



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

GEOTECHNIKOS KATEDRA

Julija Skliaustytė

**DINAMINIO ZONDAVIMO DUOMENŲ PATIKIMUMO
SMULKIUOSE IR RUPIUOSE GRUNTUOSE TYRIMAS
DYNAMIC PROBING DATA ANALYSIS IN COARSE SOILS**

Baigiamasis magistro darbas

Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 621H25001

Geotechnikos specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Geotechnikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 1.....
Data 2016-06-06

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

Pavadinimas **Dinaminio zondavimo duomenų patikimumo smulkiuose ir rupiuose gruntuose tyrimas**

Autorius **Julija Skliaustytė**

Vadovas **Gintaras Žaržojus**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami dinaminio zondavimo metu išmatuoti duomenys. Apžvelgtas dinaminio zondavimo bandymas, pagrindiniai principai, kuriais remiantis atliekamas bandymas. Pateiktas sąryšis ir koreliacijos koeficientas tarp zondavimo užfiksuotų pagreičių ir grunto kūginio stiprio vandeningame ir nevandeningame grunte. Taip pat sąryšis tarp grunto atsako ir kūginio stiprio vandeningame ir nevandeningame grunte. Išnagrinėjus gautus bandymo rezultatus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, dinaminis zondavimas, atliktas tyrimas, bandymo rezultatai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 50 p. teksto be priedų, 24 iliustr., 4 lent., 36 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: dinaminis zondavimas, pagreičiai, grunto atsakas, grunto praskydymas

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Geotechnical Engineering

ISBN _____ ISSN _____
Copies No. 1.....
Date 2016...06..06

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

Title **Research of dynamic penetration test data reliability in coarse soils.**

Author **Julija Skliaustytė**

Academic supervisor **Gintaras Žaržojus**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

This thesis examines the dynamic probing during the measured data. Overlooked dynamic probing test, the basic principles on which the test is performed. The above relationship and the correlation coefficient between the probe and the ground accelerations recorded cone strength watery and waterless ground. Also, the relationship between the soil response and cone strength watery and waterless ground. An examination of test results, conclusions.

The work consists of 7 parts: introduction, literature review, dynamic probing, study, test results, conclusions, references.

Work size - 50 p. text without appendixes, 24 pictures., 4 tables., 36 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: dynamic probing, accelerations, ground response, liquefaction.

TURINYS

ĮVADAS	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1. Standartizuotas dinaminio zondavimo bandymas	13
1.2. Lietuvoje atlikti dinaminio zondavimo tyrimai	13
1.3. Užsienio autorių publikacijų apžvalga	15
1. DINAMINIS ZONDAVIMAS	20
1.1. Dinaminio zondavimo metodas	20
1.2. Dinaminio zondavimo duomenų patikimumas	22
2. ATLIKTAS TYRIMAS	25
2.1. Tyrimo metu naudota įranga	25
2.2. Modifikuotas zondavimo kūgis	25
2.3. Plakto poslinkių matavimo įranga	26
2.4. Duomenų apdorojimas	27
2.4.1. Duomenų apdorojimui naudotos formulės	27
2.5. Bandymo vieta	28
3. BANDYMO REZULTATAI	34
3.1. Bandymo metu užfiksuoti pagreičiai	34
3.2. Vandens poveikis zondavimo duomenims	37
3.2.1. Vandens poveikis išmatuotiems pagreičiams	39
3.2.2. Vandens poveikis grunto atsakui	41
3.3. Rezultatų analizė	46
IŠVADOS	47
LITERATŪRA	48
A PRIEDAS. STATINIO ZONDAVIMO DUOMENYS	51

PAVEIKSLAI

1 pav. Principinė dinaminio zondo schema.....	20
2 pav. Dinaminės sistemos skaičiavimo modelis pasiūlytas Smith'o 1960 metais (Žaržojus, 2010).....	23
3 pav. Modifikuotas zondavimo kūgis	26
4 pav. Poslinkių matavimo prietaisas pritvirtintas prie plakto	26
5 pav. Zondavimo įranga paruošta bandymui, pamatų bandymo stende	28
6 pav. Bandymo vietos schema, vaizdas iš viršaus	29
7 pav. Bandymo vietos schema, vertikalinis pjūvis	29
8 pav. Pirmojo bandinio granuliometrinė kreivė, bandinio paėmimo gylis 1,4 m.....	30
9 pav. Antrojo bandinio granuliometrinė kreivė, bandinio paėmimo gylis 1,65 m	31
10 pav. Trečiojo bandinio granuliometrinė kreivė, bandinio paėmimo gylis 3,0 m	31
11 pav. Dinaminio zondavimo smūgių grafikas	33
12 pav. Statinio ir dinaminio zondavimo palyginamasis grafikas	33
13 pav. Dviejų smūgių pagreičių istorijos.....	34
14 pav. Zondavimo metu užfiksuoti pagrečiai a	35
15 pav. Grunto kūginio stiprio ir pagreičių palyginamasis grafikas	35
16 pav. Smūgių skaičiaus ir pagreičių palyginamasis grafikas.....	36
17 pav. Smūgių skaičiaus priklausomybė, kai gruntas vandeningas ir ne (Melzer, 1979)	38
18 pav. Tiesinė pagreičio priklausomybė nuo grunto kūginio stiprio iki 3,4 m gylio	40
19 pav. Tiesinė pagreičio priklausomybė nuo grunto kūginio stiprio nuo 3,4 m gylio	41
20 pav. Zondavimo kūgio įsmigimas nuo smūgio	42
21 pav. Grunto atsako ir dinaminio zondavimo smūgių skaičiaus palyginamasis grafikas.....	42
22 pav. Grunto atsako ir kūginio stiprio palyginamasis grafikas.....	43
23 pav. Grunto atsako ir kūginio stiprio tiesinė priklausomybė iki 3,4 m gylio.....	44
24 pav. Grunto atsako ir kūginio stiprio tiesinė priklausomybė nuo 3,4 m gylio	45

LENTELĖS

1 lentelė. Dinaminiai zondai pagal LST EN ISO 22476-2:2005.....	20
2 lentelė. Bandinių fizinės savybės.....	28
3 lentelė. Dinaminio zondavimo metu užfiksuotas smūgių skaičius.....	32
4 lentelė. Duomenų analizės metu gauti koreliacijos koeficientai.....	47

SIMBOLIAI

A – zondo kūgio plotas;
 a_n – vienu matavimu užfiksuotas pagreitis;
 a_{vid} – vidutinis smūgio metu užfiksuotas pagreitis;
 c – bangos sklidimo greitis;
 ct – tam tikra zondavimo strypo dalis;
 d – dalelių skersmuo;
 d_n – vieno matavimo grunto atsakas;
 d_{n-1} – prieš tai buvusio matavimo grunto atsakas;
 E – zondavimo energija;
 E_Y – zondo tamprumo modulis;
 E_{OED} – Odometrinis deformacijų modulis;
 e – vidutinis zondo įsmigimas nuo smūgio;
 F – perduota jėga;
 F_d – grunto dinaminė jėga;
 f_s – grunto šoninis stipris;
 h – zondavimo gylis;
 I_D – grunto tankumo rodiklis;
 L – zondavimo strypų ilgis;
 m – plakto masė;
 m' – priekalo ir zondavimo strypo masė;
 m_s – bandinio masė;
 m_t – taros masė;
 m_{ts} – taros ir bandinio masė;
 N_x – smūgių skaičius;
 N' – smūgių skaičius žemiau gruntinio vandens lygio;
 r – koreliacijos koeficientas;
 q_c – kūginis stipris;
 q_d – dinaminė kūgio smiga;
 t – laikas;
 v_n – vienu matavimu užfiksuotas greitis;
 v_{n-1} – prieš tai buvusiu matavimu užfiksuotas greitis;
 α_x – kūgio stiprio ir smūgių skaičiaus santykis;
 Δu_d – dinaminis (perteklinis) porinis slėgis;

φ – grunto vidinės trinties kampas.

SANTRUMPOS

CDCPI – pataisytas dinaminio zondavimo indeksas (*corrected dynamic cone penetration index*);

CSV – bylų formatas, skirtas saugoti duomenis lentelėms;

CPT – bandymas kūginiu penetrometru (*cone penetration test*);

CPTu – bandymas kūginiu penetrometru kartu matuojant porinį vandens slėgį;

CPU – centrinis mikroprocesorius;

DCPI – dinaminio zondavimo indeksas (*dynamic cone penetration index*);

DPH – sunkus dinaminis zondas;

DPL – lengvas dinaminis zondas;

DPM – vidutinio sunkumo dinaminis zondas;

DPSH-A – ypač sunkus dinaminis zondas, A tipo;

DPSH-B – ypač sunkus dinaminis zondas, B tipo;

DPT – dinaminis grunto zondavimas (*dynamic penetration test*);

EFV – jėgos– greičio metodas (*force velocity integration method*);

EF2 – „jėgos kvadrato“ integravimo metodas (*force squared integration method*);

PDM – polių įrengimo monitorius;

SPT – standartinio zondavimo bandymas (*standard penetration test*).

IVADAS

Pamatų ir pagrindų projektavime vienas svarbiausių elementų yra gruntas. Nuo grunto geologinės sandaros priklauso pamato tipas. Projektuojant pastatus negalime parinkti norimo grunto, kaip pagrindo būsimam statiniui, todėl reikia išsamiai išanalizuoti esamo grunto savybes. Tam yra atliekami inžineriniai geologiniai ir geotechniniai grunto tyrimai. Turint išsamią informaciją apie gruntą, galima optimaliai ir ekonomiškai suprojektuoti statinio pamatus.

Inžineriniam geologiniams ir geotechniniams tyrimams naudojami laboratoriniai tyrimai, taip pat naudojamas in-situ tyrimai, populiariausias jų yra bandymas kūginiu penetrometru (CPT). Bet tiriant giliau slūgsančius gruntus ar tankesnius gruntus, statinio zondo neužtenka, nes jis pro juos neprasiskverbia. Tokiu atveju naudojamas dinaminis grunto zondavimas (DPT). Tačiau duomenys gauti atlikus dinaminį zondavimą, tiesiogiai pamatų projektavime Lietuvoje nenaudojami.

Standartinė zondavimo įranga negalima pamatuoti įrangos darbo parametrų ir grunto atsako į smūgį. Tam buvo modifikuotas ypač sunkus dinaminis zondas. Norint stebėti įrangos darbą prie plakto buvo sumontuota elektroninė poslinkio matavimo sistema, ji padeda įvertinti plakto smūgį. Grunto atsakui vertinti, zondo kūgyje sumontuota pagreičių matavimo įrenginys.

Baigiamojo magistro darbo tema: Dinaminio zondavimo duomenų analizė rupiuose gruntuose. Darbe analizuojami dinaminio zondavimo metu gauti duomenys, gruntą zonduojant modifikuotu ypač sunkiu zonu (DPSH–B).

Darbo tikslas– nustatyti dinaminio zondavimo metu kūgyje atsirandančius pagreičius, ir jų vertes palyginti su zonduojamo grunto savybėmis.

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti dinaminio zondavimo metodą ir jo taikymą skirtingos litologinės sudėties ir genezės gruntuose.
2. Apžvelgti darbo tema pasaulyje atliekamų tyrimų medžiagą ir gautus rezultatus.
3. Įvertinti pagreičių matavimo galimybes dinaminio zondavimo metu.
4. Atlikti dinaminio zondavimo (DPSH–B) bandymus, šalia atlikti bandymus statiniu zonu.
5. Gautus zondavimo duomenis palyginti su atliktais grunto laboratoriniais tyrimais.
6. Apibendrinti ir išanalizuoti gautus rezultatus.

Baigiamajame darbe yra panaudoti doktoranto Vaido Martinkaus grunto laboratorinių tyrimų duomenys.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Standartizuotas dinaminio zondavimo bandymas

Standartas LST EN ISO 22476-2:2005 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Lauko bandymai. 2 dalis. Dinaminis zondavimas“ nustato reikalavimus grunto tyrimui dinaminio zondavimu, tai yra dalis geotechninių tyrinėjimų ir bandymų naudojamų, pagal LST EN 1997-1 ir LST EN 1997-2 reikalavimus. Standarte pateikiama kokia įranga naudojama dinaminiam grunto zondavimui, pateikiamas kiekvieno įrangą sudarančio elemento aprašymas, naudojamos skaičiavimo formulės. Išsamiai aprašoma bandymo metodika ir gautų rezultatų interpretacija su pavyzdžiais.

Dinaminio zondavimo bandymas gali būti naudojamas stiprumo ir deformacinių grunto savybių nustatymui, daugiausia tinka rupiems gruntams, bet taip pat galima naudoti ir smulkiems, per atitinkamas koreliacijas. Taip pat bandymą galima panaudoti labai tankaus grunto sluoksnio gyliui nustatyti. Bet apie gautų rezultatų panaudojimą tiesiogiai pamatų projektavime nėra užsimenama.

Standarte nurodoma, kad šio bandymo rezultatai puikiai tinka palyginti kartu su tiesioginiais grunto tyrimais arba kitais in-situ bandymais.

1.2. Lietuvoje atlikti dinaminio zondavimo tyrimai

G. Žaržojus (2010) savo daktaro disertacijoje išsamiai išanalizuoja statinio ir dinaminio zondavimo metodikas, jų tarpusavio sąsajas Lietuvos gruntuose. Norint susieti statinį ir dinaminį zondavimą dažniausia naudojama netiesioginė sąsaja su tarpiniu santykinio tankumo rodikliu (I_D). Bet tokia sąsaja duoda labai didelius netikslumus ir iškraipo galutinius rezultatus, nes nėra patikimų I_D nustatymo lygčių, kai gruntas tiriamas ypač sunkiu dinaminio zondavimu. Tai skatina ieškoti kitų koreliacinių priklausomybių tarp tiesioginių statinio ir dinaminio zondavimo rodiklių.

Mokslininkas taip pat analizuoja dinaminio zondavimo duomenų patikimumą ir tam poveikį darančius veiksnius ir veiksnių poveikio dydį. Europos normose pateikiami pavyzdžiai, kaip pagal dinaminio zondavimo smūgių skaičių (N_x) galima vertinti santykinį tankį (I_D), vidinės trinties kampą (φ) ir odometrinį deformacijų modulį (E_{OED}), bet tik tada kai zondavimo bandymai atlikti DPL ar DPH zondais, bet Lietuvoje dažniausia naudojamas DPSH zondas.

Palyginus skirtingos zondavimo įrangos smūgių skaičių, įvertinus smūgio savitąjį darbą, buvo nustatyta, kad didžiausias smūgių savitasis darbas yra DPSH–B zonu, o mažiausias– DPL zonu.

Atlikus DPL ir DPSH–A zondu duomenų analizę buvo išskirti skirtingi santykiniai smūgių sąsajos koeficientai skirtingiems gruntams. Nustatyta, kad rupėjant grunto frakcijai didėja santykinis koeficientas. Šį santykinės smūgių sąsajos koeficientą galima nustatyti, pagal gruntų granulometrinės sudėties koeficientą, kuris rupiems gruntams priklauso nuo vyraujančios frakcijos dalelių dydžio.

Nagrinėjant dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) skaičiavimui naudojamas polių kalimo formules buvo nustatyta, kad formulėse naudojami duomenų korekcijos koeficientai arba jų nebuvimas, neatspindi skirtingos grunto sudėties. Pagrindinis skaičiavimams naudojamų kalimo formulių trūkumas tai, kad tikrasis energijos kiekis yra nežinomas, remiamasi tik teoriniu. Tikrajam energijos perdavimui išmatuoti, mokslininkas siūlo pasinaudoti vienmatės bangos sklidimo tampriame kūne teorija. Tolimesniuose skaičiavimuose vertina tik smūgių skaičių (N_x).

Analizuojant smūgių skaičiaus patikimumą, buvo nustatyta, kad didelę poveikį daro grunto geostatinis slėgis ir grunto trintis. Mokslininkas teigia, kad atsižvelgus į tyrimo rezultatus zonuojant rupius gruntus smūgių skaičius gilėjant didėja, pagal tiesinę priklausomybę. Zonuojant kaitaus grunto storymę, smūgių skaičius gali būti iki 50 % didesnis, dėl grunto geostatinio slėgio poveikio. Didėjantis geostatinis slėgis sumažina energijos perdavimą.

Analizuojant DPT ir CPT tarpusavio sąsajas zonuojant DPSH–A zonu buvo nustatyta, kad kūginio stiprio ir smūgių skaičiaus santykis (α_x) turi glaudų ryšį su zondavimo gyliu (h). Darbe pateikiama konstantų vertės, suskirstytos pagal gruntą sudarančias daleles. Todėl atliekant dinaminio zondavimo analizę, reikia bent preliminariai žinoti grunto mechanines ir fizikines savybes.

Lietuvos mokslininkai (Žaržojus *et al.* 2013) atliko tyrimus susijusius su energijos perdavimu atliekant dinaminį zondavimą Lietuvos gruntuose. Didžiausias dinaminio zondavimo trūkumas yra energijos perduodamos į zondavimo kūgį, matavimo nepatikimumas. Atlikti trys bandymai su pritvirtintais matuokliais prie zondavimo strypo, zonuotas gruntas įvairios litologinės sudėties. Bandymo metu matuota energija. Tyrimams atlikti už 1,5 m nuo DPT bandymo buvo atliktas ir statinis zondavimo bandymas kartu matuojant porinį slėgį (CPTu). Abu bandymai, CPTu ir DPT, atlikti tuo pačiu įrenginiu.

Dinaminio zondavimo bandymams buvo naudotas standartizuotas ypač sunkus zondas (DPSH–B), zondavimo plakto svoris– 63,5 kg, kritimo aukštis– 750 mm. Statiniam

zondavimui naudotas standartinis zondas, kūgio kampas 60° , plotas 10 cm^2 , trinties mova -150 cm^2 . Matavimams naudotas akselerometras ir įtempių matuoklis.

Bangos sklidimo greitis zondavimo strypuose, matuotas naudojant polių vientisumo bandymų įrangą. Atliekant DPT bandymą, nustatyta, kad bangos sklidimo skaičiavimai neduoda norimo rezultato, tik padeda įvertinti bangos rezonansą. Perduodama energija apskaičiuota naudojant jėgos–greičio metodą.

Tyrimo rezultatai parodė, kad išmatuota energija perduodama, zondavimo strypais, vidutinio tankumo smėliuose, atitinka teoriškai apskaičiuotą. Tai galime sieti su nedidele trintimi tarp grunto ir zondavimo strypo. Molinguose gruntuose pastebėtas žymus energijos slopinimas, išmatuota energija sudarė tik 16 % smūgio energijos. Smėlinguose gruntuose energijos praradimą galime sieti su trintimi ir strypų jungtimis. Mokslininkai siūlo DPT metu matuoti energiją perduodamą į zondavimo strypus, taip bus išvengta zondavimo rezultatų iškraipymo.

Mokslinės informacijos apie dinaminio zondavimo įrangos tobulinimus nėra daug. Yra tik keletas publikacijų šia tema.

1.3. Užsienio autorių publikacijų apžvalga

Pietų Korėjos mokslininkų grupė (Byun, Lee 2013) modifikavo dinaminį zondą, taip kad būtų įmanoma įvertinti dinaminį grunto atsaką, atsižvelgiant į energiją užfiksuotą zondavimo kūgyje ir priekale. Akselerometrai ir įtempių matuokliai buvo įmontuoti zondavimo kūgio viduje ir priekale. Bandymai atlikti betoninėje grunto „dėžėje“, kurios plotas $1,44 \text{ m}^2$, gylis $1,0 \text{ m}$. Taip buvo kontroliuojami bandymą veikiantys veiksniai. Bandymams naudotas zondas, kurio plakto svoris 8 kg , kritimo aukštis– 575 mm .

Bandymų metu buvo pastebėti energijos nuostoliai, atsirandantys dėl strypų sujungimų, po kiekvieno smūgio jungtys tarp zondavimo strypo šiek tiek atsipalaiduoja. Šie energijos nuostoliai buvo eliminuoti įvedus perdavimo ir atspindžio koeficientus. Iš išmatuotų grunto atsakų, buvo apskaičiuota energijos kiekis tekęs priekalui ir zondavimo kūgiui. Zondavimo kūgiui teko daugiau kaip 64 % energijos, lyginant su priekalo gauta energija.

Atlikus eksperimentus ir skaičiavimus buvo nustatyta, kad energijos nuostoliai didėja, didėjant zondavimo strypo skaičiui (didėja jungčių skaičius). Eliminavus energijos nuostolius, dinaminis atsakas puikiai atvaizduoja silpnus grunto sluoksnius, kurių nebūtų įmanoma užfiksuoti tiriant standartine įranga.

Šis tyrimas rodo, kad energijos nuostoliai, atsiradę dėl zondavimo strypo jungčių, turi būti įvertinti, matuojant energijos kiekį patenkančią į zondavimo kūgį. Nagrinėtas dinaminio zondavimo įrangos modifikavimas gali būti naudingas tankių gruntų apibūdinimui.

Tos pačios mokslininkų grupės iš Pietų Korėjos (Byun *et al.* 2015) 2015 metais buvo publikuotas straipsnis apie hibridinio zondo naudojimą tiriant geležinkelių pagrindus. Straipsnyje aprašomas hibridinis zondavimo įrenginys. Jis sudarytas iš išorinės zondavimo strypo ir vidinio kūgio, juo galima statiškai ir dinamiškai zonuoti gruntą. Akselerometras ir keturi įtempių matuokliai buvo įmontuoti išorinės zondavimo strypo galvoje (viršuje). Kiti keturi įtempių matuokliai įmontuoti į zondavimo kūgio vidų, kūgio zondavimo pasipriešinimui matuoti. Buvo įvestas mechaninės jėgos kalibravimas įtempių matuokliams.

Laboratoriniai bandymams buvo sudarytos visiškai kontroliuojamos sąlygos. Bandymai atlikti betoninėje grunto „dėžėje“, kurios plotas 1,44 m², gylis 1,0 m. Gruntą sudaro du sluoksniai, viršuje skalda, apačioje smėlis. Zonduojant skaldos sankasą, išorinėje strype sumontuoti davikliai fiksuoja dinaminio zondavimo indeksą (DCPI) ir pataisytą zondavimo indeksą (CDCPI) su energija perduota į strypo galvą. Vidinis zondavimo kūgis yra stumiamas gilyn į gruntą matuoti pasipriešinimą zondavimui.

Hibridinis zondavimo bandymas buvo atliktas ir realiomis sąlygomis, gauti duomenys palyginti su standartiniu zondavimo bandymu (SPT). Laboratoriniai bandymai parodė, kad grunto pasipriešinimas zondavimui yra atvirkščiai proporcingas pataisytam dinaminio zondavimo indeksui (CDCPI). Tyrimas parodė, kad bandymai hibridiniu zonu, gali būti efektyviai panaudoti tiriant geležinkelių pagrindus, taip juos paveikiama mažiausia.

Standartinio zondavimo tyrimas labai panašus į dinaminį, SPT metu, gruntas zonduojamas į gruntą kalant gruntotraukis, jį iškeliant į paviršių išimti grunto mėginiai, ir zonduojant toliau.

Atliekant standartinį zondavimą (SPT) (Lukiantchuki, Esquivel 2011) smūgių vertės N priklauso netik nuo grunto parametrų ar gruntotraukio savybių, bet ir nuo energijos perduodamą į zondavimo įrangą, į strypą ir gruntotraukio, smūgio metu. Šių mokslininkų tikslas buvo išanalizuoti ir interpretuoti užfiksuotas jėgas ir pagreičius po plakto smūgio, SPT bandymuose. Tam tikslui ant zondavimo strypo, viršuje – žemiau priekalo, tiek apačioje – virš gruntotraukio, buvo sumontuoti matavimo prietaisai, pagreičių matuoklis ir dinamometras.

Bandymai atlikti natūraliomis grunto slūgsojimo sąlygomis, zonuoti nevandeningi gruntai.

Tyrimo metu buvo gauta, kad potencinės energijos vertės turi būti perskaiciuotos įvertinus gruntotraukio pasipriešinimą zondavimui ir zondavimo strypo svorį. Maksimalūs pagrečiai yra didesni, kai matavimo prietaisai tvirtinami virš gruntotraukio. Skaičiuojant

energijos kiekį, kuris pasiekia gruntotraukį, reikia įvertinti antrinius poveikius, tai svarbu tiriant birius gruntus. Mažo zondavimo pasipriešinimo gruntuose smūgio bangos atspindys yra intensyvesnis, nei didesnio pasipriešinimo gruntuose. Norint dar tiksliau įvertinti energiją, kuri pasiekia gruntotraukį, virš jo reikia sumontuoti platesnio diapazono akselerometrą.

Standartinio zondavimo bandymo smūgių skaičiui didžiausią poveikį daro gruntinis vanduo. Mokslininkas K. J. Melzer 1971 metais publikuotame straipsnyje aprašė, gruntinio vandens poveikis, standartinio zondavimo smūgių skaičiui. Be vandens poveikio, smūgių skaičius priklauso nuo santykinio grunto tankio, grunto suspaudžiamumo ir grunto dalelių dydžio.

Bandymas atliktas laboratorijoje visiškai kontroliuojant bandymo sąlygas. Tyrimui buvo atlikti keturi SPT ir trys CPT bandymai. Bandymams naudotas skirtingo tankio ir granulimetrinės sudėties smėliai.

Vandens poveikio nustatymui buvo atlikti laboratoriniai tyrimai su smėliu, kuris buvo visiškai išdžiovintas ir prisotintas vandens. Buvo nustatytas smūgių skaičius reikalingas ištirti gruntą iki tam tikro gylio esant tam tikram santykiniam grunto tankiui, kai gruntas vandeningas ir nevandeningas. Atlikta šių duomenų statistinė analizė, ji parodė tiesioginę smūgių skaičiaus priklausomybę, kai gruntas vandeningas ir ne.

Bandymo rezultatai parodė, kad esant vidutinio smulkumo ir rupių smėliams, smūgių skaičiaus priklausomybė nuo vandens, nepriklauso nuo smėlio rūšies. Taip pat tyrimas parodė, kad smūgių skaičius yra mažesnis, kai gruntas vandeningas, nes smūgio metu įvyksta zondas smigdamas sukelia grunto praskydimą, taip sumažėja grunto pasipriešinimas zondavimui.

Šio tyrimo metu tyrimo metu gautos priklausomybės yra empirinės, mokslininkas siūlo šiomis priklausomybėmis vadovautis, tik kaip pradiniais duomenimis tolimesnėms analizėms.

Apie pagreičių ir deformacijų matuoklių pritaikymą dinaminiam ir standartiniam zondavimui yra naudojimą grunto tyrimams mini ir kiti mokslininkai (Restrepo *et al.* 2013). Standartinio zondavimo tyrimuose taikė kelis skirtingus energijos apskaičiavimo metodus. Panaudojus bandymo metu užfiksuotus pagreičius ir įtempius, buvo apskaičiuota energija taikant „jėgos kvadrato“ (EF2) ir jėgos–greičio (EFV) integravimo metodus, šie metodai aprašyti standarte ASTM D4633, taip pat apskaičiuota grunto dinaminė jėga (F_d). Bandymus atliko realiomis grunto slūgsojimo sąlygomis.

Tyrimo metu nustatyta, kad naudojant EF2 ir EFV metodus gauti energijos skaičiavimai ir atitinkamas efektyvumas, vidutinis energijos efektyvumas, viso zondavimo metu, gautas 51,6 %. Apskaičiuotos skirtingos dinaminės jėgos vertės gali padėti įvertinti geotechnines charakteristikas, pasinaudojant dinaminės jėgos ir smūgių skaičiui per metrą, proporcingumu.

Smūgių skaičius tenkantis vienam zondavimo metrui naudojamas praktiniuose skaičiavimuose. Smūgio metu, kai plaktas susiliečia su zondavimo strypu (metas į metalą), aukšto dažnio vertės (nuo 1000 iki 10000 Hz) ir pagreičiai (nuo 10000g), sukelia trukdžius, kurie neigiamai veikia fiksuojamą grunto atsaką.

Mokslininkų grupė iš Australijos (Look *et al.* 2015) nustatė skirtumus tarp smūgių skaičiavimo ir skaitmeninių matavimų. Žmogaus akis negali išmatuoti, kai zondas į gruntą įsminga tik 5 mm, arba, kai atšoka esant kietam gruntui, taip pat, kai zondavimo strypas susispaudžia smūgio metu. Standartinio zondavimo metu matavimams panaudotas polių įrengimo monitorius (PDM), juo fiksuojama polio laikomoji galia įrengimo metu. PDM išmatuoja nusistovėjusį ir laikiną gniuždymą, plakto efektyvumą, strypų susispaudimą smūgio metu, taip pat galima nustatyti pikines greičio (energijos) vertes. Bandymams naudota standartinė zondavimo įranga, plaktas– 63,5 kg, plakto kritimo aukštis– 760 mm. Bandymai atlikti realiomis grunto slūgsojimo sąlygomis, zonuoti įvairios sudėties gruntai.

Atlikus tyrimą, mokslininkai nustatė, kad dabar naudojamas standartinio zondavimo smūgių skaičiaus vizualus vertinimas turi paklaidą. Ji gali paveikti projektavimą, jeigu bus naudojamas tik jis. PDM įrenginys sėkmingai naudojamas polių kalime, jis taip pat gali būti sėkmingai panaudotas atliekant SPT bandymus. Išmatuotas energijos perdavimo koeficientas priklauso nuo grunto kietumo ir zondavimo strypų ilgio. Šis energijos perdavimo koeficientas kartu smūgių skaičiumi gali būti naudojamas projektavime.

Publikacijose (Restrepo *et al.* 2013, Žaržojus *et al.* 2013, Look *et al.* 2015) aprašytuose bandymuose naudoti pagreičių ir deformacijų matuokliai buvo sumontuoti taip, kad galėjo įvertinti tik pačios energijos perdavimą ir jos kalibravimą.

Didžiosios Britanijos mokslininkas D. D. Langdonas 1999 metais aprašė modifikuotą lengvąjį dinaminį zondą pavadinimu „PANDA“. Zondas veikia naudodamas kintamą energiją, juo lengvai gali naudotis vienas žmogus. Zonuoti galime bet kokią gruntą iki 4– 6 metrų gylio, jeigu tik leidžia galimybės ir gilesnius, zondavimo atsparumas iki 20–30 MPa.

Zondo veikimo principas yra toks, plaktuku smūgiuojama į zondo galvą, smūgis zondui suteikia energiją. Mikroprocesorius prijungtas prie zondo kiekvienam smūgiui fiksuoja du parametrus, smūgio greitį ir zondavimo kūgio gylį ir apdoroja gautus duomenis iš pritvirtintų jutiklių. Vienas iš jutiklių yra akselerometras įmontuotas į zondo galvą, smūgio metu fiksuoja greičius ir juos perduoda į mikroprocesorių. Kitas jutiklis yra speciali ištraukiama juosta, įmontuota į zondavimo kūgį. Procesorius apdoroja gautus duomenis, apskaičiuoja ir parodo dinaminę kūgio smigą ir gylį realiu laiku. Dinaminės smigos skaičiavimams naudojama polių kalimo formulė. Bandymo rezultatai gali būti perkelti į kompiuterį išsamesnei analizei ir

duomenų palyginimui. Dinaminės kūgio smigos rodiklį tiesiogiai kompiuteryje galime palyginti su grunto kūginiu stipriu, abu atvaizduojami viename grafike.

Mokslininkas išskiria pagrindines dvi zondo „PANDA“ paskirtis. Pirmoji galima stebėti grunto sutankinimą kokybę, įrengiant dirbtinius grunto pagrindus. Antroji paskirtis yra atlikti grunto tyrimams įvairiose vietose, ypač ten kur sunku patekti su įprasta zondavimo įranga, tiriant šlaitų stabilumą, kelių ir geležinkelių dangoms ir sankasoms tirti.

2013 metais mokslininkų grupė iš Brazilijos (Figueiredo *et al.* 2013) atliko analizę kokie tyrimai yra atlikti dinaminio zondavimo bandymuose. Mokslininkai apžvelgė ir apibendrino tyrimus. Nustatė, kad norint ištirti grunto savybes dinaminio zondavimu, jį reikia sieti su standartiniu zondavimu, nors įranga skiriasi tiek geometrinėmis savybėmis, perduodamos energijos dydžiu ir plakto kritimo aukščiu. Praktiška, nes standartinis zondas plačiai naudojamas pasaulyje ir su juo susipažinta išsamiai. Mokslininkai taip pat išanalizavo kokie tyrimai atlikti siejant dinaminį zondavimą su statiniu zondavimu. Atlikti moksliniai tyrimai šia tema davė pakankamai gerus rezultatus, kad būtų galima įvesti jų tarpusavio koreliacijas.

Apžvelgus literatūrą galime teigti, kad norint gauti kuo išsamesnius duomenis dinaminio zondavimo metu, reikia įrangą modifikuoti taip, kad būtų galima kuo labiau sumažinti faktorius iškreipiančius matavimo rezultatus. Dinaminį zondavimą galime sieti su Lietuvoje plačiai naudojamu statiniu zondavimu.

1. DINAMINIS ZONDAVIMAS

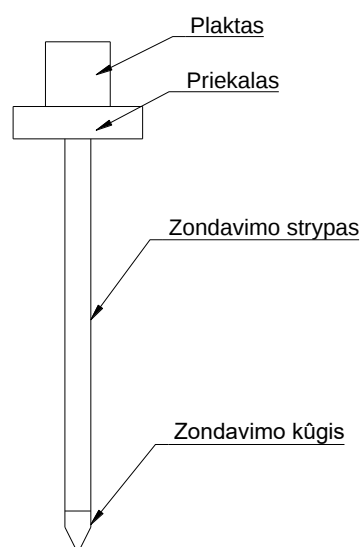
1.1. Dinaminio zondavimo metodas

Pirmieji įrašai apie dinaminį zondą atsirado Vokietijoje, apie XVII a.. Zondo pradininkas Nicholas Goldmannas gruntui tirti naudojo „kalamąjį zondą“. 1936 m. E. Künzelis Vokietijoje pristatė grunto tyrimo in-situ įrenginį „Prüfstab“ (bandymų strypą). Šis prietaisas buvo standartizuotas Vokietijoje 1964 m. standartu DIN 4094 ir pavadintas lengvuju zonu (Kleyn ir kt., 1982). Remiantis kitais literatūros šaltiniais, kitu dinaminio zondavimo metodo pradininku laikomas A. J. Scala (Luo ir kt., 1998). 1956 m. A. J. Scala dirbdamas Viktorijos krašto kelių valdyboje, naudojo savadarbį lengvojo tipo dinaminį zondą. Zondas sudarytas iš 9 kg plakto, mėtomo iš 508 mm, kūgio kampas 30 laipsnių. (Scala, 1985). Patobulinta ir pabaigta kurti, dinaminio zondavimo procedūra pristatyta 1989 m., ISSMFE parengtoje ataskaitoje kartu su kitomis zondavimo metodikomis (Žaržojus, 2010).

Dinaminis zondavimas (DPT) yra vienas iš inžinerinių geologinių lauko tyrimo metodų, kuriuo nustatomas netiesioginės gruntų fizinės ir mechaninės savybės. Lietuvoje jis taikomas rečiau nei statinis zondavimas (CPT).

Tiriant giliau slūgsančius gruntuos ar tankesnius gruntuos statinio zondo neužtenka, nes jis pro juos neprasiskverbria. Tokiu atveju dažniausia naudojamas dinaminis grunto zondavimas.

Dinaminį zondą sudaro: priekalas, plaktas, zondavimo strypas, kūgis, kuris tvirtinamas prie strypo galo, juo zonduojamas gruntas. Principinė dinaminio zondo schema pateikta 1 paveiksle. Priklausomai nuo dinaminio zondo tipo, zondą sudarantys elementai yra skirtingų charakteristikų, jų aprašymai pateikti 1 lentelėje.



1 pav. Principinė dinaminio zondo schema

Dinaminio grunto zondavimas iš principo vyksta taip: plaktu smūgiuojama per priekalą, smūgio energija perduodama į zondavimo strypus, toliau energija iš jų patenka į kūgį. Kūgis gavęs kinetinę energiją įsminga į gruntą. Tokiu principu vyksta grunto zondavimas visais dinaminiais zondais, skiriasi tik dinaminio zondavimo metu skaičiuojamas smūgių skaičius (N_x) tam tikram gylio intervalui. Zonduojant lengvuoju (DPL), vidutinio sunkumo (DPM) ir sunkiuoju (DPH) dinaminiais zondais skaičiuojamas smūgių skaičius, tenkantis 10-čiai centimetrų, o zonduojant ypač sunkiais (DPSH-A ir DPSH-B) dinaminiais zondais 20-čiai centimetrų.

1 lentelė. Dinaminiai zondai pagal LST EN ISO 22476-2:2005

Įranga	Simbolis	Matavimo vienetai	DPL	DPM	DPH	DPSH-A	DPSH-B
Plakto masė	M	kg	10±0,1	30±0,3	50±0,5	63,5±0,5	63,5±0,5
Plakto kritimo auštis	h	mm	500±10	500±10	500±10	500±10	750±20
Priekalo skersmuo	d	mm	50	50	50	50	50
Priekalo masė	M'	kg	6	18	18	18	30
Kūgio (90°) plotas	A	cm ²	10	15	15	16	20
Kūgio (90°) skersmuo	D	mm	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3	45,0±0,3	50,5±0,5
Strypo masė	m	kg	3	6	6	6	8
Strypo skersmuo	d _r	mm	22	32	32	32	35
Savitasis smūgio darbas	E _n	kJ/m ²	50	100	167	194	238

Smūgių skaičius yra tiesioginis dinaminio zondavimo metu gaunamas rodiklis, zonduojant tą patį gruntą skirtingais zondais gausime skirtingą smūgių skaičių. Standartas LST EN ISO 22476-2:2005 „Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Lauko bandymai. 2 dalis. Dinaminis zondavimas“ siūlo zondavimo įrangos poveikį smūgių skaičiui eliminuoti įvedus netiesioginį dinaminio zondavimo rodiklį dinaminę kūgio smigą q_d (MPa) (1). Standarte siūloma dinaminę kūgio smigą q_d , skaičiuoti, pagal Eytelwein (Dutch) polių kalimo formulę:

$$q_d = \frac{E}{A \cdot e} \cdot \left(\frac{m}{m + m'} \right); \quad (1)$$

čia E – zondavimo energija, kJ; A – zondo kūgio plotas, m^2 ; e – vidutinis zondo įsmigimas nuo smūgio, m; m – plakto masė, kg; m' – priekalo ir zondavimo strypo masė, kg.

Lietuvoje dinaminis zondavimas privalo būti atliekamas, pagal LST EN ISO 22476-2:2005 standarto nustatytą metodiką.

1.2. Dinaminio zondavimo duomenų patikimumas

Dinaminio zondavimo smūgių skaičius priklauso nuo šių veiksnių: naudojamos įrangos ir zonduojamo grunto savybių. (Bondarik, 1967; Трофименков, Воробков, 1981; Рубинштейн, Кулачкин, 1984; Stefanoff, Sanglerat *etc.*, 1988; Sy, 1993; Robertson, 2006; Dundulis, Žaržojus, 2008; Daniel, 2008; Žaržojus, Dundulis, 2010).

Įrangos savybės, nuo kurių priklauso smūgių skaičių:

- 1) Strypo deformacijos ir sujungimo kokybė;
- 2) Plakto kritimo aukštis;
- 3) Zondavimo greitis;
- 4) Zondavimo pertraukos;
- 5) Strypo trintis į gruntą.

Grunto savybės, nuo kurių priklauso smūgių skaičius:

- 1) Pertankinimo slėgis;
- 2) Įtempių dydžiai ir sklaida;
- 3) Granuliometrinė ir mineralinė sudėtis, amžius, cementacija;
- 4) Dalelių geometrija;
- 5) Drenavimosi sąlygos;
- 6) Fizikinės ir mechaninės savybės.

Visi šie veiksniai paveikia, tiek smūgių skaičiaus didėjimui, tiek smūgių skaičiaus mažėjimui. Norint eliminuoti bent įrangos poveikį smūgių skaičiui jį galime perskaičiuoti į dinaminę kūgio smigą q_d (MPa). Bet remiantis literatūra, smūgių skaičiaus perskaičiavus į dinaminę kūgio smigą gauti rezultatai yra labai netikslūs (Poulos, Davis, 1980; Terzaghi, Peck *etc.*, 1996).

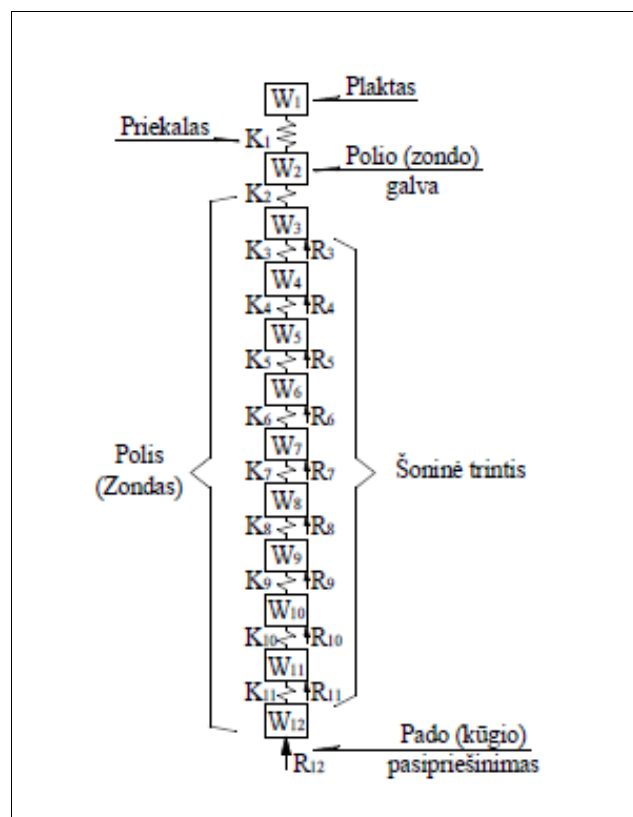
Dinaminio zondavimo procesą galima aprašyti, naudojant polių kalimo dinamines formules, jų matematinės išraiškos tos pačios. 2 paveiksle pateiktas dažniausia skaičiavimuose naudojamas Smith'o dinaminės sistemos modelis. Polis yra idealizuojamas, suskaidant jį į svorių ir spyruoklių elementus. Šis modelis paremtas vienmatės bangos sklidimo teorija.

Vienmatės bangos sklidimo teorija pradėta vystyti jau daugiau kaip prieš amžių. Teorija supaprastinama, kad ją būtų patogų taikyti praktikoje: skersinė banga strype sklinda tam tikru greičiu (c , m/s) ir po tam tikro laiko intervalo (t , s) tam tikra strypo dalis (ct , m) bus

suspausta, o likusi strypo dalis bus neveikiama įtempių (Timoshenko, Goodier, 1951). Pirmąjį ir dar naudojamą supaprastintą skaičiavimo algoritmą sukūrė E. A. L. Smith'as (1960). Jo sukurtas skaičiavimas grindžiamas baigtinių skirtumų metodu. Naudojant vienmatės bangų sklidimo teorijos formules, pagal pasirinktą apkrovą galima apskaičiuoti polio deformacijas ir laikomąją galią. Ši bangos sklidimo teorija įvertina plakto perduodamą energiją į polį smūgio metu. Išsamios informacijos apie dinaminio zondavimo metu perduodamą energiją nėra, todėl galima remtis polių kaimo dinamikos teorija.

Standartinio zondavimo metu perduodama energija yra išsamiai išnagrinėta. Standartinio zondavimo ir dinaminio zondavimo bandymo principas yra toks pat, todėl galima remtis atliktais moksliniais tyrimais šia tema.

1979 metais publikuotame straipsnyje (Shmertmann, Palacios), išsamiai aprašomas energijos perdavimas zonduojant SPT zondą. Daugiausia energijos patenka į gruntotraukį, kuriuo zonduojamas gruntas, atlikus analizę, nustatyta, kad vieno zondavimo metu atlikus daugiau nei 500 smūgių prarandama nuo 30 % iki 85 % energijos t. y. į kūgį perduota energija gali sudaryti tik ketvirtadalį plakto perduotos energijos. Šiuos energijos nuotolius sukelia naudojamos įrangos savybės ir zonduojamas gruntas.



2 pav. Dinaminės sistemos skaičiavimo modelis pasiūlytas Smith'o 1960 metais (Žaržojus, 2010)

J. H. Shmertmann ir A. Palacios perduodamos energijos kiekį siūlo apskaičiuoti pagal darbo–energijos teoremos formules (2), (3). Dinaminio zondavimo standarte LST ISO 22476-2:2005 energijos kiekiui nustatyti siūloma naudoti formulę (3).

$$E = \frac{c}{E_Y \cdot A} \cdot \int_0^{\frac{2L}{c}} F^2(t) \cdot dt; \quad (2)$$

$$E = \int_0^{t_{\max}} F(t) \cdot v(t) \cdot dt; \quad (3)$$

čia E – energija, kJ; E_Y – zondo medžiagos Young'o modulis, MPa; A – zondavimo strypų skerspjūvio plotas, m²; c – bangos sklidimo greitis, m/s; L – zondavimo strypų ilgis, m; t – laiko intervalas, s; F – perduota jėga, kN.

Energijos praradimą sukelia geostatinis grunto slėgis ir zondavimo strypus veikianti trintis. Zonduojant dinaminio zonu trintis labiausia pasireiškia zonduojant smulkius gruntus, ją galime sumažinti zondavimo metu naudojant gręžimo skystį. Grunto geostatinio slėgio poveikis didina grunto dalelių dydis, smulkiuose gruntuose smūgių skaičius padidėja, kai virs rupių gruntų slūgso smulkūs smūgių skaičius padidėja iki 50 % (Žaržojus, 2010)

Remiantis atlikta literatūros analize, polių kalimo formulėmis nevertėtų taip pasitikėti, nes skaičiavimuose naudojamas teorinis energijos kiekis, o ne išmatuotas zondavimo metu. Atliekant dinaminį zondavimą perduodama energija yra viena svarbiausių charakteristikų, padedančių įvertinti zondavimo duomenis. Skaičiavimams ir dinaminio zondavimo metu gautiems duomenims analizuoti reikia naudoti išmatuotos energijos kiekį.

2. ATLIKTAS TYRIMAS

2.1. Tyrimo metu naudota įranga

Standartine dinaminio zondavimo įranga neįmanoma pamatuoti grunto atsako. Tyrimams buvo naudotas patobulintas ypač sunkus dinaminis zondas (DPSH-B), jis standartizuotas standartu LST EN ISO 22476-2:2005, visų standartizuotų dinaminių zondų aprašymas pateiktas 1 lentelėje. Šį dinaminį zondą sudaro: plaktas 63,5 kg, jis mėtomas iš 760 mm aukščio į priekalą. Priekalas sujungtas su zondavimo strypais (36 mm), jų gale prisuktas kūgis, jo skersmuo 50 mm, kūgio kampas 90°. Plaktu smūgiuojama į priekalą, iš priekalo kinetinė energija perduodama į zondavimo strypus, per juos į kūgį, kuris įsminga į gruntą. Tiriant gruntą dinaminiu zonu skaičiuojamas smūgių skaičius (N_{20}) reikalingas zondavimo strypui įsmigti į gruntą 20 cm.

2.2. Modifikuotas zondavimo kūgis

Tyrimams buvo pagamintas specialus kūgis, savo matmenimis atitinkantis standartinį DPSH kūgį. Jis susideda iš korpuso ir įsukamo antgalio, patį kūgį galima išardyti (žr. pav. 3). Bandymams naudoto kūgio korpuse buvo išgręžta skylė, įrangos montavimui. Kūgyje buvo sumontuotas poslinkių pagreičių matuoklis. Patį centrinį mikroprocesorių (CPU), kur vyksta visos informacijos apdorojimas sudaro: pagreičių jutiklis, mikroprocesorius, baterija ir atminties kortelė (Micro SD), joje saugoma informacija. Pagreičių jutiklis yra sujungtas su CPU ir pritvirtintas prie vidinio kūgio korpuso. Kūgio viduje prietaisas yra apsaugotas nuo drėgmės patekimo ir kontaktų susilietimo, taip pat nuo žalingų vibracijų, atsirandančių smūgio metu. Visi baterijos krovimo kontaktai, jungtukai, atminties kortelės lizdas, USB jungtis prietaiso programavimui, yra išvesti į kūgio išorę.

Pagreičių jutiklis yra analoginis (tolydinis laikas ir tolydinė amplitudė), diskretizacijos laipsnis 14 bitų. Naudoto pagreičių jutiklio projektinis matavimo diapazonas yra $\pm 500g$ ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) su didžiausia netiesiškumo paklaida 2 %, didėjant pagreičiams paklaida analogiškai didėja. Pagreičių jutiklio perduodama informacija yra nuskaitomas be žemo dažnio filtrų.

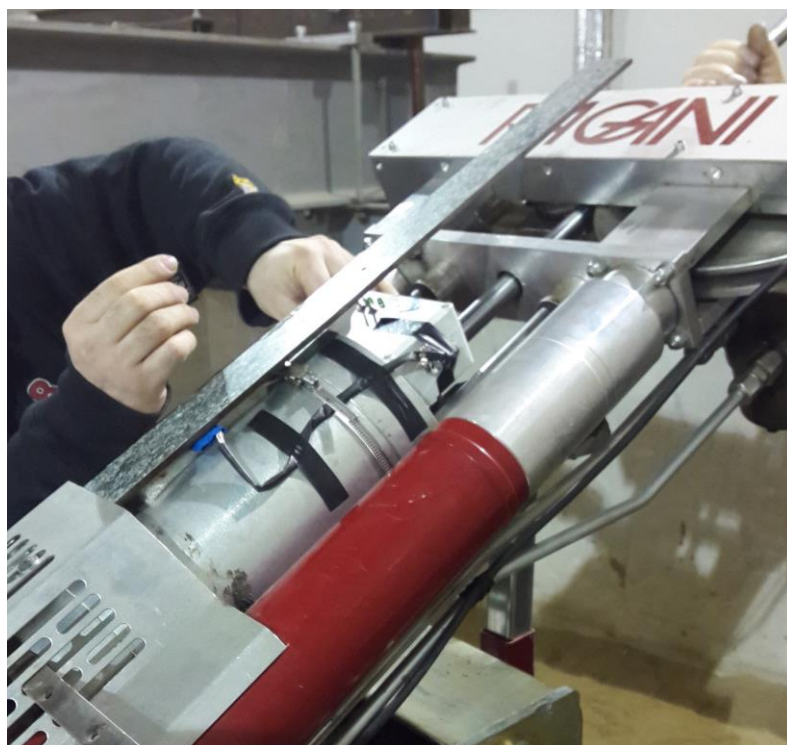
Centrinio mikroprocesoriaus veikimo algoritmas yra toks: įjungus atliekamas pagreičių jutiklio kalibravimas, rezultatai įrašomi į atminties kortelę. Nustatytu dažniu (40000 kartų per sekundę) matavimai įrašinėjami į atminties kortelę CSV formatu. Į žiedinę atmintį įrašoma 100 užfiksuotų rezultatų, taip gauname smūgio istoriją.



3 pav. Modifikuotas zondavimo kūgis

2.3. Plakto poslinkių matavimo įranga

Plakto poslinkių matavimo įrangą sudaro: mikroprocesorius, baterijos, HOLO efekto jutiklis (veikiant išoriniam magnetiniam laukui atsiranda elektrovaros jėga), SD atminties kortelė, ir magnetinė liniuotė (padalos vertė 0,79 mm). Liniuotė tvirtinama prie DPSH zondo plakto rėmo. Prie plakto viršaus tvirtinama HOLO jutikliai ir mikroprocesorius. Bendras poslinkių matavimo įrangos svoris yra mažiau nei 100 g, priimame, kad matavimams needaro poveikio. Matavimų rezultatai įrašomi į atminties kortelę, tokiu pat formatu, kaip ir pagreičių matavimo rezultatai – CSV.



4 pav. Poslinkių matavimo prietaisas pritvirtintas prie plakto

2.4. Duomenų apdorojimas

Kūgio greitis prieš ir po smūgio yra 0 m/s, tačiau atliekant bandymus ir apskaičiavus kūgio greitį, pagal išmatuotus pagreičius, tokio rezultato nebuvo gauta. Bet greičio kreivė lygiagreti laiko ašiai, todėl buvo įvesti pakeitimai, 2–5 rezultatai padidinti, kad kūgio greitis po smūgio būtų lygus 0 m/s. Rezultatai buvo padidinti tik tiek, kad bendra įrašo pagreičių suma būtų lygi 0. Pagreičių jutiklio diapazonas yra per mažas norint užfiksuoti visus kūgio pagreičius. Neatitiktimai pastebėti 2–5 užfiksuotų pagreičių intervale, jie viršijo 780g ($g=9,81 \text{ m/s}^2$). Duomenų analizėje buvo priimta, kad apskaičiuoti poslinkiai neturi viršyti 0,79 mm, vienos tiesioginio poslinkio matavimo paklaidos.

2.4.1. Duomenų apdorojimui naudotos formulės

Pagreičio skaičiavimo formulė :

$$a_n = (a_{vid} - a) \cdot \frac{\left(\frac{3300}{2^{16}}\right)}{2,2}; \quad (4)$$

Čia a_n – vienu matavimu užfiksuotas pagreitis, m/s^2 ; a_{vid} – vidutinis smūgio metu užfiksuotas pagreitis, m/s^2 .

Greičio skaičiavimo formulė:

$$v_n = -a_n \cdot 0,000025 \cdot g + v_{n-1}; \quad (5)$$

Čia v_n – vienu matavimu užfiksuotas greitis, m/s ; a_n – vienu matavimu užfiksuotas pagreitis, m/s^2 ; g – laisvo kritimo pagreitis, m/s^2 ; v_{n-1} – prieš tai buvusiu matavimu užfiksuotas greitis, m/s .

Zondavimo gylio skaičiavimo formulė:

$$d_n = d_{n-1} + v_n \cdot 0,000025; \quad (6)$$

čia d_n – vienu matavimu užfiksuotas grunto atsakas, m; d_{n-1} – prieš tai buvusio matavimo grunto atsakas, m; v_n – vienu matavimu užfiksuotas greitis, m/s .

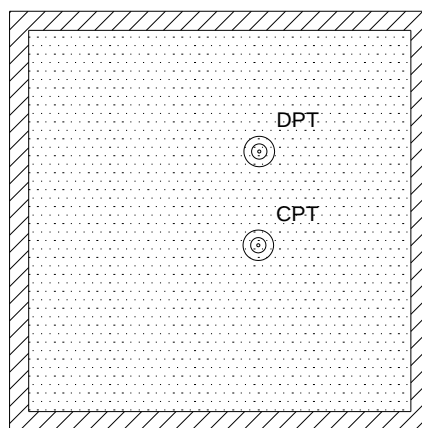
2.5. Bandyto vieta

Bandymai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Geotechnikos mokslo laboratorijoje, esančiame pamatų bandymo stende, jo plotas 25,0 m², gylis apie 5,0 m. Bandyto vietos nuotrauką ir schemas žiūrėti 5, 6 ir 7 paveiksluose. Tarp statinio zondo ir dinaminio zondo bandymų vietų, išlaikytas atstumas reikalaujamas standarte.

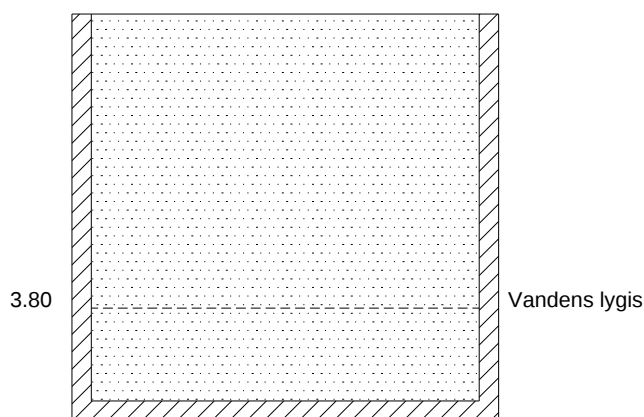


5 pav. Zondavimo įranga paruošta bandymui, pamatų bandymo stende

Dirbtinai suformuotą grunto masę sudaro smulkus ir vidutinio rūpumo smėlis, formuojant grunto sluoksnius, jis buvo tankinamas. Bandyto vietoje, grunto masėje imituojant realias sąlygas, masėje suformuotas gruntinio vandens lygis, jis 3,8 m gylyje.



6 pav. Bandymo vietos schema, vaizdas iš viršaus



7 pav. Bandymo vietos schema, vertikalinis pjūvis

Laboratoriniai grunto bandymai atlikti Geotechnikos mokslo laboratorijoje. Iš polių bandymo stende esančio grunto masyvo buvo paimti trys grunto bandiniai. Pirmasis bandinys paimtas iš 1,4 m, antrasis– 1,65 m, trečiasis– 3,0 m, gylio nuo paviršiaus. Laboratorijoje nustatyta bandinių fizinės savybės, pateiktos 2 lentelėje, taip pat atliktas bandinių granulimetrinės sudėties tyrimas.

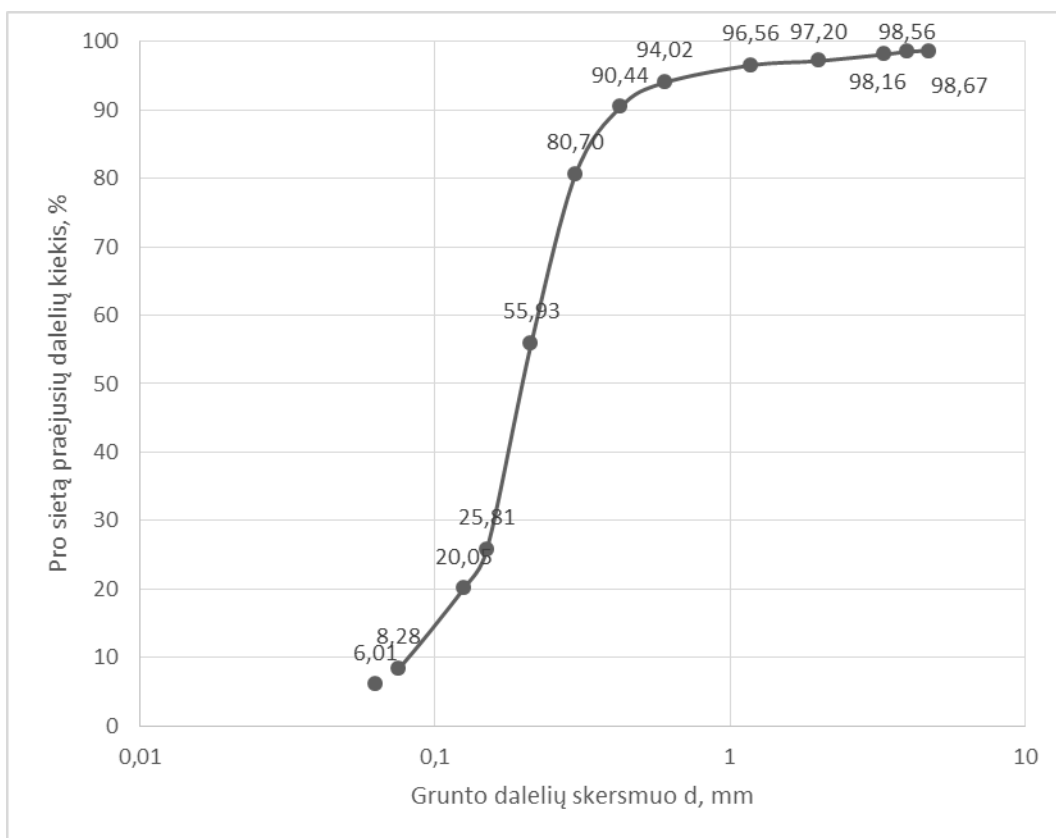
2 lentelė. Bandinių fizinės savybės

Bandinio numeris	Drėgnis W, %	Tankis ρ , g/cm ³	Sauso grunto tankis ρ_d , g/cm ³	Poringumo koeficientas e , vnt. d.	Tankumas I_D , vnt. d.
1	4,8	1,62	1,55	0,712	0,74
2	4,4	1,63	1,57	0,693	0,76
3	3,7	1,61	1,67	0,647	0,81

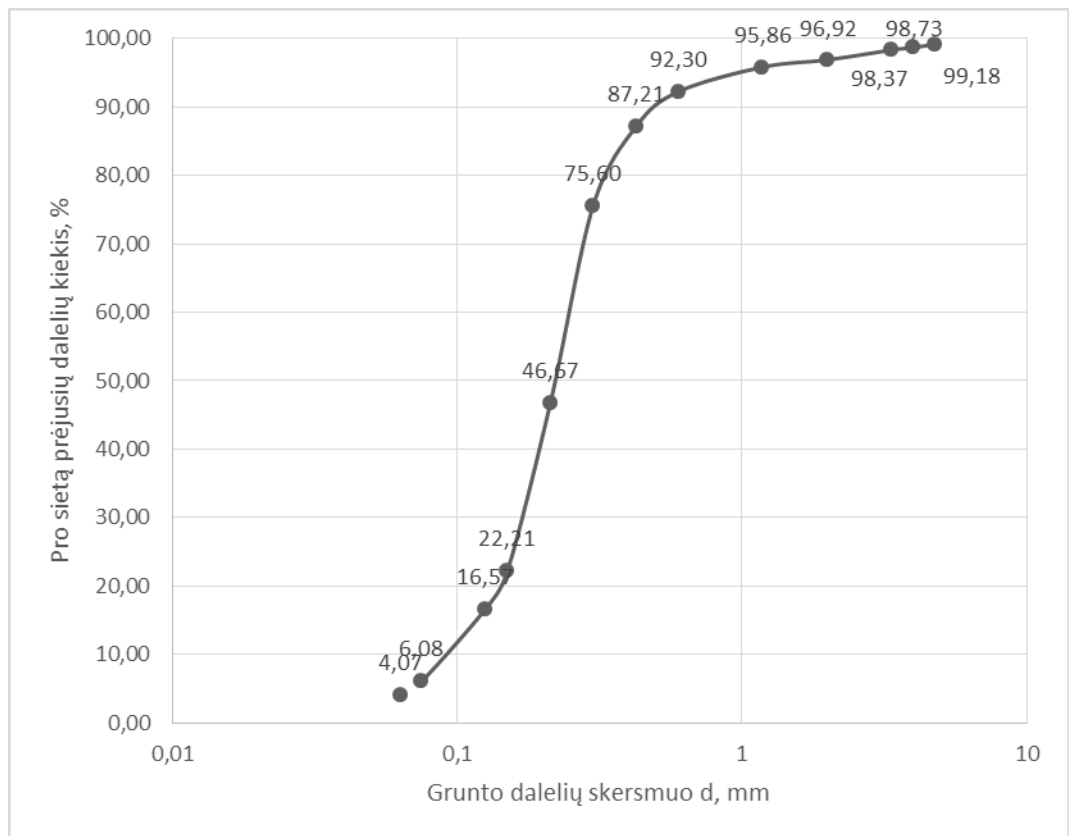
Pagal apskaičiuotas tankumo rodiklio vertes, kurių intervalas yra 0,74–0,81 vnt. d., remiantis standartu LST EN ISO 14688-2: 2004, gruntas yra tankus.

Bandinių granuliometrinė sudėtis pateikta, granuliometrinėmis kreivėmis, atitinkamai kiekvieno bandinio, pirmojo– 8 paveiksle, antrojo– 9 paveiksle ir trečiojo– 10 paveiksle. Pagal granuliometrinių kreivių formas nustatyta, kad gruntas yra vienodos sanklodos, rūšiuotumo koeficientas yra $C_u < 6$, sanklodos koeficientas yra $C_c < 1$. Dažniausia vienodos sanklodos gruntu sudaro vidutinio rūpumo, smulkūs ir dulkingi smėliai.

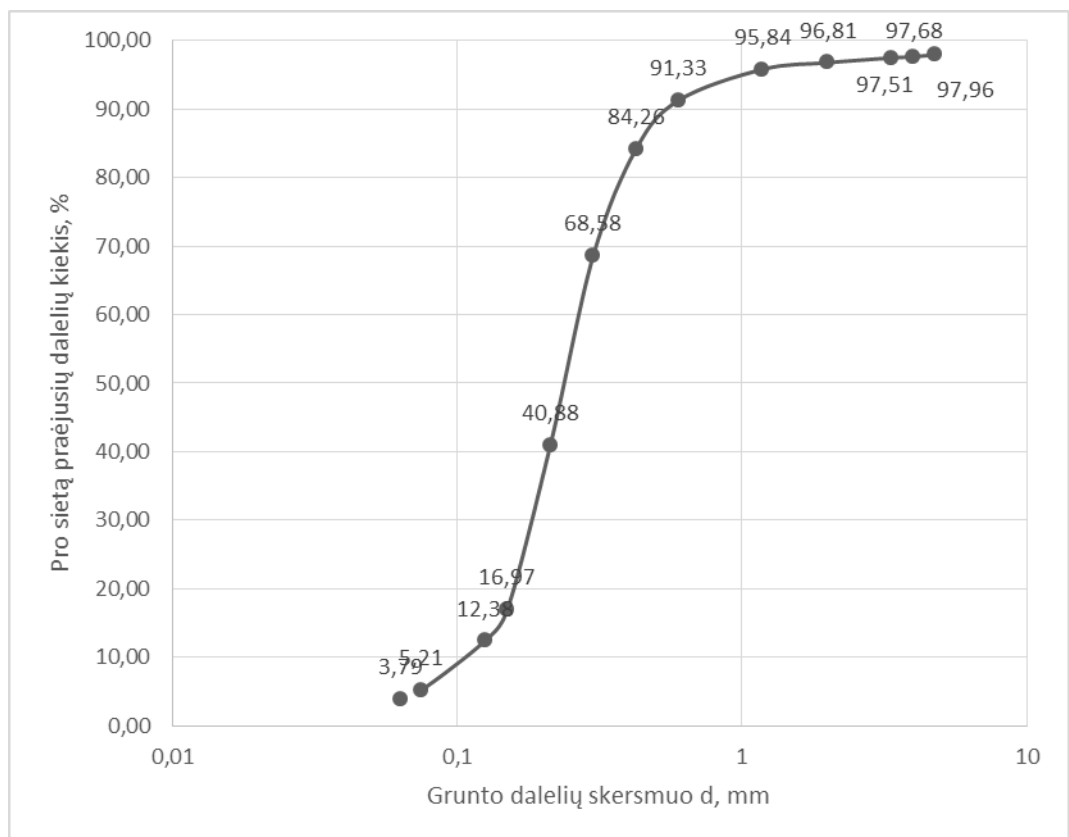
Atlikus laboratorinius grunto tyrimus nustatyta, kad pamatų bandymo stende, dirbtinai suformuotas grunto masyvas sudarytas iš vienodos sanklodos, vidutinio tankumo– tankaus smėlio.



8 pav. Pirmojo bandinio granuliometrinė kreivė, bandinio paėmimo gylis 1,4 m



9 pav. Antrojo bandinio granulimetrinė kreivė, bandinio paėmimo gylis 1,65 m



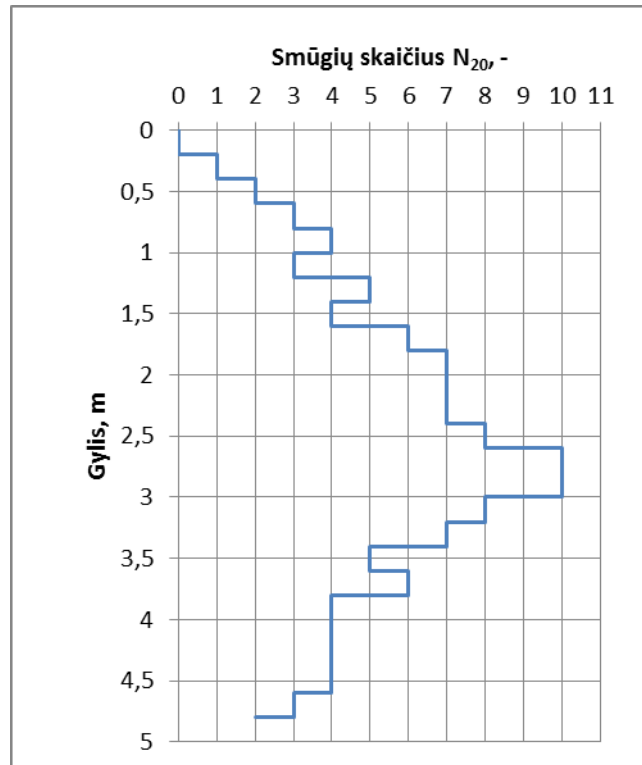
10 pav. Trečiojo bandinio granulimetrinė kreivė, bandinio paėmimo gylis 3,0 m

Norint sužinoti grunto nevienalytiškumą, pamatų bandymo stende buvo atliktas statinio zondavimo (CPT) bandymas. Statiniu zonu buvo matuojamas grunto kūginis stipris (q_c , MN/m²) ir grunto šoninis stipris (f_s , kN/m²), matavimo intervalas kas 2 cm. Viso statinio zondavimo metu užfiksuoti duomenys pateikti A priede. Pagal statinio zondavimo metu išmatuotas grunto kūginis stiprio vertes, remiantis standartu LST EN 1997–2:2007, galime teigti, kad grunto storymę sudaro vidutinio tankumo– tankus smėlis.

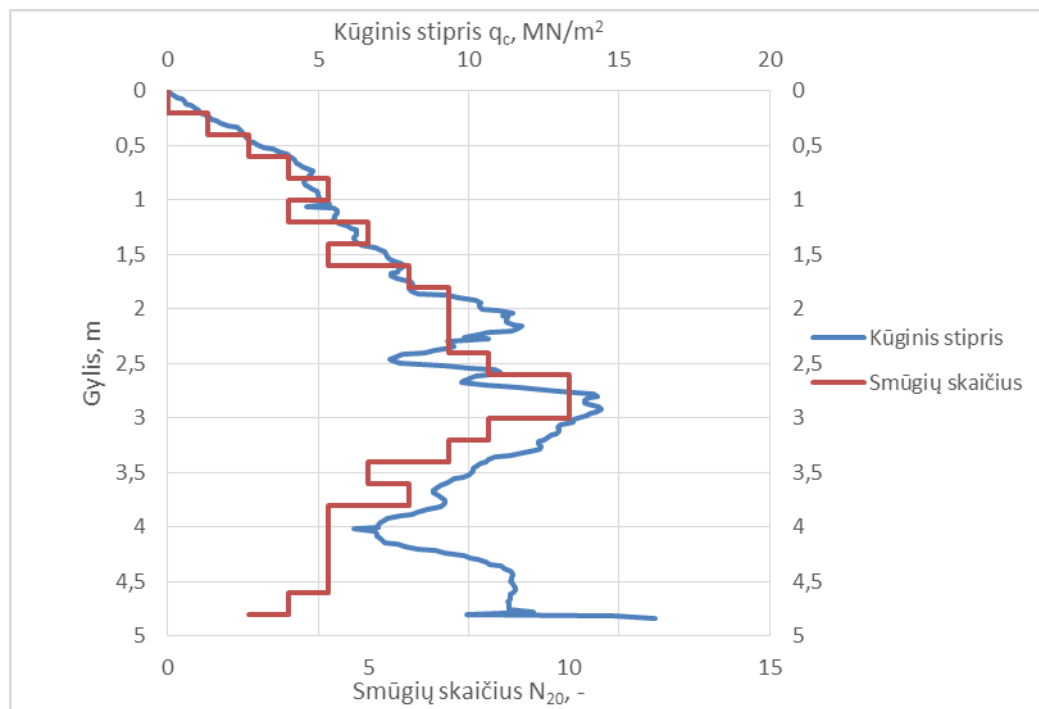
Šalia CPT bandymo buvo atliktas dinaminio zondavimas, jo metu buvo fiksuojamas smūgių skaičius. 3 lentelėje pateiktas dinaminio zondavimo metu gautas smūgių skaičius, pagal šią lentelę sudarytas dinaminio zondavimo grafikas (žr. 11 pav.). Grafiniam palyginimui buvo sudarytas bendras abiejų CPT ir DPT bandymų grafikas, taip galima įvertinti bendrą abiejų zondavimo grafikų kitimą, priklausomai nuo gylio. Grunto kūginio stiprio ir dinaminio zondavimo palyginamasis grafikas pateiktas 12 paveiksle. Dinaminio zondavimo kreivė atkartoja statinio zondavimo metu užfiksuotą grunto kūginį stiprį iki 3,8 m gylio. Giliau dinaminio zondavimo kreivės atsiskiria, tokį kreivių kitimą paveikia grunte esantis vanduo, detaliau vandens poveikis aptariamas 3 skyriuje.

3 lentelė. Dinaminio zondavimo metu užfiksuotas smūgių skaičius

Smūgių skaičius N ₂₀	Gylis, m
0	0
1	0,2
2	0,4
3	0,6
4	0,8
3	1
5	1,2
4	1,4
6	1,6
7	1,8
7	2
7	2,2
8	2,4
10	2,6
10	2,8
8	3
7	3,2
5	3,4
6	3,6
4	3,8
4	4
4	4,2
4	4,4
3	4,6
2	4,8



11 pav. Dinaminio zondavimo smūgių grafikas

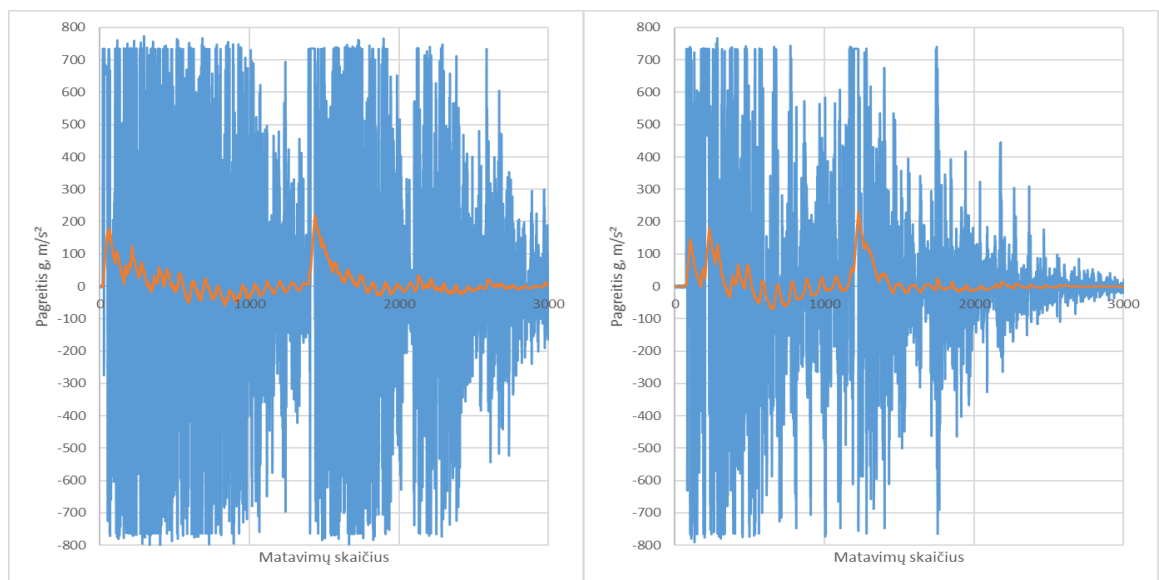


12 pav. Statinio ir dinaminio zondavimo palyginamasis grafikas

3. BANDYMO REZULTATAI

3.1. Bandymo metu užfiksuoti pagreičiai

Bandymo metu zondavimo kūgyje įtaisyti akselerometrai fiksavo kūgio smigimo pagreičius, viso DPT bandymo metu. 13 paveiksle pavaizduota dviejų smūgių laisvojo kritimo pagreičių ($g, m/s^2$) grafikai su viso smūgio istorija. Iš grafikų matoma, kad nuo vieno smūgio kūgis smigdamas kelis kartus sustojo ir toliau smigo. Tai parodo, kad smūgio metu plaktas atšoko nuo priekalo, taip sukeldamas pasikartojančius smūgius, kuriuos užfiksavo pagreičių matavimo prietaisas. Šie pagreičių jutiklio užfiksuoti duomenys leidžia nustatyti pirmąjį smūgį ir atmesti visus pasikartojančius.

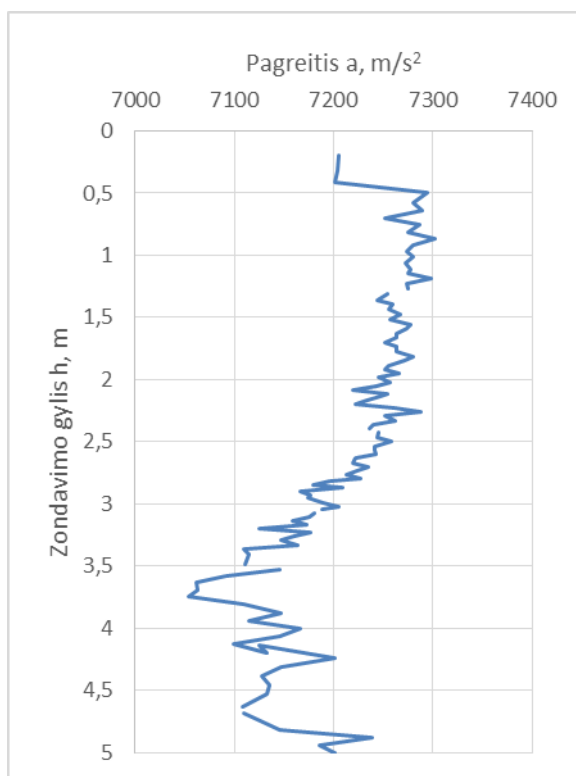


13 pav. Dviejų smūgių pagreičių istorijos

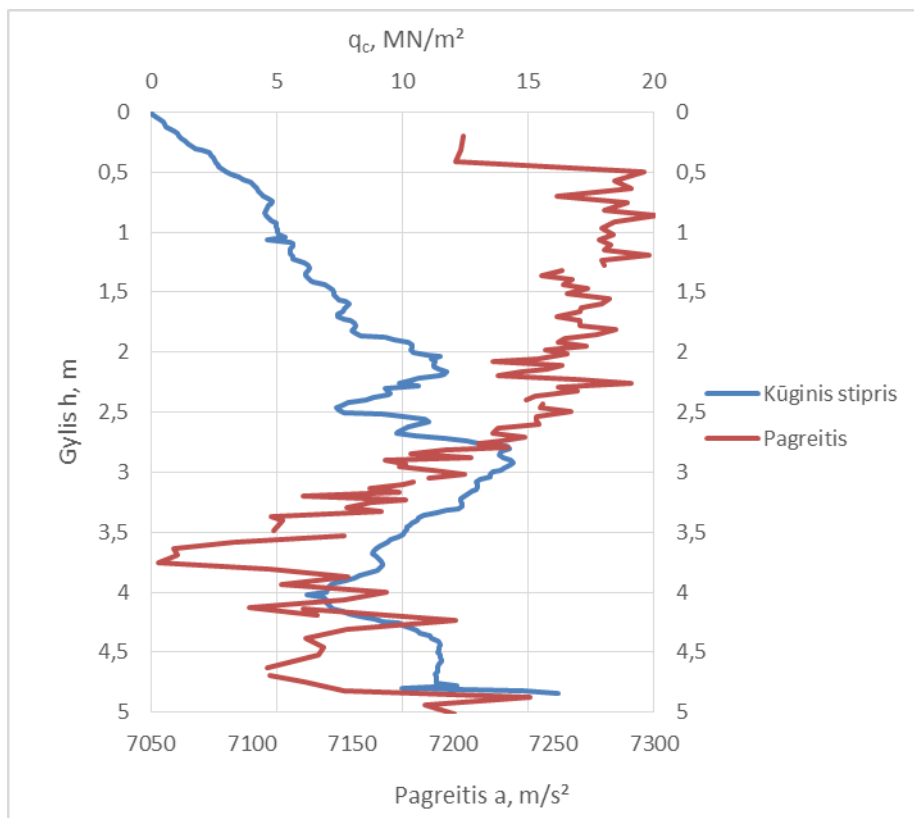
Išanalizavus pagreičių duomenis, gautus bandymo metu, atmetus pasikartojančius ir smūgių sukeltus netikslumus, galima sudaryti pagreičių grafiką per visą zondavimo storymę. 14 paveiksle pateikiamas grafikas su matematiškai apdorotomis pagreičių vertėmis, g vertės suvedamos į a vertes. Trumpas duomenų apdorojimo aprašas ir skaičiavimuose naudotos formulės pateiktos 2.4. poskyryje ir 2.4.1. skyrelyje.

Gautus vidutinius pagreičius a sugretiname su grunto stiprumo savybėmis. Bendrame grafike pateikiamos statinio zondavimo metu užfiksuoto grunto kūginio stiprio ir išmatuotų pagreičių vertės (žr. 15 pav.). Grafikas atspindi tendenciją, kad pagreitis (a) mažėja didėjant grunto kūginiam stipriui (q_c). Tai paaiškinti galima dėl vis didėjančio grunto pasipriešinimo kūgio smigimui, nuo vieno smūgio zondavimo kūgis įsminga mažiau. Toks kūginio stiprio ir pagrečio kreivių santykio vystymasis pastebimas iki maždaug 3,8 m gylio.

Toliau tiriant grunto masyvą pagreičiai mažėja, nors kūginis stipris taip pat mažėja. Tai lemia, kad nuo ~3,8 m gruntas vandeningas.

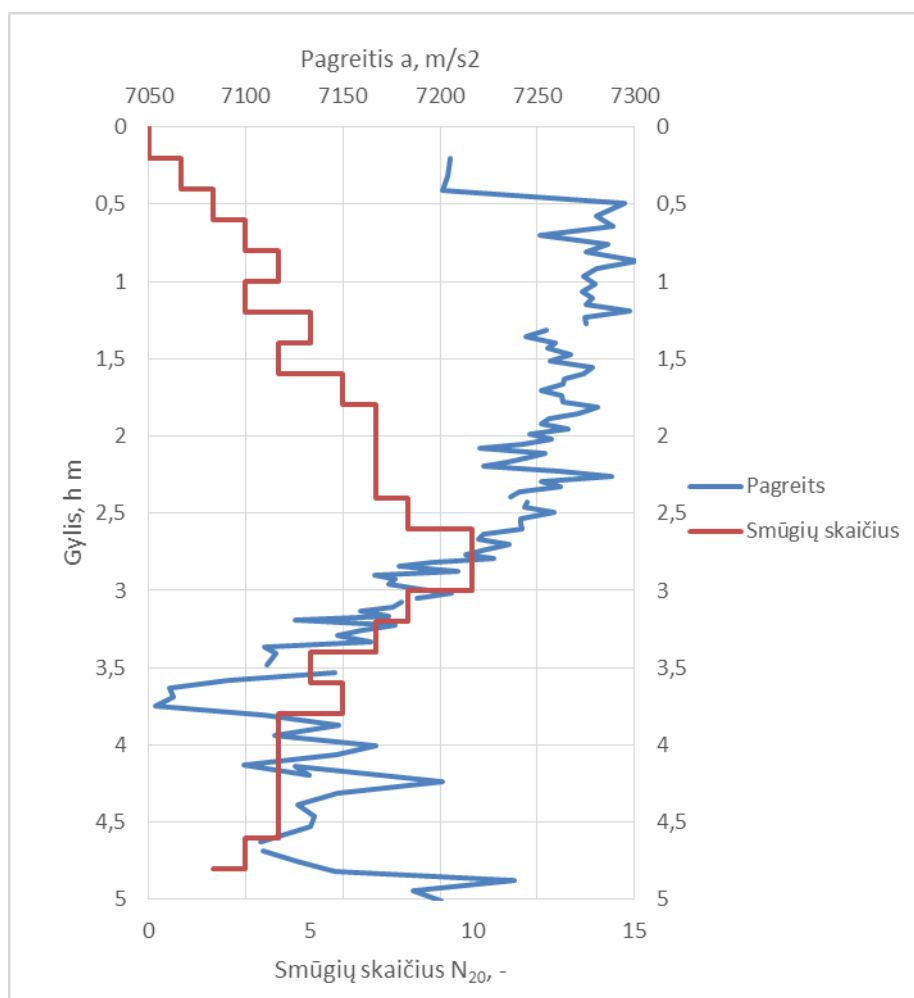


14 pav. Zondavimo metu užfiksuoti pagreičiai a



15 pav. Grunto kūginio stiprio ir pagreičių palyginamasis grafikas

16 paveiksle grafiškai palyginami dinaminio zondavimo metu užfiksuotas smūgių skaičius ir zondavimo metu gautos vidutinės pagreičių vertės. Kreivių kitimo tendencija panaši, kaip ir lyginant su kūginio stiprio vertėmis, didėjant smūgių skaičiui N , pagreičiai a mažėja. Ši tendencija pasikeičia pasiekus gruntinį vandenį, 3,8 m nuo paviršiaus, smūgių skaičius mažėja, bet pagreičio kreivė po truputį didėja. Smūgių skaičiaus mažėjimas galima sieti su porinio vandens poveikiu.



16 pav. Smūgių skaičiaus ir pagreičių palyginamasis grafikas

3.2. Vandens poveikis zondavimo duomenims

Smūgių skaičiaus sumažėjimą, zondavimo metu, paveikia pasikeitęs grunto fizinis būvis, vanduo esantis grunto porose priešinasi zondavimui, taip susidaro perteklinis (dinaminis) porinis slėgis (Δu_d). Įvyksta momentinis grunto pasipriešinimas zondo skverbimuisi, vanduo smūgio metu negali greitai pasišalinti iš grunto porų. Taip pat vandens filtraciją iš grunto apsunkina grunto granulimetrinė sudėtis, grunte daug smulkaus smėlio.

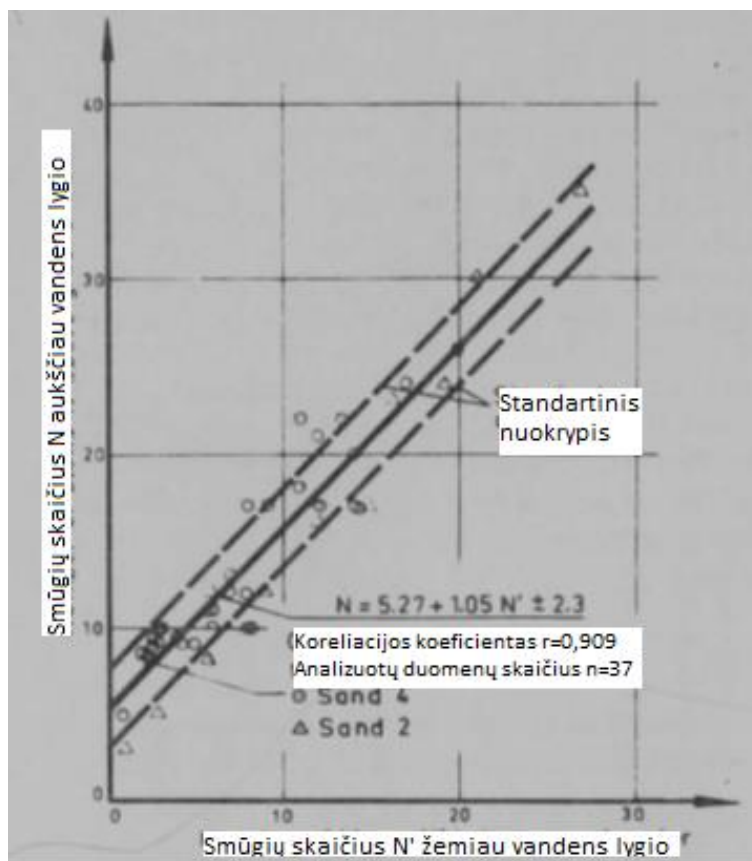
Kapiliarinės jėgos, dėl kurių porose esantis vanduo negali nutekėti veikiamas dinaminių poveikių, gali atsirasti prisotintuose smėliniuose gruntuose, nepaisant didelio jų filtracijos koeficiento. Tai būdinga vandeniui prisotintiems smėliams, kuriuos paveikus dinaminėmis jėgomis, gruntas praskysta. Smėlinių gruntų praskydymas, prasideda esant dideliame poriniam slėgiui (Zaretskii *et al.*, 1991). Vandeniui prisotinto grunto praskydymas, tai momentinis grunto stiprumo savybių ir tankio praradimas. Jis vyksta, dėl gruntą veikiančių dinaminių poveikių. Aiškiausia pastebimas, kai gruntą paveikia seisminiai virpesiai žemės drebėjimo metu.

Tokio pat veikimo principo, tik daug mažesnes skalės, vietinis grunto praskydymas vyksta vibruojant polių į gruntą. Vibropolį įrengimo metu atsirandanti vietinė praskydimą nerišliuose gruntuose analizavo (O'Neill, 1989), jo atlikti eksperimentai parodė, kad vanduo esantis nerišliuose gruntuose pagerina vibrogramzdinimą. Įrengiant vibropolį, prasidėjusi vibracija, padidina porinį slėgį, kuris staigiai sumažina efektyviusius įtempius tarp grunto dalelių. Išsamesnius tyrimus apie porinį vandens slėgį atliko (Rao, 1993) ir (Wang, 1994). Vibrogramzdinimo metu prie polio buvo pritvirtinti du porinio slėgio jutikliai. Mokslininkai nustatė, kad porinis vandens slėgis tolstant nuo polio staigiai mažėja, vidutinė išmatuota jo reikšmė, net esant skirtingiems atstumams nuo polio šono, buvo vienoda. Tai daro labai didelį poveikį vibrogramzdinimui. Cikliniai judesiai dėl polio vibravimo, sukėlė ciklinį grunto dalelių judėjimą, ir tai sukėlė ciklinį porinį slėgį, jis pasireiškė prie pat vibruojamo polio šono. Iš tyrimo galime daryti išvadas, kad dinaminio zondavimo metu padidėjęs grunto porinis slėgis greičiausia bus tik prie pat zondo šoninio paviršiaus.

Grunto tyrimas SPT zonu gali padėti nustatyti grunto jautrumą praskydimui. SPT ir DPT bandymai pasižymi tokiais pat savybėmis, kurių pagalba galime juos tarpusavyje susieti, bei analizuoti. Grunto praskydimą atliekant DPT bandymus, galima vertinti remiantis SPT bandymu surinktais duomenimis. Grunto praskydimą galima vertinti pagal smūgių skaičių N_x atliekant SPT bandymą (Shmertmann, Palacios, 1979).

Mokslininko K. J. Melzerio 1979 metais atlikta analizė parodė, kad standartinio zondavimo metu, smūgių skaičius sumažėja, kai gruntas vandeningas. Jis surado tiesinę priklausomybę tarp smūgių skaičiaus, kai gruntas vandeningas ir ne, šios priklausomybės grafine

išraiška pateikta 17 paveiksle, priklausomybė pateikta 7 formulėje. Gautas koreliacijos koeficientas $r = 0,909$, išanalizuotų duomenų taškų suma $n = 37$.



17 pav. Smūgių skaičiaus priklausomybė, kai gruntas vandeningas ir ne (Melzer, 1979)

$$N = 5,27 + 1,05 \cdot N' \pm 2,3; \quad (7)$$

čia N – smūgių skaičius virš gruntinio vandens, –; N' – smūgių skaičius žemiau gruntinio vandens lygio, –.

Šios priklausomybės, negalime panaudoti bandymo metu gautiems dinaminio zondavimo smūgių skaičiaus korekcijai, kai jis yra prisotintas vandeniu, nes bandymo metu tirtas gruntas yra skirtingos granulimetrinės sudėties, tankio ir taip pat ši priklausomybė skirta smūgių skaičiui reikalingam ištirti 30 cm grunto.

Perteklinis porinis slėgis susidaręs SPT zondavimo metu greit išsisklaidys rupiuose gruntuose, tikėtina dar nepasibaigus zondavimui. Labai mažai žinoma apie išsisklaidymo dydį, greitį ir poveikį perteklinio porų slėgio, susidariusio SPT metu (Daniel, 2008)

Dinaminio zondavimo bandymo metu pastebėta, kad dinaminis porinis slėgis, susiformavęs smūgio metu, grunto daleles atstumia viena nuo kitos, mažėja efektyvieji grunto įtempiai. Praskydus gruntui aplik kūgį, su kiekvienu smūgiu kūgis įsminga giliau, mažindamas zonduojamo grunto smūgių skaičių (N_{20}). Tiesiogiai vandens poveikio dydžio dinaminio zondavimo smūgių skaičiui negalime įvertinti, jeigu nėra žinoma ar zonduojamas gruntas yra

vandeningas ir kokiame gylyje yra vanduo. Bet atliekant statinį zondavimą gruntinio vandens poveikis grunto kūginiam stipriui taip aiškiai nepasireiškia. Gruntas zonduojamas naudojant statinę apkrovą ir sąlyginai lėtai, tai leidžia vandeniui drenuotis ir nesukelia porinio slėgio, todėl nepaveikia grunto kūginio stiprio.

Norint tiksliau išsiaiškinti vandens poveikį zondavimo duomenims, grunto kūginis stipris buvo palygintas su dinaminio zondavimo metu užfiksuotais duomenimis. Analizės metu duomenys suskirstyti į dvi dalis, kai grunte nėra vandens ir kai gruntas prisotintas vandeniu. Grunto kūginis stipris pasirinktas, todėl kad jį mažiausia paveikia pasikeitęs grunto fizinis būvis.

3.2.1. Vandens poveikis išmatuotiems pagreičiams

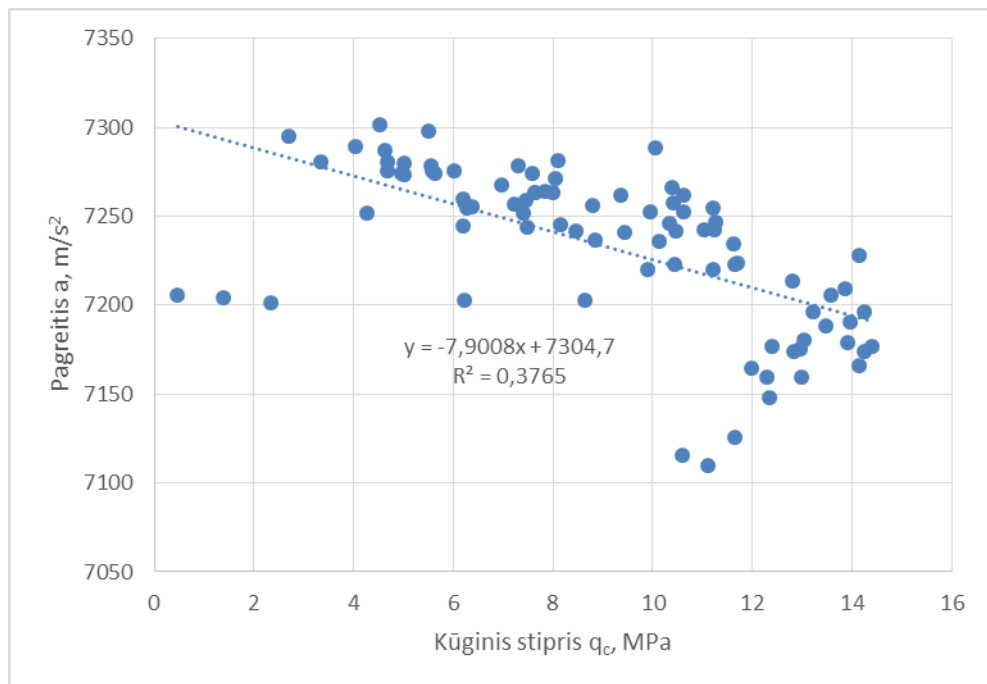
Pirmiausia analizuojamas vandens poveikis DPT zondavimo metu išmatuotiems pagreičiams. Vandens poveikis pagreičiams pasireiškia nuo 3,4 m gylio, pagreičiai pradeda mažėti. Gruntinis vanduo yra tik nuo 3,8 m gylio, bet jo poveikis pasireiškia jau nuo 3,4 m gylio, tai yra dėl to, kad vandens lygis pakyla grunte esančiais kapiliarais. Atlikta statistinė pagreičio ir kūginio stiprio analizė, siekiant įvertinant vandens poveikį.

18 paveiksle pateikta išmatuotų pagreičių priklausomybė nuo grunto kūginio stiprio, kai analizuojami duomenys užfiksuoti iki gylio 3,4 m, kuriame dar nepasireiškia vandens poveikis. Grafike matoma, kad santykis tarp pagreičio ir kūginio stiprio mažėja pagal tiesinę regresiją, kuo didesnis grunto kūginis stipris, tuo mažesnis išmatuotas pagreitis. Grafike atvaizduotos regresinės tiesės formulė išreiškiama pagreičio priklausomybe nuo kūginio stiprio (8). Remiantis šia formule, galima teigti, jei nepriklausomas kintamasis, šiuo atveju q_c , padidėja vienu vienetu, tai priklausomas kintamasis a , sumažės dydžiu 7,9008.

$$a = 7304,7 - 7,9008 \cdot q_c; \quad (8)$$

čia a – pagreitis, m/s^2 ; q_c – grunto kūginis stipris, MPa.

Analizės metu apskaičiuotas pagreičio ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas, pagal šį dydį galima spręsti kiek dydžiai yra tiesiogiai priklausomi vienas nuo kito. Gautas koreliacijos koeficientas $r = 0,614$, tai rodo, kad tarp pagreičio ir kūginio stiprio yra vidutinio stiprumo tiesinis ryšys.



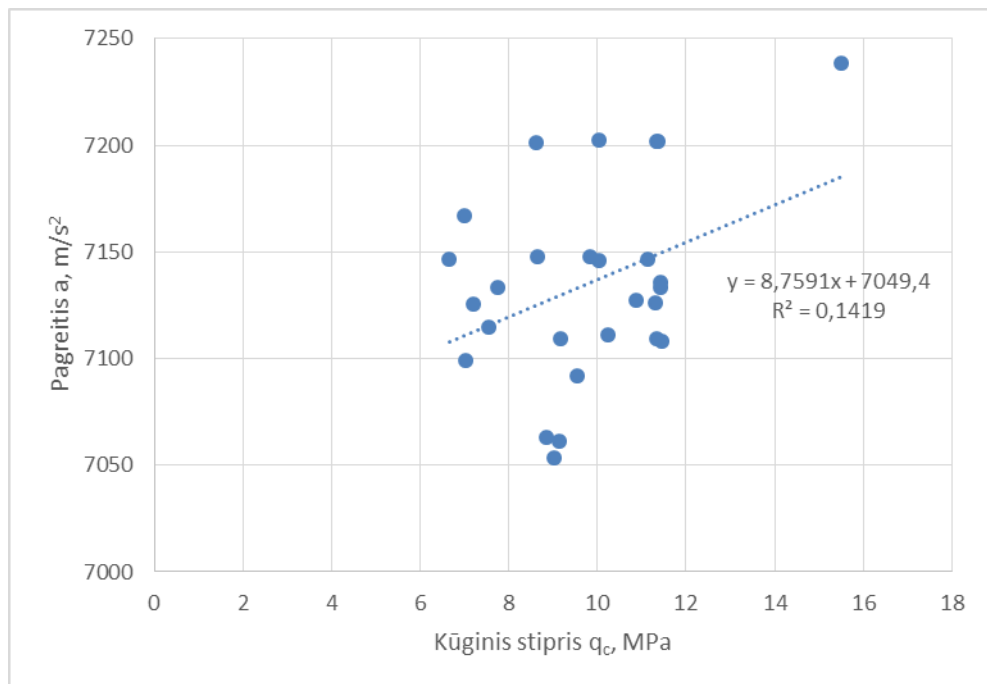
18 pav. Tiesinė pagreičio priklausomybė nuo grunto kūginio stiprio iki 3,4 m gylio

Toliau analizuojami duomenys išmatuoti vandeningame grunte. 19 paveiksle pavaizduota išmatuotų pagreičių priklausomybė nuo grunto kūginio stiprio vandens prisotintame grunte. Grafike matoma, kad santykis tarp pagreičio ir kūginio stiprio didėja pagal tiesinę regresiją, kuo didesnis grunto kūginis stipris, tuo didesnis išmatuotas pagreitis. Grafike atvaizduotos regresinės tiesės formulė išreiškiama pagreičio priklausomybe nuo kūginio stiprio (9). Remiantis šia formule, galima teigti, jei nepriklausomas kintamasis, šiuo atveju q_c , padidėja vienu vienetu, tai priklausomas kintamasis a , padidės dydžiu 8,7591.

$$a = 7049,4 + 8,7591 \cdot q_c; \quad (9)$$

čia a – pagreitis, m/s^2 ; q_c – grunto kūginis stipris, MPa.

Analizės metu apskaičiuotas šių dydžių koreliacijos koeficientas $r = 0,377$, tai rodo, kad tarp pagreičio išmatuoto vandens prisotintame grunte ir kūginio stiprio yra silpnas tiesinis ryšys.



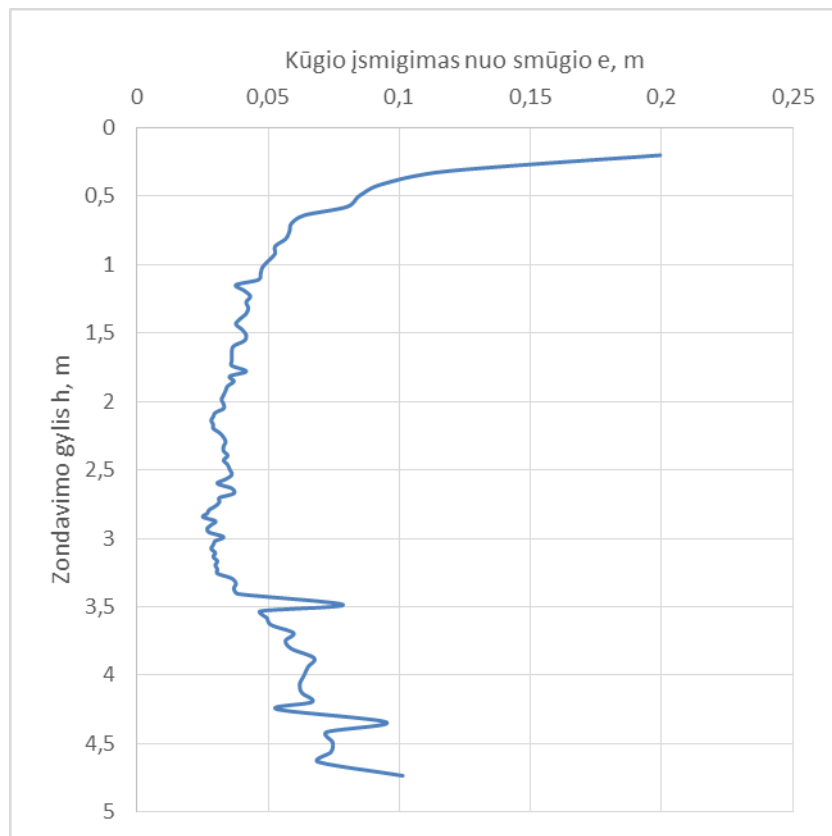
19 pav. Tiesinė pagreičio priklausomybė nuo grunto kūginio stiprio nuo 3,4 m gylio

Atlikus išmatuotų pagreičių ir grunto kūginio stiprio duomenų analizę buvo nustatyta, pagreičio ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas, kai gruntas nevandeningas yra $r = 0,614$ ir kai gruntas vandeningas – $r = 0,377$. Nustatėme, kad vanduo koreliacijos koeficientą sumažina 61,4 %. Remiantis šiais rezultatais galime teigti, kad vanduo koreliacijos koeficientą sumažina 61,4 %

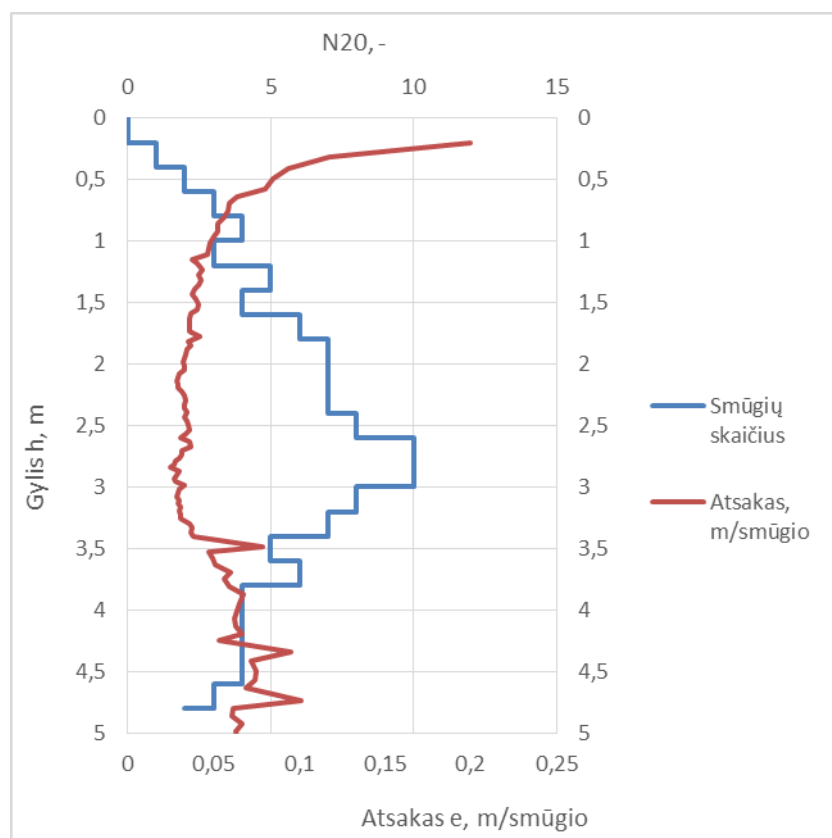
3.2.2. Vandens poveikis grunto atsakui

Grunto atsakas išmatuotas DPT metu parodo, kiek įsmigo zondo kūgis nuo kiekvieno smūgio, 20 paveiksle pateiktas grunto atsako grafikas išmatuotas zondavimo bandymo metu.

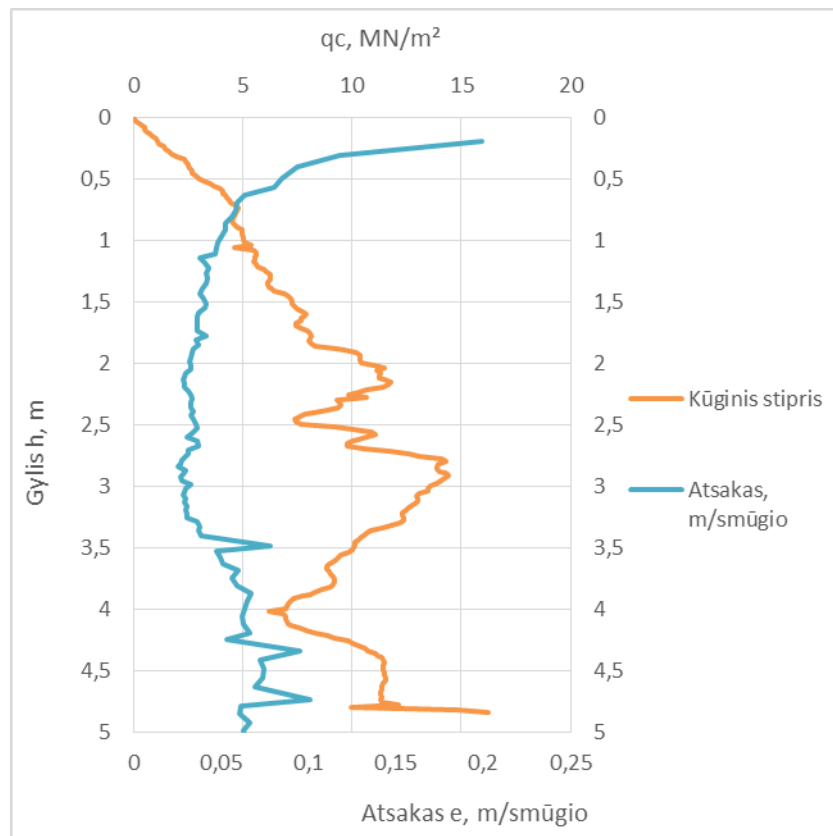
Paveiksluose 21 ir 22 pateikiami grafiniai palyginimai tarp dinaminio ir statinio zondavimo duomenų ir grunto atsako per visą zondavimo gylį, atitinkamai. Pagal šiuos grafikus negalime tiksliai pasakyti ar grunto atsaką taip pat paveikia gruntinis vanduo, kaip ir zondavimo metu išmatuotus pagreičius. Todėl atliktas statistinis grunto kūginio stiprio ir grunto atsako palyginimas, kai gruntas prisotintas vandeniu ir neveikiamas jo.



20 pav. Zondavimo kūgio įsmigimas nuo smūgio



21 pav. Grunto atsako ir dinaminio zondavimo smūgių skaičiaus palyginamasis grafikas



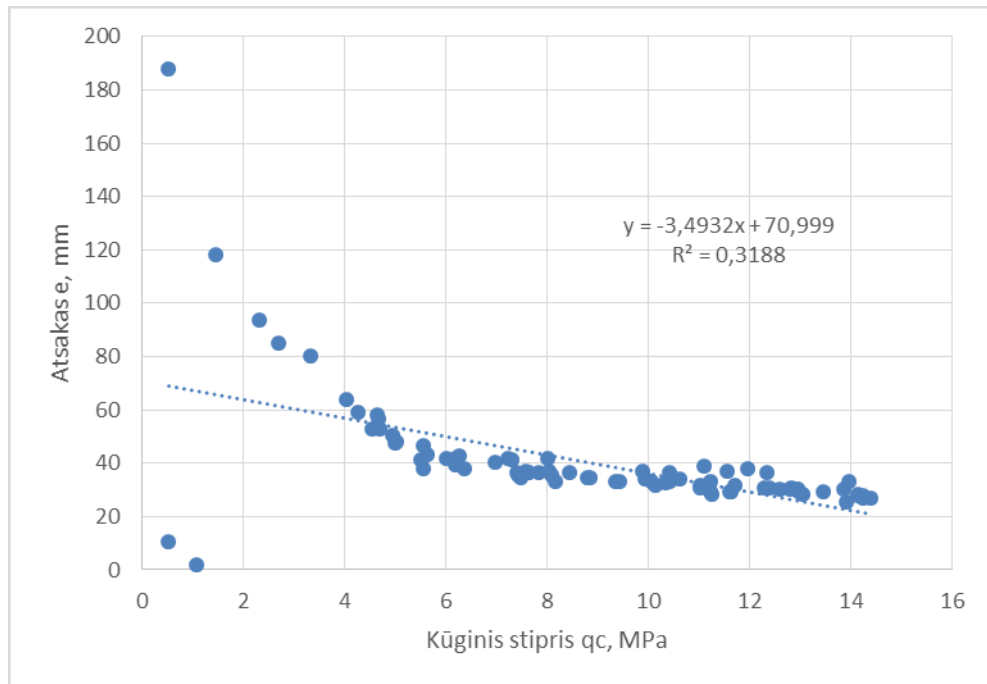
22 pav. Grunto atsako ir kūginio stiprio palyginamasis grafikas

Atlikus statistinę analizę tarp grunto atsako ir grunto kūginio stiprio, radome juos siejančią priklausomybę. 23 paveiksle pateikiamas gautos tiesinės priklausomybės grafikas, kai grunto atsako ir grunto kūginio stiprio duomenys užfiksuoti iki gruntinio vandens. Gauta priklausomybė yra mažėjanti, t. y. kuo didesnis grunto kūginis stipris tuo mažesnis grunto atsakas. Grafike atvaizduotos regresinės tiesės formulė išreiškiama grunto atsako e priklausomybe nuo kūginio stiprio (11). Remiantis šia formule, galima teigti, jei nepriklausomas kintamasis, šiuo atveju q_c , padidėja vienu vienetu, tai priklausomas kintamasis e , sumažės dydžiu 3,4932.

$$e = 70,999 - 3,4932 \cdot q_c; \quad (11)$$

čia e – grunto atsakas, mm/smūgi; q_c – grunto kūginis stipris, MPa.

Analizės metu apskaičiuotas šių dydžių koreliacijos koeficientas $r = 0,565$; , tai rodo, kad tarp grunto atsako ir grunto kūginio stiprio yra vidutinio stiprumo tiesinis ryšys.



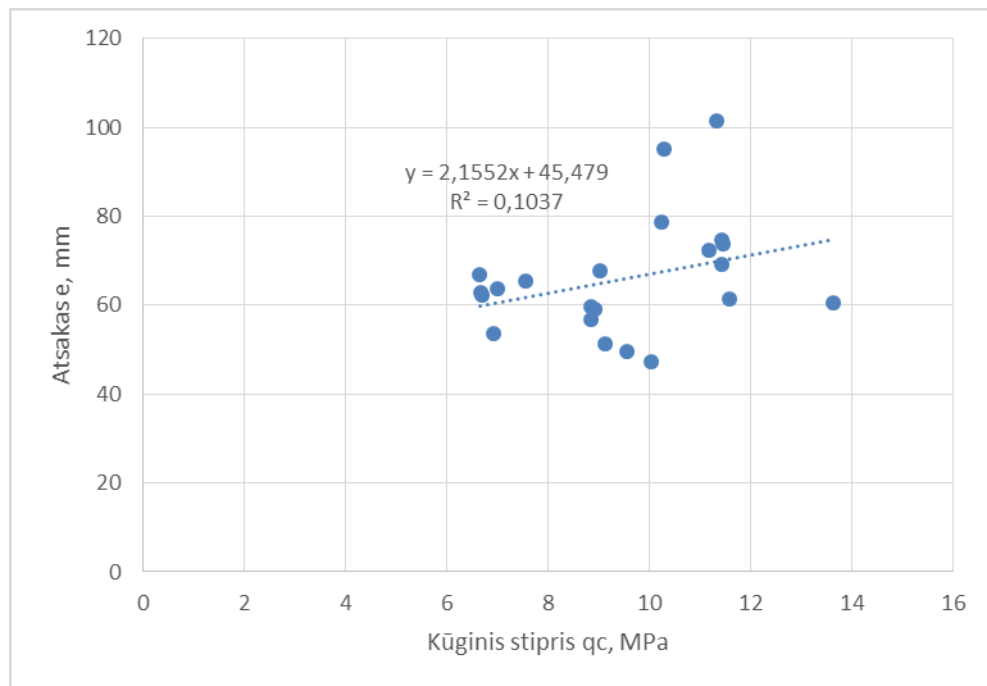
23 pav. Grunto atsako ir kūginio stiprio tiesinė priklausomybė iki 3,4 m gylio

Toliau analizuojame atsako priklausomybę nuo grunto kūginio stiprio, kai tiriamas gruntas vandeningas. 24 paveiksle pateikiamas gautas grunto atsako priklausomybės nuo grunto kūginio stiprio grafikas. Gauta regresinė tiesė yra didėjanti, t. y. kai grunto kūginis stipris didėja, grunto atsakas taip pat didėja. Grafike atvaizduotos regresinės tiesės formulė išreiškiama atsako priklausomybe nuo kūginio stiprio (12). Remiantis šia formule, galima teigti, jei nepriklausomas kintamasis, šiuo atveju q_c , padidėja vienu vienetu, tai priklausomas kintamasis e , padidės dydžiu 2,1552.

$$e = 45,479 + 2,1552 \cdot q_c; \quad (12)$$

čia e – grunto atsakas, mm/smūgi; q_c – grunto kūginis stipris, MPa.

Analizės metu apskaičiuotas šių dydžių koreliacijos koeficientas $r = 0,312$, tai rodo, kad tarp pagreičio ir kūginio stiprio yra silpnas tiesinis ryšys.



24 pav. Grunto atsako ir kūginio stiprio tiesinė priklausomybė nuo 3,4 m gylio

Atlikus duomenų analizę buvo nustatyta, grunto atsako ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas, kai gruntas nevandeningas yra $r = 0,565$ ir kai gruntas vandeningas– $r = 0,312$. Vanduo koreliacijos koeficientą sumažina 55,2 %. Remiantis šiais rezultatais galime teigti, kad vanduo grunto atsaką sumažina 55,2 %.

3.3. Rezultatų analizė

Duomenų analizės metu gautų koreliacijos koeficientai ir gruntinio vandens poveikis jiems pateikta 4 lentelėje.

Atlikus duomenų analizę buvo nustatyta, pagreičio ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas, kai gruntas nevandeningas yra $r = 0,614$ ir kai gruntas vandeningas – $r = 0,377$. Vanduo koreliacijos koeficientą sumažina 61,4 %.

Taip pat buvo nustatyta, grunto atsako ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas, kai gruntas nevandeningas yra $r = 0,565$ ir kai gruntas vandeningas – $r = 0,312$. Vanduo koreliacijos koeficientą sumažina 55,2 %.

4 lentelė. Duomenų analizės metu gauti koreliacijos koeficientai

	Pagreičio ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas	Grunto atsako ir kūginio stiprio koreliacijos koeficientas
Kai vandens nėra	0,614	0,565
Kai yra gruntinis vanduo	0,377	0,312
Koreliacijos koeficientų procentinis skirtumas	61,4 %	55,2 %

Analizuojant grunto atsako ir kūginio stiprio duomenis, kai grunte nėra vandens, grunto atsakas mažėja didėjant grunto kūginiam stipriui. Bet pasikeitus grunto fiziniam būviui, grunte atsiradus vandeniui, ši priklausomybė pasikeičia, grunto atsakas didėja, didėjant grunto kūginiam stipriui. Šis grunto susilpnėjimas įvyksta dėl smūgio metu įvykstančio momentinio grunto praskydimo.

IŠVADOS

Literatūros analizės metu buvo nustatyta, kad atliktų tyrimų baigiamojo darbo tema yra nedaug. Juos išanalizavus galime teigti, kad norint gauti kuo išsamesnius duomenis dinaminio zondavimo metu, reikia įrangą modifikuoti taip, kad būtų galima kuo labiau sumažinti faktorius iškreipiančius matavimo rezultatus.

Atlikus tyrimus modifikuotu dinaminiu zonu, užfiksuoti kūgio smigimo pagreičiai parodo smūgių istoriją, tai leidžia įvertinti gruntinio vandens poveikį zondavimo metu, taip pat įvertinti jo poveikį grunto savybėms.

Kai gruntas nėra vandeningas, buvo nustatytos šios priklausomybės:

- Tarp grunto kūginio stiprio ir išmatuotų pagreičių yra vidutinio stiprumo tiesinė priklausomybė, koreliacijos koeficientas $r = 0,614$.
- Tarp išmatuoto grunto atsako ir kūginio stiprio yra vidutinio stiprumo tiesinė priklausomybė, koreliacijos koeficientas $r = 0,565$.

Kai gruntas vandeningas, buvo nustatytos šios priklausomybės:

- Tarp grunto kūginio stiprio ir išmatuotų pagreičių yra silpna tiesinė priklausomybė, koreliacijos koeficientas $r = 0,377$.
- Tarp išmatuoto grunto atsako ir kūginio stiprio yra silpna tiesinė priklausomybė, koreliacijos koeficientas $r = 0,312$.

Vanduo buvimas grunte koreliacijos koeficientus atitinkamai sumažino 61,4 % ir 55,2 %.

Analizuojant grunto atsako ir kūginio stiprio duomenis, buvo nustatyta, kad atliekant dinaminį zondavimą, grunte aplink zondavimo kūgį, smūgio metu atsiradę dinaminiai poveikiai sukelia momentinį grunto praskydimą.

LITERATŪRA

- Byun Y., Lee J. 2013. Instrumented Dynamic Cone Penetrometer Corrected with Transferred Energy into a Cone Tip: A Laboratory Study. *Geotechnical Testing Journal*. 36(4): 533–542.
- Byun Y., Hong W., Lee J. 2015. Characterization of railway substructure using a hybrid cone penetrometer. *Journal of Smart Structures and Systems*. 15(4): 1085–1101.
- Bondarik, G. K. 1967. Dynamic and static sounding of soils in engineering geology. [translated from Russia]. *Israel Program for Scientific Translations*, Jerusalem, 137 p.
- Daniel C. R. 2008. Energy transfer and grain size effects during the standard penetration test (SPT) and large penetration test (LPT). PhD thesis. Department of Civil Engineering the University of British Columbia, Vancouver, Canada, 350 p.
- Dundulis, K.; Žaržojus, G. 2008. Comparative analysis of static and dynamic probing results, in *Proc of the 11th Baltic Sea Geotechnical Conference “Geotechnics in Maritime Engineering”*, vol. 1. Eds. by Młynarek, Z.; Sikora, S.; Dembicki, E. September 15–18, 2008, Gdansk, Poland. Polish Committee on Geotechnics & Gdansk University of Technology, 383–390 p.
- Figueiredo L. C., Cunha R. P., Conciani W. 2013. An overview on existing dynamic cone penetration test research related to the Central Area of Brazil. *Proceedings of 4th International Conference on Site Characterization “Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4”*. Porto De Galinhas – Pernambuco. 1669–1675 p.
- Fletcher, G. F. A. 1965. Standard penetration test: its use and abuse, *Journal of Soil Mechanics Foundations Division*, ASCE, vol. 91 (SM4), 67–75 p.
- Gadeikis, S. 2013. Inžineriniai geologiniai lauko tyrimų metodai– pradžia ir evoliucija. *Geologija*. Vol. 55. No. 3(83). Lietuvos mokslų akademija. 75–98 p.
- Kelevišius K. 2013. Vibropolio laikomosios galios nustatymas pagal įrengimo metu išmatuotus parametrus: Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Kleyn, E. G.; Maree, J. H.; Savage, P. F. 1982. The application of portable pavement dynamic cone penetrometer to determine in-situ bearing properties of road pavement layers and subgrades in South Africa, in *Proceeding of the 2nd European Symposium on Penetration Testing /ESOPT II/*. Ed. by Verruijt, A. May 24–27, 1982, Amsterdam, 277–282 p.
- Langton D. D. 1999. The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Journal of Ground Engineering*. 32(9): 33–37 p.
- Look B. G., Seidel J. P., Sivakumar S. T., Welikala D. L. C. 2015. Real Time Monitoring of SPT Using a PDM Device – The Failings of Our Standard Test Revealed. *Proceedings of International Conference on Geotechnical Engineering*. Colombo. 435–438 p.
- Lukiantchuki J. A., Esquivel E. R., Bernardes G. P. 2011. Interpretation of force and acceleration signals during hammer impact in SPT tests. *Proceedings of 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Toronto.
- Luo, X.; Salgado, R.; Altschaeffl, A. 1998. Dynamic cone penetration test to assess the mechanical properties of the subgrade soil, *Final Report [FHWA/IN/JTRP-98/13/*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. 147 p.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. 1980. Pile foundation analysis and design. New York: John Wiley & Sons, 486 p.

- Restrepo V. H., Rodríguez J. A., Nicolas E. P. 2013. Measurements of energy and dynamic force using instrumented SPT in a soil profile and wave propagation analysis. *Proceedings of 4th International Conference on Site Characterization "Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4"*. Porto De Galinhas – Pernambuco. 319–328 p.
- Robertson, P. K. 2006. Guide to in-situ testing. California: Gregg Drilling & Testing Inc., 87 p.
- Savidis, S. A.; Müller, R. 2007. Der Einfluss der Gestängelänge auf die Ergebnisse von Rammsondierungen. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 132 p.
- Scala, A. J. 1985. Simple methods of flexible pavement design using cone penetrometers, in *Golden Jubilee of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering: Commemorative Volume*. Ed. by Barton, A. C. T. Institution of Engineers, Australia, 1–12 p.
- Shmertmann, J. H.; Palacios, A. 1979. Energy dynamics of SPT, *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, vol. 105 (GT8), 909–926 p.
- Sy, A. 1993. Energy measurements and correlations of the standard penetration test (SPT) and the Becker penetration test (BPT). PhD thesis. Department of Civil Engineering the University of British Columbia, Vancouver, Canada, 213 p.
- Stefanoff, G.; Sanglerat, G.; Bergdahl, U.; Melzer, K. –J. 1988. Dynamic probing (DP): international reference test procedure, in *Proc of the 1st International Symposium on Penetration Testing /ISOPT-1/ "Penetration Testing 1988"*, vol. 1. Ed. by De Ruiter, J., March 20–24, 1988, Orlando, USA. Rotterdam: A. A. Balkema, 53–69.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B.; Mesri, G. 1996. Soil mechanics in engineering practice. 3rd edition. New York: Wiley-Interscience, 592 p.
- Timoshenko, S.; Goodier, J. N. 1951. Theory of elasticity. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Zaretskii Yu. K., Vorontsov É. I., Baizakov A.A., Translated from Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, No. 2, 1991, 12–15 p.
- Žaržojus, G.; Dundulis, K. 2010. Problems of correlation between dynamic probingtest (DPSH) and cone penetration test (CPT) for cohesive soils of Lithuania, *the Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(2), 69–75 p.
- Žaržojus G. 2010. Dinaminio zondavimo rezultatų ir juos įtakojančių veiksnių analizė bei sąsajos su statinio zondavimo duomenimis Lietuvos gruntuose: Daktaro disertacija. Vilniaus universitetas.
- Žaržojus G., Kelevišius K., Amšiejus J. 2013. Energy transfer measuring in dynamic probing test in layered geological strata. *Procedia Engineering*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd. 1302-1308 p.
- Рубинштейн, А. Я.; Кулачкин, Б. И. 1984. Динамическое зондирование грунтов. Москва: Недра. 92 с.
- Трофименков, Ю. Г.; Воробков, Л. Н. 1981. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. Москва: Стройиздат: 1981. 213 с.
- ASTM D4633– 10 Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers. 2005. *ASTM international*. United States.
- DIN 4094-1:2002-06 Subsoil – Field Investigation – Part 1: Cone penetration test. Berlin: German Institute for Standardization.

- LST EN 1997–2:2007. Eurokodas 7 – Geotechninis projektavimas – 2 dalis: Gunto tyrinėjimai ir bandymai. CEN. Brussels.
- LST EN ISO 14688-2: 2004. Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 2 dalis. Klasifikavimo principai.
- LST EN ISO 22476–1:2005. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests. CEN. Brussels.
- LST EN ISO 22476–2:2005. Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Lauko bandymai. 2 dalis. Dinaminis zondavimas. CEN. Brussels.

A PRIEDAS. STATINIO ZONDAVIMO DUOMENYS

STATINIO ZONDAVIMO DUOMENYS

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
0	0	0
0,02	0,0319	0,3
0,04	0,1853	0,9
0,06	0,3146	1,5
0,08	0,4908	2,5
0,1	0,5363	2,4
0,12	0,6149	2,9
0,14	0,7716	3,2
0,16	0,8769	4,1
0,18	1,031	5,5
0,2	1,083	5,2
0,22	1,1785	5,3
0,24	1,3599	6,1
0,26	1,4392	7,3
0,28	1,6316	8,9
0,3	1,7532	8,1
0,32	2,0008	12,3
0,34	2,3012	11,2
0,36	2,3818	11,4
0,38	2,4832	12,2
0,4	2,5235	13,2
0,42	2,5768	14,32
0,44	2,6613	13,58
0,46	2,7029	14,23
0,48	2,8589	15,65
0,5	2,9954	14,32
0,52	3,2151	15,89
0,54	3,5011	16,2
0,56	3,6675	16,3
0,58	3,9796	18,76
0,6	4,0628	22,3
0,62	4,1148	21,1
0,64	4,2136	24,5
0,66	4,2552	23,2
0,68	4,3553	22,7
0,7	4,4632	24,5
0,72	4,6738	23,78
0,74	4,8103	24,89

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
0,76	4,7622	25,68
0,78	4,6738	26,32
0,8	4,6296	26,87
0,82	4,562	25,64
0,84	4,5243	22,32
0,86	4,5503	25,67
0,88	4,6465	23,48
0,9	4,7544	25,67
0,92	4,9507	25,89
0,94	4,9702	25,97
0,96	4,9767	26,32
0,98	5,03	25,89
1	5,03	25,99
1,02	5,0846	25,12
1,04	5,3564	26,31
1,06	4,6192	23,12
1,08	5,5176	25,74
1,1	5,6164	25,89
1,12	5,6164	26,12
1,14	5,541	26
1,16	5,5254	25,14
1,18	5,5124	24,13
1,2	5,6411	23,21
1,22	5,6567	22,87
1,24	5,9531	26,78
1,26	6,1065	24,59
1,28	6,2599	23,12
1,3	6,2872	31,25
1,32	6,256	29,87
1,34	6,1689	27,45
1,36	6,1663	28,94
1,38	6,2274	28,65
1,4	6,3314	28,77
1,42	6,4276	29,35
1,44	6,9022	31,25
1,46	7,066	35,42
1,48	7,2142	33,21
1,5	7,2636	36,78

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
1,52	7,2714	33,84
1,54	7,365	35,74
1,56	7,4716	34,89
1,58	7,7056	35,69
1,6	7,898	39,78
1,62	7,7992	38,56
1,64	7,6718	32,3
1,66	7,6458	32,1
1,68	7,4066	37
1,7	7,4222	37,8
1,72	7,651	37,7
1,74	7,9552	36,3
1,76	8,08	35,2
1,78	8,1424	35,9
1,8	8,0748	35,9
1,82	7,9942	35,9
1,84	8,1164	37,5
1,86	8,3166	37,7
1,88	9,2995	37,7
1,9	9,6869	35,9
1,92	10,2122	35,9
1,94	10,3916	37,2
1,96	10,3656	39,7
1,98	10,3448	43,5
2	10,4228	50,4
2,02	10,987	50,4
2,04	11,4837	53,1
2,06	11,1378	55,7
2,08	11,3068	54,8
2,1	11,234	59,2
2,12	11,2626	62
2,14	11,4707	65,4
2,16	11,7775	67,3
2,18	11,6553	67,4
2,2	11,4264	67,3
2,22	10,6412	68,1
2,24	10,2902	69
2,26	9,8481	70,2

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
2,28	10,6412	71,1
2,3	9,2969	70,2
2,32	9,4217	67,9
2,34	9,5101	59,7
2,36	9,3931	56,4
2,38	8,8601	54,6
2,4	8,5247	53,8
2,42	7,8148	53,3
2,44	7,6016	53,5
2,46	7,3858	53,5
2,48	7,456	52,8
2,5	7,6952	49
2,52	9,2267	41,3
2,54	10,0484	38,4
2,56	10,8882	36,7
2,58	11,0416	38,2
2,6	10,6464	43,7
2,62	10,2408	54,6
2,64	10,0172	58,1
2,66	9,7961	62,8
2,68	9,7805	66,4
2,7	10,5164	66,4
2,72	11,7177	65
2,74	12,5887	61,2
2,76	13,0516	55,8
2,78	14,1462	62,4
2,8	14,2684	62,4
2,82	13,9616	73,3
2,84	13,8706	76,2
2,86	13,8654	79,7
2,88	13,9772	83,6
2,9	14,3152	83,6
2,92	14,3984	81,7
2,94	14,258	82,6
2,96	14,0656	79,3
2,98	13,8992	86
3	13,5846	86
3,02	13,4754	88,8

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
3,04	13,4754	88,7
3,06	13,0568	84,7
3,08	12,9397	86,9
3,1	12,9944	88,8
3,12	12,9944	88,8
3,14	12,9345	91
3,16	12,7499	91,9
3,18	12,6121	92,2
3,2	12,4795	90,5
3,22	12,3261	90,5
3,24	12,3131	90,3
3,26	12,3833	88,8
3,28	12,3443	85,9
3,3	12,1909	82,2
3,32	11,7749	82,2
3,34	11,3692	79,2
3,36	10,8492	79,8
3,38	10,6516	79
3,4	10,584	79,7
3,42	10,3994	79,5
3,44	10,2824	78,4
3,46	10,1602	76,2
3,48	10,1524	72,2
3,5	10,09	62,7
3,52	9,9964	60,8
3,54	9,8091	59,3
3,56	9,4971	57,4
3,58	9,3905	53,9
3,6	9,2241	51,1
3,62	9,0811	50,4
3,64	8,9537	47
3,66	8,8419	39,7
3,68	8,8185	37,8
3,7	8,9303	34,7
3,72	9,0421	32,6
3,74	9,1591	32,7
3,76	9,2033	32
3,78	9,2059	32,7

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
3,8	9,1045	33,5
3,82	9,0213	34
3,84	8,6261	35,1
3,86	8,3114	36,5
3,88	8,0852	37,4
3,9	7,7134	37
3,92	7,287	36,4
3,94	7,1752	35,9
3,96	7,0569	34
3,98	7,001	32,5
4	6,975	30,3
4,02	6,178	29,4
4,04	6,8736	23,8
4,06	6,9477	24,1
4,08	6,9659	23,4
4,1	7,0244	23,3
4,12	7,1037	23,8
4,14	7,2246	24,3
4,16	7,6302	24,7
4,18	7,8824	25
4,2	8,3218	26,2
4,22	8,9147	26,8
4,24	9,2111	27,1
4,26	9,8559	28,3
4,28	10,0406	29,4
4,3	10,3058	31,9
4,32	10,5918	32,8
4,34	10,6906	36,1
4,36	11,0702	37,6
4,38	11,1638	40,4
4,4	11,3744	41,1
4,42	11,4342	41,5
4,44	11,4837	42,4
4,46	11,4395	44,3
4,48	11,4395	45,2
4,5	11,3978	44,9
4,52	11,4785	44,4
4,54	11,4967	43,2

Gylis, m	Kūginis stipris q_c , MPa	Šoninis stipris f_s , kPa
4,56	11,5357	43,3
4,58	11,5383	43,5
4,6	11,4473	45
4,62	11,3822	44,2
4,64	11,3796	44,2
4,66	11,39	45
4,68	11,2834	45,4
4,7	11,3328	45,6
4,72	11,3458	45,4
4,74	11,325	45,4
4,76	11,351	46,5
4,78	12,1415	47
4,8	9,947	54,9
4,82	14,8275	54,9
4,84	16,2108	84,2