

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Gintaras Žaržojus

DINAMINIO ZONDAVIMO REZULTATŲ IR JUOS ĮTAKOJANČIŲ VEIKSNIŲ
ANALIZĖ BEI SAŠAJOS SU STATINIO ZONDAVIMO DUOMENIMIS
LIETUVOS GRUNTUOSE

Daktaro disertacija
Fiziniai mokslai, geologija (05 P)

Vilnius, 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus universitete

Mokslinis vadovas:

prof. dr. Kastytis Juozas Dundulis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, geologija – 05 P).

Konsultantas:

doc. dr. Saulius Gadeikis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, geologija – 05 P).

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	vii
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	x
ĮVADAS	1
1. GEOTECHNINIO ZONDAVIMO METODŲ IR RE-	
ZULTATŲ INTERPRETACIJOS APŽVALGA	4
1.1. Geotechninis zondavimas	4
1.2. Gruntų bandymai dinaminio zondavimu (DPT)	8
1.2.1. <i>Dinaminio zondavimo metodo raida</i>	8
1.2.2. <i>Dinaminių zondų tipai ir darbo principai</i>	9
1.2.3. <i>Dinaminio zondavimo duomenų patikimumas,</i> <i>energijos nuostolio ir gruntų pasipriešinimo įver-</i> <i>tinimas</i>	10
1.2.4. <i>Dinaminio zondavimo rodiklių sąsajos su</i> <i>gruntų fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis</i>	17
1.2.5. <i>Dinaminio zondavimo duomenų naudojimas</i> <i>projektuojant pamatus</i>	19
1.3. Gruntų bandymai statiniu zondavimu (CPT,	
CPTu)	22
1.3.1. <i>Statinio zondavimo metodo raida</i>	22
1.3.2. <i>Statinių zondų tipai ir zondo elgsena grunte</i>	23
1.3.3. <i>Statinio zondavimo rodiklių sąsajos su gruntų</i> <i>fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis</i>	25
1.3.4. <i>Statinio zondavimo duomenų naudojimas pro-</i> <i>jektuojant pamatus</i>	30
1.4. Skyriaus rezultatai ir išvados	32
2. DINAMINIO ZONDAVIMO RODIKLIAI IR JŲ PA-	
TIKIMUMAS	34
2.1. Smūgių skaičius zonduojant skirtingų tipų DPT	
zondais ir jų tarpusavio sąsajos	34
2.1.1. <i>Savitasis smūgio darbas. Santykinis smūgio są-</i> <i>sajų koeficientas β</i>	34

2.1.2. Smūgių skaičiaus skirtumai naudojant DPL ir DPSH–A tipo zondus	36
2.1.3. Smūgių skaičiaus skirtumai naudojant DPL ir DPSH–B zondus limnoglacialiniuose gruntuose	43
2.1.4. Smūgių skaičiaus skirtumai naudojant DPSH– A ir DPSH–B zondus limnoglacialiniuose grun- tuose	46
2.2. Netiesioginis dinaminio zondavimo rodiklis – di- naminė kūgio smiga (q_d).....	49
2.2.1. Dinaminės kūgio smigos apskaičiavimo formu- lės	49
2.2.2. Įvairių kalimo formulių rezultatų palyginimas vertinant DPSH–A zondo duomenis	51
2.2.3. Įvairių kalimo formulių rezultatų palyginimas vertinant DPL zondo duomenis	57
2.2.4. Dinaminės kūgio smigos smulkiame smėlyje invariantiškumo analizė	64
2.3. Dinaminio zondavimo rodiklių patikimumo verti- nimo rezultatai ir išvados.....	65
3. SMŪGIŲ SKAIČIŲ ĮTAKOS TURINČIŲ VEIKSNIŲ ANALIZĖ	71
3.1. Smūgio efektyvumas.....	71
3.2. Zondavimo štangų trintis į gruntą, jos įtaka smū- gių skaičiui.....	74
3.3. Grunto geostatinio slėgio įtaka smūgių skaičiui	79
3.4. Smūgių skaičiaus patikimumo analizės rezultatai ir išvados.....	84
4. DINAMINIO IR STATINIO ZONDAVIMO RODIK- LIŲ TARPUSAVIO SĄSAJOS	86
4.1. Tyrinėti gruntai ir sąsajų tarp DPT ir CPT rodik- lių paieškos metodika	86
4.1.1. Tyrinėti gruntai ir jų suskirstymas į analizuo- jamas grupes	86

4.1.2. Sąsajų tarp DPT ir CPT zondavimo rodiklių paieškos metodika	89
4.2. DPL ir CPT zondavimo rodiklių tarpusavio sąsajos	92
4.2.1. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška rupiuose gruntuose	92
4.2.2. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame dulkingame molyje	96
4.2.3. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame molingame dulkyje	100
4.2.4. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniuose smulkiuose gruntuose	104
4.3. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių tarpusavio sąsajos	108
4.3.1. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška dulkingame smėlyje	108
4.3.2. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška smulkiame ir vidutinio rupumo smėlyje	113
4.3.3. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška rupiame ir žvyringame smėlyje	118
4.3.4. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame dulkingame molyje	121
4.3.5. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame molingame dulkyje	126
4.3.6. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniame molyje	132
4.3.7. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniame smėlingame dulkingame molyje	134
4.3.8. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniame dulkyje	137

4.4. DPT ir CPT zondavimo rodiklių tarpusavio sąsajų nustatymo rezultatai ir išvados	139
IŠVADOS	142
LITERATŪROS SĄRAŠAS	144
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS	154

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Įvairių tipų zondų taikymo galimybės ir rezultatų patikimumas (Lunne, Robertson, Powell, 1997)	6
1.2 lentelė. Europoje naudojami dinaminiai zondai (ištrauka iš ISO 22476-2:2005)	9
1.3 lentelė. NVS šalyse naudojami dinaminiai zondai (pagal ГОСТ 19912-2001)	10
1.4 lentelė. Kalimo formulių suvestinė lentelė (Poulos, Davis, 1980)	13
1.5 lentelė. Buvusioje Tarybų Sąjungoje naudotos kalimo formulės (Солодухин, 1975)	15
1.6 lentelė. Grunto tipo nustatymas pagal CPT zondo rodiklių vertes (Clayton etc., 1995)	25
1.7 lentelė. Lietuvos teritorijos gruntų klasifikacija pagal statinio zondavimo duomenis (Šimkus, 1987)	28
2.1 lentelė. Nagrinėjamų smūgių skaičiaus santykinių sąsajų koeficientų β_A ir λ_A pagrindiniai statistiniai rodikliai	37
2.2 lentelė. Smūgių skaičiaus sąsajos koeficiento (β'_A) procentinės ir santykinės vertės	43
2.3 lentelė. Nagrinėjamų smūgių skaičiaus santykinių sąsajos koeficientų β_B ir λ_B pagrindiniai statistiniai rodikliai	43
2.4 lentelė. Nagrinėjamų smūgių skaičiaus santykinių sąsajos koeficientų (β_{AB}) ir (λ_{AB}) pagrindiniai statistiniai rodikliai	46
2.5 lentelė. Dinaminės kūgio smigos (q_d) skaičiavimuose naudotų kalimo formulių suvestinė lentelė	50
2.6 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPSH-A}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (moreninis smėlingas molingas dulkis)	52

2.7 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPSH-A}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (smulkus smėlis).....	56
2.8 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPL}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (moreninis smėlingas molingas dulkis).....	58
2.9 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPL}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 0,0 iki 2,4 m)	60
2.10 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPL}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 2,4 iki 5,2 m)	62
3.1 lentelė. Tyrimuose naudoto moreninio smėlingo dulkingo molio granulimetrinė sudėtis (Urbaitis, 2009).....	74
3.2 lentelė. Tyrimuose naudoto moreninio smėlingo dulkingo molio gamtinio drėgnio (w), sankibos (c), vidinės trinties kampo (φ) ir deformacijos modulio (E) vertės (Urbaitis, 2009)	75
3.3 lentelė. Smūgių skaičiaus N_{20} ir N_{20}^* aritmetinis ir procentinis skirtumai zonduojant moreninį smėlingą dulkingą molį	77
3.4 lentelė. Geostatinio slėgio įtakos tyrime naudotų smulkių gruntų fizikinės savybės.....	78
3.5 lentelė. Geostatinio slėgio įtakos tyrime naudotų rupių gruntų granulimetrinė sudėtis	81
4.1 lentelė. Rupių gruntų apibendrinta granulimetrinė sudėtis (Rachimovas, 2007)	87
4.2 lentelė. Smulkių limnoglacialinių gruntų fizikinės savybės (Urbaitis, 2007).....	87
4.3 lentelė. Smulkių glacialinių gruntų fizikinės savybės (Urbaitis, 2007)	88

4.4 lentelė. Nefiltruotos (visos) ir filtruotos santykio (α_{DPL}) aibių pagrindiniai statistiniai rodikliai (rupus gruntas).....	93
4.5 lentelė. Santykio (α_{DPL}) kiekvieno zondavimo metro reikšmių statistinės analizės rezultatai (rupus gruntas)	94
4.6 lentelė. Nefiltruotos (visos) ir filtruotos santykio (α_{DPL}) aibių pagrindiniai statistiniai rodikliai (sasiCl morena)	97
4.7 lentelė. Limnoglacialinių smulkių gruntų filtruoto santykio (α_{DPL}) imčių pagrindiniai statistiniai rodikliai	104
4.8 lentelė. Santykio (α_{DPSH-A}) verčių imties iki 7,0 m gylio pagrindiniai statistiniai rodikliai (dulkingas smėlis)	109
4.9 lentelė. Santykio (α_{DPSH-A}) verčių iki 17,0 m imties pagrindiniai statistiniai rodikliai (FSa ir MSa).....	115
4.10 lentelė. Lygties (4.5) konstantos ir eksponentės, kai zonuotas gruntas yra limnoglacialinis molis	134
4.11 lentelė. Lygties (4.7) konstantos, kai zonuotas gruntas yra limnoglacialinis smėlingas dulkingas molis	135
4.12 lentelė. Lygties (4.5) konstanta (a) ir eksponentė (n), kai zonuotas įvairaus rupumo dulkis	137
4.13 lentelė. Lygties (4.2) konstantų dydžiai skirtingiems gruntams, kai zonuota DPL zonu.....	139
4.14 lentelė. Lygčių (4.2), (4.3) ir (4.4) konstantų vertės, kai zonuota DPSH–A zonu rupiuose gruntuose	140
4.15 lentelė. Lygčių (4.5), (4.6) ir (4.7) konstantų ir eksponentių vertės, kai zonuota DPSH–A zonu smulkiuose gruntuose	141

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Tiesioginiai ir netiesioginiai gruntų tyrimo metodai (pagal Houlsby, 1998)	4
1.2 pav. Geotechninis zondavimas: zondų tipai, tikslas ir pa- skirtis	5
1.3 pav. Įvairių zondavimo metodų tarpusavio sąsajų kiekio įvertinimas	7
1.4 pav. Smūgių skaičiui įtakos turintys veiksniai bei jų tarpu- savio sąsajos	11
1.5 pav. E. A. L. Smith'o pasiūlytas dinaminės sistemos skai- čiavimo modelis (Smith, 1960)	16
1.6 pav. Polio pado savitojo stiprio (q_b) nustatymas pagal di- naminio zondavimo duomenis (Heinonen, Hartikai- nen etc., 1997)	20
1.7 pav. Polio kamieno savitojo stiprio (q_s) nustatymas pagal dinaminio zondavimo duomenis (Heinonen, Harti- kainen etc., 1997):	
a) spraustiniams poliams	20
b) gręžtiniams poliams	21
1.8 pav. Grunto klasifikacijos pagal CPT duomenis grafikais: Schmertmann'o ir Robertson'o (Fellenius etc., 2000)	26
1.9 pav. Grunto klasifikacijos pagal CPT duomenis grafikais: Begemann'o (1965), Sanglerat'o ir kt. (1974), Jo- nes'o ir Rust'o (1982) bei Senneset'o ir kt. (1989) (Fellenius etc., 2000)	27
2.1 pav. Skirtingos zondavimo įrangos plakto smūgio savitojo darbo (E_n) vertės	34
2.2 pav. Koeficiento (β_A) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu (visi grunto tipai)	38
2.3 pav. Koeficiento (β_A) dažnių histograma su log- normaliuoju skirstiniu (visi grunto tipai).....	38
2.4 pav. Koeficiento (β_A) verčių pasiskirstymas apie normalę (visi grunto tipai)	39

2.5 pav. Logaritmuoto koeficiento (λ_A) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu (visi grunto tipai).....	39
2.6 pav. Koeficiento (λ_A) verčių pasiskirstymas apie normalę (visi grunto tipai)	40
2.7 pav. Koeficiento (β'_A) verčių priklausomybė nuo koeficiento (k) (smulkus gruntas)	41
2.8 pav. Koeficiento (β'_A) verčių priklausomybė nuo grunto frakcijos dydžio (d) (rupus gruntas)	42
2.9 pav. Koeficiento (β_B) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose	44
2.10 pav. Koeficiento (β_B) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose	44
2.11 pav. Logaritmuoto koeficiento (λ_B) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose	45
2.12 pav. Koeficiento (λ_B) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose	45
2.13 pav. Koeficiento (β_{AB}) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose	47
2.14 pav. Koeficiento (β_{AB}) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose	47
2.15 pav. Logaritmuoto koeficiento (λ_{AB}) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose	48
2.16 pav. Koeficiento (λ_{AB}) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose	48
2.17 pav. Tikrosios ir suglodingtos q_c ir N_{DPSH-A} vertės, gautos zonuojant moreninį smėlingą molingą dulkį	51
2.18 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (moreninis smėlingas molingas dulkis)	53
2.19 pav. Tikrosios ir suglodingtos q_c ir N_{DPSH-A} vertės, gautos zonuojant smulkų smėlį	54
2.20 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (smulkus smėlis)	55

2.21 pav. Dinaminės kūgio smigos (q_d) ir kūgio spraudos (q_c) duomenų grafikų palyginimas	57
2.22 pav. Tikrosios ir suglodintos q_c ir N_{DPL} vertės, gautos zonduojant moreninį smėlingą molingą dulkį	57
2.23 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (moreninis smėlingas molingas dulkis)	59
2.24 pav. Tikrosios ir suglodintos q_c ir N_{DPL} vertės, gautos zonduojant smulkų smėlį	60
2.25 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 0,0 iki 2,4 m)	61
2.26 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 2,4 m iki 5,2 m)	63
2.27 pav. Kūgio spraudos (q_c) ir dinaminės kūgio smigos (q_d) grafikai (smulkus smėlis; DPL zondas)	63
2.28 pav. Santykio (Δ) verčių pasiskirstymas skaičiuojant pagal skirtingas kalimo formules	64
2.29 pav. Santykio (Δ) verčių pasiskirstymas zondavimo gylio intervale skaičiuojant pagal skirtingas kalimo formules	65
3.1 pav. Smūgio efektyvumas priklausomai nuo zondavimo tipo ir pasirinktos skaičiavimo metodikos	73
3.2 pav. Atlikto eksperimento vietos geologinė situacija ir CPT bei DPSH–A zondų apibendrinti duomenys	75
3.3 pav. Eksperimento su DPSH–A zonu ir gręžimo skysčiu atlikimo schema	76
3.4 pav. Šoninės trinties įtakos eksperimento dinaminio zondavimo duomenys	76
3.5 pav. Smūgių skaičiaus N_{20} ir N_{20}^* aritmetinis (A) ir procentinis (B) skirtumai	77
3.6 pav. Dinaminio zondavimo (DPSH–A) taškų (Nr. 1, 2, 3, 4) vidutinių verčių grafikai	78

3.7 pav. Smūgių skaičiaus (N_{20} ir N_{20}^*) aritmetinių skirtumų dažnių histograma.....	78
3.8 pav. Smūgių skaičiaus (N_{20} ir N_{20}^*) procentinių skirtumų dažnių histograma.....	79
3.9 pav. Gruntų šoninio geostatinio slėgio įtakos smūgių skaičiui nustatymo schema	80
3.10 pav. Tyrimų vietoje esančių gruntų geologinis pjūvis, CPT ir DPSH–A zondavimų duomenys	80
3.11 pav. Smūgių skaičiaus zonduojant nuo žemės paviršiaus (N_{20}) ir nuo gręžinio dugno (N_{20}^*) santykio (N_{20}/N_{20}^*) priklausomybė nuo zondavimo gylio (h)	83
4.1 pav. Santykio (α_{DPL}) verčių dažnių analizės histograma, kai nagrinėjami rupūs gruntai ($N = 201$)	92
4.2 pav. Filtruoto santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) sklaidos diagrama rupiuose gruntuose.....	93
4.3 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama rupiame grunte (imtys kas 20 cm)	94
4.4 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama rupiame grunte (imtys kas 1,0 m).....	95
4.5 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra koreguotas dėl smūgio efektyvumo (rupus gruntas)	96
4.6 pav. Santykio (α_{DPL}) verčių dažnių analizės histograma, kai nagrinėjamas moreninis smėlingas dulkingas molis ($N = 153$).....	97
4.7 pav. Filtruoto santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) sklaidos diagrama moreniniame smėlingame dulkingame molyje.....	98
4.8 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių ir gylio (h) duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame dulkingame molyje (imtys kas 20 cm).....	98

4.9 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame dulkingame molyje (imtys kas 1,0 m)	99
4.10 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra koreguotas dėl smūgio efektyvumo (moreninis smėlingas dulkingas molis)	100
4.11 pav. Santykio (α_{DPL}) verčių dažnių analizės histograma, kai nagrinėjamas moreninis smėlingas molingas dulkis ($N = 84$)	101
4.12 pav. Filtruoto santykio (α_{DPL}) ir gylio sklaidos diagrama moreniniame smėlingame molingame dulkyje	102
4.13 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame molingame dulkyje (imtys kas 20 cm)	102
4.14 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame molingame dulkyje (imtys kas 1,0 m)	103
4.15 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra koreguotas dėl smūgio efektyvumo (moreninis smėlingas molingas dulkis)	103
4.16 pav. Dulquio ir molingio dulquio santykio (α_{DPL}) duomenų sklaidos diagrama	105
4.17 pav. Smėlingo molingio dulquio ir smėlingo dulquio santykio (α_{DPL}) duomenų sklaidos diagrama su polinomine aproksimuojančia kreive	106
4.18 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra koreguotas dėl smūgio efektyvumo (saI_{Si} ; $saSi$)	107
4.19 pav. Smėlingo dulkingo molio ir dulkingo molio santykio (α_{DPL}) duomenų sklaidos diagrama	108

4.20 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama gylio (h) atžvilgiu ($N = 110$; siSa).....	109
4.21 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) verčių iki 7,0 m gylio sklaidos diagrama (siSa).....	111
4.22 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su polinomine ir tiesine aproksimuojančiomis kreivėmis (sudarytos imtys kiekvienam zondavimo metrui, zonuota dulkingame smėlyje).....	111
4.23 pav. Dėl smūgio efektyvumo pakoreguoto santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (zonuota dulkingame smėlyje).....	112
4.24 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su polinomine aproksimuojančia kreive (sudarytos imtys kiekvienam zondavimo 20 cm; zonuota smulkiame ir vidutinio rupumo smėlyje).....	114
4.25 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su polinomine aproksimuojančia kreive (sudarytos imtys kiekvienam zondavimo metrui, zonuotas gruntas FSa ir MSa).....	114
4.26 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su elipse, kuri atitinka imties plotį (iki 17,0 m gylio; FSa ir MSa).....	115
4.27 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, vaizduojanti smulkaus grunto įtaką (imtys kas 20 cm; FSa ir MSa).....	116
4.28 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, vaizduojanti smulkaus grunto įtaką (imtys kas metras; FSa ir MSa).....	117
4.29 pav. Dėl smūgio efektyvumo pakoreguoto santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama.....	117
4.30 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (nagrinėjama visa duomenų aibė $N = 195$; Csa ir GrSa).....	118

4.31 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (im- tys kas 20 cm; CSa ir GrSa)	119
4.32 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (im- tys kas vieną metrą; CSa ir GrSa).....	119
4.33 pav. Dėl smūgio efektyvumo pakoreguoto santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (CSa ir GrSa).....	120
4.34 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (nagrinėjama visa duomenų aibė $N = 389$).....	121
4.35 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama ($q_c \leq$ 2,0 MPa; $n = 120$).....	122
4.36 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su eksponentine kreive ($q_c \leq 1,5$ MPa; morena sasiCl).....	123
4.37 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine kreive ($1,5$ MPa $< q_c \leq 2,0$ MPa; morena sasiCl)	123
4.38 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine kreive ($2,0$ MPa $< q_c \leq 4,0$ MPa; morena sasiCl).....	124
4.39 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine kreive ($q_c > 4,0$ MPa; morena sasiCl)	125
4.40 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, apimanti visą aibę ($N = 401$; morena sa- siCl)	126
4.41 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama ($N =$ 613; morena saclSi)	127
4.42 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsninėmis kreivėmis ($q_c \leq 3,0$ MPa; morena sacl- Si)	128
4.43 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsninėmis kreivėmis ($3,0$ MPa $< q_c$, MPa $\leq 8,0$; morena saclSi)	129

4.44 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsninėmis kreivėmis ($q_c > 8,0$ MPa; morena sacl-Si)	129
4.45 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, apimanti visą aibę ($N = 581$; morena sacl-Si)	130
4.46 pav. Laipsninės lygties (4.5) konstantos (a) nustatymo grafikas (morena saclSi)	131
4.47 pav. Laipsninės lygties (4.5) eksponentės (n) nustatymo grafikas (morena saclSi)	132
4.48 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama ($N = 123$; CI).....	133
4.49 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su aproksimuojančiomis kreivėmis (CI)	133
4.50 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su logaritmine tendencine kreive ($N = 164$; saSiCI).....	135
4.51 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su aproksimuojančiomis kreivėmis (saSiCI).....	135
4.52 pav. Lygties (4.7) konstantų d ir c nustatymo kreivės (saSiCI)	136
4.53 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su logaritmine tendencine kreive ($N = 144$; Si)	137
4.54 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su aproksimuojančiomis kreivėmis (Si)	138
4.55 pav. Lygties (4.5) konstantos a nustatymo kreivė (Si)	138

ĮVADAS

Darbo aktualumas. Augant statybos mastams ir statant vis sudėtingesnius statinius, kurių pamatų pagrindu būna vis gilesni grunto sluoksniai, reikalingi greiti ir ekonomiškai grunto tyrimo metodai. Atliekant inžinerinius geologinius tyrimus pagrindinę informaciją apie gruntų savybes duoda įvairūs zondavimo metodai. Pasaulyje iš šių metodų plačiausiai atliekant lauko tyrimus taikomas statinis zondavimas (CPT), šiek tiek rečiau – standartinis zondavimas (SPT). Lietuvoje tradiciškai vykdamas inžinerinius geologinius tyrimus naudojami statiniai (CPT) ir dinaminiai (DPT) zondai.

Statinis ir standartinis zondai dėl savo specifikos labiausiai tinka zonduoti palyginti silpnus gruntuos be žvirgždo ir gargždo priemaišų ar jų sluoksnių. Lietuvoje pamatų pagrindu dažniausiai būna glacigeniniai ir aliuviniai pleistoceno amžiaus gruntuos, kurių atskirų sluoksnių fizikinės ir mechaninės savybės gali labai skirtis. Šiuose gruntuose dažnai būna nemaži žvirgždo ir gargždo priemaišos kiekiai, kartais – ištisi jų sluoksniai. Toks dažnai sudėtingas geologinis pjūvis apsunkina darbus CPT įranga, todėl reikalingi ištirti sluoksniai lieka nezonduoti. Dinaminis zondavimas (DPT) leidžia zonduoti per tvirtus gruntuos iki 30,0 m gylio. Statant sudėtingus statinius, jų pamatų įgilinimas dažnai viršija 15–20 m. CPT zondais toks gylis dažnai būna nepasiekiamas, todėl tokiais atvejais naudojami DPT zondai, kurie be didesnių kliūčių pasiekia reikiamą projektinį gylį.

Dinaminis zondavimas dažniausiai naudojamas gruntuos fizikinei būklei įvertinti, tačiau jo duomenys tiesiogiai pamatų projektavime nenaudojami. Pagal šiuo metu esančius norminius reikalavimus nepakankamai įvertinti DPT metu rezultatams įtakos turintys energijos nuostolius sukeltantys veiksniai. Praktiškai neištirtos DPT ir CPT rodiklių tarpusavio sąsajos. Šių sąsajų ir koreliacinio ryšio nustatymas sudarytų palankias sąlygas tiesiogiai pagal DPT rezultatus projektuoti giliuosius pamatus.

Darbo objektas – Lietuvos teritorijoje slūgsantys gruntuos, kurie gali būti statinių pamatų pagrindais.

Darbo tikslas – dinaminio zondavimo duomenų patikimumo įvertinimas, gautų pradinių rezultatų apdorojimas ir pataisos koeficientų nustatymas, sąsajų tarp dinaminio ir statinio zondų rodiklių paieška bei įvertinimas.

Darbo uždaviniai:

- išanalizuoti statinio ir dinaminio zondavimo metodikas, gaunamų duomenų panaudojimą gruntuos savybių įvertinimui ir vykdamas geotechninį projek-

tavimą, nustatyti duomenų interpretacijos problemines vietas;

- įvertinti dinaminio zondavimo rodiklių (N_x ir q_d) patikimumą, nustatyti ryšį tarp skirtingo tipo dinaminių zondų smūgių skaičiaus (N_x) verčių ir rasti sąsajų koeficientus;
- nustatyti dinaminio zondavimo duomenų patikimumui įtakos turinčius veiksnius, įvertinti jų įtakos mastą;
- rasti koreliacinius ryšius Lietuvos gruntuose tarp dinaminio ir statinio zondavimo rodiklių, įvertinant jų sąsajos glaudumą.

Darbo naujumas:

- atliktas išsamus dinaminio zondavimo rodiklių patikimumo ir smūgių skaičiaus tarp skirtingo tipo zondų santykio įvertinimas;
- nustatytos smūgių skaičiaus pataisos dėl šoninės trinties ir geostatinio slėgio įtakos zondavimo duomenims, įvairių dinaminių sistemų smūgio efektyvumo įvertinimo metodika pritaikyta DPT duomenims;
- surastos koreliacinės priklausomybės tarp dinaminio zondavimo rodiklio smūgių skaičiaus (N_{20}) ir statinio zondavimo rodiklio kūgio spraudos (q_c).

Ginami teiginiai:

- dinaminė kūgio smiga (q_d) – netiesioginis, išvestinis dinaminio zondavimo rodiklis yra keistinas tiesioginiu DPT matavimo rodikliu smūgių skaičiumi (N_x);
- dinaminio zondavimo metu smūgių skaičiaus (N_x) vertės gali būti padidintos iki 80% dėl zondavimo įrangos masės kaitos, šoninės trinties ir gruntų geostatinio slėgio;
- Lietuvos gruntuose, tarp smūgių skaičiaus (N_x) ir statinės kūgio spraudos (q_c) egzistuoja pakankamai glaudus ryšys, kuris priklauso nuo grunto granulimetrinės sudėties, mechaninių savybių ir slūgsojimo gylio.

Darbo praktinė reikšmė. Atliktas darbas padeda geriau suprasti energijos pernešimą zondavimo metu, leidžia patikslinti zondavimo duomenis. Atliekant smūgių skaičiaus interpretaciją, galima išvengti didelių paklaidų, atsiradusių dėl įvairių veiksnių įtakos. Atlikta dinaminio ir statinio zondavimų tarpusavio koreliacinė analizė leidžia supaprastinti DPT duomenų naudojimą vykdant geotechninį projektavimą .

Darbo rezultatų aprobavimas. Darbo rezultatai aptarti ketvirtojoje mokslinėje VU Gamtos mokslų konferencijoje „Mokslas Gamtos mokslų fakultete“ (Vil-

nius, 2006); devintoje tarptautinėje konferencijoje „Modern building materials, structures and techniques“ (Vilnius, 2007); vienuoliktoje Baltijos šalių geotechnikos konferencijoje „Geotechnics in maritime engineering“ (Gdansk, 2008); antrame tarptautiniame simpoziume apie statinį zondavimą „CPT‘10“ (Huntington Beach, CA, 2010).

Publikacijos. Disertacijos darbo tema paskelbti 9 moksliniai straipsniai. Iš jų 2 – leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) sąrašą, 7 – recenzuojamuose tarptautiniuose užsienio ir Lietuvos leidiniuose.

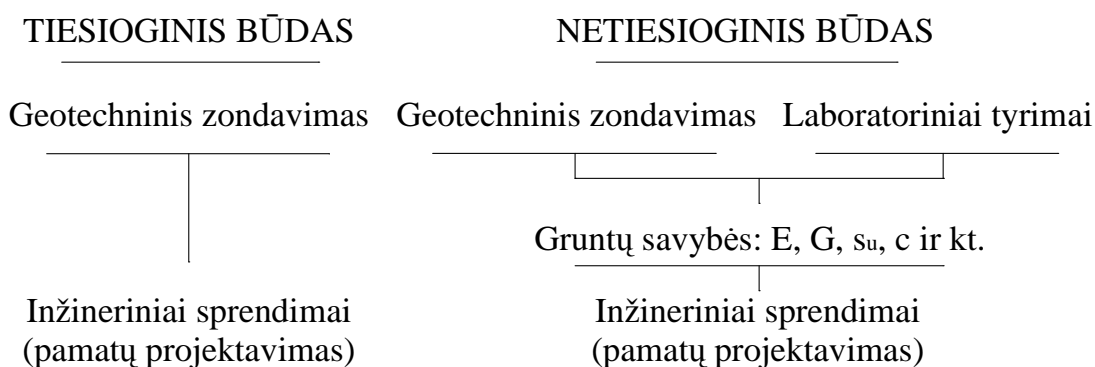
Darbo apimtis ir struktūra. Darbą sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas. Darbo apimtis – 155 puslapiai. Tekste pateikti 104 paveikslai ir 37 lentelės. Literatūros sąrašė 95 bibliografiniai pavadinimai.

Padėkos. Autorius nuoširdžiai dėkoja visiems kolegoms, padėjusiems atlikti ir parengti šį darbą. Labiausiai norėtųsi padėkoti mokslinio darbo vadovui prof. dr. Kastyčiui Dunduliui už nuoširdžią pagalbą ir vertingus patarimus rašant šį darbą. Atskirai norėtųsi padėkoti doc. dr. Sauliui Gadeikiui už įvairią pagalbą, mgr. Donatui Urbaičiui už pagalbą renkant literatūrinę medžiagą ir atliekant laboratorinius tyrimus, doktorantui Dariui Macijauskui (VGTU) už tikrai vertingus patarimus ir konsultacijas. Taip pat nuoširdžiai dėkoju visiems Vilniaus Universiteto Hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedros darbuotojams ir UAB „Geotestus“ kolektyvui už pagalbą bei moralinį palaikymą.

1. GEOTECHNINIO ZONDAVIMO METODŲ IR REZULTATŲ INTERPRETACIJOS APŽVALGA

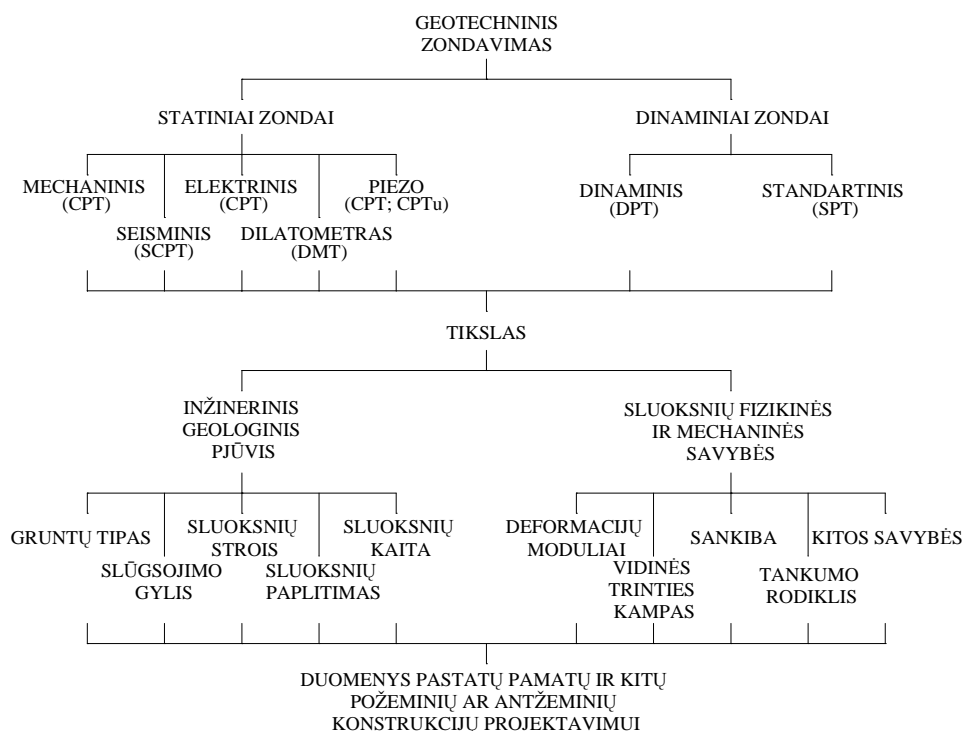
1.1. Geotechninis zondavimas

Atliekant inžinerinius geologinius tyrimus, gruntų savybes galima nustatyti dviem būdais – lauko ir laboratoriniai bandymais. Paprastai lauko bandymai atliekami naudojant įvairių gruntų zondavimo įrangą, kuria galima tiesiogiai (*in-situ*) tirti gruntus. Norint atlikti laboratorinius tyrimus, reikalingi suardytos ir nesuardytos sandaros gruntų bandiniai, o tai dažnai būna sudėtinga. Zondavimo metu gauti rezultatai gali būti tiesiogiai naudojami pamatų projektavime arba apskaičiuojant grunto savybes. Laboratorinių tyrimų metu nustatomos gruntų savybės, į kurias vėliau atsižvelgiama priimant inžinerinius sprendinius (1.1 pav.). Geotechninis zondavimas turi daug privalumų, tačiau projektuojant sudėtingesnius ir atsakingesnius objektus negalima atsakyti ir laboratorinių tyrimų. Pagrindinis geotechninio zondavimo privalumas – tyrimų sparta ir tiesioginis jų taikymas projektuojant pamatus (Houlsby, 1998; Mayne, 2000).



1.1 pav. Tiesioginiai ir netiesioginiai gruntų tyrimo metodai (pagal Houlsby, 1998)

Atliekant inžinerinius geologinius tyrimus taikomi įvairūs grunto zondavimo metodai, kurių skiriasi tiek metodikos, tiek darbų metu gaunami rodikliai. Nepaisant visų metodinių skirtumų, zondavimo darbų tikslas yra bendras – nustatyti tiriamos vietovės geologinį pjūvį, t.y. jį sudarančių gruntų tipus; skirtingų gruntų slūgsojimo gylius; sluoksnių storius ir išplitimą (Yu, 2006). Pagrindinis zondavimo metu gautų duomenų interpretavimo tikslas – įvertinti tiriamos vietovės gruntų fizikinių ir mechaninių savybių rodiklių vertes (1.2 pav.). Šios gruntų savybės įvertinamos išanalizavus įvairias koreliacines priklausomybes tarp zondavimo metu gautų rodiklių verčių ir grunto fizikinių bei mechaninių savybių rodiklių verčių. Zondavimo metu gauti duomenys ir apskaičiuotos grunto savybių rodiklių vertės naudojami projektuojant statinių pamatus.



1.2 pav. Geotechninis zondavimas: zondų tipai, tikslas ir paskirtis

Visus zondus, naudojamus geoteknikoje, galima suskirstyti į dvi dideles grupes, t.y. į zondus, kurie įgilinami veikiant statinei ir dinaminei jėgoms (1.2 pav.). Zondavimo *in-situ* tikslas yra vienas, tačiau gaunamų duomenų patikimumas gana skirtingas. Be to, vieni zondai tinka zonduoti rupius (birius), kiti – smulkius (rišlius) gruntuos. Apskaičiuojant gruntų fizikines ar mechanines savybes pagal tiesioginius zondavimo duomenis, gautų rezultatų patikimumas taip pat yra įvairus (1.1 lentelė).

Taigi visi šie veiksniai nulemia pamatų ir kitų požeminių ar antžeminių konstrukcijų projektavimo tikslumą.

Iš 1.1 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad statinio zondavimo (CPT, CPTu, SCPT) taikymas atliekant inžinerinius geologinius tyrimus turi platesnes galimybes ir gauti rezultatai yra patikimesni. Dinaminis zondavimas (DPT, SPT) yra mažiau patikimas lauko tyrimo metodas. SPT bandymo metu ir po to sekanti duomenų interpretacija geriau atspindi zonduotų gruntų fizikines ir mechanines savybes, lyginat su DPT bandymo metu gautais rezultatais (Campanella, Robertson, 1982; Wroth, 1984; Greig, Campanella, Robertson, 1988; Bell, Cripps, Culshaw, 1990; Bowles 1997; Lunne, Powell, Robertson, 1997). DPT zondavimo metu gautų duomenų menkas patikimumas gali būti susijęs su šio metodo nepopuliarumu ir per mažu jam mokslininkų skiriamu dėmesiu. SPT metodas leidžia patikimiau vertinti grunto savybes. Be to, jis gana populiarus, ypač JAV, todėl tai skatina mokslininkus domėtis šiuo metodu ir tobulinti gautų duomenų analizę bei galimus sprendinius (Mayne, Mitchell etc., 1995).

1.1 lentelė. Įvairių tipų zondų taikymo galimybės ir rezultatų patikimumas (Lunne, Robertson, Powell, 1997)

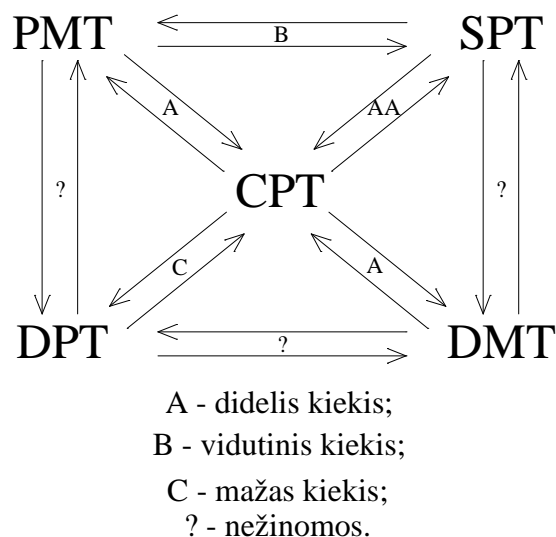
Zondo tipas	Grunto tipas	Pjūvis	Grunto savybių rodikliai										Zonduojamas gruntas				
			u	φ	s_u	I_D	M	c_v	k	G	σ_h	OCR	Gr	Sa	Si	Cl	O
Dinaminis (DPT)	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C	B	A	B	B	B
Mechaninis (CPT)	B	AB	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C	C	A	A	A	A
Elektrinis (CPT)	B	A	-	C	B	AB	C	-	-	B	BC	B	C	A	A	A	A
Piezo (CPTu)	A	A	A	B	B	AB	B	AB	B	B	BC	B	-	A	A	A	A
Seisminis (SCPT)	A	A	A	B	AB	AB	B	AB	B	A	B	B	-	A	A	A	A
Dilatometras (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	-	A	A	A	A
Standartinis (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C	B	A	A	A	A

Taikymo galimybės: A – geros; B – vidutinės; C – silpnos; - – netaikoma. u – statinis porinis slėgis (*in situ*); φ – vidinės trinties kampas; s_u – kerpamasis stipris nedrenuotose sąlygose; I_D – santykinis tankumo rodiklis; M – suvaržytų deformacijų modulis; c_v – konsolidacijos koeficientas; k – pralaidumo (skvarbos) koeficientas; G – skersinių deformacijų modulis; σ_h – horizontalusis įtempis; OCR – pertankinimo slėgio koeficientas; Gr – žvyras; Sa – smėlis; Si – dulkis; Cl – molis; O – organiniai gruntai (durpė).

Kadangi CPT ir CPTu metodai yra populiariausi, tai atitinkamai ir daugiausia mokslinių darbų skirta jiems nagrinėti. Nemažai mokslininkų ieškojo ir pasiūlė savo

sprendinius, kaip rasti sąsajas tarp įvairių zondavimo tipų (Campanell, Berzins etc., 1979; Robertson, Campanella, 1983; Greig, Campanella etc., 1988; Chung-Tien Chin etc., 1988; Badu-Tweneboach, Bloomquis, 1988; Sy, 1993; Campanella, Davies etc. 1995; Tanaka H., Tanaka M., 1998; Tian, Fu, 2002; Daniel, Howie, Sy, 2003; Ravi Sharma, Ilamparuthi, 2005; Mayne, 2006; Farouz, Chen, 2006; Rogers, 2006; Spagnoli, 2007; Dundulis, Žaržojus, 2008; Žaržojus, Dundulis, 2010; Hamidi, Nikraz etc., 2010; Elkateb, Ali, 2010; Kara, Gündüz, 2010; McNulty, Harney, 2010; Gadeikis, Žaržojus, Urbaitis, 2010). Daugiausia dėmesio skiriama CPT (CPTu) ir SPT tarpusavio ryšiui nustatyti (1.3 pav.).

Sukurta nemažai pamatų laikomosios gebos skaičiavimo metodikų, kurių pagrindas –gruntų zondavimo duomenys. Skaičiavimo metodų gausa ir jų tikslumas labai priklauso nuo pasirinkto zondavimo metodo. Pavyzdžiui, polių ir sekliųjų pamatų pagrindo laikomosios gebos skaičiavimams paprastai naudojami CPT (arba CPTu) bei SPT duomenys, rečiau – DMT arba PMT duomenys. Dinaminio zondavimo (DPT) duomenys projektuojant pamatus tiesiogiai naudojami retai.



1.3 pav. Įvairių zondavimo metodų tarpusavio sąsajų kiekio įvertinimas

1.2. Gruntų bandymai dinaminio zondavimu (DPT)

1.2.1. Dinaminio zondavimo metodo raida

Šiuolaikinėje inžinerinėje geologijoje dinaminis zondavimas (DPT) suprantamas kaip kūgio smeigimas į gruntą naudojant dinaminę jėgą. Dinaminio zondavimo metu kūgį pakeitus gruntotraukiu, gaunamas kitas zondavimo metodas – standartinis zondavimas (SPT). Tiek taikant DPT, tiek SPT darbo principai yra panašūs, tačiau istoriškai taip susiklostė, kad šios metodikos tapo skirtingomis.

Anksčiausi įrašai apie gruntų dinaminį zondavimą padaryti XVII a. Vokietijoje. Šio metodo pradininkas Nicholaus Goldmann'as grunto tyrimams naudojo „kalamąjį zondą“. 1936 m. Künzel'is Vokietijoje pristatė gruntų tyrimo *in-situ* įrenginį „Prüfstab“ (bandymų strypą). 1964 m. šis prietaisas buvo įteisintas Vokietijos standartu DIN 4094 ir pavadintas „lengvuoju zonu“ (Kleyn etc., 1982). Remiantis kitais literatūros šaltiniais, dinaminio zondavimo metodo pradininku laikomas A. J. Scala (Luo etc., 1998). 1956 m. Australijoje A. J. Scala, dirbdamas Viktorijos krašto kelių valdyboje, naudojo lengvo tipo savadarbį dinaminį zondą – iš 508 mm aukščio mėtomą 9 kg plaktą, kurio kūgio kampas buvo 30 laipsnių (Scala, 1985). Dinaminiam zondavimui rekomenduojama bandymų procedūra buvo pradėta kurti 1977 m., o 1989 m. ji buvo pristatyta ISSMFE parengtoje ataskaitoje kartu su kitomis rekomenduojamomis zondavimo metodikomis.

2005 m. Europoje buvo patvirtintas ir išleistas tarptautinis standartas ISO 22476-2:2005 „Geotechniniai tyrimai ir bandymai – Lauko bandymai – 2 dalis: Dinaminis zondavimas“. Šiame dokumente pateikiamas zondavimo įrangos ir darbo su ja standartas, taip pat gautų duomenų analizės pavyzdžiai bei galimos interpretacijos gairės.

Jungtinėse Amerikos Valstijose, Bostone, 1902 m. įmonės „Gow Construction Co.“ savininkas pulkininkas Charles R. Gow'as pradėjo žvalgybiniam gręžiniams naudoti 2,5 cm skersmens kalamąjį gruntotraukį, kuris į gruntą buvo sukalamas 50 kg masės plaktu. 1927 m. buvo pasiūlyta dabartinė SPT konstrukcija, kuri vėliau buvo įteisinta JAV standartu (Fletcher, 1965; Broms, Flodin, 1988).

Tuometinėje Tarybų Sąjungoje rankinį dinaminį zondą pirmą kartą 1947–1948 m. panaudojo I. A. Fizdel'is dirbtinai sutankinto smėlio tankumui nustatyti. Šio zondo kūgio skersmuo ir zondavimo štangų skersmuo buvo vienodi (60 mm). Zondas

buvo įkalamas iš 1,0 m aukščio krintančiu 9 kg plaktu, tankių smėlių nuosėdis buvo matuojamas po 10-ies smūgių, purių smėlių – po 5–6 smūgių. Penktajame dešimtmetyje, atliekant inžinerinius geologinius tyrimus hidroelektrinių statybai prie Volgos ir Dono upių, V. Durante naudojo savos konstrukcijos dinaminį zondą, kuris buvo kalamas 60 kg plaktu. 1973 m. tuometinėje Tarybų Sąjungoje buvo patvirtintas dinaminio zondavimo metodikos standartas „Nurodymai gruntų zondavimui statyboms (CH 448-72)“. Šiame standarte dinaminio zondavimo rodikliu buvo priimtas sąlyginis dinaminis grunto pasipriešinimas (p_d , kg/cm²) (Бондарик etc., 1967; Bondarik, 1967; Трофименков etc., 1981; Дудлер, 1979; Рубинштейн, 1984).

1.2.2. Dinaminių zondų tipai ir darbo principai

Dinaminis zondavimas – tai nustatytų matmenų zondo kūgio kalimas į gruntą standartinio svorio plaktu, kuris mėtomas iš vienodo aukščio, t.y. gruntas zonduojamas veikiant dinaminei apkrovai (jėgai).

Dinaminiai zondai gali būti kelių tipų: lengvas (DPL); vidutinis (DPM); sunkus (DPH) ir ypač sunkus (DPSH–A ir DPSH–B). Zondų tipai išskirti pagal plakto masę ir jų kritimo aukštį (1.2 lentelė). Visų, standartizuotų pagal ISO 22476-2:2005, zondų plaktų kritimo aukštis yra 0,5 m, tik DPSH–B potipio – 0,75 m.

1.2 lentelė. Europoje naudojami dinaminiai zondai (ištrauka iš ISO 22476-2:2005)

Įrangos dalys	Simbolis	Matavimo vienetai	Dinaminio zondo tipas				
			DPL	DPM	DPH	DPSH-A	DPSH-B
Plaktas:							
masė	M	kg	10	30	50	63,5	6,35
kritimo aukštis	h	mm	500	500	500	500	750
Priekalas:							
skersmuo	d	mm	50	50	50	50	50
masė	M'	kg	6	18	18	18	30
Kūgis (90°):							
plotas	A	cm ²	10	15	15	16	20
skersmuo	D	mm	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3	45,0±0,3	50,5±0,5
Štangos:							
masė	m	kg	3	6	6	6	6
skersmuo	d_s	mm	22	32	32	32	35
Savitasis smūgio darbas	E_n	kJ/m ²	50	100	167	194	238

Dinaminio zondavimo metu kalant zondą į gruntą skaičiuojamas smūgių skaičius (N_x). Naudojant skirtingas įrangas, smūgių skaičius skaičiuojamas skirtingam gylio intervalui. Pavyzdžiui, zonduojant DPL, DPM arba DPH, smūgių skaičius skai-

čiuojamas dešimčiai zondavimo centimetrų (N_{10}), o zonduojant DPSH (A arba B) įranga, smūgių skaičius skaičiuojamas dvidešimčiai zondavimo centimetrų (N_{20}). Smūgių skaičius – tiesioginis dinaminio zondavimo metu matuojamas rodiklis. Standarte ISO 22476-2:2005 yra pateiktas ir netiesioginis dinaminio zondavimo rodiklis – dinaminė kūgio smiga (q_d , MPa).

Buvusioje Tarybų Sąjungoje, o dabar – Nepriklausomų Valstybių Sąjungoje (NVS), naudojama dinaminio zondavimo įranga skiriasi nuo naudojamos Europoje. Ši įranga yra įteisinta valstybiniu standartu GOST 19912-2001 (ГОСТ 19912-2001). Pagal ją dinaminiai zondai suskirstyti į tris grupes: lengvus (DPL), vidutinio sunkumo (DPM) ir sunkius (DPH) (1.3 lentelė).

1.3 lentelė. NVS šalyse naudojami dinaminiai zondai (pagal ГОСТ 19912-2001)

Įrangos dalys	Simbolis	Vienetai	Dinaminio zondo tipas		
			DPL	DPM	DPH
Plaktas:					
masė	M	kg	30	60	120
kritimo aukštis	h	cm	40	80	100
Kūgis 60°:					
plotas	A	cm ²	43	43	43
skersmuo	D	mm	74	74	74
Štangos:					
skersmuo	d_r	mm	42	42	42
Savitasis smūgio darbas	E_n	N/cm	280	1120	2800

Pastaba: lentelėje pateikti simboliai yra suvienodinti su ISO 22476-2:2005 standarto žymėjimu.

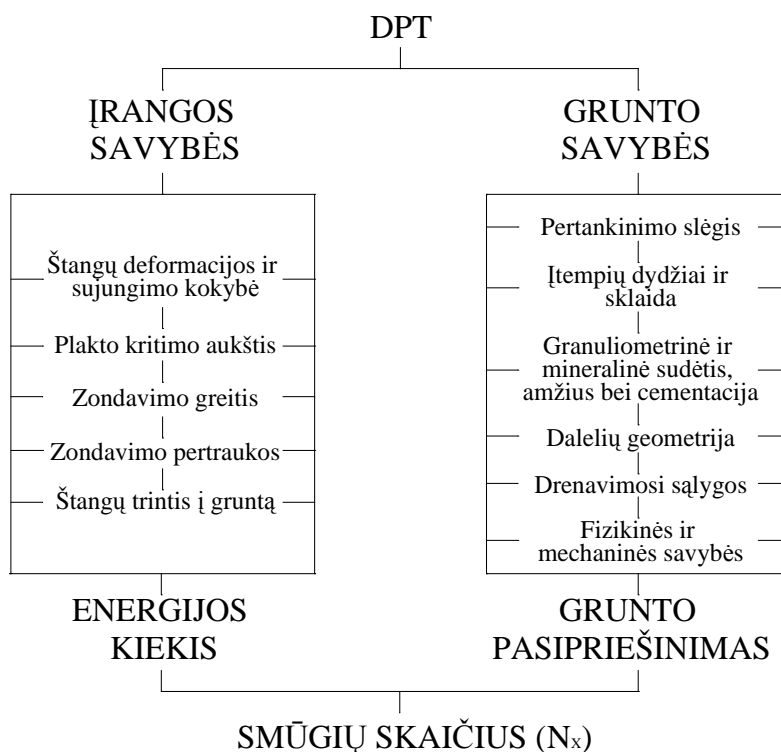
Pagal standartą GOST 19912-2001 pagrindinis dinaminio zondavimo rodiklis yra sąlyginis grunto dinaminis pasipriešinimas (p_d , MPa). Dirbant su tokiais zondais matuojamas zondo įsmigimas priklausomai nuo užsiduoto smūgių skaičiaus.

Lietuvoje dinaminis zondavimas atliekamas naudojant tiek standartu ISO 22476-2:2005, tiek standartu GOST 19912-2001 įteisiną įrangą (Žaržojus, Dundulis, 2010).

1.2.3. Dinaminio zondavimo duomenų patikimumas, energijos nuostolio ir gruntų pasipriešinimo įvertinimas

Dinaminio zondavimo metu skaičiuojamas smūgių skaičius (N_x), kuris reikalingas, kad zondas įsmigtų į nustatytą gylį. Smūgių skaičius priklauso nuo dviejų pagrindinių veiksnių – nuo naudojamos įrangos savybių ir nuo zonduojamo grunto savybių (Bondarik, 1967; Трофименков, Воробков, 1981; Рубинштейн, Кулачкин, 1984; Stefa-

noff, Sanglerat etc., 1988; Sy, 1993; Robertson, 2006; Dundulis, Žaržojus, 2008; Daniel, 2008; Žaržojus, Dundulis, 2010). Šių dviejų veiksmų sąsajos pavaizduotos schemoje (1.4 pav.).



1.4 pav. Smūgių skaičiui įtakos turintys veiksniai bei jų tarpusavio sąsajos

Atliekant dinaminį zondavimą ir po to analizuojant gautus duomenis, būtina atsižvelgti į 1.4 paveiksle išvardintus veiksmus, nes vieni jų mažina smūgių skaičių, kiti – smarkiai jį padidina. Bet koks energijos nuostolis padidina smūgių skaičių, tuo tarpu grunto granulimetrinė sudėtis, dalelių geometrija ar jo apvandeninimas gali turėti skirtingos įtakos smūgių skaičiui.

Kad visi aukščiau minėti veiksniai turėtų kuo mažiau įtakos smūgių skaičiaus iškreipimui, siūloma imtis papildomų techninių priemonių, kurios sumažintų (ar visiškai panaikintų) grunto ir zondavimo štangų tarpusavio trintį, padėtų išlaikyti zondo vertikalumą, užtikrintų vienodą plakto kritimo aukštį ir kt. (Stefanoff, Sanglerat etc., 1988). Visos šios priemonės gali sumažinti energijos nuostolius, tačiau zonduojamo sluoksnio apvandeninimo, grūdelių formos ar rūšiuotumo pakeisti negalima, todėl visada zondavimo duomenis reikia analizuoti labai atsargiai.

Priklausomai nuo zondavimo metu naudojamos įrangos tipo smūgių skaičius tame pačiame grunte gali ženkliai skirtis. Šiam skirtumui panaikinti buvo pasiūlyta N_x vertes perskaičiuoti į dinaminės smigos (q_d , MPa (ISO)) arba į sąlyginio grunto dina-

minio pasipriešinimo (p_d , MPa (GOST)) vertes. Jų skaičiavimams naudojamos „kali-
mo“ arba dinaminės formulės, kurios yra parašytos remiantis Niutono ir Huko dė-
sniais, jas papildant empiriniais arba teoriniais energijos nuostolio koeficientais. Kali-
mo formulės dažniausiai taikomos kaltinių polių laikomajai gebai nustatyti. Vienas
pirmųjų energijos perdavimą į kalamąjį polių 1948 m. aprašė Taylor‘as (Poulos, Davis,
1980). Taylor‘o sprendinys susideda iš pradinės energijos (E_1 , kJ) (formulė (1.1)),
pasiekiančios smūgiuojamą kūną, ir energijos kiekio (E_2 , kJ) (formulė(1.2)), likusio
po smūgio. Šių energijų santykis nusako smūgio efektyvumą (e_{iv}) (formulė (1.3)).

$$E_1 = e_f \cdot W \cdot H = \frac{W \cdot v^2}{2 \cdot g}; \quad (1.1)$$

$$E_2 = e_f \cdot e_{iv} \cdot W \cdot H; \quad (1.2)$$

$$e_{iv} = \frac{W + n^2 \cdot W_p}{W + W_p} = \frac{E_2}{E_1}; \quad (1.3)$$

čia e_f – plakto efektyvumo rodiklis, vnt.d.; W – plakto svoris, kN; W_p – polio (zondo
svoris), kN; H – plakto kritimo aukštis, m; v – plakto greitis prieš smūgį, m/s; n –
tamprumo koeficientas, vnt.d; g – laisvo kūno kritimo pagreitis, m/s².

Pateikta skaičiavimo metodika, kuri paremta Niutono impulso teorija, yra ne-
tikslė. Ji teisinga tik tuomet, kai kūnas yra neapribotas. Energijos perdavimo sprendi-
nyje neįvertinti ir dinaminiai procesai, kurie vyksta smūgio metu (Terzaghi, Peck etc.,
1996).

Deja, Taylor‘o sprendinys sunkiai pritaikomas praktikoje, nes jame yra daug
nežinomųjų ir sunku nustatyti jų tikslias vertes. Praktiniam naudojimui skirtingų for-
mulių autoriai supaprastino aukščiau minėtą sprendinį ir pateikė savas versijas (1.4
lentelė).

Dinaminę kūgio smigą (q_d , MPa) standarte ISO 22476-2:2005 siūloma apskai-
čiuoti pagal formulę (1.4), kuri atitinka Eytelwein (Dutch) polių kalimo formulę (žr.
1.4 lentelę). Formulėje (1.4) gauta pasipriešinimo jėga (R_u) yra padalinta iš kūgio plo-
to:

$$q_d = \frac{E}{A \cdot e} \cdot \left(\frac{m}{m + m'} \right), \quad (1.4)$$

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

1.4 lentelė. Kalimo formulių suvestinė lentelė (Poulos, Davis, 1980)

Formulės pavadinimas	Dinaminė laikomoji geba R_u , kN
Sanders	$\frac{W \cdot H}{S}$
Engineering News	$\frac{W \cdot H}{S + C}$
Eytelwein (Dutch)	$\frac{W \cdot H}{S} \cdot \frac{W}{W + W_p}$
Weisbach	$\frac{S \cdot A \cdot E_p}{L} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot W \cdot H \cdot A \cdot E_p}{L} \right) + \left(\frac{S \cdot A \cdot E_p}{L} \right)^2}$
Hiley	$\frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \frac{1}{2}(C_1 + C_2 + C_3)} \cdot \frac{W + n^2 \cdot W_p}{W + W_p}$
Janbu	$\left(\frac{1}{k_u} \right) \cdot \left(\frac{W \cdot H}{S} \right)$
Danish	$\frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \left(\frac{2 \cdot e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{A \cdot E_p} \right)^{\frac{1}{2}}}$
Gates	$4,0 \cdot \sqrt{e_f \cdot W \cdot H \cdot \log_{10}} \cdot \left(\frac{25}{S} \right)$

Rodikliai: S – polio (zondo) įsmigimas nuo vieno smūgio; C , C_1 , C_2 , C_3 , k_u – amortizacija; A – polio (zondo) skerspjūvio plotas; L – polio (zondo) ilgis; E_p – polio (zondo) tamprumo modulis; kiti rodikliai paaiškinti prie formulių (1.1)–(1.3) aprašymo.

Literatūroje pateikti duomenys apie Eytelwein (Dutch) formulės duomenų patikimumą rodo, kad pagal ją skaičiuojant gaunami labai netikslūs rezultatai (Poulos, Davis, 1980; Terzaghi, Peck etc., 1996).

Buvusioje Tarybų Sąjungoje ir dabartinės NVS šalyse skaičiuojamas savitasis dinaminis grunto pasipriešinimas (p_d , MPa). Lygtys, reikalingos šiam rodikliui apskaičiuoti, išvestos iš tų pačių kanoninių Niutono dėsnų naudojant aukščiau aprašytą

Taylor'o sprendinį (formulės (1.1)–(1.3)). Standarte GOST 19912-2001 pateikta tokia (p_d) apskaičiavimo formulė:

$$p_d = \frac{A \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot n}{h}, \quad (1.5)$$

čia A – savitoji zondavimo energija, N/cm; K_1 – plakto efektyvumas; K_2 – energijos nuostolio koeficientas dėl štangų šoninės trinties į gruntus; n – numatytas smūgių skaičius, vnt.d.; h – zondo įsmigimas nuo užsiduoto smūgių skaičiaus, cm.

Formulės (1.5) koeficientai pateikti standarto GOST 19912-2001 lentelėse, kurios sudarytos pagal daugelio mokslininkų pasiūlytas įvairias koeficientų vertes ir jų nustatymo lygtis (Bondarik, 1967; Солодухин, 1975; Трофименков, Воробков, 1981; Рубинштейн, Кулачкин, 1984; Грязнов, 1984).

Buvusioje Tarybų Sąjungoje buvo siūloma savitąjį dinaminį pasipriešinimą (p_d) skaičiuoti pagal N. M. Gersevanov'o kalimo formulę (Солодухин, 1975):

$$p_d = \frac{n \cdot \omega}{2} + \sqrt{\left(\frac{n \cdot \omega}{2}\right)^2 + \frac{k}{h} \cdot \left(n \cdot \omega \cdot Q \cdot H \cdot \frac{Q + l^2 \cdot q}{Q + q}\right)}, \quad (1.6)$$

čia ω – kūgio skerspjuvio plotas, cm²; Q – plakto masė, kg; q – zondo masė, kg; H – plakto kritimo aukštis, cm; k – užsiduotas smūgių skaičius, vnt.d.; h – zondo įsmigimas nuo užsiduoto smūgių skaičiaus, cm; n – koeficientas, kuris priklauso nuo zondo medžiagos, smūgio perdavimo sąlygų ir kt.; l – smūgio atsistatymo koeficientas ($l = 0,3$).

Be jau paminėtų formulių, buvusioje Tarybų Sąjungoje buvo išvesta arba panaudotos vakarų autorių ir daugiau formulių, kurios pateiktos 1.5 lentelėje.

„Kieto kūno“ mechanikos teorija neleidžia tiksliai analizuoti energijos perdavimo dinaminio zondavimo metu, todėl dinaminės kūgio smigos (q_d) ar savitojo dinaminio grunto pasipriešinimo (p_d) vertės netenka prasmės. Plakto perduotos energijos kiekiui įvertinti galima taikyti bangų teoriją.

1.5 lentelė. Buvusioje Tarybų Sąjungoje naudotos kalimo formulės (Солодужин, 1975)

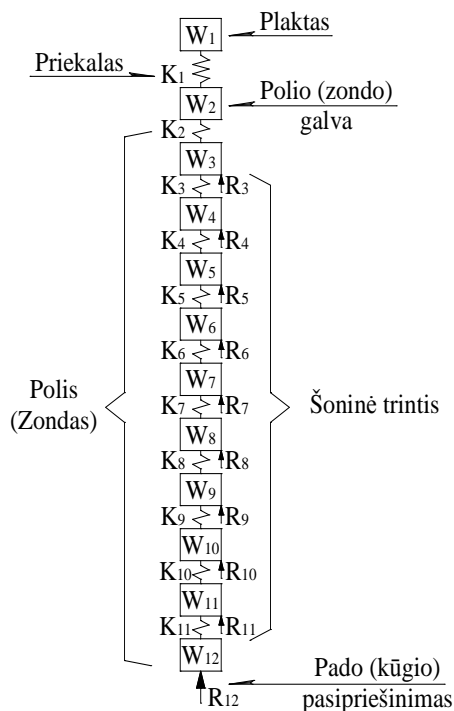
Formulės autorius ir metai	Savitojo dinaminio grunto pasipriešinimo (p_d) skaičiavimo formulė
R. Haefeli etc., 1951	$A + \frac{q + Q}{\omega}$
E. Paprot, 1943	$\alpha \cdot A + \frac{q + Q}{\omega}$
G. K. Bondarik, 1964	$\alpha \cdot A + \frac{q + Q}{\omega}$
A. J. Rubinštein, 1969	$\alpha \cdot A - F - P_{byt}$
V. A. Durante	$\sqrt{130^2 + 260 \cdot \alpha \cdot A} - 130$
S. A. Šaškov, 1960	$\sqrt{121 + 22 \cdot \alpha \cdot A} - 11$

Rodikliai: A – savitasis zondavimo darbas; α – energijos nuostolio koeficientas; F – zondo šoninės trinties jėga; P_{byt} – geostatinis slėgis; N – koreguota smūgių skaičius į 10 cm; h – zondo įsmigimas smūgių skaičiaus serijoje.

Vienmatės bangos sklidimo tampriu prizminiu strypu po standaus kūno smūgio teorija pradėta vystyti jau daugiau kaip prieš amžių (Peck, Hanson etc., 1974). Panašiu metu ši teorija buvo pradėta diegti ir kaltinių polių statybos bei projektavimo darbuose (Chen, Wang, 2003). Geoteknikoje šios teorijos sprendiniai yra supaprastinami, kad juos būtų galima pritaikyti praktikoje. S. Timoshenko ir J. N. Goodier (1951) aprašė ir supaprastino bangos sklidimo teoriją: 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 ramybės būsenoje, neveikiama kompresinių įtempių (Timoshenko, Goodier, 1951). Pirmąjį ir iki šių dienų tebenaudojamą supaprastintą skaičiavimo algoritmą sukūrė E. A. L. Smith'as (1960), kuris davė pagrindą geoteknikoje plačiai vystyti šiai teorijai. Jo skaičiavimas grindžiamas baigtinių skirtumų metodu. Naudojant bangų teorijos formules, pagal pasirinktą apkrovą galima apskaičiuoti polio deformacijas ir laikomąją gebą. Tokiais atvejais polis yra idealizuojamas, suskaidant jį į svorių ir spyruoklių elementus (1.5 pav.) (Smith, 1960).

Dinaminio zondavimo metu vykstantis energijos perdavimas yra mažai nagrinėtas. Pagrindinė medžiaga dinaminės sistemos analizei yra polių kalimo dinamika ir standartinio zondavimo (SPT) proceso analizė. Tačiau, kaip jau buvo minėta, energijos sklaidos modeliai tinka daugeliui dinaminėms sistemoms. Standartinio zondavimo analizė bangų sklidimo teorijos požiūriu buvo pradėta nagrinėti vadovaujantis polių dinamikos modeliais (Shmertmann, Palacios, 1979; Sy, Campanella, 1991; Sy, 1993;

Odebrecht, 2003). Dinaminio zondavimo metu vykstantį procesą galima aprašyti to-
mis pačiomis matematinėmis išraiškomis (Savidis, Müller, 2007).



1.5 pav. E. A. L. Smith'o pasiūlytas dinaminės sistemos skaičiavimo modelis (Smith, 1960)

Plakto į zondą perduodamos energijos kiekį siūloma apskaičiuoti pagal darbo-
energijos teoremos formules (Shmertmann, Palacios, 1979; Sy, Campanella, 1991;
Morgano, Liang, 1992; Goble, Abou-matar, 1992; Abou-matar, Goble, 1997):

$$E = \frac{c}{E_Y \cdot A} \cdot \int_0^{\frac{2L}{c}} F^2(t) \cdot dt ; \quad (1.7)$$

$$E = \int_0^{t_{\max}} F(t) \cdot v(t) \cdot dt ; \quad (1.8)$$

čia E – energija, kJ; E_Y – zondo ir Young'o modulis, MPa; A – zondavimo štangų
skerspjūvio plotas, m^2 ; c – bangos sklidimo greitis, m/s; L – zondavimo štangų
ilgis, m; t – laikas, s; F – perduota jėga, kN.

Energijos skaičiavimo formulė (1.7) yra gauta iš formulės (1.8) priimant, kad
jėga ir greitis yra proporcingi. Jei ši sąlyga pažeidžiama, skaičiavimas tampa nekorek-

tiškas. Formulė (1.8) energijos dydį leidžia įvertinti esant skirtingiems greičiams ir jėgoms (Abou-matar, Goble, 1997). Standarte ISO 22476-2:2005 energijos kiekiui nustatyti siūloma naudoti formulę (1.8).

1.2.4. Dinaminio zondavimo rodiklių sąsajos su gruntų fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis

Dinaminio zondavimo duomenų naudojimas vertinant gruntų fizikines ir mechanines savybes yra komplikuotas dėl kelių priežasčių: esant skirtingiems zondų tipams, reikalingos skirtingos koreliacinės priklausomybės; dėl zondo trinties į gruntus iškreipiami rezultatai, kurie mažina skaičiavimams naudojamų formulių patikimumą; reikalingos skirtingos formulės gruntų savybėms virš ir po gruntiniu vandeniu (ypač puriuose rupiuose gruntuose) įvertinti ir kt. Bendrų, pasaulyje priimtų koreliacinių priklausomybių tarp DPT rodiklių ir grunto savybių rodiklių nėra. Europos standarte (EN 1997-2:2007) yra pateikta tik kelios pavyzdinės lygtys grunto santykiniam tankumui (I_D) ir tamprumo koeficientui (ν) nustatyti.

Tarp grunto santykinio tankumo rodiklio (I_D) ir zondavimo metu gauto smūgių skaičiaus (N_x) yra logaritminė priklausomybė:

$$I_D = a \cdot \log(N_x) \pm b, \quad (1.9)$$

čia a ir b – lygties konstantos, kurių vertės priklauso nuo zondo tipo, zonduojamo rūšaus grunto rūšiuotumo, granulimetrinės sudėties, gruntinio vandens lygio.

Eurokode 7 (EN 1997-2:2007) I_D skaičiavimo lygtys pateiktos tik DPL ir DPH tipo zondams. Pagal šio rodiklio vertes rupius gruntus galima skaidyti į purius ($I_D < 35\%$), vidutinio tankumo ($35\% < I_D < 65\%$) ir tankius ($I_D > 65\%$).

Melzer (1967), atlikęs tyrimus su DPL zonu, nustatė, kad santykinis tankumo rodiklis (I_D) priklauso nuo geostatinio slėgio (Melzer, 1967):

$$I_D = a \cdot \log(N_{10}) - c \cdot \gamma \cdot z + b, \quad (1.10)$$

čia a , b ir c – lygties (1.10) konstantos; γ – grunto savitasis sunkis, kN/m^3 ; z – gylis skaičiavimo taške, m.

Kitas gruntų tankumą apibūdinantis rodiklis yra D_R – tankumo rodiklis (DIN 4094; Savidis, Müller, 2007). Skirtumas tarp santykinio tankumo rodiklio (I_D) ir tankumo rodiklio (D_R) yra tas, kad I_D vertės priklauso nuo poringumo koeficientų (e , e_{max} , e_{min}), o D_R vertės – nuo poringumo rodiklių (n , n_{max} , n_{min}) verčių. Kadangi tiek poringumo koeficientai, tiek poringumo rodikliai tarpusavyje susiję, D_R apskaičiavimo formulė analogiška I_D apskaičiavimo formulei (1.9), tik skiriasi konstantų a ir b vertės.

Buvusios Tarybų Sąjungos mokslininkų paskelbtose publikacijose gruntų tankumas pagal dinaminio zondavimo duomenis vertinamas labai įvairiai. Vieni autoriai gruntų tankumą siūlo vertinti atsižvelgiant į smūgių skaičių (N_x), kiti – atsižvelgiant į savitojo dinaminio pasipriešinimo (p_d) vertes (Бондарик, Комаров etc. 1967; Bondarik, 1967; Сугакевич, 1969; Солодухин, 1975; Трофименков, Воробков, 1981; Грязнов, 1984).

Smulkių gruntų konsistencijos ribų nustatymas pagal DPT tyrimo rezultatus Europos normose (EN 1997-2:2007) neaprašytas. Čia nesiūloma zonuoti smulkių gruntų dinaminio zonu, todėl rezultatų sąsajos su kitomis gruntų fizikinėmis savybėmis taip pat neaprašomos.

Buvusioje Tarybų Sąjungoje pagal dinaminio zondavimo duomenis (netiesioginį rodiklį p_d) buvo vertinamos smulkių gruntų fizikinės savybės: takumo rodiklis (I_L), plastingumo rodiklis (I_P) ir gamtinis drėgnis (w) (Bondarik, 1967; Бондарик, Комаров etc, 1967; BSSR RSN 62-87).

Gruntų mechaninių savybių įvertinimas pagal dinaminio zondavimo duomenis leidžia nustatyti deformacijos modulio (E_{oed} ir E), vidinės trinties kampo (φ) ir sankibos (c) vertes. Pagal „Eurocode 7“ pateiktą pavyzdį iš DPT duomenų (N_x) galima nustatyti tamprumo koeficientą (ν), kuris naudojamas apskaičiuojant E_{oed} . Tamprumo koeficiento (ν) priklausomybė nuo smūgių skaičiaus (N_x) gali būti logaritminė (formulė (1.11)), kai tyrinėjami rupūs gruntai, ir tiesinė (formulė (1.12)), kai tyrinėjami smulkūs gruntai (EN 1997-2:2007).

Melzer'is (1967) nagrinėjo DPL zondo sąryšį su tamprumo koeficientu. Jis nustatė, kad rupiuose gruntuose reikia atsižvelgti į geostatinio slėgio įtaką zondavimo duomenims. Tokiais atvejais, skaičiuojant ν vertes, logaritminė lygtis papildoma geostatinio vertikaliu slėgiu (Melzer, 1967):

$$v = a \cdot \log(N_{10}) + b; \quad (1.11)$$

$$v = a \cdot N_{10} + b; \quad (1.12)$$

$$v = a \cdot \log(N_{10}) - c \cdot \gamma \cdot z + b; \quad (1.13)$$

čia a , b , c – sąlygų koeficientai, kurie apibūdinti prie formulių (1.9) ir (1.10).

Vidinės trinties kampas (φ) iš DPT duomenų tiesiogiai nenustatomas. Normose EN 1997-2:2007 pateiktas ryšys tarp I_D ir φ , kur I_D nustatomas pagal N_x (žr. formulę (1.9)). Sankiba (c) iš DPT duomenų taip pat nenustatoma (EN 1997-2:2007; Savidis, Müller, 2007).

Anuometinėje tarybinėje literatūroje yra pateikti tiesioginiai deformacijos modulio (E) skaičiavimai pagal DPT duomenis. Šioje srityje daug dirbo V. Durante, M. Chazanov'as, G. Bondarik'as, M. Troickaja, S. Šaškov'as. Šie mokslininkai pateikė tiesines deformacijų modulio skaičiavimo lygtis, kuriose yra naudojamos smūgių skaičiaus (N_x) ar dinaminio gruntų pasipriešinimo (p_d) vertės (Bondarik, 1967; Бондарик, Комаров etc, 1967; Солодухин, 1975; Трофименков, Воробков, 1981; Грязнов, 1984).

Vidinės trinties kampas (φ) ir sankiba (c) buvusioje Tarybų Sąjungoje buvo nustatoma pagal DPT duomenis. Šių rodiklių įvertinimui buvo sudarytos skaičiavimo lentelės, pagal kurias c ir φ buvo nustatoma pagal N_x arba p_d vertes (Солодухин, 1975; Трофименков, Воробков, 1981).

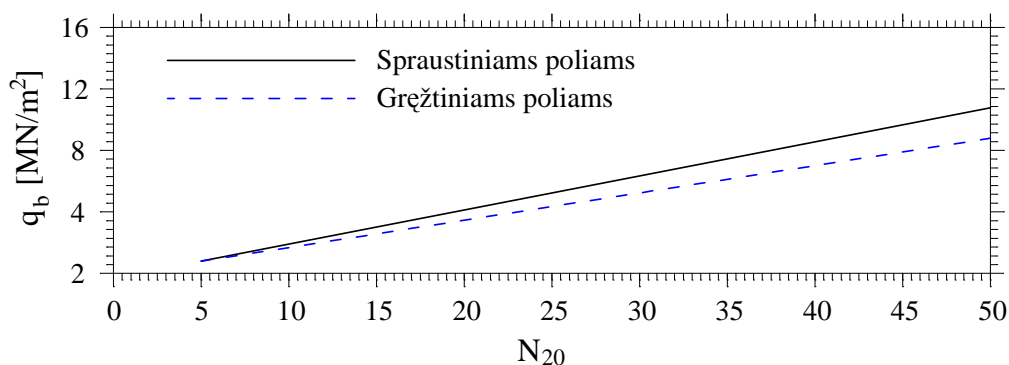
1.2.5. Dinaminio zondavimo duomenų naudojimas projektuojant pamatus

Dinaminio zondavimo metu gauti duomenys projektuojant pamatus naudojami retai. Dažniausiai visos naudojamos skaičiavimo metodikos yra vietinės ar regioninės reikšmės. Normose EN 1997-2:2007 nepateikiama pamatų projektavimo pagal tiesioginius DPT duomenis pavyzdžių. Projektuojant sekliuosius pamatus, naudojami E_{oed} ir I_D , φ rodikliai, kurie gali būti nustatyti tiesiogiai iš DPT duomenų.

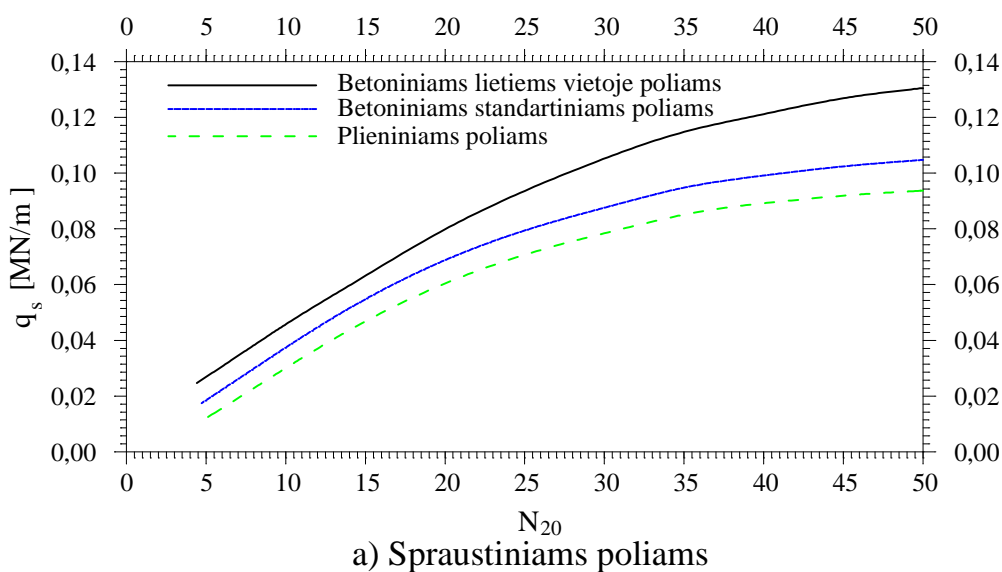
Polinių pamatų projektavimas pagal DPT duomenis yra retas, tačiau Suomijoje, Lenkijoje, Švedijoje ir Jungtinėje Karalystėje DPT duomenys polinių pamatų skai-

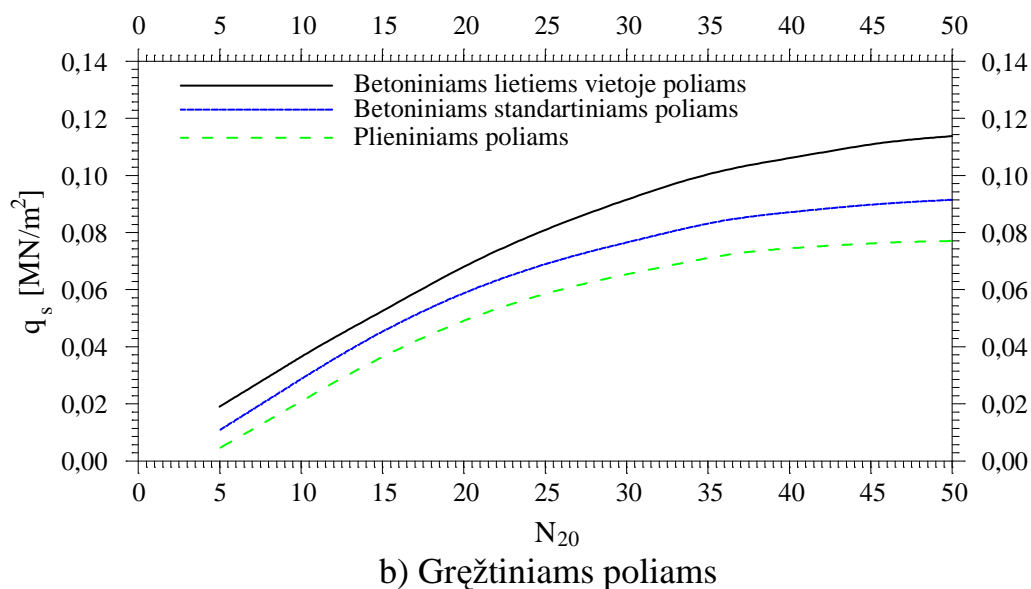
čiavimams naudojami pakankamai dažnai, kiek rečiau tai daroma Prancūzijoje, Belgijoje, Airijoje (Mandolini, 1999).

Suomijoje, skaičiuojant atskiro polio laikomąją gebą pagal DPT duomenis, N_x vertės imamos $5D$ į viršų nuo polio pado ir $3D$ į apačią (D – polio skersmuo). Ribiniai polio pado ir kamieno savitieji stipriai (atitinkamai q_b ir q_s) nustatomi atsižvelgiant į vidutinę N_{20} vertę (1.6 ir 1.7 pav.) (Holm, 1993; Heinonen, Hartikainen etc., 1997; FinnRA, 2000).



1.6 pav. Polio pado savitojo stiprio (q_b) nustatymas pagal dinaminio zondavimo duomenis (Heinonen, Hartikainen etc. 1997)





1.7 pav. Polio kamieno savitojo stiprio (q_s) nustatymas pagal dinaminio zondavimo duomenis: a) spraustiniams polioms; b) gręžtiniams polioms (Heinonen, Hartikainen etc. 1997)

Lenkijoje dinaminio zondavimo metu gautas N_x skaičiavimuose nenaudojamas. Čia rupiuose gruntuose polio pado ir šoninio paviršiaus savitieji stipriai (atitinkamai q_b ir q_s) nustatomi naudojantis santykinio tankumo rodiklio (I_D) vertėmis. Taip pat pagal I_D vertes yra nustatomi ir tam tikri skaičiavimui reikalingi koeficientai (S_p , S_s , S_i^w) (Gwizdala, 1997).

Švedijoje polio ribinė laikomoji geba (Q_f) dažnai nustatoma pagal SPT bandymo duomenis (formulė (1.14)). Ši metodika tinka polio laikomajai gebai nustatyti pagal dinaminio zondavimo duomenis, kai N_{SPT} (arba N_{30t} ir N_{30s}) yra tiesiogiai prilyginama N_{20} atsižvelgiant į mažesnę kalimo energiją (Svensson etc., 1997):

$$Q_f = 400 \cdot N_{30t} \cdot A_t + 2 \cdot N_{30s} \cdot A_s, \quad (1.14)$$

čia N_{30t} – smūgių skaičius polio pade; N_{30s} – vidutinis smūgių skaičius išilgai polio kamieno; A_t ir A_s – polio pado ir kamieno plotai, m^2 .

Didžiojoje Britanijoje, kai zonduojami tankūs žvyringi smėliai ir moreninės nuogulos, dažnai prie SPT gruntotraukio prisukamas 60° kūgis, kuriuo zonduojama. Toks zondavimo metodas pagal savo įrangos charakteristikas yra artimas DPSH zon-

dui. Smūgių skaičius (N) yra prilyginamas N_{SPT} ir tuomet taikoma ta pati skaičiavimo metodika kaip ir pagal SPT (Findlay etc., 1997).

Baltarusijos Respublikoje pamatai gali būti projektuojami pagal dinaminio zondavimo duomenis naudojant dinaminio stiprio (p_d , MPa) vertes. Šios šalies statybinėse normose (BSSR RSN 62-87, 1987) pateiktas skaičiavimas sekliams ir poliiniams pamatams. Projektuojant sekliuosius pamatus, naudojamas skaičiuojamasis pagrindo stipris (R_o , MPa), kuris nustatomas priklausomai nuo p_d verčių ir pateikiamas standarto lentelėse. Polinių pamatų pagrindo laikomoji geba apskaičiuojama pagal klasikinę formulę:

$$F_u = R_s \cdot A + f_s \cdot l \cdot u, \quad (1.15)$$

čia F_u – polio laikomoji geba, MN; R_s – ribinis grunto stipris polio pade, MPa; A – polio pagrindo plotas, m²; f_s – vidutinis grunto stipris prie polio kamieno, MPa; l – polio ilgis grunte, m; u – polio skerspjūvio perimetras, m.

Ribinis grunto stipris polio pade (R_s) ir prie polio kamieno (f_s) gali būti nustatomas pagal sąlyginio dinaminio pasipriešinimo (p_d) vertes (BSSR RSN 62-87, 1987).

1.3. Gruntų bandymai statiniu zondavimu (CPT, CPTu)

1.3.1. Statinio zondavimo metodo raida

Statinis zondavimas labai plačiai naudojamas grunto tyrimuose lauko sąlygomis. Šio zondo naudojimo istorija prasidėjo 1917 m. ir 1927 m., kai Švedijos ir Danijos geležinkelio kompanijos atliko bandymus zonuoti silpnus gruntus naudojant statinę jėgą išspaudžiamus strypus. Pirmasis mechaninis statinis zondas buvo sukurtas Olandijoje 1932 m. Šio zondo autorius – inžinierius P. Barentsen'as. Zondą sudarė 19,0 mm dujotiekio vamzdis, kurio viduje buvo 15,0 mm skersmens plieninis strypas, galėjęs judėti aukštyn ir žemyn. Apatinėje metalinio strypo dalyje buvo pritvirtintas 10,0 cm² ir 60° kampo metalinis kūgis. 1953 m. Begemann'as prie zondo primontavo movą, kuri leido nustatyti šoninės trinties dydį. 1965 m. kompanija „Fugro“ kartu su Olandijos valstybiniu tyrinėjimo institutu (TNO) sukonstravo elektrinį statinį zondą, kurio geometrija yra standartizuota. Norvegijos geotechnikos institutas 1974 m. pademonstravo

tradicinį statinį zondą su porinio slėgio matuokliais (Broms, Flodin, 1988; Terzaghi, Peck, 1996; Lunne etc., 1997, Robertson, 2006).

Pastaraisiais dešimtmečiais statinio zondavimo technika labai smarkiai tobulėjo, atsirado tikslesnių priklausomybių duomenims interpretuoti. Į patį zondą buvo įdiegtas temperatūros matuoklis, įtempių matavimo kamera, vibratorius, radioizotopų detektorius, įvairūs dielektrikai ir įvairūs kiti papildomi matuokliai (Jamiolkowski, 1995; Been, Quinonez etc., 2010; Ramsey, 2010).

1.3.2. Statinių zondų tipai ir zondo elgsena grunte

Statinio zondavimo metu 60° kūgis yra spaudžiamas į gruntą pastoviu 20 mm/s greičiu. Standartinio kūgio skerspjūvio plotas yra 10 cm^2 (jei reikia, kartais naudojami 15 cm^2 skerspjūvio kūgiai). Nors statinio zondavimo įranga standartizuota, tačiau tarp atskirų zondų yra tam tikrų skirtumų ir priklausomai nuo to jie skirstomi į tris tipus (ISO 22476-1:2005; De Beer, Goelen etc., 1988; Lunne, Powell etc., 1997; Mayne, 2007; Schnaid, 2009):

mechaninis zondas (CPT) – zondavimo duomenys matuojami žemės paviršiuje, registruojant jėgą (Q_c), reikalingą zondui smigti ir trinčiai nugalėti (F_s). Kūgio spraudos (q_c) ir šoninės trinties (f_s) vertės gaunamos užregistruotą jėgą padalijus atitinkamai iš kūgio ir movos plotų. Šiuo atveju f_s yra suminė per visą zondavimo gylį;

elektrinis zondas (CPT) – zondavimo duomenys matuojami zonde įmontuotose elektrinėse celėse. Matuojama kūgio sprauda (q_c) ir lokali šoninė trintis (f_s);

piezo zondas (CPTu) – tai elektrinis zondas su įmontuotais porinio slėgio matuokliais. Zondavimo metu matuojami trys rodikliai: q_c , f_s ir porinis slėgis (u);

seisminis zondas (SCPTu) – tai elektrinis zondas su įmontuotu seisminiu registru. Juo galima matuoti q_c , f_s , u bei registruoti seismines bangas S ir P .

Iš minėtų zondų tipų šiuo metu daugiausia naudojami elektriniai zondai su ir be porinio slėgio matuoklių. Mechaninio zondo dėl duomenų nepatikimumo (ypač silpnuose gruntuose) pamažu atsisakoma. Zondai su seisminiais bangų S ir P rodiklių registras pastaraisiais metais atliekant inžinerinius geologinius tyrimus taikomi vis dažniau.

Zondui smingant, po kūgiu ir šalia jo vyksta grunto suardymas, perstūmimas ir tankinimas. Šis procesas makromastelyje yra artimas spraustinių polių įgilinimo metu vykstančiam grunto performavimui (Žaržojus, Kairys etc., 2007). Apibendrintas

ir supaprastintas grunto deformacijų ir poslinkių modelis zondo smigimo metu yra toks: gruntas, išspauštas iš po zondo, slegia gruntą, esantį prie pat zondo sienelių, perstumia jį nedideliu atstumu ir tuo pat metu traukia žemyn. Vertikalių deformacijų zona – tai šlyties zona. Atroji, horizontalių poslinkių zona, – grunto gniuždymo (slėgimo) zona (Bondarik, 1967; Грязнов, 1984; Kairys, Žaržojus etc., 2007).

Mokslininkų, ypač A. Vesic'iaus, atlikti tyrimai parodė, kad grunto ardymas zondo smigimo metu vyksta dėl šlyties ir gniuždymo. Spaudžiant į gruntą mažiau kaip 30° kampo kūgį, gruntas ardomas jį perstumiant į šonus. Kai kūgio kampas 90° ir didesnis, gruntas spaudžiamas po kūgiu. Pirmuoju atveju, kai kampas smailas, grunto pasipriešinimas zondo smigimui vertinamas pagal šlyties procesą, t.y. pagal vidinės trinties kampą (φ , °) ir sankibą (c , kPa). Antruoju atveju, kai kampas yra 90° ir didesnis, grunto pasipriešinimas zondavimui vertinamas pagal gniuždymo procesą, t.y. pagal Jungo modulį (E_Y , MN/m², MPa) ir Puasono koeficientą (ν). Kai kūgio kampas yra tarp 30° ir 90°, grunto priešinimasis zondo smigimui priklauso tiek nuo stipruminių (φ , c), tiek nuo deformacinių (E_Y , ν) savybių (Трофименков, Воробков, 1981). Kadangi statinio zondo kūgio kampas yra 60°, todėl zondavimo metu q_c vertės priklauso nuo visų aukščiau išvardintų grunto mechaninių savybių:

$$q_c = f(E_Y, \nu, \varphi, c). \quad (1.16)$$

Grunto savybių nustatymas pagal CPT ar CPTu duomenis gali būti atliekamas taikant tiek empirinius, tiek teorinius–analitinius sprendinius. Tinkamas analitinių sprendinių parinkimas leidžia tiksliau įvertinti grunto mechanines savybes. Plačiau-siai naudojami šie teoriniai smingančio zondo ir grunto elgsenos modeliai (Yu, 2006):

- laikomosios gebos modelis (BCM);
- deformuojamo kūno mechanikos modelis (CEM);
- deformacijų trajektorijos modelis (SPM);
- baigtinių elementų modelis (FEM).

Zondo ir smulkaus grunto nedrenuotose sąlygose sistemos analitinei analizei gali būti naudojamas kiekvienas iš pateiktų modelių atskirai, tačiau geresni rezultatai gaunami, kai sistema nagrinėjama sujungus tam tikrus modelius į grupes: SPM–FEM, CEM–SPM, CEM–FEM, CEM–BCM (Yu, 2006; Sagaseta, Houlsby, 1992; Houlsby, 1990; Teh, Houlsby, 1988).

Rupūs gruntai zondavimo metu (šlytis vyksta drenuotose sąlygose) dažnai pasižymi dilatacinėmis savybėmis, dėl to jų elgsenos modelį gerokai sunkiau aprašyti, lyginant su nedrenuotais moliais. Daugelis zondavimo procesą aprašančių metodikų yra paremtos laikomosios gebos teorija (BCM) arba deformuojamo kūno mechanikos teorija (CEM). Be to, kartais naudojami baigtinių ir diskrečiųjų elementų modeliai (FEM ir DEM). Taikant aukščiau išvardintus analizės metodus, biriuose gruntuose priimama viena sąlyga: statinio zondavimo metu neatsiranda perteklinis porinis slėgis (Yu, 2006; Vesić, 1977; Salgado etc., 1997; Jiang etc., 2006).

1.3.3. Statinio zondavimo rodiklių sąsajos su gruntų fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis

Statinio zondavimo metu gautų rodiklių (q_c , f_s ir u) vertės galima tiesiogiai naudoti aprašant geologinį pjūvį, išskiriant grunto tipus, įvertinant gruntų fizikines ir mechanines savybes, projektuojant pamatus, nustatant giliųjų ir sekliųjų pamatų laikomąsias galias.

Pagal statinio zondavimo duomenis gruntų tipus galima nustatyti atsižvelgiant į gautų zondavimo rodiklių verčių dydžius ir jų santykį (R_f) bei į tam tikrus požymius (1.6 lentelė):

$$R_f = \frac{f_s}{q_c}, \quad (1.17)$$

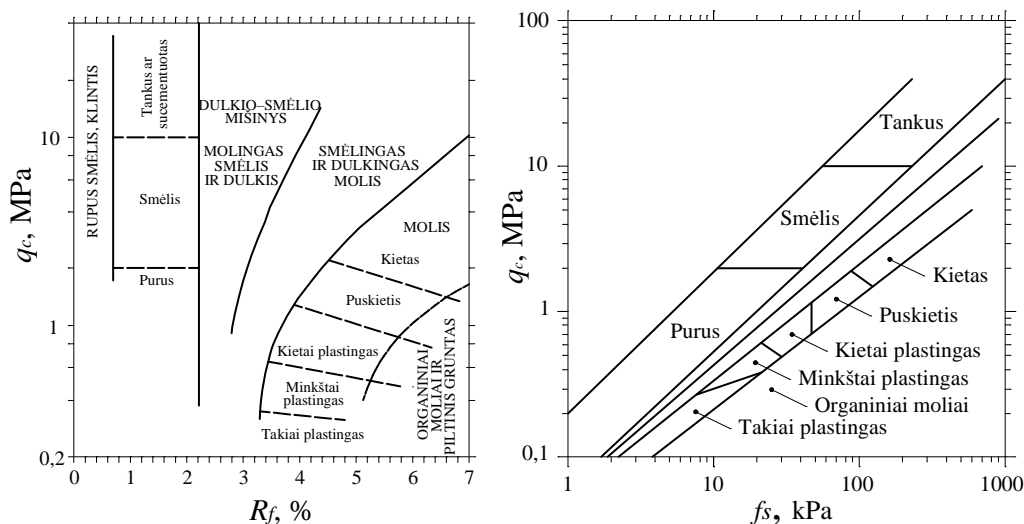
čia f_s – zondo movos trintis į gruntą, kPa; q_c – kūgio sprauda, kPa (zonduojant CPTu zonu, formulėje naudojama q_t vertė).

1.6 lentelė. Grunto tipo nustatymas pagal CPT zondavimo rodiklių vertes (Clayton etc., 1995)

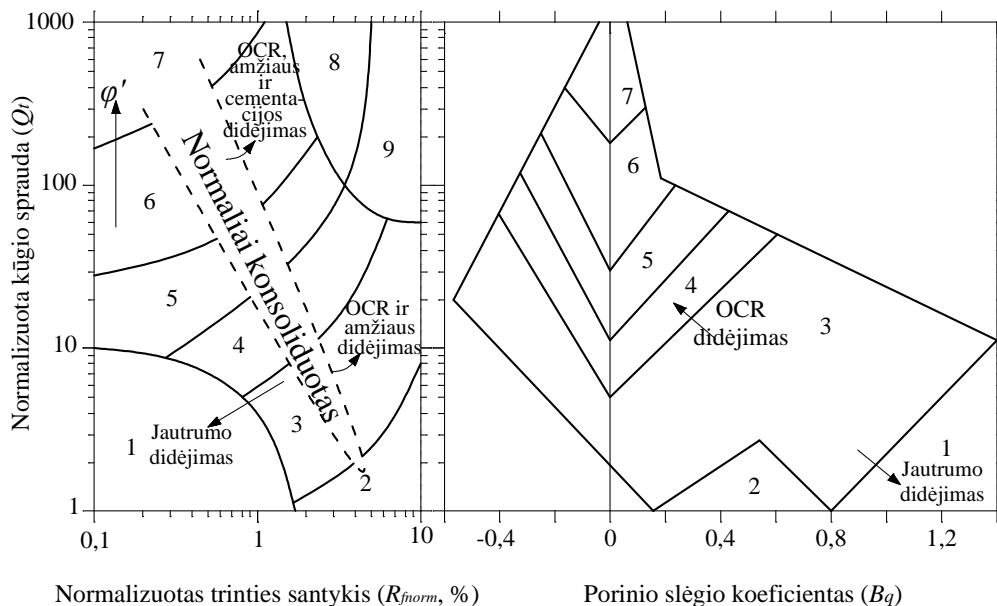
Grunto tipas	q_c vertės	R_f vertės	u vertės
Organiniai gruntai	žemos	labai aukštos	žemos
Normaliai konsoliduotas molis	žemos	aukštos	aukštos
Smėlis	aukštos	žemos	nulinė
Žvyras	labai aukštos	žemos	nulinės

Gruntų tipo išskyrimą pagal statinio zondavimo duomenis pirmasis pradėjo H. Begemann'as (1965). Vėliau tai atliko Sanglerat'as (1974), Schmertmann'as (1978),

Robertson'as (1986, 1990) ir kt. (1.8 ir 1.9 pav.) (Fellenius etc., 2000). Šiuo metu grunto tipai išskirti dažniausiai naudojama P. K. Robertson'o klasifikacija. Ši klasifikacija panaudota daugelyje programinės įrangos paketų, kurie skirti CPT ir CPTu duomenų apdorojimui.



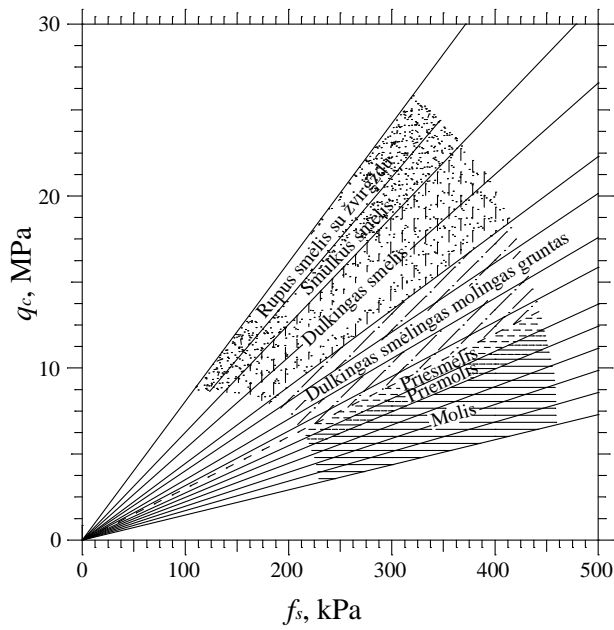
Schmertmann, 1978



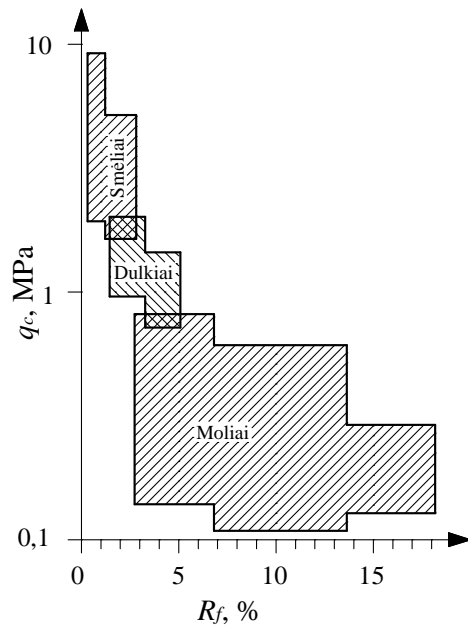
- 1. Jautrus, smulkus gruntas; 4. Dulgio mišinys; molingas dulgis; dulkingas molis; 7. Nuo žvyringo smėlio iki smėlio;
- 2. Organiniai gruntai - durpė; 5. Smėlio mišinys; dulkingas smėlis; smėlingas dulgis; 8. Nuo labai tankaus smėlio iki molingos smėlio;
- 3. Moliai ir dulkingi moliai; 6. Nuo švaraus smėlio iki dulkingo smėlio; 9. Labai kietas smulkus gruntas.

Robertson, 1990

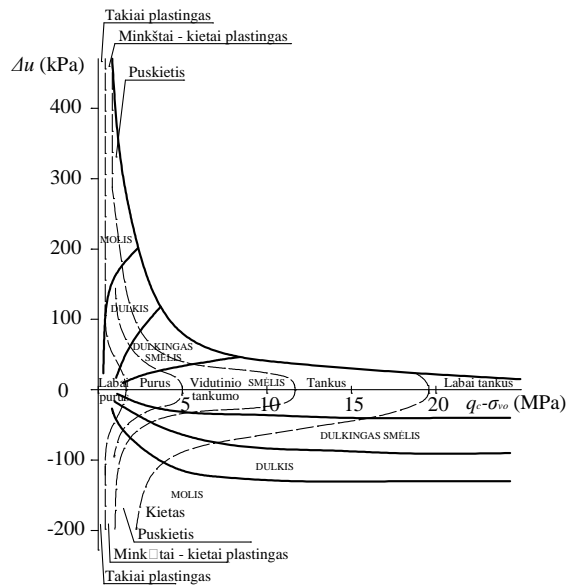
1.8 pav. Grunto klasifikacijos pagal CPT duomenis grafikai: Schmertmann'o (1978) ir Robertson'o (1990) (Fellenius etc., 2000)



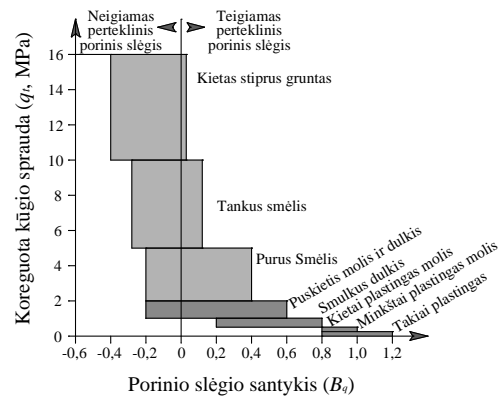
Begemann, 1965



Sanglerat et al., 1974



Jones and Rust, 1982



Senneset et al., 1989

1.9 pav. Grunto klasifikacijos pagal CPT duomenis grafikai: Begemann'o (1965), Sanglerat'o ir kt. (1974), Jones'o ir Rust'o (1982) bei Senneset'o ir kt. (1989) (Fellenius etc., 2000)

Ryšys tarp gruntų tipo ir statinio zondavimo duomenų buvo tyrinėtas ir Lietuvos teritorijos gruntuose. Apdorojus šių tyrimų duomenis, A. Brilingas pateikė savo sudarytą klasifikaciją (1.7 lentelė) (Šimkus, 1987).

1.7 lentelė. Lietuvos teritorijos gruntų klasifikacija pagal statinio zondavimo duomenis (Šimkus, 1987)

f_s/q_c	Grunto pavadinimas	q_c/f_s
<0,01	smėlis	>100
0,01–0,014	priesmėlis	100–71
0,014–0,045	priemolis	71–22
>0,045	molis	<22

Tarp mechaninių grunto savybių ir CPT kūgio spraudos (q_c) nustatytas tiesinis tarpusavio ryšys. Deformacijų modulis (E) apskaičiuojamas pagal formulę (1.18), kur koeficientas α kinta nuo 1 iki 10. Jo dydis priklauso nuo to, koku būdu jis buvo nustatytas: jei deformacijos modulio lygtis išvesta iš analitinio sprendinio, tai formulės (1.18) koeficientas α bus iki 2,5; jei tyrimuose buvo naudota laboratorinių bandymų medžiaga, koeficiento α vertės svyruos nuo 1,5 iki 7,0; jei deformacijų modulis koreliacijai su q_c buvo nustatomas štampiniais bandymais, tai α vertės bus didžiausios ir kils nuo 3 iki 10 (vidurkis – 5) (Šimkus, 1987; Трофименков, Воробков, 1981).

$$E = \alpha \cdot q_c. \quad (1.18)$$

Lietuvoje deformacijos modulio (E) ir kūgio spraudos (q_c) koreliacinė analizė buvo atliekama naudojant lauko štampos duomenis. Šioje srityje dirbo A. Brilingas, H. Valiulis, V. Ignatavičius ir kt. Jų nustatytos regresinės lygtys yra tiesinės ir atitinka pasaulinių tyrimų duomenis (žr. formulę (1.18)). Tik vertinat deformacijų modulį rūpiuose gruntuose, kai $q_c > 5,0$ MPa, priklausomybė yra laipsninė (žr. formulę (1.19)). Kadangi tyrimuose naudoti bandymo štampos duomenys, koeficiento α vertės yra sąlyginai aukštos – 7–8 (Šimkus, 1987).

$$E = 7,8 \cdot q_c^{0,71}. \quad (1.19)$$

Analitiniai sprendiniai rodo, kad kūgio sprauda (q_c) yra kerpamojo stiprio (c_u) ir pertankinimo slėgio funkcija (σ_o), todėl nedrenuotas kepamasis stipris smulkiuose

gruntuose gali būti apskaičiuojamas pagal formulę (Clayton, Matthews etc., 1995; Lunne, Robertson etc., 1997):

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_o}{N_c}, \quad (1.20)$$

čia q_c – kūgio sprauda, MPa, MN/m²; σ_o – suminis pertankinimo slėgis, MPa, MN/m² (kartais naudojamas vertikalusis arba horizontalusis įtempis (σ_{vo} arba σ_{ho}) bei efektyvieji įtempiai (σ')); N_c – teorinis kūgio koeficientas, kuris gali būti nustatomas analitiniais arba empiriniais metodais.

Nustatant teorinį kūgio koeficientą (N_c) analitiniu metodu priimama, kad $\varphi = 0$. Tam naudojamos įvairios skaičiavimo metodikos: laikomosios gebos (BCM), deformuojamo kūno (CEM), deformacijos trajektorijos (SPM) etc. (Yu, 2006).

Empiriniais metodais nustatytos N_c vertės dažniausiai kinta nuo 10 iki 20. Klasikiniu atveju, esant pertankintiems smulkiems gruntams, N_c vertė gali būti priimta nuo 15 iki 20 (Šimkus, 1987; Lunne, Robertson etc., 1997; Clayton, Matthews etc., 1995).

Vidinės trinties kampas (φ) rupiuose gruntuose priklauso nuo jų granulometrinės sudėties ir slūgsojimo gylio. Gylio įtaką skaičiavimuose atspindi vertikalusis įtempis (σ_{vo}). Tarp kūgio spraudos (q_c) ir vidinės trinties kampo (φ) egzistuoja logaritminė priklausomybė, kurią pasiūlė P. K. Robertson'as ir R. G. Campanella (Sikora, 2006):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{2,68} \cdot \left[\log \left(\frac{q_c}{\sigma_{vo}} \right) + 0,29 \right]. \quad (1.21)$$

Nepaisant nustatyto ryšio tarp vidinės trinties kampo ir gruntų slūgsojimo gylio, tiek „Eurocode 7“, tiek DIN 4094-1:2002-06 lentelėse ir skaičiavimo lygtyse pateiktos φ vertės šios įtakos neįvertina.

Tarp grunto sankibos (c) smulkiuose gruntuose ir q_c verčių yra tiesinė priklausomybė:

$$c = a \cdot q_c + b. \quad (1.22)$$

Tiesinės lygties (formulė (1.22)) konstantos (a ir b) priklauso nuo grunto genezės, amžiaus, granulimetrinės sudėties ir kitų parametrų (Šimkus, 1987; Солодухин, 1975; Lunne, Robertson etc., 1997).

Fizikinės gruntų savybės, tokios kaip rupių gruntų tankumas (D_r ; I_D) ir smulkių gruntų konsistencija (I_L), gali būti įvertinamos pagal CPT duomenis. Tarp šių rodiklių nustatytas ryšys yra logaritminis:

$$(D_r; I_D; I_L) = a \cdot \ln(q_c) - b. \quad (1.23)$$

1.3.4. Statinio zondavimo duomenų naudojimas projektuojant pamatus

Pamatų laikomosios gebos nustatymas pagal CPT duomenis buvo vienas pirmųjų šio lauko tyrimo metodo rezultatų pritaikymas geotechnikoje (Lunne, Robertson etc. 1997). Metodai, pagrįsti CPT duomenų panaudojimu projektuojant pamatus, dažniausiai taikomi Europoje (Mandolini, 1999; Mayne 2007).

Pamatų pagrindo laikomajai gebai nustatyti CPT duomenys gali būti panaudoti ir netiesiogiai, ir tiesiogiai. Netiesiogiai zondavimo duomenys (q_c ir f_s) panaudojami tuomet, kai skaičiavimai atliekami taikant analitinius laikomosios gebos (BCM) ir deformuojamo kūno mechanikos (CEM) metodus bei skaitmeninius modelius (FEM FDEM, DEM). Tiesioginiai skaičiavimo metodai yra empiriniai ir laikomoji geba apskaičiuojama į atitinkamas lygtis įrašant CPT rodiklių (q_c ir f_s) atitinkamas vertes (Eslami, Fellenius, 1997; Mayne, 2007).

Pagrindiniai polio pagrindo laikomosios gebos empiriniai tiesioginiai skaičiavimo metodai būtų tokie: Schmertmann–Nottingham (1978); de Ruiter–Beringen (1979) (ši metodas dar vadinamas Europiniu arba Fugro); LCPC–Bustamante–Gianeselli, arba prancūziškasis (1982); Meyerhof (1983); Tumay–Fakhroo; Eslami–Fellenius (1996); Van Impe, arba belgiškasis (1986); Van Mierlo–Korpejan–Begemann ir kt., arba olandiškasis (1952, 1982) (Robertson, Campanella etc., 1988; Lunne, Robertson etc. 1997; Eslami, Fellenius, 1997).

Polio pagrindo ribinė laikomoji geba (Q_{ult}) susideda iš polio pado (Q_b) ir kamieno (Q_s) ribinių laikomųjų gebų sumos:

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s = q_b \cdot A_b + q_s \cdot A_s, \quad (1.24)$$

čia q_b ir q_s – atitinkamai savitieji polio pado ir kamieno atsparumai, apskaičiuojami pagal CPT duomenis, MPa; A_b ir A_s – atitinkamai polio pado ir kamieno plotai, m².

Sekliųjų pamatų projektavimas grindžiamas pagrindo stabilumo ir deformacijos įvertinimu. Paprasčiausias tiesioginis CPT rodiklių panaudojimo metodas yra Meyerhof'o (1956) metodas, kur ribinė seklaus pamato laikomoji geba (q_{ult}) rupiuose gruntuose apskaičiuojama tiesiogiai iš vidutinių kūgio spraudos verčių (q_c), atsižvelgiant į pamato plotį ir jo įgilinimą nuo žemės paviršiaus (Lunne, Robertson etc., 1997):

$$q_{ult} = \bar{q}_c \cdot \left(\frac{B}{C} \right) \cdot \left(1 + \frac{D}{B} \right), \quad (1.25)$$

čia \bar{q}_c – vidurkinės kūgio spraudos po pamato padu vertės, apimančios intervalą, lygu pamato pločiui, MPa; C – empirinė konstanta (paprastai $C = 12,2$); B – pamato plotis, m; D – pamato įgilinimas nuo žemės paviršiaus, m.

Vertikalus pamato poslinkis, arba deformacijos (s , m) rupiuose gruntuose gali būti apskaičiuojamos pagal klasikinės Meyerhof'o (1974) (1.26) arba Schmertmann'o (1978) lygtis (formulė (1.27)). Meyerhof'o lygtis (formulė (1.26)) yra labai konservatyvi (Lunne, Robertson etc., 1997; Mayne, 2007).

$$s = \frac{\Delta p \cdot B}{2 \cdot \bar{q}_c}; \quad (1.26)$$

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta p \cdot \sum_1^n \frac{I_z}{C_3 \cdot E} \cdot \Delta z; \quad (1.27)$$

čia Δp – bendras pamato slėgis, MPa; B – pamato plotis, m; \bar{q}_c – vidurkinės kūgio spraudos vertės po pamato padu intervale B , MPa; C_1 , C_2 , C_3 – pataisos dėl pamato įrengimo technologijos, valkšnumo, formos; I_z – deformacijos įtakos koeficientas; Δz – sluoksnio storis, m; E – deformacijos modulis, atitinkantis Young'o modulį:

$$E = \alpha \cdot q_c, \quad (1.28)$$

čia q_c – nagrinėjamo sluoksnio kūgio spraudos vidutinė vertė, MPa; α – koeficientas, kuris priklauso nuo grunto tipo.

1.4. Skyriaus rezultatai ir išvados

Geotechninis zondavimas turi daug privalumų, tačiau tyrimus atliekant sudėtingesniuose ir atsakingesniuose objektuose negalima atsisakyti ir laboratorinių tyrimų. Pagrindinis geotechninio zondavimo privalumas – tyrimų sparta ir tiesioginis jų metu gautų duomenų taikymas projektuojant pamatus ar kitus inžinerinius statinius.

Gruntų bandymas statiniu zondavimu užima pagrindinę vietą atliekant inžinerinius geologinius lauko tyrimus. Mokslininkai itin daug dėmesio skiria šiam tyrimo metodui, nes jis leidžia nustatyti daugiausia koreliacinių priklausomybių tarp CPT rodiklių ir grunto fizikinių bei mechaninių savybių; statinių pamatų projektavimo metodikos pagrįstos CPT rodiklių vertėmis; yra daug grunto praskydimo potencialo vertinimo metodikų ir pan.

Atliekant inžinerinius geologinius lauko tyrimus kito tipo zondais (PMT, DMT, DPT, SPT), gautų rodiklių verčių naudojimas projektuojant pamatus ar apskaičiuojant gruntų praskydimą yra ribotas, todėl tokiais atvejais stengiamasi juos susieti su CPT duomenimis ir tolesniuose skaičiavimuose naudoti statiniam zondui skirtas formules.

Dinaminis zondavimas (DPT) retai atliekamas vykdant inžinerinius gruntų tyrimus. Tačiau šis metodas nepakeičiamas, kai reikia ištirti giliau slūgsančius grunto sluoksnius, kuriuos dengia tvirti gruntai. Dėl skaičiavimo metodikų trūkumo tyrimo metu gauti duomenys sunkiai panaudojami tolesniuose geotechninio projektavimo darbuose. Todėl dažnai DPT duomenis stengiamasi susieti su CPT rodikliais. Šios sąsajos gali būti tiesioginės arba netiesioginės, susijusios su tam tikrais grunto savybių rodikliais. Dažniausiai tam naudojama netiesioginė sąsaja su tarpiniu santykinio tankumo rodikliu (I_D):

$$DPT \rightarrow I_D \rightarrow CPT. \quad (1.29)$$

Tačiau toks duomenų susiejimas (žr. formulę (1.29)) duoda dideles paklaidas ir iškraipo galutinius rezultatus. Juolab, kad nėra patikimų I_D nustatymo lygčių, kai duomenys gauti DPSH tipo zonu. Visi šie veiksniai skatina ieškoti kuo tikslesnių koreliacinių priklausomybių tarp tiesioginių DPT ir CPT rodiklių.

2. DINAMINIO ZONDAVIMO RODIKLIAI IR JŲ PATIKIMUMAS

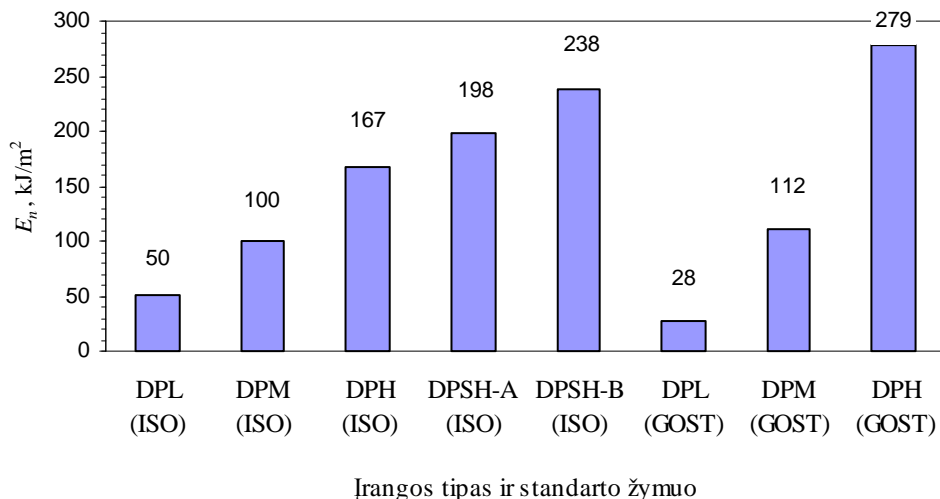
2.1. Smūgių skaičius zonduojant skirtingų tipų DPT zondais ir jų tarpusavio sąsajos

2.1.1. Savitasis smūgio darbas. Santykinis smūgio sąsajų koeficientas β

Dinaminio zondavimo metu yra skaičiuojamas smūgių skaičius (N_x). Šio rodiklio vertės zonduojant tuos pačius gruntus tame pačiame gylio intervale priklauso nuo naudojamos zondavimo įrangos tipo (žr.1 skyrių, 1.2 ir 1.3 lenteles). Šiuos skirtumus itin gerai atspindi smūgio savitasis darbas (E_n , kJ/m²) – zondavimo energijos (E_p , kJ) ir kūgio ploto (A , m²) santykis:

$$E_n = \frac{E_p}{A}. \quad (2.1)$$

Plakto smūgio savitojo darbo (E_n) vertės kinta nuo 50 kJ/m² (DPL) iki 238 kJ/m², kai naudojama standartu ISO 22476-2:2005 reglamentuota įranga, ir nuo 28 kJ/m² iki 279 kJ/m², kai naudojama standartu GOST 19912-2001 reglamentuota įranga (2.1 pav.).



2.1 pav. Skirtingos zondavimo įrangos plakto smūgio savitojo darbo (E_n) vertės

Toliau šiame skyriuje bus nagrinėjama tiksliai standarte ISO 22476-2:2005 pateikta DPT įranga.

Nagrinėjant smūgio savitojo darbo (E_n) teorines vertes (žr. 2.1 pav.) gaunama, kad, vertinant pagal lengvo zondo tipą (DPL, ISO), atitinkamas procentinis skirtumas būtų toks: 50% (DPM), 70% (DPH), 75% (DPSH–A) ir 79% (DPSH–B). Nustačius šiuos skirtumus, galima teoriškai įvertinti, koks turėtų būti smūgių skaičiaus santykinis sąsajos koeficientas (β). Nagrinėjamu atveju (vertinant pagal DPL) santykinis sąsajos koeficientas (β) atitinkamai būtų: 0,5 (DPM), 0,3 (DPH), 0,25 (DPSH–A) ir 0,21 (DPSH–B). Pateiktos koeficiento (β) vertės yra orientacinės, nes plakto smūgio savitojo darbo (E_n) apskaičiavimo formulėje (2.1) potencinės energijos (E_p) vertės yra tik teorinės. Dinaminiu zonu zonuojant realiose sąlygose, energijos kiekis yra kintantis dydis, nes jo vertė priklauso nuo labai daug veiksnių (žr. 1 skyrių).

Koeficiento β_x vertėms patikrinti buvo atliktas statistinis tyrimas, kurio metu buvo panaudoti 35 DPL, 64 DPSH–A ir 5 DPSH–B zondų duomenys. Be skaičiavimuose naudotų zondų, grunto sluoksnių vienalytiškumui nustatyti buvo zonuota CPT zonu ir buvo gręžiami gręžiniai grunto tipui identifikuoti. Tyrimui naudoti duomenys gauti zonuojant viršutinio pleistoceno Nemuno svitos Baltijos ir Grūdės posvičių aliuvines, limnoglacialines, fluvioiglacialines ir glacialines nuogulas bei vidurinio pleistoceno Medininkų posvitės fluvioiglacialines ir glacialines nuogulas.

Santykinis sąsajos koeficientas (β_x) buvo skaičiuojamas pagal formulę (2.2), įvertinus kūgio spraudos (q_c) ir smūgių skaičiaus (N_{x1} ar N_{x2}) santykius (α_{x1} ir α_{x2}):

$$\beta_x = \frac{\alpha_{x1}}{\alpha_{x2}} \cdot 100 \% ; \quad (2.2)$$

$$\alpha_{x1} \text{ arba } \alpha_{x2} = \frac{q_c}{N_{x1} \text{ ar } N_{x2}} ; \quad (2.3)$$

čia β_x – santykinis smūgių skaičiaus sąsajos koeficientas, kur apatinis simbolis „x“ analizės metu bus keičiamas priklausomai nuo nagrinėjamų DPT zondų porų tipų; α_{x1} – nagrinėjamos DPT zondų poros lengvesniojo zondo kūgio spraudos (q_c) ir smūgių skaičiaus (N_{x1}) santykis, „x“ analizės metu bus keičiamas priklausomai nuo nagrinėjamų DPT zondų porų tipų; α_{x2} – nagrinėjamos DPT zondų poros sunkesniojo zondo kūgio spraudos (q_c) ir smūgių skaičiaus (N_{x2}) santykis, „x“ analizės metu bus keičiamas priklausomai nuo nagrinėjamų DPT zondų porų tipų.

Statistinės analizės metu, nustačius duomenų logaritminį skirstinį, koeficiento (β_x) vertės bus logaritmuojamos. Atliekant detalesnę analizę, bus nagrinėjamas jau logaritmuotas santykinis sąsajos koeficientas (λ_x):

$$\lambda_x = \text{Log}(\beta_x), \quad (2.4)$$

čia λ_x – logaritmuotas santykinis sąsajos koeficientas, kur „x“ analizės metu bus keičiamas priklausomai nuo nagrinėjamų DPT zondu porų tipų.

Galutiniame duomenų analizės etape logaritmuotas santykinis sąsajos koeficientas (λ_x) bus grąžintas į procentinį santykį (β'_x):

$$\beta'_x = 10^{\lambda_x}, \quad (2.5)$$

čia β'_x – koreguotas santykinis smūgių skaičiaus sąsajos koeficientas, kuris bus naudojamas galutinėse smūgių skaičiaus sąsajos lygtyse:

$$N_{x1} = \frac{N_{x2} \cdot 100}{\beta'_x}; \quad (2.6)$$

$$N_{x2} = \frac{\beta'_x}{100} \cdot N_{x1}. \quad (2.7)$$

2.1.2. Smūgių skaičiaus skirtumai naudojant DPL ir DPSH–A tipo zondus

Pirmoje duomenų analizės stadijoje buvo tyrinėjami visi gruntai, neskaidant jų pagal litologinę ir granuliometrinę sudėtį. Iš viso statistinei analizei pasirinkta 157 kintamieji (aibė $N = 157$). Kintamuosius sudaro apskaičiuoto santykinio smūgių skaičiaus sąsajos koeficiento (β_A) vertės, kurios apskaičiuotos pagal formulę (2.2). Čia β_x pakeičiamas β_A , o α_{x1} ir α_{x2} – atitinkamai α_{DPL} ir α_{DPSH-A} , apskaičiuotais pagal formulę (2.3), kurioje panaudoti smūgių skaičiai (N_{DPL} ir N_{DPSH-A}), reikalingi zondui įsmigti į 20 cm gylį.

Atlikus koeficiento (β_A) statistinę analizę, gautas duomenų aritmetinis vidurkis lygus 33%. Statistiniai duomenų vertinimo rodikliai parodė, kad nagrinėjama duomenų aibė ($N = 157$) yra statistiškai menkai patikima (2.1 lentelė). Koeficiento (β_A) normalaus skirstinio dažnių analizė (2.2 pav.) parodė, kad duomenis reikia logaritmuoti (2.3 pav.) ir kad santykio vertės yra mažiau ar daugiau nutolę nuo normalės (2.4 pav.).

2.1 lentelė. Nagrinėjamų smūgių skaičiaus santykinų sąsajos koeficientų β_A ir λ_A pagrindiniai statistiniai rodikliai

Gruntas	N arba n		\bar{x}		S^2		S		Ω_x	
	β_A	λ_A	β_A	λ_A	β_A	λ_A	β_A	λ_A	β_A	λ_A
0	157	157	33,0	1,41	463,0	0,12	21,5	0,3	65,2	24,4
1	57	57	40,9	1,54	478,3	0,07	21,9	0,3	53,4	17,5
2	25	25	50,1	1,67	361,5	0,03	19,0	0,2	37,9	9,9
3	9	9	21,4	1,21	236,4	0,14	15,4	0,4	71,9	30,7
4	10	10	28,7	1,41	200,9	0,04	17,2	0,2	49,3	14,9
5	11	11	25,5	1,28	367,6	0,15	19,2	0,4	75,3	30,6
6	35	35	17,0	1,17	80,2	0,06	9,0	0,2	52,8	21,1

Gruntas	A		SEM		RSE		g_1		g_2	
	β_A	λ_A	β_A	λ_A	β_A	λ_A	β_A	λ_A	β_A	λ_A
0	90,6	1,7	1,7	0,03	5,2	1,9	0,8	-0,8	0,17	0,63
1	86,0	1,2	2,9	0,04	7,1	2,3	0,7	-0,8	-0,06	0,97
2	68,5	0,6	3,8	0,03	7,6	2,0	0,6	0,1	-0,53	-1,04
3	43,9	1,1	5,1	0,12	24,0	10,2	0,9	-0,6	-0,04	-0,10
4	39,9	0,6	4,5	0,70	15,6	4,7	0,8	0,3	-0,75	-1,21
5	62,4	1,4	5,8	0,12	22,7	9,3	1,1	-0,8	0,82	0,79
6	44,1	1,1	1,5	0,04	8,9	3,4	1,2	-0,6	2,49	0,50

N, n – elementų skaičius aibėje ar imtyje;

\bar{x} – aritmetinis vidurkis;

S^2 – dispersija;

S – standartinis nuokrypis;

Ω_x – variacijos koeficientas;

A – aibės plotis;




SEM – standartinė vidurkio paklaida;

RSE – santykinė standartinė paklaida;

g_1 – imties asimetrijos koeficientas;

g_2 – imties eksceso koeficientas.

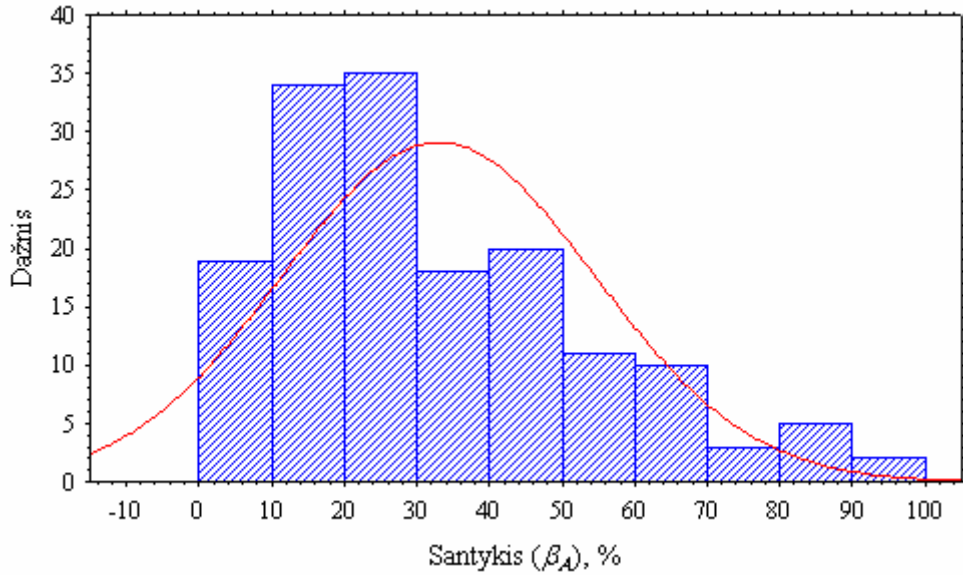
0 – visas nagrinėtas gruntas, neskaidytas pagal litologinę ir granulimetrinę sudėtį;
 1 – sasiCl, siCl morena;
 2 – sacI Si, saCl, clSi morena;
 3 – sasiCl, siCl;
 4 – sacI Si, saCl, clSi;
 5 – grSa ir CSa;
 6 – MSa ir FSa

 Patikima
 Vidutiniškai patikima
 Menkai patikima

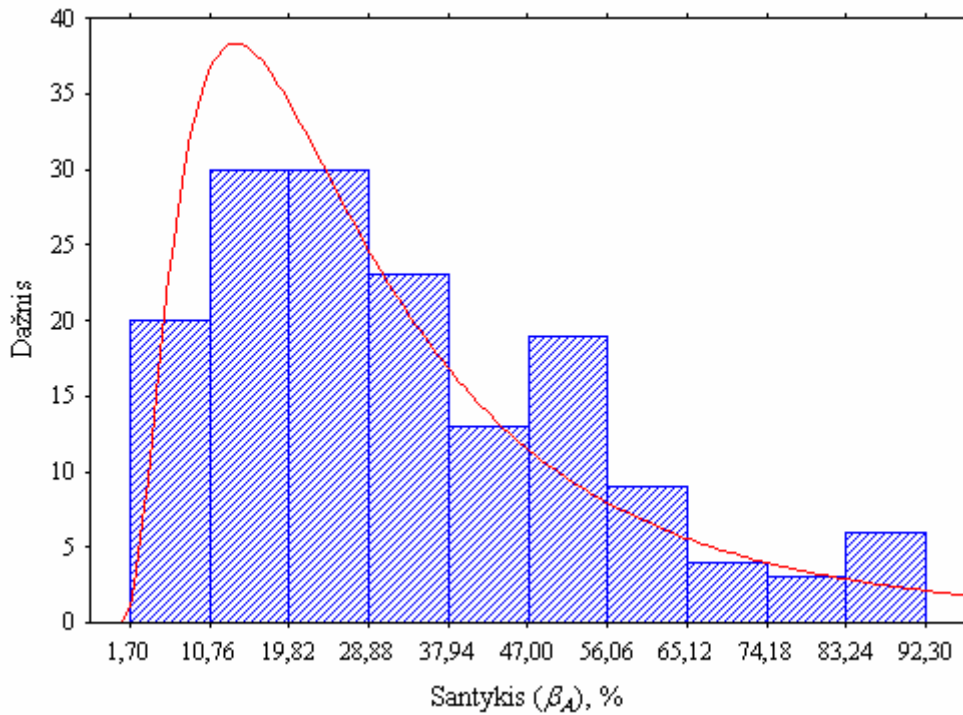
Visos koeficiento (β_A) vertės buvo logaritmuotos dešimtainio logaritmo pagrindu (žr. formulę (2.4)) ir buvo gautas logaritmuotas santykinis smūgio sąsajos koeficientas (λ_A). Logaritmuoto koeficiento (λ_A) statistinė analizė parodė, kad nagrinėjamos aibės patikimumas yra ženkliai didesnis už nelogaritmuotas vertes (λ_A patikimesnė už β_A) (žr. 2.1 lentelę). Variacijos koeficiento (Ω_x) vertės sumažėjo nuo 65,2 (β_A) iki 24,4 (λ_A), o santykinė standartinė paklaida (RSE) sumažėjo nuo 5,2 (β_A) iki 1,9

(λ_A). Logaritmuotų verčių dažnių analizė (2.5 pav.) ir verčių pasiskirstymas apie normalę (2.6 pav.) parodė, kad nagrinėjami duomenys išsidėstę arti normaliojo skirstinio.

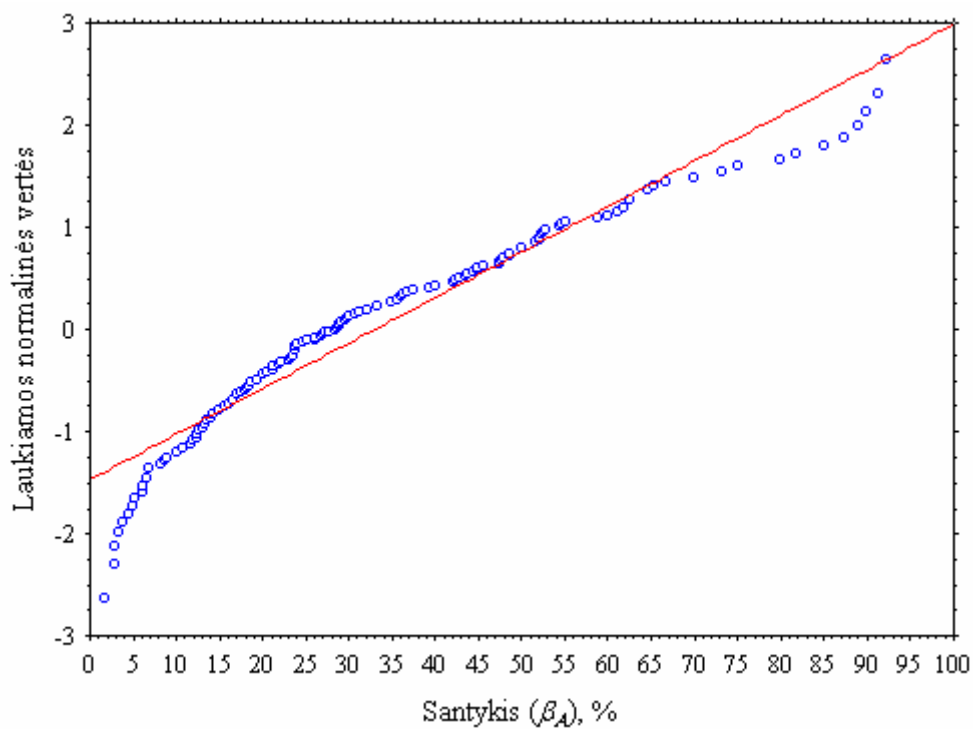
Koeficiento (λ_A) aritmetinis vidurkis – 1,4. Jį perskaičius į koreguotą koeficientą (β'_A) gauname, kad aritmetinis vidurkis yra 25,7%, arba suapvalinus – 26%.



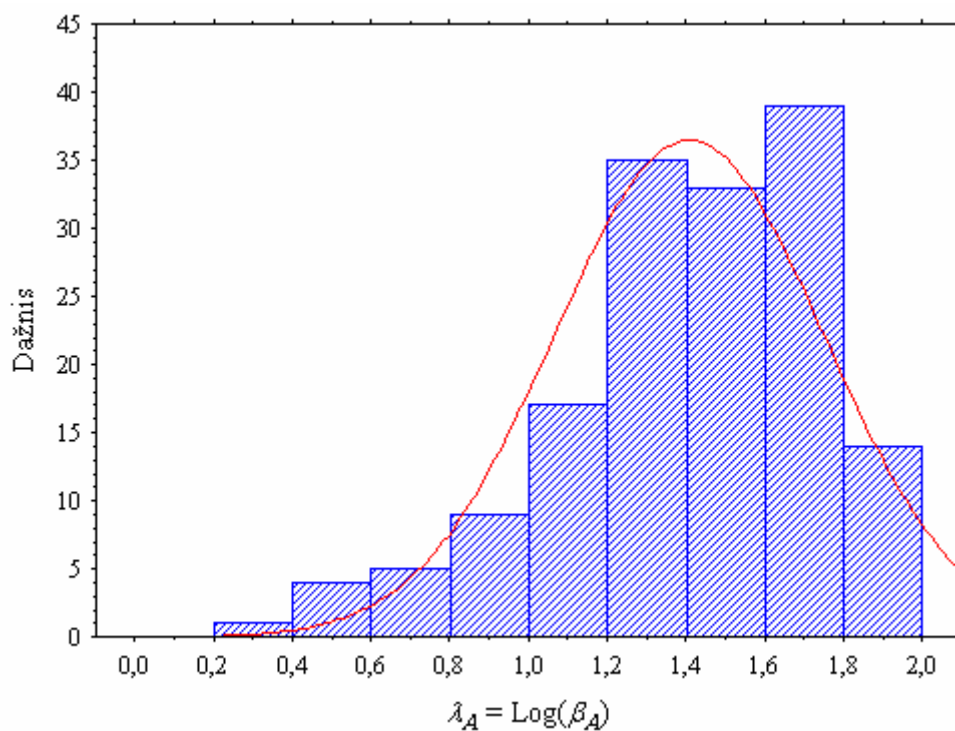
2.2 pav. Koeficiento (β_A) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu (visi grunto tipai)



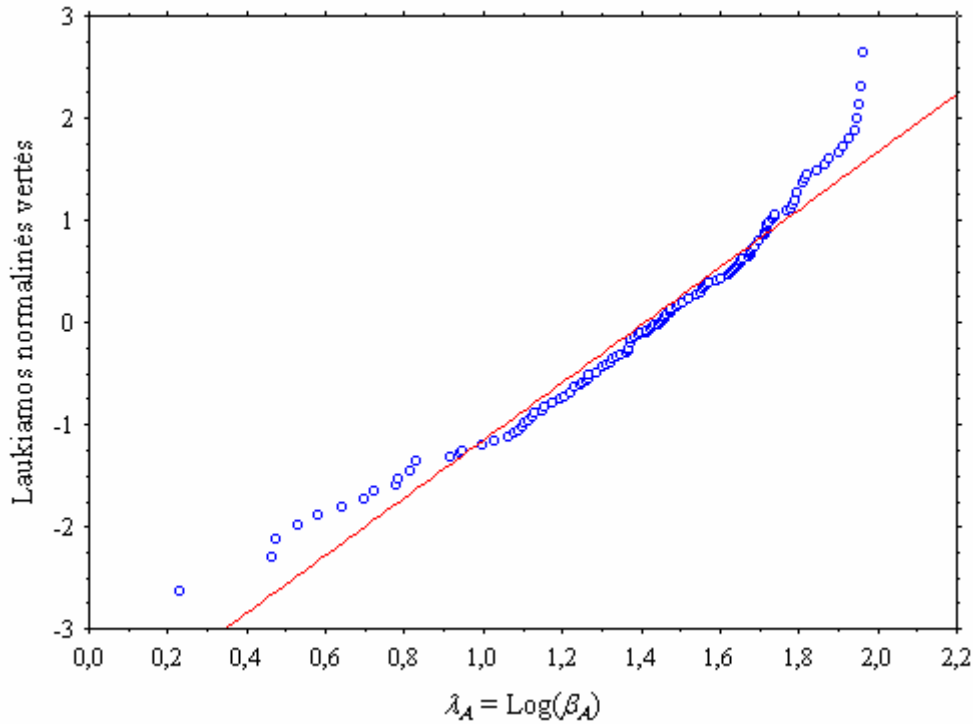
2.3 pav. Koeficiento (β_A) dažnių histograma su log–normaliuoju skirstiniu (visi grunto tipai)



2.4 pav. Koeficiento (β_A) verčių pasiskirstymas apie normalę (visi grunto tipai)



2.5 pav. Logaritmuoto koeficiento (λ_A) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu (visi grunto tipai)



2.6 pav. Koefficiento (λ_A) verčių pasiskirstymas apie normalę (visi grunto tipai)

Zonduojant DPL įrangą, smūgių skaičius (N_{DPL}) yra apytiksliai 74% didesnis už smūgių skaičių (N_{DPSH-A}) tiriamame gylyje. N_{DPL} ir N_{DPSH-A} turi būti skaičiuojami tokiam pačiam kalimo intervalui (nagrinėjamu atveju – N_{20}). Turint DPSH–A zondo duomenis ir pasinaudojus koreguotu smūgio sąsajos koeficientu (β'_A), galima apytiksliai numatyti, koks būtų DPL smūgių skaičius, apskaičiuotas pagal formulę (2.6), ir atvirkščiai, apskaičiuotas pagal formulę (2.7).

Galima teigti, kad smūgių skaičiaus procentinis arba santykinis skirtumas tarp skirtingų zondų tipų yra apytiksliai atvirkščiai proporcingas savitojo darbo skirtumui, t.y. zonduojant tame pačiame gylyje ir esant tų pačių savybių gruntui, kuo didesnis zondo savitasis darbas, tuo smūgių skaičius bus mažesnis.

Atliekant detalesnę duomenų analizę, visa turima duomenų aibė ($N = 157$) buvo sudalyta į atskiras šešias imtis, išskiriant skirtingos litologijos ir granulometrinės sudėties bei genezės gruntuos (žr. 2.1 lentelę). Pirmosioms dviem imtims buvo priskirti glacialiniai smulkūs (rišlūs) grantai (1 – moreninis smėlingas dulkingas molis, moreninis dulkingas molis; 2 – moreninis smėlingas molingas dulkis, moreninis smėlingas molis ir moreninis molingas dulkis). Į atskirą imtį buvo išskirti limnoglacialiniai smulkūs (rišlūs) grantai (3 – smėlingas dulkingas molis, dulkingas molis; 4 – smėlingas molingas dulkis, smėlingas molis ir molingas dulkis bei dulkis). Paskutinės

dvi imtys buvo sudarytos rupiems (biriems) gruntams (5 – rupus ir žvyringas smėlis; 6 – vidutinio rupumo ir smulkusis smėlis su nedidele kitų frakcijų priemaiša). Visų išskirtų imčių duomenys buvo nagrinėjami tiek procentiškai (β_A), tiek logaritmuoti (λ_A). Nagrinėjant tiek generalinę aibę, tiek atskiras imtis, logaritminės imtys buvo statistiškai patikimesnės (žr. 1 lentelę).

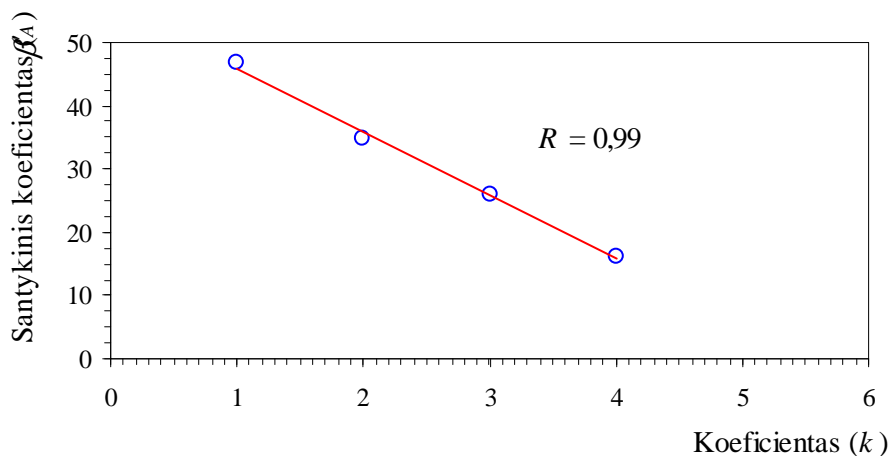
Glacialinių gruntų koreguotas santykio koeficientas (β'_A) yra didžiausias iš visų nagrinėtų gruntų ir kinta nuo ~47% iki ~35%. Koeficientas (β'_A) didėja, kai smulkiuose gruntuose didėja smėlio ir dulkių frakcijos kiekiai, tačiau išlieka smulkiųjų gruntų skirstymo tarpsnyje.

Limnoglacialinių smulkiųjų gruntų santykis (β'_A) kinta nuo ~26% iki ~16%. Atininkamai, kaip ir glacigeniniuose gruntuose, santykio vertės didėja didėjant smėlio ir dulkių frakcijų kiekiui.

Smulkių glacialinių ir limnoglacialinių gruntų koreguotą smūgio sąsajos santykinį koeficientą (β'_A) galima apskaičiuoti pagal regresinę lygtį (formulė (2.8)) arba pagal grafiką (2.7 pav.):

$$\beta'_A = 56 - 10 \cdot k, \quad (2.8)$$

čia k – koeficientas, kuris priklauso nuo nagrinėjamo smulkaus grunto granuliometrinės sudėties ir kinta nuo 1 iki 4, – tai atitinka 2.1 lentelėje pateikto grunto skaitines reikšmes.

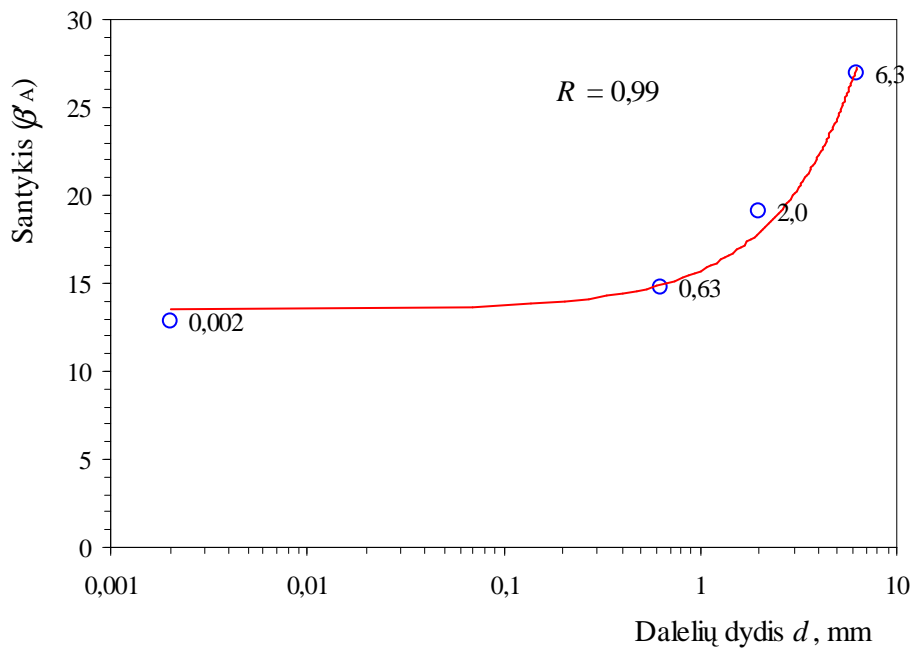


2.7 pav. Koeficiento (β'_A) verčių priklausomybė nuo koeficiento (k) (smulkus gruntas)

Rupiuose gruntuose santykinis koeficientas (β'_A) kinta nuo ~19% iki ~16%. Šis pokytis turi tokias tendencijas: smulkėjant gruntui, mažėja ir santykinis. Remiantis šia tendencija, rupūs gruntai buvo suskaidyti smulkiau, – buvo nustatytas koeficiento (β'_A) platesnis vidurkio spektras, priklausantis nuo granulimetrinės sudėties. Tai leidžia parašyti regresijos lygtį (formulė (2.9)), pagal kurią, žinant frakcijos dydį, lemiantį grunto pavadinimą, galima nustatyti santykinį koeficientą (β'_A) (2.8 pav.):

$$\beta'_A = 2,2 \cdot d + 13,5, \quad (2.9)$$

čia d – frakcijos dydis, lemiantis grunto pavadinimą, mm.



2.8 pav. Koeficiento (β'_A) verčių priklausomybė nuo grunto frakcijos dydžio (d) (rupūs gruntai)

Apibendrinant duomenis galima pasakyti, kad smūgių skaičius zonduojant DPL ir DPSH–A tipo zondais priklauso nuo grunto litologijos ir granulimetrinės sudėties. Mažiau šio rodiklio vertės priklauso nuo grunto genezės, išskyrus tuos atvejus, kai kalbama apie smulkiuosius gruntus. Čia reikėtų papildomai išskirti glacialinius gruntus (morenas). Skirtingų gruntų sąsajos koeficiento (β'_A) procentinės ir santykinės vertės pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Smūgių skaičiaus sąsajos koeficiento (β'_A) procentinės ir santykinės vertės

Gruntas	β'_A , %	β'_A , vnt. d.
saClSi, saCl, clSi morena	46,8	0,47
sasiCl, siCl morena	34,8	0,35
saClSi, saCl, clSi	25,8	0,26
sasiCl, siCl	16,3	0,16
CGr, MGr, FGr, saGr	26,9	0,27
grCSa, grMSa, grFSa, CSa – su kitos frakcijos priemaiša	19,1	0,19
MSa, FSa – su nedidele kitų frakcijų priemaiša	14,8	0,15
siSa, siFSa – iki dulquio frakcijos vyravimo	12,8	0,13

2.1.3. Smūgių skaičiaus skirtumai naudojant DPL ir DPSH–B zondus limnoglacialiniuose gruntuose

Surinkti DPL ir DPSH–B zondų duomenys smūgių skaičiaus skirtumus leido palyginti tik limnoglacialiniuose smulkiuose gruntuose – smėlingame dulkingame molyje, dulkingame molyje ir molyje. Iš viso statistinei analizei buvo sudaryta imtis iš 17 kintamųjų (β_B) ($n = 17$). Santykinio smūgių skaičiaus sąsajos koeficiento (β_B) vertės apskaičiuotos pagal formulę (2.2), kur β_x buvo keičiamas β_B , o α_{x1} ir α_{x2} – atitinkamai α_{DPL} ir α_{DPSH-B} , apskaičiuotais pagal formulę (2.3), kurioje skaičiavimui buvo panaudoti smūgių skaičiai (N_{DPL} ir N_{DPSH-B}), reikalingi zondui įsmigti į 20 cm gylį.

Pasikartojančių verčių dažnių (2.9 pav.) ir duomenų pasiskirstymo apie normalę (2.10 pav.) analizė parodė, kad koeficiento (β_B) verčių imtis statistiškai yra menkai patikima (2.3 lentelė).

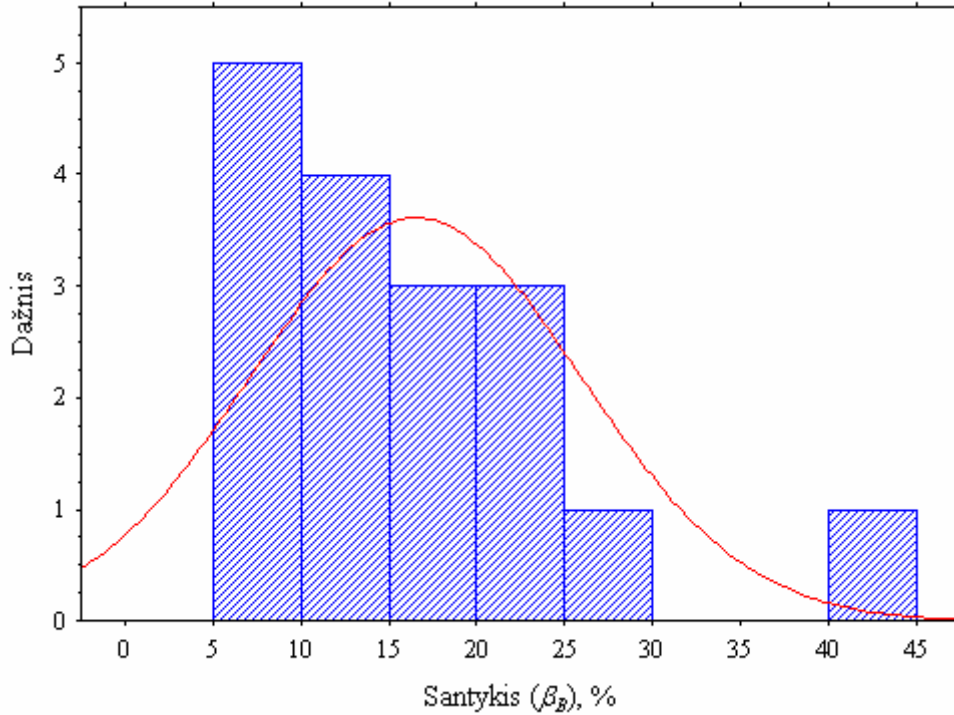
2.3 lentelė. Nagrinėjamų smūgių skaičiaus santykinų sąsajos koeficientų β_B ir λ_B pagrindiniai statistiniai rodikliai

Santykis	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	A	SEM	RSE	g_1	g_2
β_B	17	16,5	88,2	9,4	56,8	35,3	2,3	13,8	1,1	1,2
λ_B	17	1,15	0,06	0,25	21,6	0,89	0,06	5,2	-0,06	-0,72

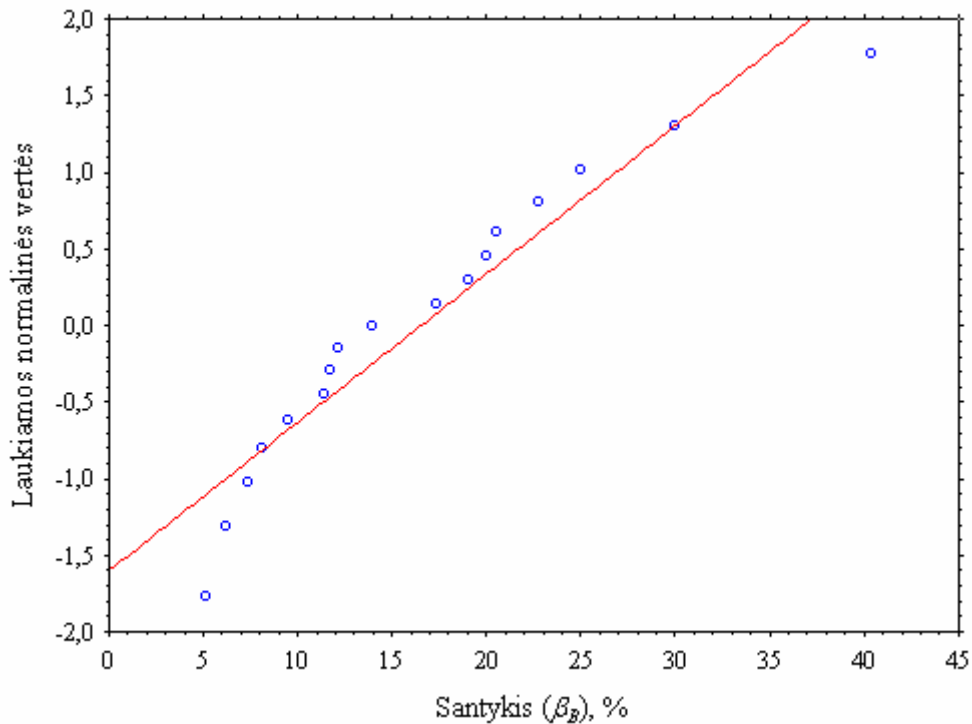
Pastaba: statistinių rodiklių ir spalvų paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.

Visos koeficiento (β_B) vertės buvo logaritmuotos dešimtainio logaritmo pagrindu (žr. formulę (2.4)) ir buvo gautas logaritmuotas santykinis smūgio sąsajos koeficientas (λ_B). Šio koeficiento (λ_B) statistinė analizė parodė, kad nagrinėjamos imties patikimumas yra ženkliai didesnis, lyginant su koeficiento (β_B) imtimi (žr. 2.3 lentelę). Variacijos koeficiento (Ω_x) vertės sumažėjo nuo 56,8 (β_B) iki 21,6 (λ_B), o santykinė standartinė paklaida (RSE) sumažėjo nuo 13,8 (β_B) iki 5,2 (λ_B). Logaritmuotų ver-

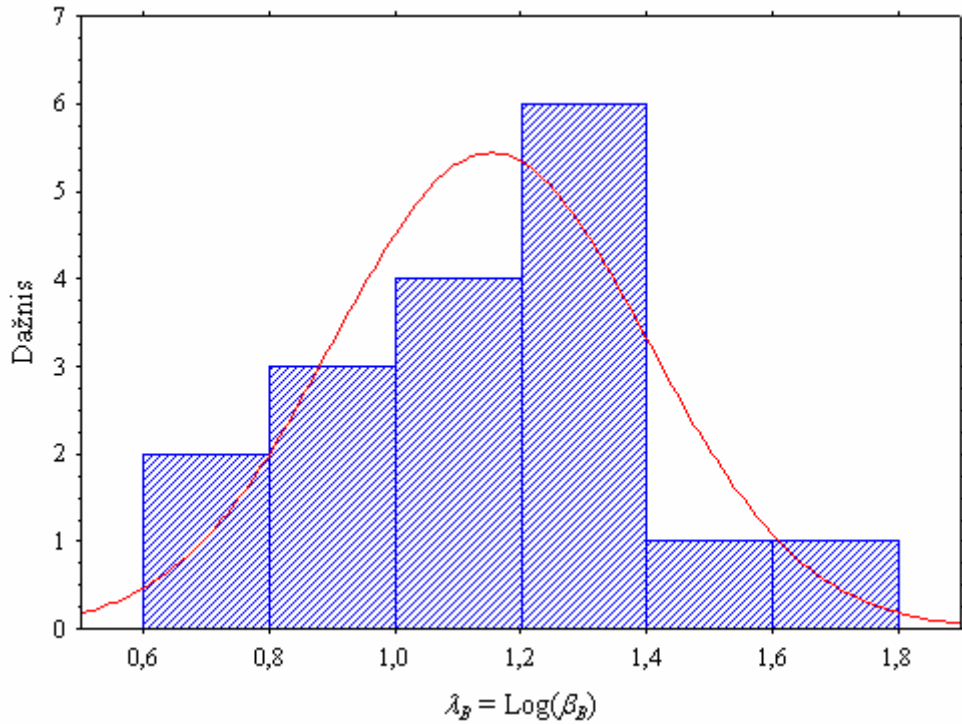
čių dažnių analizė (2.11 pav.) ir verčių pasiskirstymas apie normalę (2.12 pav.) parodė, kad nagrinėjami duomenys išsidėstę arti normaliojo skirstinio.



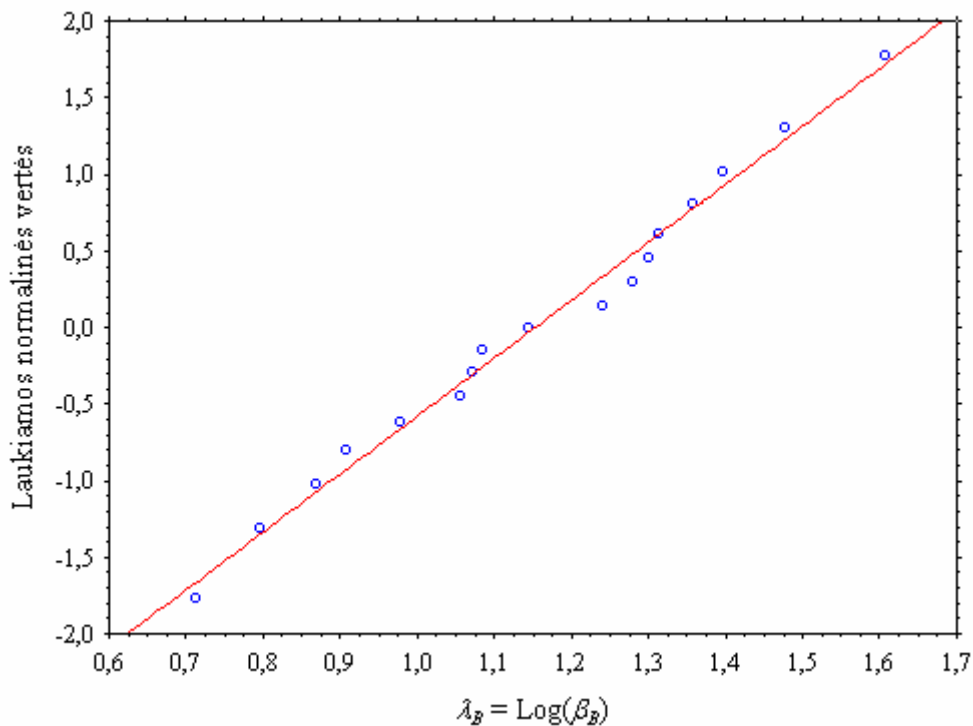
2.9 pav. Koefficiento (β_B) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose



2.10 pav. Koefficiento (β_B) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose



2.11 pav. Logaritmuoto koeficiento (λ_B) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose



2.12 pav. Koeficiento (λ_B) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose

Apskaičiuotas pagal formulę (2.5) koreguotas smūgių skaičiaus santykinis sąsajos koeficientas (β'_B) yra 14%. Tai rodo, kad DPL zondavimo metu smūgių skaičius

(N_{DPL}) bus 86% didesnis už DPSH–B zondo vertes (N_{DPSH-B}), kai smūgių skaičius skaičiuojamas į 20 cm intervalą (N_{20}). Šių rezultatų vertės yra artimos smūgio savitojo darbo (E_n) analizės rezultatams, kur procentinis skirtumas tarp DPL ir DPSH–B yra 79%. Tai patvirtina teiginį, kad, didėjant zondavimo darbui, mažėja smūgių skaičius. Galima teigti, kad smūgių skaičiaus procentinis arba santykinis skirtumas tarp skirtingų zondų tipų yra apytiksliai atvirkščiai proporcingas savitojo darbo skirtumui.

Turint DPSH–B zondo duomenis ir pasinaudojus koreguotu smūgio sąsajos koeficientu (β'_B), galima apytiksliai numatyti, koks būtų DPL smūgių skaičius, skaičiuojant pagal formulę (2.6), ir atvirkščiai, skaičiuojant pagal formulę (2.7).

2.1.4. Smūgių skaičiaus skirtumai naudojant DPSH–A ir DPSH–B zondus limnoglacialiniuose gruntuose

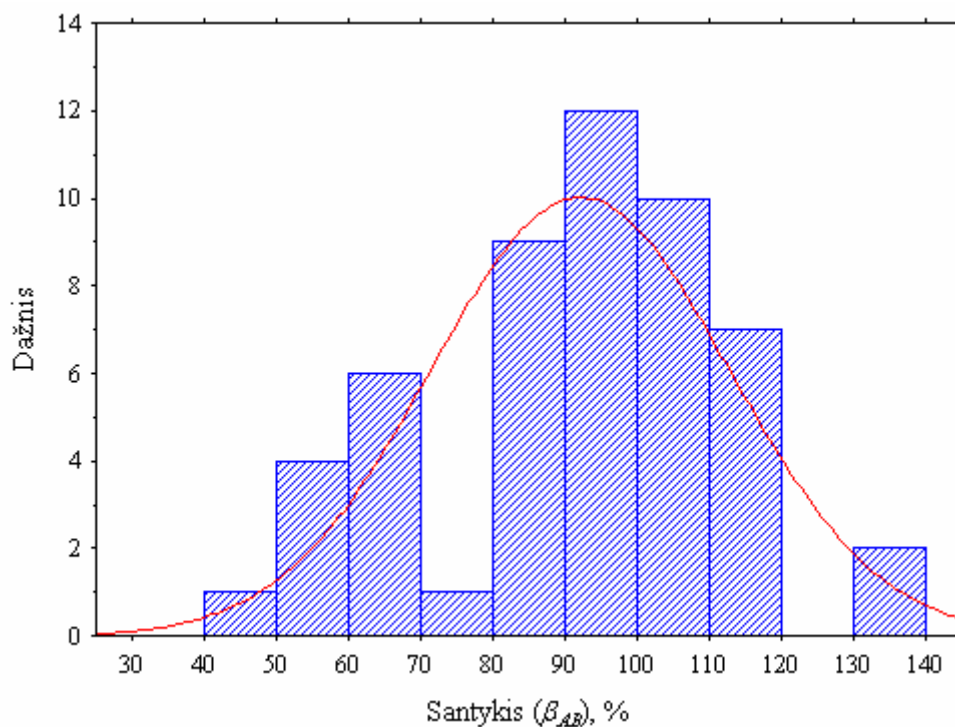
Surinkti DPSH–A ir DPSH–B zondų duomenys smūgių skaičiaus skirtumus leido palyginti tik limnoglacialiniuose smulkiuose gruntuose – smėlingame dulkingame molyje, dulkingame molyje ir molyje. Iš viso statistinei analizei buvo sudaryta imtis iš 53 kintamųjų (β_{AB}) ($n = 53$). Santykinio smūgių skaičiaus sąsajos koeficiento (β_{AB}) vertės buvo apskaičiuotos pagal formulę (2.2), kur β_x buvo keičiamas β_{AB} , o α_{x1} ir α_{x2} – atitinkamai α_{DPSH-A} ir α_{DPSH-B} , apskaičiuotais pagal formulę (2.3), kurioje skaičiavimui buvo panaudoti smūgių skaičiai (N_{DPSH-A} ir N_{DPSH-B}), reikalingi zondui įsmigti į 20 cm gylį.

Atlikus santykio (β_{AB}) verčių dažnių (2.13 pav.) analizę ir įvertinus duomenų pasiskirstymą apie normalę (2.14 pav.), buvo atliktas ir logaritminis skaičiavimas (λ_{AB}) pagal formulę (2.4). Logaritmuotų verčių dažnių (2.15 pav.) ir normalės (2.16 pav.) analizė parodė, kad verčių išsidėstymas apie normalę beveik nepakito: vertės pasiskirstė pagal log-normalųjį skirstinį, tačiau labai artimos normaliajam skirstiniui. Statistiniai skaičiavimo rodikliai pateikti 2.4 lentelėje.

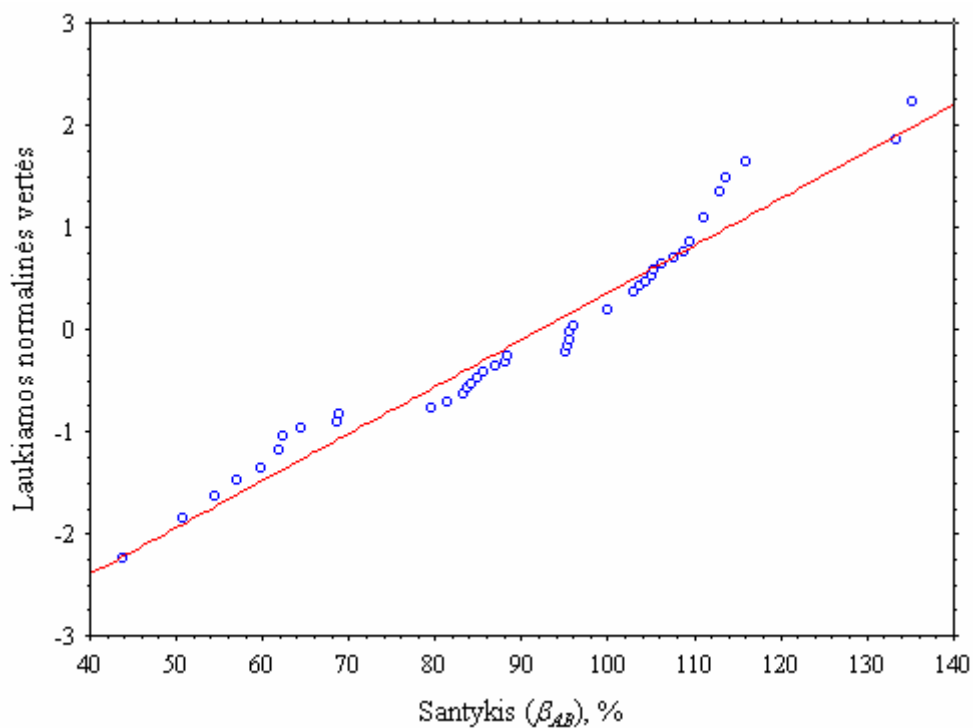
2.4 lentelė. Nagrinėjamų smūgių skaičiaus santykinų sąsajos koeficientų (β_{AB}) ir (λ_{AB}) pagrindiniai statistiniai rodikliai

Santykis	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	A	SEM	RSE	g_1	g_2
β_{AB}	53	92,2	429,4	20,7	22,5	91,5	2,87	3,1	-0,5	-0,2
λ_{AB}	53	1,95	0,01	0,11	5,6	0,49	0,02	1,0	-0,97	0,43

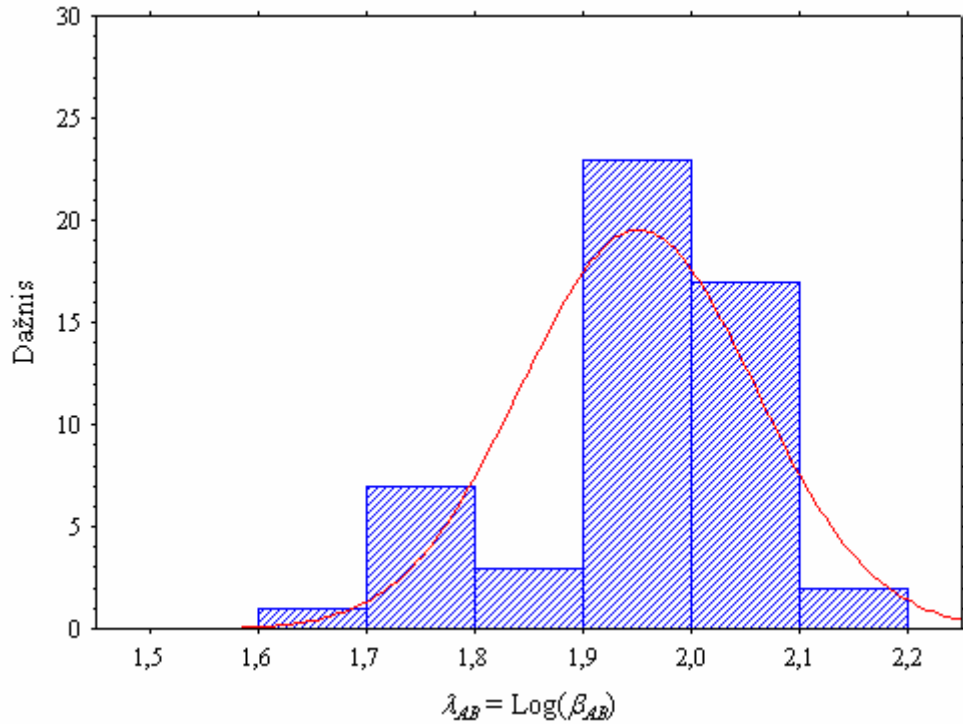
Pastaba: statistinių rodiklių ir spalvų paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.



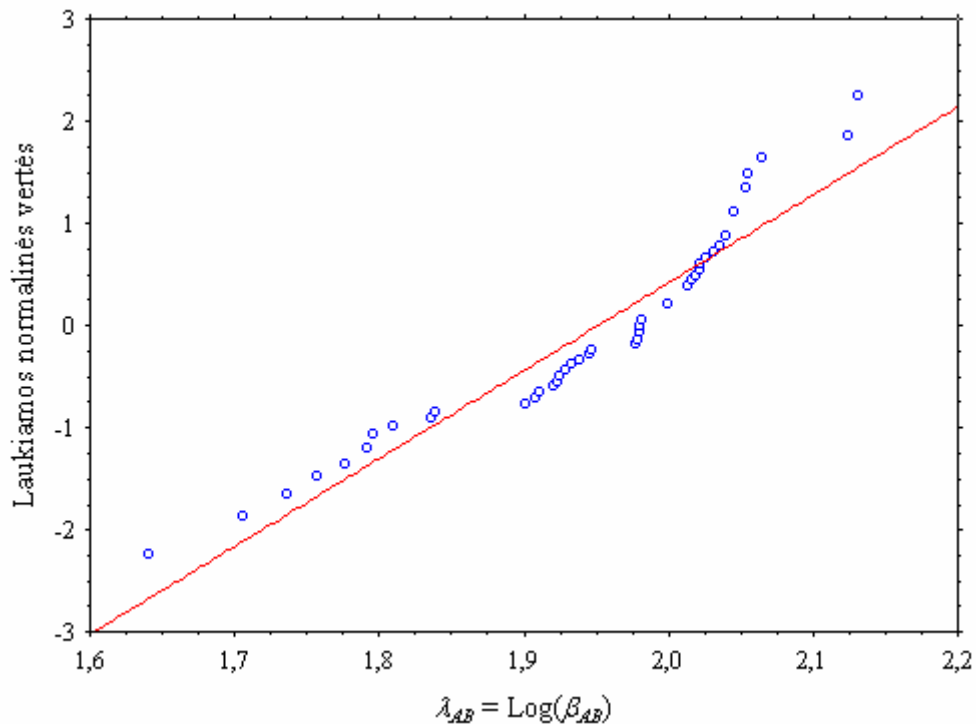
2.13 pav. Koeficiento (β_{AB}) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose



2.14 pav. Koeficiento (β_{AB}) pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose



2.15 pav. Logaritmuoto koeficiento (λ_{AB}) dažnių histograma su normaliuoju skirstiniu limnoglacialiniuose gruntuose



2.16 pav. Koeficiento (λ_{AB}) verčių pasiskirstymas apie normalę limnoglacialiniuose gruntuose

Apskaičiuotas pagal formulę (2.5) pakoreguotas smūgių skaičiaus santykinis sąsajos koeficientas (β'_{AB}) yra 89%. Tai rodo, kad DPSH–A zondavimo metu smūgių

skaičius (N_{DPSH-A}) bus 11% didesnis už DPSH–B zondo vertes (N_{DPSH-B}). Šių rezultatų vertės yra artimos smūgio savitojo darbo (E_n) analizės rezultatams, kur procentinis skirtumas tarp DPSH–A ir DPSH–B yra 17%.

Turint DPSH–B zondo duomenis ir pasinaudojus pakoreguotu smūgio sąsajos koeficientu (β'_{AB}), galima apytiksliai numatyti, koks būtų DPL smūgių skaičius, apskaičiuotas pagal formulę (2.6), ir atvirkščiai, apskaičiuotas pagal formulę (2.7).

2.2. Netiesioginis dinaminio zondavimo rodiklis – dinaminė kūgio smiga (q_d)

2.2.1. Dinaminės kūgio smigos apskaičiavimo formulės

Lietuvoje naudojama dinaminio zondavimo įranga yra „europinio“ ir „rusiško“ tipo, todėl ir vadovaujamosi dviejų standartų – ISO 22476-2:2005 ir GOST 19912-2001 – reikalavimais. Abiejuose standartuose dinaminio zondavimo duomenis siūloma įvertinti netiesioginiu dinaminės kūgio smigos (q_d arba p_d) rodikliu, kuris apskaičiuojamas pagal formules (1.4) arba (1.5) (žr. 1 skyrių). Be formulių (1.4) ir (1.5), q_d galima apskaičiuoti pagal kitas kalimo formules, kurios pateiktos 1.4 ir 1.5 lentelėse (žr. 1 skyrių).

Įvairių autorių teigimu, smūgių skaičiaus (N_x) perskaičiavimas į dinaminę kūgio smigą (q_d) leidžia išvengti zondavimo gylio ir energijos nuostolio įtakos zondavimo duomenims. Kitas šio rodiklio privalumas yra tas, kad zonduojant įvairiais dinaminiais zondais perskaičiuota dinaminė smiga yra invariantiška, t.y. q_d vertės priklauso ne nuo zondo tipo, o tik nuo zonduojamo grunto savybių (Рубинштейн, Кулачкин, 1984; Butcher etc., 1996; Livneh etc., 2000; Stefanoff, Sanglerat etc., 1988).

Natūralu, kad dinaminės smigos (q_d) skaičiavimo formulių įvairovė duoda ir skirtingus rezultatus. Kai rezultatų skirtumas nedidelis, jis tenkina inžinerinių geologinių tyrimų patikimumą, tačiau galimas ir atvirkščias rezultatas. Įvairių mokslininkų atlikti palyginamieji skaičiavimai, paremti dinaminiais polių bandymais (analogiškas bandymas dinaminiam zondavimui, tik skiriasi įrangos mastelis) ir naudojant įvairias kalimo formules (įtraukiant ir standarte ISO 22476-2:2005 pateiktą „Dutch“ formulę), parodė didelį gautų rezultatų išsibarstymą (Poulos, Davis, 1980; Terzaghi, Peck, 1996).

Kadangi mokslinėje literatūroje vyrauja įvairios nuomonės dėl kalimo formulų panaudojimo ir jų teisingumo, buvo atlikti dinaminės kūgio smigos palyginamieji skaičiavimai, naudojant įvairias kalimo formules (2.5 lentelė) ir DPL bei DPSH–A zondų duomenis.

2.5 lentelė. Dinaminės kūgio smigos (q_d) skaičiavimuose naudotų kalimo formulų suvertinė lentelė

Formulės autorius arba pavadinimas	Dinaminės kūgio smigos (q_d) apskaičiavimo formulės
Engineering News	$\frac{W \cdot H}{A^* \cdot (S + C)}$
Eytelwein (Dutch) arba ISO 22476-2:2005	$\frac{W \cdot H}{A^* \cdot S} \cdot \frac{W}{W + W_p}$
Hiley	$\frac{e_f \cdot W \cdot H}{A^* \cdot \left(S + \frac{1}{2} \cdot (C_1 + C_2 + C_3) \right)} \cdot \frac{W + n^2 \cdot W_p}{W + W_p}$
Janbu	$\left(\frac{1}{k_u} \right) \cdot \left(\frac{W \cdot H}{A^* \cdot S} \right)$
Danish	$\frac{e_f \cdot W \cdot H}{S + \left(\frac{2 \cdot e_f \cdot W \cdot H \cdot L}{A^* \cdot E_p} \right)^{\frac{1}{2}}}$
N. M. Gersevanov	$\frac{n \cdot \omega}{2} + \sqrt{\left(\frac{n \cdot \omega}{2} \right)^2 + \frac{k}{h} \cdot \left(n \cdot \omega \cdot Q \cdot H \cdot \frac{Q + l^2 \cdot q}{Q + q} \right)}$
G. K. Bondarik (1961)	$\frac{P_1 \cdot H}{\left(1 + \frac{P_2}{P_1} \right) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot s} + \frac{P_1 + P_2}{\pi \cdot r^2} - \frac{F}{\pi \cdot r^2}$
G. K. Bondarik (1964)	$\alpha \cdot A + \frac{q + Q - F}{\omega}$
A. J. Rubinshtein	$\alpha \cdot A - F_{ud} - P_{byt}$
R. Haefeli etc.	$A + \frac{q + Q}{\omega}$
E. Paprot	$\alpha \cdot A + \frac{q + Q}{\omega}$
GOST 19912-2001	$\frac{A \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot n}{h}$

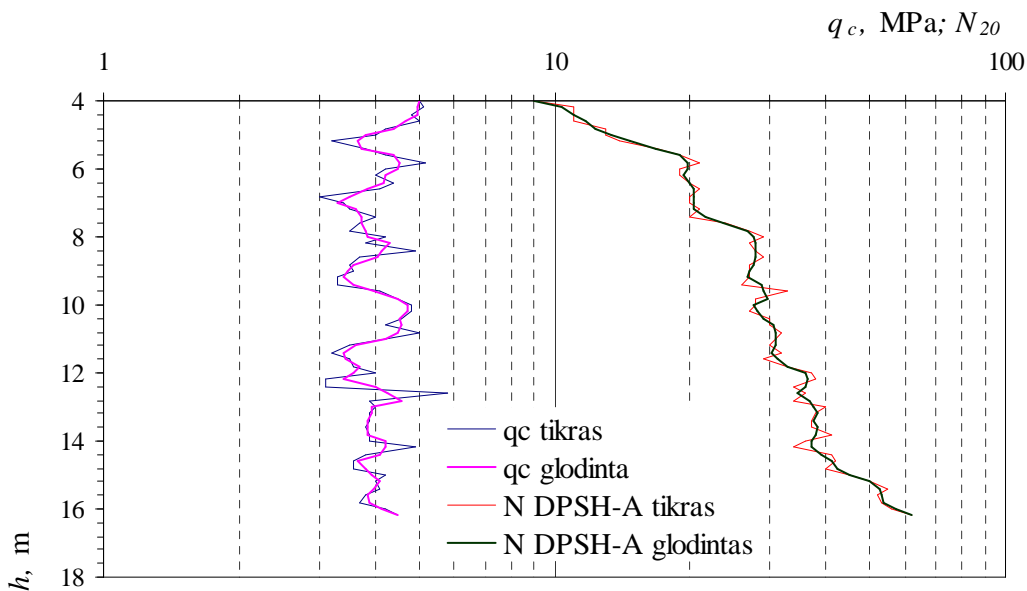
Pastaba: formulų rodiklių paaiškinimai pateikti 1.4 ir 1.5 lentelėse ir prie formulų (1.4), (1.5) ir (1.6) (žr.1 skyrių); A^* – kūgio skerspjūvio plotas, m^2 .

Tyrimo metu palyginamieji skaičiavimai ir gautų rezultatų statistinė analizė atlikta tipiniams Lietuvos gruntams, kurie dažniausiai būna pamatų pagrindu: moreniniam smėlingam molingam dulkiui ir smulkiam smėliui.

2.2.2. Įvairių kalimo formulių rezultatų palyginimas vertinant DPSH-A zondo duomenis

Skaičiavimo duomenims palyginti reikalinga pakankamai vienodų fizikinių ir mechaninių savybių gruntų storumė. Gamtoje natūraliomis slūgsojimo sąlygomis toks atvejis gana retas, todėl skaičiavimui buvo parinkti geologinio pjūvio tarpsniai su kuo vienodesnėmis savybėmis. Vienodumo matu pasirinktas kūginis stipris (q_c) ir granulimetrinė grunto sudėtis. Pasirinkta duomenų imtis tiek q_c , tiek N_{DPSH-A} buvo glodinama slenkamųjų vidurkių metodu, kad būtų panaikintas galimas duomenų „triukšmas“.

Moreninio smėlingo molingos dulkių dinaminės kūgio smigos (q_d) duomenų analizei buvo sudaryta statistinių rodiklių lentelė (2.6 lentelė). q_d buvo skaičiuojamas pagal dvylika kalimo formulių (žr. 2.5 lentelę). Skaičiavimams naudotos sugludintos smūgių skaičiaus (N_{DPSH-A}) vertės (2.17 pav.).



2.17 pav. Tikrosios ir sugludintos q_c ir N_{DPSH-A} vertės, gautos zonduojant moreninį smėlingą molingą dulki

Atlikti dinaminės kūgio smigos skaičiavimai pagal skirtingas formules rodo didžiulį verčių išsibarstymą (2.18 pav.). Aritmetinis q_d vidurkis kinta nuo 4,9 MPa (skaičiuojant pagal Hiley formulę) iki 30,3 MPa (skaičiuojant pagal Haefeli formulę). Nagrinėjamos storumės kūgio spraudos (q_c) vertės kinta nuo $q_{cmin} = 3,3$ MPa iki $q_{cmax} = 5,0$ MPa, nagrinėjamos imties amplitudė (A) yra 1,7, variacijos koeficientas $\Omega_x = 10,6$, dispersija (S^2) ir standartinis nuokrypis (S) atitinkamai 0,18 ir 0,43. Dinaminės kūgio smigos (q_d) verčių statistiniai rodikliai savo vertėmis turi būti artimi q_c imties statistiniams rodikliams (A , Ω_x , S^2 , S). Pateiktuose skaičiavimuose matyti, kad statistinių rodiklių verčių išsibarstymas yra didžiulis (2.6 lentelė).

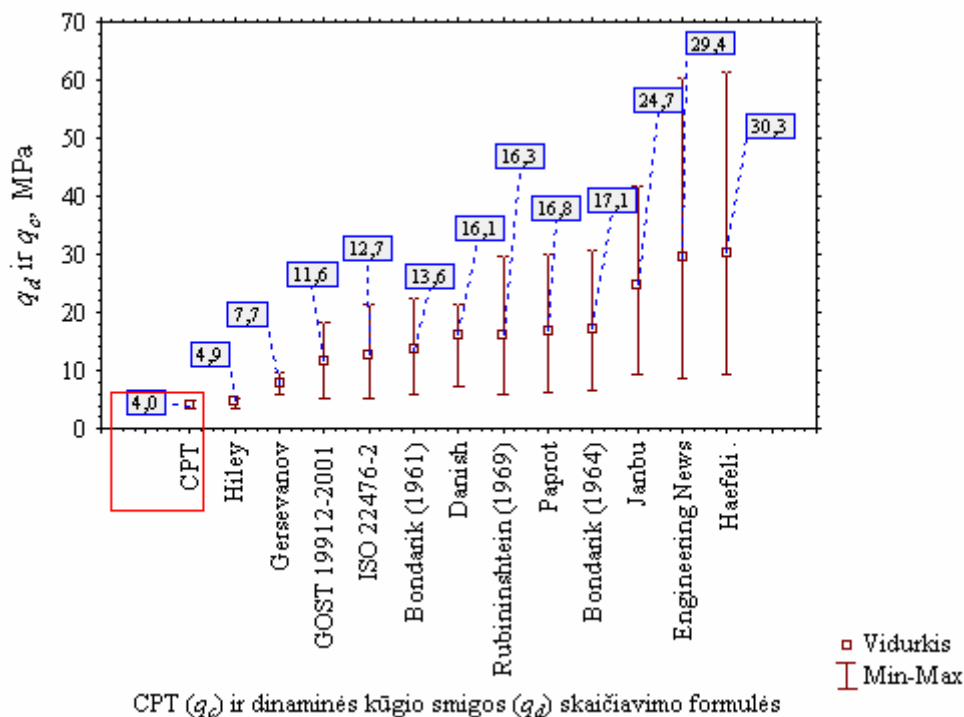
2.6 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPSH-A}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (moreninis smėlingas molingas dulkis)

Nagrinėjami duomenys ir kalimo formulės	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	x_{min}	x_{max}	A	SEM	RSE	g_1	g_2
Pradinių skaičiavimo duomenų statistiniai rodikliai												
q_c – tikrosios vertės (MPa)	62	4,0	0,35	0,59	14,7	3,0	5,8	2,8	0,08	2,0	0,63	0,20
N_{DPSH-A} – tikrosios vertės	62	30,2	141,4	11,9	39,4	9,0	62,0	53,0	1,5	5,0	0,48	0,13
q_c – glodintos (MPa)	62	4,0	0,18	0,43	10,6	3,3	5,0	1,7	0,05	1,3	0,42	-0,6
N_{DPSH-A} – glodintos	62	30,2	140,3	11,8	39,2	9,0	62,0	53,0	1,5	5,0	0,49	0,19
Dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) verčių, apskaičiuotų pagal įvairias kalimo formules, statistiniai rodikliai												
Engineering News	62	29,4	132,9	11,5	39,2	8,8	60,4	51,6	1,46	5,0	0,49	0,19
Dutch arba ISO 22476-2:2005	62	12,7	10,8	3,3	25,9	5,3	21,4	16,2	0,42	3,3	0,08	0,65
Hiley	62	4,9	0,13	0,37	7,5	3,5	5,2	1,8	0,05	1,0	-2,3	4,90
Janbu	62	24,7	49,9	7,1	28,6	9,2	41,8	32,5	0,89	3,6	-0,1	0,15
Danish	62	16,1	10,1	3,2	19,7	7,4	21,6	14,2	0,40	2,5	-1,0	0,65
Gersevanov	62	7,7	0,6	0,8	9,9	5,9	9,6	3,7	0,10	1,3	-0,2	0,41
Bondarik (1961)	62	13,6	11,7	3,4	25,2	5,9	22,16	16,6	0,43	3,2	0,07	0,57
Bondarik (1964)	62	17,1	28,7	5,4	31,3	6,5	30,7	24,2	0,68	4,0	0,28	0,28
Rubinshtein	62	16,3	27,4	5,2	32,2	5,9	29,6	23,7	0,66	4,0	0,29	0,32
Haefeli	62	30,3	135,9	11,7	38,5	9,4	61,4	52,0	1,48	4,9	0,48	0,16
Paprot	62	16,8	27,7	5,3	31,4	6,3	30,1	23,8	0,67	4,0	0,29	0,31
GOST 19912-2001	62	11,6	7,8	2,8	24,0	5,3	18,3	13,0	0,36	3,1	-0,1	0,72

Pastaba: statistinių rodiklių paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.

Mažiausias minimumų ir maksimumų pokytis bei kitų statistinių rodiklių panašumas q_c analogiškoms vertėms yra tuomet, kai skaičiavimai atliekami pagal Hiley ir Gersevanov'o formules, tačiau aritmetinis vidurkis tokiais atvejais skiriasi 36% (Hiley $q_d = 4,9$ MPa, Gersevanov'o $q_d = 7,7$ MPa).

Didžiausias duomenų išsibarstymas gautas skaičiuojant pagal Janbu, Engineering News ir Haefeli formules: aritmetinis vidurkis kinta nuo 24,7 MPa iki 30,3 MPa, stebimas didžiulis minimumų ir maksimumų skirtumas (didelės imties amplitudės A) (2.6 lentelė, 2.18 pav.). Šių dinaminės kūgio smigos verčių statistinis pasiskirstymas yra labai artimas smūgių skaičiaus pasiskirstymui. Tai rodo, kad apskaičiuotas dinaminės kūgio smigos vertės iškraipo įvairūs šalutiniai veiksniai, kurie ir lemia smūgių skaičiaus didėjimą zondui gilėjant (žr. 2.17 pav.). Tarpusavyje panašūs dinaminės kūgio smigos (q_d) rezultatai gaunami skaičiuojant pagal standartuose ISO 22476-2:2005 ir GOST 19912-2001 pateiktas formules. Aritmetiniai vidurkiai yra 11,6 MPa (GOST) ir 12,7 MPa (ISO) (žr. 2.6 lentelę). Tačiau yra nemažas atotrūkis tarp minimumo ir maksimumo (A atitinkamai kinta nuo 13,0 iki 16,2) (2.18 pav.). Minimalios apskaičiuoto dinaminio stiprio vertės stebimos viršutinėje nagrinėjamo pjūvio dalyje, vertės, artimos aritmetiniam vidurkiui, pasiskirsto zondavimo tarpsnio viduryje, o maksimalios vertės – ties zondavimo apačia. Toks statistinis verčių pasiskirstymas rodo, kad skaičiuojamo q_d vertėms įtakos turi šalutiniai veiksniai (zondavimo štangų ilgėjimas, grunto šoninio slėgio į štangas įtaka ir kt.). Formulėse naudojami korekcijos koeficientai yra netikslūs.

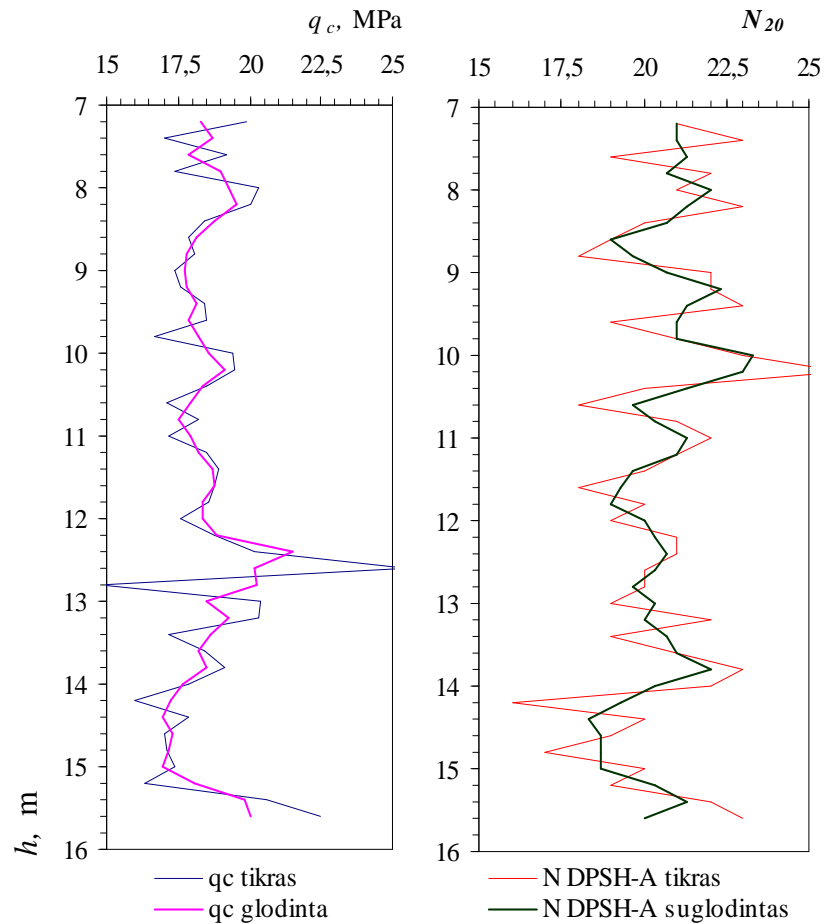


2.18 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai
(moreninis smėlingas molingas dulkis)

Pagal daugumą formulių (Danish, Rubinshtein (1969), Paprot, Bondarik (1964)) apskaičiuotas aritmetinis vidurkis yra 16,1–17,1 MPa, tačiau pagal šias formules apskaičiuotų dinaminės kūgio smigos verčių skirtumas tarp minimumo ir maksimumo yra gana didelis ($A \sim 24,0$). Tai rodo, kad dinaminio zondavimo duomenys turi įtakos dinaminės kūgio smigos skaičiavimui.

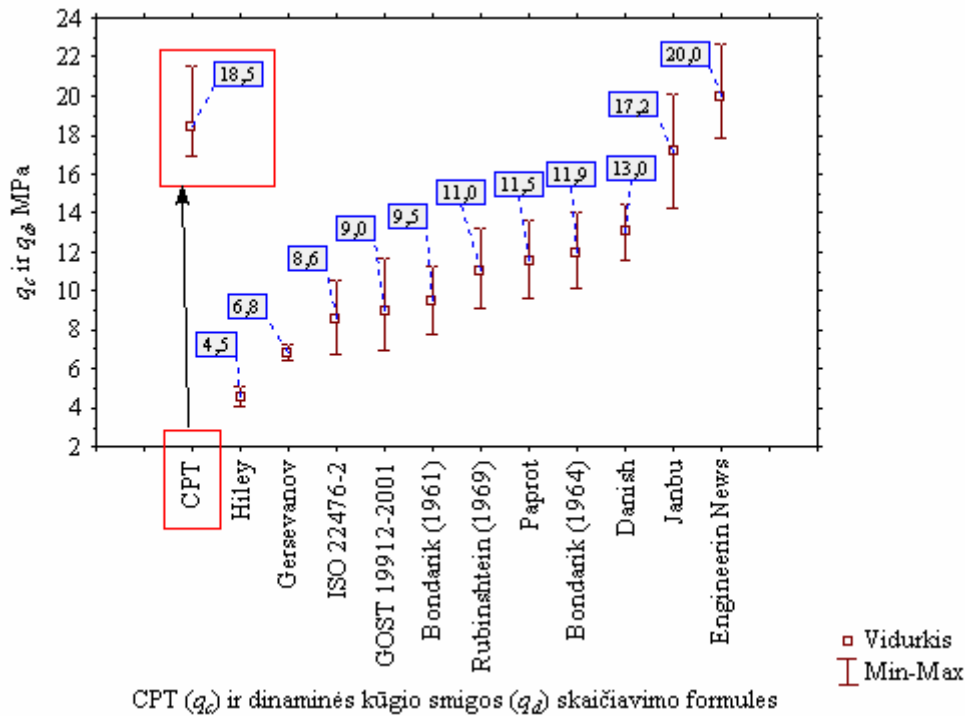
Dinaminės kūgio smigos (q_d) moreniniame smėlingame molingame dulkyje skaičiavimo analizė rodo, kad rezultatai, gauti naudojant įvairias kalimo formules, yra skirtingi, todėl tai mažina šių formulių patikimumą.

Analogiškas dinaminės kūgio smigos verčių palyginimas buvo atliktas ir su duomenimis, gautais zonduojant smulkų smėlį. Smėlio, kaip ir morenos, kūgio spraudos (q_c , MPa) ir smūgių skaičiaus (N_{DPSH-A}) vertės buvo glodinamos (2.19 pav.). Pagrindinių statistinių dinaminės kūgio smigos skaičiavimo imties rodiklių vertės pateiktos 2.7 lentelėje.



2.19 pav. Tikrosios ir suglodingtos q_c ir N_{DPSH-A} vertės, gautos zonduojant smulkų smėlį

Dinaminės kūgio smigos smulkiame smėlyje statistinių rodiklių verčių analizė parodė kiek kitokias tendencijas, lyginant su nagrinėtu moreniniu gruntu (2.20 pav., 2.7 lentelė). q_d aritmetinio vidurkio skirtumas yra gan ženklus – jis kinta nuo 4,5 MPa iki 20,9 MPa. Kaip ir prieš tai nagrinėtos morenos, taip ir smėlio dinaminio stiprio mažiausios vertės gaunamos skaičiuojant pagal Hiley ir Gersevanov'o formules, didžiausios – pagal Engineering News ir Haefeli formules.



2.20 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (smulkus smėlis)

Mažiausias dinaminės kūgio smigos (q_d) aritmetinio vidurkio vertės duodančios Hiley ir Gersevanov'o formulės smėlio gruntuose labai išlygina zondo verčių pasiskirstymą ir neatspindi kūgio spraudos (q_c , MPa) zondo grafiko formos bei tendencijų (2.21 pav.). Pagal šias formules apskaičiuotų q_d verčių grafikas gilėjant tendencingai mažėja. Statistiniai imties rodikliai gerokai skiriasi nuo kūgio spraudos rodiklių verčių.

Pagal daugelį kalimo formulių apskaičiuotų dinaminės kūgio smigos verčių imties statistiniai rodikliai panašūs ir nedaug skiriasi nuo kūgio spraudos (q_c) bei smūgių skaičiaus (N_{DPSH-A}) statistinių imties rodiklių (2.7 lentelė), tačiau duomenų

grafiko kreivės polinkis gilėjant eina verčių mažėjimo linkme, nors to nerodo kūgio spraudos grafikai (2.21 pav.).

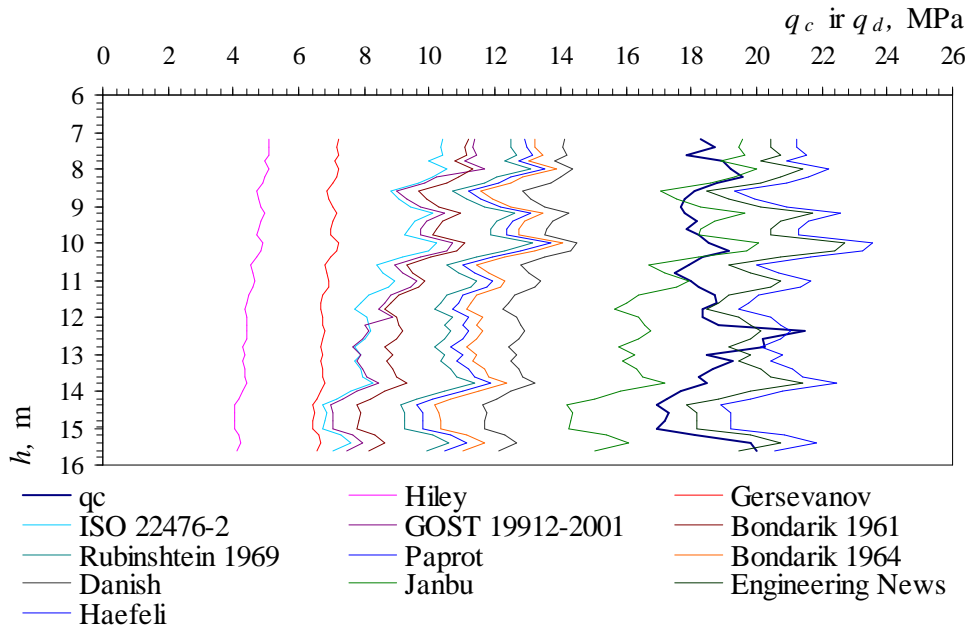
2.7 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPSH-A}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (smulkus smėlis)

Nagrinėjami duomenys ir kalimo formulės	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	x_{min}	x_{max}	A	SEM	RSE	g_1	g_2
Pradinių skaičiavimo duomenų statistiniai rodikliai												
q_c – tikrosios vertės (MPa)	43	18,5	3,2	1,8	9,7	14,8	25,5	10,7	0,3	1,6	1,4	4,6
N_{DPSH-A} – tikrosios vertės	43	20,6	3,7	1,9	9,4	16,0	26,0	10,0	0,3	1,4	0,1	0,5
q_c – glodintos vertės (MPa)	43	18,5	0,9	0,9	5,1	16,9	21,5	4,6	0,1	0,5	1,0	1,5
N_{DPSH-A} – glodintos vertės	43	20,5	1,3	1,1	5,5	18,3	23,3	5	0,2	1,0	0,2	0,1
Dinaminės kūgio smigos (q_d, MPa) verčių, apskaičiuotų pagal įvairias kalimo formules, statistiniai rodikliai												
Engineering News	43	19,9	1,2	1,1	5,5	17,8	22,7	4,9	0,2	1,0	0,2	0,1
Dutch arba ISO 22476-2	43	8,6	1,3	1,1	13,4	6,7	10,5	3,8	0,2	2,3	0,2	-1,1
Hiley	43	4,5	0,1	0,3	7,2	4,0	5,1	1,1	0,1	1,1	0,1	-1,2
Janbu	43	17,1	3,0	1,7	10,0	14,2	20,1	5,9	0,3	1,8	0,1	-1,0
Danish	43	13,0	0,6	0,8	6,2	11,6	14,5	2,9	0,1	0,8	0,1	-0,9
Gersevanov	43	6,8	0,1	0,2	3,5	6,4	7,2	0,8	0,04	0,6	0,1	-1,1
Bondarik (1961)	43	9,5	1,1	1,1	11,2	7,8	11,3	3,5	0,2	2,1	0,2	-1,1
Bondarik (1964)	43	11,9	1,0	1,0	8,3	10,1	14,0	3,9	0,2	1,7	0,2	-0,6
Rubinshtein	43	11,0	1,1	1,1	9,7	9,1	13,2	4,1	0,2	1,8	0,2	-0,7
Haefeli	43	20,9	1,1	1,1	5,1	18,9	23,6	4,7	0,2	9,6	0,3	0,2
Paprot	43	11,5	1,1	1,1	9,1	9,6	13,7	4,1	0,2	1,7	0,2	-0,7
GOST 19912-2001	43	9,0	1,8	1,4	15,1	6,9	11,7	4,8	0,2	2,2	0,4	-0,9

Pastaba: statistinių rodiklių paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.

Dinaminės kūgio smigos, apskaičiuotos pagal Engineering News ir Haefeli formules, aritmetiniai vidurkiai didžiausi, nors statistiniai imties rodikliai labiausiai atitinka kūgio spraudos ir smūgių skaičiaus rodiklius. Taip pat šiuo atveju duomenų grafikas yra labiausiai panašus į kūgio spraudos grafiką (žr. 2.21 pav.).

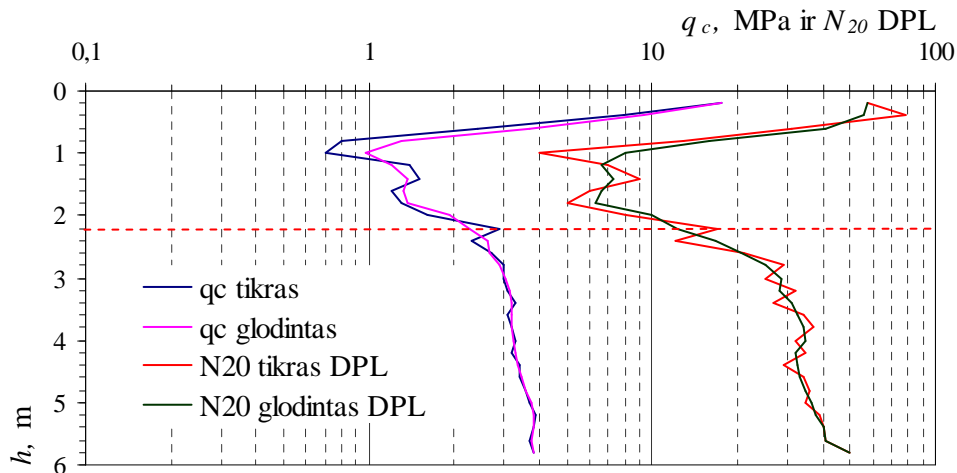
Kaip ir moreniniame smėlingame molingame dulkyje, dinaminės kūgio smigos (q_d) smulkiame smėlyje skaičiavimai rodo, kad rezultatai, gauti naudojant įvairias kalimo formules, yra skirtingi, todėl tai taip pat mažina šių formulių patikimumą.



2.21 pav. Dinaminės kūgio smigos (q_d) ir kūgio spraudos (q_c) duomenų grafikų palyginimas

2.2.3. Įvairių kalimo formulių rezultatų palyginimas vertinant DPL zondo duomenis

Dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) skaičiavimui pagal įvairias kalimo formules buvo naudojami DPL zondo duomenys (N_{DPL}). Pagal standartizuotą metodiką (ISO 22476-2:2005) zonduojant DPL zonu, smūgių skaičius (N_x) yra skaičiuojamas 10 cm zonavimo gylio intervalui (N_{10}). Tačiau tyrimų metu dėl galimybės atlikti lyginamuosius skaičiavimus naudojant DPSH zondų duomenis, DPL atveju smūgių skaičius buvo skaičiuojamas 20 cm gylio intervale (N_{20} arba N_{DPL}).



2.22 pav. Tikrosios ir suglodintos q_c ir N_{DPL} vertės, gautos zonduojant moreninį smėlingą molingą dulki

Skaičiavimui buvo pasirinktas vienalytis pagal kūgio spraudos (q_c , MPa) vertes ir pagal granulimetrinę sudėtį moreninio smėlingo molingo dulquio sluoksnis. Norint išvengti ekstreminių kūgio spraudos ir smūgių skaičiaus verčių, turimi lauko duomenys buvo glodinami (2.22 pav.). Šio sluoksnio kūgio spraudos aritmetinis vidurkis yra 3,3 MPa. Nagrinėjamo grunto sluoksnis slūgso nuo 2,2 m iki 5,8 m gylyje. Statistiniai dinaminės kūgio smigos (q_d) duomenų analizės rodikliai pateikti 2.8 lentelėje.

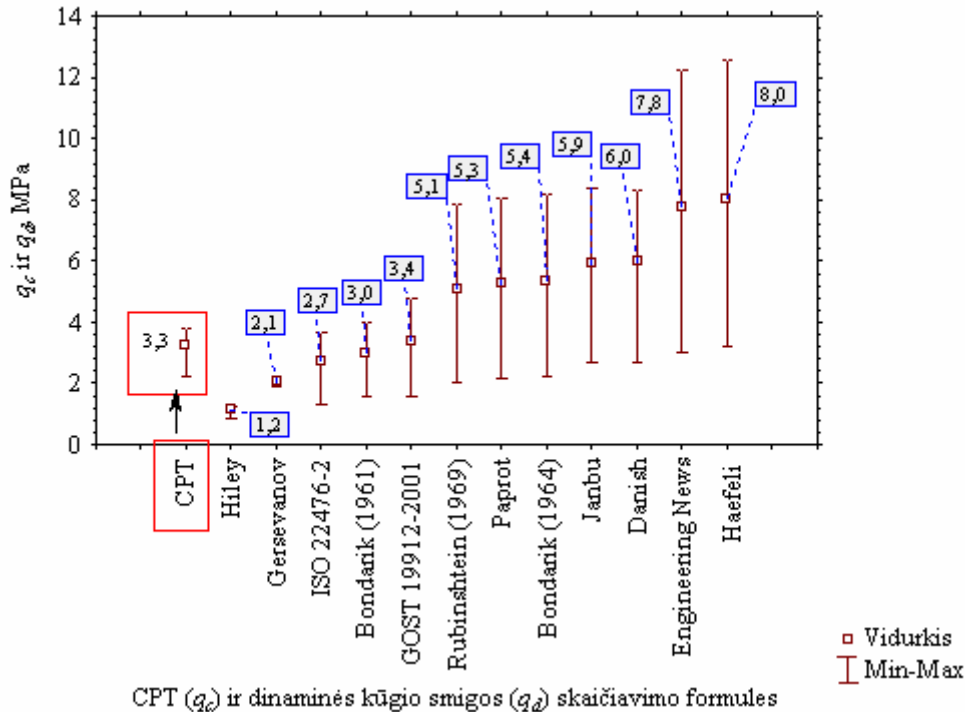
2.8 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPL}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (moreninis smėlingas molingas dulkis)

Nagrinėjami duomenys ir kalimo formulės	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	x_{min}	x_{max}	A	SEM	RSE	g_1	g_2
Pradinių skaičiavimo duomenų statistiniai rodikliai												
q_c – tikrosios vertės (MPa)	19	3,3	0,2	0,4	12,6	2,3	3,9	1,6	0,1	2,7	-0,5	0,3
N_{DPL} – tikrosios vertės	19	31,8	79,0	8,9	27,9	12,0	50,0	38,0	2,0	6,3	-0,4	0,7
q_c – glodintos vertės (MPa)	19	3,3	0,2	0,4	13,4	2,3	3,8	1,5	0,1	3,0	-0,6	0,0
N_{DPL} – glodintos vertės	19	31,7	76,4	8,7	27,6	12,3	50,0	37,7	2,0	6,3	-0,4	0,9
Dinaminės kūgio smigos (q_d, MPa) verčių, apskaičiuotų pagal įvairias kalimo formules, statistiniai rodikliai												
Engineering News	19	7,8	4,6	2,1	27,6	3,0	12,3	9,2	0,5	6,4	-0,4	0,9
Dutch arba ISO 22476-2	19	2,7	0,3	0,5	18,9	1,3	3,7	2,3	0,1	3,7	-1,3	2,6
Hiley	19	1,2	0,01	0,1	7,9	0,9	1,2	0,4	0,02	1,7	-2,5	6,3
Janbu	19	5,9	1,6	1,3	21,5	2,7	8,4	5,7	0,3	5,1	-1,0	1,9
Danish	19	6,0	1,7	1,3	21,9	2,7	8,3	5,6	0,3	5,0	-1,0	1,5
Gersevanov	19	2,1	0,01	0,07	3,5	1,9	2,2	0,3	0,02	1,0	-1,2	2,3
Bondarik (1961)	19	3,0	0,3	0,5	18,0	1,6	4,0	2,4	0,1	3,3	-1,2	2,4
Bondarik (1964)	19	5,4	1,9	1,4	25,5	2,2	8,2	5,9	0,3	5,6	-0,5	1,0
Rubinshtein	19	5,1	1,8	1,3	26,3	2,0	7,8	5,8	0,3	5,9	-0,5	1,1
Haefeli	19	8,0	4,7	2,2	27,0	3,2	12,6	9,3	0,5	6,3	-0,4	0,9
Paprot	19	5,3	1,8	1,4	25,7	2,2	8,1	5,9	0,3	5,7	-0,5	1,1
GOST 19912-2001	19	3,4	0,5	0,7	21,4	1,6	4,8	3,2	0,2	5,9	-1,0	1,8

Pastaba: statistinių rodiklių paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.

Dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) aritmetinių vidurkių išsibarstymas yra didžiulis ir kinta nuo 1,2 MPa iki 8,0 MPa. Mažiausias aritmetinis vidurkis gaunamas skaičiuojant pagal Hiley formulę (1,2 MPa), didžiausias – pagal Engineering News ir Haefeli formules (atitinkamai 7,8 MPa ir 8,0 MPa). Labai mažas duomenų išsibarstymas ($A = 0,3$) yra, kai skaičiuojama pagal Gersevanov'o formulę, tačiau šis duomenų išsibarstymas neatitinka kūgio spraudos (q_c) statistinių rodiklių ir grafiko formos.

q_d , apskaičiuoto pagal ISO 22476-2 ir Bondarik'o (1961) formules, statistiniai rodikliai labiausiai atitinka kūgio spraudos analogiškus rodiklius (2.23 pav.).



2.23 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (moreninis smėlingas molingas dulgis)

Dinaminė kūgio smigos (q_d), apskaičiuotos pagal GOST 19912-2001 formulę, aritmetinis vidurkis yra artimas kūgio spraudai (q_c), tačiau imties duomenų išsibars-tymas yra didesnis ($A = 3,2$). Dauguma skaičiavimo formulių (Rubinshtein (1969), Pa-prot, Bondarik (1964), Janbu, Danish) duoda labai panašius aritmetinius q_d vidurkius, kurie kinta nuo 5,1 MPa iki 6,0 MPa. Jų statistinių rodiklių vertės yra panašios, tačiau gerokai skiriasi nuo kūgio spraudos (q_c) statistinių rodiklių (2.23 pav., 2.8 lentelė).

DPL dinaminio zondo smūgių skaičius (N_{DPL}), gautas zonduojant moreninį smėlingą molingą dulkę ir perskaičiuotas į dinaminės kūgio smigos (q_d) vertes, parodė labai panašų duomenų rezultatą, gautą DPSH-A atveju – q_d verčių, apskaičiuotų skir-tingomis formulėmis, išsibars-tymas yra didžiulis.

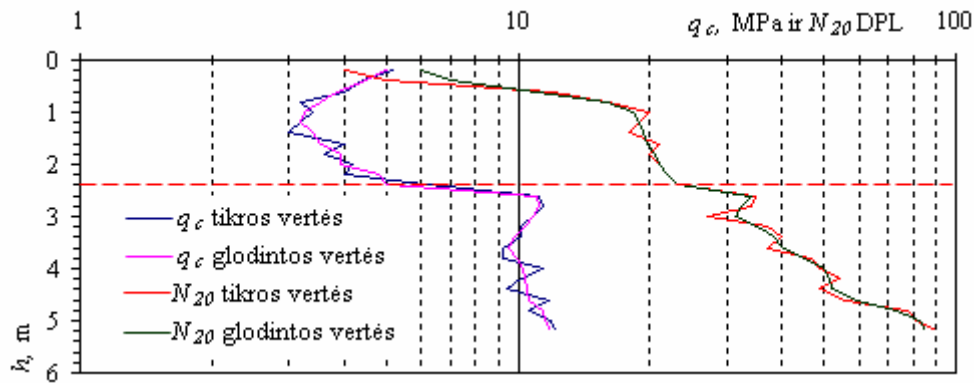
Atliekant smulkaus smėlio dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) skaičiavimus pagal N_{DPL} (arba N_{20}) duomenis, nagrinėjamasis sluoksnis dėl skirtingų kūgio sprau-dos (q_c) verčių buvo suskaidytas į dvi dalis. Pirmosios dalies (nuo 0,0 iki 2,4 m gylio)

q_c aritmetinis vidurkis yra 4,0 MPa, smūgių skaičiaus (N_{DPL}) vidurkis – 17, tuo tarpu antrosios dalies (nuo 2,4 m iki 5,2 m gylio) $q_{cvid.} = 10,7$ MPa, $N_{DPLvid} = 51$ (2.24 pav.). Statistiniai q_d duomenų analizės rodikliai pateikti 2.9 lentelėje.

2.9 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPL}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 0,0 iki 2,4 m)

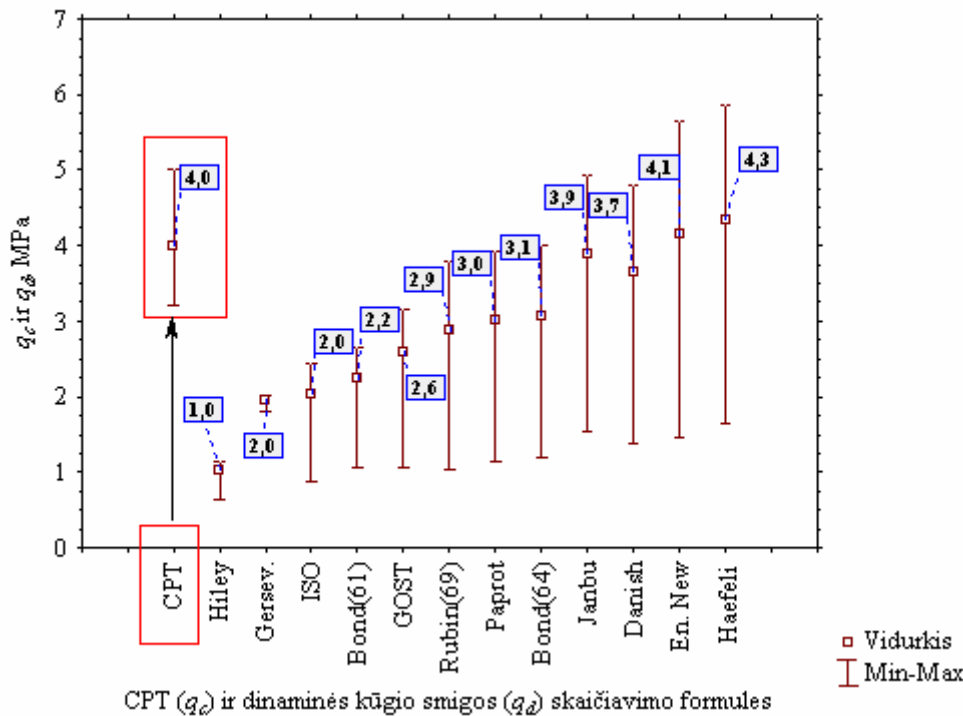
Nagrinėjami duomenys ir kalimo formulės	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	x_{min}	x_{max}	A	SEM	RSE	g_1	g_2
Pradinių skaičiavimo duomenų statistiniai rodikliai												
q_c – tikrosios vertės (MPa)	12	4,0	0,8	0,9	22,8	3,0	6,2	3,2	0,3	7,5	1,3	1,8
N_{DPL} – tikrosios vertės	12	16,8	41,3	6,4	38,4	4,0	23,0	19,0	1,9	11,3	-1,3	0,5
q_c – glodintos vertės (MPa)	12	4,0	0,4	0,7	16,7	3,2	5,0	1,8	0,2	5,0	0,5	-1,3
N_{DPL} – glodintos vertės	12	16,9	33,3	5,8	34,1	6,0	23,0	17,0	1,7	10,0	-1,1	-0,1
Dinaminės kūgio smigos (q_d, MPa) verčių, apskaičiuotų pagal įvairias kalimo formules, statistiniai rodikliai												
Engineering News	12	4,1	2,0	1,4	34,1	1,5	5,6	4,2	0,4	9,8	-1,1	-0,1
Dutch arba ISO 22476-2	12	2,0	0,3	0,6	27,9	0,9	2,4	1,5	0,2	10,0	-1,5	0,6
Hiley	12	1,0	0,03	0,2	18,0	0,6	1,1	0,5	0,05	5,0	-1,6	1,3
Janbu	12	3,9	1,4	1,2	30,5	1,6	4,9	3,4	0,3	7,7	-1,4	0,3
Danish	12	3,7	1,4	1,2	32,0	1,4	4,8	3,4	0,3	8,1	-1,2	0,1
Gersevanov	12	2,0	0,01	0,07	3,8	1,8	2,0	0,2	0,02	1,0	-1,4	0,6
Bondarik (1961)	12	2,2	0,3	0,6	26,2	1,0	2,7	1,6	0,2	9,1	-1,5	0,6
Bondarik (1964)	12	3,1	1,0	1,0	32,0	1,2	4,0	2,8	0,3	9,7	-1,2	0,0
Rubinshtein	12	2,9	0,9	1,0	33,5	1,0	3,8	2,8	0,3	10,3	-1,2	0,0
Haefeli	12	4,3	2,1	1,4	33,0	1,6	5,9	4,2	0,4	9,3	-1,1	-0,1
Paprot	12	3,0	1,0	1,0	32,4	1,1	3,9	2,8	0,3	10,0	-1,2	0,0
GOST 19912-2001	12	2,6	0,6	0,8	29,2	1,1	3,2	2,1	0,2	7,7	-1,4	0,5

Pastaba: statistinių rodiklių paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.



2.24 pav. Tikrosios ir suglodintos q_c ir N_{DPL} vertės, gautos zonduojant smulkų smėlį

Minimalios dinaminės kūgio smigos (q_d) aritmetinio vidurkio vertės (1,0 MPa), kai skaičiavimas atliktas pagal Hiley formulę, imties duomenų išsibarstymas aplink vidurkį taip pat yra minimalus ($A = 0,5$) (2.9 lentelė, 2.25 pav.). q_d aritmetinis vidurkis, apskaičiuotas pagal Gersevanov'o, ISO 22476-2:2005 ir Bondarik'o (1961) formules yra apie 2,0 MPa. Skaičiuojant pagal GOST 19912-2001, Rubinshtein'o (1969), Paprot'o, Bondarik'o (1964) formules, aritmetinis vidurkis kinta nuo 2,6 MPa iki 3,1 MPa, tačiau šių imčių duomenų minimumai ir maksimumai labai nutolę nuo vidurkio. Didžiausias, artimas kūgio spraudai (q_c) q_d vertes duoda Danish, Janbu, Engineering News, Cheifel formulės, tačiau šiais atvejais gaunamas ir didžiausias atstumas tarp minimalių ir maksimalių imties verčių (2.9 lentelė, 2.25 pav.). Reikia pastebėti, kad minimalios q_d vertės yra viršutinėje nagrinėjamo sluoksnio dalyje, ir pamažu einant gilyn jos didėja, nors, nagrinėjant statinio zondo kūgio spraudos vertes, tokio laipsniško verčių didėjimo nestebima, matyti tik chaotiškas verčių išsidėstymas imtyje.



2.25 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 0,0 iki 2,4 m)

2.10 lentelė. Pradinių skaičiavimo duomenų (q_c ir N_{DPL}) bei q_d statistinių rodiklių suvestinė lentelė (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 2,4 m iki 5,2 m)

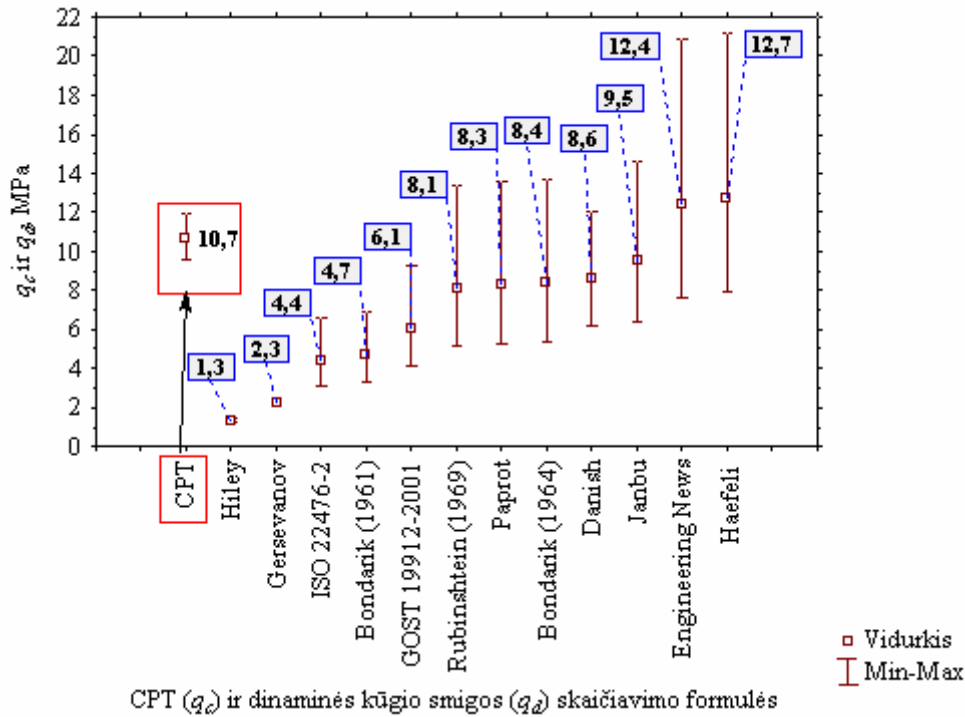
Nagrinėjami duomenys ir kalimo formulės	n	\bar{x}	S^2	S	Ω_x	x_{min}	x_{max}	A	SEM	RSE	g_1	g_2
Pradinių skaičiavimo duomenų statistiniai rodikliai												
q_c – tikrosios vertės (MPa)	14	10,7	1,0	1,0	9,4	9,2	12,2	3,0	0,3	2,8	-0,2	-1,2
N_{DPL} – tikrosios vertės	14	51,0	372,5	19,3	37,8	27,0	90,0	63,0	5,2	10,2	1,0	-0,1
q_c – glodintos vertės (MPa)	14	10,7	0,5	0,7	6,5	9,5	11,9	2,4	0,2	1,9	0,2	-0,7
N_{DPL} – glodintos vertės	14	50,8	330,7	18,2	35,8	31,3	85,0	53,8	4,9	9,6	0,9	-0,4
Dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) verčių, apskaičiuotų pagal įvairias kalimo formules, statistiniai rodikliai												
Engineering News	14	12,4	19,9	4,5	35,8	7,7	20,8	13,2	1,2	9,7	0,9	-0,4
Dutch arba ISO 22476-2:2005	14	4,4	1,4	1,2	26,8	3,1	6,6	3,5	0,3	6,8	0,9	-0,3
Hiley	14	1,3	0,0	0,05	4,1	1,2	1,4	0,2	0,0	0,0	0,3	-0,8
Janbu	14	9,5	7,6	2,8	29,1	6,4	14,6	8,2	0,7	7,4	0,9	-0,4
Danish	14	8,6	4,0	2,0	23,2	6,2	12,0	5,9	0,5	5,8	0,6	-0,8
Gersevanov	14	2,3	0,0	0,1	6,3	2,1	2,5	0,4	0,0	0,0	0,9	-0,4
Bondarik (1961)	14	4,7	1,4	1,2	25,7	3,3	6,9	3,6	0,3	6,4	0,9	-0,3
Bondarik (1964)	14	8,4	7,7	2,8	33,0	5,4	13,7	8,3	0,7	8,3	0,9	-0,3
Rubinshtein	14	8,1	7,5	2,7	33,8	5,1	13,3	8,2	0,7	8,6	0,9	-0,3
Haefeli	14	12,7	20,1	4,5	35,3	7,9	21,2	13,3	1,2	9,4	0,9	-0,4
Paprot	14	8,3	7,6	2,8	33,2	5,3	13,5	8,2	0,7	8,4	0,9	-0,3
GOST 19912-2001	14	6,1	2,9	1,7	27,9	4,1	9,3	5,2	0,5	8,2	0,9	-0,2

Pastaba: statistinių rodiklių paaiškinimai pateikti 2.1 lentelėje.

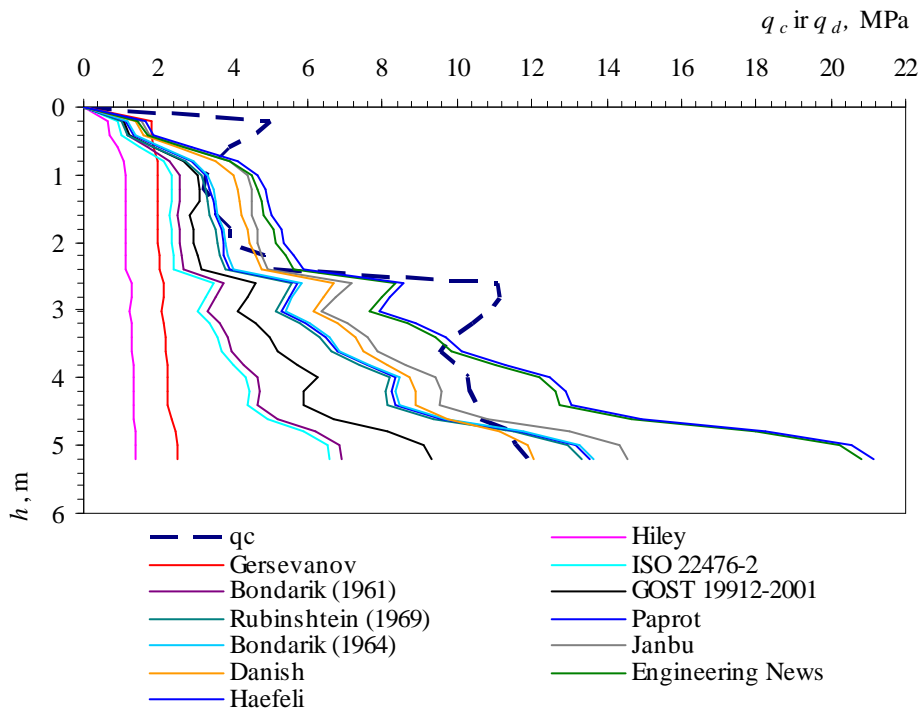
Analizuojant dinaminės kūgio smigos skaičiavimo duomenis nuo 2,4 m gylio, statistinių rodiklių verčių išsidėstymas (2.10 lentelė, 2.26 pav.) yra labai panašus į prieš tai nagrinėtą smėlio sluoksnį iki 2,4 m gylio (žr. 2.9 lentelę, 2.23 pav.). Aritmetinio vidurkio vertės kinta nuo 1,3 MPa iki 12,7 MPa. Mažiausią aritmetinį vidurkį turinčių imčių mažiausias ir duomenų išsibarstymas, ir atvirkščiai.

Dinaminės kūgio smigos (q_d) verčių grafikai turi atspindėti grunto elgseną dinaminės apkrovos atveju. Esant vienodoms gruntų savybėms, jo elgsena turi būti tokia pati. Grunto pasipriešinimas statinei kūgio spraudai (q_c) parodo grunto mechaninę elgseną statinės apkrovos atveju. Nagrinėjami du smulkaus smėlio sluoksniai statinei kūgio spraudai (q_c) priešinosi pakankamai vienodai: variacijos koeficientas iki 2,4 m gylio – 16,7, nuo 2,4 m gylio – tik 6,5. Tuo tarpu smūgių skaičiaus (N_{DPL}) vertės pamažu, zondui smingant gilyn, didėjo (žr. 2.24 pav.). Šį didėjimą lemia daug šalutinių veiksnių: zondo svorio didėjimas, trintis, geostatinis slėgis ir kt. Natūralu, kad q_d ir q_c grafikų forma bei tendencijos turi būti labai panašios, skirtis turi tik rodiklių vertės.

Analizuojant visą gylio intervalą (0,0–5,2 m), apskaičiuotų q_d duomenų grafikų forma neatkartojo kūgio spraudos (q_c) grafiko (2.27 pav.).



2.26 pav. Dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatai (smulkus smėlis; zondavimo gylis nuo 2,4 m iki 5,2 m)



2.27 pav. Kūgio spraudos (q_c) ir dinaminės kūgio smigos (q_d) grafikai (smulkus smėlis; DPL zondas)

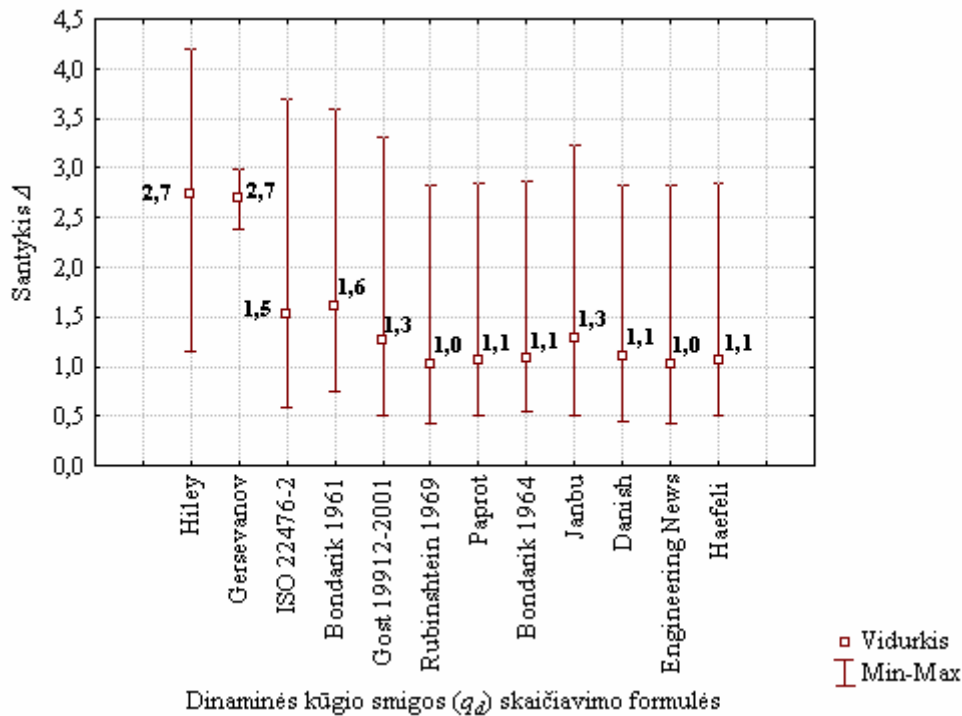
2.2.4. Dinaminės kūgio smigos smulkiame smėlyje invariantiškumo analizė

Dinaminės kūgio smigos invariantiškumui patikrinti buvo palyginti DPL ir DPSH-A zondų duomenys. Šiam palyginimui buvo pasirinktas smulkaus smėlio sluoksnis su labai artimomis mechaninėmis savybėmis (vertinimo matas q_c). DPL ir šalia esantis CPT zondai jau nagrinėti anksčiau (žr. 2.24 pav.). Toks pat zondas buvo sumodeliuotas (iš įvairių DPSH-A ir gretimai atliktų CPT) parenkant tokias pat q_c ir h bei jas atitinkančias N_{DPSH-A} vertes. Tokiu būdu sudarytų zondų duomenis galima lyginti tarpusavyje.

Invariantiškumo sąlyga išpildoma tuomet, kai smūgių skaičiaus santykis (Δ) (formulė (2.10)) yra lygus vienetui:

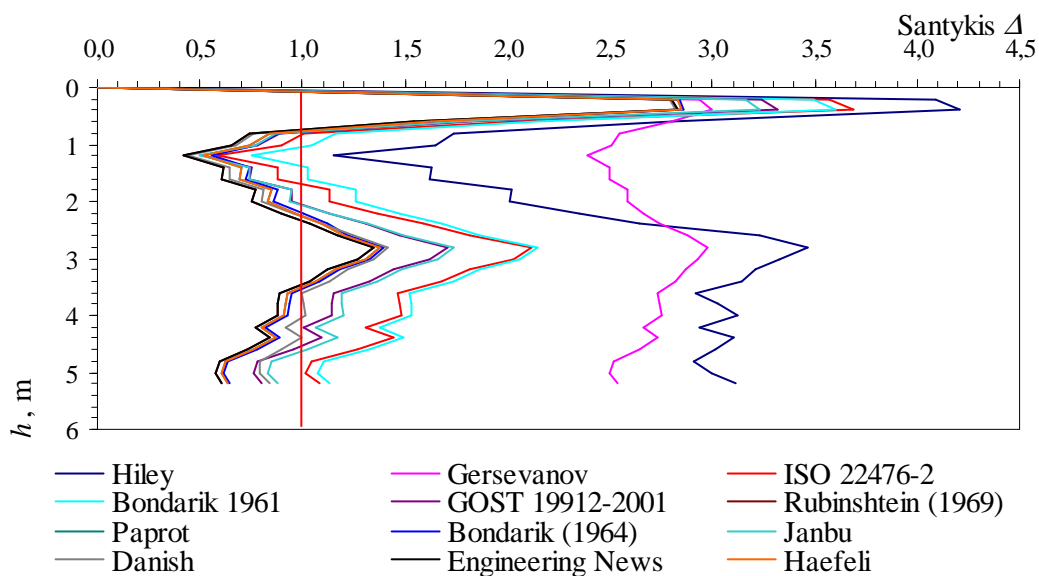
$$\Delta = \frac{q_{d(DPSH-A)}}{q_{d(DPL)}}. \quad (2.10)$$

Smulkaus smėlio sluoksnyje q_d rezultatų santykis (Δ) per visą tyrinėjamą gylį (nuo 0,0 iki 5,2 m) buvo įvairus.



2.28 pav. Santykio (Δ) verčių pasiskirstymas skaičiuojant pagal skirtingas kalimo formules

Apskaičiuoti q_d duomenų santykio (Δ) aritmetiniai vidurkiai kinta nuo 1,0 iki 2,7. Skaičiuojant pagal daugelį formulių, skaičiavimo vidurkiai buvo artimi vienetui (išskyrus Hiley ir Gersevanov'o formules), bet imties duomenų (min.–max.) išsibars- tymas buvo labai didelis (2.28 pav.). Aritmetinis vidurkis negali atspindėti duomenų invariantiškumo, nes jis priklauso nuo imties amplitudės (A), kuri parodo invariantiš- kumo lygmenį. Didžiausios santykio (Δ) vertės yra viršutinėje nagrinėjamo sluoksnio dalyje. Gilėjant jos mažėja, tačiau keičiantis sluoksnio savybėms ($q_c \sim 4,0$ MPa ir pe- reina į $q_c \sim 11,0$ MPa) santykio (Δ) vertės padidėja, o einant gilyn vėl ima mažėti. Skaičiavimo duomenys santykio $\Delta = 1,0$ ribą kerta įvairiose zondavimo gylio vietose (2.29 pav.).



2.29 pav. Santykio (Δ) verčių pasiskirstymas zondavimo gylio intervale skaičiuojant pagal skirtingas kalimo formules

2.3. Dinaminio zondavimo rodiklių patikimumo vertinimo rezultatai ir išvados

Lietuvoje tiek mokslinės institucijos, tiek įmonės, atlikdamos inžinerinius geologinius tyrimus, be CPT, naudoja dinaminį zondavimą (DPL ir DPSH (A ir B)). Atliekant duomenų interpretaciją pagal EN 1997-2:2007, labai svarbu suprasti, koks yra skirtumas tarp smūgių skaičiaus zonuojant tų pačių savybių gruntą skirtinga įranga. Europos normose pateikti pavyzdžiai, kaip pagal dinaminio zondavimo duomenis (smūgių skaičių) galima įvertinti grunto santykinį tankį (I_D), vidinės trinties kampą (φ) ir odometrinių deformacijų modulį (E_{OED}). Minėtoms savybėms įvertinti pateiktos lygtys

gali būti naudojamos tik tuo atveju, jei zonuota DPL arba DPH įranga, tačiau Lietuvoje dažniausiai naudojamas DPSH zondas.

Netiesiogiai skirtumus tarp smūgių skaičiaus galima įvertinti žinant kiekvieno zondo tipo savitąjį darbą (E_n) smūgio metu. Kuo didesnis smūgio metu atliekamas smūgio savitasis darbas (E_n), tuo mažesnis smūgių skaičius reikalingas zondui įsmigti į numatytą gylį. Didžiausias smūgių skaičius bus tuomet, kai grunto sluoksniai zonduojami DPL zondų, mažiausias – kai sluoksniai zonduojami DPSH–B zondų.

Atlikta duomenų analizė parodė, kad vidutiniškai smūgių skaičiaus skirtumas tarp DPL ir DPSH–A zondų yra ~ 74,0%, t.y. N_{DPL} buvo 74% didesnis už N_{DPSH-A} . Panašus (tik atvirkščias) skirtumas yra tarp savitojo zondavimo darbo (E_n) – 75,0%. Nustatytas santykinis sąsajos koeficientas (β'_A) yra 0,26. Reikia atkreipti dėmesį, kad smūgių skaičiaus sąsajos koeficientas (β'_A) galioja tik tuo atveju, kai zondavimo tarpsnis yra vienodas, t.y. kai skaičiuojamas smūgių skaičius tam pačiam gylio intervalui. Šiame darbe buvo analizuojamas smūgių skaičius, reikalingas zondui įkalti į 20 cm gylį (N_{20}), – tai buvo taikoma visų tipų zondams.

Detalesnė DPL ir DPSH–A zondų duomenų analizė leido išskirti skirtingus santykinius smūgių skaičiaus sąsajos koeficientus (β'_A) skirtingos genezės ir litologinės sudėties gruntams. Buvo nustatyta, kad smulkiuose gruntuose, didėjant rupios frakcijos kiekiui, santykinis sąsajos koeficientas taip pat didėja. Mažiausias jis būna, kai zonduojamas limnoglacialinis smėlingas dulkingas molis ir dulkingas molis (0,16), didžiausias – kai zonduojamas moreninis smėlingas molingas dulgis, smėlingas molis ir molingas dulgis (0,47). Rupiuose gruntuose stebima panaši situacija – kuo gruntas labiau rupėja, tuo santykinis koeficientas (β'_A) didėja: dulkingame smėlyje $\beta'_A = 0,13$, žvyre – $\beta'_A = 0,27$. Dažniausiai pasitaikančių gruntų atmainų santykiniai smūgio skaičiaus sąsajos koeficientai (β'_A) pateikti 2.2 lentelėje.

Smūgių sąsajos koeficientą (β'_A) galima nustatyti žinant koeficientą, kuris priklauso nuo gruntų granuliometrinės sudėties. Šis koeficientas (k) smulkiuose gruntuose kinta nuo 1 iki 4 ir priklauso nuo grunto granuliometrinės sudėties (žr. formulę (2.8), 2.7 pav.). Rupiuose gruntuose toks sąsajos koeficientas yra vyraujančios frakcijos dalelių dydis (d) (žr. formulę (2.9), 2.8 pav.).

Surinkti zondų duomenys leido įvertinti smūgių skaičiaus skirtumą limnoglacialinius smulkius gruntuos zonduojant DPL ir DPSH–B zondais. Savitojo darbo (E_n)

procentinis skirtumas tarp DPL ir DPSH–B zondų yra 79,0%, nustatytas smūgių skaičiaus skirtumas yra ~ 86,0%, todėl santykinis sąsajos koeficientas (β'_B) yra ~ 0,14.

Smūgių skaičiaus skirtumai tiriant limnoglacialinius smulkius gruntus buvo įvertinti ir tyrimams naudojant DPSH–A bei DPSH–B zondus. Savitojo darbo (E_n) skirtumas tarp šių zondų yra 18,0%, smūgių skaičiaus procentinis skirtumas – apie 10,0%., sąsajos koeficientas (β'_{AB}) yra ~ 0,9.

Dinaminio zondavimo duomenis galima vertinti ir naudojant netiesioginį rodiklį – dinaminę kūgio smigą (q_d , MPa). Tokį zondavimo duomenų pateikimą siūlo tarptautinis standartas ISO 22476-2:2005 ir NVS standartas GOST 19912-2001. Šiuose standartuose siūlomi dinaminės kūgio smigos skaičiavimai šiek tiek skiriasi: pavyzdžiui, ISO standarte pateiktame smūgio perdavimo koeficiento skaičiavime (pateikta Dutch kalimo formulė) smūgis nagrinėjamas kaip plastiškas, tuo tarpu GOST'e pateiktoje lygtyje smūgis nagrinėjamas kaip tampriai plastiškas. Be minėtų tarpautiniuose standartuose pateiktų dinaminės kūgio smigos skaičiavimo formulių, dar yra daug įvairių kalimo formulių, pagal kurias taip pat galima įvertinti grunto pasipriešinimą kūgio smigimui, veikiant jį dinamine apkrova (žr. 2.5 lentelę).

Dinaminės kūgio smigos palyginamieji skaičiavimai buvo atlikti analizuojant DPL ir DPSH–A zondų duomenis ir palyginus rezultatų skirtumus tarp minėtų zondavimo tipų (invariantiškumo įvertinimas). Tyrimams buvo pasirinktas smulkus (rišlus) glacialinis gruntas (smėlingas molingas moreninis dulkis) ir rupus gruntas (smulkus smėlis).

Apskaičiavus dinaminės kūgio smigos (q_d , MPa) vertes pagal DPSH–A zondo duomenis (skaičiavimams buvo naudojamas N_{DPSH-A}), gautus zonduojant smėlingą molingą moreninį dulkį, galima daryti išvadą, kad skirtumas tarp įvairiomis kalimo formulėmis apskaičiuotų rezultatų gana didelis: minimali q_d vertė yra 4,9 MPa (skaičiuota pagal Hiley formulę), maksimali q_d vertė 30,3 MPa (skaičiuota pagal Haefeli formulę). Procentinis skirtumas tarp minimalių ir maksimalių q_d verčių yra 84,0%. Kokia tikroji dinaminės kūgio smigos vertė, nežinoma, tačiau galima daryti prielaidą, kad q_d verčių pasiskirstymas zondavimo gylyje tam tikru santykiu turi atkartoti statinio zondo duomenų (q_c , MPa) vertes. Labiausiai atkartojantys q_c duomenų grafiką yra q_d grafikai, gauti skaičiuojant pagal Hiley ir Gersevanov'o formules (žr. 2.18 pav.). Skaičiuojant pagal tarptautiniuose standartuose GOST 19912-2001 ir ISO 22476-2:2005 pateiktas formules, skaičiavimo rezultatai panašūs (atitinkamai $q_d = 11,6 \div 12,7$

MPa), jų statistinių rodiklių pasiskirstymas taip pat panašus, tačiau gautų verčių grafikai labai skiriasi nuo q_c . Šie skaičiavimų rezultatai parodo, kad dinaminės kūgio smigos vertės yra jautrios smūgių skaičiui įtakos turintiems veiksniams (smūgio efektyvumui, gruntų šoninei trinčiai ir slėgiui). q_d skaičiavimo formulėse naudojami įvairūs šalutinių veiksnių įtakos mažinimo koeficientai, tačiau rezultatai rodo, kad jų vertės yra netikslios ir neatspindi realios situacijos zonuojant DPSH–A zonu smėlingą molingą moreninį dulkį.

Smulkaus smėlio dinaminio zondavimo DPSH–A zonu metu gautų tiesioginių duomenų (N_{DPSH-A}) perskaičiavimas į netiesioginį rodiklį q_d parodė, kad skirtumas tarp minimalaus ir maksimalaus vidurkio yra didelis: 4,5 MPa (pagal Hiley formulę) ir 20,9 MPa (pagal Haefeli formulę), – tai sudaro 78,0%. Zonduoto grunto statinės kūgio spraudos (q_c) vidurkis zondavimo intervale (7,0–15,6 m) yra 18,5 MPa. Pagal mažiausias q_d vertes (Hiley ir Gersevanov'o kalimo formulės) sudaryti grafikai neatspindi statinio zondo grafiko formos ir tendencijų (2.21 pav.). Pagal likusias formules apskaičiuotų dinaminio stiprio verčių grafikų formos yra panašios, tik skiriasi q_d aritmetiniai vidurkiai (8,6–20,9 MPa). Šių grafikų forma yra artima q_c , tik skiriasi polinkio kampas, kuris gilėjant krypsta mažesnių q_d verčių link. Statinio zondo grafike tokio bendro polinkio nėra. Artimiausi q_c savo forma ir bendra polinkio tendencija q_d grafikai yra tuomet, kai skaičiavimai atlikti pagal Engineering News ir Haefeli formules (žr. 2.21 pav.). Smulkiame smėlyje šoninė trintis ir slėgis į zondavimo štanagas yra nedidelis, todėl smūgių skaičiaus (N_{DPSH-A}) grafikas artimas q_c grafikui. Skaičiavimams naudotose formulėse (išskyrus Engineering News ir Haefeli formules) yra tam tikri koeficientai, kurie turi įvertinti įvairių veiksnių įtaką zondavimo duomenims. Smulkaus smėlio dinaminės kūgio smigos skaičiavimo duomenų analizė parodo, kad siūlomos koeficientų vertės yra netinkamos. Duomenų, gautų skaičiuojant pagal Engineering News ir Haefeli formules (jose nėra korekcijos koeficientų), statistiniai rodikliai ir grafikų forma yra artimiausi q_c .

Nagrinėjant skaičiavimo rezultatus, gautus vertinat DPL zondo duomenis smėlingame molingame moreniniame dulkyje, matyti, kad yra labai didelis skirtumas tarp skirtingomis formulėmis gautų q_d aritmetinio vidurkio verčių. Minimali vertė $q_d = 1,2$ MPa (skaičiuota pagal Hiley formulę), maksimali vertė $q_d = 8,0$ MPa (skaičiuota pagal Haefeli formulę). Šis skirtumas tarp minimumo ir maksimumo sudaro 85,0%. Labiausiai į q_c vertes tiek statistiniais rodikliais, tiek grafikų formomis panašūs duo-

menys gaunami, kai skaičiuojama pagal ISO 22476-2:2005 ir Bondarik'o (1961) siūlomas kalimo formules (žr. 2.8 lentelę, 2.23 pav.).

DPL zondo duomenų zonduojant smulkų smėlį perskaičiavimas į q_d vertes davė didelį aritmetinių vidurkių atotrūkį (q_d min. = 1,0 MPa, q_d max. = 4,3 MPa, – skirtumas 77,0%). Gautų duomenų statistiniai rodikliai iš dalies buvo panašūs į q_c (žr. 2.9 ir 2.10 lenteles, 2.25 ir 2.26 pav.), o grafikai – ne. Tačiau reikia pastebėti, kad q_c verčių minimumai ir maksimumai vertinamoje duomenų imtyje buvo išsidėstę chaotiškai, o q_d vertės imtyje išsidėstę tendencingai – nuo minimalių (zondo viršuje) iki maksimalių (zondo apačioje) (žr. 2.27 pav.).

DPL zondo duomenų analizė parodė, kad, kaip ir DPSH–A atveju, perskaičiuojant smūgių skaičių į q_d vertes, formulėse naudojami įvairūs koeficientai yra netikslūs ir neatspindi realaus grunto priešinimosi kūgio smigimui.

Zonduojant skirtingais zondais vienodus gruntus, gaunamas skirtingas smūgių skaičius, ir tai natūralu, nes skiriasi zondų matmenys. Kai kurių mokslininkų teigimu, smūgių skaičiaus perskaičiavimas į dinaminę kūgio smigą daro duomenis invariantiškais, t.y. nepriklausomais nuo naudojamos įrangos tipo. Atlikti smūgių skaičiaus (zonduojant smulkiame smėlyje DPL ir DPSH–A zondais) perskaičiavimai į q_d invariantiškumo neparodė. Nors skaičiuojant pagal daugelį formulių aritmetinis q_d vidurkis buvo artimas 1,0, tačiau buvo didelis duomenų išsibarstymas imtyje (žr. 2.28 pav.). Aritmetinis vidurkis negali parodyti invariantiškumo. Nagrinėjamų duomenų vertės imtyje turi būti artimos vidurkiui, o imties amplitudė turi artėti prie nulio ($A \rightarrow 0$).

Išnagrinėjus dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatus galima teigti, kad gautų verčių išsibarstymas yra labai didžiulis, statistiniai rodikliai taip pat išsibarsto nevienodai. Tokį gautų rezultatų nevienodumą lemia skirtingų korekcijos koeficientų naudojimas (arba jų visiškas nebuvimas). Skirtingi gruntai (smulkūs ir rupūs), veikiami dinaminės apkrovos, elgiasi skirtingai, todėl skaičiavimo formulėse naudojami duomenų korekcijos koeficientai turi priklausyti nuo zonduojamo grunto tipo. Tokie koeficientai yra panaudoti GOST 19912-2001, Bondarik'o ir Rubinshtein'o formulėse, tačiau norimo rezultato tai neduoda.

Pagrindinis visų kalimo formulių trūkumas tas, kad skaičiavimams naudojamas zondavimo energijos dydis yra teorinis, o tikrasis yra nežinomas. Energijos kiekis, perduotas į zondo kūgį, yra bene svarbiausias rodiklis, reikalingas tiksliam q_d ap-

skaičiavimui. Turimomis formulėmis to įvertinti negalima, nes perduodant energiją dalyvauja labai daug veiksnių, kurie iškraipo pradinės suteiktos energijos dydžius.

Tikrus perduodamos energijos ir energijos, tenkančios kūgiui, dydžius galima nustatyti matavimais bei taikant vienmatės bangos sklidimo tampriame kūne skaičiavimo teoriją.

Apibendrinus aukščiau pateiktus tyrimo ir skaičiavimo rezultatus, dėl nepakankamo dinaminės kūgio smigos (q_d) verčių patikimumo tolesniuose skaičiavimuose bus naudojamas tik smūgių skaičius (N_x), atsižvelgiant į naudojamos įrangos tipą ir įvertinat zondavimo gylį.

3. SMŪGIŲ SKAIČIUI ĮTAKOS TURINČIŲ VEIKSNIŲ ANALIZĖ

3.1. Smūgio efektyvumas

Dinaminio zondavimo duomenų patikimumui įtakos turi smūgio efektyvumas (η). Smūgių skaičius (N_x), gautas zondavimo metu, neatspindi tikro grunto pasipriešinimo kūgio smigimui. Analizuojant lauko tyrimų duomenis, būtinai reikia įvertinti ir smūgio efektyvumo įtaką duomenims. Šiuo metu galiojančiuose tarptautiniuose dinaminio zondavimo standartuose ISO 22476-2:2005 ir GOST 19912-2001 smūgių skaičiaus efektyvumas tiesiogiai nenagrinėjamas ir nėra pasiūlyta, kaip jį koreguoti. Mėnuose standartuose smūgio efektyvumo įtaka yra vertinama tik tuomet, kai skaičiuojama dinaminė kūgio smiga (q_d arba p_d). Dinaminio zondavimo metu plakto smūgis gali būti nuo artimo plastiškam (kai smūgio atsistatymo koeficientas (n) artėja prie 0) iki artimo absoliučiai tampriam (kai n artėja prie 1). Smūgio pobūdis priklauso nuo zondavimo įrangos ir nuo zonduojamo grunto savybių. Standarte ISO 22476-2:2005 pateiktame smūgio efektyvumo skaičiavime (formulė (3.1)) yra panaudota Karno teorema plastiškajam smūgiui, o GOST 19912-2001 pateiktame skaičiavime (formulė (3.2)) naudojama tampriai plastiško smūgio išraiška:

$$\eta_{ISO} = \frac{m}{m + m'}; \quad (3.1)$$

$$\eta_{GOST} = \frac{m + n^2 \cdot m'}{m + m'}; \quad (3.2)$$

čia η_{ISO} ir η_{GOST} – smūgio efektyvumas atitinkamai pagal ISO 22476-2:2005 ir GOST 19912-2001, vnt. d.; m – plakto masė, kg; m' – zondavimo štangų ir priekalo masė, kg; n – smūgio atsistatymo koeficientas (paprastai priimama $n = 0,56$).

Smūgis, artimas plastiškam, bus tuo atveju, kai zonduojami silpni gruntai ir po smūgio neįvyksta plakto atšokimo. Tampriai plastiškas smūgis būna tuomet, kai plaktas po smūgio į priekalą atšoka. Koks bebūtų silpnas gruntas, visiškai plastiško smūgio (žr. formulę (3.1)) niekada negali būti. Smūgio atsistatymo koeficientas priklauso ne tik nuo susiduriančių paviršių savybių, bet ir nuo grunto. Formulėje (3.2) smūgio atsistatymo koeficientas ($n = 0,56$) yra toks, kuomet susiduriantys kūnai yra plieni-

niai, o zondas yra standžiai įtvirtintas (nuo smūgio gruntas nezonduojamas). Dinaminio zondavimo atveju smūgio atsistatymo koeficientas turi priklausyti ne tik nuo susiduriančių kūnų savybių, bet ir nuo grunto savybių. Pateiktuose skaičiavimuose (žr. formules (3.1) ir (3.2)) neįvertinami tokie svarbūs zondavimo sistemos veiksniai: plakto smogiančiosios dalies ir priekalo plotai, zondavimo štangų sujungimai ir jų svyravimai po smūgio, tampriosios smūgio bangos sklidimas zondavimo štangomis ir plaktu.

Smūgio suteiktos energijos kiekiui įvertinti ir jos perėjimui per štangas į kūgį, o vėliau – ir į gruntą nustatyti reikalingi specialūs tyrimai bei jų analizė, pagrįsti vienmatės bangos sklidimo teorija (apie tai plačiau kalbėta 1 skyriuje).

Vienmatės bangos sklidimo tampriame kūne teoriją dinaminiam zondavimui (standartiniam zondavimui SPT) taikė nemažai mokslininkų, kurie pateikė supaprastintus smūgio efektyvumo skaičiavimus. J. H. Schmertmann'as, C. Fairhurst'as ir A. Palacios'as pateikė smūgio efektyvumo skaičiavimo lygtį (3.3), kurioje yra atsižvelgiama į susiduriančių kūnų savybes ir matmenų skirtumus. Y. Yokel'is smūgio efektyvumui skaičiuoti siūlo naudoti modifikuotą S. Timošenko sprendinį (3.4) (Savidis, Müller, 2007; Odebrecht, 2003):

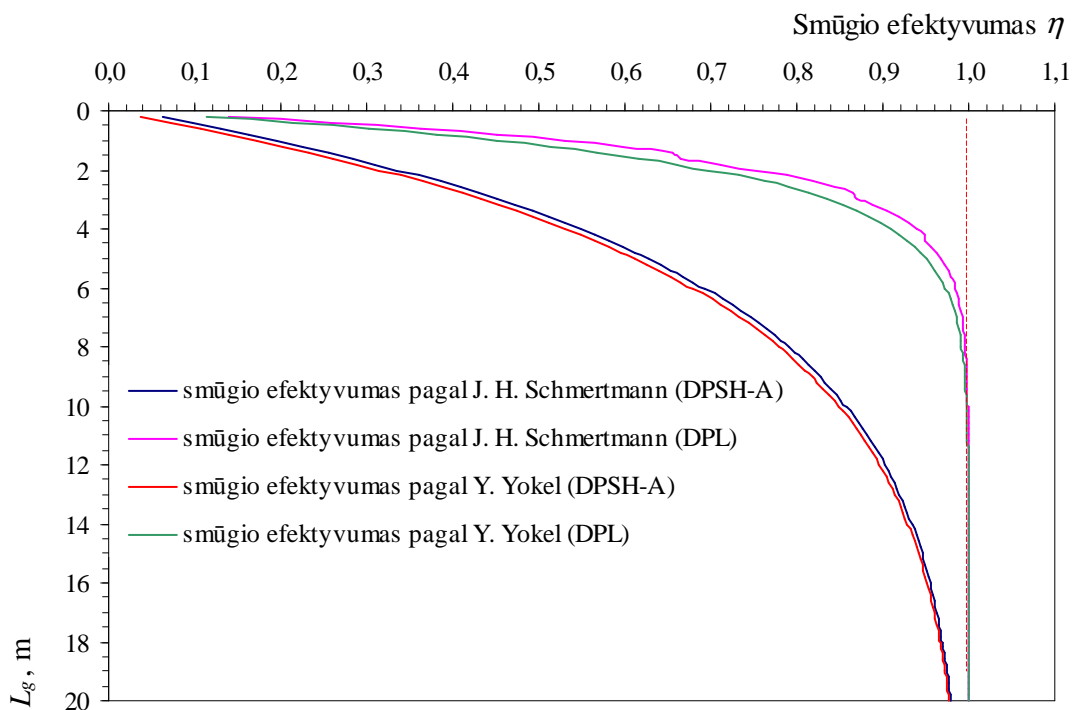
$$\eta^S = (1 - K^n) + \left(\frac{L_g}{L_h} - n \right) \cdot \frac{4 \cdot r \cdot K^n}{(1 + r^2)}; \quad (3.3)$$

$$\eta^Y = E_i^*(t) = 1 - e^{-\frac{2m_g}{M}}; \quad (3.4)$$

čia η^S ir η^Y – smūgio efektyvumas atitinkamai pagal J. H. Schmertmann'o ir kt. bei Y. Yokel'io sprendinius; r – plakto ir zondavimo štangų impedansų santykis; K – energijos netekimo koeficientas dėl įrangos tamprumo savybių; n – teigiamas sveikas skaičius, kuris priklauso nuo plakto ir zondavimo štangų ilgio (3.5); $E_i^*(t)$ – zondavimui sunaudota energijos dalis; m_g – zondavimo štangų masė, kg; M – plakto masė, kg; L_g – zondavimo štangų ilgis, m; L_h – plakto ilgis, m.

$$\frac{L_g}{L_h} \geq n > \frac{L_g}{L_h} - 1. \quad (3.5)$$

Remiantis aukščiau pateiktomis formulėmis (3.3) ir (3.4), galima apskaičiuoti smūgio efektyvumą, priklausantį nuo zondavimo gylio (h , m) arba nuo zondavimo štangų ilgio (L_g) DPL ir DPSH–A zondams (3.1 pav.).



3.1 pav. Smūgio efektyvumas priklausomai nuo zondavimo tipo ir pasirinktos skaičiavimo metodikos

Atlikti smūgio efektyvumo skaičiavimai rodo, kad, zonduojant DPL zonu, pirmuose metruose (iki 6 m gylio) ne visa smūgio energija perduodama į zondavimo štangą (žr. 3.1 pav.), – dalis energijos grįžta atgal į plaktą. Zondavimo štangoms ilgėjant, smūgio efektyvumas didėja. Skaičiuojant pagal Y. Yokel'io (žr. formulę (3.4)) arba pagal J. H. Schmertmann'o, C. Fairhurst'o ir A. Palacios'o (žr. formulę (3.3)) sprendinius, rezultatai yra labai panašūs. Smūgio efektyvumas artimas vienetui, skaičiuojant pagal abi formules, sutampa ir yra ties 6 m riba. R. Müller (2007) savo tyrimuose tikrino Y. Yokel'io sprendinio patikimumą, tyrimus atlikdama DPL ir DPH zondais. Jos paskelbti rezultatai parodė, kad teorinis sprendinys (žr. formulę (3.4)) yra artimas praktiniams rezultatams ir galioja, kai zondavimo metu yra visiškai pašalinama zondavimo štangų trintis į gruntą.

Zonduojant gruntus DPSH–A zonu, iki 20 m gylio tik dalis plakto suteiktos energijos patenka į štangą (žr. 3.1 pav.). Zondui ilgėjant, zondavimo efektyvumas didėja.

Aukščiau pateikti skaičiavimai rodo, kad zonduojat vienodų savybių gruntus viršutinėje pjūvio dalyje smūgių skaičius bus didesnis nei gilesniuose sluoksniuose. Ši sąlyga galioja, kai zondavimo štangų neveikia gruntų šoninis slėgis ir nėra trinties į gruntus.

Įprastai zonduojant nuo žemės paviršiaus vienodos sudėties ir savybių gruntus smūgių skaičius, zondui gilėjant, po tuputį didėja. Šį didėjimą lemia energijos nuostoliai, kurie atsiranda dėl štangų trinties į gruntą ir dėl jų tarpusavio sujungimų.

3.2. Zondavimo štangų trintis į gruntą, jos įtaka smūgių skaičiui

Dinaminio zondavimo metu zondavimo štangos trinasi į gruntus. Šiai trinčiai įveikti sunaudojama dalis plakto suteiktos energijos, kuri skirta kūgiui įveikti gruntų pasipriešinimą. Kuo didesnis zondavimo energijos kiekis sunaudojamas trinčiai įveikti, tuo didesnis būna smūgių skaičius.

Šoninės trinties įtakai smulkiuose gruntuose nustatyti buvo atlikti tyrimai, kurių metu buvo zonduoti smėlingas molingas dulkis (saciSi), vidutinio rupumo smėlis (MSa) ir smėlinga dulkingas molis (sasiCl) (3.2 pav.).

Smėlingas molingas dulkis ir vidutinio rupumo smėlis zondavimo vietoje slūgso iki 3,0–5,0 m gylio nuo žemės paviršiaus. Rupaus ir smulkaus grunto sluoksnių pasiskirstymas yra kaitus. Šiame gylio intervale šoninės trinties įtaka nebuvo analizuojama.

3.1 lentelė. Tyrimuose naudoto moreninio smėlingo dulkingo molio granulimetrinė sudėtis (Urbaitis, 2009)

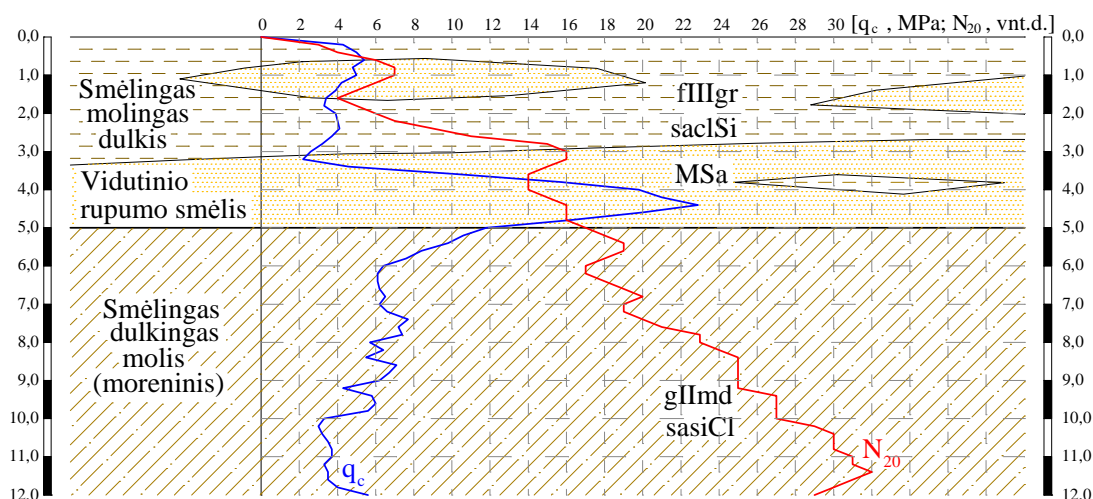
Gylis, m	Dalelių kiekis, %								Grunto pavadinimas pagal LST EN ISO 14688-2
	>2,0	2,0-0,6	0,6-0,2	0,2-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	<0,002	
6,3–6,5	4,73	5,84	19,78	31,60	16,30	9,30	4,50	7,90	Smėlingas dulkingas molis
10,4–10,6	4,24	5,53	16,73	30,19	16,30	10,70	5,60	10,70	Smėlingas dulkingas molis
11,6–11,8	5,24	5,34	18,76	33,30	16,10	9,30	3,90	8,10	Smėlingas dulkingas molis

Šoninės štangų trinties į gruntą vertinimas buvo atliekamas tik moreniniame smėlingame dulkingame molyje (sasiCl). Grunto granulimetrinė sudėtis pateikta

3.1 lentelėje, gamtinio drėgnio (w), sankibos (c), vidinės trinties kampo (φ) ir deformacijos modulio (E) vertės – 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Tyrimuose naudoto moreninio smėlingo dulkingo molio gamtinio drėgnio (w), sankibos (c), vidinės trinties kampo (φ) ir deformacijos modulio (E) vertės (Urbaitis, 2009)

Gylis, m	w , %	c , kPa	φ , °	E , MPa
4,7–4,9	10,50	35	37	17,5
5,8–6,0	---	37	34	15,5
6,3–6,5	---	44	23	20,7
7,3–7,5	11,54	---	---	---
8,0–10,0	10,71–10,87	47	29	19,1
10,8–11,0	11,27	37	34	23,3

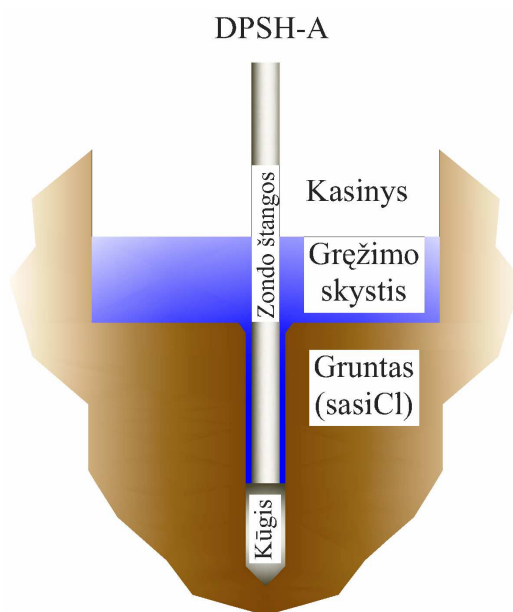


3.2 pav. Atlikto eksperimento vietos geologinė situacija ir CPT bei DPSH–A zondu apibendrinti duomenys

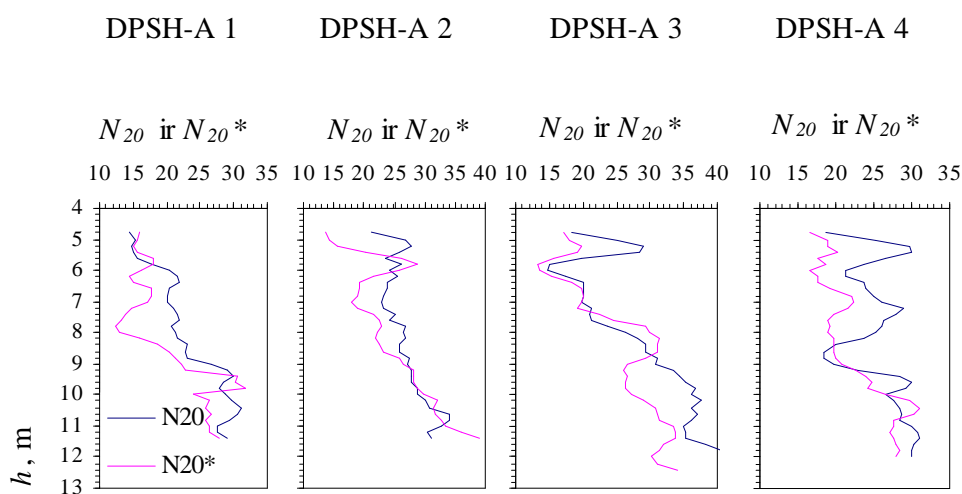
Eksperimento metu šoninės trinties įtakai įvertinti zondai buvo kalami nuo žemės paviršiaus nesiimant papildomų priemonių ir smūgių skaičius buvo skaičiuojamas kas 20 cm zondavimo gylio (N_{20}). Šalia minėtų zondu buvo kasami kasiniai (iki 20 cm gylio), kurie buvo užpildomi specialiu skysčiu (grėžimo skysčiu), sukeliančiu tepimo efektą. Nuo kasinių dugno buvo kalami dinaminiai zondai ir skaičiuojamas smūgių skaičius (N_{20}^*). Kalimo metu į kasinį buvo pastoviai papildomai įpilama grėžimo skysčio, kuris zondavimo metu patekdavo į tuštumą, susidaranti tarp zondo štangų sienelių ir grunto. Eksperimente naudotas skystis yra tarsi tepalas, sutepantis štangų sieneles ir sumažinantis trintį kontakte su gruntu (3.3 pav.). Iš viso tyrimų me-

tu buvos sukaltos keturios DPSH–A zondų poros. Kaip jau buvo minėta, tyrimų vietoje geologinis pjūvis buvo labai kaitus (žr. 3.2 pav.), todėl zondų duomenys buvo analizuojami tik nuo 5 m gylio (3.4 pav.).

Atliktų tyrimų rezultatų analizė parodė, kad dinaminio zondavimo metu, panaudojus gręžimo skystį, smūgių skaičius (N_{20}^*) sumažėja, – kai kur skirtumas buvo iki 12 smūgių. Tačiau vidutiniškai smūgių skaičius (N_{20}^*) sumažėjo 4–5 smūgiais (3.5 pav., A), t.y. skirtumo tarp N_{20} ir N_{20}^* vidurkis sudarė apie 16% (3.5 pav., B; 3.3 lentelė).



3.3 pav. Eksperimento su DPSH–A zonu ir gręžimo skysčiu atlikimo schema

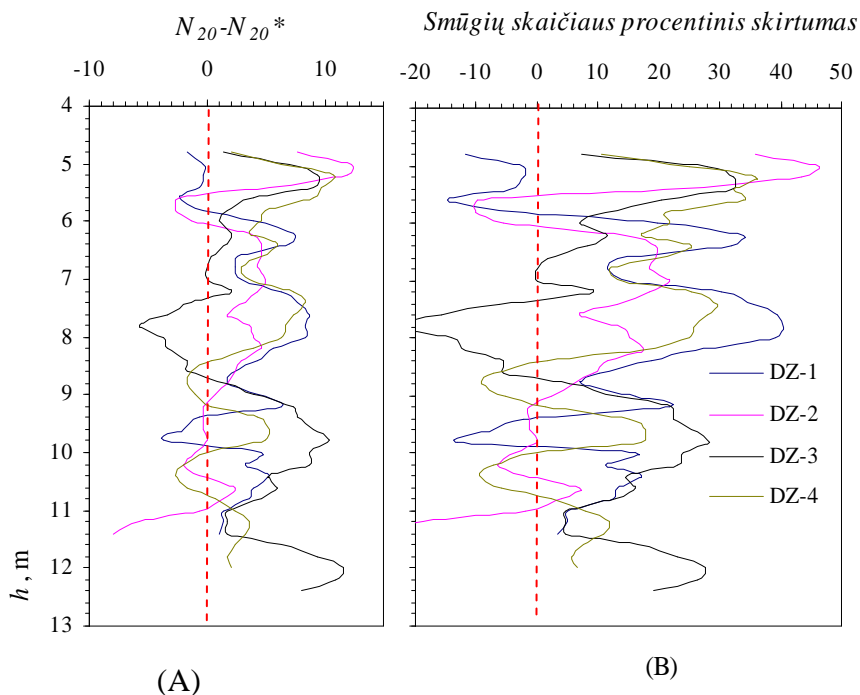


3.4 pav. Šoninės trinties įtakos eksperimento dinaminio zondavimo duomenys

3.3 lentelė. Smūgių skaičiaus N_{20} ir N_{20}^* aritmetinis ir procentinis skirtumai zonduojant moreninį smėlingą dulkingą molį

Ver- tės*	1		2		3		4		Vidurkis	
	$N_{20}-N_{20}^*$	%	$N_{20}-N_{20}^*$	%	$N_{20}-N_{20}^*$	%	$N_{20}-N_{20}^*$	%	$N_{20}-N_{20}^*$	%
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maks.	9	40,3	12	46,3	12	32,2	11	36,0	11	39,0
Vid.	4	17,4	4	14,5	5	15,7	5	16,9	4	16,0

* į minimalių, maksimalių ir vidutinių verčių skaičiavimą nebuvo įtrauktos neigiamos skirtumo ($N_{20}-N_{20}^*$) ir neigiamos procentinės vertės.

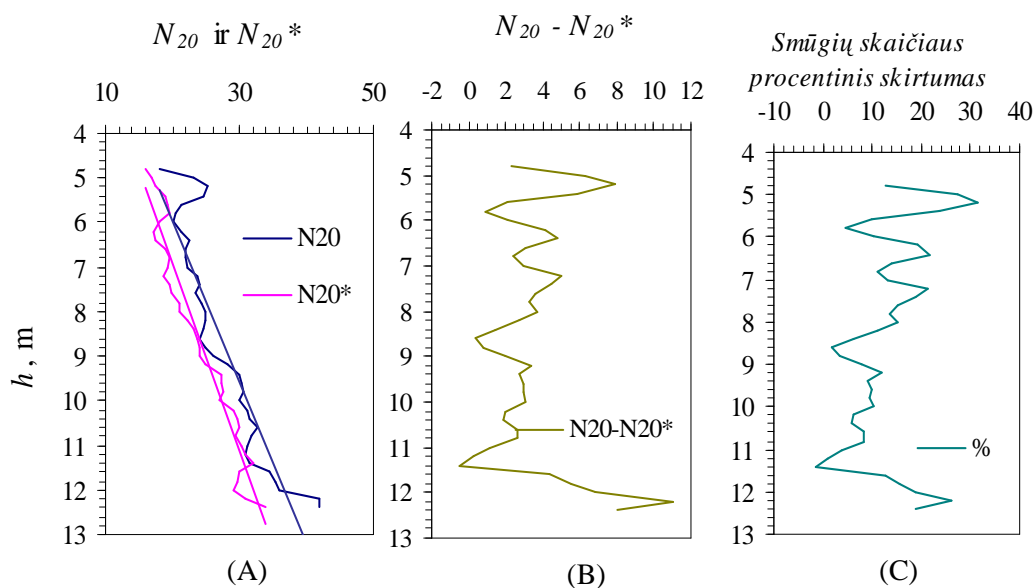
3.5 pav. Smūgių skaičiaus N_{20} ir N_{20}^* aritmetinis (A) ir procentinis (B) skirtumai

Kadangi visame tyrimų plote ir nagrinėjamoje pjūvio dalyje vyrauja panašių savybių smėlingas dulkingas moreninis molis, tai iš turimų dinaminio zondavimo duomenų galima apskaičiuoti vidurkį ir pateikti tai viename grafike, kuris visiškai atspindi zondavimo štangų šoninės trinties į gruntus įtaką duomenims (3.6 pav., A, B, C).

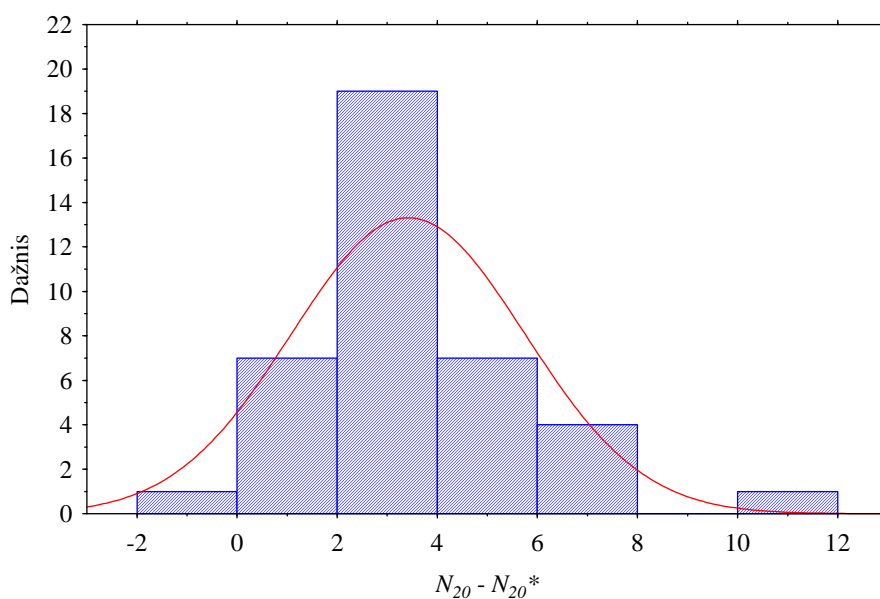
Vidutinių verčių dažnių statistinė analizė leidžia daryti prielaidas, kad zondavimo metu naudojant gręžimo skystį smūgių skaičius sumažėjo trimis smūgiais (3.7 pav.). Vertinant procentinį skirtumą tarp N_{20} ir N_{20}^* , smūgių skaičius sumažėja nuo 5% iki 20% (3.8 pav.), vidutiniškai – apie 12,5%.

Gautų duomenų analizė parodė, kad nepaisant tarp grunto ir zondavimo štangų esančio tarpo, kuris atsiranda dėl zondavimo štangų ($\varnothing 32$ mm) ir kūgio ($\varnothing 45$

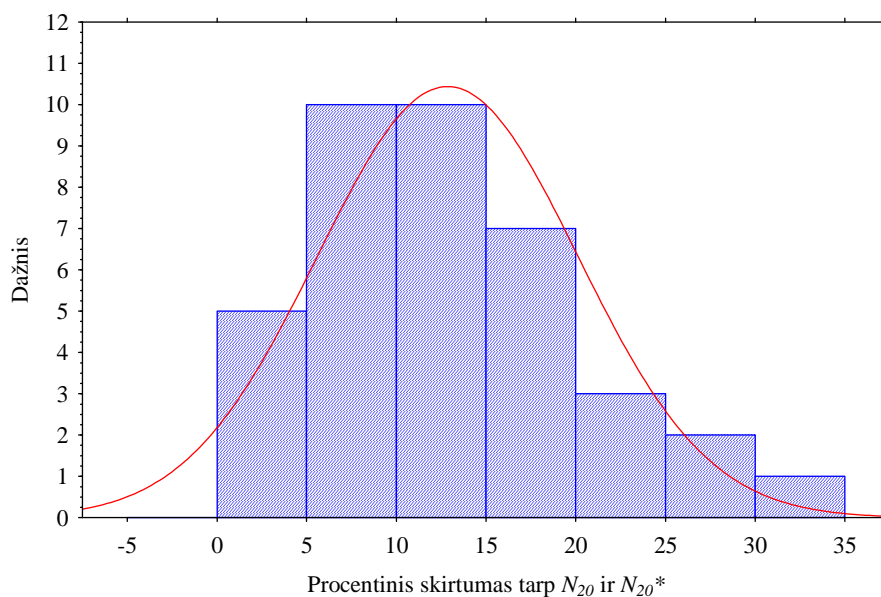
mm) skersmenų skirtumo (santykis 0,7), zondojuojant smulkiuose gruntuose smūgių skaičiui (N_{20}) įtakos turi trintis. Šiai trinciai įveikti sunaudojama dalis plakto smūgio energijos, kurios procentinė išraiška lygi smūgių skaičiaus procentiniams skirtumams. Vidutinių verčių grafiko analizė (žr. 3.6 pav.) parodė, kad vidutiniškai 5–20% smūgio energijos sunaudojama trinčiai įveikti (sunaudojamos energijos vidurkis – 12,5%).



3.6 pav. Dinaminio zondavimo (DPSH–A) taškų (Nr. 1, 2, 3, 4) vidutinių verčių grafikai



3.7 pav. Smūgių skaičiaus (N_{20} ir N_{20}^*) aritmetinių skirtumų dažnių histograma

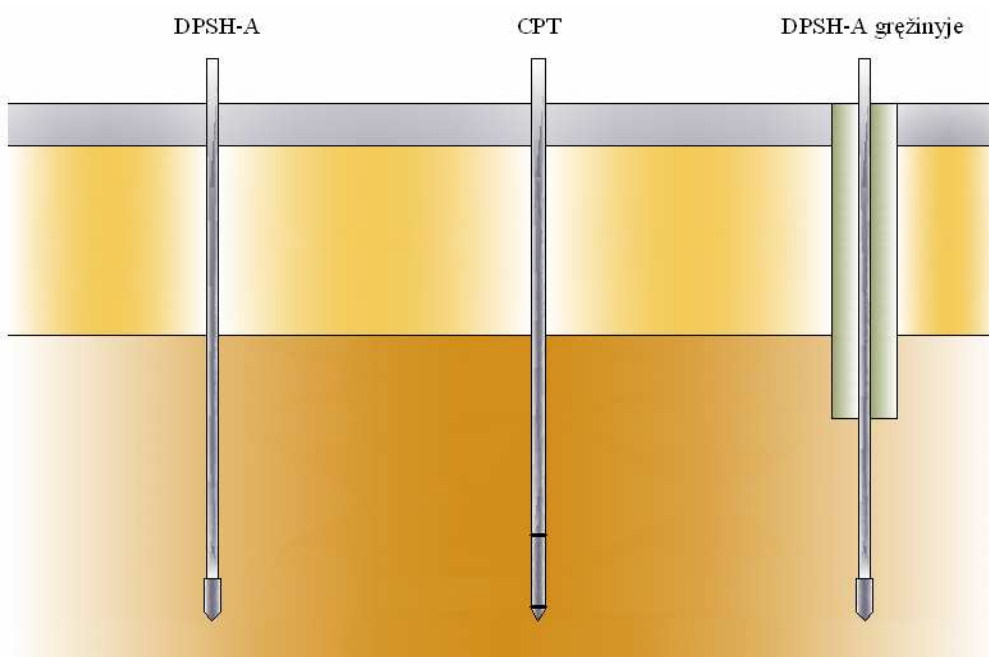
3.8 pav. Smūgių skaičiaus (N_{20} ir N_{20}^*) procentinių skirtumų dažnių histograma

3.3. Grunto geostatinio slėgio įtaka smūgių skaičiui

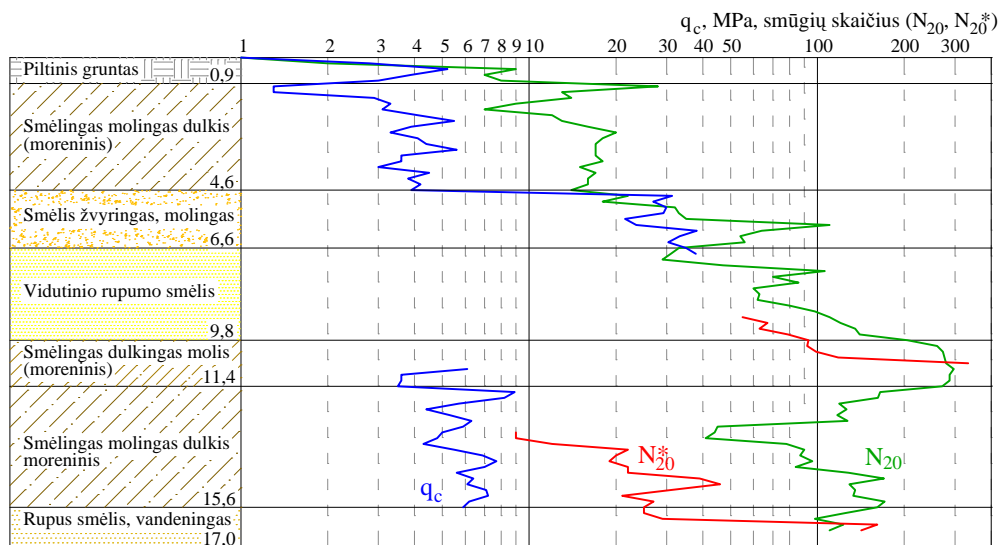
Dinaminiu zonu zonuojant gruntu pastebėta, kad kai grunto storumė vienalytė, smūgių skaičius gilėjant po truputį didėja. Toks smūgių skaičiaus didėjimas ypač ryškus zonuojant smulkius gruntu. Rupiuose gruntuose šis padidėjimas nežymus. Didžiaja dalimi ši zonavimo rezultatų iškraipymą sukelia gruntu šoninis geostatinis slėgis, dėl kurio įtakos gruntu apspaudžia zonavimo štangas. Šiam slėgiui įveikti sunaudojama dalis plakto suteiktos energijos, dėl to į kūgį perduodamas vis mažesnis energijos kiekis, – tai ir nulemia smūgių skaičiaus (N_x) didėjimą.

Šoninio geostatinio slėgio įtakai smūgių skaičiaus vertėms ištirti buvo atlikti bandymai. Šių bandymų metu vienas zondas buvo kalamas nuo žemės paviršiaus, o gretimai su tarpiniu gręžimu buvo kalamas kitas (buvo ardomas prazonuotas gruntu sluoksnis). Tarp dinaminių zonu gruntu stiprumui įvertinti buvo atliktas statinis zonavimas (CPT) (3.9 pav.). Tyrimai atlikti naudojant DPSH–A zondą.

Tyrimų vietoje iki 0,9 m gylio slūgsojo piltinis gruntu (tIV). Po juo iki tyrimų metu pasiekto gylio (17,0 m), slūgsojo kraštiniai glacialiniai dariniai (gtIIIb1) – moreninis smėlingas molingas dulkis (iki 4,6 m), molingas žvyringas smėlis (iki 6,6 m), vidutinio rupumo smėlis (iki 9,8 m), moreninis smėlingas dulkingas molis (iki 11,4 m), moreninis smėlingas molingas dulkis (iki 15,6 m) ir rupus vandeningas smėlis (iki 17,0 m) (3.10 pav.).



3.9 pav. Gruntų šoninio geostatinio slėgio įtakos smūgių skaičiui nustatymo schema



3.10 pav. Tyrimų vietoje esančių gruntų geologinis pjūvis, CPT ir DPSH-A zondavimų duomenys

Smulkaus grunto gamtinis drėgnis (w), plastingumo rodiklis (I_P), takumo rodiklis (I_L) ir konsistencijos rodiklis (I_C) pateikti gruntų fizikinių savybių lentelėje (3.4 lentelė). Rupių gruntų granulimetrinė sudėtis pateikta 3.5 lentelėje.

3.4 lentelė. Geostatinio slėgio įtakos tyrime naudotų smulkių gruntų fizikinės savybės

Bandinio Nr.	Gylis, m	w, %	I_p	I_L	I_C	Konsistencija
1	1,1–1,3	14,4	8,73	0,04	0,96	Standi
2	3,2–3,4	14,6	7,26	0,19	0,81	Standi
3	10,3–10,5	15,4	10,06	-0,05	1,05	Labai standi
4	12,5–12,7	14,0	2,63	-0,52	1,52	Labai standi

3.5 lentelė. Geostatinio slėgio įtakos tyrime naudotų rupių gruntų granulimetrinė sudėtis

Bandinio Nr.	Gylis, m	>2,0	2,0–0,6	0,6–0,2	0,02–0,06	<0,06	Grunto pavadinimas
1	4,8	31,07	37,68	14,07	8,78	8,40	grSa
2	7,8	3,75	7,39	68,96	17,82	2,08	MSa
3	8,8	3,01	9,52	62,48	21,65	3,04	MSa

Tyrimų metu zonduojant statiniu zonu (CPT) buvo atsiremta į labai tankų smėlį, dėl to buvo pragręžta iki moreninio smėlingo dulkingo molio sluoksnio ir zonuota toliau. Nepertraukiamai visa geologinė storumė buvo zonuota dinaminio zonu (DPSH-A). Dinaminis zonavimas su pragrėžimu (zonavimas nuo gręžinio dugno) buvo atliekamas dviejuose gylio intervaluose: nuo 9,0 m iki 10,6 m (smėlio sluoksnis ir dalis moreninio smėlingo dulkingo molio) ir nuo 13,0 m iki 16,4 m (moreninis smėlingas molingas dulgis ir dalis rupaus smėlio) (3.10 pav.).

Nagrinėjant gautus tyrimo rezultatus galima pastebėti, kad CPT zondo duomenys, zonduojant per moreninį smėlingą molingą dulkį (iki 4,6 m), buvo tolygūs ir kito nedaug (vidurkis $q_c \sim 4,0$ MPa). Panašios formos grafikas gautas ir zonduojant DPSH-A zonu (vidurkis $N_{20} \sim 16$). Zonduojant molingą žvyringą smėlį tiek CPT, tiek ir DPSH-A zondais gautos duomenų vertės kito nuo minimalių (sluoksnio kraige) iki maksimalių (sluoksnio pade). Vidutinio rupumo smėlio sluoksnis CPT zonu nebuvo zonuotas, o DPSH-A zondo duomenų (N_{20}) vertės ženkliai didėjo. Smūgių skaičius (N_{20}) maksimumą pasiekė zonduojant smėlingą dulkingą moreninį molį ($N_{20} \sim 278$), nors pagal CPT duomenis šio sluoksnio pasipriešinimas statinei kūgio spraudai sudarė tik apie 3,6 MPa ($q_c \sim 3,6$ MPa). Zonduojant giliau ir pasiekus smėlingo molingo moreninio dulgio sluoksnį, smūgių skaičius (N_{20}) staigiai sumažėjo (q_c vidurkis yra $\sim 8,5$ MPa, smūgių skaičiaus vidutinės vertės $N_{20} \sim 163$). Mažėjant statinei kūgio spraudai (q_c), mažėjo ir smūgių skaičius: kai $q_c \sim 5,5$ MPa, $N_{20} \sim 122$; kai $q_c \sim 4,5$ MPa, $N_{20} \sim 43$. Statinei kūgio spraudai (q_c) padidėjus iki 6,5 MPa ir zonavimo tarpsnyje (nuo 13,6 m iki 15,6 m) išliekant vienodai (imties verčių sklaida apie vidur-

kį sudaro iki 15%), smūgių skaičius (N_{20}) tame pačiame gylio intervale ženkliai padidėjo: viršutinėje nagrinėjamo intervalo dalyje $N_{20} \sim 87$, apatinėje – $N_{20} \sim 166$.

Vertinant q_c ir N_{20} verčių santykius, gautus zonduojant moreninį smėlingą molingą dulkę (iki 4,6 m gylio), buvo gauta, kad jis yra 0,27. q_c ir N_{20} santykis, kai zonduota molingame žvyringame smėlyje, buvo 0,95. Tų pačių rodiklių verčių santykis zonduojant smėlingame dulkingame moreniniame molyje buvo 0,01, smėlingame molingame moreniniame dulkyje kito nuo 0,13 iki 0,04.

Atlikus 63 dinaminių zondų (DPSH-A) ir šalia jų atliktų CPT verčių santykių (q_c/N_{20}) analizę nustatyta, kad moliniuose gruntuose zonduojant iki 6,0 m gylio šis santykis kinta nuo 0,20 iki 0,31, o zonduojant gylio intervale nuo 13,0 m iki 17,0 m, šis santykis kinta nuo 0,05 iki 0,17. Rupių gruntų zondavimo duomenų analizė leidžia teigti, kad q_c ir N_{20} santykis kinta nuo 1,4 iki 0,7 atitinkamai, santykio vertės gilėjant mažėja (tiesinė lygtis).

Ši santykių analizė parodo, kad gilesniuose sluoksniuose slūgsančių gruntų horizontalus geostatinis slėgis vis smarkiau slegia dinaminio zondavimo štangas, ir tai turi įtakos smūgių skaičiaus (N_{20}) didėjimui, nors zonduojamo sluoksnio savybių kaita yra nežymi.

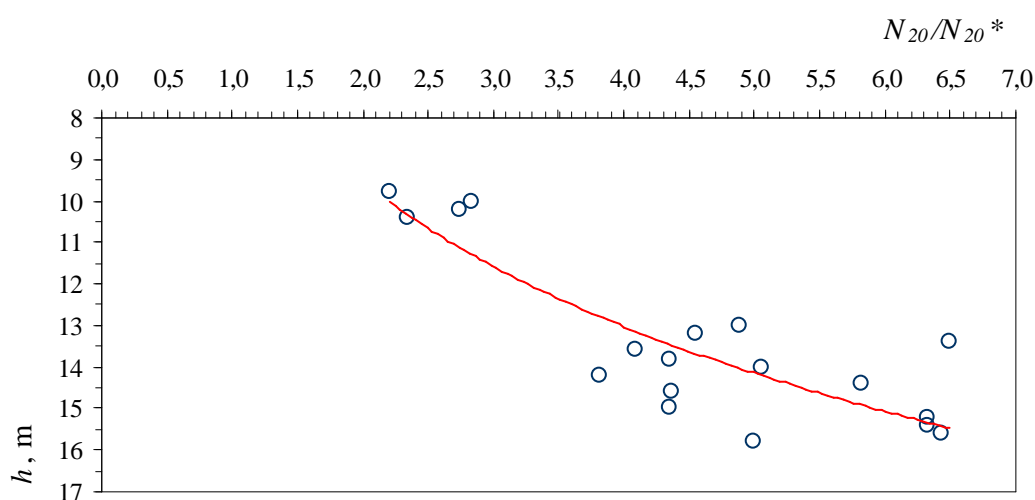
Tyrimų vietoje atliktas dinaminis zondavimas (DPSH-A) nuo grėžinio dugno (žr. 3.9 ir 3.10 pav.) aiškiai parodo grunto horizontalaus geostatinio slėgio įtaką zondavimo duomenims. Zonduojant nuo grėžinio dugno (nuo 8,8 m iki 9,6 m gylio) vidutinio rupumo smėlį, smūgių skaičius (N_{20}^*) vidutiniškai buvo tik ~ 66 , kai tuo tarpu zonduojant nuo žemės paviršiaus ir pasiekus minėtą gylį $N_{20} \sim 126$, – smūgių skaičiaus santykis (N_{20}/N_{20}^*) sudaro 1,9 karto. Pasiekus smėlingą dulkingą moreninį molį (9,6 m–10,4 m gylio intervalas), smūgių skaičius $N_{20}^* \sim 95$, o $N_{20} \sim 270$, jų santykis – apie 2,8. Pragręžus giliau, buvo vėl zonduojama nuo grėžinio dugno (nuo 12,8 m gylio). Zonduotame smėlingame molingame moreniniame dulkyje smūgių skaičiaus santykis (N_{20}/N_{20}^*) buvo ~ 5 . Šiame matavimų tarpsnyje galima pastebėti, kad mažesnės santykio vertės buvo viršutinėje sluoksnio dalyje, didesnės – apatinėje.

Santykio tarp smūgių skaičiaus (N_{20}/N_{20}^*) pokytis per visą zondavimo gylį moliniame grunte turi logaritminę priklausomybę (3.11 pav.), koreliacijos koeficientas $R = 0,87$. Remiantis šia priklausomybe gauta lygtis (3.6), pagal kurią galima apskaičiuoti apytikslį smūgių skaičių (N_{20}^*), kuris būtų, jei zonduotume nuo grėžinio

dugno. Toks pakoreguotas smūgių skaičius labiau atspindi smulkių gruntų stiprumines savybes ir leidžia tiksliau įvertinti nagrinėjamą geologinį pjūvį.

$$N_{20}^* = \frac{N_{20}}{0,5911 \cdot e^{0,1483 \cdot h}}, \quad (3.6)$$

čia N_{20}^* – smūgių skaičius, pakoreguotas dėl geostatinio slėgio įtakos ir pritaikytas DPSH–A įrangai; N_{20} – smūgių skaičius, gautas zonduojant smulkius gruntuos DPSH–A dinaminio zondų; h – zondavimo gylis, m.



3.11 pav. Smūgių skaičiaus zonduojant nuo žemės paviršiaus (N_{20}) ir nuo gręžinio dugno (N_{20}^*) santykio (N_{20}/N_{20}^*) priklausomybė nuo zondavimo gylio (h)

Rupaus gruntų smūgių skaičiaus pokytis dėl horizontalaus geostatinio slėgio įtakos tyrimų metu buvo įvertintas tik iš dalies. Pagal gautus rezultatus 8,8–9,6 m gylio intervale smūgių skaičius skyrėsi ~50%. Papildomų duomenų analizė, kur buvo nagrinėjamas kūgio spraudos ir smūgių skaičiaus santykis (q_c/N_{20}), leidžia teigti, kad tokiaame gylio intervale N_{20} gali padidėti iki 10–20%, tačiau kai geologiniame pjūvyje virš smėlinio grunto slūgso molinis gruntas, smūgių skaičiaus pokytis gali siekti iki 50% arba daugiau. Tai priklauso nuo rupaus ir aukščiau slūgsančio smulkaus grunto savybių (apie tai bus kalbama 4 skyriuje).

3.4. Smūgių skaičiaus patikimumo analizės rezultatai ir išvados

Dinaminio zondavimo metu gautas smūgių skaičius (N_{20}) neatspindi realių zonduoto grunto stipruminių savybių. Šio rodiklio (N_{20}) vertės priklauso ne tik nuo grunto fizikinių ir mechaninių savybių, bet ir nuo naudojamos įrangos specifikos, t.y. nuo plakto suteiktos pradinės smūgio energijos (E_{smg}) ir nuo energijos kiekio smaigalyje ($E_{kūg}$). Smūgio efektyvumą arba energijos dalį, tenkančią zondui, galima apskaičiuoti pagal formules (3.3) ir (3.4), tačiau zondavimo darbai turi būti atlikti pašalinus grunto trinties ir geostatinio slėgio įtaką.

Tyrimais nustatyta, kad smulkiuose gruntuose zondavimo štangų šoninio paviršiaus trintis į gruntus atima ~ 12,5% energijos, kuri gali tekti kūgio smaigaliui. Tyrimų vietoje dėl šios priežasties smūgių skaičius apytiksliai padidėjo 4–5 smūgiais. Zonduojant silpnuose smulkiuose gruntuose, toks, nors ir nedidelis, energijos nuostolis gali labai iškreipti rezultatus (N_{20}).

Didelę įtaką dinaminio zondavimo duomenims turi gruntų šoninis geostatinis slėgis. Rupiuose gruntuose ši įtaka yra mažiau pastebima. Analizuojant zondavimo duomenis ir skaičiuojant kūgio spraudos (pagal CPT) ir smūgių skaičiaus (pagal DPSH-A) santykį (q_c/N_{20}), buvo stebimas santykio kitimas einant gilyn: santykis 8,0–10,0 m gylio intervale buvo nuo 10% iki 20% mažesnis, lyginant su santykiu 1,0–2,0 m gylyje. Santykio mažėjimas einant gilyn yra tiesinis arba artimas tiesiniam. Eksperimento metu zonduojant rupaus grunto sluoksnyje smūgių skaičius N_{20} (zonduota nuo žemės paviršiaus) buvo apie 2 kartus didesnis už smūgių skaičiaus N_{20}^* vertes (zonduota nuo gręžinio dugno), t.y. smūgių skaičiaus procentinis skirtumas buvo ~ 50%. Tokį didelį smūgių skaičiaus santykį (N_{20}/N_{20}^*) lėmė virš rupaus grunto sluoksnio slūgsantis moreninio smėlingo molingo dulkių sluoksnis, kurio storis buvo apie 4,0 m. Atsižvelgiant į aukščiau minėtus tyrimo ir skaičiavimo rezultatus galima teigti, kad dinaminio zondavimo rezultatai rupiuose gruntuose gilėjant didėja pagal tiesinę lygį, ir nuo 8,0 m iki 10,0 m gylyje procentinis skirtumas sudaro 10–20%. Kai zonduojamos storumės geologinis pjūvis yra kaitus ir virš rupių gruntų yra smulkių gruntų sluoksnis, smūgių skaičius (N_{20}) gali būti iki 50% ir dar didesnis, lyginant su smūgių skaičiumi, kuris būtų, jei zondavimo štangų neveiktų horizontalus geostatinis slėgis.

Tyrimai ir įvairių kitų zondų analizė rodo, kad smulkiuose (rišliuose) gruntuose šoninio slėgio įtaka yra labai didelė. Smūgių skaičius (N_{20}) apytiksliai didėja loga-

ritminės kreivės ribose, nors zonduojamo grunto fizikinės ir mechaninės savybės geologiniame pjūvyje mažai kinta. Logaritminį pokytį lemia smulkių gruntų gebėjimas išlaikyti sieneles, kurios atsiranda tarp zondavimo štangų ir grunto. Atsiradusi ertmė pagal duomenų analizės rezultatus išlieka iki 4,0–5,0 m, vėliau dėl horizontalaus geostatinio slėgio ši ertmė sumažėja, ir gruntas ima slėgti štangas. Didėjantis slėgis tuo pat metu didina trintį ir mažina energijos perdavimą į kūgį. Pagal tyrimo rezultatus, nuo 13,0 iki 16,0 m gylio zonduojant smėlingame molingame moreniniame molyje santykis tarp smūgių skaičiaus (N_{20}) ir smūgių skaičiaus (N_{20}^*) yra ~5,0, – tai sudaro apie 80% pradinės energijos netekimo (smūgių skaičius N_{20} išauga iki 80%). Toks didelis smūgių skaičiaus skirtumas gali turėti lemiamos įtakos smulkaus grunto savybių įvertinimui, todėl skaičiuojant pagal formulę (3.6) galima apytiksliai įvertinti (koreliacijos koeficientas $R = 0,86$), koks būtų smūgių skaičius (N_{20}^*), jei zonduojant būtų pašalintas geostatinis slėgis arba tikrasis grunto pasipriešinimas kalamo zondo smigimui.

4. DINAMINIO IR STATINIO ZONDAVIMO RODIKLIŲ TARPUSAVIO SĄSAJOS

4.1. Tyrinėti gruntai ir sąsajų tarp DPT ir CPT rodiklių paieškos metodika

4.1.1. Tyrinėti gruntai ir jų suskirstymas į analizuojamas grupes

Šiame skyriuje aptartas koreliacinis ryšys tarp CPT rodiklio – kūgio spraudos (q_c) – ir DPT rodiklio – smūgių skaičiaus (N_x). Ryšiui nustatyti buvo nagrinėjami DPL ir DPSH–A zondais gauti duomenys įvairiose Lietuvos vietose: Vilniaus, Klaipėdos, Kretingos, Pabradės ir Visagino apylinkėse. Dinaminis ir statinis zondavimas buvo atliktas įvairios litologinės sudėties ir skirtingos genezės gruntuose. Didžiąją nagrinėtų gruntų dalį sudarė viršutinio pleistoceno Nemuno svitos Baltijos ir Grūdų posvičių limnoglacialiniai, fluvioglacialiniai ir glacialiniai smulkūs ir rupūs gruntai. Gilesniais zondais (iki 30 m) buvo gauta informacija apie vidurinio pleistoceno Medininkų svitos fluvioglacialinius ir glacialinius gruntuos. Visi šie gruntai Lietuvoje paprastai būna tiek sekliųjų, tiek giliųjų pamatų pagrindais ir yra pagrindinis inžinerinių geologinių tyrimų objektas.

Viršutinio pleistoceno Nemuno svitos Baltijos ir Grūdų posvičių bei vidurinio pleistoceno Medininkų svitos fluvioglacialinius rupius gruntuos sudarė dulkingas, smulkus, vidutinio rupumo ir rupus bei žvyringas smėlis (4.1 lentelė). Zonduojant kai kur buvo aptikta žvyro sluoksnių. Rupių gruntų tankumas buvo įvairus: nuo labai pu-
raus iki labai tankaus.

Viršutinio pleistoceno Nemuno svitos Baltijos ir Grūdų posvičių limnoglacialinius gruntuos sudarė įvairios konsistencijos smulkus gruntuos: smėlingas molingas dulkis, smėlingas dulkis, dulkis, dulkingas molis, smėlingas dulkingas molis (4.2 lentelė).

Baltijos, Grūdų posvičių ir Medininkų svitos glacialiniai gruntai buvo įvairios konsistencijos moreninis smėlingas dulkingas molis ir moreninis smėlingas molingas dulkis (4.3 lentelė). Šie gruntai tyrimų vietose daugiausia buvo nuo kietai plastingos iki kietos konsistencijos, tačiau pasitaikė ir silpnų takiai bei minkštai plastingų gruntų.

4.1 lentelė. Rupių gruntų apibendrinta granulimetrinė sudėtis (Rachimovas, 2007)

Grėžinio Nr.	Bandinio gylis, m	Granulimetrinė sudėtis					Grunto pavadinimas
		Gr	CSa	MSa	FSa	Si, Cl	
		> 2,0	2,0–0,6	0,6–0,2	0,2–0,06	< 0,06	
TR–28	1,0–2,8	8,71	11,17	44,32	34,34	1,46	MSa
TR–29	1,0–2,6	2,36	8,44	67,48	19,76	1,96	MSa
TR–91	2,4–2,6	1,12	18,99	18,80	53,05	8,04	FSa
TR–91	0,4–0,5	3,36	8,49	53,01	32,65	2,49	MSa
TR–92	0,6–0,7	4,89	14,45	34,45	44,26	1,95	FSa
TR–92	2,1–2,7	3,48	20,97	39,55	31,24	4,76	MSa
TR–93	0,4–0,9	9,99	15,88	31,04	37,71	5,38	FSa
TR–93	1,5–2,0	8,77	27,86	29,15	27,15	7,07	CSa
TR–97	0,4–0,9	9,69	15,88	36,95	32,10	5,38	MSa
TR–98	0,5–0,9	0,30	19,20	27,51	48,19	4,80	FSa
TR–99	0,6–1,3	1,70	13,08	40,81	37,28	4,06	FSa
TR–104	1,9–2,4	6,81	16,67	34,84	39,69	1,99	FSa
TR–120	1,0–1,4	3,48	14,97	44,94	31,85	4,76	MSa
TR–120	2,3–2,7	28,63	16,30	29,19	23,85	1,95	GrSa
TR–123	3,2–3,5	1,84	10,93	42,06	42,75	2,42	FSa
TR–124	0,3–0,8	8,77	21,83	29,15	33,18	7,07	FSa
PBD–1	1,4–1,6	3,56	15,76	34,59	44,19	1,90	FSa
PBD–1	2,3–2,5	2,84	17,97	36,15	40,07	2,97	FSa
BJR	2,9–3,1	3,36	8,49	53,00	32,66	2,49	MSa
BND–7	3,4–3,6	6,32	13,74	35,84	41,87	2,23	FSa
ZJN–1	1,9–2,1	3,71	12,67	32,09	48,11	3,42	FSa
ZJN–2	2,5–2,7	4,63	12,89	40,53	37,17	4,78	MSa

Pastaba: Gr – žvyras; CSa – rupus smėlis; MSa – vidutinio rupumo smėlis; FSa – smulkus smėlis; Si, Cl – dulcis ir molis.

4.2 lentelė. Smulkių limnoglacialinių gruntų fizikinės savybės (Urbaitis, 2007)

Eil. Nr.	Grėžinio Nr.	Bandinio paėmimo gylis, m	Kietų dalelių tankis ρ_{ss} , g/cm ³	Gamtinis drėgmė w , %	Takumo drėgnis w_L , %	Plastingumo drėgnis w_P , %	Plastingumo rodiklis I_P , %	Takumo rodiklis I_L	Grunto pavadinimas
1	TR–91	1,4–1,6	2,68	11,83	13,75	10,33	3,42	0,44	saclSi
2	TR–95	0,9–1,1		18,02	18,23	15,25	2,98	0,93	saclSi
3	TR–97	1,3–1,4		16,08	17,23	14,52	2,71	0,58	saclSi
4	TR–124	1,6–1,8		9,34	12,56	10,04	2,52	-0,28	saclSi
5	TR–104	0,6–0,8		3,19	7,45	6,22	1,23	-2,46	saSi
6	TR–95	0,8–1,0		13,95	13,99	12,39	1,60	0,97	saSi
8	TR–28	2,8–3,0		13,93	14,98	12,00	2,98	0,65	Si
7	TR–62	1,2–1,4	2,61	15,80	21,49	10,97	10,52	0,46	siCl
9	TR–62	0,6–0,9	2,68	12,70	19,67	10,78	8,89	0,22	sasiCl
10	TR–62	1,9–2,1	2,65	17,79	21,25	14,09	7,16	0,52	sasiCl
11	TR–62	2,2–2,3	2,66	19,41	23,76	16,79	6,97	0,38	sasiCl
12	TR–102	0,6–0,8		8,22	19,37	7,59	11,78	0,05	sasiCl
13	TR–104	1,2–1,4		10,97	22,43	12,05	10,38	-0,10	sasiCl
14	TR–93	2,2–2,5		16,66	20,79	11,87	8,92	0,54	sasiCl

Pastaba: saclSi – smėlingas molingas dulcis; saSi – smėlingas dulcis; Si – dulcis; siCl – dulkingas molis; sasiCl – smėlingas dulkingas molis.

4.3 lentelė. Smulkių glacialinių gruntų fizikinės savybės (Urbaitis, 2007)

Eil. Nr.	Gręžinio Nr.	Gylis, m	$\rho_s, \text{g/cm}^3$	$w, \%$	$w_L, \%$	$w_P, \%$	$I_P, \%$	I_L
Smėlingas dulkingas molis (moreninis) (sasiCl)								
1	TR-64	0,9-1,4	2,67	9,85	22,80	14,96	7,84	-0,65
2	TR-92	1,9-2,1		17,40	22,56	11,96	10,60	0,51
3	TR-64	0,5-0,7	2,66	13,99	21,78	13,54	8,24	0,05
4	TR-64	1,2-1,4	2,67	12,61	20,83	13,12	7,71	-0,07
5	TR-64	1,5-1,7	2,67	7,09	22,24	11,77	10,47	-0,45
6	TR-62	3,0-3,1	2,66	11,58	18,57	11,09	7,48	0,07
7	B-9	3,60	2,67	14,74	21,22	11,23	9,99	0,35
8	B-3	4,80	2,56	14,03	22,43	12,08	10,35	0,19
9	TR-82	2,7-3,1		13,70	21,17	11,89	9,28	0,20
10	TR-82	1,5-1,7		8,91	22,34	10,55	11,79	-0,14
11	TR-85	0,5-0,7		11,20	19,45	12,23	7,22	-0,14
12	TR-95	1,9-2,2		16,45	18,45	11,20	7,25	0,72
13	TR-95	2,4-2,7		14,56	19,23	10,96	8,27	0,44
Smėlingas molingas dulgis (moreninis) (saciSi)								
1	TR-64	1,4-1,6	2,71	10,07	17,52	14,80	2,72	-1,74
2	G-2	5,0	2,64	11,14	14,62	12,40	2,22	-0,57
3	Z-2	1,5	2,65	14,05	20,70	17,89	2,81	-1,37
4	TR-105	0,7-1,1		7,23	11,29	8,13	3,16	-0,28
5	TR-121	2,0-2,3		8,90	14,12	9,56	4,56	-0,14
6	TR-91	1,4-1,6	2,68	11,83	13,75	10,33	3,42	0,44

Pastaba: grunto savybių rodiklių reikšmės pateiktos 4.2 lentelėje.

Duomenų analizės metu rupūs gruntai nebuvo skaidomi į atskiras grupes pagal jų tankumą. Analizuojant DPL zonu gautus duomenis, visi rupūs gruntai buvo nagrinėjami kartu. DPSH-A zondavimo rezultatai buvo rūšiuojami pagal zonuotų gruntų granulimetrinę sudėtį: atskirai išskirtas dulkingas smėlis, sujungti smulkus ir vidutinio rupumo smėlis, sujungti rupus bei žvyringas smėlis.

Smulkūs gruntai duomenų analizės metu buvo skirstomi pagal jų genezę, atskirai išskiriant limnoglacialinius ir glacialinius gruntuos. Analizuojant DPL zonu duomenis, atskirai buvo nagrinėjamas moreninis smėlingas dulkingas molis ir moreninis smėlingas molingas dulgis; limnoglacialiniai gruntai buvo sujungti į vieną grupę. Analizuojant DPSH-A zonu duomenis, smulkių gruntų suskirstymas į grupes buvo detalesnis: moreninis smėlingas dulkingas molis ir moreninis smėlingas molingas dulgis buvo skirstomi pagal CPT kūgio spraudos (q_c) vertes. Limnoglacialinių gruntų grupėje analizei buvo išskirtas molis, smėlingas dulkingas molis ir įvairaus rupumo dulgis, kurie buvo detalčiau suskirstyti pagal CPT kūgio spraudos (q_c) vertes.

4.1.2. Sąsajų tarp DPT ir CPT zondavimo rodiklių paieškos metodika

Sąsajoms tarp DPT ir CPT rodiklių nustatyti iš viso buvo panaudota 100 zondavimo porų, iš kurių 35 DPL–CPT ir 65 DPSH–A–CPT. Tyrimų gylis buvo įvairus ir priklausė nuo naudojamo dinaminio zondo tipo ir zonduojamo grunto savybių. Zonduojant DPL zonu, tyrimų gylis siekė iki 7,0 m, zonduojant DPSH–A, – iki 30,0 m. Šioje duomenų analizėje iš viso buvo panaudota ~4030 duomenų porų (N_x poroje su q_c), iš kurių ~530 DPL–CPT ir ~3500 DPSH–A–CPT.

Prieš pradėdant duomenų analizę, visi turimi zondais (DPT ir CPT) gauti rezultatai buvo glodinami slenkamųjų vidurkių metodu, – tai leido iš dalies pašalinti atsitiktinį „triukšmą“, kuris atsiranda dėl grunte esančio žvirgždo ir gargždo bei skirtingų savybių grunto lęšių ar nedidelių sluoksnių. Paruošti zondų duomenys buvo rūšiuojami į atskiras duomenų aibes pagal gruntus, atsižvelgiant į zondavimo gylį (gruntų grupių išskyrimo principai pateikti 4.1.1 poskyryje). Gavus duomenų aibes, buvo atliekama sąsajų ir koreliacinio ryšio tarp DPT ir CPT rodiklių paieška.

Duomenų koreliacijai buvo pasirinkti trys rodikliai: N_x (DPT), q_c (CPT) ir gylis (h), kuriame gauti duomenys nagrinėjami. Trimatė duomenų koreliacijai supaprastinti buvo apskaičiuojamas q_c ir N_x santykis (formulė (4.1)), kuris leido duomenis nagrinėti dvimatėje sistemoje, t.y. stebėti santykio (α_x) kaitą įvairiuose gyliuose (h):

$$\alpha_x = \frac{q_c}{N_x}, \quad (4.1)$$

čia formulėje (4.1) prie rodiklių esantis indeksas (x) skaičiavimo metu buvo keičiamas nagrinėjamo zondo tipo pavadinimu (DPL arba DPSH–A).

Turimos santykio (α_x) verčių aibės (išskirtos atskiriems gruntams) papildomai buvo filtruojamos nuo atsitiktinių verčių. Ši filtracija buvo atliekama naudojant pasikartojančių verčių dažnių metodą. Po galutinės filtracijos buvo atmetama iki 20% atsitiktinių verčių. Duomenų filtracijos efektyvumui nustatyti buvo skaičiuojamos pagrindinių statistinių rodiklių vertės.

Tokiu būdu sutvarkyti duomenys buvo analizuojami trimis etapais, artėjant prie geriausios koreliacijos koeficiento (R) vertės. Pirmojo etapo metu koreliacija buvo atliekama su visa duomenų aibe, kur buvo stengiamasi nustatyti tam tikrą ryšį tarp

nagrinėjamų rodiklių (tarp α_x ir h), duomenis aproksimuojančios kreivės kryptį ir pobūdį. Visa duomenų sklaidos diagrama leidžia išskirti nebūdingas tam tikram gyliui santykio vertes.

Antrojo etapo metu visa nagrinėjama duomenų aibė buvo suskaidyta į atskiras imtis, kurios atitinka duomenų užrašymo tarpą (20 cm). Kiekvienai išskirtai imčiai skaičiuojamas aritmetinis santykio (α_x) vidurkis. Tokiu būdu kiekvienam 20 cm intervalui buvo gautos konkrečios vidutinės α_x vertės, kurios toliau buvo analizuojamos duomenų sklaidos diagramose. Toks santykio verčių vidurkinimas leidžia nustatyti duomenis aproksimuojančią funkciją ir koreliacinio ryšio stiprumą bei parašyti santykio ir gylio tarpusavio sąsajos regresinę lygtį. Šios lygtys gali būti labai įvairios: polinominės kubinės (formulė (4.2)) ar kvadratinės (formulė (4.3)), tiesinės (formulė (4.4)), laipsninės (formulė (4.5)), eksponentinės (formulė (4.6)) arba logaritminės (formulė (4.7)). Tai priklauso nuo daugelio veiksnių, tarp kurių pagrindiniai – dinaminio zondo ir zonduojamų gruntų savybės.

$$\alpha_x = \pm C_1 \cdot h^3 \pm C_2 \cdot h^2 \pm C_3 \cdot h \pm C_4; \quad (4.2)$$

$$\alpha_x = \pm C_2 \cdot h^2 \pm C_3 \cdot h \pm C_4; \quad (4.3)$$

$$\alpha_x = \pm C_3 \cdot h \pm C_4; \quad (4.4)$$

$$\alpha_x = a \cdot h^{\pm n}; \quad (4.5)$$

$$\alpha_x = a \cdot e^{\pm b \cdot h}; \quad (4.6)$$

$$\alpha_x = \pm d \cdot \ln(h) \pm c; \quad (4.7)$$

čia C_1 , C_2 , C_3 ir C_4 – trinarės (formulė (4.2)), kvadratinės (formulė (4.3)) ir tiesinės (formulė (4.4)) lygčių konstantos; a ir b – lygčių (4.5) ir (4.6) konstantos; n – lygčių (4.5) ir (4.6) eksponentės; d ir c – logaritminės lygties (4.7) konstanta; h – gylis, kuriame ieškoma santykio (α_x) vertė.

Trečiame skaičiavimo etape patikslinamos gautos santykio (α_x) nustatymo regresinės lygtys. Šiam patikslinimui visa turima filtruotų α_x duomenų aibė sudalijama į imtis po vieną metrą, t.y. pirmo zondavimo metro α_x verčių imtis, antro, trečio ir t.t. Kiekvienai gautai imčiai skaičiuojamas vidurkis. Po to braižomas vidutinių santykio (α_x) verčių ir gylio (h) priklausomybės duomenų sklaidos grafikas ir atliekama koreliacinė analizė. Šiame etape gauti rezultatai yra galutiniai ir pagal juos yra sprendžiama apie koreliacinio ryšio tarp santykio (α_x) ir zondavimo gylio (h) stiprumą.

Turimas santykio (α_x) vertes galima naudoti kūgio spraudai (q_c) reikiamame gylyje nustatyti:

$$q_c = \alpha_x \cdot N_x. \quad (4.8)$$

Šiame darbe DPL zondo duomenų analizė buvo atliekama analizuojant smūgių skaičių, gautą skaičiuojant kas 20 cm (N_{20DPL}). Tarptautiniame dinaminio zondavimo standarte siūloma DPL zondavimo metu smūgių skaičių skaičiuoti kas 10 cm (ISO 22476-2:2005). Norint formulę (4.8) pritaikyti prie N_{10DPL} , reikia įvesti pataisą:

$$q_c = 2 \cdot \alpha_x \cdot N_x. \quad (4.9)$$

3. skyriuje buvo aprašytas zondavimo energijos efektyvumas (η). Atliekant dinaminio ir statinio zondavimų rodiklių sąsajų analizę, buvo pasinaudota η nustatymo formulėmis (3.3) ir (3.4). Pagal jas buvo koreguojamas pradinis smūgių skaičius (formulė 4.10), kuris naudojamas apskaičiuojant koreguotą santykį (α_x^x) (formulė (4.1)). Gautas α_x^x yra koreliuojamas su zondavimo gyliu (h), nustatant duomenis apksimuojančią funkciją ir tarpusavio ryšio regresinę lygtį.

$$N_x^x = \eta^x \cdot N_x, \quad (4.10)$$

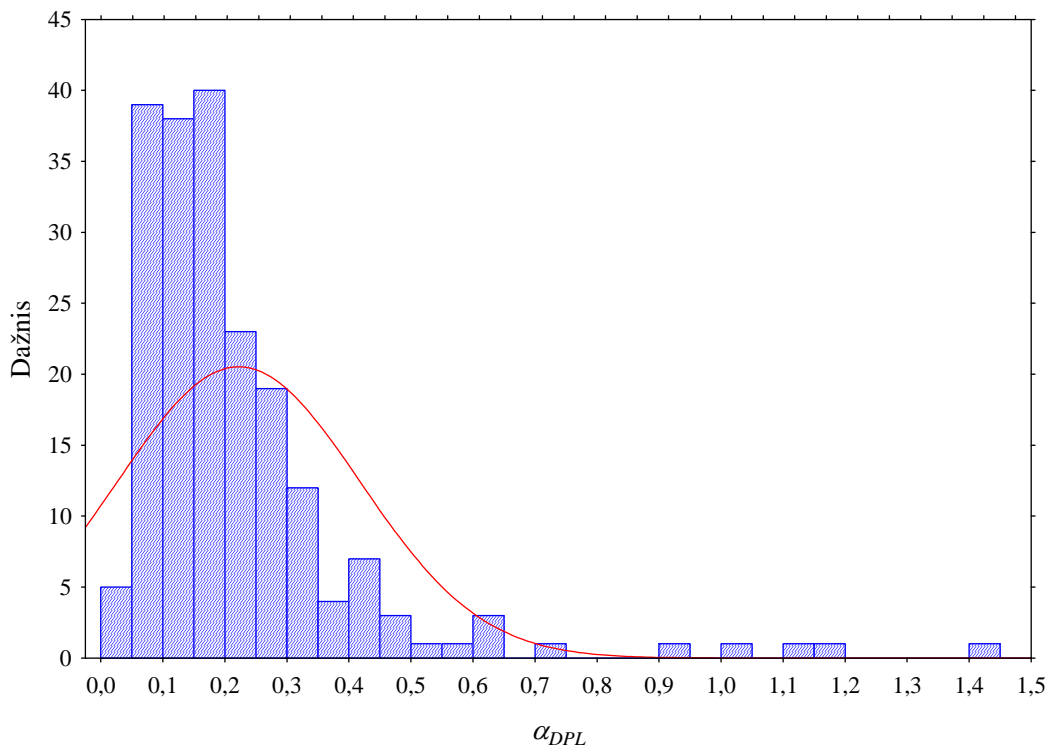
čia N_x^x – koreguotas smūgių skaičius dėl energijos efektyvumo įtakos; η^x – energijos efektyvumas, apskaičiuotas pagal formules (3.3) arba (3.4); N_x – pradinis smūgių skaičius; x – viršutinis indeksas, kuris parodo, pagal kokią lygtį apskaičiuotas smūgio efektyvumas (tolesniuose skaičiavimuose jis bus keičiamas indeksu s , kai skaičiuojama pagal formulę (3.3), ir indeksu Y , kai skaičiuojama pagal formulę (3.4)).

Smūgių skaičiaus pataisa dėl efektyvumo buvo įvedama visiems DPL zondo duomenims ir DPSH–A zondo duomenims tik rupiuose gruntuose iki 17,0 m gylio. Kituose gruntuose buvo nustatyta šoninės trinties ir geostatinio slėgio įtaka, todėl koreguoti duomenų pagal formules (3.3) ir (3.4) nebuvo galima.

4.2. DPL ir CPT zondavimo rodiklių tarpusavio sąsajos

4.2.1. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška rupiuose gruntuose

Rupių gruntų dinaminio ir statinio zondavimo duomenų ryšiiui nustatyti buvo panaudota 201 santykio (α_{DPL}) vertė. Visa turima duomenų aibė ($N = 201$) buvo analizuojama pasikartojančių verčių dažnių metodu (4.1 pav.). Ši analizė parodė, kad daugiausia pasikartojančios α_{DPL} reikšmės nagrinėjamoje aibėje kinta nuo 0,05 iki 0,35, t.y. šios reikšmės sudaro 85% (171 reikšmė) visos nagrinėjamos duomenų aibės (201 reikšmė) (žr. 4.1 pav.). Likusios 15% reikšmių yra atsitiktinės (anomalios) ir iš tolesnės analizės buvo pašalintos. Po šios duomenų filtracijos santykio (α_{DPL}) verčių statistiniai rodikliai tapo patikimesni (4.4 lentelė).



4.1 pav. Santykio (α_{DPL}) verčių dažnių analizės histograma, kai nagrinėjami rupūs gruntai ($N = 201$)

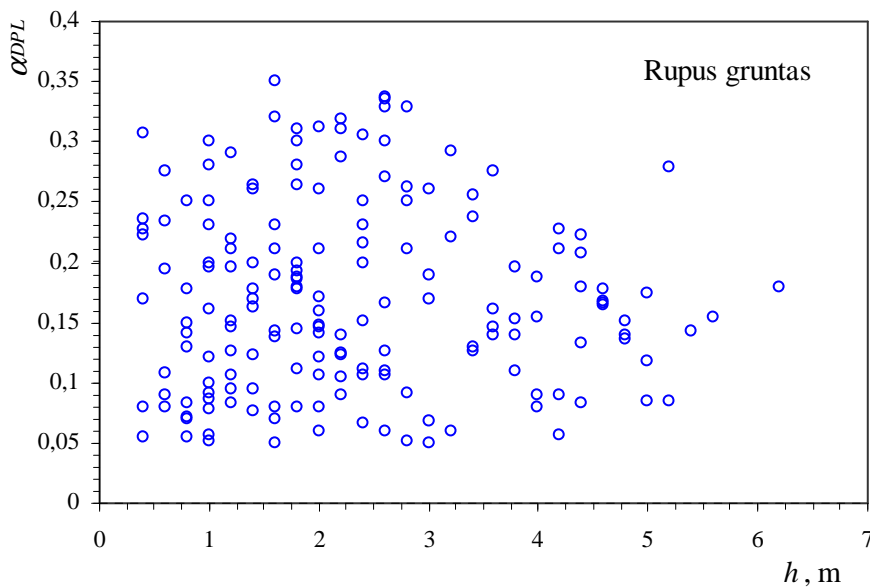
Iš duomenų aibės pašalinus atsitiktines reikšmes, aritmetinis α_{DPL} vidurkis nuo 0,22 sumažėjo iki 0,17 (pasikliautiniai vidurkio intervalai su tikimybe 0,95 buvo 0,16–0,18), variacijos koeficiento (Ω_x) vertės sumažėjo nuo 87,9% iki 45,5% (4.4 lentelė).

4.4 lentelė. Nefiltruotos (visos) ir filtruotos santykio (α_{DPL}) aibių pagrindiniai statistiniai rodikliai (rupus gruntas)

α_{DPL} aibė	N	$\overline{\alpha_{DPL}}$	S^2	S	Ω_x	A
Visa	201	0,22	0,04	0,20	87,9	1,43
Filtruota	171	0,17	0,006	0,08	45,5	0,30

N – elementų skaičius nagrinėjamoje aibėje; $\overline{\alpha_{DPL}}$ – aritmetinis santykio vidurkis; S^2 – dispersija; S – standartinis nuokrypis; Ω_x – variacijos koeficientas; A – aibės plotis.

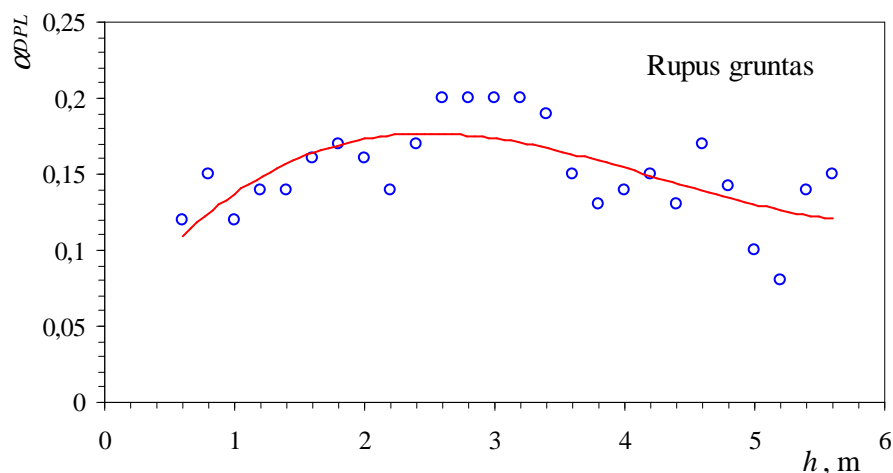
Sudaryta filtruotų α_{DPL} ir gylio (h) duomenų sklaidos diagrama koreliacinio ryšio neparodė (4.2 pav.).



4.2 pav. Filtruoto santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) sklaidos diagrama rupiuose gruntuose

Kitame duomenų analizės etape visa santykio α_{DPL} verčių aibė ($N = 171$) buvo sudalyta į atskiras imtis kas 20 cm gylio. Sudaryta santykio (α_{DPL}) imčių vidurkių ir zondavimo gylio (h) sklaidos diagrama parodė, kad egzistuoja ryšys tarp nagrinėjamų rodiklių (4.3 pav.). Šį ryšį geriausiai aprašo polinominė trinarė lygtis (4.2), koreliacijos koeficientas $R = 0,68$.

Polinominė duomenų sklaidą aproksimuojanti lygtis (4.2) rodo, kad pradinia- me zondavimo etape duomenims įtakos turi veiksniai, susiję su zondavimo įrangos ypatumais, nes nedideliame gylyje grunto šoninės trinties į štangas ir geostatinio slėgio įtaka dar nepakankama.

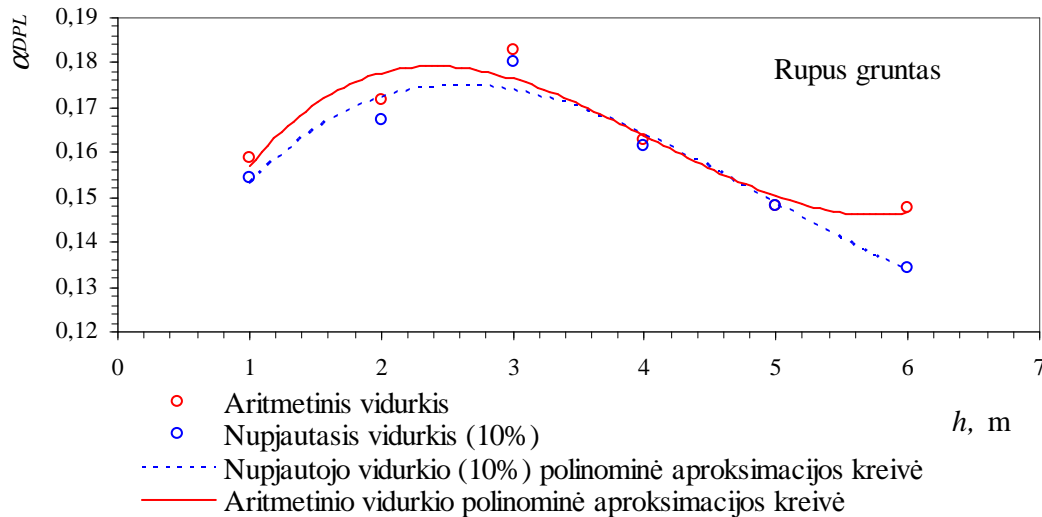


4.3 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama rupiame grunte (imtys kas 20 cm)

Detalesnei aproksimuojančiai lygčiai surasti buvo nagrinėjamos apibendrintos imtys, sudarytos sujungiant santykio (α_{DPL}) vertes kas vieną zondavimo metrą. Ši analizė patvirtino, kad yra polinominis funkcinis ryšys tarp santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) (4.4 pav.). Skaičiuojant statistinius rodiklius (4.5 lentelė), imtys nebuvo papildomai filtruojamos, tačiau buvo apskaičiuotas nupjautasis vidurkis (10%). Duomenų sklaidos diagramoje (žr. 4.4 pav.) pateiktos aproksimacijos kreivės rodo, kad, iš imties išmetus 10% minimalių ir tiek pat maksimalių reikšmių, koreliacijos koeficientas yra didesnis ($R = 0,97$), lyginant su aritmetiniu vidurkiu ($R = 0,95$).

4.5 lentelė. Santykio (α_{DPL}) kiekvieno zondavimo metro reikšmių statistinės analizės rezultatai (rupus gruntas)

Imtis	n	$\bar{\alpha}_{DPL}$	$\bar{\alpha}_{DPL} \pm 10\%$	S^2	S	Ω_x	A
0,0–1,0 m	35	0,16	0,15	0,01	0,08	50,41	0,26
1,0–2,0 m	68	0,17	0,17	0,01	0,08	44,65	0,30
2,0–3,0 m	50	0,18	0,18	0,01	0,09	49,14	0,29
3,0–4,0 m	24	0,16	0,16	0,00	0,07	42,62	0,24
4,0–5,0 m	23	0,15	0,15	0,00	0,05	33,50	0,17
5,0–6,0 m	7	0,15	0,13	0,00	0,07	45,18	0,19



4.4 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama rupiame grunte (imtys kas 1,0 m)

Išanalizavus duomenų sklaidos diagramą (žr. 4.4 pav.) matyti, kad skaičiuojant tik aritmetinius vidurkius duomenis šiek tiek iškraipo minimalios arba maksimalios vertės. Regresinės lygties (4.2) konstantas (C_1 , C_2 , C_3 ir C_4) DPL zondo atveju galima nustatyti iš nupjautųjų vidurkių pasiskirstymo. Tokiu atveju lygtis (4.2), kai $R = 0,97$, bus tokia:

$$\alpha_{DPL} = 0,001 \cdot h^3 - 0,0149 \cdot h^2 + 0,0568 \cdot h + 0,0199. \quad (4.11)$$

Žinant santykio (α_{DPL}) vertes, smūgių skaičių (N_{20DPL}) galima susieti su kūgio sprauda (q_c) (formulė (4.8)), o jei smūgių skaičius yra apskaičiuotas dešimčiai zondavimo centimetrų (N_{10DPL}), tuomet q_c nustatoma pagal formulę (4.9).

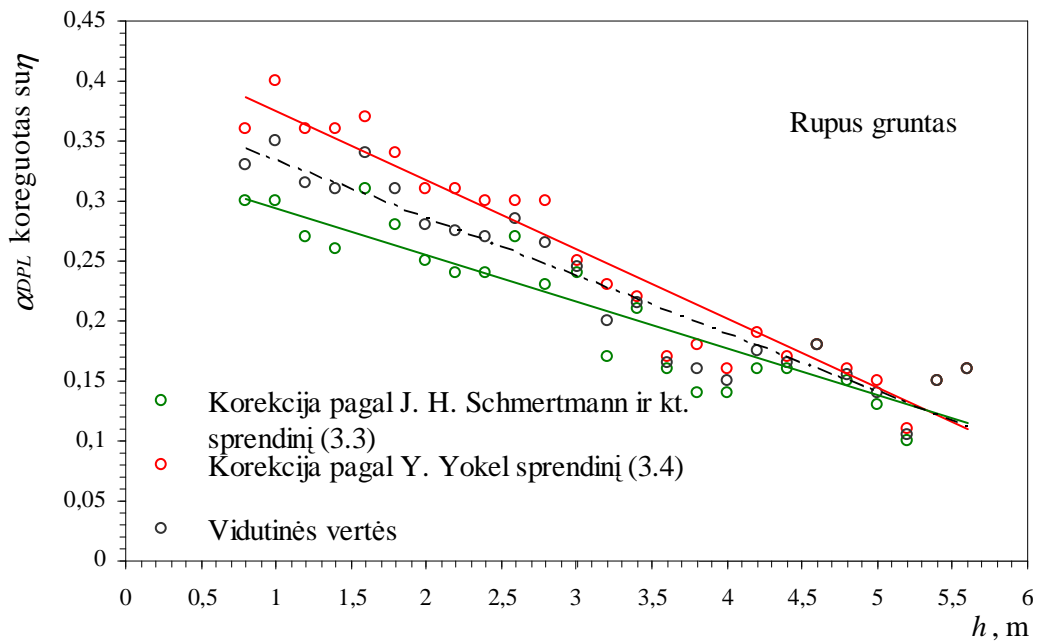
Santykio (α_{DPL}) polinominis duomenų pasiskirstymas priklauso nuo zondavimo įrangos darbo efektyvumo, arba, kitaip sakant, nuo smūgio efektyvumo. DPL zondo duomenims pakoreguoti dėl smūgio efektyvumo buvo panaudotos formulės (3.3) ir (3.4).

Atlikus smūgių skaičiaus (N_{20DPL}) duomenų korekciją (formulė (4.10)) dėl smūgio efektyvumo įtakos buvo gauta, kad α_{DPL} duomenis aproksimuoja tiesinė funkcija, t.y. priklausomybė tarp santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) yra tiesinė (formulė (4.4)). Koreliacijos koeficientas parodė labai glaudų ryšį ($R \sim 0,94$). Duomenų sklaidos diagramoje (4.5 pav.) matyti, kad koreguojant smūgių skaičių skirtingais smūgio efektyvumo (η) sprendiniais (pagal J. H. Schmertmann ir kt. (formulė (3.3)) ir Y. Yokel

(formulė (3.4)), gaunami labai panašūs rezultatai, todėl santykiui nustatyti galima naudoti apibendrintą lygtį:

$$\alpha_{DPL}^{VID} = 0,38 - 0,048 \cdot h, \quad (4.12)$$

čia α_{DPL}^{VID} – kūgio spraudos (q_c) ir koreguoto smūgių skaičiaus (N_{DPL}^S ir N_{DPL}^Y) dėl zondavimo efektyvumo santykio vidutinė vertė; h – nagrinėjamas gylis, m.



4.5 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra pakoreguotas dėl smūgio efektyvumo (rupus gruntas)

4.2.2. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame dulkingame molyje

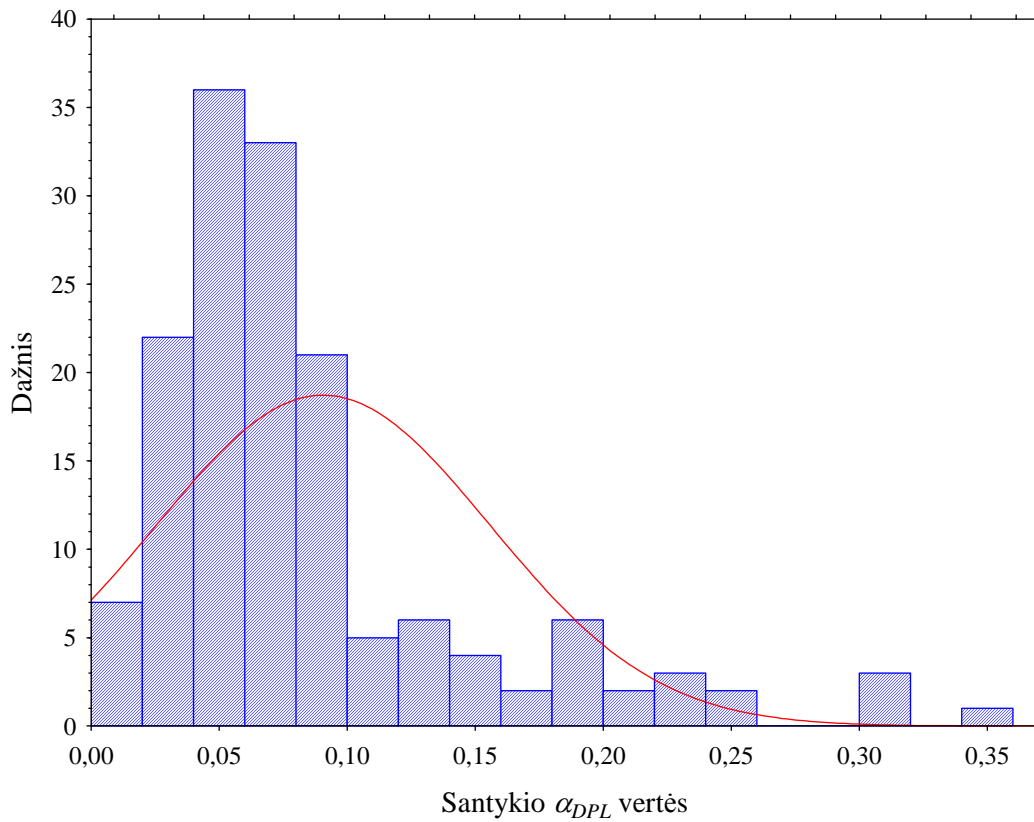
Tyrimo duomenų statistinei analizei buvo naudotos 153 q_c ir N_{20DPL} poros, iš kurių pagal formulę (4.1) buvo apskaičiuotas santykis α_{DPL} . Nagrinėtas moreninis smėlingas dulkingas molis buvo įvairios konsistencijos, tačiau vyravo puskietė ir kieta konsistencijos (žr. 4.3 lentelę).

Visa turima duomenų aibė ($N = 153$) buvo analizuojama pasikartojančių verčių dažniais (4.6 pav.). Statistinė duomenų analizė parodė, kad reikšmės, kurios pa-

tenka į intervalą tarp $< 0,02$ ir $> 0,16$, yra atsitiktinės ir galėjo atsirasti dėl žvirgždo ir gargždo, kurio Lietuvos morenoje yra gausu, įtakos. Visoje aibėje atsitiktinių verčių buvo 15% (4.6 pav.). Iš tolesnės duomenų analizės šios vertės buvo pašalintos.

Atlikus santykio (α_{DPL}) duomenų filtraciją ir atmetu atsitiktines vertes, statistinių rodiklių vertės taip pat gerokai pakito, – tai rodo, kad duomenų analizei įtakos turėjo atmetosios vertės (4.6 lentelė).

Duomenų sklaidos diagrama aiškios priklausomybės tarp santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) neparodė (4.7 pav.).



4.6 pav. Santykio (α_{DPL}) verčių dažnių analizės histograma, kai nagrinėjamas moreninis smėlingas dulkingas molis ($N = 153$)

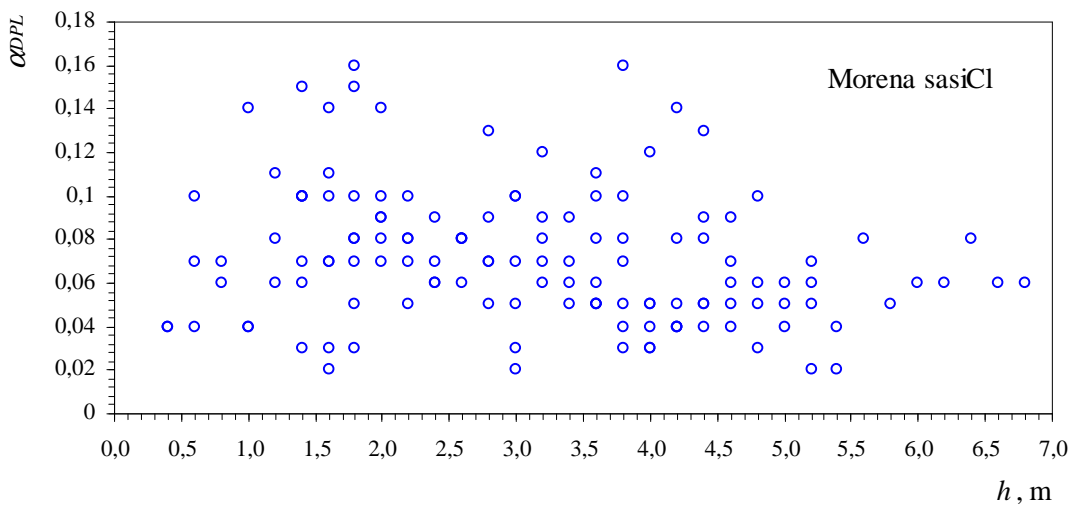
4.6 lentelė. Nefiltruotos (visos) ir filtruotos santykio α_{DPL} aibių pagrindiniai statistiniai rodikliai (sasiCl morena)

α_{DPL} aibė	N	$\overline{\alpha_{DPL}}$	S^2	S	Ω_X	A
Visa	153	0,09	0,004	0,07	72,0	0,35
Filtruota	131	0,07	0,001	0,03	43,7	0,14

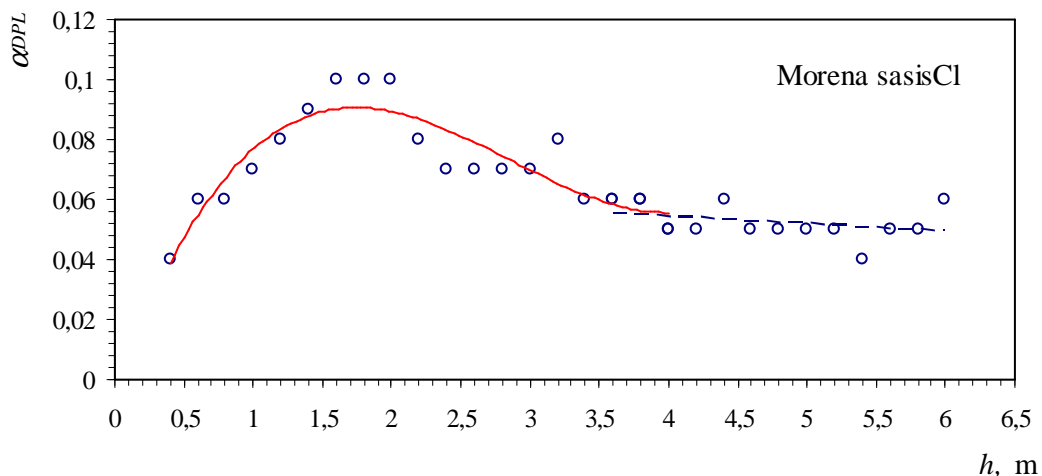
N – elementų skaičius nagrinėjamoje aibėje; $\overline{\alpha_{DPL}}$ – aritmetinis santykio vidurkis; S^2 – dispersija; S – standartinis nuokrypis; Ω_X – variacijos koeficientas; A – aibės plotis.

Tolesnėje duomenų analizėje visa filtruota santykio (α_{DPL}) duomenų aibė buvo skaidoma į atskiras imtis, kur skaidymo kriterijumi buvo zondavimo gylis, t.y. aibė buvo sudalyta į imtis, kurios atitinka 20 cm zondavimo gylį ir kiekvienai gautai imčiai buvo apskaičiuotas vidurkis.

Moreninio smėlingo dulkingo molio (sasiCl) santykio (α_{DPL}) vidurkių ir gylio sklaidos diagrama parodė, kad egzistuoja labai glaudus ryšys tarp šių rodiklių ($R = 0,90$) (4.8 pav.). Duomenų sklaidą iki 4,0 m gylio aproksimuoja polinominė lygtis (4.2). Vertinant duomenis nuo 4,0 m gylio buvo priimama, kad $\alpha_{DPL} = 0,05$.



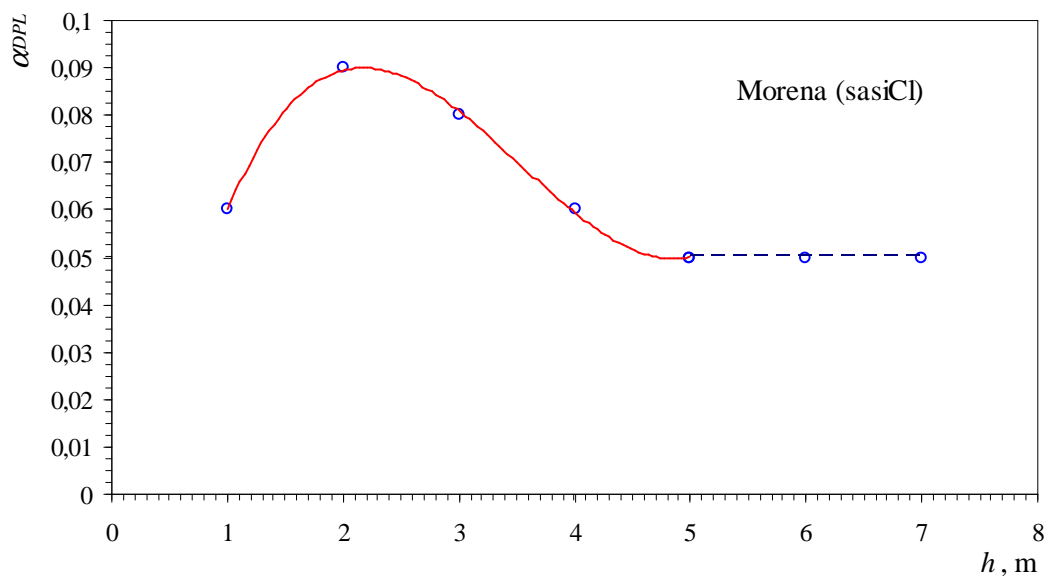
4.7 pav. Filtruoto santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) sklaidos diagrama moreniniame smėlingame dulkingame molyje



4.8 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių ir gylio (h) duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame dulkingame molyje (imtis kas 20 cm)

Detalesnei duomenų analizei ir trinarės polinominės lygties (4.2) konstantoms patikslinti sudaryta duomenų aibė ($N = 131$) buvo suskaidyta į imtis, kurios atitinka vieną zondavimo metrą. Šių verčių sklaidos diagramos duomenis iki 5,0 m gylio taip pat aproksimuoja regresinė polinominė lygtis (4.2), kur koreliacijos koeficientas rodo labai artimą funkcinį ryšį ($R = 0,99$) (4.9 pav.). Atitinkamai patikslintą su konstantų (C_1 , C_2 , C_3 ir C_4) vertėmis lygtį (4.2) galima užrašyti taip (nuo 5,0 m gylio laikoma, kad $\alpha_{DPL} = 0,05$):

$$\alpha_{DPL} = 0,0042 \cdot h^3 - 0,0439 \cdot h^2 + 0,1319 \cdot h - 0,032. \quad (4.13)$$



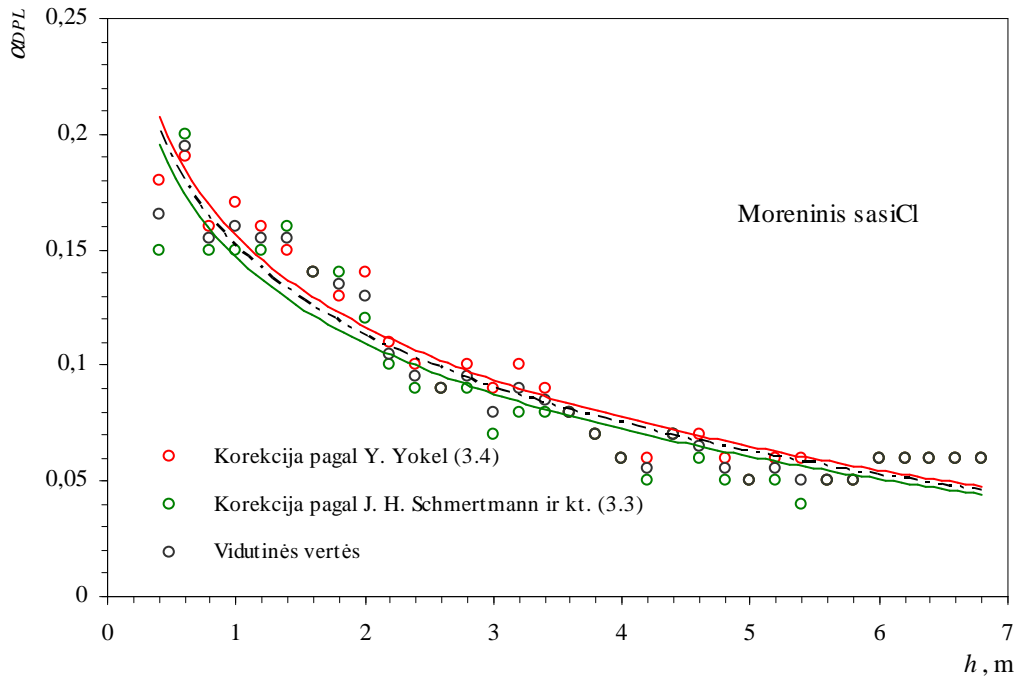
4.9 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame dulkingame molyje (imtys kas 1,0 m)

Žinant santykio (α_{DPL}) vertes, smūgių skaičių (N_{20DPL}) galima susieti su kūgio sprauda (q_c) (žr. formulę (4.8)), o kai smūgių skaičius yra apskaičiuotas dešimčiai zondavimo centimetrų (N_{10DPL}), tokiu atveju q_c nustatoma pagal formulę (4.9).

Kaip ir rupaus grunto atveju, taip ir čia, santykio (α_{DPL}) polinominį duomenų pasiskirstymą lemia zondavimo įrangos darbo efektyvumas.

Atlikus smūgių skaičiaus (N_{20DPL}) duomenų korekciją dėl smūgio efektyvumo įtakos pagal formulę (4.10), buvo gauta, kad α_{DPL} duomenis aproksimuoja logaritminė funkcija, t.y. priklausomybė tarp santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) yra logaritminė (žr. formulę (4.7)) (4.10 pav.). Koreliacijos koeficientas rodo labai glaudų ryšį ($R \sim 0,95$), o santykio nustatymui galima naudoti apibendrintą lygtį:

$$\alpha_{DPL}^{VD} = 0,1511 - 0,0548 \cdot \ln(h). \quad (4.13)$$



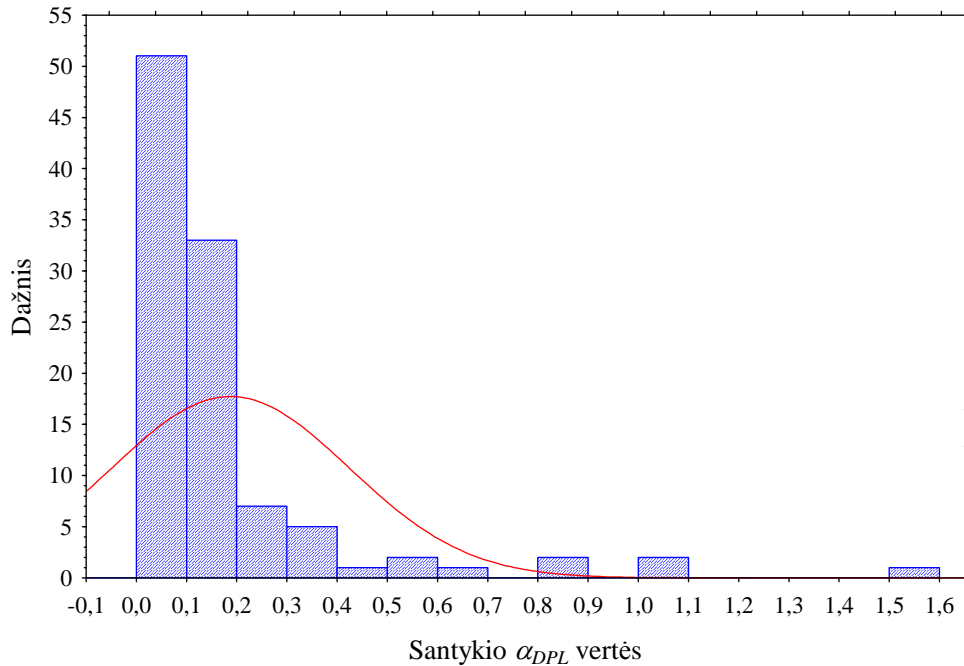
4.10 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafi-
kas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra pakoreguotas dėl smūgio efektyvumo
(moreninis smėlingas dulkingas molis)

4.2.3. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame molingame dulkyje

Dinaminio ir statinio zondavimo sąsajoms surasti moreniniame smėlingame molingame dulkyje (saciSi) buvo surinkti 105 q_c ir N_{20DPL} porų duomenys, pagal kuriuos buvo apskaičiuotas santykis (α_{DPL}) (žr. formulę (4.1)). Nagrinėtas moreninis smėlingas molingas dulgis buvo įvairios konsistencijos, tačiau vyravo kieta (žr. 4.3 lentelę).

Prieš nagrinėjant santykio (α_{DPL}) vertes ir zondavimo gylio tarpusavio priklausomybę, buvo atlikta duomenų aibės ($N = 105$) filtravimo procedūra. Iš turimos aibės buvo išmestos atsitiktinės reikšmės, kurios buvo nustatytos naudojantis dažnių analize (4.11 pav.). Visos vertės, kurios buvo $> 0,2$, nebuvo įtrauktos į tolesnius skaičiavimus. Po filtracijos liko 80% α_{DPL} verčių. Prieš filtraciją duomenų aibės aritmetinis

vidurkis buvo 0,18, po filtracijos vidurkis tapo 0,1, – tai rodo didžiulę atsitiktinių verčių įtaką skaičiavimo rezultatams.



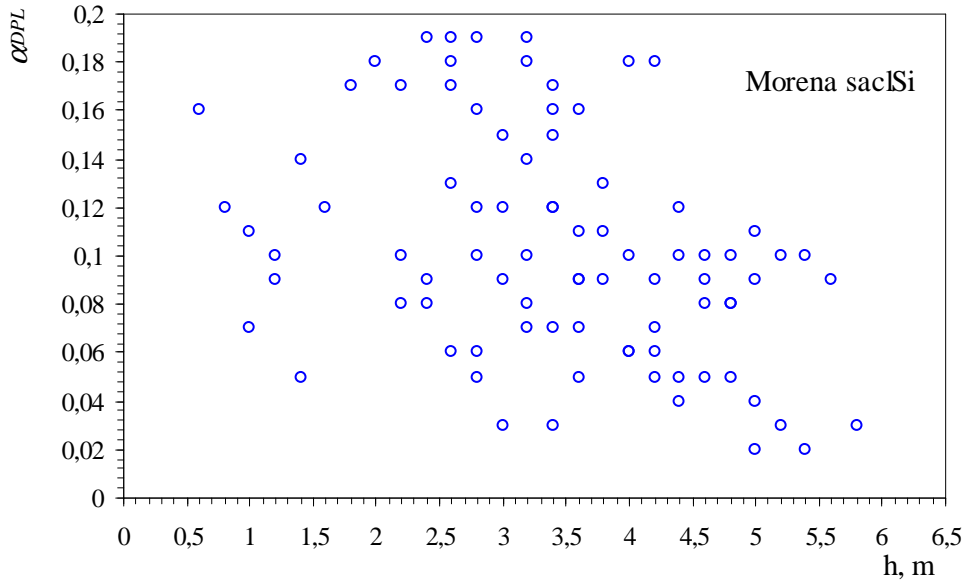
4.11 pav. Santykio (α_{DPL}) verčių dažnių analizės histograma, kai nagrinėjamas moreninis smėlingas molingas dulkis ($N = 84$)

Atlikus santykio (α_{DPL}) verčių sklaidos diagramos analizę, aiški priklausomybė nuo gylio (h) nenustatyta (4.12 pav.). Tačiau turimą aibę sudalijus į imtis kas 20 cm bei apskaičiavus tų imčių aritmetinius vidurkius (atmetus nebūdingas vertes) buvo gauta, kad moreniniame smėlingame molingame dulkyje α_{DPL} priklauso nuo zondavimo gylio (4.13 pav.). Visi duomenys pasiskirsto arti aproksimuojančios kreivės ($R = 0,80$), kuri aprašoma polinomine lygtimi (4.2) ir galioja iki 6,0 m gylio. Patikimesnėms lygties (4.2) konstantoms nustatyti turima aibė buvo sudalyta į imtis po vieną zondavimo metrą, išskiriant jam būdingus vidurkius. Tokia duomenų sklaida gerai koreliuojasi su zondavimo gyliu ir parodo labai glaudų ryšį ($R = 0,96$) (4.14 pav.). Lygtį (4.2) su tiksliomis konstantų vertėmis galima parašyti taip:

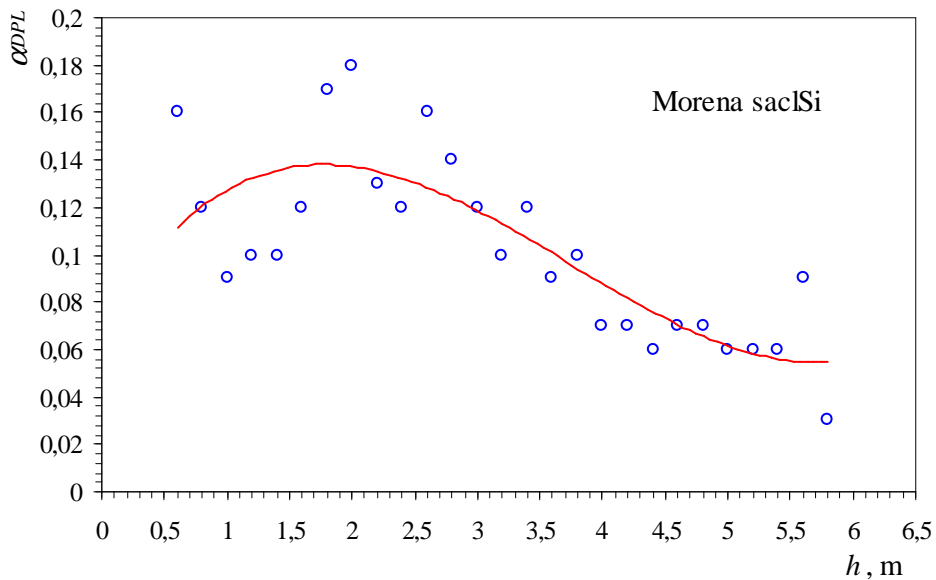
$$\alpha_{DPL} = 0,0024 \cdot h^3 - 0,0306 \cdot h^2 + 0,1012 \cdot h + 0,0333. \quad (4.14)$$

Lygtis (4.14) galioja iki 6,0 m gylio.

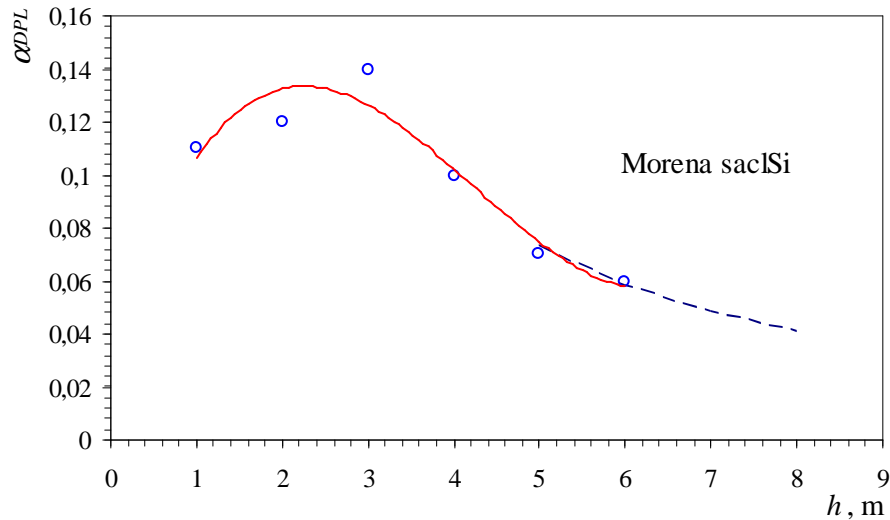
Kūgio spraudos (q_c) vertes galima suskaičiuoti pagal formulę (4.8). Jei zondavimo metu reikšmės užrašomos kas 10 cm, tai papildomai naudojant pataisos koeficientą skaičiuojama pagal formulę (4.9).



4.12 pav. Filtruoto santykio (α_{DPL}) ir gylio sklaidos diagrama moreniniame smėlingame molingame dulkyje



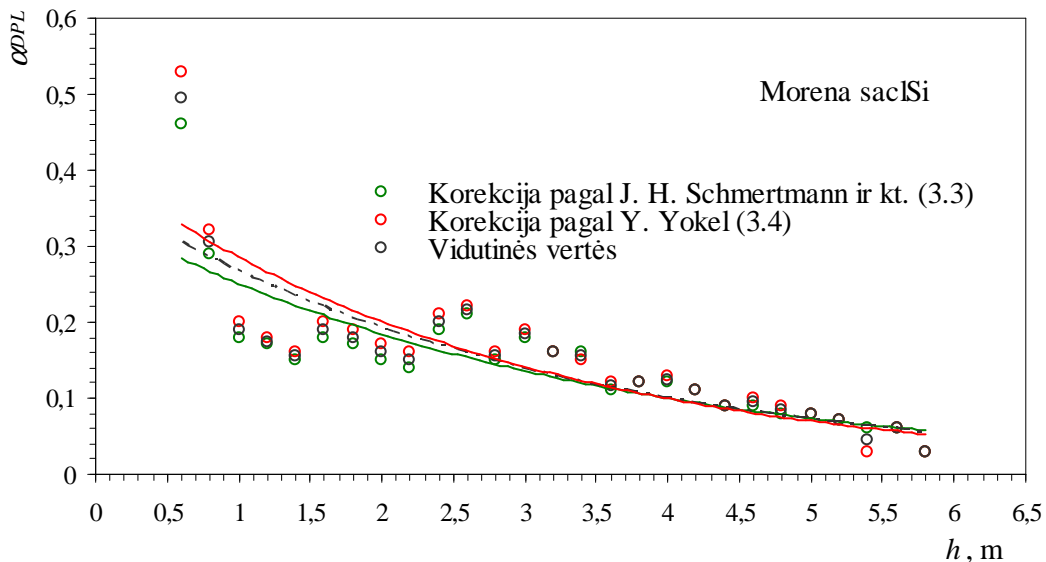
4.13 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame molingame dulkyje (imtys kas 20 cm)



4.14 pav. Santykio (α_{DPL}) vidutinių verčių duomenų sklaidos diagrama moreniniame smėlingame molingame dulkyje (imtys kas 1,0 m)

Norint apskaičiuoti santykį nuo 6,0 m gylio, galima pasinaudoti formule (4.5), kuri parodo santykio ir gylio priklausomybės pokytį laipsninės funkcijos ribose. Tuomet visa išraiška bus tokia:

$$\alpha_{DPL} = 0,5614 \cdot h^{-1,2626} . \quad (4.15)$$



4.15 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) yra pakoreguotas dėl smūgio efektyvumo (moreninis smėlingas molingas dulgis)

Įvertinus smūgio efektyvumo (η) įtaką zondavimo duomenims (N_{20DPL}) (žr. formulę (4.10)), santykio (α_{DPL}) tarp kūgio spraudos (q_c) ir smūgių skaičiaus (N_{20DPL}) verčių priklausomybė nuo gylio tampa eksponentinė (žr. formulę (4.6)). α_{DPL} vidurkių sklaidos ir gylio diagrama rodo labai glaudų koreliacinį ryšį tarp nagrinėjamų duomenų ($R = 0,90$) (4.15 pav.). Duomenis aproksimuojanti kreivė yra aprašoma regresine eksponentine lygtimi:

$$\alpha_{DPL}^{VID} = 0,3709 \cdot e^{-0,3273 \cdot h} . \quad (4.16)$$

4.2.4. DPL ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniuose smulkiuose gruntuose

Smulkiuose limnoglacialiniuose gruntuose surinktų duomenų (N_{20DPL} ir q_c) imtys yra nepakankamos, kad būtų galima atlikti detalias koreliacines analizes. Šiame skyrelyje bus apžvelgtos preliminarios duomenų koreliacinės galimybės.

Nagrinėjami tokie smulkūs gruntai: dulkis (Si)–molingas dulkis (clSi) ($N = 16$); smėlingas molingas dulkis (sacSi)–smėlingas dulkis (saSi) ($N = 25$); smėlingas dulkingas molis (sasiCl)–dulkingas molis (siCl) ($N = 24$). Kiekvieno grunto santykio (α_{DPL}) duomenų imtis (n) buvo filtruojama atmetant atsitiktines vertes. Tokių α_{DPL} verčių buvo išmesta iki 20%. Filtruotų imčių pagrindiniai statistiniai rodikliai pateikti 4.7 lentelėje.

4.7 lentelė. Limnoglacialinių smulkių gruntų filtruoto santykio (α_{DPL}) imčių pagrindiniai statistiniai rodikliai

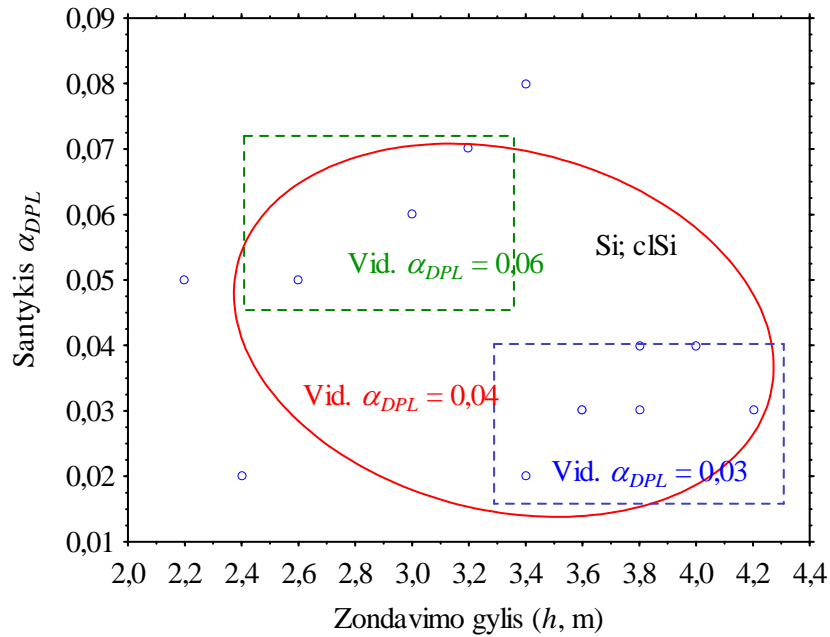
α_{DPL} imtis	n	$\overline{\alpha_{DPL}}$	S^2	S	Ω_X	A
Si, clSi	13	0,04	0,0004	0,02	44,4	0,06
sacSi, saSi	21	0,11	0,0010	0,03	28,6	0,12
sasiCl, siCl	23	0,05	0,0004	0,02	40,3	0,06

n – elementų skaičius nagrinėjamoje imtyje; $\overline{\alpha_{DPL}}$ – aritmetinis santykio vidurkis; S^2 – dispersija; S – standartinis nuokrypis; Ω_X – variacijos koeficientas; A – imties plotis.

Limnoglacialinių smulkių gruntų konsistencija kinta nuo takiai plastingos iki kietos (žr. 4.2 lentelę).

Dulkio ir molingos dulkių santykio (α_{DPL}) aritmetinis vidurkis yra 0,04 (žr. 4.7 lentelę). Tačiau duomenų sklaidos diagramoje (4.16 pav.) vizualiai matyti du duome-

nų laukai (punktyru apibrėžti kvadratai), kur vieno vidurkis yra 0,06 (žalias punktyras), kito – 0,03 (mėlynas punktyras). Viso duomenų lauko, atitinkančio aibės plotį su 0,95 patikimumu (raudona elipsė), vidurkis atitinka visos nagrinėtos aibės ir lygus 0,04. Turint šiuos analizės rezultatus galima teigti, kad apytikslė santykio (α_{DPL}) vertė gylyje nuo 2,0 m iki 3,2 m yra lygi 0,06. Zondavimo duomenis nagrinėjant giliau, α_{DPL} vertę reikia mažinti iki 0,03.



4.16 pav. Dulgio ir molingo dulgio santykio (α_{DPL}) duomenų sklaidos diagrama

Detaliau analizuojant dulgio ir molingo dulgio santykio (α_{DPL}) verčių pasiskirstymą, galima pastebėti tendenciją, analogišką moreninių gruntų polinominiam pasiskirstymui (žr. formulę (4.2)). Santykio pikas (0,06–0,07) yra tarp 2,5 m ir 3,0 m, o pradiniam zondavimo gylyje ($\sim 1,0$ m) α_{DPL} vertės būna panašios į tas, kurios yra 4,0 m gylyje. Be to, imties vidurkis (šiuo atveju – 0,04) sutampa su vertėmis, kurios yra pradiniam zondavimo intervale ($\sim 1,0$ m) ir 4,0 m gylyje (4.16 pav.). Kūgio spraudai (q_c) apskaičiuoti skirtą lygtį (4.8) tokiu atveju galima užrašyti taip:

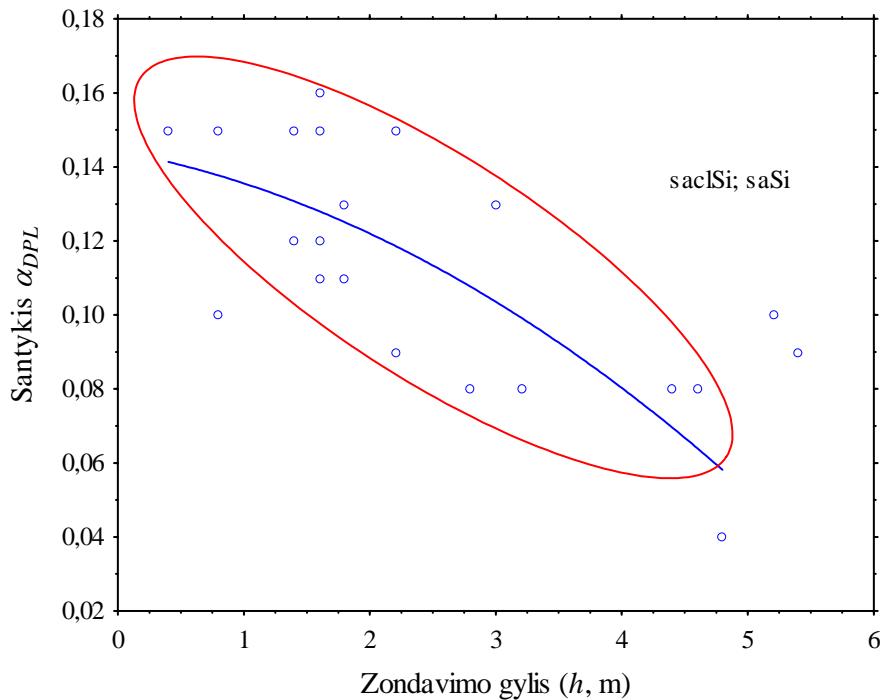
$$q_c = 0,04 \cdot N_{20DPL} \cdot \quad (4.17)$$

Jei zondavimo metu buvo skaičiuotas smūgių skaičius kas 10 cm (N_{10DPL}), tuomet lygtis bus tokia:

$$q_c = 0,08 \cdot N_{10DPL}. \quad (4.18)$$

Smūgio efektyvumo (η) įtakai santykio dydžiui įvertinti nepakako duomenų, nes didžiausia įtaka yra pradiniam gylio intervale, o šiuo atveju tokių duomenų nebuvo.

Smėlingo molingo dulgio ir smėlingo dulgio santykio (α_{DPL}) verčių analizė rodo, kad grunte esanti smėlio frakcijos dalis padidina α_{DPL} vertes (vid. $\alpha_{DPL} = 0,11$), lyginant su dulkiu ar molingu dulkiu (žr. 4.7 lentelę). Tyrimų metu gauti smėlingo molingo dulgio–smėlingo dulgio santykio (α_{DPL}) duomenys apima gylio intervalą nuo 0,4 m iki 5,4 m. Turimi duomenys leidžia detaliau nustatyti koreliacijos tarp santykio ir zondavimo gylio patikimumą. α_{DPL} analizė parodė, kad duomenų sklaidą geriausiai aproksimuoja polinominė kreivė (4.17 pav.), kurią aprašo kvadratinė polinominė lygtis (4.3). Ši sąlyga galioja iki 4,0 m gylio.



4.17 pav. Smėlingo molingo dulgio ir smėlingo dulgio santykio (α_{DPL}) duomenų sklaidos diagrama su polinimine aproksimuojančia kreive

Koreliacijos koeficientas rodo, kad egzistuoja glaudus ryšys tarp α_{DPL} ir gylio (h) ($R = 0,74$). Tokiu atveju kvadratinę polinominę lygtį (4.3) galima užrašyti taip:

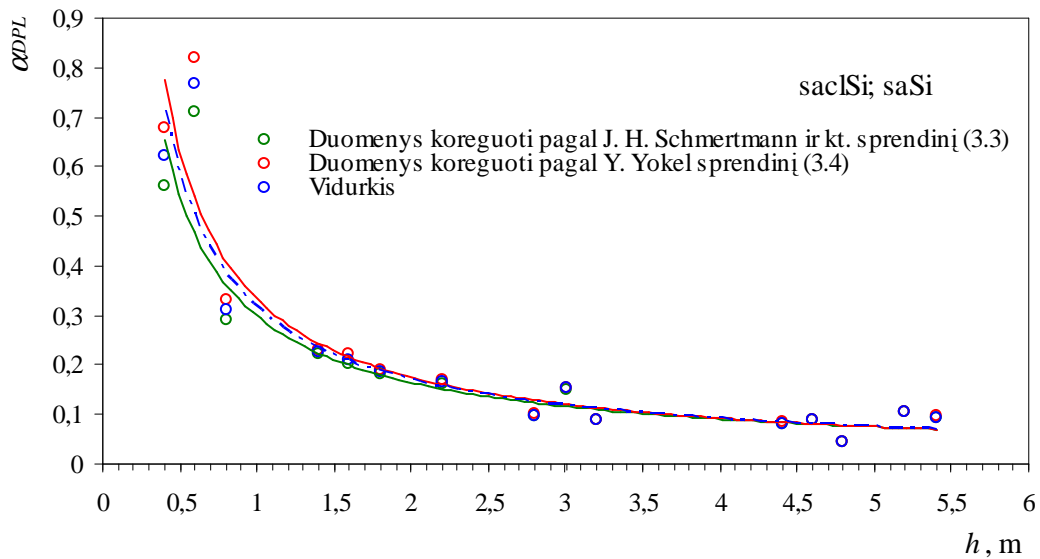
$$\alpha_{DPL} = -0,0024 \cdot h^2 - 0,0063 \cdot h + 0,1443. \quad (4.19)$$

Pagal formulę (4.19) smėlingame molingame dulkyje ir smėlingame dulkyje santykio (α_{DPL}) vertės nustatomos tik iki 4,0 m gylio. Norint nustatyti α_{DPL} vertes, kai $h > 4,0$ m, reikia naudotis laipsnine lygtimi (4.5), tuomet konstantos ir laipsnio eksponentės vertės apytiksliai bus tokios:

$$\alpha_{DPL} = 0,15 \cdot h^{-0,4}. \quad (4.20)$$

Įvertinus smūgio efektyvumo (η) įtaką dinaminio zondavimo duomenims (žr. formulę (4.10)), kurie gauti zonduojant smėlingą molingą dulki ir smėlingą dulki, gaunama, kad koreliacinis ryšys tarp santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) yra glaudus ($R = 0,87$) (4.18 pav.). Duomenų sklaidą gerai aproksimuoja laipsninė lygtis (4.5). Koreguoto santykio vidurkio skaičiavimo lygtis būtų tokia:

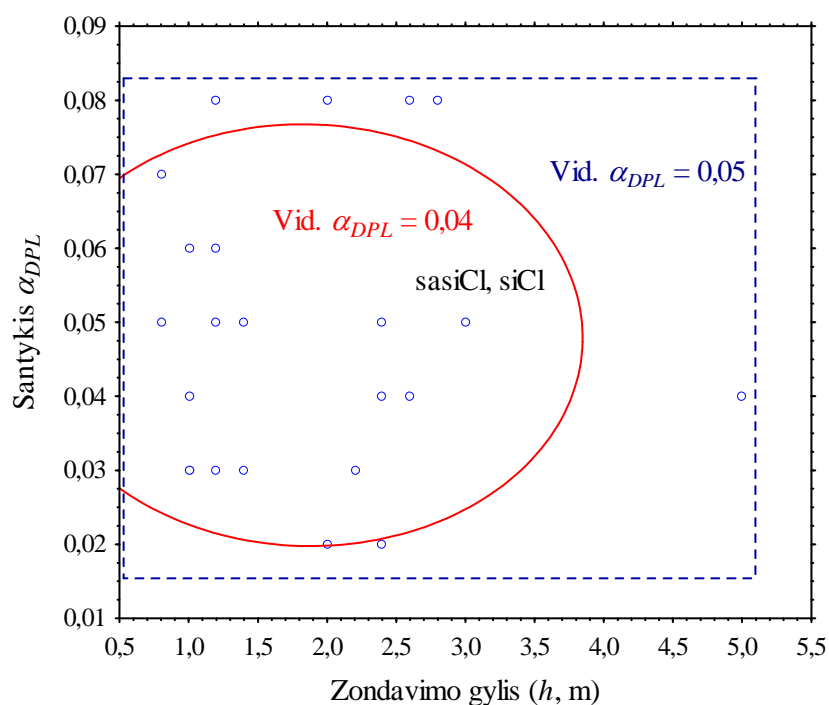
$$\alpha_{DPL}^{VID} = 0,315 \cdot h^{-0,9}. \quad (4.21)$$



4.18 pav. Santykio (α_{DPL}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos grafikas, kai smūgių skaičius (N_{20DPL}) pakoreguotas dėl smūgio efektyvumo (saclSi; saSi)

Smėlingo dulkingo molio ir dulkingo molio kietai plastingos ir pusketės konsistencijos (žr. 4.2 lentelę) santykio (α_{DPL}) ir gylio (h) analizė davė tik orientacinę vidutinę vertę, nes duomenų analizei buvo surinktas ir panaudotas duomenų kiekis, atspindintis mažą gylio intervalą (0,8–3,0 m). Aiškios koreliacijos tarp santykio α_{DPL} ir zondavimo gylio (h) nenustatyta. Nustatytas santykio (α_{DPL}) vidurkis lygus 0,05 (žr.

4.7 lentelę). Nagrinėjant duomenų sklaidos diagramą (4.19 pav.) matyti, kad apibrėžus elipsę, kuri atitinka aibės plotį su patikimumu 0,95, ne visi santykio taškai patenka į jos ribas (raudona elipsė). Patekusių taškų aritmetinis vidurkis – 0,04. Vizuali skaičiavimuose naudojamų pradinių duomenų sekų ir laboratorinių tyrimų analizė leidžia teigti, kad didesnės santykio vertės ($\alpha_{DPL} \sim 0,06$) yra tuomet, kai zonduojamas pusketės ir kietos konsistencijos gruntas, o mažesnės ($\alpha_{DPL} \sim 0,03$) – esant minkštai ar kietai plastingai konsistencijai. Norint nustatyti kūgio spraudos (q_c) vertę pagal formules (4.8) arba (4.9), galima naudotis vidurkiu ($\alpha_{DPL} \sim 0,04$), o jei žinoma konsistencija, atitinkamai reikia pasirinkti tarp minimalių ir maksimalių verčių.



4.19 pav. Smėlingo dulkingo molio ir dulkingo molio santykio (α_{DPL}) duomenų sklaidos diagrama

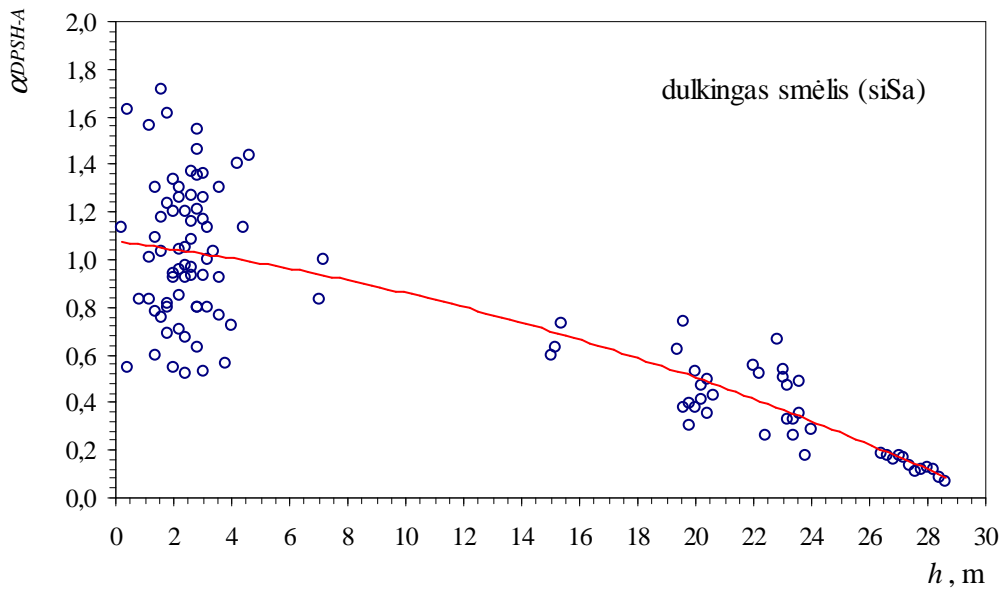
4.3. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių tarpusavio sąsajos

4.3.1. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška dulkingame smėlyje

Koreliaciniam ryšiui tarp DPSH–A dinaminio zondo ir statinio zondo (CPT) duomenų dulkinguose smėliuose (siSa) nustatyti buvo surinktos 125 zondavimo rodiklių ($N_{20DPSH-A}$ ir q_c) verčių poros, pagal kurias buvo apskaičiuotas santykis α_{DPSH-A} (žr.

formulę (4.1)). Duomenų aibė buvo sudaroma iš santykio verčių visumos, atmetant nebūdingas atsitiktines vertes. Iš viso buvo atmesta 12% atsitiktinių reikšmių. Duomenų analizei buvo sudaryta aibė iš 110 kintamųjų ($N = 110$). Nagrinėjami duomenys apima zondavimo gylį (h) nuo 0,2 m iki 28,6 m.

Sudaryta santykio (α_{DPSH-A}) priklausomybės nuo zondavimo gylio (h) duomenų sklaidos diagrama (4.20 pav.) parodė, kad tarp nagrinėjamų rodiklių egzistuoja koreliacinė priklausomybė, kurios ryšys yra glaudus ($R = 0,82$). Duomenis aproksimuojanti kreivė aprašoma regresine kvadratine polinimine lygtimi (4.3).



4.20 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama gylio (h) atžvilgiu ($N = 110$; siSa)

Analizuojant duomenų sklaidos diagramą (4.20 pav.) matyti, kad didžiausias išsibarstymas yra iki 7,0 m gylio. Šiame intervale santykio (α_{DPSH-A}) aritmetinis vidurkis – 1,04. Čia patenka 63% visos duomenų aibės verčių. Aritmetinio vidurkio pasisklidimo intervalai (su tikimybe 0,95) yra 0,96 ir 1,11, – šie intervalai atitinka vertes, gautas pradiniam ir ~6,0 m gilyje. Išskirtos imties (iki 7,0 m) pagrindinių statistinių rodiklių vertės pateiktos 4.8 lentelėje.

4.8 lentelė. Santykio (α_{DPSH-A}) verčių imties iki 7,0 m gylio pagrindiniai statistiniai rodikliai (dulkingas smėlis)

α_{DPSH-A} imtis	n	$\bar{\alpha}_{DPSH-A}$	S^2	S	Ω_X	A
siSa iki 7,0 m	69	1,04	0,09	0,3	28,5	1,196

n – elementų skaičius nagrinėjamoje aibėje; $\bar{\alpha}_{DPSH-A}$ – aritmetinis santykio vidurkis; S^2 – dispersija; S – standartinis nuokrypis; Ω_X – variacijos koeficientas; A – imties plotis.

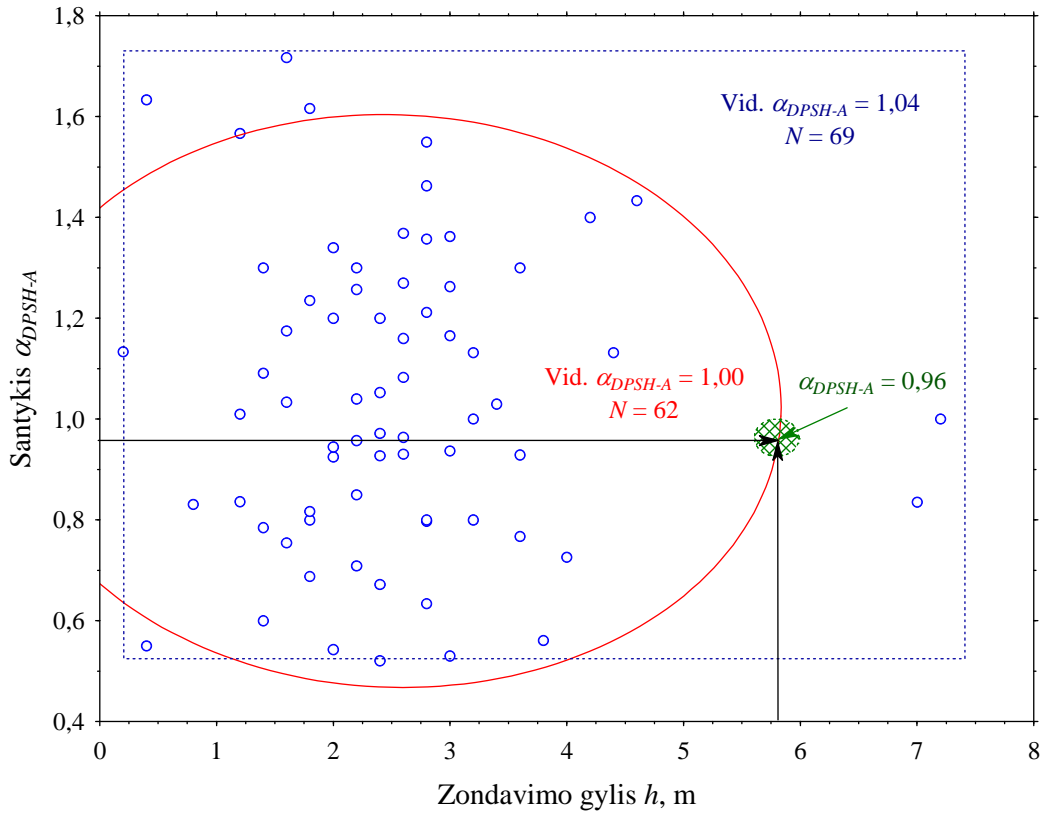
Nagrinėjant detaliau santykio (α_{DPSH-A}) verčių iki 7,0 m zondavimo gylio duomenų sklaidos diagramą (4.21 pav.) galima pastebėti, kad apibrėžus elipsę, kuri atitinka aibės plotį su patikimumu 0,95, ne visi santykio taškai patenka į jos ribas (raudona elipsė). Patekusių taškų aritmetinis vidurkis – 1,00. Elipsės ilgiausios ašies taško koordinatės artimai atitinka aritmetinio vidurkio (1,04) mažesnę pasikliautinąją intervalo vertę (0,96). Taigi galima teigti, kad santykio (α_{DPSH-A}) vertėms nustatyti gerai tinka kvadratinė polinominė lygtis (4.3), nors iki 7,0 m gylio yra nemažas duomenų išsibarstymas ($A \sim 1,2$). Jei zondavimo duomenys nagrinėjami tik iki 7,0 m gylio, tai galima sakyti, kad dulkingame smėlyje apytiksliai kūgio sprauda (q_c) lygi smūgių skaičiui ($N_{20DPSH-A}$).

Siekiant nustatyti santykio skaičiavimo lygties (4.3) tikslias konstantas (C_2 , C_3 ir C_4), visa nagrinėta duomenų aibė ($N = 110$) buvo sudalyta į atskiras imtis kiekvienam zondavimo metrui. Skaičiuojant kiekvienos imties vidurkius buvo atmetamos nebūdingos tam metrui santykio α_{DPSH-A} vertės (atmesta iki 5% verčių). Gauti duomenys parodė, kad ryšys tarp α_{DPSH-A} ir gylio (h) yra labai glaudus ir artimas funkciniam ($R = 0,99$) (4.22 pav.). Tokiu atveju kvadratinę polinominę lygtį (4.3) su tiksliais konstantomis galima užrašyti taip:

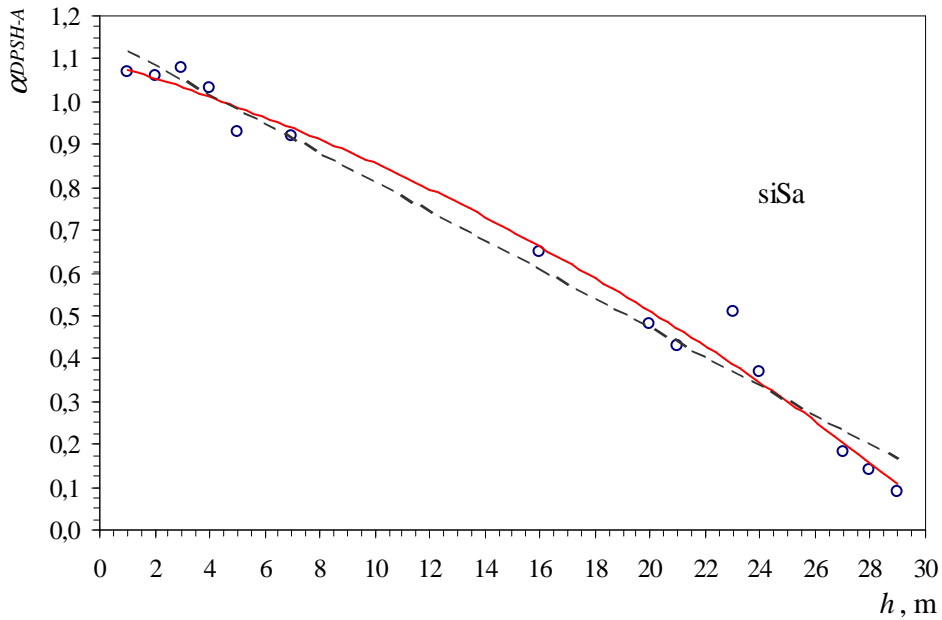
$$\alpha_{DPSH-A} = -0,0005 \cdot h^2 - 0,0184 \cdot h + 1,0934. \quad (4.22)$$

Iš α_{DPSH-A} imčių vidurkių sklaidos gylio atžvilgiu analizės matyti, kad koreliacinę priklausomybę (4.22 pav.) galima aprašyti ir tiesine regresine lygtimi (4.4) ($R = 0,98$), kurios konstantos (C_3 ir C_4) turės tokias vertes:

$$\alpha_{DPSH-A} = -0,034 \cdot h + 1,15. \quad (4.23)$$

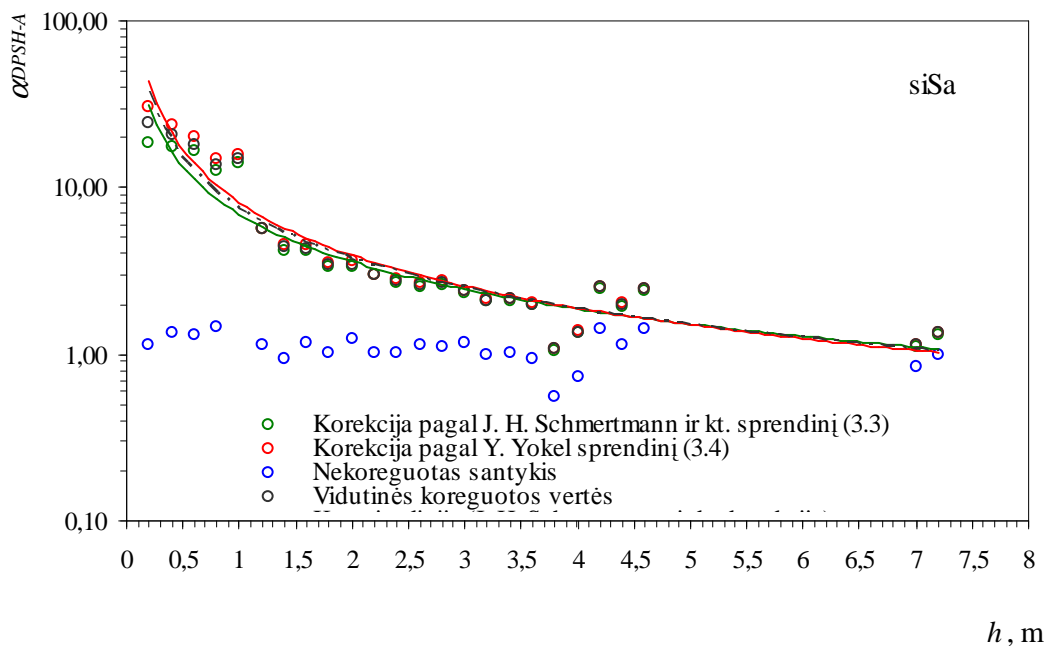


4.21 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) verčių iki 7,0 m gylio sklaidos diagrama (siSa)



4.22 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su polinimine ir tiesine aproksimuojančiomis kreivėmis (sudarytos imtys kiekvienam zondavimo metrui; zonduota dulkingame smėlyje)

Atlikti skaičiavimai rodo, kad kvadratinės polinominės lygties (4.22) rezultatai geriau atspindi santykio vertes, lyginant su tiesine priklausomybe (žr. formulę (4.23)). Pradiniame zondavimo intervale (iki 7,0 m) aritmetinis vidurkis yra 1,04, o jo pasikliautiniai intervalai (su tikimybe 0,95) – 1,11 bei 0,96 ir atitinka nagrinėjamo gylio ribose (atitinkamai 0,2 m ir 6,0 m) esančias vertes. Skaičiuojant pagal polinominę lygtį (4.22), gaunamas labai panašus rezultatas į santykio (α_{DPSH-A}) vidurkio pasikliautinuosius intervalus (atitinkamai 1,09 ir 0,96), o skaičiuojant pagal tiesinę lygtį (4.23), rezultatas nežymiai, tačiau skyrėsi (atitinkamai 1,14 ir 0,95). Santykio vertes norint įvertinti didesniame zondavimo gylyje (nuo 20,0 m), geriau naudoti polinominę lygtį (4.22), nes koreliacinė krypties kreivė yra arčiau nagrinėjamų taškų, lyginant su tiese (žr. formulę (4.23)). Taigi statinei kūgio spraudai (q_c) nustatyti pagal smūgių skaičiaus ($N_{20DPSH-A}$) vertes, formulėje (4.8) santykio (α_{DPSH-A}) vertę geriau skaičiuoti naudojant kvadratinę polinominę lygtį (4.22).



4.23 pav. Dėl smūgio efektyvumo pakoreguoto santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (zondauta dulkingame smėlyje)

Dulkingo smėlio santykio (α_{DPSH-A}) verčių pasiskirstymas pagal zondavimo gylių yra polinominis. Galimai šis duomenų pasiskirstymas yra dėl plakto smūgio efektyvumo įtakos zondavimo duomenims ir kartu α_{DPSH-A} vertėms. Zondavimo DPSH–A zonu atveju smūgio efektyvumą įvertinti sudėtingiau, nes zondą pradeda veikti geos-

tatinis grunto slėgis ir atsiranda zondo štangų sienelių trintis į gruntą. Tačiau remiantis DPL duomenų sklaidos tendencijomis galima teigti, jog ir DPSH–A atveju iki 7,0 m zondo šoninė trintis yra nedidelė ir sklaidos formą lemia plakto smūgio efektyvumas. Tokiu būdu buvo įvertintas smūgio efektyvumas (η) pagal J. H. Schmertmann'o ir kt. pateiktą lygtį (žr. formulę (3.3)) bei pagal Y. Yokel'io pasiūlytą lygtį (3.4). Gauti rezultatai parodė, kad santykio α_{DPSH-A} vertės zondavimo gylio (h) atžvilgiu pasiskirsto pagal laipsninę funkciją (žr. formulę (4.5)) (4.23 pav.). Šiuo atveju koreliacijos koeficientas $R \sim 0,95$, – ryšys labai glaudus. Apibendrinta laipsninė lygtis būtų tokia:

$$\alpha_{DPSH-A}^{VID} = 7,5 \cdot h^{-1}. \quad (4.24)$$

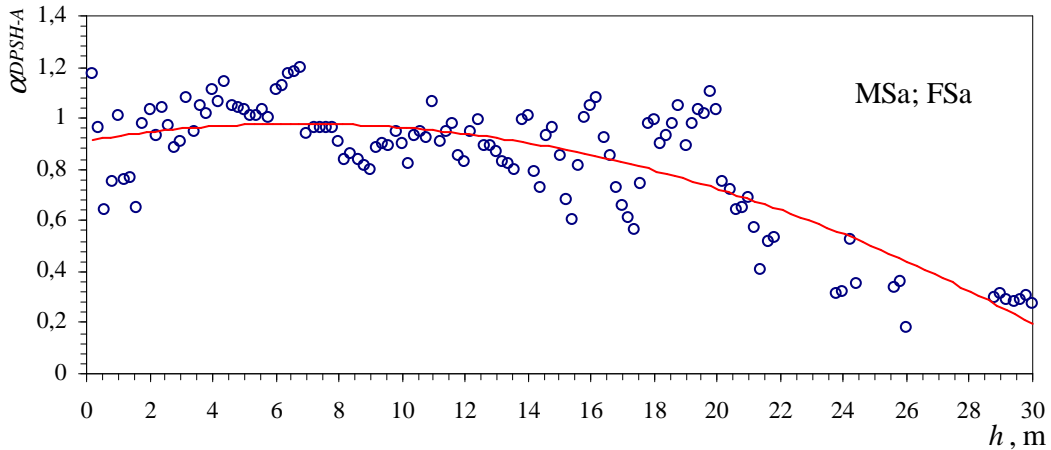
4.3.2. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška smulkiame ir vidutinio rupumo smėlyje

Duomenų analizei iš viso buvo panaudotos 955 santykio α_{DPSH-A} vertės, gautos zonduojant smulkų ir vidutinio rupumo smėlį. Pirminės duomenų filtracijos metu buvo atmesta 16% atsitiktinių verčių. Sudarytą naują duomenų aibę sudarė 801 santykio α_{DPSH-A} vertė ($N = 801$).

Visa turima aibė buvo sudalyta į atskiras imtis kas 20 cm. Suskaičiuotų imčių vidurkiai pateikti duomenų sklaidos diagramoje (4.24 pav.). Atlikus koreliacinę duomenų analizę buvo nustatyta, kad egzistuoja glaudus ryšys tarp santykio (α_{DPSH-A}) ir zondavimo gylio (h) ($R = 0,81$). Duomenis aproksimuoja regresinė polinominė kvadratinė lygtis (4.3).

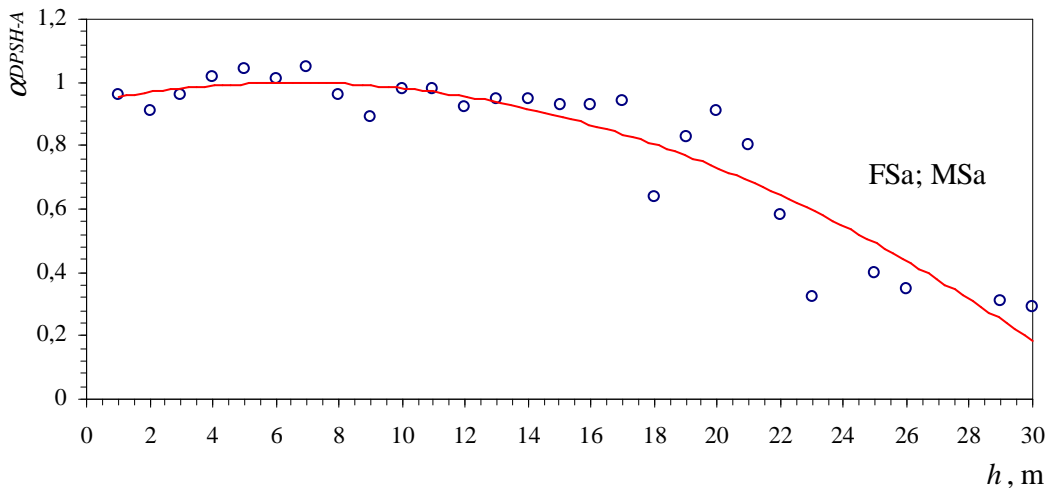
Siekiant nustatyti tikslesnes lygties (4.3) konstantų (C_2 , C_3 , C_4) vertes, iš turimų duomenų aibės ($N = 801$) buvo sudarytos naujos imtys kiekvienam zondavimo metrui ir apskaičiuoti jų vidurkiai. Gauti rezultatai parodė, kad koreliacinė priklausomybė tarp santykio ir zondavimo gylio yra labai glaudi ($R = 0,93$) (4.25 pav.). Santykio (α_{DPSH-A}) skaičiavimo visa polinominė kvadratinė regresinė lygtis būtų tokia:

$$\alpha_{DPSH-A} = -0,0015 \cdot h^2 + 0,0194 \cdot h + 0,9352. \quad (4.25)$$



4.24 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su polinomine aproksimuojančia kreive (sudarytos imtys kiekvienam zondavimo 20 cm intervalui; zonduota smulkiame ir vidutinio rupumo smėlyje)

Duomenų grafikų (4.24 ir 4.25 pav.) vizuali ir matematinė analizė rodo, kad santykio pokytis iki 17,0 m gylio yra nežymus. Statistinė duomenų analizė parodė, kad aritmetinis imties ($n = 687$) vidurkis yra 1,01, jo būdingasis intervalas (su tikimybe 0,95) yra nuo 0,98 iki 1,03. Nagrinėjamos imties (iki 17,0 m) variacijos koeficientas – 31,6. Kiti statistiniai rodikliai pateikti 4.9 lentelėje.



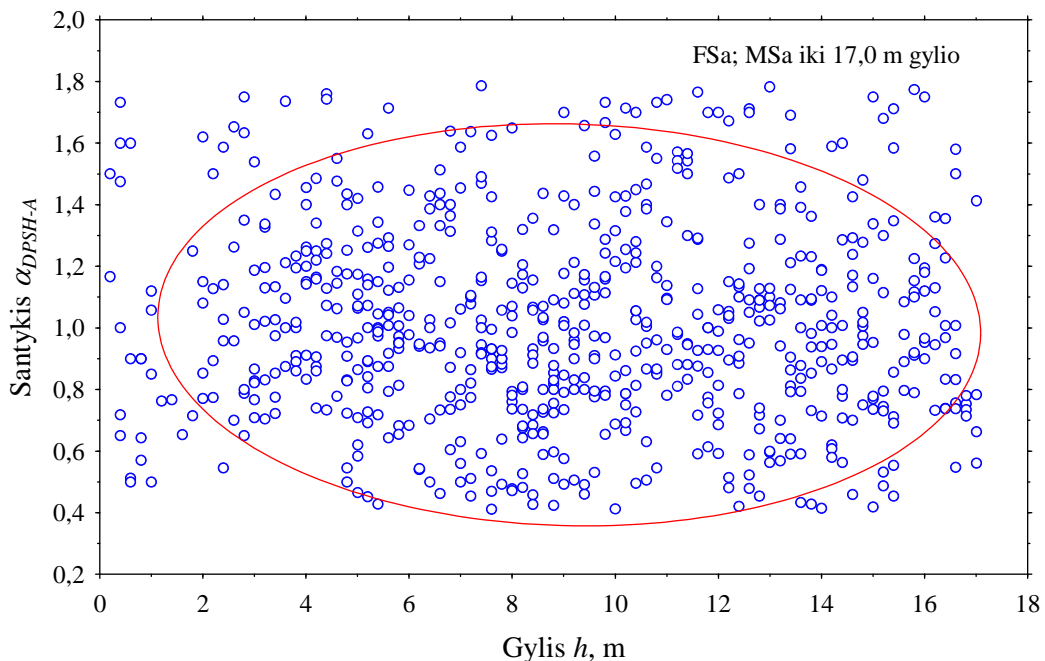
4.25 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su polinomine aproksimuojančia kreive (sudarytos imtys kiekvienam zondavimo metrui, zonduotas gruntas FSa ir MSa)

4.9 lentelė. Santykio (α_{DPSH-A}) verčių iki 17,0 m imties pagrindiniai statistiniai rodikliai (FSa ir MSa)

α_{DPSH-A} imtis	n	$\bar{\alpha}_{DPSH-A}$	S^2	S	Ω_X	A
FSa; MSa iki 17,0 m	687	1,01	0,1	0,3	31,6	1,37

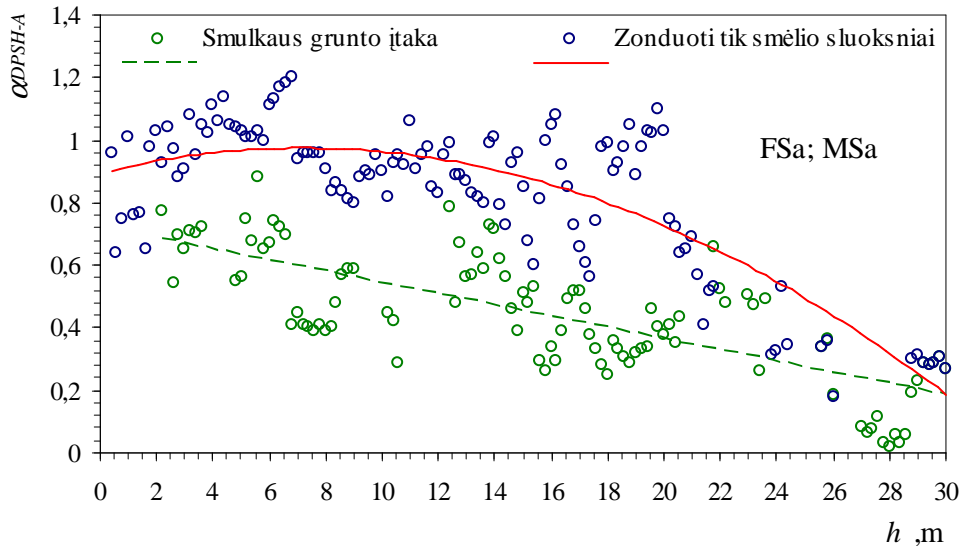
n – elementų skaičius nagrinėjamoje aibėje; $\bar{\alpha}_{DPSH-A}$ – aritmetinis santykio vidurkis; S^2 – dispersija; S – standartinis nuokrypis; Ω_X – variacijos koeficientas; A – aibės plotis.

Duomenų sklaidos diagramoje (iki 17,0 m gylio) apibrėžus elipsę, kuri atitinka imties plotį su tikimybe 0,95, matyti, kad didžioji imties taškų dalis patenka į nagrinėjamą elipsės sritį (4.26 pav.) Taigi galima sakyti, kad smulkiuose ir vidutinio rupumo smėliuose santykis (α_{DPSH-A}) apytiksliai yra lygus 1,0. Gilėjant jis parveda staugiai mažėti, – atsiranda šoninio geostatinio slėgio ir kartu trinties poveikis zondavimo duomenims. Ši išvada galioja tik tuo atveju, jei zonduojamoje stovymėje nėra didelių smulkiųjų (rišliųjų) gruntų sluoksnių, kurių poveikis (didesnis horizontalus geostatinis slėgis) gerokai padidintų zondavimo energijos nuostolius ir tai turėtų įtakos smūgių skaičiui.

4.26 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su elipse, kuri atitinka imties plotį (iki 17,0 m gylio; FSa ir MSa)

Kai zondavimo vietoje geologinis pjūvis yra kaitus ir smulkaus bei vidutinio rupumo smėlio sluoksnius dengia smulkaus (rišla) grunto sluoksniai, kurie turi įta-

kos smūgių skaičiui ($N_{20DPSH-A}$), tuomet santykio (α_{DPSH-A}) verčių dydis bus kitoks, – šiuo atveju vertės ženkliai sumažės (4.27 pav.).

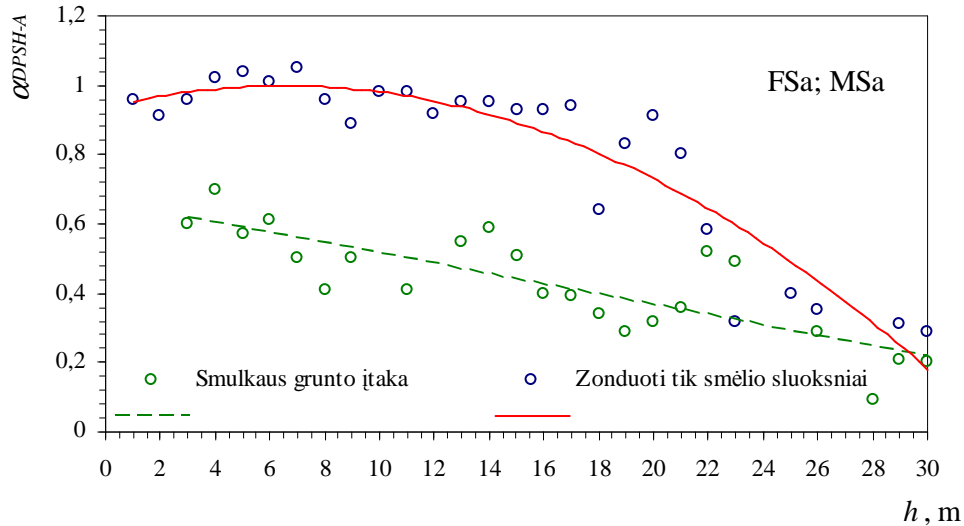


4.27 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, vaizduojanti smulkaus grunto įtaką (imtys kas 20 cm; FSa ir MSa)

Rišlaus grunto, slūgsančio virš smėlių, įtaka dinaminio zondavimo duomenims yra nustatyta išnagrinėjus 156 α_{DPSH-A} vertes ($N = 156$), kurios gautos zonduojant nuo 2,0 m iki 30,0 m. Duomenų sklaidos grafike (4.27 pav.) pateikiamos imčių, išskirtų kas 20 cm, vidutinės vertės. Dėl rišlaus grunto smėlio santykio ir gylio koreliacinė priklausomybė yra tiesinė (žr. formulę (4.4)). Koreliacinis ryšys tarp nagrinėjamų rodiklių yra glaudus ($R = 0,75$).

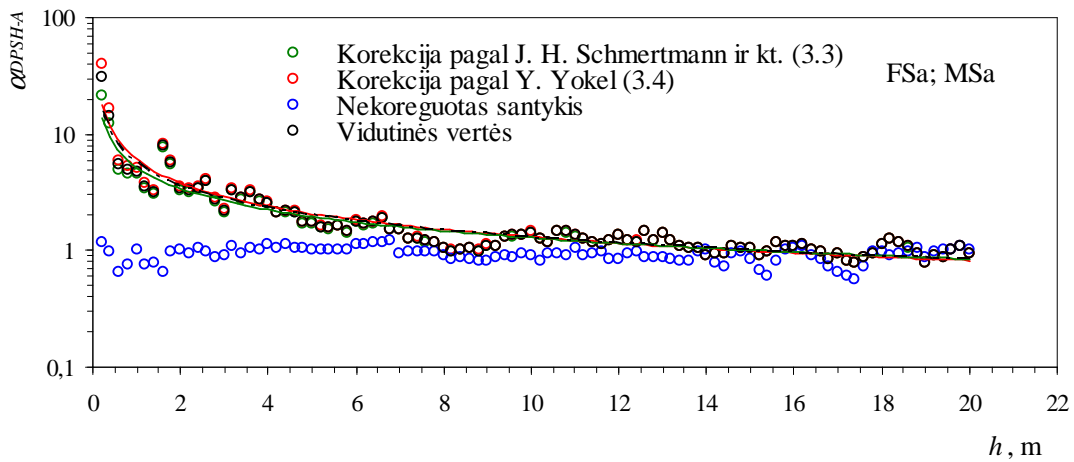
Glaudesnei koreliacijai nustatyti visa turima duomenų aibė ($N = 156$) buvo suskaidyta į atskiras imtis, kurios atitinka kiekvieną zondavimo metrą. Kiekvienai gautai imčiai apskaičiuotas aritmetinis vidurkis (4.28 pav.). Šių vidurkių statistinė koreliacinė analizė leido patikslinti tiesinės lygties (4.4) konstantų vertes ($R = 0,81$), – buvo gauta visa tiesinė lygtis:

$$\alpha_{DPSH-A} = 0,663 - 0,015 \cdot h. \quad (4.26)$$



4.28 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, vaizduojanti smulkaus grunto įtaką (imtys kas metrą; FSa ir MSa)

Kaip ir prieš tai nagrinėtais atvejais, polinominės lygtys leidžia manyti, kad tokią duomenų sklaidą lemia smūgio efektyvumas (η). Tačiau zonuojant dideliuose gyliuose, didžiulę įtaką duomenų patikimumui turi geostatinis slėgis ir štangų trintis į gruntą. Smulkaus ir vidutinio rupumo smėlio atvejais iki 17,0 m gylio geostatinio slėgio ir trinties įtaka nedidelė, nes santykis (α_{DPSH-A}) tokiais atvejais mažai priklauso nuo gylio (žr. 4.26 pav.). Smūgio efektyvumą (η) įvertinus pagal lygtis (3.3) ir (3.4) bei pakoregavus smūgių skaičių ($N_{20DPSH-A}$) pagal formulę (4.10), santykis įgavo kitas vertes (4.29 pav.).



4.29 pav. Dėl smūgio efektyvumo pakoreguoto santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama

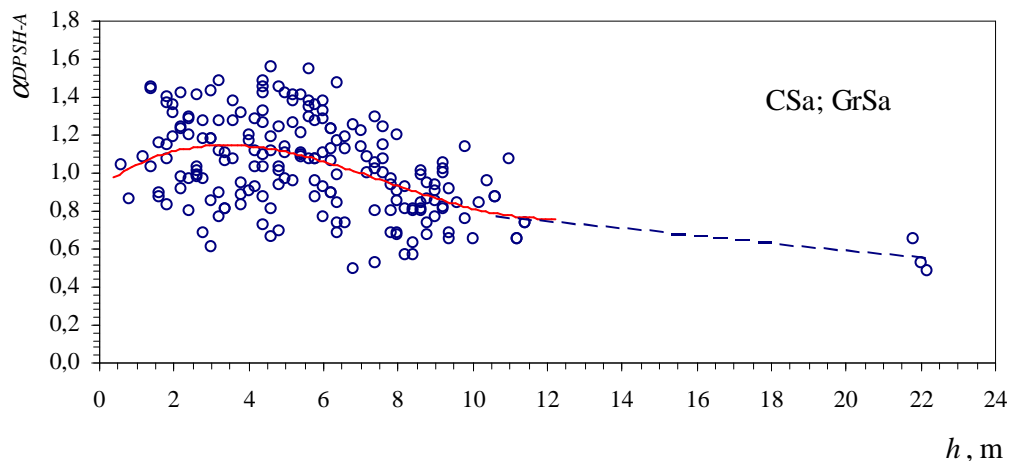
Koreguoto santykio priklausomybė nuo gylio turi labai glaudų ryšį ($R \sim 0,95$). Duomenis aproksimuojančią kreivę aprašo regresinė laipsninės lygtis:

$$\alpha_{DPSH-A}^{VID} = 5,6 \cdot h^{-0,6}. \quad (4.27)$$

4.3.3. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška rupiame ir žvyringame smėlyje

DPSH–A ir CPT duomenų analizei buvo surinktos 267 poros q_c ir N_{20} verčių. Santykio α_{DPSH-A} ir zondavimo gylio (h) koreliacinei analizei buvo panaudota tik 73% visos turėtos duomenų aibės ($N = 195$). Didelis kiekis (27%) duomenų buvo atmestas dėl žvirgždo ir gargždo įtakos zondavimo rodiklių vertėms.

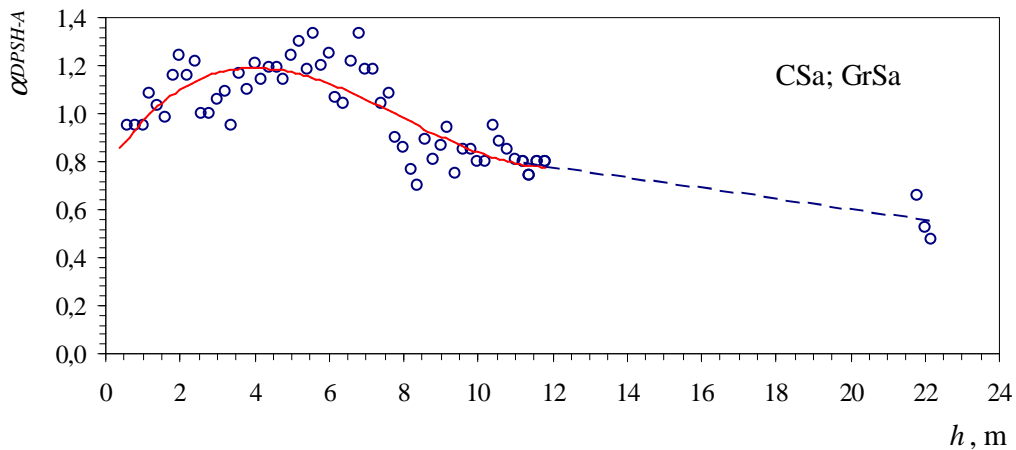
Pirminė visos nagrinėjamos santykio (α_{DPSH-A}) duomenų aibės ($N = 195$) analizė parodė, kad egzistuoja silpnas ryšys tarp santykio ir gylio ($R = 0,51$). Kaip ir kituose gruntuose, taip ir rupiame bei žvyringame smėlyje duomenis geriausiai aproksimuoja polinominė kreivė (4.30 pav.).



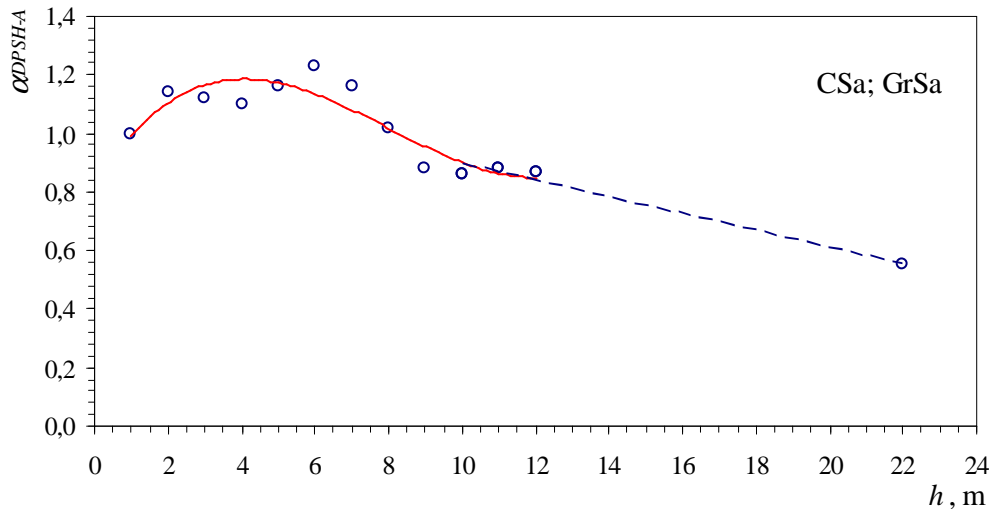
4.30 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama
(nagrinėjama visa duomenų aibė $N = 195$)

Pagrindiniai zondavimo duomenys buvo gauti tik iki 12,0 m gylio. Keletas duomenų buvo gauta iš 21,6–22,4 m gylio intervalo. Duomenų sklaidos diagramoje (žr. 4.30 pav.) trūkstamų duomenų koreliacija su zondavimo gyliu yra menama. Iš-

nalizavus smulkesnių rupių gruntų duomenis tame gylyje priimta, kad priklausomybę tiksliausiai gali aprašyti tiesinė koreliacija (grafike (žr. 4.30 pav.) pavaizduota punktyru). Nustačius duomenų koreliacinio ryšio pobūdį, turimos santykio (α_{DPSH-A}) vertės buvo skaidomos į imtis kas 20 cm. Vidutinių kiekvienos imties santykio (α_{DPSH-A}) verčių priklausomybė nuo zondavimo gylio turi glaudų ryšį ($R = 0,81$) (4.31 pav.), duomenų pasiskirstymas iki 12,0 m aprašomas kubine polinomine lygtimi (4.2), gi-
liau – tiesine lygtimi (4.4).



4.31 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (imtys kas 20 cm, CSa ir GrSa)



4.32 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama
(imtys kas vieną metrą, CSa ir GrSa)

Lygčių (4.2) ir (4.4) konstantų tikslesniam nustatymui santykio α_{DPSH-A} verčių aritmetinis vidurkis buvo skaičiuojamas kiekvienam zondavimo metrui. Gautų rezultatų sklaidos diagrama parodė, kad koreliacinis ryšys yra labai glaudus ($R = 0,91$) (4.32 pav.). Visos santykio nustatymo lygtys bus tokios: kai zonduojama iki 12,0 m, – skaičiuojama pagal kubinę polinomines lygtį (4.28), nuo 12,0 m iki 22,0 m – pagal tiesinę lygtį (4.29):

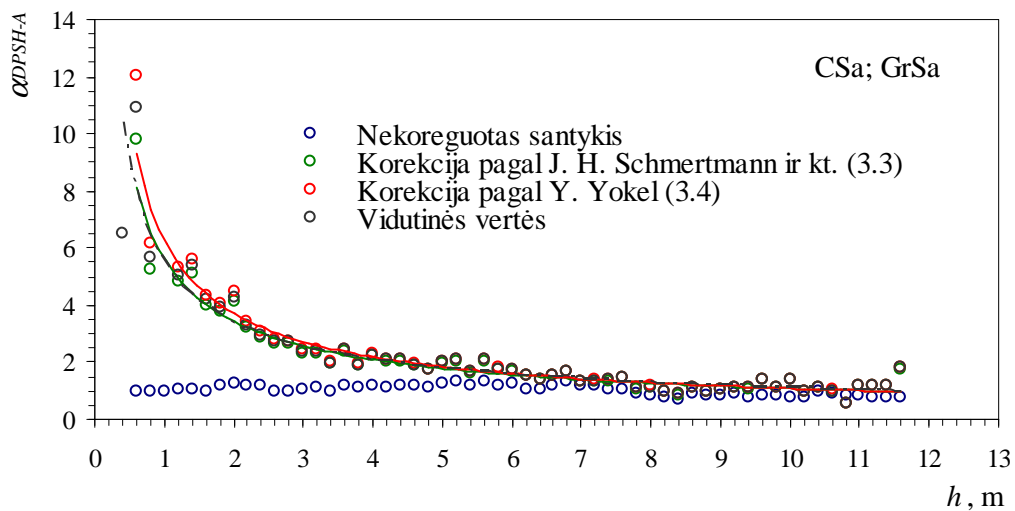
$$\alpha_{DPSH-A} = 0,0014 \cdot h^3 - 0,0332 \cdot h^2 + 0,2 \cdot h + 0,82; \quad (4.28)$$

$$\alpha_{DPSH-A} = 1,18 - 0,028 \cdot h. \quad (4.29)$$

Įvertinus smūgio efektyvumo (η) įtaką smūgių skaičiaus ($N_{20DPSH-A}$) vertėms (žr. formulę (4.10)), koreguoto santykio α_{DPSH-A}^{VID} duomenų sklaida iki 12,0 m gylio geriausiai aprašoma laipsnine lygtimi (4.5) (4.33 pav.), kurios visa išraiška būtų tokia:

$$\alpha_{DPSH-A}^{VID} = 5,5 \cdot h^{-0,7}. \quad (4.30)$$

Rupiname ir žvyringame smėlyje, žinant smūgių skaičiaus ($N_{20DPSH-A}$) dydžius, kūgio spraudos (q_c) vertes galima nustatyti pagal lygtį (4.8), atitinkamai panaudojant santykio (α_{DPSH-A}) nustatymo lygtis (4.28), (4.29) arba (4.30).



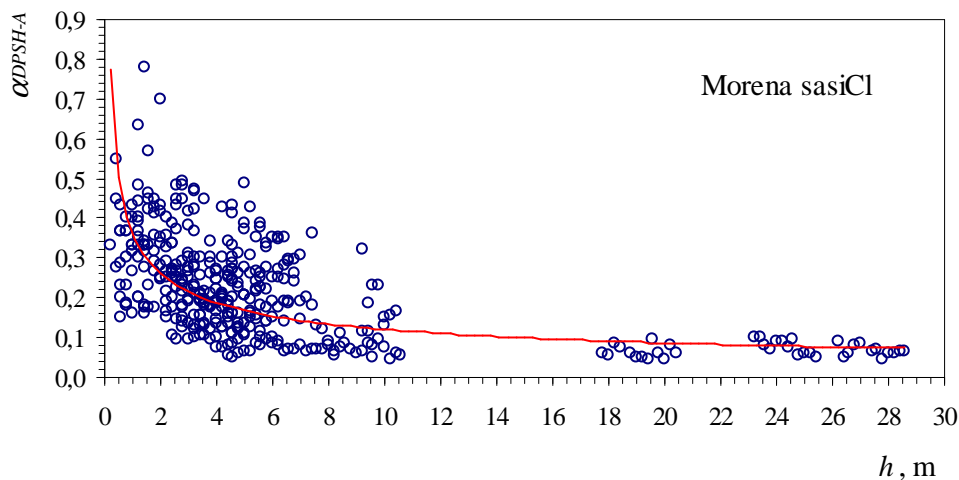
4.33 pav. Dėl smūgio efektyvumo pakoreguoto santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama (CSa ir GrSa)

4.3.4. *DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame dulkingame molyje*

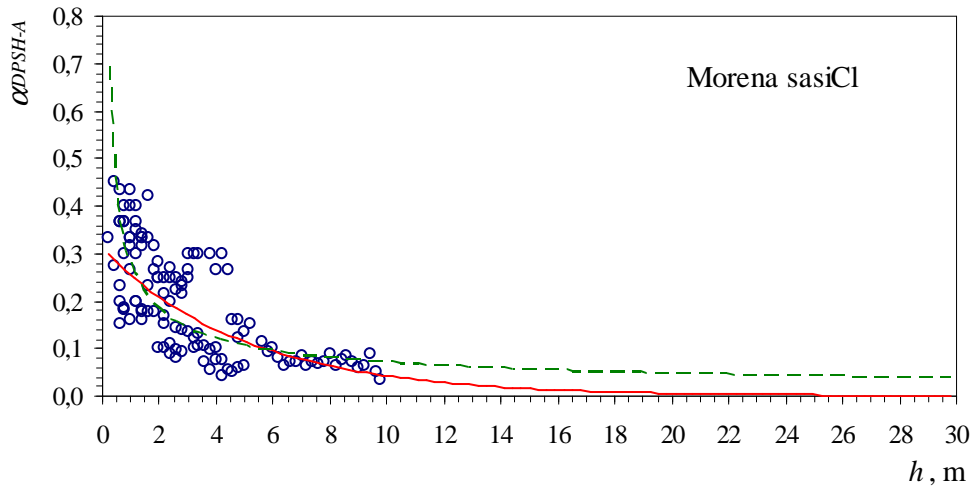
Koreliaciniam ryšiui tarp dinaminio zondavimo $DPSH-A$ duomenų (N_{DPSH-A}) ir CPT kūgio spaudos (q_c) nustatyti buvo surinkto 478 santykio (α_{DPSH-A}) vertės (žr. formulę (4.1)). Tolesnei koreliacinei analizei ir regresinių priklausomybės lygčių nustatymui buvo panaudota virš 80% turimos aibės duomenų ($N = 389$). Koreliacinė duomenų analizė parodė, kad tarp nagrinėjamo santykio ir zondavimo gylio yra silpnas ryšys ($R \sim 0,66$) (4.34 pav.). Geriausiai duomenų sklaidą aproksimuoja laipsninė funkcija (žr. formulę (4.5)).

Detalesnei duomenų analizei nefiltruota santykio (α_{DPSH-A}) duomenų aibė ($N = 478$) buvo suskaidyta į tris imtis atsižvelgiant į kūgio spaudos (q_c) vertes. Kiekvienos išskirtos imties duomenys buvo filtruojami nuo atsitiktinių duomenų, atmetant iki 20% verčių. Pirmoji imtis buvo sudaryta iš santykio verčių, kai $q_c \leq 2,0$ MPa ($n = 120$); antroji imtis – kai q_c vertės kinta nuo 2,0 MPa iki 4,0 MPa ($n = 149$); trečioji – kai $q_c > 4,0$ MPa ($n = 132$).

Kai zonduojamas moreninis smėlingas dulkingas molis, kurio mechaninės savybės yra pakankamai silpnos ($q_c \leq 2,0$ MPa) ir šio grunto konsistencija yra nuo taktai iki kietai plastiškos, santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidą geriausiai aproksimuoja eksponentinė kreivė, kuri parodo, kad tarp zondavimo gylio (h) ir nagrinėjamo santykio yra glaudus ryšys ($R = 0,76$) (4.35 pav.).



4.34 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama
(nagrinėjama visa duomenų aibė $N = 389$)

4.35 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama ($q_c \leq 2,0$ MPa; $n = 120$)

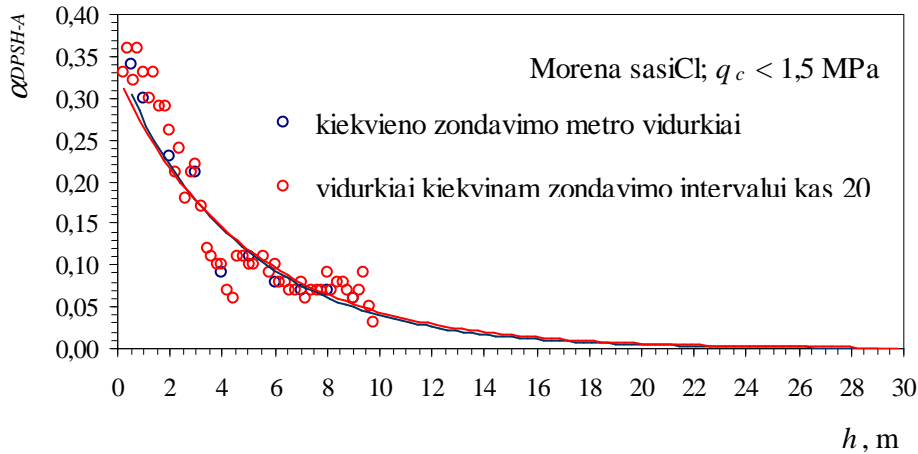
Nagrinėjamos duomenų imties (kai $q_c \leq 2,0$ MPa) santykio (α_{DPSH-A}) vertės su gyliu gali turėti tiek eksponentinę ($R \sim 0,76$), tiek laipsninę ($R \sim 0,74$) priklausomybę (žr. 4.35 pav.). Tokie ir minkštai plastingas silpnas ($q_c \leq 1,5$ MPa) moreninis smėlingas dulkingas molis turi didesnę porinį slėgį (dėl didesnio vandens kiekio). Dėl to kūgio spraudos (q_c) vertės yra nedidelės, smūgių skaičius padidėja, o santykio (α_{DPSH-A}) vertės mažėja. Zondui smingant gilyn, dėl porinio slėgio ir molinių gruntų fizikinių bei mechaninių savybių ypatumo šoninis geostatinis slėgis į zondavimo štangą didėja, o santykio vertės gerokai sumažėja. Šį procesą gerai atspindi eksponentinė priklausomybė (4.6).

Laipsninės funkcijos atveju (žr. formulę (4.5)) santykio vertės iki tam tikro gylio mažėja staigiai, giliau – mažiau. Tai tik iš dalies atspindi silpno smulkaus grunto elgseną dinaminio zondavimo metu (žr. 4.35 pav.). Laipsninė lygtis (4.5) tinka, kai zonduojamas moreninis smėlingas dulkingas molis yra kietai plastingos konsistencijos ir vidutinio stiprumo ($1,5 \text{ MPa} < q_c < 2,0 \text{ MPa}$). Šiuo atveju porinio slėgio įtaka zondavimo duomenims yra mažesnė.

Santykio (α_{DPSH-A}) skaičiavimo eksponentinėje lygtyje (4.6) esančių konstantų (a , b) vertėms nustatyti buvo suskaičiuoti aritmetiniai vidurkiai kiekvienam zondavimo intervalui kas 20 cm ir kiekvienam zondavimo metrui. Šių vidurkių sklaidos ir zondavimo gylio koreliacija rodo, kad ryšys tarp nagrinėjamų rodiklių yra labai glaudus (kai vidurkiai skaičiuoti kas 20 cm, $R = 0,90$; kai vidurkiai skaičiuoti kas metrą, $R = 0,95$) (4.36 pav.). Tokiu atveju galima užrašyti tokią apibendrintą lygtį (4.31), kuri

leistų nustatyti santykio (α_{DPSH-A}) vertę bet kuriame zondavimo gylyje, kai nagrinėjamas gruntas yra silpnas moreninis smėlingas dulkingas molis ($q_c \leq 1,5$ MPa):

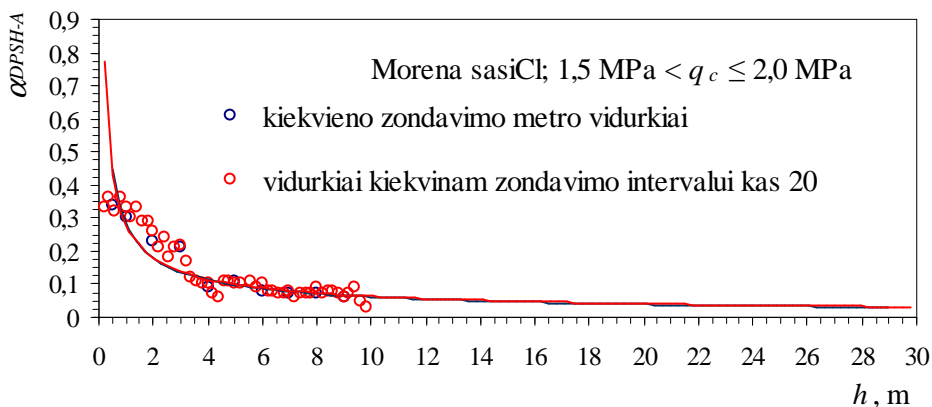
$$\alpha_{DPSH-A} = 0,3238 \cdot e^{-0,2045 \cdot h} \quad (4.31)$$



4.36 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su eksponentine kreive ($q_c \leq 1,5$ MPa; morena sasiCl)

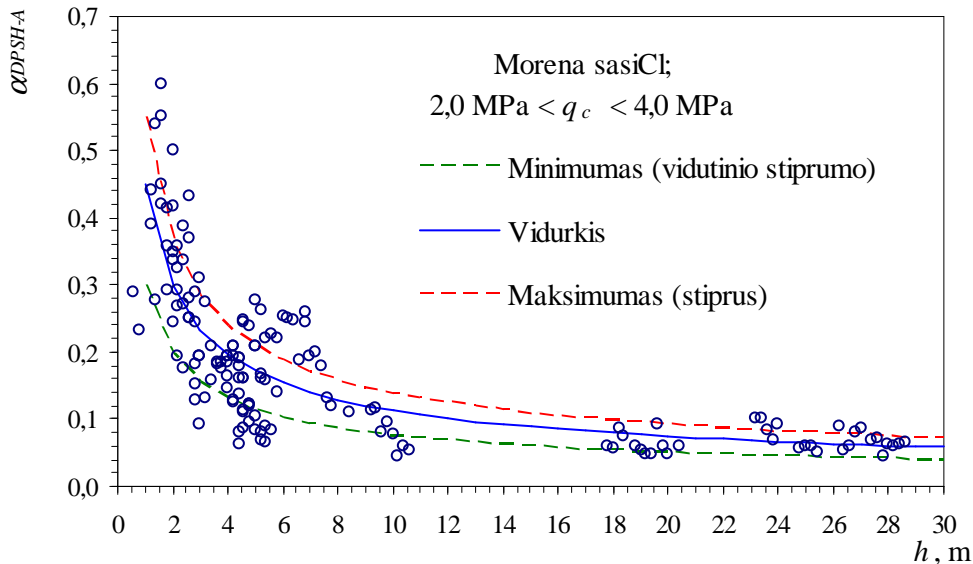
Kai moreninis smėlingas dulkingas molis yra vidutinio stiprumo, o jo kūgio spraudos (q_c) vertės kinta nuo 1,5 MPa iki 2,0 MPa, santykio (α_{DPSH-A}) vertėms nustatyti (4.37 pav.) naudojama laipsninė lygtis bus tokia ($R \sim 0,93$):

$$\alpha_{DPSH-A} = 0,277 \cdot h^{-0,63} \quad (4.32)$$



4.37 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine kreive ($1,5$ MPa $< q_c \leq 2,0$ MPa; morena sasiCl)

Kai zonduojamas moreninis smėlingas dulkingas molis yra vidutinio stiprumo ir stiprus ($2,0 \text{ MPa} < q_c \leq 4,0 \text{ MPa}$), o jo konsistencija kinta nuo kietai plastiškos iki pusketės ir kietos, santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidą geriausiai aproksimuoja laipsninė funkcija (4.5). Koreliacija tarp santykio ir zondavimo gylio yra labai glaudi ($R \sim 0,91$) (4.38 pav.).



4.38 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine kreive ($2,0 \text{ MPa} < q_c \leq 4,0 \text{ MPa}$; morena sasiCl)

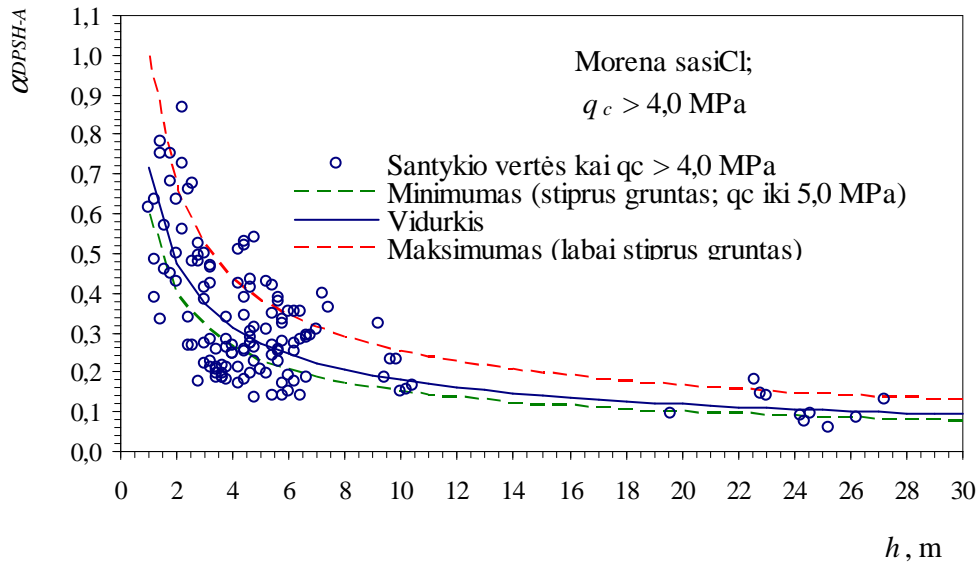
Laipsninės (4.5) lygties konstanta (a) priklauso nuo moreninio smėlingo dulkingo molio mechaninių ir fizikinių savybių. Kai zonduojamas gruntas yra vidutinio stiprumo ir kietai platingos konsistencijos, konstanta $a = 0,3$ ir apima imties minimalias vertes; kai gruntas stiprus ir konsistencija kieta, $a = 0,45$ ir apima imties maksimalias vertes (4.38 pav.). Kai nėra informacijos apie moreninio smėlingo dulkingo molio konsistenciją ir žinoma, kad q_c vertės yra tarp $2,0 \text{ MPa}$ ir $4,0 \text{ MPa}$, laipsninė lygtis būtų tokia:

$$\alpha_{DPSH-A} = 0,4216 \cdot h^{-0,6}. \quad (4.33)$$

Pusketės konsistencijos moreninio smėlingo dulkingo molio santykiui (α_{DPSH-A}) apskaičiuoti tinka lygtis (4.33).

Dinaminiu zonu (DPSH–A) zonduojant stiprų ir labai stiprų moreninį smėlingą dulkingą molį ($q_c > 4,0 \text{ MPa}$), kuris yra kietos konsistencijos, santykio (α_{DPSH-A})

vertės būna didžiausios, lyginat su silpnesniais tos pačios granulimetrinės sudėties moreniniais gruntais. Santykio duomenų sklaidą zondavimo gylio atžvilgiu geriausiai aproksimuoja laipsninės funkcijos kreivė (4.39 pav.). Koreliacijos koeficientas (R) kinta nuo 0,73, kai nagrinėjama visa imtis $n = 132$, iki 0,94, kai imtis sudalyta kas metrą ir apskaičiuoti aritmetiniai vidurkiai. Tokiu atveju galima teigti, kad tarp santykio α_{DPSH-A} verčių ir zondavimo gylio egzistuoja gana glaudus koreliacinis ryšys.



4.39 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine kreive ($q_c > 4,0$ MPa; morena sasiCl)

Stipraus moreninio smėlingo dulkingo molio (q_c iki 5,0 MPa) santykio (α_{DPSH-A}) skaičiavimo laipsninės lygties (4.5) konstanta $a = 0,6$, o kai gruntas yra labai stiprus, $a = 0,8$. Esant ypač stipriam moreniniam smėlingam dulkingam moliui, konstanta (a) gali būti lygi 1. Stipraus ir labai stipraus grunto vidutines vertes atitinka ši laipsninė lygtis:

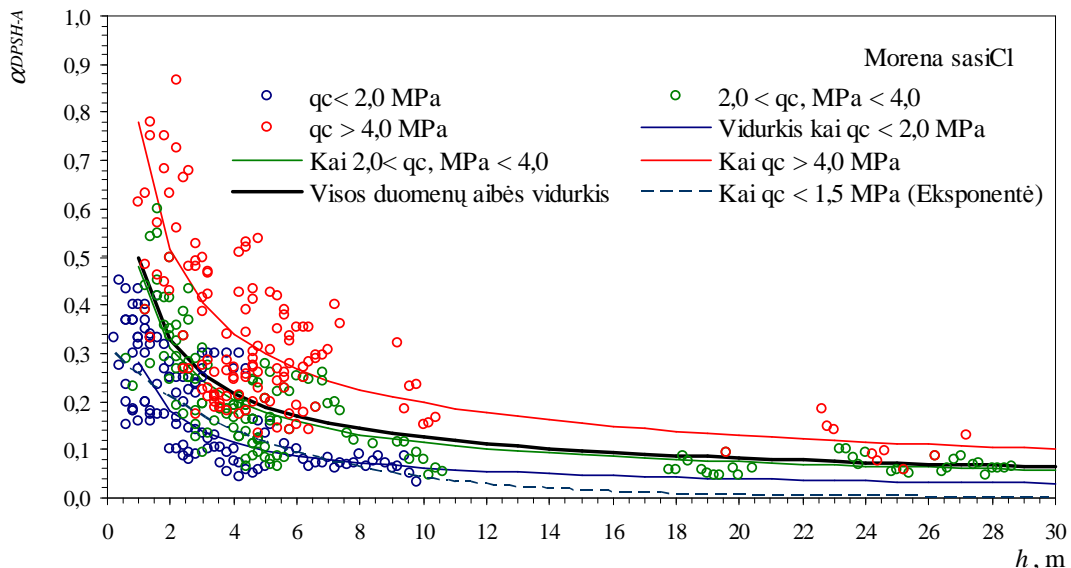
$$\alpha_{DPSH-A} = 0,72 \cdot h^{-0,6}. \quad (4.34)$$

Dėl skirtingo stiprumo moreninis smėlingas dulkingas molis skirtingai priešinasi kūgio smigimui dinaminio zondavimo metu (DPSH-A), – dėl šios priežasties atsiranda didžiuliai skirtumai tarp santykio α_{DPSH-A} . Skirtumas tarp silpno grunto ($q_c \leq 2,0$ MPa) zondavimo rodiklių santykio (α_{DPSH-A}) ir stipraus bei labai stipraus ($q_c > 4,0$ MPa) svyruoja nuo 64% iki 70%. Tuo tarpu kai zonduojamas smėlingas dulkingas

moreninis molis yra nuo vidutinio stiprumo iki stipraus ($2,0 < q_c, \text{MPa} \leq 4,0 \text{ MPa}$), jo zondavimo rodiklių santykio vertės yra artimos vidutinėms visos duomenų aibės santykio vidurkių vertėms (4.40 pav.). Skirtumas pirmuose zondavimo metruose būna iki 7%, giliau – siekia iki 10%.

Atliekant DPSH–A zondo duomenų, gautų zondojuant moreninį smėlingą dulkingą molį, analizę ir norint įvertinti santykio α_{DPSH-A} dydžius, bet neturint preliminarių papildomų žinių apie to grunto stiprumą ar jo konsistenciją, tai galima apskaičiuoti pagal lygtį (4.35), kurios sprendiniai artimi bendram vidurkiui.

$$\alpha_{DPSH-A} = 0,5 \cdot h^{-0,6}. \quad (4.35)$$

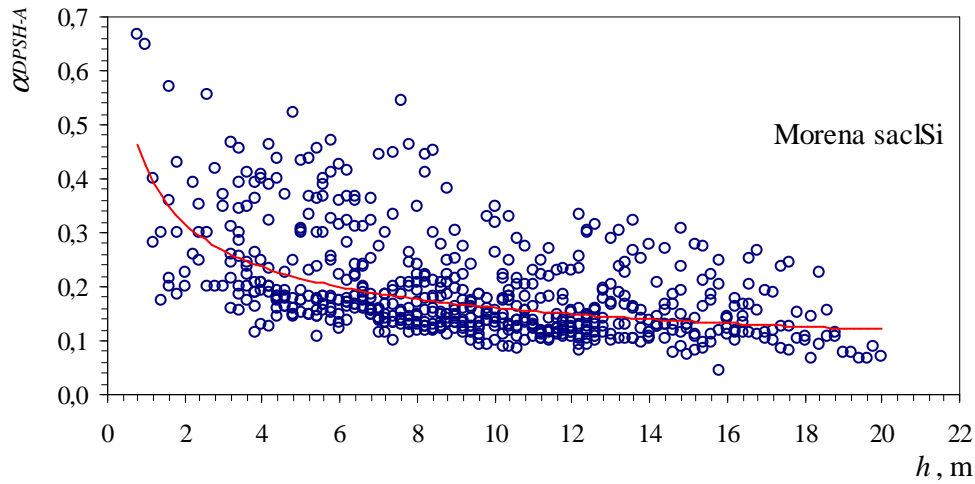


4.40 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, apimanti visą aibę ($N = 401$; morena sasiCl)

4.3.5. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška moreniniame smėlingame molingame dulkyje

Duomenų analizei ir koreliaciniam ryšiui tarp santykio (α_{DPSH-A}) ir zondavimo gylio (h) nustatyti buvo panaudota 718 smūgių skaičiaus (N_{DPSH-A}) ir kūgio spraudos (q_c) porų. Pradinėje duomenų analizės stadijoje buvo atmesta 17% atsitiktinių α_{DPSH-A} vertių. Likusių duomenų ($N = 613$) sklaidos analizė parodė, kad tarp santykio (α_{DPSH-A})

ir zondavimo gylio (h) yra silpnas koreliacinis ryšys ($R = 0,54$). Duomenis geriausiai apibūdina laipsninė lygtis (4.5) (4.41 pav.).

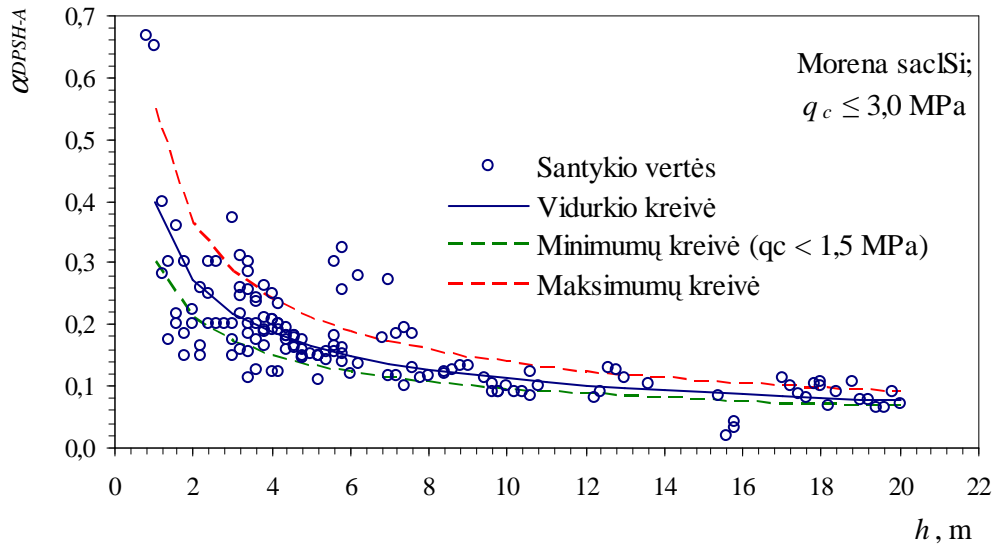


4.41 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama ($N = 613$; morena saciSi)

Remiantis visos filtruotos aibės ($N = 613$) analizės duomenimis, visa nefiltruota santykio duomenų aibė ($N = 718$) buvo sudalyta į tris imtis. Pirmoji duomenų imtis buvo sudaryta iš α_{DPSH-A} verčių, kai $q_c \leq 3,0$ MPa ($n = 185$), antrąją imtį sudarė vertės, kai $3,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 8,0$ ($n = 457$); trečiąją – kai $q_c > 8,0$ MPa ($n = 76$). Tolesnėje duomenų analizėje nuo kiekvienos gautos imties buvo atmesta iki 15–20% atsitiktinių verčių.

Nagrinėjant duomenis, gautus zonduojant moreninį smėlingą molingą dulki, kurio $q_c \leq 3,0$ MPa, nustatyta, kad laipsninis koreliacinis ryšys tarp santykio ir zondavimo gylio yra glaudus ($R \sim 0,80$) (4.42 pav.). Kai zonduojamas silpnas gruntas ($q_c \leq 1,5$ MPa), formulėje (4.5) konstanta $a = 0,3$, eksponentė $n = -0,5$. Nagrinėjant duomenis vidutinio stiprumo moreniniame smėlingame molingame dulkyje ($1,5 < q_c, \text{ MPa} \leq 3,0$), lygties (4.5) konstanta $a = 0,5$, eksponentė $n = -0,6$. Šios konstantos (a) ir eksponentės (n) vertės geriau atspindi nagrinėjamos imties duomenų sklaidos ribas, nes santykio (α_{DPSH-A}) mažesnės vertės gaunamos zonduojant silpnesnius gruntuos, ir atvirkščiai (4.42 pav.). Vidutinės santykio (α_{DPSH-A}) vertės atspindi tokia laipsninė lygtis:

$$\alpha_{DPSH-A} = 0,4 \cdot h^{-0,55}. \quad (4.36)$$



4.42 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsninėmis kreivėmis ($q_c \leq 3,0 \text{ MPa}$; morena saclSi)

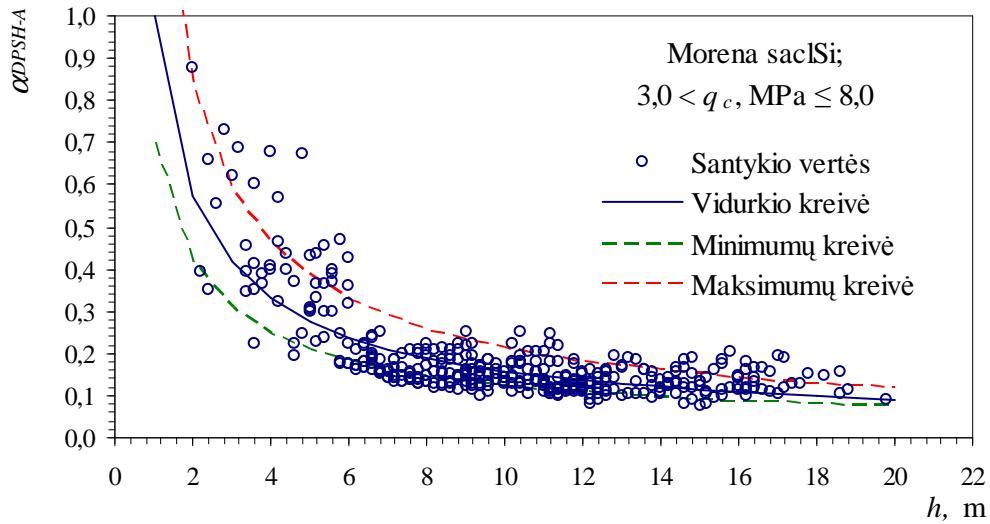
Zonduojant vidutinio stiprumo (artimą stipriam), stiprų ir labai stiprų moreninį smėlingą molingą dulkį ($3,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 8,0$), jo santykio (α_{DPSH-A}) vertės padidėja, lyginant su silpnesniu tos pačios granulometrinės sudėties moreniniu gruntu. Koreliacijos koeficientas parodo glaudų ryšį tarp santykio ir zondavimo gylio ($R \sim 0,80$), o duomenys pasiskirsto pagal laipsninę lygtį (4.5).

Lygtyje (4.5), kai moreninis smėlingas molingas dulkis stiprus ir labai stiprus, o kūgio spaudos (q_c) vertė $\sim 5,0 \text{ MPa}$, konstanta $a = 1$, eksponentė $n = -0,8$. Kai zonduojamas gruntas artėja prie vidutinio stiprumo (q_c artėja prie $3,0 \text{ MPa}$), tuomet formulėje (4.5) a nuo 1 artės prie 0,7, o eksponentė (n) kis nuo -0,8 iki -0,75.

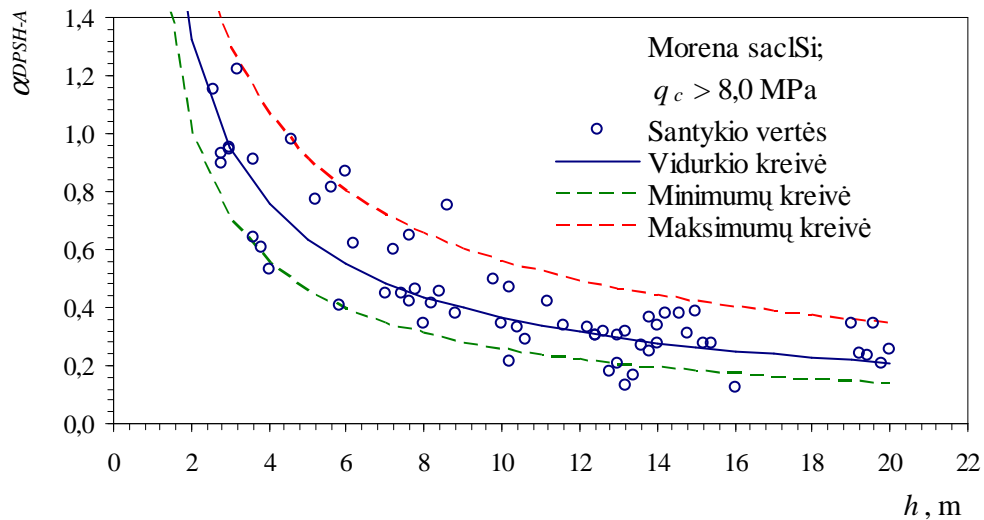
Kai smėlingas molingas moreninis dulkis yra labai stiprus ir kūgio spaudos vertės artėja prie $8,0 \text{ MPa}$, formulėje (4.5) konstanta (a) nuo 1 didėja iki 1,5, o eksponentė (n) kinta nuo -0,8 iki -0,85. Kai zonduojamo grunto kūgio spauda yra artima $8,0 \text{ MPa}$, a ir n vertės bus maksimalios (atitinkamai 1,5 ir -0,85).

Duomenų sklaidos diagramoje minimalių ir maksimalių verčių tendencijos kreivės atitinka vidutinio stiprumo (stiprius) ir labai stiprius gruntuos (4.43 pav.).

Zonduojant ypač stiprų moreninį smėlingą molingą dulkį ($q_c > 8,0 \text{ MPa}$), santykio (α_{DPSH-A}) vertės labai smarkiai išauga. Duomenų analizė leido nustatyti, kad ryšys tarp santykio pokyčio ir zondavimo gylio laipsninės funkcijos ribose yra glaudus ($R = 0,84$) (4.44 pav.).



4.43 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsninėmis kreivėmis ($3,0 \text{ MPa} < q_c, \text{ MPa} \leq 8,0$; morena saclSi)



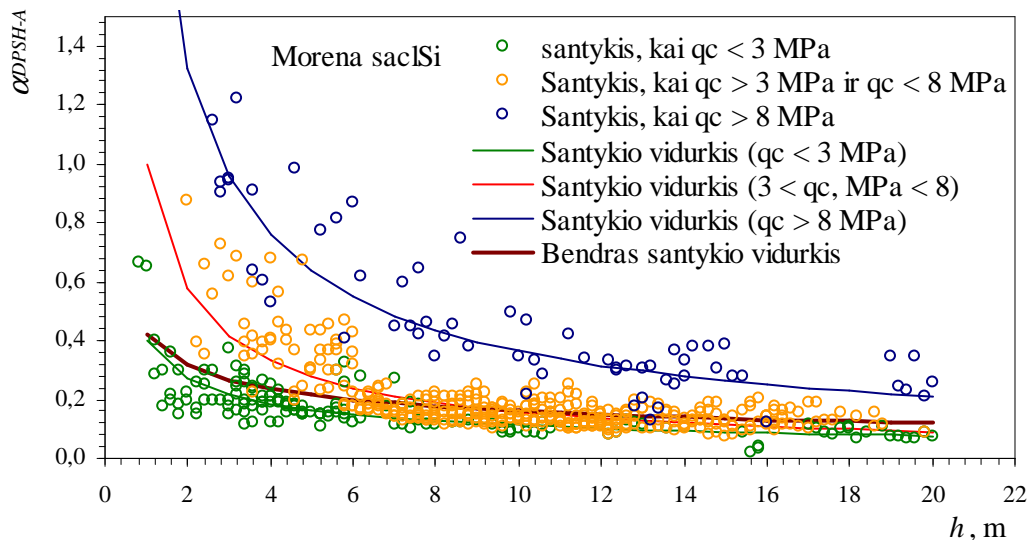
4.44 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsninėmis kreivėmis ($q_c > 8,0 \text{ MPa}$; morena saclSi)

Apibendrinta lygtis (4.37), pagal kurią skaičiuojant galima nustatyti santykio vertes (α_{DPSH-A}), būtų tokia:

$$\alpha_{DPSH-A} = 2,3 \cdot h^{-0,8}. \quad (4.37)$$

Laipsninė lygtis (4.37) galioja tuomet, kai zonuoto moreninio smėlingo molingo dulquio kūgio sprauda (q_c) yra 12,0–16,0 MPa. Kai kūgio spraudos vertės artėja prie 8,0 MPa, formulėje (4.5) konstanta (a) atitinkamai turi būti mažinama iki 1,8, o eksponentė (n) didinama iki -0,85. Minimalios konstantos (a) ir maksimalios eksponentės (n) vertės priimamos, kai $q_c > 8,0$ MPa, bet $q_c < 20,0$ MPa. Kai zonuojamas smėlingas molingas moreninis gruntas yra ypač tvirtas ($q_c > 20,0$ MPa), tuomet formulėje (4.5) konstanta (a) didėja iki 2,8, o eksponentė (n) mažėja iki -0,75.

Moreninio smėlingo molingo dulquio santykio (α_{DPSH-A}) priklausomybės nuo gylio (h) analizė parodė, kad kuo gruntas silpnesnis, tuo labiau α_{DPSH-A} vertės mažėja (4.45 pav.). Pradiniame zondavimo gylyje (iki 7,0 m) vidutiniškai santykis skiriasi nuo 3,5 iki 5,5 karto, gilesniuose sluoksniuose šis skirtumas mažesnis 2–3 kartus. Analizuojant dinaminio zondavimo duomenis ($N_{20DPSH-A}$) ir norint netiesiogiai gauti statinės kūgio spraudos (q_c) vertes, reikia preliminariai žinoti zonuoto smėlingo molingo moreninio dulquio stiprumines savybes ar konsistenciją. Tai leistų geriau pasirinkti laipsninės regresinės lygties (4.5) konstantos (a) ir eksponentės (n) dydžius.



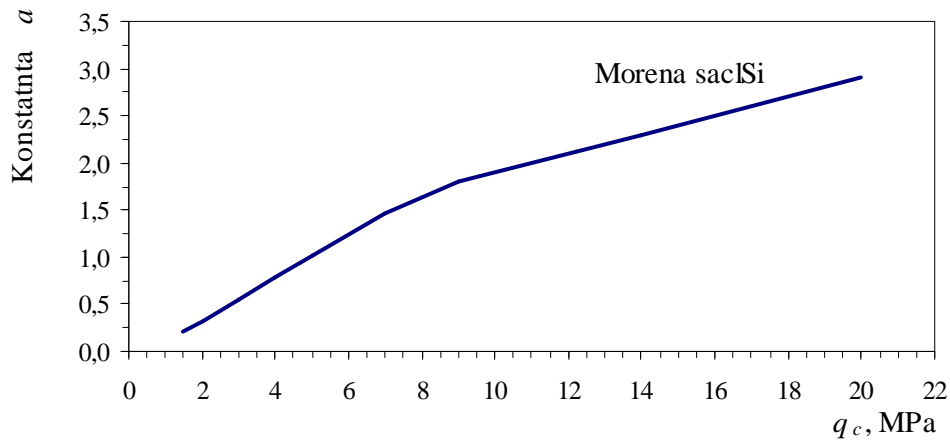
4.45 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama, apimanti visą aibę ($N = 581$; morena saclSi)

Lygties (4.5) konstantą (a) galima nustatyti pagal tiesines lygtis (4.38) ir (4.39). Pirmoji lygtis (4.38) tinka, kai preliminari nustatyta kūgio sprauda neviršija 7,0 MPa, lygtis (4.39) tinka, kai $q_c > 7,0$ MPa. Taip pat konstantą (a) galima nustatyti iš grafiko (4.46 pav.).

$$a = 0,23 \cdot q_c^{pr} - 0,14; \quad (4.38)$$

$$a = 0,1 \cdot q_c^{pr} + 0,9; \quad (4.39)$$

čia q_c^{pr} – nagrinėjamame gylyje esanti preliminari kūgio spraudos vertė, nustatyta tiesiogiai CPT bandymais, paimta iš archyvinių duomenų arba priimta netiesiogiai, MPa.



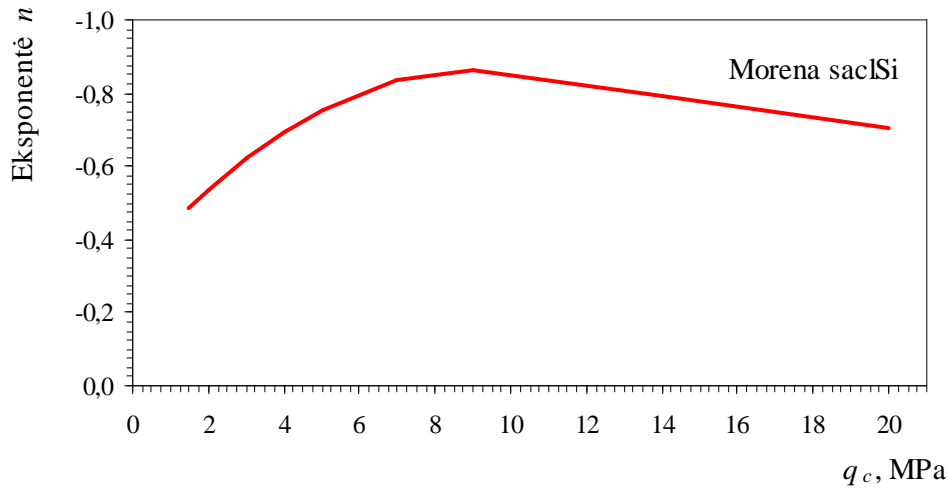
4.46 pav. Laipsninės lygties (4.5) konstantos (a) nustatymo grafikas (morena sacSi)

Lygties (4.5) eksponentei (n) nustatyti galima naudoti lygtis (4.40) ir (4.41) arba grafiką (4.47 pav.). Lygtis (4.40) galioja, kai $q_c \leq 9,0$ MPa, lygtis (4.41) galioja, kai $q_c \geq 9,0$ MPa:

$$n = 0,0068 \cdot q_c^{pr^2} - 0,1207 \cdot q_c^{pr} - 0,323; \quad (4.40)$$

$$n = 0,0144 \cdot q_c^{pr} - 0,993; \quad (4.41)$$

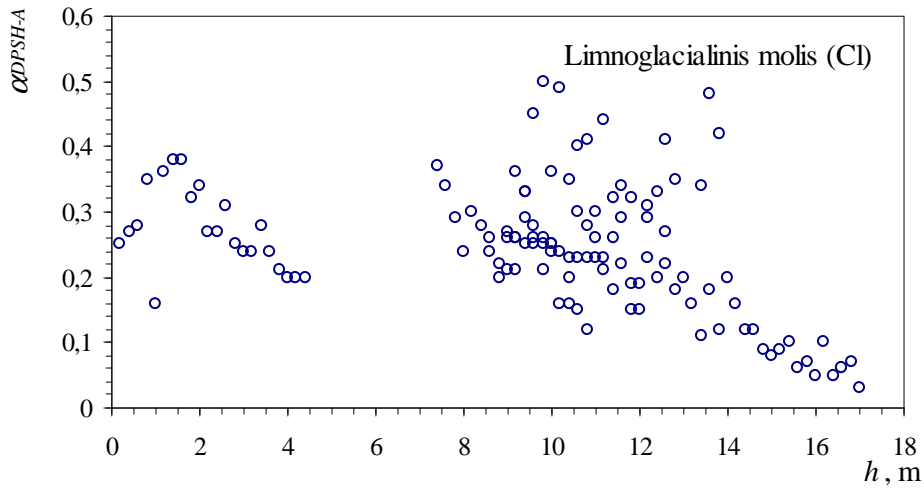
čia q_c^{pr} – nagrinėjamame gylyje esanti preliminari kūgio spraudos vertė, nustatyta tiesiogiai CPT bandymais, paimta iš archyvinių duomenų arba priimta netiesiogiai, MPa.

4.47 pav. Laipsninės lygties (4.5) eksponentės (n) nustatymo grafikas (morena saclSi)

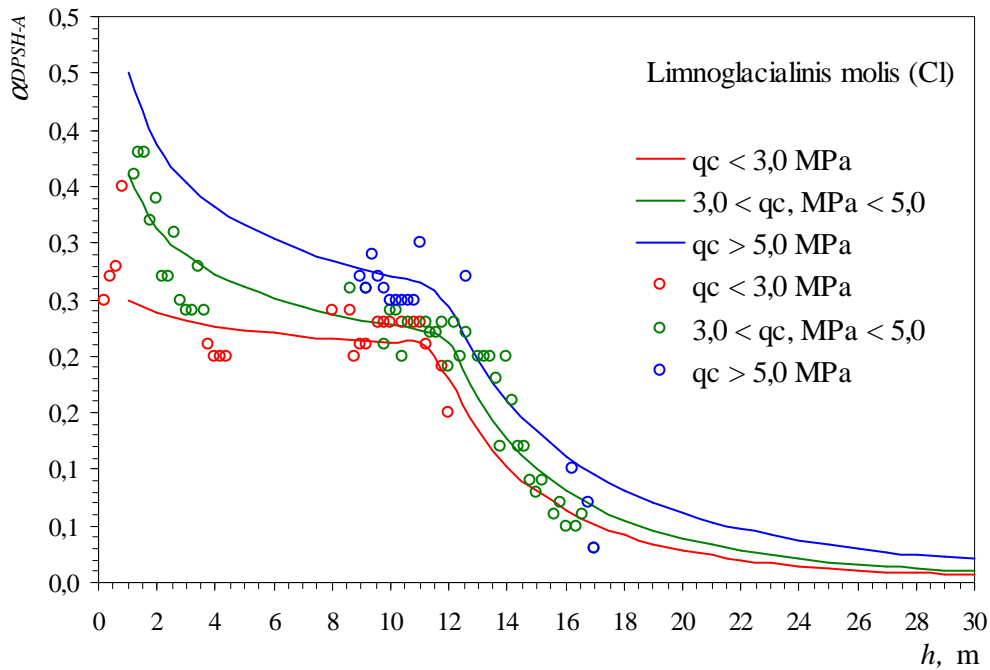
4.3.6. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniame molyje

Lietuvoje limnoglacialiniai moliai mažai zonuoti dinaminio DPSH–A zondavimu. Šiame darbe buvo surinktos 123 q_c ir $N_{20DPSH-A}$ rodiklių poros ($N = 123$). Visos turimos santykio (α_{DPSH-A}) duomenų aibės ir zondavimo gylio (h) koreliacinė analizė aiškios tarpusavio priklausomybės neparodė (4.48 pav.). Todėl duomenys buvo suskaidyti į atskiras imtis pagal zonduojamo molio stiprumą. Skaidymo kriterijumi buvo pasirinktas turimos kūgio spraudos q_c vertės. Išskirtos trys imtys: pirmoji imtis, kai $q_c < 3,0$ MPa (sąlyginai silpni ir vidutinio stiprumo moliai); antrosios imties duomenis sudarė santykio vertės, kai $3,0 \leq q_c, \text{ MPa} < 5,0$ (vidutinio stiprumo ir stiprūs moliai); trečioji imtis, kai $q_c \geq 5,0$ MPa (labai stiprūs moliai). Be to, analizuojant kiekvieną išskirtą imtį, zondavimo gylis buvo sudalytas į dvi dalis: iki 11,0 m ir nuo 11,0 m. Toks turimos duomenų aibės išskaidymas į atskiras imtis leido nustatyti preliminarų santykio pasiskirstymą gylio atžvilgiu priklausomai nuo grunto stiprumo.

Koreliacinė priklausomybė tarp išskirtų santykio (α_{DPSH-A}) imčių ir zondavimo gylio (h) pirmame intervale (iki 11,0 m) kinta nuo silpnos iki glaudžios. Silpnas koreliacinis ryšys yra, kai zonduojamas silpnas ir vidutinio stiprumo molis ($R = 0,6$). Glaudus koreliacinis ryšys nustatytas, kai molis yra stiprus ir labai stiprus (R kinta nuo 0,73 iki 0,81). Duomenų nuo 11,0 m gylio analizė parodė, kad nepriklausomai nuo grunto stiprumo koreliacinis ryšys tarp santykio ir zondavimo gylio yra labai glaudus ($R \sim 0,92$) (4.49 pav.).



4.48 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama ($N = 123$; CI)



4.49 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su aproksimuojančiomis kreivėmis (CI)

Santykio (α_{DPSH-A}) ir gylio (h) koreliacinę priklausomybę tiek zonuojant iki 11,0 m, tiek giliau nepriklausomai nuo grunto stiprumo galima aprašyti ta pačia laipsnine lygtimi (4.5), tačiau lygties (4.5) konstanta (a) ir eksponentė (n) kiekvienu atveju bus skirtingos (4.10 lentelė).

4.10 lentelė. Lygties (4.5) konstantos ir eksponentės, kai zonuotas gruntas yra limnoglacialinis molis

Zondavimo gylis	Lygties (4.5) $\alpha_{DPSH-A} = a \cdot h^{-n}$ konstantos ir eksponentės					
	Kai $q_c < 3,0$ MPa		Kai $3,0 \leq q_c < 5,0$ MPa		Kai $q_c \geq 5,0$ MPa	
	a	n	a	n	a	n
Iki 11,0 m	0,25	-0,07	0,36	-0,20	0,45	-0,20
Nuo 11,0 m	1380,0	-3,60	811,0	-3,32	200,0	-2,70

Apskaičiavus santykio (α_{DPSH-A}) vertes pagal formulę (4.5) matyti, kad didžiausias skirtumas (iki 30%) yra pradiniame zondavimo gylyje, giliau skirtumas mažėja ir ties 11,0 m sudaro 5–18%. Santykio skirtumas tarp skirtingų stiprumų molių nuo 11,0 m gylio išlieka panašus ir sudaro ~45% (4.49 pav.).

Neturint duomenų apie zonuoto molio stiprumą (nenustačius preliminarios kūgio spraudos vertės ar kitais laboratoriniais metodais neįvertinus stiprumo), santykio vertes reikėtų nustatinėti vadovaujantis sąlyga, kad gruntas yra vidutinio stiprumo, t.y. lygtyje (4.5) taikyti konstantos (a) ir eksponentės (n) dydžius, kurie atitiktų sąlygą $q_c < 3,0$ MPa (žr. 4.10 lentelę).

4.3.7. DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniame smėlingame dulkingame molyje

Lietuvos teritorijoje smėlingas dulkingas molis retai būna pamatų pagrindu, todėl dinaminio zondavimo (DPSH–A) ir statinio zondavimo (CPT) duomenų šiame grunte nedaug. Tyrimams pavyko surinkti tik 190 statinio (q_c) ir dinaminio ($N_{20DPSH-A}$) rodiklių porų ($N = 190$). Duomenų analizei iš turimos santykio aibės buvo atmesta iki 20% atsitiktinių verčių. Iš viso analizei panaudota 164 santykio vertės ($N = 164$).

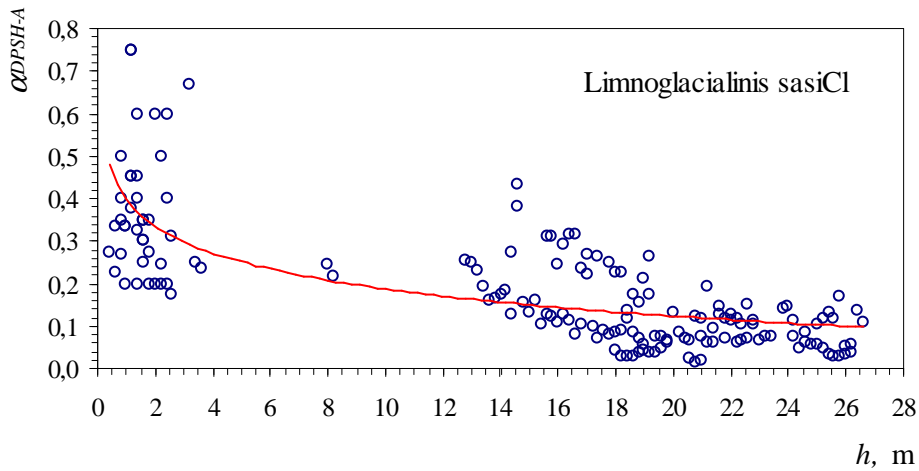
Visos turimos smėlingo dulkingo molio santykio (α_{DPSH-A}) duomenų aibės ir zondavimo gylio (h) koreliacinė analizė parodė, kad tarp nagrinėjamų rodiklių yra glaudus ryšys ($R \sim 0,72$). Duomenys pasiskirsto apie logaritminę kreivę. Tačiau duomenų sklaidos diagramoje matyti aiškūs, nors ir dėsningas, duomenų išsibarstymas (4.50 pav.).

Tolesnėje duomenų analizės stadijoje visa turima aibė ($N = 164$) buvo suskaidyta į atskiras imtis pagal smėlingo dulkingo molio stiprumą. Išskirtos trys imtys: pirmoji, kai kūgio spraudos (q_c) vertės neviršija 3,0 MPa (silpnas ir vidutinio stiprumo gruntas); antroji – kai $q_c \geq 3,0$ MPa, bet $q_c < 5,0$ MPa (vidutinio stiprumo ir stiprus gruntas); trečioji – kai $q_c \geq 5,0$ MPa (labai stiprus gruntas).

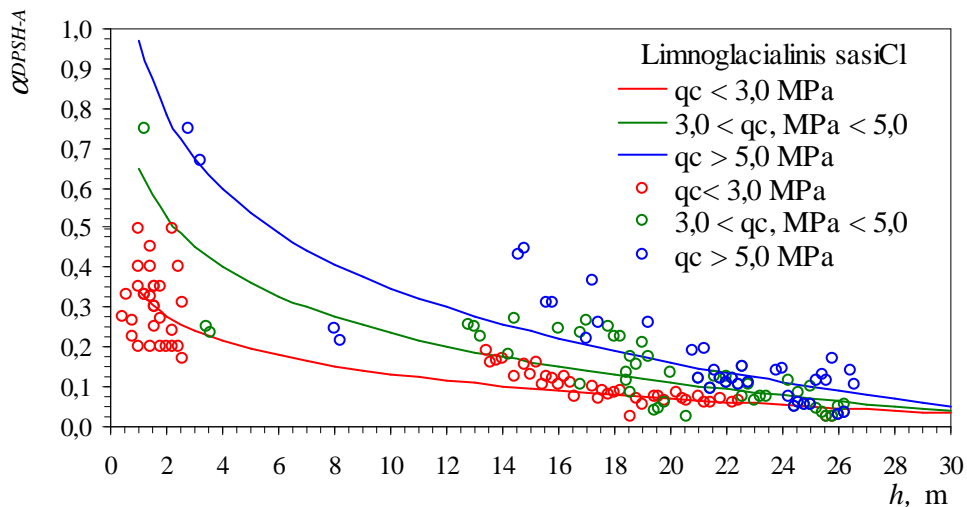
Zondavimo duomenų išskaidymas pagal smėlingo dulkingo molio stiprumą leido nustatyti tikslesnę koreliacinę ryšį ($R \sim 0,85$). Sąsajos tarp santykio ($\alpha_{DP_{SH-A}}$) ir zondavimo gylio (h) geriausiai aprašomos regresine logaritmine lygtimi (4.7), kurios konstantos (d ir c) pateiktos 4.11 lentelėje.

4.11 lentelė. Lygties (4.7) konstantos, kai zonuotas gruntas yra limnoglacialinis smėlingas dulkingas molis

Lygties (4.7) konstantos	$q_c < 3,0$ MPa	$3,0 \leq q_c, \text{ MPa} < 5,0$	$q_c \geq 5,0$ MPa
c	0,34	0,65	0,97
d	-0,09	-0,18	-0,27



4.50 pav. Santykio ($\alpha_{DP_{SH-A}}$) duomenų sklaidos diagrama su logaritmine tendencine kreive ($N = 164$; sasiCl)



4.51 pav. Apibendrinta santykio ($\alpha_{DP_{SH-A}}$) duomenų sklaidos diagrama su aproksimuojančiomis kreivėmis (sasiCl)

Apskaičiavus santykio (α_{DPSH-A}) vertes pagal formulę (4.7) esant skirtingoms konstantoms matyti, kad skirtumas tarp verčių, gautų silpniems–vidutinio stiprumo ir labai stipriems gruntams pradiniam zondavimo intervale yra iki 65%, su gyliu jis mažėja ir ties 30,0 m riba sudaro ~ 40% (4.51 pav.).

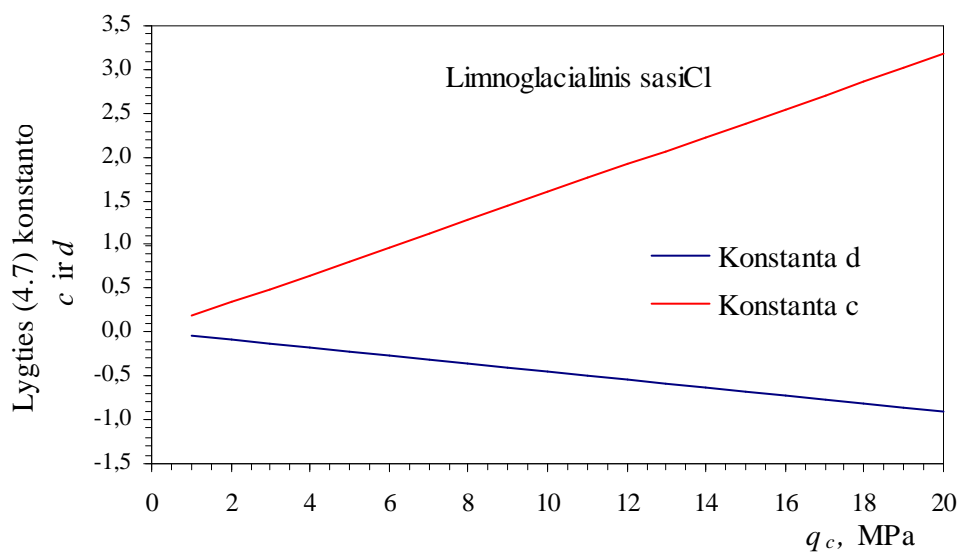
Norint nustatyti santykio (α_{DPSH-A}) vertę tam tikrame gylio intervale, tačiau neturint žinių apie preliminarių smėlingo dulkingo molio stiprumą, reikėtų rinktis mažiausias lygties (4.7) konstantų vertes, kai $q_c < 3,0$ MPa (4.11 lentelė), nes apdorojant duomenis šioje imtyje buvo daugiausia santykio verčių ($n = 80$), kurios pasiskirstė visame nagrinėjamame gylio intervale.

Žinant preliminarias kūgio spaudos (q_c , MPa) vertes, kurios galėjo būti nustatytos pagal tiriamos vietovės archyvinis duomenis ar atlikus papildomus CPT bandymus, lygties (4.7) konstantas (d) ir (c) galima nustatyti pagal tiesines lygtis (4.42) ir (4.43) arba iš grafiko (4.52 pav.):

$$d = -0,045 \cdot q_c^{pr}; \quad (4.42)$$

$$c = 0,1575 \cdot q_c^{pr} + 0,0233; \quad (4.43)$$

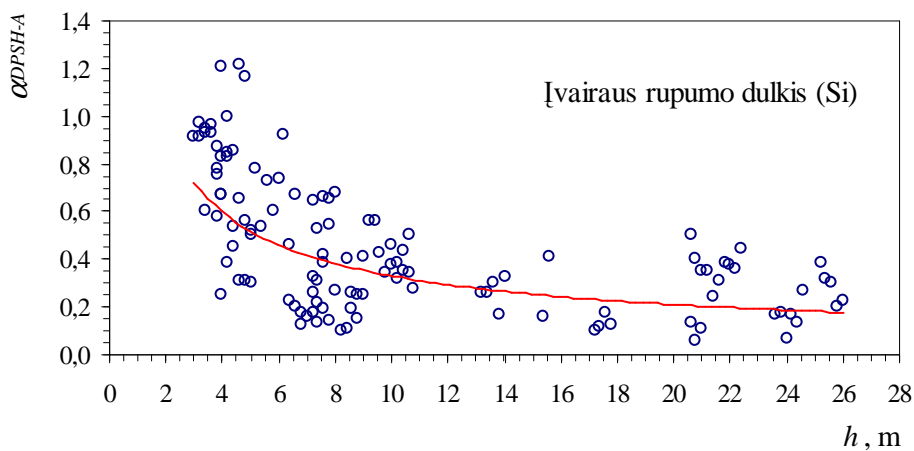
čia d ir c – lygties (4.7) konstantos, kurios priklauso nuo preliminarios kūgio spaudos q_c^{pr} dydžio.



4.52 pav. Lygties (4.7) konstantų d ir c nustatymo kreivės (sasiCl)

4.3.8. *DPSH–A ir CPT zondavimo rodiklių sąsajų paieška limnoglacialiniame dulkyje*

Duomenų analizei dulkyje buvo panaudotos 144 kūgio spraudos (q_c) ir smūgių skaičiaus (N_{DPSH-A}) poros ($N = 144$). Visos turimos duomenų aibės ($N = 144$) sklaidos diagrama parodė silpną koreliacinę ryšį ($R = 0,62$) tarp santykio (α_{DPSH-A}) ir zondavimo gylio (h) (4.53 pav.). Tačiau tai leido nustatyti duomenis aprašančios kreivės pobūdį ir kryptį. Santykio (α_{DPSH-A}) su gyliu (h) pasiskirstymą geriausiai aprašo laipsninė funkcija (4.5).



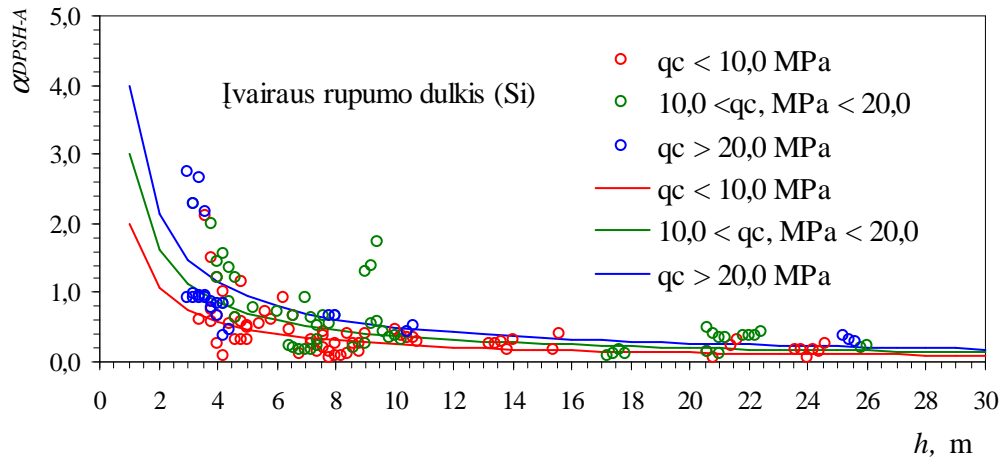
4.53 pav. Santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su laipsnine tendencine kreive ($N = 144$; Si)

Santykio verčių išsibarstymo analizė parodė, kad tai priklauso nuo grunto stipruminių savybių. Kuo gruntas silpnesnis, tuo santykis mažėja. Visa turima aibė buvo skaidoma pagal kūgio spraudos vertes į tris dalis: pirmoji – kai $q_c \leq 10,0$ MPa; antroji – kai $10,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 20,0$; trečioji – kai $q_c > 20,0$ MPa.

Išskaidytų santykio verčių koreliacija su gyliu parodė glaudų ryšį tarp koreliuojamų rodiklių ($R \sim 0,82$) (4.54 pav.). Nepriklausomai nuo zonduojamo grunto stiprumo duomenys pasiskirsto laipsninės lygties (4.5), kurios konstanta (a) ir eksponentė (n) pateiktos 4.12 lentelėje, ribose.

4.12 lentelė. Lygties (4.5) konstanta (a) ir eksponentė (n), kai zonduotas įvairaus rupumo dulgis

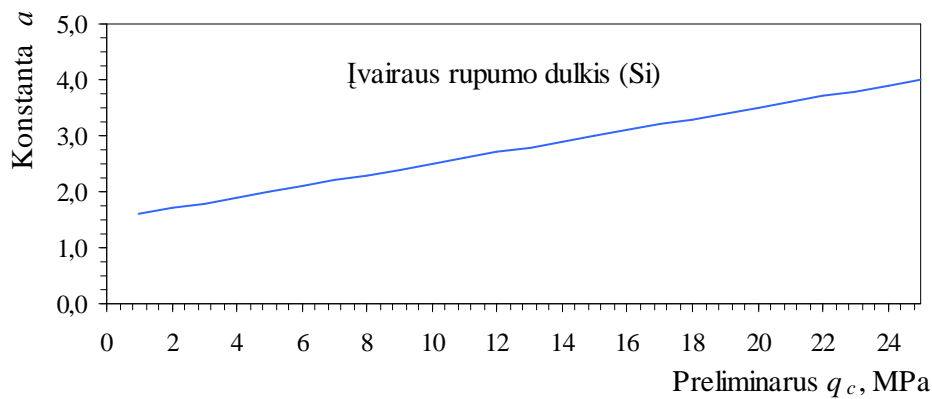
Konstantos ir eksponentės	$q_c \leq 10,0$ MPa	$10,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 20,0$	$q_c > 20,0$ MPa
a	2,0	3,0	4,0
n	-0,9	-0,9	-0,9



4.54 pav. Apibendrinta santykio (α_{DPSH-A}) duomenų sklaidos diagrama su aproksimuojančiomis kreivėmis (Si)

Didėjant grunto stiprumui (didėjant q_c), lygties (4.5) konstantos (a) vertės kinta didėjimo linkme, o eksponentė (n) išlieka vienoda. Konstanta (a) kinta tiesiškai ir gali būti apskaičiuota pagal lygtį (4.44) arba nustatyta iš grafiko (4.55 pav.):

$$a = 0,1 \cdot q_c^{pr} + 1,5. \quad (4.44)$$



4.55 pav. Lygties (4.5) konstantos a nustatymo kreivė (Si)

Dėl duomenų trūkumo įvairaus rupumo dulkių santykio (α_{DPSH-A}) vertės pagal lygtį (4.5), pritaikant konstantą (a) ir eksponentę (n) (žr. 4.12 lentelę), reikėtų skaičiuoti tik nuo 3,0 m gylio. Pagal lygtį (4.5) apskaičiuotus santykį iki 3,0 m gylio, gaunamos labai didelės vertės, kurios nėra patikrintos lauko bandymo rezultatais. Norint nustatyti vertes iki 3,0 m gylio, reikalingi papildomi tyrimai arba galima priimti, kad iki 3,0 m gylio santykio vertės yra konstanta, nekinta ir lygios vertei 3,0 m gylyje.

4.4. DPT ir CPT zondavimo rodiklių tarpusavio sąsajų nustatymo rezultatai ir išvados

Dinaminio zondavimo metu veikia įvairūs šalutiniai veiksniai. Didžiausią įtaką turi šoninė trintis ir geostatinis slėgis bei plakto perduodamos energijos pokytis. Šie trys pagrindiniai veiksniai siejasi su zondavimo gyliu (h). Smūgių skaičiaus (N_x) susiejimas su statine kūgio sprauda (q_c) dėl minėtų veiksnių labai priklauso nuo zondavimo gylio (h). Koreliuojant tarpusavyje N_x ir q_c , būtina į tai atsižvelgti, ir koreliacinė analizė tampa trinare. Tokia koreliacija yra labai sudėtinga, todėl dažnai jos tikslumas būna abejotinas. Kūgio spraudos ir smūgių skaičiaus santykio (α_x) (žr. formulę (4.1)) naudojimas koreliacinėje analizėje tai supaprastina.

Lengvojo dinaminio zondo (DPL) ir statinio zondo (CPT) rodiklių, išreikštų per santykį (α_{DPL}), koreliacija parodė glaudų ir labai glaudų ($R \sim 0,9$) ryšį. Rodiklių tarpusavio priklausomybę geriausiai aprašo regresinės polinominės lygtys (4.2) ir (4.3), kurios paprastai galioja iki 4,0–6,0 m gylio. Giliau santykio vertė priimama konstanta arba jos pasiskirstymas aprašomas laipsnine lygtimi (4.5). Lygčių (4.2) ir (4.3) konstantų dydžiai priklausomai nuo grunto pateikti 4.13 lentelėje.

4.13 lentelė. Lygčių (4.2) ir (4.3) konstantų dydžiai skirtingiems gruntams, kai zonduota DPL zonu

Gruntas	Polinominių lygčių (4.2) ir (4.3) konstantos				Koreliacijos koeficientas (R)	Pastabos
	C_1	C_2	C_3	C_4		
GrSa; CSa; Msa; FSa	0,001	-0,0149	0,0568	0,0199	0,97	
Morena sasiCl	0,0042	-0,0439	0,1319	-0,032	0,99	Galioja iki 5,0 m gylio. Giliau priimama, kad $\alpha_{DPL} = 0,05$
Morena sacLSi	0,0024	-0,0306	0,1012	0,0333	0,96	Galioja iki 6,0 m gylio. Giliau priimama, kad $\alpha_{DPL} = 0,5614 \cdot h^{-1,2626}$
sacLSi saSi	-	-0,0024	-0,0063	0,1443	0,74	Galioja iki 4,0 m gylio. Giliau priimama, kad $\alpha_{DPL} = 0,15 \cdot h^{-0,4}$
Si ir cLSi sasiCl ir siCl	-	-	-	-	-	$\alpha_{DPL} = 0,06 \div 0,03 (0,04)$

Lentelės duomenys galioja, jei dinaminio zondavimo metu smūgių skaičius buvo skaičiuojamas kas 20 cm (N_{20}). Jei zondavimo metu buvo skaičiuojamas N_{10} , tada gautas α_{DPL} vertes reikia dauginti iš 2.

DPL koreliacijos su CPT atveju gauta rodiklių tarpusavio priklausomybės polinominės lygtys (4.2) ir (4.3) leidžia teigti, kad zondavimo duomenims įtakos turi plakto smūgio efektyvumas (η), kurio skaičiavimo lygtys pateiktos 3 skyriuje (žr. formules (3.3) ir (3.4)). Koreguoto santykio (α_{DPL}) ir zondavimo gylio (h) tarpusavio priklausomybę aprašo tiek tiesinės (rupaus grunto), tiek logaritminės ir eksponentinės (smulkaus grunto) lygtys.

Ypač sunkaus dinaminio zondo (DPSH–A) ir statinio zondo rodiklių tarpusavio koreliacija parodė, kad ryšys tarp santykio (α_{DPSH-A}) ir zondavimo gylio (h) yra glaudus ($R \sim 0,90$). Regresinės lygtys, pagal kurias galima apskaičiuoti santykio vertes, yra labai įvairios ir priklauso nuo grunto granulometrinės sudėties bei stipruminių savybių. Santykio priklausomybę nuo gylio rupiuose gruntuose geriausiai aprašo kubinės ir kvadratinės lygtys, o smulkiuose gruntuose – laipsninės, eksponentinės ir logaritminės lygtys.

Nagrinėjant zondavimo duomenis, gautus rupiuose gruntuose, santykis α_{DPSH-A} yra gaunamas iš kvadratinės lygties (4.3), kai rupusis gruntas yra žvyringas ir rupus smėlis, – tokiu atveju santykis nustatomas pagal kubinę lygtį (4.2) (iki 12,0 m gylio) ir pagal tiesinę lygtį (4.4) (nuo 12,0 m gylio). Šių lygčių konstantų vertės pateiktos 4.14 lentelėje.

4.14 lentelė. Lygčių (4.2), (4.3) ir (4.4) konstantų vertės, kai zonuota DPSH–A zonu rupiuose gruntuose

Gruntas	Polinominių lygčių (4.2), (4.3) ir (4.4) konstantos				Koreliacijos koeficientas (R)	Pastabos
	C_1	C_2	C_3	C_4		
siSa	-	-0,0005	-0,0184	1,0934	0,99	Tinka tik rupaus grunto sluoksniams, kurių nedengia smulkus (rišlus) gruntas
FSa Msa	-	-0,0015	0,00194	0,9352	0,93	Tinka tik rupaus grunto sluoksniams, kurių nedengia smulkus (rišlus) gruntas
CSa; GrSa	0,0014	-0,0332	0,20	0,82	0,91	Galioja iki 12,0 m gylio Galioja nuo 12,0 m gylio
	-	-	-0,028	1,18		
Rupus ir smulkus gruntas	-	-	-0,015	0,663	0,81	Galioja, kai rupaus grunto sluoksnius dengia rišlus gruntas

Lentelėje pateikti duomenys galioja, jei dinaminio zondavimo metu smūgių skaičius buvo skaičiuojamas kas 20 cm (N_{20})

Santykio (α_{DPSH-A}) ir zondavimo gylio (h) priklausomybę išliuose gruntuose daugeliu atvejų aprašo laipsninės funkcijos lygtis (4.5) ir eksponentė (žr. formulę (4.6)). Tačiau kai duomenys gauti zonduojant smėlingą dulkingą molį, santykis (α_{DPSH-A}) nustatomas pagal logaritminę lygtį (4.7).

Lygčių (4.5), (4.6) ir (4.7) konstantų (a, b, c, d) ir eksponentės (n) dydžiai priklauso nuo zonduoto rišlaus grunto granulometrinės sudėties ir stiprumo (nuo q_c dydžio). Apibendrintos konstantų ir eksponentės vertės pateiktos 4.15 lentelėje.

4.15 lentelė. Lygčių (4.5), (4.6) ir (4.7) konstantų ir eksponentių vertės, kai zonduota DPSH–A zonu smulkiuose gruntuose

Gruntas	Lygčių (4.5), (4.6) ir (4.7) konstantų ir eksponentės vertės					Koreliacijos koeficientas (R)	Pastabos
	a	b	c	d	n		
Morena sasiCl	0,3238	-0,2045	-	-	-	0,92	$q_c \leq 1,5$ MPa
	0,277	-	-	-	-0,63	0,93	$1,5 < q_c, \text{ MPa} \leq 2,0$
	0,4216	-	-	-	-0,6	0,91	$2,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 4,0$
	0,72	-	-	-	-0,6	0,94	$q_c > 4,0$ MPa
Morena saciSi	0,4	-	-	-	-0,55	0,80	$q_c \leq 3,0$ MPa
	1,0	-	-	-	-0,8	0,80	$3,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 8,0$
	2,3	-	-	-	-0,8	0,84	$q_c > 8,0$ MPa
Molis Cl	0,25	-	-	-	-0,7	0,60	$q_c < 3,0$ MPa
	1380,0	-	-	-	-3,6		iki 11,0 m gylio nuo 11,0 m gylio
	0,36	-	-	-	-0,2	0,77	$3,0 \leq q_c, \text{ MPa} \leq 5,0$
	811,0	-	-	-	-3,32		iki 11,0 m gylio nuo 11,0 m gylio
Įvairaus rupumo dulkis Si	0,45	-	-	-	-0,2	0,92	$q_c > 5,0$ MPa
	200,0	-	-	-	-2,7		iki 11,0 m gylio nuo 11,0 m gylio
Įvairaus rupumo dulkis Si	2,0	-	-	-	-0,9	0,82	$q_c \leq 10,0$ MPa
	3,0	-	-	-	-0,9		$10,0 < q_c, \text{ MPa} \leq 20,0$
	4,0	-	-	-	-0,9		$q_c > 20,0$ MPa
sasiCl	-	-	0,34	-0,09	-	0,85	$q_c < 3,0$ MPa
	-	-	0,65	-0,18	-		$3,0 \leq q_c, \text{ MPa} < 5,0$
	-	-	0,97	-0,27	-		$q_c \geq 5,0$ MPa

Lentelėje pateikti duomenys galioja, jei dinaminio zondavimo metu smūgių skaičius buvo skaičiuojamas kas 20 cm (N_{20}).

Atliekant dinaminio zondavimo duomenų analizę, būtina preliminariai žinoti apie zonduotų gruntų fizikines ir mechanines savybes. Tokia informacija leidžia tiksliau parinkti santykio skaičiavimo formulių konstantas.

IŠVADOS

1. Dinaminis zondavimas yra nepakeičiamas gruntų tyrimo *in-situ* metodas, kai reikia zonuoti per tvirtus ar žvirgždingus, gargždingus grunto sluoksnius ir pasiekti didelius (iki 30,0 m) gylius. Šio metodo trūkumas – esamas metodikas sudėtinga panaudoti geotechniniame projektavime. Todėl dinaminio ir statinio zondavimo duomenis būtina susieti tarpusavyje. Sąsajos gali būti įvairios – tiek tiesioginės, tiek netiesioginės, per kitus savybių rodiklius. Pasaulinėje praktikoje nėra pasiūlyta patikimų DPT ir CPT rodiklių tiesioginių tarpusavio sąsajų. Šios sąsajos yra esminės, nes duoda gerokai mažesnes paklaidas.
2. Analizuojant dinaminio zondavimo duomenis ir naudojant įvairių šalių patirtį šioje srityje, būtina įvertinti skirtumus tarp skirtingų zondų tipų ir jų rezultatų. Kad duomenys būtų visiškai ir tiksliai panaudoti, reikia nustatyti smūgių skaičiaus sąsajos koeficientus. Darbo metu buvo nustatyta, kad smūgių skaičiaus sąsajos koeficiento dydis yra apytiksliai atvirkščias savitojo zondavimo darbo dydžiui. Nustatyta, kad smulkiuose gruntuose, didėjant rupiosios frakcijos kiekiui, santykinis sąsajos koeficientas didėja. Mažiausias jis būna, kai zonduojamas limnoglacialinis smėlingas dulkingas molis ir dulkingas molis (0,16), didžiausias – kai zonduojamas moreninis smėlingas molingas dulkis, smėlingas molis ir molingas dulkis (0,47). Rupiuose gruntuose stebima panaši situacija: gruntui rupėjant, santykinis koeficientas (β'_A) didėja. Dulkingame smėlyje $\beta'_A = 0,13$, žvyre $\beta'_A = 0,27$.
3. Išnagrinėjus dinaminės kūgio smigos skaičiavimo rezultatus galima teigti, kad gautų verčių išsibarstymas yra didžiulis, statistinių rodiklių kitimo ribos taip pat yra didelės. Tokių gautų rezultatų nevienodumą lemia skirtingų korekcijos koeficientų panaudojimas (arba jų visiško nebuvimas), taip pat smūgio proceso supaprastinimas. Energijos kiekis, perduotas į zondo kūgį, yra bene svarbiausias rodiklis, reikalingas tiksliai q_d apskaičiuoti. Turimomis formulėmis to įvertinti negalima, nes energijos perdavime veikia labai daug veiksnių, kurie iškraipo pradinės suteiktos energijos dydžius. Dinaminio zondavimo duomenų pateikimas netiesioginiu rodikliu – dinamine kūgio smiga (q_d) – yra keistinas.
4. Dinaminio zondavimo rezultatus smarkiai veikia šalutiniai veiksniai: energijos nuostolis, štangų trintis į gruntą ir horizontalus geostatinis slėgis. Energijos

kiekis, tenkantis kūgiui, be įrangos specifikos, priklauso ir nuo grunto savybių, – kuo didesnė grunto trintis ir horizontalus geostatinis slėgis, tuo energijos nuostoliai didėja. Tyrimais nustatyta, kad dėl štangų šoninio paviršiaus trinties smulkiuose gruntuose netenkama ~ 12,5% energijos. Didėjantis slėgis kartu didina trintį ir mažina energijos perdavimą į kūgį. Pagal tyrimo rezultatus, nuo 13,0 iki 16,0 m gylio zonduojant smulkiuose glacialiniuose gruntuose, energijos nuostoliai gali būti iki 80% (smūgių skaičius N_{20} padidėja iki 80%).

5. Lengvojo dinaminio zondo (DPL) ir statinio zondo (CPT) rodiklių, išreikštų santykiu (α_{DPL}), tarpusavio koreliacija parodė labai glaudų ($R \sim 0,9$) ryšį. Rodiklių tarpusavio priklausomybę geriausiai aprašo trinarė (kubinė) regresinė polinominė lygtis, kuri paprastai galioja iki 4,0–6,0 m gylio. Giliau santykio vertė priimama konstanta arba jos pasiskirstymas aprašomas laipsnine lygtimi.
6. Ypač sunkaus dinaminio zondo (DPSH–A) ir statinio zondo (CPT) rodiklių tarpusavio koreliacija parodė, kad ryšys tarp santykio (α_{DPSH-A}) ir zondavimo gylio (h) yra glaudus ($R \sim 0,90$). Regresinės lygtys, pagal kurias galima apskaičiuoti santykio vertes, yra labai įvairios ir priklauso nuo grunto granulometrinės sudėties bei stipruminių savybių. Santykio priklausomybę nuo gylio rupiuose gruntuose geriausiai aprašo kubinės ir kvadratinės lygtys, smulkiuose gruntuose – laipsninės, eksponentinės ir logaritminės lygtys.

LITERATŪROS ŠARAŠAS

- Abou-matar, H. & Goble, G. G. 1997. SPT dynamic analysis and measurements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123 (10), 921–928.
- Badu-Tweneboah, K.; Bloomquist, D.; Ruth, B. E. & Miley, W.G. 1998. CPT & DMT testing of highway pavements in Florida, in *Proc of the 1st International Symposium on Penetration Testing /ISOPT-1/ “Penetration Testing 1988”*, vol. 2. Ed. by De Ruiter, J. Martch 20–24, 1988, Orlando, USA. Rotterdam: A. A. Balkema, 627–634.
- Been, K.; Quinonez, A.; Sancio, R.B. 2010. Interpretation of the CPT in engineering practice, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 1. Eds. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 27–46.
- Bell, F. G.; Cripps J. C & Culshaw M. G. 1990. Field testing methods for engineering geological investigations, in *Engineering Geology Special Publications “Field Testing in Engineering Geology”*, vol. 6. Ed. by Coffey J. R., Geological Society, London, England. 3–20.
- Bondarik, G. K. 1967. *Dynamic and static sounding of soils in engineering geology*. [translated from Russia]. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 137 p.
- Bowles, J. E. 1997. *Foundation analysis and design*. 5th edition (International edition). Singapore: The McGraw-Hill Companies, Inc. 1207 p.
- Broms, B. B. & Flodin, N. 1988. History of soil penetration testing, in *Proc of the 1st International Symposium on Penetration Testing /ISOPT-1/ “Penetration Testing 1988”*: vol. 1. Ed. by De Ruiter, J. Martch 20–24, 1988, Orlando, USA. Rotterdam: A. A. Balkema, 157–220.
- Butcher, A. P.; McElmeel, K.; Powell, J. J. M. 1996. Dynamic probing and its use in clay soils. *Advances in site investigation practice*. Ed. by Craig, C. London, Thomas Telford, 383–395.
- Campanella, R. G. D.; Berzins, W. E. B.; Shields, D. H. D. 1979. A preliminary evaluation of Menard pressuremeter, cone penetrometer and standard penetration test in the Lower Mainland, British Columbia, *Soil Mechanics Series* 40.

- Department of Civil Engineering the University of British Columbia, Vancouver. 50 p.
- Campanella, R. G. & Robertson, P. K. 1982. State of the art in in-situ testing of soils: developments since 1978, in *Proc of Engineering Foundation Conference on "Updating subsurface samplings of soils and rocks and their in-situ testing"*. Ed. by Saxena, S. K. January 3–4, 1982, Santa Barbara, California, USA. New York: Engineering Foundation, 254–269.
- Chen, R. P.; Wang, S. F.; Chen Y. M. 2003. Study on pile drivability with one dimensional wave propagation theory. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, vol. 4(6), 683–693.
- Chung–Tien Chin, Shaw–Wei Duann & Tsung–Chung Kao. 1988. SPT–CPT correlations for granular soils, in *Proc of the 1st International Symposium on Penetration Testing /ISOPT–1/ "Penetration Testing 1988"*, vol. 2. Ed. by De Ruiter, J. Martch 20–24, 1988, Orlando, USA. Rotterdam: A. A. Balkema, 335–340.
- Clayton, C. R. I.; Matthews, M. C.; Simons, N. E. 1995. *Site Investigation*. 2nd edition. Department of Civil Engineering, University of Surrey. [elektroninė versija].
- Daniel, C.R.; Howie, J.A.; and Sy, A. 2003. A method for correlating large penetration test (LPT) to standard penetration test (SPT) blow counts. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 66–77.
- 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.
- De Beer, E. E.; Goelen, E.; Heynen, W. J. & Justra, K. 1998. Cone penetration test (CPT): 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. Martch 20–24, 1988, Orlando, USA. Rotterdam: A. A. Balkema, 27–52.
- 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.
- Elkateb, T. M.; Ali, H. E. 2010. CPT–SPT correlations for calcareous sand in the Persian Gulf Area, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 2. Ed. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 233–240.
- Eslami, A.; Fellenius, B. H. 1997. Pile capacity estimated from CPT data – Six methods compared, in *Proc of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Hamburg, Germany, September 6–12, A. A. Balkema, 91–94.
- Farouz, E.; Chen, J.–Y.; Failmesger, R. A. 2006. The Use of dilatometer and in–situ testing to optimize slope design, in *Proc form the 2nd International Flat Dilatometer Conference*. Eds. by Failmezger, R. A. & Anderson, J. B. April 2–5, 2006, Washington, DC, 97–102.
- Fellenius, B. H.; Eslami, A. 2000. Soil profile interpreted from CPTu data, in *Proc of Geotechnical Engineering Conference “Year 2000 Geotechnics”*, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, November 27–30, 2000, 18 p.
- Findlay, J. D.; Brooks, N. J.; Mure, J. N. & Heron, W. 1997. Design of axially loaded piles – United Kingdom practice, in *Proc of the ERTC–3 Seminar*. Eds. by De Cock, F; Legrand, C. April 17–18, 1997, Rotterdam, A. A. Balkema, 353–376.
- FinnRA. 2000. Steel pipe piles. *The supplement bridge design instruction*. Finnish National Road Administration, Bridge Engineering. Helsinki, Finland, 81 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.
- Gadeikis, S.; Žaržojus, G.; Urbaitis, D. 2010. Comparing CPT and DPSH in Lithuania soils, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 3. Ed. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 169–178.
- Goble, G. G. & Abou–matar, H. 1992. Determination of wave equation soil constants from the standard penetration test, *Application of Stress–Wave Theory to Piles*. Ed. by Barends, F. B. J., Rotterdam, Balkema, 99–103.

- Greig, J. W.; Campanella, R. G. & Robertson, P. K. 1988. Comparison of field vane results with other in-situ test results, in *ASTM Special Technical Publication of Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies, STP 1014*. Ed. by Richard, A. F., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 247–263.
- Gwizdala, K. 1997. Polish design methods for single axially loaded piles, in *Proc of the ERTC–3 Seminar*, Eds. by De Cock, F; Legrand, C. April 17–18, 1997, Rotterdam, A. A. Balkema, 291–306.
- Hamidi, B.; Nikraz, H.; Varaksin, S. 2010. Correlation between CPT and PMT at a dynamic compaction project, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 2. Eds. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 161–168.
- Heinonen, J.; Hartikainen, J.; Kiiskilä, A. 1997. Design of axially loaded piles – Finnish practice, in *Proc of the ERTC–3 Seminar*. Eds. by De Cock, F; Legrand, C. April 17–18, 1997, Rotterdam, A. A. Balkema, 133–160.
- Holm, G. 1993. 4. Keynote paper: Sweden, Denmark, Norway and Finland, in *Proc of the Conference Organized by the Institution of Civil Engineering “Piling: European Practice & Worldwide Trends*. Ed. by Sands, M. J. April 7–9, 1992, London, Thomas Telford, 25–31.
- Houlsby, G. T. 1990. Analysis of cone penetrometer and pressuremeter tests, in *Proc of 2nd European Specialty Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. September 18–20, 1990. Santander, 429–440.
- Houlsby, G. T. 1998. Advanced interpretation of field test. *Geotechnical Site Characterization*. Ed. by Robertson, P. K and Mayne, P. W. Rotterdam: Balkema, 99–112.
- Jamiolkowski, M. 1995. Opening address: CPT’95, in *Proc of International Symposium on Cone Penetration Testing*, vol. 1. Swedish Geotechnical Society Report 3:95, October 4–5, 1995, Sweden, Linköping: 7–15.
- Jiang, M.; Yu, H. S.; Harris, D. 2006. DEM simulation of deep penetration in granular soil, in *International Journal “Numerical and Analytical Methods in Geomechanic*, vol. 30, issue 4, 335–361.

- Kairys, T.; Žaržojus, G.; Dundulis, K. 2007. Deformations of till soils while installing vibro-piles, in *Journal "Geologija"*. No. 60. Vilnius, Lithuanian Academy of Sciences, 76–82.
- Kara, O.; Gündüz, Z. 2010. Correlation between CPT and SPT in Adapazari, Turkey, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing "CPT'10"*, vol. 2. Ed. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 273–280.
- 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 *Proc of 2nd European Symposium on Penetration Testing /ESOPT II/*. Ed. by Verruijt, A. May 24–27, 1982, Amsterdam, 277–282.
- Livneh, M.; Livneh, N. A.; Ishai, I. 2000. The Israeli experience with the regular and extended dynamic cone penetrometer for pavement and subsoil-strength evaluation, *Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli*, vol. 3, ASTM STP 1375. eds. by Tayabji, S. D.; Lukanen, E. O., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA: 189–213.
- Lunne, T.; Powell, J. J. M.; Robertson, P. K. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Spon Press, 352 p.
- 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, September 30, 1998, 147 p.
- Mandolini, A. 1999. Pile design using in-situ tests results with particular reference to the CPT, in *Survey report on the present-day design methods for axially loaded piles. European practice*. ERTC 3. Eds. by De Cock, F.; Legrand, C.; Lehane, B. Published at the occasion of the XIIth ECSMGE, June 1999, Amsterdam, 32–42.
- Mayne, P. W.; Mitchell, J. K.; Auxt, J. A. and Yilmaz, R. 1995. U.S. National Report on CPT. in *Proc of the International Symposium on Cone Penetration Testing /CPT'95/*, vol. 1. October 4–5, 1995, Swedish Geotechnical Society. Report 3:95, Linköping, 263–276.

- Mayne, P. W. 2000. Enhanced geotechnical site characterization by seismic piezocone penetration tests, in *Proc of the 4th International Geotechnical Conference, Invited Lecture*. Eds. by Abdel-Rahman, M. M.; Agaiby, S. W.; Fam, M. A. January 2000, Soil Mechanics and Foundation Research Laboratory, Faculty of Engineering, Cairo University Egypt, 95–120.
- Mayne, P. W. 2006. Interrelationships of DMT and CPT readings in soft clays, in *Proc of the 2nd International Flat Dilatometer Conference “Flat Dilatometer Testing”*. Eds. by Failmezger, R. A. & Anderson, J. B. April 2–5, 2006, Washington, DC, 220–225.
- Mayne, P. W. 2007. Cone penetration testing, a synthesis of highway practice. *NCHRP Synthesis 368*. National Cooperative Highway Research Program, Washington, 118 p.
- McNulty, G.; Harney, M. D. 2010. Comparison of CPT- and DMT-correlated effective friction angle in clayey and silty sands, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 2. Ed. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 551–558.
- Melzer, K. J. 1967. *Sondenuntersuchungen in Sand*. Doktorarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 345 p.
- Morgano, C. M. & Liang R. 1992. Energy transfer in SPT – rod length effect. *Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Ed. by Barends, F. B. J., Rotterdam, Balkema, 121–127.
- Odebrecht, E. 2003. *Medidas de energia no ensaio SPT*. PhD thesis. Porto Alegre. 230 p.
- Peck, R. B.; Hanson, W. E., Thornburn, T. H. 1974. *Foundation engineering*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, 486 p.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. 1980. *Pile foundation analysis and design*. New York: John Wiley & Sons, 486 p.
- Rachimovas, A. 2007. *Lengvojo dinaminio zondavimo metodo taikymas (smėliniams gruntams) inžineriniams geologiniams lauko tyrimams*. Bakalauro darbas. Vilnius, 57 p.
- Ramsey, N. 2010. Some issues related to applications of the CPT, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 1. Eds.

- by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 47–70.
- Ravi Sharma, S.; Ilamparuthi, K. 2005. Offshore in-situ test using electric piezo cone and its correlation with standard penetration test, *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division* 86, 62–66.
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; Wightman, A. 1983. SPT–CPT correlation, *Journal of Geotechnical Engineering* 109(11), 1449–1459.
- Robertson, P. K. 2006. *Guide to in-situ testing*. California: Gregg Drilling & Testing Inc., 87 p.
- Rogers, J. D. 2006. Subsurface exploration using the standard penetration test and the cone penetrometer test, in *the Joint Publication of the Association of Environmental and Engineering Geologists and Geological Society of America, Environmental & Engineering Geoscience*, 12 (2), 161–179.
- Sagaseta, C.; Houlsby, G. T. 1992. Stresses near the shoulder of a cone penetrometer in clay, in *Proc of 3rd International Conference on Computational Plasticity “Computational Plasticity: Fundamentals and Applications”*, vol. 2. Eds. by Owen, D. R. J.; Oñate, E.; Hinton, E., April 6–10, 1992, Barcelona, Spain, 895–906.
- Salgado, R.; Mitchell, J. K.; Jamiolkowski, M. 1997. Cavity expansion and penetration resistance in sand, in *International Journal “Geomechanics and Geoen지니어ing”*, vol. 123 (4), 344–354.
- 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.
- Shmertmann, J. H.; Palacios, A. 1979. Energy dynamics of SPT, *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, vol. 105 (GT8), 909–926.
- Schnaid, F. 2009. *In Situ Testing in Geomechanics. The main tests*. 1st edition. Oxon. UK. Taylor & Francis, 330 p.
- Sikora, Z. 2006. *Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii*. Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, Warszawa: 351 p.

- Smith E. A. L. 1960. Pile-driving analysis by the wave equation, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, vol. 86 (SM4), 35–61.
- Spagnoli, G. 2007. An empirical correlation between different dynamic penetrometers, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering /EJGE/*, 12 (Bundle C) [cited 20 November, 2009], Available from Internet: <www.ejeg.com/index_ejeg.htm>.
- 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., Martch 20–24, 1988, Orlando, USA. Rotterdam: A. A. Balkema, 53–69.
- Svensson, L.; Olsson, C.; Grävare, C. –J. 1997. Design of axially loaded piles – Swedish practice, in *Proc of the ERTC-3 Seminar*, Ed. by De Cock, F; Legendrand, C. April 17–18, 1997, Rotterdam, A. A. Balkema, 337–342.
- Sy, A. & Cmapanella, R. G. 1991. Wave equation modeling of the SPT. In *Proc of Geotechnical Engineering Congress*. June 9–12, 1991, Boulder, Colorado, USA, 8–23.
- Sy, A. & Cmapanella, R. G. 1991. An alternative method of measuring SPT energy. In *Proc 2nd International Conference on Recent Advantages in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. 1. Ed. by Prakash, S., March 11–15, 1991, St. Louis, Missouri, USA, 499–505
- 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.
- Šimkus, J. 1987. *Gręžtinių pamatų projektavimas ir statyba. Gruntų tyrimas statinių zondavimu. Metodikos nurodymai*. Vilnius, VISI: 64 p.
- Teh, C. I.; Houlsby, G. T. 1988. Analysis of the cone penetration test by the strain path method, in *Proc of the 6th International Conference on Numerical and Analytical methods in Geomechanics “Numerical Methods in Geomechanics”*, vol. 1. Ed. by Swoboda, G., April 11–15, 1988, Innsbruck., Rotterdam: A. A. Balkema, 397–402.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B.; Mesri, G. 1996. *Soil mechanics in engineering practice*. 3rd edition. New York: Wiley–Interscience, 592 p.

- Urbaitis, D. 2007. *Lengvojo dinaminio zondavimo (DPL) metodo taikymas (moliniams gruntams) inžineriniams geologiniams lauko tyrimams*. Bakalauro darbas. Vilnius, 55 p.
- Urbaitis, D. 2009. *Molio gruntų lauko ir laboratorinių geotechninių tyrimų tarpusavio koreliacija Vilniaus mieste*. Magistro darbas. Vilnius, 81 p.
- Vesić, A. S. 1977. Design of pile foundations, in National Cooperation Highway Research Program, *Synthesis of Highway Practice 42*. TRB, National Research Council: Washington, DC. 68 p.
- Wroth, C. P. 1984. The interpretation of in-situ soil test, *Written Version of the 1984 Rankine Lecture, Geotechnique*, vol. 34, №. 4, 449–489.
- Yu, H. S. 2006. The first James K. Mitchell lecture in situ soil testing: from mechanics to interpretation. *An International Journal of Geomechanical and Geoengineering*, 1(3), 165–195.
- Žaržojus, G.; Dundulis, K. 2010. Problems of correlation between dynamic probing test (DPSH) and cone penetration test (CPT) for cohesive soils of Lithuania, *the Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(2), 69–75.
- Žaržojus, G.; Kairys, T.; Gadeikis, S.; Dundulis K. 2007. Results of research of deformations of vibropiles and till interaction, in *Proc of 9th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Vols 1–3, May 16–18, 2007, Vilnius, Lithuania. Technika, 1143–1145.
- Бондарик, Г. К.; Комаров, И. С.; Ферронский, В. И. 1967. *Полевые методы инженерно-геологических исследований*. Москва: Недра. 374 с.
- Грязнов, Т. А. 1984. Оценка показателей свойств пород полевыми методами. Москва: Недра. 197 с.
- Дудлер, И. В. 1979. Комплексные исследования грунтов полевыми методами. Москва: Стройиздат. 132 с.
- Рубинштейн, А. Я.; Кулачкин, Б. И. 1984. *Динамическое зондирование грунтов*. Москва: Недра. 92 с.
- Солодухин, М. А. 1975. *Инженерно-геологические изыскания для промышленного и гражданского строительства*. Москва: Недра. 188 с.
- Сугакевич, О. В. 1969. К вопросу об определении плотности песков методом динамического зондирования, *Материалы к совещанию “Полевые ме-*

- тоды исследования грунтов*”, Редакционная коллегия Василщъев, А. В., Воробков, Л. Н. и др. Рязань, 14–17 Октября, 1969, ПНИИИС, 49–51.
- Трофименков, Ю. Г.; Воробков, Л. Н. 1981. *Полевые методы исследования строительных свойств грунтов*. Москва: Стройиздат: 1981. 213 с.
- DIN 4094-1:2002-06 Subsoil – Field Investigation – Part 1: Cone penetration test. Berlin: German Institute for Standardization.
- EN 1997-2:2007. Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing. CEN. Brussels.
- ISO 22476-1:2005. Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests. CEN. Brussels.
- ISO 22476-2:2005. *Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 2: Dynamic probing*. CEN. Brussels.
- БССР РСН 62–87. Динамическое зондирование грунтов в условиях БССР. Госстрой БССР. 1987. Минск.
- ГОСТ 19912–2001. *Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием*. Москва. Госстрой.

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

- Žaržojus, G. 2006. Lietuvos geologinis rajonavimas pagal polių laikomąją gebę, *Lietuvos geologų sąjungos žurnalas „Geologijos akiračiai“*, 3 (63), 25–32.
- Žaržojus, G. 2006. Polinių pamatų pagrindų rajonavimas. *4-osios mokslinės konferencijos „Mokslas gamtos mokslų fakultete“ pranešimai*. Red. Rukšėnas, O. Lapkričio 23–24, 2006, Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 228–234.
- Kairys, T.; Žaržojus, G.; Dundulis, K. 2007. Deformations of till soils while installing vibro-piles, in *Journal “Geologija”*. No. 60. Vilnius, Lithuanian Academy of Sciences, 76–82.
- Žaržojus, G.; Kairys, T.; Gadeikis, S.; Dundulis, K. 2007. Results of research of deformations of vibropiles and till interaction, in *Proc of 9th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”*. Vols 1–3, May 16–18, 2007, Vilnius, Lithuania. Technika, 1143–1145.
- Dundulis, K.; Kaczynski, R. R.; Kraužlis, K. S., Žaržojus, G. 2008. Engineering geological properties of Vilnius and Warsaw region tills as building subsoils, in *Journal “Geologija”*. vol. 50. Supplement. Vilnius, Lithuanian Academy of Sciences, S11–S15.
- Dundulis, K.; Žaržojus, G. 2008. Evaluation of the pile foundation bearing capacity, 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, 55–60.
- 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.
- Gadeikis, S.; Žaržojus, G.; Urbaitis, D. 2010. Comparing CPT and DPSH in Lithuania soils, in *Proc of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing “CPT’10”*, vol. 3. Ed. by Robertson, P. K.; Mayne, P. W. May 9–10, 2010, Huntington Beach, California, USA, 169–178.

Žaržojus, G.; Dundulis, K. 2010. Problems of correlation between dynamic probing test (DPSH) and cone penetration test (CPT) for cohesive soils of Lithuania, *the Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(2), 69–75.