998; Bitinas et al., 1999; Molodkov et al., 2002; Satkūnas & Bitinas, 2005; Satkūnas et al., 2008; Satkūnas, 2009; Bitinas, 2011; Guobytė & Satkūnas, 2011; Kondratienė, 2011; Bitinas et al., 2013; Paškauskaitė, 2014; Baltrūnas et al., 2015; Šeirienė et al., 2019). Mechaniniai ir fizikiniai šio amžiaus gruntų rodikliai taip pat tirti, tačiau tyrimų nėra daug, o rezultatai ne visada apibrėžia gruntų savybes, jų rodiklius ir gautų rezultatų taikymo ribas (Bucevičiūtė et al., 1997; Baltrūnas, 2004; Dundulis et al., 2008).

1.2. Vidurinio pleistoceno amžiaus įvertinimas ir išskyrimas Lietuvoje

Visos glacialinės nuogulos, jų mineralinė ir cheminė sudėtis, struktūra, tekstūra, susidarymo, kitimo ir paplitimo ypatybės tiesiogiai priklauso nuo slenkančių ledynų egzistacijos metu su savimi pernešamų prekvartero uolienų litologijos, taip pat pernešamų dalelių kiekio, ledyno slinkimo krypties ir greičio. Šis bendras visų procesų ryšys nulemia unikalią skirtingo amžiaus moreninių nuogulų sudėtį, o petrografiniai ir mineraliniai pokyčiai, lemiami kristalinių uolienų paplitimo prekvartere ir ledynų slinkimo ritmiškų

pasikartojimų, tampa esminiais rodikliais identifikuojant įvairių laikotarpių morenines nuogulas. Visa tai atskleidžia sudėtingą glacialinių gruntų formavimosi procesą (Paškauskaitė, 2014; Molén, 2023).

Vidurinio pleistoceno Medininkų ledynmečio glacialiniai dariniai dažniausiai yra po viršutinio pleistoceno Nemuno svitos ledynmečių nuogulomis ir tik pietrytinėje Lietuvos dalyje jų aptinkama arti Žemės paviršiaus, nepadengtų vėlesnių ledynų. Vidurinio pleistoceno glacialinių gruntų stambių nuolaužų frakcijoje išskiriamas žvyras – vienas iš vyraujančių frakcijų komponentų. Žvyro frakciją dažniausiai sudaro dolomito nuolaužos, kilusios iš Švedijos šiaurės (Gaigalas & Melešytė, 2001; Gaigalas, 2008). Tuo šio ledynmečio dariniai labiausiai skiriasi nuo kitų laikotarpių.

Reikėtų pabrėžti, kad glacialinių gruntų šaltiniai gali būti ne tik įvairios sudėties prekartero uolienos, bet ir ankstesnių apledėjimų ar jų tirpsmo vandens suklostytos nuogulos ir tarpledynmečių nuosėdos, o tai gali apsunkinti jų skaidymą ir koreliaciją (Molén, 2023).

Siekiant patvirtinti vidurinio pleistoceno ir Medininkų ledynmečio išskirtinumą ir amžių, remiantis įvairiais geologiniais tyrimais sukurtas modelis, kuris apibrėžia paskutinio ledynmečio procesus ir jo išplitimą. Šiame modelyje ir deglaciacijos schemoje patvirtinta, kad vienintelės pietrytinės Lietuvos dalies susidarymas nebuvo nulemtas paskutinio viršutinio pleistoceno apledėjimo. Tai leido patikimai nubrėžti paskutinio apledėjimo ribą (Guobytė, 2014).

Minėtas modelis paremtas išanalizuotais ir apibendrintais geologiniais tyrimais – reljefo morfometrine analize, būdingųjų riedulių tyrimais, karbonatų išplovimo gylio morenoje nustatymu, morenos mikroelementinės sudėties analize, nuosėdų geochronologine analize ir biostratigrafiniais tyrimais. Pagrindiniai skirtumai nustatyti sugretinus skirtingų aukštumų (Baltijos–Švenčionių ir Ašmenos–Medininkų) reljefus. Tiriant pastebėta ryškių makromorfologinių skirtumų tarp ledyninių reljefo formų. Minėtina, kad jau anksčiau buvo atlikti detalūs morfologinės analizės tyrimai (Dzūkijos ir Medininkų aukštumų), kurių rezultatai atskleidė, kad šių aukštumų reljefo formos skiriasi dėl ilgos paviršių veikiančios erozijos ir solifliukcijos trukmės (Satkūnas et al., 1995). Aptarti procesai lemia nuogulų storį, paplitimą ir struktūrines savybes.

Sudarytas modelis rėmėsi ir išanalizuota mikroelementine sudėtimi (Kadūnas & Gregorauskienė, 1999). Medininkų ledynmečio moreninėse nuogulose daugiausia yra mineralų elementų, atsparių dūlėjimui (Zr, Mn, Ti, Y, Yb, Pb). Kitų ledynmečių nuogulose daugiausia elementų, susijusių su molio mineralais (Ga, Cr, Co, V, Ni). Nevienodas mikroelementų

pasiskirstymas rodo, kad glacialiniai dariniai susiformavo skirtingais etapais (Bitinas, 2011). Kiek vėliau buvo nustatyta, kad Nemuno svitos ledynmečio Baltijos posvitės moreninius gruntus sudarantys molio mineralai pasižymi mažesniu kalcio karbonato (CaO) kiekiu negu Medininkų ledynmečio mineralai (Gaigalas & Melešytė, 2001).

Dar vienas skirtingų moreninių nuogulų amžiaus patvirtinimas yra karbonatų išplovimo gylis ir mikroelementinė sudėtis (Satkūnas & Bitinas, 1995; Rudnickaitė, 2016). Taip pat minėtini gitijos ir medžio liekanų biostratigrafiniai duomenys paleoėžerų nuosėdose, vyraujančiose paskutinio ledynmečio nepadengtoje teritorijoje (Gregorauskienė & Bitinas, 2017).

Šis glacialinių nuogulų amžiaus įvertinimas svarbus ne tik nustatant nuogulų paplitimą ir paskutinio apledėjimo ribas, bet ir inžineriniu geologiniu aspektu. Kaip jau buvo minėta, inžinerinėje geologijoje įvertinti gruntų sudėtį, fizikines ir mechanines savybes bei jų sąveikas su taikomomis apkrovomis ar juos kitaip veikiant galima tik gerai ištyrus jų susidarymą (kilmę ir raidą) (Clarke, 2018).

Visoje vidutinio klimato zonoje plačiai paplitę glacialiniai gruntai laikomi sudėtingais ir rizikingais, jų sudėtis, struktūra ir savybės skiriasi, todėl labai sunku paimti kokybiškus nesuardytos sandaros mėginius, juos iširti ir teisingai klasifikuoti (Clarke, 2017). Taip pat labai svarbu suprasti aplinką, kurioje šie gruntai susiformavo, ir kaip aplinka veikia elgseną, nes glacialiniai gruntai ne visada atitinka klasikines gruntų mechanikos teorijas.

Remiantis nuogulų amžiaus skirtumais, moreniniai gruntai inžinerinių geologinių tyrimų metu pirmiausia skirstomi atsižvelgiant į susiformavimo laiką. Ištyrus gruntų amžių, pradėdama gilintis į grunto sudėtį, tipą ir savybes.

1991 m. sudarytas Lietuvos inžinerinis geologinis žemėlapis (1:500 000). Žemėlapyje pateikiama kvartero ir prekvartero stratigrafinių genetinių kompleksų gruntų ir uolienu inžinerinė geologinė charakteristika, taip pat nurodytas teritorijos inžinerinis geologinis rajonavimas (Bucevičiūtė et al., 1997).

Lietuvos teritorijoje vyraujančių moreninių gruntų granulimetrinė sudėtis gali būti labai įvairi. Glacialiniai dariniai, sudaryti iš gargždo, žvirgždo, smėlio, dulquio ir molio, – tai sudėtiniai gruntai, kuriuose yra ir labai stambių, ir labai smulkių dalelių. Smulkiusia frakcija – molinės dalelės – sudarytos iš molio mineralų, kurių sudėtis priklauso nuo egzaruotos uolienos tipo (Clarke, 2018).

1.3. Gruntų mechaninės elgsenos klasifikacijos, lauko ir laboratorinių tyrimų metu nustatytų rodiklių sąsajos

1.3.1. Gruntų mechaninės elgsenos klasifikavimo sistemos

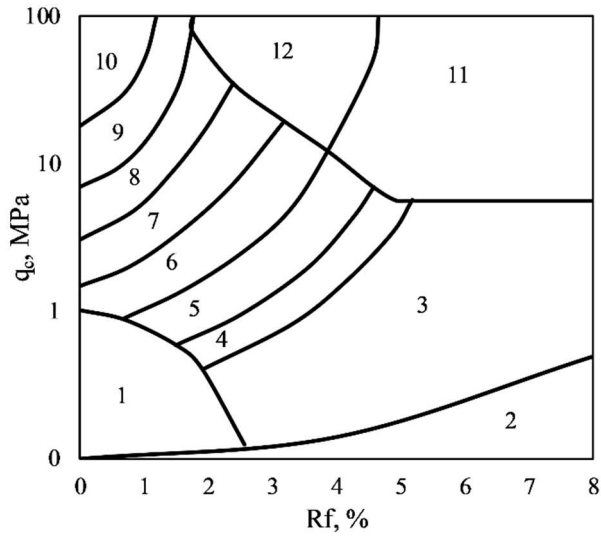
Gruntų klasifikavimo sistema naudojama gruntams pagal bendras charakteristikas sugrupuoti, remiantis paprastais ir ekonomiškais bandymais. Dažniausiai naudojamos gruntų klasifikavimo sistemos pagrįstos fizinėmis (struktūrinėmis) charakteristikomis, tokiomis kaip granulometrinė sudėtis ir plastiškumas (pavyzdžiui, angl. *Unified Soil Classification System*, USCS; *International Standard Organization*, ISO) (Moreno-Maroto et al., 2021). Šiomis struktūromis pagrįstos klasifikavimo sistemos naudojamos daugiau negu 70 metų, siekiant pateikti bendrąsias gaires, vadovaujantis empirinėmis, patirtimi paremtomis koreliacijomis. Vis dėlto tarp paprastų fizikinių rodiklių, nustatomų suardytuose grunto mėginiuose, ir tarp grunto elgsenos lauko sąlygomis egzistuoja reikšmingas neapibrėžtumas. Idealiu atveju gruntai klasifikuojami atsižvelgiant į pagrindines elgsenos charakteristikas, kurios tvirtai susijusios su lauko sąlygomis grįsta grunto elgsena apkrovos metu (Cai et al., 2011; Bol, 2013). Kombinuota klasifikacija, pagrįsta tiek fizikinėmis, tiek elgsenos charakteristikomis, būtų labai naudinga, tačiau mažai taikoma. Grunto tyrimams lauko sąlygomis dėl metodo efektyvumo ir nepertraukiamo matavimo viso bandymo metu inžinerinėje geologijoje ir geotechnikoje plačiausiai naudojamas kūginės penetracijos (statinio zondavimo) bandymas (CPT) (Wu et al., 2023). Šis metodas pasaulyje pradėtas taikyti gana seniai – jau 1917–1927 m. CPT galima greitai nustatyti ir apibrėžti tyrimo vietos profilį, orientacinį grunto tipą, pirminį grunto stiprumą. Taikant šį metodą taip pat papildomi gręžimo metu gauti duomenys ir suteikiama greitos informacijos apie sluoksnių gylį ir storį (Kameistu et al., 2023). Klasifikuojant gruntus, naudojantis lauko tyrimo metodais, dažniausiai klasifikavimas atliekamas panaudojus kūginės penetracijos bandymo duomenis (Shahri et al., 2015).

Teoriniai ir eksperimentiniai CPT su porinio slėgio matavimu (CPTu) patobulinimai leido tirti įvairias geotechnines charakteristikas, todėl šie bandymai tapo vertingais įrankiais, vertinant gruntų tipą ir būklę (Bol, 2013). Kūgis reaguoja į mechaninę grunto elgseną, taigi gruntų tipai skirstomi į grupes, kurios pasižymi panašia mechanine elgsena, o ne fizikinėmis savybėmis, kaip įprastai nustatoma atliekant laboratorinius gruntų tyrimus. Ši klasifikacija svarbesnė praktiniams uždaviniams spręsti. Klasifikacija, atlikta remiantis fizikinėmis savybėmis, suteiktų papildomos informacijos sudarant geomechaninį modelį. Taigi terminas „grunto elgsenos tipas“ (angl. *Soil*

Behaviour Type, SBT) pradedamas vartoti apibūdinant gruntų tipo paaiškinimus, pagrįstus CPT ir CPTu, pabrėžiant, kad jie parodys ne gruntų tipo sudėtį, o grunto elgsenos tipą apkrovos metu. Gruntų tipo klasifikavimo metodai, pagrįsti CPT ir CPTu, dažniausiai aprašomi grafiškai (Sodré, 2022). Atkreiptinas dėmesys, kad daugelyje CPT pagrįstų SBT klasifikavimo sistemų naudojami struktūriniai aprašymai, tokie kaip smėlis ir molis, kurie nėra tikslius.

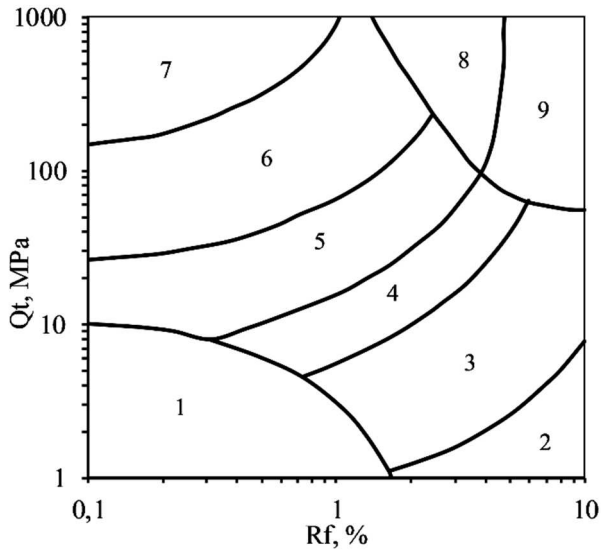
Nemažai tyrėjų bandė klasifikuoti gruntuos naudodamiesi CPT duomenimis. Ankstyvuosiuose metoduose naudotas kūginis stipris (q_c) ir šoninės trinties stipris (f_s) klasifikavimo diagramoms sudaryti, netaikant jokių korekcijų dėl apkrovos ir porinio vandens slėgio (Bol, 2013). Pirmąją gruntų klasifikacijos schema (Begemann, 1965) įrodyta, kad gruntų tipas nėra kūginio ar šoninės trinties stiprio funkcija, – tai šių verčių kombinacija (Fellenius & Eslami, 2000; Valsson, 2016). Po 1965 m. sukurta pirmoji schema (Sanglerat et al., 1975), kurioje kūginis stipris pateiktas logaritminėje skalėje su trinties santykiu linijinėje skalėje. Schemos autoriai pasiūlė gruntų klasifikavimo schema, kuri nurodo ribas tarp pūraus ir tankaus smėlio, taip pat, atsižvelgiant į konsistenciją, molio ir dulkio zonas (Eslami et al., 2020). Buvo teigiama, kad bet kokios gruntų klasifikacijų ar schemų koreliacijos gali būti labai skirtingos, esant įvairioms geologinėms sąlygoms (Schmertmann, 1978). Visos klasifikacijos skirtos tipiniam regionui, kurio sąlygos žinomos, o gruntų jautrumas, šoninės trinties stipris, plastiškumas ir porinio slėgio poveikis schemoms gali daryti didelę įtaką (Bol, 2013). Kiek vėliau pasiūlyta pirmoji gruntų klasifikavimo schema, paremta elektriniu kūginės penetracijos bandymu (Douglas & Olsen, 1981). Po kelerių metų pristatyta gruntų klasifikavimo schema su porinio slėgio matavimu (Jones et al., 1983), vertinant bendrąjį kūgio pasipriešinimą ($q_c - \sigma_{vo}$) ir perteklinį porinį vandens slėgį ($\Delta u = u_2 - u_0$), susidariusį CPTu metu. Modifikavus (Robertson & Campanella, 1983) pirmąją CPT paremtą diagramą (Douglas & Olsen, 1981), pradėtas vertinti perteklinis porinis vandens slėgis ir patobulinta gruntų klasifikavimo sistema (Bol, 2013). Padarius tokią išvadą, pateikta pirmoji klasifikavimo schema, kurioje apibrėžtas porinio slėgio koeficientas (B_q) (Senneset & Janbu, 1985) ir pradėtas naudoti koreguotas kūginis stipris (q_t), atsižvelgiant į porinį vandens slėgį (u_2) (Bihs et al., 2018).

Populiariausią (Robertson et al., 1986) klasifikavimo schema sudaro du grafikai. Rengiant šią schema, panaudoti visi trys CPT metu gaunami parametrai. Taikant B_q , sukurtas klasifikacijos grafikas, kuriame apibrėžta 12 zonų (1.2 pav., 1.3 lentelė), naudojant ašis q_t-R_f (%) ir q_t-B_q .



1.2 pav. Gruntų tipo klasifikavimo grafikas (sudaryta autorės pagal Robertson et al., 1986)

Kiek vėliau ši klasifikacijos sistema (Robertson et al., 1986) pakoreguota (Robertson, 1990) ir pristatyta patobulinta klasifikavimo schema (1.3 pav., 1.3 lentelė), naudojanti normalizuotus kūgio parametrus (koreguotą kūginį Q_t (q_{cnorm}) ir šoninės trinties stiprį (R_{fnorm} (R_f), B_q) (Robertson, 1990, 2009).



1.3 pav. Gruntų tipo klasifikavimo grafikas (sudaryta autorės pagal Robertson, 1990)

Normalizuotų Q_t ir R_f parametrų naudojimas naudingas tuo, kad abu parametrai didėja gyliu dėl augančio efektyviojo įtempio. Atnaujinta schema grafiškai vaizduoja „normalizuotą kūginį stiprį“ Q_t (q_{cnorm}), turintį „normalizuotą trinties santykio koeficientą“ R_f (R_{fnorm}), kūginio pasipriešinimo schemoje pridant porinio slėgio koeficiento schemą, kurioje pateikiamas „normalizuotas kūginis stipris“, turintis porinio slėgio koeficientą B_q (Robertson, 2016). Ši sistema pripažinta patikimesne, nes CPT zondavimo metu nustatytas porinis slėgis daro didžiulę įtaką gaunamiems rezultatams, todėl reikia įvesti korekcijų. Atnaujintoje schemoje gruntų zonų sumažinta nuo 12 iki 9 (1.3 lentelė) (Robertson, 2016).

1.3 lentelė. Robertsono 1986 m. ir 1990 m. parengtų gruntų klasifikacijos schemų palyginimas (sudaryta autorės pagal Robertson, 2009)

<i>Robertson et al. (1986)</i>	<i>Robertson (1990)</i>	<i>Grunto elgsenos tipo (SBT) apibūdinimas</i>
1	1	Jaurūs, gerai išrūšiuoti.
2	2	Organiniai gruntai.
3	3	Molių: nuo molių iki dulkingų molių.
4 ir 5	4	Dulkio mišiniai: molingas dulkis ir dulkingas molis.
6 ir 7	5	Smėlio mišiniai: nuo dulkingo smėlio iki smėlingo dulkio.
8	6	Smėliai: nuo „švarių“ iki dulkingų.
9 ir 10	7	Nuo tankių smėlių iki žvyringų.
12	8	Nuo standžių smėlių iki molingų.
11	9	Standūs, gerai išrūšiuoti (smulkūs).

Gruntai, priskiriami 6 ir 7 zonoms (1.3 lentelė), atitinka CPT tyrimą, atliktą drenuotomis sąlygomis. Gruntai, esantys 1–4 zonose, atspindi nedrenuotas sąlygas, 5, 8 ir 9 zonų gruntai (1.3 lentelė) – tik iš dalies drenuotas sąlygas (Robertson, 1990). Porinio slėgio matavimas, atliekant CPT, teikia patikimesnę informaciją apie drenavimosi laipsnį ir sąlygas (Robertson, 2009; Hotstream et al., 2012).

Tobulinant gruntų klasifikacijos sistemas, nustatytas grunto elgsenos tipo indeksas (I_c) (Pincus et al., 1993), kuris gali parodyti SBT zonas normalizuotoje CPT SBT_n diagramoje (Robertson, 1990) (1.4 lentelė), todėl

šis indeksas taikytas ir 1990 m. (Robertson, 2009) atnaujintam grafikui (Robertson, 2012; Valsson, 2016).

1.4 lentelė. Grunto elgsenos tipo indekso (I_c) rodiklio intervalų palyginimas (sudaryta autorės pagal Jefferies et al., 2016)

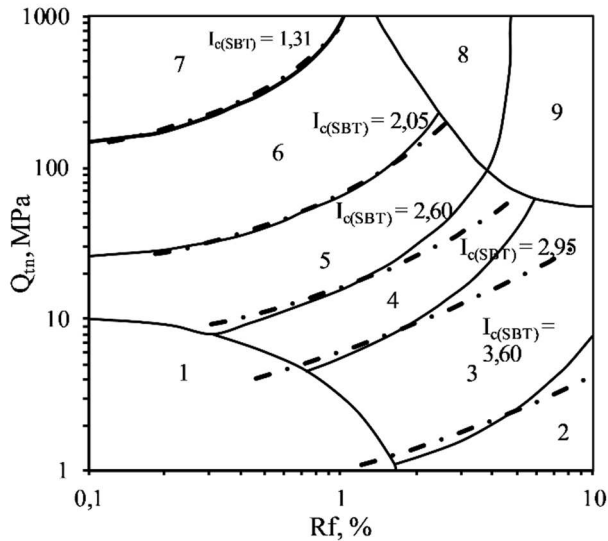
<i>Robertson, (1990)</i>	<i>Grunto elgsenos tipas</i>	<i>Jefferies & Davies (1993), I_c</i>	<i>(Robertson, 2009) Robertson & Wride (1998), I_c</i>
1	Jautrūs, gerai išrūšiuoti.	N/A*	N/A*
2	Organiniai gruntai.	>3,60	>3,60
3	Molių: nuo molių iki dulkingų molių.	2,76–3,22	2,95–3,60
4	Dulkio mišiniai: molingas dulkis ir dulkingas molis.	2,76–2,40	2,60–2,95
5	Smėlio mišiniai: nuo dulkingo smėlio iki smėlingo dulkio.	2,40–1,80	2,05–2,60
6	Smėliai: nuo „švarių“ iki dulkingų.	1,80–1,25	1,31–2,05
7	Nuo tankių smėlių iki žvyringų.	<1,25	<1,31
8	Nuo standžių smėlių iki molingų.	N/A*	N/A*
9	Standūs, gerai išrūšiuoti (smulkūs).	N/A*	N/A*

* N/A – neįvertintos reikšmės.

Vėliau tyrimais nustatyta (Robertson & Wride, 1998), kad grunto elgsenos indeksas didėja, kai gruntai tampa smulkesni. Kai $I_c > 2,60$, gruntai panašesni į molį (Jefferies & Been, 2016).

Svarbiausi Robertsono 2009 m. klasifikacijos ir schemos pakeitimai ir pritaikymai (Robertson, 2009)

Pateiktas atnaujinimas susijęs su normalizuotu kūginiu stipriu (Q_m) ir susietas su SBTn diagrama, naudojant normalizavimą su kintama įtempių eksponente (n) (Robertson, 2016). Į schemą taip pat įvedamas grunto elgsenos tipas (SBTn) ir jo rodiklis (I_c) (Robertson & Wride, 1998) (1.4 pav., 1.4 lentelė). Įvesti atnaujinimai keičia grunto elgsenos tipo zonas, palyginti su zonomis, Robertsono išskirtomis 1990 metais.



1.4 pav. Gruntų tipo klasifikavimo grafikas (sudaryta autorės pagal Robertson, 2009)

Atnaujintos schemos grafike naudojamas Q_{tn} (Robertson, 2009), o ne originalus Q_t (Robertson, 1990). Didžiausias skirtumas tarp Q_t ir Q_{tn} atsiranda rupiuose gruntuose, esant sąlygoms ($\sigma'_{vo} < 1 \text{ atm (1 MPa)}$), kai $Q_t > Q_{tn}$, (nes $n < 1,0$) (Robertson, 2016).

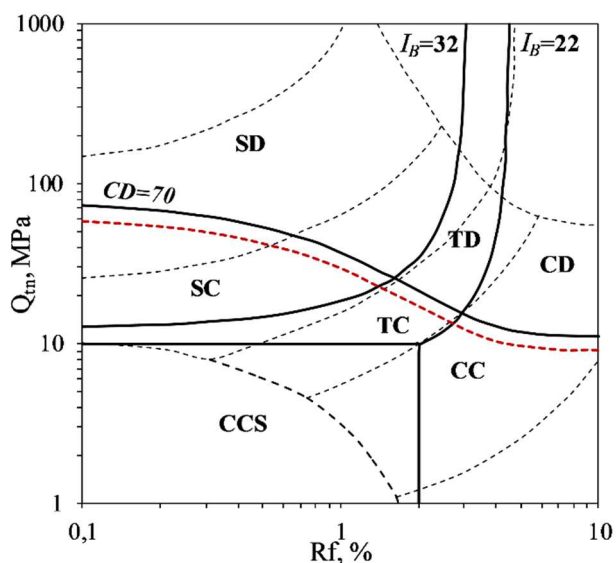
Svarbiausi Robertsono 2010 m. klasifikacijos ir schemos pakeitimai ir pritaikymai (Robertson, 2010)

Pritaikius minėtą modifikaciją, buvo teigiama, kad, naudojant nenormalizuotas kūginio stiprio (q_c) vertes, rezultatai pastebimai nekistų, o efektyvusis įtempis išliktų 50–150 kPa intervale. Taip būtų apibrėžiamas naujas indeksas I_{SBT} (Robertson, 2010, 2012).

Nustatyta, kad rupus ir smulkus gruntas, kurio perkonsolidavimo santykis $OCR > 4$, išsiplečia kirpimo metu (pasireiškia dilatacija), esant dideliems įtempiams. Taigi galima apibrėžti jų zoną, remiantis CPT rezultatais, identifikuojančiais gruntus, kurie yra besiplečiantys (pasireiškia dilatacija) arba susitraukiantys (pasireiškia retrakcija). Taip pat nurodoma sritis, kuri apibrėžia apytikslių ribų tarp drenuoto ir nedrenuoto atsako CPT metu. Pateikta supaprastinta diagrama, identifikuojanti keturias pagrindines grunto elgsenos grupes (išsiplečiantys, susitraukiantys, drenuoti ir nedrenuoti) (Robertson, 2010, 2012).

Svarbiausi naujai modifikuotos Robertsono 2009 m. klasifikacijos schemos pakeitimai ir pritaikymai (Robertson, 2016)

Keletas autorių (Robertson, 2009; Mayne, 2014) teigia, kad daugumai smulkių „idealių“ (nestruktūrinių) gruntų, kurių $OCR > 4$, galioja sąlyga, kad $Q_m > 12$ ir jie daugiausia plečiasi esant dideliems šlyties įtempiams. Taigi, derinant šiuos du kriterijus, nustatyta $Q_m - R_f$ pagrįsta riba, atskirianti gruntus, kurie susitraukia arba plečiasi esant dideliems šlyties įtempiams ($CD = 70$) (Robertson, 2016). Atnaujintoje Robertsono 2016 m. klasifikacijos schemoje išskirtos septynios modifikuotos grunto elgsenos zonos (1.5 pav., 1.5 lentelė), priklausančios nuo grunto elgsenos šlyties metu.



1.5 pav. Gruntų tipo klasifikavimo grafikas (sudaryta autorės pagal Robertson, 2016)

Kai $CD > 70$, gruntai greičiausiai išsiplečia esant dideliems šlyties įtempiams. Grafike taip pat pateikiamos originalios SBT_n ribos (Robertson, 1990, 2009), kad būtų galima palyginti ir išlaikyti pradinį grupavimą, pagrįstą fizikinių charakteristikų aprašymais (pavyzdžiui, smėliu ir moliu). Modifikuotas grafikas rodo grunto elgsena pagrįstus pavadinimus ir ribas, todėl ši schema tinkamiausia taikyti idealiems gruntams (Robertson, 2016).

1.5 lentelė. Robertsono (2016) grunto tipo indeksas ir apibūdinimas

<i>Indeksas</i>	<i>Apibūdinimas</i>
CCS	Molio tipo elgsena – susitraukiantys – jautrūs.
CC	Molio tipo elgsena – dilatuojantys (išsipučiantys).

<i>Indeksas</i>	<i>Apibūdinimas</i>
CD	Molio tipo elgsena – susitraukiantys (retrakcija).
TC	Pereinamojo tipo elgsena – susitraukiantys (retrakcija).
TD	Pereinamojo tipo elgsena – dilatuojantys (išsipučiantys).
SC	Smėlio tipo elgsena – susitraukiantys (retrakcija).
SD	Smėlio tipo elgsena – dilatuojantys (išsipučiantys).

Nustatyta riba tarp susitraukiančių ir išsiplečiančių (dilatuojančių) gruntų, ją lemia keletas kintamųjų: įtempių būvis, grunto plastiškumas, granulimetrinė sudėtis. Ši riba – tarsi perėjimas iš gruntų, kurie daugiausia susitraukia, į tuos, kurie daugiausia plečiasi (dilatuoja), juos veikiant šlyties įtempiams. Taip pat nurodyta, kad riba ($CD = 70$) yra per konservatyvi (gruntai, kurių Q_m reikšmės yra šiek tiek mažesnės, taip pat gali plėstis, esant didesniems įtempiams). Išvesta nauja brūkšninė linija (1.5 pav.), kuri rodo apytikslę apatinę ribą, pagrįstą (Robertson, 2010) pateiktomis idealių gruntų būsenomis. Šie gruntai daugiausia išsiplečia esant dideliems įtempiams (Robertson, 2010, 2016).

Aptariamoje modifikacijoje matyti ir pakeistos pagrindinės SBT_n ribos tarp smėlinių ir molinių gruntų elgsenų, pagrįstos labiau hiperboline forma, naudojant modifikuotą grunto elgsenos tipo indeksą IB (1.5 pav.) (Hotstream et al., 2012). Kai $IB = 32$, tai yra apatinė riba daugeliui idealių smėlio pavidalo gruntų, ji panaši į pradinę ribą tarp 4 ir 5. Riba $IB = 22$ reiškia viršutinę ribą daugeliui idealių molio gruntų ir yra panaši į pradinę ribą tarp 3 ir 4 (1.3 lentelė). Ši $IB = 22$ reikšmė yra apytikslė plastiškumo rodiklio (I_p) 18 proc. riba smulkiuose idealiuose gruntuose (Hotstream et al., 2012; Robertson, 2016). Zona $22 < IB < 32$ apibrėžia pereinantį grunto tipą, kurio elgsena gali būti tarp smėlio ar molio (pavyzdžiui, mažo plastiškumo smulkūs gruntai, tokie kaip dulkis, taip pat dažnai šiai zonai priskiriami ir moreniniai gruntai) (DeJong & Mark, 2012).

Apibendrinant visus grunto elgsenos tipo schemų atnaujinimus (Robertson et al., 1986; Robertson, 1990, 2009, 2016), pabrėžtina, kad inžineriniai geologai ir geotechnikai visada labiau domisi gruntų elgsena lauko sąlygomis, o ne suardytos sandaros gruntų klasifikacija, paremta granulimetrine gruntų sudėtimi ir plastingumu. CPT gaunamais rodikliais paremti grafikai nurodo grunto būvį, nes kūginis stipris tiesiogiai priklauso nuo grunto mechaninės būsenos lauko sąlygomis ir netiesiogiai – nuo grunto tipo klasifikacijos kriterijų.

Robertsono klasifikacijos schemų panaudojimas ir pritaikymas moksliniuose tyrimuose

Analizuojant grunto elgsenos schemas, pabrėžiama, kad, jomis remiantis, didžiausių neatitikimų gali būti mišriuose gruntuose (smėlio ir molio mišiniuose) (Robertson, 2010). Taip pat patvirtinta, kad šios gruntu klasifikavimo sistemos gali būti nepatikimos struktūrizuotų gruntu atveju (Robertson, 2016).

Mokslinėje literatūroje pateikiama nemažai tyrimų, kuriuose lyginamos minėtos klasifikacijos. Keliuose tyrimuose išanalizuotos ir palygintos dvi Robertsono pristatytos gruntu klasifikavimo schemas (Robertson, 1990, 2016). Atlikus analizę, nustatyta, kad šių klasifikavimo sistemų duomenų patikimumas gerokai didesnis, įtraukus gylio parametrus. Tyrimų metu įvedus gylio (z) pataisą, patikimumas padidėja nuo 70 proc. iki 90 proc. (Carvalho & Ribeiro, 2019). Kiti tyrimai parodė, kad, išanalizavus daugiau negu 12 tūkst. taškų (10 314 molio (iš viso apie 85 proc.) 1 411 – mišinių, 387 – smėlio), ši klasifikacijos schema gerokai patikimesnė molio atveju (tikslumas siekė 94 proc.; plg. mišinių ir smėlio – atitinkamai tik 27 proc. ir 21 proc.) (Cho et al., 2023). Taip pat prieita prie išvados, kad pateikiamos grunto elgsenos tipų ribos nebūtinai rodo, jog egzistuoja skirtingi gruntu tipai, nes skirtingi tipai gali būti ir toje pačioje Robertsono schemas zonoje (Thajeel et al., 2022). Tyrimais pagrįsta, kad Robertsono schema (Robertson et al., 1986) gali padėti tiksliai atskirti smulkų gruntą nuo rupaus, tačiau didžiausias neapibrėžtumas išlieka nustatant dulkingo grunto tipą. Kai kur „molingas dulkis ir dulkingas molis“ patenka į „molio iki dulkingo molio“ zoną, o tai turi įtakos gruntu tipo klasifikavimo tikslumui. Todėl dulquio mišinių klasifikavimo tikslumas yra mažas. Taip pat nustatyta, kad, taikant Robertsono 2010 m. pasiūlytą diagramą (Robertson, 2010), gaunamas geras jautrių smulkiagrūdžių gruntu klasifikavimo tikslumas, o naudojant pačią pirmąją diagramą (Robertson et al., 1986), tikslumas siekia 65 proc. (naudojant atlikus pirmąjį atnaujinimą (Robertson, 1990) – apie 80 proc.). Robertsono klasifikavimo tikslumo rodiklis skiriasi, nes, taikant normalizuoto kūgio atsparumo Q_m skaičiavimo metodą, atsižvelgiama į smulkaus ir rupaus grunto skirtumą. Skirtumas reikšmingas ne pereinamojoje gruntu tipo zonoje, todėl riba tarp skirtingų gruntu tipų akivaizdesnė (Zhang et al., 2022).

Aptartos schemas pritaikymas buvo analizuojamas ir tiriant moreninius gruntu. Morenininis smulkus gruntas SBT (Robertson et al., 1986) ir SBT_n (Robertson, 2009) diagramose apibūdinamas kaip dulkis arba molingas dulkis, o tai panašu į laboratorinių tyrimų metu nustatytą grunto pavadinimą. Nenormalizuotose B_q (Robertson, 1990) diagramose šis morenininis gruntas

apibūdinimas kaip smėlis. Analizuojant smėlingą moreninį smulkų gruntą, SBT ir SBT_n diagramose šis gruntas apibūdinamas kaip dulkingas smėlis ar smėlis. Taigi, tyrimas rodo, kad būtina žinoti, kurią klasifikacijos schemą patikimiau taikyti, atsižvelgiant į tiriamą grunto tipą ir jo amžių (Elbanna et al., 2009).

Daugelyje tyrimų pripažįstama, kad Robertsono (Robertson et al., 1986; Robertson, 1990, 2009, 2016) pasiūlyti klasifikavimo metodai yra plačiausiai naudojami visame pasaulyje (Cho et al., 2023). Vis dėlto patariama nuolat siekti pagerinti Robertsono schemas koreliacijų tikslumą, remiantis pasaulinėmis duomenų bazėmis ir taikant šias klasifikacijas atskiroms teritorijoms (Collico & Arroyo, 2022).

1.3.2. Grunto tipo įvertinimas ir klasifikacija Lietuvoje

Grunto tipo nustatymas, remiantis statinio zondavimo duomenimis, taikytas ir Lietuvos teritorijos gruntams tirti. Metodas Lietuvoje pradėtas taikyti gana seniai, dar 1967 m. (Šimkus, 2002), tačiau detalių tyrinėjimų, siekiant nustatyti grunto tipus, atliekant statinį zondavimą, nėra daug.

1987 m. Brilingas pateikė klasifikaciją (1.6 lentelė), sudarytą lauko darbų metu atliktus statinio zondavimo bandymų duomenis nagrinėjant ir susiejant su laboratorijoje nustatytais rezultatais (Šimkus, 1987; Brilingas, 1988).

1.6 lentelė. Brilingo klasifikacija Lietuvos teritorijos gruntams tirti, atsižvelgiant į statinio zondavimo duomenis (Šimkus, 1987; Brilingas, 1988)

$f_s/q_c, \%$	Grunto pavadinimas	q_c/f_s
<1,0	smėlis	>100
1,0–1,4	priesmėlis	100–71
1,4–4,5	priemolis	71–22
>4,5	molis	<22

Ši klasifikacija neapibrėžia visų Lietuvos teritorijoje aptinkamų gruntų tipų (neiškiriami organiniai ir dulquio gruntai). Klasifikacija aprėpė Lietuvoje dažniausius gruntuos, naudojamus pamatų pagrindams. Tuo metu ši klasifikacija buvo patikima ir itin plačiai naudojama praktikoje. 1.6 lentelėje įvardyti gruntų tipai buvo klasifikuojami remiantis ne tik statinio zondavimo duomenimis, bet ir jų fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis (Šimkus et al., 1973). Vis dėlto vėliau palaiapsniui pereita prie europietišku ISO standartu, kur nebeliko tokiu grunto pavadinimu kaip *priesmėlis* ar *priemolis*. Brilingo

(1988) ir Šimkaus ir kt. tyrėjų (1973) rezultatai nebuvo modifikuoti ar patikslinti, todėl minėtas skirstymas šiandien praktikoje taikomas netikslingai.

1984 m. Brilingas, Valiulis ir Ignatavičius (Brilingas, 1988; Šimkus, 1987) pateikė atskirų gruntų tipų koreliacines priklausomybes tarp grunto deformacijos modulio ir kūginio stiprio (1.7 lentelė). Grunto E priklausomybėms išvesti gautas lauko tyrimų metu, naudojant statinę plokštę (5 000 cm² ploto plokštę, taikant GOST 12374-77 metodiką). Gautos koreliacijos paremtos α proporcingumo koeficientu (Sanglerat et al., 1975), kuris priklauso nuo grunto tipo ir jo savybių (Šimkus, 1987). Vis dėlto minimų gruntų tipai ir pavadinimai nebeatitinka šiuo metu naudojamų gruntų tipų klasifikacijų. Šios lygtys buvo taikomos naudojant GOST 25100-82 klasifikaciją.

1.7 lentelė. Koreliacinės priklausomybės tarp grunto deformacijos modulio ir kūginio stiprio (Brilingas, 1988; Šimkus, 1987)

<i>Grunto pavadinimas</i>	<i>Koreliacinė priklausomybė</i>
Bendroji lygtis	$E = \alpha \cdot q_c$
Moreninis priemolis	$E = 7,4 \cdot q_c + 7,2$
Moreninis priemolis ir priemolis, kai $6,5 < q_c < 30$ MPa	$E = 2,85 \cdot q_c + 23,9$
Dulkingas priemolis	$E = 5 \cdot q_c$
Dulkingas priemolis	$E = 7 \cdot q_c$
Molis	$E = 8,2 \cdot q_c - 3,1$
Molis nuo kietos iki minkštai plastiškos konsistencijos	$E = 8,0 \cdot q_c$
Vidutinio tankumo ir tankus smėlis, kai $q_c > 5,0$ MPa	$E = 7,8 \cdot q_c^{0,71}$
Purus smėlis, kai $q_c < 5,0$ MPa	$E = 3 \cdot q_c$

Remiantis ISO 146688-2 (2004) standartu, 2012 m. pateiktos oedometrinio deformacijos modulio koreliacijos (Martinkus et al., 2012) dviem grunto tipams (1.8 lentelė). Koreliacijos atliktos remiantis kūginio stiprio vertėmis ir oedometrinio bandymo metu gautais rezultatais.

1.8 lentelė. Oedometrinio deformacijos modulio koreliacijos (Martinkus et al., 2012)

<i>Grunto pavadinimas</i>	<i>Koreliacinė priklausomybė</i>
Moreninis mažo plastiškumo smėlingas molingas dulgis (sacSi)	$E = 1,15 \cdot q_c + 17,5$
Moreninis mažo plastiškumo smėlingas dulkingas molis (sasiCl)	$E = 2,0 \cdot q_c^2 - 14,0 \cdot q_c + 47,0$

Dėl per mažos bandymų imties buvo rekomenduojama papildyti ir patikrinti gautas regresijos lygtis. Šios koreliacijos praktikoje nebuvo taikomos.

Šiuo metu Lietuvoje naudojama grunto klasifikacija, kurioje į grupes skirstoma atsižvelgus į tankumą ir stiprumą, ir skaičiuojamas deformacijos modulis (TAR, 2015-11-16, Nr. 18162). Nuo 1987 m., kai buvo išvestos gruntų deformacijos modulio koreliacinės priklausomybės, iki šių dienų jau pasikeitę keturi gruntų klasifikacijos standartai ar rekomendacijos (GOST 25100-82; LST 1445:1996; ASTM D 2487-17; ISO 14688-1:2018, ISO 14688-2:2018; TAR 2019-06-14, Nr. 2019-09653). Tai reiškia, kad gruntų pavadinimų skyrimo kriterijai taip pat nuolat keitėsi. Didžiausių skirtumų yra dėl smulkių gruntų pavadinimų, nes nuolat buvo keičiama smulkiosios ir rupiosios frakcijos procentinė riba (nuo smulkaus ar rupaus (40–60 %) santykio iki dabar galiojančio smulkaus ar rupaus (35–65 %) santykio).

Taigi grunto deformacijos modulio skaičiavimas vis dar paremtas pirminėmis išvestomis koreliacijomis. Atlikus lyginamąjį tos pačios granulometrinės sudėties grunto tyrimą, pavadinimas buvo parenkamas remiantis skirtingomis klasifikacijomis ir, atsižvelgiant į nustatytą pavadinimą, apskaičiuojamas deformacijos modulis. Gauti nevienodi gruntų pavadinimai lemia didelius deformacijos modulio reikšmių skirtumus, nors analizuojamas tas pats gruntas, tik pasirenkama skirtinga klasifikacinė sistema. Prieita išvada, kad, remiantis skirtingais standartais, nustatomas vis kitoks grunto pavadinimas, tada neteisingai ir netinkamai naudojamos išvestos koreliacijos, siekiant įvertinti netiesioginį grunto deformacijos modulį (Tamošiūnas et al., 2022).

Pagrindinis skirtumas tarp pasaulyje taikomų grunto tipo klasifikacijų ir klasifikacijos, taikomos Lietuvoje, yra grunto tipo elgsenos įvertinimas. Lietuvoje grunto elgsena apibrėžiama remiantis tik laboratoriniais tyrimais nustatytu grunto pavadinimu. Pasaulinėse klasifikacijose (pavyzdžiui, Robertsono) daugiau dėmesio skiriama tam, kokia yra grunto mechaninė elgsena, veikiant taikomoms apkrovoms, nepriklausomai nuo pavadinimo.

1.3.3. Grunto būvio ir tyrimų sąlygų įvertinimas ir pritaikymas

Inžinerinių geologinių tyrimų tikslas – įvertinti grunto tipą, jo būvį ir atsaką į išorinius veiksnius, taip pat nustatyti fizikinių ir mechaninių savybių rodiklių vertes. Pirminis grunto tipo, sudėties, būsenos ir savybių įvertinimas atliekamas vykdant bandymus lauke (Crisp et al., 2019).

Siekiant patikimai ir tiksliai interpretuoti CPT rezultatus, reikia visapusiškai suvokti kūgio įsiskverbimo procesą, gautų rezultatų tikrąją vertę ir sąlygas, esančias atliekant bandymą. Įprastai CPT gautos vertės priklauso nuo grunto tipo ir jo drenavimosi sąlygų (Sheng et al., 2014; Price et al., 2019). Teigiama, kad prasiskverbimas į rupius gruntuos vyksta esant drenavimo sąlygoms, atsižvelgiant į didelį šių gruntų laidumą vandeniui, o į smulkiuosius (rišlius) gruntuos dėl mažo jų laidumo prasiskverbiamas esant nedrenavimo sąlygoms. Tarpinių gruntų, tokių kaip dulkis ar moreniniai smulkieji gruntuos, laidumas vandeniui įprastai yra tarpinis, tarp smėlio ir molio. Dėl šios minėtų gruntų savybės tyrimas atliekamas esant iš dalies drenavimo sąlygoms CPT metu (Wu et al., 2023).

Vertinant grunto charakteristikas, galima teigti, kad tyrimų rezultatai, gauti lauko sąlygomis, suteikia tik pirminę informaciją, kuri turi būti pagrįsta gręžimo duomenimis ir laboratoriniais rezultatais. CPT gali būti naudojami kaip nuoroda, nustatant gruntų tipus ir suteikiant informacijos, kokius kitus lauko ar laboratorinius bandymus reikėtų pasitelkti, siekiant gauti detalesnę informaciją.

Grunto duomenų analizės metodika lauko ir laboratorinio bandymo metu priklauso ir nuo norimo gauti rezultato bei jo tikslo (Tiwari & Ajmera, 2018; Patel, 2019). Nedrenuotas stiprumas ar tyrimo metu esančios nedrenavimo sąlygos įprastai priskiriamos smulkiesiems gruntams, kurie apkraunami greičiau, negu gali išsisklaidyti perteklinis porinis slėgis, susidaręs dėl gniuždymo ar tangentinių įtempių. Šios sąlygos, priklausomai nuo grunto sandaros ir apkrovų pobūdžio, įprastai gali susidaryti vykdomų statybos darbų metu arba iš karto po apkrovimo, t. y. tuo metu, kai gruntuos dar nekonsoliduojamas ir nevyksta tūrio pokyčių (sumažėjimo), dėl kurio išauga atsparumas šlyčiai (Wrzesinski et al., 2019).

Minėtų sąlygų tyrimas svarbus greito apkrovimo metu ir trumpalaikės apkrovos atveju: vykdam užtvankos, dambos ar pylimo užpylimą, potvynių ir vandens rezervuare pakilimo metu, seisminio drebėjimo, laikinų kasinėjimų ar nukasimo darbų bei laikinų konstrukcijų tvirtinimo metu, atliekant šlaitų analizę dėl šlaito nukasimo, nuslinkimo ir kt. (daroma prielaida, kad nevyksta konsolidacija dėl papildomos apkrovos, statybos, potvynių ar seisminių apkrovų) (Mun et al., 2016). Nedrenuotas stiprumas taip pat apskaičiuojamas remiantis efektyviųjų įtempių teorija, atskirai vertinant įtempius tarp grunto dalelių ir hidrostatinio slėgio.

Drenavimo sąlygos apibūdina grunto reakciją į ilgalaikę apkrovą. Iš gaunamų grunto rodiklių kontroliuojami tik efektyvieji įtempiai. Pagrindinė tyrimo sąlyga – nuolatinė ir statinė apkrova. Esant tokioms sąlygoms,

nuolatinės konstrukcijos vertinamos visą statinio eksploatacijos laikotarpį, šlaitų būklė, vykstant vandens prasisunkimui ar bet kokiam grunto ir statinio veikimui, vertinama nuolat (Budhu, 2010; Eid et al., 2016).

Esant drenavimo sąlygoms, gniuždant ar kerpant didesnio pralaidumo rupius gruntuos, dar vadinamus švariais gruntais, vanduo iš mėginio greitai pasišalina. Tikimasi, kad nuolatinų apkrovų metu, iš šių didesnio pralaidumo gruntuos ištekėjus vandeniui, bet koks šlyties sukeltas perteklinis porinis vandens slėgis išsisklaidys beveik akimirksniu (Lade, 2016). Smulkiuose gruntuose perteklinis vandens slėgis gali nesusidaryti, jei apkrovimas ir drenavimasis vyks vienu metu. Taigi perteklinis vandens slėgis porose, susidaręs dėl suspaudimo ar šlyties, išsisklaidytų arba visai nesusidarytų, o tai galiausiai sukeltų nuolatinę vandens prasiskverbimo būseną.

Jei gruntas yra purus ir (arba) neperkonsoliduotas, normaliai konsoliduotas arba mažai perkonsoliduotas ($LOC = OCR < 4$) (Robertson, 2016), nedrenuoto grunto stiprumas bus labai mažas, palyginti su tankesniu (perkonsoliduotu) gruntu arba tuo pačiu gruntu, esant drenavimo sąlygoms. Jei gruntas tankus ir (arba) labai perkonsoliduotas ($HOC = OCR > 4$) (Robertson, 2016), nedrenavimo metu tiriamas stiprumas bus labai didelis. Tankius ir labai perkonsoliduotus gruntuos didelis trumpalaikis nedrenuotas stipris veikia mažiau negu mažesnis drenuotas stipris. Teoriškai nedrenavimo sąlygos gali būti modeliuojamos naudojant efektyviusius įtempius, tačiau visada turi būti įvertintas susidarantis porinis vandens slėgis, o tai atlikti gana sudėtinga (VandenBerge et al., 2015).

Vertinant grunto mechaninių savybių rodiklius ir žinant jų naudojimo tikslą, reikia ne tik atsižvelgti į drenavimo ar nedrenavimo sąlygų reikšmę, bet labai svarbu įvertinti ir grunto elgseną, būsimus įtempius, apkrovų dydžius ir apkrovimo greitį (trumpalaikė ar ilgalaikė apkrova) (Mirsayapov & Koroleva, 2019).

Visa tai įvertinti lauko bandymuose labai sudėtinga ne tik dėl esamų sąlygų, bet ir dėl limituotų bandymo metodų. Laboratoriniais bandymo metodais galima sukurti reikiamas tyrimų sąlygas reikalingiems rodikliams gauti ir juos taikyti tikslingsoms užduotims.

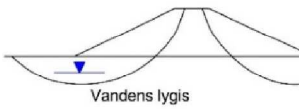
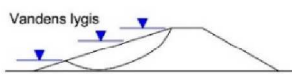
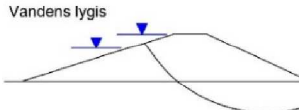
Grunto mechaniniams rodikliams nustatyti laboratorijoje naudojami šie pagrindiniai metodai:

- ◆ *Grunto kompresinio (oedometrinio) spūduo bandymas* (angl. *Oedometer Test*, OED) (CEN ISO/TS 17892-5:2017). Duomenų analizė leidžia apskaičiuoti oedometrinę deformacijų modulį (E_{oed}) (vienašio suspaudimo metu, kai leidžiama kontroliuoti vieną dydį: įtempį arba deformaciją ašine kryptimi) reikiamų ir būsimų

apkrovų intervale. Šiuo tyrimu galima numatyti, kaip gruntas deformuosis lauke, reaguodamas į efektyviojo įtempio pasikeitimą, jo nuosėdžius. Tyrimas leidžia įvertinti laiką, per kurį nuosėdžiai pasireikš (Zhafirah et al., 2019);

- ◆ *Tiesioginio kirpimo* bandymas (angl. *Direct Shear Test*, DST) (LST EN ISO 17892-10:2018). Duomenų analizė leidžia apskaičiuoti suminius kerpamojo stiprio rodiklius. Jie apibrėžiami kaip didžiausias atsparumas, kurį tiriamas gruntas gali atlaikyti kirpimo (šlyties) metu. Iš tyrimo metu gautų rodiklių galima apskaičiuoti grunto laikomąją gebą, įvertinti šlaito stabilumą, šoninius grunto slėgius laikančiosiose konstrukcijose (Thermann et al., 2006). Tiesioginio kirpimo bandymai skirti tiek nekonsoliduotoms, tiek konsoliduotoms drenuotoms ir nedrenuotoms sąlygoms įvertinti, tačiau pabrėžiama, kad, atliekant šį tyrimą, drenavimo sąlygų reguliuoti neįmanoma, todėl grunto drenavimosi sąlygos priklauso nuo tiriamo grunto tipo. Minėtina ir tai, kad, atliekant tyrimą, nei grunto soties laipsnio, nei porinio slėgio ar jo drenavimosi sąlygų kontroliuoti ir įvertinti negalima (Laloui & Rotta Loria, 2020).
- ◆ *Triašio slėgio* bandymas (TT – UU, CU, CD, UU) (LST EN ISO 17892-8:2018; LST EN ISO 17892-9:2018). Duomenų analizė leidžia apskaičiuoti suminio ir efektyvaus kerpamojo stiprio rodiklius, vertinant tiek ilgalaikių, tiek trumpalaikių apkrovų poveikį. Papildomai galima įvertinti tokias savybes, kaip dilataciją ir standumą (Nguyen et al., 2018). Vienas iš šio bandymo tikslų – kuo labiau priartinti bandinį prie natūralios būsenos sąlygų jį konsoliduojant ir sotinant. Triašių bandymų rezultatai taikomi labai plačiai: nuo šlaitų stabilumo analizės iki dangų ir tunelių projektavimo bei laikomosios gebos skaičiavimų, atliekant laikinuosius darbus ir projektuojant pamatus (1.9 lentelė) (Patel, 2019). Šio tyrimo metu kontroliuojama ir vertinama grunto soties laipsnis, porinis slėgis ir jo drenavimosi sąlygos.

1.9 lentelė. Keletas tyrimo sąlygų ir tipų įvertinimų (Patel, 2019)

<i>Analizuojamos sąlygos</i>	<i>Kerpamasis stipris: CU, CD, UU</i>	<i>Tipinė schema</i>
1 atvejis –statybų metu ir statybų pabaigoje	Gerai besidrenuojantys gruntai – CD. Naudojami efektyvieji įtempiai.	
	Mažai laidūs gruntai (drėgni ir prisotinti vandens) – UU, kai $OCR < 2-4$. Naudojami suminiai įtempiai.	
	Mažai laidūs gruntai (silpnai drėgni) – CD, kai $OCR > 2-4$. Jei $OCR < 2-4$, tada $\varphi = 0$. Naudojami efektyvieji įtempiai.	
2 atvejis– staigus vandens pažemėjimas	Gerai besidrenuojantys gruntai – CD.	
	Mažai laidūs gruntai – trijų etapų skaičiavimai. Pirmajame etape naudojami CD arba CU; antrajame – UU; trečiajame – CD arba UU, priklausomai nuo to, kuris stiprumas mažesnis. Naudojami efektyvieji ir suminiai įtempiai.	
3 atvejis – vandens pakilimas	Gerai besidrenuojantys gruntai – CD. Liekamasis stiprumas naudojamas šlyties deformacijos vietose arba zonose, kur atsiradęs slysmo paviršius. Naudojami efektyvieji įtempiai.	
	Mažai laidūs gruntai (drėgni ir prisotinti vandens) – UU, kai $OCR < 2-4$. Naudojami suminiai įtempiai.	
	Mažai laidūs gruntai (silpnai drėgni) – CD. Jei $OCR < 2-4$, tada $\varphi = 0$. Naudojami efektyvieji įtempiai.	

Efektyviųjų įtempių rodikliai gaunami atlikus prisotintų bandinių konsoliduotus drenuotus (CD) arba konsoliduotus nedrenuotus (CU) triašio slėgio bandymus, matuojant porinį slėgį. Nedrenuotą nekonsoliduotą kerpamąjį stiprį galima gauti atlikus nekonsoliduotus nedrenuotus (UU) ir

tiesioginius paprastus šlyties bandymus. Nedrenuotas kerpamasis stipris taip pat gali būti įvertintas naudojant CU bandymus, prieš tai bandinį konsolidavus iki lauko sąlygų būklės.

1.4. Fizikinių savybių įtaka grunto elgsenai ir mechaninių savybių rodikliams

1.4.1. Gruntų fizikinių savybių įtakos tyrimai

Natūraliai slūgsantys moreniniai gruntai yra nevienalyčiai ir turi sudėtingą mikro- ir makrostruktūrą. Smulkūs moreniniai gruntai yra žvyro, smėlio, dulquio ir molio mišiniai, todėl nėra lengva suskirstyti natūralų gruntą tik į rupų ar smulkų. Dažnu atveju sudėtyje yra visų frakcijų. Minėtina, kad gruntų fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei elgsenai didelę įtaką daro heterogeniškumas, anizotropija ir geologinė aplinka, kurioje šie gruntai susidarė (Kim et al., 2017; Yin et al., 2021).

Apibūdinti moreninių gruntų mechaninę elgseną labai komplikauta dėl sudėtingos, įvairios jų struktūros bei sudėties ir geologinių slūgsojimo sąlygų. Minėtina ir tinkama bandinio paėmimo metodika, taip pat bandinio svarbu nesuardyti jį transportuojant ir atliekant bandymą (Clarke, 2018). Mokslinėje literatūroje nurodoma, kad eksperimentiniai ir teoriniai gruntų elgsenos tyrimai dažnai koncentruojami į idealius gruntus (idealiai prisotintą, konsoliduotą molį arba vienalytį smėlį), taigi gruntų mechanika ir jos dėsniai daugiausia plėtojami remiantis šių idealių gruntų ar gruntų, kurie slūgso tam tikroje vietoje ar aplinkoje, tyrimų rezultatais (Khasanov & Khasanov, 2020; Yin et al., 2021; Tang et al., 2023).

Seikiant geriau suvokti natūralių gruntų mechaninę elgseną, laboratoriniuose tyrimuose dažnai naudojami supaprastinti ir kontroliuojamos sudėties gruntai. Šie supaprastinti gruntai gali būti rekonstruoti smėlio ir dulquio arba smėlio ir molio mišiniai, kurių struktūra panaši į natūralių gruntų struktūrą. Tokių supaprastintų mišinių savybės laikomos tarpinėmis, arba pereinamosiomis, tarp sudėtinių gruntų savybių. Rupių ir smulkių gruntų mišinio mechaninė elgsena gali būti aiškinama, atsižvelgiant į sąveikos tarp rupių ir smulkių gruntų pobūdį. Laboratoriniai apibrėžtos frakcijos kiekio smėlio ir molio mišinio tyrimai gali suteikti informacijos, leidžiančios išsiaiškinti tokio grunto elgseną ir ją prognozuoti. Taigi tokių gruntų tyrimų skaičius labai reikšmingas. Vis dėlto nustatytos tirtų gruntų savybės ir reakcija į mechanines apkrovas kol kas mažai aprašyta (Akayuli et al., 2013; Kim et al., 2017, 2018; Yin et al., 2021).

Grunto parametrų ir sudėties įtaka deformacijai ir stabilumui labai reikšminga apibrėžiant ir interpretuojant gaunamus rodiklius. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys deformacinius ir stiprio rodiklius bei grunto atsaką veikiant išorinei jėgai, yra gruntą sudarančių dalelių dydis, smulkiosios frakcijos kiekis ir drėgnis. Galiausiai, visi įtrūkimai, tarp sluoksniams, fizikinės savybės, tokios kaip tankis, poringumas ir kt., taip pat tiesiogiai veikia grunto mechanines savybes, esant išorinei apkrovai. Pasikeitus bet kuriai fizikinei smulkaus grunto savybei, pasikeis ir grunto stiprumas (Saravanan et al., 2020).

1.4.2. Gruntų dalelių dydžio ir kiekio įtaka

Skirtingos grunto dalelių struktūros, įvairios granulometrinės sudėties dalelių kiekis ir šių dalelių išsidėstymas grunte formuoja skirtingą atsparumą deformacijai, išorinėms apkrovoms ar bet kokiam natūralios būklės pakeitimui, keičiant grunto struktūrinę sudėtį ir jo dalelių išsidėstymą (Saravanan et al., 2020). Gruntus sudarančios skirtingų frakcijų (dydžių) dalelės pasižymi nevienodomis mechaninėmis ir fizikinėmis savybėmis, tačiau smulkių ir rupių dalelių ryšį labai sunku atskirti. Taigi yra daug mišinių ir vienalyčių gruntų skirtumų, tokių kaip suirimo paviršiaus ir įtempių sklidimo skirtumai, taip pat laikančioji geba ir grunto struktūra (Jiang et al., 2015).

Siekiant suvokti mišinių sudėtį, atlikta gana daug laboratorinių ir lauko bandymų, elgsenai analizuoti taikyti įvairūs metodai, tačiau įprastai daugiausia dėmesio skiriama rupių dalelių savybėms, tokioms kaip forma, dydis ar apvalumas. Tokių tyrimų metu į smulkiųjų dalelių poveikį ir jų kiekį grunte neatsižvelgiama (Jiang et al., 2015).

Įtaka grunto stiprumui

Nėra žinoma, kokia turi būti riba tarp smulkių ir rupių dalelių. Be to, ši riba nuolat skiriasi dėl įvairių veikiančių kintamųjų. Tam tikro tipo grunte smulkiosios dalelės dalyvauja surišant arba sucementuojant kitas grunto daleles, o tai pagerina grunto vientisumą ir atsparumą. Be to, skirtingo smulkiųjų dalelių kiekio mišiniai turi skirtingas stiprumo charakteristikas (Cabalar, 2011; Vallejo, 2001; Jiang et al., 2015; Phan et al., 2016).

Rupios frakcijos (smėlio ir žvyro) kiekis grunte lemia kerpamojo stiprio rodiklių (c , c' , ϕ , ϕ') reikšmes. Nustatyta, kad tuo atveju, kai rupioji grunto frakcija sudaro >75 proc., kerpamojo stiprio reikšmėms daugiausia įtakos turi pasipriešinimas tarp smėlio dalelių. Smėlio koncentracijai sumažėjus nuo 75 iki 40 proc., kerpamąjį stiprį iš dalies lemia molio atsparumas šlyčiai ir smėlio

grūdelių atsparumas trinčiai. Smėlio frakcijos kiekiui kritus mažiau negu 40 proc., grunto stiprumą lemia smulkiosios frakcijos pasipriešinimas. Poringumo tyrimai smėlio ir molio mišiniuose parodė, kad poringumas priklauso nuo mišinio santykio. Nustatyta, kad mišinių poringumas yra mažesnis, negu vertinant smėlinio ir molinio grunto poringumą atskirai (Vallejo & Mawby, 2000).

Didėjant tankiui, didėja grunto sankiba ir vidinės trinties kampas. Nustatyta, kad didžiausią tankį sukuria gruntų mišiniai, kuriuose 26 proc. molio ir 74 proc. smėlio dalelių frakcijų. Tai gali reikšti, kad, esant iki 26 proc. molio frakcijos, molis palaipsniui užpildo tuštumas tarp smėlio grūdelių, o ši dydį viršijant, smėlio dalelės pradeda plūduriuoti sutankinto molio matricoje ir tarp jų nebelieka kontakto (Miller & Sowers, 1958). Nustatytas molio procentinės dalies smėlio ir molio mišinyje ir grunto savybių ryšys. Didėjant molio procentiniam kiekiui grunte, tankis didėja tol, kol molis pradeda perpildyti tuštumas. Vadinas, tolesnė grunto konsolidacija priklauso nuo molio ir vandens santykio (Havens & Goodwin, 1951). Šios srities tyrimai (Havens & Goodwin, 1951; Miller & Sowers, 1958) patvirtina, kad, didėjant molio kiekiui smulkiuose gruntuose, sankiba didėja, o vidinės trinties kampas mažėja (Yin et al., 2021).

Tyrimais taip pat patvirtinta, kad smėlio ir molio mišinys, esant mažam molio kiekiui, elgiasi kaip rupus gruntas, o esant dideliame kiekiui, – kaip smulkus. Molio kiekio riba, kurią pasiekus elgsena keičiasi iš „panašaus į smėlį“ į „panašų į molį“, gali skirtis. Nuo šios ribos priklauso išmatuoti grunto rodikliai, tokie kaip sankiba, pikinis ir liekaninis stiprumas, vidinės trinties kampas (Simpson & Evans, 2016). Nuo 5 iki 10 proc. didėjantis molio kiekis rupiuose gruntuose didina sankibos vertes. Atlikus bandymą su paruoštais smėlio ir molio mišiniais, kuriuose molio kiekis svyruoja nuo 5, 10, 15, 20, 25 iki 30 proc., nustatyta, kad smėlio ir molio mišinių vidinės trinties kampas pasiekia piką, kai molio frakcija sudaro 10 proc. (Kim et al., 2019). Esant didesniai negu 20 proc. molio kiekiui, grunto sankiba pradeda mažėti (Dafalla, 2013). Didėjant molio kiekiui, nedrenuotas kerpamasis stipris ir nedrenuotas liekamasis stipris mažėja nuo 0 iki 20 proc. (Krim et al., 2019; Yin et al., 2021). Minėtini ir nesuvaržytos konsolidacijos bandymai, naudojant skirtingus smėlio ir molio mišinius. Tyrimo rezultatai parodė, kad didžiausias nesuvaržytas mišinių gniuždymo stipris yra tada, kai molio frakcija sudaro 40–60 proc. viso mišinio, nepriklausomai nuo molio tipo (Nagaraj, 2016). Atlikus nedrenuotus triašio slėgio bandymus su smėliu, kuriame dulčio frakcija kinta nuo 5 iki 75 proc., gauti rezultatai parodė, kad didžiausias stiprumas iš pradžių padidėja esant maždaug 5 proc. dulčio frakcijos, o vėliau greitai mažėja iki beveik ribinio dulčio kiekio ir galiausiai išlieka santykinai

pastovus visų dulquio frakcijų atveju iki grynojo dulquio (Dash & Sitharam, 2011). Sąlygiškai tankiuose smėlio ir stipriuose molio mišiniuose, kuriuose molio kiekis gali sudaryti nuo 0 iki 100 proc., šlyties stiprumas sparčiai mažėja didėjant molio kiekiui. Smėlio karkaso struktūra tampa laisvesnė, nes tarp smėlio dalelių padaugėja molinio grunto frakcijos (ar dalelių). Purių smėlio ir silpnų molio mišinių mėginių stiprumas įprastai išauga didėjant molio kiekiui (Kim et al., 2017). Aptartų bandymų rezultatai rodo, kad smėlio ir molio mišinio mechaninis atsakas skiriasi priklausomai nuo molio frakcijos kiekio. Įprastai galima nubrėžti ribą, rodančią perėjimą nuo smėlio tipo prie molio (Yin et al., 2021).

Įtaka grunto deformacijai

Bandymais nustatyta, kad iki tam tikro taško (šis taškas vadinamas *pereinamąja smulkiųjų dalelių zona* (FCt)) smulkiosios dalelės lemia smėlio ir molio mišinių deformatyvumą arba daro jam įtaką. FCt riba svyruoja nuo 19 iki 34 proc. Kai smulkiųjų dalelių koncentracija viršija FCt , grunto deformaciją kontroliuoja tik molio frakcija (Murat & Ozden, 2007). Tiriant smėlio frakcijos įtaką grunte, prieita prie išvados, kad, molio kiekiui molinguose smėliuose padidėjus nuo 4,6 iki 10 proc., tai neturi įtakos grunto deformacijai. Tendencija keičiasi, kai molio frakcija svyruoja 20–30 proc. intervale. Šiuo atveju rezultatai pasiekia reikšmes, būdingas moliniams gruntams (Georgiannou et al., 1990).

Visada išlieka bendroji tendencija: gruntas mažiau deformuojamas, kai jame mažiau smulkiosios frakcijos (Habtemariam et al., 2022). Padidėjus smulkiosios frakcijos kiekiui, didėja grunto deformatyvumas ir kompresijos rodiklis (c_c), mažėja pralaidumas vandeniui (Akayuli et al., 2013; Reece, 2021). Didėjant dalelių dydžiui, vyksta grunto suirimo mechanizmas. Veikiant apkrovoms, nuo skilimo pereinama prie mechanizmo, kuriame vyrauja šlytis (Wang et al., 2021). Smėliniams gruntams deformacijos požiūriu didžiausią poveikį daro jų dalelių dydis ir pasiskirstymas. Deformacijos modulis didėja stambesnėje frakcijoje (Sabarishri et al., 2017; Wang et al., 2021).

Įprastai grunto dalelių dydis yra lemiamas veiksnys, vertinant įtempių ir deformacijų bei stiprumo savybes ir charakteristikas. Atlikta nemažai tyrimų, tačiau santykis tarp smulkiųjų dalelių kiekio ir grunto stiprumo vis dar nėra aiškus (Jiang et al., 2015).

Apibendrinant galima teigti, kad didesnis molio kiekis grunte reiškia didesnę plastiškumą, susitraukimo ir išsipūtimo potencialą, didesnę deformatyvumą ir didesnę sankibą bei mažesnę hidraulinių laidumą ir vidinės trinties kampą. Atkreiptinas dėmesys, kad stambiagrūdis arba rupus gruntas gali turėti tam tikrų sankabumo savybių, kai jame vyrauja (5–40 %) dulquio ir

molio dalelės. Smėlio mišinių konsistencijos ribos susietos su molio kiekiu grunte tiesiniu ryšiu, išskyrus tuos mišinius, kuriuose molio kiekis mažas (Wagner, 2013).

Taip pat minėtina, kad smulkus rišlus gruntas yra sankabus, jam būdingas didelis deformacijos laipsnis, veikiant apkrovai ar įtempiams. Taigi, vyraujant smulkiems gruntams, įprastai formuojasi didesni nuosėdžiai. Rišliuose gruntuose nusėdimo procesas labai lėtas, todėl nuosėdžiai gali pasireikšti ir vėliau, jau nustojus veikti apkrovai.

1.4.3. Gruntų gamtinio drėgnio ir plastingumo rodiklio įtaka

Smulkiagrūdžiai gruntai turi molio frakciją ($<0,002$ mm), kuriose kaupiasi labiau hidrofiliniai molio mineralai, ir pasižymi hidratacinėmis savybėmis (Chi et al., 2023). Tokių gruntų savitajame paviršiuje gali susikaupti didelis kiekis surišto vandens. Didėjant vandens kiekiui šiuose gruntuose, jų konsistencija keičiasi iš standžiosios į minkštąją. Grunto konsistencija turi įtakos jo atsparumo kerpamajam stipriui ir deformaciniam rodikliams (Pezowicz & Choma-Moryl, 2015).

Smulkiagrūdžių gruntų mechaninė elgsena daugiausia priklauso nuo šių gruntų plastiškumo savybių, o ne nuo dalelių dydžio. Atterbergo ribos apibūdina vandens kiekį ir ribas, kurioms esant ar kurias peržengiant pastebima smulkių gruntų mechaninių savybių kaita (Malizia & Shakoor, 2018).

Žinios apie Atterbergo ribas dažnai naudojamos nustatant dulquio ir molio kiekį smulkiuose gruntuose, nes plastiškumas įprastai didėja esant didesniam molio kiekiui. Kita vertus, minėtos ribos suteikia svarbios informacijos apie grunto, naudojamo kaip pamatas arba statybinė medžiaga, mechanines savybes. Didelė takumo (w_L) riba įprastai rodo didesnę grunto suspaudžiamumą ir didelį susitraukimo (brinkimo) potencialą. Didelis plastiškumo rodiklis (I_P) turi įtakos mažėjančiam šlyties stiprumui. Mažėjant grunto I_P , konsistencija labai pasikeis, net ir nedaug pasikeitus vandens kiekiui, tačiau kuo didesnis plastiškumas, tuo didesnis susitraukimas gruntui netenkant drėgmės (Wagner, 2013).

Nustatyta, kad molio gniuždomasis stipris auga, didėjant plastiškumui. Gniuždomasis stipris didėja kartu su sankiba mažo, vidutinio ir didelio plastiškumo smulkiuose gruntuose, esant optimaliam grunto drėgniui (w_{opt}) (Malizia & Shakoor, 2018).

Daugeliu atvejų smulkūs (moliniai) gruntai yra kompaktiškesni, esant didžiausiam sausam tankiui ($\rho_{d,max}$) ir optimaliam drėgniui (w_{opt}) (Holtz et al., 2010). Tankis ir vandens kiekis daro didelę įtaką molinio grunto atsparumui.

Gamtinės drėgmės kiekio ir tankio supratimas turi didelę įtaką deformacijai ir stiprumui. Praktinio pritaikymo požiūriu labai svarbu suprasti šių savybių ryšį. Padidėjus vandens kiekiui grunte, mažėja stiprumas, deformacijos modulio vertė, konsolidacijos koeficientas (c_v) ir vidinės trinties kampas (φ) (Malizia & Shakoor, 2018; Habtemariam et al., 2022; Hov & Gaharia, 2023).

Atlikti moreninio smulkaus grunto tyrimai patvirtino, kad didžiausio sutankinimo pasiekama esant optimaliam drėgmės kiekiui. Rezultatai rodo, kad svarbu parinkti tinkamas tankinimo sąlygas, kurioms esant drėgnio kiekio padidėjimas nesumažintų atsparumo kirpimui ir gniuždymui. Remiantis tyrimo rezultatais, galima teigti, kad didesnis drėgnis turi didesnę neigiamą įtaką grunto spūdumui negu atsparumui šlyčiai. Vidinės trinties kampo ir sankibos vertės silpnuose gruntuose sumažėjo mažiau negu oedometrinis deformacijų modulis (E_{oed}). Ypač didelis spūdimas būdingas gruntams, kurių 28–38 proc. sudaro molio frakcijos. Taip pat pastebėta, kad, nepaisant grunto konsistencijos, didėjant molio frakcijai mažėja vidinės trinties kampas ir didėja sankiba bei oedometrinis deformacijų modulis (Pezowicz & Choma-Moryl, 2015).

Kita svarbi smulkaus (rišlaus) grunto savybė – labai mažas hidraulinis laidumas arba jo filtracijos koeficientas (k_f) (Wagner, 2013). Grunto dalelių išsidėstymas ir gamtinio drėgnio kiekis yra pagrindiniai komponentai, lemiantys grunto rišlumą. Rišlaus grunto dalelių sudėtis ir drėgnio kiekio svyravimai keičia grunto dalelių kontaktinę būseną ir struktūrinį išsidėstymą, o tai lemia smulkaus grunto makroskopines savybes (stiprumą, standumą, spūdimą) (Lei et al., 2022). Įrodyta, kad molio frakcija yra pagrindinis gruntų hidromechaninės elgsenos veiksnys, nes ši frakcija reguliuoja grunto išsiplėtimą (dilataciją) (Cherblanc et al., 2016).

1.5. Veiksniai, darantys įtaką grunto mechaniniams rodikliams

1.5.1. Įtempių ir deformacijos ryšys, įtempiai grunte

Įtempių ir deformacijos ryšys

Gruntų įtempių ir deformacijų sąryšis yra netiesiškas, tamprus, daugiausia priklausantis nuo grunto struktūros ir įtempių pasiskirstymo, veikiant skirtingomis apkrovimo arba nukrovimo sąlygomis (Huang et al., 2018; Li et al., 2022). Šis sąryšis apibūdina (taip pat naudojamas siekiant įvertinti ir analizuoti) grunto stabilumą ir jo elgseną apkrovos ar kito poveikio metu (Krabbenhøft & Wang, 2021).

Remiantis lauko sąlygų ir laboratorinių tyrimų rezultatais, nustatyta, kad gruntams dėl jų struktūrinės sudėties būdingas netiesinis įtempių ir

deformacijų ryšys, net veikiant labai mažoms apkrovoms, kurios sukelia sąlygiškai nedidelių deformacijų (Atkinson, 2000; Krabbenhøft & Wang, 2021). Išskirtinis įtempių ir deformacijų santykio netiesiškumas apibrėžia suirimo ribą, kurią viršijus pasiekama grunto plastinė deformacija (Al-Shayea & Mohib, 2012).

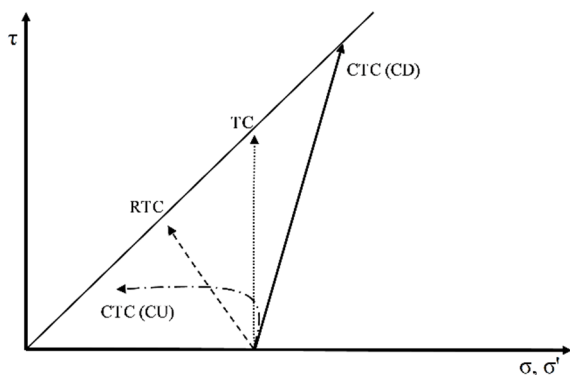
Įtempių ir deformacijų santykis priklauso nuo grunto struktūros, perkonsolidavimo santykio, kelės slėgio, esamo porinio vandens slėgio ir drenavimosi sąlygų (Han et al., 2014; Shu et al., 2021; Tong et al., 2022). Įprastai susiduriama su dvių tipų kreivėmis. Vienos rodo pikinę smailę, po kurios eina liekaninė deformacijų sritis, antrosios rodo tolygų deviatoriaus padidėjimą ar sumažėjimą nuo pikinės vertės, didėjant ašinei deformacijai (Nguyen et al., 2018).

Įtempių kitimas, esant skirtingoms tyrimų sąlygoms

Mechaniniai grunto rodikliai ir suirimas priklauso ne tik nuo grunto savybių, struktūros, veikusių įtempių grunte, bet ir nuo esamos ir galutinės gruntų įtempių būsenos. Taip pat tai glaudžiai susiję su apkrovos kryptimi ir poriniu slėgiu. Pabrėžiama, kad gruntas gali išsiskirti skirtingomis mechaninėmis savybėmis, esant skirtingiems įtempių keliams (Li et al., 2022). Tai ypač svarbu projektuojant statinius ir juos eksploatuojant (Cai et al., 2018; Shi et al., 2021; Zhuang et al., 2022).

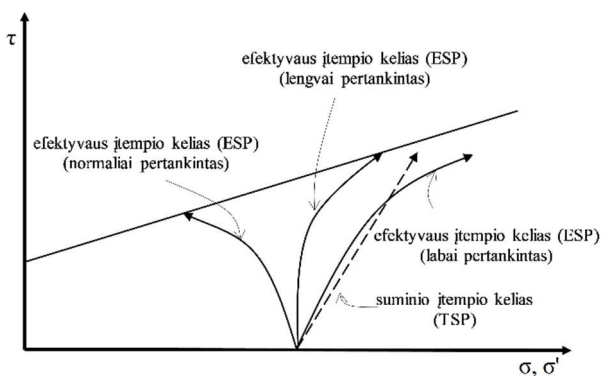
Analizuojant deformacijas, glaudžiai susijusias su grunto struktūra, vienu iš svarbiausių poveikių laikomas įtempių pokytis (Li et al., 2022). Įtempių kelias rodo išorinių apkrovų ar veikiančių jėgų sukeltus įtempių pokyčius grunto elemente apkrovimo arba nukrovimo metu (Cheng et al., 2023). Grafiškai tai Moro-Kulono (angl. *Mohr-Coloumb*) apskritimų viršūnių kelias arba linija, kuri indikuoja įtempių kitimo padėtį tarp pradinės ir galutinės būsenų. Įtempių keliais galima aprašyti bendrųjų ir efektyviųjų įtempių sklidimą. Įtempių kelias rodo (efektyviojo įtempio principas), kad skirtumas tarp suminio ir efektyviojo vidutinių normalinių įtempių lygus poriniam slėgiui. Tai reiškia, kad reikia atkreipti dėmesį ne į vieną įtempio kelią, o į du – bendrąjį ir efektyvųjį. Įtempių kelio metodas laikomas svarbiausiu, sprendžiant įtempių ir deformacijų problemas gruntų mechanikoje. Tai labai svarbu ir sprendžiant problemas, susijusias su skirtingomis grunto tyrimo ir slūgsojimo sąlygomis (Farooq et al., 2005; Jiang et al., 2011; Ding et al., 2017).

Skiriamos keturių tipų įtempių kelių sąlygos: įprastinio triašio bandymo (drenuotas, nedrenuotas); triašio, palaikant pastovų deviatoriaus slėgį (TC); triašio, mažinant deviatoriaus slėgį (RTC) (1.6 pav.) (Zhang et al., 2021; Cheng et al., 2023).



1.6 pav. Tipiniai skirtingų triašio bandymo sąlygų įtempių keliai: įprastinio triašio bandymo (CTT) (drenuotas (CD), nedrenuotas (CU)); triašio, palaikant pastovų deviatoriaus slėgį (TC); triašio, mažinant slėgį (RTC) (sudaryta autorės pagal Zhang et al., 2021)

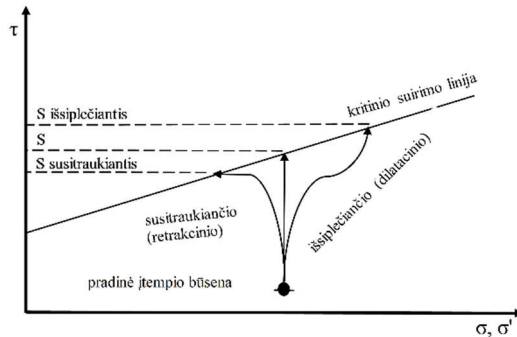
Pagrindiniai įtempių keliai, atsižvelgiant į įprastinio triašio bandymo sąlygas, gali būti drenuotų ir nedrenuotų sąlygų, efektyvieji (ESP) ir suminiai (TSP) (1.6 ir 1.7 pav.) (Farooq et al., 2005; Venkatramaiah, 2006; Budhu, 2010; Babu et al., 2015; Cai et al., 2018). Didžiausią jų pokytį lemia porinio vandens slėgio skirtumas ir jo kitimas.



1.7 pav. Atsižvelgiant į įprastinio triašio bandymo (CTT) sąlygas, tipinių įtempių kelių skirstymas į efektyviuosius (ESP) ir suminius (TSP) (sudaryta autorės pagal: Babu et al., 2015; Gu et al., 2016; Gao et al., 2017; Cai et al., 2018)

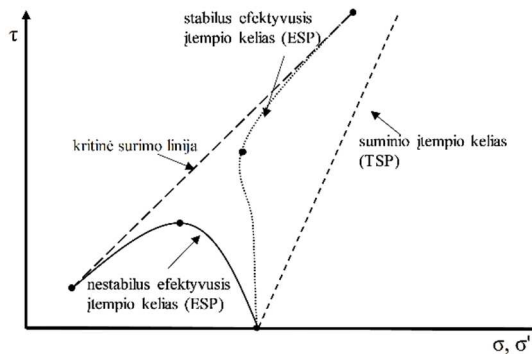
Įtempių keliai pateikia informaciją ne tik apie įtempių ir deformacijų sklaidimą grunte ar jų įtaką gruntui, bet ir apie grunto charakteristikas ar tyrimo sąlygas. Įtempių kelių polinkis ir kampas gali nurodyti, kokiomis sąlygomis gruntas tirtas (drenuota, nedrenuota) (1.6 pav.) (Farooq et al., 2005; Babu et al., 2015; Mital & Andrade, 2016). Taip pat galima gauti informacijos, koks

porinio slėgio dydis grunte (1.7 pav.) ir kaip jis veikia įtempių ir deformacijų grunte sklidimą. Porinio vandens slėgio kitimai atspindi grunto išsiplėtimą ir susitraukimą, esant skirtingiems įtempių keliams (1.8 pav.) (Hendry, 2018; Li et al., 2022).



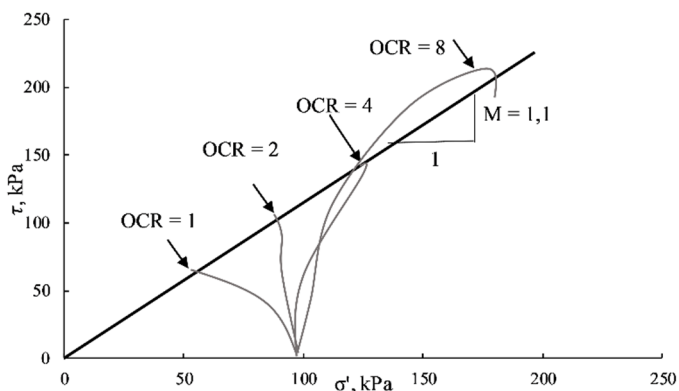
1.8 pav. Susitraukiančio ir išsiplėčiančio grunto elgsenos tipiniai įtempių keliai (sudaryta autorės pagal Hendry, 2018)

Grunto dilatacija ar retrakcija lemia grunto stabilumą (1.9 pav.) (Mital & Andrade, 2016).



1.9 pav. Stabilių ir nestabilių gruntų elgsenos tipiniai įtempių keliai (sudaryta autorės pagal Mital & Andrade, 2016)

Vienas iš svarbiausių dalykų – įtempio kelio sąryšis su perkonsolidavimo santykiu (1.10 pav.). Analizuojant įtempių kelių kryptis, prieita prie išvados, kad svarbu daugiau dėmesio skirti OCR. Lyginant lauko sąlygomis ir laboratorinių tyrimų metu nustatytus įtempių kelius, pastebėta, kad smulkaus grunto mechaninė elgsena labiausiai priklauso nuo efektyviojo įtempio ir perkonsolidavimo santykio (Li et al., 2022). Taigi efektyviojo įtempio sklidimas priklauso nuo grunto OCR verčių (1.10 pav.) (Briaud, 2013; Gu et al., 2016; Gao et al., 2017).



1.10 pav. Gruntų skirtingų perkonsolidavimo santykių (OCR) tipiniai įtempimų keliai (sudaryta autorės pagal Gu et al., 2016; Tong et al., 2022)

Minėtina, kad įtempimų kelių susidarymą lemia drenuotos ir nedrenuotos tyrimų sąlygos ir grunto charakteristikos (OCR, porinis vandens slėgis, grunto dilatacija ar retrakcija). Taigi, žinant kai kurias grunto charakteristikas, galima numatyti įtempimų sklidimą, o pagal tai, kaip grunte sklinda įtempiai, galima nusakyti minėtas grunto charakteristikas.

Nustatyta, kad įtempimų kelias daro didelę įtaką struktūrinio smulkaus grunto bendriesiems įtempimų stiprumo rodikliams, o poveikis grunto sankibai yra didesnis negu vidinės trinties kampui (Yavna et al., 2023). Tuo remiantis galima daryti išvadą, kad įvairūs projektiniai skaičiavimai turi būti atliekami atsižvelgiant į laboratorinių tyrimų metu gautus mechaninius rodiklius, gruntui patiriant įtempimų kelią esamomis inžinerinėmis sąlygomis, siekiant užtikrinti saugumą ir stabilumą statybos metu. Nemažai tyrimų atlikta siekiant iširti gruntų, kurių skirtingi OCR, įtempimų kelių įtaką silpno smulkaus grunto stiprumo ir porinio slėgio savybėms. Tyrimų rezultatai parodė, kad mechaniniai grunto rodikliai susiję su įtempimų keliais (Cai et al., 2018; Yin et al., 2021; Wang et al., 2021).

Svarbu pabrėžti, kad įtempimų kelias ir konsolidavimosi įtempis turi lemiamą įtaką tūrinei grunto deformacijai (Wei et al., 2023). Tai vyksta dėl grunto grūdelių pertvarkymo ir priklauso nuo dalelių ryšių stiprumo, skeleto tvirtumo ir stabilumo. Grunto dalelės skatinamos persiorientuoti, riedėti ir slysti, o vanduo išspaudžiamas iš porų. Labai svarbu numatyti nuo laiko priklausomą grunto gniuždymo ar stiprumo elgseną (Adeyer, 2015; Adeyeri, 2018; Jayalekshmi & Elamathi, 2020).

Atliekant tyrimus, iširtas grunto deformacijos modulio ir įtempimų kelio ryšys. Tyrimų rezultatai parodė, kad skirtingi įtempimų keliai pasižymi skirtingomis įtempio ir deformacijų charakteristikomis. Kaip jau minėta,

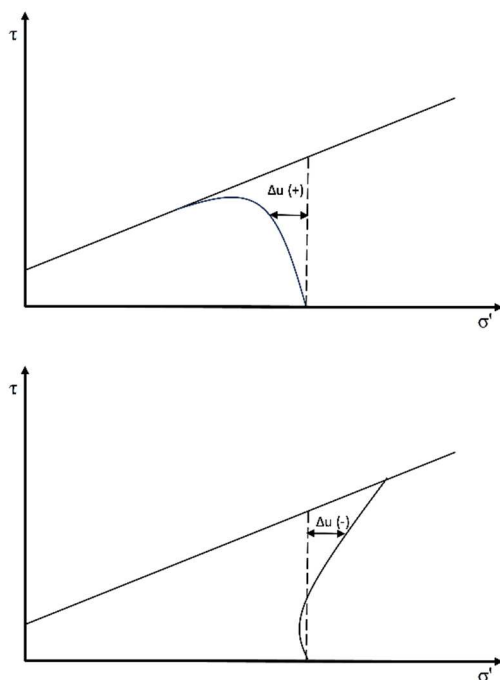
kiekvienas iš šių kelių yra netiesinio pobūdžio (Huang et al., 2018). Deformacijų ir įtempių santykiai per įtempių kelius atskleidė grunto stiprinimo ir atsparumo deformacijai didėjimo procesą (Cheng et al., 2023). Taip pat analizuotas skirtingų nukrovimo įtempių kelių ir nukrovimo greičių poveikis įtempių ir deformacijų santykiams ir poriniam slėgiui. Tyrimas atskleidė, kad grunto elgsena priklauso nuo nukrovimo greičio ir įtempių kelių (Yang et al., 2020).

Triašio gniuždymo bandymai – geriausias būdas įtempių kelių sklidimui, esant skirtingoms tyrimų sąlygoms, įvertinti. Nuolat siekiama iširti grunto deformaciją ir stiprumą, esant skirtingiems įtempių keliams (Zeng & Chen, 2009; Bin et al., 2018; Huang et al., 2018; Li et al., 2022).

1.5.2. Porinio slėgio įtaka ir jo kitimas

Gruntų porų struktūros, reaguodamos į taikomą apkrovą, padidina arba sumažina efektyvųjį įtempį grunte. Šis įtempis sumažėtų, jei dėl pridėtos apkrovos išaugtų porinis slėgis, sumažėjus tuštumų tūriui grunte (Hartge & Horn, 2016; Faloye et al., 2021). Porinio slėgio kitimas ir jo įtaka – vienas iš svarbiausių rodiklių, vertinant efektyviuosius grunto rodiklius. Gerai žinoma, kad didelis porinio vandens slėgis mažina efektyvųjį įtempį, t. y., padidėjus poriniam slėgiui, grunto suminis vidinės trinties kampas didėja, o efektyvusis įtempis mažėja (Alkarni, 2006).

Efektyvusis įtempis ir kartu vykstantys porinio vandens slėgio pokyčiai labai priklauso nuo grunto gebėjimo išlaikyti vandenį. Be to, grunto struktūros pokyčiai, atsiradę dėl grunto perkonsolidavimo santykio, taip pat turi įtakos efektyviojo įtempio ir porinio slėgio dydžiui grunte apkrovos metu. Porinis slėgis didėja (iš neigiamo į teigiamą) (1.11 pav.), augant smulkių dalelių kiekiui grunte, bet išlieka pastovus arba mažėja (tampa neigiamas), kai grunte daugėja vidutinių ir stambių dalelių. Taigi, kuo daugiau grunte smulkiosios frakcijos, tuo neigiamas porinis slėgis mažesnis (Faloye et al., 2021).



1.11 pav. Tipiniai įtempimų keliai, veikiant skirtingam porinio slėgio pokyčiui kirpimo metu (sudaryta autorės pagal: Wang et al., 2021; Kaliakin & Anantanasakul, 2023)

Nustatyta, kad esančių porų orientacija daro poveikį vidiniam gruntu stiprumui ir turi įtakos vandens judėjimui grunte dėl statinio ir dinaminio įtempimų. Esant tam tikrai struktūrai ir tankiui, vertikaliai orientuotos poros sukelia mažiau porinio vandens slėgio pokyčių, palyginti su atsitiktiniu pasiskirstymu (Zhai & Horn, 2019). Taip pat įrodyta, kad susikaupęs perteklinis porinis vandens slėgis neprisotintuose gruntuose yra didesnis negu prisotintuose (Cary & Zapata, 2016). Didžiausias porinis vandens slėgis visada padidėja, kai gruntui taikomas vis didesnis slėgis ar vis didesnė apkrova, taip sukeldami tūrinių deformacijų. Ilgesnis apkrovimo laikas sulėtina porinio vandens slėgio kaupimąsi, taigi ilgesnis apkrovos taikymo laikas lemia mažesnę didžiausią porinį vandens slėgį.

Porinis vandens slėgis yra pagrindinis inžinerinio geologinio ir geotechninio projektavimo veiksnys, nes nuo šio slėgio tiesiogiai priklauso grunto stiprumas, deformacija ir kitos savybės (Wang et al., 2021). Kaip jau minėta, kylant požeminio vandens lygiui, porinis vandens slėgis gruntuose nuolat didėja. Bendrieji ir šlyties įtempimai išlieka pastovūs, tačiau efektyvusis įtempis mažėja (Zhai & Horn, 2019). Tokia padėtis gali sukelti nestabilumą ir grunto praskydimą. Tai atitinka specifinį įtempimų kelią, kurį nagrinėjant matyti grunto kritinė būseną ir nestabilumas (Leroueil et al., 2009; Huang et al.,

2018). Remiantis triašio bandymo rezultatais, nustatyta, kad yra kritinis porinis vandens slėgis, dėl kurio mėginiai suyra veikiant nuolatiniam slėgiui. Kuo didesnis porinio slėgio susidarymo greitis, tuo didesnis kritinis porinis vandens slėgis. Be to, dėl struktūrinių mėginių pokyčių susidaro tam tikras porų vandens slėgio perteklius, jam artėjant prie kritinio lygio (Duan et al., 2023).

Bandinio porinis slėgis yra sudėtingas tiek įtempių nukrovimo, tiek apkrovimo atvejais. Porinis slėgis priklauso nuo įtempių veikimo laiko, todėl jo pokytis praktikoje turėtų būti stebimas realiuoju laiku.

1.5.3. Perkonsolidavimo santykio įtaka

Perkonsolidavimo santykis – svarbus parametras, turintis lemiamą vaidmenį atliekant inžinerinį grunto vertinimą ir rengiant geotechninį projektą. Tai didžiausio efektyviojo vertikaliojo įtempio, kurį anksčiau patyrė gruntas, ir dabartinio efektyviojo vertikaliojo įtempio santykis. OCR naudojamas norint įvertinti veikusių įtempių ir dabartinę grunto įtempių būseną, o tai ypač svarbu siekiant suvokti grunto mechaninę elgseną.

Remiantis OCR reikšmėmis, aiškinami gruntų mechaninių savybių rodikliai ir jų elgsena. OCR daro didelę įtaką grunto stiprumui, įtempių sklidimui, deformacijai, standumui, taip pat grunto porinio vandens slėgio atsakui į apkrovą ir lauko bandymų rezultatams (Wu et al., 2021; Deng et al., 2023; Zhao et al., 2023). Grunte veikusių įtempių (vidinės jėgos, sukeltos buvusių apkrovų) istorija svarbi, siekiant tinkamai interpretuoti vietos tyrimų ir lauko stebėjimo rezultatus bei parinkti geotechniniam projektavimui tinkamus grunto rodiklius.

Jei gruntas apkraunamas daugiau negu jo perkonsolidavimo įtempis (σ'_o), jis negali išlaikyti padidėjusios apkrovos ir jo struktūra suyra. Šis perkonsolidavimo įtempis ir kiti grunte vykę pokyčiai išsaugomi grunto struktūroje (Mustapha & Alhassan, 2013). OCR reikšmės nepaisymas gali lemti netikslias grunto elgsenos prognozes, todėl būtina atsižvelgti į OCR, siekiant užtikrinti konstrukcijų saugumą ir patikimumą. Perkonsoliduoti gruntai, kurių OCR reikšmės didelės, mažiau jautrūs nusėdimui ir gali turėti didesnę kerpamąją stiprį (Gu et al., 2016), o tai gali turėti įtakos pamato konstrukcijai, šlaito stabilumo analizei ir, apskritai, geotechniniam projektui.

Mokslininkų siūlė įvairių metodų, kaip pagrįstai nustatyti OCR. Pagrindiniai ir populiariausi metodai: Casagrande, Burmisterio, Joes, Mikasos, „f“, grafinis ir densitometrinis. Taikant šiuos metodus apskaičiuotas perkonsolidavimo įtempis yra įvairus ir kartais prieštaringas, grunto struktūrinis poveikis nevertinamas (Xu et al., 2021). Nustatyta, kad

perkonsolidavimo įtempis susijęs ne tik su grunto apkrovos istorija, bet ir su medžiagos sudėtimi bei struktūrinėmis grunto savybėmis (Wang et al., 2016).

Nustatyti tikrąjį grunto OCR sudėtinga. OCR dydį galima numatyti ir iš laboratorinių tyrimų metu sudarytų grafikų, vertinant mechaninius rodiklius, kurie vaizduoja grunto stiprumą ir deformacijas (Zhao et al., 2023). Kaip rodo atliktų tyrimų rezultatai, gaunami labai skirtingi smulkaus grunto, išsiskiriančio nevienodomis OCR reikšmėmis, kerpamojo stiprio rodikliai. Laboratorinių bandymų metu gautos įtempių ir deformacijų kreivių formos panašios viena į kitą, o didžiausios vertės (kerpamojo stiprio (τ_u)) skiriasi. Padidėjus OCR reikšmėms, kerpamasis stipris smarkiai išauga (Indraratna et al., 2008).

Skirtingi perteklinio porinio slėgio ir ašinių įtempių lyginimo grafikai patvirtina OCR poveikį, nes, didėjant OCR reikšmėms, išauga tikimybė atsirasti neigiamam pertekliniam poriniam slėgiui (1.11 pav.) (Kaliakin & Anantanasakul, 2023). Dėl OCR įtakos pertekliniam porų vandens slėgiui efektyviųjų įtempių keliai, esant skirtingoms OCR reikšmėms, taip pat labai skiriasi. Matyti, kad didėjant OCR, pradeda skirtis suirimo kreivės kampo nuolydžiai. Teigiama, kad OCR veikia porinio slėgio sklaidos charakteristikas, nes perkonsolidavimo įtempis turi įtakos standumo indeksui (I_r), kerpamajam stipriui ir filtracijos koeficientui (Song et al., 2019; Deng et al., 2023).

Patvirtinta ir tai, kad OCR verčių didėjimas turi įtakos ašinei deformacijai (jos kaupimosi greičiui) ir bandinio tūrinei deformacijai, kuri nurodo grunto dilataciją arba jo susispaudimą jį paveikus šlyties įtempiams (Gu et al., 2016; Zhao et al., 2023). Siekiant išskirti tūrinės deformacijos charakteristikas (pagal jos kaupimosi greitį), išanalizuoti bandymų rezultatai, atsižvelgiant į efektyviųjų įtempių kelią, kai OCR reikšmės skirtingos. OCR = 1 (normaliai konsoliduoto) atveju tūrinė deformacija kaupiasi lėtai ir nuolat lėtėja, tačiau niekada nesustoja. Kitais atvejais, kai OCR = 1–4 (mažai perkonsoliduoti) ir OCR > 4 (labai perkonsoliduoti), nuolatinės tūrinės deformacijos išsivystymo greitis yra daug lėtesnis negu normaliai konsoliduoto mėginio, tačiau deformacija yra pastovi. OCR > 4 atveju nuolatinė tūrinė deformacija yra net neigiama (prasideda mėginio dilatacija – išsipūtimas) (Gu et al., 2016; Zhao et al., 2023). Daugelio tyrėjų nuomone, dilatacija visada buvo laikoma pagrindiniu indikatoriumi grunto stiprumui ir deformacijai apibūdinti (Gao et al., 2017). Tyrimais nustatyta, kad grunto išsiplėtimas, veikiant šlyties įtempiams, labai priklauso nuo perkonsolidavimo santykio dydžio (Gao et al., 2017). Šlyties metu perkonsoliduoto smulkaus grunto tūris padidėja, kai OCR yra didelis, ir susitraukia, kai OCR yra mažas (Hattab & Hicher, 2004).

Mokslinėje literatūroje pabrėžiama, kad nėra aiškios ribos tarp mažai perkonsoliduoto (LOC) ir labai perkonsoliduoto (HOC) grunto. Vis dėlto neretai nurodoma, kad ši riba yra tada, kai $OCR > 4$, tačiau taip pat nurodoma ir $OCR > 6$ riba (Sarma & Sarma, 2008; Sorensen & Okkels, 2013; He et al., 2023). Aiškios OCR ribos nėra, tačiau, analizuojant rezultatus, ji akivaizdžiai matyti, lyginant skirtingo perkonsolidavimo laipsnio gruntų rezultatus.

OCR verčių aiškinimas svarbus, siekiant suvokti grunto elgseną, nes perkonsoliduotų gruntų spūdimas ir kerpamasis stipris yra didesni, palyginti su normaliai konsoliduotais gruntais (Wu et al., 2021; Zhao et al., 2023). Perkonsolidavimo santykis taip pat daro didelę įtaką lauko darbų metu atliekamo CPTu nustatomiems rodikliams – kūginiam stipriui ir porinio slėgio sklaidos charakteristikoms (Deng et al., 2023).

1.5.4. Soties laipsnio įtaka

Soties laipsnio dydis nusako, ar gruntas gali sugerti drėgmę arba ją priimti ir užpildyti savo poras. Prisotindamas gruntą, vanduo keičia jo fizikines ir mechanines savybes, ypač šlyties stiprumą, sumažindamas atsparumo šlyčiai vertę (Chen et al., 2018).

Pilnai vandens prisotinto grunto soties laipsnis (S_v) yra ~ 1 , o neprisotinto < 1 . Prisotintame grunte esantis vanduo gali nusidreuoti, o oras patekti į jį, todėl gruntas taps neprisotintas. Taigi tarp šių dviejų fazių (prisotintas ir neprisotintas) yra ir skirtumų, ir sąsajų. Neprisotintame grunte yra dujinė fazė, todėl grunto savybės tampa sudėtingesnės negu prisotinto grunto. Dėl inžinerinių tyrimų patogumo dauguma tyrėjų tiria gruntą arba jį priima kaip visiškai prisotintą. Prisotintame grunte galima atmesti dujų ir vandens oro sąsajos įtaką, todėl šį gruntą galima laikyti idealiu. Neprisotintų gruntų tyrimų atlikta nepalyginti mažiau. Toks gruntas taip pat nagrinėjamas deformacijos, stiprumo ir prasisunkimo aspektais (Huang et al., 2012).

Esminis prisotinto ir neprisotinto grunto skirtumas – bendrasis įsiurbimas neprisotintame grunte, dėl kurio kinta grunto stiprumas (Liu et al., 2011). Atliekant vandens neprisotinto grunto stiprumo bandymus, nustatyta, kad šiems bandiniams būdingas trapus suirimas, prisotintiems – plastinis irimas (Guan et al., 2021).

Kai įsiurbimas vyksta neprisotintame grunte, grunto elgsena sudėtingesnė, o įsiurbimas yra dujinės fazės dalis. Įsiurbimas yra svarbus neprisotinto grunto savybių parametras ir įtempių kintamasis, apibūdinantis neprisotinto grunto savybes. Bendrasis grunto įsiurbimas susideda iš matricos siurbimo ir osmosinio siurbimo. Matricos siurbimui daugiausia įtakos turi grunte esančio drėgnio kiekio arba soties laipsnio pokytis, o osmosiniam

siurbimui – druskos kiekio pasikeitimas. Neprisotinto grunto elgsena mažiau nuspėjama, palyginti su prisotintu. Neprisotintame grunte įsiurbimas gali padidinti grunto šlyties stiprumą ir sumažinti jo deformaciją, kartu padidindamas efektyvųjį įtempį (Huang et al., 2012; Guan et al., 2021; Ahmad et al., 2023).

Grunto sotes laipsnis gali paveikti jo stiprumą statinėmis sąlygomis. Įprastai projektuojamų geotechninių konstrukcijų kritiniu kerpamuoju stipriu laikoma visiškai prisotinta būklė. Nepaisant to, tai nebūtinai tinka, kai atsižvelgiama į nesočiojo grunto stiprumą. Taigi geotechninius parametrus būtina suvokti ne tik gruntų mechanikos kontekste, kai jie analizuojami esant kritinei būsenai (atsižvelgiant į 100 proc. prisotintą gruntą), bet ir atkreipiant dėmesį į sistemą, kurioje gruntai iš tiesų randami gamtoje – dažniausiai tai iš dalies prisotinta būseną (Perez, 2021; Baltodano-Goulding & Brenes-Garcia, 2022).

Atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad grunto sotes laipsnis stipriai veikia jo mechaninę elgseną (Toyota et al., 2019; Wang et al., 2020). Didėjant sotes laipsniui, oedometrini deformacijų modulis mažėja. Tai rodo, kad sotes laipsnis veikia grunto mechaninę elgseną, sumažindamas jo atsparumą deformacijoms. Ir atvirkščiai, sumažėjus grunto sotes laipsniui, atsparumas didėja (Toyota et al., 2019; Perez, 2021). Taigi tarp sotes laipsnio ir oedometrinio deformacijų modulio yra tiesinis ryšys. Tai reiškia, kad, padidinus sotes laipsnį grunte, jo nuosėdžiai didėja. Nusėdimo problema tampa dar svarbesnė, kai gruntas ilgiau veikiamas drėgmės (Mahmood et al., 2020). Ši problema išauga vertinant gruntą, kuris linkęs subyrėti (neprisotintas), nes dėl įvairių išorinių veiksnių, tokių kaip padidėjęs įsotinimas, didelis pralaidumas dėl gausaus poringumo, cheminių veiksnių ir mažo tankio, šio grunto tūris staiga ima kisti. Iš dalies prisotintas gruntas gali turėti daugiau subyrėti linkusių vietų ar zonų negu prisotintas. Nustatyta, kad neprisotintų gruntų laikomoji galia svyruoja nuo 2 000 iki 3 000 kPa, o prisotintų – apie 500–700 kPa (Ahmed et al., 2019).

Didėjant sotes laipsniui, mažėja vidinės trinties kampas. Kai gruntas prisotintas, stipriai veikiama jo mechaninė elgsena, mažėja jo stiprumas. Ir atvirkščiai, mažėjant grunto drėgmei, stiprumas didėja, o grunto sankiba sparčiai auga didėjant sotes laipsniui (Yang et al., 2021; Perez, 2021). Taigi, vertinant grunto stiprumą, nustatyta, kad vidinės trinties kampas ir sankiba mažėja didėjant drėgmės kiekiui netiesiškai (Yang et al., 2021).

Triašio gniuždymo neprisotintų gruntų bandymų rezultatai rodo, kad skirtingo sotes laipsnio bandiniai pasižymi ir skirtinga įtempių ir deformacijų grunte elgsena bei stiprumu (Zhai et al., 2019a), net esant tiems patiems įtempiams. Kuo didesnis sotes laipsnis, tuo didesnis įtempių santykis,

atitinkantis tam tikrą ašinę deformaciją ir stiprumą, kai kitos sąlygos yra vienodos (Sun et al., 2010).

Nustatyta, kad grunto soties laipsnis labiau paveikia pasipriešinimą deformacijai, negu sumažina vidinės trinties kampą (Ahmed et al., 2019). Labai svarbu atlikti mechaninius grunto bandymus, atsižvelgiant į soties laipsnį, nes nuo jo dydžio mechaninės savybės skirsis ir tai turės tiesioginės įtakos gaunamiems rezultatams.

1.6. Pirmosios dalies išvados

1. Vidurinio pleistoceno laikotarpio darinių aptinkama visoje Lietuvos teritorijoje, tačiau tik pietrytinėje šalies dalyje jis slūgso Žemės paviršiuje vėlesnių ledynų nepadengtų glacialinių darinių (g. gt II md) pavidalu ir užima apie 2,25 proc. Lietuvos teritorijos. Ši Lietuvos teritorijos dalis svarbi ne tik dėl čia vykusių išskirtinių nuledėjimo procesų, bet ir inžineriniu geologiniu požiūriu, nes čia vykdoma žmogaus ūkinė veikla (terpė statiniams, jų konstrukcinėms dalims). Vidurinio pleistoceno amžius ir jo genezė Lietuvoje tyrinėta ir aptarta plačiai, tačiau mechaninių ir fizikinių savybių rodiklių tyrimų nėra daug, o turimi rezultatai ne visada pritaikomi inžineriniams geologiniams uždaviniams spręsti.

2. Vidurinio pleistoceno glacialiniuose gruntuose daugiausia dūlėjimui atsparių mineralų elementų. Molio mineralai pasižymi didesniu kalcio karbonato kiekiu negu Nemuno svitos ledynmečio glacialiniai dariniai. Žvyro frakciją dažniausiai sudaro dolomito nuolaužos, kilusios iš Švedijos šiaurės.

3. Gruntams klasifikuoti naudojant lauko tyrimo metodus, klasifikavimas dažniausiai atliekamas panaudojus kūginės penetracijos bandymo duomenis. Išskirtas *grunto elgsenos tipo* terminas rodo ne grunto tipo sudėtį, o jo elgsenos tipą apkrovos metu. Labiausiai pasaulyje nagrinėjamos ir naudojamos grunto elgsenos klasifikacijomis laikomos Robertsono sukurtos ir nuolat atnaujinamos schemas. Remiantis šiomis schemomis, didžiausių neatitikimų, palyginti su laboratorinių tyrimų metu įvardytu grunto tipu, yra mišriuosiuose gruntuose (smėlio ir molio mišiniuose).

4. Lietuvoje gruntų klasifikacija paremta fizikinėmis jų savybėmis (granuliometrine sudėtimi ir plastiškumu). Grunto deformacijos modulio skaičiavimas vis dar pagrįstas pirminėmis išvestomis koreliacijomis. Nuo pat pirmąkart išvestos gruntų deformacijos modulio koreliacinės priklausomybės iki šių dienų jau pasikeitė keturi gruntų klasifikacijos standartai ar rekomendacijos, o tai reiškia, kad gruntų pavadinimų skyrimo kriterijai taip pat nuolat keitėsi. Remiantis skirtingais standartais, nustatomas vis kitoks

grunto pavadinimas, o tada netinkamai naudojamos pirminės išvestos koreliacijos, siekiant įvertinti netiesioginį grunto deformacijos modulį.

5. Grunto parametrų ir sudėties įtaka deformacijai ir stabilumui labai reikšminga apibrėžiant ir interpretuojant gaunamus rodiklius. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys deformacinius ir stipruminius rodiklius bei grunto atsaką, veikiant išorinei jėgai, yra gruntą sudarančių dalelių dydis, smulkiosios frakcijos kiekis ir drėgnis.

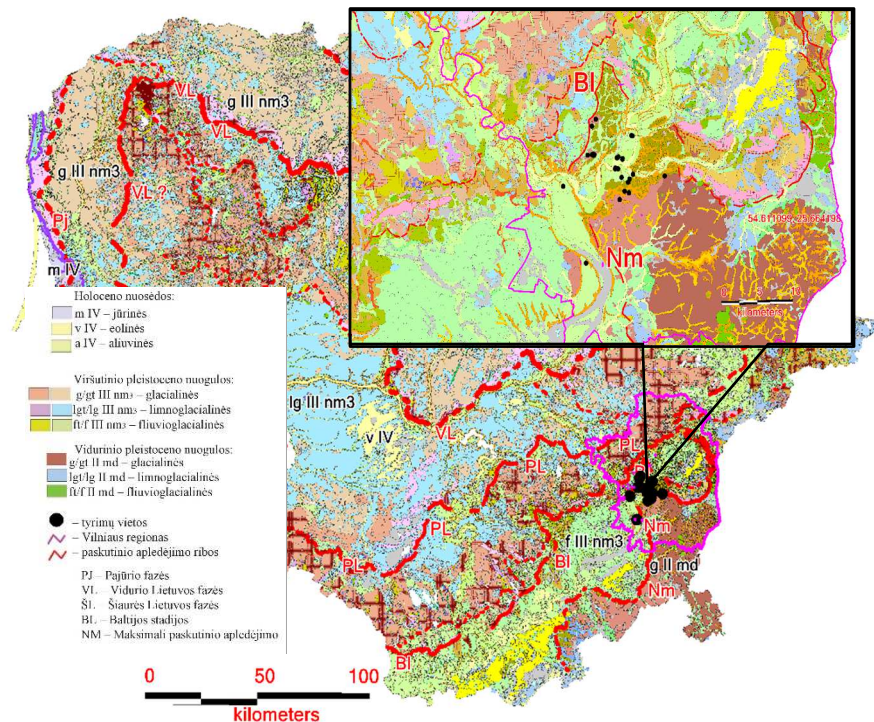
6. Grunto mechaninių savybių rodikliai ir suirimas priklauso ne tik nuo grunto fizikinių savybių ir jo struktūros, bet ir nuo grunte esančių ir sukeltų įtempių, tyrimų metu taikomos apkrovos krypties ir slėgio, taip pat nuo grunto porinio slėgio, drenavimosi sąlygų, soties laipsnio ir perkonsolidavimo santykio. OCR įvardijamas kaip vienas iš svarbiausių grunto parametrų, kuriuo aiškinami gruntų mechaninių savybių rodikliai ir paties grunto elgsena.

2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA

2.1. Tyrimų objektas

Disertacijoje pristatomo tyrimo tikslas – ištirti pietrytinėje Lietuvos dalyje susiklosčiusias ir reljefą sudarančias morenines smulkias nuogulas bei išskirti jų savybes. Minėta teritorija itin svarbi tiek inžineriniu geologiniu, tiek ir ekonominiu požiūriu (Dundulis et al., 2008).

Remiantis Lietuvos geomorfologiniu žemėlapiu (Guobytė, 1999), nuledėjimo žemėlapiu (Guobytė, 2014) ir kvartero stratigrafine schema (Satkūnas, 2005), tiriamasis gruntas priklauso reljefą sudarantiems, vėlesnių ledynų nepadengtiems vidurinio pleistoceno Medininkų ledynmečio glacialiniams smulkiems dariniams (g, gt II md). Jų aptinkama tik prietrynėje Lietuvos dalyje (2.1 pav., 7 priedas).



2.1 pav. Geomorfologinis Lietuvos žemėlapis (M 1:200 000) (Guobytė, 1999) (Geologijos informacinė sistema GEOLIS (www.lgt.lt); žemėlapyje išskirta tyrimų aplinka, bandinių paėmimo vietos, pateikti sutartiniai ženklai

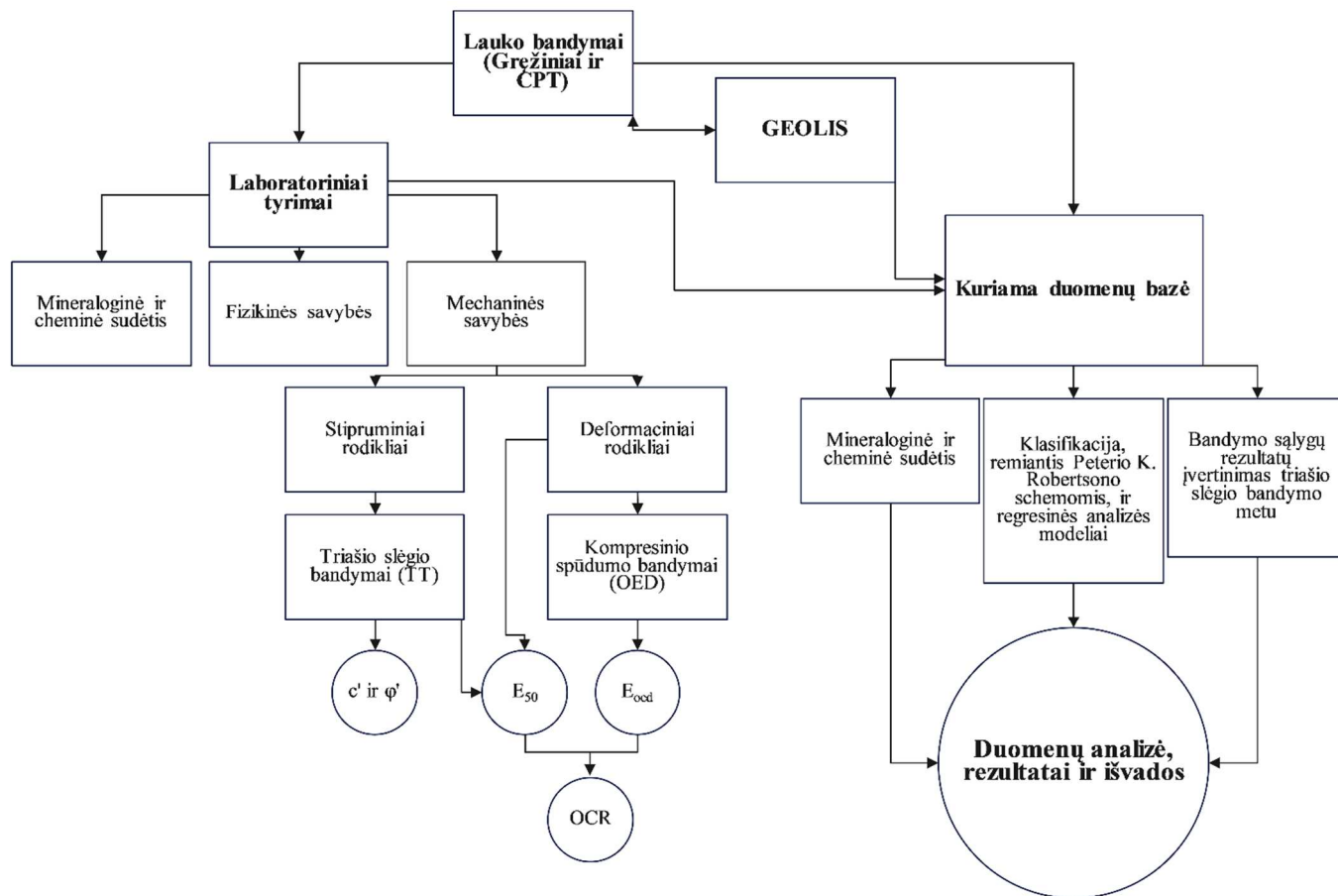
Darbo tikslui pasiekti nagrinėti gruntai iš 30 tyrimo vietų pietrytinėje Lietuvos dalyje, Vilniaus miesto apylinkėse ir jo rajone.

2.2. Darbo eiga

Disertacijos rengimo eigą ir naudotus metodus, padėjusius įgyvendinti išsikeltus darbo tikslus ir suformuluotus uždavinius, galima skirstyti į keletą pagrindinių etapų: literatūros analizė, tiriamasis darbas, gautų duomenų analizė. Tiriamojo darbo pradžia sieta su išsikelta problematika, kuriai spręsti pasirinkta tam tikra teminė mokslinė literatūra, tyrimų ir rezultatų apdorojimo metodikos. Pabaigoje siekta suprasti, išanalizuoti ir pateikti galimus sprendimo būdus ir rekomendacijas išsikeltiems uždaviniams įgyvendinti. Darbui atlikti sudaryta darbo rengimo schema (2.2 pav.), iliustruojanti duomenis ir tyrimo metodus, naudotus suformuluotam tikslui ir išsikeltiems uždaviniams pasiekti.

Darbe analizuojama vėlesnių ledynų nepadengto vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto sudėties, fizikinių ir mechaninių savybių kaita, kuri turi įtakos visų savybių pokyčiams ir bendrajai grunto elgsenai.

Darbe naudoti metodai ir jų principai apibūdinami tolesniuose skyriuose.



2.2 pav. Mokslinio darbo tyrimų schema, atskleidžianti darbų eiliškumą

2.3. Lauko bandymai

Pirminis lauko tyrimas – gręžinių gręžimas, imant nesuardytos ir suardytos sandaros bandinius. Lauko darbų metu gruntas identifikuotas remiantis ISO 14688-1:2018, vėliau – atsižvelgiant į laboratorinių tyrimų rezultatus, klasifikuojamus pagal ISO 14688-2:2018; TAR, 2015-11-16, Nr. 18162. Bandiniai laboratoriniams tyrimams surinkti ir transportuoti į laboratoriją taikant ISO 22475-1:2021. Siekiant nustatyti gruntų sąlyginį stiprumą, atlikti CPT (ISO 22476-1:2022).

Tyrimo duomenys gauti iš 160 nesuardytos sandaros bandinių, paimtų iš 90 gręžinių, taikant CPT, iš 30 skirtingų vietų. Iš 160 bandinių 30 (iš 10 gręžinių) laboratoriniais tyrimų metodais tirti darbo autorės, kita dalis (apie 130 bandinių) duomenų surinkta iš geologinės informacinės sistemos GEOLIS (www.lgt.lt).

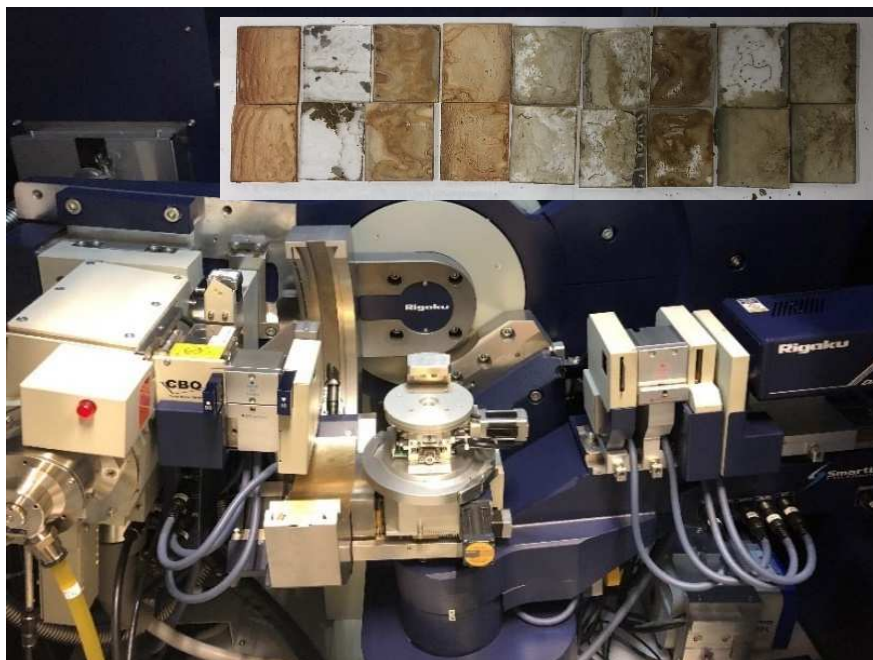
Inžinerinių geologinių lauko bandymų metu iš gautų rodiklių (kūginio ir šoninės trinties stiprio bei trinties santykio) išskaičiuoti ir vėliau statistškai apdoroti rodikliai, reikalingi sudaromoms Robertsono klasifikacijos schemoms (Robertson, 2009; Robertson, 2016). Taip pat apskaičiuotas grunto elgsenos tipas ir kiti papildomi rodikliai rezultatams palyginti ir analizuoti (OCR, *E*). Informacija iš gręžinių stulpelių naudota inžinerinėms geologinėms sąlygoms ir amžiui įvertinti, taip pat laboratorinių tyrimų metu gautai informacijai palyginti.

2.4. Cheminė ir mineralinė sudėtis

Tiriamą grunto cheminei ir mineralinei sudėčiai nustatyti pasirinkti rentgeno spindulių fluorescencijos (XRF), rentgeno spindulių difrakcijos (XRD) ir skenuojančio elektroninio mikroskopo (SEM) metodai.

Rentgeno spindulių fluorescencijos (ISO 18227:2014; Oyedotun, 2018) tyrimų metu atlikta elementinė ir oksidinė keturių bandinių cheminės sudėties analizė. XRF naudotas spektrometras *Axios max (Panalytical)*. Tyrimai atlikti Valstybiniame moksliniame tyrimų institute, Fizinių ir technologijų mokslo centre (FTMC) (<https://www.ftmc.lt/struktuline-analize>).

Rentgeno spindulių difrakcijos (Harris & White, 2008) metu atlikta 12 bandinių, atrinktų iš trijų skirtingų vietovių, tiriamojo grunto mineralinė kiekybinė analizė, naudojant *SmartLab (Rigaku)* difraktometrą (2.3 pav.). Atliekant tyrimą, siekiant palyginti gautus rezultatus, tirti ne tik vidurinio (g, gt II md), bet ir viršutinio pleistoceno (g III nm₃) gruntai. Tyrimai atlikti Valstybiniame moksliniame tyrimų institute, Fizinių ir technologijų mokslo centre (FTMC) (<https://www.ftmc.lt/struktuline-analize>).



2.3 pav. Rentgeno spindulių difraktometras (nuotrauka autorės)

Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (2.4(a) pav.), taikant pasirinktą metodiką (Ruge et al., 2019), nagrinėta 4 bandinių, atrinktų iš dviejų skirtingų vietovių, kokybinė mineralinė gruntų sudėtis. Tyrimo metu, siekiant palyginti gautus rezultatus, naudotasi ir viršutinio pleistoceno (g III nm₃) laikotarpio bandinių analizėmis (Lekstutytė et al., 2023). Mineralinei analizei naudotas Gamtos tyrimų centre esantis skenuojantis elektroninis mikroskopas *Quanta 250*, turintis *Oxford EDS* (energijos dispersijos sistema) ir analizatorių, INCA analitinę sistemą (<https://gamtostyrimai.lt/iranga/skenuojantis-elektroninis-mikroskopas-quant-250-su-oxford-eds-energijos-dispersijos-sistema-analizatoriumi-ir-inca-analitine-sistema/>). Prieš atliekant tyrimą, grunto bandiniai paruošti šlifų gamybai, tačiau šlifų gamyba gruntams nėra būdinga. Šlifai (2.4(b) pav.) buvo gaminami Valstybiniame moksliniame tyrimų institute, Fizinių ir technologijų mokslo centre (FTMC) (<https://www.ftmc.lt/strukturine-analize>) ir siunčiami į Prancūziją, „Thin Section Lab“ laboratoriją (<https://thinsectionlab.com/samples-preparation>), vadovaujantis vandeniui jautrių medžiagų paruošimo metodika (naudojant aliejinius preparatus, kurie tinkami naudoti molio turinčioms uolienoms).



2.4 pav. Kokybinės mineralinės gruntų sudėties tyrimas: (a) skenuojantis elektroninis mikroskopas; (b) šlifai, pagaminti Fizinių ir technologijos mokslų centre ir „Thin Section Lab“ laboratorijoje

2.5. Fizikinės savybės

Atliekant tyrimą, nustatytos šios pagrindinės fizikinės gruntų savybės: granulimetrinė sudėtis (ISO 17892-4:2016), natūralus tankis (ISO 17892-2:2015), kietųjų dalelių tankis (ISO 17892-3:2015), gamtinis drėgnis (ISO 17892-1:2015), Atterbergo ribos (ISO 17892-12:2018), apskaičiuotas poringumas ir poringumo koeficientas. Iš viso atlikta ir apibendrinta 160 bandinių fizikinių savybių komplektų.

Sudaryta tiriamo grunto fizikinių savybių duomenų bazė. Ji naudota tolesniam tyrimui, tarpusavio koreliacinių ryšių analizei ir duomenų apibendrinimui atlikti.

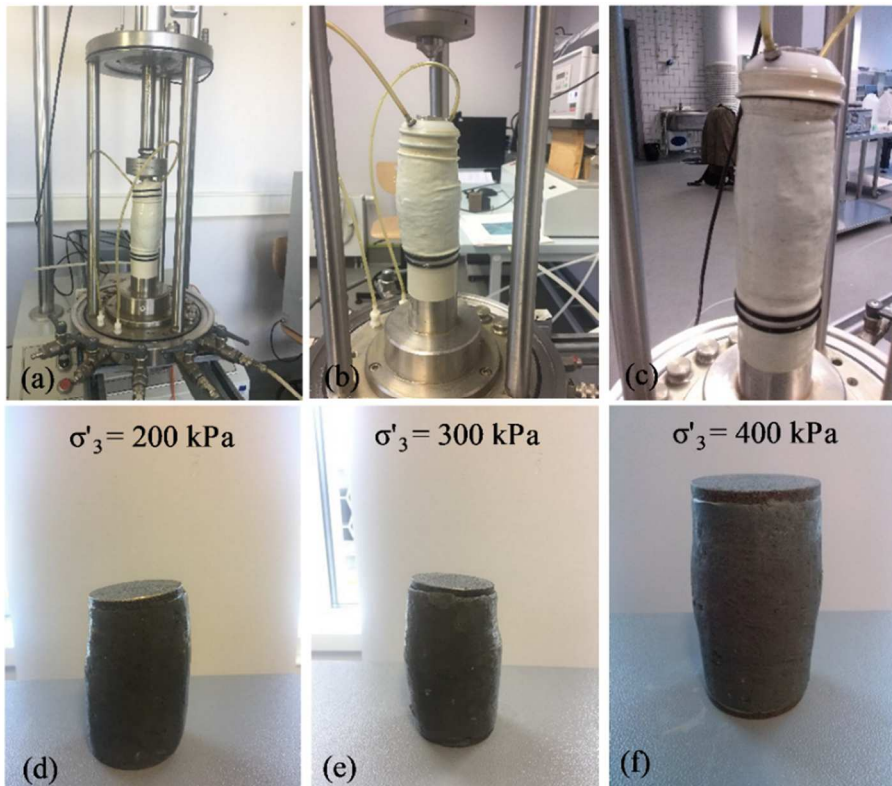
2.6. Mechaninės savybės

Tikslui pasiekti nustatyti ir apibendrinti gruntų mechaniniai rodikliai. Gruntų deformacinis rodiklis – oedometrinis deformacijų modulis – nustatytas atliekant kompresinio spūdumo (oedometro) tyrimus, taikant pakopomis apkraunamo grunto bandymą (ISO/TS 17892-5:2017). Bandymai atlikti su 20 mm aukščio ir 70 mm skersmens nesuardytais grunto mėginiais. Bandymuose naudotos apkrovos siekė nuo 50 kPa iki 1 610 kPa. Viena apkrova buvo išlaikoma ne mažiau negu 24 val. Iš šio bandymo metu gautų rezultatų buvo apskaičiuojamas gruntų perkonsolidavimo įtempis (σ'_p),

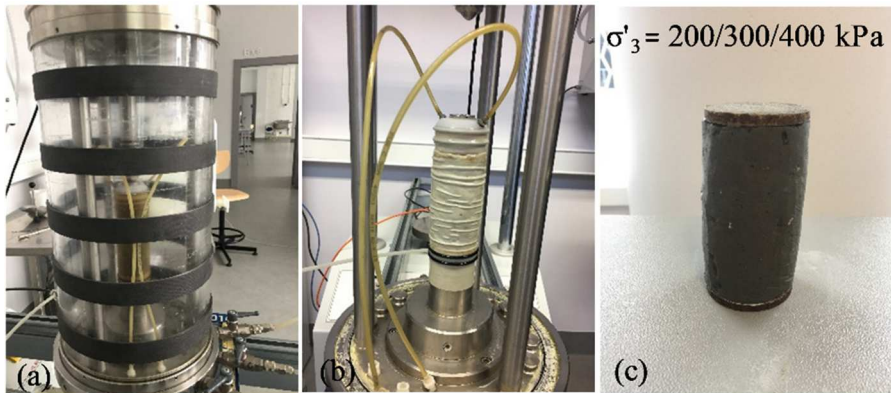
taikant keleto tyrėjų sudarytas metodikas (Jozsa, 2013; Józsa, 2016). Vėliau, remiantis mokslinėje literatūroje pateiktomis metodikomis (Mayne, 1988), apskaičiuotas perkonsolidavimo santykis (OCR).

Viena iš svarbiausių tiriamojo darbo metodikų – stiprumo ir spūdumo rodiklių nustatymas triašio slėgio bandymu (ISO 17892-8:2018; ISO 17892-9:2018). Atlikta keletas skirtingų bandymų, esant nevienodomis sąlygoms, remiantis įvairiomis metodikomis.

Pirmuoju tyrimų etapu naudotos vienpakopio (klasikinio) triašio (CTT) (2.5 pav.) ir daugiapakopio triašio (MTT) (2.6 pav.) bandymų metodikos (Hormdee et al., 2012).



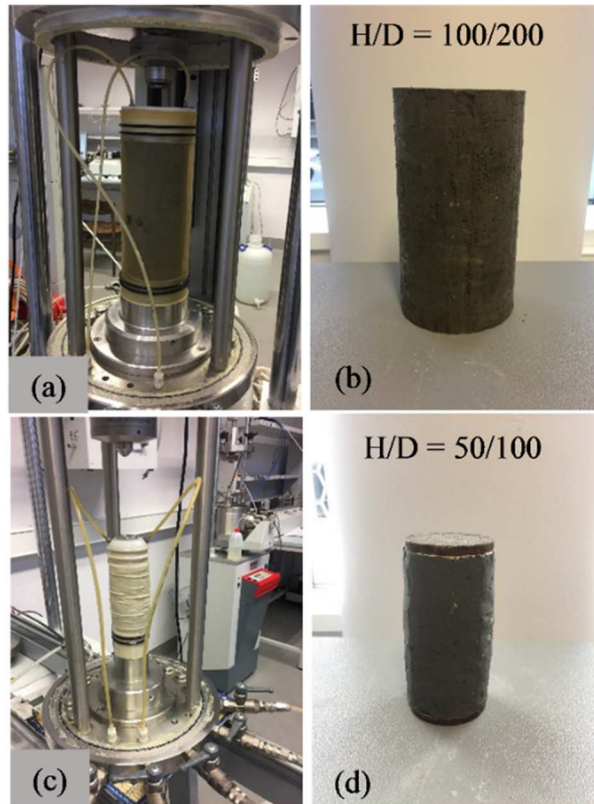
2.5 pav. Bandiniai po vienpakopio triašio bandymo (CTT): esant $\sigma'_3 = 200 \text{ kPa}$ celės slėgiui (a, d); esant $\sigma'_3 = 300 \text{ kPa}$ celės slėgiui (b, e); esant $\sigma'_3 = 400 \text{ kPa}$ celės slėgiui (c, f)



2.6 pav. Daugiapakopis triašio bandymas (MTT), esant $\sigma'_3 = 200/300/400$ kPa celės slėgiui: (a) bandinys kameroje; (b, c) bandinys, atlikus bandymą

Pagrindiniai CTT ir MTT skirtumai: atliekant CTT, skirtingiems grunto mėginams taikomas nekintamas celės slėgis, o ašinis įtempis didinamas, kol mėginys suyra; atliekant MTT, naudojamas tik vienas grunto mėginys, kuris apslegiamas skirtingais celės slėgiais. Bandymas apima grunto mėginio prisotinimą ir jo konsolidaciją, vėliau – deviatorinio įtempio didėjimą ir pastovią ašinę deformaciją, kol grunto mėginys plastiškai deformuojasi. Ši procedūra kartojama antrą ir trečią kartą, celėje didinant slėgį (Alsalmān, 2015).

Antru etapu buvo tiriami skirtingo skersmens bandiniai, kai aukščio ir skersmens santykis buvo 2 ($H = 100$ mm, $D = 50$ mm) ir kai $H/D = 2$ ($H = 200$ mm, $D = 100$ mm) (2.7 pav.).



2.7 pav. Skirtingų skersmenų bandinių tyrimas: (a, b) $H/D = 2$, kai $H = 200$ mm, $D = 100$ mm; (c, d) $H/D = 2$, kai $H = 100$ mm, $D = 50$ mm

Trečiu etapu buvo taikomos penkios bandymo sąlygos mechaniniams rodikliams gauti, kad būtų galima įvertinti sąlygų įtaką galutiniams rezultatams. Pirmoji bandymų serija atlikta esant neprisotintoms konsoliduotoms ir nedrenuotoms (UCU) sąlygoms, antroji – esant prisotintoms konsoliduotoms ir drenuotoms (SCD), trečioji – neprisotintoms konsoliduotoms ir drenuotoms (UCD), ketvirtoji – prisotintoms konsoliduotoms ir nedrenuotoms (SCU), penktoji – neprisotintoms nekonsoliduotoms ir nedrenuotoms (UUU).

Prieš atliekant bandymus skirtingomis sąlygomis ir bandymus atlikus, vykdyti kontroliniai gamtinio drėgnio ir gamtinio tankio matavimai, apskaičiuotas poringumo koeficientas. Tyrimuose naudotos apkrovos parinktos kaip atspindinčios natūralias gruntų sąlygas, atsižvelgiant į tai, jog gruntą galima apkrauti arba nukrauti 100 kPa žingsniu. Bandymų serijose vertikalios ašinės deformacijos greitis buvo nuo 0,002 %/min iki 0,027 %/min, pasiekiant didžiausią 15 proc. vertikalią ašinę deformaciją.

2.7. Duomenų bazės sudarymas

Iš visų rezultatų, gautų lauko bandymų metu (kūginio ir šoninės trinties stiprio), ir laboratorinių tyrimų metu nustatytų ir apskaičiuotų fizikinių (gamtinis drėgnis, gamtinis tankis, poringumo koeficientas, plastingumo ir takumo drėgniai, plastiškumo ir takumo rodikliai, molio kiekis) ir mechaninių (oedometrinis deformacijų modulis, sankiba ir vidinės trinties kampas) rodiklių atrinkta reprezentatyvi, išsamiai identifikuojanti ir patikima informacija apie gruntą. Tokia tiriamą gruntą apibūdinančių savybių ir jų rodiklių visuma sudaro duomenų bazę. Ši duomenų bazė sudaryta ne tik iš tyrimo metu atliktų bandymų rezultatų, bet ir papildyta geologinės informacinės sistemos (GEOLIS, www.lgt.lt) duomenimis. Duomenų bazė sukurta naudojant „Microsoft Excel“ programinę įrangą.

2.8. Robertsono klasifikacinių schemų sudarymas

Vienas iš tyrimo tikslų – nustatyti tarptautinės Robertsono gruntų elgsenos klasifikacijos taikymo galimybes vidurinio pleistoceno moreniniam smulkiam gruntui.

Remiantis lauko bandymų metu gautais grunto q_c , f_s ir R_f rodikliais, gruntas suklasifikuotas pagal bendrąją schemą (Robertson, 1990), vėliau, atsižvelgiant į Robertsono sudarytą 2009 m. klasifikaciją (Robertson, 2009) ir pritaikius grunto elgsenos (I_c) rodiklį, išskirtas į molio ($I_c = 2,95-3,6$), dulkio ($I_c = 2,95-2,6$) ir smėlio mišinių ($I_c = 2,6-2,05$) elgsenos grupes (2.1 lentelė). Disertacijoje analizuojamos gruntų tipų zonos paryškintos.

2.1 lentelė. Populiariausių Robertsono klasifikacijų schemose išskirti gruntų tipai

<i>Schemoje išskirtos gruntų tipų zonos (Robertson, 1990)</i>	<i>Schemoje išskirtos gruntų tipų zonos, remiantis I_c (Robertson, 2009)</i>	<i>Schemoje išskirtos gruntų tipų zonos (Robertson, 2016)</i>
1		CCS
2	>3,6	CC
3	2,95–3,6	CC/CD
4	2,60–2,95	TC/TD
5	2,05–2,6	SC/SD
6	1,31–2,05	SD/SC
7	<1,31	SD
8		SD/TD
9		CD

Analizuota ir atnaujinta schema (Robertson, 2009), kurioje įvestos dilatuojančių ir susitraukiančių gruntų zonos (Robertson, 2010) bei pereinamųjų gruntų zona (Robertson, 2016). Šioje klasifikacijoje gruntas skirstomas į naujas zonas. Skiriami: molio elgsenos tipo dilatuojantys (CD), molio elgsenos tipo susitraukiantys (CC), pereinamojo elgsenos tipo dilatuojantys (TD), pereinamojo elgsenos tipo susitraukiantys (TC), smėlio elgsenos tipo dilatuojantys (SD) ir smėlio elgsenos tipo susitraukiantys (SC) gruntai (2.1 lentelė).

Atlikus gruntų klasifikaciją, taikant jų elgsenos modelį, gauti rezultatai palyginti su Lietuvos gruntams pritaikyta projektinių IGG tyrimų klasifikacija (TAR 2019-06-14, Nr. 2019-09653), sudaryta remiantis ISO 14688-2:2018. Šios klasifikacijos pagrindas – gruntų skirstymas, atsižvelgiant į granulimetrinę sudėtį ir plastiškumą. Lyginant minėtas klasifikacijas, elgsena buvo lyginama su fizikinėmis savybėmis. Atliekant duomenų lyginamąją analizę, daug dėmesio skirta gamtinio drėgnio, molio dalelių kiekio ir plastiškumo rodikliams analizuoti ir šių rodiklių tarpusavio ryšiams nustatyti.

2.9. Regresinės analizės modelio sudarymas

Grunto fizikinių rodiklių sąsajoms nustatyti ir didžiausią įtaką mechaninei elgsenai darantiems grunto rodikliams išskirti sudaryti modeliai ir jų lygtys. Prieš pradėdant kurti modelius ir jų lygtis, turimi duomenys apie nagrinėjamo grunto savybes sugrupuoti. Pirmiausia pasinaudota Robertsono klasifikacijomis ir, atsižvelgiant į grunto tipą (Robertson, 2009) bei dilatuojančių ir susitraukiančių gruntų zonas (Robertson, 2016), gruntai suskirstyti pagal jų elgseną. Vėliau duomenys sugrupuoti remiantis kūginio stipriu. Išskirtos trys pagrindinės grupės (kai $q_c = 1-5$ MPa, $q_c = 5-10$ MPa ir $q_c > 10$ MPa). Grupavimas pasirinktas atsižvelgiant į vyraujančias grunto stiprumo imtis.

Tyrimo tikslui pasiekti atlikta daugiavarė regresinė analizė. Ši analizė ir jos metu sukurti modeliai leidžia interpretuoti skirtingų kintamųjų (gruntų fizikinės savybės) poveikį ir nustatyti tikėtinus išėities rezultatus. Atliekant tyrimą, regresinė analizė pradėta nuo kintamųjų pasirinkimo. Galutiniai kintamieji – keletas gruntų fizikinių (gamtinis drėgnis, molio frakcijos kiekis, plastiškumo rodiklis) ir mechaninių (grunto kūginis stipris) savybių. Sudarant modelį, atsisakyta naudoti poringumo koeficientą e , nes tai išskaičiuojamas grunto fizikinis rodiklis, kuris priklauso nuo gamtinio drėgnio, gamtinio tankio ir kietųjų dalelių tankio. Gamtinis tankis ir kietųjų dalelių tankis kinta nedideliame intervale, o gamtinio drėgnio kaita yra daug didesnė, todėl

regresinėje analizėje pasirinkta naudoti tiesiogiai nustatytą gamtinio drėgnio vertę. Taip pat vietoj plastiškumo rodiklio, kuris nustatytas ne visais atvejais, panaudota tiesiogiai nustatyta molio frakcijos vertė, lemianti plastiškumo rodiklį.

Pasirinktų kintamųjų sąveikos rezultatas – sumodeliuotas (žymimas S raidės indeksu) oedometrinis deformacinis modulis (E_{Soed}) bei sumodeliuotas (žymimas S raidės indeksu) efektyvusis vidinės trinties kampas (φ'_S). Šie sumodeliuoti grunto rodikliai lyginti su nustatytais kintamaisiais, t. y. su laboratorinių tyrimų metu nustatytu (žymimas N raidės indeksu) oedometriniu deformacijos moduli (E_{Noed}) ir nustatytu (žymimas N raidės indeksu) efektyviuoju vidinės trinties kampu (φ'_N). Nustatyti E_{Noed} ir sumodeliuoti E_{Soed} analizuoti 0,2 ir 0,4 MPa apkrovų ribose. Minėti apkrovų intervalai parinkti kaip dažniausiai gruntą veikiančios apkrovos. Analizės rezultatas – aprašyti kintamieji ir sudaryto modelio lygtis. Gautų lygčių modelių tinkamumas buvo tikrinamas remiantis determinacijos koeficientu (R^2), koreliacijos koeficientu (R) bei reikšmingumo lygmens reikšme (p) regresoriams. Daugianarė tiesinė regresija buvo naudojama ryšiams tarp dviejų ar daugiau prognozuojamųjų kintamųjų ir nusistatyto atsako kintamajam įvertinti. Daugiausia dėmesio skiriama p reikšmėms išvestyje, siekiant nustatyti, ar ryšys tarp prognozuojamų kintamųjų ir numatytojo kintamojo yra statistiškai reikšmingas. Reikšmė p turi būti mažesnė negu 0,05. Tokiu atveju galima daryti išvadą, kad regresijos modelis, kaip visuma, yra statistiškai reikšmingas. Vis dėlto, atliekant tyrimą, buvo atvejų, kai pašalinus vieną regresorių, smarkiai suprastėjo visas modelis. Tokiais atvejais statistiškai mažiau reikšmingas kintamasis vis tiek buvo paliekamas lygtyje.

2.10. Antrosios dalies išvados

1. Atlikus detalią mokslinės literatūros analizę, darbo tikslui pasiekti ir ginamiesiems teiginiams įvertinti parengtas darbo planas ir pasirinktos tyrimų metodikos.

2. Pirminis lauko tyrimas – grėžinių grėžimas, imant nesuardytos ir suardytos sandaros bandinius. Lauko darbų metu gruntas buvo identifikuojamas remiantis ISO 14688-1:2018, vėliau – remiantis laboratorinių tyrimų rezultatais, klasifikuojamais atsižvelgiant į ISO 14688-2:2018; TAR 2015-11-16, Nr. 18162.

3. Siekiant nustatyti tiriamojo grunto cheminę ir mineralinę sudėtį, pasirinkti rentgeno spindulių fluorescencijos, rentgeno spindulių difrakcijos ir skenuojančio elektroninio mikroskopo metodai.

4. Gruntų elgsenai klasifikuoti pasirinktos plačiausiai pasaulyje naudojamos ir įvardijamos kaip patikimiausios Robertsono schemos. Atlikus tiriamų gruntų klasifikaciją, atsižvelgiant į jų elgseną, gauti rezultatai lyginti su Lietuvos gruntams pritaikyta projektinių IGG tyrimų klasifikacija, sudaryta remiantis ISO 14688-2:2018. Lyginant duomenis, daug dėmesio skirta gamtinio drėgnio, molio dalelių kiekio ir plastiškumo rodikliams analizuoti ir šių rodiklių tarpusavio ryšiams nustatyti.

5. Fizikiniams ir mechaniniams rodikliams palyginti pasirinkta atlikti daugianarę regresinę analizę. Šia analize ir jos metu kuriamais modeliais interpretuotas skirtingų kintamųjų (gruntų fizikinės savybės) poveikis mechaniniams rodikliams. Sąveikos rezultatas – sumodeliuotas oedometrinis deformacinis modulis (E_{Soed}) ir efektyvusis vidinės trinties kampas (φ'_s). Sumodeliuoti grunto rodikliai lyginti su laboratorijoje nustatytais rodikliais (E_{Noed}) ir (φ'_N).

6. Tiriamojo grunto mechaniniai rodikliai ir jų kaita analizuoti naudojant triašio slėgio aparatą, keičiant bandymo sąlygas. Bandymų metu mėginiai tirti pasirinkus keletą metodikų (vienpakopė ir daugiapakopė) ir nusistačius skirtingas sąlygas (neprisotintas konsoliduotas ir nedrenuotas, prisotintas konsoliduotas ir drenuotas, neprisotintas konsoliduotas ir drenuotas, prisotintas konsoliduotas ir nedrenuotas, neprisotintas nekonsoliduotas ir nedrenuotas).

3. TYRIMO DUOMENŲ ANALIZĖ IR REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

3.1. Amžiaus įvertinimas ir mineralinė bei cheminė sudėtis

3.1.1. Tiriamo grunto amžiaus įvertinimas

Glacialinių darinių sudėties tyrimai atliekami siekiant išsiaiškinti ir rekonstruoti paleogeografines ir paleoglaciologines sąlygas bei veiksnius ir atsakyti į klausimus apie ledynų slinkimą, jų kelius, mechanizmą ir, svarbiausia, iš kokių sudedamųjų dalių sudaryti glacialiniai nuogulų sluoksniai (Baltrūnas & Karmaza, 2011).

Atliekant tyrimą, tiriamo grunto amžiui pagrįsti pasirinktas struktūrinis analizės metodas (Baltrūnas, 1995; Baltrūnas & Karmaza, 2011). Remiantis geomorfologiniu žemėlapiu (Guobytė, 1999) (2.2 pav.) ir nuledėjimo schema (Guobytė, 2014), kurie rodo nuogulų išplitimą, paplitimą ir pasiskirstymą visoje Lietuvos teritorijoje, ir išanalizavus giliuosius kartografavimo gręžinius tiriamųjų gręžinių žemėlapyje (GEOLIS, www.lgt.lt), sudaryti geologiniai pjūviai (1–4 priedai). Pjūviuose pažymėtos tyrimų vietos, iš kurių paimti bandiniai disertacijos tyrimams atlikti.

Išanalizavus turimus duomenis, tiriamasis gruntas priskirtas prie reljefą sudarančių, vėlesnių ledynų nepadengtų vidurinio pleistoceno Medininkų ledynmečio glacialinių smulkių nuogulų (g, gt II md). Išvados dėl gruntų amžiaus padarytos remiantis išanalizuotais šaltiniais (geomorfologinis žemėlapis (Guobytė, 1999), nuledėjimo žemėlapis (Guobytė, 2014), kvartero stratigrafinė schema (Satkūnas, 2005)), koreliuojant pjūvius pagal absoliutinius aukščius, įvertinus geologinių sluoksnių sudėtį, sluoksnių slūgsojimo pobūdį, kryptis ir sugretinus turimus duomenis su inžinerinių geologinių tyrimų metu gautais duomenimis, gręžiant gręžinius (1–4 priedai).

3.1.2. Mineralinė ir cheminė sudėtis

Reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto cheminės ir mineralinės sudėties tyrimai – nuoroda į detalesnį grunto sudėties ir analitinį amžiaus įvertinimą.

Remiantis analizuojamą gruntą sudarančių oksidų ir bendrosios cheminės sudėties spektrinės analizės tyrimais, rentgeno fluorescencijos analizatoriumi nustatyti tirto grunto cheminiai elementai (3.1 lentelė).

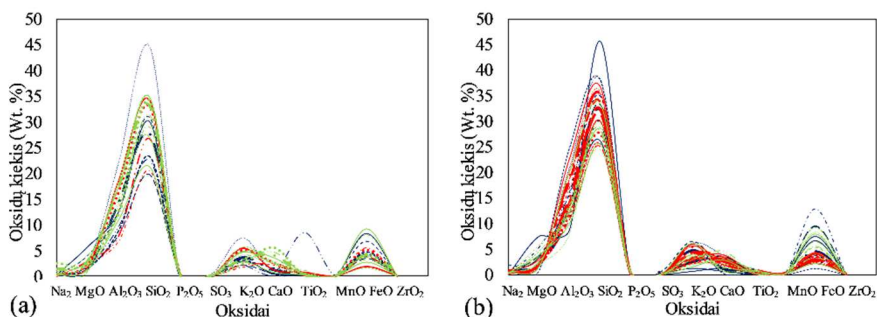
3.1 lentelė. Rentgeno fluorescencijos analizatoriumi nustatyti vidurinio pleistoceno moreniniuose gruntuose molio frakcijoje esantys elementai ir jų kiekiai bandiniuose

<i>Elementas</i>	<i>Mažiausias kiekis, %</i>	<i>Didžiausias kiekis, %</i>	<i>Vidurkis, %</i>
Na	0,342	0,378	0,356
Mg	1,410	1,580	1,473
Al	5,070	5,630	5,460
Si	23,700	25,500	24,400
P	0,044	0,049	0,047
S	0,083	0,093	0,087
Cl	0,010	0,014	0,012
K	2,250	2,480	2,378
Ca	6,950	7,460	7,220
Ti	0,246	0,277	0,266
Mn	0,037	0,045	0,041
Fe	1,680	2,050	1,915
Ni	0,003	0,004	0,003
Zn	0,004	0,008	0,005
Rb	0,008	0,009	0,009
Sr	0,011	0,012	0,012
Y	0,001	0,001	0,001
Zr	0,016	0,020	0,018
Nb	0,001	0,001	0,001
Ba	0,040	0,345	0,118
Cu	0,002	0,002	0,002
As	0,001	0,001	0,001
I	0,013	0,013	0,013

Iš gautų rezultatų tikslinga išskirti šiuos elementus: Ti, Mn, Zr, Cu. Tai atsparūs dūlėjimui klastogeniniai elementai. Šių elementų randama Medininkų aukštumų moreninėse nuogulose (Satkūnas & Bitinas, 1995; Gregorauskienė & Bitinas, 2017). Minėta aukštuma suformuota iš vidurinio pleistoceno nuogulų (Basalykas, 1965; Kadūnas et al., 2002).

Remiantis cheminės analizės rezultatais, gautais skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (3.1(a, b) pav.), nustatyta, kad viršutinio pleistoceno laikotarpio gruntu sudarantiems molio mineralams būdingas mažesnis CaO kiekis (3.1(a) pav.). Kalcio oksido kiekis viršutinio pleistoceno nuogulose kinta nuo 0,31 iki 5,52 proc. (vidurkis 2,07 proc.), o reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno nuogulose – nuo 0,31 iki 2,88 proc. (vidurkis 3,21 proc.) (3.1(b) pav.). Įvertinus gautus rezultatus, galima daryti prielaidą, kad tirtos reljefą sudarančios vidurinio pleistoceno moreninės nuogulos pasižymi didesniu karbonatingumu negu viršutinio pleistoceno nuogulos (šios nuogulos tirtos siekiant palyginti). Vadovaujantis CaO kiekiu ir palyginus gautus rezultatus, tiriamąsias nuogulas tikslinga atskirti. Aptarti rezultatai ir išvados minimi ir kituose tyrimuose (Gaigalas & Melešytė, 2001; Rudnickaitė, 2016).

Karbonatingumas ir jo kiekis susiję su poledyninio paviršiaus reljefu ir po juo slūgsančių uolienu sudėtimi. Ten, kur ledynas slinko per uolienas, gausių karbonatų, nuogulose fiksuojamas didesnis karbonatingumas. Karbonatingumo padidėjimas pastebimas ir tais atvejais, kai karbonatinės uolienos slūgso kaip ledyno guolio reljefo paaukštėjimai (Satkūnas & Bitinas, 1995; Rudnickaitė, 2016).



3.1 pav. Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu išskirti oksidų kiekiai: (a) viršutinio pleistoceno moreninėse smulkiose nuogulose; (b) reljefą sudarančiose vidurinio pleistoceno moreninėse smulkiose nuogulose

Atliekant grunto molio frakcijos mineralinės sudėties tyrimą, naudojant rentgeno spindulių difraktometrą, gauti duomenys (3.2 lentelė) analizuoti ir lyginti su viršutinio pleistoceno Nemuno ledynmečio (g III nm³) moreninio grunto molinės frakcijos duomenimis (3.2 lentelė). Išanalizavus gautas difraktogramas ir procentinius gautų mineralų kiekius, nustatytas šių dviejų skirtingo amžiaus gruntų pagrindinis skirtumas – mineralo dolomito kiekis (3.2 lentelė), kuris reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno bandiniuose kinta nuo 3,2 proc. iki 14,0 proc., o viršutinio pleistoceno bandiniuose – nuo 0,8 proc. iki 2,8 proc.

3.2 lentelė. Rentgeno spindulių difraktometru rasti mineralai ir jų vidutinis kiekis viršutinio ir reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninėse smulkiose nuogulose

<i>Mineralo pavadinimas</i>	<i>Mineralo cheminė formulė</i>	<i>Viršutinio pleistoceno (g III nm₃) kiekis bandinyje, %</i>	<i>Vidurinio pleistoceno (g, gt II md) kiekis bandinyje, %</i>
Kvarcas	SiO ₂	76,03	61,54
Kalcitas	CaCO ₃	11,13	10,73
Montmorilonitas	Na _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·8(H ₂ O)	0,30	0,46
Albitas	Na(AlSi ₃ O ₈)	2,13	1,80

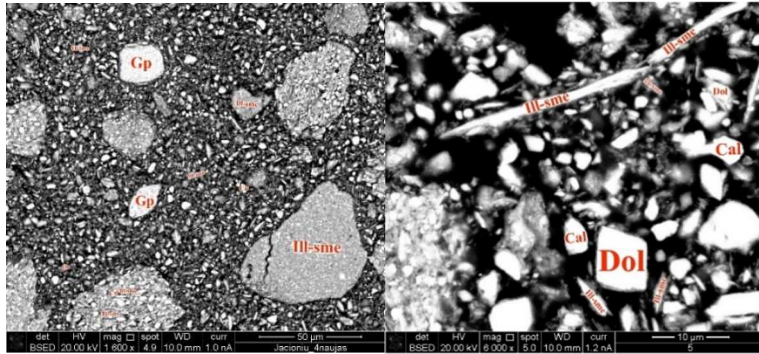
<i>Mineralo pavadinimas</i>	<i>Mineralo cheminė formulė</i>	<i>Viršutinio pleistoceno (g III nm₃) kiekis bandinyje, %</i>	<i>Vidurinio pleistoceno (g, gt II md) kiekis bandinyje, %</i>
Ilitas	$(K_{0,74}Ca_{0,03})(Al_{1,92}Mg_{0,09}(Fe_{0,01})(Si_{3,22}Al_{0,78})O_{10}(OH)_2)$	1,98	4,37
Klinochloras	$Mg_3(Mg_2Al)((Si_3Al)O_{10}(OH)_2O_3)$	1,34	1,14
Kaolinitas	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	1,43	6,87
Muskovitas	$KAl_2((Si_3Al)O_{10}(OH)_2)$	2,67	3,53
Dolomitas	$CaMg(CO_3)_2$	1,57	8,97
Anortitas	$(Ca_{0,89}Na_{0,11})(Al_{1,89}Si_{0,11})Si_2O_8$	1,41	0,38

Dolomitas – vienas iš karbonatinių mineralų. Nustatyta, kad didesni jo kiekiai aptinkami reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno nuogulose. Pagrindinė priežastis – vidurinio pleistoceno ledynmetis vyko anksčiau negu viršutinis, o tuo metu Žemės paviršiuje slūgsojo devono periodo uolienos (Kavoliūtė, 2012; Baltrūnas, 2018). Taigi, ledynui slenkant, sukaupta medžiaga, kurią sudarė įvairios karbonatinės uolienos su jose esančiais mineralais (kalcitas, dolomitas), buvo pernešta kartu (Baltrūnas, 1995; Rudnickaitė, 2016).

Mineralų kiekių santykių gretinimas naudojamas kaip vienas iš galimų stratigrafinio skirstymo ir gretinimo tikslų, atpažįstant skirtingo amžiaus nuogulas (Baltrūnas, 1995). Kitų autorių tyrimuose minima, kad vidurinio pleistoceno moreniniuose gruntuose žvyro frakciją dažniausiai sudaro dolomito nuolaužos, jos kildinamos iš Švedijos šiaurės (Gaigalas & Melešytė, 2001; Gaigalas, 2008). Taigi nustatytas mineralo dolomito kiekis ne tik suteikia detalesnės informacijos apie tiriamo grunto sudėtį, bet gali būti ir vienas iš indikatorių, darant prielaidas apie grunto kilmę.

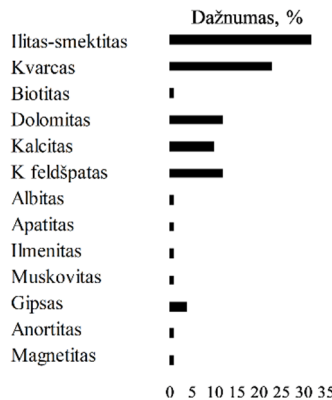
Atliekant tyrimą skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, taip pat identifikuoti grunte esantys mineralai (3.2 pav.). Vis dėlto minėtu tyrimu gaunama tik kokybinė, o ne kiekybinė analizė.

Išanalizavus visus bandinius, perskaičiavus jiems formules ir sudarius įvairių oksidų santykius atspindinčius grafikus, išskirta, iš kokių mineralų sudaryti tirti bandiniai (3.2 ir 3.3 pav.).



3.2 pav. Reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto tipo molio frakcijos vaizdai, gauti skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (Qz – kvarcas, Cal – kalcitas, Ill-smc – ilitas-smektitas, Dol – dolomitas, Gp – gipsas)

Apibendrinus SEM gautus rezultatus, nustatyta, kad reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno analizuotus molio mineralus sudaro ilitas-smektitas, feldšpatai, kvarcas, taip pat karbonatiniai mineralai – kalcitas, dolomitas (3.3 pav.). Išskirtas ir gipso mineralas, jis gali būti aptinkamas devono uolienų egzravimo metu (Baltrūnas et al., 2005).



3.3 pav. Reljefą sudarančio vidurinio pleistoceno moreniniuose smulkiuose gruntuose skenuojančiu elektroniniu mikroskopu nustatyti mineralai

Analizuojant bandinius, dažniausiai randamas molio mineralas – ilito-smektito mišinys (3.3 pav.). Atskirti šiuos mineralus vieną nuo kito sudėtinga dėl jų labai kaičios ir įvairios sudėties (Deon et al., 2022).

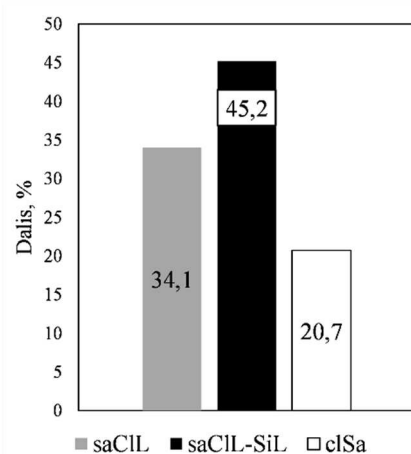
Gautus molio mineralų rezultatus palyginus XRD ir SEM tyrimo metodais, nustatyta, kad randama tų pačių ar tai pačiai grupei priklausančių mineralų. Vis dėlto, siekiant tiriamo grunto mineralus nustatyti tiek kokybiškai, tiek ir kiekybiškai tiksliai, rekomenduojama ištirti daugiau bandinių.

Nustatyti absoliutinį amžių yra sunkiai įgyvendinama ir sudėtinga užduotis. Dažnai taikomi izotopiniai geocheminiai, termoluminescencinis, optiškai stimuliuotos liuminescencijos ir kiti metodai, tačiau jie datuoja į morenines nuogulas prineštų nuosėdų amžių (Briner, 2011; Davies, 2021). Amžiaus išskyrimą lyginamuoju būdu tarp skirtingo amžiaus gruntų galima laikyti alternatyva moreninių gruntų amžiaus datavimui, tačiau toks amžiaus identifikavimas reikalauja kruopštaus rezultatų gretinimo ir didelio tiriamų bandinių kiekio. Pabrėžiama, kad tokiu būdu galima identifikuoti tik konkrečioje teritorijoje esančias skirtingo amžiaus nuogulas, nes mineralinė sudėtis skirtingose vietose gali būti itin kaiti ir ne visada turėti bendrų dėsningumą.

3.2. Klasifikacijos ir jų pritaikymas

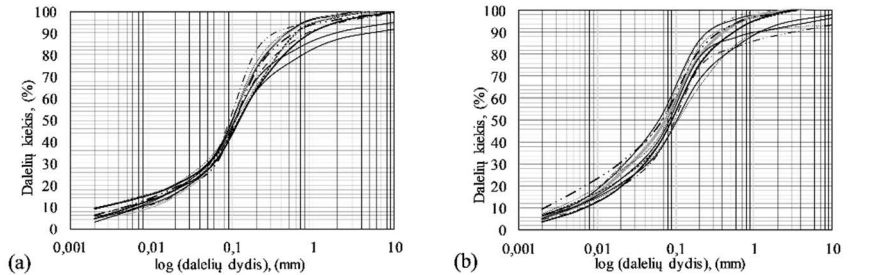
3.2.1. Vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų fizikinės savybės ir sudėtis

Išanalizavus rezultatus, gautus laboratorinių tyrimų metu (IS 17892-4:2016; ISO 17892-12:2018) pagal Lietuvoje taikomą ir priimtą gruntų klasifikavimo sistemą (ISO 14688-1:2018; ISO 14688-2:2018), vadovaujantis rekomendacijomis (TAR, 2015-11-16, Nr. 18162), analizuojamas vidurinio pleistoceno moreninis smulkus gruntas skirstytinas į tris pagrindines grunto tipo grupes (3.4 pav.). Įvertinus gautus rezultatus, nustatyta, kad dažniausiai iš vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų aptinkamas grunto tipas yra smėlingas mažo plastiškumo molis – dulkis (saCIL–SiL).



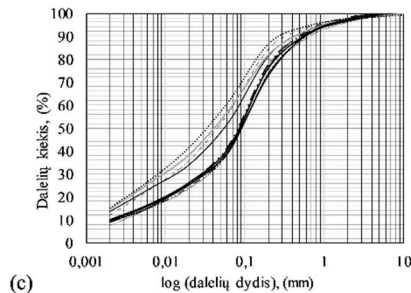
3.4 pav. Vidurinio pleistoceno moreniniuose smulkiuose dariniuose dažniausiai aptinkamų gruntų tipai

Šiame darbe nagrinėjami šie grunto tipai: smėlingas mažo plastiškumo molis (saCIL) (3.5(a) pav.), smėlingas mažo plastiškumo molis – dulkis (saCIL–SiL) (3.5(b) pav.) ir molingas smėlis (clSa) (3.5(c) pav.) Lietuvoje šie gruntai dažniausiai naudojami statinių ir įrengimų pamatų pagrindams, yra į juos įgilinami.



Molis	Dulkis			Smėlis			Žvyras
	Smulkus	Vidutinis	Rupus	Smulkus	Vidutinis	Rupus	
<0,002	0,002–0,0063	0,0063–0,02	0,02–0,063	0,2–0,63	0,63–2,0	>2,0	
10,67	35,43			51,15			2,66

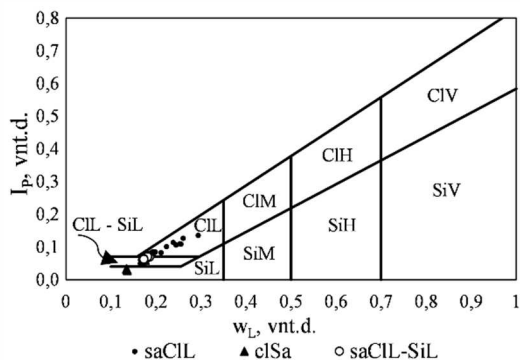
Molis	Dulkis			Smėlis			Žvyras
	Smulkus	Vidutinis	Rupus	Smulkus	Vidutinis	Rupus	
<0,002	0,002–0,0063	0,0063–0,02	0,02–0,063	0,2–0,63	0,63–2,0	>2,0	
6,14	35,84			54,25			3,77



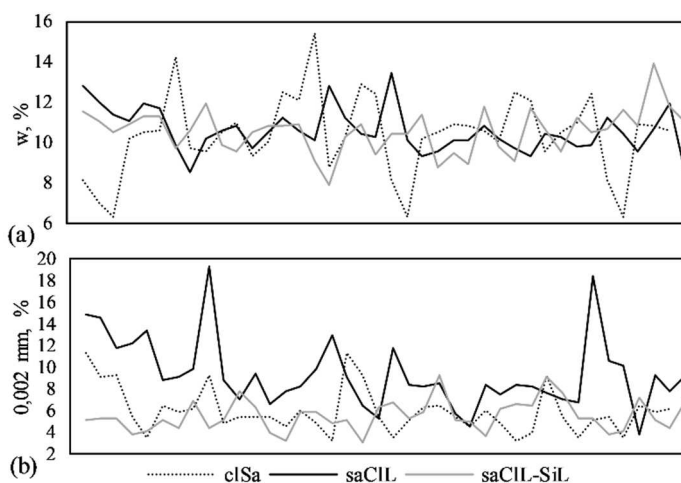
Molis	Dulkis			Smėlis			Žvyras
	Smulkus	Vidutinis	Rupus	Smulkus	Vidutinis	Rupus	
<0,002	0,002–0,0063	0,0063–0,02	0,02–0,063	0,2–0,63	0,63–2,0	>2,0	
6,64	26,42			62,71			4,23

3.5 pav. Darbe nagrinėjamų gruntų tipų granulimetrinė sudėtis (vidurkiai): (a) smėlingo mažo plastiškumo molio (saCIL); (b) smėlingo mažo plastiškumo molio – dulgio (saCIL–SiL); (c) molingo smėlio (clSa)

Remiantis tiriamųjų gruntų granulimetrinėmis sudėtimis (3.5 pav.), galima teigti, kad vidurinio pleistoceno moreniniai gruntai yra gana smėlingi. Rupios frakcijos kiekis yra arti 65 proc. ribos arba ją viršija. Taip pat nustatytas padidėjęs žvyro frakcijos kiekis (siekia beveik 5 proc.). Minėtina, kad tirtuose gruntuose molio frakcijos (<0,002 mm) kiekis kinta nuo 4 iki 19 proc. Didžiausias molio kiekis yra saCIL, mažiausias – saCIL–SiL tipo gruntuose (3.7(b) pav.). Visi tiriamieji gruntai yra mažo plastiškumo (3.6 pav.), o gamtinis drėgnis vyrauja 9–16 proc. intervale (3.7(a) pav).



3.6 pav. Tipinis moreninio smulkaus grunto išsidėstymas plastiškumo diagramoje

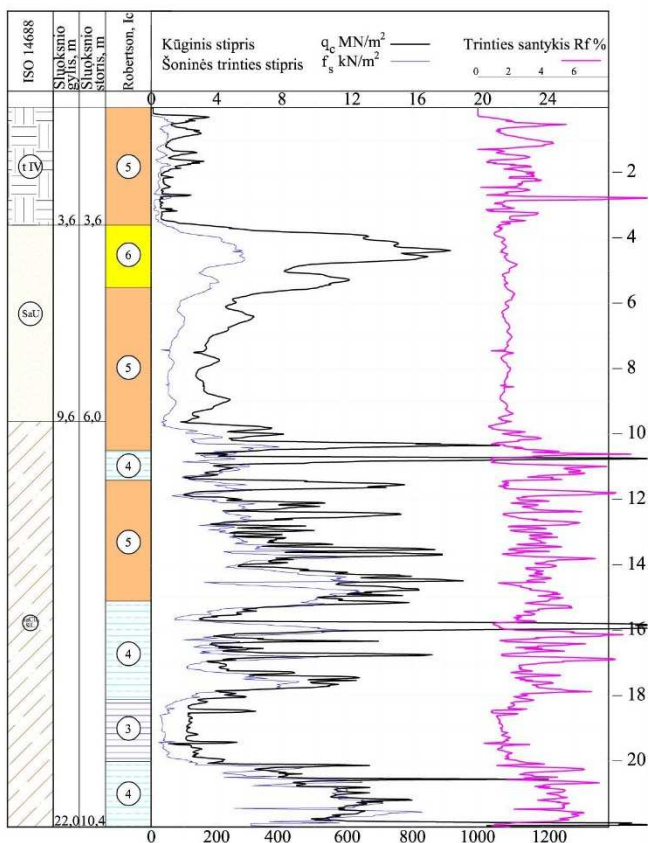


3.7 pav. Fizikinių rodiklių kitimo amplitudės: (a) gamtinio drėgnumo kiekio kitimas pagrindiniuose išskirtuose grunto tipuose, (b) molio frakcijos kiekio (<0,002 mm) kitimas

Labai panašios sudėties moreninių gruntų randama ir kitose šalyse, kurias taip pat buvo uždenę Fenoskandinavijos ledo skydai (Lindh & Lemenkova, 2023). Kaip viena iš panašiausių kitose Europos šalyse vyraujančių moreninių gruntų savybių dažniausiai minimas mažas plastiškumas ($w_L < 35 \%$) (Clarke et al., 2008; Clarke, 2018). Pabrėžiamas kiek didesnis molio frakcijos (<0,002 mm) kiekis grunte, jis siekia nuo 12 iki 30 proc. (Bell, 2002). Vis dėlto apie fizikines moreninių gruntų savybes randama labai mažai informacijos. Dažniausiai, kalbant apie šiuos gruntuos, minima kompleksinė sudėtis, dėl kurios nuspėti moreninio grunto mechaninę elgseną sudėtinga (Jones et al., 1966; Clarke, 2017; Hailemariam & Wuttke, 2021).

3.2.2. Robertsono klasifikacijų palyginimas moreniniuose gruntuose

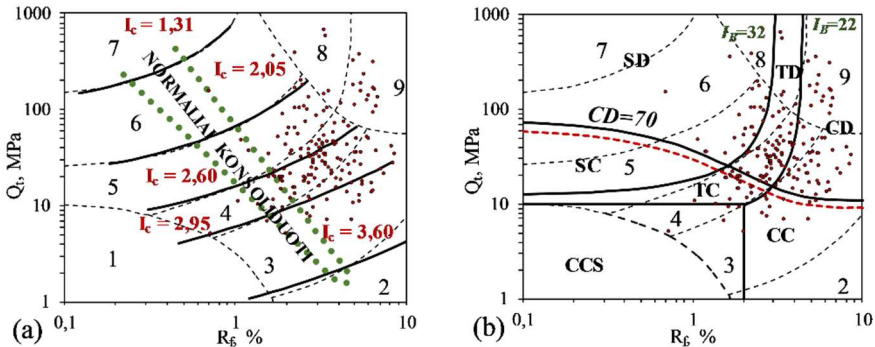
Atliekant pirminį Robertsono klasifikacijos (Robertson, 2009) tinkamumo vidurinio pleistoceno smulkiam gruntui analizuoti įvertinimą, CPT gauti rodikliai (q_c , f_s) ir gręžinio stulpelių, kuriuose gruntų pavadinimai nustatyti laboratoriniais tyrimais (ISO 14688-2:2018), duomenys sugretinti su CPT interpretuotu stulpeliu, atsižvelgiant į Robertsono klasifikaciją (Robertson, 2009), gruntą suskirsčius pagal elgsenos tipus. Iš pateikto pavyzdžio (3.8 pav.) matyti, kad ISO 14688-2:2018 ir Robertsono klasifikacijos sutampa tik vertinant rupiusius gruntuos. Kaip nurodoma mokslinėje literatūroje, lyginant smulkių gruntų rezultatus, galimi neatitikimai. Laboratorinių tyrimų metu nustatytas smėlingas mažo plastiškumo molis – dulkis (saCIL–SiL), remiantis grunto elgsena, priskiriamas prie smėlio mišinių (5), dulkių mišinių (4) ir molio (3) elgsenos grupių (1.3 lentelė, 3.9(a) pav.).



3.8 pav. Gruntų pavadinimų lyginimas, remiantis ISO 14688-2:2018 ir Robertsono (2009) klasifikacijomis: tIV – technogeniniai dariniai, SaU – tolygiai išrūšiuotas smėlis, saCIL–SiL – smėlingas mažo plastiškumo molis – dulkis (ISO 14688-2:2018); 3 – molio mišiniai, 4 – dulkių mišiniai, 5 – smėlio mišiniai (Robertson, 2009)

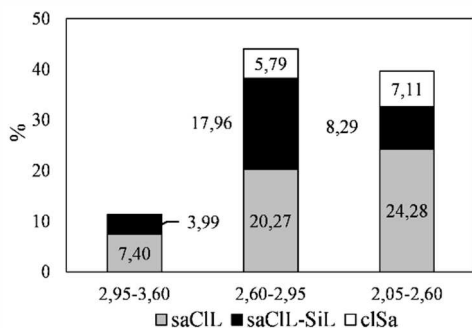
Lauko tyrimų metu kūginis stipris reaguoja į mechaninę grunto elgseną, todėl grunto tipai skirstytini į grupes, kuriose gruntų mechaninė elgsena yra panaši. Į įprastai laboratorijoje nustatytas fizikines savybes neatsižvelgiama (Sodré, 2022).

Toliau lyginami du Robertsono klasifikacijų atnaujinimai (3.9 pav.) (dar žr. 1.4 lentelę (Robertson, 2009) ir 1.5 lentelę (Robertson, 2016)).



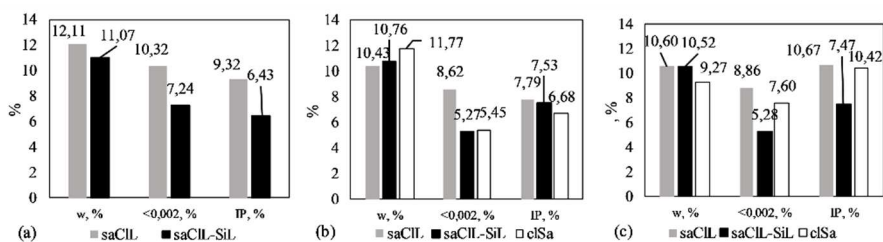
3.9 pav. Vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų pasiskirstymas Robertsono klasifikacijos schemose: (a) gruntų pasiskirstymas (Robertson, 2009); (b) gruntų pasiskirstymas (Robertson, 2016)

Pirmiausia, remiantis surinkta duomenų baze, vidurinio pleistoceno smulkūs grantai suklasifikuoti atsižvelgiant į grunto elgsenos tipo indeksą (Robertson, 2009), kuris naudojamas apibūdinti grunto elgsenai, pagrįstai CPT, o ne identifikuotai pagal laboratorinius rezultatus. Išanalizavus duomenis (3.9(a) ir 3.10 pav.), galima teigti, kad grantai pasiskirsto į tris grupes – molio, dulquio ir smėlio mišinių (1.6 lentelė). Daugiausia grunto (apie 44 proc.) priskiriama dulquio mišiniams ($I_c = 2,60\text{--}2,95$, molingas dulkis ir dulkingas molis). Šioje grupėje smėlingas mažo plastiškumo molis (saCIL) sudaro apie 20 proc. Taip pat nustatyta, kad mažiausiai grunto (apie 11 proc.) priklauso molio mišinių grupei ($I_c = 2,95\text{--}3,6$, nuo molių iki dulkingų molių). Šioje grupėje visiškai nėra clSa grunto tipo, dominuoja saCIL grunto tipas, kurio pavadinimas nustatytas laboratorinių tyrimų metu, vertinant grunto fizikines savybes.



3.10 pav. Pagrindinių vidurinio pleistoceno moreninių gruntų tipų, suklasifikuotų remiantis ISO 14688-2:2018, kiekio (%) pasiskirstymas Robertsono klasifikacijos schemoje, atsižvelgiant į I_c rodiklį (Robertson, 2009): kai $I_c = 2,95-3,6$, nuo molių iki dulkingų molių mišinių; kai $I_c = 2,60-2,95$, molingas dulgis ir dulkingas molis; kai $I_c = 2,05-2,6$, nuo dulkingo smėlio iki smėlingo dulgio mišinių

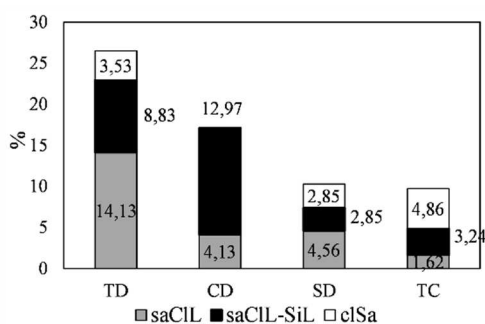
Vertinant pagrindinėse trijose grupėse (molio (3.11(a) pav.), dulgio (3.11(b) pav.) ir smėlio (3.11(c) pav.) mišiniai) pasiskirsčiusius gruntų fizikinius rodiklius (w , $<0,002\text{ mm}$ ir I_P), nustatyta, kad didžiausias smulkiosios frakcijos kiekis ir gamtinis drėgnis vyrauja molinių gruntų mišiniuose (3.11(a) pav.), esančiuose saCl ir saCIL-SiL gruntų tipuose. Dulgio mišiniuose (3.11(b) pav.) didžiausias w ir $<0,002\text{ mm}$ kiekis yra clSa grunto tipe. Išanalizavus duomenis, nustatyta, kad molio frakcijos dalelių kiekis saCIL tipo grunte proporcingas drėgnio kiekiui. Šią priklausomybę patvirtina daugelis tyrėjų (Pezowicz & Choma-Moryl, 2015; Çakir & Cangir, 2019; Zamin et al., 2021). Vis dėlto, vertinant saCIL-SiL ir clSa grunto tipus, nustatyta atvirkštinė priklausomybė, kai, didėjant drėgniui, mažėja molio frakcijos dalelių kiekis (ypač clSa grunte). Tokia priklausomybė nurodoma ir kitų tyrėjų, ji siejama su mažesniu smulkiosios frakcijos kiekiu (Bağ & Chmielewski, 2019) ir didesniu dulgio frakcijos kiekiu (Feng & Zhang, 2021).



3.11 pav. Fizikinių rodiklių (w , $<0,002\text{ mm}$ ir I_P) pasiskirstymas: (a) molio mišiniuose (nuo molių iki dulkingų molių, $I_c = 2,95-3,6$); (b) dulgio mišiniuose (molingas dulgis ir dulkingas molis, $I_c = 2,60-2,95$); (c) smėlio mišiniuose (nuo dulkingo smėlio iki smėlingo dulgio, $I_c = 2,05-2,6$)

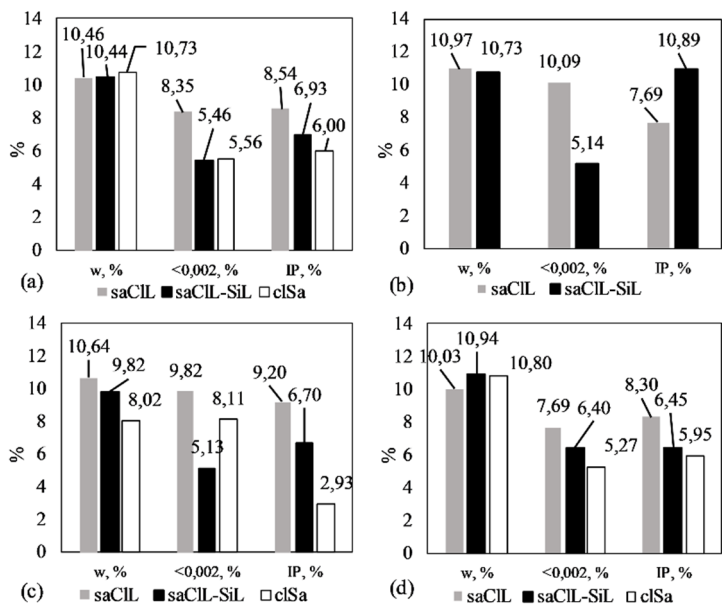
Gruntai suklasifikuoti, remiantis 2016 m. Robertsono atnaujinta ir apibendrinta schema, kurioje gruntai skirstomi į dilatuojančius ir susitraukiančius šlyties metu. Išskiriamas ir pereinamųjų gruntų intervalas (3.9(b) pav.).

Tiriamieji gruntai daugiausia pasiskirstė į keturias grupes (SD, TD, CD ir TC) (3.12 pav., 1.5 lentelė). Apibendrinus duomenis, galima teigti, kad daugiausia (apie 26 proc.) grunto priskiriama pereinamojo tipo elgsenos dilatuojančių (TD) gruntų zonai, kur vyrauja saCIL grunto tipas. Pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančių (TC) ir smėlio tipo elgsenos dilatuojančių (SD) gruntų yra apylygiai (po 10 proc.). Taip pat nustatyta, kad tarp molio tipo elgsenos dilatuojančių (CD) gruntų nėra clSa grunto tipo.



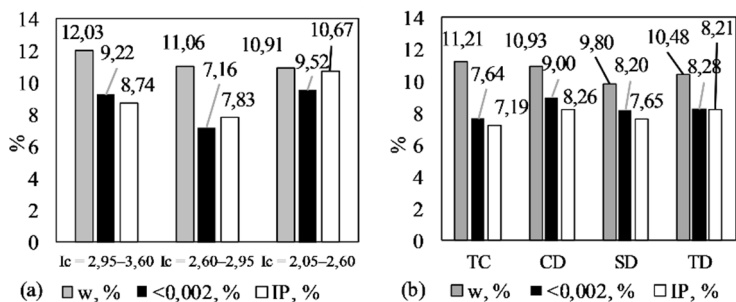
3.12 pav. Pagrindinių vidurinio pleistoceno moreninių gruntų tipų, suklasifikuotų remiantis ISO 14688-2:2018, kiekio (%) pasiskirstymas Robertsono klasifikacijos schemoje (Robertson, 2016) (TD – pereinamojo tipo elgsenos dilatuojantys gruntai, CD – molio tipo elgsenos dilatuojantys gruntai, SD – smėlio tipo elgsenos dilatuojantys gruntai, TC – pereinamojo tipo elgsenos susitraukiantys gruntai)

Vertinant pagrindinėse keturiose grupėse (TD (3.13(a) pav.), CD (3.13(b) pav.), SD (3.13(c) pav.) ir TC (3.13(d) pav.)) pasiskirsčiusius gruntų fizikinius rodiklius (w , $<0,002\text{ mm}$ ir I_p), nustatyta, kad didžiausias gamtinis drėgnis yra pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančių (TC) gruntų mišiniuose, išskyrus saCIL grunto tipą (jo minėtos fizikinės savybės yra didžiausios molio tipo elgsenos dilatuojančių (CD) gruntų grupėje). Nagrinėjant gamtinio drėgnio ir molio frakcijos kiekio grunte priklausomybę, panašios tendencijos nustatytos visuose gruntų tipuose (saCIL, saCIL-SiL, ir clSa), kaip ir prieš tai nagrinėtoje Robertsono klasifikacijos schemoje (Robertson, 2009). Dar vienas panašumas – molio tipo elgsenos dilatuojančiuose (CD) mišiniuose nėra clSa grunto tipo (šis grunto tipas jau analizuotoje Robertsono klasifikacijoje (Robertson, 2009) molio mišiniuose nefiksuotas).



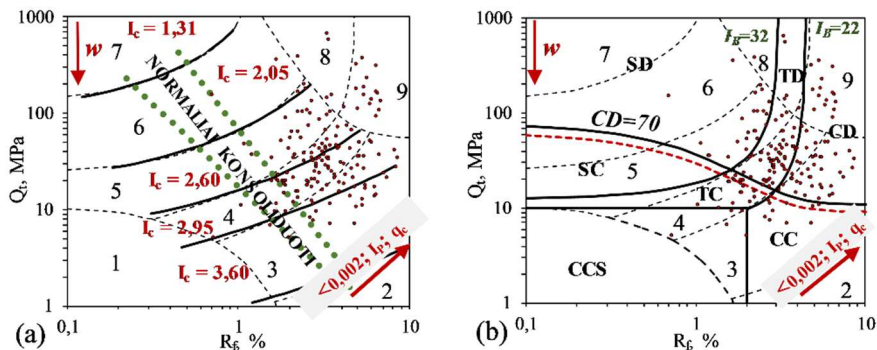
3.13 pav. Fizikinių rodiklių (w , $<0,002\text{ mm}$ ir I_p) verčių pasiskirstymas zonose: (a) TD (pereinamojo tipo elgsenos – dilatuojantys (išsipučiantys)); (b) CD (molio tipo elgsenos – dilatuojantys (išsipučiantys)); (c) SD (smėlio tipo elgsenos – dilatuojantys); (d) TC (pereinamojo tipo elgsenos – susitraukiantys)

Apibendrinant fizikinių rodiklių kitimą abiejose analizuotose klasifikacijose, nustatyta, kad grunta, išsiskiriantys didžiausiu vidutiniu gamtiniu drėgniu, yra molio (nuo molių iki dulkingų molių mišinių, $I_c = 2,95-3,6$) ir pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančių (TC) (Robertson, 2016) grupėse. Grunta, turintys mažiausią molio frakcijos kiekį, yra dulquio (molingas dulquis ir dulkingas molis, $I_c = 2,60-2,95$) (Robertson, 2009) ir pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančių (TC) (Robertson, 2016) grupėse (3.14 pav.).



3.14 pav. Fizikinių rodiklių (w , $<0,002\text{ mm}$ ir I_p) verčių pasiskirstymas skirtingose klasifikacijose: (a) 2009 m. Robertsono klasifikacijos schemoje; (b) 2016 m. Robertsono klasifikacijos schemoje

Išanalizavus atskiras gruntų grupes, buvo tiriama, kaip gruntai pasiskirsto bendrosiose klasifikacijų schemose ir kokios yra gruntų fizikinių ir mechaninių (kūginio stiprio) savybių tendencijos. Išnagrinėjus schemas, jos papildytos fizikinių savybių kitimo kryptimis (3.15 pav.).



3.15 pav. Tyrimų metu nustatytos fizikinių ir mechaninių savybių kitimo kryptys

Nustatyta, kad vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto drėgnis didėja, grafike einant vertikaliai iš viršaus į apačią, o smulkios frakcijos kiekis, kūginis stipris ir plastiškumo rodiklis – einant skersai nuo kairės link dešinės pusės (3.15 pav.). Minėtina, kad, atsižvelgiant į gruntų pasiskirstymo panašumus ir fizikinių savybių išsidėstymą, sugretinti ir Robertsono klasifikacijų schemose naudoti populiariausių gruntų tipai bei analizuojami vidurinio pleistoceno moreninių gruntų tipai, kurių pavadinimai nustatyti laboratorinių tyrimų metu (3.3 lentelė).

3.3 lentelė. Tirtų gruntų tipų skirstymas, remiantis skirtingomis klasifikacijomis

<i>(Robertson, 1990)*</i>	<i>(Robertson, 2009)</i>	<i>(Robertson, 2016)</i>	<i>(LST EN ISO 14688-2:2018)</i>
1		CCS	
2	>3,6	CC	
3	2,95–3,6	CC/CD	saCIL
4	2,60–2,95	TC/TD	saCIL-SiL, clSa
5	2,05–2,6	SC/SD	saCL, clSa
6	1,31–2,05	SD/SC	
7	<1,31	SD	
8		SD/TD	
9		CD	

* Detalesnė informacija pateikiama 1.3 lentelėje.

Apibendrinus gautus duomenis ir atsižvelgiant į gruntų fizikines savybes, nustatytas laboratorijoje, galima teigti, kad vidurinio pleistoceno moreninis

smulkus gruntas dėl savo kompleksinės sudėties grafikuose neturi vienos zonos, kurioje pasiskirstytų. Ši tendencija nustatyta ir kitais tyrimais, nagrinėjusiais Robertsono klasifikacijas (Sodré, 2022). Vis dėlto, remiantis aptartomis gruntų elgsenos klasifikacijomis, galima įvertinti tikrąją grunto mechaninę elgseną, kuri neatspindima klasikiniame pavadinime, suteiktame atsižvelgiant į kitas klasifikavimo schemas, paremtas tik grunto sudėties analize.

3.3. Mechaninių rodiklių priklausomybė nuo fizikinių savybių, atsižvelgiant į kūginio stiprio vertes

3.3.1. Įtaka oedometriniam deformacijos moduliui

Įtaka grunto deformacijai buvo analizuojama vertinant įvairius grunto fizikinių savybių rodiklius, pasitelkus tiesinės regresijos metodą. Regresinės analizės tikslas – sudaryti tinkamiausią modelį ir išreikšti jį lygtimi, nustatant fizikinių savybių rodiklių įtaką grunto deformatyvumui. Tirtos pleistoceno moreninių gruntų deformacinės savybės ir fizikinių savybių rodikliai, kurie reikšmingai lemia nuosėdį ir deformaciją.

Tarp sumodeliuoto E_{Soed} deformacijos modulio ir grunto fizikinių rodiklių (jie aprašyti toliau) bei kūginio stiprio (ribos taip pat minimos toliau) sudaryti daugianarės logistinės regresijos modeliai. Modeliai paremti laboratorijoje oedometriniu bandymo metu nustatytu oedometriniu deformacijos E_{Noed} moduliui.

Modelių sudarymas remiasi CPT rezultatais pagrįstomis grunto klasifikacijomis, atsižvelgiant į mechaninę elgseną (žr. 3.2 skyrių). Analizuotos dvi Robertsono klasifikacinės sistemos: parengta 2009 m. (1.4 pav., 1.4 lentelė) ir 2016 m. modifikuota bei apibendrinta sistema (Robertson, 2016) (1.5 pav., 1.5 lentelė).

Tirti gruntai, atsižvelgiant į grunto elgsenos tipo indeksą, suskirstyti į tris pagrindines grupes: nuo dulkingo smėlio iki smėlingo dulquio (smėlio mišinys), nuo molingo dulquio iki dulkingo molio (dulquio mišinys) ir nuo dulkingo molio iki molio (molio mišinys) (Robertson, 2009). Tada tikrinta rodiklių įtaka modifikuotai Robertsono klasifikacinei sistemai (Robertson, 2016), kurioje gruntai, remiantis dilatacija (D) ir retrakcija (C), atskirti ir pradėtas vartoti *pereinančiųjų mišinių* (T) terminas. Grunto dilataciją ir retrakciją šlyties metu daugiausia lemia perkonsolidavimo santykis (OCR) (1.5.4 poskyris).

Gauti modeliai ir regresinės lygtys dažniausiai pateikiamos atsižvelgiant į vyraujančias kūginio stiprio vertes, kai $q_c = 1,0\text{--}5,0$ MPa, o dulquio mišinių

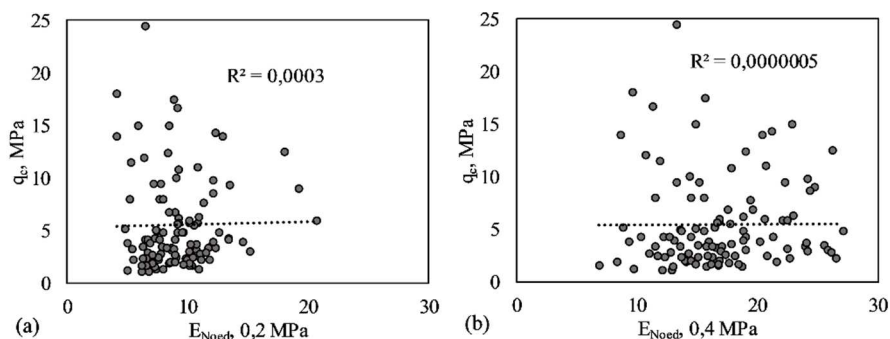
grupė papildomai išskirta $q_c = 5,0\text{--}10,0$ MPa diapazone (esant 0,2 ir 0,4 MPa įtempiams). Nurodyti įtempių dydžiai pasirinkti kaip tinkamiausi šiam modeliui patvirtinti.

Sudarant oedometrinio deformacijos modulio regresinę analizę, pasinaudota sukurta duomenų baze (2.7 skyrius). Iš jos paimti šie fizikinių savybių rodikliai: gamtinis drėgnis, gamtinis tankis, Atterbergo ribos (plastiškumo rodiklis), taip pat molio frakcijos kiekis ir CPT metu fiksuotas ir išmatuotas kūginis stipris. Visais atvejais, atliekant analizę, pateiktos modelyje naudojamų regresorių apibrėžtumo ribos. Galutiniame modelio sudarymo etape naudotų fizikinių ir mechaninių grunto savybių rodiklių mažiausios ir didžiausios vertės pateiktos 3.4 lentelėje. Analizuojant gaunamas koreliacines priklausomybes, remiantis reikšmingumo lygmens reikšme (p) regresoriams, galutinėse koreliacinėse lygtyse plastiškumo rodiklis buvo statistiškai nereikšmingas, todėl jo atsisakyta.

3.4 lentelė. Deformacijos modulio modelyje naudoti fizikinių ir mechaninių savybių rodiklių ekstremumai, nustatyti laboratorinių tyrimų metu

	$E_{Noed}^{0,2}$, MPa	$E_{Noed}^{0,4}$, MPa	q_c , MPa	$<0,002$ mm, %	w, %
Mažiausias	4,1	6,8	1,1	2,1	6,7
Didžiausias	20,7	27,1	24,5	19,2	18,9

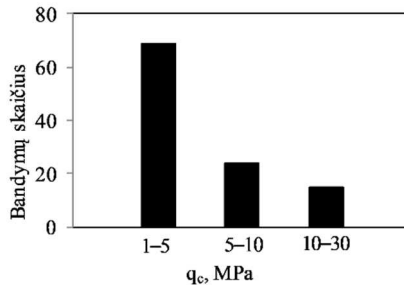
Atliekant analizę, patikrinta, ar kūginis stipris ir laboratorijoje nustatytas oedometrinis deformacijų modulis E_{Noed} turi tiesinę priklausomybę (3.16 pav.).



3.16 pav. Bendroji kūginio stiprio ir nustatyto oedometrinio deformacijų modulio E_{Noed} priklausomybė: (a) esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiumi; (b) esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiumi

Atsižvelgiant į gautus rezultatus, nustatyta, kad tiesioginės tiesinės priklausomybės tarp ieškomų rodiklių nėra. Išskirti determinacijos koeficientai R^2 itin maži (3.16 pav.).

Vyraujantis gruntas, atsižvelgiant į kūginio stiprio vertes, pasiskirstė ganėtinai nedideliame intervale (3.17 pav.).



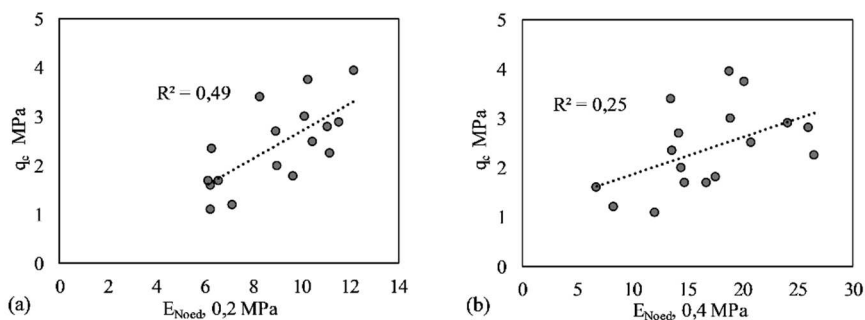
3.17 pav. Visų tirtų gruntų tipų kūginio stiprio pasiskirstymas, atsižvelgiant į bandymų skaičių

Vyraujantis gruntų stiprumas – nuo 1,1 iki 5,0 MPa (69 %). Mažesnė grupė, kur q_c kito 5,0–10,0 MPa intervale, sudarė 24 proc. gruntų. Mažiausią grupę, kurioje q_c buvo didesnis negu 10,0 MPa, – 15 proc. tirtų gruntų.

3.3.2. Molio mišinių ir molio tipo elgsenos deformatyvumo analizė

Robertsono 2009 m. klasifikacijos ir schemos analizė, remiantis fizikinėmis savybėmis (Robertson, 2009)

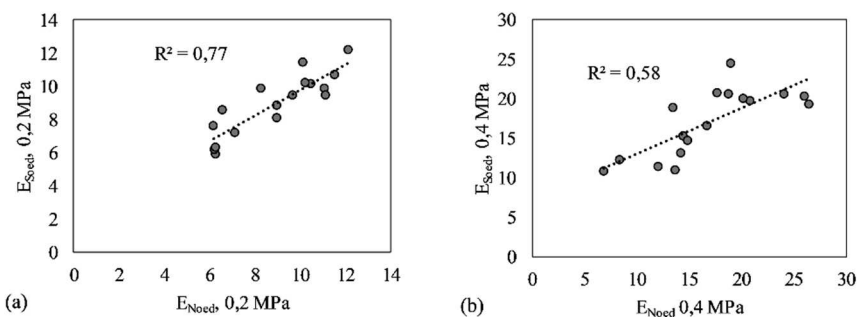
Pirminis tikslas – suskirstyti gruntus į grupes, atsižvelgiant į šių gruntų elgseną. Pirmoji analizuojama grupė – tai molių mišiniai. Šios grupės grunto elgsenos tipo indeksas I_c kinta nuo 2,95 iki 3,60. Išskyrus gruntus pagal jų elgseną į molių grupę, į ją patekę gruntai pasižymėjo sąlygiškai panašiu stiprumu, atsižvelgiant į CPT rezultatus. Kūginis stipris kito intervale nuo 1,1 iki 3,9 MPa. Rezultatai ganėtinai artimi, todėl į detalesnes grupes pagal stiprumą šis gruntas neskirstytinas dėl per mažos duomenų imties ir nustatytų artimų deformacijos modulio verčių. Sudaryti tiesioginiai regresijos modeliai, rodantys priklausomybę nuo E_{Noed} , esant 0,2 ir 0,4 MPa įtempiui ir kūginiam stipriui (3.18 pav.). Nustatytos tiesinės priklausomybės, nors, esant 0,4 MPa apkrovai, determinacijos koeficientas ganėtinai mažas ($R^2 = 0,25$). Tai galima paaiškinti tiriamajame moreniniame grunte esančių rupių grunto dalelių, tokių kaip gargždas ar žvirgždas, įtaka, – gruntas veikiamas jį stipriau spaudžiant. Taigi rezultatai, esant 0,2 MPa apkrovai, išsiskiria patikimesniu determinacijos koeficientu ($R^2 = 0,49$). Minėta įžvalga darytina ir kitų tyrėjų, analizavusių moreninius gruntus. Teigiama, kad tokių stambių dalelių, kaip gargždas ar žvirgždas, įtaka dažnai nulemia rezultatus (Clarke, 2018).



3.18 pav. Molio mišinių grupės gruntų kūginio stiprio ir nustatyto oedometrinio deformacijų modulio (E_{Noed}) priklausomybė: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

Taigi, siekiant pagerinti modelio rezultatus, atlikta daugianarė tiesinė regresinė analizė, įtraukiant fizikinių ir mechaninių savybių rodiklius. Geriausių rezultatų nustatyta modeliuojant molio frakcijos kiekį ($<0,002$ mm), gamtinį drėgnį w ir kūginį stiprį q_c . Gauti rezultatai patikimi abiem atvejais. Esant tiek 0,2 MPa, tiek ir 0,4 MPa apkrovoms, gaunamas stiprus koreliacijos ryšys. Modeliuose R kinta nuo 0,88 iki 0,76. Nors molio kiekis (3.5 lentelė) ir buvo statistiškai nereikšmingas regresorius ($p = 0,086$), jį pašalinus iš modelio, sumažėja determinacijos koeficiento reikšmė (nuo 0,77 iki 0,71), todėl modelyje jis paliekamas.

Toliau pateikiami daugianarės tiesinės regresinės analizės grafikai (3.19 pav.).



3.19 pav. Molio mišinių grupės $I_c = 2,95-3,60$ nustatyto (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 1,1 iki 3,9 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

3.5 lentelė. Molių mišinių grupės $I_c = 2,95-3,60$ regresinės analizės statistiniai rodikliai

	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	<i>p</i> reikšmė	koeficientas	<i>p</i> reikšmė	koeficientas
Konstanta	0,0006	15,14	0,0017	46,16
<0,002 mm	0,086	0,22	–	–
<i>w</i>	0,002	–0,91	0,007	–2,68
<i>q_c</i>	0,009	1,17	0,409	1,16

Atlikus regresinę analizę, sudarytos lygtys (1 ir 2 formulės, 3.15 lentelė), leidžiančios apskaičiuoti oedometrinį deformacijų modulį:

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 15,14 + 0,22 \cdot (<0,002) - 0,91 \cdot w + 1,17 \cdot q_c \quad (1),$$

$$E_{Soed}^{0,4MPa} = 46,16 - 2,68 \cdot w + 1,16 \cdot q_c \quad (2).$$

Didžiausią įtaką lygtyje turi gamtinis drėgnis (kai $E_{Soed}^{0,2}$, *p* reikšmė yra 0,002; kai $E_{Soed}^{0,4}$, *p* reikšmė yra 0,007), mažiau įtakos turi kūginis stipris (kai $E_{Soed}^{0,2}$, *p* reikšmė yra 0,009; kai $E_{Soed}^{0,4}$, *p* reikšmė yra 0,409), o mažiausiai lemia molio kiekis (kai $E_{Soed}^{0,2}$, *p* reikšmė yra 0,086; kai $E_{Soed}^{0,4}$, *p* reikšmė yra minusinė (–)). Įtakos dydis nusakomas lygties koeficientais. Kuo koeficientas didesnis, tuo stipresnė įtaka (Petchko, 2018). Kadangi gruntai, prieš atliekant detalią regresinę analizę, buvo išskirstyti atsižvelgiant į jų elgseną, natūralu, kad molio kiekio frakcija turi mažiausią įtaką modeliui, kai nagrinėjame molio elgsenos gruntus. Esant 0,4 MPa įtempiui, grunto deformacijai vis didesnę įtaką turi rupesnės moreninio grunto dalelės, o molio kiekio įtaka lygčiai modelyje yra nereikšminga. Molio frakcijos kiekis iš modelio pašalinamas, o kūginio stiprio regresorius paliekamas lygtyje, nors jo *p* vertė ir viršija 0,05.

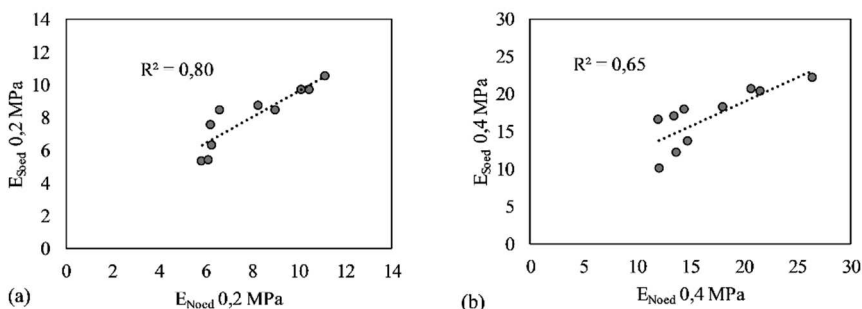
Robertsono 2016 m. klasifikacijos ir schemos analizė, remiantis fizikinėmis savybėmis (Robertson, 2016)

Gruntai perskirstyti, remiantis statinio zondavimo rezultatais, laikantis Robertsono (2016) modifikuotos gruntų klasifikacijos. Atsižvelgiant į gruntų elgseną, atskirti gruntai, kurie šlyties metu išsipučia (dilatuoja), ir gruntai, kurie šlyties metu susitraukia (retrakcija). Taigi analizuojami molio tipo elgsenos grupės gruntai papildomai išskirti į susitraukiančius (CC) ir dilatuojančius (CD). Susitraukiantys moliai (CC) dėl mažos imties ($n = 10$) analizuojami neskaidant jų į skirtingas grupes pagal kūginį stiprį.

Kūginio stiprio vertės kinta nuo 1,1 iki 3,4 MPa. Atsižvelgiant į statistinius rodiklius, kūginio stiprio vertė, esant 0,2 ir 0,4 MPa įtempiui,

neturi didelės statistinės reikšmės (kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra 0,226; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,263), tačiau modelyje paliekama, nes, ją pašalinus, mažėja determinacijos koeficientas (3.6 lentelė, 3.20 pav.).

Atlikus regresinę analizę, sudarytos toliau pateiktos lygtys (3 ir 4 formulės, 3.15 lentelė).



3.20 pav. Susitraukiančio molio tipo elgsenos (CC) grupės nustatyto (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 1,1 iki 3,4 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 31,51 - 0,32 \cdot (<0,002) - 1,47 \cdot w - 1,05 \cdot q_c \quad (3),$$

$$E_{Soed}^{0,4MPa} = 68,87 - 0,48 \cdot (<0,002) - 3,31 \cdot w - 3,00 \cdot q_c \quad (4).$$

Atlikus susitraukiančio molio tipo elgsenos grupės regresinę analizę, nustatytas determinacijos koeficientas R^2 , esant 0,2 ir 0,4 MPa apkrovai, atitinkamai kinta nuo 0,80 iki 0,65. Reikšmingiausių įtaką turi gamtinis drėgnis ir kūginis stipris. Atsižvelgiant į lygtyje nustatytus ir pateiktus koeficientus, molio kiekio įtaka mažesnė.

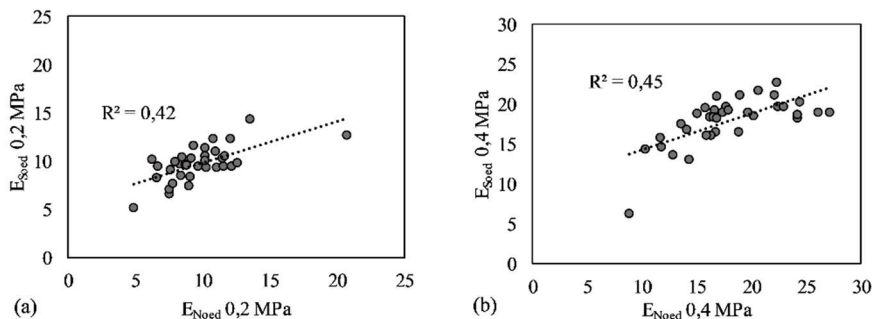
3.6 lentelė. Susitraukiančio molio tipo elgsenos (CC) grupės regresinės analizės statistiniai rodikliai

	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	p reikšmė	koeficientas	p reikšmė	koeficientas
Konstanta	0,0016	31,51	0,0087	68,87
<0,002 mm	0,030	-0,32	0,223	-0,48
w	0,004	-1,47	0,017	-3,31
q_c	0,226	-1,05	0,263	-3,00

Atliekant dilatuojančio molio tipo elgsenos (CD) grupės gruntų analizę, geriausių rezultatų gaunama sudarant grupę, kurioje kūginis stipris kinta nuo

1,7 iki 10,0 MPa (n = 35). Skaidant į mažesnius intervalus, gaunami daug prastesni determinacijos koeficientai. Geriausias modelis, esant 0,2 MPa įtempiui, gaunamas panaudojus kūginio stiprio ir gamtinio drėgnio rodiklius, o esant 0,4 MPa apkrovai, – molio frakcijos kiekį ir gamtinį drėgnį (3.7 lentelė, 3.21 pav.).

Atlikus regresinę analizę, sudarytos toliau pateiktos lygtys (5 ir 6 formulės, 3.15 lentelė).



3.21 pav. Dilatuojančio molio tipo elgsenos (CD) grupės (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 1,7 iki 10,0 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 16,51 + 0,35 \cdot w - 0,75 \cdot q_c \quad (5),$$

$$E_{Soed}^{0,4MPa} = 36,96 - 0,29 \cdot (<0,002) - 1,50 \cdot w \quad (6).$$

3.7 lentelė. Dilatuojančio molio tipo elgsenos (CD) grupės regresinės analizės statistiniai rodikliai

	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	<i>p</i> reikšmė	koeficientas	<i>p</i> reikšmė	koeficientas
Konstanta	$1,21 \cdot 10^{-6}$	16,51	$3,19 \cdot 10^{-11}$	36,96
<0,002 mm	–	–	0,067	–0,29
<i>w</i>	0,080	0,35	$4,01 \cdot 10^{-5}$	–1,50
q_c	0,001	–0,75	–	–

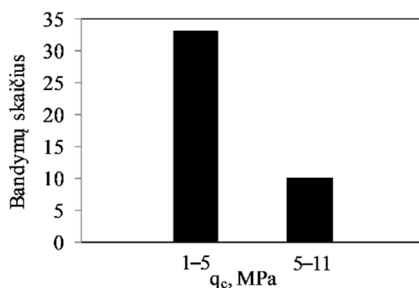
3.3.3. Dulquio mišinių ir pereinamojo tipo elgsenos gruntų deformatyvumo analizė

Robertsono 2009 m. klasifikacijos ir schemos analizė, remiantis fizikinėmis savybėmis (Robertson, 2009)

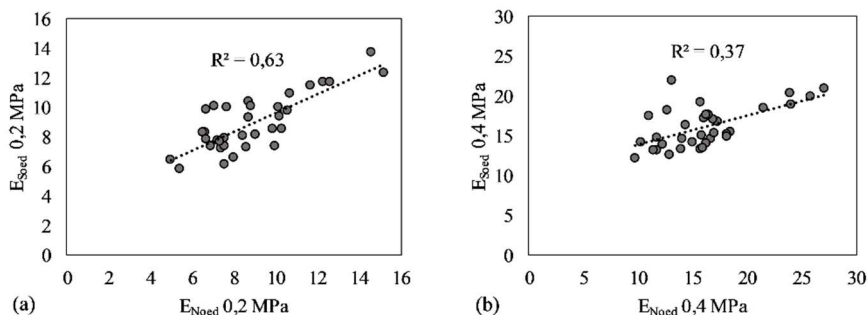
Antroji analizuojama grupė – dulquio mišiniai, kuriuose grunto elgsenos tipo indeksas I_c kinta nuo 2,60 iki 2,95. Išskirsčius gruntuos pagal jų elgseną, į šią

grupę patekę gruntai, skirtingai nuo molių elgsenos grupės, išsiskyrė gana kaičiu kūginiu stipriu. Kūginis stipris kito intervale nuo 1,1 iki 18,0 MPa. Atlikus analizę, neskaidant duomenų pagal kūginį stiprį, nebuvo nustatytų patikimų rezultatų, todėl, atsižvelgiant į vyraujančią kūginį stiprį (3.22 pav.) ir nustatytus didžiausius determinacijos koeficientus (0,63 ir 0,37), analizuota gruntų grupė, kurioje q_c kinta nuo 1,0 iki 5,0 MPa. Sudaryti tiesioginiai regresijos modeliai, rodantys priklausomybę nuo E_{oed} , esant 0,2 ir 0,4 MPa apkrovai, kartu su kūginiu stipriu (3.8 lentelė, 3.23 pav.).

Atlikus regresinę analizę, sudarytos toliau pateikiamos lygtys (7 ir 8 formulės, 3.15 lentelė).



3.22 pav. Dulquio mišinių grupės kūginio stiprio pasiskirstymas, atsižvelgiant į bandymų skaičių



3.23 pav. Dulquio mišinių grupės $I_c = 2,60-2,95$ nustatyto (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 1,0 iki 5,0 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 17,95 - 0,17 \cdot (<0,002) - 0,84 \cdot w + 0,82 \cdot q_c \quad (7),$$

$$E_{Soed}^{0,4MPa} = 23,50 - 0,29 \cdot (<0,002) - 0,78 \cdot w + 1,54 \cdot q_c \quad (8).$$

Didžiausią įtaką lygtyje turi gamtinis drėgnis (kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra $9,28 \cdot 10^{-5}$; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,086), mažesnę įtaką turi kūginis stipris

(kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra 0,001; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,036), o mažiausiai lemia molio kiekis (kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra 0,075; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,196).

3.8 lentelė. Dulquio mišinių grupės $I_c = 2,60-2,95$ regresinės analizės statistiniai rodikliai

	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	p reikšmė	koeficientas	p reikšmė	koeficientas
Konstanta	$2,17 \cdot 10^{-7}$	17,95	0,0008	23,5
<0,002 mm	0,075	-0,17	0,196	-0,29
w	$9,28 \cdot 10^{-5}$	-0,84	0,086	-0,78
q_c	0,01	0,82	0,036	1,54

Robertsono 2016 m. klasifikacijos ir schemos analizė, remiantis fizikinėmis savybėmis (Robertson, 2016)

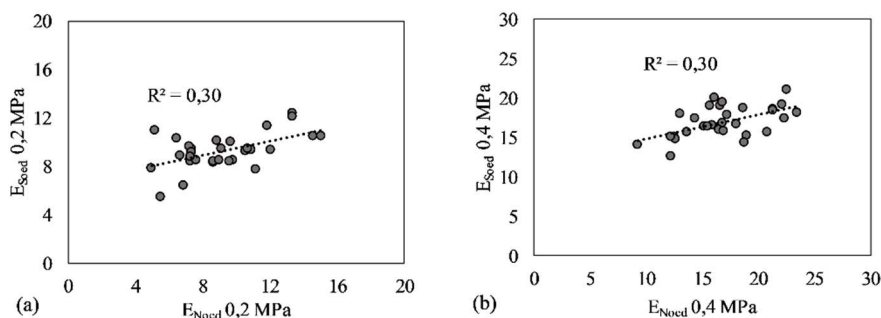
Analizuojami dulquio mišinių grupės gruntai papildomai išskirti į pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančius (TC) ir dilatuojančius (TD) gruntuos. Kaip matyti iš 3.8 pav., susitraukiančių gruntų grupėje labai mažai duomenų, todėl analizuoti tik dilatuojantys gruntai ($n = 30$), kurių kūginis stipris kinta nuo 1,0 iki 5,0 MPa. Remiantis statistiniais rodikliais, nustatyta, kad skirtingų apkrovų intervalus (0,2 ir 0,4 MPa) lemiantys fizikinių savybių rodikliai yra skirtingi. Minėtina, kad nustatyta kūginio stiprumo p reikšmė, esant 0,2 MPa apkrovai, smarkiai viršijo 0,005 (0,501), kaip ir esant 0,4 MPa apkrovai, tik pastaruoju atveju p reikšmė (0,529) buvo per didelė gamtiniam drėgniui (3.9 lentelė, 3.24 pav.).

Atlikus regresinę analizę, sudarytos šios lygtys (9 ir 10 formulės, 3.15 lentelė):

$$E_{SOED}^{0,2MPa} = 11,40 - 0,51 \cdot (<0,002) + 0,27 \cdot w - 0,30 \cdot q_c \quad (9),$$

$$E_{SOED}^{0,4MPa} = 25,39 - 0,68 \cdot (<0,002) + 0,17 \cdot w - 1,48 \cdot q_c \quad (10).$$

Atkreiptinas dėmesys, kad šie kintamieji iš modelio nešalinami, nes juos pašalinus, determinacijos koeficientas sumažėja. Įtaką darančių rodiklių kaita gali būti siejama su bandinio viduje esančia rupios frakcijos įtaka, taip pat su molio frakcijos ir drėgnio santykio kitimu, kuris, kaip matyti iš lygties koeficientų, lemia deformacijų modulio prognozuojamas vertes.



3.24 pav. Dilatuojančio pereinamojo tipo elgsenos grunto (TD) nustatyto (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 1,0 iki 5,0 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

3.9 lentelė. Dilatuojančių pereinamojo tipo elgsenos (TD) gruntų grupės regresinės analizės statistiniai rodikliai

	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	<i>p</i> reikšmė	koeficientas	<i>p</i> reikšmė	koeficientas
Konstanta	0,001	11,4	$4,26 \cdot 10^{-6}$	25,39
<0,002 mm	0,195	-0,51	0,009	-0,68
<i>w</i>	0,005	0,27	0,529	0,17
<i>q_c</i>	0,501	-0,30	0,021	-1,48

Palyginus analizuojamų dulquio mišinių ir pereinamojo tipo elgsenos grupių modelius, atsižvelgiant į Robertsono (2009) ir modifikuotas (2016) klasifikacines sistemas, nustatytas stiprus determinacijos modulio sumažėjimas, kai analizuojama modifikuota sistema. Tikėtina, kad, remiantis Robertsono (2016) modifikacija, į analizę reikėtų įtraukti 1.3.1 poskyryje aptartus veiksniai (gylį, konsolidacijos koeficientą).

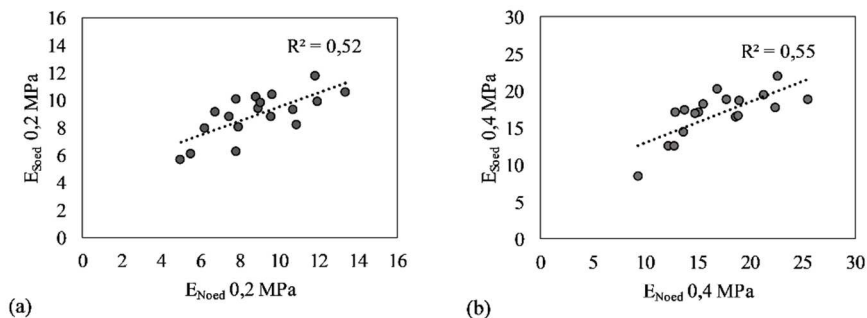
3.3.4. Smėlio mišinių ir smėlio tipo elgsenos gruntų deformatyvumo analizė

Robertsono 2009 m. klasifikacijos ir schemos analizė, remiantis fizikinėmis savybėmis (Robertson, 2009)

Trečioji analizuojama grupė – tai smėlio mišiniai. Šioje grupėje grunto elgsenos indeksas I_c kinta nuo 2,05 iki 2,60. Išskirsčius gruntuos pagal jų elgseną, į šią grupę patekę grunta, skirtingai nuo molių elgsenos grupės, išsiskyrė gana kaičiu kūginiu stiprumu. Kūginis stipris kito intervale nuo 1,1 iki 24,5 MPa. Atlikus analizę, neskaidant gruntų pagal kūginį stiprį, nebuvo nustatytų patikimų rezultatų, todėl, atsižvelgiant į vyraujančią kūginį stiprį (3.22 pav.) ir nustatytus didžiausius determinacijos koeficientus (0,52 ir 0,55),

analizuota gruntų grupė, kai q_c vyrauja nuo 1,0 iki 5,0 MPa. Sudaryti tiesioginiai regresijos modeliai, rodantys priklausomybę nuo E_{oed} , esant 0,2 ir 0,4 MPa įtempiui, kartu su kūginiu stipriu (3.10 lentelė, 3.25 pav.).

Atlikus regresinę analizę, sudarytos toliau pateikiamos lygtys (11 ir 12 formulės, 3.15 lentelė).



3.25 pav. Smėlio mišinių grupės $I_c = 2,05-2,60$ nustatyto (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 1,0 iki 5,0 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 18,24 - 0,55 \cdot (<0,002) - 0,31 \cdot w - 0,35 \cdot q_c \quad (11),$$

$$E_{Soed}^{0,4MPa} = 42,54 - 0,59 \cdot (<0,002) - 1,42 \cdot w - 1,39 \cdot q_c \quad (12).$$

Didžiausią įtaką lygtyje turi smulkiosios frakcijos kiekis (kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra 0,036; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,189), mažesnę įtaką daro drėgnis (kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra 0,440; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,068), o mažiausiai lemia kūginis stipris (kai $E_{Soed}^{0,2}$, p reikšmė yra 0,407; kai $E_{Soed}^{0,4}$, p reikšmė yra 0,083).

3.10 lentelė. Smėlio mišinių grupės $I_c = 2,05-2,60$ regresinės analizės statistiniai rodikliai

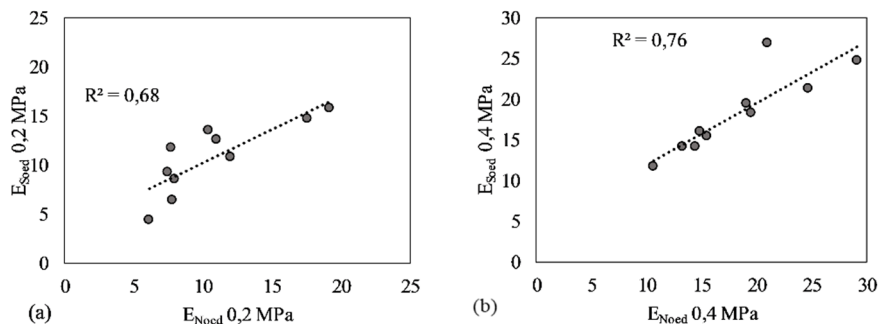
	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	p reikšmė	koeficientas	p reikšmė	koeficientas
Konstanta	0,001	18,24	0,0001	42,54
<0,002 mm	0,036	-0,55	0,189	-0,59
w	0,440	-0,31	0,068	-1,42
q_c	0,407	-0,35	0,083	-1,39

Analizuojant smėlio grupės modelio lygtį, esant 0,2 MPa įtempiui (3.25(a) pav.), galima teigti, kad pagrindinis įtakos veiksnys yra molio

frakcijos kiekis grunte ($<0,002$ mm). Tai vienas iš reikšmingiausių veiksnių, leidžiančių suvokti grunto gniuždymą, esant apkrovai (Malizia et al., 2018). Kaip matyti iš statistinių kriterijų, pateiktų 3.20 lentelėje, p reikšmės daugeliu atvejų, tiek esant 0,2 MPa, tiek 0,4 MPa, viršija 0,05, tačiau, analizuojant oedometrinį deformacijų modulį tiesiogiai su tam tikru rodikliu (pavyzdžiui, su w , molio kiekiu, kūginio stipriu ir pan.) ar su dviem skirtingais rodikliais, gauti daug prastesni determinacijos koeficientai, todėl lygtyse nuspręsta palikti visus regresorius (11 ir 12 formulės, 3.15 lentelė). Didžiausią įtaką, esant 0,2 MPa apkrovai, turi molio frakcija. Esant 0,4 MPa apkrovai, gamtinio drėgnio ir kūginio stiprio įtaka yra panaši, nors molio frakcija smarkiai sumažėjusi.

Robertsono 2016 m. klasifikacijos ir schemos analizė, remiantis fizikinėmis savybėmis (Robertson, 2016)

Analizuojant smėlio tipo elgsenos gruntų grupes, atsižvelgiant į susitraukimą (SC) ir išsipūtimą (SD), nustatyta, kad nė vienas duomenų bazėje esantis gruntas nepriskiriamas susitraukiančiųjų gruntų grupei (SC). Taigi analizuota dilatuojančio smėlio tipo elgsenos (SD) grupė. Nustatyta, kad šią grupę, atsižvelgiant į kūginį stiprį, tikslinga skirstyti į atskiras grupes. Duomenų kiekis nedidelis ($n = 18$), tačiau, analizuojant apibendrintai, gaunami prasti rezultatai. Geriausiai aptariama gruntų grupė išsiskiria, kai kūginis stipris kinta nuo 5,0 iki 10,0 MPa. Minėtina, kad visa dilatuojančio smėlio tipo elgsenos grupė pasižymi išskirtinai didesnėmis kūginio stiprio vertėmis, negu lyginant smėlio grupę pagal elgsenos rodiklį I_c . Atlikus analizuojamos grupės modeliavimą (3.26 pav.), nustatyti gana patikimi determinacijos koeficientai (0,68 ir 0,76) ir sudarytos lygtys (13 ir 14 formulės, 3.15 lentelė).



3.26 pav. Dilatuojančio smėlio tipo elgsenos (SD) grupės nustatyto (E_{Noed}) ir sumodeliuoto (E_{Soed}) oedometrinio deformacijų modulio priklausomybė, kai kūginis stipris kinta nuo 5,0 iki 10,0 MPa: (a) modelis, esant $\sigma = 0,2$ MPa įtempiui; (b) modelis, esant $\sigma = 0,4$ MPa įtempiui

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 23,42 - 1,80 \cdot w + 0,63 \cdot q_c \quad (13),$$

$$E_{Soed}^{0,2MPa} = 19,94 - 1,41 \cdot (<0,002) + 1,60 \cdot q_c \quad (14).$$

Kaip matyti iš statistinių kriterijų (3.11 lentelė), esant 0,2 MPa įtempiui, molio frakcijos įtakos nėra. Esant 0,4 MPa įtempiui, nėra gamtinio drėgnio įtakos.

3.11 lentelė. Dilatuojančio smėlio tipo elgsenos (SD) grupės regresinės analizės statistiniai rodikliai, kai q_c kinta nuo 5,0 iki 10,0 MPa

	$(E_{Soed}^{0,2})$		$(E_{Soed}^{0,4})$	
	<i>p</i> reikšmė	koeficientas	<i>p</i> reikšmė	koeficientas
Konstanta	0,010	23,42	0,025	19,94
<0,002 mm	–	–	0,009	–1,41
<i>w</i>	0,008	–1,80	–	–
q_c	0,297	0,63	0,038	1,60

Apibendrinant visų modelių regresinius (3.15 lentelė) modelius, galima teigti, kad didžiausią įtaką oedometriniam deformacijų moduliui turi gamtinis drėgnis. Ši tendencija nustatyta ir kaimyninėje Lenkijoje, kur taip pat analizuoti moreniniai gruntai (Pezowicz & Choma-Moryl, 2015; Ayizula & Liu, 2023).

3.3.5. Vidurinio pleistoceno moreninio grunto efektyviojo vidinės trinties kampo regresijos modelio sudarymas

Vertinant ir koreliuojant efektyviusius grunto stiprumo rodiklius – sankibą c' ir vidinės trinties kampą φ' (5 priedas), gautus laboratorinio tyrimo metu, įprastai pirmaisia dėmesys kreipiamas į grunto fizikines savybes. Taip teigiama ir daugelio tyrėjų darbuose (Sorensen & Okkels, 2013; Pezowicz & Choma-Moryl, 2015; Vondráčková et al., 2016; Kim et al., 2018; Saravanan et al., 2020; Reece, 2021).

Stiprumo parametrai, nustatyti triašio slėgio aparatu, kartu su pagrindiniais fizikiniais ir mechaniniais rodikliais, gautais laboratoriniais tyrimų metodais ir lauko tyrimų metu (grunto kūginis stipris), pateikti apibendrintoje 3.12 lentelėje. Mechaninių rodiklių kitimas iš dalies atitinka fizikinių rodiklių kismą ir priklausomybes nuo gamtinio drėgnio, tankio, poringumo koeficiento, plastiškumo rodiklio ir smulkiosios frakcijos kiekio bei bandinio dydžio įtakos.

3.12 lentelė. Ekstremumai ir tiriamojo grunto laboratorinių tyrimų metu nustatytos fizikinės ir mechaninės savybės (vidurkiai)

	c' , kPa	φ' , °	w , %	ρ , Mg/m ³	e , vnt. d.	w_L , vnt. d.	I_P , vnt. d.	$< 0,002$ mm, %	q_c , MPa
Mažiausias	7,3	18,9	5,5	2,25	0,23	0,19	0,08	8,79	4,1
Didžiausias	48,6	30,2	11,3	2,33	0,34	0,26	0,12	14,23	8,2
Vidurkis	21,5	25,1	9,7	2,30	0,30	0,22	0,10	10,67	6,8

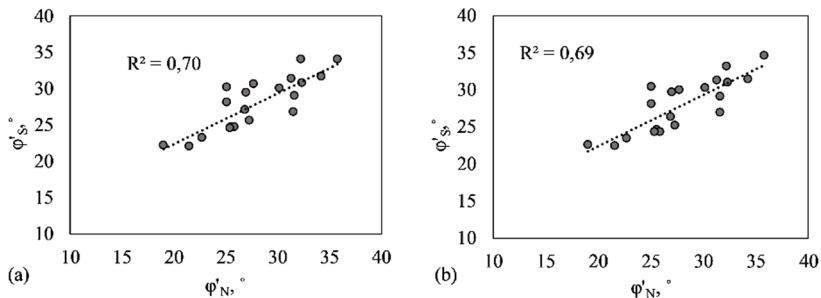
Siekiant nustatyti fizikinių savybių ir q_c įtaką efektyviajam vidinės trinties kampui, atlikta duomenų analizė, sudarant regresinės analizės modelius. Parengta vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų fizikinių ir mechaninių rodiklių suvestinė lentelė (3.12 lentelė), kuri vėliau papildyta archyviniais (GEOLIS) tokio pat amžiaus moreninio grunto duomenimis (5 priedas). Nagrinėjamų modelių galiojimo ribos pateiktos 3.13 lentelėje.

3.13 lentelė. Vidinės trinties kampo modelyje naudoti laboratorinių tyrimų metu nustatyti fizikinių ir mechaninių savybių rodiklių ekstremumai

	φ'_N , °	q_c , MPa	$< 0,002$ mm, %	w , %	I_P , vnt.d
Mažiausias	18,9	2,0	8,79	5,5	0,08
Didžiausias	35,7	8,3	25,5	17,0	0,13

Sudarytas regresinės analizės modelis (3.27(b) pav.) (ir jo lygtis) (15 formulė, 3.15 lentelė), atsižvelgiant į tiriamojo grunto fizikines savybes, kūginį stiprį, kartu su nustatytu efektyviuoju vidinės trinties kampu (φ'_N) (3.13 lentelė), gautu triašio slėgio bandymo metu.

Regresijos lygtis (3.15 lentelė, 15 formulė) nurodo kiekvieno atskiro regresoriaus (w , $< 0,002$ mm, q_c) įtakos dydį priklausomajam kintamajam – efektyviajam vidinės trinties kampui (φ'_s), kuris sumodeliuotas remiantis laboratorinių tyrimų metu (φ'_N) nustatyta verte.



3.27 pav. Vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų nustatytos (φ'_N) ir sumodeliuotos (φ'_s) vidinės trinties kampo priklausomybė: (a) modelis, turintis I_P , (b) modelis, neturintis I_P

$$\varphi' = 34,10 - 1,15 \cdot q_c + 0,36 \cdot (<0,002) - 0,49 \cdot w \quad (15).$$

Iš gautų rezultatų matyti, kad mažiausią poveikį, atsižvelgiant į p vertę (3.14 lentelė), modeliui daro plastiškumo rodiklis (I_p). Panaikinus šį regresorių, determinacijos koeficientas nuo 0,70 (3.27(a) pav.) pakinta tik iki 0,69 (3.27(b) pav.).

3.14 lentelė. Plastiškumo rodiklio (I_p) įtaka modeliui, remiantis p reikšmės dydžiu (kairėje – esant I_p regresoriui, dešinėje – I_p regresoriui nesant)

	<i>Koeficientai</i>	<i>p reikšmė</i>	<i>Koeficientai</i>	<i>p reikšmė</i>
Konstanta	31,622	2,39E-05	34,097	2,34E-08
I_p	0,301	0,543	–	–
q_c	–1,184	0,001	–1,151	0,001
<0,002	0,323	0,030	0,3584	0,008
w	–0,473	0,146	–0,492	0,122

Daugelis tyrėjų teigia priešingai, kad tarp I_p ir vidinės trinties kampo yra glaudi koreliacija (Santamarina et al., 2003; Sorensen et al., 2013; Gunnar et al., 2022), tačiau tyrimais pagrįsta, kad ši koreliacija glaudi, kai plastiškumo rodiklis siekia 10–50 proc. (Štuhec et al., 2019). Tirtu vidurinio pleistoceno morenos I_p rodiklis yra 8,0–13,0 proc. intervale (3.12 lentelė), todėl koreliacija tarp šių dviejų minėtų rodiklių yra silpna, palyginti su rodikliais, nurodytais mokslinėje literatūroje.

Siekiant įvertinti kitų regresorių įtaką, būtina atsižvelgti į rodiklių kitimo intervalus (kiekvieno rodiklio kitimo intervalas skirtingas) ir jų skaitines reikšmes (3.12 ir 3.13 lentelės).

3.15 lentelė. Regresinės analizės korelaciinių lygčių suvestinė

	<i>Grupė</i>	<i>Formulė</i>	<i>Nr.</i>	<i>Taikymas q_c, ribose (MPa)</i>
Molio mišiniai ir molio tipo elgsenos	$I_c =$	$E_{Soed}^{0,2MPa} = 15,14 + 0,22 \cdot (<0,002) - 0,91 \cdot w + 1,17 \cdot q_c$	1	1,0–
	2,95–			4,0
	3,60	$E_{Soed}^{0,4MPa} = 46,16 - 2,68 \cdot w + 1,16 \cdot q_c$	2	
	CC	$E_{Soed}^{0,2MPa} = 31,51 - 0,32 \cdot (<0,002) - 1,47 \cdot w - 1,05 \cdot q_c$	3	1,0–
		$E_{Soed}^{0,4MPa} = 68,87 - 0,48 \cdot (<0,002) - 3,31 \cdot w - 3,00 \cdot q_c$	4	3,5
CD	$E_{Soed}^{0,2MPa} = 16,51 + 0,35 \cdot w - 0,75 \cdot q_c$	5		

<i>Grupė</i>	<i>Formulė</i>	<i>Nr.</i>	<i>Taiky- mas q_c, ribose (MPa)</i>	
	$E_{\text{Soed}}^{0,4\text{MPa}} = 36,96 - 0,29 \cdot (<0,002) - 1,50 \cdot w$	6	1,7– 10,0	
Dulkio mišiniai ir pereinanamojo tipo elgsenos	$I_c =$ 2,60– 2,95	$E_{\text{Soed}}^{0,2\text{MPa}} = 17,95 - 0,17 \cdot (<0,002) - 0,84 \cdot w + 0,82 \cdot q_c$	7 1,0– 5,0	
		$E_{\text{Soed}}^{0,4\text{MPa}} = 23,50 - 0,29 \cdot (<0,002) - 0,78 \cdot w + 1,54 \cdot q_c$	8	
	<i>TD</i>	$E_{\text{Soed}}^{0,2\text{MPa}} = 11,40 - 0,51 \cdot (<0,002) + 0,27 \cdot w - 0,30 \cdot q_c$	9	1,0– 5,0
		$E_{\text{Soed}}^{0,4\text{MPa}} = 25,39 - 0,68 \cdot (<0,002) + 0,17 \cdot w - 1,48 \cdot q_c$	10	
Smėlio mišiniai ir smėlio tipo elgsenos	$I_c =$ 2,05– 2,60	$E_{\text{Soed}}^{0,2\text{MPa}} = 18,24 - 0,55 \cdot (<0,002) - 0,31 \cdot w - 0,35 \cdot q_c$	11 1,0– 5,0	
		$E_{\text{Soed}}^{0,4\text{MPa}} = 42,54 - 0,59 \cdot (<0,002) - 1,42 \cdot w - 1,39 \cdot q_c$	12	
	<i>SD</i>	$E_{\text{Soed}}^{0,2\text{MPa}} = 23,42 - 1,80 \cdot w + 0,63 \cdot q_c$	13	5,0– 10,0
		$E_{\text{Soed}}^{0,4\text{MPa}} = 19,94 - 1,41 \cdot (<0,002) + 1,60 \cdot q_c$	14	
Visiems more- ninio smulkaus grunto tipams	$\phi' = 34,10 - 1,15 \cdot q_c + 0,36 \cdot (<0,002) - 0,49 \cdot w$	15	1,0– 10,0	

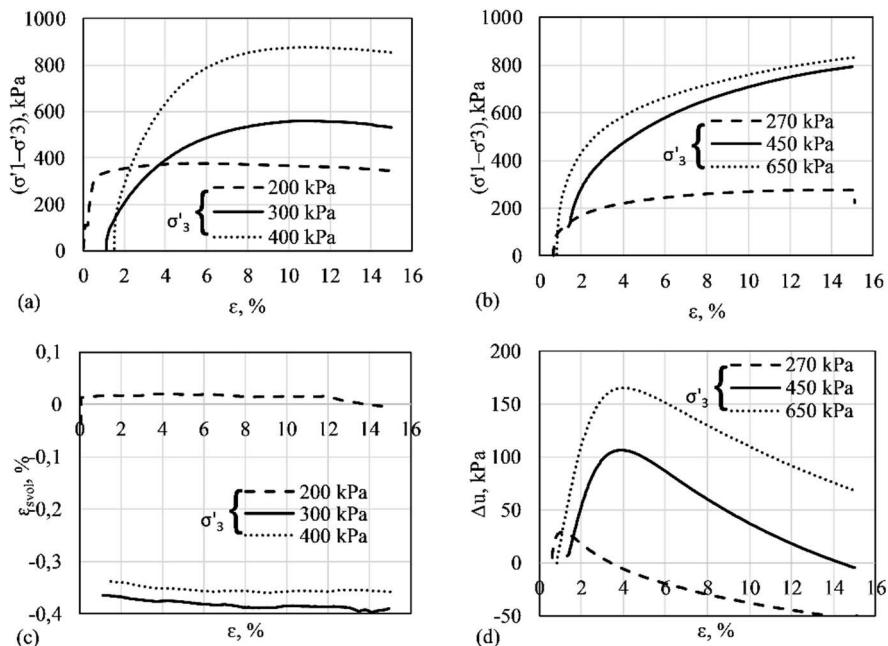
3.4. Vidurinio pleistoceno moreninio grunto skirtingų bandymo sąlygų rezultatų įvertinimas triašio slėgio bandymo metu

3.4.1. Įtempių ir deformacijų priklausomybė

Įtempių ir deformacijų santykis nagrinėjamas gautus tiriamojo grunto laboratorinių tyrimų rezultatus suskirsčius į drenuotas ir nedrenuotas bandymo atlikimo sąlygas ir rezultatus lyginant tarpusavyje.

Iš tirtų vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų bandinių įtempių ir deformacijų grafikų (3.28 pav.) matyti, kad nėra išsiskiriančios pikinės vertės. Tiriant šiuos gruntuos, aptinkama tampriai plastinė deformacija, kai, didėjant įtempiams, pastebimas nedidelis deviatoriaus padidėjimas

(angl. *hardening*), būdingas tankėjancio (stiprėjancio) grunto (angl. *strain hardening*) modeliui. Tokius modelius apibrėžia ir kiti tyrėjai (Al-Shayea & Mohib, 2012; Xiang et al., 2020).



3.28 pav. Įtempių ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) ir ašinių deformacijų (ϵ) priklausomybė, esant skirtingiems celės slėgiams (σ'_3): (a) SCD bandymo sąlygomis; (b) SCU bandymo sąlygomis; (c) tūrinės (ϵ_{svol}) ir ašinių deformacijų priklausomybė nuo SCD; (d) porinio slėgio pokyčio (Δu) ir ašinių deformacijų priklausomybė nuo SCU

Įtempių ir deformacijų ryšys atspindi ir grunto perkonsolidavimo santykio reikšmes. Išanalizavus OCR reikšmes, apskaičiuotas iš laboratorinių tyrimų rezultatų (3.16 lentelė), gautų atlikus gruntų kompresinio spūdumo (oedometrinio) ir triašio slėgio bandymus, tiriamąjį gruntą galima priskirti prie mažai perkonsoliduotų gruntų, kurių perkonsolidavimo santykis, remiantis oedometrinio deformacijos moduliū E_{oed} ir tampros moduliū E_{50} , atitinkančiu 50 proc. didžiausio šlyties stiprumo, vyrauja tarp $OCR = 2,1 - 3,9$. Daugelyje tyrimų pabrėžiama, kad normaliai konsoliduotų ir mažai perkonsoliduotų ($LOC = OCR \geq 2$ iki 4(6)) gruntų kreivėse nematyti aiškaus pikinio taško (Priest et al., 2019), o labai perkonsoliduoto ($HOC = OCR \geq 4(6)$) smulkaus grunto įtempių ir deformacijų kreivės turi aiškius pikus (deviatorius pakyla, kol suyra bandinys ir pasiekiamas pikinio stiprumo). Visa tai rodo trapias deformacijas. Ši tendencija atsispindi kai kurių tyrėjų analizuotuose gruntuose (Asaoka et al., 1998; Gu et al., 2016; Wang et al., 2020; Tong et al., 2022).

3.16 lentelė. Vidutinės vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto perkonsolidavimo santykio reikšmės

<i>Tyrimų sąlygos</i>	<i>OCR (CPT)¹</i>	<i>OCR (E_{oed})²</i>	<i>OCR (E₅₀)²</i>
UUU	14,7	3,1	2,1
SCU	12,7	2,7	2,7
SCD	11,7	3,9	2,1
UCD	9,6	–	2,1
UCU	9,6	2,5	3,1

¹ Žr.: Lunne et al., 1997; Urbaitis et al., 2016.

² Žr.: Jozsa, 2013; Józsa, 2016; Paniagua et al., 2016; Wdowska et al., 2023.

Taigi vyraujančios OCR vertės bei įtempių ir deformacijų kreivės formos nurodo, kad tiriamasis gruntas gali būti priskiriamas prie mažai perkonsoliduotų gruntų, o vertinant grunto elgseną ir mechaninius rodiklius, būtina atsižvelgti į perkonsolidavimo santykį. OCR vertės, išskaičiuotos iš CPT duomenų (3.16 lentelė), pervertina grunto perkonsolidavimą ir gruntą apibūdina kaip labai perkonsoliduotą ($OCR > 4$), tačiau tai neatspindi tikrosios jo būsenos.

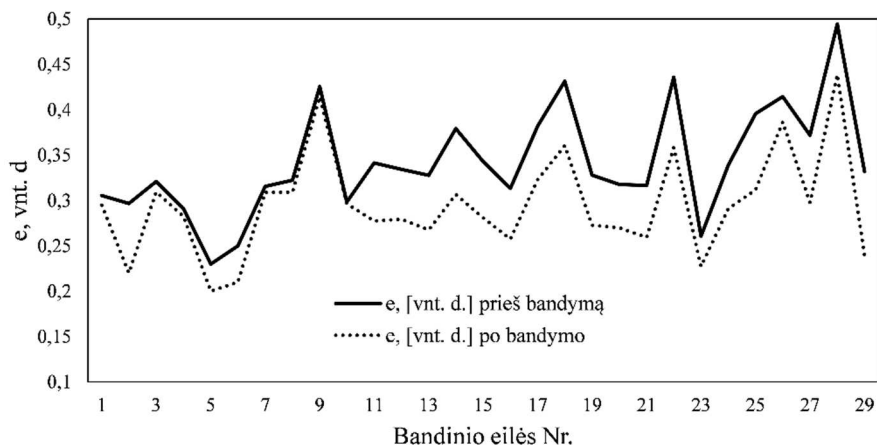
Vykdam bandymą, esant drenuotoms sąlygoms (3.28(a, c) pav., 6 priedas) ir mažai perkonsoliduotiems gruntams, matyti plastiškas grunto suirimas ir grunto retrakcija (rodo neigiama tūrinė deformacija) (3.28(c) pav.). Tai reiškia, kad teigiamos tūrio deformacijos iš pradinių sąlygų nepasiekiami. Tyrėjai pabrėžia, kad grunto susitraukimas kirpimo metu būdingas normaliai ir mažai perkonsoliduotiems gruntams (Asaoka et al., 1998). Kitais atvejais, minimais mokslinėje literatūroje, nagrinėjant labai perkonsoliduotus gruntus, galima įžiūrėti aiškų pikinį stiprumą, o gruntas dilatuoja (Yao et al., 2009; Kimoto et al., 2013; Gu et al., 2016; Gao et al., 2017; Wang et al., 2020; Tong et al., 2022). Minėtos tendencijos tiriamuose bandiniuose nenustatyta.

Tūrinės deformacijos pokyčiai kirpimo metu leidžia suvokti mėginio būklę. Pradinėse apkrovos stadijose dominuoja ašinis suspaudimas, bandinio tūris mažėja. Tam tikru momentu ašinis įtempis turėtų tapti pakankamai didelis, kad sukeltų mikroįtrūkimų, kurie atitinkamai padidintų tūrį (Orilogi et al., 2020).

Disertacijoje pristatomo mokslinio tyrimo metu, atliekant konsoliduotus drenuotus bandymus (3.28(a, c) pav.), stiprumas nuolat augo, didėjant ašinei deformacijai, o tūrio susitraukimas pakilo padidėjus įtempiui ir nebekito. Tirtame grunte jo tūris kirpimo metu nesmarkiai (~4–5 %) sumažėjo (gruntas susitraukė) dėl pokonsolidacinės būsenos (3.28(c) pav.).

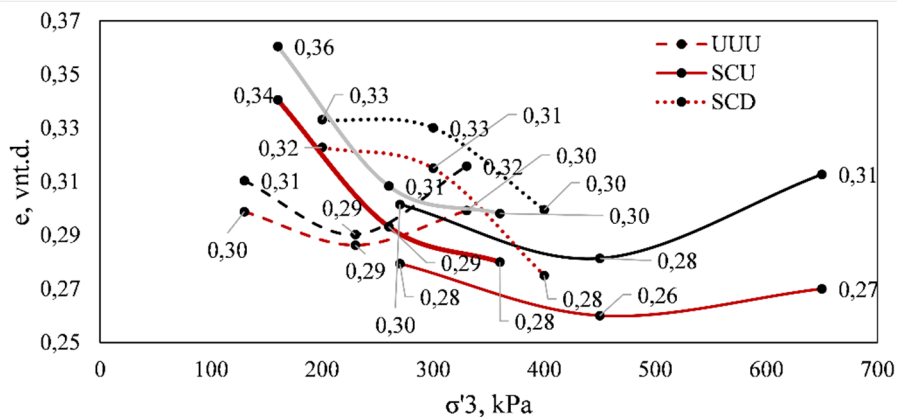
Kaip tūrio pokyčių rodiklis apibrėžiamas ir poringumo koeficiento pokytis, lemiamas tūrinės deformacijos. Iš pateiktų grafikų (3.29 pav.) matyti, kad kiekvieno bandinio poringumas sumažėjo pasikeitus jo tūriui. Šis

poringumo koeficiento pokyčio dėsningumas minimas ir kitų tyrėjų (Bignonnet et al., 2016; Egert et al., 2018).



3.29 pav. Poringumo koeficiento e pokytis prieš atliekant triašio slėgio bandymą ir bandymą atlikus

Mokslinėje literatūroje (Egert et al., 2018) nurodoma, kad poringumo pokytis priklauso ir nuo taikomo celės slėgio. Kuo didesnis slėgis, tuo gruntas patiria didesnę poringumo pokytį nuo pradinės reikšmės. Šis dėsningumas aiškiai matyti tyrimo metu gautuose rezultatuose (3.30 pav.), kai, esant mažesniems celės slėgiams (apie 100–300 kPa), poringumas pakinta apie 0,1–0,2 vnt. d. Esant didesniems slėgiams (apie 400–700 kPa), e kinta nuo 0,2 iki 0,4 vnt. d.



3.30 pav. Poringumo koeficiento e kitimas nuo pradinės reikšmės, esant skirtingiems taikomiems celės slėgiams (σ'_3) ir skirtingoms sąlygoms (UUU, SCU, SCD, UCU) triašio bandymo metu (juodos ir pilkos linijos – rezultatai prieš atliekant bandymą, raudonos linijos – rezultatai bandymą atlikus)

Kaip jau minėta, tiriamasis gruntas mažai perkonsoliduotas. Remiantis gautais duomenimis, galima teigti, kad šiam gruntui būdingas retrakcijos procesas. Taigi svarbu vadovautis perkonsolidavimo tipui taikomomis teorijomis ir dėsningumais, aptartais kitų tyrėjų darbuose (Hattab & Hicher, 2004; Khan et al., 2011; Gao et al., 2017).

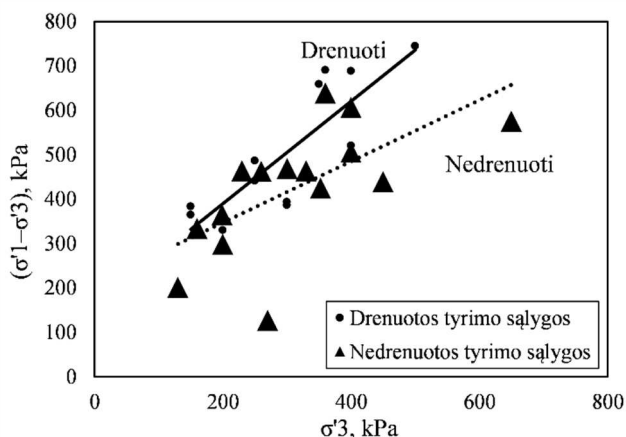
Atliekant nedrenuotų sąlygų bandymus (3.28(b, d) pav., 6 priedas), matyti, kad, poriniam slėgiui pasiekus pikinę stiprumo vertę, jis pradeda mažėti, o gruntas tuo metu ima irti. Tai reiškia, kad perteklinis porinis slėgis mažėja (3.28(d) pav.). Porinio slėgio kreivės kitimas rodo efektyviojo įtempio pokytį, kai, didėjant poriniam slėgiui, efektyvieji įtempiai mažėja ir tai lemia grunto stiprumą. Šis porinio slėgio kitimo dėsningumas pastebimas tiek mažai perkonsoliduotų, tiek labai perkonsoliduotų bandinių atvejais. OCR didėjant, porinis slėgis kirpimo metu linkęs sugeneruoti vis mažesnes vertes, palyginti su mažai perkonsoliduotais gruntais, ir pradeda generuoti didesnes neigiamas vertes. Tai turi didelę įtaką efektyviesiems įtempiams, juos didinant. Apie tai kalbama ir kitų tyrėjų darbuose (Jiang et al., 2011; Gu et al., 2016; Han et al., 2021). Taigi porinio slėgio priklausomybė nuo OCR reiškia, kad mažai perkonsoliduotuose gruntuose efektyvusis įtempis yra mažesnis, todėl šie gruntai labiau deformuojasi ir yra mažiau atsparūs šlyčiai.

Porinio slėgio dydžiui labai svarbi grunto granulimetrinė sudėtis. Perteklinio porinio slėgio tendencijos (neigiamos ir teigiamos) kirpimo (iki 15 proc. deformacijos) metu priklauso nuo grunte esančio molio frakcijos (<0,002 mm) kiekio ir taikomo celės slėgio. Tirtuose gruntuose, esant 10 proc. molio frakcijos dalelių, porinis slėgis didėja (generuojasi teigiamas porinis slėgis) vykstant kirpimui (iki grunto suirimo), tada pradeda generotis neigiamas porinis slėgis (taikant sąlygiškai mažesnes celės slėgio vertes (iki 500 kPa)). Esant didelėms vertėms (>500 kPa), susigeneravęs teigiamas porinis slėgis nemažėja arba mažėja nedaug (iki 15 proc. deformacijos). Šis dėsningumas patvirtintas ir kitų tyrėjų darbuose (Altuhafi et al., 2010; Araei et al., 2012)

Apibendrinant analizuojamo grunto (3.28(d) pav., 6 priedas) porinio slėgio grafikus, galima teigti, kad generuojasi teigiamas porinis slėgis. Tai apibūdina mažai perkonsoliduoto grunto dėsningumą. Taigi porinio slėgio priklausomybė nuo OCR reiškia, kad mažai perkonsoliduotuose gruntuose yra mažesnis efektyvusis įtempis, todėl šie vidurinio pleistoceno moreniniai smulkūs gruntai, palyginti su labai perkonsoliduotais gruntais, yra spūdesni ir mažiau atsparūs šlyčiai. Įvertinus grunto granulimetrinę sudėtį atliekant SCU bandymą (5 priedas), kai molio kiekis siekia 14,1 proc., galima išvelgti apribojančio slėgio įtaką. Taikant 650 kPa slėgį, porinis slėgis skaidosi lėčiau ir neigiamos vertės (iki 15 proc. deformacijos) nepasiekia.

3.4.2. Drenuotų ir nedrenuotų tyrimo sąlygų apibendrinimas

Bandymų rezultatai, įskaitant deviatoriaus įtempį, tūrinį bandinio pokytį ir perteklinio porinio slėgio pokytį, buvo lyginami su ašine deformacija (3.28 pav., 6 priedas). Įprastai, taikant panašų celės slėgį, pikinis deviatoriaus įtempis, esant drenuotoms sąlygoms, yra didesnis negu esant nedrenuotoms sąlygoms, o tai lemia porinio slėgio susidarymas. Šis teiginys patvirtintas ir kitų tyrėjų darbuose (Cetin & Gökoğlu, 2013; Nguyen et al., 2018). Tikrasis porinis slėgis taip pat priklauso nuo pradinės vertės iki įtempių pasikeitimo bandinyje.



3.31 pav. Drenuotų ir nedrenuotų sąlygų pikinio deviatorinio įtempio ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) palyginimas su taikomu celės slėgiu (σ'_3)

Minėtas dėsningumas matyti iš tiriamo grunto apibendrintų rezultatų (3.31 pav., 3.17 lentelė). Pikinio deviatoriaus vertės, esant drenuotoms sąlygoms, tirtuose gruntuose yra apie 100 kPa didesnės, palyginti su vertėmis, esant nedrenuotoms sąlygoms. Tai lemia ir galutinius grunto stipruminių savybių rodiklių dydžius. Drenuotų ir nedrenuotų sąlygų įtaką analizuojant atskirai, būtina atsižvelgti į fizikines tiriamojo grunto savybes ir taikomus slėgius.

3.17 lentelė. Bendrieji duomenys, esant drenuotoms ir nedrenuotoms triašio slėgio tyrimų sąlygoms

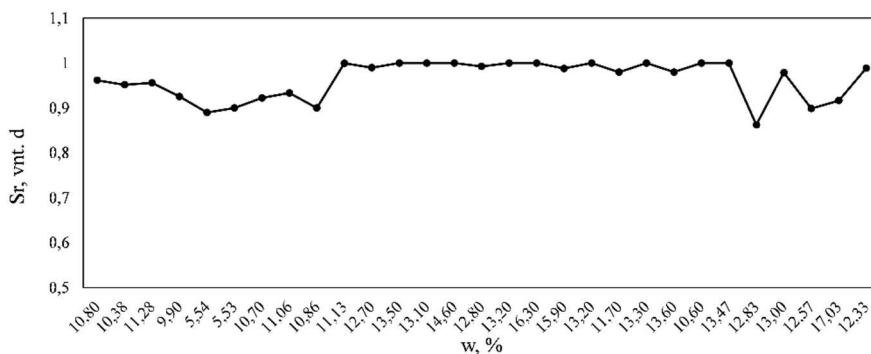
Tyrimų sąlygos	c' , kPa	φ' , °	Celės slėgio intervalas, kPa	
			200–300 ($\sigma'_1 - \sigma'_3$), kPa	400–500 ($\sigma'_1 - \sigma'_3$), kPa
SCU	7,30	26,90	126,95	575,44
SCD	11,69	27,78	252,43	671,54
UCU	30,69	21,97	375,35	583,74

UCD	36,21	23,21	464,15	674,82
-----	-------	-------	--------	--------

Tiriamasis gruntas yra panašių fizikinių savybių (5 priedas), tačiau, atliekant bandymus su skirtingomis apkrovomis ir taikant nevienodus tyrimo metodus, įtempių ir deformacijų grafikai atskleidžia skirtingą grunto elgseną.

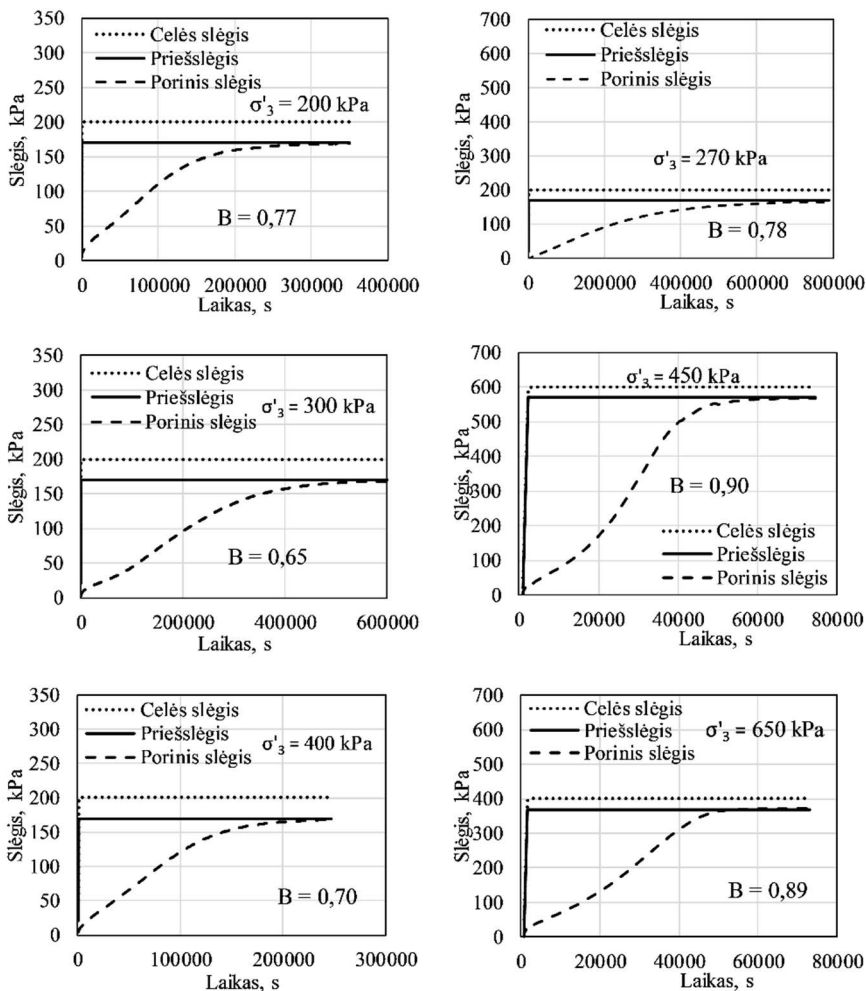
3.4.3. Soties laipsnio įtaka rezultatams

Remiantis apskaičiuotu (3.32 pav.) soties laipsniu S_r (išskyrus kai kurias nukrypstančias reikšmes), tiriamasis gruntas priskiriamas prie prisotintų gruntų (kai $S_r \sim 1$) (Morvan et al., 2016).



3.32 pav. Tirtų bandinių gamtinio drėgčio (w) ir soties laipsnio (S_r) palyginimas

Gruntą sudaro mineralinė dalis bei vanduo ir oras (dujos). Atliekant triašio slėgio tyrimą, bandiniai papildomai sotinami, kad jų porose esantį orą pakeistų vanduo. Apskaičiuotos soties laipsnio S_r ir nustatytos Skemptono rodiklio (B) vertės skiriasi. Skemptono rodiklis yra mažesnis negu grunto soties laipsnis (Vernay et al., 2019). Disertacijoje pristatomo tyrimo metu B vertės svyravo nuo 0,70 iki 0,98 proc. Minėtina, kad B vertė gali priklausyti ir nuo taikomo soties metodo (Yilmaz et al., 2016), tačiau šiame darbe kita metodika nebuvo taikoma.



3.33 pav. Soties metu gautos Skemptono rodiklio (B) vertės: (a) prisotintame konsoliduotame ($\sigma'_3 = 270, 450, 650$ kPa) nedrenuotame bandinyje; (b) prisotintame konsoliduotame ($\sigma'_3 = 200, 300, 400$ kPa) drenuotame bandinyje

Papildomas sotinimas būtinas, nes taip priartėjama prie grunto porinio slėgio, esančio natūraliomis lauko sąlygomis, ir grunto konsolidacijos atkūrimo nuo nuosavo svorio (geostatinių sąlygų). Vis dėlto tyrimo metu, atliekant tiriamo grunto triašio slėgio bandymus, ne visi bandiniai buvo sotinami prieš juos konsoliduojant. Taip siekta įvertinti neprisotintų bandymo sąlygų įtaką gaunamiems rodikliams.

Įvertinus vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto rezultatus, galima teigti, kad neprisotinto grunto mechaniniai rodikliai, tokie kaip vidinės trinties kampas ir sankiba, yra didesni negu sotinto grunto rodikliai, esant tam

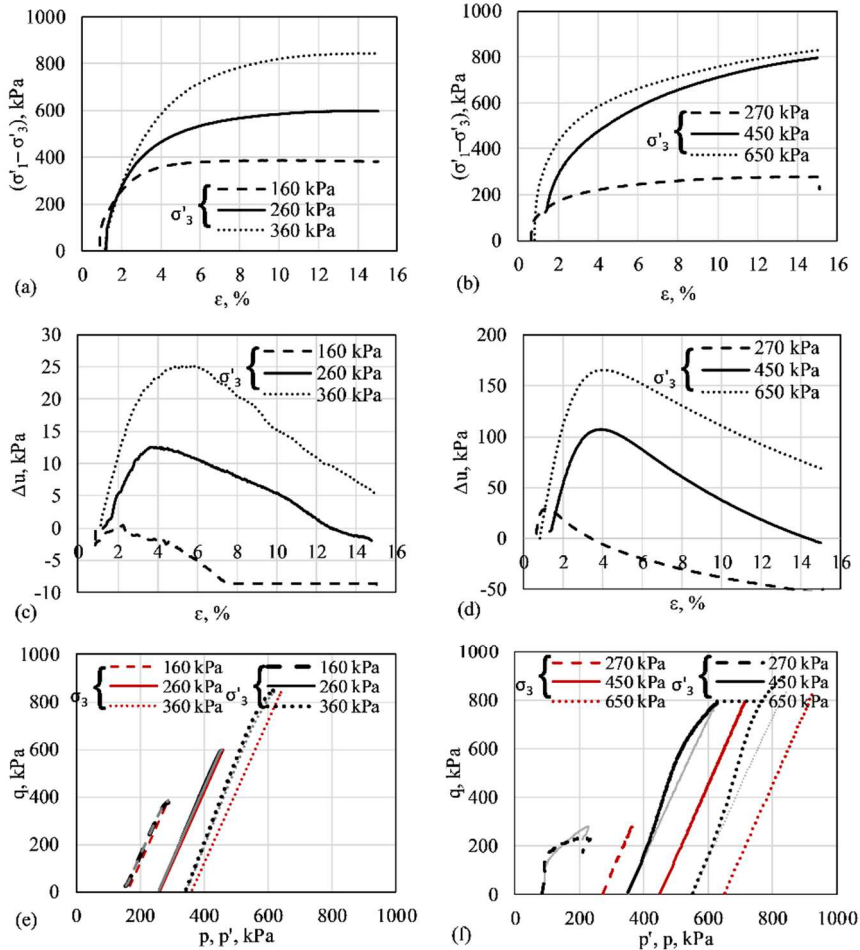
pačiam ar labai panašiam celės slėgiui (3.18 lentelė). Tokie rezultatai nurodomi ir mokslinėje literatūroje (Sun et al., 2010; Perez, 2021; Baltodano-Goulding & Brenes-Garcia, 2022; Li et al., 2022).

3.18 lentelė. Prisotintų ir neprisotintų tyrimų sąlygomis tirtų bandinių rezultatų suvestinė

<i>Tyrimų sąlygos</i>	<i>c', kPa</i>	<i>φ', °</i>	<i>Celės slėgis, kPa</i>	<i>Deviatoriaūs įtempis, esant pikinėms vertėms, kPa</i>
SCU	7,30	26,90	270	126,95
			450	438,93
			650	575,44
SCD	18,62	27,32	200	329,89
			300	393,27
			400	688,66
SCD	7,75	25,82	200	224,22
			300	386,13
			400	598,29
SCD	8,70	30,20	300	280,64
			400	520,34
			500	744,79
UCD	32,82	23,71	150	364,66
			250	486,79
			360	690,74
UCU	12,60	25,40	160	333,97
			260	462,32
			360	638,91

Bendroji visų bandymų tendencija – nesotinti bandiniai yra standesnio būvio, todėl jie patiria didesnius ribinius deviatorinius įtempius, esant pikinėms reikšmėms, taikant panašius slėgių intervalus (įtempiai skiriasi nuo 150 kPa iki 200 kPa) (3.18 lentelė).

Kitas esminis prisotintų ir neprisotintų triašio tyrimo sąlygų skirtumas susijęs su įtempių keliais, esant nedrenuotų tyrimų sąlygoms (3.34(e, f) pav.). Atliekant neprisotinto grunto tyrimą, susigeneruoja mažesnis porinis slėgis, o tai lemia mažesnę porinio slėgio skirtumą efektyviųjų įtempių keliuose (3.34(c, e) pav.). Minėta tendencija pastebima ir kitų tyrėjų atliktuose tyrimuose (Casini et al., 2013). Akcentuojama, kad esminis rodiklis, vertinant stačių šlaitų stabilumą drėgnio pokyčių metu, yra soties laipsnis.



3.34 pav. Įtempių ($\sigma_1 - \sigma_3$) ir ašinių deformacijų (ε) priklausomybės, esant skirtingoms celės slėgiams (σ_3): (a) UCU tyrimų sąlygos; (b) SCU tyrimų sąlygos; porinio slėgio (Δu) pokyčio ir ašinių deformacijų priklausomybė: (c) UCU tyrimų sąlygos; (d) SCU tyrimų sąlygos; efektyvieji (σ_3') ir suminiai (σ_3) įtempių keliai $q - p, p'$ koordinacių sistemoje: (e) UCU tyrimų sąlygos; (f) SCU tyrimų sąlygos

Įvertinus rezultatus, galima teigti, kad jeigu tyrimo metu bandinys nebus prisotintas, bus pervertintos jo stipruminės savybės ir nekorektiškai įvertintas porinis slėgis bei efektyvieji įtempiai. Smulkių gruntų sotinimas yra ilgas procesas, tačiau jo negalima atsisakyti taupant laiką.

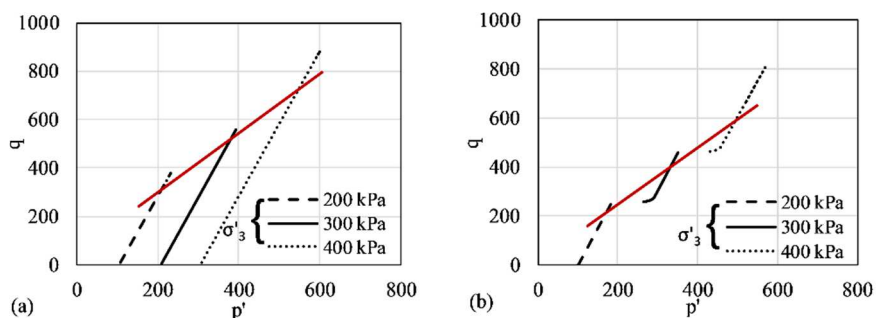
3.4.4. Įtempių kelių analizė

Drenuotų gruntų įtempių kelių analizė

Drenuotų tyrimo sąlygų bandymų metu grunte esančiam poriniam slėgiui buvo leidžiama drenuotis. Tai reiškia, kad porinis slėgis kirpimo metu (šis

slėgis vadinamas *pertekliniu poriniu slėgiu*) nuolat mažėjo iki nulio, o kirpimo metu tik grunto kietosios dalelės (skeletas) išlaikė visą taikomų apkrovų padidėjimą. Minėtina, kad šiuos procesus aptaria ir kiti tyrėjai (Cetin & Gökoğlu, 2013; Nguyen et al., 2018).

Tirtuose bandiniuose pertekliniam poriniam slėgiui išsisklaidžius, vandeniui drenuojantis iš grunto, vidutinis efektyvusis įtempis kiekvieno apkrovos žingsnio pabaigoje tapo lygus vidutiniam bendrajam įtempimui. Taigi tiek efektyviųjų įtempių, tiek suminių įtempių vystymosi keliai yra vienodi. Drenuotų efektyviųjų įtempių kelių kryptį galima palyginti su suminių įtempių keliais (3.35 pav.). Tai pabrėžiama ir kituose tyrimuose (Mendoza et al., 2015; Chen et al., 2018). Įtempių keliai (3.35 pav.) pateikti $q-p'$ koordinatinių sistemoje (angl. *cambridge*).



3.35 pav. Efektyviųjų įtempių keliai ir grunto pikinio stiprumo kreivė (raudona), esant skirtingiems celės slėgiams (σ'_3), $q-p'$ koordinatinių sistemoje: (a) esant CTT triašio slėgio SCD tyrimų sąlygoms; (b) esant MTT triašio slėgio SCD tyrimų sąlygoms

Žvelgiant į įtempių kelius, matyti, kokie gali būti šoninis ir ašinis įtempiai, kol gruntas pasiekia pikinį stiprumą (raudona linija) (3.35 pav.). Tiriamo grunto drenuotų sąlygų įtempių keliai išsiskiria tolygiai didėjančiu deviatoriniu ir ašiniu efektyviaisiais įtempimais. Įtempių kelias, pasiekęs suirimo liniją, nepradeda mažėti ir ją kerta, todėl tirtiems gruntams būdingas tankėjančio (stiprėjančio) grunto (angl. *strain hardening*) modelis. Šis modelis išskiriamas ir kitų tyrėjų darbuose (Mendoza et al., 2015).

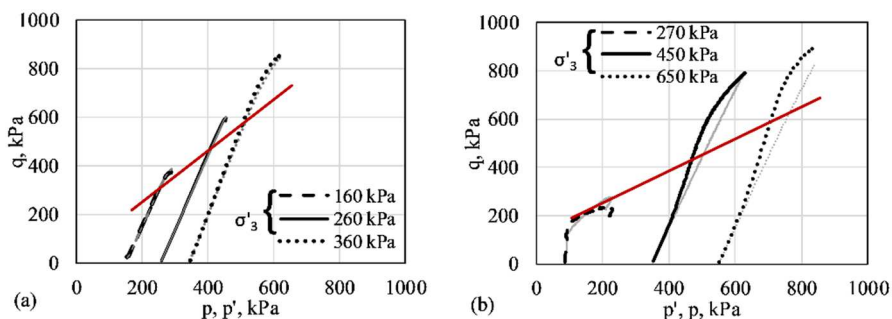
Įtempių kelio kryptis nusako grunto būseną, kai krypstama į kairę arba į dešinę nuo išvesto iš vertikalios ašies įtempio kelio 0,0 koordinatėje. Remiantis įtempių kelio kryptimis į dešinę, galima teigti, kad tiriamasis moreninis smulkus gruntas mažai perkonsoliduotas (kai $OCR \leq 4$) (žr. 1.5.1 skyrių, 1.7 ir 1.10 pav.). Tai nurodoma ir kitų tyrėjų darbuose (Gu et al., 2016; Gao et al., 2017).

Nedrenuotų grunto tyrimo sąlygų analizė

Esant nedrenuoto bandymo sąlygoms, porinis slėgis pradeda augti didėjant deviatoriniam įtempiui. Kaip matyti iš pateiktų grafikų (3.36 pav., 6 priedas), augant poriniam slėgiui, didėja ir skirtumas tarp efektyviųjų ir suminių įtempių. Vis dėlto tirtuose neprisotintuose (3.36(a) pav.) bandiniuose porinis slėgis yra sąlygiškai nedidelis (nuo 9 iki 63 kPa, esant skirtingiems celės slėgiams), todėl aiškaus efektyviojo įtempio kelio polinkio kampo nėra.

Analizuojant prisotinto grunto (3.36(b) pav.) atvejį, galima matyti efektyviojo kelio polinkį. Dėl sotes čia susidaro didesnis porinis vandens slėgis, kuris gali apibrėžti grunto stiprumo kitimą. Ten, kur kirpimo metu buvo susigeneravęs teigiamas vandens slėgis porose, efektyviojo įtempio kreivė pakrypo į kairę. Tai matyti ir vertinant įtempių ir deformacijų bei porinio slėgio kitimo grafikus (3.37(b, d) pav.). Bandiniui pasiekus kritinę būseną, porinis slėgis pradeda mažėti, o tai reiškia, kad perteklinis porinis slėgis turi tendenciją mažėti.

Nedrenuotų tyrimų metu efektyviųjų įtempių kelių forma taip pat atitinka mokslinėje literatūroje pateikiamas mažai perkonsoliduotų gruntų tipines kreives (žr. 1.5.1 skyrių; 1.7 ir 1.10 pav.).



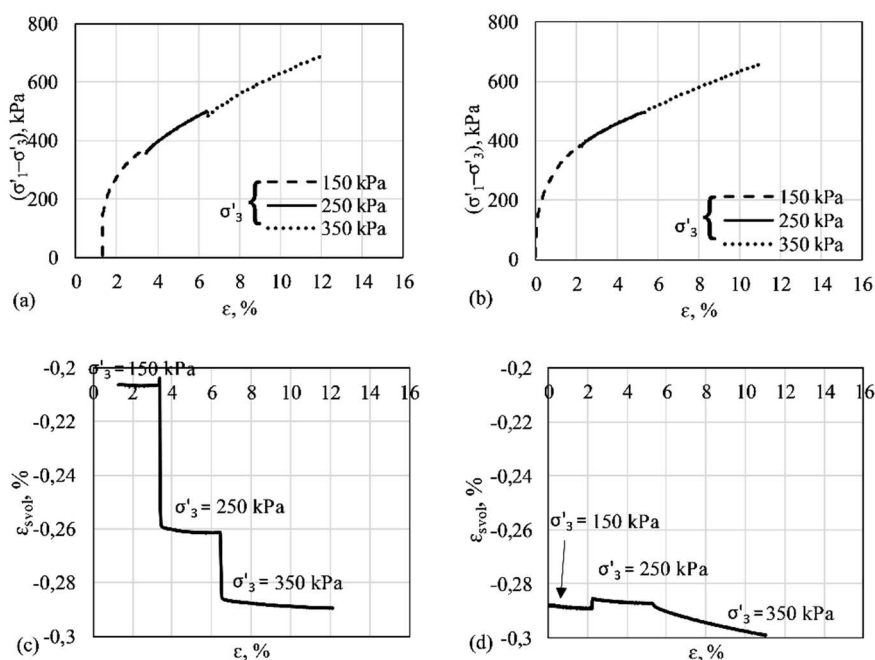
3.36 pav. Efektyviųjų įtempių keliai ir grunto pikinio stiprumo kreivė (raudona), esant skirtingiems celės slėgiams (σ'_3), $q-p'$ koordinačių sistemoje: (a) esant UCU tyrimų sąlygoms; (b) esant SCU tyrimų sąlygoms

Nagrinėjant SCU įtempio kelią, esant 270 kPa celės slėgiui, matyti, kad gruntas, pasiekęs kritinę suirimo būseną, pradeda mažėti ir kritinės ribos nekerta. Tai rodo, kad porinis slėgis pasiekė neigiamą reikšmę prieš pat grunto suirimą.

Įvertinus įtempių kelių sklidimą, galima patvirtinti, kad sotinimas yra būtinas procesas. Vidurinio pleistoceno moreninis smulkus gruntas mažai perkonsoliduotas, todėl būtina į tai atsižvelgti, vertinant grunto mechaninius rodiklius.

3.4.5. Bandinio dydžio įtaka

Analizuoti ir lyginti du triašio bandymai (3.37 pav.), esant drenuotoms tyrimo sąlygoms, atlikti su skirtingo skersmens ir aukščio santykio bandiniais (skersmuo / aukštis – D50/H100 (3.37(a, c) pav.) ir D100/H200 (3.37(b, d) pav.), kurių fizikinės savybės (5 priedas) yra panašios, todėl galima vertinti bandinio dydžio įtaką. Įvertinus gautus rezultatus (3.37 pav., 3.19 lentelė), galima teigti, kad kirpimo metu mažesni bandiniai išsiskyrė statėse kritinio suirimo kreive (ang. *critical state line*, CSL) (3.37(a) pav.) ir didesniais pikiniais deviatoriaus įtempiais (3.19 lentelė). Tai atspindi mažesnę susispaudžiamumą ir didesnę vidinės trinties kampą mažesnės skalės bandiniuose (vertė skiriasi apie 3°) (3.19 lentelė). Minėti rezultatai aprašomi ir mokslinėje literatūroje (Omar & Sadrekarimi, 2015; Gebresamuel et al., 2023).



3.37 pav. Įtempių ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) ir ašinių deformacijų (ϵ) priklausomybė, esant skirtingiems celės slėgiams (σ'_3), skirtingo skersmens bandiniuose: (a) 50/100 skersmens UCD bandinio tyrimų sąlygomis; (b) 100/200 skersmens UCD bandinio tyrimų sąlygomis. Tūrinių (ϵ_{svolt}) ir ašinių deformacijų priklausomybė, esant skirtingiems celės slėgiams (σ'_3), skirtingo skersmens bandiniuose: (c) 50/100 skersmens UCD bandinio tyrimų sąlygomis; (d) 100/200 skersmens UCD bandinio tyrimų sąlygomis

Atkreiptinas dėmesys, kad didesni bandiniai išsiskyrė mažesne tūrine deformacija (3.37(d) pav.) šlyties metu, palyginti su mažesniais bandiniais

(3.37(c) pav.). Vis dėlto didesni bandiniai patyrė didesnę tūrinę deformaciją bandinio konsolidacijos metu, prieš pradėdant kirpimą. Tai lėmė, kad didesniame bandinyje grunto dalelės turėjo daugiau erdvės laisvesniam grunto dalelių persigrupavimui, sąlygojusiam didesnę susispaudžiamumą (šlyties metu jo nebepastebime). Toks dalelių persigrupavimo dėsningumas didesnės skalės bandiniuose aprašomas ir mokslinėje literatūroje (Omar & Sadrekarimi, 2015).

3.19 lentelė. Laboratorinių tyrimų metu gauti skirtingų bandinių dydžių mechaniniai rodikliai ir sąlygos

<i>Tyrimų sąlygos</i>	<i>D/H</i>	<i>c', kPa</i>	<i>φ', °</i>	<i>Celės slėgis, kPa</i>	<i>Deviatoriaus įtempis, esant pikinėms vertėms, kPa</i>
UCD	0,5/1	32,82	25,82	150	364,66
				250	486,79
				350	690,74
UCD	1/2	39,60	22,70	150	343,31
				250	441,51
				350	658,90

Mažesnių deviatoriaus įtempių, identifikuotų didesniuose bandiniuose, gali atsirasti dėl padidėjusios deformacijos, kurią sukelia ilgesnių šlyties plokštumų susidarymas per visą tiriamą bandinį (Omar & Sadrekarimi, 2015). Naudojant mažesnių skersmenų bandinių rezultatus, gali atsirasti klaidingai pervertintas grunto stiprumas. Tai nurodoma ir kituose tyrimuose (Skuodis et al., 2019; Gebresamuel et al., 2023). Gaunami rezultatai rodo didelę bandinio dydžio įtaką grunto elgsenai vertinti. Didesnių dydžių bandinių tyrimai geriau atspindi gruntų šlyties ir deformacijos elgseną lauko sąlygomis.

3.4.6. Daugiapakopio ir vienpakopio triašio bandymų įtaka

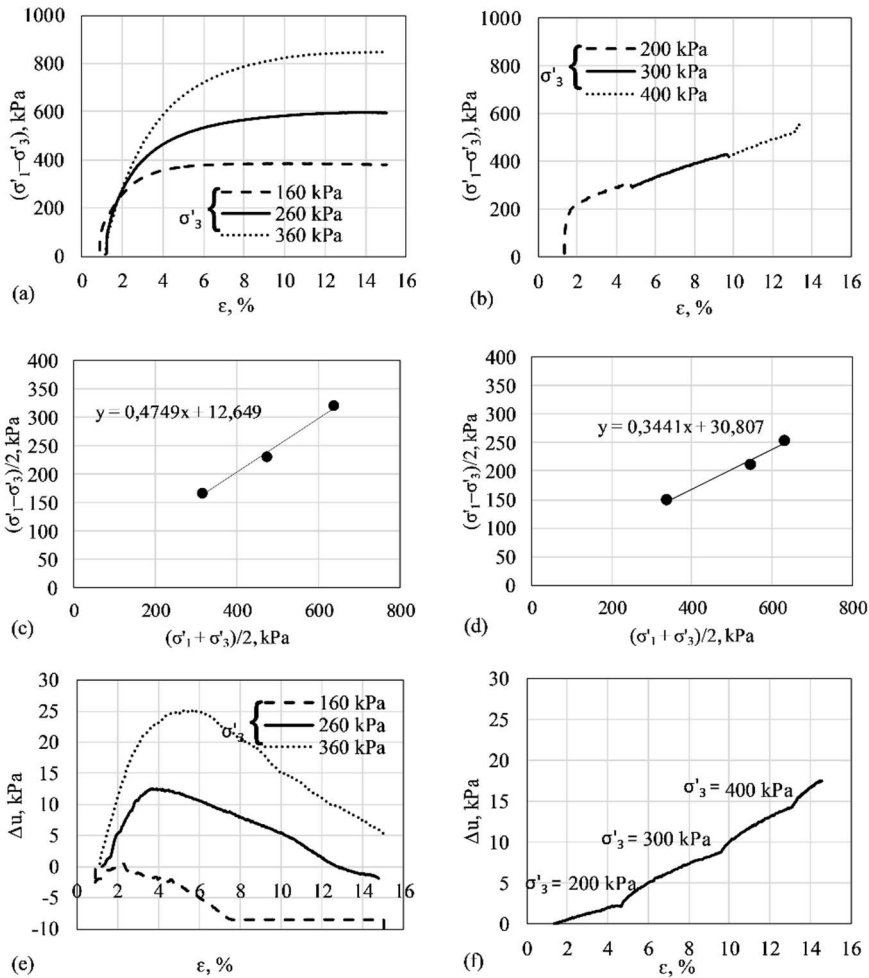
Palyginus vienodo mastelio ir panašių fizikinių rodiklių vienpakopio ir daugiapakopio bandymų metu gautus stiprumo savybių rezultatus (3.20 lentelė, 3.38 pav., 6 priedas), matyti, kad gruntų sankibos c' reikšmės, gautos atliekant MST testą, yra didesnės maždaug 30 kPa (~15 %).

3.20 lentelė. Apibendrinti vienpakopio ir daugiapakopio triašio slėgio bandymo metu gauti mechaniniai rodikliai

<i>Bandymo metodika</i>	<i>D/H</i>	<i>Tyrimų sąlygos</i>	<i>c', kPa</i>	<i>φ', °</i>
CTT	0,5/1	SCU	7,30	26,90
		SCD	18,62	27,32
		UCU	12,60	25,40
		SCD	8,23*	28,60*
MTT	0,5/1	UCU	30,87	18,98
		UCD	32,82	25,82
	1/2	UCU	48,60	21,53
		UCD	39,60	22,70

* Bandiniams būdingos skirtingos fizikinės savybės.

Vis dėlto skirtumas tarp vidutinių vidinės trinties kampo verčių yra atvirkščias arba sąlygiškai nedidelis. Panašūs skirtumai tarp CTT ir MST testų rezultatų nustatyti ir kitų tyrėjų darbuose (Shahin & Cargeeg, 2011).



3.38 pav. UCU bandinių įtempių ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) ir ašinių deformacijų (ϵ) priklausomybė, esant skirtingiems celės slėgiams (σ'_3): (a) vienpakopiame bandyme; (b) daugiapakopiame bandyme. Pikinės stipruminės vertės: (c) vienpakopiame bandyme; (d) daugiapakopiame bandyme. Porinio slėgio pokyčio (Δu) ir ašinių deformacijų priklausomybė: (e) vienpakopiame bandyme; (f) daugiapakopiame bandyme

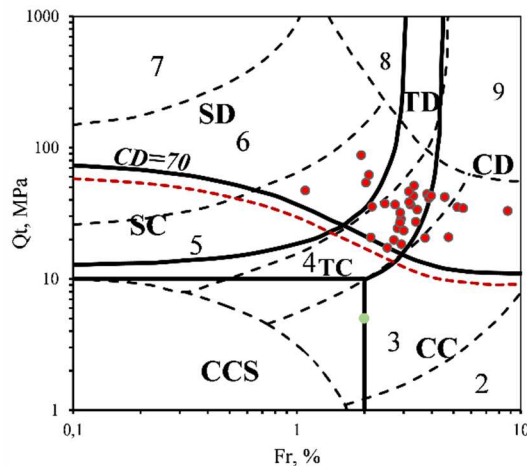
Šių didesnių verčių priežastys yra įtempiai ir deformacijos, veikiančios mėginių ankstesniuose apkrovos etapuose (Choi et al., 2018). Naudojant MTT metodiką, reikėtų įvesti korekcijas. Atliekant disertacijoje pristatomą tyrimą, korekcijos nebuvo įvestos, jos neanalizuotos.

3.4.7. Pereinamojo tipo elgsenos grunto įvertinimas ir pritaikymas

Panašios kilmės natūralūs gruntai įprastai turi panašią sudėtį, jų formavimosi proceso pobūdis dažnai lemia dalelių dydžio pasiskirstymą ir skirtumus. Taip susidaro daugybė gruntų, kurie iš esmės panašaus amžiaus nuosėdose pereina iš vieno grunto tipo į kitą. Minėti skirtumai įprastai neleidžia apibūdinti natūralaus grunto kaip vieno tipo (žvyras, smėlis, dulkis ar molis).

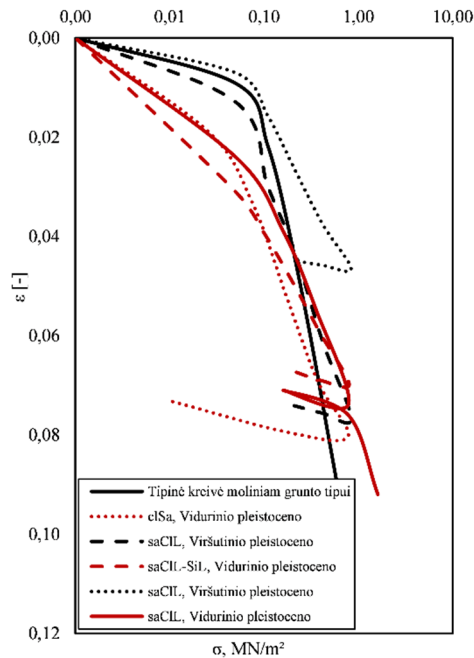
Atsižvelgus į moreninio grunto kompleksinę sudėtį ir į bandinių (tirtų triašio slėgio bandymais) išsidėstymą atnaujintoje Robertsono schemoje (2016) (3.39 pav.), įvertinta pereinamųjų TD ir TC gruntų elgsena. Pateiktoje schemoje matyti, kad ne visi tirti gruntai patenka į TD/TC zoną, tačiau yra arti jos ribų.

Pereinamaisiais gruntais dažniausiai įvardijami glacialiniai gruntai (Altuhafi et al., 2010), taip pat gruntai, esantys ant ribinės „linijos“ tarp smėlinių ir molinių gruntų. Vertinant pereinamuosius gruntus, pastebima tiek smėlinių, tiek molinių gruntų savybių ir dėsningumų (Todisco & Coop, 2019). Pagrindiniu pereinamųjų gruntų skiriamuoju bruožu laikoma tai, kad šie gruntai neturi tipinių unikalių normalios konsolidacijos kreivės ($v\text{-log}\sigma$) formų, skirtingai atsižvelgiant į grunto tipą, matyti tik nuožulnus kreivės pokrypis. Tai aprašoma ir kitų tyrėjų darbuose (Elkamhawy et al., 2021).



3.39 pav. Gruntų, tirtų triašio slėgio bandymais, išsidėstymas Robertsono (2016) schemoje, paremtoje gruntų dilatacija (D) ir retrakcija (C) šlyties metu, įvedus *pereinamojo tipo elgsenos gruntu* (T) terminą (Robertson, 2016): CCS (molio tipo elgsenos – susitraukiantys – jautrūs), CC (molio tipo elgsenos – dilatuojantys (išsipučiantys)), CD (molio tipo elgsenos – susitraukiantys (retrakcija)), TC (pereinamojo tipo elgsenos – susitraukiantys (retrakcija)), TD (pereinamojo tipo elgsenos – dilatuojantys (išsipučiantys)), SC (smėlio tipo elgsenos – susitraukiantys (retrakcija)), SD (smėlio tipo elgsenos – dilatuojantys (išsipučiantys))

Analizuojant tiriamų gruntų kompresinio spūdumo (oedometrinio) bandymo metu gautas kompresijos kreives (3.40 pav.), matyti, kad šios vidurinio pleistoceno moreninių gruntų kreivės (raudonos linijos) skiriasi nuo tipinės (juoda linija) molinių gruntų kreivės – nepastebima būdingo kreivės polinkio, žyminčio struktūrinių ryšių suirimą. Minėtina, kad vidurinio pleistoceno (Medininkų ledynmečio) ir viršutinio pleistoceno (Baltijos posvitės) moreninių gruntų kreivės tarpusavyje skiriasi.



3.40 pav. Tipinės molinio grunto (juoda linija) kreivės lyginimas su vidurinio pleistoceno skirtingų tipų moreniniais smulkiaisiais gruntais ir su viršutinio pleistoceno moreniniais smulkiaisiais gruntais

Įvertinus tiriamo vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto sudėtį (5 priedas) (sudaro tiek smulkioji (~35 %), tiek rupioji frakcija (~65 %)) ir remiantis grunto elgsena jį tiriant oedometrinio ir triašio slėgio metu, galima teigti, kad šis gruntas atitinka mokslinėje literatūroje išskiriamą (Altuhafi et al., 2010; Todisco & Coop, 2019) pereinamąjį grunto tipą (angl. *Transitional*).

3.5. Trečiosios dalies išvados

1. Remiantis struktūrinės ir analitinės analizės metodais, tiriamasis gruntas gali būti priskiriamas prie reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno ledynmečio glacialinių nuogulų. Pagrindiniai skiriamieji bruožai: atsparūs dūlėjimui klastogeniniai elementai (Ti, Mn, Y, Zr, Cu, Nb), didesnis

karbonatingumas ir didesnis kalcito, dolomito ir gipso mineralų kiekis, palyginti su tirtomis viršutinio pleistoceno moreninėmis nuogulomis.

2. Atliekant tyrimą, paremtą 2009 m. Robertsono klasifikacijos schema, nustatyta, kad saCIL grunto tipas dominuoja smėlio mišinių elgsenos tipe, saCIL-SiL – dulquio mišinių elgsenos tipe, o clSa – apylygiai tiek dulquio, tiek smėlio mišinių grupėse. Taikant 2016 m. atnaujintą Robertsono klasifikacijos schema, matyti, kad saCIL daugiausia yra pereinamojo tipo elgsenos dilatuojančių, saCIL-SiL – pereinamojo ir molio tipo elgsenos dilatuojančių, o clSa – pereinamojo dilatuojančių ir susitraukiančių tipų elgsenos bandinių grupėse.

3. Atlikus tyrimą, nustatyta, kad gruntai, išsiskiriantys didžiausiu gamtiniu drėgniu, yra molio mišinių (Robertson, 2009) ir pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančių (TC) (Robertson, 2016) bandinių grupėse. Gruntai, kuriems būdingas mažiausias smulkios frakcijos kiekis, yra dulquio mišinių (Robertson, 2009) ir pereinamojo tipo elgsenos susitraukiančių (TC) (Robertson, 2016) bandinių grupėse. Mažiausiu stiprumu, atsižvelgiant į kūginį stiprį (q_c kinta nuo 1,1 iki 3,9 MPa), išsiskiria gruntai, priskiriami prie molių mišinių, o didžiausiu (q_c kinta nuo 1,1 iki 24,5 MPa) stiprumu išsiskiria smėlio mišinių grupės gruntai.

4. Didžiausią įtaką, vertinant pagal p vertes, oedometriniam deformacijų moduliui turi gamtinis drėgnis, mažiausią – kūginis stipris. Vidinės trinties kampo modeliui mažiausią poveikį daro plastiškumo rodiklis, didžiausią – molio kiekis ir kūginis stipris.

5. Gauti rezultatai, esant skirtingoms tiriamo gruntu stipruminių savybių tyrimų sąlygoms, leidžia teigti, kad tiriamajame grunte pastebima tampri plastinė deformacija, šlyties metu gruntas nedilatuoja, galutinis poringumo pokytis tyrimų metu priklauso nuo taikomo celės slėgio. Taip pat nustatyta, kad tai mažai perkonsoliduotas gruntas ($OCR < 4$), o, didėjant OCR, porinis slėgis kirpimo metu linkęs sugeneruoti vis mažesnes teigiamas reikšmes. Neprisotinto grunto mechaniniai rodikliai, tokie kaip vidinės trinties kampas ir sankiba, yra didesni negu prisotinto grunto rodikliai, esant tam pačiam ar labai panašiam celės slėgiui. Didesnio mastelio bandinių tyrimai geriau atspindi natūraliomis sąlygomis slūgsančių gruntu šlyties ir deformacijos elgseną. Palyginus vienodo mastelio ir panašių fizikinių rodiklių vienpakopio ir daugiapakopio bandymų metu gautus stiprumo savybių rezultatus, nustatyta kad gruntu sankibos c' reikšmės, gautos atliekant MST testą, yra didesnės maždaug 30 kPa (~15 %).

6. Įvertinus tiriamo vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto, nepadengto vėlesnių ledynų, sudėtį (sudaro tiek smulkioji (~35 %), tiek rupioji frakcija (~65 %)) ir remiantis grunto elgsena jį tiriant oedometriniu ir triašio slėgio bandymų metodais, galima teigti, kad šis gruntas atitinka mokslinėje literatūroje išskiriamą pereinamąjį grunto tipą.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Remiantis struktūrinės analizės metodais, tiriamas gruntas priskiriamas prie reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno laikotarpio glacialinių nuogulų, kurių aptinkama pietrytinėje Lietuvos teritorijos dalyje. Įvertinus mineralinę ir cheminę sudėtį, nustatyta, kad pagrindinis šio grunto išskirtinumas – didesnis karbonatingumas, palyginti su paskutinio apledėjimo nuogulomis.

2. Apibendrinus visus duomenis, nustatyta, kad tirtas granulimetrinės sudėties gruntas, vertinamas atsižvelgiant į skirtingo laikotarpio Robertsono (2009, 2016) klasifikacijas, gali būti priskirtas skirtingiems gruntų elgsenos tipams.

3. Didžiausią įtaką, sudarant regresinės analizės modelius oedometriniam deformacijų moduliui, turi gamtinis drėgnis. Analizuojant gruntus, remiantis 2009 m. Robertsono parengta klasifikacijos schema, patikimiausi rezultatai gaunami tiriant molio mišinių grupės gruntus (R^2 kinta nuo 0,58 iki 0,77). Taikant 2016 m. Robertsono atnaujintą klasifikacijos schemą, patikimiausi rezultatai gaunami tiriant dilatuojančius smėlio tipo elgsenos gruntus (R^2 kinta nuo 0,68 iki 0,76). Vidinės trinties kampui didžiausią poveikį daro molio kiekis ir kūginis stipris, didžiausias modelio patikimumas siekia $R^2 = 0,83$.

4. Įvertinus tiriamo grunto įtempių ir deformacijų ryšį, plastišką grunto suirimą ir grunto retrakciją šlyties metu, tiriamą reljefą formuojantį vidurinio pleistoceno moreninį smulkų gruntą galima priskirti prie mažai perkonsoliduotų ($OCR < 4$) gruntų. Prie mažai perkonsoliduotų ($OCR < 4$) gruntų tiriamas grutas skirtinas ir atsižvelgiant į OCR reikšmes, apskaičiuotas iš gruntų kompresinio spūdumo (oedometrinio) ir triašio slėgio bandymų metu gautų laboratorinių tyrimų rezultatų. Nustatytas perkonsolidavimo santykis, remiantis laboratorinių tyrimų rezultatais, vyrauja tarp 2,1–3,9, o atsižvelgiant į CPT, gaunama > 4 . Tirtiems gruntams vertinti OCR, remiantis CPT rezultatais, nerekomenduojama.

REKOMENDACIJOS, TAIKYMO GALIMYBĖS IR PRAKTINĖ REIKŠMĖ

1. Rekomenduojama reljefą sudarančių vidurinio pleistoceno moreninių smulkių gruntų mineralinės ir cheminės sudėties tyrimu metu gautus rezultatus papildyti, siekiant patikimesnių rezultatų. Darbe pateikiami rezultatai yra pirminis rezultatų įvertinimas.

2. Tiriamo vėlesnių ledynų nepadengto vidurinio pleistoceno moreninio smulkaus grunto savybės itin kaičios. Tai lemia kompleksinė šio grunto sudėtis (žvyro (vidurkis iki 3–5 proc.), smėlio (vidurkis iki 50–65 proc.), dulquio (vidurkis iki 25–36 proc.) ir molio (vidurkis iki 5–11 proc.) mišinys, kurio gamtinis drėgnis vyrauja 9–16 proc. intervale ir yra mažo plastiškumo (I_p vidurkis iki 10 proc., w_L vidurkis iki 22 proc.)). Remiantis šiandien Lietuvoje taikoma priimta gruntų klasifikavimo sistema ir vadovaujantis papildomomis LGT rekomendacijomis, galima teigti, kad tiriamo amžiaus gruntas dažniausiai yra smėlingas, mažo plastiškumo molis-dulkis (saCIL–SiL) (45,2 proc. visų tirtų bandinių). Tokie sudėtiniai gruntai turėtų būti klasifikuojami, atsižvelgiant į jų litologiją ir tipą, siekiant susieti juos paveikusius procesus su gruntų fizikinėmis savybėmis ir mechanine elgsena.

3. Siekiant įvertinti grunto elgseną mechaninio poveikio metu, nepriklausomai nuo nustatyto pavadinimo, remiantis ISO 14688-2:2018 pagrindu sudaryta ir Lietuvos gruntams pritaikyta projektinių IGG tyrimų klasifikacija (TAR 2019-06-14, Nr. 2019-09653), rekomenduojama naudotis Robertsono (2009, 2016) schemomis. Šiose schemose tiriamas gruntas dažniausiai klasifikuojamas kaip pereinamojo tipo elgsenos arba dulquio mišinys. Gruntui įvertinti siūloma naudoti disertacijos 3.15 lentelėje pateiktas koreliacinių priklausomybių formules. Būtina numatyti taikomumo galimybes, atsižvelgiant į grunto elgsenos tipą, kūginį stiprį ir išskirtus gruntų fizikinių savybių ribų intervalus (3.4 ir 3.13 lentelės).

4. Vertinant tiriamo grunto mechaninių savybių rodiklius, rekomenduojama taikyti mažai perkonsoliduotų pereinamųjų gruntų ($OCR < 4$) mechanikos principus. Siekiant įvertinti prieškonsolidacinį įtempį ir apskaičiuoti perkonsolidavimo santykį, rekomenduojama tai atlikti remiantis laboratorinių tyrimų metu gautais rezultatais ir taip išvengti galimybės pervertinti grunto stiprumą, OCR vertinant remiantis CPT rezultatais.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Adeyeri, J. B. (2015). Compressibility and consolidation of soils. In *Technology and practice in geotechnical engineering* (p. 476–527). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-6505-7.ch008>
- Adeyeri, J. B. (2018). Encyclopedia of engineering geology. In *Encyclopedia of Earth sciences series* (p. 170–179). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_63
- Ahmad, T., Kato, R., & Kuwano, J. (2023). Constant volume shear tests on compacted silty soil. *International Journal of GEOMATE*, 24(103), 104–111. <https://doi.org/10.21660/2023.103.s8536>
- Ahmed, M., Almurshedi, A., & Alowan, H. (2019). Effect of saturation levels on shear strength and bearing capacity properties of soil types. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(6). <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.6.23>
- Ayizula, A., & Liu, J. (2023). Inverse analysis on compressibility of toronto clays. *Soils and Foundations*, 63(2), 101280. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101280>
- Akayuli, C., Oforu, B., Nyako, O. S., & Opuni, O. K. (2013). The influence of observed clay content on shear strength and compressibility of residual sandy soils. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(4), 2538–2542. https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue4/OO3425382542.pdf
- Alkarni, A. (2006). Effect of pore water pressure on stress-strain characteristics of dense sand. In *Soil and rock behavior and modeling* (p. 35–41). [https://doi.org/10.1061/40862\(194\)3](https://doi.org/10.1061/40862(194)3)
- Als Salman, M. (2015). *Comparison and correction of multistage triaxial tests to single stage triaxial test for the rock mechanical testing*. Petroleum engineering. University of Houston.
- Al-Shayea, A. N., & Mohib, R. K. (2012). Parameters for an elasto-plasto-damage model for the stress–strain behavior of cohesive soils. *International Journal of Damage Mechanics*, 21(3), 309–339. <https://doi.org/10.1177/105678951140107>
- Altuhafi, F., Baudet, A. B., & Sammonds, P. (2010). The mechanics of subglacial sediment: an example of new “transitional” behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(7), 775–790. <https://doi.org/10.1139/T09-136>
- Amundsen, H. A., Dang, H., Adamson, M., Emdal, A., & Thakur, V. (2017). A new laboratory procedure to study stress relief in soil samples. In

- Advances in natural and technological hazards research* (p. 121–132). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56487-6_11
- Araei, A., Soroush, A., Tabatabaei, S., & Ghalandarzadeh, A. (2012). Consolidated undrained behavior of gravelly materials. *Scientia Iranica*, 19, 1391–1410. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.09.011>
- Asaoka, A., Noda, T., & Fernando, G. S. (1998). Consolidation deformation behavior of lightly and heavily overconsolidated clay foundations. *Soils and Foundations*, 38(2), 75–91. https://doi.org/10.3208/sandf.38.2_75
- ASTM (2017). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)* (ASTM D2487-17). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/020e31ca-50f1-4dc7-a934-9c693ba22bd7/astm-d2487-17>
- Atkinson, J. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique*, 50, 487–508. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.5.487>
- Babu, G. S., Lakshmikanthan, P., & Santhosh, L. (2015). Shear strength characteristics of mechanically biologically treated municipal solid waste (MBT-MSW) from Bangalore. *Waste Management*, 39, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.013>
- Bağ, A., & Chmielewski, R. (2019). The influence of fine fractions content in non-cohesive soils on their compactibility and the CBR value. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(4), 353–361. <https://doi.org/10.3846/jcem.2019.9687>
- Baltodano-Goulding, R., & Brenes, L. (2022). *Influence of degree of saturation on the dynamic soil properties of a fine-grained soil*. <https://doi.org/10.1061/9780784484043.052>
- Baltrūnas, V. (1995). *Pleistoceno stratigrafija ir koreliacija*. Academia.
- Baltrūnas, V. (Red.). (2004). *Lietuvos Žemės gelmių raida ir ištekliai*. Petro ofsetas.
- Baltrūnas, V. (2018). *Ledyno dvelksmas: Grendlandija ir Lietuva*. Valstybinis mokslinis tyrimo institutas, Gamtos tyrimų centras.
- Baltrūnas, V., & Karmaza, B. (2011). Glacialinių nuogulų tyrimai paleogeografinių ir paleoglaciloginių sąlygų atkūrimui. *Baltica*, 24(2011), 103–108. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3850.5448>
- Baltrūnas, V., Karmaza, B., Zinkutė, R., Katinas, V., Paškauskas, S., & Pukelytė, V. (2015). Inferences from geochemical characteristics of the upper part of the Middle Pleistocene. *Baltica*, 28(2), 89–109. <https://doi.org/10.5200/baltica.2015.28.09>
- Banerji, U. S., Goswami, V., & Joshi, K. B. (2022). Quaternary dating and instrumental development: An overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 7, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100091>

- Basalykas, A. (1965). *Lietuvos TSR fizinė geografija II (Fiziniai geografiniai rajonai)*. Mintis.
- Begemann, H. K. (1965). The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. In *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (p. 17–20). Montreal, Quebec, Canada.
- Bell, F. G. (2002). The geotechnical properties of some till deposits occurring along the coastal areas of eastern England. *Engineering Geology*, 63(1–2), 49–68. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00068-0)
- Bičkauskas, G., Brazauskas, A., Kleišmantas, A., & Motuza, G. (2011). *Bendrosios geologijos pratybos*. Vilniaus universiteto leidykla.
- Bignonnet, F., Dormieux, L., & Kondo, D. (2016). A micro-mechanical model for the plasticity of porous granular media and link with the cam clay model. *International Journal of Plasticity*, 79, 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.07.003>
- Bihs, A., Nordal, S., Long, M., Paniagua, P., & Gylland, A. (2018). Effect of piezocone penetration rate on the classification of Norwegian silt. *Cone Penetration Testing*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59365036>
- Bin, G., Jun, C., Heng, Y., Xubo, C., & Zhonghu, W. (2018). Experimental study on mechanical properties of red clay under different stress paths. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 14(5), 1202–1212. <http://dxkjxb.cqu.edu.cn/EN/>
- Bitinas, A. (2011). *Paskutinis ledynmetis Rytinės Baltijos regione*. Klaipėdos universiteto leidykla.
- Bitinas, A., Damušytė, A., Grigienė, A., Molodkov, A., Šeirienė, V., & Šliauteris, A. (2013). South-eastern Baltic sea region during the last glacial cycle: From late Saalian until late Weichselian. In *Paleolandscapes from Saalian to Weichselian, South Eastern Lithuania. International Field Symposium* (p. 16–18).
- Bitinas, A., Repečka, M., & Kalnina, L. (1999). Correlation of tills from the South-Eastern Baltic sea bottom and nearshore boreholes. *Baltica: Special Publication*, 12, 5–10.
- Bol, E. (2013). The influence of pore pressure gradients in soil classification during piezocone penetration test. *Engineering Geology*, 157, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.01.016>
- Briaud, J. L. (2013). Shear strength properties. In *Geotechnical engineering: Unsaturated and saturated soils*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118686195.ch15>
- Brilingas, A. (1988). *Metodika inžinerno-geologických izyskanij dlja promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva v rajonah*

- raspostranjenija lednikovyh otlozhenij (na primere territorii Litovskoj SSR)* [Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk]. PNIIS. [In Russian]
- Briner, J. (2011). Dating glacial landforms. In V. S. Singh, *Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Encyclopedia of Earth sciences series* (p. 175–176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_61
- Bucevičiūtė, S., Marcinkevičius, V., & Dansevicienė, D. (1997). *Lietuvos inžinerinis geologinis žemėlapis, M 1:500 000*. Lietuvos geologijos tarnyba.
- Budhu, M. (2010). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed). John Wiley & Sons, Incorporated.
- Cabalar, A. F. (2011). The effects of fines on the behaviour of a sand mixture. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 91–100. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9355-z>
- Cai, G., Liu, S., & Puppala, J. A. (2011). Comparison of CPT charts for soil classification using PCPT data: Example from clay deposits in Jiangsu Province, China. *Engineering Geology*, 121(1–2), 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.016>
- Cai, Y., Hao, B., Gu, C., Wang, J., & Pan, L. (2018). Effect of anisotropic consolidation stress paths on the undrained shear behavior of reconstituted Wenzhou clay. *Engineering Geology*, 242(14), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.016>
- Çakir, R., & Cangir, C. (2019). Water holding properties and soil water types in fine textured Vertisol soils of Thrace region in Turkey. *Polish Journal of Soil Science*, 52(2), 247–257. <http://dx.doi.org/10.17951/pjss.2019.52.2.247>
- Cary, C. E., & Zapata, C. E. (2016). Pore water pressure response of soil subjected to dynamic loading under saturated and unsaturated conditions. *International Journal of Geomechanics*, 16(6), D4016004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000642](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000642)
- Carvalho, L., & Ribeiro, D. (2019). Soil classification system from cone penetration test data applying distance-based machine learning algorithms. *Soils & Rocks*, 42(2), 167–178. <https://doi.org/10.28927/SR.422167>
- Casini, F., Serri, V., & Springman, M. S. (2013). Hydromechanical behaviour of a silty sand from a steep slope triggered by artificial rainfall: From unsaturated to saturated conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 28–40. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0095>

- Cetin, H., & Gökoğlu, A. (2013). Soil structure changes during drained and undrained triaxial shear of a clayey soil. *Soils & Foundations*, 53(5), 628–638. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.002>
- Chen, Y., Zhang, G., & Chan, D. (2018). Cyclic response and modeling of saturated silty clay due to fluctuations in reservoir water level of the Three Gorges Dam, China. *Soils & Foundations*, 58(3), 702–715. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.023>
- Cheng, S., Wang, Q., Wang, J., & Han, Y. (2023). Study of mechanical properties of saline soils under different stress paths. *Buildings*, 13(9), 2347. <https://doi.org/10.3390/buildings13092347>
- Cherblanc, F., Berthonneau, J., Bromblet, P., & Huon, V. (2016). Influence of water content on the mechanical behaviour of limestone: Role of the clay minerals content. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(6), 2033–2042. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0911-y>
- Chi, Z. C., Dai, Z. J., Chen, S. X., Li, F. F., Wang, W., & Li, J. B. (2023). Effect of hydration on mechanical properties and microstructure of expansive soil. *Environmental Earth Sciences*, 82(6), 133. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10837-y>
- Cho, S., Kim, H. S., & Kim, H. (2023). Locally specified CPT soil classification Based on machine learning techniques. *Sustainability*, 15(4), 2914. <https://doi.org/10.3390/su15042914>
- Choi, J. H., Dai, S., Lin, J. S., & Seol, Y. (2018). Multistage triaxial tests on laboratory-formed methane hydrate-bearing sediments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(5), 3347–3357. <https://doi.org/10.1029/2018JB015525>
- Clark, P. U., Archer, D., Pollard, D., Blum, J. D., Rial, J. A., Brovkin, V., Mix, A. C., Piasias, N. G., & Roy, M. (2006). The middle Pleistocene transition: characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO₂. *Quaternary Science Reviews*, 25(23), 3150–3184. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.07.008>
- Clarke, B. G., Hughes, D. B., & Hashemi, S. (2008). Physical characteristics of subglacial tills. *Géotechnique*, 58(1), 67–76. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.1.67>
- Clarke, G. B. (2017). *Engineering of glacial deposits* (1 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315149356>
- Clarke, G. B. (2018). The engineering properties of glacial tills. *Geotechnical Research*, 5(4), 262–277. <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00020>
- Collico, S., Arroyo, M., Devincenzi, M., Rodriguez, A., & Deu, A. (2022). Clustering analysis to improve total unit weight prediction from CPTu. <https://doi.org/10.1201/9781003308829-45>

- Crisp, M., Jaksa, B. M., & Kuo, L. Y. (2019). Toward a generalized guideline to inform optimal site investigations for pile design. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(4). <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0111>
- Dafalla, M. A. (2013). Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 562726. <https://doi.org/10.1155/2013/562726>
- Dash, H. K., & Sitharam, T. G. (2011). Undrained monotonic response of sand-silt mixtures: effect of nonplastic fines. *Geomechanics and Geoengineering*, 6(1), 47–58. <https://doi.org/10.1080/17486021003706796>
- Davies, B. (2021). Cryospheric geomorphology. Dating glacial landforms II: Radiometric techniques. In *Reference module in Earth systems and environmental sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00040-7>
- DeJong, T. J., & Mark, R. (2012). Influence of partial consolidation during cone penetration on estimated soil behavior type and pore pressure dissipation measurements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(7), 777–788. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000646](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000646)
- Deng, S., Zhang, Y., Han, J., Wang, K., Tian, Z., & Liu, T. (2023). An analytical study on penetration and pore pressure dissipation of piezocone test in typical normally and over-consolidated silty clays. *Applied Sciences*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063797>
- Ding, J., Tian, B., Huang, M., & Huang, H. (2017). Researches on mechanical properties of soil under conditions of excavation unloading in Guangzhou. In *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Civil, Transportation and Environmental Engineering (ICCTE 2017)* (p. 83–95). <https://doi.org/10.2991/iccte-17.2017.15>
- Douglas, B. J., & Olsen, R. S. (1981). Soil classification using electric cone penetrometer. In *Cone penetration testing and experience, geotechnical engineering division* (p. 209–227). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113915286>
- Duan, Z., Li, Z. Y., Wu, Y. B., Niu, B., & Shen, R. J. (2023). Mechanical and microscopic properties of soil according to the rate of increase in pore water pressure. *Soil and Tillage Research*, 225, 105530. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105530>
- Dundulis, K., Gadeikis, S., & Ignatavičius, V. (2004). Kvartero nuogulų inžinerinių geologinių sąlygų formavimasis. In „*Litosfera“ spec. leidinys „Lietuvos žemės gelmių raida ir išteklių“*. Petro ofsetas.

- Dundulis, K., Kaczyński, R. R., Krauzlis, S. K., & Žaržojus, G. (2008). Engineering geological properties of Vilnius and Warsaw region tills as building subsoils. *Geologija*, 50, S11–S15. <https://doi.org/10.2478/v10056-008-0019-0>
- Egert, R., Seithel, R., Kohl, T., & Stober, I. (2018). Triaxial testing and hydraulic–mechanical modeling of sandstone reservoir rock in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy*, 6(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0109-0>
- Ehlers, J., Gibbard, P., & Hughes, P. D. (2011). *Quaternary glaciations – extent and chronology: A closer look*. Elsevier.
- Eid, H., Rabie, H. K., & Wijewickreme, D. (2016). Drained residual shear strength at effective normal stresses relevant to soil slope stability analyses. *Engineering Geology*, 204(1), 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.003>
- Elbanna, M., & Sabbagh, M. E. (2009). *Soil Classification using CPTu in Fort McMurray*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221896506>
- Elias, S. A. (2013). The quaternary. In *Reference module in Earth systems and environmental sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05350-1>
- Elkamhawy, E., Wang, H., Salem, N. T., Vranay, F., & Zelenakova, M. (2021). Soil fabric and transitional behavior in completely decomposed granite: an example of well-graded soil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1046. <https://doi.org/10.3390/jmse9101046>
- Eslami, A., Moshfeghi, S., MolaAbasi, H., & Eslami, M. M. (2020). Background to foundation engineering. In *Piezcone and cone penetration test (CPTu and CPT) applications in foundation engineering* (p. 25–53). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102766-0.00002-X>
- European Committee for Standardization. (2007). *Eurocode 7: Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing* (EN 1997-2:2007). <https://hdl.handle.net/20.500.12259/178089>
- Faloye, O. T., Ajayi, A., Zink, A., Fleige, H., Dörner, J., & Horn, R. (2021). Effective stress and pore water dynamics in unsaturated soils: Influence of soil compaction history and soil properties. *Soil and Tillage Research*, 211(1), 104997. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104997>
- Farooq, K., Orense, P. R., & Towhata, I. (2005). Evaluation of shear strength parameters for rain-induced slope instabilities. In *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*

- (p. 2511–2514). Millpress Science Publishers / IOS Press.
<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-2511>
- Fellenius, B., & Eslami, A. (2000). Soil profile interpreted from CPTu data. In *Geotechnical Engineering Conference, I*.
- Feng, J., & Zhang, G. (2021). Thermal-hydro-mechanical interactions in saturated and unsaturated soils. *Geofluids*, 2021, 5475391. <https://doi.org/10.1155/2021/5475391>
- Gaigalas, A. (2008). Quaternary research in the Baltic countries. *Geological Society*, 301, 129–140. <https://doi.org/10.1144/SP301.8>
- Gaigalas, A. & Melešytė, M. (2001). Nemuno ledynmečio nuogulų paplitimas ir sudėtis. In V. Baltrūnas (Ed.), *Akmens amžius Pietų Lietuvoje: (geologijos, paleogeografijos ir archeologijos duomenimis)* (p. 46–54). Geologijos institutas.
- Gao, Z., Zhao, J., & Yin, Z. Y. (2017). Dilatancy relation for overconsolidated clay. *International Journal of Geomechanics*, 17(5), 6016035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000793](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000793)
- Gebresamuel, T. H., Melese, T. D., Boru, T. Y., & Legese, M. A. (2023). Effect of specimens' height to diameter ratio on unconfined compressive strength of cohesive soil. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 45(2), 112–132. <https://doi.org/10.2478/sgem-2023-0001>
- Georgiannou, N. V., Burland, B. J., & Hight, W. D. (1990). The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension. *Géotechnique*, 40(3), 431–449. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.431>
- GOST. (1982). *Grunty. Klassifikacija*. (GOST 25100-82). [In Russian]
- GOST. (1984). *Soils. Field methods for determining deformation characteristics*. (GOST 12374-77). [In Russian]
- Gozhik, P., Lindner, L., & Marks, L. (2012). Late early and early middle pleistocene limits of Scandinavian glaciations in Poland and Ukraine. *Quaternary International*, 271, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.07.027>
- Gregorauskienė, V., & Bitinas, A. (2017). Bendrieji vidurinio pleistoceno aukštumų formavimosi geologiniai ypatumai. In *Vidurinio pleistoceno apledėjimo aukštumų dirvožemio dangos ypatumai: mokslinės konferencijos ekspedicijos vadovas* (p. 19–23). Leidybos centras.
- Grigelis, A., Gailius, R., & Kadūnas, V. (1994). *Lietuvos geologija: monografija*. Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas.
- Gu, C., Wang, J., Cai, Y., Sun, L., Wang, P., & Dong, Q. (2016). Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under

- constant and variable confining pressure. *Soils and Foundations*, 56(3), 427–439. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.04.009>
- Guan, D., Zheng, J., Huang, W., Zhong, J., Du, W., Luo, Z., & Zhou, Y. (2021). The influence of soft clay saturation characteristics on unconfined compressive strength in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. In *3rd Global Conference on Ecological Environment and Civil Engineering (GCEECE 2021)* (p. 293). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129302011>
- Gunnar, A., & Suzanne, L. (2022). Shear strength of soft clay in terms of effective stresses. *NGI Articles*. <https://hdl.handle.net/11250/3030282>
- Guobytė, R. (1999). *Lithuanian quaternary geological map M 1:20 000*. Lietuvos geologijos tarnyba.
- Guobytė, R. (2014). *Teritorijos nuledėjimo kartoschema, M 1:2 000 000*. Lietuvos nacionalinis atlasas, Nacionalinė žemės tarnyba prie Žemės ūkio ministerijos.
- Guobytė, R., Aleksa, P., & Satkūnas, J. (2001). Lietuvos paviršiaus genetinių, litologinių ir stratigrafinių tipų paplitimo analizė. *Geologijos metraštis*, 34(2), 57–67.
- Guobytė, R., & Satkūnas, J. (2011). Pleistocene glaciations in Lithuania. In J. Ehlers, P. L. Gibbard, & P. D. Hughes, *Developments in quaternary science* (p. 231–246). Elsevier.
- Habtemariam, B. G., Shirago, K. B., & Dirate, D. D. (2022). Effects of soil properties and slope angle on deformation and stability of cut slopes. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 4882095. <https://doi.org/10.1155/2022/4882095>
- Hailemariam, H., & Wuttke, F. (2021). A laboratory study on the shear strength behavior of two till deposits from Northern Germany. *Energies*, 14(6), 1462. <https://doi.org/10.3390/en14061692>
- Han, J., Dano, C., Hicher, P. Y., & Yin, Z. Y. (2014). Strain-rate dependency of shear strength for a highly overconsolidated clay. *Geotechnical Special Publication*, 343–352. <https://doi.org/10.1061/9780784413388.035>
- Han, J., Yin, Z. Y., Dano, C., & Hicher, P. Y. (2021). Cyclic and creep combination effects on the long-term undrained behavior of overconsolidated clay. *Acta Geotechnica*, 16(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01078-5>
- Harris, W., & Norman White, G. (2008). X-ray diffraction techniques for soil mineral identification. In *Methods of soil analysis. Part 5: Mineralogical methods* (p. 81–115). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.5.c4>

- Hartge, H. K., & Horn, R. (2016). *Essential soil physics an introduction to soil processes, functions, structure and mechanics*. Schweizerbart Science Publishers.
- Hattab, M., & Hicher, P. Y. (2004). Dilating behaviour of overconsolidated clay. *Soils and Foundations*, 44(4), 27–40. https://doi.org/10.3208/sandf.44.4_27
- Havens, J. H., & Goodwin, W. A. (1951). Clay mineralogy and soil stabilization. *Kentucky Transportation Center Research Report*, 69. <http://dx.doi.org/10.13023/KTC.RR.1951.69>
- He, Y. Q., Liao, H. J., Wu, W., & Wang, S. (2023). Hypoplastic modeling of inherent anisotropy in normally and overconsolidated clays. *Acta Geotechnica*, 18(12), 6315–6333. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01923-3>
- Hendry, M. T. (2018). Shear strength. In P. T. Bobrowsky, & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of engineering geology* (p. 831–833). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_257
- Holtz, D. R., William, D. K., & Thomas, C. S. (2010). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall.
- Hormdee, D., Kaikeerati, N., & Angsuwotai, P. (2012). Evaluation on the results of multistage shear test. *GEOMATE Journal*, 2(1), 140–143. <https://doi.org/10.21660/2012.3.3m>
- Hotstream, J., Randolph, M., Schneider, J., & Mayne, P. (2012). Comparing CPTU Q–F and Q– Δ u / σ_v0 ' soil classification charts. *Géotechnique Letters*, 2, 209–215. <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00044>
- Hov, S., & Gaharia, D. (2023). Geotechnical characterization of index and deformation properties of Stockholm clays. *AIMS Geosciences*, 9(2), 258–284. <https://doi.org/10.3934/geosci.2023015>
- Hrynowiecka, A., & Winter, H. (2016). Palaeoclimatic changes in the Holsteinian Interglacial (Middle Pleistocene) on the basis of indicator-species method Palynological and macrofossils remains from Nowiny Zukowskie site (SE Poland). *Quaternary International*, 409, 255–269. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.036>
- Huang, H., Huang, M., & Ding, J. (2018). Calculation of tangent modulus of soils under different stress paths. *Mathematical Problems in Engineering*, 6, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/1916761>
- Huang, K., Wan, J., & Chen, G. (2012). Experimental study on the relationship between shear strength and water content of unsaturated soil. *Geotechnical Mechanics*, 33(09), 2600–2604.

- Indraratna, B., Jayanathan, M., & Brown, T. E. (2008). No access shear strength model for overconsolidated clay-infilled idealised rock joints. *Géotechnique*, 58(1), 55–65. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.1.55>
- International Organization for Standardization. (2014). *Soil quality. Determination of elemental composition by X-ray fluorescence* (ISO 18227:2014). <https://www.iso.org/standard/61816.html>
- International Organization for Standardization. (2015). *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil. Part 1: Determination of water content* (ISO 17892-1:2015). <https://www.iso.org/standard/55243.html>
- International Organization for Standardization. (2015). *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil. Part 2: Determination of bulk density* (ISO 17892-2:2015). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/7a201656-a5cd-4a1a-91ec-ea69dc83ddb5/sist-en-iso-17892-2-2015>
- International Organization for Standardization. (2016). *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil. Part 4: Determination of particle size distribution* (ISO 17892-4:2016). <https://www.iso.org/standard/55246.html>
- International Organization for Standardization. (2017). *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil. Part 5: Incremental loading oedometer test* (ISO 17892-5:2017). <https://www.iso.org/standard/55247.html>
- International Organization for Standardization. (2017). *Soil quality. Determination of particle density* (ISO 11508:2017). <https://www.iso.org/standard/68257.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing – identification and classification of soil. Part 1: Identification and description* (ISO 14688-1:2018). <https://www.iso.org/standard/66345.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing – identification and classification of soil. Part 2: Principles for a classification* (ISO 14688-2:2018). <https://www.iso.org/standard/66346.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil. Part 8: Unconsolidated undrained triaxial test* (ISO 17892-8:2018). <https://www.iso.org/standard/70790.html>

- International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil. Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soils* (ISO 17892-9:2018). <https://www.iso.org/standard/70954.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil. Part 10: Direct shear tests* (ISO 17892-10:2018). <https://www.iso.org/standard/72015.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *Geotechnical investigation and testing – laboratory testing of soil. Part 12: Determination of Attenberg limits* (ISO 17892-12:2018). <https://www.iso.org/standard/72017.html>
- International Organization for Standardization. (2022). *Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test* (ISO 22476-1:2022). <https://www.iso.org/standard/75661.html>
- Yang, D., Niu, S., Cai, Y., Feng, W., & Zhang, D. (2021). Analysis of shear characteristics of cohesive soil and rigid base: A case study of concrete base. *Geotechnical and Geological Engineering*, *36*, 135–143. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01478-0>
- Yang, W. A., Yang, S. K., & Zhang, Z. D. (2020). Experimental study of mechanical properties of dredger fill under different unloading rates and stress paths. *Rock and Soil Mechanics*, *41*(9), 2891–2900. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1992>
- Yao, Y. P., Hou, W., & Zhou, A. N. (2009). UH model: Three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays. *Géotechnique*, *59*(5), 451–469. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.00029>
- Yavna, V., Shapovalov, V., Okost, M., Morozov, A., Ermolov, Y., & Kochur, A. (2023). Modeling of long-term train loads impacts on subgrade soils: A review. *International Journal of Transportation Science and Technology*, *12*(3), 729–752. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.06.005>
- Yilmaz, Y., Kheirjouy, B. A., & Akgüngör, P. A. (2016). Investigation of the effect of different saturation methods on the undrained shear strength of a clayey soil compacted with standard and modified proctor energies. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *60*(3), 323–329. <https://doi.org/10.3311/PPci.8891>
- Yin, J., Zhao, A., Han, W., Xiao, J., Ahmed, S., & Miao, Y. (2021). Experimental investigation on strength behavior of reconstituted Zhenjiang clay under different consolidation stress paths. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(2), 109. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06424-1>

- Yin, K., Fauchille, A. L., Di Filippo, E., Kotronis, P., & Sciarra, G. (2021). Review of sand–clay mixture and soil–structure interface direct shear test. *Geotechnics*, 1(2), 260–306. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1020014>
- Yin, K., Fauchille, A. L., Di Filippo, E., Othmani, K., Branchu, S., Sciarra, G., & Kotronis, P. (2021). The influence of mixing orders on the microstructure of artificially prepared sand-clay mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 8552224. <https://doi.org/10.1155/2021/8552224>
- Jayalekshmi, S., & Elamathi, V. (2020). A review on correlations for consolidation characteristics of various soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1006(1), 12007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1006/1/012007>
- Jefferies, M., & Been, K. (2016). *Soil liquefaction, a critical state approach* (2 ed.). Applied geotechnics series. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19114>
- Jiang, M., Hu, H., Peng, J., & Leroueil, S. (2011). Experimental study of two saturated natural soils and their saturated remoulded soils under three consolidated undrained stress paths. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 5(2), 225–238. <https://doi.org/10.1007/s11709-011-0108-8>
- Jiang, X., Cui, P., & Ge, Y. (2015). Effects of fines on the strength characteristics of mixtures. *Engineering Geology*, 198, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.09.011>
- Jones, G. A., & Rust, E. (1983). Piezometer probe (cupt) for subsoil identification. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 27, 303–308. <https://eurekamag.com/research/019/729/019729184.php>
- Jones, R. L., Beavers, A. H., & Alexander, J. D. (1966). Mineralogical and physical characteristics of till in moraines of LaSalle County, Illinois. *Ohio Journal of Science*, 66(4), 359–368. <http://hdl.handle.net/1811/5197>
- Jozsa, V. (2013). Empirical correlations of overconsolidation ratio, coefficient of earth pressure at rest and undrained strength. In *Second Conference of Junior Researchers in Civil Engineering* (p. 88–92).
- Józsa, V. (2016). Estimation and separation of preconsolidation stress using triaxial,- and oedometer test in kiscelli clay. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(2), 297–304. <https://doi.org/10.3311/PPci.9068>
- Kadūnas, V., & Gregorauskienė, V. (1999). Mikroelementai dirvožemio granulometrinės frakcijose Lietuvoje. *Geologija*, 28, 15–22.
- Kadūnas, V., Budavičius, R., Gregorauskienė, V., Katinas, V., Kliaugienė, E., Radzevičius, A., & Taraškevičius, R. (1999).

- Lietuvos geocheminis atlasas*. Geologijos institutas, Lietuvos geologijos tarnyba.
- Kadūnas, V., Katinas, V., & Gregorauskienė, V. (2002). Geochemical zonation of soil of Lithuania. *Applied Geochemistry. Ecological geochemistry*, 131–141.
- Kaliakin, N. V., & Anantanasakul, P. (2023). Behavior and modeling of silt-clay transition soils. In *Smart Geotechnics for Smart Societies* (1 ed.) (p. 253–268). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003299127-22>
- Kalm, V., Raukas, A., Rattas, M., & Lasberg, K. (2011). Chapter 8: Pleistocene glaciations in Estonia. In J. Ehlers, P. L. Gibbard, & P. D. Hughes (Eds.), *Quaternary glaciations – extent and chronology, Vol. 15* (p. 95–104). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00008-8>
- Kameistu, P., Priadi, E., & Widodo, S. (2023). Correlation of based soil carrying capacity results of cone penetration test, dynamic cone penetrometer (DCP), plate bearing test, and hand penetrometer. *Jurnal Teknik Sipil*, 23, 318. <https://doi.org/10.26418/jts.v23i3.64107>
- Kasparinskis, R., Astover, A., Reintam, E., Krievāns, M., Zelčs, V. N., & Kārklīņš, A. (2017). *International WRB soil classification field workshop in Latvia and Estonia*. University of Latvia, Estonian University of Life Sciences.
- Kavoliutė, F. (2012). *Lietuvos gamtinis pamatas. I dalis. Gelmės ir paviršius*. Vilniaus universitetas.
- Khan, P. A., Madhav, M. R., & Reddy, S. (2011). Radial consolidation of lightly overconsolidated clays. In *Indian Geotechnical Conference* (p. 871–874). Kochi. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138383344>
- Khasanov, A., & Khasanov, Z. (2020). *Experimental and theoretical study of strength and stability of soil* (1 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429351860>
- Kim, D., Nam, B. H., & Youn, H. (2018). Effect of clay content on the shear strength of clay–sand mixture. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0087-x>
- Kim, U. G., Zhuang, L., Kim, D., & Lee, J. (2017). Evaluation of cyclic shear strength of mixtures with sand and different types of fines. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(4), 447–455. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.987891>
- Kimoto, S., Khan, B. S., Mirjalili, M., & Oka, F. (2013). Cyclic elastoviscoplastic constitutive model for clay considering nonlinear kinematic hardening rules and structural degradation. *International*

- Journal of Geomechanics*, 15(5), A4014005.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000327](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000327)
- Kondratiene, O. (2011). Problems of the middle pleistocene stratigraphy in Lithuania. *Baltica*, 24, 109–112.
- Krabbenhøft, K., & Wang, J. (2022). Analytical stress-strain relation for soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(4), 614–619.
<https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0043>
- Krim, A., Arab, A., Chemam, M., Brahim, A., Sadek, M., & Shahrour, I. (2019). Experimental study on the liquefaction resistance of sand–clay mixtures: Effect of clay content and grading characteristics. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(2), 129–141.
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1407974>
- Lade, V. P. (2016). *Tiaxial testing of soils*. John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9781119106616>
- Laloui, L., & Rotta Loria, A. F. (2020). Determination of design parameters for energy geostructures. In *Analysis and design of energy geostructures* (p. 821–932). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816223-1.00014-x>
- Lamsters, K., Kalińska-Nartiša, E., & Zelchs, V. (2017). New luminescence ages reveal Early to Middle Weichselian deposits in central Latvia. *Geological Quarterly*, 61(2). <https://doi.org/10.7306/gq.1349>
- Lang, J., Lauer, T., & Winsemann, J. (2018). New age constraints for the Saalian glaciation in northern central Europe: Implications for the extent of ice sheets and related proglacial. *Quaternary Science Reviews*, 180, 240–259. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.029>
- Lee, J. (2018). Glacial lithofacies and stratigraphy. In *Past glacial environments* (p. 377–429). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100524-8.00011-7>
- Lei, H., Qi, Z., Feng, S., & Lei, S. (2022). Macroscopic and microscopic investigation of the structural characteristics of artificially structured marine clay. *Soils & Foundations*, 62(6), 101243.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101243>
- Lekstutytė, I., Moliakovaitė, G., Žaržojus, G., Gadeikis, S., & Skuodis, Š. (2023). Intermediate till soil properties and distinctive features. In *Modern building materials, structures and techniques*. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_63
- Leroueil, S., Chu, J., & Wanatowski, D. (2009). Slope instability due to pore water pressure increase. In *Proc. first italian workshop on landslides-rainfall-induced landslides, Vol. 1* (p. 81–90).

- Li, J., Xu, H., Chen, L., Li, B., Liang, D., Ren, S., Zhang, S., & Wang, J. (2022). Effect of saturation degree on mechanical behaviors of shallow unsaturated expansive soils. *Sustainability*, *14*(21). <https://doi.org/10.3390/su142114617>
- Li, L., Zang, M., Zhang, R. T., & Lu, H. J. (2022). Deformation and strength characteristics of structured clay under different stress paths. *Mathematical Problems in Engineering*, *2022*, 9266206. <https://doi.org/10.1155/2022/9266206>
- Lindh, P., & Lemenkova, P. (2023). Behaviour of moraine soils stabilised with OPC, GGBFS and hydrated lime. *Archives of Mining Sciences*, *68*(2), 319–334. <https://doi.org/10.24425/ams.2023.146182>
- Lindner, L., Marks, L., & Nita, M. (2013). Climastratigraphy of interglacials in Poland: Middle and Upper Pleistocene lower boundaries from a Polish perspective. *Quaternary International*, *292*, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.018>
- Liu, C., He, P., & Huang, Q. (2011). Influence of matrix suction on engineering properties of unsaturated soil. In *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (p. 2250–2253). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987427>
- Lunne, T., Robertson, P., & Powell, J. (1997). Cone penetration testing in geotechnical practice. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *46*. <https://doi.org/10.1007/s11204-010-9072-x>
- Mahmood, M. S., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., & Husain, M. M. (2020). Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking. *Materials Science and Engineering*, *737*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012080>
- Mayne, P. W. (1988). Determining OCR in clays from laboratory strength. *Journal of Geotechnical Engineering*, *114*(1), 76–92. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:1\(76\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:1(76))
- Mayne, P. W. (2014). Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. In *Proceedings, 3rd international symposium on cone penetration testing (CPT14, Las Vegas)*, *102* (p. 47–73).
- Malizia, P. J., & Shakoor, A. (2018). Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils. *Engineering Geology*, *244*, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.028>
- Marks, L. (2011). Chapter 23: Quaternary glaciations in Poland. In J. Ehlers, P. L. Gibbard, & P. D. Hughes (Eds.), *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology, Vol. 15* (p. 299–303). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00023-4>

- Marks, L., Bińska, K., Woronko, B., Majecka, A., & Teodorski, A. (2019). Revision of the late Middle Pleistocene stratigraphy and palaeoclimate in Poland. *Quaternary International*, 534, 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.02.023>
- Marks, L., Dzierżek, J., Janiszewski, R., Kaczorowski, J., Lindner, L., Majecka, A., Makos, M., Szymanek, M., Tołoczko-Pasek, A., & Woronko, B. (2016). Quaternary stratigraphy and palaeogeography of Poland. *Acta Geologica Polonica*, 66, 403–427. <https://doi.org/10.1515/agp-2016-0018>
- Martinkus, V., Skuodis, Š., & Kelevisius, K. (2012). Rišlių gruntų odometrinio grunto deformacijų modulio ir kūginio stiprio priklausomybė. In *Proceedings of the 15th Conference for Junior Researchers “Science – Future of Lithuania”* (p. 2029–2252).
- Mendoza, C. C., Cunha, P. R., & Lizcano, A. (2015). Mechanical and numerical behavior of groups of screw (type) piles founded in a tropical soil of the Midwestern Brazil. *Computers & Geotechnics*, 67(1). <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.09.010>
- Miller, E. A., & Sowers, G. F. (1958). The strength characteristics of soil-aggregate mixtures & discussion. *Highway Research Board Bulletin*, 183, 16–32. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134279964>
- Mirsayapov, I. T., & Koroleva, I. V. (2019). Deformation of clay soils under regime long-term static loading. *XVII ECSMGE-2019 geotechnical engineering foundation of the future*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0956>
- Mital, U., & Andrade, J. E. (2016). Mechanics of origin of flow liquefaction instability under proportional strain triaxial compression. *Acta Geotechnica*, 11(5), 1015–1025. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0430-8>
- Molén, O. M. (2023). Glaciation-induced features or sediment gravity flows – an analytic review. *Journal of Palaeogeography*, 12(4), 487–545. <https://doi.org/10.1016/j.jop.2023.08.002>
- Molodkov, A., Bolikhovskaya, N. S., & Gaigalas, A. (2002). The last Middle Pleistocene interglacial in Lithuania: Insights from ESR-dating of deposits at Valakampiai, and from stratigraphic and palaeoenvironmental data. *Geological Quarterly*, 46(4), 363–374.
- Moreno-Maroto, M. J., Alonso-Azcárate, J., & O’Kelly, B. C. (2021). Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity. *Applied Clay Science*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105955>

- Morvan, M., Vernay, M., & Breul, P. (2016). Study of the variation of B with Sr. *E3S Web of Conferences*, 9, 10003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160910003>
- Mun, W., Teixeira, T., Balci, C. M., Svoboda, J., & McCartney, J. S. (2016). Rate effects on the undrained shear strength of compacted clay. *Soils & Foundations*, 56(4), 719–731. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.07.012>
- Murat, M. M., & Ozden, G. (2007). Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. *Engineering Geology*, 89, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.10.001>
- Mustapha, A. M., & Alhassan, M. (2013). Overconsolidation ratio of some selected soil deposits in Nigeria. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, 1(4), 183–186.
- Nagaraj, H. B. (2016). Influence of gradation and proportion of sand on stress–strain behavior of clay–sand mixtures. *International Journal of Geo-Engineering*, 7(19). <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0033-8>
- Nguyen, H. B., Rahman, M. M., & Fourie, A. B. (2018). Characteristic behavior of drained and undrained triaxial compression tests: DEM study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(9), 04018060. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001940](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001940)
- Oyedotun, T. D. (2018). X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of Earth materials: A review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 148–154. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>
- Omar, T., & Sadrekarimi, A. (2015). Effect of triaxial specimen size on engineering design and analysis. *International Journal of Geo-Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-015-0006-3>
- Oriligi, E., Berry, S. M., & MacLaughlin, M. M. (2020). Evaluating volumetric strain for identifying the loading stage termination points for the multistage triaxial test: A case study with Utah Coal Specimens. In *54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.
- Paniagua, P., L'Heureux, J. S., Yang, S., & Lunne, T. (2016). Study on the practices for preconsolidation stress evaluation from oedometer tests. *Proceedings of the 17th Nordic geotechnical meeting challenges in Nordic geotechnic*, 547–555
- Panulinova, E., & Harabinova, S. (2020). Determination of deformation properties of soils as input parameters for calculation. In *4th International Scientific Conference Structural and Physical Aspects of Construction Engineering* (p. 310). <https://doi.org/10.1051/matecconf/202031000045>

- Paškauskaitė, J., & Šinkūnas, P. (2014). Correlation of Lithuanian Maritime Pleistocene tills based on their mineralogy. *Geologija*, 56(4), 87–96.
- Patel, A. (2019). Geotechnical investigations and improvement of ground conditions. In *A volume in Woodhead Publishing Series in civil and structural engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01307-9>
- Perez, S. P. (2021). Variation of the mechanical properties of a soil at different states of saturation. *Ingeniería Solidaria*, 17(3). <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2021.03.04>
- Petchko, K. (2018). Chapter 14: Results, discussion, and conclusion. In K. Petchko (Ed.), *How to write about economics and public policy* (p. 271–300). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813010-0.00014-4>
- Pezowicz, P., & Choma-Moryl, K. (2015). Moisture content impact on mechanical properties of selected cohesive soils from the Wielkopolskie Voivodeship Southern Part. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(4), 37–46. <https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0043>
- Phan, V. T. A., Hsiao, D. H., & Nguyen, P. T. L. (2016). Effects of fines contents on engineering properties of sand-fines mixtures. *Procedia Engineering*, 142, 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.034>
- Pincus, H. J., Jefferies, M. G., & Davies, M. P. (1993). Use of CPTu to estimate equivalent SPT N60. *Geotechnical Testing Journal*, 16, 458–468. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128676942>
- Price, A. B., Boulanger, R., & Dejong, J. (2019). Centrifuge modeling of variable-rate cone penetration in low-plasticity silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002145)
- Priest, A. J., & Hayley, L. J. (2019). Strength of laboratory synthesized hydrate-bearing sands and their relationship to natural hydrate-bearing sediment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12556–12575. <https://doi.org/10.1029/2019JB018324>
- Putys, P., Satkūnas, J., & Jusienė, A. (2010). Lietuvos kvartero storumės geologinių struktūrų tūrio įvertinimas. *Geologijos akiračiai*, 3–4, 20–30.
- Rattas, M., Kalm, V., Kihno, K., Liivrand, E., Tinn, O., Tānavsuo-Milkeviciene, K., & Sakson, M. (2010). Chronology of Late Saalian and Middle Weichselian episodes of ice-free lacustrine sedimentation recorded in the Arumetsa section, southwestern Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 59, 125–140. <https://doi.org/10.3176/earth.2010.2.03>

- Reece, S. J. (2021). The impact of grain size on the hydromechanical behavior of mudstones. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(8). <https://doi.org/10.1029/2021GC009732>
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 151–158. <https://doi.org/10.1139/t90-014>
- Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 11, 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>
- Robertson, P. K. (2010). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6), 842–853. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286)
- Robertson, P. K. (2012). James K. Mitchell lecture: interpretation of in-situ tests-some insights. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, 1, 3–24
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- Robertson, P. K., & Campanella, R. G. (1983). Interpretation of cone penetration tests: sands and clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 20, 719–745. <https://doi.org/10.1139/t83-079>
- Robertson, P. K., & Wride, C. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 442–459. <http://dx.doi.org/10.1139/t98-017>
- Robertson, P. K., Campanella, R., Gillespie, D., & Greig, J. (1986). Use of piezometer cone data. *ASCE Specialty Conference in situ '86: Use of in situ Tests in Geotechnical Engineering*, 6, 1263–1280.
- Rudnickaitė, E. (2016). *Lietuvos kvartero nuogulų karbonatingumas kaip litostratigrafinis kriterijus ir paleoklimatinių sąlygų indikatorius* [Daktaro disertacija]. Vilniaus universitetas.
- Ruge, J. C., Palacios, X., Molina-Gómez, F., & Suárez, J. P. R. (2019). Mineralogical, microstructural and porosimetry analysis in three different clayey soils. *Journal of Physics: Conference Series*, 1388(1), 12014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1388/1/012014>
- Sabarishri, K., Premalatha, K., & Arivazhagan, R. (2017). Influence of grain size and its distribution on the deformation modulus and stress strain characteristics of sands. In *Indian Geotechnical Conference 2017 GeoNEst*.

- Sanglerat, G., Nhim, T. V., Sejourne, M., & Andina, R. (1975). Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve. *Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-1, 2*, 337–344.
- Santamarina, J. C., & Díaz-Rodríguez, J. A. (2003). Friction in soils: Micro and macroscale observations. *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4240.0647>
- Saravanan, R., Poongodi, K., Murthi, P., Sudharshan, E., & Gobinath, R. (2020). Effect of particle grain size on its shear strength behaviour of soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 981*, 032079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/3/032079>
- Sarma, D. M., & Sarma, D. (2008). Prediction of consolidation properties of partially saturated clays. *The 12-th International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 2181–2188.
- Satkūnas, J. (2005). *Lietuvos kvartero stratigrafijos schema*. Lietuvos geologijos tarnyba.
- Satkūnas, J., & Bitinas, A. (1995). The lithological composition of Saalian tills in Lithuania as a criterion for lithostratigraphical subdivision. *Acta Geographica Lodziensia, 68*, 173–180.
- Satkūnas, J., & Molodkov, A. (2005). Middle Pleistocene stratigraphy in the light of data from the Vilkiskes site, Eastern Lithuania. *Polish Geological Institute Special Papers, 16*, 94–102.
- Satkūnas, J., Grigienė, A., & Bitinas, A. (2007). Lietuvos kvartero stratigrafinio suskaidymo būklė. *Geologijos akiračiai, 1*.
- Satkūnas, J., Grigienė, A., Velichkevich, F., Robertsson, A. M., & Sandgren, P. (2008). Upper Pleistocene stratigraphy at the Medininkai site, eastern Lithuania: A continuous record of the Eemian-Weichselian sequence. *Boreas, 32*(4), 627–641. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2003.tb01240.x>
- Schmertmann, J. H. (1978). *Guidelines for cone penetration test, performance and design, report No. FHWA-TS-78-209*. United States. Federal Highway Administration.
- Senneset, K., & Janbu, N. (1985). Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests. *Strength Testing of Marine Sediments – Laboratory and in-situ Measurements, 41–54*. <https://doi.org/10.1520/STP36328S>
- Shahin, M. A., & Cargeeg, A. (2011). Experimental investigation into multistage versus conventional triaxial compression tests for a C-Phi

- soil. *Advances in Civil Engineering, ICCET 2011*, 90, 28–32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.28>
- Shahri, A. A., Malehmir, A., & Juhlin, C. (2015). Soil classification analysis based on piezocone penetration test data – a case study from a quick-clay landslide site in southwestern Sweden. *Engineering Geology*, 189(14), 32–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.10.013>
- Sheng, D., Kelly, R., Pineda, J., & Bates, L. (2014). Numerical study of rate effects in cone penetration test. *3rd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'14)*, 419–428.
- Shi, C., Yang, J., Chu, W., Tang, H., & Zhang, Y. (2021). Macro- and micromechanical behaviors and energy variation of sandstone under different unloading stress paths with DEM. *International Journal of Geomechanics*, 21(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002106](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002106)
- Shu, R., Kong, L. W., Liu, B., & Juntao, W. (2021). Stress–strain strength characteristics of undisturbed granite residual soil considering different patterns of variation of mean effective stress. *Applied Sciences*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/app11041874>
- Sibul, I., Plado, J., & Jõelet, A. (2017). Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography for mapping bedrock topography and fracture zones: A case study in Viru-Nigula, NE Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 66, 142–151. <https://doi.org/10.3176/earth.2017.11>
- Simpson, D. C., & Evans, T. M. (2016). Behavioral thresholds in mixtures of sand and kaolinite clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 4015073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001391)
- Skuodis, Š., Dirgelienė, N., & Lekstutytė, I. (2019). Change of soil mechanical properties due to triaxial sample size. In *13th International Conference Modern Building Materials, Structures And Techniques* (p. 470–474). <https://doi.org/10.3846/mbmst.2019.006>
- Sodré, D. J. R. (2022). Cone penetration index for soil behaviour type prediction. *Scientific Reports*, 12(1), 12412. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15994-x>
- Song, C., Bekele, B., & Silvey, A. (2019). Pore pressure responses of overconsolidated soils in a partially drained piezocone penetration test. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(4), 4019017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001594](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001594)
- Sorensen, K. K., & Okkels, N. (2013). Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays.

- In *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (p. 423–428).
- Strani, F., Sardella, R., & Mecozzi, B. (2021). An overview of the middle pleistocene in the North Mediterranean Region. *Alpine & Mediterranean Quaternary*, 34(1), 5–16. <https://doi.org/10.26382/AMQ.2021.13>
- Stroeven, A. P., Hättestrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., Fredin, O., Goodfellow, B. W., Harbor, J. M., Jansen, J. D., Olsen, L., Caffee, M. W., Fink, D., Lundqvist, J., Rosqvist, G. C., Strömberg, B., & Jansson, K. N. (2016). Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews*, 147, 91–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>
- Sun, D., Sun, W., & Xiang, L. (2010). Effect of degree of saturation on mechanical behaviour of unsaturated soils. *Computers & Geotechnics*, 37(5), 678–688. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.04.006>
- Šeirienė, V., Karabanov, A., Rylova, T., Baltrūnas, V., & Savchenko, I. (2015). The Pleistocene stratigraphy of the south-eastern sector of the Scandinavian glaciation (Belarus and Lithuania): A review. *Baltica*, 28(1), 51–60. <https://doi.org/10.5200/baltica.2015.28.06>
- Šeirienė, V., Šinkūnas, P., Stančikaitė, M., Kisielienė, D., & Gedminienė, L. (2019). Late Middle Pleistocene interglacial sediments from Buivydžiai site, eastern Lithuania: A problem of chronostratigraphic correlation. *Quaternary International*, 534, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.006>
- Šimkus, J. (1987). *Gręžtinių pamatų projektavimas ir statyba. Gruntų tyrimas statinių zondavimu. Metodikos nurodymai*. VISI.
- Šimkus, J., Alikonis, A., & Sidauga, B. (1973). *Lietuvos TSR gruntų statybinės savybės*. Mintis.
- Šinkūnas, P., & Jurgaitis, A. (1998). *Lėdyninių nuogulų litologija ir sedimentacija*. Academia.
- Šliaupa, A. (2004). Prekvartero uolienu paviršius. In *Lietuvos Žemės gelmių raida ir ištekliai* (p. 254–258). Vilnius.
- Štuhec, D., Ivandić, K., Strelec, S., & Dodigović, F. (2019). The analysis of some cohesive soils engineering. In *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0876>
- Tamošiūnas, T., Skuodis, Š., & Žaržojus, G. (2020). Overview of the Quaternary sediments deformation modulus dependence on testing methodology. *Baltica*, 33(2), 191–199. <https://doi.org/10.5200/baltica.2020.2.6>

- Tamošiūnas, T., Žaržojus, G., & Skuodis, Š. (2022). Indirect determination of soil young's modulus in Lithuania using cone penetration test data. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 17(2), 1–24. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2022-17.558>
- Tang, C. S., Cheng, Q., Gong, X., Shi, B., & Inyang, I. H. (2023). Investigation on microstructure evolution of clayey soils: A review focusing on wetting/drying process. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1), 269–284. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.004>
- Teisės aktų registras. (2015). *Projektinių inžinerinių geologinių ir geotechninių tyrimų rekomendacijos (TAR 2015-11-16, Nr. 18162)*. <https://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/d7af4ab08ca511e59c9a8f8c9980906b?jfwid=>
- Teisės aktų registras. (2019). *Inžinerinių geologinių ir geotechninių tyrimų gruntų klasifikacijos patvirtinimas (TAR 2019-06-14, Nr. 2019-09653)*. <https://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAP/7402b83086a211e98a8298567570d639?positionInSearchResults=8&searchModelUUID=42e25b0d-edb0-4aa0-9732-68f09551129f>
- Thajeel, J. K., Adel, R., Ali, H. M., & Shakir, R. R. (2022). Effect of the covariance matrix type on the CPT based soil stratification utilizing the Gaussian mixture model. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 492–500. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0049>
- Thermann, K., Gau, C., & Tiedemann, J. (2006). Shear strength parameters from direct shear tests—influencing factors and their significance. *The Geological Society of London*, 484. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:194162527>
- Tiwari, B., & Ajmera, B. (2018). Soil Laboratory Tests. In *Encyclopedia of Engineering Geology* (p. 853–871). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_304
- Todisco, M. C., & Coop, M. R. (2019). Quantifying “transitional” soil behaviour. *Soils & Foundations*, 59(6), 2070–2082. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.014>
- Toyota, H., Takada, S., & Susami, A. (2019). Rate dependence on mechanical properties of unsaturated cohesive soil with stress-induced anisotropy. *Soils & Foundations*, 59(4), 1013–1023. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.04.001>
- Tong, C. X., Liu, H. W., & Li, H. C. (2022). Constitutive modeling of normally and over-consolidated clay with a high-order yield function. *Mathematics*, 10(9), 1376. <https://doi.org/10.3390/math10091376>

- Urbaitis, D., Lekstutyte, I., & Gribulis, D. (2016). Overconsolidation ratio determination of cohesive soil. In *13th Baltic Sea Geotechnical Conference* (p. 108–113). <https://doi.org/10.3846/13bsgc.2016.014>
- Vallejo, E. L. (2001). Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, *38*(5), 1097–1104. <https://doi.org/10.1139/t01-029>
- Vallejo, E. L., & Mawby, R. (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material–clay mixtures. *Engineering Geology*, *58*(2), 125–136. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00051-X)
- Valsson, S. (2016). Detecting quick clay with CPTu. In *17th Nordic Geotechnical Meeting: Challenges in Nordic Geotechnics* (p. 143–152).
- VandenBerge, R. D., Duncan, J. M., & Brandon, L. T. (2015). Limitations of transient seepage analyses for calculating pore pressures during external water level changes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(5), 04015005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001283)
- Venkatramaiah, C. (2006). *Geotechnical engineering. New age international.* Ltd Publishers
- Vernay, M., Morvan, M., & Breul, P. (2019). Evaluation of the degree of saturation using Skempton coefficient B. *Geomechanics & Geoengineering*, *15*(2), 79–89. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1620349>
- Vondráčková, T., Kmec, J., Čejka, J., Bartuška, L., & Stopka, O. (2016). Evaluation of the parameters affecting the cohesion of fine grained soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *44*(2), 022019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/2/022019>
- Wachecka-Kotkowska, L., Krzyszkowski, D., Wieczorek, D., Boswell, S., & Myśkow, E. (2021). Lithopetrographic and geochemical features of the Saalian tills in the Szczerców outcrop (Poland) in various deformation. *Open Geosciences*, *13*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0186>
- Wagner, J. F. (2013). Chapter 9: Mechanical properties of clays and clay minerals. In F. Bergaya & G. Lagaly (Eds.), *Handbook of Clay Science, Vol. 5* (p. 347–381). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0>
- Wang, Y., Li, K., Li, J., & Tang, S. (2021). Influence of soil particle size on the engineering properties and microstructure of a red clay. *Applied Sciences*, *11*(22), 10887. <https://doi.org/10.3390/app112210887>
- Wang, Y. K., Wan, Y. S., Ruan, H., Yu, X., Shao, J. G., & Ren, D. B. (2021). Pore pressure accumulation of anisotropically consolidated soft clay

- subjected to complex loads under different stress paths. *China Ocean Engineering*, 35, 465–474. <https://doi.org/10.1007/s13344-021-0043-y>
- Wang, L., Sun, D., Yao, Y., Wu, L., & Xu, Y. (2020). Kinematic limit analysis of three-dimensional unsaturated soil slopes reinforced with a row of piles. *Computers & Geotechnics*, 120, 1034428. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103428>
- Wang, Q., Kong, Y., Zhang, X., Ruan, Y., & Chen, Y. (2016). Mechanical effect of pre-consolidation pressure of structural behaviour soil. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 51, 987–994. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2016.05.023>
- Wang, S., & Wu, W. (2020). A simple hypoplastic model for overconsolidated clays. *Acta Geotechnica*, 16, 21–29. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01000-z>
- Wang, S., Wu, W., Zhang, D., & Kim, J. R. (2020). Extension of a basic hypoplastic model for overconsolidated clays. *Computers & Geotechnics*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103486>
- Wdowska, M., & Lipiński, J. M. (2023). Reliability of methods for determination of stress history parameters in soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 1–12. <https://doi.org/10.2478/sgem-2023-0017>
- Wei, H., Liu, H., Xiaoxiao, L., Zhao, T., Wu, Y., Shen, J., & Yin, M. (2023). Effect of stress path on the mechanical properties of calcareous sand. *Underground Space*, 9, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.06.003>
- Williams, M., Dunkerley, D., Decker, P. D., Kershaw, P., & Chappell, J. (1998). Quaternary sea-level changes. In *Quaternary environments* (p. 107–125).
- Wrzesinski, G., Pawluk, K., Lendo-Siwicka, M., & Miskowska, A. (2019). Undrained shear strength anisotropy of cohesive soils. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (p. 471). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/4/042006>
- Wu, P., Li, Y., Wang, L., Wang, L., Sun, X., Liu, W., & Song, Y. (2021). Triaxial tests on the overconsolidated methane hydrate-bearing clayey-silty sediments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109035>
- Wu, X., Ghafghazi, M., Tian, Y., Chow, S., & Liu, Z. (2023). Numerical modelling of drained and undrained cone penetration tests. *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. London, UK. <https://doi.org/10.53243/NUMGE2023-143>
- Xiang, G., Song, D., & Chen, Z. (2020). Investigated stress-strain relationships of municipal solid waste incineration bottom

- ashincineration bottom ash. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2431–2448. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1845823>
- Xu, Y., Guo, P., Zhu, C., Lei, G., & Cheng, K. (2021). Experimental investigation into compressive behaviour and preconsolidation pressure of structured loess at different moisture contents. *Geofluids*, 2021, 5585392. <https://doi.org/10.1155/2021/5585392>
- Zamin, B., Nasir, H., Mehmood, K., Iqbal, Q., Farooq, A., & Tufail, M. (2021). An experimental study on the geotechnical, mineralogical, and swelling behavior of KPK expansive soils. *Advances in Civil Engineering*, 8493091. <https://doi.org/10.1155/2021/8493091>
- Zelčš, V., & Markots, A. (2004). Deglaciation history of Latvia. *Developments in Quaternary Sciences*, 2, 225–243. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(04\)80074-5](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(04)80074-5)
- Zelčš, V., & Nartišš, M. (2014). Outlines of the quaternary geology of Latvia. In *INQUA Peribaltic Working Group Meeting and Field Excursion in Eastern and Central Latvia* (p. 9–15). <https://doi.org/10.22364/lqtpsh.2014.16>
- Zelčš, V., Markots, A., Nartišš, M., & Saks, T. (2011). Pleistocene glaciations in Latvia. In J. Ehlers, P. L. Gibbard, & P. D. Hughes (Eds.), *Quaternary glaciations – extent and chronology* (p. 221–229), 15. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00018-0>
- Zeng, L. L., & Chen, X. P. (2009). Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 30(5), 1264–1270.
- Zhafirah, A., Somantri, A. K., & Permana, S. (2019). Analysis of oedometer and rowe cell consolidation compared to experimental testing. *Journal of Physics Conference Series*, 1402, 22006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/2/022006>
- Zhai, Q., Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Dai, G. (2019a). Estimation of unsaturated shear strength from soil–water characteristic curve. *Acta Geotechnica*, 14, 1977–1990. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00785-y>
- Zhai, X., & Horn, R. (2019b). Dynamics of pore functions and gas transport parameters in artificially ameliorated soils due to static and cyclic loading. *Geoderma*, 337, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.039>
- Zhang, D., Luo, F., Zhu, Z., Liu, J., Li, J., Li, B., & Xue, T. (2021). Study on mechanical properties of gravelly sand under different stress paths. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 8898814. <https://doi.org/10.1155/2021/8898814>

- Zhang, J., Meng, Q., Guo, L., Zhang, Y., Wei, G., & Liu, T. (2022). A case study on the soil classification of the Yellow river delta based on piezocone penetration test. *Acta Oceanologica Sinica*, *41*(4), 119–128. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1944-6>
- Zhao, Y., Liu, J., Hua, L., Kong, L., Sang, S., & Yuan, Q. (2023). Mechanical characteristics of overconsolidated hydrate-bearing clayey-silty sediments with various confining pressures. *Acta Geotechnica*, *18*(4). <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01773-5>
- Zhuang, H., Wang, J., & Gao, Z. (2022). Anisotropic and noncoaxial behavior of soft marine clay under stress path considering the variation of principal stress direction. *International Journal of Geomechanics*, *22*(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002390](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002390)

SUMMARY

1. INTRODUCTION

Formulation of the problem. Till fine soil is a mixture of gravel, sand, silt, and clay resulting from glacial processes and it undergoes erosion, transportation, and deposition during several glacial and periglacial cycles. This soil exhibits highly variable composition, structure, and properties. Undisturbed soil sampling in field conditions is challenging due to its complex composition, which includes a significant amount of gravel and boulders. A review of the formation and properties of till soils (Lee, 2018) suggests that such composite soils should be further classified according to their lithology to establish connections between the processes that affected them, the physical properties of the soils, and their mechanical behaviour.

Relevance of the dissertation. Significant climatic changes and global instability occurred during the Pleistocene epoch of the Quaternary period, particularly in Europe (Banerji et al., 2022). Glacial processes formed soils during this geological age, that are now predominant in most of Lithuania's territory. This scientific work focuses on studying Middle Pleistocene glacial formations predominantly concentrated near the surface in the country's southeastern part. These formations emerge on the surface, shaping the terrain, and are not overlain by later glacial deposits (Satkūnas & Bitinas 1995; Satkūnas et al., 2008; Molodkov et al., 2002).

Understanding the age of soils is essential for soil identification and engineering geology purposes. Engineering geologists can evaluate the composition, physical, and mechanical properties of soils and their interactions with applied loads or other impacts after thoroughly studying their formation process (genesis and accumulation) (Clarke, 2018). The composition of till soil deposits of different ages directly correlates with the lithology of the pre-Quaternary rocks transported alongside them during glacial activity. Such factors as the quantity of transported rock particles, glacier direction, and velocity influence the composition. This fundamental relationship between processes is crucial for identifying till soil deposits from various periods (Paškauskaitė, 2014; Molén, 2023). Therefore, studies focusing on their mineral and chemical composition are critical for evaluating the origin and development of soils.

The next step in soil identification involves its classification and distinguishing of the type of soil. The most used classification systems for the types of soil rely on physical (structural) characteristics such as granulometric

composition and plasticity (Moreno-Maroto et al., 2021). However, there is significant uncertainty surrounding simple physical parameters determined in disturbed soil samples and their behaviour under field conditions. Laboratory soil testing serves as a standard method for determining the type of based on physical properties. Additionally, field test methods such as CPT and CPTu are employed to evaluate soil behaviour during loading. Ideally, soils should be classified according to essential behavioural characteristics related to field-based soil behaviour under loading. Although practitioners rarely do it, implementing a combined classification based on both physical and behavioural characteristics would be beneficial.

The soil behaviour classification schemes, developed and continually updated by Peter K. Robertson, are widely regarded as the most thoroughly researched and utilized globally. These classifications categorize soil based on its behaviour (SBT) under mechanical impact. However, in Lithuania, soil classification relies on its physical properties, namely granulometric composition and plasticity. The evolving standards of soil classification frequently result in the changes in the name of the soil, particularly for fine soil types. The calculation of soil deformation modulus in Lithuania still relies on correlations derived from classification systems that are no longer considered valid. The application of these derived equations is predicated on the established name of the soil and has not been adjusted to accommodate updated soil classifications. Consequently, a problem arises during soil classification in Lithuania: incorrect names of the soil are assigned based on disparate standards, leading to inaccurate and inappropriate estimates of the indirect soil deformation modulus (Tamošiūnas et al., 2022) Furthermore, the variation in soil mechanical indicators is determined not only by the physical condition of the soil but also by testing conditions (Saravanan et al., 2020). Soils are subjected to various external factors during testing, including specific test conditions, stresses, and drainage. Therefore, it is essential to understand how the chosen test conditions can impact the obtained results for accurate interpretation.

Aim of the dissertation – to determine and evaluate the composition, physical, and mechanical properties of the terrain forming Middle Pleistocene till fine soils, as well as to correlate the indicators determining the change in soil properties, which define the main factors influencing the changes in the properties and behaviour of the soil.

Research object – the terrain forming Middle Pleistocene till fine soil, its composition, and indicators of physical and mechanical properties.

Classification of mechanical behaviour of soils and practical application to the Middle Pleistocene till fine soil. Additionally, the effect of different triaxial compression test conditions on the obtained results.

Objectives of the dissertation

1. To select, analyze, and systematize the results of scientific research on Middle Pleistocene era, emphasizing the interrelationships between physical and mechanical properties, the influence on mechanical behaviour of the soil, and the importance of soil classification systems.

2. Collect and compile a database of terrain forming Middle Pleistocene till fine soils.

3. Prepare selected samples for studies on mineral and chemical composition.

4. Provide recommendations for further studies on mineral and chemical composition to identify outliers.

5. To analyze classifications of soil mechanical behaviour and evaluate their applicability to Middle Pleistocene till fine soil.

6. To conduct data analysis on physical and mechanical properties of the investigated soil, including determining interrelationships, correlation dependencies, and their influence on mechanical behaviour. Additionally, perform tests using a triaxial compression apparatus under various conditions and analyze the results to establish the influence of the chosen methodology on the obtained data.

Scientific novelty of the dissertation

1. The mineral and chemical composition of the terrain forming Middle Pleistocene till fine soils has been evaluated, yielding insights to facilitate identification of the soil under study.

2. An analysis of classifications of mechanical behaviour of soil has been conducted. Adhering to the principles of classification, adaptability is proposed for analysing mechanical indicators of Lithuanian till fine soils.

3. Empirical equations have been derived to determine the connection between physical and mechanical properties of the soil under study. The overconsolidation coefficient of the Middle Pleistocene till fine soil has been evaluated, along with its corresponding value.

4. Evaluation of the behaviour of soils and the dispersion of results under different conditions of the triaxial compression test.

Practical value of the research findings

1. The research has supplemented the results on the mineral and chemical composition of the terrain forming Middle Pleistocene till fine soil. These findings can be utilized in analysing changes in the granulometric composition of the soil, assessing physical and mechanical properties, and distinguishing differences in soil age.

2. Peter K. Robertson's classification, exemplified by the terrain forming Middle Pleistocene till fine soil, offers applicability in engineering geological and geotechnical studies. It enables the evaluation of the behaviour of the soil and the correlation of mechanical indicators.

3. Correlational dependencies of physical and mechanical indicators, determined during the comparative analysis of properties and confirmed by experiments, enable a more reliable analysis of till fine soils for engineering purposes.

4. The principles of lightly overconsolidated transitional soils ($OCR < 4$) mechanics can apply to terrain forming Middle Pleistocene till fine soil.

Defended statements

1. The Middle Pleistocene till fine soil that forms the terrain of Southeastern Lithuania exhibits a mineral and chemical composition characterized by a higher concentration of minerals from transported deposits during the exaggeration of pre-Quaternary rocks and their subsequent accumulations. The identified chemical and mineral composition of the soil under study can serve as one of the methods for soil identification.

2. After classifying and typifying the Middle Pleistocene till fine soil under investigation according to Peter K. Robertson's classifications, the behaviour of the soil is assessed. The soil can be categorized into groups based on these classifications, enabling the determination of dependencies between physical and mechanical properties.

3. Mechanical properties of the terrain forming Middle Pleistocene till fine soil can be evaluated based on the ratio of natural moisture content, clay fraction content, and cone resistance. These are the primary characteristics influencing the values of mechanical properties.

4. The composition and mechanical properties of the terrain forming Middle Pleistocene till fine soil are varied. When assessing the behaviour of the soil under mechanical impact, the mechanics of lightly overconsolidated soils ($OCR < 4$) can be applied, considering both the overconsolidation ratio and theoretical assumptions.

Approval of the research findings

Based on the dissertation results, two papers have been published in peer-reviewed scientific journals, and four reports have been prepared and presented at international conferences.

Structure of the dissertation

The dissertation comprises the following sections: introduction, research and literature review, methodology, results, conclusions, bibliography, summary, and seven annexes. The dissertation spans 192 pages and draws from 304 literary sources. It is written in Lithuanian and includes 30 tables and 58 figures

2. MIDDLE PLEISTOCENE FINE-GRAINED TILL SOIL RESEARCH IN LITHUANIA, PROBLEMS AND CHALLENGES

In Lithuania, the total thickness of the sedimentary cover varies from 300 to 2.500 meters, with Quaternary deposits averaging between 80 to 120 meters (Bickauskas et al., 2011; Guobytė & Satkūnas, 2011). According to the Lithuanian Quaternary stratigraphic scheme (Satkūnas, 2005), which is based on the age of soil formation, the largest geomorphological complexes shaping the country's terrain were formed during the period of Upper Pleistocene Nemunas glaciation (Fig. 2.1). The Middle Pleistocene period sediments covered the territory before Upper Pleistocene glaciation. The Middle Pleistocene glaciation occurred approximately 195–128 thousand years ago, leaving formations distributed across Lithuania's territory. These formations shaped the terrain and remained uncovered by later glaciers only in the southeastern part of the country, covering about 1,459.6 km² (2.25%) of the land, and the prevailing soil is glacial till soil (Satkūnas & Bitinas, 1995; Satkūnas et al., 2008; Molodkov et al., 2002; Gregorauskienė & Bitinas 2017).

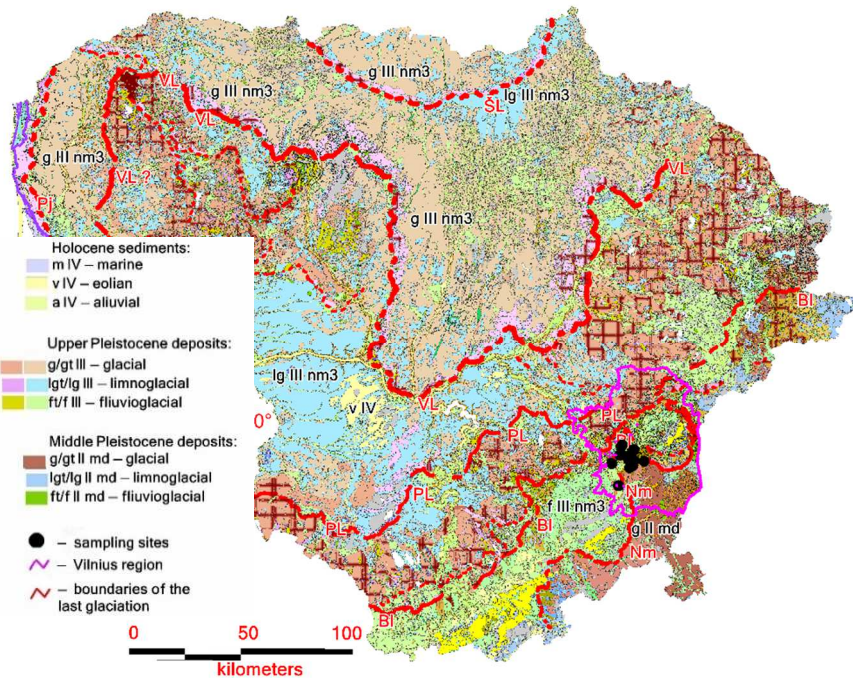


Fig. 2.1. Geomorphological map of Lithuania. M 1:200,000 (Guobytė, 1999) from the geological information system GEOLIS (www.lgt.lt) with indicated investigated soil sample locations of the terrain forming Middle Pleistocene

Considering the prevalence of till soils in Lithuania, it is crucial to classify them based on their physical properties and lithology (Lee, 2018). This approach facilitates correlating the influencing processes with the physical properties of the soils and their mechanical behaviour. However, despite the potential benefits of a combined classification approach, significant uncertainty persists regarding the correlation between the basic physical parameters determined in undisturbed soil samples and the actual soil behaviour under field conditions. Ideally, soils should be classified according to key behavioural characteristics that strongly correlate with the behaviour of soils under loading in field conditions (Cai et al., 2011; Bol, 2013). While a combined classification based on both physical and behavioural characteristics would be advantageous, it requires further investigation and refinement.

Soil behaviour under field conditions can be identified through cone penetration test (CPT). This test is the most widely used method in engineering geology and geotechnics for field soil testing, primarily due to its efficiency and continuous measurement capabilities throughout the test (Wu

et al., 2023). As the cone responds to the mechanical behaviour of the soil, soil types are grouped into categories that exhibit similar mechanical behaviour rather than relying solely on physical properties, as determined by conventional laboratory soil testing.

Methods for soil type classification based on CPT and CPTu are typically presented graphically (Sodré, 2022). The classification schemes developed by Peter K. Robertson are widely regarded as the most popular and commonly used systems. Summarizing all updates to soil behaviour type schemes (Robertson et al., 1986; Robertson, 1990, 2009, 2016), it is emphasized that engineering geologists and geotechnicians are consistently more concerned with the behaviour of soils under field conditions than with classifying soils based solely on their granulometric composition and plasticity.

Currently, soil classification used in Lithuania involves categorizing soils into groups based on the type of soil established through laboratory tests, as well as considering density and strength, followed by the calculation of the deformation modulus (TAR, 11/16/2015, No. 18162). In 1984, Albertas Brilingas, Henrikas Valiulis, and Vytautas Ignatavičius (Brilingas, 1988; Šimkus, 1987) presented correlational relationships between soil deformation modulus and cone resistance (Table 2.1) for specific soil types. It is important to note that to establish these relationships, soil E was obtained during field tests using a static plate (5.000 cm² plate according to GOST 12374-77 methodology). The obtained correlations rely on the proportionality factor α (Sanglerat et al., 1975), which is contingent upon the type of soil and its properties (Šimkus, 1987). However, the soil types and names referenced no longer align with the presently utilized classifications of soil types. These equations were applied using the GOST 25100-82 classification. Since 1987, when the correlation dependencies of soil deformation modulus were derived, four soil classification standards or recommendations have already been changed. The most significant differences in the classifications and recommendations have emerged in the name of fine soils, as the percentage limit between the fine and coarse fraction (from the fine/coarse ratio of 40/60% to the current fine/coarse ratio of 35/65%) has been changed.

Table 2.1. Correlation dependencies between soil deformation modulus and cone resistance (Brilingas, 1988; Šimkus, 1987)

<i>Soil description</i>	<i>Correlation</i>
General equation	$E = \alpha \cdot q_c$
Till loam	$E = 7.4 \cdot q_c + 7.2$

<i>Soil description</i>	<i>Correlation</i>
Till loam and sandy loam, when $6.5 < q_c < 30$ MPa	$E = 2.85 \cdot q_c + 23.9$
Silty sandy loam	$E = 5 \cdot q_c$
Silty loam	$E = 7 \cdot q_c$
Clay	$E = 8.2 \cdot q_c - 3.1$
Clay (consistency from firm to soft)	$E = 8.0 \cdot q_c$
Medium density and dense sand, when $q_c > 5.0$ MPa	$E = 7.8 \cdot q_c^{0.71}$
Loose sand, when $q_c < 5.0$ MPa	$E = 3 \cdot q_c$

Thus, the calculation of soil deformation modulus still relies on the derived initial correlations. Following a comparative study on soil with identical granulometric composition, different soil names were selected based on various classifications. Subsequently, the deformation modulus was calculated according to the designated name. These varied soil names resulted in significant discrepancies in deformation modulus values despite analysing the same soil but under different classification systems. The conclusion was made that different soil names are determined based on different standards. Consequently, the correlations for the deformation modulus were wrongly applied to estimate the indirect soil deformation modulus (Tamošiūnas et al., 2022).

The characterization of mechanical properties as deformation modulus and etc. of till soils is a complex task due to their diverse structure, composition, and geological subsidence conditions. Additionally, proper sampling techniques are crucial to avoid disturbance of the sample during transportation and testing (Clarke, 2018). Literature sources often mention that experimental and theoretical studies of soil behaviour frequently focus on ideal soils, such as ideally saturated, consolidated clay, or homogeneous sand (Khasanov & Khasanov, 2020; Yin et al., 2021; Tang et al., 2023).

The main factors that determine the deformation and strength indicators and the response of the soil under the action of an external force are the size of the particles that make up the soil, the amount of fine fraction, and moisture content. Lastly, various test conditions of the soil itself, the overconsolidation ratio, the stress-strain relationship, existing pore pressure, and the degree of saturation also directly affect the mechanical properties of the soil under external loading. Any alteration in the physical properties of the fine soil or the mentioned indicators of soil condition will consequently lead to a change in its strength and stability (Saravanan et al., 2020).

3. DATA AND METHODS

The process of preparing this scientific work and the methods that aided in achieving the research objectives and formulating tasks can be divided into several main stages: literature analysis, research, and data analysis. For the implementation of this work, a work preparation scheme was drafted (Fig. 3.1). This scheme illustrates the data and research methods applied for achieving the established aim and objectives of work.

This scientific work analyzes the changes in the composition, physical, and mechanical properties of the terrain forming Middle Pleistocene till fine soil, which influence alterations in all the properties and the general behaviour of the soil.

The methods and principles employed in this work are described below.

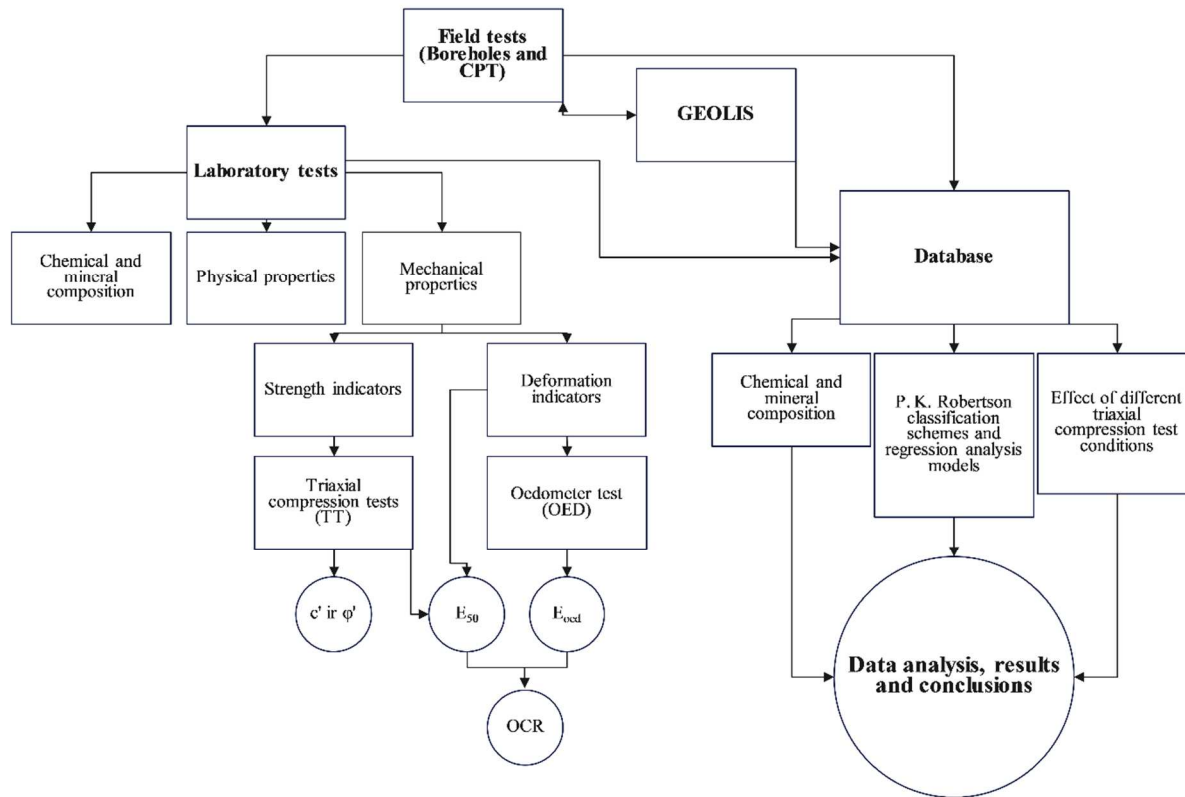


Fig. 3.1. Research framework of a scientific paper outlining the sequence of work

3.1. Field and laboratory tests

This research gathered information from 160 undisturbed samples extracted from 90 boreholes alongside cone penetration tests (CPT) conducted at 30 locations. The author of this paper has investigated as many as 30 of the samples (from 10 boreholes) through laboratory research methods, while the information on the remaining 130 samples was sourced from the geological information system GEOLIS (www.lgt.lt).

For chemical and mineral composition research, X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscope (SEM) methods were selected to determine the chemical and mineral composition of the soil under investigation.

During the research, the main physical properties were determined, including granulometric composition (ISO 17892-4:2016), natural density (ISO 17892-2:2015), density of solid particles (ISO 17892-3:2015), natural moisture (ISO 17892-1:2015), Atterberg limits (ISO 17892-12:2018), porosity, and void ratio. A total of 160 sets of physical properties of samples were conducted and summarized

For the determination of mechanical properties the deformation indicators of soil, specifically the oedometric modulus of deformations, were used through compressive strength (oedometer) tests, employing the incremental loading soil test method (ISO/TS 17892-5:2017).

The other essential method employed in this research was the determination of strength and deformation indicators through triaxial compression tests (ISO 17892-8:2018; ISO 17892-9:2018). Triaxial compression tests were conducted under varying test conditions using diverse methodologies. In the first phase of the triaxial test, single-stage (conventional CTT) and multi-stage (MTT) test methodologies were employed (Hormdee et al., 2012). In the second stage, samples of varying sizes were tested with a height-to-diameter ratio of 2, when ($H = 100$ mm, $D = 50$ mm) and ($H = 200$ mm, $D = 100$ mm). Five different test conditions were employed in the third experimentation stage to acquire mechanical indicators for determining the final result. The first test series of soil was conducted under unsaturated consolidated and undrained (UCU) condition; the second series under saturated consolidated drained (SCD) condition; the third one under unsaturated consolidated drained (UCD) condition, the fourth series under saturated consolidated undrained (SCU) condition, and the fifth series was conducted under unsaturated and undrained (UUU) condition.

3.2. Peter K. Robertson's classification schemes

One of the objectives of the study is to determine the feasibility of applying Peter K. Robertson's international soil behaviour classification to the investigated soil

Initially, based on the q_c , f_s , and R_f obtained during cone penetration tests, the soil was classified according to Peter K. Robertson's (1990) general scheme. Subsequently, Peter K. Robertson's (2009) classification was utilized for further categorization based on the soil behaviour index (I_c) into behaviour groups of clay ($I_c = 2.95-3.6$), silt mixtures ($I_c = 2.95-2.6$), and sand mixtures ($I_c = 2.6-2.05$) (Table. 3.1).

Table 3.1. Soil types used in P. K. Robertson's classification schemes

<i>Soil type zones in the scheme. (Robertson, 1990)</i>	<i>Soil types zone in the scheme according to I_c (Robertson, 2009)</i>	<i>Soil type zones in the scheme. (Robertson, 2016)</i>
1		CCS
2	>3.6	CC
3	2.95–3.6	CC/CD
4	2.60–2.95	TC/TD
5	2.05–2.6	SC/SD
6	1.31–2.05	SD/SC
7	<1.31	SD
8		SD/TD
9		CD

Furthermore, another scheme proposed by Peter K. Robertson (2009) that was and updated incorporating the introduction of zones for dilatative and contracting soils (Robertson, 2010), as well as transitional soils (Robertson, 2016), was examined. This updated classification divides soil into new zones: clay-like dilatative (CD), clay-like contractive (CC), transitional dilatative (TD), transitional contractive (TC), sand-like dilatative (SD), and sand-like contractive (SC). The areas of soil types analysed in this research paper are highlighted in Table 3.1.

3.3. Regression analysis model

Models and their equations have been developed to determine correlations between physical indicators of soil and identify those exerting the most significant influence on its mechanical behaviour. Initially, the research

employed the classification schemes by Peter K. Robertson (Robertson, 2009; 2016) described earlier, and divided the studied soils based on their behaviour. Next, data clustering was conducted based on cone resistance, distinguishing three main groups: $q_c = 1\text{--}5$ MPa, $5\text{--}10$ MPa, and > 10 MPa, selected based on the predominant patterns of soil strength.

A multinomial regression analysis was conducted to fulfill the research objective. This analysis, along with the models developed therein, aids in interpreting the impact of various variables (physical and mechanical properties of the soil) and predicting the expected output results (deformation modulus and effective friction angle). In this study, the regression analysis began with the selection of variables, with the final variables comprising the physical properties (natural moisture content, clay fraction content, plasticity index) and mechanical properties (cone resistance).

The outcome of the interaction among the selected variables is the modeled oedometric deformation modulus (denoted by the letter S , index E_{Soed}) and the modeled effective angle of internal friction (denoted by the letter S , index ϕ'_s). These modeled soil indicators were compared with the determined variables: the oedometric modulus of deformation (E_{Noed}) determined during laboratory tests (marked by the letter N index) and the effective angle of internal friction (ϕ'_N) determined (marked by the letter N index). In the analysis the determined E_{Noed} and modeled E_{Soed} under applied loads of 0.2 and 0.4 MPa, selected to represent the most common loads affecting the soil.

4. ANALYSIS OF RESEARCH DATA AND SUMMARY OF RESULTS

4.1 Estimating the age of investigated soils

After analysing the data in this study, the investigated soil is classified as glacial fine sediments from the terrain forming Middle Pleistocene Medininkai glaciations (g, gt II md), which are only exposed in the southeastern part of Lithuania and not covered by later glaciers. Conclusions regarding the age of the soil were drawn based on analysed sources such as the geomorphological map (Guobytė, 1999), deglaciation map (Guobytė, 2014), and Quaternary stratigraphic scheme (Satkūnas, 2005). Additionally, geological cross-sections were drawn and correlated based on absolute heights, the composition of geological layers, and the nature of layer subsidence, and comparisons were made; boreholes data obtained from engineering geological surveys during boreholes drilling (Annex 1–4).

4.1.2 Mineral and chemical composition

The spectral analysis results of oxides and the overall chemical composition of the analysed soil using an X-ray fluorescence analyzer reveal several noteworthy elements: Ti, Mn, Zr, and Cu. These elements are indicated as weathering-resistant clastogenic elements. The elements are present in the till Medininkai high deposits (Satkūnas & Bitinas, 1995; Gregorauskienė & Bitinas, 2017). According to the data from the Geochemical Atlas of Lithuania, this particular geological hill is composed of Middle Pleistocene sediments (Kadūnas & Gregorauskienė, 1999; Kadūnas et al., 2002).

The chemical analysis results obtained with the help of a scanning electron microscope show that the clay minerals constituting the soils of the Middle Pleistocene period have a higher content of CaO compared to Upper Pleistocene sediments. In Upper Pleistocene sediments, the quantity of calcium oxide varies from 0.31 to 5.52 % (with an average of 2.07 %), while in the terrain forming Middle Pleistocene, it ranges from 0.31 to 12.88 % (with an average of 3.21 %).

During the study of the mineral composition of the clay fraction of the investigated soil using an X-ray diffractometer, the data were analysed and compared with the analyses of the clay fraction of the till soil from the Upper Pleistocene Nemunas glaciation. After analysing the obtained diffractograms and the percentage amounts of minerals, the main difference between these soils of two different ages was the quantity of dolomite mineral. Dolomite minerals vary from 3.2 % to 14.0 % in the investigated Middle Pleistocene samples and from 0.8 % to 2.8 % in the Upper Pleistocene samples.

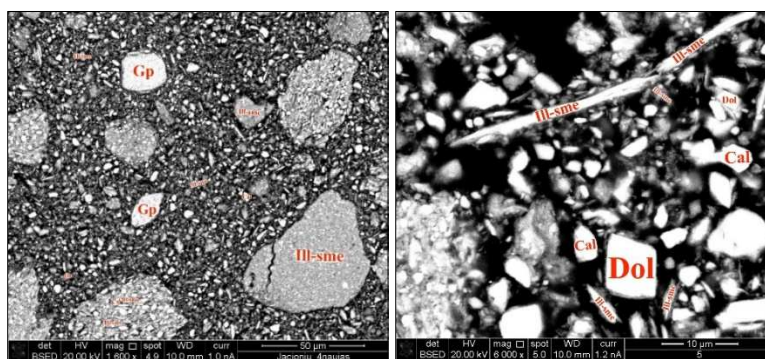


Fig. 4.1. Scanning electron microscope images of the clay fraction in the investigated terrain forming Middle Pleistocene till fine soils show various minerals including quartz (Qz), calcite (Cal), illite-smectite (Ill-smc), dolomite (Dol), and gypsum (Gp)

After summarizing the results obtained during the SEM study, it was found that the analysed clay minerals of the investigated Middle Pleistocene

soil include illite-smectite, feldspars, quartz, and carbonate minerals such as calcite and dolomite (Fig. 4.1). Additionally, gypsum mineral was isolated, a common occurrence in Devonian rocks, as reported by Baltrūnas et al. (2005).

4.2. Classifications and their application

4.2.1. Physical properties and composition of the investigated Middle Pleistocene till fine soils

After analysing the results obtained from laboratory tests (ISO 17892-4:2016; ISO 17892-12:2018) and applying the soil classification system adopted in Lithuania (ISO 14688-1:2018; ISO 14688-2:2018) in line with the recommendations (TAR, 2015-11-16, No. 18162), the analysed Middle Pleistocene till fine soil can be categorized into three main soil type groups (Fig. 4.2). After evaluating the obtained results, it has been established that the commonly found soil type of the investigated Middle Pleistocene till fine soils is low plasticity sandy clay-silt (saCIL–SiL).

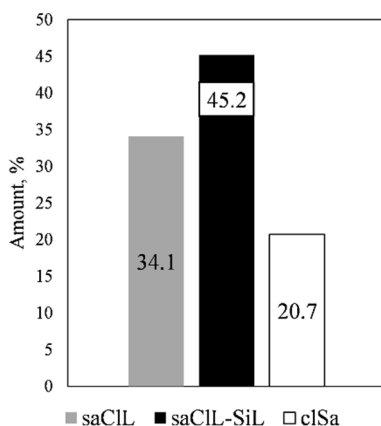


Fig. 4.2. The most common soil types in the investigated Middle Pleistocene till sediments

Based on the grain size composition of the studied soils it can be stated that the Middle Pleistocene till soils are predominantly sandy, with the coarse fraction constituting close to or exceeding the limit of 65 %. There is also an increased amount of gravel fraction, reaching almost 5 %. It is essential to mention that the clay fraction ($< 0.002\text{mm}$) content in the studied soils varies from 4% to 19%, with the highest amount found in saCIL and the least in saCIL-SiL type soils. All the investigated soils exhibit low plasticity and the natural moisture content falls within the range of 9–16 %.

4.2.2. Peter K. Comparison of Robertson's Classifications in Till Fine Soils

To assess the applicability of Peter K. Robertson's classifications to the investigated till fine soil, two updated versions of Peter K. Robertson's classifications (Table 3.1) (Robertson, 2009) and (Table 3.1) (Robertson, 2016) were compared. The investigated soils are positioned in both classifications for comparison (Fig. 4.3).

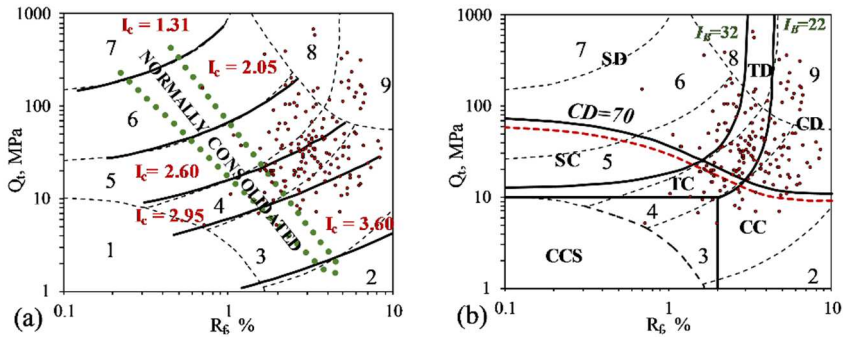


Fig. 4.3. Distribution of Middle Pleistocene till fine soils in Peter K. Robertson's classification schemes: soil distribution according to Robertson (2009) (a); soil distribution according to Robertson (2016) (b)

Based on the collected database, the investigated Middle Pleistocene till fine soils were classified using the soil behaviour type index (Robertson, 2009), which characterizes soil behaviour based on CPT rather than relying solely on laboratory results for identification.

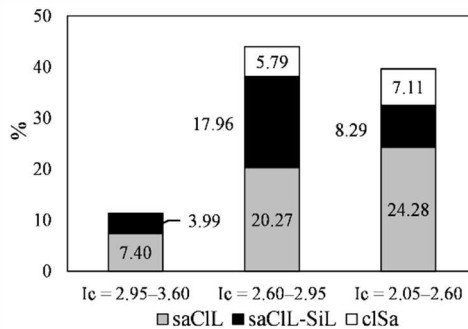


Fig. 4.4. Distribution of the percentage (%) of the main Middle Pleistocene till soil types, classified according to (ISO 14688-2:2018), in Peter K. Robertson's classification scheme based on the I_c index (Robertson, 2009) with I_c values ranging from 2.95 to 3.6 representing clayey to silty clay mixtures, I_c values ranging from 2.60 to 2.95 indicating clayey silt and silty clay, and I_c values ranging from 2.05 to 2.6 representing silty sand to sandy silt mixtures

After analysing the data (Fig. 4.3 (a) and 4.4), it can be concluded that the soils are primarily divided into three groups: clay, silt, and sand mixtures. Approximately 44% of the soil is classified as silt mixtures ($I_c = 2.60-2.95$, representing clayey silt and silty clay).

Soils are classified according to the updated and generalized scheme proposed by Robertson (2016), which categorizes soils based on their behaviour during shear into dilatative and contractive types. Additionally, the scheme identifies a range for transitional soils (Fig. 4.3 (b)).

The investigated soils are primarily divided into four groups (SD, TD, CD, and TC) (Fig. 4.5). Summarizing the data it can be concluded that the majority (approximately 26%) of the soil belongs to the transitional dilatative (TD) zone, with the saCIL soil type being predominant.

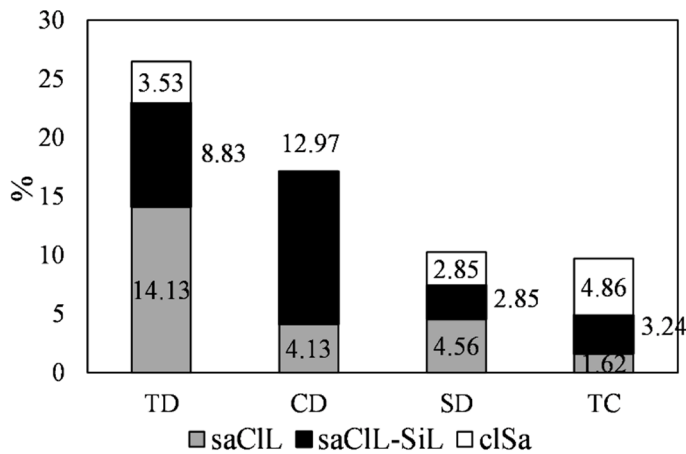


Fig. 4.5. Distribution of the percentage (%) of the investigated Middle Pleistocene till soil types (ISO 14688-2:2018) in Peter K. Robertson's classification scheme (Robertson, 2016), where TD represents transitional dilative behaviour soils, CD denotes clay-type dilative behaviour, SD indicates sand type dilative behaviour, and TC represents transition contractive type

The soil behaviour groups used in Peter K. Robertson's most popular classification schemes were compared. Additionally, the investigated Middle Pleistocene till fine soils, whose soil types were determined during laboratory tests according to the ISO 14688-2:2018 classification system, were compared with Peter K. Robertson's soil behaviour groups (Table 4.1).

Table 4.1. Compared classification schemes

<i>(Robertson, 1990)*</i>	<i>(Robertson, 2009)</i>	<i>(Robertson, 2016)</i>	<i>(ISO 14688-2:2018)</i>
1		CCS	
2	>3.6	CC	
3	2.95–3.6	CC/CD	saCIL
4	2.60–2.95	TC/TD	saCIL-SiL, clSa
5	2.05–2.6	SC/SD	saCL, clSa
6	1.31–2.05	SD/SC	
7	<1.31	SD	
8		SD/TD	
9		CD	

After summarizing the data and based on the physical properties of soils determined in the laboratory, it can be stated that the investigated Middle Pleistocene till fine soil, due to its complex composition, does not exhibit a single distinct soil behaviour zone. This trend is also observed in other studies utilizing this classification by Peter K. Robertson (Sodré, 2022). However, based on these classifications of soil behaviour, it is possible to evaluate the actual mechanical behaviour of the soil, a factor not reflected in the classical naming convention according to other classification schemes based solely on the soil composition analysis.

4.3. Dependence of mechanical indicators on physical properties, considering cone resistance values

4.3.1. Effect on the oedometric deformation modulus and effective angle of internal friction

The influence on soil deformation and on effective angle of internal friction was analysed by evaluating various indicators of soil physical properties using the linear regression method. Regression analysis aims to create the most appropriate model and express it as an equation by determining the influence of physical property indicators on soil deformability and strength.

The minimum and maximum values of the oedometer deformation modulus indicators of physical and mechanical properties of the soil, which were employed in the final design of the model, are presented in Table 4.2.

Table 4.2. The deformation modulus model uses the extremes of physical and mechanical properties indicators determined during laboratory tests

	$E_{Noed}^{0,2}$, MPa	$E_{Noed}^{0,4}$, MPa	q_c , MPa	$< 0,002$ mm, %	w , %
Min.	4.1	6.8	1.1	2.1	6.7
Max.	20.7	27.1	24.5	19.2	18.9

The application limits of the effective angle of internal friction models under consideration are presented in Table 4.3.

Table 4.3. In the internal friction angle model, the extremes of the indicators of physical and mechanical properties were determined during laboratory tests

	φ'_N , °	q_c , MPa	$< 0,002$ mm, %	w , %	I_p [-]
Min.	18.9	2.0	8.8	5.5	0.08
Max.	35.7	8.3	25.5	17.0	0.13

Based on the constructed regression models (Table 4.4), it is evident that natural moisture most significantly influences the oedometric deformation modulus and clay content and cone resistance on effective angle of internal friction during the creation of regression analysis models.

Analysing Peter K. Robertson's classification scheme (2009), the most reliable results are obtained for soils classified under the clay mixture group (R^2 ranges from 0.58 to 0.77). Conversely, according to Peter K. Robertson's classification scheme (2016), the most reliable results are obtained for soils categorized as dilatant sand-type soils (R^2 ranges from 0.68 to 0.76). For the angle of internal friction, the highest reliability is achieved when considering the clay content and cone resistance, with the model attaining an R^2 value of 0.83.

Table 4.4. Correlation Equations Derived from Regression Analysis

	Group <i>index</i>	Equation	No.	q_c limits (MPa)
Clay mixture and clay-type behaviour	$I_c =$ 2.95– 3.60	$E_{Soed}^{0.2MPa} = 15.14 + 0.22 \cdot (<0.002) - 0.91 \cdot w + 1.17 \cdot q_c$	1	1.0–
		$E_{Soed}^{0.4MPa} = 46.16 - 2.68 \cdot w + 1.16 \cdot q_c$	2	4.0
	CC	$E_{Soed}^{0.2MPa} = 31.51 - 0.32 \cdot (<0.002) - 1.47 \cdot w - 1.05 \cdot q_c$	3	1.0–
		$E_{Soed}^{0.4MPa} = 68.87 - 0.48 \cdot (<0.002) - 3.31 \cdot w - 3.00 \cdot q_c$	4	3.5
	CD	$E_{Soed}^{0.2MPa} = 16.51 + 0.35 \cdot w - 0.75 \cdot q_c$	5	1.7–
		$E_{Soed}^{0.4MPa} = 36.96 - 0.29 \cdot (<0.002) - 1.50 \cdot w$	6	10.0

	<i>Group index</i>	<i>Equation</i>	<i>No.</i>	<i>q_c limits (MPa)</i>
Silt mixture and transitional type soil behaviour	$I_c = 2.60 - 2.95$	$E_{Soed}^{0.2MPa} = 17.95 - 0.17 \cdot (< 0.002) - 0.84 \cdot w + 0.82 \cdot q_c$	7	1.0–5.0
		$E_{Soed}^{0.4MPa} = 23.50 - 0.29 \cdot (< 0.002) - 0.78 \cdot w + 1.54 \cdot q_c$	8	
		$E_{Soed}^{0.2MPa} = 11.40 - 0.51 \cdot (< 0.002) + 0.27 \cdot w - 0.30 \cdot q_c$	9	
	<i>TD</i>	$E_{Soed}^{0.4MPa} = 25.39 - 0.68 \cdot (< 0.002) + 0.17 \cdot w - 1.48 \cdot q_c$	10	1.0–5.0
Sand mixture and sand-type soil behaviour	$I_c = 2.05 - 2.60$	$E_{Soed}^{0.2MPa} = 18.24 - 0.55 \cdot (< 0.002) - 0.31 \cdot w - 0.35 \cdot q_c$	11	1.0–5.0
		$E_{Soed}^{0.4MPa} = 42.54 - 0.59 \cdot (< 0.002) - 1.42 \cdot w - 1.39 \cdot q_c$	12	
		$E_{Soed}^{0.2MPa} = 23.42 - 1.80 \cdot w + 0.63 \cdot q_c$	13	
	<i>SD</i>	$E_{Soed}^{0.4MPa} = 19.94 - 1.41 \cdot (< 0.002) + 1.60 \cdot q_c$	14	5.0–10.0
Till fine soils		$\phi' = 34.10 - 1.15 \cdot q_c + 0.36 \cdot (< 0.002) - 0.49 \cdot w$	15	1.0–10.0

4.4. Evaluation of the results of different test conditions of investigated Middle Pleistocene till fine soil in a triaxial compression test

4.4.1. Stress-strain relationship

The stress-strain graphs of the investigated till fine soil samples (Fig. 4.6) do not exhibit a distinct peak value. When examining these soils, an elastoplastic deformation is detected, characterized by a slight increase in the deviator (hardening) as the stress increases, which is typical of the strain hardening model.

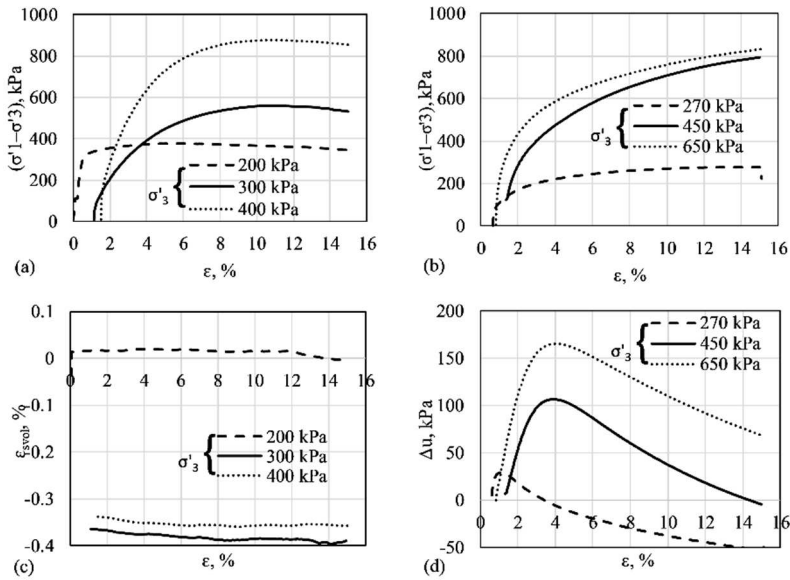


Fig. 4.6. Dependence of stresses ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) and axial strains (ε) on different cell pressures (σ'_3): in SCD test conditions (a); in SCU test conditions (b); dependence of volumetric (ε_{svol}) and axial strains in SCD (c); dependence of pore pressure change (Δu) and axial deformations in SCU (d)

Furthermore, this relationship between stresses and strains reflects the values of the soil overconsolidation ratio. After analysing the calculated OCR values from the results of laboratory tests obtained during soil incremental loading oedometer and triaxial compression tests (Table 4.5), the tested soil can be classified as lightly overconsolidated. This ratio of investigated soils ranges between $OCR = 2.1 - 3.9$, based on the oedometric deformation modulus E_{oed} and the elastic modulus, corresponding to 50% of the maximum shear strength E_{50} prevails. Many studies emphasize that the stress-strain curves of normally consolidated to lightly overconsolidated ($LOC = OCR \geq 2$ to 4(6)) soils do not show a clear peak point (Priest et al., 2019).

Table 4.5. Average values of the overconsolidation ratio of Middle Pleistocene till fine soil

Test conditions	$OCR (CPT)^1$	$OCR (E_{oed})^2$	$OCR (E_{50})^2$
UUU	14.7	3.1	2.1
SCU	12.7	2.7	2.7
SCD	11.7	3.9	2.1
UCD	9.6	-	2.1
UCU	9.6	2.5	3.1

¹ (Lunne et al., 1997; Urbaitis et al, 2016);

² (Jozsa, 2013; Paniagua et al, 2016; Józsa, 2016; Wdowska et al, 2023)

Hence, the predominant OCR values and the stress-strain curve shapes suggest that the analysed soil can be categorized as lightly overconsolidated. Considering the overconsolidation ratio, when assessing the behaviour and mechanical properties of the soil, is crucial. OCR values derived from CPT data (Table 4.4) tend to overestimate the overconsolidation of the soil, portraying it as highly overconsolidated ($OCR > 4$), which does not accurately represent its actual condition.

When conducting tests under drained conditions (Fig. 4.6 (a, c)) with lightly overconsolidated soils, signs of soil retraction (as indicated by negative volumetric strain) are evident (Fig. 4.6 (c)). This retraction implies that positive volume deformations do not return to their initial conditions. Researchers note that soil retraction during shearing is characteristic of normally and lightly overconsolidated soils (Asaoka et al., 1998). Conversely, highly overconsolidated soils often exhibit an apparent peak strength and dilation, as observed in other research cases (Yao et al., 2009; Kimoto et al., 2013; Gu et al., 2016; Gao et al., 2017; Wang et al., 2020; Tong et al., 2022). However, such a dilatation trend has not been observed in the examined samples.

Undrained tests (Fig. 4.6 (b, d)) reveal a decrease in pore pressure following the attainment of peak strength, indicative of soil disintegration. This reduction signifies decreased excess pore pressure (Fig. 4.6 (d)). The pore pressure curve reflects variations in effective stress: while pore pressure increases, effective stresses consistently decrease, influencing soil strength. This trend is evident in both lightly and highly overconsolidated specimens. However, as the overconsolidation ratio (OCR) increases, pore pressure generates lower values than lightly overconsolidated soils, resulting in more significant negative pore stresses during shearing. This variation in pore pressure significantly impacts effective stresses by elevating them, which is also emphasized by other researchers (Jiang et al., 2011; Gu et al., 2016; Han et al., 2021). Thus, the correlation between pore pressure and OCR implies that less overconsolidated soils exhibit lower effective stress, rendering them more deformable and less resistant to shearing.

Therefore, the correlation between volumetric strain, pore pressure and OCR implies that lightly overconsolidated soils do not dilatate and exhibit lower effective stress compared to soils with high OCR. The investigated Middle Pleistocene till fine soils are more compressible and less shear-resistant than highly overconsolidated ones.

4.4.2. General summary of drained and undrained test conditions

At similar cell pressures, the peak deviator stress in drained conditions is higher than in undrained conditions, as it is influenced by the formation of pore pressure. This statement is confirmed by the works of other authors (Cetin & Gökoğlu, 2013; Nguyen et al., 2018).

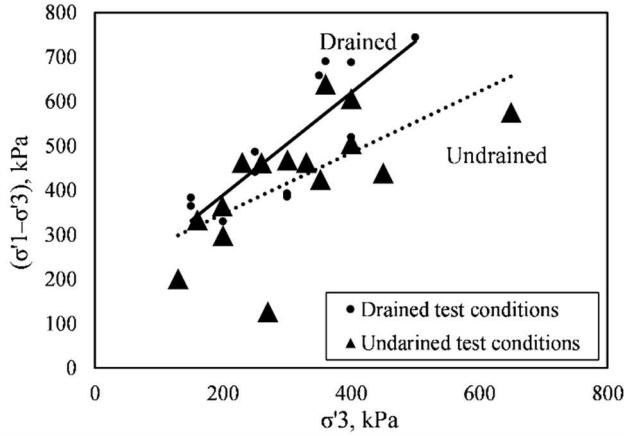


Fig. 4.7. Comparison of peak deviatoric stress ($\sigma'_1-\sigma'_3$) with applied cell pressure (σ'_3) under drained and undrained conditions

This regularity of mentioned deviator stress is evident in the summarized results of the studied soil (Fig. 4.7, Table 4.6). The peak deviator stress values in drained conditions are approximately 100 kPa higher compared to undrained conditions in the investigated soils, which significantly impacts the soil strength property indicators.

Table 4.6. Generalized data of both drained and undrained triaxial compression test

Test conditions	c' , kPa	φ' , °	Cell pressure, kPa	
			200–300 ($\sigma'_1-\sigma'_3$), kPa	400–500 ($\sigma'_1-\sigma'_3$), kPa
SCU	7.30	26.90	126.95	575.44
SCD	11.69	27.78	252.43	671.54
UCU	30.69	21.97	375.35	583.74
UCD	36.21	23.21	464.15	674.82

4.4.3 The effect of the degree of saturation

Based on the degree of saturation (S_r) (Fig. 4.8), the investigated soils are classified as saturated soil (when S_r is approximately 1).

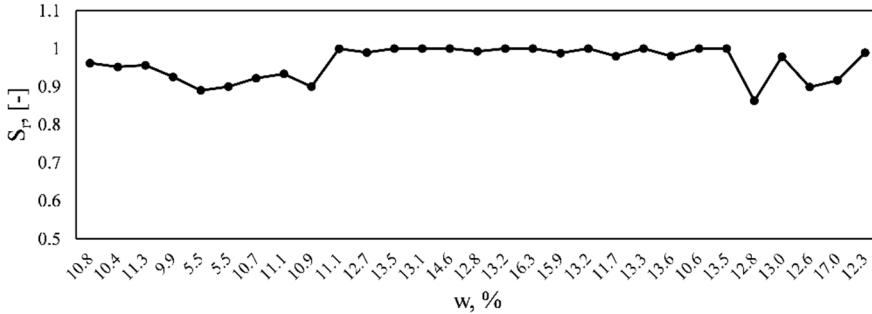


Fig. 4.8. Comparison of the natural moisture (w) and degree of saturation (S_r) of the investigated soil samples

After evaluating the results of the investigated till fine soil, it can be concluded that the mechanical indicators of the unsaturated soil, such as the angle of internal friction and cohesion, are higher than those of the saturated soil at the same or very similar cell pressure (Annex 5). Such findings are commonly reported in the literature (Sun et al., 2010; Perez, 2021; Baltodano-Goulding & Brenes). A general trend observed across all tests is that unsaturated specimens exhibited greater stiffness and endured higher ultimate deviatoric stresses at peak values than saturated ones, particularly within similar ranges of applied pressures (ranging from 150 kPa to 200 kPa) (Annex 5).

Upon evaluating the results, it becomes apparent that if a sample is not saturated during testing, its strength properties may be overestimated, and the estimation of pore pressure and effective stresses may be inaccurate. Although the saturation process for fine soils is time-consuming, it cannot be disregarded to save time and resources.

4.4.4. Stress path analysis

Stress path analysis of drained soils

The orientation of drained effective stress paths can be compared with total stress paths (Fig. 4.9). Other studies also highlighted this observation (Mendoza et al., 2015; Chen et al., 2018). The stress paths, represented in Figure 3.34, are presented in the q - p' coordinate system (*Cambridge*).

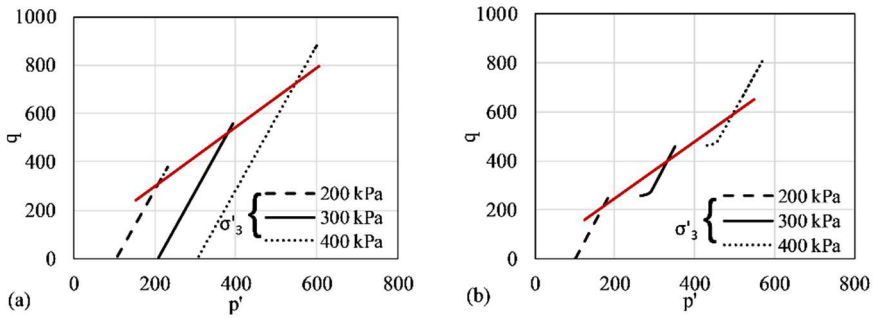


Fig. 4.9. Effective stress paths and soil peak strength curve (red) at various cell pressures (σ'_3) in the q - p' coordinate system for two different conditions: CTT in triaxial compression SCD test conditions (a) and MTT under triaxial compression SCD test conditions (b)

The stress paths of the drained conditions of the investigated soil exhibit uniformly increasing deviatoric and axial effective stresses. Once the stress path intersects the critical state line, it does not reverse its direction, indicating that the studied soils follow the strain hardening model, as also noted in other studies (Mendoza et al., 2015).

Stress path analysis of undrained soils

Under undrained test conditions, the pore pressure increases with increasing deviatoric stress. As pictured in the graphs (Figure 4.10, Annex 6), the differences between effective and total stresses widen with the expansion of pore pressure. However, in the examined unsaturated samples (Fig. 3.35 (a)), the pore pressure remains relatively low (ranging from 9 to 63 kPa) at various cell pressures; thus, no significant inclination angle of the effective stress path is apparent.

Analysing the saturated soil case (Fig. 4.10 (b)), distinct variations in the effective stress path are evident. Soil saturation processes led to the formation of higher pore water pressure, influencing the soil strength characteristics. Where positive pore water pressure developed during shearing, the effective stress curve shifted leftward, consistent with the stress-strain and pore pressure variation graphs. Upon reaching the critical state, the pore pressure decreased, signifying a reduction in excess pore pressure.

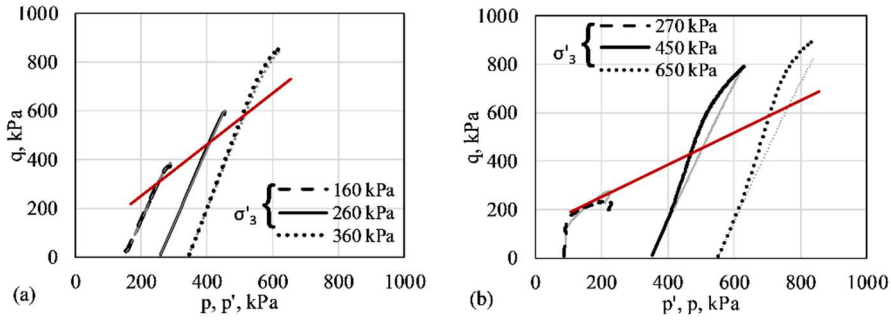


Fig. 4.10. Effective stress paths and the soil peak strength curve (in red) at different cell pressures (σ'_3) are depicted in the q - p' coordinate system for two research conditions: UCU (a) and SCU (b)

Therefore, upon evaluating the propagation of stress paths, it is confirmed that saturation is necessary. Consequently, the tested soil can approximate natural conditions, allowing for the evaluation of its actual strength and condition during laboratory tests. Saturated soil during the test exhibits higher effective stress, determining its strength properties.

4.4.5. Impact of sample size

The analysis of the obtained results (Annex 6, Table 4.7) shows that smaller specimens exhibited a steeper critical state line (CSL) during shearing (Annex 6) and higher peak deviator stresses (Table 4.7).

These findings reflect lower compressibility and a higher angle of internal friction in the smaller-scale specimens, with the angle varying by about 3° (Table 4.7). Similar results have been described in the literature (Omar & Sadrekarimi, 2015; Gebresamuel et al., 2023).

Table 4.7. Triaxial compression laboratory test results of different sample sizes

<i>Test conditions</i>	<i>D/H</i>	<i>c', kPa</i>	<i>ϕ', °</i>	<i>Cell pressure, kPa</i>	<i>Peak deviatoric stresses, kPa</i>
UCD	0.5/1	32.82	25.82	150	364.66
				250	486.79
				350	690.74
				150	343.31
UCD	1/2	39.60	22.70	250	441.51
				350	658.90

The lower deviator stresses seen in larger specimens could be due to the increased strain softening caused by longer shear bands forming. Furthermore, variances in the space or flexibility for particle rearrangement within specimens of varying sizes may also play a role in this occurrence. Using the results of specimens with smaller diameters may lead to an inaccurate overestimation of soil strength, a phenomenon also identified in other studies (Skuodis et al., 2019; Gebresamuel et al., 2023). These findings highlight the significant influence of sample size on evaluating soil behavior, suggesting that tests conducted with larger sample sizes provide a better reflection of soil shear and deformation behavior under field conditions.

4.4.6. Influence of multistage and single stage (conventional) triaxial compression test

After comparing the strength properties obtained from single-stage and multistage tests of similar scale and physical indicators (Table 4.8), it appears that the values of soil cohesion obtained during the MST test are approximately 30 kPa (15%) higher.

Table 4.8. Mechanical indicators obtained during the single-stage and multistage triaxial compression tests

<i>Test methodology</i>	<i>D/H</i>	<i>Test conditions</i>	<i>c', kPa</i>	<i>φ', °</i>
CTT	0.5/1	SCU	7.30	26.90
		SCD	18.62	27.32
		UCU	12.60	25.40
MTT	0.5/1	SCD	8.23*	28.60*
		UCU	30.87	18.98
	1/2	UCD	32.82	25.82
		UCU	48.60	21.53
		UCD	39.60	22.70

* - these samples have different physical properties

These higher values represent the stresses and strains acting on the sample during the earlier stages of loading (Choi et al., 2018). Corrections should be introduced using the MTT test methodology; however, no corrections have been made or analysed in this study.

CONCLUSIONS

1. Based on structural and analytical analysis, the studied soil is classified as glacial deposits from the terrain forming Middle Pleistocene till

fine soils. It has been determined that primary uniqueness of the investigated soils lies in the presence of carbonate minerals in them.

2. After summarizing all the data, it was found that the investigated till fine soil can be assigned into different groups of soil behaviour, according to the classifications of Peter K. Robertson (2009, 2016).

3. Natural moisture exerts the most significant influence on the oedometric modulus of deformations. Upon analysing the classification scheme of Peter K. Robertson (2009), the most reliable results are obtained for soils of the clay mixture group (R^2 varies from 0.58 to 0.77), while according to the classification scheme of P.K. Robertson (2016), the most reliable outcomes are derived for dilatant sand-type soils (R^2 varies from 0.68 to 0.76). Regarding the effective angle of internal friction, the highest values are associated with clay content and cone resistance, resulting in higher model reliability, reaching $R^2 = 0.83$.

4. After assessing the stress-strain relationship of the studied soil, including elastoplasticity, strain hardening behaviour and soil retraction during shearing, the investigated soil can be classified as lightly overconsolidated ($OCR < 4$). Additionally, based on the calculated OCR values obtained from laboratory tests, including incremental loading consolidation and triaxial compression tests, the soil also falls into the lightly overconsolidated category ($OCR < 4$). The overconsolidation ratio determined from laboratory tests ranges between 2.1 and 3.9, while according to CPT results values > 4 . Hence, evaluating the OCR based on CPT results for the studied soils is not advisable.

RECOMMENDATIONS, APPLICATION OPPORTUNITIES, AND PRACTICAL SIGNIFICANCE

1. It is recommended to supplement the results obtained while studying the mineral and chemical composition of the Middle Pleistocene till fine soils, in order to achieve more reliable findings. The results presented during this study are preliminary evaluations;

2. The properties of the investigated till fine soil exhibit significant variability. This variability stems from the complex composition of the soil, comprising a mixture of gravel (averaging up to 3–5%), sand (averaging up to 50–65%), silt (averaging up to 25–36%), and clay (averaging up to 5–11%). The prevailing natural moisture content falls within the range of 9–16%, with low plasticity (average plasticity index up to 10% and liquid limit average up to 22%). Based on the currently applied soil classification system in Lithuania and following additional LGT recommendations, the investigated soil

predominantly falls under the category of low plasticity sandy clay-silt (saCIL–SiL) (accounting for 45.2% of all tested samples). Classifying such composite soils based on their lithology and type is advisable to establish correlations between the processes that influenced them and their physical properties and mechanical behaviour;

3. It is recommended to use Peter K. Robertson's (2009, 2016) classification schemes for assessing behaviour of the soil during mechanical impact.. Typically, the studied soil is classified as having transitional or silt mixture behaviour in these schemes. To assess the soil, it is suggested to employ the oedometer deformation and effective friction ratio correlation formulas, provided in Table 4.4.. However, it is essential to consider the application possibilities based on the behaviour of the type of soil, cone resistance, and the specified intervals of the limits of the physical properties of soils (Tables 4.2 and 4.3);

4. It is recommended to apply the principles of mechanics of lightly overconsolidated transitional soils ($OCR < 4$) when evaluating mechanical properties of the Middle Pleistocene till fine soils forming the terrain. To accurately determine the pre-consolidation stress and calculate the overconsolidation ratio, it is recommended to rely on laboratory test results. This approach helps prevent overestimation of soil strength when assessing the overconsolidation ratio based on Cone Penetration Test (CPT) results.

CURRICULUM VITAE

Disertacijos autorė Ieva Lekstutytė gimė 1992 m. gegužės mėn. 23 d. Kartenos miestelyje, Kretingos rajono savivaldybėje.

2011 m. baigė Kartenos vidurinę mokyklą ir įstojo į Vilniaus universiteto Gamtos mokslų fakulteto aplinkos hidrogeologijos ir geoinžinerijos studijų programą, kurią sėkmingai baigė 2015 m. apsigynusi bakalauro darbą tema „Pertankinimo koeficiento (OCR) nustatymas rišliems – moliniams gruntams“. Pagal bakalauro darbą buvo paruoštas pirmasis autorės straipsnis „Overconsolidation Ratio Determination of Cohesive Soil“. Bakalauro studijų metu nuo 2014 m. pradėjo dirbti ir vis dar tebedirba bei specializuojasi privačiame inžinerinės geologijos sektoriuje.

Nuo 2015 m. Ieva toliau tęsė studijas hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedroje hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos magistrantūroje. Studijų metu 2016 m. buvo išvykusi erasmus programa į Dresdno technologijų universitetą. Magistro darbą paruošė tema „Lietuvos kvartero gruntų klasifikacija pagal statinio zondavimo duomenis“.

2017 m. po magistro studijų baigimo magna cum laude diplomu autorė įstojo į geologijos krypties doktorantūrą Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedroje. Nuo trečių doktorantūros metų Ieva pradėjo dėstyti inžinerinės hidrogeologijos kursą bei vesti hidrogeologijos pagrindų laboratorinius darbus.

PADĖKA

Disertacinio darbo autorė išreiškia padėką savo moksliniam vadovui doc. dr. Sauliui Gadeikiui už pagalbą, įžvalgas bei suteiktą duomenų prieigą šiam moksliniam darbui. Taipogi už konsultacijas, rekomendacijas ir pagalbą Vilniaus Gedimino technikos universiteto darbuotojui doc. Dr. Šarūnui Skuodžiui bei už suteiktą galimybę atlikti gruntų mechanikos laboratorinius bandymus prof. dr. Jono Šimkaus vardo Gruntų fizikinių ir mechaninių savybių laboratorijoje.

Už baigiamojo mokslinio darbo recenzavimą ir vertingus atsiliepimus darbo autorė dėkoja doc. dr. Sonatai Gadeikienei ir doc. dr. Jurgiui Medzvieckui. Taip pat dėkoja disertacijos gynimo nariams prof. dr. Petruį Šinkūnui (pirmininkas), prof. dr. Albertui Bitinui, dr. Viktors Haritonovs, doc. dr. Kęstučiui Jokšui ir doc. dr. Jurgiui Medzvieckui už skirtą laiką darbo įvertinimui bei suteiktą galimybę jį gintis.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Moksliniai straipsniai

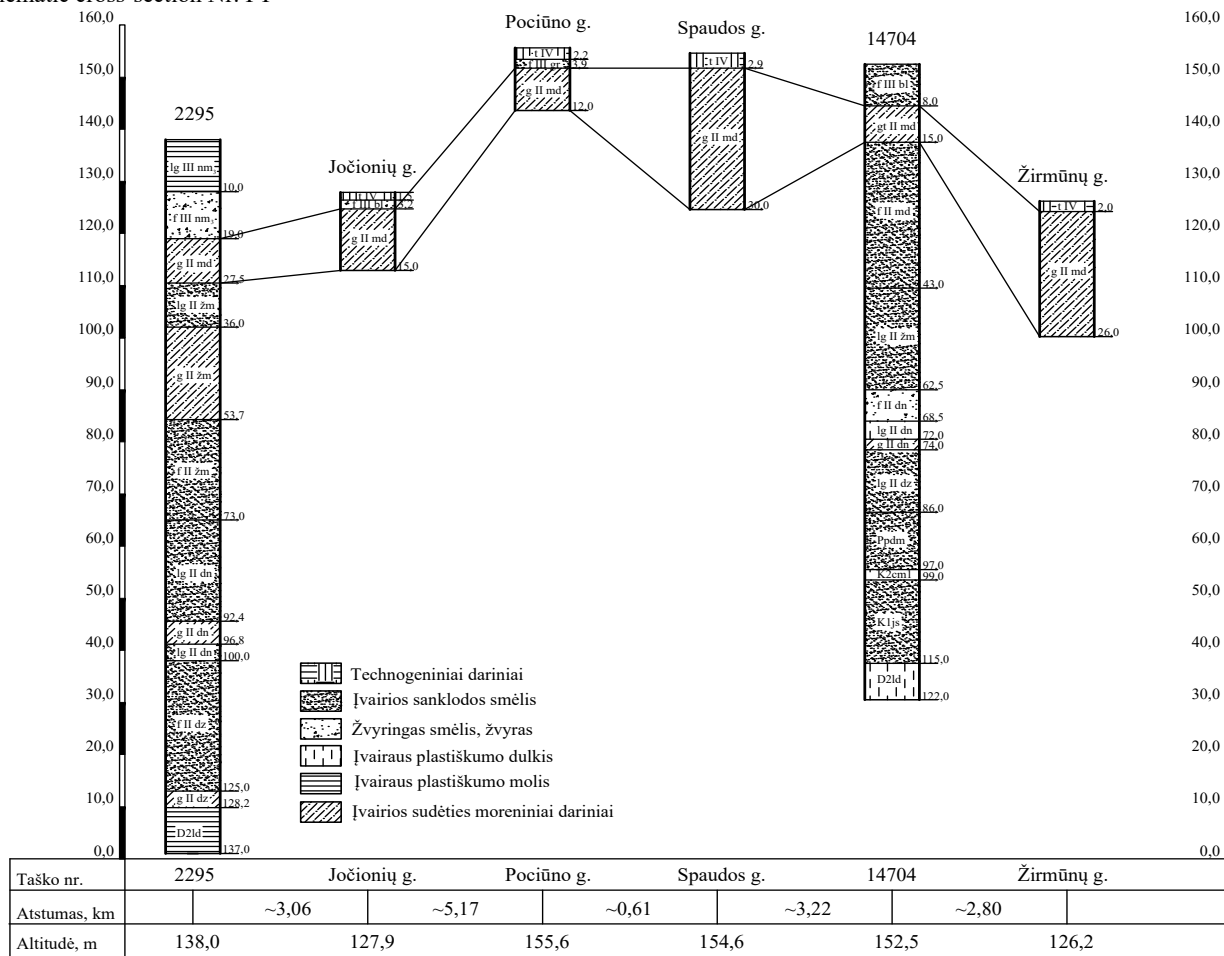
- Lekstutytė, I., Gadeikis, S., Žaržojus, G., & Skuodis, Š. (2019). Engineering geological and geotechnical properties of till soil of the Middle Pleistocene glacial period. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 68(2), 101–111. <https://doi.org/10.3176/earth.2019.09>
- Lekstutytė, I., Urbaitis, D., Žaržojus, G., Skuodis, Š., & Gadeikis, S. (2023). Factors affecting the oedometric modulus of till soil. *Baltica*, 36(2), 190–205. <https://doi.org/10.5200/baltica.2023.2.8>

Pranešimai tarptautinėse mokslinėse konferencijose

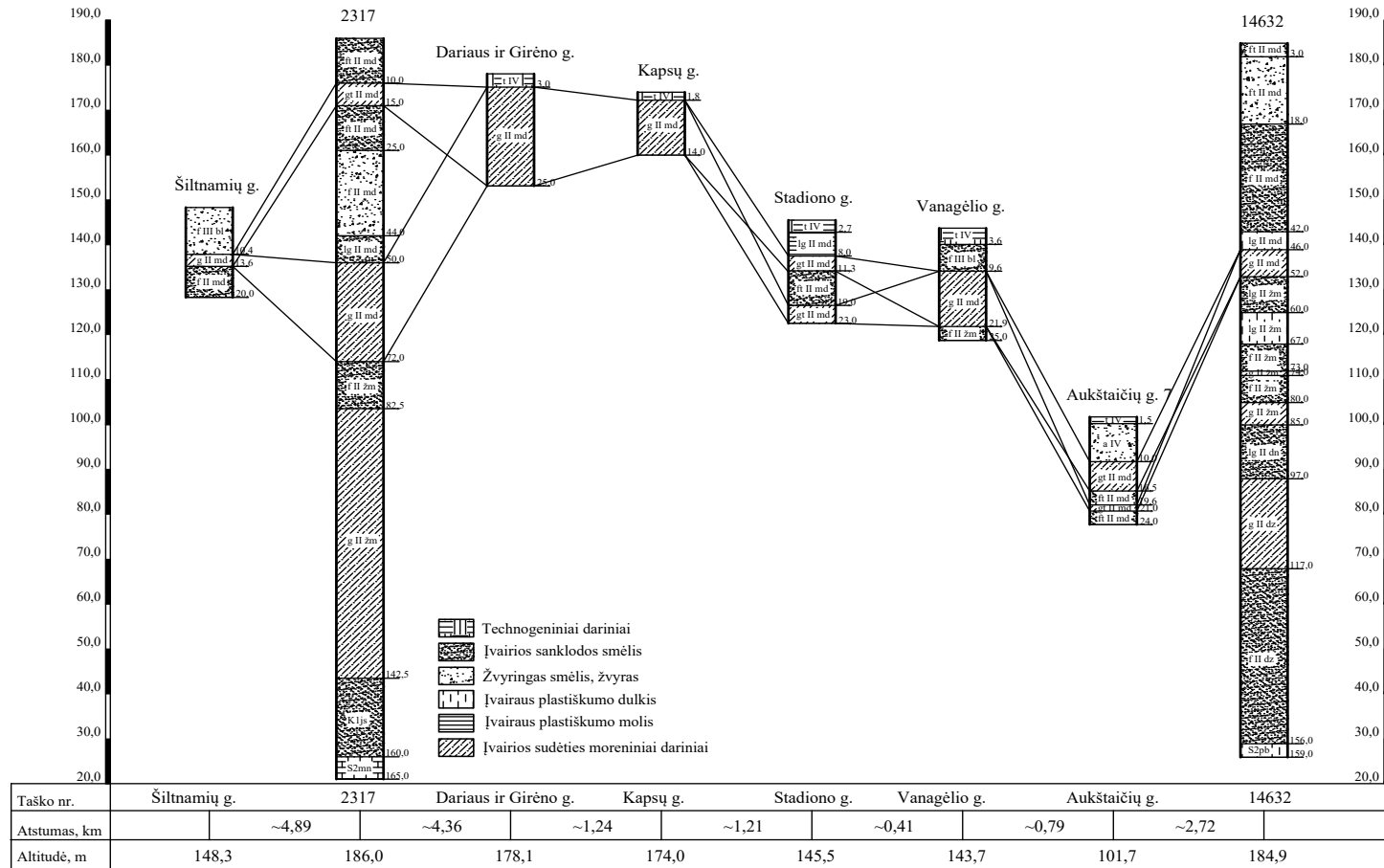
- Lekstutytė, I., Gadeikis, S., Žaržojus, G., & Skuodis, Š. (2018). Some mechanical properties of Medininkai glacial period overconsolidated moraine clay. In *Proceedings of 26th European Young Geotechnical Engineers Conference* (p. 83–92). Graz University of Technology.
- Skuodis, Š., Dirgelienė, N., & Lekstutytė, I. (2019). Change of soil mechanical properties due to triaxial sample size. In *13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”* (p. 470–478). <https://doi.org/10.3846/mbmst.2019.006>
- Lekstutytė, I., Žaržojus, G., Gadeikis, S., Domej, G., & Skuodis, Š. (2022). Composition and strength of Middle Pleistocene till in Lithuania. In *Proceedings of The HKIE Geotechnical Division 42nd Annual Seminar: A New Era of Metropolis and Infrastructure Developments in Hong Kong, Challenges and Opportunities to Geotechnical Engineering. Hong Kong: The Hong Kong Institution of Engineers* (p. 302–315). <https://doi.org/10.21467/proceedings.133.26>
- Lekstutytė, I., Moliakovaitė, G., Žaržojus, G., Gadeikis, S., & Skuodis, Š. (2023). Intermediate till soil properties and distinctive features. In *14th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”* (p. 612–622). https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_63

PRIEDAI

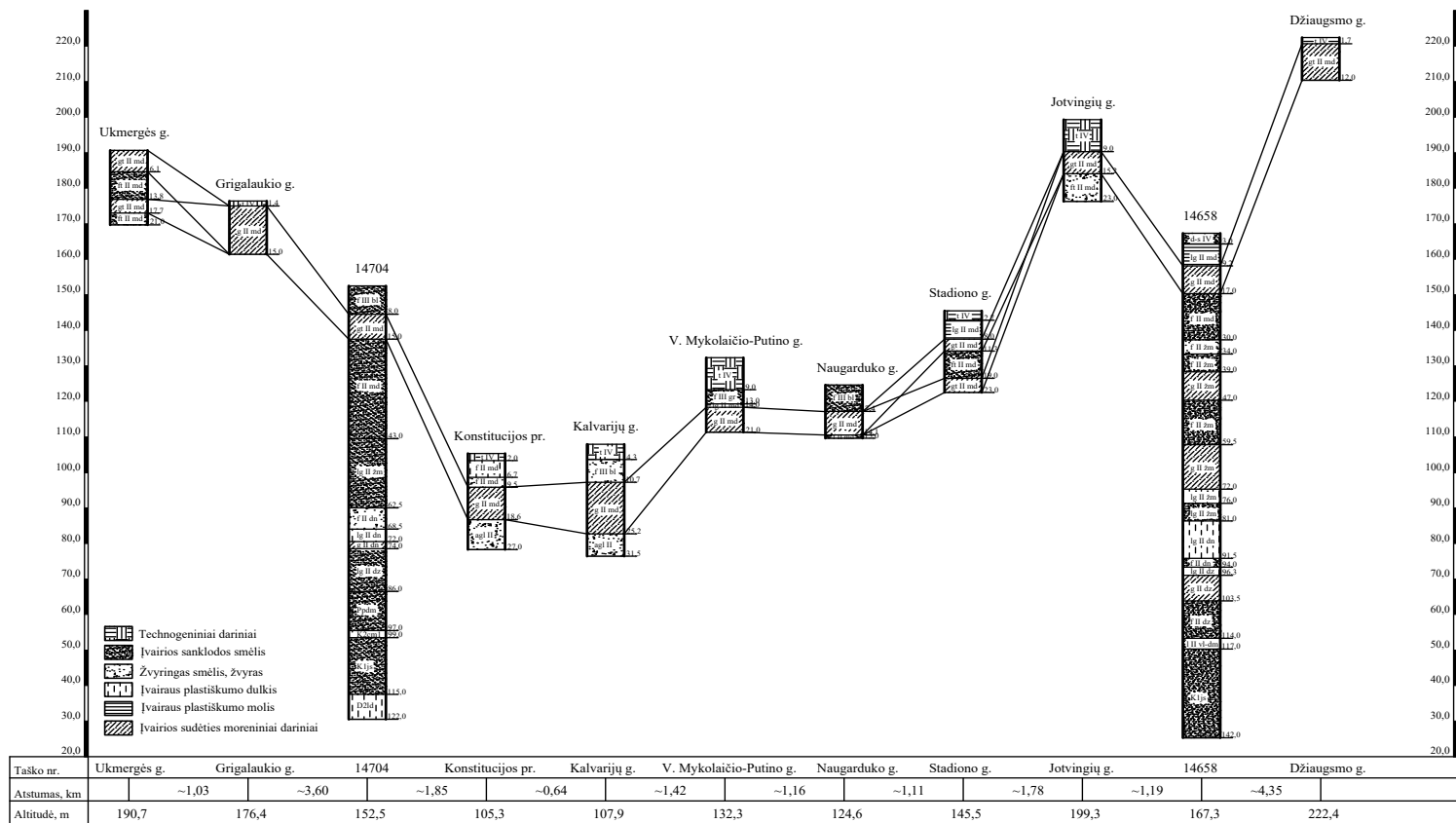
1 PRIEDAS. Schematinis pjūvis Nr. I-I'
Annex 1. Schematic cross-section Nr. I-I'



2 PRIEDAS. Schematinis pjūvis Nr. II-II'
Annex 2. Schematic cross-section Nr. II-II'



3 PRIEDAS. Schematinis pjūvis Nr. III-III'
Annex 3. Schematic cross-section Nr. III-III'



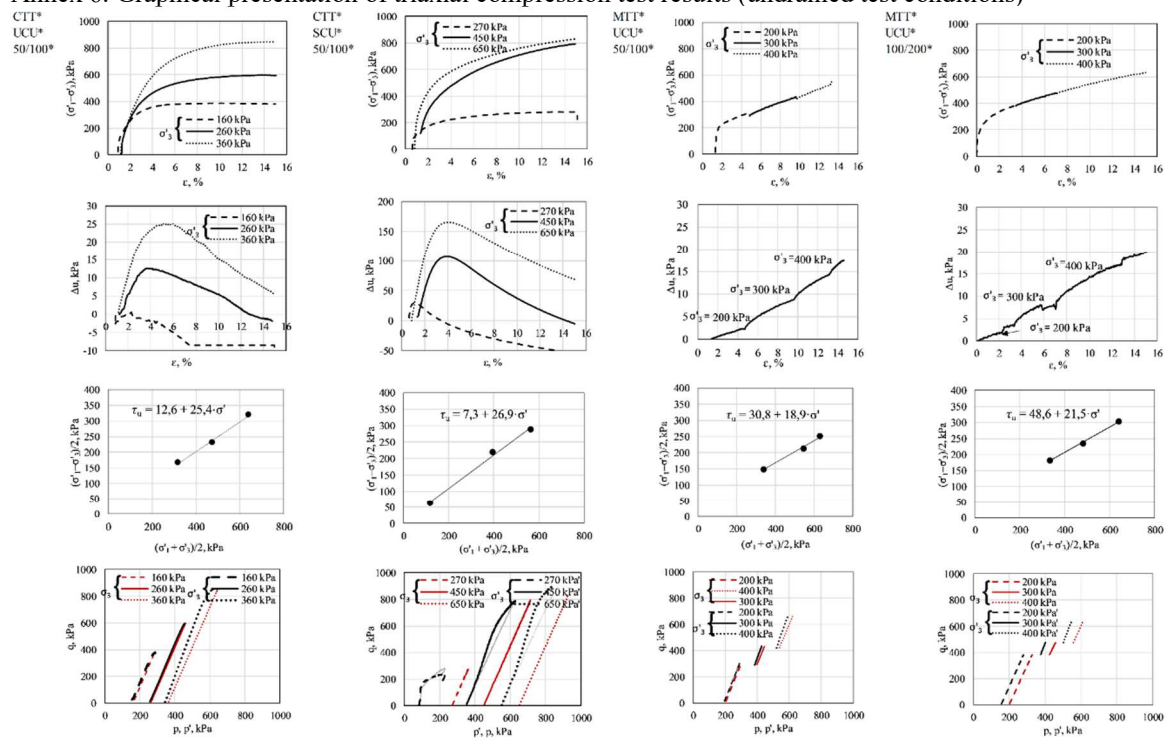
5 PRIEDAS. Triašio slėgio bandymų rezultatai ir fizikiniai rodikliai bei kūginio stiprio vertės
Annex 5. Triaxial pressure test results and physical parameters and cone strength values

Tyrimų metodai ir sąlygos			c' , kPa	ϕ' , °	w , %	ρ , Mg/m ³	e , vnt.d	w_L , vnt.d	w_P , vnt.d	I_P , vnt.d	I_L , vnt.d	<0,002mm, %	q_c , MPa
CTT*	UUU*	50/100*	7,88	25,54	10,80	2,29	0,31	0,22	0,12	0,10	-0,17	10,09	6,8
	SCU*	50/100*	7,30	26,90	10,38	2,31	0,30	0,25	0,13	0,12	-0,17	14,23	6,8
	SCD*	50/100*	18,62	27,32	11,28	2,30	0,32	0,22	0,12	0,11	-0,19	10,09	6,1
MTT*	UCD*	50/100*	32,82	25,82	9,90	2,31	0,29	0,24	0,13	0,11	-0,26	12,30	8,1
	SCD*	50/100*	7,75	27,00	5,54	2,33	0,23	0,19	0,11	0,08	-0,08	9,11	4,3
	SCD*	50/100*	8,70	30,20	5,53	2,30	0,25	0,19	0,11	0,09	-0,10	9,82	4,1
	UCD*	100/200*	39,60	22,70	10,70	2,28	0,32	0,22	0,13	0,09	-0,19	10,46	8,0
CTT*	UCU*	50/100*	12,60	25,40	11,06	2,28	0,32	0,24	0,14	0,10	-0,23	12,83	7,8
MTT*	UCU*	50/100*	30,87	18,98	10,86	2,25	0,43	0,21	0,13	0,08	-0,22	9,01	8,2
	UCU*	100/200*	48,60	21,53	11,13	2,32	0,30	0,21	0,13	0,08	-0,12	8,79	8,2
CTT*	SCU*	50/100*	25,76	28,45	12,70	2,23	0,34	0,23	11,58	11,10	0,11	-	21,5
			3,81	32,33	13,50	2,26	0,33	0,22	11,63	10,59	0,02	25,50	6,6
			17,87	31,57	13,10	2,27	0,33	0,22	11,59	10,72	0,14	24,50	8,3
			47,25	21,85	14,60	2,21	0,38	0,23	12,32	10,45	0,14	-	3,3
			23,95	29,13	12,80	2,23	0,34	-	-	-	-	-	17,8
			5,80	35,09	13,20	2,29	0,31	0,22	11,39	10,74	0,17	-	4,3
			7,55	31,61	16,30	2,24	0,38	0,18	9,14	8,65	0,24	17,50	2,8
			39,91	25,66	15,90	2,17	0,43	0,22	12,20	10,00	0,13	-	5,6
			13,62	32,23	13,20	2,17	0,33	0,29	16,40	13,13	0,46	25,50	3,1

6,36	34,28	11,70	2,26	0,32	–	–	10,41	–	14,80	2,0
29,53	27,71	13,30	2,29	0,32	–	–	12,51	–	23,00	5,1
66,70	32,90	13,60	2,12	0,44	–	–	–	–	–	22,8
0,52	35,15	10,60	2,33	0,26	0,24	11,60	12,07	0,10	–	4,3
1,51	35,76	13,47	2,25	0,34	–	–	8,89	–	24,80	2,2
16,60	28,90	12,83	2,19	0,40	0,25	12,19	12,51	–0,04	–	–
34,90	25,10	13,00	2,14	0,41	–	–	11,15	–	23,00	6,9
2,73	31,90	12,57	2,21	0,37	–	–	–	–	–	2,8
22,50	25,10	17,03	2,11	0,49	0,19	9,07	9,52	0,28	25,00	4,0
18,80	31,30	12,33	2,25	0,33	0,22	10,93	10,64	0,23	21,00	3,8

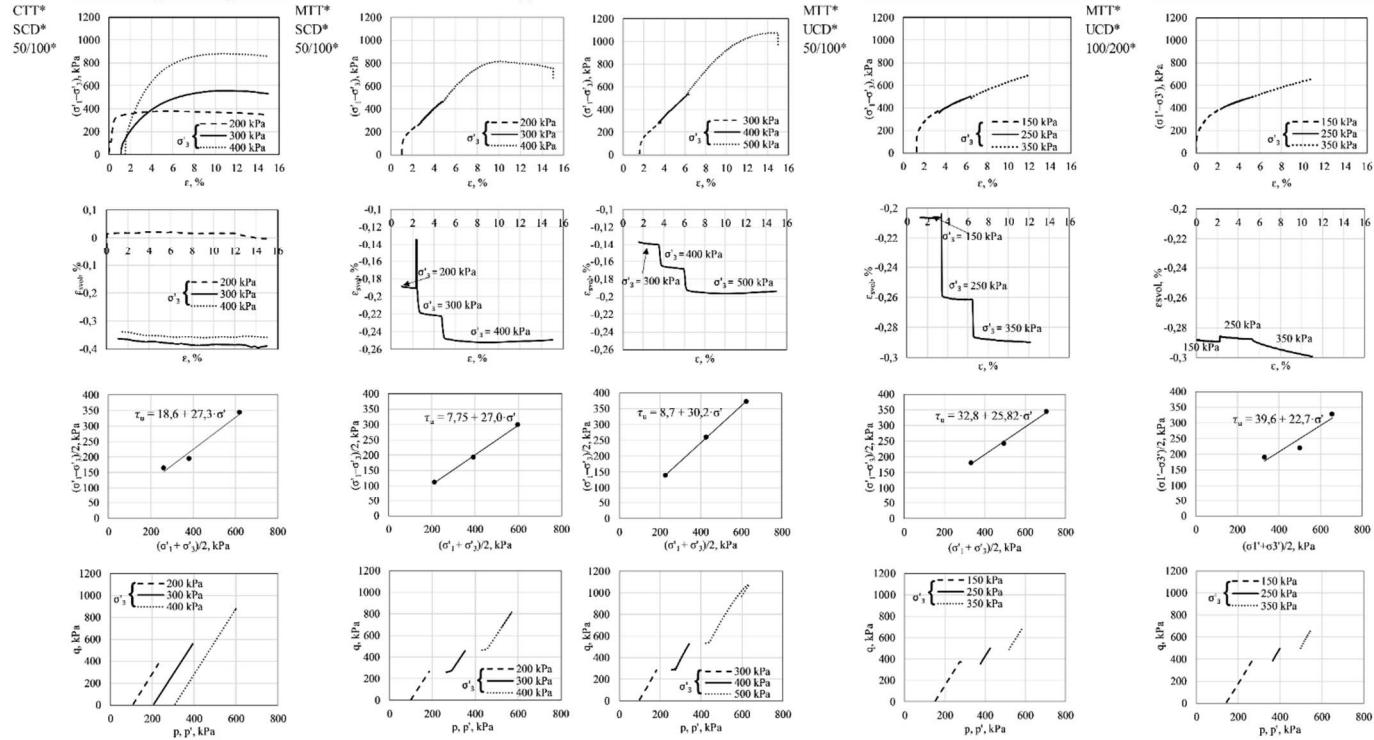
*CTT – vienpakopis (klasikinis) triašio bandymas; MTT – daugiapakopis triašio bandymas; UCU – neprisotintas konsoliduotas nedrenuotas; UCD – neprisotintas konsoliduotas drenuotas; UUU – nesotintas nekonsoliduotas ir nedrenuotas; SCU – prisotintas konsoliduotas nedrenuotas; SCD – prisotintas konsoliduotas drenuotas; 50/100 bandinio skersmuo $H/D = 2$, kai ($H = 100$ mm, $D = 50$ mm); 100/200 bandinio skersmuo $H/D = 2$, kai ($H = 200$ mm, $D = 100$ mm)

6 PRIEDAS. Triašio slėgio bandymų rezultatų grafinis pateikimas (nedrenuotos tyrimų sąlygos)
 Annex 6. Graphical presentation of triaxial compression test results (undrained test conditions)



*CTT – vienpakopis triašio bandymas; MTT – daugiapakopis triašio bandymas; UCU – neprisotintas konsoliduotas nedrenuotas; SCU – prisotintas konsoliduotas nedrenuotas; 50/100 bandinio skersmuo H/D = 2, kai (H = 100 mm, D = 50 mm); 100/200 bandinio skersmuo H/D = 2, kai (H = 200 mm, D = 100 mm); σ'_3 – efektyvusis celės slėgis, σ_3 – celės slėgis; τ_u – kerpamasis stipris

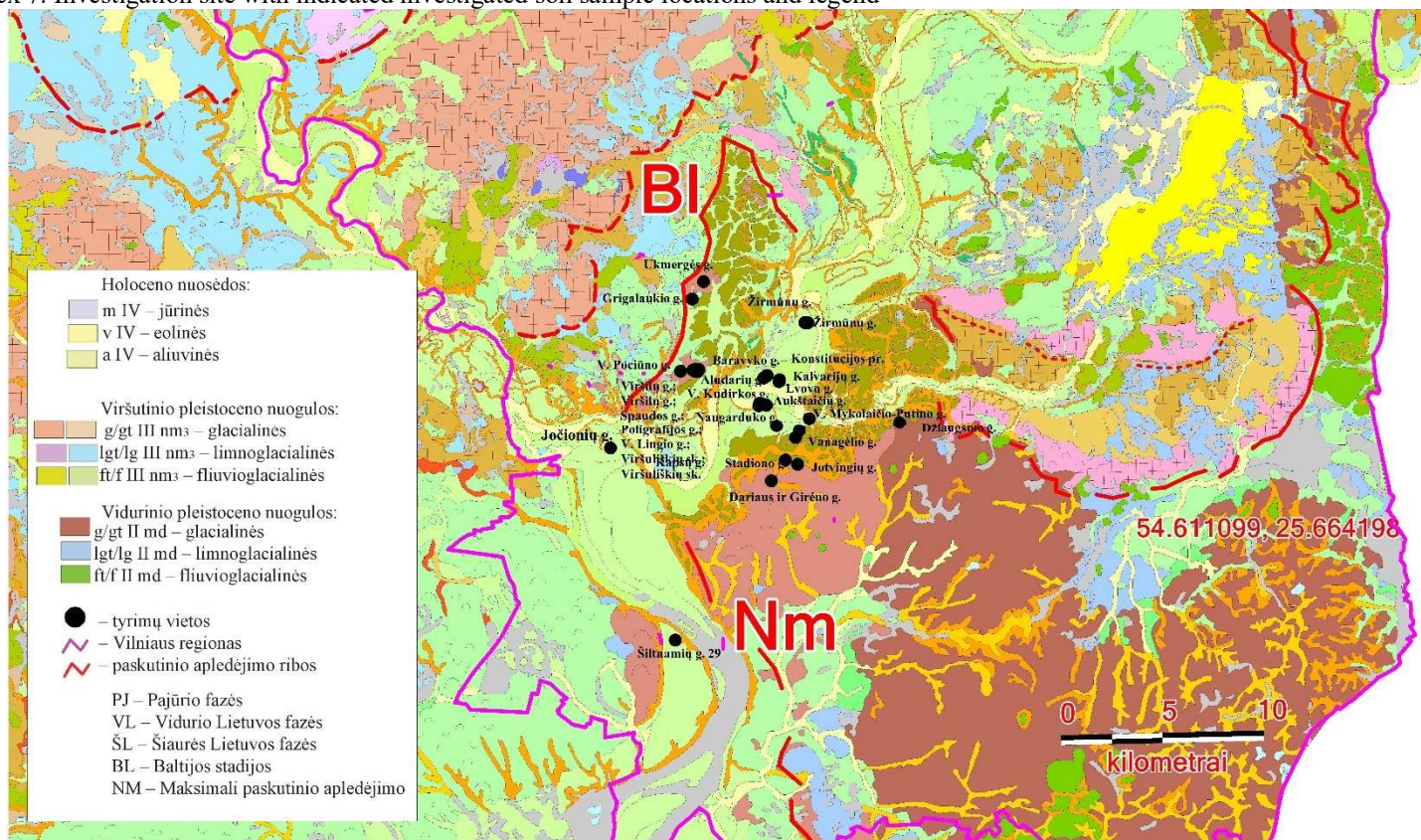
6 PRIEDAS. Triašio slėgio bandymų rezultatų grafinis pateikimas (drenuotos tyrimų sąlygos)
 Annex 6. Graphical presentation of triaxial compression test results (drained test conditions)



*CTT – vienpakopis triašio bandymas; MTT – daugiapakopis triašio bandymas; UCD – neprisotintas konsoliduotas drenuotas; SCD – prisotintas konsoliduotas drenuotas; 50/100 bandinio skersmuo $H/D = 2$, kai ($H = 100$ mm, $D = 50$ mm); 100/200 bandinio skersmuo $H/D = 2$, kai ($H = 200$ mm, $D = 100$ mm); σ'_3 – efektyvusis celės slėgis, σ_3 – celės slėgis; τ_u – kerpamasis stipris

7 PRIEDAS. Faktinės medžiagos žemėlapis ir legenda

Annex 7. Investigation site with indicated investigated soil sample locations and legend



UŽRAŠAMS

Vilniaus universiteto leidykla
Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius
El. p. info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
bookshop.vu.lt, journals.vu.lt
Tiražas 20 egz.