

Endijs Virsis

METODE AUTOCEĻU KONSTRUKCIJAS NESTSPĒJAS MODELĒŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Transportbūvju institūts

Endijs Virsis

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants

**METODE AUTOCEĻU KONSTRUKCIJAS
NESTSPĒJAS MODELĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

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

profesors *Dr. sc. ing.*
Ātis Zariņš

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Virsis E. Metode autoceļu konstrukcijas nestspējas modelēšanai. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. – 39 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-06” 2023. gada 13. oktobra lēmumu, protokols Nr. 04030-9.6.1/8



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais
fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Promocijas darbs izstrādāts ar Rīgas Tehniskās universitātes doktorantūras grantu programmas DOK.BIF/20, DOK.BIF/21 un DOK.CTK/22A atbalstu.

Pētījums tapis ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

<https://doi.org/10.7250/9789934370038>

ISBN 978-9934-37-003-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 8. decembrī plkst. 12.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A, 342. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Leonīds Pakrastiņš
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Dr. Šarūnas Skuodis*
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. Audrius Vaitkus*
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Endijs Virsis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 78 attēli, 13 tabulas, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 79 nosaukumi.

SATURS

Saturs	4
Ievads	6
1.1. Tēmas aktualitāte	6
1.2. Darba mērķis	6
1.3. Pētījuma uzdevumi.....	7
1.4. Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti	7
1.5. Darba zinātniskā novitāte un praktiskā vērtība.....	7
1.6. Promocijas darba uzbūve	8
1.7. Aprobācija konferencēs.....	9
1.8. Doktorantūras laikā izstrādāto publikāciju saraksts.....	9
2. Ģeotehniskās izpētes datu analīze un projekta risinājumu izstrāde.....	10
2.1. Autoceļa posma novērtējums un nepieciešamo risinājumu izstrāde	10
2.2. Ģeotehniskās izpētes datu analīze.....	10
2.2.1. Smilšainas atbilstošas kvalitātes grunts uzbērumā un zemes klātnē	11
2.2.2. Putekļaina, mālaina grunts vai zemākas stiprības slāņi zemes klātnē un uzbērumā.....	11
2.2.3. Vājas nestspējas grunts slāņi zemes klātnē un uzbērumā	11
2.3. Projekta risinājumu izstrāde un aprēķinu veikšana konstrukcijas ilgmūžības nodrošināšanai	11
3. Autoceļu konstrukcijas ģeotehniskās pastiprināšanas metodes.....	12
3.1. Ceļu projektēšana uz vājas nestspējas gruntīm.....	12
3.2. Ceļu ģeotehniskās projektēšanas metožu novērtējums	13
3.3. Zemes klātnes grunts pastiprināšanas pieredze Latvijā	13
3.3.1. Grunts apmaiņa	13
3.3.2. Pāļu kolonnas	13
3.3.3. Minerālmateriālu bermas izbūve	13
3.3.4. Gabiona sienas konstrukcija.....	14
4. Grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības.....	15
4.1. Veikto pētījumu apskats	15
4.2. Lauka izpētes testa apraksts	15
4.2.1. Konusa iespiešanas tests (<i>CPT</i>).....	15

4.2.2. Dilatometriskā testa (DMT) metode.....	16
4.2.3. Dinamiskā penetrometra tests	16
4.3. <i>CPT</i> un <i>DMT</i> testa metožu salīdzinājums, izmantojot autoceļa P32 ģeotehniskās izpētes datus.....	17
4.3.1. Izpētes punktā (497 + 20D) iegūto rezultātu interpretācijas.....	17
4.3.2. Izpētes punktā (498 + 40D) iegūto rezultātu interpretācijas.....	18
4.3.3. Nogāzes stabilitātes aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības	18
4.3.4. Konstruktijas deformācijas aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības.....	19
4.4. <i>CPT</i> , <i>DMT</i> un <i>DCP</i> testa metožu salīdzinājums, izmantojot autoceļa P86 ģeotehniskās izpētes datus.....	20
4.4.1. Iegūto rezultātu interpretācijas	20
4.5. <i>CPT</i> , <i>DMT</i> un <i>DCP</i> testa metožu salīdzinājums, analizējot testa laukumā veiktās izpētes.....	22
5. Satiksmes slodzes modelis ceļa konstrukcijas ģeotehniskajai projektēšanai	23
5.1. Satiksmes slodzes modelis	23
5.2. Aprēķinu modelis.....	24
5.3. Nogāžu stabilitātes rezultātu analīze.....	25
5.4. Globālās stabilitātes/deformācijas aprēķinu rezultātu analīze.....	26
6. Ceļa konstrukcijas nestspējas novērtēšana, izmantojot statiskās plātnes testu	27
6.1. Statiskās plātnes testa galīgo elementu aprēķina modeļa izstrāde.....	27
6.1.1. Esošais ceļa pamats	27
6.1.2. Statiskās plātnes tests.....	27
6.1.3. Statiskās plātnes testa simulācijas modeļa uzbūve.....	27
6.1.4. Analītiskās aprēķinu formulas izstrāde E_{v2} aprēķinam	30
6.2. Ceļa konstrukcijas esošā pamata atlikušās nestspējas novērtējums.....	31
6.2.1. Ģeotehniskā izpēte.....	31
6.2.2. Autoceļa A10 Rīga–Ventspils esošā pamata nestspējas analīze	31
6.2.3. Autoceļa P86 33,59.–37,87. km posma ģeotehniskās izpētes datu analīze	34
6.2.4. Autoceļa A10 13,30.–19,20. km posma ģeotehniskās izpētes datu analīze.....	36
7. Secinājumi.....	38

IEVADS

1.1. Tēmas aktualitāte

Latvijā ievērojams finansējums ceļu nozarei tika saņemts no Eiropas Savienības struktūrfondiem, taču 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 atlikušo nestspēju, var radīt būtiskus strukturālo deformāciju riskus jaunajā ceļa konstrukcijā, un tā rezultātā ceļš var zaudēt nestspēju, kā arī būvniecības laikā var rasties 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, būvinženierim 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 risinājums ir veikt vājas nestspējas grunts apmaiņu, kas lielākoties visos projektos arī tiek paredzēts, jo būvinženieriem trūkst pieredzes un zināšanu, lai piedāvātu alternatīvus risinājumu variantus. Taču šis risinājums noteikti nav lētākais. 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 būvinženieri varētu veikt ģeotehnisko projektēšanu, nepieciešams projektētājus izglītot attiecīgajā jomā.

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, ko iespējams izmantot autoceļu ģeotehnisko aprēķinu veikšanai un projekta risinājumu izstrādei.

1.3. Pētījuma uzdevumi

1. Apkopot informāciju par Latvijā un pasaulē lietotajām 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, 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 ko iespējams lietot ģeotehnisko aprēķinu veikšanai un 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, ko nepieciešams lietot, veicot ceļa konstrukcijas ģeotehniskos aprēķinus (nogāžu stabilitātes pārbaude, ceļa globālā stabilitāte u. c.).
3. Izmantojot galīgo elementu aprēķina modeli un DMT (dilatometriskais tests), *CPT* (statiskās zondes tests) 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 un praktiskā vērtība

1. Izstrādāts jauns satiksmes slodzes modelis, ko iespējams izmantot, 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. Izstrādāta jauna analītiskā aprēķinu formula esošā pamata/zemes klātnes nestspējas (*Ev2*) noteikšanai, izmantojot ģeotehniskās izpētes datus.
4. Izstrādāta oriģināla blokshēma autoceļa ģeotehniskās situācijas analīzei, projekta risinājumu izstrādei un nepieciešamo pārbaužu veikšanai.
5. 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.

1.6. Promocijas darba uzbūve

Promocijas darbā ir sešas nodaļas.

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

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

Trešajā nodaļā 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 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 dažādās pasaules valstīs pieņemtie satiksmes slodzes modeļi autoceļu un tiltu projektēšanai. Ņemot vērā Latvijā un citur pasaulē raksturīgos smagā sastāva transportlīdzekļus, kas rada vislielāko ietekmi uz ceļa konstrukciju, izstrādāts satiksmes slodzes modelis, ar kura palīdzību jāveic ģeotehnisko risinājumu izstrāde.

Sestajā nodaļā 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, izstrādāta analītiska aprēķinu formula esošā pamata/zemes klātnes nestspējas (*Ev2*) noteikšanai, izmantojot ģeotehniskās izpētes datus.

1.7. Aprobācija konferencēs

- 30th International Baltic Road Conference, September 24–25, 2021, Riga, Latvia.
- Rīgas Tehniskās universitātes 62. starptautiskā zinātniskā konference, 28.10.2021, Rīga, Latvija.
- 5th International Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”, September 28–30, 2022, Riga, Latvia.
- 12th International Conference “Environmental Engineering”, April 27–28, 2023, Vilnius, Lithuania.

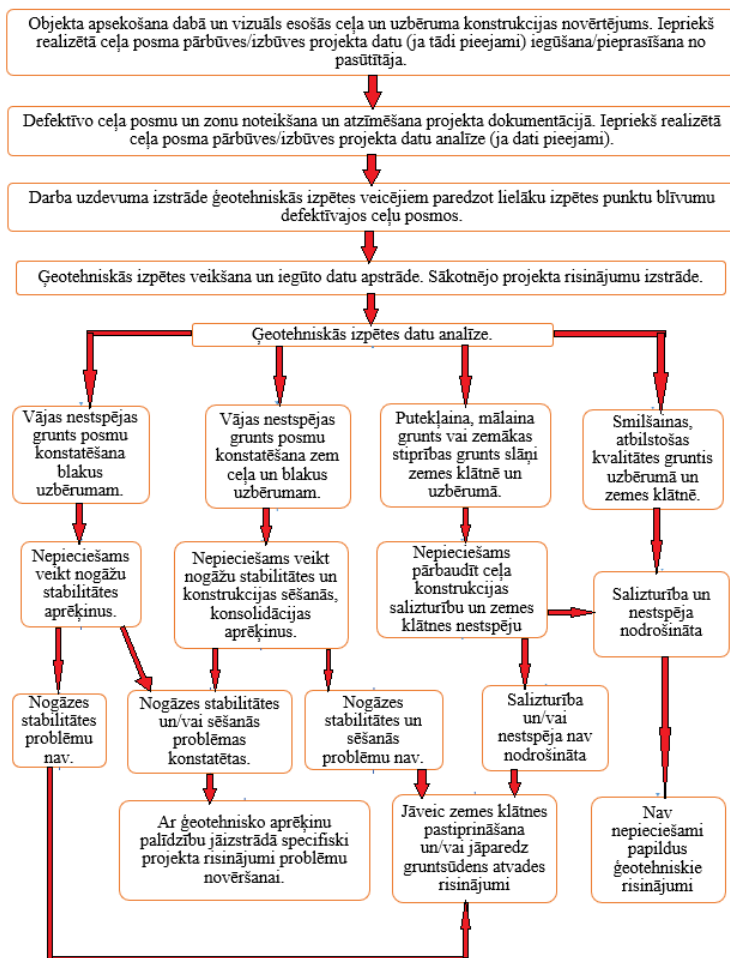
1.8. Doktorantūras laikā izstrādāto publikāciju saraksts

- 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/bjrbe.2020-15.481>.
- Virsis E., Paeglītis A., Jateikienē 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/bjrbe.2023-18.605>.
- 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.
- 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.
- 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

Ņemot vērā to, ka ģeoloģiskā situācija zem autoceļa konstrukcijas ir ļoti mainīga, pastāv iespēja, ka viena projektēšanas un būvniecības objekta ietvaros tiek konstatēti dažādas stiprības, sastāva un konsistences grunts tipu posmi. Lai projekta izstrādes gaitā būtu vieglāk sekot līdzi nepieciešamajai darbībai, promocijas darbā izstrādāta blokshēma (2.1. att.).



2.1. att. Autoceļa projekta risinājumu izstrādes blokshēma.

2.2. Ģeotehniskās izpētes datu analīze

Ģeotehniskā urbšana un zondēšana ir nepieciešama grunts sastāva noteikšanai, grunts paraugu ņemšanai laboratorijas analizēm, gruntsūdens līmeņa noskaidrošanai, kā arī grunts

slāņu robežu precizēšanai. Urbšanas darbi galvenokārt tiek izpildīti ar urbšanas iekārtas palīdzību, retāk tiek lietots 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.

2.2.1. Smilšainas atbilstošas kvalitātes grunts uzbērumā un zemes klātnē

Ceļa posmos, kur pēc ģeotehniskās izpētes datu analīzes zemes klātnē noteiktas smilšainas grunts, ir atbilstoši apstākļi, lai neparedzētu papildu risinājumu izbūvi zemes klātnes pastiprināšanai. Uz smilšainām gruntīm zemes klātnē parasti tiek sasniegtas nestspējas prasības $E_{v2} \geq 45$ MPa, kā arī šāda tipa grunts ir salizturīgas, līdz ar to nav jāuztraucas par sala radīto ietekmi uz ceļa konstrukciju.

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

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 grunts var uzskatīt par vājas nestspējas slāņiem, līdz ar to, konstatējot šādas grunts ar pietiekami 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 gruntīm uzskatāmas tās, ar kurām nav iespējams panākt 25 MPa lielu nestspēju apakšējām zemes klātnes kārtām. Tās parasti ir plastiskas vai plūstošas grunts ar lielu smalko daļiņu, palielinātu mitruma saturu un lielu organisko daļiņu procentuālo daudzumu.

Bieži vājas nestspējas grunts atrodas dziļāk par projektētās zemes klātnes virsmu, tāpēc to izrakšana ne vienmēr ir tehniski iespējama vai nesniedz vēlamu 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.

2.3. Projekta risinājumu izstrāde un aprēķinu veikšana konstrukcijas ilgmūžības nodrošināšanai

Visiem uzbērumiem jābūt projektētiem un veidotiem tā, lai tie būtu stabili un sniegtu pietiekamu drošības rezervi pret konstrukcijas pamatu nestspējas un nogāžu stabilitātes zudumu. Nogāzes izslīdēšana lielākoties notiek pa izslīdēšanas virsmu, kas parasti ir loka formā un kuras apakšējā daļa iet caur vājas nestspējas grunts slāni, jo tas nespēj nodrošināt nepieciešamo bīdes pretestību. Konstrukcijas sēšanās un konsolidācija notiek grunts slāņu sablīvēšanas rezultātā.

Ģeotehnisko aprēķinu veikšanai ir pieejamas dažādas stabilitātes analīzes programmas, kā arī vienkāršotos aprēķinus iespējams veikt, analītiski izmantojot pētījumos izstrādātās aprēķinu formulas.

3. AUTOCEĻU KONSTRUKCIJAS ĢEOTEHNISKĀS PASTIPRINĀŠANAS METODES

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 sēšanos, konsolidāciju vai bīdes bojājumus, kas var radīt strukturālās deformācijas. Tādējādi ģeotehniskajiem, būvniecības un projektēšanas inženieriem projekta izstrādes gaitā ir jāizvērtē grunts nestspēja.

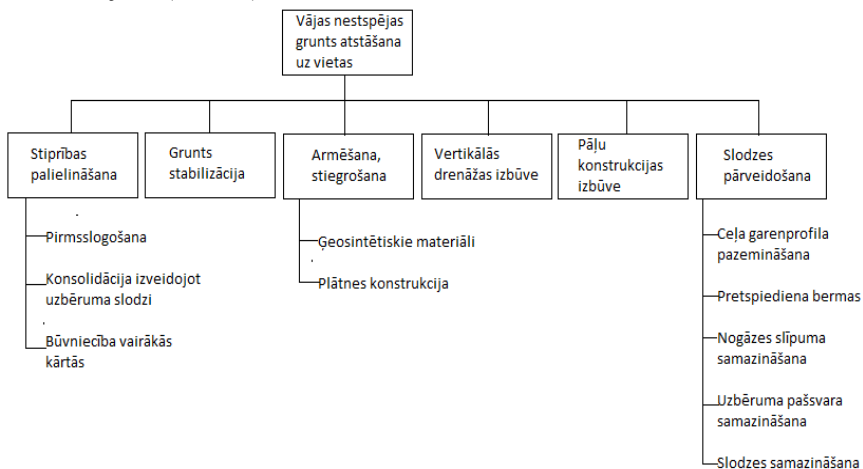
3.1. Ceļu projektēšana uz vājas nestspējas gruntīm

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

1. Izvairīšanās (trases novietojuma maiņa, nešķērsojot vājas nestspējas gruntis).
2. Izrakšana (vājas nestspējas grunts slāņi tiek izrakti, ceļa konstrukciju izbūvējot ierakumā).
3. Grunts nomaina (vājas nestspējas grunts tiek izrakta un aizstāta ar salizturīgu materiālu).
4. Pārvietojums (vājas nestspējas gruntis 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, taču ne ekonomiskākais, risinājums, lai šķērsotu vājas nestspējas grunts posmu vai pastiprinātu esošā ceļa konstrukciju.

Metodes, kurās vājas nestspējas gruntis atstāj uz vietas, novēršot apjomīgos zemes darbus, mūsdienās kļūst arvien izplatītākas, jo, samazinoties ceļu būvniecības budžetam, tiek meklēti rentablāki risinājumi (3.1. att.).



3.1. att. Metodes, kas atstāj vājas nestspējas gruntis uz vietas.

3.2. Ceļu ģeotehniskās projektēšanas metožu novērtējums

Pareiza risinājuma izvēle ceļa būvniecībai vai labiekārtošanai uz vājas nestspējas grunts parasti tiek balstīta racionālos apsvērumos, piemēram, pieejamā budžetā, kā arī jaunās konstrukcijas ekspluatācijas prasībās. Ceļu projektēšanas inženierim vissvarīgākais ir pareizi noteikt cēloņus, problēmas un faktorus, kas varētu ietekmēt ceļa nestspēju un stabilitāti.

3.3. Zemes klātnes grunts pastiprināšanas pieredze Latvijā

Līdz 2019. gadam Latvijā nebija izstrādātu ieteikumu, specifikāciju 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 lēti risinājumi, kas neatbilst konkrētām vajadzībām.

3.3.1. Grunts apmaiņa

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

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 49,50.–50,00. km posmā tika atklātas vājas nestspējas grunts – purva posms ar kūdras slāni 10 m dziļumā. Tas atklājās papildu izpētē, projektētājs ieteica iespējamus risinājumus grunts stabilizācijai.

Lai stabilizētu vājas nestspējas grunti, valsts ceļu tīklā pirmo reizi tika lietota kombinēto 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, kas tika izkārtotas 2,5 m × 2,0 m režģī. Lai veiktu šo darbu, Latvijā bija ieradusies speciālistu komanda no Polijas.

3.3.3. Minerālmateriālu bermas izbūve

2019. gadā veikta Siguldas Peldu ielas avārijas seku novēršana, konservācijas tehnisko risinājumu izstrāde. Autoceļa konstrukcijas stāvoklis tika novērtēts kā kritisks. Gaujas ūdeņu, gruntsūdeņu un citu faktoru ietekmē notika ceļa konstrukcijas izslīdēšana, kā rezultātā transportlīdzekļiem pārvietoties pa Peldu ielu pārvietoties ar transportlīdzekļiem kļuva bīstami. Veicot segas konstrukcijas monitoringu, tika konstatēts, ka deformācijas laika gaitā progresēja un plaisu platums palielinājās (3.2. att.). Lai novērstu ceļa konstrukcijas pilnīgu sagrūvumu un varētu atjaunot transporta kustību, bija nepieciešams novērst deformāciju attīstību.

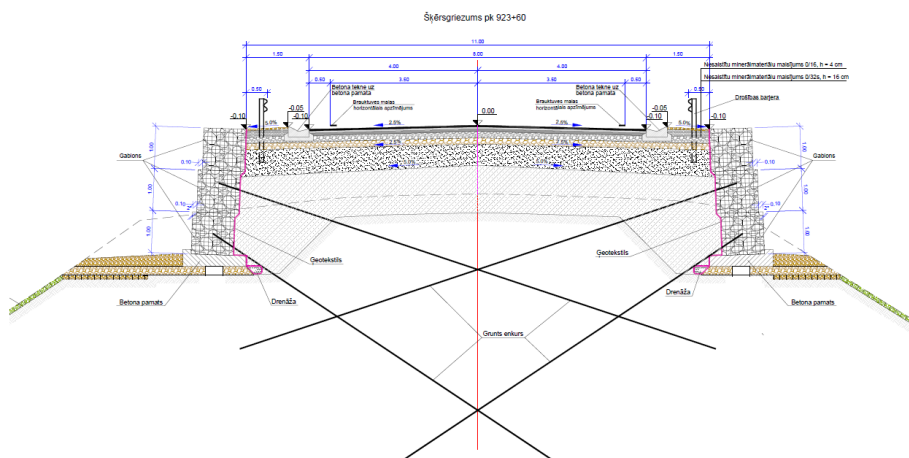


3.2. att. Peldu ielas ceļa konstrukcijas deformācijas.

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 satiksmi Peldu ielā. 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. Esošais uzbērums bija izbūvēts no morēnas smilšmāla (ģeotehniskajā izpētē noteikta nedrenētas bīdes pretestība $C_u = 20$ kPa), tāpēc gadījumā, ja vertikālo slodzi palielinātu papildu uzbērums, pastāvēja liels nogāzes izslīdēšanas un grunts deformācijas/sēšanās risks. Problēma tika atrisināta ar grunts enkuru palīdzību (3.3. att.), kas kalpoja, lai vecais uzbēruma korpuss neizslīdētu un neveidotos deformācijas.



3.3. att. Valsts autoceļa A2 projekta risinājums.

4. GRUNTS SLĀŅU FIZIKĀLI MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS

Lauku izpētes testi var sniegt vairākas priekšrocības, salīdzinot 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, ko ir būtiski apzināt, jo katra izpēte dod nedaudz atšķirīgas interpretāciju vērtības.

4.1. Veikto pētījumu apskats

Pēdējos gados ir veikti vairāki pētījumi, kuros tiek salīdzinātas korelācijas starp *CPT*, *DMT* un *DCP* testiem.

Krzysztof Nepelski 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* 2016. gadā. Viņa pētījuma rezultāti noteica, ka *DMT* uzrādīja stingrāku grunts reakciju, salīdzinot ar vērtībām, kas iegūtas ar laboratorijas izmeklējumiem un *CPT* interpretācijām. *McNulty and Harney* 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 savā pētījumā salīdzināja *CPT* un *DMT* testu interpretācijas rezultātus. Viņš secināja, ka *CPT* un *DMT* testi uzrādīja ļoti labu rezultātu atkārtojamību un apliecināja, ka ir vērtīgi palīglīdzekļi, lai noteiktu uzbēruma kvalitāti gan nevienmērīguma, 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. 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. Miguel Angel Benz-Navarrete 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 stienņa sieniņu.

Ņemot 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

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 Nīderlandes grunts mehānikas laboratorijā Delftā pagājušā gadsimta 50. gados, lai pētītu mīksta, vājas nestspējas gruntis. Konusa iespīšanās tests starptautiski ir kļuvis par vienu no visplašāk izmantotajām un pieņemtajām pārbaudes metodēm grunts ģeotehnisko īpašību noteikšanai.

1983. gadā Robertsons un Kampanella publicēja divus nozīmīgus rakstus par *CPT* interpretāciju. Kopš 1983. gada ir bijušas vairākas nozīmīgas publikācijas par *CPT* interpretāciju. 4.1. tabulā redzamas noteiktās aplēses par *CPT* grunts parametru novērtēšanas lietojamību.

4.1. tabula

Noteiktā *CPTU* lietojamība grunts parametru iegūšanai

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; tukšums – nav piemērojamas.

D_r – relatīvais blīvums ;

ϕ – grunts iekšējās berzes leņķis;

Ψ – stāvokļa parametrs;

K_0 – sprieguma attiecība;

OCR – grunts pārkonsolidācijas koeficients;

M (vai mv) – saspiežamība;

C_u – grunts nedrenētā bīdes pretestība;

S_t – jutīgums;

C_h – konsolidācijas koeficients;

k – grunts filtrācijas koeficients.

E, G – Deformācijas deformācijas un bīdes modulis;

G_0 - dinamiskais (sākotnējais) bīdes deformāciju modulis;

Viens no galvenajiem *CPT* lietojumiem ir grunts slāņu profilēšana un grunts tipa noteikšana.

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) pārvietojumam. Šīs testa metodes priekšrocība ir precīzāks pamatu grunts pārvietošanas un deformācijas apraksts. Precizētie DMT rezultāti tiek izmantoti, lai iegūtu informāciju par grunts tipu izplatību, sprieguma stāvokli, bīdes izturību un deformācijas īpašībām.

4.2.3. Dinamiskā penetrometra tests

Dinamiskā konusa iespīšanās testu (*DCP*) izstrādāja *Scala*. Pašreizējais dinamiskā penetrometra modelis izstrādāts Dienvidāfrikā, Transvālas Ceļu departamentā. *DCP* mehānika parāda gan *CPT*, gan *SPT* iezīmes. Tiek reģistrēta stieņa iespīšanās grunts slāņos ar noteiktu sitienu skaitu. Tāpēc tas ir diezgan līdzīgs procedūrai, kā iegūt sitienu skaitu *N*, izmantojot standarta penetrometra testa (*SPT*) iekārtu. Taču *DCP* tiek izmantots konuss, lai iegūtu iespīšanās dziļumu, nevis izmantots dalīts grunts paraugu ņemšanas līdzeklis. Šajā ziņā ir

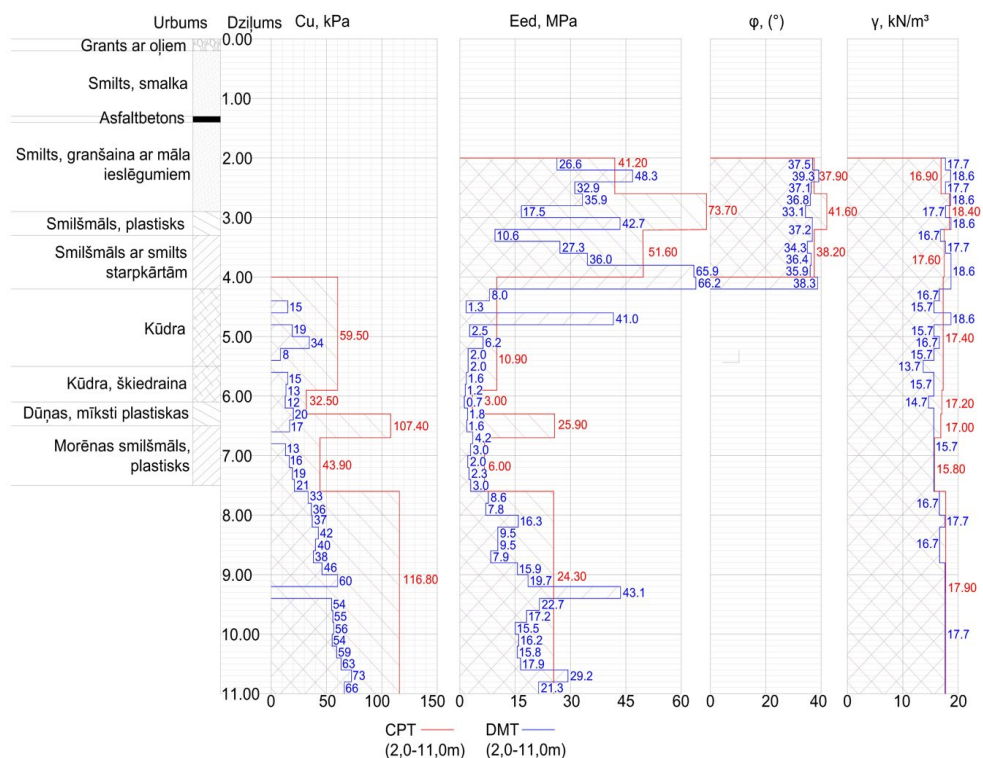
zināma līdzība ar *CPT*, jo abi testi iespēšanās laikā rada dobumu un dobuma izplešanās pretestību.

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

Veikta ģeotehniskā izpēte autoceļa P32 Augšlīgatne–Skrīveri 49,58.–49,97. km posmā. Posmā 49,66–49,93 km 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.

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 (4.1. att.). Ir izstrādātas dažādas korelācijas un formulas *CPT* un *DMT* datu izteikšanai fizikāli mehāniskajos parametros. Slāņi tiek iedalīti grunts tipos. Sākotnēji pēc iegūtajiem zondes parametriem tiek noteikts grunts veids un slāņu biezums. Katram grunts tipam ir izstrādātas dažādas korelācijas un formulas, tādēļ ir svarīgi precīzi noteikt grunts tipu.



4.1. att. Grunts fizikāli mehāniskās īpašības izpētes punktā 497 + 20D.

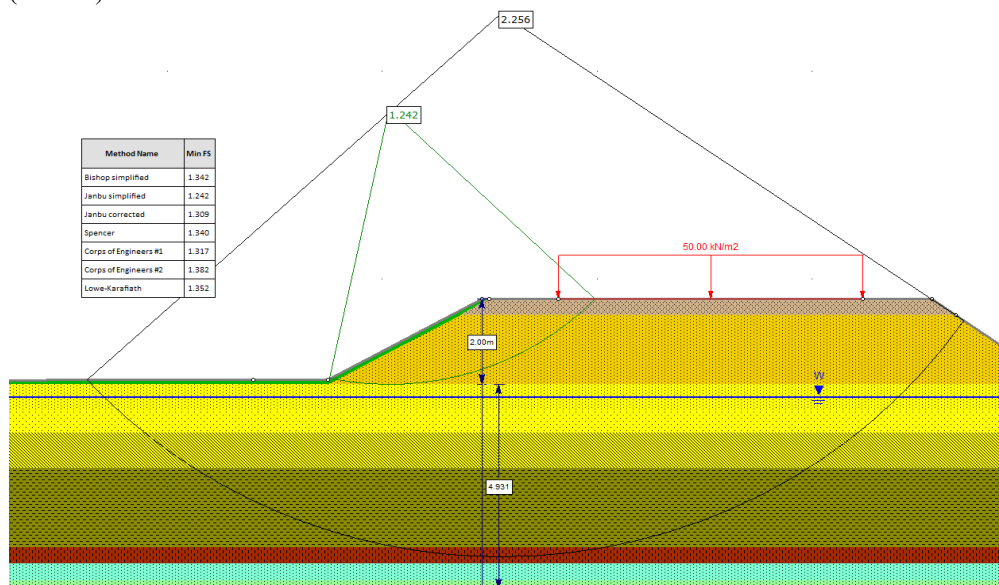
Salīdzinot iegūtos rezultātus, redzams, ka statistiskās zondes (*CPT*) izpēte uzrāda lielākas grunts slāņu fizikāli mehāniskās vērtības visās aplūkotajās pozīcijās. Salīdzinot *CPT* un DMT rezultātus, *CPT* izpēte uzrāda vidēji par 8 % lielāku berzes leņķa vērtību un par 87 % lielākas deformācijas moduļa 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).

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

Otrajā punktā (498 + 40D), 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).

4.3.3. Nogāzes stabilitātes aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības

Izmantojot ar *CPT* un DMT metodēm iegūtos grunts parametrus, tika aprēķināta nogāžu stabilitāte un konstrukcijas sēšanās, kā arī salīdzināta aprēķinu rezultātu atšķirība. Pirmā aprēķina rezultāti, izmantojot *CPT* interpretāciju pētījuma punktā 497 + 20D, redzami grafikā (4.2. att.).



4.2. att. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti, izmantojot *CPT* grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 497 + 20D.

Nogāzes stabilitātes drošības koeficienti apkopoti 4.2. tabulā.

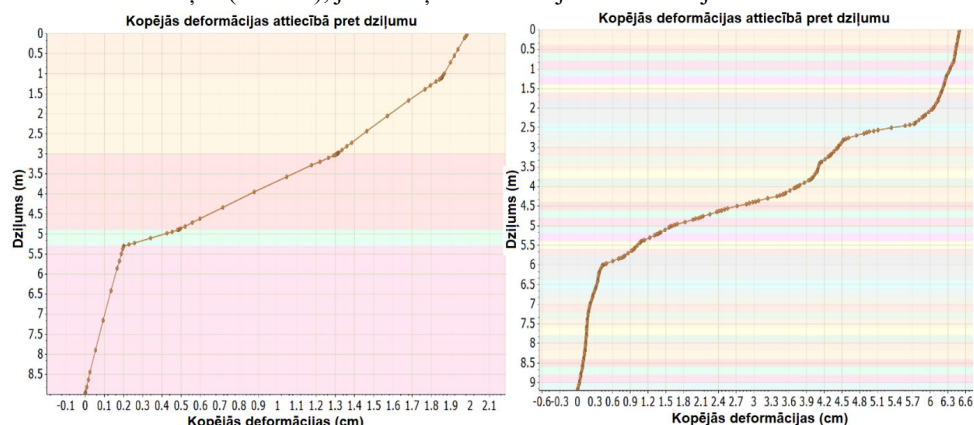
Nogāzes stabilitātes drošības koeficienti

Aprēķins, izmantojot izpētes datus	Izslīdēšanas virsmas novietojums	Drošības koeficients						
		<i>Bishop simplified</i>	<i>Corps of Engineers #1</i>	<i>Corps of Engineers #2</i>	<i>Janbu simplified</i>	<i>Janbu corrected</i>	<i>Lowe- Karafath</i>	<i>Spencer</i>
<i>CPT 497 + 20D</i>	Pie ceļa nogāzes	1,342	1,317	1,382	1,242	1,309	1,352	1,340
<i>DMT 497 + 20D</i>		1,504	1,471	1,572	1,398	1,473	1,528	1,494
<i>CPT 497 + 20D</i>	Zem visas brauktuves konstrukcijas	2,374	2,409	2,624	2,256	2,436	2,329	2,372
<i>DMT 497 + 20D</i>		1,073	1,160	1,141	1,073	1,159	1,094	1,070
<i>CPT 498 + 40D</i>	Pie ceļa nogāzes	1,342	1,317	1,385	1,225	1,303	1,352	1,34
<i>DMT 498 + 40D</i>		1,511	1,478	1,581	1,404	1,479	1,536	1,500
<i>CPT 498 + 40D</i>	Zem visas brauktuves konstrukcijas	2,517	2,482	2,535	2,136	2,325	2,345	2,509
<i>DMT 498 + 40D</i>		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 precizāk attēlot esošo grunts slāņu īpašības. Zemes klātnes grūtis ir ļoti neviendabīgas, tāpēc īpašības var ievērojami atšķirties viena slāņa ietvaros.

4.3.4. Konstrukcijas deformācijas aprēķini, izmantojot interpretētās vērtības

Saskaņā ar iegūtajiem aprēķinu rezultātiem lielākā deformācija notiek kūdras, dūņu un irdeno smilšu slāņos (4.3. att.), jo šo slāņu deformācijas modulis bija viszemākais.



4.3. att. Konstrukcijas deformācijas rezultāti, izmantojot grunts parametru interpretācijas izpētes punktā 498 + 40D – kreisajā pusē *CPT*; labajā pusē – *DMT*.

Konstrukcijas deformācijas, izmantojot *CPT* datus, noteiktas 1,99 cm apmērā, 6,50 cm apmērā, 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 to, ka deformācijas vērtības DMT izpētei sakrīta ar konsolidācijas testa rezultātiem (seši testa paraugi), var secināt, ka aprēķins ar *CPT* testa datiem sniedz optimistiskāku konstrukcijas sēšanās rezultātu, nekā reāli sagaidāms.

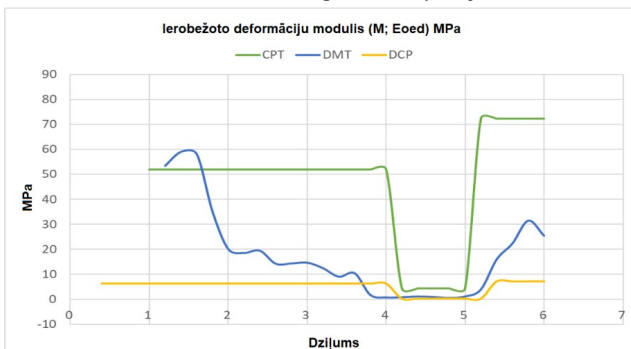
Vidējās grunts slāņu fizikāli mehāniskās īpašības neļauj novērtēt stiprības izmaiņas viena grunts tipa ietvaros. Noteiktais deformācijas apjoms un citu ģeotehnisko aprēķinu rezultāti var būtiski atšķirties, izmantojot slāņu vidējās vērtības vai, no otras puses, izmantojot īpašības katram 20 cm biežam 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, un tā rezultātā grunts slāņa vidējie parametri uzrāda zemas vērtības, bet tās nav kritiski zemas.

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

4.4.1. Iegūto rezultātu interpretācijas

Izpētes punktā, kas atrodas ceļa 34,46. km, veiktas visas trīs zondēšanas izpētes metodes. Pēc urbuma datiem tika noteikts, ka šajā vietā zem ceļa ir 1,1 m biezs kūdras slānis.

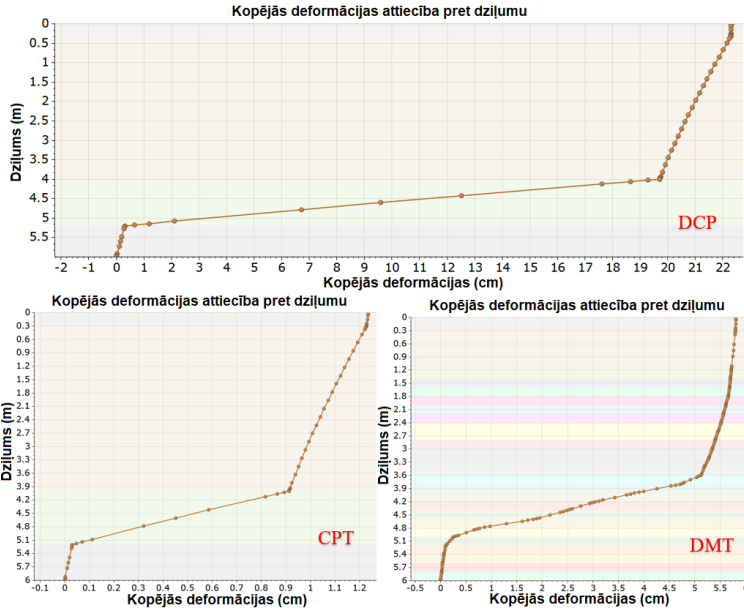
Salīdzinot iegūtos rezultātus (4.4. att.), redzams, ka statiskās zondes (*CPT*) izpēte uzrāda lielākas vērtības, aptuveni 10 reizes augstāka stiprība par *DCP* un līdz trīs reizēm augstāka stiprība par DMT. Atbilstoši *CPT* datiem līdz 4 m dziļumam noteikta atbilstošas kvalitātes smalka smiltis, tomēr, izvērtējot DMT un *DCP* interpretācijas, var secināt, ka abas pārējās izpētes metodes noteikušas zemākas kvalitātes grunts slāņus, jau sākot no 1,5 m dziļuma.



4.4. att. Ierobežotā deformācijas moduļa vērtību izmaiņas (34,46 km).

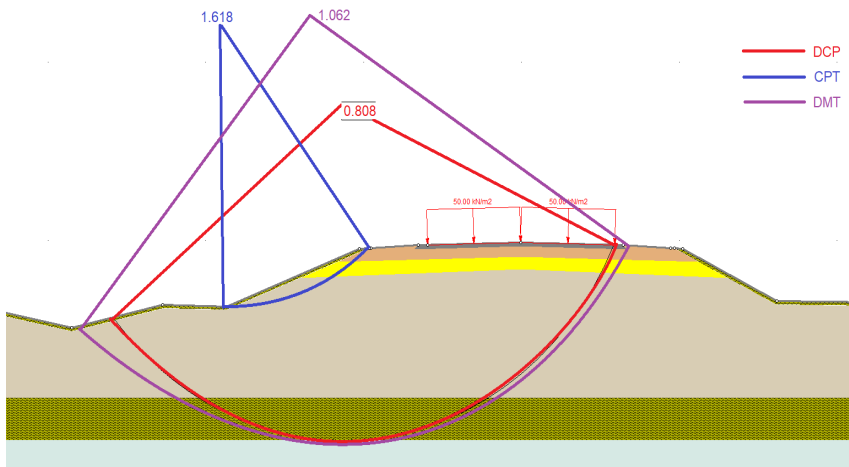
Visām trīs izpētes metodēm ir konstatēts būtisks ierobežoto deformācijas moduļa stiprības samazinājums kūdras slānī. Kūdra ir vājas nestspējas grunts, un, atbilstoši nenovērtējot tās iespējamo ietekmi cikliskās transporta slodzes iedarbībā, tā var izraisīt būtiskas konstrukcijas deformācijas.

Lai salīdzinātu iegūto deformācijas moduļa atšķirību ietekmi uz ceļa konstrukciju, veikts sēšanās aprēķins (4.5. att.).



4.5. att. Konstruktijas deformācijas rezultāti (34,46. km).

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



4.6. att. Nogāzes stabilitātes aprēķinu rezultāti (34,46. km).

Veicot aprēķinus, izmantojot statistiskās 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 5,8 cm apmērā, tomēr tika secināts, ka nogāžu stabilitāte tiek nodrošināta. Ņemot vērā to, ka 5,8 cm lielas deformācijas var radīt būtiskus riskus konstrukcijas kalpotspējai, nepieciešams izstrādāt zemes klātnes pastiprināšanas risinājumus, palielinot būvniecības izmaksas. Aprēķinu rezultāti, izmantojot *DCP* interpretācijas, uzrādīja būtiskas problēmas ceļa konstrukcijas kalpotspējas nodrošināšanai. Vājas nestspējas grunts slāņa deformācijas slodzes ietekmē tika noteiktas 19 cm 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 to, 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.

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

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

Statiskā konusa iespiešanās testa (*CPT*) metodes interpretācijas noteica labākus grunts slāņu parametrus, salīdzinot ar citām lauku izpētes metodēm un laboratorijas testu datiem. Lai projekta izstrādes gaitā izvairītos no šādām problēmām, papildus zondēšanai bija 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, ko 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 var secināt, ka DMT metode nodrošināja visprecīzākos ģeotehniskās izpētes datus, kas nepieciešami 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 tajos izpētes punktos, kuros tika noteikts lielākais sēšanās apjoms.

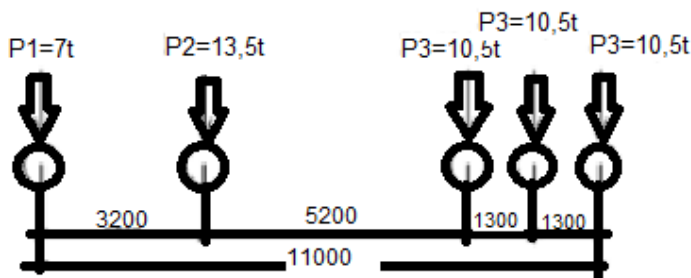
5. SATIKSMES SLODZES MODELIS CEĻA KONSTRUKCIJAS ĢEOTEHNISKAJAI PROJEKTĒŠANAI

Atšķirībā no tiltu projektēšanas standartiem un metodoloģijām, kas nosaka slodžu kombinācijas, ģeotehnisko aprēķinu standarti un metodikas nenosaka aprēķinos lietojamo 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 izklienātā slodzē, taču, ņemot vērā to, ka ceļa konstrukcija nav stingra, slodzes izkliede grunts slāņos atšķiras no slodzes izkledes būvkonstrukcijās.

5.1. Satiksmes slodzes modelis

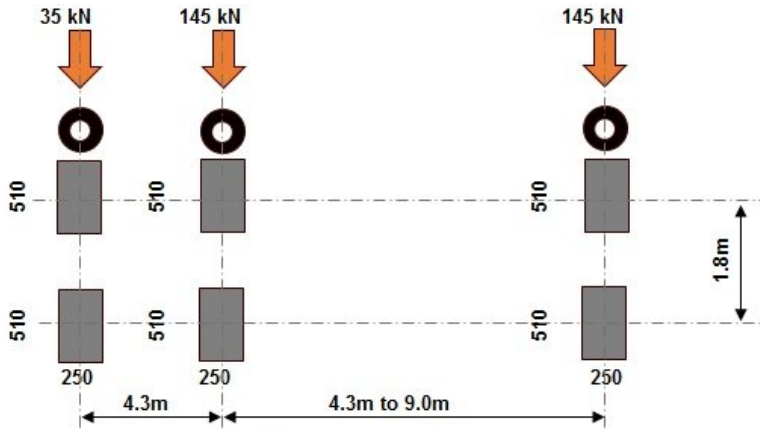
Daudzviet pasaulē arī ģeotehniskajiem aprēķiniem tiek izmantota tiltu tandēma slodze, kas definēta saskaņā ar "Eiropkodekss 1: Darbības uz konstrukcijām – 2. daļa: Satiksmes slodzes uz tiltiem". Aprēķinos kopējā tandēma slodze tiek izklienāta pa transporta projekcijas laukumu. Taču, ņemot vērā to, ka uz ceļiem šādas slodžu kombinācijas nav sagaidāmas, jo maksimāli pieļaujamo ass slodzi katrā valstī nosaka likumdošana, aprēķinos būtu jāizmanto transportlīdzeklis ar maksimāli pieļaujamo slodzi.

Eiropkodeksā ir aprakstītas četras slodžu kombinācijas, no kurām Latvijā ir individuāli attīstīts slodzes modelis *LM3*. Pieņemts, ka tā ir kravas automašīna ar puspiekabi, kas raksturo kokvedēju transportlīdzekli, kas nedaudz pārsniedz atļauto ass slodzi. Latvijā bieži tiek konstatēti pārkrauti baļķvedēji, 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 5.1. attēlā.



5.1. att. Aprēķinu slodzes modelis *LM3*.

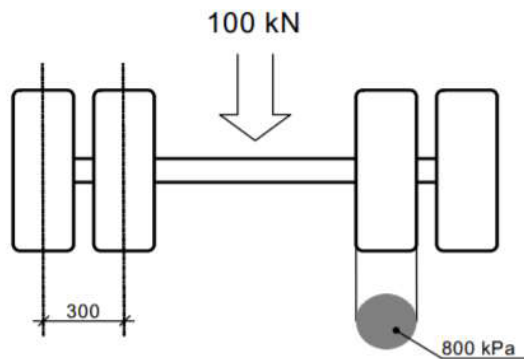
Amerikas Savienotajās Valstīs ģeotehniskie aprēķini un risinājumi jāizstrādā, izmantojot Ģeotehniskās projektēšanas rokasgrāmatu un *AASHTO* tiltu projektēšanas specifikācijās atrodamās satiksmes slodzes (5.2. att.).



5.2. att. HL-93 aprēķina kravas automašīna AASHTO.

Pirms tika pieņemts eirokodekss EN 1991-2, Vācijā 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 (tās izmērs – 3 m × 6 m un 3 m × 6 m).

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 izkļiedētu slodzi (5.3. att.).



5.3. att. Standarta ass, ko izmanto Zviedrijā.

Ņemot vērā to, ka aprēķinos tiek izmantotas dažādas transporta slodzes, vienādā ģeoloģiskajā situācijā 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

Tika salīdzināti trīs visbiežāk izmantotie slodzes modeļi.

- Izkļiedēta eirokodeksa LMI slodze – tandēma sistēmas slodze 2×300 kN, kas izkļiedēta uz taisnstūra veida laukumu, kas ir 3 m plats un 5 m garš, rezultātā izveidojot izkļiedētu slodzi 40 kPa.

- LM3 slodzes modelis 180 kPa lielumā tiek pielikts uz 0,4 m × 6 m liela laukuma katrā transportlīdzekļa pusē.
- AASHTO HL-93 slodze – atbilstoši transportlīdzekļa shēmai slodze izdalīta uz riteņa kontakta laukumu.

5.3. Nogāžu stabilitātes rezultātu analīze

Pētījuma gaitā veikti nogāžu stabilitātes aprēķini, izmantojot dažādas aprēķina slodzes, kas definētas iepriekšējā nodaļā.

Iegūtie rezultāti apkopoti 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Aprēķinu scenāriji un iegūtie rezultāti

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

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 autors rekomendē izmantot *LM3* slodzi, kas pārveidota par līnijasveida slodzi, ņemot vērā riteņa kontaktlaukumu.

5.4. Globālās stabilitātes/deformācijas aprēķinu rezultātu analīze

Pētījuma gaitā veikti globālās stabilitātes/deformācijas aprēķini, izmantojot trīsdimensiju galīgo elementu aprēķinu programmu un dažādas aprēķina slodzes.

Iegūtie rezultāti apkopoti 5.2. tabulā.

5.2. tabula

Globālās stabilitātes/deformāciju iegūtie rezultāti

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

Ņemot vērā iegūtos rezultātus, kā arī to, ka autoceļos ļoti bieži novērojamas risu deformācijas 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 liecina, ka *LM1* slodzes modelis nesniedz precīzus aprēķinu rezultātus, jo šīs slodzes parametri neatbilst transportlīdzekļa izraisītajai slodzei, kas uz autoceļiem parasti tiek pārnesta, ievērtējot riteņu trajektoriju un riepju kontaktvirsmas platumu.

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

6. CEĻA KONSTRUKCIJAS NESTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANA, IZMANTOJOT STATISKĀS PLĀTNES TESTU

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

Balstoties zondes datu interpretācijās iegūtajās grunts slāņu parametru vērtībās, promocijas darba gaitā 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 atlikusī nestspēja. Izstrādājot promocijas darbu, tika konstatēts, ka statiskās plātnes testa rezultātus būtiski ietekmē skatrakuma izmērs, jo nedemontējais asfalts ietekmē deformāciju attīstību pamatslānī, līdz ar to tiek noteikta neprecīza pamata nestspēja.

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 nepieciešams papildu finansējums, lai izbūvētu risinājumus nestspējas nodrošināšanai.

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 tests tiek veikts, pamatojoties uz Vācijas standartu *DIN 18134* (pārbaudes procedūras un testēšanas aprīkojums – plātnes slodzes tests).

6.1.3. Statiskās plātnes testa simulācijas modeļa uzbūve

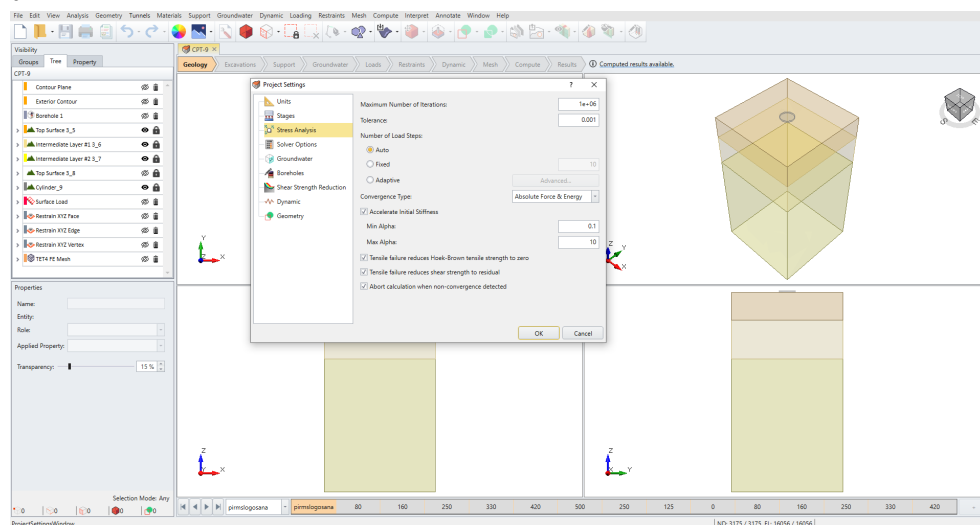
Ģeotehniskās izpētes laikā statiskās plātnes tests tika veikts atbilstoši 6.1.2. apakšnodaļā aprakstītajam. Galīgo elementu modelis un slogošanas/atslogošanas stadijas tika izstrādātas

atbilstoši standartam *DIN 18134* ar trīs cikliem – slogošana, atslogošana un atkārtota slogošana. 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 darbā galīgo elementu aprēķiniem izmantota kompānijas “*Rocscience*” izstrādātā aprēķinu programma/programmatūra *RS3*, kurā iespējams precīzi definēt visus ievades parametrus. Aprēķiniem izmantots *Mohr-Coulomb* modelis, kas ir vizizplatītākais modelis, ko izmanto ģeomateriālu un grunts slāņu aprēķiniem. Šī modeļa specifika un tā kritērijs parasti ietver Kulona hipotēzi, kas postulē lineāru attiecību starp bīdes izturību plaknē un spriegumu, kas uz to iedarbojas. Modelis ietver piecus parametrus, t. i., Junga moduli, Puasona koeficientu, bīdes pretestību, iekšējās berzes leņķi un dilatācijas leņķi (6.1. att.).

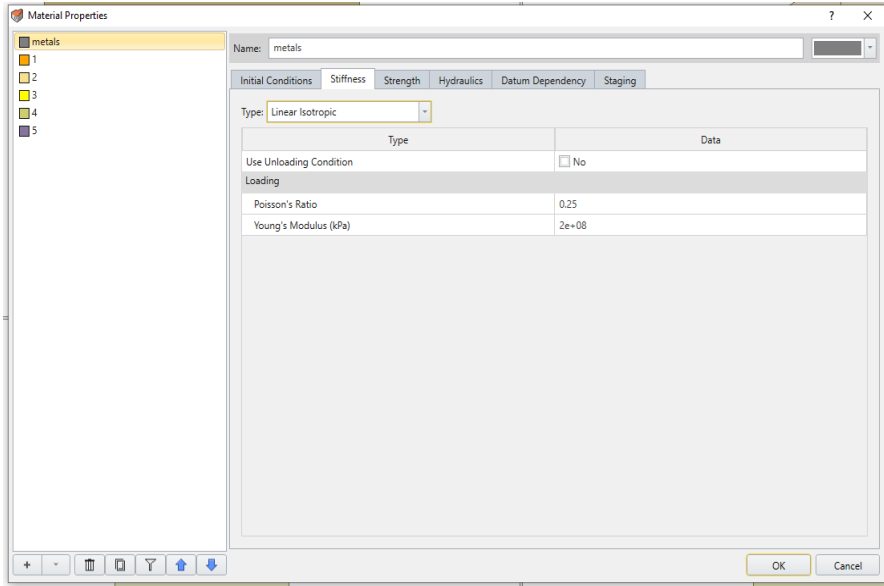
6.1. att. Ievades logs *Mohr-Coulomb* modeļa definēšanai.

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. Galīgo elementu programmas uzbūve un aptuvena aprēķina modeļa ģeometrija redzama 6.2. attēlā.



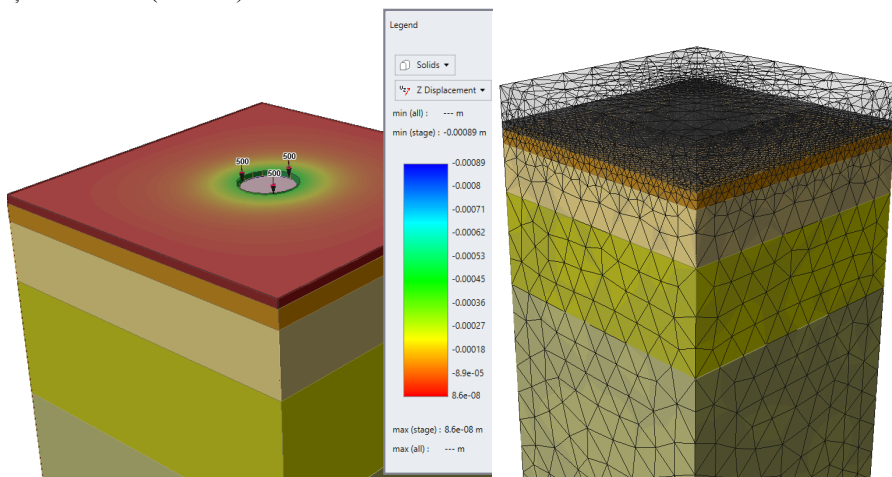
6.2. att. *RS3* datorprogrammas saskarne.

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



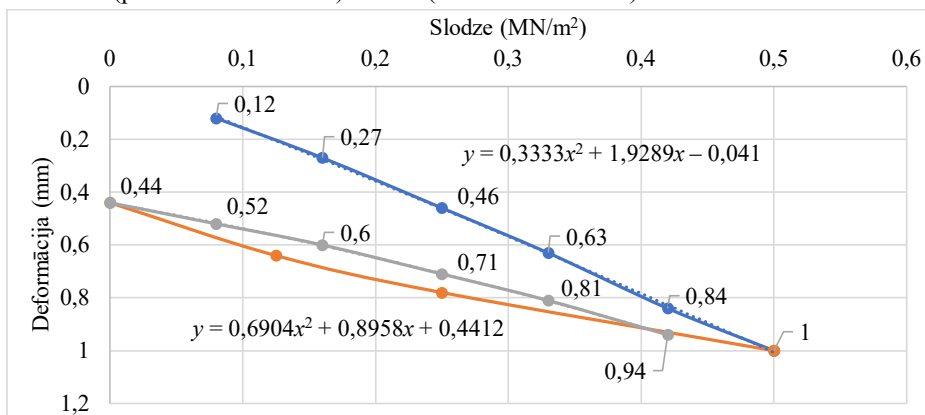
6.3. att. Grunts/materiālu slāņu fizikāli mehānisko īpašību parametri.

Ievērtējot visus izejas datus (grunts slāņu biezumus, slāņu fizikāli mehāniskās īpašības, statiskās plātnes testa sloģošanas ciklus u. c. parametrus), tika izstrādāts galīgo elementu aprēķina modelis (6.4. att.).



6.4. att. Statiskās plātnes testa simulācijas modelis.

Statiskās plātnes simulācijā slodze tika pielikta saskaņā ar *DIN 18134*. Katrā sloģošanas posmā tika noteikta statiskās plātnes vertikālā deformācija, un apkopotie dati tika apstrādāti tā, lai iegūtu statiskās plātnes testa grafiku (6.5. att.), no kura tika izteiktas esošā pamata nestspējas vērtības Ev_1 (pirmais slodzes cikls) un Ev_2 (otrais slodzes cikls).



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

6.1.4. Analītiskās aprēķinu formulas izstrāde Ev_2 aprēķinam

Apzinoties faktu, ka galīgo elementu aprēķini ir sarežģīti un aprēķina programmatūra nav pieejama visiem inženieriem, ņemot vērā šo programmu lielās 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 statiskās zondes testa metodi.

Aprēķina 6.1. formula izstrādāta, balstoties uz grunts slāņu fizikāli mehāniskajām īpašībām, kā arī ceļu būvdarbu laikā apkopotajiem būvdarbu kvalitātes kontroles datiem, kad būvdarbu kvalitāte tiek pārbaudīta ar statiskās plātnes testa palīdzību, nosakot konstruktīvo slāņu nestspēju. Aprēķins tiek veikts, ņemot vērā katra grunts slāņu ierobežoto deformāciju moduli M , ko iespējams noteikt ar oedometra laboratorijas testu vai arī ģeotehniskās izpētes laikā veicot zondēšanas izpētes interpretācijas. Virzienā no apkašas uz augšu tiek aprēķināta Ev_2 nestspēja virs katra ģeoloģijas grunts slāņa. Ņemot vērā nestspēju (Ev_2 vērtību) zem katra grunts slāņa, tiek aprēķināta attiecība Ev_2/M , nosakot nestspējas/deformācijas moduļa attiecību. Šādu attiecību nepieciešams novērtēt, jo atkarībā no šīs attiecības būtiski atšķiras stiprības/nestspējas pieaugums.

$$Ev_2 = M_i \cdot X, \quad (6.1.)$$

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 $B = 2,5$.

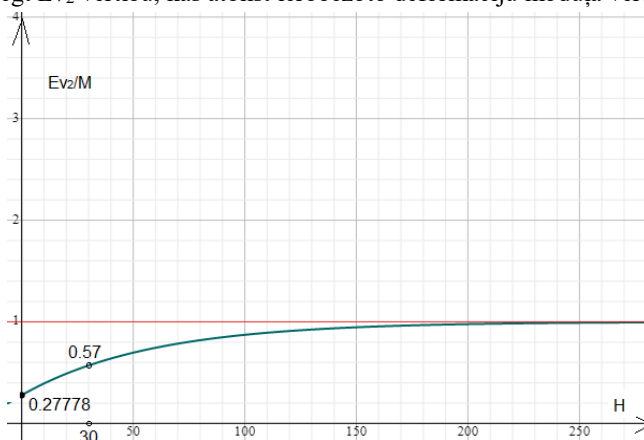
E_{v2} – zemes klātnes nestspēja uz apskatāmā grunts slāņa virsmas (MPa);

E_{v2+i} – 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 (E_{v2}/M), tiek noteikts, cik straujš ir sagaidāms nestspējas pieaugums. Palielinoties attiecībai (E_{v2}/M), palielinās sākotnējais nestspējas pieaugums, jo kvalitatīvāks materiāls ar daudz augstākām fizikāli mehāniskajām īpašībām sākotnēji sniedz būtisku piesumu nestspējas palielinājumam, līdz konkrētā slāņa biezums jau paliek pietiekami liels, kad tas sāk tuvuoties maksimāli iespējamajai nestspējai uz konkrētā materiāla, līdz ar to nestspējas palielinājums kļūst mērens. 6.6. attēlā redzams nestspējas noteikšanas grafiks (E_{v2+i} pieņemts 25 MPa, M pieņemts 90 MPa un $H = 30$ cm). Būtībā ir definēts, ka maksimāli iespējams sasniegt E_{v2} vērtību, kas atbilst ierobežoto deformāciju moduļa vērtībai – $E_{v2} \leq M$.



6.6. att. Aprakstītā piemēra eksponenciālais grafiks.

Lai pārbaudītu izstrādātās formulas precizitāti, tā tika pielietota ģeotehniskās izpētes datu analīzē.

6.2. Ceļa konstrukcijas esošā pamata atlikušās nestspējas novērtējums

6.2.1. Ģeotehniskā izpēte

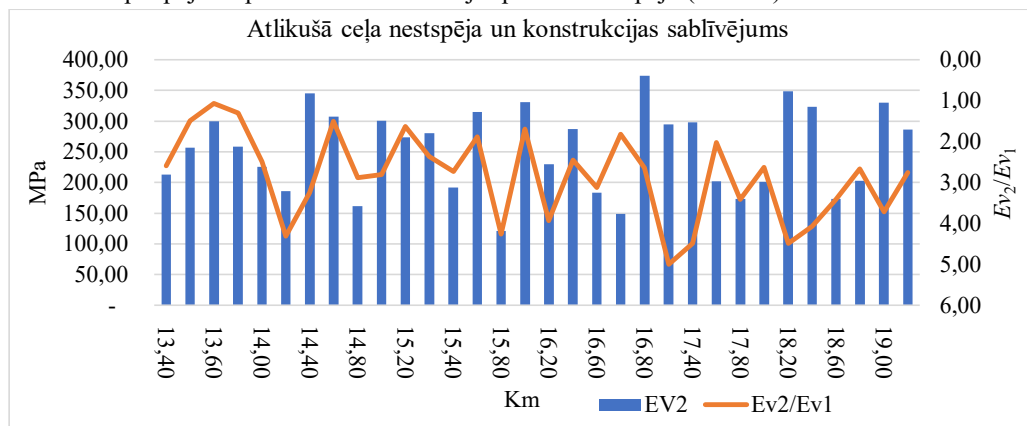
Ģeotehniskās izpētes pamatojums – sniegt pasūtītājam nepieciešamo informāciju, lai nodrošinātu pilnvērtīgu autoceļa segas pastiprināšanas (pārbūves) būvprojekta izstrādi.

6.2.2. Autoceļa A10 Rīga–Ventspils esošā pamata nestspējas analīze

6.2.2.1. Esošās pamata konstrukcijas ģeotehniskā izpēte

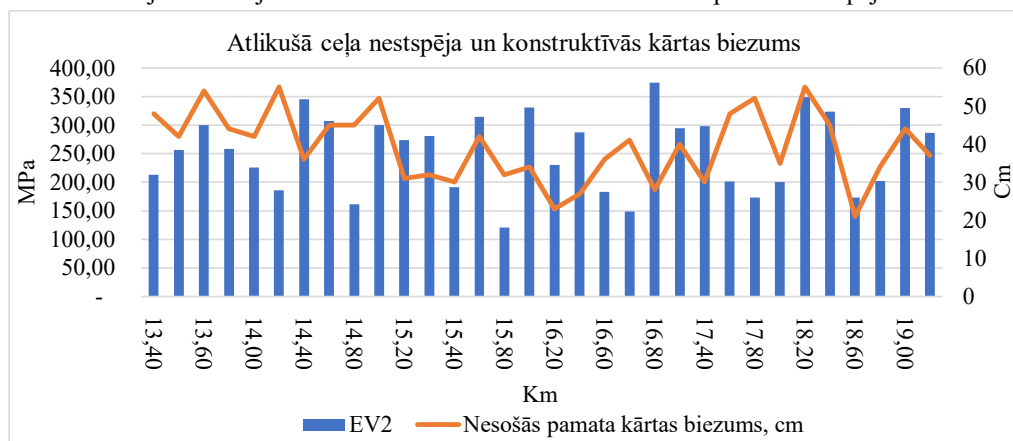
Valsts galvenā autoceļa A10 Rīga–Ventspils 13,30.–19,20. km posmā ģeotehniskās izpētes darbu gaitā, lai noteiktu ceļa pamata nesošās kārtas deformatīvās un izturības īpašības, brauktuves daļā 34 punktos tika veikti statiskās plātnes slogošanas testi.

Izmantojot ģeotehniskās izpētes laikā veikto statistiskās plātnes testa izpētes rezultātus, izstrādāts apkopojums par esošās konstrukcijas pamata nestspēju (6.7. att.).



6.7. att. Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas sablīvējuma.

6.7. attēlā redzama esošā pamata nestspēja un pamata sablīvējums. Analizējot iegūtos rezultātus, iespējams vērot sakarību, ka, palielinoties pamata kārtas sablīvējumam, pieaug arī tā nestspēja. 6.8. 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.



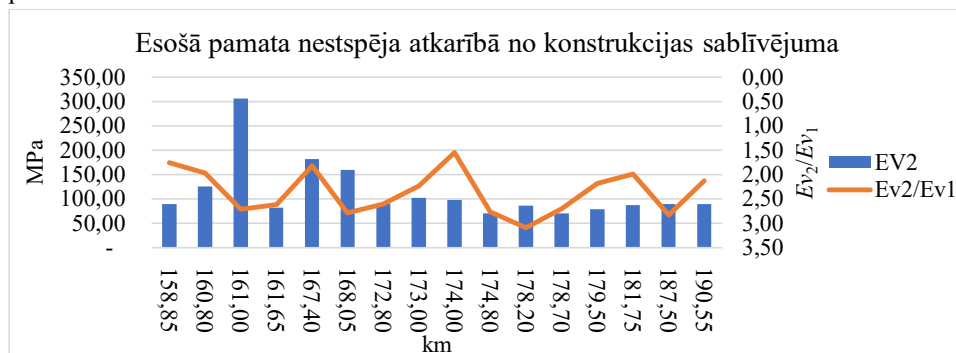
6.8. att. Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas biezuma.

6.2.2.2. Ceļa pastiprināšanas būvdarbi

Projektā apskatītajam ceļa posmam tika paredzēts izbūvēt ceļa segas pastiprināšanas risinājumu, kas ietver esošo pamatu, 20 cm biezu reciklēta materiāla kārtu un trīs asfalta kārtas. Tika definēts, ka uz esošā pamata nepieciešams sasniegt 90 MPa lielu nestspēju.

Lai pārlicinātos par izstrādātā risinājuma iespējamo realizāciju un projekta izstrādes laikā aplēsto esošā ceļa pamata nestspēju, būvniecības gaitā tika veikti statistiskās plātnes sloģošanas

mērījumi. Sākotnēji tika nofrezēta vecā asfaltbetona konstrukcija un tests veikts uz esošā pamata zem tās.

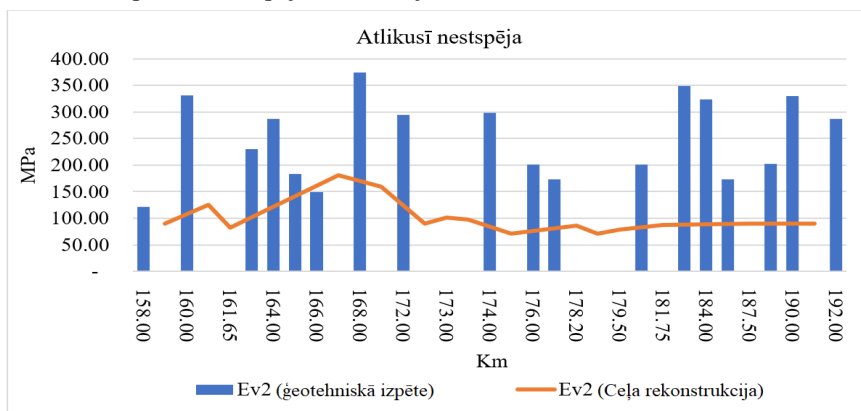


6.9. att. Esošā pamata nestspēja atkarībā no konstrukcijas sablīvējuma.

6.9. attēlā apkopoti būvniecības laikā konstatētā esošā pamata nestspējas rādītāji. Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem redzams, ka vidējā esošā pamata nestspēja ir aptuveni 90 MPa, tādēļ var secināt, ka esošā pamata nestspēja noteikta precīzi.

6.2.2.3. Esošā pamata nestspējas analīze

Var droši apgalvot, ka statistiskās plātnes tests tiek veikts katra ceļa projektēšanas un būvniecības gaitā, tādēļ svarīgi saprast kopsakarības, ar kuru palīdzību varētu noteikt esošā pamata nestspēju. 6.10. attēlā redzams veiktās ģeotehniskās izpētes un būvniecības gaitā konstatētās esošā pamata nestspējas salīdzinājums.



6.10. att. 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.

Viens no būtiskākajiem rezultātu ietekmējošajiem faktoriem varētu būt atšķirīgie pamata sloģošanas apstākļi. Ģeotehniskās izpētes laikā skatrakumu veidošanai tiek izgriezts neliels

asfaltbetona laukums, lai varētu tikt pie esošā pamata konstrukcijas, veikt statistiskās plātnes testu un noteikt, 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.

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

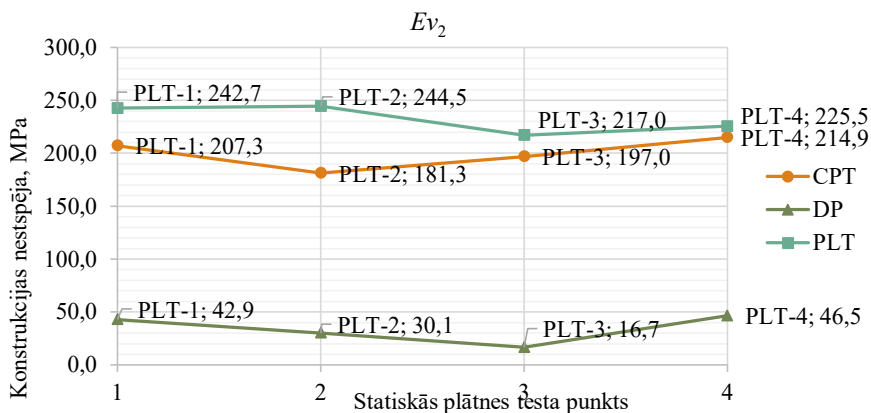
Aprēķinot esošā pamata teorētisko nestspēju, iegūtas būtiskas rezultātu atšķirības.

- Konstrukcija bez asfaltbetona virskārtas (simulējot ceļa būvniecības slogošanas apstākļus) – $E_{v1} = 105,97$ MPa; $E_{v2} = 152,58$ MPa; $E_{v2}/E_{v1} = 1,43$.
- Konstrukcija ar asfaltbetona virskārtu un skatrakumu 1 m × 1 m izmērā (simulējot ģeotehniskā izpētes slogošanas apstākļus) – $E_{v1} = 117,26$ MPa; $E_{v2} = 203,39$ MPa; $E_{v2}/E_{v1} = 1,73$.
- Konstrukcijai ar apļveida skatrakumu iegūti šādi rezultāti – $E_{v1} = 103,91$ MPa; $E_{v2} = 333,70$ MPa; $E_{v2}/E_{v1} = 3,21$.

Visi trīs izstrādātie galīgo elementu aprēķina modeļi izstrādāti, balstoties uz identiskām teorētiskajām materiālu īpašībām, taču 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 kārtā, kas varētu ietekmēt rezultātu precizitāti.

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

Lai noteiktu, kura no ģeotehniskās izpētes metodēm (statiskā zonde vai dinamiskā zonde) sniedz precīzākas un piemērojamākas grunts parametru interpretācijas, tika veiktas statistiskās plātnes testa simulācijas, izmantojot abu zondēšanas metožu datu interpretācijas.

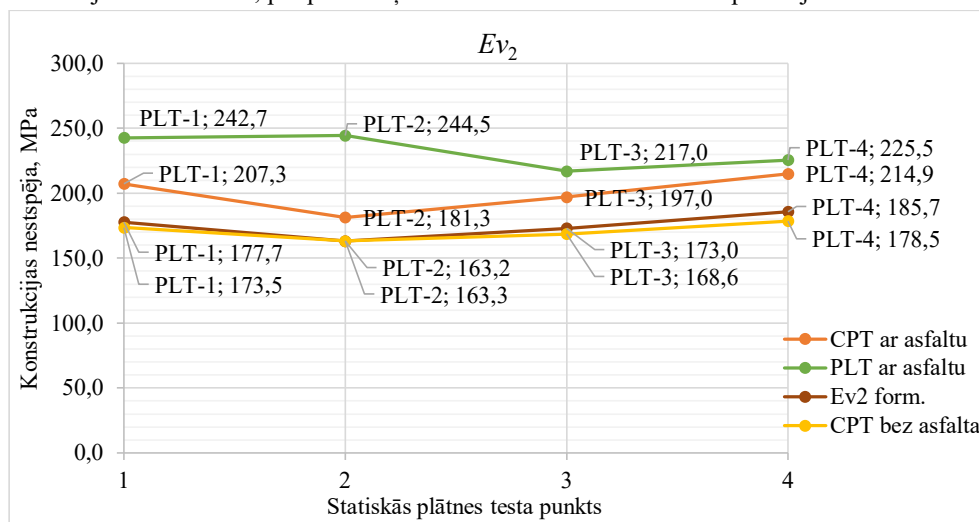


6.11. att. Esošā ceļa konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja.

6.11. attēlā redzama esošā ceļa pamata nestspēja. Galīgo elementu simulācija, izmantojot statistiskās zondēšanas testa (*CPT*) datus, nodrošina salīdzinoši precīzus rezultātus, salīdzinot ar ģeotehniskās izpētes laikā veikto statistiskās 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.

Ģeotehniskās izpētes laikā statistiskās plātnes tests uz brauktuves daļas lielākoties tiek veikts skatrakumā. Tas tiek izveidots, noņemot esošās asfalta kārtas aptuveni statistiskās plātnes diametra izmērā, tādēļ atlikušie blakus esošie asfaltbetona slāņi ietekmē testa gaitu un iegūtos rezultātus. Promocijas darbā izstrādātā analītiskā aprēķina formula nespēj novērtēt blakus statistiskās plātnes testam atstātās asfalta kārtas, līdz ar to ģeotehniskās izpētes laikā veiktās statistiskās plātnes testa datus nav iespējams tieši salīdzināt ar analītisko Ev_2 aprēķinu rezultātiem.

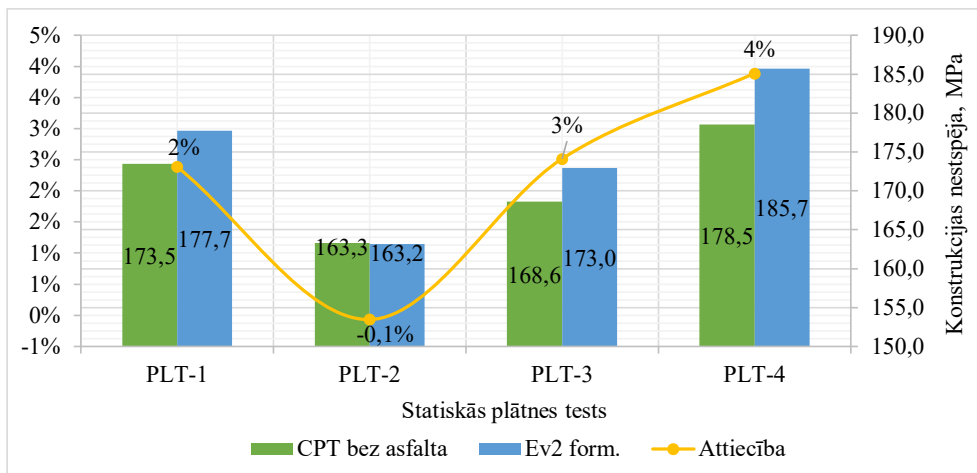
Lai veiktu salīdzinājumu un pārlicinātos, ka izstrādātā 6.1. formula sniedz atbilstošus rezultātus, veikta statistiskās plātnes testa simulācija, noņemot asfalta kārtas visā brauktuves zonā. Aprēķina rezultāti un salīdzinājums redzams 6.12. attēlā. Analītiskie aprēķinu rezultāti iegūti, izmantojot 6.1. formulu, par pamatu ņemot statistiskās zondes datu interpretācijas.



6.12. att. P86 ceļa esošās konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja.

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

Analītiskā aprēķina un galīgo elementu statistiskās plātnes simulācijas bez asfalta konstrukcijas rezultāti ir ļoti līdzīgi, un atšķirības ir minimālas.



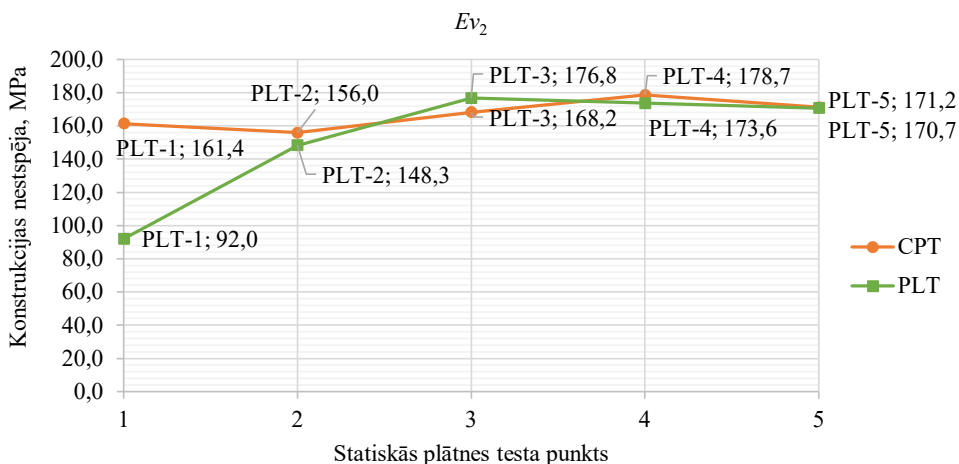
6.13. att. Iegūto rezultātu salīdzinājums.

Lielākā rezultātu atšķirība bija 4 %, bet vismazākā atšķirība bija 0,1 % robežās. Ar abām metodēm noteiktās esošā pamata nestspējas vērtības ir līdzvērtīgas. Var secināt, ka izstrādātā aprēķina formula sniedz objektīvus esošā pamata nestspējas rezultātus un 6.1. formulu, izmantojot *CPT* datu interpretācijas, iespējams lietot esošā pamata novērtēšanai.

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

Veikta autoceļa A10 (Rīga–Ventspils) ģeotehniskās izpētes un būvdarbu kvalitātes datu analīze. Ceļa būvdarbu laikā tika veikts testa posms – uz nesaistītas minerālmateriālu kārtas tika dublēti pieci statistiskās plātnes testi (*PLT*) un pieci statistiskās zondēšanas testi (*CPT*).

Ar galīgo elementu metodi veikto aprēķinu rezultāti tika salīdzināti ar ģeotehniskās izpētes laikā veiktajiem statistiskās plātnes testa rezultātiem.

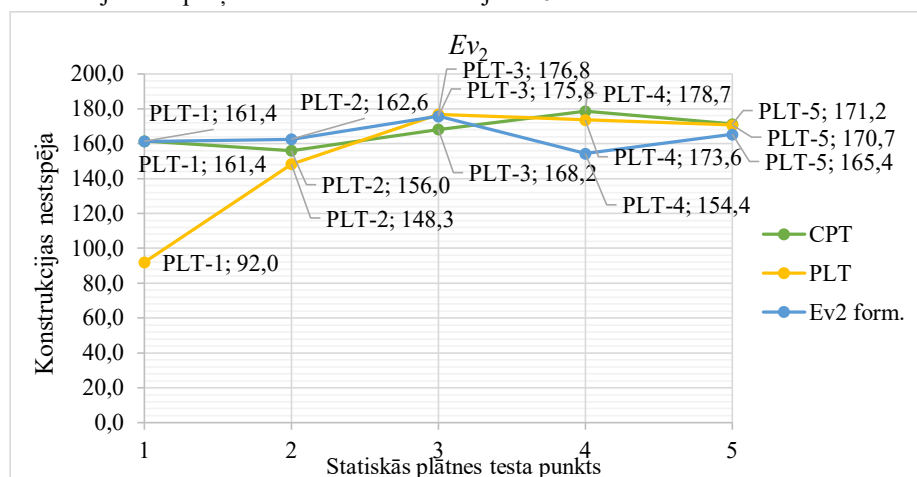


6.14. att. Esošā ceļa konstrukcijas pamata atlikušā nestspēja.

6.14. attēlā parādīta esošā ceļa pamata nestspēja. Iegūtie rezultāti ir ļoti precīzi. Var secināt, ka esošā pamata atlikušo nestspēju var noteikt ar galīgo elementu metodi, simulējot statistiskās plātnes testu, izmantojot grunts fizikāli mehāniskās īpašības, kas iegūtas no statistiskās zondēšanas testa interpretācijām.

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

Promocijas darbā izstrādāta analītiskā aprēķina formula un, lai pārliecinātos, ka izstrādātā 6.1. formula sniedz atbilstošus rezultātus, veikts CPT, PLT un analītiskā aprēķina salīdzinājums. Aprēķina rezultāti un salīdzinājums 6.24. attēlā.



6.15. att. A10 ceļa esošās konstrukcijas pamata atlikusī nestspēja.

Rezultātos attēloti analītiski noteiktie esošā pamata nestspējas rādītāji, galīgo elementu simulācijas, izmantojot statistiskās zondes interpretāciju 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.

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 darba mērķis un uzdevumi ir sasniegti. Izstrādāta aprēķina metode autoceļu konstrukcijas nestspējas modelēšanai, izmantojot grunts slāņu un citu materiālu īpašības, kā arī transporta slodzes modelis, ko iespējams izmantot autoceļu ģeotehnisko aprēķinu veikšanai un projekta risinājumu izstrādei.

Promocijas darba rezultātā ir iegūti vairāki 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 statistiskās zondes interpretācijas uzrāda visaugstākās grunts slāņu parametru vērtības. Tā uzrādīja lielāku ierobežoto deformāciju moduļa vērtību, vidēji 10 reizes augstāku stiprību par *DCP* un divas 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 2 MPa, savukārt statistiskā zonde noteikusi pārāk augstas vērtības, aptuveni par 12 MPa augstākas. Līdz ar to secināts, ka aprēķini, izmantojot statistiskās zondes datus, var sniegt pārāk optimistiskus galarezultātus.
4. Iegūtie ceļa konstrukcijas deformāciju aprēķini uzrādīja būtiskas rezultātu atšķirības. Vislielākā starpība noteikta, salīdzinot aprēķinus, izmantojot *CPT* un *DCP* interpretācijas, un tā bija 25 cm jeb 600 % apmērā. Konstrukcijas konsolidācijas/sēšanās aprēķini, izmantojot statistiskās zondes datus, uzrādīja vidēji trīs reizes mazākas deformācijas, kā noteiktas ar dilatometra izpēti, un sešas reizes mazākas, kā noteikts ar dinamisko zondi. Papildus zondēšanas izpētēm nepieciešams veikt netraucētu paraugu laboratoriskās pārbaudes. Tādējādi būtu iespējams pārbaudīt, vai izstrādātie risinājumi balstīti konservatīvās, atbilstošās vai arī netipiski augstās grunts slāņu fizikāli mehāniskajās īpašībās 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*, taču līdz ar to palielina būvniecības izmaksas.

6. Pētījumā noteikts, ka autoceļu ģeotehniskajos aprēķinos bieži tiek izmantota tiltu tandēma slodze *LMI*, kas izkļiedēta uz $3\text{ m} \times 5\text{ m}$ lielu taisnstūra laukumu. Ņemot vērā to, ka autoceļos visbiežāk tiek novērotas risveida deformācijas, kas attīstās zem riteņu trajektorijas, *LMI* 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 arī citās valstīs, ņemot vērā katras valsts likumdošanā noteikto maksimālo ass slodzi un tādējādi modificējot slodzes lielumu, bet saglabājot tās pielikšanas shēmu.
8. Pētījuma rezultātā noteikts, ka vislielākā ietekme uz statistiskās 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 skatrakumam 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 statistiskās plātnes testa rezultātus vidēji 40 % apmērā, salīdzinot ar rezultātiem, kas tiek iegūti būvniecības laikā. Līdz ar to autoruzraudzības laikā var nākties veikt projekta korekcijas.
9. Promocijas darbā izstrādātais inovatīvais statistiskās plātnes galīgo elementu aprēķina modelis sniedz ļoti precīzus rezultātus, veicot aprēķinus uz nesaistītām seguma kārtām bez skatrakuma izveides (bez blakus esoša apbēruma, kas iespaido testa rezultātus). Iegūtie rezultāti rāda, ka statistiskās plātnes testa simulācija, izmantojot statistiskās 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 vēlamā dziļumā.
10. Pētījuma rezultātā noteikts, ka atšķirība starp objektā veiktā statistiskās 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 lietot esošā pamata novērtēšanai.



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.