

Endijs Virsis

METODE AUTOCEĻU KONSTRUKCIJAS NESTSPĒJAS MODELĒŠANAI

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Transportbūvju institūts

Endijs Virsis

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorants

**METODE AUTOCEĻU KONSTRUKCIJAS
NESTSPĒJAS MODELĒŠANAI**

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji
profesors *Dr. sc. ing.*
Ainārs Paeglītis

profesors *Dr. sc. ing.*
Atis Zariņš

Rīga 2023



Šis darbs ir izstrādāts ar

- Rīgas Tehniskās universitātes Doktorantūras grantu programmas atbalstu:
 - DOK.BIF/20
 - DOK.BIF/21
 - DOK.CTK/22A
- Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas «Izaugsme un nodarbinātība» 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa «Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās» projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 «Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās» ietvaros.

ANOTĀCIJA

Latvijas teritorijā plaši izplatīti zemas nestspējas un organiskas izcelsmes nogulumieži. Lielākā daļa no mūsu valsts ceļu tīkla ir izbūvēta uz šāda tipa gruntīm. Veicot ceļu projektēšanu un ģeotehniskās izpētes laikā konstatējot organiskas izcelsmes nogulumiežus, būvinžinierim var rasties daudz dažādu problēmu, kas var aizkavēt projekta izstrādes procesu. Var nākties sazināties ar konkrētā objekta pasūtītāju un kopīgi censties atrast izdevīgāko, racionālāko, ekonomiskāko un satiksmes dalībniekiem drošāko risinājumu. Visvienkāršākais, bet noteikti ne lētākais risinājums ir veikt vājas nestspējas grunts apmaiņu, kas lielākoties visos projektos arī tiek paredzēts, jo būvinžinieriem trūkst pieredzes un zināšanu, lai piedāvātu alternatīvus risinājumu variantus. Lielākajā daļā Eiropas un citās pasaules valstīs, kur zemes klātnē izplatītas līdzīgas izcelsmes nogulumieži un vājas nestspējas grunts tiek veikta ģeotehniskā projektēšana. Lai arī Latvijā būvinžinieri varētu veikt ģeotehnisko projektēšanu nepieciešams projektētājus izglītēt attiecīgajā sfērā.

Promocijas darba pētījuma mērķis bija izstrādāt aprēķina metodi autoceļu konstrukcijas nestspējas modelēšanai, izmantojot grunts slāņu un citu materiālu īpašības, kā arī izstrādāt transporta slodzes modeli, kuru izmantot autoceļu ģeotehnisko aprēķinu veikšanai un projekta risinājumu izstrādei.

Veicot zemes klātnes modelēšanu, izmantojot galīgo elementu programmas, ir ļoti grūti precīzi novērtēt esošā pamata nestspēju un aprēķinu modelī definēt transporta izraisīto slodzi, jo tā ir dinamiska.

Veikta literatūras analīze, citu valsts pētījumu izpēte. Izstrādāta autoceļa projekta risinājumu blokshēma, ar kuras palīdzību inženieris var analizēt projekta datus un noteikt kādus projektēšanas soļus nepieciešams veikt.

Iegūti ģeotehniskās izpētes dati no vairākiem būvniecības un projektēšanas objektiem, kā arī pētījuma ietvaros tika izveidots testa laukums, kurā vairākos punktos tika dublētas dažādas ģeotehniskās lauka testa izpētes. Visa iegūtā informācija tika apkopota un analizēta, izdarot būtiskus secinājumus par katras izpētes rezultātu precizitāti.

Balstoties uz ģeotehniskās izpētes datiem izveidota metode autoceļa konstrukcijas nestspējas modelēšanai. Izstrādāta analītiska aprēķina formula esošā pamata nestspējas novērtēšanai.

Izstrādāts satiksmes slodzes modelis, kuru izmantot, veicot autoceļa konstrukcijas ģeotehnisko projektēšanu.

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām darba pamatdaļas nodaļām, secinājumiem un izmantotās literatūras saraksta. Darba apjoms – 123 lapaspuses, 78 attēli, 13 tabulas un 79 literatūras avoti. Promocijas darbs ir izstrādāts latviešu valodā.

ANNOTATION

Soil with weak bearing capacity, like peat and organic grounds, is widespread in Latvia. Most of Latvia's national road network are built on this type of soil. During the design of road project and during the geotechnical investigation, when sedimentary rocks of organic origin are detected, the civil engineer may encounter many different problems that can delay the project development process. The designer may have to contact the customer of the specific object and joint efforts to try to find the most advantageous, rational, economical and safest solution for road users. The simplest, but certainly not the cheapest, solution is to replace the soil layers with weak load-bearing capacity, which is very often foreseen in the projects, because civil engineers lack the experience and knowledge to offer alternative solutions. In most of Europe and other countries of the world, existing and prospective roads are geotechnically designed for areas where sedimentary rocks of similar origin and soils of weak bearing capacity are common. In order for civil engineers in Latvia to be able to perform geotechnical design, it is necessary to educate designers in the relevant field.

The aim of the doctoral thesis was to develop a calculation method that, using the properties of soil layers and other materials, can determine the bearing capacity of the highway structure. In addition, it was planned to develop a transport load model, which designers will use to perform geotechnical calculations of highway structures and develop constructive solutions.

When performing calculations of soil layers using finite element programs, it is very difficult to accurately estimate the bearing capacity of the existing foundation and to define the load caused by transport in the calculation model, because it is dynamic.

Literature analysis, research of other studies was carried out in the work. A block diagram of highway project solutions has been developed, with the help of which the engineer can analyse the project data and determine what design steps need to be taken.

As part of the doctoral work, geotechnical investigation data from several construction and design objects were obtained, and a test area was created, where various geotechnical field test investigations were duplicated at several points. All the obtained information was collected and analysed, making significant conclusions about the accuracy of the results of each study.

Based on the data of the geotechnical investigation, a method was developed for modeling the bearing capacity of the highway structure. In addition, an analytical calculation formula was developed for evaluating the bearing capacity of the existing foundation.

A traffic load model has been developed, which can be used for performing geotechnical calculations of highway construction and developing project solutions.

The doctoral thesis consists of an introduction, five chapters of the main part of the thesis, conclusions and a list of used literature. The volume of the work – 123 pages, 78 pictures, 13 tables and 79 literature sources. The doctoral thesis is written in Latvian.

SATURS

Anotācija	3
Annotation	4
Saturs	5
Attēlu saraksts	8
Tabulu saraksts	11
Simboli un saīsinājumi	12
1. Ievads	14
1.1. Tēmas aktualitāte	14
1.2. Darba mērķis	14
1.3. Pētījuma uzdevumi	15
1.4. Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti	15
1.5. Darba zinātniskā novitāte	15
1.6. Darba praktiskā vērtība	16
1.7. Disertācijas uzbūve	16
1.8. Darba aprobācija un publikācijas	17
2. Ģeotehniskās izpētes datu analīze un projekta risinājumu izstrāde	18
2.1. Autoceļa posma novērtējums un nepieciešamo risinājumu izstrāde	18
2.2. Ģeotehniskās izpētes datu analīze	20
2.2.1. Smilšainas, atbilstošas kvalitātes gruntis uzbērumā un zemes klātnē	20
2.2.2. Putekļaina, mālaina grunts vai zemākas stiprības slāņi zemes klātnē un uzbērumā	21
2.2.3. Vājas nestspējas grunts slāņi zemes klātnē un uzbērumā	22
2.3. Projekta risinājumu izstrāde un aprēķinu veikšana konstrukcijas ilgmūžības nodrošināšanai	23
3. Autoceļu konstrukcijas ģeotehniskās pastiprināšanas metodes	24
3.1. Ceļu projektēšana uz vājas nestspējas gruntīm	24
3.2. Ceļu ģeotehniskās projektēšanas metožu novērtējums	27
3.3. Zemes klātnes grunts pastiprināšanas pieredze Latvijā	31
3.3.1. Grunts apmaiņa	32
3.3.2. Pāļu kolonnas	32
3.3.3. Minerālmateriālu bermas izbūve	33

3.3.4.	Gabiona sienas konstrukcija	34
4.	Grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības.....	35
4.1.	Veikto pētījumu apskats.....	35
4.2.	Lauka izpētes testa apraksts	37
4.2.1.	Konusa iespiešanas tests (CPT).....	38
4.2.2.	Dilatometriskā testa (DMT) metode	41
4.2.3.	Dinamiskā penetrometra tests.....	44
4.3.	CPT un DMT testa metožu salīdzinājums, izmantojot autoceļa P32 ģeotehniskās izpētes datus.....	46
4.3.1.	Izpētes punktā (497+20D) iegūto rezultātu interpretācijas.....	46
4.3.2.	Izpētes punktā (498+40D) iegūto rezultātu interpretācijas.....	50
4.3.3.	Nogāzes stabilitātes aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības	53
4.3.4.	Konstrukcijas deformācijas aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības	56
4.4.	CPT, DMT un DCP testa metožu salīdzinājums, izmantojot autoceļa P86 ģeotehniskās izpētes datus.....	60
4.4.1.	Izpētes punktā (34,46km) iegūto rezultātu interpretācijas.....	60
4.4.2.	Izpētes punktā (34,86km) iegūto rezultātu interpretācijas.....	64
4.4.3.	Izpētes punktā (35,08km) iegūto rezultātu interpretācijas.....	67
4.1.	CPT, DMT un DCP testa metožu salīdzinājums, analizējot testa laukumā veiktās izpētes. 71	
4.1.1.	Izpētes punktos iegūto rezultātu interpretācijas.....	72
4.1.2.	Laboratorijas testu un interpretēto zondēšanas datu salīdzinājums	75
4.1.3.	Konstrukcijas sēšanās aprēķins izmantojot interpretētās grunts īpašības ...	77
4.1.4.	Nogāzes stabilitātes aprēķins izmantojot interpretētās grunts īpašības	79
5.	Satiksmes slodzes modelis ceļa konstrukcijas ģeotehniskajai projektēšanai	83
5.1.	Satiksmes slodzes modelis	83
5.2.	Aprēķinu modelis	86
5.3.	Nogāžu stabilitātes rezultātu analīze	87
5.4.	Globālās stabilitātes/deformācijas aprēķinu rezultātu analīze	91
6.	ceļa konstrukcijas nestspējas novērtēšana, izmantojot statistiskās plātnes testu.....	94
6.1.	Statiskās plātnes testa galīgo elementu aprēķina modeļa izstrāde	94
6.1.1.	Esošais ceļa pamats.....	94
6.1.2.	Statiskās plātnes tests.....	95

6.1.3.	Statiskās plātnes testa simulācijas modeļa uzbūve	96
6.1.4.	Analītiskās aprēķinu formulas izstrāde Ev2 aprēķinam.....	100
6.2.	Ceļa konstrukcijas esošā pamata atlikušās nestspējas novērtējums	101
6.2.1.	Ģeotehniskā izpēte	101
6.2.2.	Autoceļa A10 Rīga-Ventspils esošā pamata nestspējas analīze	102
6.2.3.	Autoceļa P86 posma 33,59-37,87km ģeotehniskās izpētes datu analīze ..	108
6.2.4.	Autoceļa A10 posma 13,30 - 19,20 km ģeotehniskās izpētes datu analīze 112	
7.	Secinājumi	116
8.	Izmantotās literatūras saraksts	118

ATTĒLU SARAKSTS

		Lapaspuše
Attēls 2.1.	Autoceļa projekta risinājumu izstrādes blokshēma	19
Attēls 3.1.	Metodes, kas atstāj vājas nestspējas gruntis uz vietas	25
Attēls 3.2.	Purvu izplatība Latvijas teritorijā	26
Attēls 3.3.	Kombinēto kolonnu un pāļu kolonnu būvniecība	33
Attēls 3.4.	Peldu ielas ceļa konstrukcijas deformācijas	33
Attēls 3.5.	Valsts autoceļa A2 projekta risinājums	34
Attēls 4.1.	Nenormalizēta CPT grunts uzvedības tipa (SBT) diagramma	39
Attēls 4.2.	Grunts tūlumpusvara (blīvuma) γ noteikšana izmantojot Marchetti un Crapps izstrādāto grafiku	43
Attēls 4.3.	Grunts fizikāli mehāniskās īpašības izpētes punktā 497+20D	47
Attēls 4.4.	Ceļa ģeotekhniskais šķērsgriezums 497+20D	48
Attēls 4.5.	Grunts nedrenētas bīdes pretestība izpētes punktā 497+20B	49
Attēls 4.6.	Grunts parauga (6,35m dziļumā) konsolidācijas tests izpētes punktā (497+20D)	50
Attēls 4.7.	Grunts fizikāli mehāniskās īpašības izpētes punktā 498+40D	51
Attēls 4.8.	Grunts nedrenētas bīdes pretestība izpētes punktā 498+40B	52
Attēls 4.9.	Bišopa šķēluma metode	53
Attēls 4.10.	Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti, izmantojot CPT grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 497+20D	54
Attēls 4.11.	Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti, izmantojot DMT grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 497+20D	55
Attēls 4.12.	Konstrukcijas deformācijas rezultāti, izmantojot CPT grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 497+20D	57
Attēls 4.13.	Konstrukcijas deformācijas rezultāti, izmantojot DMT grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 497+20D	57
Attēls 4.14.	Konstrukcijas deformācijas rezultāti, izmantojot grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 498+40D – kreisajā pusē CPT; labajā pusē DMT	58
Attēls 4.15.	Autoceļa 34,46 kilometrā veiktā izpētes punkta apraksts	60
Attēls 4.16.	Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (34,46km)	61
Attēls 4.17.	Konstrukcijas deformācijas rezultāti (34,46km)	62
Attēls 4.18.	Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (34,46km)	63
Attēls 4.19.	Autoceļa 34,86 kilometrā veiktā izpētes punkta apraksts	64
Attēls 4.20.	Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (34,86km)	65
Attēls 4.21.	Konstrukcijas deformācijas rezultāti (34,86km)	66
Attēls 4.22.	Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (34,86km)	67
Attēls 4.23.	Autoceļa 35,08 kilometrā veiktā izpētes punkta apraksts	68
Attēls 4.24.	Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (35,08km)	68
Attēls 4.25.	Konstrukcijas deformācijas rezultāti (35,08km)	69
Attēls 4.26.	Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (35,08km)	70
Attēls 4.27.	Ierobežoto deformāciju modulis pirmajā izpētes punktā	72
Attēls 4.28.	Nedrenētas bīdes pretestības vērtības pirmajā izpētes punktā	73

Attēls 4.29.	Iekšējā berzes leņķa vērtības pirmajā izpētes punktā	73
Attēls 4.30.	Grunts tilpumsvara vērtības pirmajā izpētes punktā	74
Attēls 4.31.	Odometra testa rezultāti pirmajā izpētes punktā	75
Attēls 4.32.	Tiešo bīdes testa rezultāti otrajā izpētes punktā	76
Attēls 4.33.	Konstrukcijas sēšanās rezultāti 1. izpētes punktā, izmantojot CPT interpretācijas	77
Attēls 4.34.	Konstrukcijas sēšanās rezultāti 1. izpētes punktā, izmantojot DMT interpretācijas	78
Attēls 4.35.	Konstrukcijas sēšanās rezultāti 1. izpētes punktā, izmantojot DCP interpretācijas	78
Attēls 4.36.	Nogāzes stabilitātes rezultāti, izmantojot grunts parametrus no CPT interpretācijām	80
Attēls 4.37.	Nogāzes stabilitātes rezultāti, izmantojot grunts parametrus no DMT interpretācijām	80
Attēls 4.38.	Nogāzes stabilitātes rezultāti, izmantojot grunts parametrus no DCP interpretācijām	81
Attēls 5.1.	Eirokodeksā definētais aprēķina slodzes modelis LM1	84
Attēls 5.2.	Aprēķinu slodzes modelis LM3	84
Attēls 5.3.	HL-93 Aprēķina kravas automašīna AASHTO	85
Attēls 5.4.	Standarta ass, ko izmanto Zviedrijā	85
Attēls 5.5.	Satiksmes slodzes modeļu salīdzināšanai pieņemtais ceļa profils	87
Attēls 5.6.	Nogāžu stabilitātes aprēķinu rezultāti	88
Attēls 5.7.	Aprēķinos noteiktā nogāzes stabilitāte	90
Attēls 5.8.	Globālās stabilitātes/deformācijas aprēķinu rezultāti	91
Attēls 5.9.	Aprēķinos noteiktās maksimālās deformācijas	93
Attēls 6.1.	Ievades logs Mohr-Coulomb modeļa definēšanai	97
Attēls 6.2.	RS3 datorprogrammas interfeiss	97
Attēls 6.3.	Grunts/materiālu slāņu fizikāli-mehānisko īpašību parametri	98
Attēls 6.4.	Statiskās plātnes testa simulācijas modelis	99
Attēls 6.5.	Statiskās plātnes testa simulācijas rezultātu grafiks	99
Attēls 6.6.	Aprakstītā piemēra eksponenciālais grafiks	101
Attēls 6.7.	Ģeotehniskā izpēte uz valsts galvenā autoceļa A10 Rīga - Ventspils 13.30-19.20 km	102
Attēls 6.8.	Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas sablīvējuma	103
Attēls 6.9.	Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas biežuma	103
Attēls 6.10.	Projekta risinājumus paredzētā ceļa konstrukcija	104
Attēls 6.11.	Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas sablīvējuma	105
Attēls 6.12.	Konstrukcijas atlikušā nestspēja	105
Attēls 6.13.	Galīgo elementu aprēķina modelis	106
Attēls 6.14.	Galīgo elementu aprēķina rezultāti	107
Attēls 6.15.	Ģeotehniskās izpētes skatrakums 16.4 kilometrā	107
Attēls 6.16.	Pirmā slogošanas cikla atlikušās pamata nestspējas salīdzinājums	109
Attēls 6.17.	Esošā ceļa konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja	109

Attēls 6.18.	Iegūto rezultātu salīdzinājums	110
Attēls 6.19.	P86 ceļa esošās konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja	111
Attēls 6.20.	Iegūto rezultātu salīdzinājums	111
Attēls 6.21.	Esošā pamata nestspēja pēc pirmā slogošanas cikla	112
Attēls 6.22.	Esošā ceļa konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja	113
Attēls 6.23.	Iegūto rezultātu salīdzinājums	113
Attēls 6.24.	A10 ceļa esošās konstrukcijas pamata atlikusī nestspēja	114
Attēls 6.25.	Iegūto rezultātu salīdzinājums	114

TABULU SARAKSTS

		Lapaspuše
Tabula 3.1.	Ceļa ģeotehniskās projektēšanas metožu novērtējums	27-30
Tabula 4.1.	Lauka izpētes testa metodes parametru precizitāte (P.K. Robertson, 2012)	36
Tabula 4.2.	Noteiktā CPTU pielietojamība grunts parametru iegūšanai (Robertsons un Kabals (Robertsons, 2010))	39
Tabula 4.3.	Konsolidācijas testa rezultāti pētījuma punktā 498+40D	52
Tabula 4.4.	Nogāzes stabilitātes drošības koeficienti	56
Tabula 4.5.	Izmantotās interpretāciju metodes	72
Tabula 4.6.	Grunts slāņu vidējās vērtības	74
Tabula 4.7.	Laboratorijas un lauka testu rezultātu salīdzinājums	77
Tabula 4.8.	Aprēķināto konstrukcijas sēšanās rezultātu salīdzinājums	79
Tabula 4.9.	Aprēķināto nogāzes stabilitātes rezultātu salīdzinājums	81
Tabula 5.1.	Aprēķinos izmantoto materiālu parametri	86-87
Tabula 5.2.	Aprēķinu scenāriji un iegūtie rezultāti	89
Tabula 5.3.	Globālās stabilitātes/deformāciju iegūtie rezultāti	92

SIMBOLI UN SAĪSINĀJUMI

DMT	Plakanā dilatometra tests
CPT	Konusa iespiešanās, jeb konusa penetrometra tests
DCP	Dinamiskā penetrometra tests
I_p	Plastiskuma skaitlis
CBR	Kalifornijas nestspējas vērtība
Cu vai Su	Nedrenētas bīdes pretestība
SPT	Standarta penetrometra tests
CPTu	Konusa penetrometra tests ar ūdens poru spiedienu mērītāju
SCPTu	Seismiskais konusa penetrometra tests ar ūdens poru spiedienu mērītāju
SDMT	Seismiskais plakanā dilatometra tests
FVT	Spārņingriezies tests
DPL	Vieglais dinamiskā penetrometra tests
DPM	Vidējā svara dinamiskā penetrometra tests
DPSH	Supersmagais dinamiskā penetrometra tests
LCCA	Dzīves cikla izmaksu analīze
U_0	Statiskais poru spiediens
OCR	Konsolidācijas koeficients
D_R	Relatīvais blīvums
ψ	Stāvokļa parametrs
Φ	Grunts iekšējās berzes leņķis
G_0	Dinamiskais bīdes deformācijas modulis
G	Bīdes deformācijas modulis
E	Junga modulis
Eoed	Oedometra elastības modulis
σ - ϵ	Spriegumu – relatīvo deformāciju atkarība
M	Ierobežoto deformāciju modulis
C_c	Kompresijas indekss
k	Filtrācijas koeficients
C_v/ C_h	Konsolidācijas koeficients
K_0	Sprieguma attiecība
St	Jutīgums
SBT	Grunts uzvedības tips
R_f	Berzes koeficients
q_c	Konusa pretestība
q_t	Koriģētā konusa pretestība
γ	Grunts tilpumsvars
γ_w	Ūdens tilpumsvars
P_a	Atmosfēras spiediens
σ_{v0}	Kopējais vertikālais spriegums
σ'_{v0}	Efektīvais vertikālais spriegums
z_i	Katra grunts slāņa biezums
γ_i	Katra grunts slāņa tilpumsvars
Q_t	Normalizētā konusa pretestība

Fr	Normalizētā berzes attiecība
Ic	Grunts uzvedības tipa indekss
V _s	Bīdes viļņa ātrums
P ₀	Koriģētais pirmais nolasījums
P ₁	Koriģētais otrais nolasījums
P ₂	Koriģētais trešais nolasījums
I _D	Materiāla indekss
K _D	Horizontālo spriegumu indekss
E _D	Dilatometra elastības modulis
Nspt	Standarta penetrometra sitienu skaits
R _{pd}	Dinamiskās stieņa gala pretestības novērtējums
γ _{sat}	Ūdens piesātinātas grunts tilpumsvars
F _{safety}	Nogāžu stabilitātes drošības koeficients
SLS	Servisa robežstāvoklis
ULS	Nestspējas robežstāvoklis
Ev1	Grunts slāņa nestspēju pēc pirmā slogošanas cikla
Ev2	Grunts slāņa nestspēju pēc otrā slogošanas cikla
SKT	Skatrakums
PLT	Statiskās plātnes tests
Ev2i+1	Zemes klātnes nestspēja zem apskatāmā grunts slāņa
M _i	Apskatāmā grunts slāņa ierobežoto deformāciju modulis

1. IEVADS

1.1. Tēmas aktualitāte

Latvijā ievērojams finansējums ceļu nozarei tika saņemts no Eiropas Savienības struktūrfondi, bet no 2018. gada tas ir samazināts no 124 miljoniem eiro līdz 63,2 miljoniem eiro 2019. gadā. Tas nozīmē, ka tuvākajos gados ceļu būvniecība un atjaunošana kļūs arvien atkarīgāka no valsts budžeta. Eiropa ir definējusi nākamā perioda mērķus, kas faktiski neietver ceļu būvniecību un tamlīdzīgus projektus.

Samazinoties ceļu nozares finansējumam, pēdējo gadu laikā, būtiski palielinājies ceļa segas pastiprināšanas projektu skaits. Projekta sākumā tiek izvērtēts esošā ceļa stāvoklis, ņemot vērā dažādus seguma novērtēšanas kritērijus, un tiek noteikts, kuros ceļa posmos ir iespējams veikt seguma pastiprināšanu un kur nepieciešama pilna konstrukcijas pārbūve. Ceļu segas konstrukcija Latvijā tiek projektēta, izmantojot „Rekomendācijas ceļu projektēšanai. Ceļa sega”. Neparedzot pilnu ceļa segas konstrukciju ir iespējams būtiski samazināt projekta izmaksas, tādējādi iespējams optimizēt pieejamos līdzekļus ceļu rekonstrukcijai. Lai kvalitatīvi un droši veiktu ceļa segas pastiprināšanu, ir ļoti svarīgi projektēšanas laikā ar ģeotehniskās vai citas izpētes palīdzību analizēt esošā ceļa konstrukcijas pamatu nestspēju un strukturālo stāvokli. Kļūdaini novērtējot esošās pamata konstrukcijas īpašības un palikušo nestspēju var radīt būtiskus strukturālo deformāciju riskus jaunajā ceļa konstrukcijā, kā rezultātā ceļš var zaudēt nestspēju un būvniecības laikā rastos neparedzētas izmaksas esošā pamata pastiprināšanai.

Latvijas teritorijā plaši izplatīti zemas nestspējas un organiskas izcelsmes nogulumieži. Lielākā daļa no mūsu valsts ceļu tīkla ir izbūvēta uz šāda tipa gruntīm. Veicot ceļu projektēšanu un ģeotehniskās izpētes laikā konstatējot organiskas izcelsmes nogulumiežus, būvinžinierim var rasties daudz dažādu problēmu, kas var aizkavēt projekta izstrādes procesu. Var nākties sazināties ar konkrētā objekta pasūtītāju un kopīgi censties atrast izdevīgāko, racionālāko, ekonomiskāko un satiksmes dalībniekiem drošāko risinājumu.

Visvienkāršākais, bet noteikti ne lētākais risinājums ir veikt vājas nestspējas grunts apmaiņu, kas lielākoties visos projektos arī tiek paredzēts, jo būvinžinieriem trūkst pieredzes un zināšanu, lai piedāvātu alternatīvus risinājumu variantus. Lielākajā daļā Eiropas un citās pasaules valstīs, kur zemes klātnē izplatītas līdzīgas izcelsmes nogulumieži un vājas nestspējas grunts tiek veikta ģeotehniskā projektēšana. Lai arī Latvijā būvinžinieri varētu veikt ģeotehnisko projektēšanu nepieciešams projektētājus izglītēt attiecīgajā sfērā.

1.2. Darba mērķis

Promocijas darba pētījuma mērķis ir izstrādāt aprēķina metodi autoceļu konstrukcijas nestspējas modelēšanai, izmantojot grunts slāņu un citu materiālu īpašības, kā arī izstrādāt transporta slodzes modeli, kuru izmantot autoceļu ģeotehnisko aprēķinu veikšanai un projekta risinājumu izstrādei.

1.3.Pētījuma uzdevumi

1. Apkopot informāciju par Latvijā un pasaulē pielietotajām autoceļu konstrukcijas ģeotehniskās pastiprināšanas metodēm.
2. Izvērtēt statistiskās plātnes testa rezultātus, kas iegūti ģeotehniskās izpētes un objekta būvniecības laikā. Veikt iegūto datu analīzi nosakot rezultātu savstarpējo korelāciju un faktorus, kas ietekmē iegūto rezultātu precizitāti.
3. Izstrādāt galīgo elementu aprēķinu modeli, ar kura palīdzību, izmantojot ģeotehniskās izpētes laikā noteiktās grunts slāņu īpašības, iespējams noteikt ceļa konstrukcijas nestspēju un sablīvējumu.
4. Ņemot vērā statistiskās plātnes testa rezultātus, kas iegūti ģeotehniskās izpētes laikā un veicot galīgo elementu aprēķinus, paredzēts izstrādāt analītisku aprēķina formulu ceļa konstrukcijas nestspējas novērtēšanai.
5. Apkopot informāciju par ģeotehniskās lauku izpētes metodēm veicot to savstarpējo salīdzinājumu. Analizēt iegūto datu interpretācijas un novērtēt to izmantošanu ģeotehnisko aprēķinu veikšanai.
6. Izstrādāt transporta slodzes modeli, kas atspoguļotu reālo satiksmes slodzes ietekmi uz ceļa konstrukciju un kuru iespējams pielietot ģeotehnisko aprēķinu veikšanai, projekta risinājumu izstrādei.

1.4.Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti

1. Ģeotehniskās izpētes lauka testu metožu interpretēto grunts slāņu parametru vērtību analīze un salīdzinājums, atbilstoši Latvijas grunts apstākļiem, izmantojot ārvalstu pētījumos izstrādātās aprēķinu formulas grunts slāņu fizikāli mehānisko īpašību noteikšanai.
2. Izstrādātais satiksmes slodzes modelis, kuru nepieciešams pielietot veicot ceļa konstrukcijas ģeotehniskos aprēķinus (nogāžu stabilitātes pārbaude, ceļa globālā stabilitāte u.c.).
3. Izmantojot galīgo elementu aprēķina modeli un DMT, CPT izpētes datu interpretācijas izstrādātā statistiskās plātnes testa simulācijas metode autoceļu konstrukcijas nestspējas modelēšanai.
4. Izstrādātā analītiskā aprēķinu formula esošā pamata/zemes klātnes nestspējas (Ev2) noteikšanai izmantojot ģeotehniskās izpētes datus.
5. Izstrādātā blokshēma autoceļa ģeotehniskās situācijas analīzei, projekta risinājumu izstrādei un nepieciešamo pārbaužu veikšanai.

1.5.Darba zinātniskā novitāte

1. Izstrādāts jauns satiksmes slodzes modelis, kuru pielietot veicot ceļa konstrukcijas ģeotehniskos aprēķinus (nogāžu stabilitātes pārbaude, ceļa globālā stabilitāte u.c.).
2. Izstrādāta inovatīva statistiskās plātnes testa simulācijas metode autoceļa konstrukcijas nestspējas modelēšanai izmantojot galīgo elementu aprēķina modeli un DMT, CPT izpētes datu interpretācijas.

3. Izstrādātā jaunā analītiskā aprēķinu formula esošā pamata/zemes klātnes nestspējas (Ev2) noteikšanai izmantojot ģeotehniskās izpētes datus.
4. Izstrādātā oriģinālā blokshēma autoceļa ģeotehniskās situācijas analīzei, projekta risinājumu izstrādei un nepieciešamo pārbaužu veikšanai.

1.6. Darba praktiskā vērtība

Analizēta, salīdzināta un noteikta ģeotehniskās izpētes lauka testu metožu grunts slāņu parametru interpretāciju precizitāte, atbilstoši Latvijas grunts apstākļiem, izmantojot ārvalstu pētījumos izstrādātās aprēķinu formulas grunts slāņu fizikāli mehānisko īpašību noteikšanai.

Izstrādāts satiksmes slodzes modelis, kuru nepieciešams pielietot veicot ceļa konstrukcijas ģeotehniskos aprēķinus (nogāžu stabilitātes pārbaude, ceļa globālā stabilitāte u.c.).

Izstrādāta statiskās plātnes testa simulācijas metode autoceļa konstrukcijas nestspējas modelēšanai izmantojot galīgo elementu aprēķina modeli un DMT, CPT izpētes datu interpretācijas.

Izstrādātā analītiskā aprēķinu formula esošā pamata/zemes klātnes nestspējas (Ev2) noteikšanai izmantojot ģeotehniskās izpētes datus.

Izstrādātā blokshēma autoceļa ģeotehniskās situācijas analīzei, projekta risinājumu izstrādei un nepieciešamo pārbaužu veikšanai.

1.7. Disertācijas uzbūve

Disertācija sastāv no sešām nodaļām.

Pirmajā nodaļā ir skaidrota tēmas aktualitāte, noteikts darba mērķis un risināmie uzdevumi, kā arī formulēti aizstāvēšanai izvirzītie pētījuma rezultāti, darba zinātniskā novitāte un praktiskā vērtība.

Otrajā nodaļā ir apkopota informācija par autoceļa projektēšanas gaitu, kā arī izejas datu analīzi. Izstrādāta blokshēma, ar kuras palīdzību iespējams veikt kontroli projektēšanas gaitai un vienkārši sekot līdzi projekta izstrādes gaitai, veicamajām darbībām. Otrajā nodaļā aprakstīts, kā precīzi veikt ģeotehniskās izpētes datu analīzi un, kuri ir būtiskākie grunts slāņu parametri, kam pievērst uzmanību, lai noteiktu vai gruntis zemes klātnē ir atbilstošas kvalitātes un nestspējas.

Trešajā nodaļā ir apkopota informācija par autoceļu konstrukcijas ģeotehniskās pastiprināšanas metodēm. Nodaļā sniegta klasifikācija būvniecības risinājumiem uz zemas nestspējas grunts. Veikts ģeotehnisko projektēšanas metožu novērtējums aprakstot katra risinājuma priekšrocības un trūkumus. Sniegts ieskats par to, kādas metodes ir izmantotas Latvijas autoceļu būvobjektos.

Ceturtajā nodaļā ir apkopoti vairāku būvniecības/projektēšanas objektu ģeotehniskās izpētes dati. Izpētes punktos, kuros tika dublētās vairākas lauka testa izpētes metodes veikta datu interpretācija un iegūto rezultātu analīze. Rezultāti salīdzināti ar laboratorijas testa datiem, kā arī izstrādāti aprēķina modeļi nosakot, cik būtisku ietekmi uz projekta risinājumiem sniedz atšķirīgas ģeotehniskās izpētes metodes izvēle.

Piektajā nodaļā analizēti satiksmes slodzes modeļi, kādi autoceļu un tiltu projektēšanai ir pieņemti dažādās pasaules valstīs. Ņemot vērā Latvijā un citur pasaulē raksturīgo smagā sastāva transportlīdzekli, kas rada vislielāko ietekmi uz ceļa konstrukciju, izstrādāts satiksmes slodzes modelis, ar kura palīdzību jāveic ģeotehnisko risinājumu izstrāde.

Sestajā nodaļā ir analizēti statistiskās plātnes testa dati, nosakot būtiskākos faktorus, kas ietekmē ģeotehniskās izpētes laikā veikto testu precizitāti. Izstrādāta statistiskās plātnes testa simulācijas metode autoceļa konstrukcijas nestspējas modelēšanai izmantojot galīgo elementu aprēķina modeli un DMT, CPT izpētes datu interpretācijas. Ņemot vērā ģeotehniskās izpētes datus un veiktos galīgo elementu aprēķinus izstrādātā analītiska aprēķinu formula esošā pamata/zemes klātnes nestspējas (Ev2) noteikšanai izmantojot ģeotehniskās izpētes datus.

1.8. Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ir publicēti zinātniskos žurnālos un apspriesti starptautiskās zinātniskās konferencēs:

Publikācija zinātniskā žurnālā, kas citēts SCOPUS datu bāzē:

1. Virsis E., Paeglītis A., Zarins A., (2020.) Road Design on Low Bearing Capacity Soils. *The Baltic Journal of Roads and Bridge Engineering*, Vol. 15, No. 3, 19.-33. lpp.

<https://doi.org/10.7250/bjrbc.2020-15.481>

2. Virsis E., Paeglītis A., Jateikienė L. (2023.) Analysis of physical and mechanical soil properties determined using interpretations of dilatometric test (DMT) and cone penetration test (CPT) methods. *The Baltic Journal of Roads and Bridge Engineering*, 2023 Volume 18 Issue 2: 223–250 lpp.

<https://doi.org/10.7250/bjrbc.2023-18.605>

Publikācijas konferenču materiālos, kas ir indeksēti Web of Science un/vai SCOPUS:

3. Virsis E., Paeglītis A., Zarins A., (2021.) Evaluation of the Residual Load-Bearing Capacity of the Existing Road Using Plate Loading Test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1202, Article number 012012.

DOI:10.1088/1757-899X/1202/1/012012

4. Virsis E., Paeglītis A., Zarins A., (2023.) Development of a Static Plate Test Finite Element Calculation Model. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2423, Article number 012039.

DOI: 10.1088/1742-6596/2423/1/012039

5. Virsis E., Paeglītis A., (2023.) Analysis of physical and mechanical soil properties determined using probing data interpretations. *12th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"*, eISBN 978-609-476-342-7.

<https://doi.org/10.3846/enviro.2023.877>

2. ĢEOTEHNISKĀS IZPĒTES DATU ANALĪZE UN PROJEKTA RISINĀJUMU IZSTRĀDE

2.1. Autoceļa posma novērtējums un nepieciešamo risinājumu izstrāde

Autoceļu projekta izstrāde un realizācija ir sarežģīts un laikietilpīgs process, kurā iesaistīti daudz dažādu savas jomas speciālistu. Lai izstrādātu kvalitatīvu un ilgtspējīgu ceļa projektu, ļoti svarīga ir esošās situācijas novērtēšana un nepieciešamo izejas datu iegūšana. Esošās situācijas novērtēšana, jeb objekta apsekošana dabā ir ļoti svarīga un tās laikā iespējams konstatēt, kuros ceļa posmos ir attīstījušās paliekošās deformācijas, kas varēja rasties grunts problēmu rezultātā. Papildus vizuālajam novērtējumam nepieciešams iegūt/pieprasīt datus par konkrētā ceļa posma iepriekš realizētajiem projekta risinājumiem, kurus iespējams analizēt un novērtēt, kādi ir galvenie cēloņi deformāciju attīstībai seguma konstrukcijā.

Pēc tam, kad veikta sākotnējā datu un vizuālā novērtējuma analīze, tiek sagatavots darba uzdevums ģeotehniskās izpētes veicējiem. Lielāks izpētes punktu blīvums tiek paredzēts problemātiskajās, deformāciju zonās, lai varētu precīzāk noteikt grunts slāņu izplatību, to fizikāli – mehāniskās īpašības un varētu veikt ģeotehniskos aprēķinus.

Laika posmā, kad ģeotehniskās izpētes veicēji veic lauku darbus projektējams veic sākotnējo risinājumu izstrādi. Ņemot vērā satiksmes intensitātes datus tiek noteikts ceļa normālprofils un veikta ceļa segas konstrukcijas variantu izstrāde. Paralēli tiek izstrādāts ceļa trases plāns, garenprofils, ūdens atvades risinājumi un izstrādāts aptuvenš ceļa koridors, projektētā virsma.

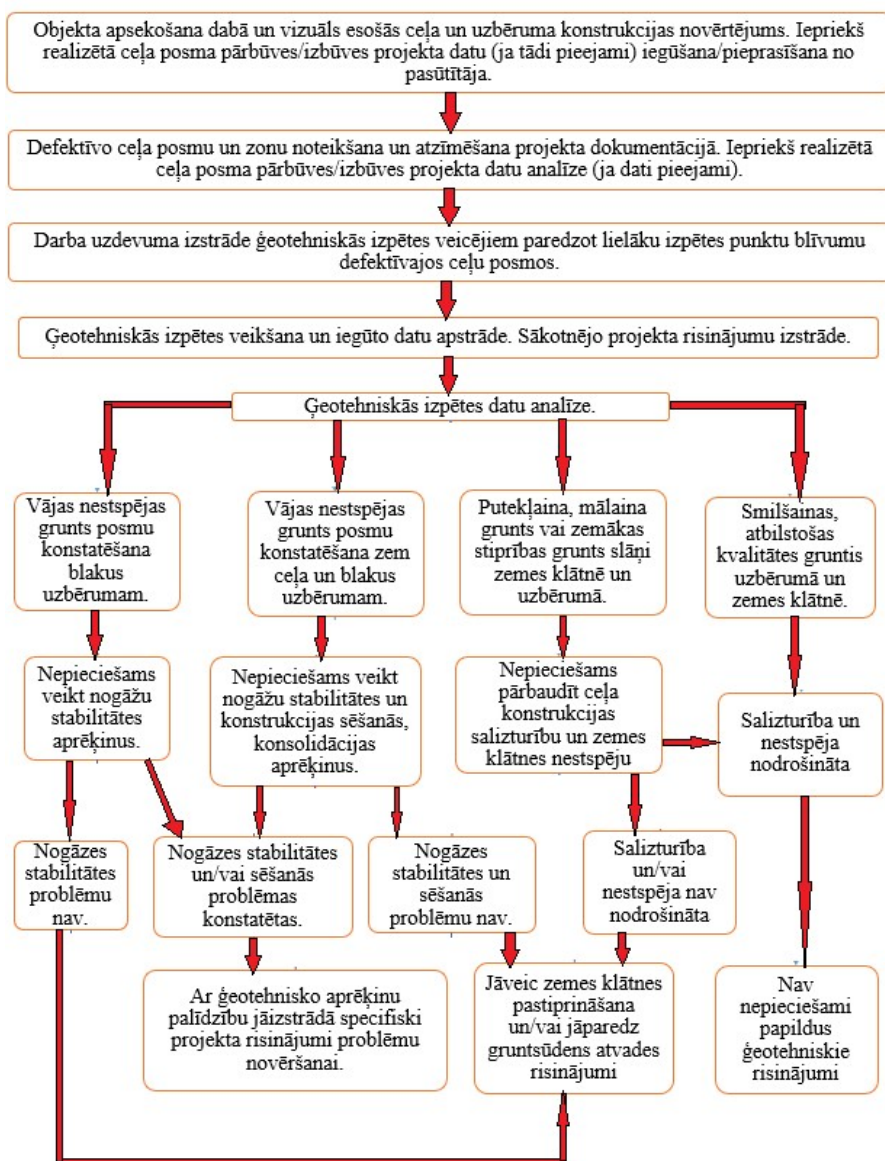
Pēc tam, kad ģeotehniskās izpētes veicējs sagatavojis sākotnējo ģeotehniskās izpētes atskaiti (iespējams, laboratorijas vai citi dati vēl nav līdz galam apstrādāti) iespējams veikt izpētes datu analīzi. Sākotnēji nepieciešams pārskatīt visus veikto urbumu datus, nosakot, kādi grunts tipi ir zemes klātnē, ceļa uzbērumā, zem uzbēruma nogāzes un pie nogāzes pēdām.

Konstatējot vājas nestspējas gruntis nepieciešams noteikt to izplatību (posma garums, izplatība šķērsgriezumā), noteikt fizikāli mehāniskās īpašības. Ņemot vērā sākotnēji izstrādātos projekta risinājumus (ceļa šķērsgriezums ar izstrādāto ceļa segas konstrukciju un projektētās garenprofila atzīmes), nepieciešams veikt autoceļa konstrukcijas ģeotehniskos aprēķinus.

- Ja vājas nestspējas gruntis nav konstatētas zem ceļa uzbēruma konstrukcijas, bet atrodas tikai zem un pie nogāzes pēdām ir jāveic nogāzes stabilitātes pārbaudes.
- Ja vājas nestspējas gruntis noteiktas zem ceļa un nogāzēm, tad nepieciešams veikt nogāzes stabilitātes un konstrukcijas sēšanās, konsolidācijas aprēķinus.
- Ja netiek konstatētas vājas nestspējas gruntis, tomēr zemes klātnē un/vai uzbērumā ieguļ putekļaini, mālaini vai zemākas stiprības grunts slāņi, kā arī gadījumos ar augstu gruntsūdens līmeni nepieciešams pārbaudīt ceļa konstrukcijas salizturību un zemes klātnes nestspēju.
- Ja ģeotehniskajā izpētē tiek noteiktas smilšainas, atbilstošas kvalitātes gruntis uzbērumā vai zemes klātnē, tad nav nepieciešami papildus ģeotehniskie risinājumi.

Ņemot vērā, ka ģeoloģiskā situācija zem autoceļa konstrukcijas ir ļoti mainīga pastāv iespēja, ka viena projektēšanas un būvniecības objekta ietvaros tiek konstatēti visi iepriekš

aprakstītie grunts tipu posmi. Lai projekta izstrādes gaitā būtu vieglāk sekot līdzi nepieciešamajai darbībai promocijas darbā izstrādāta blokhēma, skatīt 2.1.attēlu.



2.1.attēls Autoceļa projekta risinājumu izstrādes blokhēma

Ņemot vērā izstrādāto 2.1.attēla blokhēmu ir vienkārši sekot līdzi projekta izstrādes gaitai un veicamajām darbībām. Galvenais, ko nepieciešams ņemt vērā ir tas, ka ģeotehniskās izpētes laikā konstatējot vājas nestspējas grunts šo faktu nedrīkst ignorēt vai pieņemt lēmumu,

izstrādāt risinājumu bez aprēķinu veikšanas. Grunts slāņu īpašības ir mainīgas, un līdz ar to var arī atšķirties konstruktīvie risinājumi. Projekta risinājums, kas ir piemērots vienā objektā var nesniegt vēlamo efektu citā objektā, līdz ar to katru reizi specifiski projekta risinājumi ir jāizstrādā balstoties uz ģeotehniskajiem aprēķiniem nevis ņemot vērā līdz šim izbūvēto objektu pieredzi.

Projektējot zemes klātni, vēlams panākt, lai tās augšējā kārtā nodrošinātu vismaz 45 MPa lielu nestspēju visu klātnes kalpošanas laiku. Sablīvējums ir jāparedz $\geq 98\%$ no standarta Proktora blīvuma. Zemāk esošajām uzbēruma kārtām ir jānodrošina vismaz 25 MPa liela nestspēja, kā arī sablīvējums ir jāparedz $\geq 98\%$ no standarta Proktora blīvuma. Ja ar esošajām gruntīm nevar nodrošināt nestspējas un sablīvējuma prasības zemāk esošajām uzbēruma kārtām, projekta risinājumos jāparedz papildus pasākumi prasību nodrošināšanai vai neatbilstību kompensēšanai.

2.2. Ģeotehniskās izpētes datu analīze

Ģeotehniskā urbšana un zondēšana ir nepieciešama grunts sastāva noteikšanai, grunts paraugu ņemšanai laboratorijas analīzēm, gruntsūdens līmeņa noskaidrošanai, kā arī grunts slāņu robežu precizēšanai. Urbšanas darbi galvenokārt tiek izpildīti ar urbšanas iekārtas palīdzību, retāk tiek pielietots rokas urbšanas instruments. Zondēšanas darbiem un grunts slāņu fizikāli mehānisko īpašību noteikšanai tiek izmantotas dinamiskās un statiskās zondēšanas iekārtas, dilatometrs, kā arī citas izpētes metodes. Darba uzdevumu ģeotehniskās izpētes darbiem sagatavo atbildīgais ceļu projektēšanas inženieris. Kā norādīts 2.1. attēla blokshēmā ļoti svarīgi ir veikt objekta apsekošanu dabā un defektīvo ceļa posmu noteikšanu un atzīmēšanu projekta dokumentācijā, lai varētu padziļināti izpētīt šīs zonas un noteikt problēmu rašanās cēloņus.

Saņemot ģeotehniskās izpētes rezultātus, ļoti svarīgi ir analizēt urbumu un paņemto laboratorijas paraugu datus. Ņemot vērā izstrādātos ceļa garenprofila un ceļa konstrukcijas risinājumus, nepieciešams sadalīt projektēto ceļa posmu zemes klātnes tipos. Grunts slāņus nepieciešams klasificēt dažādos tipos:

- Smilšainas, atbilstošas kvalitātes grunts slāņi;
- Putekļaini, mālaini un organiski grunts slāņi;
- Vājas nestspējas grunts slāņi (kūdra, dūņas, mīksta līdz plūstoša mālaina gruntis).

2.2.1. Smilšainas, atbilstošas kvalitātes gruntis uzbērumā un zemes klātnē

Pilnās ceļa segas konstrukcijas apakšējie, salizturīgie un drenējošie slāņi tiek izbūvēti no smilšainām gruntīm, kas atbilst specifikācijās izvirzītajām prasībām. Ceļa posmos, kur pēc ģeotehniskās izpētes datu analīzes noteiktas smilšainas gruntis arī zemes klātnē ir atbilstoši apstākļi, lai neparedzētu papildus risinājumu izbūvi zemes klātnes pastiprināšanai. Uz smilšainām gruntīm zemes klātnē parasti tiek sasniegtas nestspējas prasības $Ev2 \geq 45\text{MPa}$, kā arī šāda tipa gruntis ir salizturīgas, līdz ar to nav jāuztraucas par sala radīto ietekmi uz ceļa konstrukciju. Tomēr arī smilšainas, atbilstošas kvalitātes grunts posmos būtiski ir pārbaudīt sekojošas lietas:

- Nepieciešams pārskatīt laboratorijas paraugu datus un noteikt grunts slāņa salizturības klasi, putekļu un mālaino daļiņu procentuālo saturu, kā arī granulometrijas viendabības koeficientu;
- Nepieciešams noteikt maksimālo gruntsūdens līmeni;
- Atbilstoši garenprofila atzīmei un ceļa šķērsprofilam jāpārliciecinās vai izstrādāts atbilstošs ūdens atvades risinājums;

2.2.2. Putekļaina, mālaina grunts vai zemākas stiprības slāņi zemes klātnē un uzbērumā

Galvenā zemes klātnes problēma, kas ietekmē seguma kalpošanas ilgumu, ir mālaino, smalkgraudaino un organisko grunšu nestspējas samazināšanās zemes klātnes augšējos slāņos. Cikliskajos sasalšanas atkuššanas periodos (rudens – pavasaris), salizturīgā un/vai drenējošā kārtā, var nodrošināt ūdens novadi no seguma. Tomēr, jāņem vērā, ka ūdens, kas tiek izvadīts no ceļa konstrukcijas arī plūst uz leju un var pārmitrināt zemes klātnes virsējos slāņus. Šajos periodos mālainie, smalkgraudainie grunts slāņi absorbē ūdeni, tie var uzbriest, palielinās to mitruma saturs, kā rezultātā mainās grunts konsistence. Visu šo faktoru iespējams samazināt grunts slāņa nestspēja, un ceļa konstrukcijā var attīstīties palielošās deformācijas [1].

Zemes klātnē, tās virsējos slāņos vai uzbērumā konstatējot gruntis ar lielu putekļu, mālu vai organisko vielu saturu, nepieciešams pārbaudīt un analizēt vairākas lietas:

- Grunts slāņa putekļu, māla un organisko vielu daļiņu procentuālo saturu – ja šādas gruntis tiek konstatētas obligāti jāveic salizturības, zemes klātnes nestspējas pārbaudes;
- Slāņu kopējo biežumu un ieguluma dziļumu zem ceļa konstrukcijas – jāpārliciecinās, vai slānis neatrodas sasaluma zonā;
- Mālaino grunts slāņu konsistenci, dabīgo mitrumu, plastiskuma un plūstamības robežu – mikstām līdz plūstošām mālainām gruntīm ir ļoti zemas fizikāli mehāniskās īpašības, līdz ar to netiek nodrošināta zemes klātnes nestspēja $E_{v2} \geq 45 \text{MPa}$;
- Grunts slāņu fizikāli – mehāniskās īpašības, kas noteiktas veicot zondēšanas izpētes interpretācijas – pēc zondēšanas rezultātu interpretācijām iespējams novērtēt grunts slāņu un zemes klātnes nestspēju;
- Gruntsūdens līmeņa atzīmi – nepieciešams pārliciecināties, vai gruntsūdens neatrodas sasaluma zonā un vai nav jāparedz drenāžas vai citi risinājumi gruntsūdens pazemināšanai.

Grunts putekļu, māla un organisko vielu daļiņu procentuālais saturs būtiski ietekmē grunts slāņa fizikāli mehāniskās īpašības. Putekļa daļiņas piesaista kapilāro ūdeni un līdz ar to grunts slāņi ar lielu putekļu saturu (>15%) nav salizturīgas gruntis un rudens – pavasara sezonā var izraisīt konstrukcijas kūkumošanu, ja šāda tipa gruntis atrodas pārāk tuvu seguma virsmai. Mālainām un organiskām gruntīm mitruma ietekmē būtiski pasliktinās fizikāli mehāniskās īpašības, līdz ar to samazinās zemes klātnes nestspēja.

Projekta izstrādes gaitā ļoti svarīgi ir noteikt putekļaino, mālaino un organisko grunts slāņu kopējo biežumu un ieguluma dziļumu. Kā jau iepriekš minēts, ja šāda tipa gruntis atrodas pārāk tuvu zemes virsmai tās var izraisīt ceļa konstrukcijas kūkumošanu. Biezs organiskās grunts slānis var izraisīt ilgtermiņa problēmas jaunajā ceļa konstrukcijā. Tas galvenokārt sagādā

problēmas sasniegt nepieciešamo zemes klātnes nestspēju, bet papildus, dēļ tā, ka šos slāņus nav iespējams atbilstoši sablīvēt, cikliskās slodzes iespaidā var attīstīties nevienmērīgas deformācijas.

Mālaino grunšu parametri mainās atkarībā no mitruma satura. Jo tuvāk grunts slāņa mitrums dabīgā stāvoklī atrodas plūstamības robežai, jo mazāka ir grunts pretestība pašsvara un satiksmes izraisītajai slodzei. Plūstošas, mālainas gruntis var uzskatīt par vājas nestspējas slāņiem, līdz ar to konstatējot šādas gruntis ar pietiekoši lielu slāņa kopējo biežumu nepieciešams veikt nogāžu stabilitātes un konstrukcijas sēšanās ģeotehniskos aprēķinus.

2.2.3. Vājas nestspējas grunts slāņi zemes klātnē un uzbērumā

Par vājas nestspējas grūnīm uzskatāmas tās, ar kurām nav iespējams panākt 25MPa lielu nestspēju apakšējām zemes klātnes kārtām. Tās parasti ir plastiskas vai plūstošas gruntis ar lielu smalko daļiņu, palielinātu mitruma saturu un lielu organisko daļiņu procentuālo daudzumu. Vājas nestspējas grunšu raksturīgās pazīmes ir:

- Vidēji augsts un augsts organisko vielu saturs > 6%;
- Augsts plasticitātes indekss $I_p \geq 7$;
- Esošais mitrums pārsniedz optimālo;
- Liels smalko daļiņu saturs > 40%;
- CBR rādītājs < 5

Bieži vājas nestspējas grūtis atrodas dziļāk par projektētās zemes klātnes virsmu un to izrakšana ne vienmēr ir tehniski iespējama vai nesniedz vēlamo ekonomisko efektu. Šādos gadījumos nepieciešams veikt autoceļa ģeotehniskos aprēķinus nosakot cik lielu ietekmi uz konstrukciju rada vājas nestspējas grunts slāņi un jāparedz, jāizstrādā zemes klātnes pastiprināšanas risinājumi [2].

Zemes klātnes pastiprināšanas risinājumiem ir jānodrošina nepieciešamā nestspējai un tai ir jāsauglabājas paredzēto kalpošanas laiku. Pastiprināšanu var neparedzēt, ja vājas nestspējas grunts slāņi atrodas dziļi, slāņa kopējais biežums ir neliels un veiktās ģeotehnisko aprēķinu pārbaudes apliecina, ka vājas nestspējas grunts slāņi ietekmi uz ceļa un uzbēruma konstrukciju nerada. Jānovērtē iespējamā vājas nestspējas grunts sablīvēšanās, izspiešanās uz sāniem, kas varētu izraisīt zemes klātnes un līdz ar to ceļa konstrukcijas sēšanos, deformāciju attīstību.

Ceļa būvniecības, rekonstrukcijas vai pastiprināšanas segas konstrukcijas un metodes izvēle parasti balstās uz ekonomisku un konstrukcijas kalpotspējas apsvērumu kombināciju. Lielākā daļa autoceļu var izturēt diezgan lielas sēšanās, uzbēruma konsolidācijas, ja tas notiek vienmērīgi un garos ceļa posmos tad, pat netiek būtiski ietekmēta braukšanas kvalitāte. No otras puses, nevienmērīgas sēšanās īsos ceļa posmos un brauktuves šķērsgriezumā var radīt būtiskus draudus ātri braucošiem transportlīdzekļiem, līdz ar to šādos gadījumos ir jāizstrādā speciāli projekta risinājumi problēmu un risku novēršanai. Ceļa konstrukcija un uzbērums ir jāprojektē tā, lai tie atbilstu diviem galvenajiem inženiertehniskajiem kritērijiem – uzbēruma, konstrukcijas stabilitāte (nestspēja, nogāžu stabilitāte) un deformāciju attīstību ierobežošana [3].

Jēdziens “nestspēja” un “vājas nestspējas grunts” slikti sader kopā. Kūdra savā dabiskajā stāvoklī ir ūdens un organisko vielu savienojums, kam praktiski nav izmērāmas nestspējas. Līdzīgi ir ar smalkgraudainām, ūdens piesātinātām, plūstošām gruntīm. Tās nespēj nodrošināt nestspēju un slodzes iespaidā tiek saspīestas vai izspīestas uz sāniem no uzbēruma un transporta slodzes kombinācijas. Tomēr, mūsdienās ir izstrādātas vairākas metodes, lai vājas nestspējas grūntis pārveidotu par atbilstošu pamata materiālu. Jēdziens “nestspēja” tā klasiskajā grūnšu mehānikas izpratnē var tikt definēts kā grūnts spēja izturēt spiedienu, kas uz to tiek radīts no jebkuras inženierbūves, neizraisot bīdes bojājumus ar lielām deformācijām [3].

2.3. Projekta risinājumu izstrāde un aprēķinu veikšana konstrukcijas ilgmūžības nodrošināšanai

Visiem uzbērumiem jābūt projektētiem un veidoti tā, lai tie būtu stabili un sniegtu pietiekamu drošības rezervi pret konstrukcijas pamatu nestspējas un nogāžu stabilitātes zudumu. Šādas konstrukcijas problēmas galvenokārt rodas vāju nestspējas slāņu ietekmē. Nogāzes izslīdēšana lielākoties notiek pa izslīdēšanas virsmu, kas parasti ir loka formā un kuras apakšējā daļa iet caur vājas nestspējas grūntu slāni, jo tas nespēj nodrošināt nepieciešamo bīdes pretestību. Konstrukcijas sēšanās un konsolidācija notiek grūntu slāņu sablīvēšanas rezultātā, tomēr, ja zem uzbēruma konstrukcijas atrodas vājas nestspējas grūntu slāņi, tad tos iespējams ne tikai saspiest, bet tie var arī tikt izspīesti uz sāniem, pakļaujot deformācijām augstāk esošos slāņus.

Ģeotehnisko aprēķinu veikšanai ir pieejamas dažādas stabilitātes analīzes programmas, piemēram, PLAXIS, OASYS, FLAC, SAGE, RS3 u.c., kā arī vienkāršotos aprēķinus iespējams veikt analītiski, izmantojot pētījumos izstrādātās aprēķinu formulas. Ģeotehniskās analīzes ietvaros nepieciešams pārliccināties, ka uzbēruma īstermiņa stiprība būvdarbu laikā ir nodrošināta, kā arī izvēlēta būvniecības metode un konstruktīvais risinājums nodrošina ilgtermiņa stabilitāti.

3. AUTOCEĻU KONSTRUKCIJAS ĢEOTEHNISKĀS PASTIPRINĀŠANAS METODES

Ceļu būvniecība uz vājas nestspējas gruntīm rada lielus izaicinājumus ceļu projektētājam un būvniekam. Nepieciešams atrast labākos un drošākos plāna un garenprofila risinājumus zonām, kur zemes klātnē konstatētas vājas nestspējas grunts, kā arī jāizstrādā ceļa konstrukcijas risinājumi ņemot vērā grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības – ūdens saturs, materiāla blīvums, deformāciju modulis, materiāla saiste, berzes leņķis un citas. Ceļu inženierim jāanalizē visa pieejamā informācija un pieņemtie apsvērumi saistībā ar inženiertehniskajiem sarežģījumiem, lai varētu uzbūvēt drošus, stabilus un ekspluatējamus ceļa uzbērumus [4].

Konstrukcijas zemākā daļa parasti tiek saukta par pamatu (autoceļiem – zemes klātne). Autoceļa segas konstrukcijas galvenā funkcija ir pārnest satiksmes slodzi uz grunti, uz kuras tā atrodas. Pareizi novērtēta esošās zemes klātne, esošais pamats un pareizi izstrādāts konstrukcijas risinājums pārnēs satiksmes un ceļa pašsvara izraisīto slodzi dziļākos grunts slāņos, nepārslogojot tos. Grunts pārmērīga noslogošana var izraisīt tūlītēju sēšanas, konsolidāciju vai bīdes bojājumus, kas var izraisīt strukturālās deformācijas. Tādējādi ģeotehniskajiem, būvniecības un projektēšanas inženieriem, projekta izstrādes gaitā ir jāizvērtē grunts nestspēja.

3.1. Ceļu projektēšana uz vājas nestspējas gruntīm

Nestspēja - slāņu stiprība, grunts spēja uzņemt un izkliedēt pielikto slodzi. Zemes klātnes/grunts slāņu struktūras nestspēja ir maksimālais vidējais kontakta spiediens starp pamatu un grunti, kas nedrīkst izraisīt bīdes bojājumus vai pārmērīgas deformācijas.

Ar vājas nestspējas grunts problēmām saskaras visā pasaulē, tādēļ gadu gaitā izstrādātas dažādas zemes klātnes un grunts slāņu pastiprināšanas metodes. Lai projektēšanas gaitā varētu piedāvāt ekonomiskāko un racionālāko pastiprināšanas risinājumu, nepieciešams precīzi identificēt galvenos riskus, kas varētu ietekmēt ceļa kalpotspēju.

Ir vairākas metodes, kā uzlabot grunts nestspēju, un divas galvenās būvniecības stratēģijas, ieskaitot zemas nestspējas grunts izrakšanu un atstāšanu vietā. Izrakšana nozīmē zemas nestspējas slāņu likvidēšanu pirms būvniecības - grunts izrakšanu, nomaiņu un pārvietošanu. Vājas nestspējas grunts atstāšana ietver visas konstrukcijas, kas tiek izbūvētas tieši uz šīs grunts, lai izvairītos no lieliem zemes darbiem. Iespējams pielietot dažādas metodes - konsolidācija, grunts īpašību uzlabošana, lai samazinātu deformācijas, slodzes pārveidošana, stabilizācija un pāļu veidošana.

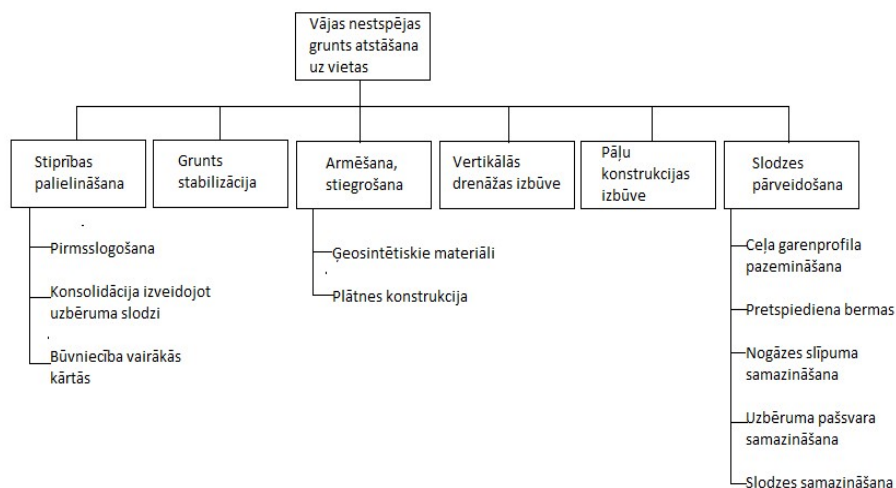
Būvniecību uz zemas nestspējas grunts būtībā var iedalīt piecās plašās klasifikācijās:

1. Izvairīšanās (trases novietojuma maiņa nešķērsojot vājas nestspējas grunts);
2. Izrakšana (vājas nestspējas grunts slāņi tiek izrakti un ceļa konstrukcija izbūvēta ierakumā) ;
3. Grunts nomaiņa (vājas nestspējas grunts tiek izrakta un aizstāta ar salizturīgu materiālu);

4. Pārvietojums (vājas nestspējas grunts ar dažādu metožu palīdzību tiek izspiestas uz sāniem);
5. Grunts atstāta uz vietas (ģeotehniskā projektēšana paredzot speciālus risinājumus un/vai materiālus, lai samazinātu transporta slodzes ietekmi uz vājas nestspējas grunts slāņiem).

Izrakšana ir drošākais risinājums, lai šķērsotu vājas nestspējas grunts posmu vai pastiprinātu esošā ceļa konstrukciju. Daudzi inženieri uzskata, ka tas ir vienīgais uzticamais veids, kā šķērsot vājas nestspējas grunts uz kuras plānots izbūvēt pastāvīgi izmantojamu ceļu, ja nav iespējams izvairīties no šādu zonu šķērsošanas. Izmantojot izrakšanas metodi, visi vājie grunts slāņi tiek izrakti, līdz slānim ar pietiekamu nestspēju, kas spēs nodrošināt jaunās ceļa konstrukcijas kalpotspēju [5].

Metodes, kurās vājas nestspējas grunts atstāj uz vietas, novēršot apjomīgos zemes darbus, tagad kļūst arvien izplatītākas, jo samazinoties ceļu būvniecības budžetam tiek meklēti rentablāki risinājumi (skatīt attēlu 3.1.). Arī vides aizsardzības un atkritumu samazināšanas jautājumi sniedz papildus argumentus, lai projektā tiktu realizēts risinājums, kurā vājas nestspējas grunts tiek atstāta uz vietas.



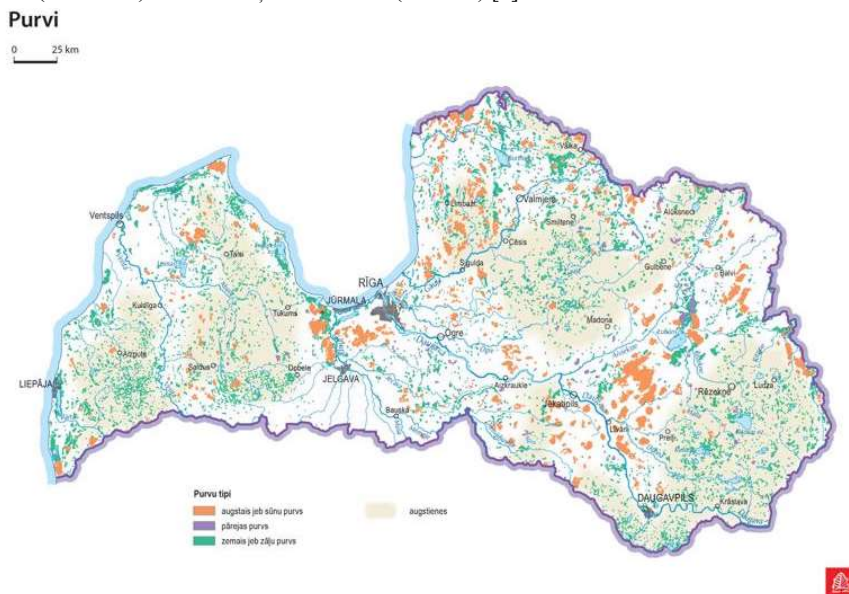
3.1. attēls. Metodes, kas atstāj vājas nestspējas grunts uz vietas

Latvijā līdz 2018. gadam vājas nestspējas grunts apmaiņas metode bija galvenā un visbiežāk izmantotā zemes klātnes pastiprināšanas metode. 2018. gadā vienā no ceļu būvniecības objektiem būvdarbu laikā notika būtiskas ceļa konstrukcijas deformācijas, kā rezultātā būvdarbi tika apturēti un bija nepieciešams izstrādāt jaunus projekta risinājumus. Pirmo reizi Latvijā tika izmantota kombinētā grunts un betona kolonnu būvniecība. Pēc šī pilotprojekta īstenošanas grunts nestspējas nodrošināšana ir kļuvusi par aktuālu tēmu.

Latvija atrodas tektoniski stabilā, ģeoloģiski senā teritorijā – Austrumeiropas kratona ziemeļrietumos, vienlaikus Eirāzijas litosfēras plātnes rietumos. Latvijas ģeoloģiskajā uzbūvē

var nodalīt trīs pamata elementus: proterozoja pamatklintājs, kas veido cietu, kristālisku pamatni zem nogulumiežiem; slāņota nogulumiežu sega; to pārsedzošā kvartārsega, kas lielā mērā veidojusies apledojumu ietekmē [6].

Latvijas mērenais klimats ar lielāku nokrišņu daudzumu nekā iztvaikošana, kā arī viegli viļņotais reljefs un mālainie, vāji caurlaidīgie nogulumu purvu ieplakās ir labvēlīgs apstākļu kopums purvu veidošanās procesiem un attīstībai. Mūsdienās purvu kompleksi Latvijā ir sarežģītas dinamiskas sistēmas, kas izveidojušās un attīstījušās tūkstošiem gadu garumā un joprojām intensīvi aug horizontāli un vertikāli, būtiski ietekmējot ainavu dinamiku. Purvi Latvijas teritorijā aizņem vairāk nekā 10 % (skatīt 3.2. attēlu), kur pēdējos 11 700 gadus uzkrājies vismaz 30 cm biezs kūdras slānis. Tie ir izplatīti visā valsts teritorijā, bet to novietojums dabas apvidos ir atšķirīgs. Vislielākā purvainība ir Austrumlatvijas, Viduslatvijas un Piejūras zemienē, kur atrodas pēc platības lielākie purvi – Teiču purvs (14 074 ha), Cenas tūrelis (10 600 ha) un Lielais Ķemeru tūrelis (5000 ha) [7].



3.2. attēls. Purvu izplatība Latvijas teritorijā

Purvi Latvijā attīstījušies Zemes virsas negatīvajās reljefa formās, kuras galvenokārt izveidojušās pēdējā apledojuma ledāja un tā kušanas ūdeņu darbības rezultātā. Izņēmums ir jūras piekrastes teritorijas, kur reljefa veidošanos būtiski ietekmēja Baltijas jūras attīstības stadiju izraisītie ģeoloģiskie procesi. Purvi Latvijas teritorijā veidojušies, pārpurvojoties sauszemei vai aizaugot seklām ūdenstilpēm, kā arī to veidošanos būtiski ietekmē reljefs [7].

3.2. Ceļu ģeotehniskās projektēšanas metožu novērtējums

Pareiza risinājuma izvēle ceļa būvniecībai vai labiekārtošanai uz vājas nestspējas grunts parasti tiek balstīta uz racionāliem apsvērumiem, piemēram, pieejamo budžetu, kā arī jaunās konstrukcijas ekspluatācijas prasībām. Ceļu projektēšanas inženierim vissvarīgākais ir pareizi noteikt cēloņus, problēmas un faktorus, kas varētu ietekmēt ceļa nestspēju un stabilitāti. Pasaulē ir izstrādātas dažādas būvniecības metodes (skatīt 3.1. tabulu) veicot ceļa izbūvi vājas nestspējas grunts zonās [8].

3.1.tabula

Ceļa ģeotehniskās projektēšanas metožu novērtējums

Risinājums	Priekšrocības	Trūkumi
Ceļa plānotā maršruta izmaiņas	Novērs iespējamās grunts problēmas	Nepieciešama izstrādātā ceļu plāna pārskatīšana un izmaiņu veikšana
Vājas nestspējas grunts izrakšana un nomaīņa	Pārbaudīta, uzticama un labi zināma tehnoloģija	Problēmas ar izraktā materiāla atbērtnes atrašanu un jaunā materiāla augsto kvalitāti. Augsta gruntsūdens līmeņa problēmas. Nav lētākais risinājums.
Pārvietošana vai daļēja izrakšana	Pārbaudīta tehnoloģija. Vājās grunts pārvietošana uz ceļa uzbēruma malām var uzlabot ceļa un nogāzes stabilitāti.	Nav piemērots visiem grunts veidiem. Nepieciešams ievērojams daudzums uzbēruma materiāla un ilgāks būvniecības laiks, lai grunts pārvietošana un papildus pieliktā slodze būtu efektīva.
Pārvietošana ar ūdens strūklu	Izveidota starpproduktu tehnoloģija. Nav nepieciešama vājas nestspējas grunts rakšana. Vajadzētu sasniegt labu nestspēju pārvietotajā uzbēruma konstrukcijā.	Nav piemērots visiem grunts veidiem. Nepieciešams ievērojams daudzums uzbēruma materiāla un ilgāks būvniecības laiks, lai grunts pārvietošana un papildus pieliktā slodze būtu efektīva.
Pārvietošana ar spridzināšanu	Tiek lietota kopā ar pārvietošanas un / vai daļējiem izrakšanas risinājumiem. Izveidota starpproduktu tehnoloģija. Nav nepieciešama vājas nestspējas grunts izrakšana. Vajadzētu sasniegt labu nestspēju pārvietotajā uzbēruma konstrukcijā.	Nav piemērots visiem grunts veidiem. Nepieciešams ievērojams daudzums uzbēruma materiāla un ilgāks būvniecības laiks, lai grunts pārvietošana un papildus pieliktā slodze būtu efektīva. Darbības ar sprāgstvielām. Var izmantot tikai atvērtās vietās bez komunikācijām un citiem tīkliem.

3.1.tabulas turpinājums

Risinājums	Priekšrocības	Trūkumi
Nestspējas uzlabošana ar pirms sloģošanu	Samazina nepieciešamā uzbēruma materiāla daudzumu. Nav nepieciešama vājas nestspējas grunts rakšana un aizvešana.	Laiks, kas nepieciešams pirms sloģošanai, var paildzināt būvniecības laiku. Nav iespējams precīzi paredzēt sloģošanas grafiku. Pastāv iespēja, ka sloģošana ir jāatkārto. Nepieciešama visaptveroša ģeotehniskā izpēte un grunts laboratorijas pārbaudes pirms būvdarbu uzsākšanas. Nepieciešama monitoringa sistēmas ierīkošana.
Nestspējas uzlabošana pamatu nosloģojot ar papildus uzbērumu	Uzlabo vājas nestspējas grunts nestspēju, lai tā varētu balsīt uzbēruma pašsvaru. Primārās un sekundārās konsolidācijas laiku var paātrināt.	Laiks, kas nepieciešams sloģojuma izveidei, var paildzināt būvniecības laiku. Nepieciešama visaptveroša ģeotehniskā izpēte un grunts laboratorijas pārbaudes pirms būvdarbu uzsākšanas. Nepieciešama monitoringa sistēmas ierīkošana.
Nestspējas uzlabošana būvdarbus realizējot pa kārtām	Samazina jaunā uzbēruma sekundāro konsolidāciju. Augstas uzbēruma konstrukcijas var izbūvēt bez bīdes vai izslīdēšanas bojājumiem zonās ar vājas nestspējas gruntīm. Nav nepieciešama vājas nestspējas grunts rakšana un aizvešana.	Garš būvniecības laiks, kas nepieciešams, lai realizētu būvniecības etapus, var palielināt ceļa būvniecības laiku. Nepieciešama uzraudzības sistēma.
Slodzes samazināšana pazeminot ceļa profilu	Nepieciešams mazāk uzbēruma materiāla. Samazina slodzi uz pamatā esošo vājas nestspējas grunti, nepieciešams mazāk uzbēruma materiāls.	Nepieciešama ceļa profila koriģēšana. Risinājumu var realizēt, ja tilts vai citas inženierbūves nav kritiski tuvas. Var radīt problēmas ar gruntsūdeni.
Slodzes pārveidošana, izbūvējot uzbēruma bermas	Palielina izslīdēšanas zonas stabilitāti. Kā bermas aizpildījumu/uzbērumu iespējams pielietot zemas stiprības un/vai kvalitātes materiālu (pat vājas nestspējas grunts).	Nepieciešams papildu uzbēruma materiāls un papildus ceļam nepieciešamās zemes plašākai konstrukcijai. Palielina konstrukcijas kopējo pašsvaru. Var pieaugt konsolidācijas deformācija palielinātās slodzes izplatīšanās rezultātā no spiediena bermas.

3.1.tabulas turpinājums

Risinājums	Priekšrocības	Trūkumi
Slodzes pārveidošana samazinot ceļa nogāzes slīpumu	Palielina kritiskā izslīdēšanas virsmas stabilitāti, dziļumu un garumu.	Nepieciešams papildu uzbēruma materiāls un papildus ceļam nepieciešamās zemes plašākai konstrukcijai. Palielina konstrukcijas kopējo pašvaru. Var pieaugt konsolidācijas deformācija palielinātas slodzes izplatīšanās rezultātā no plašākām nogāzēm.
Slodzes samazināšana uzbēruma konstrukcijā izmantojot mazāka blīvuma materiālus	Nepieciešama mazāka vājas nestspējas grunts pamata nestspēja. Parasti nav nepieciešams stiprināt vājos grunts slāņus. Vieglāka uzbēruma konstrukcija parasti samazina iespējamo nākotnes deformāciju apmērus.	Izmantojot specializēto vieglo materiālu var būtiski palielināties būvniecības un transportēšanas cena. Viegļu materiālu projektēšana un izbūve var prasīt īpašus pasākumus. Var rasties sarežģīti vides apsvērumi īpaši ar gruntsūdeņiem. Ceļa konstrukcijas nestspēja, kurai izmantots maza blīvuma materiāls, var būt ierobežota.
Uzbēruma pastiprināšana izmantojot ģeosintētiskos materiālus	Ierobežots esošās grunts un apkārtējā reljefa traucējums. Nodrošina konstrukcijas pastiprinājumu un stabilitāti īstermiņā un vidējā termiņā. Vienmērīgi izlīdzināta konstrukcijas deformācija un samazināti sānu spriegumi uz vājiem grunts slāņiem. Samazina nepieciešamību pēc augstas kvalitātes un stiprības uzbēruma materiāla. Nav nepieciešama rakšana un materiāla aizvešana.	Kopējā konstrukcijas uzbēruma deformācija netiek samazināta. Ģeosintētiskie materiāli prasa kvalitatīvu un saudzīgu iekļāšanu. Materiāla šļūde var ietekmēt ģeotekstila ilgtermiņa izturību. Izbūvējot ģeorežģus, nepieciešams pielietot augstākas kvalitātes uzbēruma materiālu.
Vertikālās drenāžas izbūve	Samazina primārās un sekundārās konsolidācijas laiku. Samazināta teritorijas platība, kurā jāveic būvdarbi.	Primārās un sekundārās konsolidācijas paātrināšanās rezultātā būvniecības laikā notiek ievērojamas deformācijas/sēšanās. Vertikālās drenāžas darbību ietekmē konsolidācijas procesā veidojošās deformācijas un grunts spriegumi uz drenāžas sienām.

3.1.tabulas turpinājums

Risinājums	Priekšrocības	Trūkumi
Uzbēruma pastiprināšana ar zāģētiem koka stumbriem	Samazināta teritorijas platība, kurā jāveic būvdarbi. Uzlabo ceļa stabilitāti īstermiņā un vidējā termiņā. Samazina nevienmērīgu grunts deformāciju un vienmērīgi izkliedē bīdes spriegumus uz vājās virsmas. Samazina nepieciešamību pēc jauna uzbēruma materiāla. Nav jāveic izrakšana un aizvešana uz atbērtni.	Kopējā uzbēruma/ceļa deformācija netiek samazināta. Uzbēruma būvniecības laikā izbūvētais pastiprināšanas risinājums var tikt bojāts/traucēts ar būvniecības tehniku. Pastiprinājums tiek realizēts izmantojot augstas kvalitātes roku darbu. Koka stumbru klājam jābūt iegremdētam, lai izvairītos no elementu nobīdīšanās. Neparedzams bioloģiskās segregācijas periods.
Uzbēruma pastiprināšana izmantojot betona blokus, tērauda loksnes	Samazināta teritorijas platība, kurā jāveic būvdarbi. Ilgtermiņā tiek nodrošināta stingra uzbēruma pamata konstrukcija. Samazina nevienmērīgu grunts deformāciju un vienmērīgi izkliedē bīdes spriegumus uz vājās virsmas. Samazina nepieciešamību pēc jauna uzbēruma materiāla. Nav jāveic izrakšana un aizvešana uz atbērtni.	Kopējā uzbēruma/ceļa deformācija netiek samazināta. Salīdzinoši ilgs betona sacietēšanas laiks. Pastiprinājums tiek realizēts izmantojot augstas kvalitātes roku darbu.
Pāļu konstrukcijas izbūve	Nav jāveic izrakšana un aizvešana uz atbērtni. Samazināta teritorijas platība, kurā jāveic būvdarbi. Minimāls vai pilnībā novērstas konstrukcijas deformācijas. Konstrukcijas nestspēja tiek palielināta uzreiz pēc pastiprinājumu izbūves.	Risinājuma izstrādes laikā netiek ņemtas vērā lauku testos noteiktās vājas nestspējas grunts īpašības. Veicot pāļu aprēķinus netiek ņemts vērā apkārt esošās grunts papildus atbalsts/nestspēja. Parasti nepieciešama betona plātnes vai ģeosintētisko materiālu slodzes uzņemšanas un izkļiedes platforma/klājs. Liels dziļums līdz nesošajam gruntam slānim. Palielināti būvniecības izdevumi.
Grunts stabilizācija	Nav jāveic izrakšana un aizvešana uz atbērtni. Samazina konstrukcijas deformācijas/sēšanos un palielina vājā grunts slāņa un kopējo zemes klātnes nestspēju.	Nav iespējams novērtēt, kā izbūvētā konstrukcija ietekmē gruntsūdens filtrāciju. Salīdzinoši ilgs betona sacietēšanas laiks. Palielināti būvniecības izdevumi.

3.3.Zemes klātnes grunts pastiprināšanas pieredze Latvijā.

Līdz 2019. gadam Latvijā nebija izstrādātu ieteikumu, specifiku vai rokasgrāmatu, kurās būtu apkopotas un aprakstītas vājas nestspējas grunts, zemes klātnes, nogāžu stabilitātes un citas ģeotehniskās nostiprināšanas metodes, piemēram, ceļu uzbērums virs pāļu pamatiem, vertikālās drenāžas grunts konsolidācija, grunts pāļi zem uzbēruma utt. Tādējādi katrs projektētājs, inženieris vadījās pēc savas pieredzes, zināšanām, aizspriedumiem un drošības koncepcijām, kas rada risku, ka var tikt izstrādāti neracionāli un nevajadzīgi dārgi risinājumi, vai varbūt lēti risinājumi, kas neatbilst konkrētām vajadzībām.

2019. gadā tika izstrādāta rokasgrāmata - "Ceļa zemes klātnes grunts nestspējas nodrošināšanas risinājumu izstrāde" tajā apkopotas, un aprakstītas grunšu nostiprināšanas metodes, risinājumi gadījumos, ja ceļa konstrukcija tiek projektēta posmos, kur sastopamas vājas nestspējas grunts. Rokasgrāmata palīdz izmantot esošās grunts zemes klātnes izbūvei visefektīvākajā un racionālākajā veidā. Ir izstrādātas procedūras, un metodikas, kurās aprakstīts, kā novērtēt zemes klātnes grunts un kā izstrādāt konkrētus tehniski-ekonomiski pamatotus risinājumus, ietverot dzīves cikla izmaksu analīzi (LCCA), zemes klātnes nepieciešamās nestspējas un funkcionalitātes nodrošināšanai, atkarībā no paredzamajām satiksmes slodzēm, ģeoloģiskajiem un klimatiskajiem apstākļiem, esošo grunšu īpašībām [9].

Tehniski – ekonomiskais grunšu pastiprināšanas un uzlabošanas metožu pamatojums katram konkrētajam projektam ir atkarīgs no metodes/žu izvēles un tās/to funkcijām. Lai novērtētu konkrētas grunšu uzlabošanas un pastiprināšanas metodes lietošanas pamatojumu, nepieciešams ņemt vērā ceļa konstrukcijas tehniskos parametrus, projekta būvniecības etapus un tehnoloģiskās prasības, projektā definētās prasības un kvalitātes kritērijus, ierobežojumus un cita rakstura (nevis tehnisku apsvērumu) risku novērtēšanas rezultātus. Salīdzinot un novērtējot optimālākās grunšu pastiprināšanas un uzlabošanas metodes, konkrētam projektam ir jāizvērtē ģeotehniskās izpētes atskaites un ceļa konstrukcijas parametru dati. Lai novērtētu grunšu pastiprināšanas un uzlabošanas nepieciešamību, nepieciešams apskatīt zemāk uzskaitītos gadījumus un robežnosacījumus:

- zemes klātnē esošās grunts nevar nodrošināt pietiekošu nestspēju, vai arī paredzamās nevienmērīgās un kopējās deformācijas pārsniedz drošas ceļa ekspluatācijas prasības;
- projektā paredzētas stāvas nogāzes, atbalstsienas u.c.;
- nepieciešams izbūvēt darba platformu vai piedev/apvedceļu;
- identificēt vai noteikt ceļa konstrukcijas ekspluatācijas prasības;
- identificēt laika, telpiskos un ietekmes uz vidi un vides aizsardzības ierobežojumus;
- noskaidrot projektā noteiktos un būvlaukumā sagaidāmos ierobežojumus;
- identificēt dažādu grunšu pastiprināšanas un uzlabošanas metožu lietošanas ierobežojumus;
- savā starpā salīdzināt dažādas grunšu pastiprināšanas un uzlabošanas metodes [9].

3.3.1. Grunts apmaiņa

Latvijā ceļu projektēšanā līdz 2018. gadam kā galvenais un lielākoties vienīgais zemes klātnes pastiprināšanas variants tika pielietots vājas nestspējas grunts apmaiņa. Šāda izbūves tehnoloģija ir dārga, laikietilpīga un patērē daudz resursu.

Realizēto objektu piemēri:

- 1) 2017. gadā ekspluatācijā nodots **P128 km 24,48 – km 32,02 (Sloka – Talsi)** autoceļa posms. Pēdējo reizi ceļa būvdarbi šajā posmā tika veikti 70. gados, un rekonstrukcija ilgi tika atcelta tādēļ, ka gandrīz visa posma garumā ceļa grunts ir purvaina. Grunts nomaīnai tika izrakti **63 000 m³** kūdras un aizstāta ar nestspējīgu grunti.
- 2) 2018. gadā ekspluatācija nodots **A12 km 114,34 – km 125,14 (Rēzekne – Ludza)** autoceļa posms. Darbus sarežģīta apjomīga kūdras nomaīna pret nestspējīgu grunti ceļa pamatos – 300 metrus garā posmā sešu metru dziļumā.
- 3) 2018. gadā ekspluatācija nodots **P5 km 20,54 – km 25,00 (Tīnūži – Ogre)** autoceļa posms. Šo būvdarbu ietvaros veikta pilna ceļa segas konstrukcijas pārbūve – grunts atkūdrošana, ceļa jaunas salizturīgās kārtas un divu asfalta seguma kārtu izbūve. Ar smilti nomainīti **50 000 kubikmetru** pamatos esošās kūdras.
- 4) 2018. gadā ekspluatācija nodots **P62 km 44,15 – km 57,54 (Bašķi – Preiļi)** autoceļa posms. Ceļa pamatu stabilizācijai bija jāmaina grunts līdz pat deviņu metru dziļumam, un šos darbus pamatīgi apgrūtināja stiprais lietus. Lietavu dēļ remontdarbu zonās grunts bija pārmitrināta, tāpēc caurbraukšana bija apgrūtināta un satiksmes norise traucēta. Objekta ietvaros tika veikta grunts apmaiņa **120 000 m³** apjomā.

3.3.2. Pāļu kolonnas

Valsts reģionālā autoceļa **Augšligatne–Skrīveri (P32)** divos posmos no Madlienas līdz Skrīveriem (47,20.-60,29 km un 61,27.-71,27. km) 2018. gada sezonā notika plašākie ceļa remontdarbi valsts autoceļu tīklā. Ceļa pārbūves gaitā posmā no 49,50.-50,00. km tika atklātas vājas nestspējas grunts – purva posms ar kūdras slāni 10 metru dziļumā. Tas atklājās papildu izpētē, projektētājs ieteica iespējamus risinājumus grunts stabilizācijai.

Izstrādājot ceļa rekonstrukcijas projektu, ģeotehniskās izpētes laikā tika veikti urbumi tikai līdz četrus metrus dziļumam. Šie urbumi neuzrādīja vājas nestspējas grunti, līdz ar to tika izdarīts pieņēmums, ka vājas nestspējas grunts jau agrāk ir tikušas nomainītas. Tomēr izrādījās, ka zem uzbūrtajām gruntīm ir palicis aizaudzis ezers. Aizdomas par to radās, veicot būvdarbus, un tas apstiprinājās padziļinātā izpētē. Atklājās, ka zem bieza grants slāņa ir gan kūdra, gan dūņas. Līdz ar to bija skaidrs, ka pie intensīvākas satiksmes un lielākām slodzēm ceļš varētu deformēties, un ieguldītās investīcijas nebūs ilgtspējīgas.

Lai risinātu vājas nestspējas grunts problēmas, bija iespējami divi varianti:

- 1) Vājas nestspējas grunts izrakšana līdz pat 10 metru dziļumam pietiekami platā ceļa trases zonā, kas ietver arī esošās komunikācijas. Tas ir ne vien dārgi, bet ir risks sakustināt arī ceļam blakus esošos grunts slāņus. Turklāt, veicot grunts nomaīnu, ir nepieciešams laiks, lai tā nosētos un stabilizētos, kas nozīmē, ka nebūtu iespējams turpināt būvdarbus un pabeigt tos šajā sezonā. Šīs metodes pielietošana izmaksātu gandrīz vienu miljonu eiro (bez PVN);
- 2) Pielietot jaunu tehnoloģiju, kas līdz šim valsts ceļu tīklā netika praktizēta, un stiprināt grunti ar pāļiem (skatīt 3.3. attēlu). Līdzīga tehnoloģija tiek izmantota tiltu un ēku pamatiem, bet

ceļiem šādas pieredzes Latvijā līdz šim nebija. Šīs metodes izmaksas ir gandrīz 600 tūkstoši eiro (bez PVN), turklāt izbūvējot pāļu un kombinētās kolonnas, ir iespējams uzreiz turpināt arī ceļa segas izbūvi, neaizkavējot visa ceļa posma būvdarbus.



3.3. attēls. Kombinēto kolonnu un pāļu kolonnu būvniecība

Lai stabilizētu vājas nestspējas grūti, valsts ceļu tīklā pirmo reizi tika pielietota kombinēto kolonnu un pāļu kolonnu izbūves metode. Tika izbūvētas 30 cm platas un līdz 6 m garas betona kolonnas, virs tām – 60 cm platas līdz 2 m garas grants/šķembu kolonnas. Kopumā tika izbūvētas 952 kolonnas, kuras tika izkārtotas 2,5 x 2,0 m režģī. Lai veiktu šo darbu, Latvijā bija ieradusies speciālistu komanda no Polijas [10].

3.3.3. Minerālmateriālu bermas izbūve

2019. gadā veikta Peldu ielas avārijas seku novēršana, konservācijas tehnisko risinājumu izstrāde. Peldu iela tiek izmantota kā galvenā pieklūšanas iespēja Siguldas bobsleja un kamaniņu trasei. Autoceļa konstrukcijas stāvoklis tika novērtēts, kā kritisks. Gaujas ūdeņu, gruntsūdeņu un citu faktoru ietekmē notika ceļa konstrukcijas izslīdēšana, kā rezultātā pa Peldu ielu pārvietoties ar transportlīdzekļiem kļuva bīstami. Veicot segas konstrukcijas monitoringu, tika konstatēts, ka deformācijas laika gaitā progresēja un plaisu platums palielinājās (skatīt 3.4. attēlu). Lai novērstu ceļa konstrukcijas pilnīgu sagruvumu un varētu atjaunot transporta kustību, bija nepieciešams novērst deformāciju attīstību.

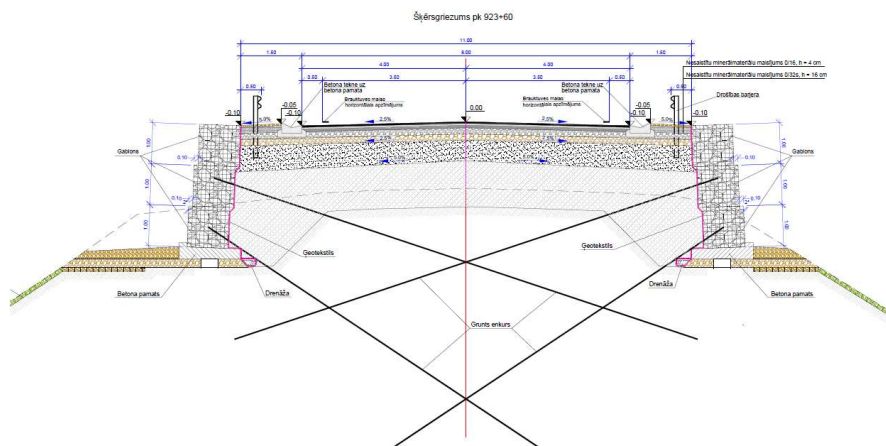


3.4. attēls. Peldu ielas ceļa konstrukcijas deformācijas

Konservācijas tehniskajiem risinājumiem tika izstrādāti vairāki nogāzes un ceļa pastiprināšanas varianti. Viens no galvenajiem projekta faktoriem bija ierobežotais laiks, kurā bija nepieciešams realizēt būvdarbus un atjaunot Peldu ielas satiksmes norisi. Šī iemesla dēļ kā gala risinājums tika izvēlēta minerālmateriālu bermas izveide un ceļa konstruktīvo slāņu ietīšanu augstas stiprības ģeotekstilā.

3.3.4. Gabiona sienas konstrukcija

Uz autoceļa A2 starp Rīgu un Siguldu 2019. gadā teritorijā virs Raunas upes tika paaugstināts ceļa garenprofils, uzbēruma nogāzes pastiprinātas ar gabionu atbalsta sienām. Gabiona atbalsta sienas bija paredzētas ceļa posmam no 92,34 km līdz 92,40 km. Esošais uzbērums bija izbūvēts no morēnas smilšmāla (ģeotehniskajā izpētē noteikta nedrenētas bīdes pretestība $C_u = 20$ kPa), tāpēc, gadījumā ja vertikālo slodzi palielinātu papildus uzbērums, pastāvēja liels nogāzes izslīdēšanas un grunts deformācijas/sēšanās risks. Problēma tika atrisināta ar grunts enkuru palīdzību (skatīt 3.5. attēlu), kas kalpoja, lai vecais uzbēruma korpus neizslīdētu un neveidotos deformācijas. Gabionus bija paredzēts būvēt uz šķembām. Grunts enkuri tika izvēlēti, lai nodrošinātu slodzi 350 kN; stiepes spēks 120 kN (spēka izlīdzināšanai gabiona vidū tika uzstādīta U profila sija). Spriegošana tika veikta pēc uzbēruma izbūves un sablīvēšanas līdz gabiona pilnam augstumam. Gabionu fasādes priekšpuse (~ 50 cm biezā) tika uzbūvēta pēc enkuru nospriegošanas. Aiz gabionu sienām tika uzbūvēta vertikāla drenāžas sistēma brauktuves virsmas nosusināšanai.



3.5. attēls. Valsts autoceļa A2 projekta risinājums

4. GRUNTS SLĀŅU FIZIKĀLI-MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS

Ceļu projektēšana ir sarežģīts, laikietilpīgs un ļoti atbildīgs process. Lai izstrādātu kvalitatīvu un ilgtspējīgu ceļa projektu, ļoti svarīgi ir veikt ģeotehnisko izpēti. Ģeotehniskās izpētes laikā tiek veikti – ģeoloģiskie urbumi; augsnes paraugu laboratoriskā pārbaude; statiskā, dinamiskā vai cita veida zondēšanas metode, kā arī atkarībā no objekta prasībām iespējama arī cita izpēte. Lauku izpētes testi var sniegt vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālo urbšanas, paraugu ņemšanas un laboratorijas testēšanas pieeju, ko izmanto daudzos projektos. Tomēr, tāpat kā visiem testiem, arī lauku izpētes testiem ir vairāki ierobežojumi, kurus būtiski apzināt, jo katra no izpētēm dod nedaudz atšķirīgas interpretāciju vērtības.

Visbiežāk tiek veikts dinamiskais (DCP) vai konusa (statiskais) zondes tests (CPT), bet papildus iespējams veikt arī dilatometrisko testu (DMT). No iegūtajiem pārbaudes rezultātiem dati tiek interpretēti, nosakot grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības. Lai gan visas zondēšanas metodes ir līdzvērtīgas, katra no tām sniedz nedaudz atšķirīgas grunts slāņu fizikāli-mehānisko īpašību interpretācijas. Šī iemesla dēļ ir ļoti svarīgi saprast, cik būtiska ir atšķirība starp iegūtajiem rezultātiem un kā tie var ietekmēt tehnisko risinājumu izstrādi.

4.1. Veikto pētījumu apskats

Ģeotehniskā izpēte ir ieguvusi ievērojamu nozīmi autoceļu projektēšanas, būvniecības un eksperimentālo ietvaros. Analizējot iegūtos datus tiek novērtētas grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības, zemes klātnes un grunts slāņu nestspēja. Nepieciešamības gadījumā, balstoties uz ģeotehniskās izpētes datiem, iespējams izstrādāt atbalstsienus, zemes klātnes pastiprināšanas un citus tehniskos risinājumus tādējādi novēršot cilvēku un materiālos kaitējumus, kas varētu rasties konstrukciju deformācijas vai citu problēmu rezultātā. Atkarībā no objekta sarežģītības un nozīmīguma ir ļoti svarīgi izvēlēties pareizās izpētes metodes. Ģeotehniskā izpēte var būt vienkārša - vietas vizuāls novērtējums, vai detalizēta - grunts slāņu datorizēta izpēte izmantojot zondes datus, laboratorijas testus un citas metodes.

Ģeotehniskā testēšana tiek veikta, veicot vietas raksturojumu, laboratorisko testēšanu un iegūto datu profesionālu interpretāciju, lai pabeigtu teritorijas risinājumu projektēšanu un būvniecību. Lauka izpētes testēšanas metodes ietver iespēšanās testus, piemēram, standarta iespēšanās testus (SPT), kas iespēžas esošajā gruntī ar urbšanas palīdzību, uz sitieniem balstītas analīzes metodes, skaņas vibrācijas urbšanas metodes un dažādas statiskās konusa iespēšanās penetrometra pārbaudes. Lauku testi nodrošina priekšrocības, ko sniedz precīzāks esošās grunts apstākļu novērtējums, kas ļauj veikt labāku datu analīzi un atbilstošāka projekta risinājuma izstrādi. Katrai, individuālai projekta/apkārtnes situācijai jāizvēlas pareizā testa metode vai jāizmanto vairākas izpētes metodes, lai veiktu precīzu grunts slāņu novērtējumu. Izpratne par pieejamo testēšanas metožu veidiem un katras metodes priekšrocībām/trūkumiem var būtiski samazināt neskaidrības par pareizās testa iekārtas izvēli konkrētajam objekta un līdz ar to nodrošinot atbilstošu datu analīzi un projekta risinājuma izstrādi [11].

Katrai ģeotehniskās zondēšanas izpētes metodei ir izstrādāta atšķirīga testēšanas procedūra, nepieciešamais aprīkojums un iegūto datu interpretācijas formulas/pieejas. Ņemot vērā šos faktus, ir novērtēta katrai metodei iegūto rezultātu precizitāte, skatīt 4.1. tabulu.

4.1.tabula

Lauka izpētes testa metodes parametru precizitāte [12].

Grupa	Lauka izpētes tests	Ģeotehniskās īpašības											Grunts tips					
		Grunts tips	Grunts profils	U ₀	OCR	D _{R-ψ}	Φ'	C _u	G ₀ -E	σ-ε	M-C _c	k	C _v	Ciets	Mīksts mineralmateriāls	Grunts	Smilts	Dūnas/māls
Penetrometrs/ tiešais spiediens	DCP	C	B	-	C	C	C	C	-	-	-	-	-	C	B	A	B	B
	SPT	B	B	-	C	B	C	C	C	-	-	-	-	C	B	A	B	B
	CPT	B	A	-	B	B	B	B	C	C	C	-	-	B	B	A	A	A
	CPT _u	A	A	A	B	A	B	A	B	C	B	A	A	-	B	B	A	A
	SCPT _u	A	A	A	A	A	B	A	A	B	B	A	A	-	B	B	A	A
	DMT	B	B	B	B	C	B	B	B	C	B	C	B	-	C	C	A	A
	SDMT	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B	C	B	-	C	C	A	A
	Pilnas plūsmas (T/lode)	C	B	B	B	C	C	A	C	C	C	C	C	-	-	-	C	B
Spārningrieztes tests (FVT)	B	C	-	B	-	-	A	-	-	-	-	-	-	-	-	A	B	
Spiediena mērītājs	Priekš-urbšana	B	B	-	C	C	C	B	B	C	C	-	C	A	A	B	B	
	Paš-urbuma	B	B	A	B	B	B	A	A	B	B	A	-	C	-	B	A	
	Pilna-pārvietošana	B	B	B	C	C	C	B	A	A	B	B	A	-	C	-	B	
Citi	Skrūvju/plātnes slodze	C	-	-	B	C	C	B	B	B	B	C	C	C	A	B	B	
	Urbuma saiste/bīde	C	-	-	-	-	B	C	-	-	-	-	-	C	B	C	C	
	Permeamets	C	-	A	-	-	-	-	-	-	-	A	B	A	A	A	A	
	Seismiskais urbums	C	C	-	B	C	-	-	A	C	-	-	-	A	A	A	A	
	Seismiskā virsma	-	C	-	B	C	-	-	A	C	-	-	-	A	A	A	A	
	Hidrauliskais lūzums	-	-	B	-	-	-	-	-	-	-	-	C	C	B	B	-	

Piemērojamība: A=augsta, B=vidēja, C=zema, - =nav

Ģeotehniskie parametri: U₀ = statiskais poru spiediens, OCR = konsolidācijas koeficients, D_{R-ψ} = relatīvais blīvums un/vai stāvokļa parametrs, Φ' = maksimālais berzes leņķis, C_u = nedrenēta bīdes izturība (maksimālā un/vai pārveidota), G₀-E = bīdes deformācijas un/vai Junga modulis, σ-ε = spriegumu – relatīvo deformāciju atkarība, M-C_c = deformācijas modulis un/vai kompresijas indekss, k = filtrācijas koeficients, C_v = konsolidācijas koeficients

Pēdējos gados ir veikti vairāki pētījumi, kuros tiek salīdzinātas korelācijas starp CPT, DMT un DCP testiem [13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28].

Krzysztof Nepelski [14] 2019. gadā analizēja ēkas un grunts mijiedarbību. Savā pētījumā viņš secināja, ka DMT testa interpretācijas uzrādīja augstāku grunts slāņu deformācijas moduli nekā CPT interpretācijas. Tādu pašu secinājumu izdarīja Alexandru Poenaru [13] 2016. gadā.

Viņa pētījuma rezultāti noteica, ka DMT uzrādīja stingāku grunts reakciju, salīdzinot ar vērtībām, kas iegūtas ar laboratorijas izmeklējumiem un CPT interpretācijām. Maknultijs un Hārnijns [19] savā pētījumā secināja, ka DMT testa metode, nevis CPT, ir jāizmanto, lai novērtētu grunts slāņu ierobežoto deformāciju moduli un izmantotu konstrukcijas sēšanās analizēm.

Mensur Mulabdic [16] savā pētījumā salīdzināja CPT un DMT testu interpretācijas rezultātus. Viņš secināja, ka CPT un DMT testi uzrādīja ļoti labu rezultātu atkarotamību un apliecināja, ka ir vērtīgi palīg līdzekļi, lai noteiktu uzbēruma kvalitāti gan neviendabīguma, gan fizikālo un mehānisko īpašību ziņā. Savā pētījumā viņš noteica, ka vertikālās deformācijas modulis, kas iegūts ar odometra testu (iegremdētiem paraugiem), bija daudz mazāks nekā CPT interpretācijas un vēl mazāks, salīdzinot ar DMT interpretācijas vērtībām (abas zondes izpētes tika veiktas māla slāņiem, kas nebija iegremdēti/pārmitrināti).

2022. gada sākumā tika publicēts pētījums par korelāciju starp CPT un DMT testiem [14]. Tika konstatēts, ka deformācijas moduļa vērtības bija līdzvērtīgākas pie zemākām OCR vērtībām un homogēnos grunts intervālos. Grunts slāņu intervālos ar augstākām OCR vērtībām DMT tests uzrādīja augstākas deformācijas moduļa vērtības. Migels Anhels Benzs-Navarrete [21] izstrādāja lineāru modeli, lai prognozētu qc (CPT) vērtības no qd mērījumiem, kas veikti ar Panda (DCP). Šis modelis ir uzticams, ja testa laikā netiek konstatēta grunts berze gar stieņa sienīņu.

Nemot vērā visus iepriekš apskatītos pētījumus, kā arī faktu, ka līdz šim veikta ļoti neliela izpēte par DCP un citu pētījumu metožu savstarpējām korelācijām, ir skaidrs, ka joprojām ir daudz nezināmo faktoru, kas ietekmē grunts slāņu fizikāli-mehānisko īpašību interpretācijas, kas noteiktas, izmantojot dilatometriskā testa (DMT), konusa iespiešanas testa (CPT) un dinamiskā penetrometra testa (DCP) metodes.

4.2. Lauka izpētes testa apraksts

Pirms projekta risinājumu izstrādes tiek veikta ģeotehniskā izpēte. Ar tās palīdzību tiek nodrošināta kvalitatīvu un drošu risinājumu izstrāde. Atkarībā no objekta sarežģītības un mēroga ir ļoti svarīgi izvēlēties pareizās izpētes metodes. Zondēšanas pētījumi tiek izmantoti, lai noteiktu grunts slāņu fizikālās un mehāniskās īpašības. Katrai ģeotehniskās zondēšanas izmeklēšanas metodei ir izstrādāta atšķirīga testēšanas procedūra, atšķiras nepieciešamais aprīkojums un iegūto datu interpretācijas formulas/piecejas.

Lauka izpētes testi var sniegt vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālo urbšanas, paraugu ņemšanas un laboratorijas testēšanas pieeju, ko izmanto daudzās ģeotehniskajās izpētēs. Tomēr, tāpat kā citas izpētes metodes, arī lauku testiem ir vairāki ierobežojumi. Ir svarīgi, lai inženieri saprastu gan lauka izpētes testu priekšrocības, gan ierobežojumus. Lai pareizi izmantotu testos iegūtos rezultātus, ir svarīgi saprast ierobežojumus. Lauka izpētes pārbaudes ierobežojumi ietver:

- 1) grunts slāņu robežas ir grūti definēti;
- 2) nav zināmi gruntsūdens apstākļi;
- 3) grunts slāņu traucējumu līmenis nav zināms;

- 4) deformācijas rādītāji parasti ir lielāki nekā laboratorijas pārbaudēs;
- 5) pārbaudāmās grunts īpatnības nav zināmas;
- 6) grūti novērtēt apkārtējās vides izmaiņu ietekmi uz grunts slāņu uzvedību [29].

Konusa iespiešanās tests (CPT) ir izmantots vairāk nekā 40 gadus. CPT ir lielas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālajām lauka izpētes metodēm, piemēram, urbšanu un paraugu ņemšanu, jo tā ir ātra, atkarojama un ekonomiska. Turklāt tas nodrošina gandrīz nepārtrauktus datus un tai ir liela teorētiskā pamatojuma bāze [30].

Plakanā dilatometra tests (DMT) ir iespiešanās lauku tests, ātrs, vienkāršs, ekonomisks un ļoti labi atkarojams. To var izpildīt ar dažādām lauka izpētes iekārtām. DMT izpēte sniedz grunts slāņu dažādu projektēšanas parametru novērtējumu (M, Cu, grunts tips, slāņu nogulumu vēsture). Viens no vispiemērotākajiem izpētes metodes pielietojumiem ir grunts slāņu saspiežamības noteikšana un sēšanās prognozēšana [31].

Dinamiskais konusa iespiešanās tests (DCP) sākotnēji tika izstrādāts kā alternatīva elastīga seguma vai pamatnes grunts īpašību novērtēšanai. Tradicionālās pieejas asfalta un grunts materiālu stiprības un stinguma īpašību novērtēšanai ietver paraugu ņemšanu un sarežģītu laboratorijas testu veikšanu, piemēram, elastības moduļa vērtības noteikšana, Māršala testus un citus [32]. Pateicoties dinamiskās zondes ekonomiskumam un vienkāršībai, šī metode var ievērojami samazināt pūles un izmaksas, kas saistītas ar seguma un pamatnes grunts slāņu novērtēšanu.

4.2.1. Konusa iespiešanas tests (CPT)

Konusa iespiešanās, jeb konusa penetrometra tests (CPT) ir metode, ko izmanto, lai noteiktu grunts fizikāli-mehāniskās īpašības un precizētu grunts slāņu izplatību. Sākotnēji tas tika izstrādāts 1950. gados Nīderlandes grunts mehānikas laboratorijā Delftā, lai pētītu mīksts, vājas nestspējas gruntis. Konusa iespiešanās tests ir kļuvis starptautiski par vienu no visplašāk izmantotajām un pieņemtajām pārbaudes metodēm grunts ģeotehnisko īpašību noteikšanai [33].

Testa ietvaros instrumentālais konuss ar kontrolētu ātrumu tiek iespiests zemē (pieņemts ar ātrumu 1,5–2,5 cm/s). CPT grunts slāņu robežu noteikšanas precizitāte ir saistīta ar konusa gala izmēru, un tipiskiem konusa galiem ir 10 vai 15 cm² šķērsgriezuma laukums, kas atbilst 3,6 un 4,4 cm diametriem [34].

Noteiktās konusa iespiešanās pretestības vērtības, izmantojot izstrādātās empīriskās līknes, var korelēt uz bīdes stiprības parametriem. Pastāv arī dažas projektēšanas metodes, kas izmanto testa laikā iegūtos, neinterpretētos CPT datus, ar kuriem tiek noteikts iespējamais deformācijas apjoms grunts slāņos, zem noteikta spiediena/slodzes. Nozīmīgākos pētniecības darbus saistībā ar konusa iespiešanas testu ir veicis Robertsons [35]. Ievērojamas CPT interpretācijas ir publicējis arī Lunne [33].

Praksē ir pieņemtas un plaši izmantotas daudzas empīriskās un teorētiskās CPT interpretācijas metodes. Šīs pieejas mēdz apsvērt, vai konusa iespiešanās zona ir nosusināta (drenēta) vai nenosusināta (nedrenēta), un pēc tam tiek apsvērts, vai gruntis ir “smilts” vai “māls”. Lielākā daļa fundamentālo pētījumu par CPT un tā interpretācijām aplūko iespiešanu smiltīs vai mālos atsevišķi un ietver pārbaudes/apstiprināšanas testus materiālos ar gandrīz ideālu smilšu vai māla uzvedību [36].

1983. gadā Robertsons un Campanella publicēja divus nozīmīgus rakstus par CPT interpretāciju [37; 38]. Kopš 1983. gada ir bijušas vairākas nozīmīgas publikācijas par CPT interpretāciju [33; 39]. 4.2. tabulā parādītas noteiktās aplēses par CPT grunts parametru novērtēšanas pielietojamību.

4.2.tabula

Noteiktā CPTU pielietojamība grunts parametru iegūšanai [34].

Grunts tips	D_r	ψ	K_0	OCR	S_t	C_u	Φ	E,G	M	G_0	k	C_h
Smiltis	2-3	2-3		5			2-3	3-4		2-3	3	3-4
Māls			2	1	2	1-2	4	3-4	4	3-4	2-3	2-3

1 = augsta; 2 = augsta līdz mērena; 3 = mērena; 4 = mērena līdz zema; 5 = zema uzticamība; Tukšums = nav piemērojamas

Kur:

D_r – Relatīvais blīvums

Ψ – Stāvokļa parametrs

OCR - Grunts pārkonsolidācijas koeficients

C_u - Grunts nedrenētā bīdes pretestība

C_h - Konsolidācijas koeficients

E, G – Deformācijas un bīdes modulis

G_0 - Dinamiskais (sākotnējais) bīdes deformāciju modulis

ϕ – Grunts iekšējās berzes leņķis

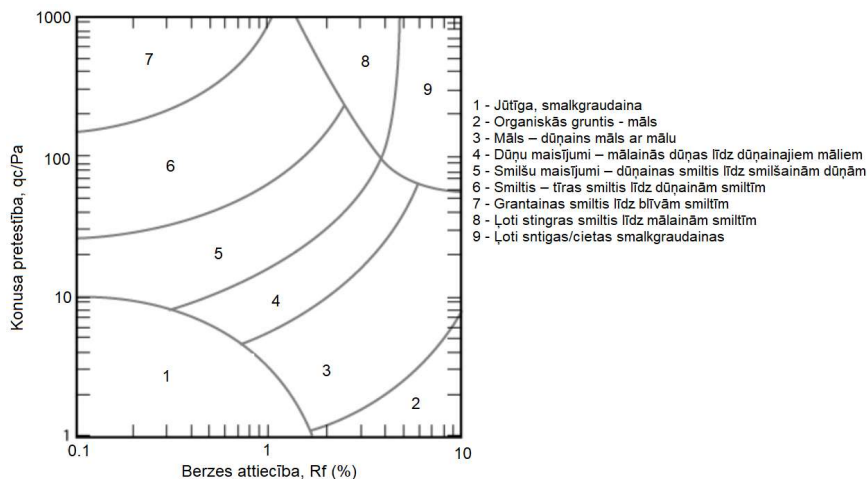
K_0 – Sprieguma attiecība

M (vai mv) - Saspiežamība

S_t - Jutīgums

k - Grunts filtrācijas koeficients

Viens no galvenajiem CPT pielietojumiem ir grunts slāņu profilēšana un grunts tipa noteikšana. Parasti konusa pretestība (q_t) ir augsta smiltīs un zema mālos, un berzes koeficients (Rf) ir zems smiltīs un augsts mālos. Visbiežāk izmantoto CPT grunts uzvedības tipa (SBT) diagrammu ieteica Robertsons [40], atjauninātā, bezdimensiju versija [34] ir parādīta 4.1. attēlā. Šajā diagrammā ir izmantoti pamata CPT parametri konusa pretestība (q_t) un berzes koeficients (Rf). Diagramma ir globāla, un var sniegt pamatotas prognozes par grunts uzvedības tipu CPT zondēšanai līdz aptuveni 20 m dziļumam.



4.1. attēls. Nenormalizēta CPT grunts uzvedības tipa (SBT) diagramma

Nemot vērā, ka CPT izpētes laikā tiek noteiktas (q_c - zondes gala pretestība), (f_s - zondes sānu pretestība) un (u_2 - porūdens spiediens) vērtības pārējie grunts fizikāli – mehāniskie parametri tiek aprēķināti, izmantojot pētījumu un eksperimentu gaitā izstrādātas aprēķinu formulas. Promocijas darba, pētījumu un publikāciju izstrādes ietvaros CPT dati interpretēti izmantojot šīs formulas.

Koriģētā konusa pretestība q_t tiek aprēķināta izmantojot (4.1.) formulu:

$$q_t = q_c + u_2 (1 - \alpha) \quad (4.1.)$$

kur,

α – kopējā laukuma attiecības, kas noteikta laboratorijas kalibrēšanas laikā – parasti 0.7 – 0.85.

Berzes attiecība (R_f) ir zondes sānu pretestības (f_s) un gala pretestības (q_c) attiecības rādītājs. To aprēķina pēc (4.2.) formulas:

$$R_f = (f_s/q_t) \cdot 100\% \quad (4.2.)$$

Grunts tilpumsvars (blīvums) γ tiek aprēķināta izmantojot Robertsona izstrādāto [34] formulu (4.3.):

$$\gamma/\gamma_w = 0.27 (\log(R_f)) + 0.36 [\log(q_t/P_a)] + 1.236 \quad (4.3.)$$

kur,

γ_w - ūdens tilpumsvars (≈ 10) [kN/m³],

P_a – atmosfēras spiediens (≈ 100 [kPa]).

Kopējais σ_{v0} un efektīvais σ'_{v0} vertikālais spriegums tiek aprēķināti izmantojot (4.4.) un (3.5.) formulu:

$$\sigma_{v0} = \sum(z_i \cdot \gamma_i) \quad (4.4.)$$

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_2 \quad (4.5.)$$

kur,

z_i – katra grunts slāņa biezums, [m];

γ_i - katra grunts slāņa tilpumsvars, [kN/m³].

Normalizētā konusa pretestība Q_t tiek noteikta pēc formulas (4.6.) Konusa pretestību var izteikt bezdimensiju formā (Q_{tn}), normalizējot vertikālo spriegumu ar sprieguma eksponentu n , kas mainās atkarībā no grunts veida un sprieguma līmeņa. Ja $n = 1$, $Q_{tn} = Q_t$:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (4.6.)$$

$$Q_{tn} = ((q_t - \sigma_{v0}) / P_a) \cdot (P_a / \sigma'_{v0})^n \quad (4.7.)$$

$$n = 0.381 \cdot I_c + 0.05 (\sigma'_{v0} / P_a) - 0.15 \quad (4.8.)$$

Normalizētā berzes attiecība F_r tiek noteikta pēc formulas (4.9.):

$$F_r = [(f_s / (q_t - \sigma_{v0})) \cdot 100\% \quad (4.9.)$$

Grunts uzvedības tipa indekss I_c var uzskatīt par reprezentatīvu vērtību, kas apvieno (Q_t) un (F_r), veidojot koncentriskus apļus, kas iezīmē Robertsona 1990. gada SBT diagrammas zonas. I_c izsaka šo koncentrisko apļu rādiusu pēc (4.10.) formulas:

$$I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5} \quad (4.10.)$$

Pastāv vairākas korelācijas, kas saistītas ar **grunts iekšējās berzes leņķi ϕ'** . Kulhawy un Mayne [41] izstrādāja aprēķina formulu (4.11.) smiltīm. Smalkgraudainām gruntīm Mayne [42] izstrādāja (4.12.) aprēķina formulu:

$$\Phi' = 17.6 + 11 \cdot \log Q_{tn} \quad (4.11.)$$

$$\Phi' = 29.5 \cdot B_q^{0.121} \cdot [0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q_t] \quad (4.12.)$$

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4.13.)$$

kur,

u_0 – līdzsvara poru spiediens, kas tiek noteikts ņemot vērā gruntsūdens dziļumu.

Pārmērīgas konsolidācijas koeficients OCR tiek definēts kā grunts spriegumu attiecība - lielākais spriegums, kas uz to iedarbojies attiecībā pret pašreizējo spriegumu. Robertsons [30] izstrādāja (4.14.) vienādojumu:

$$OCR = 0.25Q_t^{1.25} \quad (4.14.)$$

Vienas dimensijas (vertikālo) **ierobežoto deformācijas modulis M** var novērtēt no CPT rezultātiem, izmantojot (4.15.) sakarību:

$$M = \alpha_M (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4.15.)$$

Robertsons [30] ieteica α_M vērtības, kas mainās atkarībā no Q_t .

Ja $I_c > 2,2$ (smalkgraudainas grunts):

$$\alpha_M = Q_t \quad , \text{kad } Q_t < 14$$

$$\alpha_M = 14 \quad , \text{kad } Q_t > 14$$

Ja $I_c < 2,2$ (rupjgraudainas grunts) α_M tiek aprēķināts pēc (4.16.) formulas:

$$\alpha_M = 0.0188 [10^{0.55I_c + 1.68}] \quad (4.16.)$$

Junga elastības modulis E tiek aprēķināts pēc (4.18.) formulas:

$$\alpha_E = 0.015 \cdot [10^{0.55I_c + 1.68}] \quad (4.17.)$$

$$E = \alpha_E (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4.18.)$$

Bīdes viļņa ātrumu V_s iespējams noteikt izmantojot logaritma funkciju, kas redzama (4.19.) formulā, kuru izstrādājis Mayne [42]:

$$V_s = 51.6 \cdot \ln(fs) + 18.5 \quad (4.19.)$$

Nedrenētas bīdes pretestībai, S_u Mūns [43] izstrādājis bīdes stiprības aprēķina formulu (4.20.) izmantojot bīdes viļņa ātrumu V_s un pārmērīgas konsolidācijas koeficientu OCR:

$$S_u = 0.114 \cdot V_s^{1.18} \cdot OCR^{0.15} \quad (4.20.)$$

4.2.2. Dilatometriskā testa (DMT) metode

Plakanā dilatometra tests ir lauku pārbaudes metode, ko izmanto, lai noteiktu smalkgraudainu grunts slāņu stiprības un deformācijas raksturlielumus. Pārbaude tiek veikta, izmantojot dilatometriju, kas darbojas pēc vērtību pārbaudes principa, izmantojot induktīvo sensoru (ar jutību līdz 0,001 mm) pārvietojumu. Šīs testa metodes priekšrocība ir precīzāks pamatu grunts pārvietojuma un deformācijas apraksts. Precizētīe DMT rezultāti tiek izmantoti, lai iegūtu informāciju par grunts tipu izplatību, sprieguma stāvokli, bīdes izturību un deformācijas īpašībām [44].

Plakanā dilatometra testā (DMT) tiek izmantoti spiediena rādījumi no ievietotās plakanās plāksnes, lai noteiktu grunts tipu un dažādas grunts fizikāli-mehānisko parametru aplēses. Plakanā dilatometra testu (DMT) Itālijā izstrādāja Silvano Marchetti [45]. Plakanais dilatometrs ir nerūsējošā tērauda asmens, kam vienā pusē ir uzstādīta plakana, apaļa tērauda membrāna. Ar tā palīdzību tiek noteiktas dažādu projektēšanas parametru/informācijas aplēse (M , c_u , grunts tipu izplatība, grunts slāņu nogulumu vēsture). Viens no vispiemērotākajiem dilatometra lietojumiem ir grunts saspiežamības izpēte deformāciju prognozēšanai.

Asmens ar pneimatiski-elektrisku cauruli ir savienots ar vadības bloku uz zemes virsmas (kas pārraida gāzes spiedienu un elektrisko nepārtrauktību). Gāzes tvertne, kas ar pneimatisko kabeli savienota ar vadības bloku, nodrošina gāzes spiedienu, kas nepieciešams membrānas paplašināšanai. Vadības bloks ir aprīkots ar spiediena regulatoru, spiediena mērītāju(-iem), audiovizuālo signālu un atgaisošanas vārstiem. Spiediens, kas nepieciešams, lai uzsāktu membrānas kustību pret grunti, tiek reģistrēts un tiek saukts par “A spiedienu”. Uzpūšana turpinās, līdz membrānas centrs tiek pārvietots 1,1 mm pret grunti. Nepieciešamo spiedienu, lai to sasniegtu, sauc par “B spiedienu”. Ja nepieciešamais dziļums ir zem ūdens līmeņa, membrānu var lēnām iztukšot, lai reģistrētu “C spiedienu”, kas atspoguļo poru spiedienu, kas iedarbojas uz membrānu [45].

Sākotnējās korelācijas [46] tika iegūtas, kalibrējot DMT rezultātus pret augstas kvalitātes grunts parametriem, kas iegūti ar tradicionālām metodēm. Daudzas no šīm korelācijām veido mūsdienu interpretācijas pamatu, ko kopumā apstiprina turpmākie pētījumi.

Ņemot vērā, ka DMT izpētes laikā tiek noteiktas “A”, “B” un “C” spiediena vērtības pārējie grunts fizikāli – mehāniskie parametri tiek aprēķināti, izmantojot pētījumu un eksperimentu gaitā izstrādātas aprēķinu formulas. Promocijas darba, pētījumu un publikāciju izstrādes ietvaros DMT dati interpretēti izmantojot Marchetti izstrādātās formulas.

Koriģētais pirmais nolasījums P_0 tiek aprēķināts izmantojot (4.21.) formulu:

$$P_0 = 1.05 (A + \Delta A) - 0.05 (B - \Delta B) \quad (4.21.)$$

kur,

A – “A Spiediens”,

B – “B Spiediens”,

ΔA – Membrānas kalibrācija “A spiediena” nolasīšana brīvā gaisā,

ΔB – Membrānas kalibrācija “B spiediena” nolasīšana brīvā gaisā,

Koriģētais otrais nolasījums P_1 tiek aprēķināts izmantojot (4.22.) formulu:

$$P_1 = B - \Delta B \quad (4.22.)$$

Koriģētais trešais nolasījums P_2 tiek aprēķināts izmantojot (4.23.) formulu:

$$P_2 = C + \Delta A \quad (4.23.)$$

Materiāla indekss I_D tiek noteikts izmantojot (4.24.) formulu:

$$I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - U_0) \quad (4.24.)$$

kur,

U_0 – līdzsvara poru spiediens, kas tiek noteikts ņemot vērā gruntsūdens dziļumu, ($U_0 \approx P_2$ drenētiem grunts slāņiem).

Horizontālo spriegumu indekss K_D tiek noteikts izmantojot (4.25.) formulu:

$$K_D = (P_0 - U_0) / \sigma'_{v0} \quad (4.25.)$$

kur,

σ'_{v0} – tiek aprēķināts pēc (4.6.) formulas ievērtējot gruntsūdens spiedienu.

Dilatometra elastības modulis E_D tiek noteikts izmantojot (4.26.) formulu:

$$E_D = 34.7 (P_1 - P_0) \quad (4.26.)$$

Pārmērīgas konsolidācijas koeficients OCR tiek noteikts grunts slāņiem, kuru materiāla indekss $I_{D \leq 1.2}$. OCR aprēķina izmantojot (4.27.) formulu:

$$OCR_{DMT} = (0.5 \cdot K_D)^{1.56} \quad (4.27.)$$

Nedrenētas bīdes pretestība, S_u tiek noteikta grunts slāņiem, kuru materiāla indekss $I_D \leq 1.2$. S_u aprēķina izmantojot (4.28.) formulu:

$$S_{uDMT} = 0.22 \cdot \sigma'_{v0} (0.5 \cdot K_D)^{1.25} \quad (4.28.)$$

Grunts iekšējās berzes leņķis ϕ tiek noteikts grunts slāņiem, kuru materiāla indekss $I_D \geq 1.8$. ϕ aprēķina izmantojot (4.29.) formulu:

$$\phi = 28 + 14.6 \log K_D - 2.1 \log^2 K_D \quad (4.29.)$$

Vienas dimensijas (vertikālo) **ierobežoto deformācijas modulis M** var novērtēt no DMT rezultātiem, izmantojot dilatometra elastības moduli, pēc (4.30.) formulas sakarības:

$$M = R_M \cdot E_D \quad (4.30.)$$

Marchetti [40] ieteica R_M vērtības, kas mainās atkarībā no I_D .

Ja $I_D \leq 0.6$

$$R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$$

Ja $I_D \geq 3$

$$R_M = 0.5 + 2 \log K_D$$

Ja $0.6 < I_D < 3$

$$R_M = 0.14 + 0.15 (I_D + 0.6) + (2.5 - (0.14 + 0.15 (I_D + 0.6))) \log K_D$$

Ja $K_D > 10$

$$R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$$

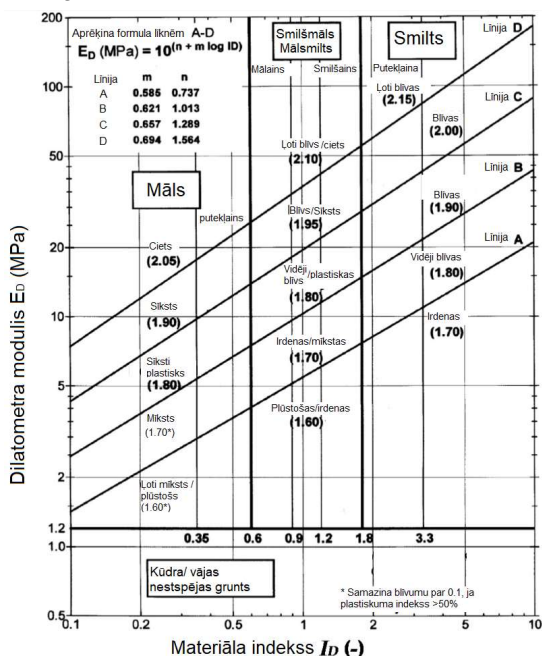
Ja $R_M < 0.85$

$$R_M = 0.85$$

Junga elastības modulis E tiek aprēķināts izmantojot ierobežoto deformāciju moduļa vērtības pēc (4.31.) formulas:

$$E \approx 0.8 \cdot M \quad (4.31.)$$

Grunts tilpumsvars (blīvums) γ tiek noteikts izmantojot Marchetti un Crapps [47] izstrādāto grafiku, skatīt 3.2. attēlu.



4.2. attēls. Grunts tilpumsvara (blīvuma) γ noteikšana izmantojot Marchetti un Crapps [47] izstrādāto grafiku

4.2.3. Dinamiskā penetrometra tests

Dinamiskā konusa iespiešanās testu (DCP) izstrādāja Scala [48]. Pašreizējais dinamiskā penetrometra modelis izstrādāts Dienvidāfrikā Transvālas ceļu departamentā [49]. DCP mehānika parāda gan CPT, gan SPT iezīmes. Tiek reģistrēta stieņa iespiešanās grunts slāņos ar noteiktu sitienu skaitu. Tāpēc tas ir diezgan līdzīgs procedūrai, kā iegūt sitienu skaitu N, izmantojot Standarta penetrometra testa (SPT) iekārtu. Tomēr DCP tiek izmantots konuss, lai iegūtu iespiešanās dziļumu, nevis izmantots dalīts grunts paraugu ņemšanas līdzeklis. Šajā ziņā ir zināma līdzība ar CPT, jo abi testi iespiešanās laikā rada dobumu un rada dobuma izplešanās pretestību [50].

Dinamiskās zondes stieņa iespiešanās ātrumu izmanto, lai secinātu slāņu relatīvo izturību, un to var kalibrēt ar empīriskiem modeļiem, lai iegūtu standarta informāciju, piemēram, statiskās caurspiešanas testa (CBR) vērtības. Ir konstatētas korelācijas starp DCP un CBR mērījumu un gadu gaitā ir izveidotas vairākas korelācijas, kuras var izmantot, lai interpretētu iegūtos testa rezultātus un iegūtu grunts slāņu parametrus [51].

Daudzas empīriskās un teorētiskās DCP interpretācijas metodes ir plaši pieņemtas un izmantotas praksē. Šīs pieejas izšķir, vai konusa iespiešanās vieta ir nosusināta vai mitra, ūdens piesātināta, un pēc tam nosaka, vai grunts slānis ir smiltis vai māli. Ģeotehniskajam inženierim ir jāizvēlas vispiemērotākā korelācijas metode/formula, ņemot vērā faktiski sastopamos grunts tipus. Lai gan DCP metode tika izstrādāta 1956. gadā un joprojām tiek plaši izmantota visā pasaulē, populārākās un plaši izmantotās korelācijas metodes tika izstrādātas laika posmā no 1960. līdz 1985. gadam. Nesaistītu grunšu korelāciju rezultāti ir ticamāki nekā saistītu grunšu rezultāti, jo saistīto grunšu īpašības būtiski mainās mitruma ietekmē [50].

Ir pieejami dinamiskās zondēšanas programmatūras rīki, lai analizētu iegūtos rezultātus (iespiešanās dziļums pret sitienu skaitu). Dati, kas savākti, izmantojot dinamisko zondi, tiek korelēti ar CBR, analizēti un interpretēti.

Ņemot vērā, ka DCP izpēti laikā tiek noteikts sitienu skaits, kas nepieciešams stieņa iespiešanās grunts slāņos, parasti 10cm biežam slānim, pārējie grunts fizikāli – mehāniskie parametri tiek aprēķināti, izmantojot pētījumu un eksperimentu gaitā izstrādātas aprēķinu formulas. Standarta penetrometra tests (SPT) līdz šim ir viena no visizplatītākajām un ekonomiskākajām metodēm informācijas iegūšanai par ģeoloģisko grunts slāņu parametriem. Lielākā daļa esošo korelāciju izstrādātas balstoties uz N_{spt} sitienu skaita vērtībām, kas iegūtas ar SPT testu, tādēļ ir izstrādāta korelācija, kā no dinamiskās zondes sitienu skaita pāriet uz N_{spt} vērtībām. Pāreju nodrošina (4.32.) formula.

Promocijas darba, pētījumu un publikāciju izstrādes ietvaros DCP dati interpretēti izmantojot šīs formulas.

Standarta penetrometra sitienu skaits N_{spt} tiek aprēķināta izmantojot (4.32.) formulu:

$$N_{spt} = \beta_t \cdot N \quad (4.32.)$$

$$\beta_t = Q/Q_{spt} \quad (4.33.)$$

kur Q ir dinamiskās zondes iekārtas viena sitienu īpatnējā enerģija un Q_{spt} ir tā, kas attiecas uz SPT testa iekārtu.

Īpatnējo enerģiju uz vienu sitienu aprēķina pēc formulas (4.34.):

$$Q = (M^2 \cdot H) / (A \cdot \delta \cdot (M + M')) \quad (4.34.)$$

Kur

M = krītošā āmura masa (kg);

M' = stieņa masa (kg/m);

H = krišanas augstums (m);

A = konusa pamatnes laukums (cm²);

δ = zondēšanas solis (m).

Dinamiskās stieņa gala pretestības novērtējums **R_{pd}** tiek veikts pēc (4.35.) formulas:

$$R_{pd} = (M^2 \cdot H \cdot N) / [A \cdot \delta \cdot (M + P)] \quad (4.35.)$$

Kur

P = kopējais stieņa un krītošā āmura svars;

Jaunākās N_{SPT} relatīvā blīvuma, bīdes pretestības un berzes leņķa korelācijas ir izstrādātas, izmantojot iespiešanās pretestību N₆₀ vai N_{1,60}.

Saskaņā ar Cestari veiktajiem pētījumiem N_{spt} = N₆₀.

4.2.3.1. Smilšainu grunts slāņu parametru formulas.

Slāņa **relatīvais blīvums D_r** aprēķināts atbilstoši Skempton [52] izstrādātajai (4.36.) formulai:

$$D_r = (N_{spt}/60)^{0.5} \cdot 100\% \quad (4.36.)$$

Grunts iekšējās berzes leņķis φ tiek noteikts grunts slāņiem, aprēķina izmantojot formulu [53]:

$$\phi = 27 + 0.3 \cdot N_{spt} \quad (4.37.)$$

Junga elastības modulis E_y tiek aprēķināts izmantojot Meina [41] izstrādāto interpretācijas formulu:

$$E_y = 1000 \cdot N_{spt} \text{ (kPa)} \quad (4.38.)$$

Vienas dimensijas **ierobežoto deformācijas moduli M** var noteikt izmantojot formulu:

$$M = 7.1 + 0.49 \cdot N_{spt} \text{ (MPa)} \quad (4.39.)$$

Grunts tilpumsvars (blīvums) γ tiek aprēķināts izmantojot Mejerhofs (Meyerhof) [54], 1956. gadā izstrādāto formulu (4.40.):

$$\gamma = 1.29968 + 0.05291 \cdot N_{spt} - 0.00106 \cdot (N_{spt}^2 + 7.58 \cdot 10^{-6} \cdot N_{spt}^3) \quad (4.40.)$$

Ūdens piesātinātas grunts tilpumsvars (blīvums) γ_{sat} tiek aprēķināts izmantojot Bowles (Bowles) [55] izstrādāto formulu:

$$\gamma_{sat} = 1.8559 + 0.0062 \cdot N_{spt} \quad (4.41.)$$

4.2.3.2. Smalkgraudainu, saistītu grunts slāņu parametru formulas.

Nedrenētas bīdes pretestība, S_u tiek noteikts grunts slāņiem izmantojot formulu:

$$S_u = 4.2 \cdot N_{spt} \text{ (kPa)} \quad (4.42.)$$

Junga elastības modulis E_y tiek aprēķināts izmantojot izstrādāto interpretācijas formulu:

$$E_y = 400 \cdot N_{spt} \text{ (kPa)} \quad (4.43.)$$

Vienas dimensijas (vertikālo) **ierobežoto deformācijas moduli M** var noteikt izmantojot Stroud [56] izstrādāto (4.44.) formulu:

$$M = 450 \cdot N_{\text{spt}} \text{ (kPa)} \quad (4.44.)$$

Grunts tilpumsvars (blīvums) γ tiek aprēķināts izmantojot Mejerhofs (Meyerhof) [57] izstrādāto formulu:

$$\gamma = 1.3936 + 0.0918 \cdot N_{\text{spt}} - 0.004 \cdot N_{\text{spt}}^2 + 6.2 \cdot 10^{-5} \cdot N_{\text{spt}}^3 \quad (4.45.)$$

Ūdens piesātinātas grunts tilpumsvars (blīvums) γ_{sat} tiek aprēķināts izmantojot Bowles (Bowles) [55] izstrādāto formulu (4.46.):

$$\gamma_{\text{sat}} = 1/(0,5449 - 0.0025 \cdot N_{\text{spt}}) \quad (4.46.)$$

4.3. CPT un DMT testa metožu salīdzinājums, izmantojot autoceļa P32 ģeotehniskās izpētes datus.

Ceļu pastiprināšanas un rekonstrukcijas projektu laikā vienmēr tiek veikta esošās grunts un ceļa seguma ģeotehniskā izpēte. Atkarībā no ceļa kategorijas un transportlīdzekļu satiksmes intensitātes projektēšanas uzdevumā ir noteiktas minimālās prasības ģeotehniskajai izpētei, kas ietver grunts urbšanu, dažādus grunts parametru izpētes lauku testus, statistiskās slodzes plāksni, grunts paraugu laboratoriskās pārbaudes un citus pētījumus.

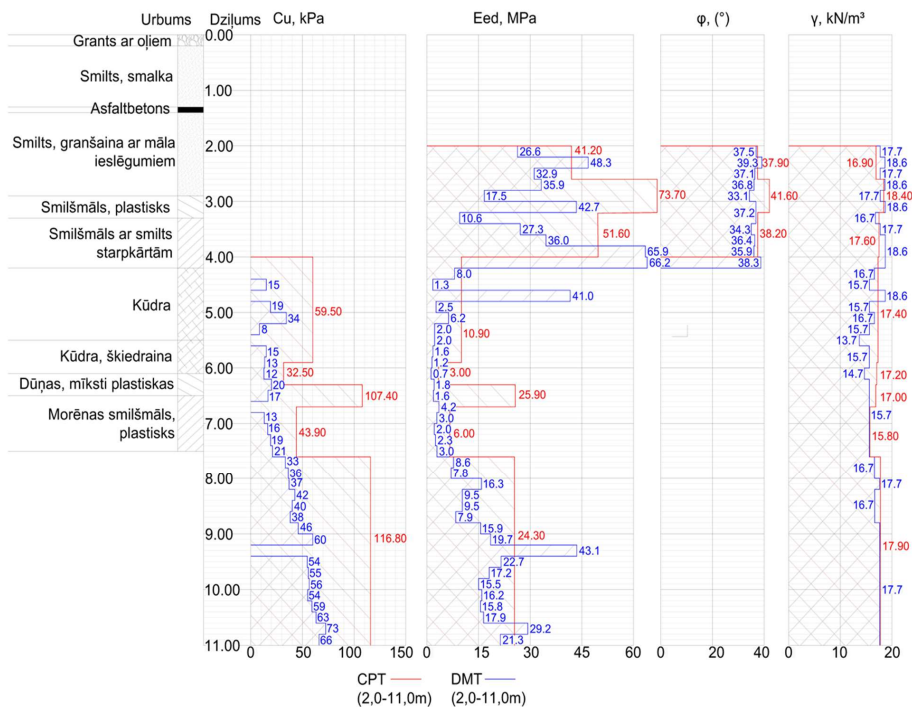
Veikta ģeotehniskā izpēte autoceļa P32 Augšlīgatne – Skrīveri 49,58 – 49,97 km posmā. Posmā 49,66 – 49,93 zem ceļa, kā arī blakus ceļa uzbērumam konstatēti organiskie nosēdumi - kūdra un dūņas. Organisko nogulumu slāņa biezums zem ceļa uzbēruma minētajā posmā bija nevienmērīgs, un svārstījās 0,9 – 5,7 m robežās, vidēji – 3,0 m.

Zem ceļa klātnes esošās organiskās grunts (kūdra, dūņas) ir ar zemu nestspēju un augstām deformācijas īpašībām, kā rezultātā šis slānis nav piemērots kā ceļa būves pamats. Ģeotehniskās izpētes laikā kopumā tika veikti 44 izpētes punkti, izvietojot tos 12 šķērsgriezumos, vienmērīgi nosedzot izpētes laukumu. Vidējais attālums starp šķērsgriezumiem bija 30 m. Lai noteiktu mākslīgās un dabiskās augsnes nogulsnešānās apstākļus, kā arī grunts fizikālās un mehāniskās īpašības, tika veikti 22 statistiskie zondēšanas punkti (CPT) 2,6 – 12,4 m dziļumā no zemes virsmas un 8 plakanā dilatometra testi (DMT) 6,0 – 11,0 m dziļumā.

Ģeotehniskās izpētes punktu izvietojums bija plānots pēc iespējas efektīvāks, lai aptvertu visu ceļa posmu, tāpēc CPT un DMT izpētes netika paredzētas vienā vietā. Tomēr, lai veiktu pētījumu kvalitātes kontroli, zondēšanas punkti tika dublēti divās vietās. Izmantojot iegūto datu interpretācijas, tika veikta rezultātu analīze un salīdzināšana. Pētījumā tika veikts 4 grunts parametru salīdzinājums – kohēzija, deformācijas modulis, berzes leņķis, tilpumsvars.

4.3.1. Izpētes punktā (497+20D) iegūto rezultātu interpretācijas

Pirmajā izpētes punktā (497+20D) iegūto rezultātu interpretācijas ir apkopotas un attēlotas grafikā, lai grunts parametru salīdzinājums būtu uzskatāmāks (skat. 4.3. attēlu). Ir izstrādātas dažādas korelācijas un formulas CPT un DMT datu izteikšanai fizikāli-mehāniskajos parametros. Slāņus iedala grunts tipos. Sākotnēji pēc iegūtajiem zondes parametriem nosaka grunts veidu un slāņu biezumu. Katram grunts tipam ir izstrādātas dažādas korelācijas un formulas; tādēļ ir svarīgi precīzi noteikt grunts tipu.

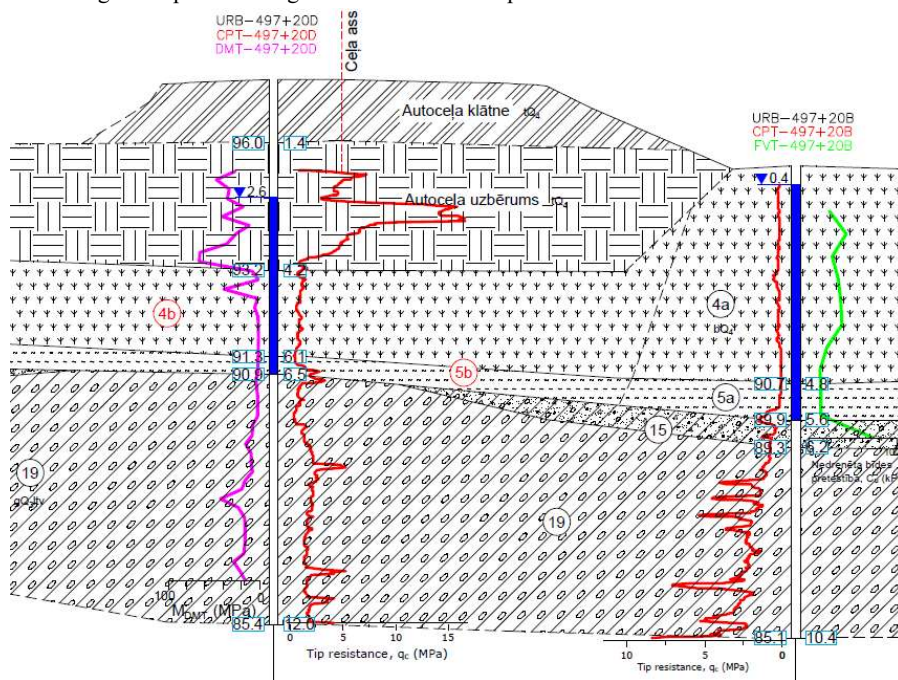


4.3. attēls. Grunts fizikāli mehāniskās īpašības izpētes punktā 497+20D

Attēlā 4.3. parādīta pirmā atšķirība starp CPT un DMT testa rezultātiem. CPT pētījuma laikā iegūtie dati ir sadalīti plašākās sadaļās, ņemot vērā identificētos materiālu tipus un interpretētās grunts fizikāli mehāniskās īpašības noteiktas biežākam slānim. DMT testa rezultāti tiek interpretēti katrā testa laukumā (šajā gadījumā 20 cm biežiem slāņiem) un tādējādi tiek iegūtas grunts fizikāli mehāniskās īpašības katram 20 cm biežam slānim.

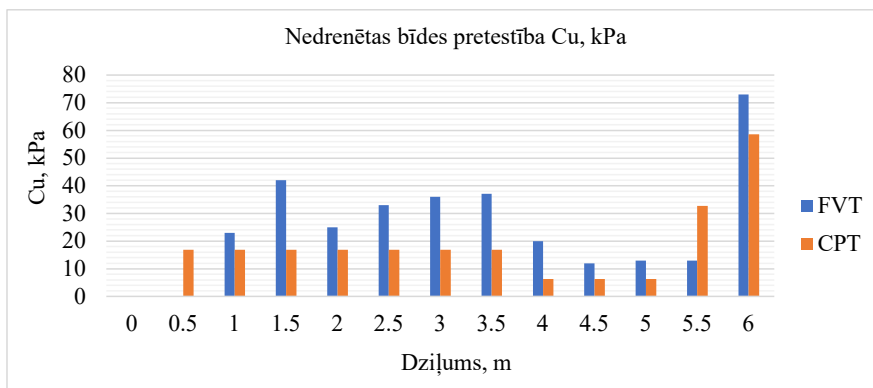
Salīdzinot iegūtos rezultātus, redzams, ka statiskās zondes (CPT) izpēte uzrāda lielākas grunts slāņu fizikāli mehāniskās vērtības visās aplūkotajās pozīcijās. Salīdzinot CPT un DMT rezultātus, CPT izpēte uzrāda vidēji par 8% lielāku berzes leņķa vērtību un par 87% lielākas deformācijas moduļa vērtības smilšainās gruntīs; par 130% lielāku nedrenētas bīdes pretestību un par 60% lielāku deformācijas moduļa vērtību mālainās gruntīs; 300% lielāku nedrenētas bīdes pretestību un par 360% lielāku deformācijas moduļa vērtību zemas nestspējas gruntīs (kūdra, organiskie slāņi). Abas metodes dod līdzvērtīgas materiāla blīvuma vērtības. Konstruktīvas deformācijas un nogāzes stabilitāti visbūtiskāk ietekmē grunts slāņu nedrenētas bīdes pretestība, deformācijas modulis un iekšējās berzes leņķis. Lielākās atšķirības iegūtajos rezultātos ir novērojamas grunts deformācijas moduļa un nedrenētas bīdes pretestības stiprības īpašībās, tāpēc šie parametri tiks sīkāk analizēti. Ir ļoti svarīgi pārliccināties, kura no metodēm (CPT vai DMT) precīzāk atspoguļo grunts slāņu patiesās īpašības. Lai to noteiktu, ir jāsalīdzina iegūtie rezultāti ar citu ģeotehniskās izpētes testu.

Salīdzinot iegūtos datus, būtiskākās atšķirības vērojamas materiālu nedrenētas bīdes pretestības rezultātos. Grunts nedrenētas bīdes pretestības (C_u) vērtības, kas iegūtas ar CPT, ir vidēji par 180% augstākas nekā vērtības, kas iegūtas ar DMT. Vietās ar nogāžu stabilitātes problēmām ir ļoti svarīgi noteikt precīzus mālaino, saistīto grunšu parametrus, jo nedrenētas bīdes pretestība ir viena no svarīgākajām šo grunts tipu īpašībām. Lai noteiktu, kura no pētījuma metodēm precīzāk atspoguļo grunts patieso saites stiprību, ir nepieciešams rezultātus salīdzināt ar citu pētījuma metodi. Lai gan šajā izpētes punktā tika dublēti tikai DMT un CPT testi, CPT un Spārņgriezies (FVT) tests tika dublēti pie ceļa nogāzes pamatnes 12 m attālumā (sk. 4.4. attēlu), tāpēc ir iespējams salīdzināt rezultātus izpētes punktā 497+20B un noteikt, vai CPT uzrāda augstāku/zemāku nedrenētu bīdes pretestību. Saskaņā ar 4.1. tabulas datiem FVT tests sniedz augstākas precizitātes grunts nedrenētu bīdes pretestību vērtības nekā CPT metode.



4.4. attēls. Ceļa ģeotehniskais šķērsgriezums 497+20D

Spārņgriezies tests ir viena no visizplatītākajām lauka izpētes metodēm, ar kuras palīdzību tiek noteiktas saistītu grunšu nedrenētas bīdes pretestības vērtības. Pārbaudi veic ar aprīkojumu, kas sastāv no stieņa ar tam piestiprinātām lāpstiņām, kas tiek ievietots zemē un pagrieztas. Lāpstiņa tiek ievadīta urbumā līdz dziļumam, kurā nepieciešams mērīt bīdes pretestību. Mērītājs stieņa augšpusē mēra griezes momentu, kas nepieciešams, lai izraisītu grunts deformācijas/pārvietojumu, un pārveido iegūtos datus par bīdes izturību. Iegūtie FVT un CPT testa rezultāti ir apkopoti 4.5. attēlā.



4.5. attēls. Grunts nedrenētas bīdes pretestība izpētes punktā 497+20B

Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, FVT tests uzrāda augstāku grunts nedrenētas bīdes pretestību nekā CPT izpēte. Līdz ar to var secināt, ka interpretētie CPT un DMT rezultāti punktā 497+20D uzrāda zemāku grunts saites stiprību, nekā tā ir patiesībā. DMT testa datu korelācija nodrošina lielāku konstrukcijas stiprības rezervi, jo izstrādājot inženierim, balstoties uz DMT rezultātiem, būtu jāizstrādā sarežģītākus un dārgākus projekta risinājumus, bet vienlaikus palielinātu konstrukcijas drošību.

Deformācijas modulis sniedz būtisku grunts saspiežamības/deformācijas raksturlielumu. Izpētes laikā konstatējot zemas Eoed vērtības, projektētājs uzreiz var secināt, ka bez papildus grunts stiprības analīzes, ģeotehniskajiem aprēķiniem vai konkrētiem projekta risinājumiem nav iespējams izstrādāt drošu un ilgmūžīgu būvniecības risinājumu. CPT izpētes rezultāti uzrādīja vidēji par 85% augstāku grunts deformācijas moduli nekā DMT. Šajā pētījuma punktā 497+20D tika ņemts grunts paraugs 6,35m dziļumā, lai veiktu konsolidācijas/odometra testu laboratorijā. No laboratorijā veiktā konsolidācijas testa rezultātiem (skat. 4.6. attēlu) iespējams noteikt grunts deformācijas moduļa vērtību, tādējādi iegūtās vērtības iespējams salīdzināt ar DMT un CPT pētījumu datiem.

Konsolidācijas testu izmanto, lai noteiktu grunts konsolidācijas ātrumu un tās apmēru, kad grunts ir ierobežota sāniski un noslogota aksiāli. Konsolidācijas tests tiek saukts arī par standarta odometra testu vai viendimensijas kompresijas testu. Konsolidācijas testa laikā paraugam tiek uzlikta slodze, kas tiek palielināta ar katru nākamo slodzes posmu. Situācija objektā ir līdzīga, jo esošie grunts slāņi tiek pakļauti uzbēruma slodzei (slodze, ko rada virs aplūkojamā slāņa esošie grunts slāņi). Ņemot vērā izpētes laikā noteiktos grunts slāņu blīvumus un pazemes ūdeņu augstumu, noteikts, ka esošā uzbēruma slodze 6,35 m dziļumā sasniedz aptuveni 82 kPa slodzi. Interpolējot iegūtos konsolidācijas testa rezultātus, grunts parauga deformācijas modulis tiek noteikts 1,6 MPa.

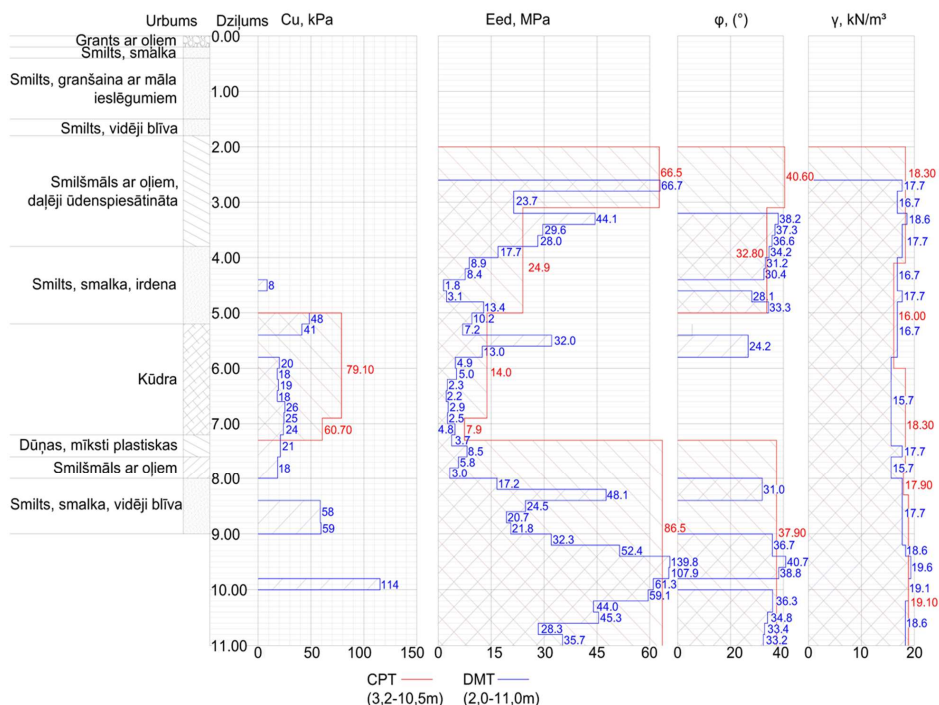
Saspiežamība - kalkūlācija												Consolidation test - calculation							
Objekts / Location								Līguma Nr. / Job ref.											
Valsts reģionālā autoceļa P32 Augšlīgatne - Skrīveri posma km 47,20 - 60,29 ģeotehniskās projektēšanas risinājumu izstrāde								Lab. Nr. / Lab. no.				124C333							
Grunts apraksts / Soil description								Urbuma Nr. / Borehole no.				-							
Puteklī ar vidēju organisko savienojumu saturu Medium-organic silt								Pauga Nr. / Sample no.				P497+20D-2							
								Dziļums / Depth				6,35							
Datums / Date								04.04.18-13.04.18											
Testēšanas metode / Test method												LVS CEN ISO/TS 17892-5							
Aparāta Nr. / Machine no.				I				Paugauga diametrs / Specimen diameter				71,7 mm		Augstums / Height Ho		34,67			
Blīvums / Density ρ				Mg/m ³		1,45		Daiļums augstums / Height of solids				11,58 mm		Minerāldaiļumu blīvums /					
Mitruma / Moisture w				%		71,2		Sakuma porainības koeficients / Initial voids ratio e ₀				1,994		Particle density Mg/m ³				2,528	
PORAINĪBAS KOEFICIENTS / VOIDS RATIO												SASPIEŽAMĪBA / COMPRESSIBILITY				KONSOLIDĀCIJAS KOEFICIENTS / COEFF. OF CONSOLID.			
Pakāpes Nr. / Increment no.	Spiediens / Pressure P, kPa	Summāra saaspiede / Cumulative compression (ΔH-y), mm	Relatīvā deformācija / Relative deformation ε	Konsolidēta augstums / Consolidated height H _s , mm	Porainības koeficients / Voids ratio e _s	Pakāpes / Incremental augstuma izmaiņas / height change ΔH, mm	Spiediena izmaiņas / pressure change Δp, kPa	$m_v = \frac{\Delta H}{\Delta p} \cdot \frac{1000}{E_{oed}}$	$E_{oed} = \frac{\Delta p}{\Delta \epsilon_v}$	ϵ_{100}	ϵ_{200}	L = (H ₁ +H ₂)/2	C _v = $\frac{0,848 \cdot H}{t_{90}}$	Sekundārās saaspiežamības koeficients / Secondary consolidation coefficient C _α					
0	0	0	0	34,67	1,994	0	0	-	-	-	-	-	-	-					
1	79	5,510	0,159	29,16	1,518	5,510	79	2,012	0,5	3,670	100,00	31,92	4,54	-					
2	25	4,970	0,143	29,70	1,565	-0,54	-54	-	-	-	-	-	-	-					
3	50	5,402	0,156	29,27	1,528	0,432	25	0,582	2,0	5,275	81,00	29,48	4,78	3,8E-04					
4	100	6,665	0,192	28,01	1,419	1,263	50	0,863	1,4	6,480	376,36	28,64	0,97	5,9E-05					
5	200	8,993	0,259	25,68	1,218	2,328	100	0,831	1,5	8,490	309,76	26,84	0,93	4,0E-03					
6	400	11,925	0,344	22,75	0,964	2,932	200	0,571	2,4	11,510	213,16	24,21	1,10	1,3E-03					
7	800	14,237	0,411	20,43	0,765	2,312	400	0,254	6,0	13,750	324,00	21,59	0,58	1,7E-03					
C _c		=	0,841																

4.6.attēls. Grunts parauga (6,35m dziļumā) konsolidācijas tests izpētes punktā (497+20D)

Salīdzinot odometra testa rezultātus ar CPT un DMT interpretācijām, var secināt, ka konkrētajā diapazonā ar DMT testu ir noteikts precīzs grunts deformācijas modulis E_{oed} = 1,6MPa. CPT testa interpretācijas līdz 6,3 m dziļumam parāda grunts deformācijas moduļa vērtības E_{oed} = 3,0 MPa, bet pēc tam tika identificēts 40 cm biezs slānis ar E_{oed} = 25,9 MPa. Spriežot pēc šī salīdzinājuma, pastāv iespēja, ka CPT interpretācijas uzrāda labākas grunts deformācijas īpašības, nekā tās ir patiesībā. Varam secināt, ka DMT testa galvenā priekšrocība ir tā, ka tas nosaka grunts īpašības katram 20 cm biežam slānim, līdz ar to neveidojas lielāks slānis ar vidējo parametra vērtību. Salīdzinot DMT un konsolidācijas testa rezultātus, var konstatēt, ka dilatometra izpēte sniedz precīzu grunts deformācijas moduļa novērtējumu. Izmantojot šos datus, var precīzi novērtēt esošā konsolidācijas/deformācijas apjomu.

4.3.2. Izpētes punktā (498+40D) iegūto rezultātu interpretācijas

Otrajā punktā (498+40D) iegūto rezultātu interpretācijas ir apkopotas un uzzīmētas, lai grunts parametru salīdzinājums būtu viegli saprotams (sk. 4.7. attēlu). Kā aprakstīts 4.2. un 4.3. nodaļās, tad ir izstrādātas dažādas korelācijas un formulas CPT un DMT datu izteikšanai fizikāli-mehāniskajos parametros.

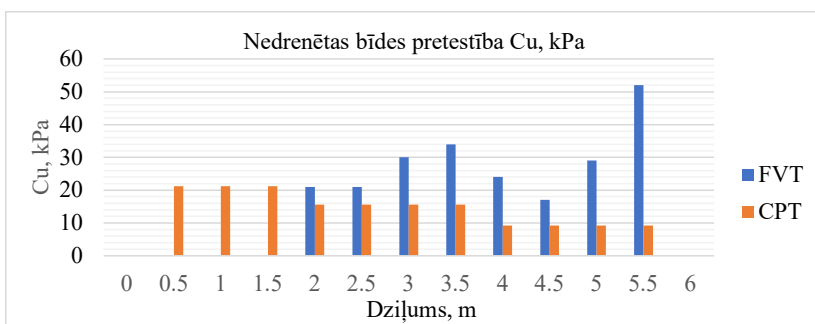


4.7.attēls. Grunts fizikāli mehāniskās īpašības izpētes punktā 498+40D

Salīdzinot iegūtos rezultātus, redzams, ka statiskās zondes (CPT) pētījumi uzrāda lielākas stiprības vērtības visās aplūkotajās pozīcijās. Salīdzinot CPT un DMT rezultātus, CPT uzrāda vidēji par 8% lielāku berzes leņķa vērtību un par 200% lielāku deformācijas moduļa vērtību irdenās smiltīs, par 9% lielāku berzes leņķa vērtību un par 90% lielāku deformācijas moduļa vērtību blīvās smiltīs, par 230% lielāku nedrenētas bīdes pretestību un par 185% lielāku deformācijas moduļa vērtību zemas nestspējas gruntīs (kūdra, organiskie slāņi).

Kā aprakstīts 4.5.1.1. nodaļā, konstrukcijas deformācijas un nogāžu stabilitāti visvairāk ietekmē materiāla nedrenētā bīdes pretestība, deformācijas modulis un berzes leņķis. Lielākās atšķirības iegūtajos rezultātos ir novērojamas grunts deformācijas moduļa un saistes stiprības īpašībās.

Nedrenētas bīdes pretestības vērtības, kas iegūtas ar CPT, ir vidēji par 230% augstākas nekā vērtības, kas iegūtas ar DMT. Lai gan izpētes punktā tika dublēti tikai DMT un CPT testi, CPT un spārnīgriezies (FVT) testi tika dublēti ceļa nogāzes pamatnē 12 m attālumā (līdzīgi kā iepriekšējā punktā), tāpēc ir iespējams salīdzināt rezultātus pētījuma punktā 498. +40B un noteikt, vai CPT pētījums uzrāda augstāku/zemāku nedrenētas bīdes pretestību (sk. 4.8. attēlu).



4.8. attēls. Grunts nedrenētas bīdes pretestība izpētes punktā 498+40B

Iegūtie FVT un CPT testa rezultāti ir apkopoti 4.8. attēlā. Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, FVT tests uzrāda augstāku grunts nedrenētas bīdes pretestību nekā CPT izpēte. Līdz ar to var secināt, ka interpretētie CPT un DMT rezultāti pētījuma punktā 498+40D uzrāda zemāku grunts saites stiprību, nekā tā ir patiesībā. DMT testa datu korelācija nodrošina lielāku stiprības rezervi.

CPT pētījuma rezultāti uzrādīja vidēji par 100% augstākas grunts deformācijas moduļa vērtības nekā DMT. Šajā izpētes punktā (498+40D) tika ņemti 6 grunts paraugi dziļuma intervālā no 6,00m līdz 7,45m, lai veiktu konsolidācijas testu laboratorijā. No laboratorijā veiktā konsolidācijas testa rezultātiem (skat. 4.3. tabulu) iespējams noteikt grunts deformācijas moduļa vērtības, tādējādi iegūtās vērtības iespējams salīdzināt ar DMT un CPT pētījumu datiem.

4.3. tabula.

Konsolidācijas testa rezultāti pētījuma punktā 498+40D

Dziļums (m)	Blīvums (Mg/m ³)	E _{oed} (MPa)	CPT E _{oed} (MPa)	DMT E _{oed} (MPa)
6,00	1,00	2,00	14,00	4,80
6,25	1,00	2,40	14,00	2,30
6,70	0,98	2,10	14,00	2,20
6,95	1,07	3,30	7,90	2,90
7,20	1,13	2,60	7,90	3,70
7,45	1,09	5,50	7,90	3,70

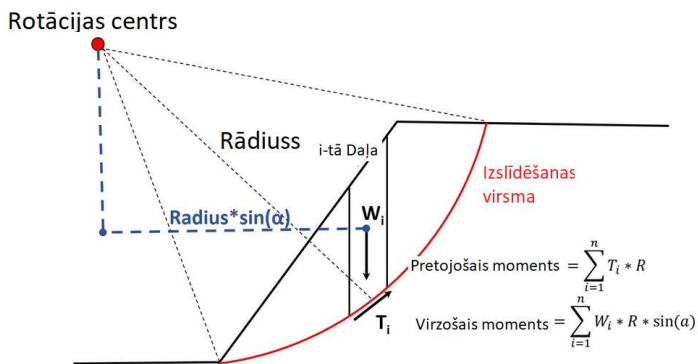
Salīdzinot konsolidācijas testa rezultātus ar CPT un DMT interpretācijām, var secināt, ka DMT testā ir noteikts ļoti precīzs grunts deformāciju modulis E_{oed}. Rezultātu atšķirības ir ļoti minimālas, tāpēc var secināt, ka DMT tests sniedz ļoti precīzus datus par grunts deformāciju, konsolidāciju (deformācijas moduli). CPT testa interpretācijas uzrāda lielākas vērtības nekā konsolidācijas tests. Spriežot pēc šī salīdzinājuma, pastāv iespēja, ka CPT interpretācijas uzrāda labākas grunts deformācijas īpašības, nekā tās patiesībā ir. Ņemot vērā, ka ģeotehniskajos aprēķinos tiek izmantoti dažādi koeficienti, daļējie faktori (grunts stiprības samazināšana un citi), varam izmantot CPT testa norādītās deformācijas īpašības, taču, protams, rūpīgi analizējot ne tikai zondēšanas datus, bet arī citu pieejamo informāciju un, ja nepieciešams, manuāli samazinot deformācijas moduli ģeotehniskajiem aprēķiniem.

4.3.3. Nogāzes stabilitātes aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības

Inženiertehniskajiem projektiem, piemēram, ēkām, tiltiem, grunts dambjiem un ceļiem, projektēšanas procesā ir nepieciešama detalizēta informācija par zemes klātnes virsmu. Zemes klātne un esošā grunts zem būves atbalsta visas konstrukcijas. Lai nodrošinātu inženierbūves ilgtermiņa kalpotspēju, grunts slāņi zem pieliktās konstrukcijas slodzes nedrīkst pārsniegt pieļaujamās deformācijas. Ģeotehniskā inženiera uzdevums ir analizēt objekta ģeotehniskos apstākļus, noteikt grunts slāņu nestspēju, pārbaudīt nogāzes stabilitāti un nepieciešamības gadījumā izstrādāt dažādus konstruktīvos risinājumus. Uzdevums var paplašināties, lai sniegtu ieteikumus citās saistītās jomās, piemēram, gruntsūdeņu problēmas un zemes darbos. Zemes klātnē esošais grunts tips sniedz norādi par to, kā grunts reaģēs zem uzbēruma, konstrukcijas vai transporta slodzes un vai materiāls spēs nodrošināt nepieciešamo nestspēju. Piemēram, māls reaģē pavisam savādāk nekā smiltis. Kūdra un irdenais uzbērums, kas atrodas zem paredzētās konstrukcijas, nav piemērots konstrukcijas atbalstam. Zemas kvalitātes materiāls ir jāizrok vai jāstabilizē, vai pamati jāatbalsta uz stingrākiem materiāliem, kas atrodas zem vājas nestspējas materiāla slāņa(-iem). Lai noskaidrotu racionālāko un vienlaikus ekonomiski izdevīgāko ilgtermiņa risinājumu, jāveic ģeotehniskie aprēķini.

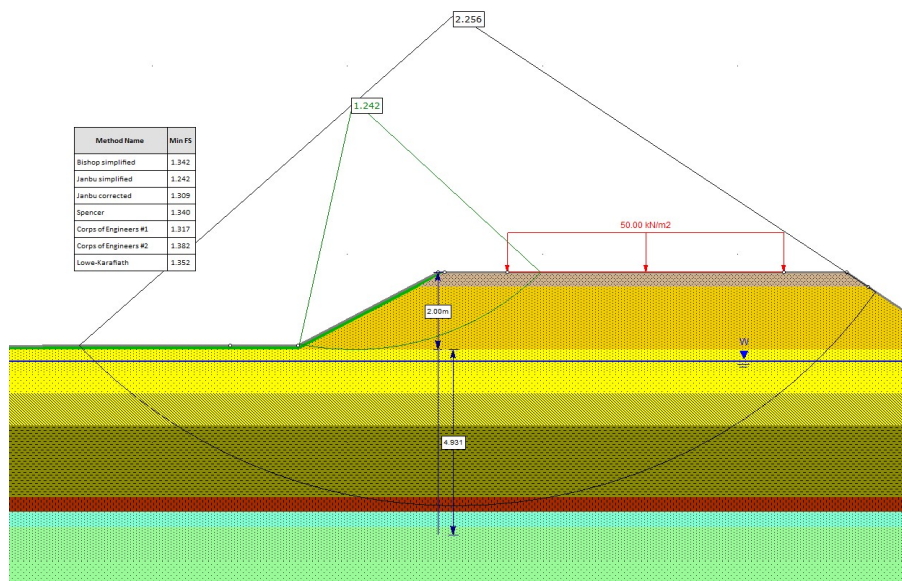
Izmantojot ar CPT un DMT metodēm iegūtos grunts parametrus, tika aprēķināta nogāžu stabilitāte un konstrukcijas sēšanās, kā arī salīdzināta aprēķinu rezultātu atšķirība. Abiem aprēķiniem ir izmantotas īpaši izstrādātas aprēķinu programmas/programmatūra, kurā iespējams precīzi definēt visus ievades parametrus, kā arī ņemt vērā parciālos faktorus. Nogāzes stabilitātes aprēķiniem tika izmantota kompānijas “Rocscience” izstrādātā programma – “Slide2” [58]. Tajā ir iekļautas vairākas izstrādātās aprēķinu metodes (Bishop, Janbu un citas), drošības koeficienta noteikšanai, tāpēc visu metožu rezultātus ir ļoti vienkārši salīdzināt ņemt vērā, izvēloties gala risinājumu.

Analītiskos nogāzes stabilitātes aprēķinus visbiežāk veic izmantojot Bišopa metodi, jo tā ir pietiekami precīza, nodrošinot nelielas novirzes no faktiskā nogāžu drošības faktora. Tā ir viena no vairākām šķēlumu metodēm, kas izstrādātas, lai novērtētu nogāžu stabilitāti. Galvenais nogāzes stabilitātes pieņēmums ir tāds, ka pretestības spēki ir lielāki par ierosinājumu spēkiem (sk. 4.9. attēlu). Formulas un aprēķinu procedūra aprakstīta [59].



4.9. attēls. Bišopa šķēluma metode

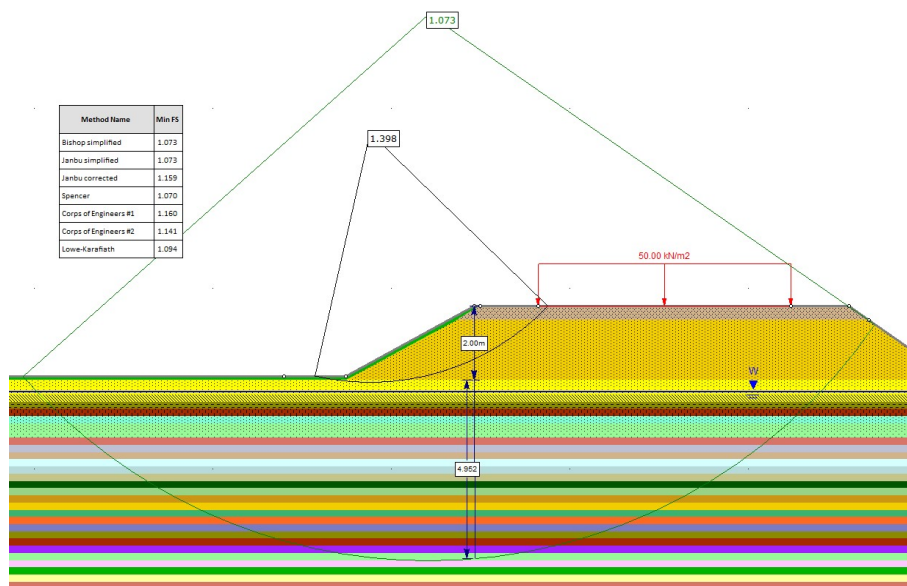
Nogāzes stabilitātes aprēķināšanai visiem aprēķinu modeļiem ir pieņemts viens un tas pats konstruktīvais risinājums. Aprēķinos tika pieņemts, ka dziļums, kurā tika uzsākta zondēšana esošajā ceļā (apmēram 2 m dziļumā), ir esošā zemes klātne un uz tās ir izbūvēts 2 m augsts ceļa uzbērums. Papildus uzbēruma slodzei uz brauktuves pielikta izkliedēta transporta slodze 50 kN/m². Ceļa uzbērums izbūvēts ar nogāžu slīpumu 1:2 un nogāze, nostiprināta ar zāli. Aprēķinos izmantoti Eirokodeksa 7 parciālie koeficienti - projektēšanas pieceja 1, kombinācija 2. Pirmā aprēķina rezultāti, izmantojot CPT interpretāciju pētījuma punktā 497+20D, ir parādīti grafikā (skat. 4.10. attēlu).



4.10. attēls. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti, izmantojot CPT grunts parametru interpretācijas izpēti punktā 497+20D

Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, nogāzes stabilitāte ir nodrošināta, jo drošības koeficients F_s visās metodēs ir lielāks par 1. Autoceļam P32 lielākās problēmas bija ar grunts deformācijām, un iegūtie aprēķinu rezultāti to ļoti labi atspoguļo, jo ģeotehniskās izpēti laikā tika konstatēti, ka augšējie grunts slāņi ir smilšaini un ar salīdzinoši labām īpašībām, bet zemas nestspējas grunts sākas aptuveni no 3,5m dziļuma.

Salīdzinot CPT un DMT interpretācijas, tika konstatēti, ka CPT metode pētījuma punktā 497+20D uzrādīja par 180% lielāku saistes stiprību. Ņemot vērā, ka nedrenētā bīdes pretestība ir viena no svarīgākajām saistīto grunšu īpašībām, šāda grunts parametru atšķirība var būtiski samazināt nogāzes izturību. Nogāzes stiprības aprēķins, izmantojot DMT parametrus, ir parādīts 4.11. attēlā.



4.11. attēls. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti, izmantojot DMT grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 497+20D

Pēc aprēķina noteikta un attēlota nogāzes izslīdēšanas virsma ar viszemāko drošības koeficientu. Salīdzinot abus aprēķinus, noteikts, ka atšķirība starp drošības koeficientiem ir minimāla. Iegūto rezultātu atšķirība ir 16% (DMT – F_{safety} = 1 070; CPT - F_{safety} = 1 242). Tomēr, salīdzinot katras metodes noteikto izslīdēšanas virsmu ar vismazāko drošības koeficientu, redzams, ka CPT metodei tā atrodas pie ceļa nogāzes, savukārt DMT izpētei pastāv visas brauktuves konstrukcijas izslīdēšanas risks.

Precīzākai rezultātu salīdzināšanai 4.10. un 4.11. attēlā ir attēlotas izslīdēšanas virsmas, kas aptuveni sakrīt ar otras metodes zemākā drošības koeficienta virsmu. Pie ceļa nogāzes esošo izslīdēšanas virsmu drošības koeficienta atšķirība ir 12% (DMT – F_{safety} = 1 398; CPT - F_{safety} = 1 242). Spriežot pēc aprēķinu rezultātiem, redzams, ka DMT izpētē ir noteikti labāki grunts parametri ģeoloģijas augšējās slāņos. Visas brauktuves konstrukcijas izslīdēšanas virsmu rezultātu atšķirība ir 110% (DMT – F_{safety} = 1,070; CPT - F_{safety} = 2,256). Spriežot pēc aprēķinu rezultātiem, redzams, ka DMT izpētē ir noteikti zemāki fizikāli-mehāniskie parametri vājajos grunts slāņos. Ņemot vērā to, ka visai brauktuvei ir gandrīz neiespējami slīdēt, 4.11. attēlā parādīta esošās pamatnes problēma veidojas tieši caur vājas nestspējas grūti, kas ir ļoti plūstoša.

Tāpat kā pirmajā izpētes punktā, veikts uzbēruma un ceļa konstrukcijas nogāžu stabilitātes aprēķins izpētes punktā 498+40D. Nogāzes stabilitātes drošības koeficienti ir apkopoti 4.4. tabulā. Atbilstoši iegūtajiem nogāžu izslīdēšanas aprēķina rezultātiem, abus izpētes punktus noteiktās mazākās drošības koeficientu vērtības, DMT un CPT izpētes metodēm, ir līdzvērtīgas un atšķiras robežās no 1,8% līdz 16%.

Nogāzes stabilitātes drošības koeficienti

Aprēķins izmantojot izpētes datus:	Izslīdēšanas virsmas novietojums	Drošības koeficienti						
		Bishop simplified	Corps of Engineers #1	Corps of Engineers #2	Janbu simplified	Janbu corrected	Lowe- Karafiath	Spencer
CPT 497+20D	Pie ceļa nogāzes	1.342	1.317	1.382	1.242	1.309	1.352	1.340
DMT 497+20D		1.504	1.471	1.572	1.398	1.473	1.528	1.494
CPT 497+20D	Zem visas brauktuves konstrukcijas	2.374	2.409	2.624	2.256	2.436	2.329	2.372
DMT 497+20D		1.073	1.160	1.141	1.073	1.159	1.094	1.070
CPT 498+40D	Pie ceļa nogāzes	1.342	1.317	1.385	1.225	1.303	1.352	1.34
DMT 498+40D		1.511	1.478	1.581	1.404	1.479	1.536	1.500
CPT 498+40D	Zem visas brauktuves konstrukcijas	2.517	2.482	2.535	2.136	2.325	2.345	2.509
DMT 498+40D		1.336	1.414	1.407	1.247	1.354	1.356	1.353

Abu izpētes punktu DMT aprēķini vēl vairāk apstiprina, ka esošos grunts slāņus ir iespējams sablīvēt/konsolidēt. Spriežot pēc aprēķinu rezultātiem, var secināt, ka definējot grunts parametrus katram 20 cm biežam slānim, var precīzāk attēlot esošo grunts slāņu īpašības. Zemes klātnes grunts ir ļoti nevienmērīgas, tāpēc īpašības var ievērojami atšķirties viena slāņa ietvaros.

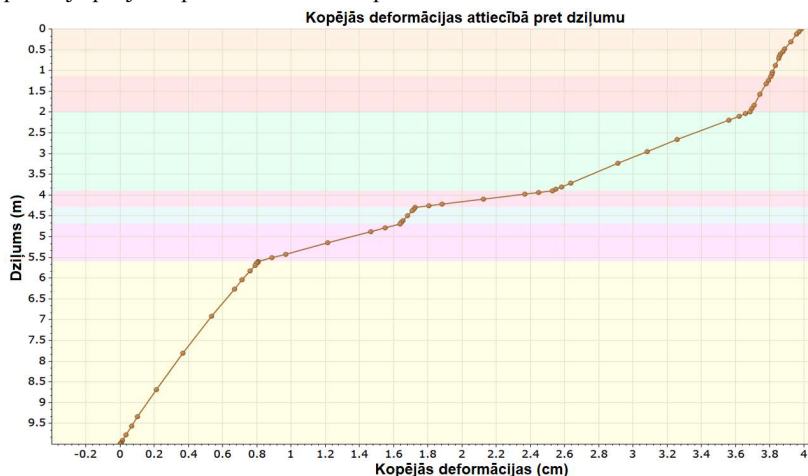
4.3.4. Konstrukcijas deformācijas aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības

Deformācija rodas grunts slāņu konsolidācijas rezultātā, ko pieliktās slodzes vai mitruma satura izmaiņu dēļ izraisa tukšumu vai atstarpju samazināšanās starp grunts daļiņām. Mitrums grūnīs palielina apjomu/slāņa tilpumu un, kad tas tiek izvadīts, zaudē apjomu un konsolidējas. Pastāv arī iespēja, ka mitruma/gruntsūdens migrācijas iespaidā tiek izskalotas mazākās materiālu daļiņas, kas iepriekš aizpildīja tukšumus starp lielākām grunts daļiņām un nodrošināja papildus struktūras atbalstu. Tas noved pie tā, ka grunts slānim samazinās nestspēja.

Deformācijas aprēķiniem izmantota aprēķinu programma/programmatūra, kompānijas "Rocscience" izstrādātā programma – "Settle3", kurā iespējams precīzi definēt visus ievades parametrus, kā arī ņemt vērā daļējos koeficientus [60]. Analītiskajiem deformācijas aprēķiniem ir izstrādātas konsolidācijas un sēšanās formulas. Īss analītisko aprēķinu apraksts ir sniegts ģeotehniskās projektēšanas rokasgrāmatā [61].

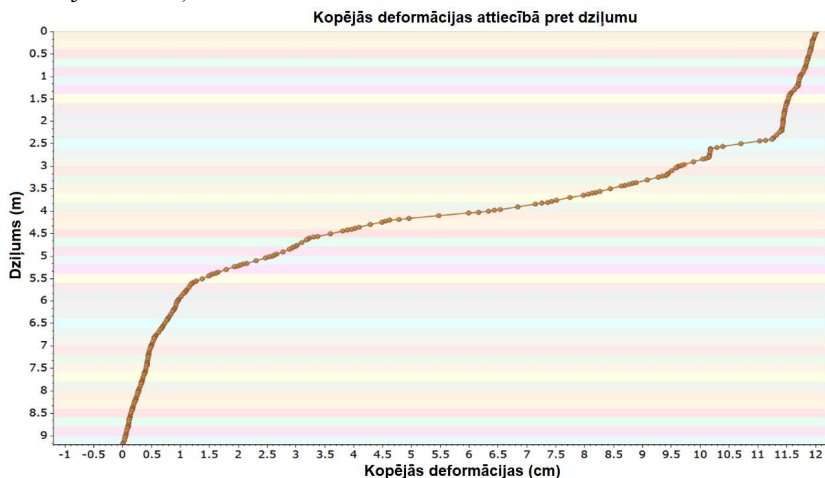
Visiem ceļa konstrukcijas deformācijas aprēķiniem ir pieņemts vienāds konstruktīvais risinājums. Aprēķinos tika pieņemts, ka dziļums, kurā tika uzsākta zondēšana esošajā ceļā (apmēram 2 m dziļumā), ir esošā zemes klātnē un uz tās ir izbūvēts 2 m augsts ceļa uzbērums. Papildus uzbēruma slodzei uz brauktuves pielikta izkliedēta transporta slodze 50 kN/m². Ceļa uzbērums izbūvēts ar nogāžu slīpumu 1:2. Aprēķinos izmantoti Eirokodeksa 7 daļējie koeficienti - projektēšanas pieeja 1, kombinācija 2. Pirmā aprēķina rezultāti, izmantojot CPT

interpretāciju pētījuma punktā 497+20D, parādīts 4.12. attēlā, bet aprēķins, izmantojot DMT interpretāciju pētījuma punktā 497 +20D ir parādīts 4.13. attēlā.



4.12. attēls. Konstrukcijas deformācijas rezultāti, izmantojot CPT grunts parametru interpretācijas izpēti punkā 497+20D

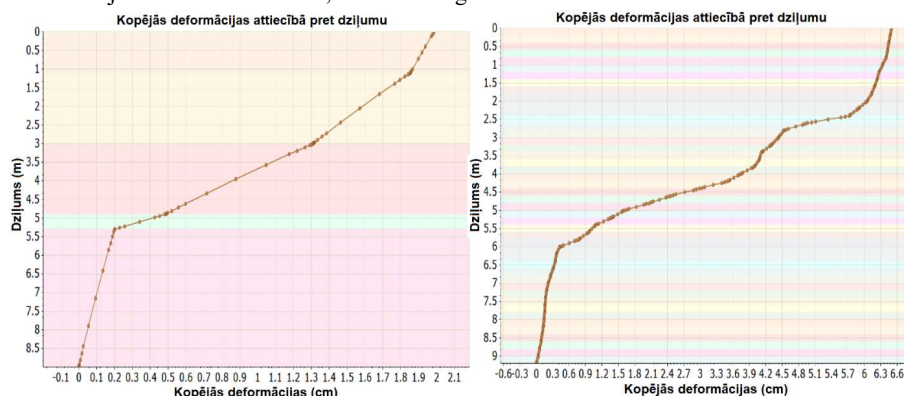
Atbilstoši iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākā deformācija notiek kūdras, dūņu un plūstošā smilšmāla slāņos, jo šo slāņu deformācijas modulim bija viszemākās vērtības. Konstrukcijas deformācijas noteiktas 3,98 cm apmērā. Ņemot vērā, ka aprēķina modelī ir noteikts, ka kūdras slānis sākas no 2 m dziļuma, deformācijas apjoms nav pārāk liels, tomēr šis ir vienkāršots aprēķins, kurā izmantoti tikai divi grunts parametri - blīvums un Eoed (deformācijas modulis).



4.13. attēls. Konstrukcijas deformācijas rezultāti, izmantojot DMT grunts parametru interpretācijas izpēti punkā 497+20D

Atbilstoši iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākā deformācija notiek kūdras, dūņu un plūstošā smilšmāla slāņos, jo šo slāņu deformācijas modulim bija viszemākās vērtības. Konstruktijas deformācijas noteiktas 12,00 cm apmērā. 11 cm no kopējās konstrukcijas deformācijas notiek diapazonā no 2,4 m līdz 5,4 m. Salīdzinot CPT un DMT aprēķinu rezultātus, noteikts, ka abos aprēķinos lielākās deformācijas notiek tajos pašos grunts slāņos. CPT izpētē noteiktais deformāciju apjoms ir 3,98 cm, bet DMT izpētē tas ir 12 cm. Iegūtie rezultāti atšķiras 8,02 cm apmērā, jeb aptuveni 3 reizes. Ņemot vērā, ka dūņu deformācijas vērtības DMT izpētei sakrīt ar konsolidācijas testa rezultātiem (6,35 m dziļumā), var secināt, ka deformācijas aprēķins ar CPT testa datiem dod nepamatoti labus rezultātus.

Konstruktijas deformācijas aprēķina rezultāti izpētes punktā 498+40D ir apkopoti vienā attēlā (skat. 4.14. attēlu). Saskaņā ar iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākā deformācija notiek kūdras, dūņu un irdeno smilšu slāņos, jo šo slāņu deformācijas modulis bija viszemākais. Konstruktijas deformācijas, izmantojot CPT datus, noteiktas 1,99 cm apmērā un 6,50 cm izmantojot DMT interpretācijas. 90% no kopējām konstrukcijas deformācijām notiek diapazonā no 2,0 m līdz 5,5 m. Iegūtie rezultāti atšķiras 4,51 cm apmērā, jeb aptuveni 3,25 reizes. Ņemot vērā, ka deformācijas vērtības DMT izpētei sakrīt ar konsolidācijas testa rezultātiem (6 testa paraugi), var secināt, ka aprēķins ar CPT testa datiem sniedz optimistiskāku konstrukcijas nosēšanās rezultātu, nekā reāli sagaidāms.



4.14. attēls. Konstruktijas deformācijas rezultāti, izmantojot grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 498+40D – kreisajā pusē CPT; labajā pusē DMT

CPT un DMT metodes ļoti atšķiras gan zondēšanas aprīkojuma, gan paša izpētes procesa ziņā. DMT izpētē iegūtie testa dati tiek interpretēti ar 20 cm soli, lai grunts īpašību izmaiņas varētu novērtēt ļoti precīzi. CPT izpētē vispirms tiek identificēti grunts tipi un pēc tam ģeotehniskās izpētes inženieris sadala iegūtos datus vienādas stiprības slāņos (parasti slāņa biezums > 0,4m) un tiek interpretēta slāņa vidējā konusa pretestība. Iespējams, ka šī atšķirība būtiski ietekmē korelāciju laikā iegūtos rezultātus. Vidējo datu rezultāti neļauj novērtēt stiprības izmaiņas viena grunts tipa ietvaros. CPT izpēte sniedza daudz augstākas grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības vājas nespējas grunts slāņiem, līdz ar to būtiski ietekmēja aprēķinu rezultātus.

Plakanā dilatometra testa izpētes galvenā priekšrocība ir tā, ka tas nosaka grunts slāņu īpašības katram 20 cm biežam slānim, līdz ar to neveidojas lielāks slānis ar vidējām parametra vērtībām. Grunts slāņi ir ļoti nevienmērīgi, tādēļ viena un tā paša grunts tipa ietvaros fizikāli mehāniskās īpašības var ievērojami atšķirties. Ņemot vērā, ka lielākās konstrukcijas deformācijas rodas grunts slāņos ar zemām īpašībām, līdz ar to, aprēķinos izmantojot, slāņu vidējās vērtības var ietekmēt iegūto rezultātu precizitāti.

Galvenā statistiskās zondes izpētes priekšrocība ir tā, ka konusa pretestības vērtības (qc) tiek iegūtas tieši zondēšanas laikā. Šīm vērtībām, veicot vairākus testus vienā pētījuma punktā, jābūt vienādām. Qc datus var pārbaudīt, veicot atkārtotu zondēšanu.

Abas metodes noteica grunts nedrenētās bīdes pretestības vērtības ar drošības rezervi.

Nogāžu stabilitāte tika nodrošināta, izmantojot abu izpētes metožu interpretētās grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības. CPT izpēte uzrādīja augstākas grunts slāņu parametru vērtības, kā rezultātā nogāžu stabilitātes drošības koeficients bija par 16% lielāks nekā DMT metodei.

P32 autoceļam tika veikti konsolidācijas/Odometra laboratorijas testi. Salīdzinot iegūtos rezultātus ar zondēšanas metožu interpretācijām, tika noteikts, ka DMT metode ir noteikusi ļoti precīzas grunts ierobežoto deformāciju moduļa Eoed vērtības. CPT testa interpretācijas uzrādīja lielākas vērtības nekā konsolidācijas tests, tāpēc pastāv iespēja, ka statistiskās zondes interpretācijas uzrāda augstākas grunts slāņu deformācijas moduļa vērtības, nekā tās ir patiesībā.

Atšķirība starp iegūtajiem statistiskās zondes un dilatometra konstrukcijas sēšanās aprēķinu rezultātiem bija aptuveni 300%. Izmantojot CPT izpētes interpretētos grunts slāņu parametrus tika noteikti zemāki ceļa konstrukcijas un uzņēmuma sēšanās/deformācijas apjomi, salīdzinot ar reāli sagaidāmo deformāciju apjomu.

Vidējās grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības neļauj novērtēt stiprības izmaiņas viena grunts tipa ietvaros. Noteiktais deformācijas apjoms un citu ģeotehnisko aprēķinu rezultāti var būtiski atšķirties, izmantojot slāņu vidējās vērtības vai, no otras puses, izmantojot īpašības katram 20 cm biežam grunts slānim. Deformāciju apjoms būtiski pieaug grunts slāņos ar ļoti zemām fizikāli mehāniskajām īpašībām, tādēļ izmantojot vidējās vērtības var rasties neprecizitātes. Viena grunts tipa ietvaros augstākas stiprības slāņi mijas ar zemākas nestspējas starpkārtām, kā rezultātā grunts slāņa vidējie parametri uzrāda zemas, bet ne kritiskas vērtības.

Ģeotehniskie risinājumi, kas izstrādāti, pamatojoties uz dilatometra interpretācijām, nodrošina lielāku konstrukcijas drošību salīdzinājumā ar statistiskās zondes noteiktajiem datiem, bet līdz ar to arī palielina būvniecības izmaksas.

Būtiskākie pētījumi saistībā ar CPT korelācijām galvenokārt ir veikti Amerikas Savienotajās Valstīs, tāpēc nepieciešams veikt padziļinātu statistiskās zondes izpēti, lai pārbaudītu, vai metodes izstrādātās interpretāciju formulas ir piemērotas grunts slāņu fizikāli mehānisko īpašību noteikšanai mūsu klimatiskajos un ģeogrāfiskajos apstākļos.

4.4.CPT, DMT un DCP testa metožu salīdzinājums, izmantojot autoceļa P86 ģeotehniskās izpētes datus.

Veikta ģeotehniskā izpēte autoceļa P86 Sērene - Kalnieši posmā no 33.59 - 37.87 km. Autoceļa posmā no 33.90 līdz 35.38 km zemes klātnes pamatnē konstatēts līdz 1.3 m biezs kūdras slānis. Kūdrai raksturīga galvenokārt zema līdz vidēji augsta sadalīšanās pakāpe, kā arī augsts organisko vielu saturs. Balstoties uz pieejamo informāciju, var secināt, ka šajā posmā ceļa izbūves laikā veikti daļēji uzbēruma pamatnes atkūdrošanas darbi. Konstatētā kūdras slāņa pamatne iegūļ 2.9 m līdz 5.8 m dziļumā no ceļa segas virsmas. Kopējais kūdras slāņa biežums pie uzbēruma pamatnes vismaz 5.0 metri [62].

Ģeotehniskās izpētes punktu izvietojums tika plānots maksimāli efektīvs, lai aptvertu visu izpētes teritoriju. Tomēr, lai veiktu pētījumu kvalitātes kontroli CPT, DMT un DCP zondēšanas punkti tika dublēti trīs vietās. Izmantojot iegūto datu interpretācijas, tika veikta rezultātu analīze un salīdzināšana. Pētījumā tika veikts 4 grunts parametru salīdzinājums – kohēzija, deformācijas modulis, berzes leņķis, tilpumsvars.

4.4.1. Izpētes punktā (34,46km) iegūto rezultātu interpretācijas

Izpētes punktā, kurš atrodas ceļa 34,46 kilometrā veiktas visas trīs zondēšanas izpētes metodes. Pēc urbuma datiem tika noteikts, ka šajā vietā zem ceļa ir 1,1 metru biezs kūdras slānis. Urbuma apraksts un visu trīs izpētes metožu interpretāciju vērtības redzamas 4.15.attēlā.

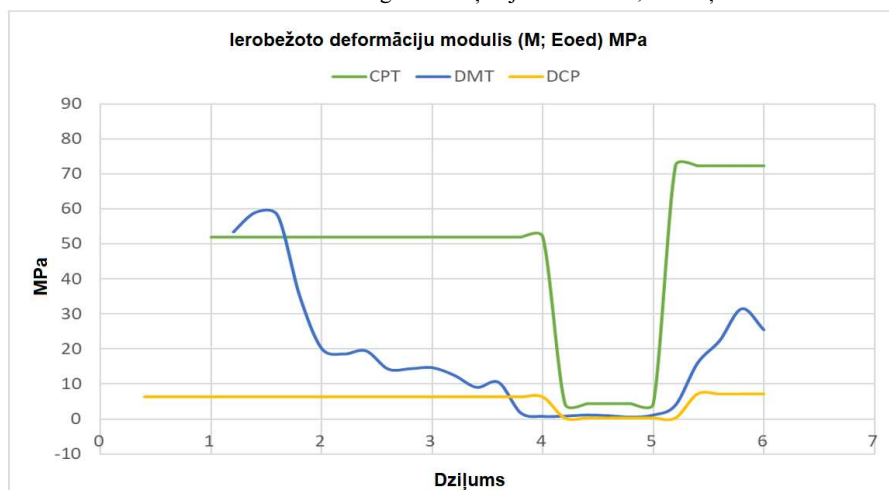
Urbuma apraksts	Pamatnes dziļums	Cu, kPa			Eoed, Mpa			φ			γ, kN/m³		
		CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP
Smiltis, smalka, brūngana, ar granti un oļiem, irdena	0.2												
	0.4												
	0.6					-							
	0.8												
	1												
	1.2					53.4				40			17.7
	1.4					59				41.5			
	1.6					58.1				40.2			18.6
	1.8					35.1				36.9			
	2		-			20.1				34.1			
	2.2					18.6	6.31			33.3	29.65		
	2.4				52	19.5			35.5	33.8		17.1	17.7
	2.6					14.3				32.9			
	2.8					14.4				32.5			
	3					14.7				32.4			
	3.2					12.5				31.9			
	3.4					9.1				30.6			16.7
3.6					10.5				31.2				
3.8					12							15.7	
4					10								
4.2					14								
4.4					0.9								
Kūdra, brūna, vidēji labi sadalījusies	4.4	34.8	15	0	4.4	1.2	0.2		-		16.7	14.7	
	4.6					1							
	4.8					0.6							
	5					1.2							
	5.2					4						15.7	
Putekļi, zilganpelēki, ar smilšainām un mālainām	5.4					16			31.9				
	5.6				72.4	22.4	7.16	35.3	32.5		17.7		
	5.8					31.5			34.2	30.2	17.7	16.18	
	6					25.5			32.5				
									34				

4.15. attēls. Autoceļa 34,46 kilometrā veiktā izpētes punkta apraksts

Pirmajā izpētes punktā (34,46 km) noteiktas būtiskas atšķirības visu trīs metožu interpretētajās vērtībās. Veicot vienkāršotas ģeotehniskās analīzes nepieciešamas grunts slāņu īpašības, kas salīdzinātas 4.15. attēlā – tūlītējā konstrukcijas sēšanās, ņemot vērā ierobežoto deformāciju moduli, un materiāla tilpumsvaru, kā arī nogāžu stabilitātes pārbaudi, ņemot vērā grunts slāņu tilpumsvaru, iekšējās berzes leņķi un efektīvo saisti (pieņemot, ka $C^* \approx C_u$).

Tūlītējās konstrukcijas sēšanās apmēru visvairāk ietekmē ierobežotās deformācijas modulis un spriežot pēc 4.15. attēla datiem izpētes metožu rezultāti būtiski atšķiras. Vismazākās grunts slāņu ierobežoto deformāciju moduļa vērtības tika noteiktas, veicot dinamiskās zondes datu interpretācijas. Atšķirības ir būtiskas, un varētu būtiski iespaidot projekta risinājumus. Grunts slāņu ierobežotā deformācijas moduļa vērtības un tā izmaiņas urbama ietvaros attēlotas 4.16. attēlā.

Salīdzinot iegūtos rezultātus, redzams, ka statiskās zondes (CPT) izpēte uzrāda lielākas vērtības, aptuveni 10 reizes augstāka stiprība par DCP un līdz 3 reizēm augstāka stiprība par DMT. Atbilstoši CPT datiem līdz 4 metru dziļumam noteikta atbilstošas kvalitātes smalka smiltis, tomēr izvērtējot DMT un DCP interpretācijas var secināt, ka abas pārējās izpētes metodes noteikušas zemākas kvalitātes grunts slāņus jau sākot ar 1,5m dziļumu.

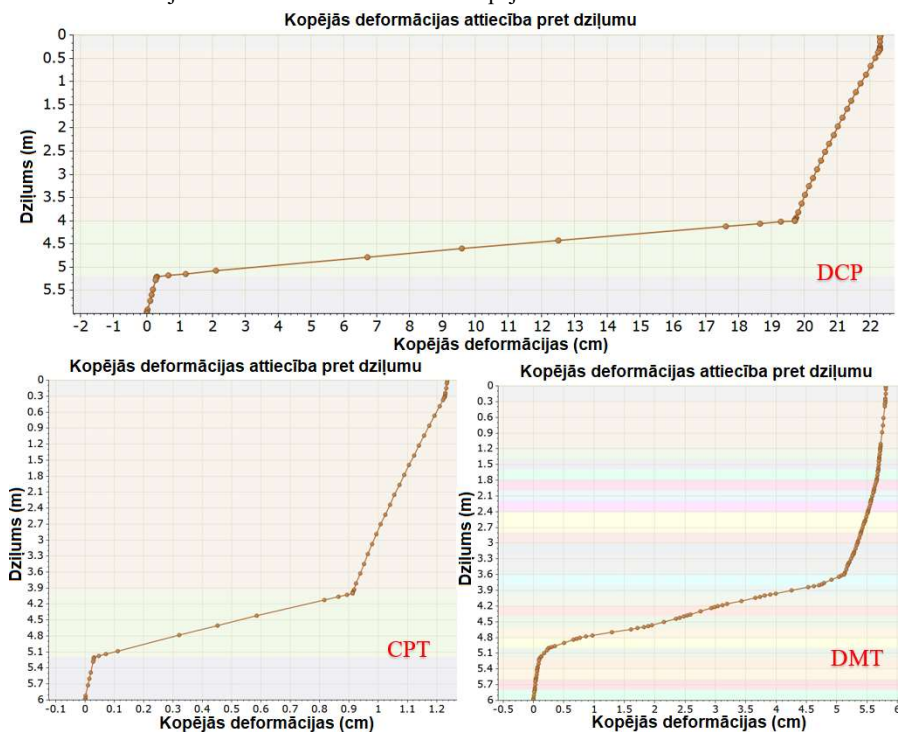


4.16. attēls. Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (34,46km)

Visām trīs izpētes metodēm ir konstatēts būtisks ierobežoto deformācijas moduļa stiprības samazinājums kūdras slānī. Kūdra ir vājas nestspējas grunts un atbilstoši nenovērtējot tās iespējamo ietekmi cikliskās transporta slodzes ietekmē tā var izraisīt būtiskas konstrukcijas deformācijas.

Lai salīdzinātu iegūto deformācijas moduļa atšķirību ietekmi uz ceļa konstrukciju, veikts sēšanās aprēķins. Aprēķinā pielikta izkliedēta transporta slodze un ņemtas vērā grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības un slāņu biezumi atbilstoši 4.15. attēlam. Kopējo sēšanās apjomu un kādas deformācijas rodas katrā grunts slānī iespējams novērtēt 4.17. attēlā, kurā atspoguļoti aprēķina rezultāti.

Saskaņā ar iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākās deformācija rodas kūdras slānī, dziļumā no 4,00 līdz 5,20 metriem, jo šī slāņa deformācijas modulis bija viszemākais. Konstruktijas deformācijas izmantojot CPT datus noteiktas 1,23 cm apmērā, izmantojot DMT datus 5,80 cm apmērā, bet izmantojot DCP datus noteiktas 22,20 cm apmērā. 90% no kopējām konstrukcijas deformācijām rodas diapazonā no 4,0 m līdz 5,2 m. Iegūto rezultātu atšķirības ir būtiskas, piemēram, salīdzinot CPT un DCP deformāciju apjomus atšķirības ir 21 cm apjomā. Ja veiktu projekta izstrādi, balstoties uz statistiskās zondes datiem, tad papildus zemes klātnes pastiprināšanas risinājumu izstrāde nebūtu nepieciešama, bet atbilstoši dinamiskās zondes rezultātiem būtu jāveic būtiski zemes klātnes nestspējas uzlabošanas darbi.

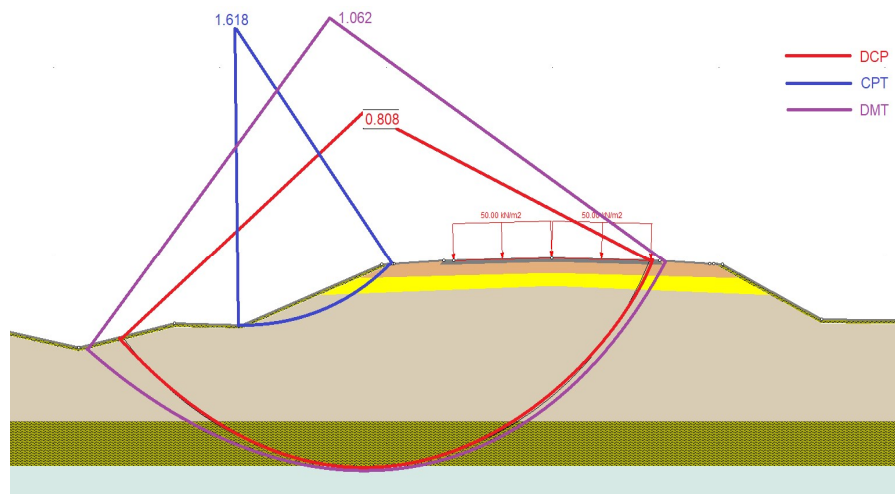


4.17. attēls. Konstruktijas deformācijas rezultāti (34,46km)

Pēc iegūto rezultātu analīzes var secināt, ka ģeotehniskās izpētes metodes izvēle var būtiski iespaidot projekta risinājumus un kopējās būvniecības izmaksas, kā arī radīt situāciju, ka izstrādātie projekta risinājumi nespēj nodrošināt ceļa kalpotspēju. Lai noteiktu zondēšanas metožu interpretāciju precizitāti un nepieciešamības gadījumā veiktu interpretēto grunts slāņu īpašību korekciju, ģeotehniskās izpētes laikā ieteicams veikt odometra laboratorijas vai līdzvērtīgus testus.

Analītiskos nogāzes stabilitātes aprēķinus visbiežāk veic izmantojot Bišopa metodi, jo tā ir pietiekami precīza, nodrošinot nelielas novirzes no faktiskā nogāžu drošības faktora. Tā ir viena no vairākām šķēlumu metodēm, kas izstrādātas, lai novērtētu nogāžu stabilitāti. Lai noskaidrotu, cik būtisku ietekmi uz ceļa un uzbūruma konstrukcijas nogāzes stabilitāti izraisa

grunts slāņu saistes, iekšējā berzes leņķa un tilpumsvara parametru atšķirības tika izstrādāts aprēķina modelis. Aprēķinā pielikta izkliedēta transporta slodze un ņemtas vērā grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības un slāņu biezumi atbilstoši 4.15. attēlam. Aprēķinos izmantoti Eirokodeksa 7 daļējie koeficienti - projektēšanas pieeja 1, kombinācija 2. Aprēķina rezultāti, izmantojot interpretētās grunts slāņu parametru vērtības, ir parādītas 4.18. attēlā.



4.18. attēls. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (34,46km)

Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, nogāzes stabilitāte ir nodrošināta veicot aprēķinus izmantojot CPT un DMT grunts interpretācijas vērtības. Statiskās zondes nogāžu stabilitātes drošības koeficients ir par 52,3% lielāks salīdzinājumā ar aprēķina rezultātiem izmantojot dilatometra datus. Veikto aprēķinu rezultātus, un līdz ar to nogāžu stabilitātes atšķirības visbūtiskāk ietekmēja vājas nestspējas grunts slāņu noteiktā nedrenētā bīdes pretestība, kas CPT izpētei bija par 100% lielāka salīdzinot ar DMT metodi.

Iegūtie aprēķina rezultāti, izmantojot dinamiskās zondes interpretācijas, uzrāda nepietiekamu ceļa uzbūruma un nogāzes stabilitāti. Izbūvējot pilnu ceļa konstrukciju netiek nodrošināta ilgtermiņa ceļa kalpotspēja, līdz ar to nepieciešams izstrādāt specifiskus projekta risinājumus. Atbilstoši 4.18. attēlam iespējams secināt, ka DCP un DMT aprēķinu slīdvirsmas ar zemāko nogāžu stabilitāti atrodas vienā un tajā pašā zonā. Slīdvirsmas veidojas caur vājas nestspējas grunts slāņa apkašu, jo tā fizikāli mehāniskās īpašības ir pārāk mazas, lai nodrošinātu bīdes pretestību.

Pēc veikto nogāzes stabilitātes un konstrukcijas sēšanās aprēķinu rezultātu analīzes var secināt, ka CPT datu interpretācijas uzrādīja visaugstākās grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības. Veicot aprēķinus, izmantojot statiskās zondes datus, tika noteikts, ka, izbūvējot pilnu ceļa konstrukciju, tiks nodrošināta ceļa ilgmūžība, un kūdras slānis nelabvēlīgu ietekmi uz ceļa konstrukcijas nestspēju nerada. Sēšanās aprēķins, izmantojot DMT interpretācijas, noteica deformācijas 5,8cm apmērā, tomēr tika secināts, ka nogāžu stabilitāte tiek nodrošināta. Ņemot

vērā, ka 5,8cm lielas deformācijas var radīt būtiskus riskus konstrukcijas kalpotspējai, līdz ar to nepieciešams izstrādāt zemes klātnes pastiprināšanas risinājumus, palielinot būvniecības izmaksas. Abu aprēķinu rezultāti izmantojot DCP interpretācijas uzrādīja būtiskas problēmas ceļa konstrukcijas kalpotspējas nodrošināšanai. Vājas nestspējas grunts slāņa deformācijas slodzes ietekmē tika noteiktas 19cm apmērā, kā arī nogāzes stabilitātes drošības koeficients uzrādīja, ka izbūvējot pilnu ceļa konstrukciju sagaidāma ceļa konstrukcijas izslīdēšana. Izstrādājot projekta risinājumus izmantojot DCP datus tiek būtiski palielinātas būvniecības izmaksas un nepieciešami sarežģīti konstruktīvie risinājumi, lai ierobežotu deformāciju attīstību vājas nestspējas grunts slāņos. Ņemot vērā, ka aptuveni 60-90% no kopējās konstrukcijas sēšanās attīstās vājas nestspējas grunts slānī vislielāko ietekmi uz veikto aprēķinu rezultātiem radīja vājas nestspējas grunts slāņa interpretāciju atšķirības.

4.4.2. Izpētes punktā (34,86km) iegūto rezultātu interpretācijas

Izpētes punktā, kurš atrodas ceļa 34,86 kilometrā veiktas visas trīs zondēšanas izpētes metodes. Pēc urbuma datiem tika noteikts, ka šajā vietā zem ceļa ir 0,5 metrus biezs kūdras slānis. Urbuma apraksts un visu trīs izpētes metožu interpretāciju vērtības redzamas 4.19.attēlā.

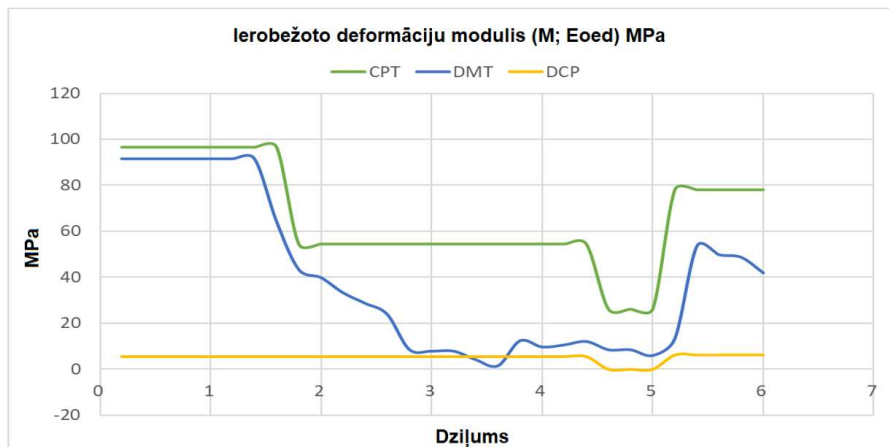
Urbuma apraksts	Pamatnes dziļums	Cu, kPa			Eoed, Mpa			φ			γ, kN/m ³		
		CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP
Smilts, smalka: gaiši brūna, 0.15 - 0.4 m ar retiem grants ieslēgumiem, no 1.6 m ūdens piesātināta, irdena	0.2				96.6	91.4	5.39	40.5	40.3	29.06	18.5	18.6	14.61
	0.4				96.6	91.4	5.39	40.5	40.3	29.06	18.5	18.6	14.61
	0.6				96.6	91.4	5.39	40.5	40.3	29.06	18.5	18.6	14.61
	0.8				96.6	91.4	5.39	40.5	40.3	29.06	18.5	18.6	14.61
	1				96.6	91.4	5.39	40.5	40.3	29.06	18.5	18.6	14.61
	1.2				96.6	91.4	5.39	40.5	40.3	29.06	18.5	18.6	14.61
	1.4				96.6	91.4	5.39	40.5	42.2	29.06	18.5	18.6	14.61
	1.6				96.6	64.1	5.39	40.5	40.4	29.06	18.5	18.6	14.61
	1.8				54.5	43.3	5.39	34.9	38.8	29.06	17.1	17.7	14.61
	2				54.5	39.8	5.39	34.9	38.2	29.06	17.1	17.7	14.61
	2.2				54.5	33.2	5.39	34.9	37.5	29.06	17.1	17.7	14.61
	2.4				54.5	28.6	5.39	34.9	36.7	29.06	17.1	17.7	14.61
	2.6				54.5	23.8	5.39	34.9	35.3	29.06	17.1	17.7	14.61
	2.8				54.5	8.5	5.39	34.9	30	29.06	17.1	16.7	14.61
	3				54.5	7.8	5.39	34.9	30.8	29.06	17.1	16.7	14.61
	3.2				54.5	7.8	5.39	34.9	30.3	29.06	17.1	16.7	14.61
	3.4				54.5	4.1	5.39	34.9	30.3	29.06	17.1	15.7	14.61
	3.6				54.5	1.4	5.39	34.9	30.3	29.06	17.1	15.7	14.61
3.8				54.5	12.3	5.39	34.9	31.6	29.06	17.1	16.7	14.61	
4				54.5	9.6	5.39	34.9	30.3	29.06	17.1	16.7	14.61	
4.2				54.5	10.5	5.39	34.9	30.7	29.06	17.1	16.7	14.61	
4.4				54.5	12	5.39	34.9	31.4	29.06	17.1	16.7	14.61	
Kūdra: tumši brūna, vidēji labi līdz labi sadalījiesies, ar augstu organisko vielu saturu	4.6	116.8		0	26.2	8.4	0		32		17.9	16.7	13.63
	4.8	116.8	10	0	26.2	8.4	0				17.9	16.7	13.63
	5	116.8	10	0	26.2	5.9	0				17.9	15.7	13.63
Māls, puteklains: pelēks, smilšains, cietas konsistnesces	5.2			49	78.1	13.2	6.06	35.1	31.1		17.5	17.7	20.01
	5.4			49	78.1	53.5	6.06	35.1	36.4		17.5	18.6	20.01
	5.6			49	78.1	49.7	6.06	35.1	37		17.5	18.6	20.01
	5.8			49	78.1	48.6	6.06	35.1	37		17.5	18.6	20.01
	6			49	78.1	41.8	6.06	35.1	35.5		17.5	18.6	20.01

4.19. attēls. Autoceļa 34,86 kilometrā veiktā izpētes punkta apraksts

Otrajā izpētes punktā (34,86 km) visbūtiskākās atšķirības noteiktas grunts slāņu ierobežotās deformācijas moduļa un grunts saistes īpašībās. Līdzīgi kā pirmajā izpētes punktā, tika veikta tūlītējās konstrukcijas sēšanās, kā arī nogāžu stabilitātes aprēķins.

Tūlītējās konstrukcijas sēšanās apmēru visvairāk ietekmē ierobežotās deformācijas modulis un spriežot pēc 4.19. attēla datiem izpētes metožu rezultāti būtiski atšķiras. Vismazākās grunts slāņu ierobežoto deformāciju moduļa vērtības tika noteiktas veicot dinamiskās zondes datu interpretācijas. Atšķirības ir būtiskas, un varētu būtiski iespaidot projekta risinājumus. Grunts slāņu ierobežotā deformācijas moduļa vērtības un tā izmaiņas urbuma ietvaros attēlotas 4.20. attēlā.

Salīdzinot iegūtos rezultātus, redzams, ka statistiskās zondes (CPT) izpēte uzrāda lielākas vērtības, aptuveni 10 reizes augstāka stiprība par DCP un līdz 3 reizēm augstāka stiprība par DMT. Atbilstoši CPT datiem līdz 4 metru dziļumam noteikta atbilstošas kvalitātes smalka smiltis, DCP interpretācijas noteikušas zemākas kvalitātes grunts slāņus jau sākot ar esošās segas apakšu, bet DMT izpētes metode sākot ar 2,5m dziļumu konstatētas grūtis ar salīdzinoši zemu ierobežoto deformācijas moduli.



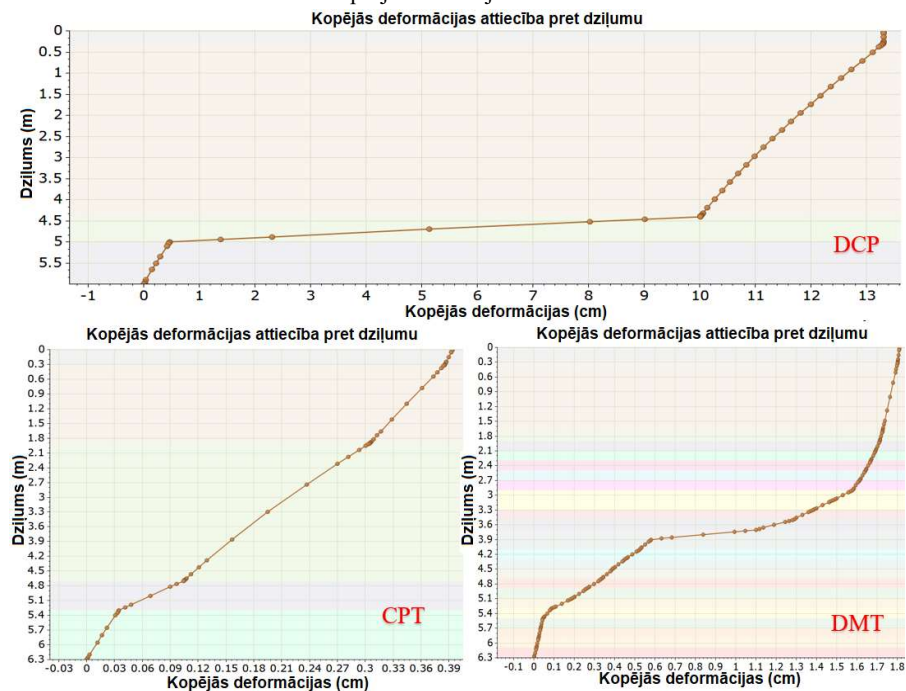
4.20. attēls. Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (34,86km)

CPT izpētes metodei ir konstatēts būtisks ierobežoto deformācijas moduļa stiprības samazinājums kūdras slānī, savukārt DMT izpētē noteikts, ka kūdras slānis samazinājis grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības arī 2m biežam slānim virs vājās nestspējas grunts.

Lai salīdzinātu iegūto deformācijas moduļu atšķirību ietekmi uz ceļa konstrukciju, veikta sēšanās aprēķins. Kopējo sēšanās apjomu un kādas deformācijas rodas katrā grunts slānī iespējams novērtēt 4. 21. attēlā, kurā atspoguļoti aprēķina rezultāti.

Saskaņā ar iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākās deformācija rodas kūdras slānī, dziļumā no 4,40 līdz 5,00 metriem, jo šī slāņa deformācijas modulis bija viszemākais. Konstrukcijas deformācijas izmantojot CPT datus noteiktas 0,39 cm apmērā, izmantojot DMT datus 1,80 cm apmērā, bet izmantojot DCP datus noteiktas 13,20 cm apmērā. Dinamiskās zondes izpētei aptuveni 80% no kopējām konstrukcijas deformācijām rodas diapazonā no 4,4 m līdz 5,0 m.

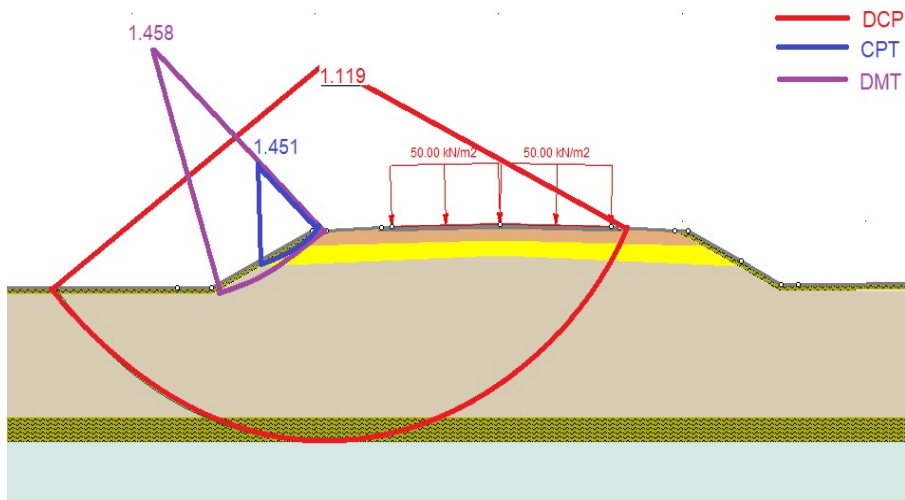
Iegūto rezultātu atšķirības ir būtiskas, piemēram, salīdzinot CPT un DCP deformāciju apjomus atšķirības ir 12,8 cm apjomā. Līdzīgi kā pirmajā izpētes punktā arī šeit noteikts, ka zondēšanas metodes izvēle var būtiski ietekmēt projekta risinājumus un to izmaksas.



4.21. attēls. Konstruktijas deformācijas rezultāti (34,86km)

Lai noskaidrotu, cik būtisku ietekmi uz ceļa un uzbēruma konstrukcijas nogāzes stabilitāti izraisa grunts slāņu saistes, iekšējā berzes leņķa un tilpumsvara parametru atšķirības tika izstrādāts nogāžu stabilitātes aprēķina modelis. Aprēķinā pielikta izkļaidēta transporta slodze un ņemtas vērā grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības un slāņu biezumi atbilstoši 4.19. attēlam. Aprēķinos izmantoti Eirokodeksa 7 parciālie koeficienti - projektēšanas pieeja 1, kombinācija 2. Aprēķina rezultāti, izmantojot interpretētās grunts slāņu parametru vērtības, ir parādītas 4.22. attēlā.

Atbilstoši 4.22. attēla rezultātiem, nogāzes stabilitāte ir nodrošināta ar visām izpētes metodēm. Aprēķini, izmantojot statistiskās zondes un dilatometra izpētes datus, uzrāda vienādu nogāžu stabilitātes drošības koeficientus, kā arī par 30% lielākus salīdzinājumā ar aprēķina rezultātiem izmantojot dinamiskās zondes datus. Lai gan statiskā zonde uzrādīja 10 reizes augstākas nedrenētas bīdes pretestības vērtības nogāžu stabilitātes aprēķina rezultātus tas neietekmē. Tas skaidrojams ar to, ka DMT metodes interpretācijā tika noteikts salīdzinoši neliels, 40cm biezs, vājas nestspējas grunts slānis pietiekoši lielā dziļumā, tādējādi neietekmējot nogāzes stabilitāti.



4.22. attēls. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (34,86km)

Iegūtie aprēķina rezultāti, izmantojot dinamiskās zondes interpretācijas, uzrāda pietiekamu ceļa uzbēruma un nogāzes stabilitāti. Slīdvirsmā ar zemāko drošības koeficientu veidojas caur vājas nestspējas grunts slāņa apkašu, jo tā fizikāli mehāniskās īpašības ir pārāk mazas, lai nodrošinātu bīdes pretestību.

Pēc veikto nogāzes stabilitātes un konstrukcijas sēšanās aprēķinu rezultātu analīzes var secināt, ka CPT datu interpretācijas uzrādīja visaugstākās grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības. Veicot aprēķinus, izmantojot statiskās zondes un dilatometra izpētes datus, tika noteikts, ka, izbūvējot pilnu ceļa konstrukciju, tiks nodrošināta ceļa ilgmūžība, un kūdras slānis nelabvēlīgu ietekmi uz ceļa konstrukcijas nestspēju nerada. Sēšanās aprēķins, izmantojot DCP interpretācijas, noteica deformācijas 13,2 cm apmērā, tomēr tika secināts, ka nogāžu stabilitāte tiek nodrošināta. Ņemot vērā, ka 13,2cm lielas deformācijas var radīt būtiskus riskus konstrukcijas kalpotspējai, līdz ar to nepieciešams izstrādāt zemes klātnes pastiprināšanas risinājumus būtiski palielinot būvniecības izmaksas. Ņemot vērā, ka aptuveni 60-90% no kopējās konstrukcijas sēšanās attīstās vājas nestspējas grunts slānī vislielāko ietekmi uz veikto aprēķinu rezultātiem radīja vājas nestspējas grunts slāņa interpretāciju atšķirības.

4.4.3. Izpētes punktā (35,08km) iegūto rezultātu interpretācijas

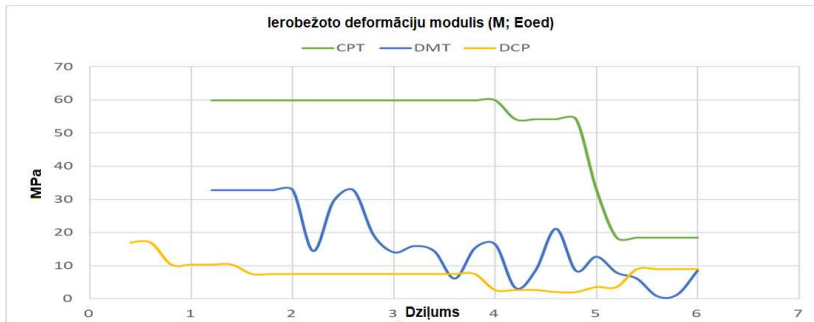
Izpētes punktā, kurš atrodas ceļa 35,08 kilometrā veiktas visas trīs zondēšanas izpētes metodes. Pēc urbuma datiem tika noteikts, ka šajā vietā zem ceļa ir 0,6 un 0,4 metrus biezi kūdras slāņi. Urbuma apraksts un visu trīs izpētes metožu interpretāciju vērtības redzamas 4.23.attēlā.

Urbuma apraksts	Pamatnes dziļums	Cu, kPa			Eoed, Mpa			φ			γ, kN/m ³				
		CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP	CPT	DMT	DCP		
Dolomīta šķembas	0.2														
	0.4						17						20.99		
Smilts, vidēji rupja	0.6						17					36.5	20.99		
	0.8						10.36					32.25	18.44		
Smilts, smalka, vidēji blīva	1						10.36					32.25	18.44		
	1.2				59.9	32.7	10.36	34.4	34.1			32.25	16.9	17.7	18.44
	1.4				59.9	32.7	10.36	34.4	34.1			32.25	16.9	17.7	18.44
	1.6				59.9	32.7	7.5	34.4	34.1			30.42	16.9	17.7	16.48
	1.8				59.9	32.7	7.5	34.4	34.1			30.42	16.9	17.7	16.48
	2				59.9	32.7	7.5	34.4	34.1			30.42	16.9	16.7	16.48
	2.2				59.9	14.4	7.5	34.4	29.4			30.42	16.9	16.7	16.48
	2.4				59.9	29.3	7.5	34.4	34.1			30.42	16.9	17.7	16.48
	2.6				59.9	32.7	7.5	34.4	35.2			30.42	16.9	17.7	16.48
	2.8				59.9	19.1	7.5	34.4	32.8			30.42	16.9	17.7	16.48
	3				59.9	14	7.5	34.4	30.6			30.42	16.9	16.7	16.48
	3.2				59.9	15.9	7.5	34.4	31.4			30.42	16.9	16.7	16.48
	3.4				59.9	14.3	7.5	34.4	31.6			30.42	16.9	16.7	16.48
	3.6				59.9	6.1	7.5	34.4	31			30.42	16.9	16.7	16.48
	3.8				59.9	15.3	7.5	34.4	32.6			30.42	16.9	17.7	16.48
	4			36.19	59.9	16.4	2.66	34.4	33.5			16.9	17.7	17.75	
Kūdra, labi sadalījiesies, ar smilšainām starpkārtām, ar augstu organisko vielu saturu	4.2			36.19	54.2	3.3	2.66	35.1	29.8			17.5	16.7	17.75	
	4.4			36.19	54.2	8.6	2.66	35.1	31.4			17.5	16.7	17.75	
	4.6			27.75	54.2	21.1	2.04	35.1	35.2			17.5	17.7	16.97	
Smilšmāls, ar smilšainām starpkārtām, mīksti plastisks	4.8			27.75	54.2	8.4	2.04	35.1	31.6			17.5	16.7	16.97	
	5			48.54	33	12.7	3.56	33.8	31.6			17	16.7	18.63	
Kūdra, vidēji labi sadalījiesies	5.2	79.6	34	48.54	18.5	7.9	3.56					17	16.7	18.63	
	5.4	79.6	26		18.5	6.1	8.98					31.37	17	16.7	17.65
Smilts, smalka, ar vidēji rupjas un putekļainas smilts starpkārtām	5.6	79.6	20		18.5	0.8	8.98					31.37	17	14.7	17.65
	5.8	79.6	22		18.5	1.3	8.98					31.37	17	14.7	17.65
	6	79.6	24		18.5	8.5	8.98					31.37	17	16.7	17.65

4.23. attēls. Autocēļa 35,08 kilometrā veiktā izpētes punkta apraksts

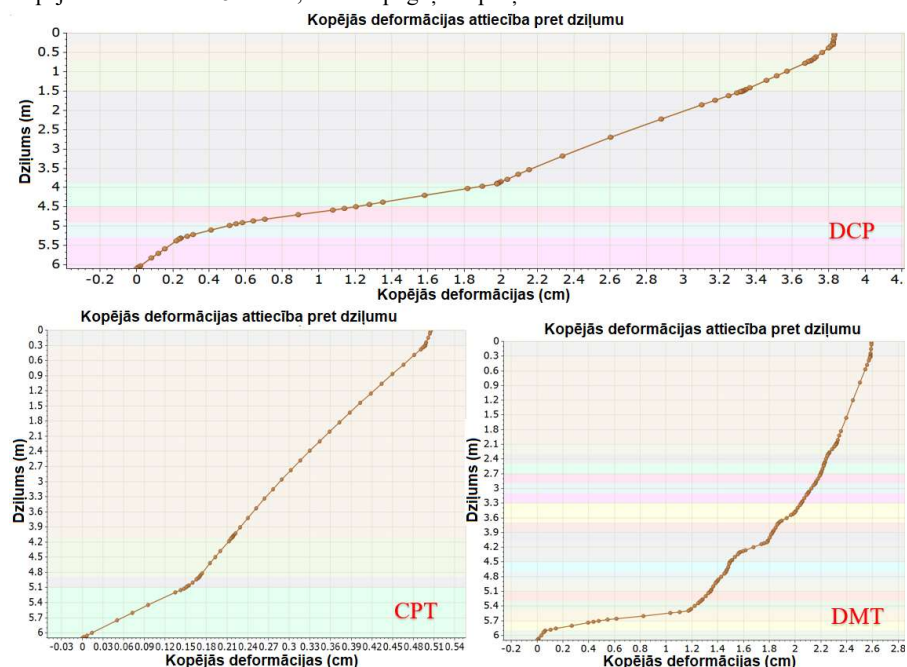
Arī trešajā izpētes punktā (35,08 km) noteiktas būtiskas atšķirības interpretētajās vērtībās. Visaugstākās grunts fizikāli mehāniskās īpašības noteiktas izmantojot statistiskās zondes izpēti, savukārt, līdzīgi kā pirmajos divos izpētes punktos, zemākās īpašības noteiktas ar dinamiskās zondes izpētes metodi.

Tūlītējās konstrukcijas sēšanās apmēru visvairāk ietekmē ierobežotās deformācijas modulis un spriežot pēc 4.23. attēla datiem izpētes metožu rezultāti būtiski atšķiras. Vismazākās grunts slāņu ierobežoto deformāciju moduļa vērtības tika noteiktas veicot dinamiskās zondes datu interpretācijas. Grunts slāņu ierobežotā deformācijas moduļa vērtības un tā izmaiņas urbuma ietvaros attēlotas 4.24. attēlā.



4.24. attēls. Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (35,08km)

Salīdzinot iegūtos rezultātus, redzams, ka statistiskās zondes (CPT) izpēte uzrāda lielākas vērtības, aptuveni 6 reizes augstāka stiprība par DCP un līdz 3 reizēm augstāka stiprība par DMT. Atbilstoši CPT datiem līdz 5,1 metru dziļumam noteikta augstas nestspējas grunts, tomēr izvērtējot DMT un DCP interpretācijas var secināt, ka abas pārējās izpētes metodes noteikušas zemākas kvalitātes grunts slāņus jau sākot ar 3,0m dziļumu. Lai salīdzinātu iegūto deformācijas moduļa atšķirību ietekmi uz ceļa konstrukciju, veikts sēšanās aprēķins. Kopējo sēšanās apjomu iespējams novērtēt 4.25. attēlā, kurā atspoguļoti aprēķina rezultāti.



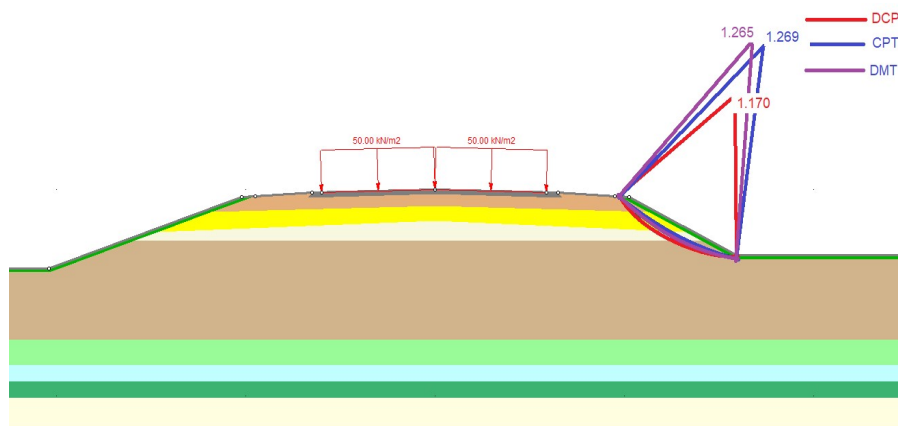
4.25. attēls. Konstrukcijas deformācijas rezultāti (35,08km)

Saskaņā ar iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākās deformācijas rodas vājas nestspējas un mālaino/saistīto grunšu slāņos. DMT izpētei viszemākās nestspējas grunts slānis atrodas 5,60 metru dziļumā, kurā rodas 45% no kopējām deformācijām. Sēšanās aprēķinā, izmantojot DCP interpretācijas, deformāciju attīstība ir vienmērīga, jo deformācijas moduļa izmaiņas ir minimālās.

Konstrukcijas deformācijas, izmantojot CPT datus, noteiktas 0,50 cm apmērā, izmantojot DMT datus 2,60 cm apmērā, bet, izmantojot DCP datus, noteiktas 3,80 cm apmērā. Iegūto rezultātu atšķirības ir minimālas, piemēram, salīdzinot CPT un DCP deformāciju apjomus atšķirības ir 3,30cm apjomā. Konstrukcijas sēšanās apjoms ir nenozīmīgs, kas izskaidrojams ar to, ka, lai gan ģeotehniskās izpētes urbumā tika konstatēti divi kūdras slāņi, to fizikāli mehāniskās īpašības zondes datu interpretācijās noteiktas salīdzinoši augstas. Ņemot vērā, ka iegūto rezultātu atšķirība ir neliela, atšķirīgas metodes izvēle neiespajda projekta risinājumus.

Lai noskaidrotu, cik būtisku ietekmi uz ceļa un uzbēruma konstrukcijas nogāzes stabilitāti izraisa grunts slāņu saistes, iekšējā berzes leņķa un tilpumsvara parametru atšķirības tika

izstrādāts nogāžu stabilitātes aprēķina modelis. Aprēķinā pielikta izkliedēta transporta slodze un ņemtas vērā grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības un slāņu biezumi atbilstoši 4.23. attēlam. Aprēķinos izmantoti Eirokodeksa 7 parciālie koeficienti - projektēšanas pieeja 1, kombinācija 2. Aprēķina rezultāti, izmantojot interpretētās grunts slāņu parametru vērtības, ir parādītas 4.26. attēlā.



4.26. attēls. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (35,08km)

Kā redzams no 4.26. attēla rezultātiem, nogāzes stabilitāte ir nodrošināta ar visām izpētes metodēm. Aprēķini, izmantojot statistiskās zondes un dilatometra izpētes datus, uzrāda vienādu nogāžu stabilitātes drošības koeficientus, kā arī par 8% lielākus salīdzinājumā ar aprēķina rezultātiem izmantojot dinamiskās zondes datus. Autoceļa konstrukcijas uzbērums šajā izpētes punktā bija 1,5m augsts, līdz ar to uzbēruma pašsvara ietekme uz dabīgās zemes klātnes gultni bija neliela. Ģeotehniskās izpētes urbumā tika noteiktas vājas nestspējas grūtis, tomēr, veicot zondēšanas metožu interpretācijas, tika konstatēts, ka kūdras slāņa parametri ir atbilstoši un spēj nodrošināt ceļa kalpotspēju. Šī iemesla dēļ slīdvirsma ar viszemāko nogāžu stabilitātes koeficientu veidojas tieši ceļa nogāzes daļā. Tas skaidrojams ar faktu, ka smilšaino grunšu iekšējās berzes leņķis atbilst nogāzes slīpumam 1:1,5.

Pētījuma ietvaros visos apskatītajos izpētes punktos tika veikti trīs dažādi zondēšanas metožu testi. Pēc urbumu datiem tika noteikts, ka katrā no punktiem tika konstatētas vājas nestspējas grūtis, kuras visbiežāk ir galvenais faktors, kādēļ ceļa konstrukcijā attīstās dažādas deformācijas. Pēc veikto nogāzes stabilitātes un konstrukcijas sēšanās aprēķinu rezultātu analīzes secināts, ka CPT datu interpretācijas uzrādīja visaugstākās grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības.

Grunts slāņu saspiežamību/konsolidāciju vislabāk izsaka Junga elastības un ierobežoto deformāciju moduļi, kuriem pastāv savstarpēja korelācija. Samazinoties šim parametram būtiski palielinās grunts slāņa saspiežamība un līdz ar to sagaidāmo deformāciju apjoms. Salīdzinot ierobežotā deformācijas moduļa vērtības, noteikts, ka statistiskās zondes (CPT) izpēte uzrāda

aptuveni 10 reizes augstāku stiprību par DCP un līdz 3 reizēm augstāku stiprību par DMT interpretētajām vērtībām.

Atbilstoši noteiktajiem grunts slāņu saspiežamību/konsolidācijas parametriem atšķiras arī sagaidāmās konstrukcijas sēšanās apjoms, kura atšķirība ir aptuveni tikpat liela, kāda tā bija savstarpēji salīdzinot izpētes metožu deformācijas moduļu vērtības. Vislielākais ceļa konstrukcijas sēšanās apjoms – 22,2cm noteikts pirmajā izpētes punktā izmantojot dinamiskās zondes datus. Šajā punktā aprēķins izmantojot CPT izpētes datus uzrādīja 1,23cm, bet DMT 5,80 cm. Ņemot vērā, ka aptuveni 60-90% no kopējās konstrukcijas sēšanās attīstās vājas nestspējas grunts slānī, vislielāko ietekmi uz veikto aprēķinu rezultātiem radīja vājas nestspējas grunts slāņa interpretāciju atšķirības.

Ņemot vērā, ka ceļa uzbūruma augstums visos izpētes punktos bija salīdzinoši mazs, līdz ar to nogāžu stabilitāte tika nodrošināta gandrīz visos aprēķinos, izņemot pirmajā izpētes punktā izmantojot DCP interpretācijas. Otrajā un trešajā izpētes punktā CPT un DMT metodes uzrādīja vienādu nogāžu stabilitātes drošības koeficientu, kā arī par 30% un 8% lielāku nekā DCP aprēķini. Dinamiskā zonde nodrošina vismazāko nogāžu stabilitāti, jo tās interpretācijas uzrādīja viszemākās grunts slāņu un it sevišķi vājas nestspējas grunts fizikāli mehāniskās īpašības.

Pēc iegūto rezultātu analīzes var secināt, ka ģeotehniskās izpētes metodes izvēle var būtiski iespaidot projekta risinājumus un kopējās būvniecības izmaksas, kā arī radīt situāciju, ka izstrādātie projekta risinājumi nespēj nodrošināt ceļa kalpotspēju.

Lai noteiktu zondēšanas metožu interpretāciju precizitāti un nepieciešamības gadījumā veiktu interpretēto grunts slāņu īpašību korekciju, ģeotehniskās izpētes laikā ieteicams veikt ometra laboratorijas vai līdzvērtīgus testus. Tādējādi būtu iespējams pārbaudīt vai izstrādātie risinājumi, balstīti uz konservatīvām, atbilstošām vai arī netipiski augstām grunts slāņu fizikāli mehāniskajām īpašībām.

4.1.CPT, DMT un DCP testa metožu salīdzinājums, analizējot testa laukumā veiktās izpētes.

Promocijas darba ietvaros tika izveidots ģeotehniskās izpētes testa laukums, kurā tika veikti lauka izpētes testi, paņemti laboratorijas paraugi un veikta iegūto datu apstrāde un analīze. Tika sagatavots testēšanas lauks, kurā piecos punktos tika dublētas dažādas lauka izpētes metodes (CPT, DMT, (DCP - viegls, vidējs un ļoti smags). Papildus lauka pētījumiem tika veikti vairāki ometra un tiešās bīdes laboratorijas testi. Iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar zondēšanas metožu interpretētajām grunts slāņu īpašībām.

Grunts ir materiāls, kam raksturīga augsta parametru un īpašību neviendabība un mainīgums. Lai nodrošinātu drošus, ekonomiskus un videi draudzīgus projektu risinājumus un novērtētu katra pētījuma precizitāti/iespējamo pielietojamību tika salīdzināti ģeotehniskajā izpētē iegūtie fizikāli-mehāniskie parametri. Vispārējā datu analīze tika izmantota kā ģeotehniskā modeļa ievades dati.

Pamatojoties uz publicētām sakarībām, ar iegūto datu interpretācijas palīdzību tika aprēķināti, korelēti un noteikti grunts slāņu parametri. Publicētās korelācijas parasti balstās uz

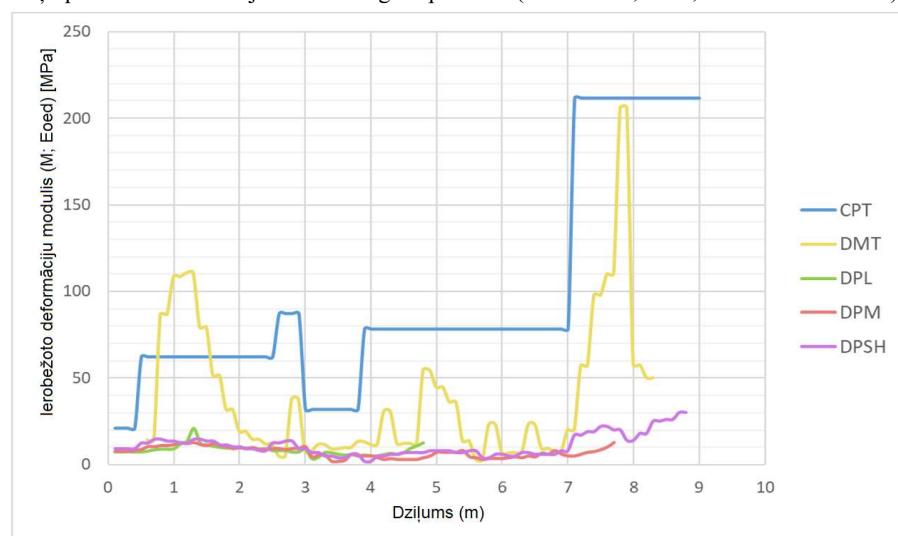
teorētisku un daļēji empīrisku koncepciju kombināciju. Ierobežotā deformācijas moduļa un citu parametru interpretāciju metodes ir parādītas 4.5. tabulā.

4.5. tabula. Izmantotās interpretāciju metodes

Parametrs		CPT	DMT	DCP
Ierobežoto deformāciju modulis	M	Robertson (2009)	S. Marchetti (1980)	Stroud
Nedrenētas bīdes pretestība	Su	Moon (2018)	S. Marchetti (1980)	Schmertmann 1975
Iekšējās berzes leņķis	Φ	Mayne (2006)	S. Marchetti (1980)	Sowers (1961)
Grunts tilpumsvars	γ	Robertson (2010)	Marchetti, S. and Crapps, D.K. (1981)	Meyerhof (1956)

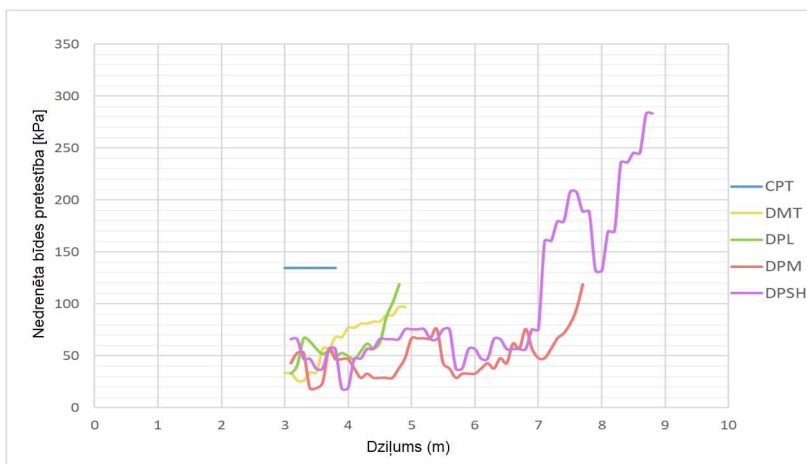
4.1.1. Izpētes punktos iegūto rezultātu interpretācijas

Pirmajā pētījuma punktā iegūto rezultātu interpretācijas ir apkopotas un attēlotas, lai grunts slāņu parametru salīdzinājums būtu viegli saprotams. (Skatīt 4.27.; 4.28.; 4.29. un 4.30. attēlu).



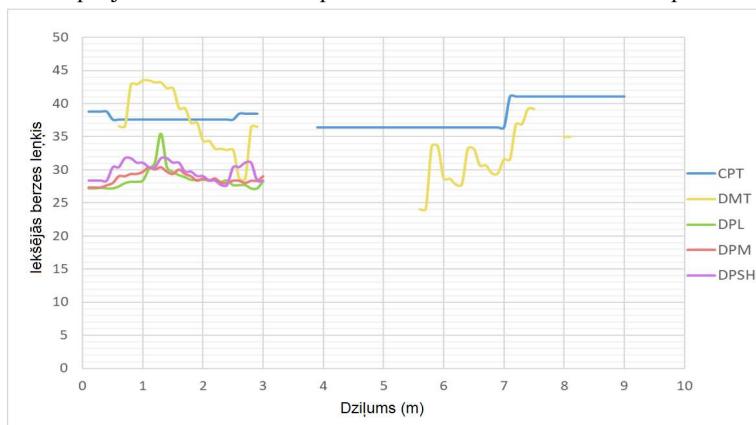
4.27. attēls. Ierobežoto deformāciju modulis pirmajā izpētes punktā

Salīdzinot 4.27. attēlā iegūtos rezultātus, redzams, ka statiskā konusa iespiešanās testa (CPT) izpēte uzrāda lielākās ierobežotā deformācijas moduļa stiprības vērtības. Smilšainās gruntīs CPT vērtības ir vidēji par 428% augstākas nekā DMT izpētei un par 825% augstākas nekā DCP izpētei. Mālainās gruntīs CPT vērtības ir vidēji par 315% augstākas nekā DMT izpētei un par 1145% augstākas nekā DCP izpētei.



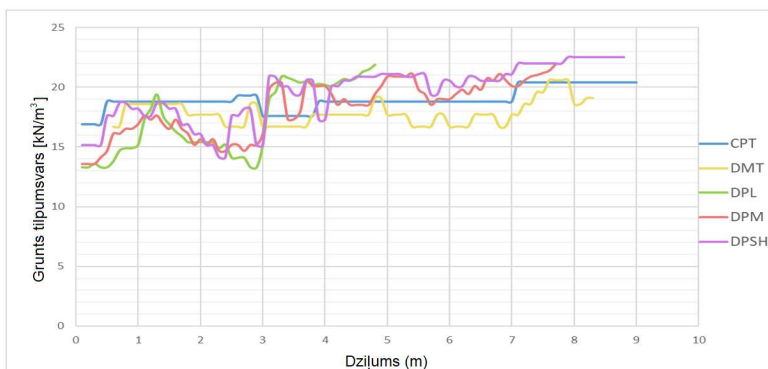
4.28. attēls. Nedrenētas bīdes pretestības vērtības pirmajā izpētes punktā

Salīdzinot iegūtos nedrenētas bīdes rezultātus, redzams, ka ar dažādām metodēm mālainās grunts tika noteiktas dažādos slāņu biezumos un dziļumos. Pēc urbuma datiem mālainie grunts slāņi konstatēti intervālā no 3,00 līdz 9,00 m dziļumam. Ar CPT izpētes metodi tika noteikts vismazākais mālaino grunts slāņu biezums. Konusa iespiešanās testa noteiktās nedrenētās bīdes stiprības vērtības bija 2 reizes augstākas nekā tās, kas noteiktas ar citām pētījumu metodēm. DMT un DCP pētījumos tika noteiktas aptuveni vienādas nedrenētas bīdes stiprības vērtības.



4.29. attēls. Iekšējā berzes leņķa vērtības pirmajā izpētes punktā

Salīdzinot 4.29. attēlā iegūtos rezultātus, redzams, ka statiskā konusa iespiešanās (CPT) testa un plakanā dilatometra (DMT) testa izpētes uzrāda augstākās berzes leņķa vērtības pirmajos trīs pētījuma metros. Dziļākos grunts slāņos visaugstākās vērtības uzrādīja CPT izpēte. Salīdzinot interpretētās iekšējā berzes leņķa vērtības, tika konstatēts, ka CPT metode noteica par 10% lielākas vērtības nekā DMT izpēte un par 25% lielākas nekā DCP izpēte.



4.30. attēls. Grunts tilpumsvara vērtības pirmajā izpētes punktā

Saskaņā ar 4.30. attēla datiem grunts slāņu tilpumsvara vērtības, urbuma ietvaros, visām izpētes metodēm ir ļoti mainīgas, taču, ņemot vērā vidējos rādītājus, visas metodes nodrošina salīdzinoši līdzīgus parametrus.

Lai labāk atspoguļotu ar visām pētījumu metodēm iegūtās grunts parametru vērtības un to savstarpējās atšķirības, visi apstrādātie dati ir parādīti 4.6. tabulā. Dinamiskās zondes izpēti apkopotas vidējās vērtības, kas iegūtas, ņemot vērā visas trīs ierīces variācijas.

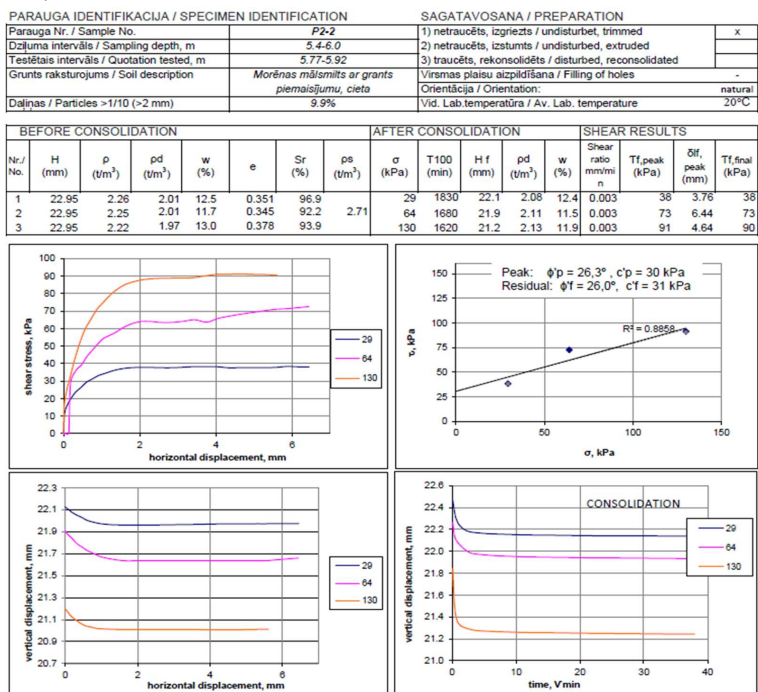
4.6. tabula.

Grunts slāņu vidējās vērtības

Izpētes punkts	Parametrs	CPT	DMT	DCP
1.	M [MPa]	97,4	38,8	9,5
	Su [kPa]	134,5	64,5	71
	Φ [°]	38,1	34,8	29,2
	γ [kN/m ³]	18,97	17,85	18,32
2.	M [MPa]	52,7	25,5	9,5
	Su [kPa]	94,8	55,6	80,9
	Φ [°]	38,9	39,8	29,3
	γ [kN/m ³]	18,11	17,14	19,19
3.	M [MPa]	43,9	14,0	7,8
	Su [kPa]	33,3	20,0	14,4
	Φ [°]	36,3	33,3	31,0
	γ [kN/m ³]	16,14	16,8	17,2
4.	M [MPa]	36,1	22,4	14,3
	Su [kPa]	252,7	72,3	147,8
	Φ [°]	35,6	40,6	28,4
	γ [kN/m ³]	17,9	17,4	17,4
5.	M [MPa]	43,9	59,1	14,0
	Su [kPa]	164,4	70	143,5
	Φ [°]	38,4	41,4	30,6
	γ [kN/m ³]	18,03	18,07	18,82

Lai pārliecinātos par noteikto grunts slāņu parametru precizitāti un atbilstību reālajai situācijai dabā, tika veikts laboratorijā noteikto un interpretēto grunts slāņu īpašību salīdzinājums. Pirmajā izpētes punktā veikta viena ometra laboratoriskā pārbaude, paraugs ņemts dziļuma intervālā no 8,22 līdz 8,26m. Pēc ometra pārbaudes datiem grunts dabiskais efektīvais spiediens, kas iedarbojas uz paraugu, bija 83 kPa, līdz ar to tika noteikts, ka grunts ierobežoto deformāciju modulis ir 11,1 MPa. Salīdzinot laboratorisko izmeklējumu rezultātus ar CPT, DMT un DCP interpretācijām, tika secināts, ka konkrētajā diapazonā CPT tests ir noteicis $M = 211,5$ MPa; DMT tests ir noteicis $M = 50,1$ MPa un DCP tests ir noteicis $M = 18,2$ MPa. Vērtību atšķirības ir būtiskas un var ietekmēt projektēto konstrukciju drošību.

Otrajā izpētes punktā tika veikti divi tiešās bīdes testi. Seklākais paraugs ņemts dziļuma intervālā no 5,77 līdz 5,92 m. Pēc tiešās bīdes testa datiem grunts dabiskais efektīvais spiediens, kas iedarbojas uz paraugu, bija 64 kPa, līdz ar to tika noteikts, ka grunts slāņa bīdes pretestība bija 73 kPa, skatīt 4.32. attēlu.



4.32. attēls. Tiešo bīdes testa rezultāti otrajā izpētes punktā

Salīdzinot tiešās bīdes testa rezultātus ar CPT, DMT un DCP interpretācijām, var secināt, ka konkrētajā diapazonā CPT tests ir noteicis $S_u = 94,8$ kPa; DMT tests ir noteicis $S_u = 61$ kPa un DCP tests ir noteicis $S_u = 52$ kPa. Statiskā konusa iespiešanās tests noteica labāku nedrenētās bīdes pretestību salīdzinājumā ar tiešo bīdes testu.

Lai labāk atspoguļotu laboratorijas un lauka testu pārbaudēs iegūtās grunts parametru vērtības un to savstarpējās atšķirības, visi apstrādātie dati ir parādīti 4.7. tabulā. Dinamiskajai zondei vidējās vērtības apkopotas, ņemot vērā visas trīs iekārtas variācijas.

4.7. tabula. Laboratorijas un lauka testu rezultātu salīdzinājums

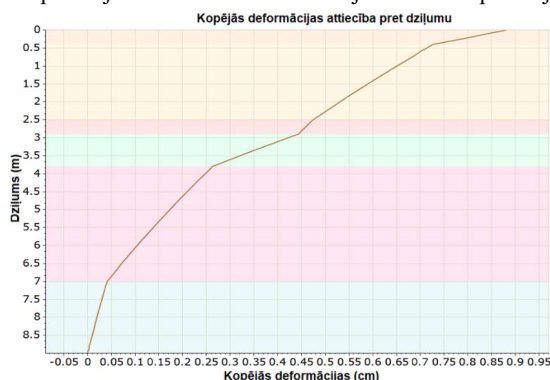
Izpētes punkts	Parametrs	Laboratorija	CPT	DMT	DCP
P1-2	M [MPa]	11,1	211,5	50,1	18,2
P2-2	M [MPa]	5,5	25,8	4,3	6,1
P2-4	M [MPa]	6,7	25,8	5,9	6,6
P3-3	M [MPa]	0,6	5,4	3,7	2
P2-2	Su [kPa]	73	94,8	61	52
P2-6	Su [kPa]	79	94,8	51	110
P3-3	Su [kPa]	44	28,3	28	20

Analizējot 4.7. tabulas datus, tika secināts, ka statiskā konusa iespēšanās testa (CPT) metode noteica labākus grunts slāņu parametrus, salīdzinot ar laboratorijas testu datiem. DMT un DCP metožu rezultāti bija līdzvērtīgi un tikai nedaudz atšķīrās no laboratorijas datiem. Var secināt, ka CPT datu interpretācijas noteica labākus grunts parametrus, nekā tie ir patiesībā. Lai izvairītos no šādām problēmām projekta izstrādes gaitā, papildus zondēšanai nepieciešams veikt laboratoriskās pārbaudes, verificēt iegūtos interpretāciju rezultātus un, ja nepieciešams, veikt datu korekciju.

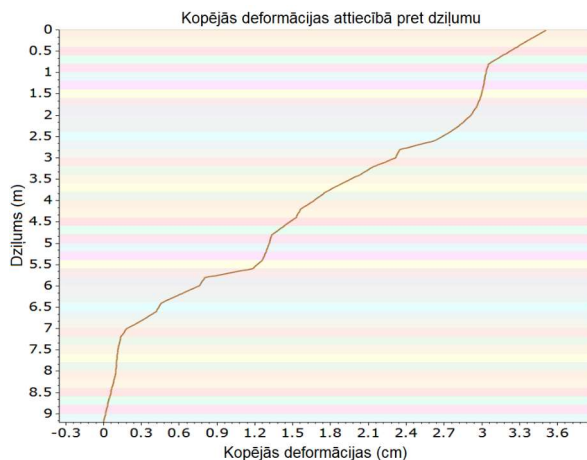
4.1.3. Konstruktijas sēšanās aprēķins izmantojot interpretētās grunts īpašības

Sēšanās rodas grunts konsolidācijas rezultātā, ko izraisa tukšumu vai attāluma samazināšanās starp grunts daļiņām pieliktās slodzes vai mitruma satura izmaiņu dēļ. Aprēķiniem izmantota īpaši izstrādāta aprēķinu programma/programmatūra, kurā iespējams precīzi definēt visus ievades parametrus, kā arī ņemt vērā parciālos faktorus. Visiem konstruktijas sēšanās aprēķiniem tika pieņemts nemainīgs konstruktīvais risinājums. Tika pieņemts, ka vieta, kur tika uzsākta zondēšana, ir esošā zemes klātne un uz tās ir izbūvēts 2 m augsts ceļa uzbērums. Papildus uzbēruma slodzei ir pielikta izklidēta transporta slodze 50 kN/m². Ceļa uzbērums izbūvēts ar nogāžu slīpumu 1:2. Aprēķinos tika izmantoti 7. Eirokodeksa parciālie faktori - 1. projekta pieceja, 2. kombinācija.

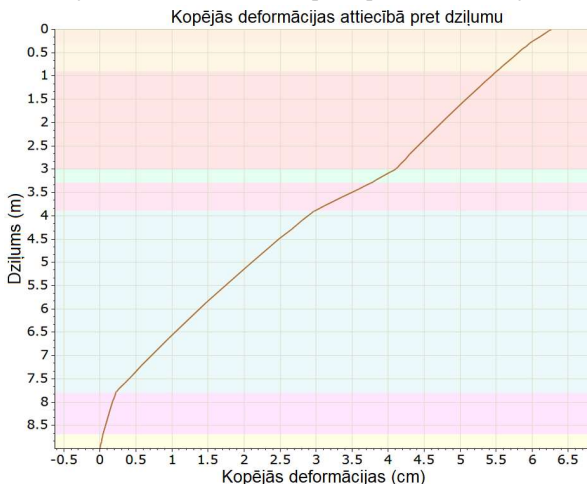
Aprēķinu rezultāti 1. izpētes punktā izmantojot CPT interpretācijas attēloti 4.33. attēlā, izmantojot DMT interpretācijas 4.34. attēlā un izmantojot DCP interpretācijas 4.35. attēlā.



4.33. attēls. Konstruktijas sēšanās rezultāti 1. izpētes punktā, izmantojot CPT interpretācijas



4.34. attēls. Konstruktijas sēšanās rezultāti 1. izpētes punktā, izmantojot DMT interpretācijas



4.35. attēls. Konstruktijas sēšanās rezultāti 1. izpētes punktā, izmantojot DCP interpretācijas

Saskaņā ar visu trīs aprēķinu iegūtajiem rezultātiem lielākās deformācijas rodas, izmantojot grunts slāņu parametrus no DCP interpretācijām. Tika noteikti konkrēti konstruktijas sēšanās apjomi:

- 0,88 cm izmantojot CPT datus;
- 3,51 cm izmantojot DMT datus;
- 6,26 cm izmantojot DCP datus.

Atšķirība starp iegūtajiem konusa iespiešanās testa (CPT) un dinamiskā penetrometra testa (DCP) rezultātiem bija 5,38 cm jeb aptuveni 7,1 reizes, bet starp iegūtajiem CPT un DMT rezultātiem bija 2,63 cm jeb aptuveni 4 reizes.

Tāpat kā pirmajā izpētes punktā, visos izpētes punktos tika veikti būvniecības sēšanās aprēķini. Aprēķinu rezultāti ir apkopoti 4.8. tabulā.

4.8. tabula. Aprēķināto konstrukcijas sēšanās rezultātu salīdzinājums

Izpētes punkts	Parametrs	CPT	DMT	DCP
1	Deformācija [cm]	0,88	3,51	6,26
2	Deformācija [cm]	1,43	6,68	5,64
3	Deformācija [cm]	5,67	14,20	30,20
4	Deformācija [cm]	1,96	4,87	11,10
5	Deformācija [cm]	1,36	2,10	5,38

Analizējot 4.8. tabulas datus, secināts, ka aprēķins, izmantojot statiskā konusa iespiešanās testa (CPT) metodes datus, noteica mazākās konstrukcijas sēšanās. Saskaņā ar visu aprēķinu iegūtajiem rezultātiem lielākās deformācijas rodas, izmantojot DCP metodes interpretētos grunts parametrus.

Lielākais konstrukcijas sēšanās apjoms tika noteikts 3. izpētes punktā, izmantojot dinamiskās zondes datu interpretācijas, un tas bija 30,20 cm. Atšķirības starp iegūtajiem CPT un DCP rezultātiem bija aptuveni 5,2 reizes, starp iegūtajiem CPT un DMT rezultātiem bija aptuveni 2,8 reizes, un starp iegūtajiem DMT un DCP rezultātiem bija aptuveni 1,9 reizes. Salīdzinot trešajā izpētes punktā iegūtos rezultātus, redzams, ka kopējo deformāciju apjoma atšķirības ir lielas. Ņemot vērā, ka iepriekš tika noteikts, ka CPT metodes interpretācijas noteica augstākas grunts slāņu ierobežotā deformācijas moduļu vērtības salīdzinot ar laboratorijas testu datiem, var secināt, ka aprēķins, izmantojot CPT testa datu interpretācijas, dod optimistiskāku konstrukcijas sēšanās rezultātus nekā sagaidāms. Tas var radīt risku, ka pēc būvdarbu pabeigšanas konstrukcijā attīstīsies neparedzētas deformācijas, kuras nav iespējams noteikt ar aprēķiniem neprecīzi noteikto grunts slāņu īpašību dēļ.

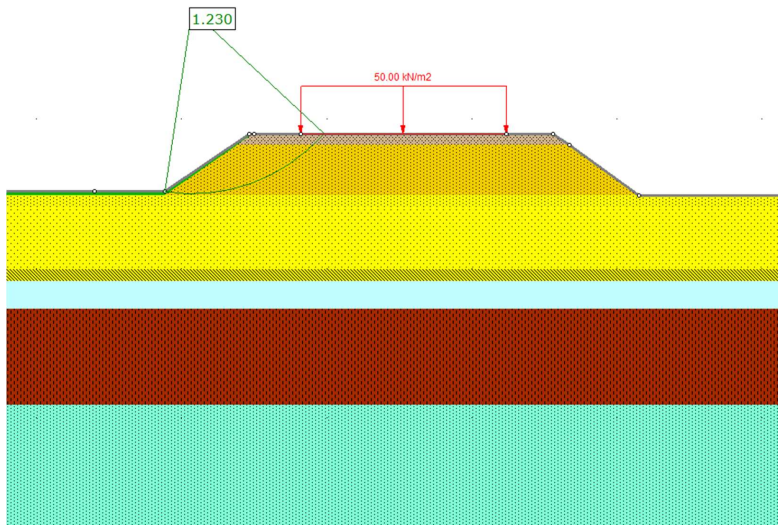
4.1.4. Nogāzes stabilitātes aprēķins izmantojot interpretētās grunts īpašības

Inženierbūvju projektiem, piemēram, ēkām, tiltiem, dambjiem un ceļiem, projektēšanas procesa ietvaros ir nepieciešama detalizēta informācija par zemes klātni un ģeotehnisko situāciju. Zemes klātnē atbalsta visas konstrukcijas un, lai nodrošinātu to ilgmūžību, grunts slāņi zemes klātnē zem pieliktās konstrukcijas slodzes nedrīkst zaudēt savu nestspēju. Ir svarīgi noteikt grunts tipu, jo pēc tā ir iespējams prognozēt, kā konkrētais grunts slānis reaģēs uz pielikto slodzi un vai materiāla nestspēja ir pietiekama, lai uzņemtu pamata pašsvara slodzi.

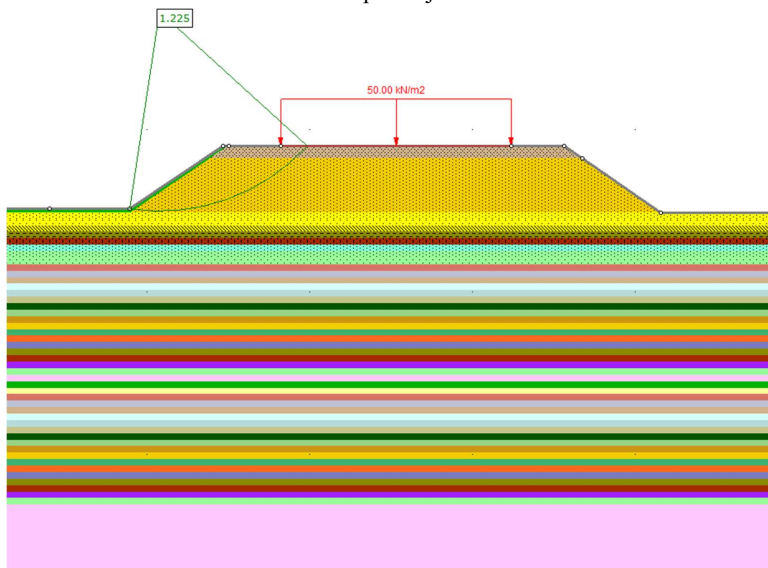
Analītiskajiem nogāzes stabilitātes aprēķiniem tik izmantota Bišopa metode, kura atzīta par pietiekami precīzu, nodrošinot nelielas novirzes no faktiskā nogāžu drošības koeficienta. Tā ir viena no vairākām šķēlumu metodēm, kas izstrādātas, lai novērtētu nogāžu stabilitāti. Galvenais pieņēmums ir tāds, ka nogāžu stabilitāte ir pietiekama, ja pretestības spēki, kas darbojas, ir lielāki nekā virzošie spēki.

Nogāžu stabilitātes noteikšanai visiem aprēķina modeļiem ir pieņemts viens un tas pats konstruktīvais risinājums. Tika pieņemts, ka vieta, kur tika uzsākta zondēšana, ir esošā zemes klātne un uz tās ir izbūvēts 2 m augsts ceļa uzbērums. Papildus uzbēruma slodzei ir pielikta izklidēta transporta slodze 50 kN/m². Ceļa uzbērums izbūvēts ar nogāžu slīpumu 1:2.

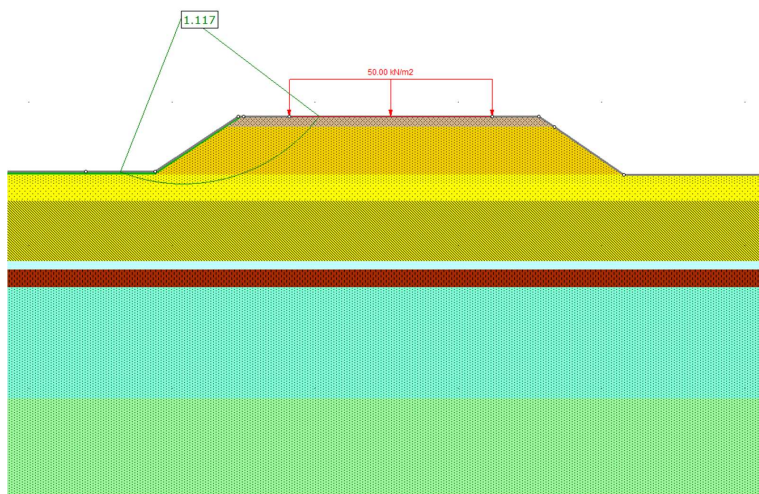
Aprēķinos tika izmantoti 7. Eirokodeksa daļējie faktori - 1. projekta pieeja, 2. kombinācija. Aprēķinu rezultāti pirmajā izpētes punktā, izmantojot CPT interpretācijas, parādīti 4.36. attēlā, aprēķini, izmantojot DMT interpretācijas, parādīti 4.37. attēlā, un aprēķini, izmantojot DCP interpretācijas, ir parādīti 4.38. attēlā.



4.36. attēls. Nogāzes stabilitātes rezultāti, izmantojot grunts parametrus no CPT interpretācijām



4.37. attēls. Nogāzes stabilitātes rezultāti, izmantojot grunts parametrus no DMT interpretācijām



4.38. attēls. Nogāzes stabilitātes rezultāti, izmantojot grunts parametrus no DCP interpretācijām

Nogāžu stabilitāti visvairāk ietekmē grunts slāņu bīdes pretestība un iekšējās berzes leņķis. Kā secināts 4.5.1. nodaļā, statistiskā konusa iespiešanās testa (CPT) interpretācijas uzrādīja vislielāko nedrenētas bīdes pretestību.

Ar aprēķinu palīdzību tika noteiktas un uzzīmētas slīdvirsmas ar zemāko nogāžu stabilitātes drošības koeficientu. Salīdzinot visus, pirmā izpētes punkta aprēķinus, noteikts, ka atšķirība starp drošības koeficientiem ir minimāla. Ar aprēķina modeli noteiktie nogāžu stabilitātes drošības koeficienti, izmantojot CPT un DMT grunts parametru interpretācijas, bija vienādi. Rezultātu atšķirība starp CPT, DMT un DCP ir 10% (DMT – Fsafety = 1,225; CPT – Fsafety = 1,230; DCP – Fsafety = 1,117).

Tāpat kā pirmajā izpētes punktā, visos pētījuma punktos tika veikti konstrukcijas nogāzes stabilitātes aprēķini. Aprēķinu rezultāti ir apkopoti 4.9. tabulā.

4.9. tabula. Aprēķināto nogāzes stabilitātes rezultātu salīdzinājums

Izpētes punkts	Parametrs	CPT	DMT	DCP
1	Drošības koeficients	1,23	1,225	1,117
2	Drošības koeficients	1,23	1,22	1,121
3	Drošības koeficients	1,239	0,766	0,519
4	Drošības koeficients	1,23	0,834	0,704
5	Drošības koeficients	1,24	1,25	1,06

Analizējot 4.9. tabulas datus, tika noteikts, ka nogāzes stabilitāte, izmantojot statistiskā konusa iespiešanās testa (CPT) interpretācijas datus, ir nodrošināta visos piecos izpētes punktos. Ņemot vērā, ka iepriekš tika noskaidrots, ka CPT metode noteica labākas grunts slāņu nedrenētas bīdes pretestības vērtības, salīdzinot ar laboratorijas testu datiem, var secināt, ka aprēķins, izmantojot CPT testa datu interpretācijas, dod optimistiskākus nogāzes stabilitātes rezultātus, nekā tika patiesībā sagaidāms.

Dinamiskās zondes metode uzrādīja zemākās grunts parametru interpretācijas, kā arī lielākās konstrukcijas deformācijas, tāpēc likumsakarīgi, ka lielākās nogāzes stabilitātes problēmas tika noteiktas, veicot aprēķinus, izmantojot DCP interpretācijas. Trešajā un ceturtajā izpētes punktā, izmantojot DMT un DCP metodes datus, nogāžu stabilitāte netika nodrošināta.

Gan DMT, gan DCP aprēķini apstiprināja, ka vertikālās konstrukcijas deformācijas ir cieši saistītas ar nogāzes stabilitāti. Nogāžu stabilitāte netika nodrošināta tieši tajos izpētes punktos, kur noteiktas lielākās konstrukcijas sēšanās/konsolidācija.

Analizējot grunts slāņu interpretācijas datus, tika secināts, ka statiskā konusa iespīšanās testa (CPT) metode visos izpētes punktos uzrādīja augstākās vidējās grunts slāņu ierobežotā moduļa un nedrenētas bīdes pretestības vērtības.

Statiskā konusa iespīšanās testa (CPT) metodes interpretācijas noteica labākus grunts slāņu parametrus salīdzinājumā ar citām lauku izpētes metodēm un laboratorijas testu datiem. Lai izvairītos no šādām problēmām projekta izstrādes gaitā, papildus zondēšanai nepieciešams veikt laboratoriskās pārbaudes, pārbaudīt iegūto interpretāciju rezultātus un nepieciešamības gadījumā veikt datu korekciju.

CPT testa datu interpretācijas sniedz optimistiskākus konstrukcijas sēšanās un nogāzes stabilitātes rezultātus, nekā patiesībā gaidīts. Tas var radīt risku, ka pēc būvdarbu pabeigšanas rodas neparedzētas konstrukciju deformācijas, kuras nav iespējams noteikt ar aprēķiniem neprecīzi noteikto grunts slāņu īpašību dēļ.

Dinamiskās zondes metode uzrādīja zemākās grunts parametru interpretācijas, kā arī lielākās konsolidācijas deformācijas un nogāžu stabilitātes problēmas. Ģeotehniskie risinājumi, kas izstrādāti, pamatojoties uz DCP interpretācijām, nodrošina lielāku konstrukcijas drošību, salīdzinot ar CPT un DMT, bet arī palielina būvniecības izmaksas.

Ar DMT metodi interpretētās grunts slāņu parametru vērtības bija līdzvērtīgas un tikai nedaudz atšķirās no laboratorijas datiem. Līdz ar to varam secināt, ka DMT metode nodrošināja visprecīzākos ģeotehniskās izpētes datus, kurus nepieciešams aprēķinu veikšanai un projekta risinājumu izstrādei. CPT metode uzrādīja pārāk labas grunts īpašības, savukārt DCP metode sniedza konservatīvus datus.

Vertikālās konstrukcijas deformācijas ir cieši saistītas ar nogāzes stabilitāti. Nogāžu stabilitāte netika nodrošināta izpētes punktos, kuros tika noteikts lielākais sēšanās apjoms.

CPT izmeklēšanas metodei ir nepieciešama padziļināta izpēte, lai pārbaudītu, vai izstrādātās interpretācijas ir piemērotas grunts tipiem mūsu klimatiskajos un ģeogrāfiskajos apstākļos. Lielākie pētījumi par CPT korelācijām ir veikti galvenokārt ASV, tāpēc ir jāpārliecinās, vai izstrādātās CPT grunts slāņu interpretācijas formulas/metodes ir atbilstošas, vai arī ir nepieciešams izmantot Eirokodeksā piedāvātos grunts parametru koeficientus.

5. SATIKSMES SLODZES MODELIS CEĻA KONSTRUKCIJAS ĢEOTEHNISKAJAI PROJEKTĒŠANAI

Pasaulē ir izstrādātas dažādas, pārsvarā empīriskas, ceļa konstrukcijas aprēķina metodes, ar kuru palīdzību nosaka ceļa segas kārtu skaitu, biezumu un citus parametrus. Esošā un perspektīvā satiksmes intensitāte, kā arī tās sastāvs ir svarīgākie izejas lielumi, lai noteiktu, cik liela ceļa konstrukcijas nestspēja ir jānodrošina. Ņemot vērā, ka aprēķinu metodes ir dažādas, atšķiras arī pieņemtā aprēķina satiksmes slodzes, transporta slodzes sadalījuma klases un redukcijas koeficienti.

Autoceļa konstrukcijas risinājumu izstrāde ir sarežģīta un to kalpotspēja ir atkarīga no dažādiem faktoriem - satiksmes intensitātes un transporta slodzes, gruntsūdeņu un/vai mitruma avotu ietekmes, zemes klātnes grunts slāņu parametriem, sala ietekmes. Lai analizētu visus šos faktorus, viens no svarīgākajiem ceļu projektēšanas etapiem ir esošās situācijas analīze, kas ietver ģeotehnisko izpēti, satiksmes intensitātes prognozi un esošās ceļa konstrukcijas vizuālo novērtējumu. Ceļa segas konstrukcijas aprēķins tiek veikts, balstoties uz zemes klātnes/esošā pamata virsmas nestspēju. Netiek analizētas zemes klātnē esošo grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības, līdz ar to ceļa posmos, kuros ģeotehniskajā izpētē vai vizuālajā ceļa novērtējumā konstatētas deformācijas vai zemas stiprības grunts, lai nodrošinātu autoceļa ilgmūžību un kalpotspēju, ir jāveic ģeotehniskie aprēķini.

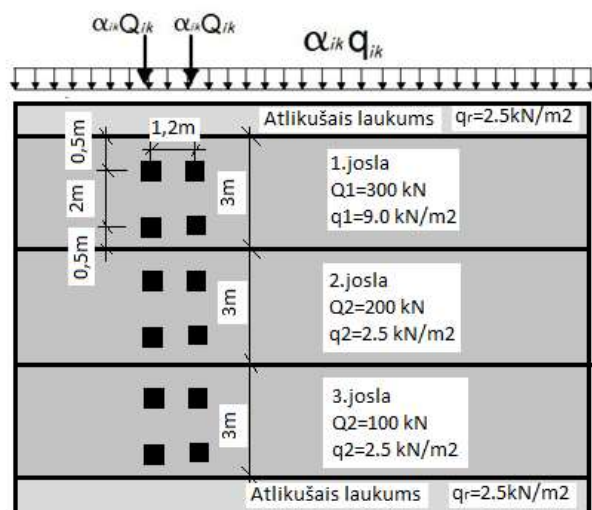
Ceļu konstrukcijām visbiežāk tiek veikti nogāžu stabilitātes un deformācijas/konsolidācijas aprēķini, kā arī nepieciešamības gadījumā tiek izstrādāti ģeotehniskie, zemes klātnes pastiprināšanas risinājumi. Atšķirībā no tiltu projektēšanas standartiem un metodoloģijām, kas nosaka slodžu kombinācijas, ģeotehnisko aprēķinu standarti un metodikas nenosaka aprēķinos pielietojamo satiksmes slodzi vai slodžu kombināciju. Izstrādājot aprēķinus, projektētājs pats nosaka pieņemto slodzi, tāpēc izstrādātie aprēķini un risinājumi var atšķirties, definējot citu satiksmes slodzi vai slodžu kombināciju. Pastāv iespēja aprēķinos izmantot tilta projektēšanai noteikto tandēma slodzi, pārveidojot to izkliedētā slodzē, taču, ņemot vērā, ka ceļa konstrukcija nav stinga, slodzes izkliede grunts slāņos atšķiras no slodzes izkliedes būvkonstrukcijās.

5.1. Satiksmes slodzes modelis

Projektētājiem veicot ceļa uzbērumsu projektēšanu ir grūtības definēt satiksmes slodzi, kuru izmantot ģeotehniskajiem aprēķiniem. Tas ir īpaši redzams, projektējot sarežģītus ģeotehniskos risinājumus (pāļi, grunts kolonnas, ģeosintētisko materiālu izmantošana un citi risinājumi) uzbērumiem un konstrukcijām, kas būvētas uz vājas nestspējas gruntīm, lai ievērotu inženiertehniskās prasības attiecībā uz servisa (SLS) un nestspējas (ULS) robežstāvokļiem. Satiksmes slodzei ir sarežģīts raksturs, un tāpēc tās ir grūti kodificēt. Tas atspoguļojas dažādās valstīs pieņemtajās pieejās un slodzes vērtībās [63].

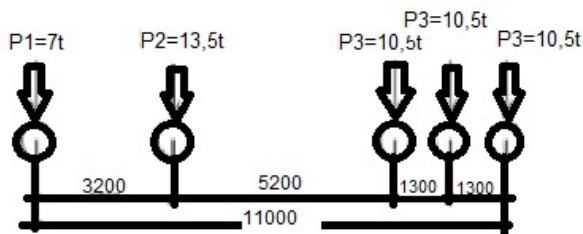
Autoceļu un tiltu projektēšana ir ļoti atšķirīga. Ceļa seguma konstrukcija nav stinga, līdz ar to var veidoties dažādas, tai skaitā lokālas deformācijas, savukārt tiltu un citu būvju konstrukcijas ir stingas, jo tām jāspēj izturēt kritiskās slodzes, neveidojot deformācijas. Ņemot vērā, ka deformācijas būvkonstrukcijās var radīt nestspējas zudumu un izraisīt tās sabrukumu,

tiltu projektēšanā ir definētas aprēķinu slodzes un to kombinācijas. Daudzviet pasaulē arī ģeotehniskajiem aprēķiniem tiek izmantota tiltu tandēma slodze, kas definēta saskaņā ar "Eirokodekss 1: Darbības uz konstrukcijām - 2. daļa: Satiksmes slodzes uz tiltiem". Aprēķinos kopējā tandēma slodze tiek izkliedēta uz transporta projekcijas laukumu. Eurokodekss paredz izmantot četrus aprēķinu slodzes modeļus, no kuriem galvenais ir slodzes modelis LM1 (skat. 5.1. attēlu).



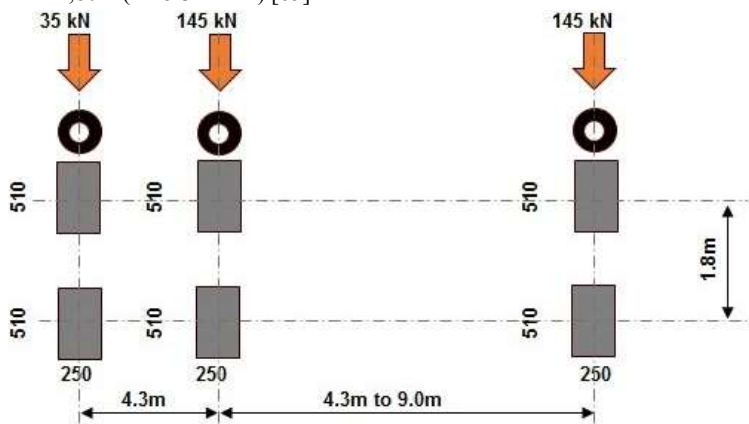
5.1. attēls. Eurokodeksā definētais aprēķina slodzes modelis LM1

Slodzes modelis LM1 ir slodžu kombinācija, ko izmanto tiltu konstrukciju stabilitātes un nestspējas pārbaudēs. Taču, ņemot vērā, ka uz ceļiem šādas slodžu kombinācijas nav sagaidāmas, jo maksimāli pieļaujamo ass slodzi katrā valstī nosaka likumdošana, aprēķinos būtu jāizmanto transportlīdzeklis ar maksimāli pieļaujamo slodzi. Eurokodeksā ir aprakstītas 4 slodžu kombinācijas, no kurām Latvijā ir individuāli attīstīts slodzes modelis LM3. Pieņemts, ka tā ir kravas automašīna ar puspiekabi, kas raksturo kokvedēju transportlīdzekli, kurš nedaudz pārsniedz atļauto ass slodzi. Latvijā bieži tiek konstatēti pārkrauti balņķvedēji, kas pārsniedz likumā atļauto ass slodzi, līdz ar to tieši šādu transporta veidu būtu nepieciešams izmantot kā aprēķina slodzes modeli, jo tas ataino reālo situāciju uz autoceļiem. LM3 slodzes un asu konfigurācijas redzamas 5.2. attēlā.



5.2. attēls. Aprēķinu slodzes modelis LM3

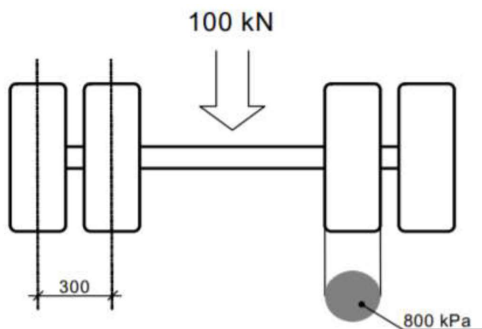
Amerikas Savienotajās Valstīs ģeotehniskie aprēķini un risinājumi jāizstrādā, izmantojot Ģeotehniskās projektēšanas rokasgrāmatu un izmantojot AASHTO tiltu projektēšanas specifikācijās atrodamās satiksmes slodzes [64]. Aprēķina kravas automašīna sastāv no trim asīm, priekšējās, kas sver 35kN un divām aizmugurējām asīm, kas sver 145 kN. Attālums starp priekšējo un aizmugurējo asi ir 4,3 m, un divu aizmugurējo asu attālumu var mainīt no 4,3 m līdz 9,0 m, lai iegūtu nelabvēlīgāko transporta slodzes ietekmi. Attālums starp riepiem uz jebkuras ass ir 1,80m (sk. 5.3. attēlu) [65].



5.3. attēls. HL-93 Aprēķina kravas automašīna AASHTO

Vācijā, pirms tika pieņemts Eirokodekss EN 1991-2 tika izmantotas satiksmes slodzes kombinācijas 33,3/16,7 kPa (pirmā/otrā josla) uz galvenajiem ceļiem un 16,7/16,7 kPa uz sekundārajiem ceļiem. Abos gadījumos slodze tiek pielikta uz kontaktpvirsmas ar izmēriem 3×6m un 3×6m, kā arī izmantota papildus slodzi 5 kPa galvenajā nosacītajā joslā aiz koncentrētās slodzes un 3 kPa pārējām joslām [63].

Saskaņā ar (ATB VĀG 2005) Zviedrijā smago transportlīdzekļu asu pārbraucieni skaits ir būtisks izejas lielums ceļa izmēru un parametru noteikšanai. Standarta asij ir 100 kN liela slodze, un tai ir jābūt ar dubultajiem riteņiem, kā arī vienmērīgi izkliedētu slodzi. Katram ritenim ir jābūt apļveida kontakta laukumam ar seguma virsmu, kā arī riepiem ir 800 kPa liels piepūšanas spiediens. 5.4. attēlā parādīta standarta ass shematiska forma [66].



5.4. attēls. Standarta ass, ko izmanto Zviedrijā

Kā aprakstīts piemēros, satiksmes slodzes modeļi katrā reģionā ir atšķirīgi un izstrādāti konkrētiem satiksmes, vides un ģeoloģiskajiem apstākļiem. Ņemot vērā to, ka aprēķinos tiek izmantotas dažādas transporta slodzes, pie vienādas ģeoloģiskās situācijas tiek iegūti dažādi rezultāti. Šī iemesla dēļ ir nepieciešams definēt vienotu, autoceļa ģeotehniskajos aprēķinos izmantojamo ceļu satiksmes slodzi un tās piemērošanas nosacījumus.

5.2. Aprēķinu modelis

Autoceļu ģeotehniskajos aprēķinos viens no svarīgākajiem izejas lielumiem ir pieņemtā satiksmes slodze, kas iedarbojas uz ceļa konstrukciju un esošajiem grunts slāņiem. Ņemot vērā, ka jebkura objekta slodze/pašsvars tiek pārnests kontakt laukuma zonā, līdz ar to transportlīdzekļu izraisītā slodze uz ceļa konstrukciju iedarbojas zem riteņu trajektorijas. Promocijas darba ietvaros izstrādāts transporta slodzes modelis, kas radīts, adaptējot tiltu LM3 slodzes modeli. Lai pārbaudītu izveidoto transporta slodzes modeli, veikti nogāžu stabilitātes un galīgo elementu aprēķini salīdzinot dažādas satiksmes slodzes. Aprēķins balstīts uz 1.tabulā definētajiem grunts slāņu/materiālu parametriem un atbilstoši 5.5. attēlā uzrādītajam ceļa profilam. Vienīgais mainīgais lielums ir pieņemtā satiksmes slodze. Tika salīdzināti trīs visbiežāk izmantotie slodzes modeļi:

- Izklidēta Eirokodeksa LM1 slodze – tandēma sistēmas slodze 2×300 kN, kas izklidēta uz taisnstūra veida laukumu, kurš ir 3m plats u 5m garš, rezultātā izveidojot izklidētu slodzi 40 kPa. LM1 dinamiskā slodze ir ievērtēta raksturīgajās slodzēs, tāpēc nav vēl papildus jāpalielina aprēķina slodzes.
- LM3 slodzes modelis pārveidots par līnijveida slodzi ņemot vērā riteņa kontakta laukumu – aprēķiniem izmantotas aizmugurējās 3 asis ($P3=10,5t$), kas izklidētas uz laukumu $0,4 \times 3m$ un ievērtēts dinamiskās pārslodzes koeficients 1,35, kā rezultātā izklidētā slodze ir 180kPa. Aprēķinā ievērtēts, ka LM3 slodze ir dinamiskā stāvoklī un pārvietojas ar ātrumu 90km/h. Atbilstoši M. J. Markova [67] veiktajam pētījumam, transportlīdzeklim pie 90km/h liela ātruma ir 10Hz liela frekvence, kas nozīmē, ka transporta izraisītā slodze tiek absorbēta 0,1 sekundē, jeb kad transportlīdzeklis ir nobraucis 3m. Šī iemesla dēļ LM3 slodze 180kPa lielumā tiek pielikta uz $0,4 \times 6m$ liela laukuma katrā transportlīdzekļa pusē.
- AASHTO HL-93 slodze – atbilstoši transportlīdzekļa shēmai slodze izdalīta uz riteņa kontakta laukumu.

Aprēķinā modelēts 2 joslu autoceļš ar uzbēruma augstumu 2m virs esošā reljefa. Galīgo elementu un nogāžu stabilitātes aprēķinos izmantoti 5.1.tabulā uzrādītie ceļa konstrukcijas un grunts slāņu parametri.

5.1.tabula.

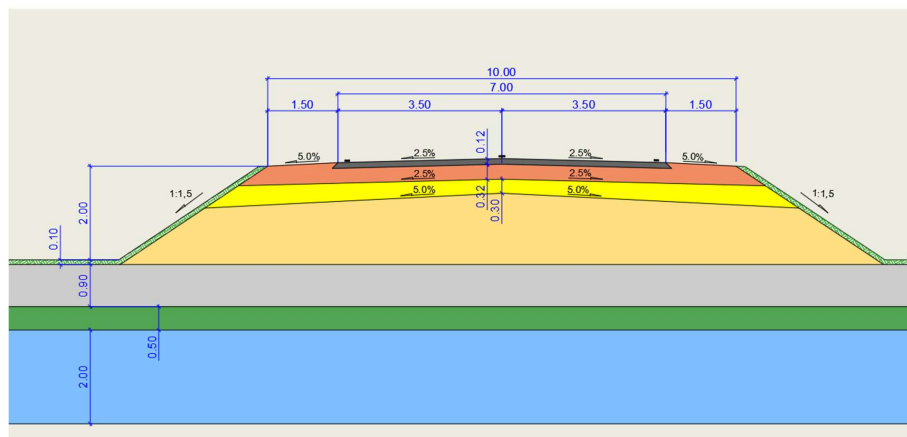
Aprēķinos izmantoto materiālu parametri

Materiāls	Tilpumsvars (kN/m ³)	Puasona koeficients	Junga modulis (kPa)	Maksimālā saiste (kPa)	Vidējā saiste (kPa)	Maksimālais berzes leņķis (degree)	Vidējais berzes leņķis (degree)	Dilatācija (degree)
Asfalts	22	0,3	1000000	500	250	45	40	5

5.1.tabulas turpinājums

Nesaistīts minerālmateriālu maisījums	19	0,3	180000	0	0	40	35	5
Smilts	18	0,3	60000	0	0	37	32	5
Uzbēruma smilts	18	0,3	45000	0	0	35	31	4
Mālsmilts	19,20	0,3	20000	100	50	0	0	0
Putekļaina smilts	18	0,3	9000	0	0	32	29	2
Vājas nestspējas grunts	15	0,3	500	15	8	0	0	0

Pieņemts ceļa normālprofils ar divām braukšanas joslām un kopējo brauktuves platumu 10m, nogāžu slīpums paredzēts 1:1,5. Ceļa uzbērums veidots uz putekļainas smilts, zem kuras atrodas 0,5m biezs vājas nestspējas grunts slānis, kas varētu izraisīt nogāžu stabilitātes problēmas, kā arī izraisīt nevienmērīgu deformāciju attīstību. Autoceļa griezumu skatīt 5.5.attēlā.

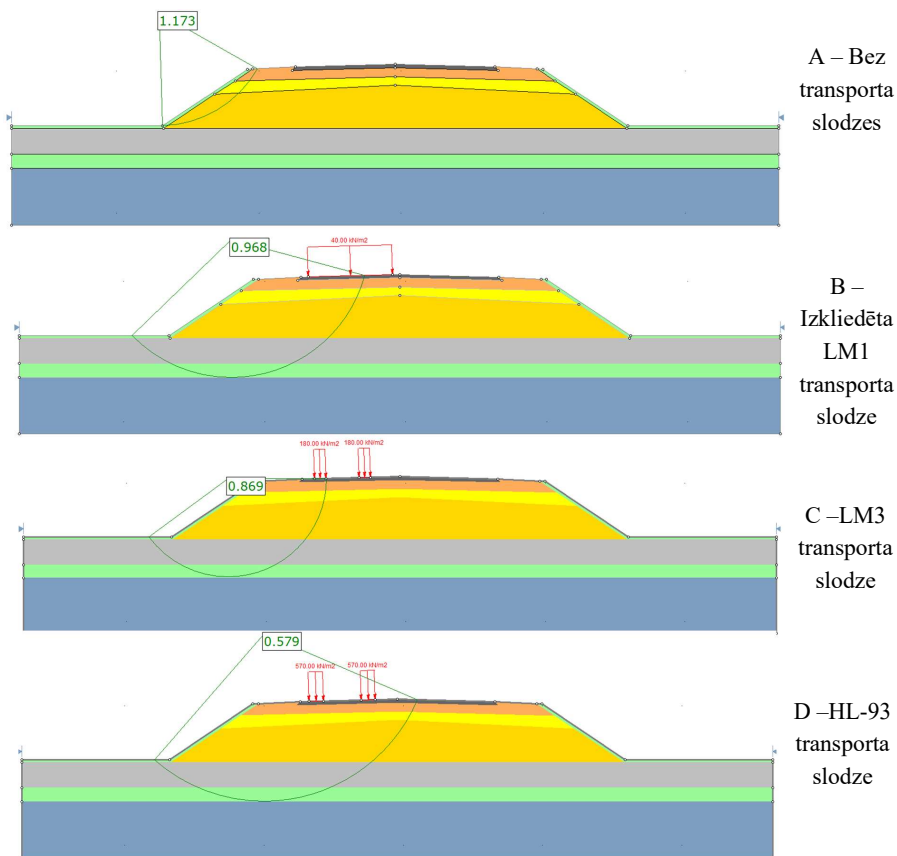


5.5.attēls. Satiksmes slodzes modeļu salīdzināšanai pieņemtais ceļa profils

5.3.Nogāžu stabilitātes rezultātu analīze

Pētījuma ietvaros veikti nogāžu stabilitātes aprēķini izmantojot dažādas aprēķina slodzes, kuras definētas iepriekšējā nodaļā.

Nogāžu stabilitātes aprēķins veikts izmantojot pieņemto ceļa normālprofilu, grunts tipu fizikāli – mehāniskās īpašības un izmantojot Bishop aprēķina metodi. Papildus šiem izejas lielumiem aprēķinā ievērtēti Eurocode 7 – Design approach 1, combination 2 parciālie koeficienti. Nogāžu stabilitāte ir nodrošināta, ja drošības koeficients FS ir lielāks par 1. Iegūtie aprēķinu rezultāti izmantojot dažādus slodzes modeļus attēloti 5.6.attēlā.



5.6. attēls. Nogāžu stabilitātes aprēķinu rezultāti

Atbilstoši iegūtajiem rezultātiem noteikts, ka ceļa uzbērumam bez transporta slodzes (5.6. attēla A variants) ir nodrošināta nogāzes stabilitāte, bet visos pārējos gadījumos nogāzes stabilitāte nav pietiekoša. 5.6.attēla B un C gadījumā netiek nodrošināta nogāžu stabilitāte - attiecīgi $FS=0,968$ (B) un $FS=0,869$ (C). Rezultāti ir līdzvērtīgi un atšķirība ir 10% robežās. Toties aprēķinā, kurā izmantota HL-93 slodze nogāzes drošības koeficients ir ļoti mazs, kā rezultātā aprēķinus balstot uz šo slodzes modeli tiktu būtiski sadārdzināti projekta risinājumi.

Papildus drošības koeficienta vērtībām salīdzināti rezultāti ņemot vērā izslīdēšanas virsmas novietojumu. 5.6. attēla D gadījumā notiek visa ceļa konstrukcijas izslīdēšana, kas liecina, ka pieņemtā aprēķina slodze ir pārāk liela, kas izskaidrojams ar to, ka nogāžu izslīdēšanas aprēķins tiek veikts 2D sistēmā un pieņemtā slodze izplatās uz priekšu plaknē nevis tiek definēta uz konkrētu kontakta laukumu, kas HL-93 gadījumā bija $0,51 \times 0,25$ m liels. Gadījumā, ja netiek pielikta transporta slodze (5.6. attēla A variants) izslīdēšanas virsma atrodas pie pašas ceļa nogāzes. Tas izskaidrojams ar to, ka smilšaino grunšu dabīgā nobiruma/iekšējās berzes leņķa vērtība ir ļoti tuva nogāzes, ar slīpumu 1:1,5, uzbēruma leņķim. Palielinot nogāzes slīpumu no

1:1,5 uz 1:2 drošības koeficienta vērtība pieaug no 1,173 uz 1,346. Salīdzinot 5.6.attēla B un C gadījumus noteikts, ka izmantojot slodzes modeli LM3 izslīdēšanas virsma veidojas aiz nogāzei tuvāk esošās, izkliedētās līnijveida slodzes trajektorijas, aptuveni 2,64 no nogāzes, savukārt LM1 satiksmes slodzei izslīdēšanas virsma veidojas tuvāk autoceļa asij, aptuveni 4,03m no nogāzes. Ņemot vērā, ka uz autoceļa bieži novērojamas risu deformācijas, tad pastāv iespēja, ka viens no šo ceļa konstrukcijas defektu attīstīšanās cēloņiem ir nogāzes stabilitātes problēmas, ko ļoti precīzi atspoguļo aprēķins ar LM3 slodzes modeli.

Lai būtu iespējams salīdzināt vēl citus aprēķina scenārijus un ģeotehniskās situācijas izstrādāti vēl daži aprēķina modeļi un apkopoti to iegūtie rezultāti. Autoceļa profils atbilst 5.5.attēlā norādītajam, veiktas tikai variācijas uzbērums augstumā, nogāzes slīpumā un ģeoloģisko grunts slāņu biežumā. Izstrādātie aprēķina modeļi un iegūtie rezultāti apkopoti 5.2.tabulā.

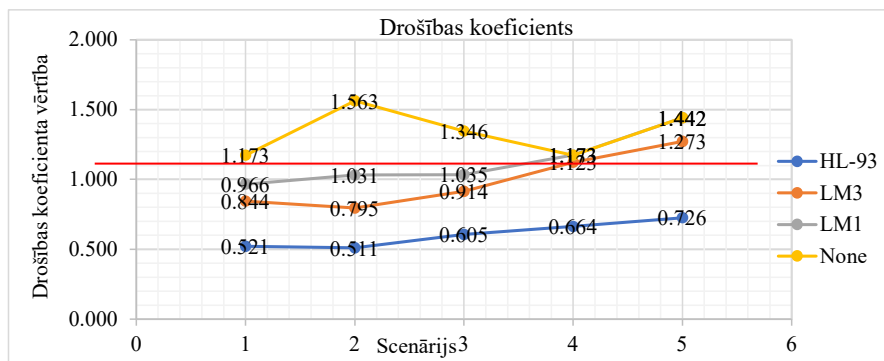
5.2.tabula.

Aprēķinu scenāriji un iegūtie rezultāti

Scenārijs	Transporta slodzes modelis	Ceļa konstrukcija				Nogāzes slīpums	Izslīdēšanas virsmas novietojums attiecībā pret brauktuvi (Mērot no nogāzes šķautnes)	F _s
		Uzbērums augstums	Puteklājama smiltis	Vājas nestspējais grunts	Mālsmitis			
1	Bez slodzes (None)	2,0m	0,9m	0,5m	2,0m	1:1,5	0,36m	1,173
	LM1						4,03m	0,966
	LM3						2,64m	0,844
	HL-93						5,66m	0,521
2	Bez slodzes (None)	1,0m	0,9m	0,5m	2,0m	1:1,5	0,30m	1,563
	LM1						4,50m	1,031
	LM3						4,30m	0,795
	HL-93						5,06m	0,511
3	Bez slodzes (None)	2,0m	0,9m	0,5m	2,0m	1:2	1,59m	1,346
	LM1						4,34m	1,035
	LM3						4,20m	0,914
	HL-93						5,66m	0,605
4	Bez slodzes (None)	2,0m	1,4m	0m	2,0m	1:1,5	0,36m	1,173
	LM1						0,36m	1,173
	LM3						2,53m	1,123
	HL-93						2,53m	0,664
5	Bez slodzes (None)	2,0m	1,4m	0m	2,0m	1:2	0,42m	1,442
	LM1						0,42m	1,442
	LM3						2,58m	1,273
	HL-93						2,55m	0,726

Transporta slodzes modeļu salīdzināšanai ir izstrādāti 5 dažādi scenāriji, kuru izejas lielumi un aprēķinu rezultāti ir redzami 5.2. tabulā, kā arī iegūtie rezultāti atspoguļoti 5.7. attēlā. Kā

tika aprakstīts iepriekš aprēķinā ievērtēti Eurocode 7 – Design approach 1, combination 2 parciālie koeficienti un, ja iegūtais drošības koeficients (F_s) ir lielāks par 1, tad nogāzes stabilitāte ir nodrošināta.



5.7. attēls. Aprēķinos noteiktā nogāzes stabilitāte

Pēc aprēķina rezultātiem (atspoguļoti 5.7.attēlā) noteikts, ka autoceļa konstrukcijas ar pašsvara slodzi, bez satiksmes slodzes nodrošina nogāzes stabilitāti visos 5. scenārijos. Tomēr, salīdzinot 1. un 2. scenāriju, kuros tiek par 1m izmainīts uzbēruma augstums, nogāžu stabilitātes samazinājums ir 25% apmērā. Līdz ar to aprēķins atbilst reālajai situācijai dabā, jo ceļa konstrukcijas uzbērumu ar nogāzes slīpumu 1:1,5 nav ieteicams paredzēt augstāku par 2m. Ja nepieciešams augstāks ceļa uzbērumus ir jāparedz lēzenāka nogāze vai projekta risinājumos jāiekļauj nogāzes pastiprinošie risinājumi.

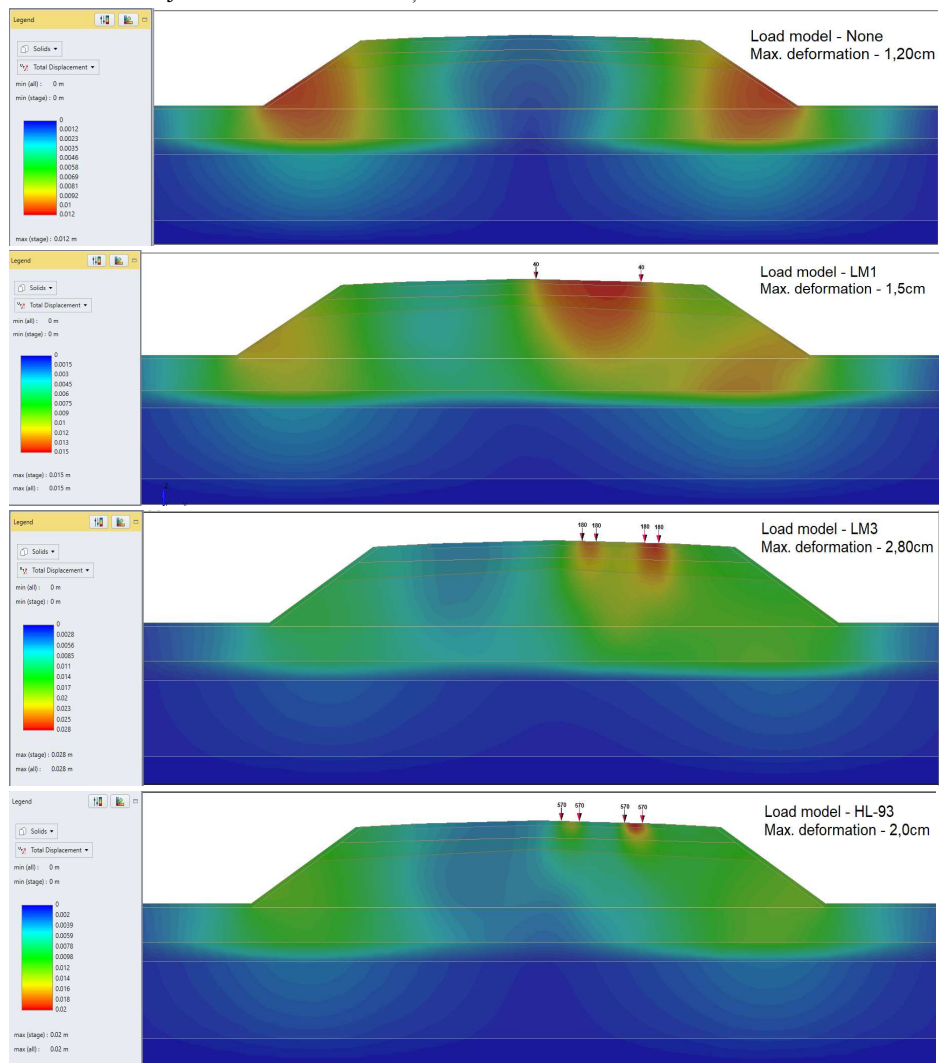
Salīdzinot visus trīs, slodzes modeļus ir vērojamas iegūto rezultātu atšķirības. Visbūtiskākās problēmas ir aprēķiniem, kuros izmantots HL-93 slodzes modelis. Kā jau iepriekš tika aprakstīts šim slodzes modelim ass slodze izdalīta uz diviem riteņiem ar laukumu 0,51x0,25m. Šī iemesla dēļ šādu slodzes modeli nav iespējams izmantot 2 dimensiju aprēķinos, jo sniedz pārspīlēti lielu slodzes ietekmi uz brauktuves konstrukciju.

Savā starpā salīdzinot, LM1 un LM3 slodzes modeļus iegūtie rezultāti ir līdzvērtīgi un atšķirības drošības koeficientos vērojamas aptuveni 10% robežās, izņemot 2.scenāriju, kurā tika samazināts uzbēruma augstums, līdz ar to novērojama lielāka pieņemtās transporta slodzes ietekme uz vājas nestspējas grunts slāni. Ņemot vērā, ka vājas nestspējas grunts slāņi, kas atrodas 0,9m zem esošās virsmas autoceļa projektos parasti tiek izrakta vai šīm zonām tiek veikta speciālu risinājumu izbūve līdz ar to LM3 slodzes modeļa aprēķini atspoguļo visreālākos rezultātus, jo visos scenārijos, kuros ir vājas nestspējas grunts slānis nogāžu stabilitāte nav nodrošināta. LM1 slodzei samazinot uzbēruma augstumu no 2m uz 1m palielinās nogāžu stabilitāte, līdz ar to slodzes ietekme uz vājas nestspējas grunts slāni nav tik būtiska, kā LM3 slodzei.

Ņemot vērā visu scenāriju aprēķinu rezultātus noteikts, ka nogāžu stabilitātes aprēķiniem nav iespējams izmantot HL-93 slodzes modeli. Pēc rezultātu analīzes secināts, ka LM3 slodzes modelis sniedz nedaudz lielāku ietekmi uz uzbērumu, ceļa konstrukciju un vājas nestspējas grunts slāni. Šī iemesla dēļ nogāžu stabilitātes aprēķiniem rekomendēju izmantot LM3 slodzi, kas pārveidota par līnijveida slodzi, ņemot vērā riteņa kontakta laukumu.

5.4. Globālās stabilitātes/deformācijas aprēķinu rezultātu analīze

Pētījuma ietvaros veikti globālās stabilitātes/deformācijas aprēķini izmantojot 3 dimensiju galīgo elementu aprēķinu programmu un dažādas aprēķina slodzes. Aprēķins veikts izmantojot pieņemto ceļa normālprofilu, grunts tipu fizikāli – mehāniskās īpašības. Iegūtie aprēķinu rezultāti izmantojot dažādus slodzes modeļus attēloti 5.8.attēlā.



5.8. attēls. Nogāžu stabilitātes aprēķinu rezultāti

Atbilstoši iegūtajiem rezultātiem, kas redzami 5.8.attēlā noteikts, ka ceļa uzbūrumā bez transporta slodzes rodas deformācijas 1,20cm apmērā un tās galvenokārt koncentrējas ceļa nogāzes daļā, atspoguļojot nogāžu stabilitātes aprēķina rezultātus. Vislielākās deformācijas

noteiktas izmantojot satiksmes slodzes modeli – LM3 un deformācijas apmēra grafiks atbilst nogāžu izslīdēšanas virsmai ar vismazāko drošības koeficientu. Vislielākās atšķirības starp nogāžu izslīdēšanas un globālās stabilitātes/deformācijas aprēķina vērtībām ir vērojamas izmantojot slodzes modeli HL-93. Kā jau tika minēts iepriekš, šādu slodzes modeli nav iespējams izmantot 2 dimensiju aprēķinos. Nogāžu aprēķinā ar slodzes modeli HL-93 tika noteikta drošības koeficienta vērtība $F_s=0,521$, bet deformāciju aprēķinā noteiktas maksimālās deformācijas 2,00cm. Ņemot vērā šos rezultātus, noteikts, ka slodzes modeli HL-93 iespējams izmantot deformāciju aprēķinā, bet to nav iespējams pielietot nogāžu stabilitātes aprēķinā, līdz ar to tas nav izmantojams visos autoceļu ģeotehniskajos aprēķinos.

Papildus 5.8.attēlā attēlotajiem rezultātiem veikti aprēķini arī pārējiem iepriekš izstrādātajiem scenārijiem. Pieņemtie slāņu biezumi un ceļa nogāzes parametri attēloti 5.2.tabulā. Izstrādāto aprēķina modeļu iegūtie rezultāti apkopoti 5.3.tabulā.

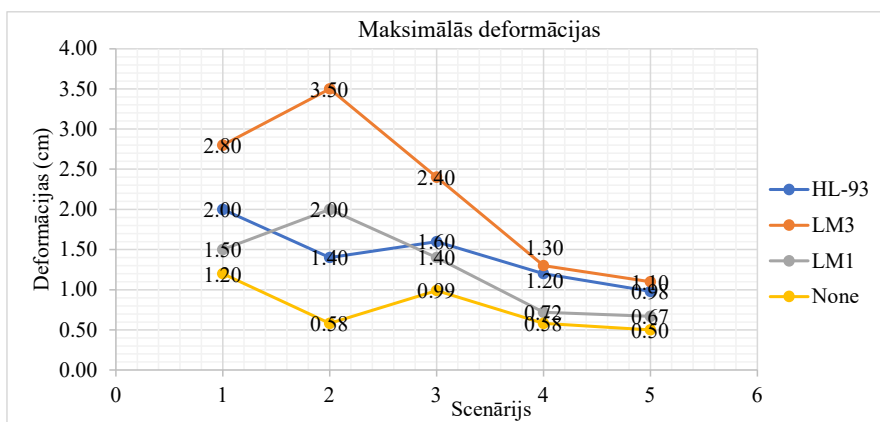
5.3.tabula.

Globālās stabilitātes/deformāciju iegūtie rezultāti

Transporta slodzes modelis	Scenārijs									
	1		2		3		4		5	
	Max. Def. (cm)	F_s	Max. Def. (cm)	F_s	Max. Def. (cm)	F_s	Max. Def. (cm)	F_s	Max. Def. (cm)	F_s
Bez slodzes (None)	1,20	1,173	0,58	1,563	0,99	1,346	0,58	1,173	0,50	1,442
LM1	1,50	0,966	2,00	1,031	1,40	1,035	0,72	1,173	0,67	1,442
LM3	2,80	0,844	3,50	0,795	2,40	0,914	1,30	1,123	1,10	1,273
HL-93	2,00	0,521	1,40	0,511	1,60	0,605	1,20	0,664	0,98	0,726

Transporta slodzes modeļu salīdzināšanai tika izstrādāti 5 dažādi scenāriji. Analizējot 5.3.tabulā apkopotos aprēķinu rezultātus iespējams secināt, ka vislielākās deformācijas tiek sasniegtas izmantojot slodzes modeli LM3. Atbilstoši 8.attēla rezultātu salīdzinājumam iespējams novērot, ka, izmantojot LM3 slodzes modeli, maksimālās deformācijas rodas zem izkliedētās līnijveida slodzes kontakta zonas, kā arī liels deformācijas apjoms novērojams segumā zonā starp abām transportlīdzekļa līnijveida slodzēm. Izstrādāto scenāriju deformāciju aprēķinu rezultātus iespējams redzēt 5.9.attēlā.

Atbilstoši 5.9. attēla datiem aprēķinā izmantojot slodzes modeli LM1 novērojamas procentuāli daudz mazākas deformācijas salīdzinājumā ar LM3 aprēķinu. Tas ir tādēļ, ka tandēma slodze izkliedēta uz lielāku kontaktvirsmas laukumu ievērtējot arī laukumu starp transportlīdzekļa riteņiem. Tomēr ņemot vērā iegūtos rezultātus, kā arī to, ka autoceļos ļoti bieži novērojamas risu deformācijās un faktā, ka slodze uz segumu tiek pārnesta tikai kontaktvirsmas zonā LM1 slodzes modelis neatpoguļo reālo situāciju un patieso slodzes raksturu, kāds rodas transportlīdzekļu braukšanas laikā. Iepriekš minētie fakti norāda uz to, ka LM1 slodzes modelis nesniedz precīzus aprēķinu rezultātus, jo šīs slodzes parametri neatbilst transportlīdzekļa izraisītajai slodzei, kas uz autoceļiem parasti tiek nodota ievērtējot riteņu trajektoriju un riepu kontaktvirsmas platumu.



5.9. attēls. Aprēķinos noteiktās maksimālās deformācijas

Izvērtējot visus nogāžu stabilitātes un deformācijas aprēķinu rezultātus, iespējams secināt, ka, aprēķiniem izmantojot slodzes modeli LM3, tiek nodrošināta vislielākā autoceļa konstrukcijas drošība. Pieliktās līnijveida slodzes, ņemot vērā riteņa kontakta laukumu, precīzi atspoguļo transportlīdzekļa kustības trajektoriju un deformācijas attīstības dinamiku ceļa konstrukcijā. Tieši šo iemeslu dēļ ģeotehnisko aprēķinu veikšanai tiek rekomendēts izmantot promocijas darba ietvaros izstrādāto slodzes modeli LM3.

Satiksmes slodzes modelis LM1 precīzi neatspoguļo satiksmes izraisīto slodžu sadalījumu ceļa konstrukcijā. Transporta slodze tiek pārnesta pa riteņu saskares virsmas laukumu, tomēr aprēķinos viss slodzes apjoms tiek sadalīts arī pa laukumu starp riteņiem, tāpēc iegūtie aprēķinu rezultāti ir neprecīzi.

Slodzes modeli HL-93 var izmantot deformāciju/gālīgo elementu globālās stabilitātes aprēķinā, taču to nav iespējams izmantot nogāzes stabilitātes aprēķinā, līdz ar to nevar izmantot visos ceļu ģeotehniskajos aprēķinos.

Slodzes modeļa LM3 izmantošana ģeotehniskajos aprēķinos nodrošina vislielāko ceļa būves drošību. Pieliktās lineārās slodzes precīzi atspoguļo transportlīdzekļa trajektoriju un deformācijas attīstības dinamiku ceļa konstrukcijā.

Ģeotehniskajiem aprēķiniem ieteicams izmantot slodzes modeli LM3 - 180kPa sadalīta slodze, kas pielikta uz 0,4x6m lielu laukumu katrā transportlīdzekļa pusē. Šķērsvirziena attālums starp slodzēm ir 1,8 m, atbilstoši tam, kā parādīts 5.3. attēlā HL-93 slodzei, un tā tiek pielikta katrai braukšanas joslai.

6. CEĻA KONSTRUKCIJAS NESTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA, IZMANTOJOT STATISKĀS PLĀTNES TESTU

Samazinoties ceļu nozares finansējumam, pēdējo gadu laikā, būtiski palielinājies ceļa segas pastiprināšanas projektu skaits. Neparedzot pilnu segas konstrukciju, iespējams, būtiski samazināt projekta izmaksas, tādējādi iespējams optimizēt pieejamos līdzekļus autoceļu rekonstrukcijai. Lai nodrošinātu ceļa konstrukcijas kalpotspēju un ilgmūžību, nepieciešams novērtēt esošo konstruktīvo slāņu nestspēju, kā arī analizēt zemes klātnes grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības. Kļūdaini novērtējot esošās konstrukcijas pamata kārtu īpašības un palikušo nestspēju var radīt būtiskus strukturālo deformāciju riskus jaunajā ceļa konstrukcijā, kā rezultātā autoceļš var zaudēt nestspēju un būvniecības laikā rastos neparedzētas izmaksas esošā pamata pastiprināšanai [68].

Ģeotehniskās izpētes laikā, izmantojot statiskās plātnes testu, tiek novērtēta esošā pamata slāņu nestspēja un sablīvējums. Šo pārbaudi var veikt visa veida dispersajās (birstošajās) gruntīs, uzbērumos un klinšainajās gruntīs, bet parasti to nelieto ļoti mīkstās un smalkgraudainās gruntīs. Ņemot vērā, statiskās plātnes testa rezultātu precizitāti un ātro datu apstrādi, to ļoti bieži izmanto, lai novērtētu esošā ceļa pamata atlikušo nestspēju.

6.1. Statiskās plātnes testa galīgo elementu aprēķina modeļa izstrāde

Ģeotehniskās izpētes laikā tiek novērtēta esošās ceļa konstrukcijas pamata slāņu nestspēja, izmantojot statiskās plātnes testu. Taču rezultātu precizitāti stipri ietekmē esošo asfalta kārtu kopējais biežums un demontētā asfalta laukuma lielums. Lai noteiktu esošā ceļa pamata un zemes klātnes nestspēju dziļākajos slāņos, inženieris veic subjektīvas, uz pieredzi balstītas interpretācijas, kas nav balstītas uz matemātiskiem aprēķiniem.

Attīstoties ģeotehniskās izpētes iekārtām un inženieru izpratnei par grunšu mehāniku un ceļa konstrukcijas nestspēju, ir iespējams izmantot arī citas lauku izpētes metodes, piemēram, zondēšanu un to datu interpretācijas. Pasaulē ir izstrādātas dažādas programmas ģeotehnisko aprēķinu veikšanai. Ar programmu palīdzību ir iespējams novērtēt grunts slāņu īpašības, prognozēt deformācijas un izstrādāt armēšanas, kā arī citus konstruktīvos risinājumus, taču iegūtie rezultāti neatspoguļo pamata nestspēju, kas izteikta MPa vienībās.

Balstoties uz zondes datu interpretācijās iegūtajām grunts slāņu parametru vērtībām, promocijas darba ietvaros izstrādātas statiskās plātnes testa simulācijas izmantojot galīgo elementu metodi un iegūtie nestspējas rezultāti salīdzināti ar ģeotehniskās izpētes laikā noteiktajām vērtībām. Mērķis bija noskaidrot, vai esošās pamatnes nestspēju var precīzi noteikt ar galīgo elementu aprēķiniem - statiskās plātnes testa simulāciju, pamatojoties uz ģeotehniskās izpētes laikā noteiktajām grunts fizikāli mehāniskajām īpašībām.

6.1.1. Esošais ceļa pamats

Ģeotehniskā izpēte tiek veikta autoceļa projekta izstrādes sākumposmā, tādēļ ir ļoti grūti definēt, kuros ceļa posmos būtu iespējams paredzēt nepilnas seguma konstrukcijas izbūvi. Līdz ar to nav iespējams precīzi noteikt kurš no esošā ceļa konstruktīvajiem slāņiem kalpos, kā

jaunās ceļa konstrukcijas pamats, kuram jānosaka atlikušā nestspēja. Izstrādājot promocijas darbu, tika konstatēts, ka statiskās plātnes testa rezultātus būtiski ietekmē skatrakuma izmērs, jo nedemontējams asfalts ietekmē deformāciju attīstību pamatslānī, līdz ar to tiek noteikta neprecīza pamata nestspēja.

Ņemot vērā, ka ģeotehniskās izpētes laikā nav iespējams izveidot vismaz 1,5x1,5m lielu skatrakumu asfalta slāņos, tad inženierim ir jānovērtē aptuvenais nestspējas samazinājums atkarībā no skatrakuma izmēra. Līdz ar to ģeotehniskās izpētes laikā, veicot statiskās plātnes testu, ir svarīgi veikt foto fiksācijas, jo ar to palīdzību iespējams novērtēt testa apstākļus.

Ceļa projektos, pieņemot pilnu ceļa konstrukcijas izbūvi, pamatnes/zemes klātnes minimālā nestspēja tiek noteikta 45 MPa. Taču būvniecības laikā nereti rodas problēmas sasniegt šo vērtību, līdz ar to nepieciešamas papildus finansējums, lai izbūvētu risinājumus nestspējas nodrošināšanai. Ņemot vērā, ka būvniecības laikā zemes klātnes un izbūvēto kārtu nestspēju nosaka ar statiskās plātnes testu, veikta analizē simulējot testu ar galīgo elementu metodes palīdzību. Tādā veidā jau projekta izstrādes gaitā nosakot tos ceļa posmus, kuros varētu rasties problēmas ar nepieciešamās zemes klātnes vai esošā pamata nestspējas sasniegšanu. Būtu iespējams būtiski uzlabot esošās pamatnes nestspējas analīzes kvalitāti un samazināt neparedzēto izmaksu apjomu, kā arī novērst iespējamo ceļa konstrukcijas deformāciju attīstību.

6.1.2. Statiskās plātnes tests

Statiskās plātnes tests ir lauka/objekta tests, ko parasti izmanto, lai noteiktu grunts nestspēju un deformācijas noteiktos slodzes apstākļos, kā arī, konstruktīvo kārtu sablīvējumu, kas veikti seklos pamatos. Statiskās plātnes testu seklajiem pamatiem jāveic pilnībā līdzienai un netraucētai virsmai vai nu zemes virspusē, vai ierakuma pamatnē noteiktā dziļumā. Ja būvprojektā tiek norādītas prasības attiecībā uz sagatavotās grunts kārtas (slāņa) nestspēju vai sablīvējumu, tad statiskās plātnes testa metode tiek uzskatīta par vienu no precīzākajām metodēm šīs nestspējas un sablīvējuma pakāpes noteikšanai. Jāatzīmē, ka ar standarta izmēra statisko plātni Ø 300 mm augsne tiek pārbaudīta aptuveni 60 cm dziļumā (x2 zīmoga diametrs). Tāpēc gadījumos, ja nepieciešama biežāka uzbēruma slāņa sablīvējuma pārbaude, testi ir jāveic pakāpeniski, kad tiek uzbērtā un noblīvētā attiecīga uzbēruma kārtā [69].

Statiskās plātnes tests tiek veikts, pamatojoties uz Vācijas standartu DIN 18134 (Pārbaudes procedūras un testēšanas aprīkojums - plātnes slodzes tests) [70]. Statiskās plātnes slogošana jāveic pakāpeniski, palielinot spiedienu. Spiediens, ko iesaka DIN 18134 standarta spiedogam Ø 300 mm, kas jāsasniedz ar slogošanu, ir 0,5 MN/m² (vai 0,5 MPa). Slodzi palielina ne mazāk kā sešos posmos vai pakāpēs ar vienmērīgu pieauguma soli, līdz tiek sasniegts iepriekš minētais maksimālais spiediens. Katra slodzes maiņa (no posma uz soli) jāpabeidz vienas minūtes laikā. Slodzes tests sastāv no trim posmiem - pirmreizējā slogošana, kad tiek sasniegts 0,5 MN/m² spiediens ar vismaz 6 slodzes palielināšanas soļiem; atslogošana (3 spiediena samazināšanas posmi (50%, 25% un ~2% no maksimālās slodzes)); kam seko otrreizējā slogošana, kuras laikā slodze jāpalielina līdz pirmā cikla pirms pēdējam slodzes līmenim (lai netiktu sasniegta pilna 0,5 MPa slodze).

Pēc pārbaudes veikšanas objektā iegūtie dati tiek apstrādāti un rezultāti tiek novērtēti birojā. Pamatojoties uz DIN 18134 sniegtajiem ieteikumiem, aprēķinus var veikt manuāli,

pamatojoties uz standartā sniegtajām aprēķinu formulām, bet var veikt arī, izmantojot īpašu šim nolūkam paredzētu datoru programmatūru. Statiskās plātnes slodzes pārbaudes rezultātā tiek iegūti šādi galvenie parametri: EV1 (pēc pirmā sloģošanas cikla rezultātiem) un EV2 (pēc otrā sloģošanas cikla rezultātiem) deformācijas moduļi, kā arī šo moduļu attiecība EV2/EV1. Būvniecības praksē galvenokārt tiek izmantota vērtība EV2 un attiecība EV2/EV1. Vērtība EV2 parāda pārbaudītā grunts slāņa nestspēju un deformācijas īpašības, bet attiecība EV2/EV1 norāda konkrētā grunts slāņa sablīvēšanās pakāpi.

6.1.3. Statiskās plātnes testa simulācijas modeļa uzbūve

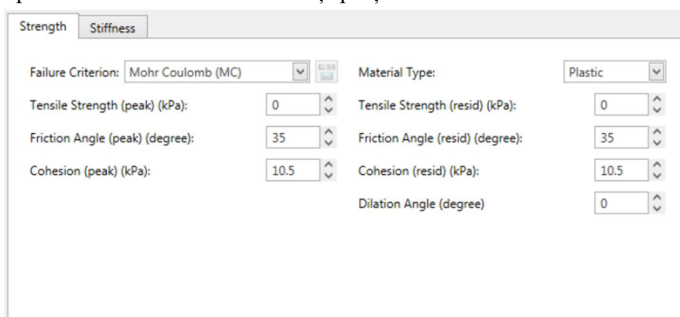
Ģeotehniskās izpētes laikā statiskās plātnes tests tiek veikts atbilstoši 6.1.2. nodaļā aprakstītajam. Galīgo elementu modelis un sloģošanas/atsloģošanas stadijas tika izstrādātas atbilstoši standartam DIN 18134 ar trim cikliem – sloģošana, atsloģošana un atkārtota sloģošana. Aprēķins modelēts izmantojot grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības, kas iegūtas, veicot statiskās un dinamiskās zondes interpretācijas. Izmantojot ģeotehniskās izpētes laikā veiktās foto fiksācijas tika noteikts katra zondes izpētes punkta skatrakuma lielums un statiskās plātnes testa novietojuma dziļums.

Promocijas darba ietvaros galīgo elementu aprēķiniem izmantota aprēķinu programma/programmatūra, kompānijas “Rocscience” izstrādātā programma – “RS3”, kurā iespējams precīzi definēt visus ievades parametrus [71]. RS3 ir trīs dimensiju programma, kas izstrādāta ģeotehnisko konstrukciju analīzei. Tā ir piemērota gan cieto iežu, piemēram, klintīs, gan grunts slāņu analīzei. RS3 ir vispārējās nozīmes galīgo elementu analīzes programma pazemes izrakumiem, tuneļu un balstu projektēšanai, virszemes ierakumiem, pamatu projektēšanai, uzbūrumiem, konstrukciju nostiprinājumiem, gruntsūdens ietekmes novērtēšanai un citiem lietojuma veidiem. RS3 ir izstrādāts ar intuitīvu darbplūsmu, lai palīdzētu lietotājam veikt nepieciešamās aprēķina modeļa izveides darbības. Zem katras cilnes rīkjoslas un izvēlnes ir pielāgotas, lai nodrošinātu lietotājam vajadzīgās funkcijas katrā modeļa izveides posmā.

RS3 galīgo elementu modeļa izveide sākas ar konstrukcijas ģeometrijas definēšanu/radīšanu. Ģeometrijas modelis ir urbumu un horizontālu darba plakņu kompozīcija. Darba plaknes tiek izmantotas, lai definētu ģeometrijas līnijas un strukturētu kontūrlīnijas. Urbumus izmanto, lai definētu grunts stratigrāfiju, zemes virsmas līmeņa izmaiņas un poru spiediena sadalījumu. No ģeometrijas modeļa tiek ģenerēts 3D tīkls, ņemot vērā informāciju no darba plaknēm un urbumiem. Tādējādi ir definēts pilns 3D ģeometrijas modelis, kas ietver visus objektus, kas parādās jebkurā darba plaknē jebkurā būvniecības posmā. RS3 galvenā funkcija ir automātiska 3D tīkla izveide, kur, izmantojot ieteiktos noklusējuma iestatījumus, ar vienu tiek automātiski ģenerēts kvalitatīvs tetraedrisks tīkls. Izvēlnes galīgie elementi opcijas ļauj - izveidojiet galīgo elementu tīklu, pielāgojiet galīgo elementu tīklu un pārbaudiet 3D tīkla kvalitāti.

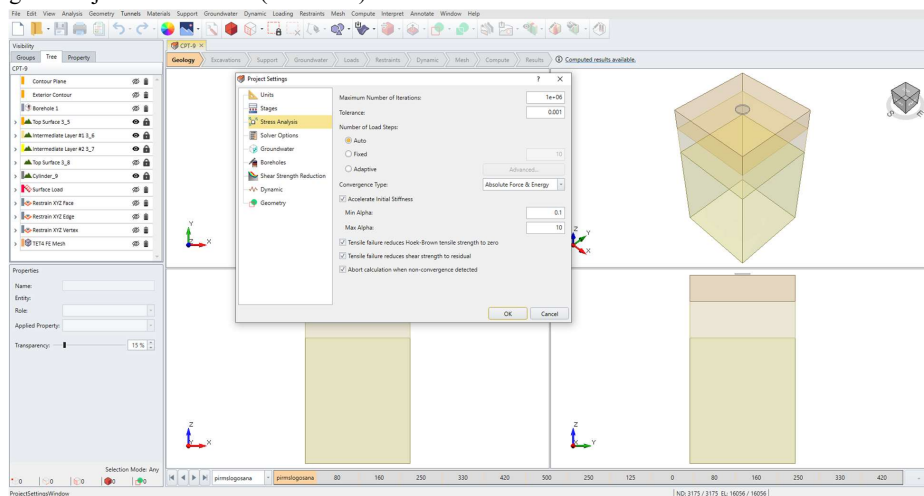
Aprēķiniem izmantots Mohr-Coulomb modelis, kas ir visizplatītākais modelis, ko izmanto ģeomateriālu un grunts slāņu aprēķiniem [72][73]. Šī modeļa specifikācija un tā kritērijs parasti ietver Kulona hipotēzi, kas postulēja lineāru attiecību starp bīdes izturību plaknē un spriegumu, kas uz to iedarbojas. RS3 pieņem kohēzijas (bīdes pretestības) un berzes leņķa maksimālās vērtības un atlikušās vērtības. Tas nozīmē, ka pēc sākotnējās deformācijas (horizontālajiem,

vertikālajiem, vektorālajiem pārvietojumiem) materiāla izturība uzreiz samazinās no maksimālā stāvokļa uz zemāku atlikušo stiprības stāvokli. Mohr-Coulomb modelis kopumā ir elastīgi-trausls plastisks materiāla modelis. Gadījumā, ja atlikušās vērtības ir tādas pašas kā maksimālās vērtības, uzvedība ir elasto – perfekti – plastiska. Šo labi zināmo modeli parasti izmanto kā pirmo grunts slāņu uzvedības tuvinājumu. Vienkāršības dēļ tas ir ļoti populārs un sniedz precīzus rezultātus. Modelis ietver piecus parametrus, t.i., Junga moduli, Puasona koeficientu, bīdes pretestību, iekšējās berzes leņķi un dilatācijas leņķi, skatīt 6.1. attēlu. Ņemot vērā, ka šie ir parametri, kurus var iegūt no ģeotehniskās izpētes zondes datu interpretācijām līdz ar to nav nepieciešami sarežģīti laboratorijas testi, lai iegūtu trūkstošo informāciju par grunts slāņu parametriem. Tieši šī iemesla dēļ aprēķiniem tika izvēlēts Mohr-Coulomb modelis.



6.1. attēls. Ievades logs Mohr-Coulomb modeļa definēšanai

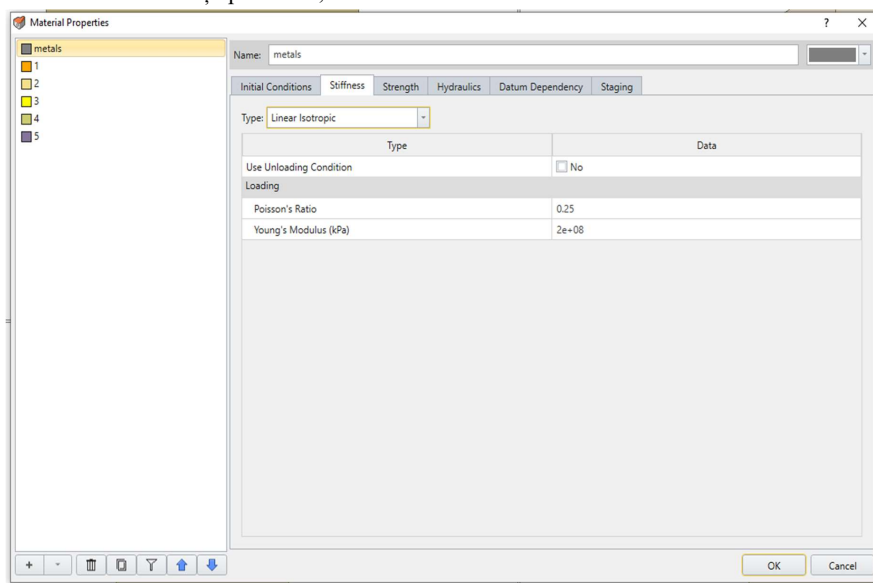
Izmantojot galīgo elementu programmu, ļoti svarīgi ir precīzi definēt visus izejas parametrus, pieliktās slodzes, brīvo kustību ierobežojumus, konstrukcijas ģeometriju, ūdens līmeņa atzīmes, galīgo elementu sadalījuma precizitāti, stadijas un to parametrus, kā arī citas lietas [74], [75], [76], [77], [78]. RS3 programmas uzbūve un aptuvena aprēķina modeļa ģeometrija redzama attēlā (attēls 6.2.).



6.2. attēls. RS3 datorprogrammas interfeiss

Esošo grunts slāņu fizikāli-mehāniskās īpašības ir paši svarīgākie dati, ko nepieciešams iegūt, veicot ģeotehnisko izpēti. Aprēķina modeļos tika definēti sekojoši grunts/materiāla slāņu dati (skatīt 6.3. attēlu):

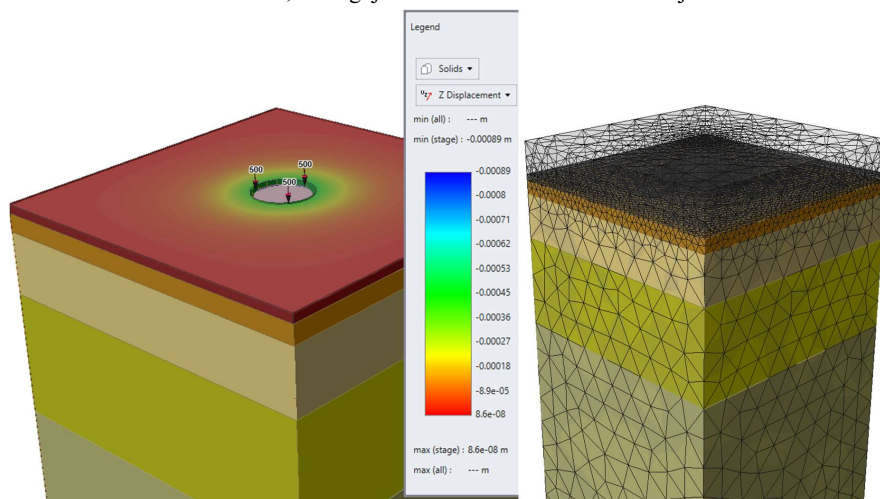
- Grunts tilpumsvars;
- Ūdens tilpumsvars;
- Uzvedības tips (lineārs, nelineārs u.c.);
- Materiāla Puasona koeficients;
- Junga elastības modulis;
- Ierobežoto deformāciju/Oedometra modulis;
- Materiāla tips (plastisks/elastīgs);
- Grunts slāņu bīdes pretestība;
- Grunts iekšējās berzes leņķis;
- Materiāla stiepes stiprība;
- Materiāla spiedes stiprība;
- Grunts slāņu dilatācijas leņķis;
- Materiāla stāvoklis (drenēts/nedrenēts);
- Grunts slāņa porainība;



6.3. attēls. Grunts/materiālu slāņu fizikāli-mehānisko īpašību parametri

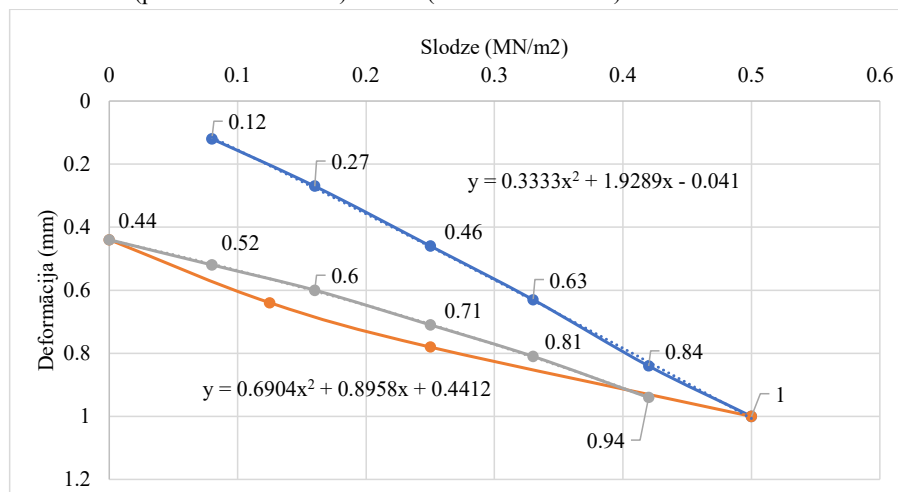
Ievērtējot visus izejas datus (grunts slāņu biezumus, slāņu fizikāli mehāniskās īpašības, statiskās plātnes testa složošanas ciklus un citus parametrus), tika izstrādāts galīgo elementu aprēķina modelis. Statiskās plātnes testa simulācijas modelis vienam no izpētes punktiem ir parādīts 6.4. attēlā. Skatrakuma (noņemtā asfalta laukuma) izmērs bija 34 cm diametrā un

atbilda apstākļiem, kādi tie bija ģeotehniskās izpētes laikā. Statiskā plātnes testa punkts, kurš redzams 6.4. attēlā tika veikts, noslogojot esošā minerālmateriālu maisījuma virskārtu.



6.4. attēls. Statiskās plātnes testa simulācijas modelis

Statiskās plātnes simulācijā slodze tika pielikta saskaņā ar DIN 18134 ar 6 slodzes palielināšanas posmiem pirmajā sloģošanas ciklā, 3 spiediena samazināšanas posmiem un 5 slodzes palielināšanas posmiem otrajā sloģošanas ciklā. Katrā no sloģošanas posmiem tika noteikta statiskās plātnes vertikālā deformācija un apkopotie dati tika apstrādāti, lai iegūtu statiskās plātnes testa grafiku (skat. 6.5. attēlu), no kura tika izteiktas esošā pamata nestspējas vērtības Ev1 (pirmais slodzes cikls) un Ev2 (otrais slodzes cikls).



6.5. attēls. Statiskās plātnes testa simulācijas rezultātu grafiks (zilā līkne - pirmais sloģošanas cikls; oranžā līkne – otrs sloģošanas cikls)

6.1.4. Analītiskās aprēķinu formulas izstrāde Ev2 aprēķinam

Promocijas darba ietvaros veikta objektos veikto statistiskās plātnes testu analīze un tika noteikts, ka esošā pamata nestspējas rezultātus virsējos konstrukcijās slāņos būtiski ietekmē skatrakuma laukums un dziļums. Ņemot vērā, ka jaunās ceļa konstrukcijas zemes klātnes līmenis tiek precīzi noteikts projekta izstrādes gaitā, ir ļoti svarīgi spēt noteikt tās nestspēju jebkurā dziļumā, līdz ar to izstrādājot detalizētus projekta risinājumus noteikt zonas, kur var būt nepieciešami specifiski risinājumi specifikācijās definētās zemes klātnes, esošā pamata nestspējas nodrošināšanai. Lai to būtu iespējams izdarīt izstrādāts galīgo elementu aprēķina modelis ar kura palīdzību tiek simulēts statistiskās plātnes tests. Tomēr, apzinoties faktu, ka galīgo elementu aprēķini ir sarežģīti un aprēķina programmatūra nav pieejama visiem inženieriem, ņemot vērā šo programmu lielas izmaksas, promocijas darbā veikta analītiskas aprēķina formulas izstrāde. Tā izstrādāta, lai atvieglotu projektētāju darbu un ar vienkāršotu pieeju noteiktu esošā pamata/zemes klātnes nestspēju. Lai rezultāti būtu atbilstoši ļoti svarīga ir izejas datu kvalitāte un precizitāte.

Ņemot vērā būtiskās atšķirības dažādu zondēšanas metožu interpretāciju vērtībās, analītiskajai aprēķina formulai iespējams izmantot tikai interpretācijas, kas veiktas, izmantojot statistiskās zondes testa metodi.

Aprēķina formula (6.1.) izstrādāta balstoties uz grunts slāņu fizikāli mehāniskajām īpašībām, kā arī ceļu būvdarbu laikā apkopotajiem būvdarbu kvalitātes kontroles datiem, kad būvdarbu kvalitāte tiek pārbaudīta ar statistiskās plātnes testa palīdzību, nosakot konstruktīvo slāņu nestspēju. Aprēķins tiek veikts ņemot vērā katra grunts slāņu ierobežoto deformāciju moduli M , kuru iespējams noteikt ar Oedometra laboratorijas testu vai arī ģeotehniskās izpētes laikā veicot zondēšanas izpētes interpretācijas. Virzienā no apkašas uz augšu tiek aprēķināta Ev2 nestspēja virs katra ģeoloģijas grunts slāņa. Ņemot vērā nestspēju (Ev2 vērtību), zem katra grunts slāņa, tiek aprēķināta attiecība Ev2/M, nosakot nestspējas/deformācijas moduļa attiecību. Šādu attiecību nepieciešams ievērtēt, jo atkarībā no šīs attiecības būtiski atšķiras stiprības/destspējas pieaugums.

$$Ev2 = M_i \cdot X \quad (6.1.)$$

, kur

$$X = A + (1 - A) - (1 - A) \cdot e^{-B \cdot (H/30)} \quad (6.2.)$$

$$B = -0.65 \cdot (1 - A)^2 - 0.75 \cdot (1 - A) + 1.4 \quad (6.3.)$$

$$A = Ev_{2i+1} / M_i \quad (6.4.)$$

Ja $A > 2$, tad $B = 2,5$

Ev2 – Zemes klātnes nestspēja uz apskatāmā grunts slāņa virsmas (MPa);

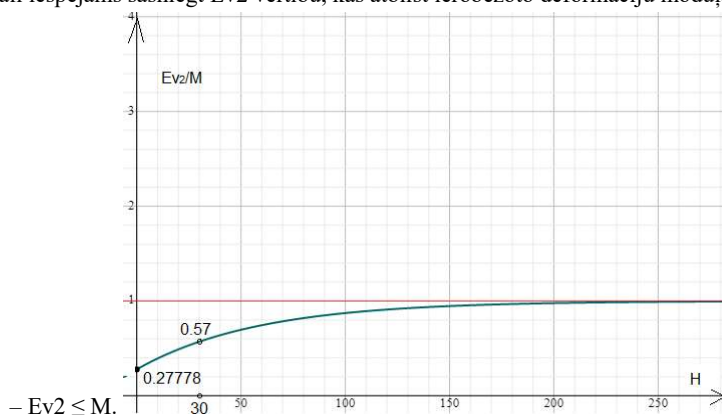
Ev_{2i+1} – Zemes klātnes nestspēja zem apskatāmā grunts slāņa (MPa);

M_i – Apskatāmā grunts slāņa ierobežoto deformāciju moduli M (MPa);

H - Apskatāmā grunts slāņa biezums (cm).

Izstrādātā aprēķina formula būtībā ir eksponenciālās funkcijas grafiks, un, izmantojot grunts slāņa biezumu un attiecību (Ev2/M), tiek noteikts, cik straujš ir sagaidāms nestspējas pieaugums. Palielinoties attiecībai (Ev2/M), palielinās sākotnējais nestspējas pieaugums, jo kvalitatīvāks materiāls ar daudz augstākām fizikāli-mehāniskajām īpašībām sākotnēji sniedz

būtisku pienesumu nestspējas palielinājumam, līdz konkrētā slāņa biezums jau paliek pietiekoši liels, kad tas sāk tuvojies maksimāli iespējamajai nestspējai uz konkrētā materiāla un līdz ar to nestspējas palielinājums kļūst mērens. 6.6. attēlā attēlots nestspējas noteikšanas grafiks (E_{v2} -i pieņemts 25MPa, M pieņemts 90MPa un $H=30$ cm). Būtībā ir definēts, ka maksimāli iespējams sasniegt E_{v2} vērtību, kas atbilst ierobežoto deformāciju moduļa vērtībai



6.6. attēls. Aprakstītā piemēra eksponenciālais grafiks

Lai pārbaudītu izstrādātās formulas precizitāti, tā tika pielietota ģeotehniskās izpētes datu analizē. Ar analītisko aprēķinu iegūtās vērtības tika salīdzinātas ar ģeotehniskās izpētes laikā veikto statistiskās plātnes testu rezultātiem, kā arī ar galīgo elementu metodi simulēto statistiskās plātnes testu rezultātiem. Veiktās aprēķinu formulas analīze, pārbaudes rezultāti apkopoti 6.2. nodaļā.

6.2. Ceļa konstrukcijas esošā pamata atlikušās nestspējas novērtējums

6.2.1. Ģeotehniskā izpēte

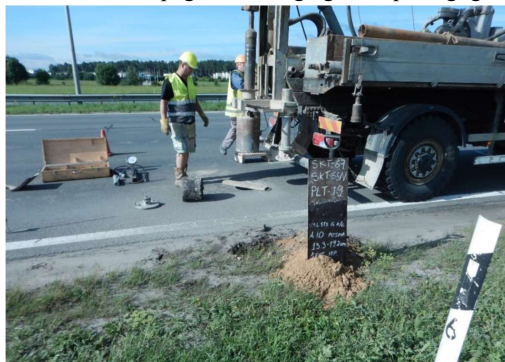
Ceļu pastiprināšanas un rekonstrukcijas projektu ietvaros vienmēr tiek veikta esošās grunts un ceļa klātnes ģeotehniskā izpēte. Atkarībā no rekonstruējamā ceļa kategorijas un transportlīdzekļu satiksmes intensitātes projektēšanas uzdevumā tiek definētas minimālās ģeotehniskās izpētes prasības, kas sevī ietver grunts urbumus, dažādas zondēšanas izpētes, statisko slogošanas plātni, grunts paraugu laboratorijas testi un citas izpētes.

Ģeotehniskās izpētes pamatojums – sniegt pasūtītājam nepieciešamo informāciju, lai nodrošinātu pilnvērtīgu autoceļa segas pastiprināšanas (pārbūves) būvprojekta izstrādi. Sniegt būvprojekta izstrādei nepieciešamo informāciju par esošās ceļa brauktuves segas uzbūvi, ceļa klātnes uzbūrumu un dabīgās pamatnes gruntīm, tai skaitā ceļa klātnes konstruktīvo kārtu, uzbūruma materiāla un dabīgo grunts slāņu sastāvu, īpašībām un slāņu/kārtu izplatību gan šķērsgriezumā, gan garengriezumā. Ģeotehniskās izpētes uzdevums – ierīkojot izpētes urbumus un noņemot grunts paraugus, kā arī veicot lauka (in-situ) pārbaudes un laboratorijas testus, ir iegūt informāciju par ceļa segas uzbūvi, ceļa klātnes konstruktīvo kārtu īpašībām un dabīgās pamatnes grunts ģeotehnisko parametru raksturīgajām vērtībām.

6.2.2. Autoceļa A10 Rīga-Ventspils esošā pamata nestspējas analīze

6.2.2.1. Esošās pamata konstrukcijas ģeotehniskā izpēte

Valsts galvenā autoceļa A10 Rīga-Ventspils posmā km 13,30 - 19,20 km ģeotehniskās izpētes darbu gaitā kopumā tika ierīkotas 170 izstrādnes: 34 izpētes urbumi blakus ceļa nogāzes pēdai (urbumu dziļums no 1.0 līdz 3.0 m) un 136 skatrakumi uz ceļa brauktuves daļas, kā arī ceļa nomalē (skatrakumu dziļums vidēji 1.0 m). Kopējais urbšanas darbu apjoms sastāda 228.6 m. Lai noteiktu ceļa konstruktīvo kārtu un pagulošo dabīgo grunšu fizikāli mehāniskās īpašības, 15 izpētes punktos veikta dinamiskā zondēšana 3.0 m dziļumā. Kopējas dinamiskās zondēšanas apjoms sastādīja 45.0 m. Papildus, lai noteiktu ceļa pamata nesošās kārtas deformatīvās un izturības īpašības, brauktuves daļā 34 punktos tika veikti statiskās plātnes slogošanas testi. Urbšanas darbu laikā no izpētes urbumiem tika noņemti 68 ceļa segas asfaltbetona paraugi saistvielas satura, granulometriskā sastāva, penetrācijas un mīkstēšanas temperatūras noteikšanai; 34 traucētas struktūras ceļa konstruktīvo kārtu paraugi granulometriskā sastāva noteikšanai; un 25 traucētas struktūras pagulošo dabīgo grunšu paraugi grunts tipa noteikšanai

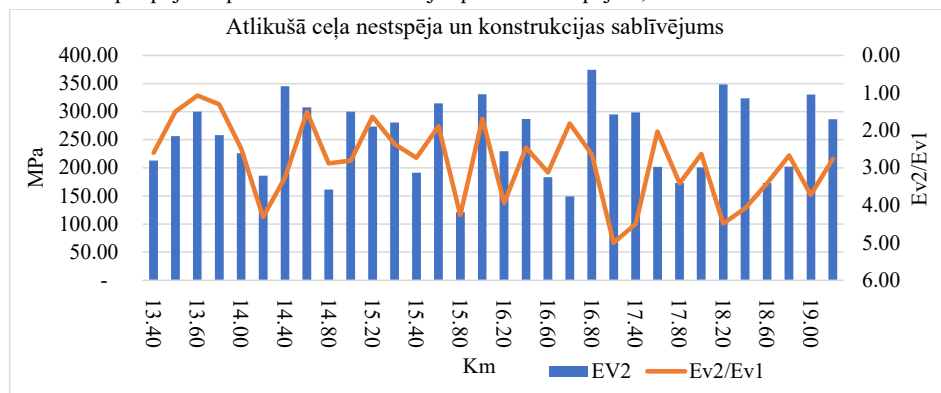


6.7. attēls. Ģeotehniskā izpēte uz valsts galvenā autoceļa A10 Rīga -Ventspils 13.30-19.20 km

Esošā ceļa pamata nesošā virskārtas nesaistīto minerālmateriālu pamats izpētes posmā pēc sastāva un biezuma lielākoties bija mainīgs, to veidoja dolomīta šķembas ar granti vai grants ar oļiem. Toties, nesošā apakškārta sastāv no grants ar oļiem vai grants ar oļu un dolomīta šķembu piejaukumu. Ceļa nesošās kārtas kopējais biežums mainās robežās no 0.22 līdz 0.55 m, vidēji 0.35 m. Nesošās kārtas deformācijas modulis Ev2 izpētes posmā bija ievērojams un norāda uz augstu nesošās kārtas sablīvētības pakāpi. Deformācijas modulis Ev2 mainījās robežās no 161 līdz 374 MPa. Piketā Pk 158+00 (SKT-51/PLT-15) Ev2 bija salīdzinoši zemāks un sasniedz 121 MPa vērtību. Sablīvējuma pakāpi raksturojošā parametru attiecība Ev2/Ev1 mainās no 1.07 līdz 5.00 robežās [79].

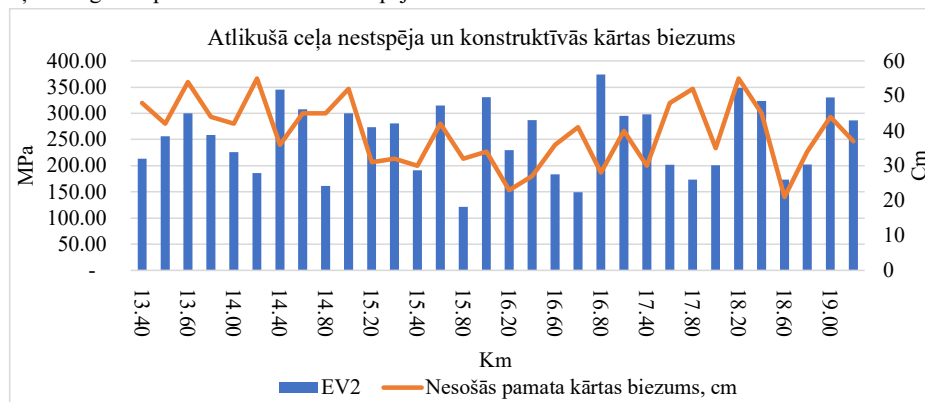
Salizturīgā kārtā lauka darbu gaitā tika konstatēta visās izstrādņēs, tieši zem nesošās kārtas. Salizturīgā kārtā sastāv no smalkgraudainas, blīvas līdz vidēji blīvas smilts. Kārtas biežums mainās robežās no 0.20 līdz 0.60 m, vidējais biežums ir 0.30 m. Vietām salizturīgās kārtas smilšainais maisījums satur oļus vai šķembu piejaukumu. Māla daļiņu saturs (daļiņu izmērs <0.063 mm) kārtā mainās robežās no 2.0 līdz 5.6 %. Organisko vielu saturs kārtā ir <2 %.

Izmantojot ģeotehniskās izpētes laikā veikto statistiskās plātnes testa izpētes rezultātus izstrādāts apkopojums par esošās konstrukcijas pamata nestspējām, skatīt 6.8. attēlu.



6.8. attēls. Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas sablīvējuma

6.8. attēlā redzama esošā pamata nestspēja un pamata sablīvējums. Analizējot iegūtos rezultātus, iespējams vērot sakarību, ka, palielinoties pamata kārtas sablīvējumam, pieaug arī tā nestspēja. Iegūtajos rezultātos ir daži posmi, kuros šī sakarība nav vērojama, piemēram, posmā no 16,8 -17,4km, 18,2-18,4km un 19,0-19,2km. Lai pārliecinātos, kādēļ šajos posmos ir tik liela pamata nestspēja, ņemot vērā zemo sablīvējuma pakāpi, jāsalīdzina nestspējas un esošā šķembu/grants pamata biezuma savstarpējā attiecība.



6.9. attēls. Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas biezuma

6.9. attēlā redzama esošā pamata nestspēja atkarībā no pamata konstrukcijas biezuma. Iegūtajos rezultātos nav vērojama viennozīmīga kopsakarība un iespējams secināt, ka konstrukcijas sablīvējumam ir daudz būtiskāka ietekme uz esošā pamata nestspēju. Iepriekš noteiktajos posmos no 16,8 -17,4km, 18,2-18,4km un 19,0-19,2km vērojams, ka pamata konstrukcijas biezums mainās robežās no 30 līdz 55cm. Posmā no 18,2-18,4 un 19,0-19,2km esošā pamata biezums ir lielāks nekā blakus esošajos posmos un iespējams, tādēļ šeit tika

sasniegta liela esošā pamata konstrukcijas nestspēja, neskatoties uz zemo slāņa sablīvējuma pakāpi. Posma 16,8-17,4km augstos nestspējas rādītājus ar pamata biezuma un sablīvējumu nav iespējams pamatot.


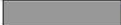
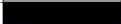
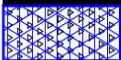


6.2.2.2. Ceļa pastiprināšanas būvdarbi

Saskaņā ar ģeotehniskās izpētes datiem projektēšanas gaitā tiek analizēta esošā pamata nestspēja un izstrādāts ceļa segas konstrukcijas aprēķins. Nav vienotu pieņēmumu, kā precīzāk noteikt palikušo esošā pamata nestspēju, tādēļ tā ir inženiera atbildība un pienākums rūpīgi analizēt pieejamo informāciju, lai izstrādātu kvalitatīvu projektu. Neprecīzi nosakot esošā pamata palikušo nestspēju var ietekmēt būvniecības gaitu un, būvniecības laikā konstatējot reālo situāciju, var nākties izstrādāt speciālus esošā pamata pastiprināšanas risinājumus vai būtiski mainīt paredzētās segas konstrukcijas risinājumu.

Projektā apskatītajam ceļa posmam tika paredzēts izbūvēt ceļa segas pastiprināšanas risinājumu, kas sastāv no esošā pamata, 20 centimetrus biezās reciklētas materiāla kārtas un trīs asfalta kārtām. Uz esošā pamata tika definēts, ka nepieciešams sasniegt 90MPa lielu nestspēju. Šādi nestspējas rādītāji tika noteikti veicot aprēķinus izmantojot "Ieteikumi ceļu projektēšanai Ceļa sega" metodiku. Izmantojot šo aprēķinu metodiku iegūstam teorētiskās slāņu nestspējas vērtības Eekv. Balstoties uz iepriekš realizēto projektu bāzes, iespējams apgalvot, ka starp teorētiskajām aprēķina vērtībām Eekv un statistiskās plātnes testēšanas vērtību Ev2 pastāv savstarpēja korelācija, tādēļ ICP metodikas aprēķinā iegūtā vērtība tika noteikta, kā esošā pamata palikušā nestspēja.

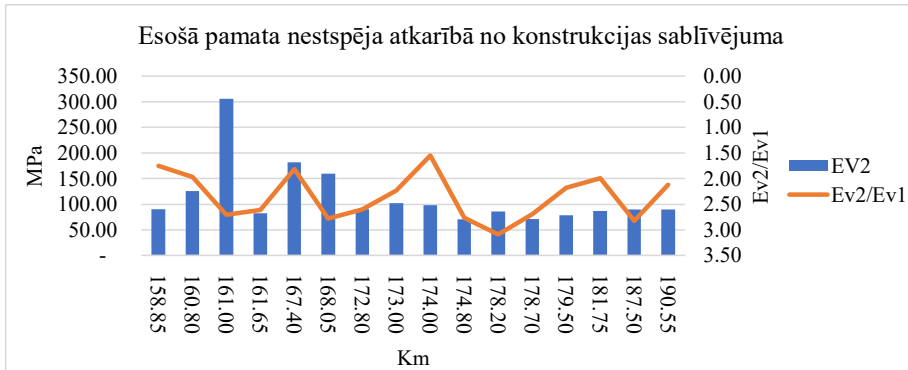
1. segas tips

Segas pastiprināšanas konstrukcija pamatceļam un A5/A10 rampu nobrauktuvēm

	Šķembu mastikas asfalta dilumkārtas būvniecība ar SMA11, h-3.5cm
	Karstā asfaltbetona saistes kārtā AC22 base/bin, h-8cm
	Karstā asfaltbetona apakškārta AC32 base/bin, h-11cm
	Esošās segas reciklēšana (aukstā pārstrāde), hmin-20 cm
	Esošā pamata apakškārta (šķembas vai grants)
	Esošais pamats

6.10. attēls. Projekta risinājumos paredzētā ceļa konstrukcija

Lai pārlicinātos, par izstrādātā risinājuma iespējamo realizāciju un projekta izstrādes laikā aplēsto esošā ceļa pamata nestspēju būvniecības gaitā tika veikti statistiskās plātnes slogošanas mērījumi. Sākotnēji tika nofrezēta vecā asfaltbetona konstrukcija un tests veikts uz esošā pamata zem tās.

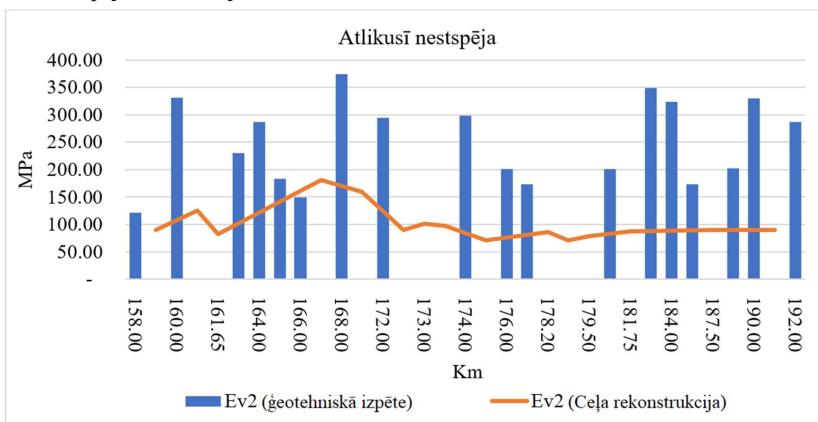


6.11. attēls. Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas sablīvējuma

6.11. attēlā apkopoti būvniecības laikā konstatētā esošā pamata nestspējas rādītāji. Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem redzams, ka vidējā esošā pamata nestspēja ir aptuveni 90MPa, tādēļ var secināt, ka esošā pamata nestspēja noteikta precīzi. Salīdzinājumā ar ģeotehniskās izpētes laikā iegūtajiem rezultātiem, būvniecības laikā iegūtajos rezultātos nav vērojama viennozīmīga kopsakarība starp pamata sablīvējumu un nestspējas izmaiņām.

6.2.2.3. Esošā pamata nestspējas analīze

Katra ceļu projekta izstrādes un realizācijas laikā tiek veikta ģeotehniskā izpēte, ar kuras palīdzību cenšas noteikt esošo grunts slāņu īpašības un ceļa konstrukcijas parametrus. Būvniecības laikā tiek sekots līdzi izbūvēto slāņu kvalitātei, nosakot kārtas nestspēju un sablīvējumu. Var droši apgalvot, ka statiskās plātnes tests tiek veikts katra ceļa projektēšanas un būvniecības gaitā, tādēļ svarīgi saprast kopsakarības, ar kuru palīdzību varētu noteikt esošā pamata nestspēju. 6.12. attēlā veikts ģeotehniskās izpētes un būvniecības gaitā konstatētās esošā pamata nestspējas salīdzinājums.

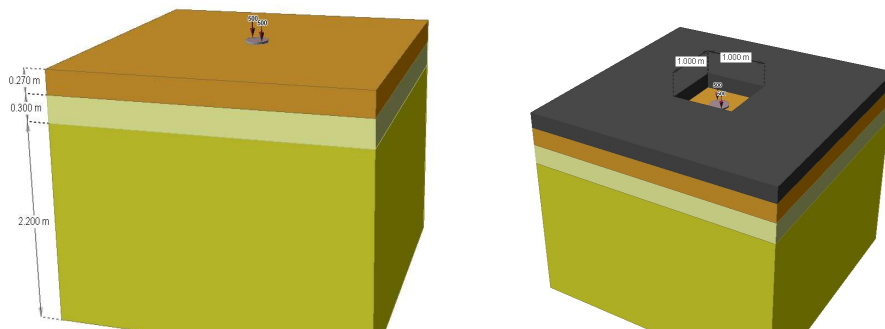


6.12. attēls. Konstrukcijas atlikusī nestspēja

Salīdzinot projekta izstrādes un būvniecības gaitā noteiktos nestspējas rādītājus, var secināt, ka ģeotehniskajā izpētē iegūtie rezultāti ir vidēji 1,8 reizes, jeb par 80% lielāki nekā būvniecības laikā noteiktie. Šāds nestspējas samazinājums var radīt riskus, ka nepieredzējis inženieris projektā definē esošā pamata nestspēju, balstoties tikai uz ģeotehniskās izpētes gaitā iegūtajiem statistiskās plātnes rezultātiem. Faktiskos pamata nestspējas rādītājus ietekmē vēl citi grunts īpašību parametri un ,protams, pastāv citi faktori (ģeoloģiskās situācijas nevienādīgums, asfaltbetona pašsvara radītā ietekme un ģeotehniskās izpētes rezultātiem un citi), kas var būtiski ietekmēt sasniegtos rezultātus.

Viens no būtiskākajiem rezultātu ietekmējošajiem faktoriem varētu būt atšķirīgie pamata slogošanas apstākļi. Ģeotehniskās izpētes laikā skatrakumu veidošanai tiek izgriezts neliels asfaltbetona laukums, lai varētu tikt pie esošā pamata konstrukcijas, veiktu statistiskās plātnes testu un noteiktu, kādi grunts slāņi atrodas ceļa konstrukcijā un zemes klātnē. Būvniecības laikā statistiskās plātnes tests tiek veikts brīdī, kad uz testējamās kārtas virsū neatrodas cits materiāls, kas varētu ietekmēt plātnes testa rezultātus. Lai pārliecinātos, cik ļoti mainās esošā pamata nestspējas vērtības, ņemot vērā dažādos testēšanas apstākļus, veikts teorētisks galīgo elementu aprēķins simulējot statistiskās plātnes testu, kuram par pamatu ņemts ģeotehniskās izpētes laikā veikto zondējumu grunts slāņu interpretācijas un slāņu biezumi. Aprēķins izstrādāts balstoties uz DIN 18134 (Testing procedures and testing equipment – Plate-loading test) aprakstīto testēšanas procedūru.

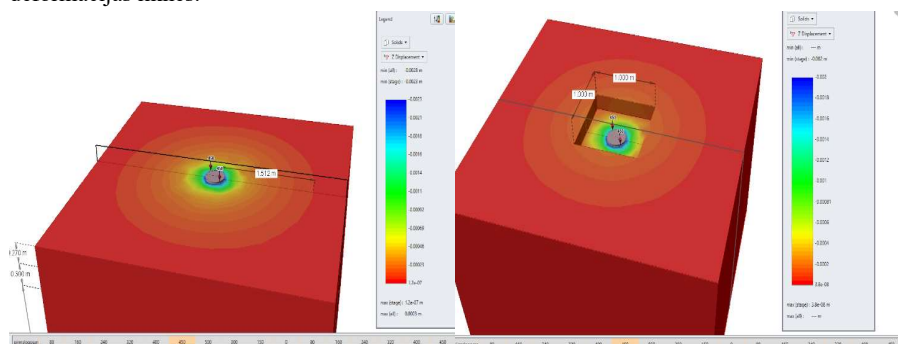
Name	Colour	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m ³)	Peak Friction Angle (°)	Peak Friction Angle (°)	Residual Cohesion (kPa)	Residual Friction Angle (°)	Residual Friction Angle (°)	Distortion Angle (°)	Young's Modulus (kPa)
Asfaltbetons	■	Fixed Stress & Body Forces	19	0	32	0	0	35	0	202000
SMRT, smiltis, līnais	□	Fixed Stress & Body Forces	21	0	36.45	0	0	32	0	34600
SMRT, smiltis, vārdi vārdi	■	Fixed Stress & Body Forces	18.7	0	31.85	0	0	31	0	25160
mešai	■	Fixed Stress & Body Forces	78	0	60	350000				200000000
Asfaltbetons	■	Fixed Stress & Body Forces	22	400	40	0	200	40	0	2000000



6.13. attēls. Galīgo elementu aprēķina modelis

Izstrādātajam galīgo elementu aprēķinam par pamatu izmantots zondes tests DPM-62 (16,4 km). 6.13. attēla kreisajā malā redzama statistiskās plātnes slogošanas shēma būvniecības laikā, bet labajā malā aptuveni slogošanas apstākļi ģeotehniskās izpētes laikā. Ierobežotos satiksmes apstākļos ģeotehniskās izpētes laikā bieži vien tiek veikti izmēra ziņā daudz mazāki skatrakumi, bet priekš analītiskā aprēķina pieņemts skatrakums 1x1m izmērā. Statiskās plātnes diametrs pieņemts 0,3m un slogošanas pirmais cikls tiek veikts 7 pakāpēs, līdz tiek sasniegta maksimālā

slodze, bet otrs cikls tiek veikts 6 pakāpēs (skat. 6.14. attēlu). Katrā slogošanas stadijā tiek fiksēta sasniegtā deformācija un, līdzīgi, kā statiskās plātnes testa iekārtās iespējams izstrādāt deformācijas līknes.



6.14. attēls. Galīgo elementu aprēķina rezultāti

Pēc aprēķina modeļa konstatēts, ka pieliktā slodze izplatās aptuveni 1,5m rādiusā no slogošanas centra. Ja virs esošā ceļa pamata konstrukcijas ir vecais asfaltbetons, tad pamata deformācijas statiskās plātnes testa laikā ir nedaudz mazākas (maksimālā deformācija bez asfalta kārtas – 2,8mm, bet ar asfalta kārtu – 2,3mm), jo pamata slānis nevar deformēties izspiežoties uz sāniem un augšu, jo asfaltbetona kārtā to nepieļauj.

Aprēķinot esošā pamata teorētisko nestspēju iegūtas būtiskas rezultātu atšķirības:

- Konstrukcija bez asfaltbetona virskārtas (simulējot ceļa būvniecības slogošanas apstākļus) – $E_{v1}=105,97\text{MPa}$; $E_{v2}=152,58\text{MPa}$; $E_{v2}/E_{v1}=1,43$,
- Konstrukcija ar asfaltbetona virskārtu un skatrakumu 1x1m izmērā (simulējot ģeotehniskā izpētes slogošanas apstākļus) – $E_{v1}=117,26\text{MPa}$; $E_{v2}=203,39\text{MPa}$; $E_{v2}/E_{v1}=1,73$.

Esošās pamata konstrukcijas nestspējas pēc galīgo elementu aprēķina modeļiem uzrāda 50MPa, jeb 30% lielu atšķirību. Faktiski samazinot skatrakuma laukumu šī atšķirība tikai pieaug un, lai par to pārliciecinātos izstrādāts trešais aprēķina modelis, kura skatrakums veidots apļveida formā ar diametru 34cm. Šāda skatrakuma forma un izmērs atbilst konkrētajam autoceļa A10 ģeotehniskajam izpētes punktam.



6.15. attēls. Ģeotehniskās izpētes skatrakums 16.4 kilometrā

Izstrādātajam galīgo elementu trešajam aprēķina modelim par pamatu izmantotas tās pašas esošās grunts īpašības no zondes testa DPM-62. Izveidojot tik mazu skatrakuma laukumu tiek būtiski samazināta iegūto rezultātu atbilstība reālajai situācijai būvniecības laikā, jo uz esošās pamata konstrukcijas papildus statistiskās plātnes izraisītajai slodzei iedarbojas asfalta kārtas pašsvara slodze un tā ierobežo esošā pamata deformācijas.

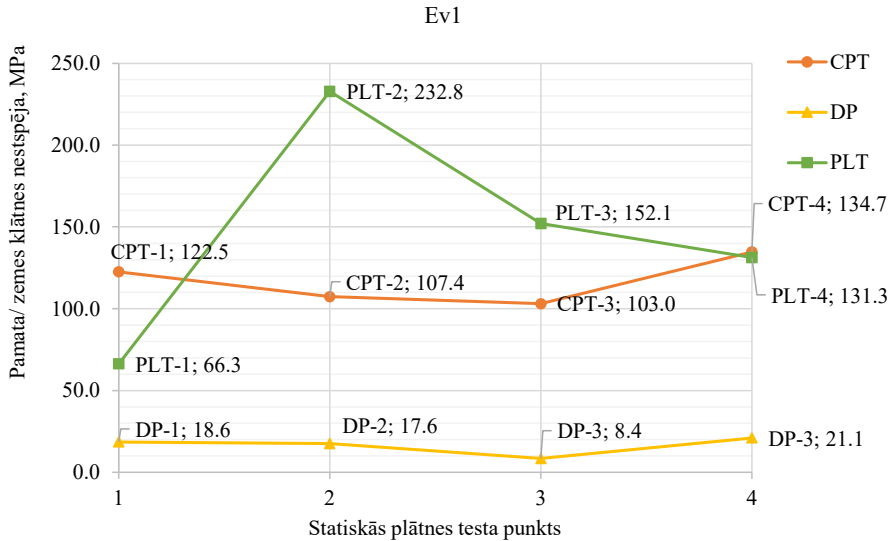
Konstrukcijai ar aplūveida skatrakumu iegūti sekojoši rezultāti – $E_{v1}=103,91\text{MPa}$; $E_{v2}=333,70\text{MPa}$; $E_{v2}/E_{v1}=3,21$. Salīdzinot teorētiski iegūtās esošā pamata nestspējas ar statistiskās plātnes datiem, varam redzēt, ka ģeotehniskās izpētes laikā punktā, kas atrodas 16,4 kilometrā noteikta $E_{v2}=287,1\text{MPa}$ nestspēja, bet galīgo elementu simulācijas aprēķina rezultāti uzrādīja $E_{v2}=333,70\text{MPa}$ nestspēju. Rezultātu atšķirība ir 16%, un varam uzskatīt, ka aprēķinu modelis sniedz salīdzinoši precīzus rezultātus, ņemot vērā, ka grūti novērtēt esošās asfalta kārtas ietekmi uz deformāciju attīstību, līdz ar to tika izdarītas būtiskākās kopsakarības.

Visi trīs izstrādātie galīgo elementu aprēķina modeļi izstrādāti balstoties uz identiskām teorētiskajām materiālu īpašībām, bet katram modelim bija atšķirīgi slogošanas apstākļi. Pēc datu analīzes var secināt, ka vislielāko ietekmi uz statistiskās plātnes testu rezultātiem sniedz slogošanas apstākļi, jeb tas vai virs testējamās kārtas ir izbūvēta vēl kāda kārta, kas varētu ietekmēt rezultātu precizitāti. Samazinot skatrakuma laukumu no $1\times 1\text{m}$ uz $0,34\text{m}$ diametrā E_{v2} vērtība pieauga par 64 %. Salīdzinot iegūtās nestspējas vērtības skatrakumam ar diametru $0,34\text{m}$ un konstrukcijai bez asfalta, konstatēts, ka E_{v2} vērtības atšķiras 119% apmērā. Šie rādītāji sniedz neapšaubāmu priekšstatu, ka ģeotehniskās izpētes dati nesniedz precīzus rezultātus, ja netiek sagatavots pietiekoši liels skatrakuma laukums, bet, ņemot vērā faktu, ka izpētes gaitā nav iespējams izveidot vismaz $1,5\times 1,5\text{m}$ lielu asfalta izgriezumu tad inženierim ir jāievērtē aptuvenais procentuālais nestspējas samazinājums atkarībā no ģeotehniskās izpētes laikā izveidotā skatrakuma izmēra. Tādēļ veidojot skatrakumu un izpildot statistiskās plātnes testu ir svarīgi veikt foto fiksācijas ar kuru palīdzību iespējams novērtēt testa apstākļus.

6.2.3. Autoceļa P86 posma 33,59-37,87km ģeotehniskās izpētes datu analīze

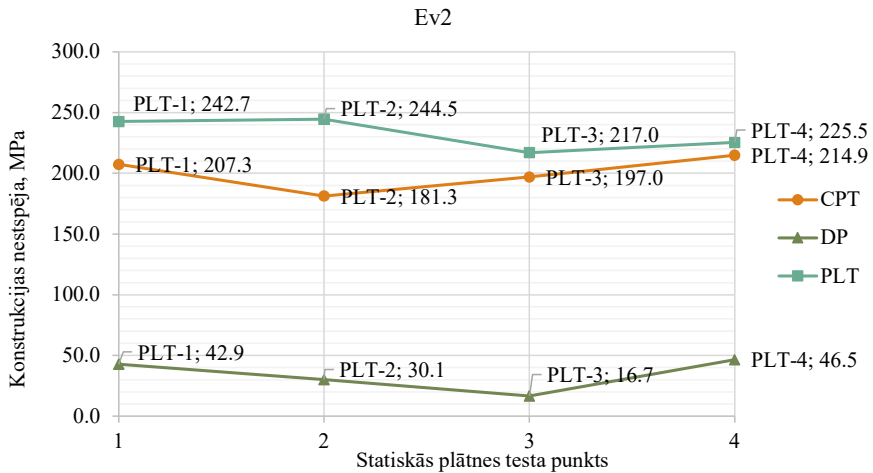
Veikta autoceļa P86 (Sērene – Kalnieši) ģeotehniskās izpētes datu analīze. Lai noteiktu esošās ceļa konstrukcijas nesaistītās pamata kārtas atlikušo nestspēju, sablīvējumu un stiprības īpašības, brauktuves daļā 4 punktos tika dublēti statistiskās plātnes (PLT), statistiskās zondes (CPT) un dinamiskās zondes (DPT) testi.

Lai noteiktu, kura no ģeotehniskās izpētes metodēm (statiskā zonde vai dinamiskā zonde) sniedz precīzākus un piemērojamākus grunts parametru interpretācijas, tika veiktas statistiskās plātnes testa simulācijas izmantojot abu zondēšanas metožu datu interpretācijas. Ar galīgo elementu metodi veikto aprēķinu rezultāti tika salīdzināti ar statistiskās plātnes testa rezultātiem, kas tika veikti autoceļa ģeotehniskās izpētes laikā. Lai gan pētījuma svarīgākais mērķis bija analizēt, vai ar statistiskās plātnes testa simulāciju ir iespējams precīzi noteikt esošā pamata atlikušo nestspēju (sk. 6.17. att.), papildus tika veikts arī pirmā slogošanas cikla nestspējas salīdzinājums (sk. 6.16. attēlu).



6.16. attēls. Pirmā složošanas cikla atlikušās pamata nestspējas salīdzinājums

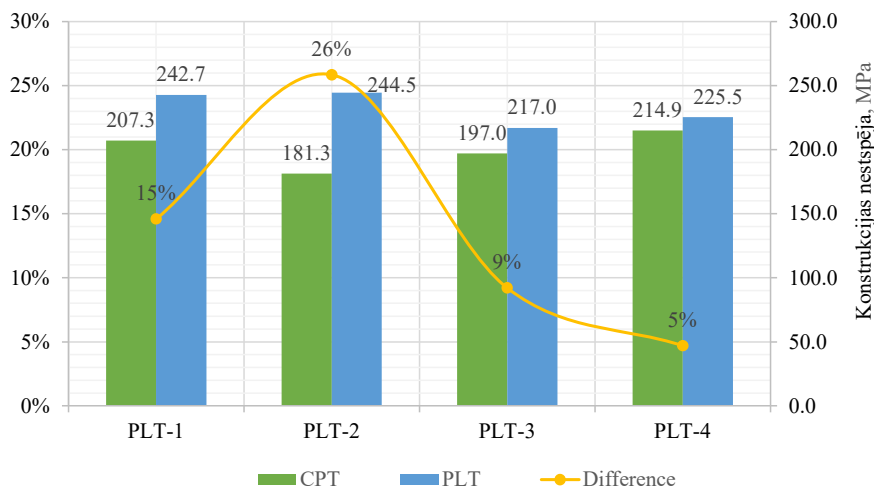
6.16. attēlā parādīti rezultāti un aprēķinātās vērtības no statiskās plātnes pirmā slodzes cikla. Kā redzams no iegūtajiem galīgo elementu aprēķinu rezultātiem, statiskās plātnes simulācijas, izmantojot dinamiskās zondēšanas datus, dod zemas Ev1 vērtības. Rezultāti bija aptuveni 10 reizes mazāki salīdzinājumā ar vērtībām, kas noteiktas izmantojot abas pārējās izpētes metodes.



6.17.attēls Esošā ceļa konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja

6.17. attēlā parādīta esošā ceļa pamata nestspēja. Galīgo elementu simulācija, izmantojot statiskās zondēšanas testa (CPT) datus, nodrošina salīdzinoši precīzus rezultātus, salīdzinot ar ģeotehniskās izpētes laikā veikto statiskās plātnes testu (PLT). Aprēķini, izmantojot dinamiskās

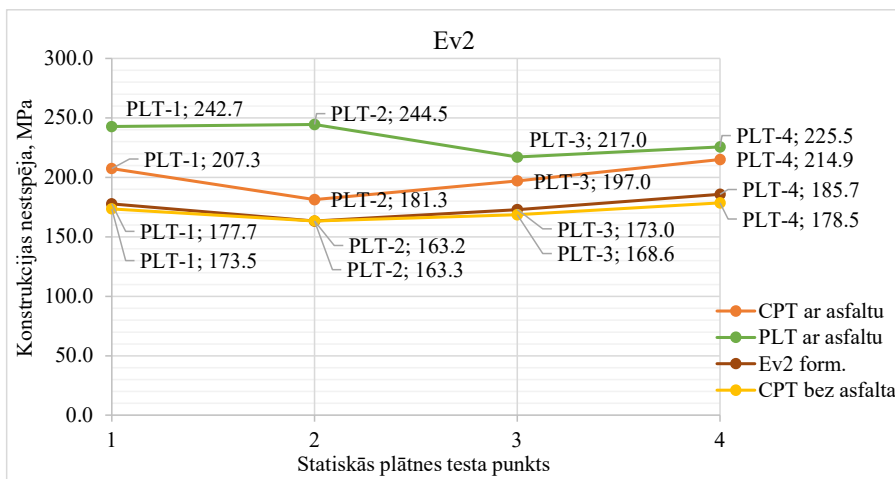
zondēšanas datu (DPT) interpretācijas, dod daudz mazāku esošā pamata nestspēju, tāpēc šos datus nav iespējams izmantot statistiskās plātnes testa simulācijai. Ņemot vērā, lielās rezultātu atšķirības, 6.18. attēlā ir salīdzināti tikai CPT un PLT rezultāti.



6.18.attēls Iegūto rezultātu salīdzinājums

6.18. attēlā veikts esošās ceļa konstrukcijas nesaistītās pamata kārtas nestspējas salīdzinājums. Salīdzināti statistiskās plātnes testa galīgo elementu simulācijas (izmantojot CPT datu interpretācijas) un ģeotehniskās izpētes laikā veikto statisko plātnes testu. Lielākā rezultātu atšķirība bija 26 procenti, bet vismazākā atšķirība bija 5 procentu robežās. Lielākās atšķirības iegūtajos rezultātos varētu būt radušās esošās asfalta kārtas ietekmē. Ģeotehniskās izpētes laikā, ņemot tikai nelielu daļu no asfalta kārtas, tiek izveidots neliels skatrakums statistiskās plātnes testa pārbaudei. Blakus skatrakumam esošais nedemontētais asfalts statistiskās plātnes testa laikā ietekmē deformāciju attīstību nesaistītajās pamata kārtās un līdz ar to ietekmē iegūtos rezultātus.

Ģeotehniskās izpētes laikā statistiskās plātnes tests uz brauktuves daļas lielākoties tiek veikts skatrakumā. Tas tiek izveidots, ņemot esošās asfalta kārtas aptuveni statistiskās plātnes diametra izmērā, tādēļ atlikušie, blakus esošie asfaltbetona slāņi rada ietekmi uz testa gaitu un iegūtajiem rezultātiem. Promocijas darba ietvaros izstrādātā analītiskā aprēķina formula nespēj ievērtēt blakus statistiskās plātnes testam atstātās asfalta kārtas, līdz ar to ģeotehniskās izpētes laikā veiktās statistiskās plātnes testa datus nav iespējams tieši salīdzināt ar analītisko Ev2 aprēķinu rezultātiem. Lai veiktu salīdzinājumu un pārlicinātos, ka izstrādātā (6.1.) formula sniedz atbilstošus rezultātus veikta statistiskās plātnes testa simulācija, ņemot asfalta kārtas visā brauktuves zonā. Aprēķina rezultāti un salīdzinājums parādīts 6.19. attēlā. Analītiskie aprēķinu rezultāti iegūti izmantojot (6.1.) formulu u par pamatu ņemot statistiskās zondes datu interpretācijas.

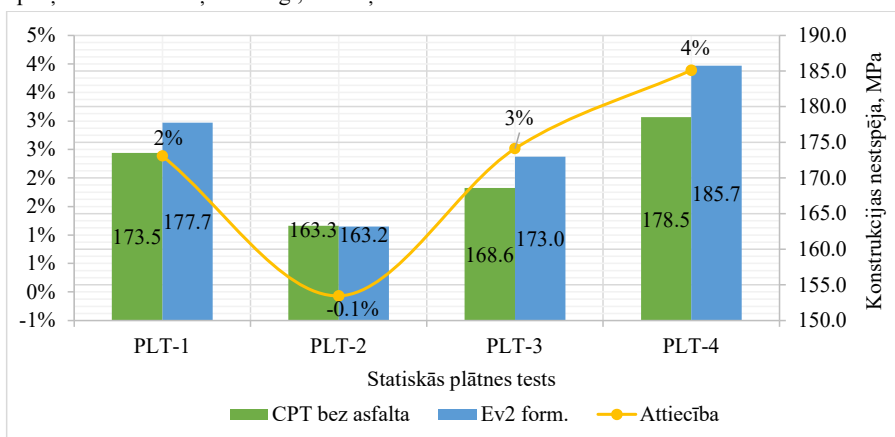


6.19.attēls P86 ceļa esošās konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja

6.19. attēlā parādīta esošā ceļa pamata nestspēja. Rezultātos attēloti analītiski noteiktie esošā pamata nestspējas rādītāji, galīgo elementu simulācijas izmantojot statistiskās zondes interpretāciju datus (vienā scenārijā aprēķinos iekļaujot esošo asfalta kārtu un otrā veicot simulāciju bez asfalta), kā arī ģeotehniskās izpētes laikā veiktās statistiskās plātnes datus.

Pēc aprēķina rezultātiem iespējams secināt, cik lielu ietekmi uz esošā pamatu nestspēju rada blakus skatracumam esošais asfalts. Galīgo elementu statistiskās plātnes simulācijas rezultātu atšķirība, salīdzinot aprēķinu ar un bez esošā asfalta, vidēji ir 30MPa. Tādējādi varam secināt, ka skatracumam blakus esošās asfalta kārtas un tās biezums var būtiski iespaidot ģeotehniskās izpētes laikā veiktās statistiskās plātnes testa rezultātus.

Analītiskā aprēķina un galīgo elementu statistiskās plātnes simulācijas, bez asfalta konstrukcijas, rezultātu salīdzinājums redzams 6.20. attēlā. Kā redzams pēc 6.19. attēla abu šo aprēķinu rezultāti ir ļoti līdzīgi, un atšķirības ir minimālas.



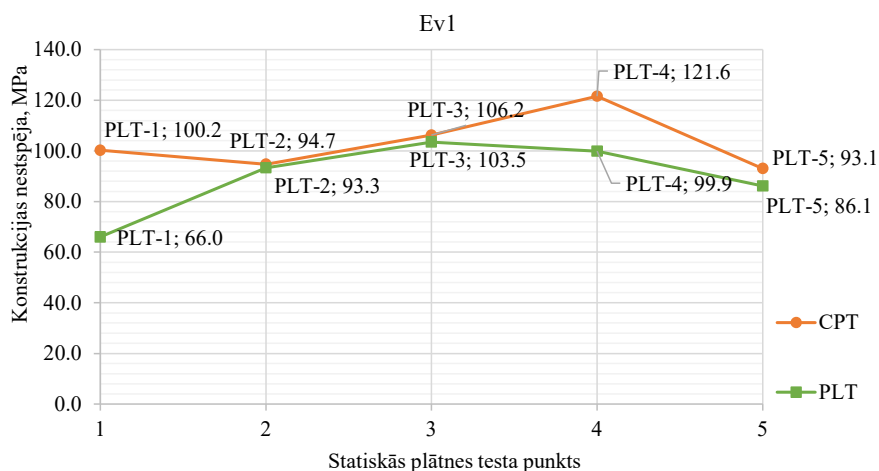
6.20.attēls Iegūto rezultātu salīdzinājums

6.20. attēlā veikts ceļa konstrukcijas, bez esošā asfalta, nesaistītās pamata kārtas nestspējas salīdzinājums. Salīdzināti statistiskās plātnes testa galīgo elementu simulācijas un izstrādātās analītiskās aprēķinu formulas rezultāti. Lielākā rezultātu atšķirība bija 4 procenti, bet vismazākā atšķirība bija 0.1 procentu robežās. Ar abām metodēm noteiktās esošā pamata nestspējas vērtības ir līdzvērtīgas. Varam secināt, ka izstrādātā aprēķina formula sniedz objektīvus esošā pamata nestspējas rezultātus un (6.1.) formulu, izmantojot CPT datu interpretācijas, iespējams pielietot esošā pamata novērtēšanai.

6.2.4. Autoceļa A10 posma 13,30 - 19,20 km ģeotehniskās izpētes datu analīze

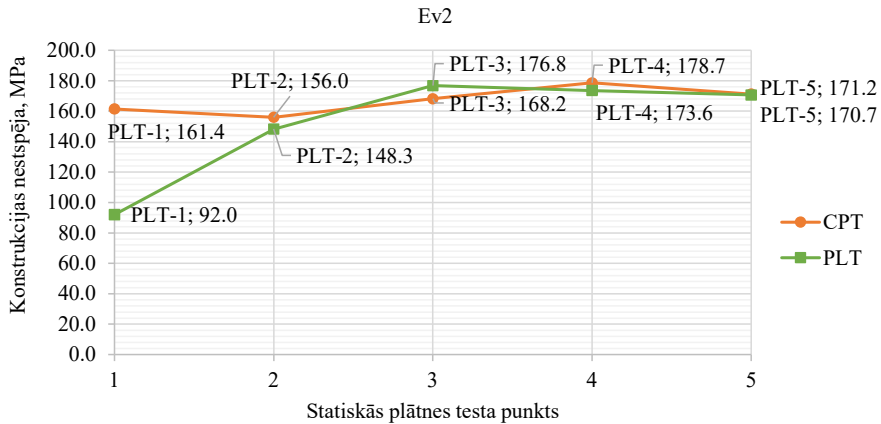
Veikta autoceļa A10 (Rīga-Ventspils) ģeotehniskās izpētes un būvdarbu kvalitātes datu analīze. Ceļa būvdarbu laikā tika veikts testa posms, uz nesaistītās minerālmateriālu kārtas tika dublēti 5 statistiskās plātnes testi (PLT) un 5 statistiskās zondēšanas testi (CPT).

Ar galīgo elementu metodi veikto aprēķinu rezultāti tika salīdzināti ar ģeotehniskās izpētes laikā veiktajiem statistiskās plātnes testa rezultātiem. Lai gan pētījuma svarīgākais mērķis bija analizēt, vai ar statistiskās plātnes testa simulāciju ir iespējams precīzi noteikt esošā pamata atlikušo nestspēju (sk. 6.22. att.), tomēr tika veikts arī pirmā pamatnes slogošanas cikla salīdzinājums.(skat. 6.21. attēlu).



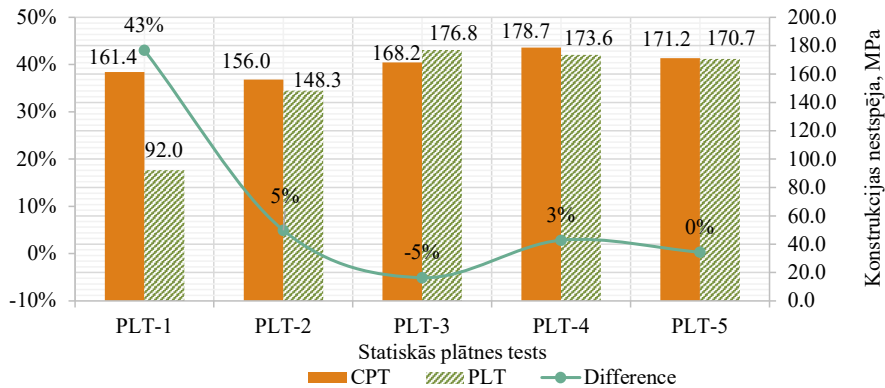
6.21.attēls Esošā pamata nestspēja pēc pirmā slogošanas cikla

Kā redzams no 6.21. attēla, ģeotehniskās izpētes laikā veiktās statistiskās plātnes testa pārbaudes un ar galīgo elementu metodes statistiskās plātnes testa simulācijas rezultāti ir līdzvērtīgi. Atsevišķos punktos atšķirības ir nedaudz lielākas, taču galvenais pētījuma mērķis bija salīdzināt esošā pamata nestspēju.



6.22 attēls Esošā ceļa konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja

6.22. attēlā parādīta esošā ceļa pamata nestspēja. Iegūtie rezultāti ir ļoti precīzi. Ģeotehniskās izpētes gaitā noteiktā pamatu nestspēja 1.punktā ir salīdzinoši daudz zemāka nekā pārējos 4 punktos, līdz ar to objektā veiktais statiskās plātnes tests varēja būt nepilnīgs un iegūtie dati bijuši neprecīzi. Iegūtie CPT un PLT rezultāti ir salīdzināti 6.23. attēlā.

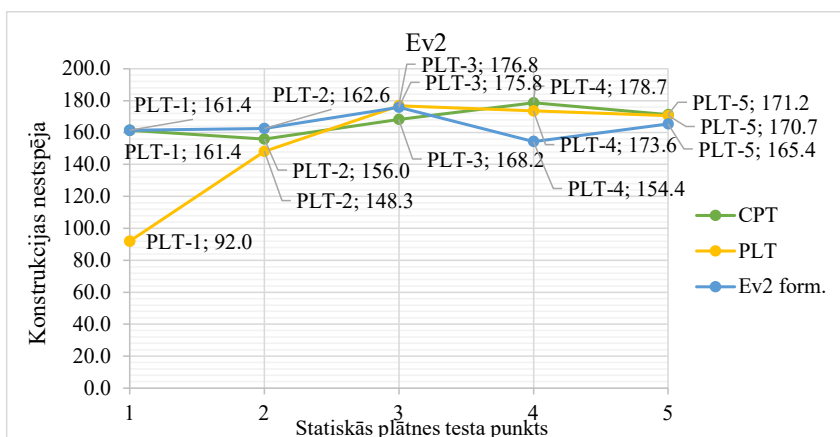


6.23. attēls Iegūto rezultātu salīdzinājums

Kā redzams 6.23. attēlā, vidējā rezultātu atšķirība ir 3 procentu robežās. Var secināt, ka esošā pamata atlikušo nestspēju var noteikt ar galīgo elementu metodi, simulējot statiskās plātnes testu, izmantojot grunts fizikāli mehāniskās īpašības, kas iegūtas no statiskās zondēšanas testa interpretācijām.

Pamata esošā nestspēja, kas noteikta ar statiskās plātnes testu pirmajā punktā, ir salīdzinoši daudz zemāka nekā citās vietās, tādēļ veiktā pārbaude varētu būt bijusi nepilnīga, un līdz ar to iegūtie dati PLT-1 ir neprecīzi.

Promocijas darba ietvaros izstrādāta analītiskā aprēķina formula un, lai pārliicinātos, ka izstrādātā (6.1.) formula sniedz atbilstošus rezultātus veikts CPT, PLT un analītiskā aprēķina salīdzinājums. Aprēķina rezultāti un salīdzinājums parādīts 6.24. attēlā.

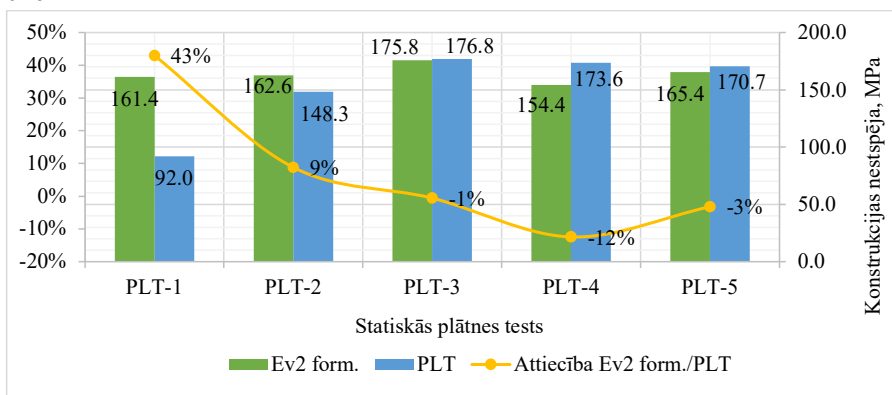


6.24.attēls A10 ceļa esošās konstrukcijas pamata atlikusī nestspēja

6.24. attēlā parādīta esošā ceļa pamata nestspēja. Rezultātos attēloti analītiski noteiktie esošā pamata nestspējas rādītāji, galīgo elementu simulācijas izmantojot statistiskās zondes interpretācijas datus, kā arī veiktās statistiskās plātnes testa dati.

Pēc aprēķina rezultātiem iespējams secināt, ka izstrādātā analītiskā formula spēj objektīvi noteikt esošā pamata nestspēju. Ja ģeotehniskās izpētes laikā veikta statistiskās zondes izpēte, tad tās datu interpretācijas iespējams izmantot analītiskā esošā pamata nestspējas noteikšanā.

Analītiskā aprēķina un veiktās statistiskās plātnes testa rezultātu salīdzinājums redzams 6.25. attēlā.



6.25.attēls Iegūto rezultātu salīdzinājums

6.25. attēlā veikts ceļa konstrukcijas nesaistītās pamata kārtas nestspējas salīdzinājums. Salīdzināti ģeotehniskās izpētes statistiskās plātnes testa un izstrādātās analītiskās aprēķinu formulas rezultāti. Lielākā rezultātu atšķirība, līdzīgi kā 6.23. attēlā bija pirmajā izpētes punktā. Veiktā pārbaude varētu būt bijusi nepilnīga, un līdz ar to ģeotehniskās izpētes laikā iegūtie PLT-1 dati ir neprecīzi.

Neņemot vērā 1. izpētes punktu, vislielākā rezultātu atšķirība bija 12 procenti, bet vismazākā atšķirība bija 0.6 procentu robežās. Ar abām metodēm noteiktās esošā pamata nestspējas vērtības ir līdzvērtīgas. Varam secināt, ka izstrādātā aprēķina formula sniedz objektīvus esošā pamata nestspējas rezultātus un (6.1.) formulu, izmantojot CPT datu interpretācijas, iespējams pielietot esošā pamata novērtēšanai.

Faktiskos pamata nestspējas rādītājus ietekmē dažādi grunts īpašību parametri un pastāv citi faktori (ģeoloģiskās situācijas neviendabīgums, asfaltbetona pašsvara radītā ietekme uz ģeotehniskās izpētes rezultātiem un citi), kas var būtiski ietekmēt sasniegtos rezultātus.

Ģeotehniskās izpētes laikā noteiktā pamata nestspēja var būt līdz pat 3 reizēm lielāka nekā būvniecības laikā konstatētā, tādēļ ļoti svarīgi analizēt ne tikai statistiskās plātnes datus, bet arī grunts paraugu laboratorijas datus, lauku izpētes datus (dinamiskā, statistiskā zondēšana, spārņingriezies testi).

Vislielākā ietekme uz esošā pamata nestspējas rādītājiem ir atšķirīgajiem testēšanas apstākļiem. Esošā asfaltbetona vai cita tipa konstrukcija, kas atrodas virs testējamā slāņa liedz iegūt atbilstošus rezultātus, jo izveidotajam skatrakumam ir pārāk mazs laukums un pamata slānis nevar deformēties izspiežoties uz sāniem un augšu, tādējādi tiek sasniegti augstāki esošā pamata nestspējas rādītāji, nekā tie ir patiesībā.

Pēc statistiskās plātnes datu rezultātiem iespējams vērot sakarību, ka palielinoties pamata kārtas sablīvējumam pieaug arī tā nestspēja. Tādēļ gadījumā, ja esošais pamats nav pietiekoši blīvs vai zemes klātnē atrodas irdena vai mīksta grunts esošā pamata nestspēja būs būtiski zemāka un projekta izstrādes gaitā jāmeklē risinājumi, kā irdeno vai mīksto grunti sablīvēt, lai nebūtu jāveic pilna ceļa konstrukcijas pārbūve.

Ģeotehniskās izpētes laikā, veidojot skatrakumus, urbumus un veicot statistiskās plātnes testus, ir svarīgi veikt foto fiksācijas, jo ar fotogrāfiju palīdzību ir iespējams novērtēt veikto testu apstākļus un citas svarīgas detaļas.

Ģeotehniskās izpētes laikā veicot statistiskās plātnes testu, samazinoties skatrakuma izmēram, būtiski palielinās atšķirība starp ģeotehniskās izpētes un ceļu būvdarbu laikā iegūtajiem esošā pamata nestspējas rezultātiem.

Ar izstrādāto analītisko aprēķina formulu, iespējams, objektīvi noteikt esošā pamata nestspēju. Ja ģeotehniskās izpētes laikā veikta statistiskās zondes izpēte, tad tās datu interpretācijas iespējams izmantot analītiskā esošā pamata nestspējas noteikšanā.

Dinamiskās zondes interpretācijas nav iespējams izmantot statistiskās plātnes testa simulācijai, jo iegūtie rezultāti uzrāda ievērojami mazāku nestspēju.

Izstrādāta statistiskās plātnes testa simulācijas metode autoceļa konstrukcijas nestspējas modelēšanai sniedz ļoti precīzus rezultātus, veicot aprēķinus uz nesaistītām seguma kārtām bez skatrakuma izveides.

7. SECINĀJUMI

Promocijas darbā izvirzītais mērķis un uzdevumi ir sasniegti. Ir izstrādāta aprēķina metode autoceļu konstrukcijas nestspējas modelēšanai, izmantojot grunts slāņu un citu materiālu īpašības, kā arī izstrādāts transporta slodzes modelis, kuru izmantot autoceļu ģeotehnisko aprēķinu veikšanai un projekta risinājumu izstrādei.

Promocijas darba rezultātā ir iegūti šādi galvenie secinājumi.

1. Pirmo reizi Latvijā veikts, savstarpējs salīdzinājums apskatot dažādu zondēšanas metožu interpretētās grunts parametru vērtības. Ģeotehniskās izpētes metodes lielākoties tiek izvēlētas, ņemot vērā izpētes izmaksas. Ir ļoti būtiski noteikt iegūto ģeotehniskās izpētes datu kvalitāti, jo tie var būtiski ietekmēt konstrukcijas kalpotspēju.
2. Pētījuma rezultātā ir noteikts, ka statiskās zondes interpretācijas uzrāda visaugstākās grunts slāņu parametru vērtības. Tā uzrādīja lielāku ierobežoto deformāciju moduļa vērtību, vidēji 10 reizes augstāku stiprību par DCP un 2 reizes augstāku stiprību par DMT interpretētajām vērtībām. Ģeotehniskās izpētes metodes izvēle var būtiski iespaidot projekta risinājumus, būvniecības izmaksas un radīt situāciju, ka izstrādātie projekta risinājumi nespēj nodrošināt ceļa kalpotspēju.
3. Atbilstoši aprēķiniem noteikts, ka 60-90% no kopējās konstrukcijas sēšanās attīstās vājas nestspējas grunts slānī, līdz ar to vislielāko ietekmi uz aprēķinu rezultātiem rada vājas nestspējas grunts slāņa parametri. Salīdzinot kūdras slāņa konsolidācijas laboratorijas testa rezultātus ar CPT un DMT interpretācijām, tika noteikts, ka Dilatometra izpēte ļoti precīzi noteikusi grunts deformāciju moduļa vērtību, atšķirība ir mazāka par 2MPa, toties statiskā zonde noteikusi pārāk augstas vērtības, aptuveni par 12MPa augstākas. Līdz ar to secināts, ka aprēķini, izmantojot statiskās, zondes datus var sniegt pārāk optimistiskus gala rezultātus.
4. Iegūtie ceļa konstrukcijas deformāciju aprēķini uzrādīja būtiskas rezultātu atšķirības. Vislielākā starpība noteikta salīdzinot aprēķinus izmantojot CPT un DCP interpretācijas un bija 25cm, jeb 600% apmērā. Konstrukcijas konsolidācijas/sēšanās aprēķini, izmantojot statiskās zondes datus, uzrādīja vidēji 3 reizes mazākas deformācijas, kā noteiktas ar Dilatometra izpēti un 6 reizes mazākas, kā noteikts ar dinamisko zondi. Papildus zondēšanas izpētēm nepieciešams veikt netraucētu paraugu laboratoriskās pārbaudes. Tādējādi būtu iespējams pārbaudīt vai izstrādātie risinājumi, balstīti uz konservatīvām, atbilstošām vai arī netipiski augstām grunts slāņu fizikāli mehāniskajām īpašībām un būtu iespējams verificēt iegūtos interpretāciju rezultātus un, ja nepieciešams, veikt datu korekciju.
5. Iegūtie rezultāti parāda, ka dinamiskās zondes metode uzrādīja zemākās grunts parametru interpretāciju vērtības, kā arī lielākas konsolidācijas deformācijas un nogāžu stabilitātes problēmas. Ģeotehniskie risinājumi, kas izstrādāti, pamatojoties uz DCP interpretācijām, nodrošina par 60% lielāku konstrukcijas drošību, salīdzinot ar CPT un DMT, bet līdz ar to palielina būvniecības izmaksas.

6. Pētījumā noteikts, ka autoceļu ģeotehniskajos aprēķinos bieži tiek izmantota tiltu tandēma slodze LM1, kas izkļiedēta uz 3x5m lielu taisnstūra laukumu. Ņemot vērā, ka autoceļos visbiežāk tiek novērotas risveida deformācijas, kuras attīstās zem riteņu trajektorijas, līdz ar to LM1 slodze neprecīzi atspoguļo satiksmes slodzes ietekmi, jo šajā modelī viss slodzes apjoms tiek sadalīts arī pa laukumu starp riteņiem un deformācijas attīstās vienmērīgi.
7. Izstrādātā oriģinālā transporta slodzes modeļa LM3 izmantošana ģeotehniskajos aprēķinos par 20% palielina ceļa būves drošību, kā arī pieliktās lineārās slodzes precīzi atspoguļo transportlīdzekļa trajektoriju un deformācijas attīstības dinamiku ceļa konstrukcijā. Atbilstoši pētījuma rezultātiem noteikts, ka LM3 slodzes modeli iespējams izmantot globāli arī citās valstīs, ņemot vērā katras valsts likumdošanā noteikto maksimālo ass slodzi un tādējādi modificējot slodzes lielumu, bet saglabājot tās pielikšanas shēmu.
8. Pētījuma ietvaros noteikts, ka vislielākā ietekme uz statiskās plātnes testa noteiktajiem esošā pamata nestspējas rādītājiem ir atšķirīgajiem testēšanas apstākļiem. Esošā asfaltbetona vai cita tipa konstrukcija, kas atrodas virs testējamā slāņa, liedz iegūt atbilstošus rezultātus, jo izveidotajam skatrumam ir pārāk mazs laukums un pamata slānis nevar deformēties, izspiežoties uz sāniem un augšu. Atbilstoši veiktajai analīzei noteikts, ka esošā asfaltbetona kārtā ietekmē ģeotehniskās izpētes laikā veiktās statiskās plātnes testa rezultātus vidēji 40% apmērā, salīdzinājumā ar rezultātiem, kas tiek iegūti būvniecības laikā. Līdz ar to autoruzraudzības laikā var nākties veikt projekta korekcijas.
9. Promocijas darba ietvaros izstrādātais inovatīvais statiskās plātnes galīgo elementu aprēķina modelis sniedz ļoti precīzus rezultātus veicot aprēķinus uz nesaisītām seguma kārtām bez skatruma izveides (bez blakus esoša apbēruma, kas iespaido testa rezultātus). Iegūtie rezultāti rāda, ka statiskās plātnes testa simulācija, izmantojot statiskās zondes interpretācijas, uzrāda ļoti precīzu esošā pamata nestspēju. Atšķirība starp objektā veiktā plātnes testa un ar galīgo elementu programmu simulētā plātnes testa rezultātiem ir 3%. Līdz ar to noteikts, ka izstrādāto aprēķina modeli iespējams izmantot, lai noteiktu esošā pamata nestspēju jebkurā, sev vēlamajā dziļumā.
10. Pētījuma ietvaros noteikts, ka atšķirība starp objektā veiktā statiskās plātnes testa un ar analītisko aprēķina formulu noteiktajiem rezultātiem ir 5%. Izstrādātā analītiskā aprēķina formula ceļa konstrukcijas nestspējas novērtēšanai sniedz objektīvus rezultātus un (6.1.) formulu, izmantojot CPT datu interpretācijas, iespējams pielietot esošā pamata novērtēšanai.

8. IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Tommy C. Hopkins, Tony L. Beckham, and Liecheng Sun (2006). Characteristics and Engineering Properties of the Soft Soil Layer in Highway Soil Subgrades. KTC- 06-13/SPR 270-03-1F, June 2006.
2. LVS 190-5, 2011. ceļu projektēšanas noteikumi. 5. daļa: Zemes klātne. Rīga: LVS
3. Munro, R. (2005). Dealing with poor bearing capacity on low volume roads on peat in the Northern Periphery. 2005: Proceedings Seventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields.
4. Guyer, J. P. (2018). *An Introduction to Road Design for Cold Regions* (2nd ed.). California, El Macero: The Clubhouse Press.
5. Munro, R., & MacCulloch, F. (2006). *Managing Peat Related Problems on Low Volume Roads. Executive Summary*. Roadex III.
6. Stinkulis, Ģ. (25 January 2019). *Latvijas ģeoloģiskā uzbūve*. Nacionālā enciklopēdija [Geological Structure of Latvia. National Encyclopedia]. Retrieved from <https://enciklopedija.lv/skirklis/26128-Latvijas-ģeoloģiskā-uzbūve>
7. Kalniņa, L. (19 November 2019) *Purvi Latvijā*. Nacionālā enciklopēdija [Bogs in Latvia. National Encyclopedia]. Retrieved from <https://enciklopedija.lv/skirklis/27677-purvi-Latvijā>
8. Munro, R. (2004). *Dealing With Bearing Capacity Problems on Low Volume Roads Constructed on Peat. Including Case Histories From Roads Projects Within ROADEX Partner Districts*. Roadex II.
9. Latvian State Roads. (2019). *Ceļa zemes klātnes grunts nestspējas nodrošināšanas risinājumu izstrāde* [Developing Solutions for Soil Bearing Capacity of Road Pavement]. Handbook. Latvia.
10. Latvian State Roads. (22 August 2018). *Ceļa pamatu stabilizēšanai pie Madlienas tiek izbūvētas 952 pāļu un kombinētās kolonnas; būvdarbus veic speciālisti no Polijas* [Article about road stabilization using combined piles under road construction]. Retrieved from <https://lvceli.lv/uncategorized/cela-pamatu-stabilizesanai-pie-madlienas-tiek-izbuvetas-952-palu-un-kombinetas-kolonnas-buvdarbus-veic-specialisti-no-polijas/>
11. Team V. (2021). 4 types of geotechnical testing: What is the best option for you? Vertek CPT. Retrieved March 13, 2023, from: <https://www.vertekcpt.com/geotechnical-testing-types/>
12. P. K. Robertson (2012). Interpretation of in-situ tests – some insights. *Mitchell Lecture - ISC'4 Brazil*, Sept., 2012
13. A. Poenaru (2016). Correlations between cone penetration test and seismic dilatometer Marchetti test with common laboratory investigations. *Energy Procedia* Volume 85, January 2016, Pages 399-407 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.219>
14. K. Grabar, S. Strelec, M. Spiranec, F. Dodigovic (2022). CPT—DMT Correlations on Regional Soils from Croatia. *Sensors* 2022, 22, 934. <https://doi.org/10.3390/s22030934>

15. K. Nepelski (2019). Interpretation of CPT and SDMT tests for Lublin loess soils exemplified by Cyprysowa research site. *Budownictwo i Architektura* 18(3) 2019, 63-72. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.890>
16. M. Mulabdic (2013). Use of penetration testing for determination of soil properties in earth dam. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013
17. P. Zawrzykraj, P. Rydelek, A. Bakowska (2017). Geo-engineering properties of Eemian peats from Radzymin (central Poland) in the light of static cone penetration and dilatometer tests. *Engineering Geology* Volume 226, 30 August 2017, Pages 290-300. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.07.001>
18. S. Rabarijoely (2018). A New Approach to the Determination of Mineral and Organic Soil Types Based on Dilatometer Tests (DMT). *Applied Sciences*. 2018; 8(11):2249. <https://doi.org/10.3390/app8112249>
19. McNulty E. G., & Harney M. D. (2014). Comparison of DMT and CPT correlated constrained moduli in clayey and silty sands. From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering. <https://doi.org/10.1061/9780784413265.032>
20. P. K. Robertson (2009a). CPT-DMT correlations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1762–1771. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000119](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000119)
21. M.A. Benz-Navarrete, (2020). Correlation between static (CPT) and dynamic variable energy (P.A.N.D.A.) cone penetration tests.
22. F. Schnaid, D. Lourenço, E. Odebrecht, (2017). Interpretation of static and dynamic penetration tests in coarse-grained soils. *Géotechnique Letters*, 7(2), 113–118. <https://doi.org/10.1680/jgele.16.00170>
23. Owen D.R.J. and Hinton E. (1980), *Finite Elements in Plasticity- Theory and Practice* Pineridge Press, Swansea.
24. Pietruszczak, S. (2010). *Fundamentals of Plasticity in Geomechanics*. CRC Press.
25. Czado B, Pietras JS (2012) Comparison of the cone penetration resistance obtained in static and dynamic field tests. *AGH J Min Geoeng* 36(1):97–105
26. dos Santos MD, Bicalho KV (2017) Proposals of SPT-CPT and DPL-CPT correlations for sandy soils in Brazil. *J Rock Mech Geotech Eng* 9(6):1152–1158. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.08.001>
27. Mahler, A., & Szendefy, J. (2009). Estimation of CPT resistance based on DPH results. *Periodica Polytechnica-civil Engineering*, 53, 101-106. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2009-2.06>
28. Lingwanda Mwajunna Ibrahim, Larsson Stefan, Nyaoro Dalmas L (2015) Correlations of SPT, CPT and DPL Data for Sandy Soil in Tanzania. *Geotech Geol Eng* 33:1221–1233 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9897-1>

29. A. J. Lutenecker (2021). In Situ Testing Methods in Geotechnical Engineering (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003002017>
30. P. K. Robertson, (2009b). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach, Canadian Geotech. J., 46(11):1337–1355.
31. TC16 DMT Report (2001). “The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations”. A Report by the ISSMGE Committee TC16. 41 pp. Reprinted in Proc. DMT 2006, Washington D.C.
32. Livneh, M, Ishai, I. and Livneh, N. A. (1994), Effect of Vertical Confinement on Dynamic Cone Penetrometer Strength Values in Pavement and Subgrade Evaluations, Transportation Research Record 1473, pp.1-8.
33. T. Lunne, P. K. Robertson and J. J.M. Powell (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Spon Press, Taylor Francis Group, London and New York.
34. P. K. Robertson and K.L. Cabal (Robertson) (2010). Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering. *Gregg Drilling & Testing, Inc. Corporate Headquarters 2726 Walnut Avenue Signal Hill, California 90755*
35. P. K. Robertson, K. L. Cabal (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Gregg drilling. 6th edition July 2015.
36. K. Been, A. Quiñonez and R.B. Sancio (2010). Interpretation of the CPT in engineering practice. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Huntington Beach, CA, USA, May 2010
37. P. K. Robertson, R. G. Campanella (1983a). Interpretation of cone penetration tests. Part I: sand. Canadian Geotechnical Journal, 20(4): 718–733.
38. P. K. Robertson, R. G. Campanella (1983b). Interpretation of cone penetration tests. Part II: clay. Canadian Geotechnical Journal, 20(4): 734–745.
39. P. W. Mayne (2007). NCHRP Synthesis 368: Cone Penetration Test. Transportation Research Board, National Academies Press, Washington DC: 118 p
40. P.K. Robertson, R.G. Campanella, D. Gillespie, and A. Rice, (1986). Seismic CPT to measure in-situ shear wave velocity. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 112(8): 791-803.
41. Kulhawy, F.H., and Mayne, P.H., (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design, Report EL-6800 Electric Power Research Institute, EPRI, August 1990.
42. P. W. Mayne (2006). In situ test calibrations for evaluating soil parameters. Proc., Characterization and Engineering Properties of Natural Soils II, Singapore.
43. Moon, S.W. and Kim, T.K. (2018). Undrained Shear Strength in Cohesive vs Soils Estimated by Directional Modes of In-Situ Shear Wave Velocity. Geotech Gelo Eng. 36:2851-2868.
44. S. Marchetti (2021). A Flat Dilatometer test. Retrieved from: <https://www.marchetti-dmt.it/instruments/dmt/>
45. S. Marchetti, P. Monaco, G. Totani & M. Calabrese (2001). The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations. *Report of the ISSMGE Technical Committee 16 on Ground Property Characterisation from In-situ Testing*

46. S. Marchetti (1980). "In Situ Tests by Flat Dilatometer". ASCE Jnl GED, Vol. 106, No. GT3, Mar., 299-321.
47. Marchetti, S. and Crapps, D.K. (1981). "Flat Dilatometer Manual". Internal Report of G.P.E. Inc
48. Scala, A.J. (1956), Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers, Proc. 2nd Australian-New Zealand Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., pp. 73.
49. Luo, X., Salgado, R. and Altschaeffl, A., (1998), Dynamic Cone Penetration Test to Access the Mechanical Properties of Subgrade Soil, Indiana Department of Transportation, Report No. FHWA/IN/JTRP-98/13.
50. Rodrigo Salgado and Sungmin Yoon (2003). Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for Subgrade Assessment. Joint Transportation Research Program Project No: C-36-45S, File No: 6-18-17, SPR-2362, Purdue University West Lafayette, Indiana February 2003
51. Akshay Dashore (2021). What is Dynamic cone Penetrometer. Retrieved from: <https://theconstructor.org/geotechnical/soils/what-dynamic-cone-penetrometer/40239/>
52. Skempton, A.W. (1986). "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation." Geotechnique, Vol. 36, No.3, pp. 425-447.
53. Shioi Y. And Fukuy J. (1982). Application of N-Value to Design of Foundations in Japan. In: Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam.
54. Meyerhof, G. G. (1956). "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils." Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE, Vol. 82, SM1, pp. 1-12.
55. Bowles, J.E. (1982). Foundation Analysis and Design. 3rd Ed., McGrawHill, Inc., New York.
56. Stroud M.A. and Butler F.G. (1975). The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials. Proc. Symp. Engineering Properties of Glacial Materials. Midlands Soil Mechanics and Foundations Society.
57. Meyerhof G.G. (1965). Shallow Foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol.91, No.SM2, pp.21-31
58. Rocscience. Slide2 [2D limit equilibrium slope stability program for evaluating the safety factor or probability of failure, of circular or non-circular failure surfaces in soil or rock slopes].
Retrieved from
<https://www.rocscience.com/software/slide2>
59. The Bishop Method of Slices. Retrieved from:
<https://www.geoengineer.org/education/slope-stability/slope-stability-the-bishop-method-of-slices>
60. Rocscience. Settle3 [3-dimensional program for the analysis of settlement and consolidation under foundations, embankments and surface excavations].
Retrieved from
<https://www.rocscience.com/software/settle3>

61. The South Carolina Department of Transportation (2019). Geotechnical design manual. South Carolina State Library
62. Ceļuprojekts. (2022). Reconstruction project of the national regional highway P86 Serene – Kalnīsi section km 33.59 - 37.87. Project documentation. Latvia.
63. M. Topolnicki (2020). Road traffic loads for geotechnical analyses of embankments. Published in Ground Engineering, June 2020
64. Washington State Department of Transportation (WSDOT), Geotechnical Design Manual, M 46-03.16, February 2022.
65. B. Lien (2019). Modeling Traffic and Construction Equipment Surcharges for Geotechnical Global Stability Analysis. the 50th Annual Southeastern Transportation Geotechnical Engineering Conference (STGEC)
66. R. Albrazi (2020). Evaluation of Roadway Embankment Under Repetitive Axial Loading Using Finite Element Analysis. Luleå University of Technology Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering.
67. M. J. Markow, J. K. Hendrick, B. D. Brademeyer and E. Abbo (1988). Analyzing the Interactions Between Dynamic Vehicle Loads and Highway Pavements. Transportation Research Record 1196, ISSN: 0361-1981, 1988.
68. Latvian State Roads (December 2019) Road newspaper [Article about road sector funding]. Retrieved from <https://lvceli.lv/aktualitates/finansejums-bus-jamekle-radosak/>
69. Geo eksperts (5 March 2021) Plate load test [Article about plate load test procedure]. Retrieved from <https://www.geoeksperts.lv/services/plate-load-test/>
70. DIN 18134:2012-O4 Soil -Testing procedures and testing equipment - Plate load test
71. Rocscience. RS3 [3D program for the analysis of geotechnical structures for civil and mining applications]. Retrieved from <https://www.rocsience.com/software/rs3>
72. Owen D.R.J. and Hinton E. (1980), Finite Elements in Plasticity- Theory and Practice Pineridge Press, Swansea.
73. Pietruszczak, S. (2010). Fundamentals of Plasticity in Geomechanics. CRC Press.
74. Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S. (1959) "Theory of plates and shells". McGraw–Hill New York, 1959.
75. Walter D. Pilkey, Orrin H. Pilkey (1974). Mechanics of solids. p. 292.
76. Daintith, John, ed. (2005). A Dictionary of Physics (Fifth ed.). Oxford University Press. p. 509.
77. Ronald L. Huston and Harold Josephs (2009), "Practical Stress Analysis in Engineering Design". 3rd edition, CRC Press, 634 pages.
78. Davis, R. O., Selvadurai A. P. (2005). Plasticity and geomechanics. Cambridge university press.

79. Ceļuprojekts. (2018). Construction Project of pavement reinforcement (reconstruction) of the state main highway A10 Riga – Ventspils section km 13.3 - 19.2. Project documentation. Latvia.



Endijs Virsis dzimis 1990. gadā Limbažos. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis profesionālo bakalaura grādu transportbūvēs un inženiera kvalifikāciju (2014) un profesionālo maģistra grādu transportbūvēs (2015).

Kopš 2014. gada strādā AS "Ceļuprojekts", ieņemot vadošā ceļu būvzinieņa amatu, kopš 2021. gada – RTU, ieņemot zinātniskā asistenta amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar drošu, kvalitatīvu ceļa konstrukcijas un projekta risinājumu izstrādi, ģeotehniskās situācijas analīzi.