

Grunšu sala pacēluma īpašību novērtēšana ceļu segas projektēšanas vajadzībām (2. kārtā)

Gala ziņojums

Pasūtītājs:
Izpildītājs:
Partneri:

VAS "Latvijas Valsts ceļi"
SIA "Vides eksperti"
Latvijas Universitāte
SIA "Ceļu eksperts"

Autori:

Māris Krievāns, PhD – Latvijas Universitāte
Jānis Karušs, PhD – Latvijas Universitāte
Jurijs Ješkins, MSc - Latvijas Universitāte
Ivars Pavasars, PhD – SIA "Vides eksperti"
Aigars Strežs, MSc– SIA "Ceļu eksperts"

Rīga 2020

KOPSAVILKUMS

Apstiprinu, _____		
(vārds, uzvārds, paraksts)		
Pētniecības projekta nosaukums: <i>Grunšu sala pacēluma īpašību novērtēšana ceļu segas projektēšanas vajadzībām (2. kārtā)</i>		
Līguma numurs	LVC2019/1.8/AC/125	
Līguma slēgšanas datums	8. oktobris, 2019	
Pētniecības projekta stadija	Gala ziņojums	
Starpziņojumu kopējais skaits	divi	
Ziņojuma nodošanas datums	17. jūlijs, 2020	
Pētniecības projekta stadijas izstrādes periods	1. aprīlis, 2020 – 17. jūlijs, 2020	
Lappušu skaits	61 (bez pielikumiem)	
Pielikumu skaits	4	
Disks vai cits datu nesējs (ir/nav)	nav	
Eksemplāru skaits	viens	
Pētniecības programma JAUNU TEHNOLOĢIJU IZPĒTES PROGRAMMA 2019. - 2021. GADAM		
Pētniecības projekta izpildītāji	Vārds, Uzvārds	Paraksts
Pētniecības projekta vadītājs	Ivars Pavasars	
Vadošais pētnieks	Jānis Karušs	
Vadošais pētnieks	Māris Krievāns	
Pētnieks	Aigars Strežs	
Pētnieks	Jurijs Ješkins	
Projektu finansē	VAS "Latvijas Valsts ceļi" / Satiksmes ministrija	
Partneri	SIA "Vides eksperti", Latvijas Universitāte, SIA "Ceļu eksperts"	
Īss apraksts Pētījuma Gala ziņojumā aprakstīta monitoringa stacijas novietojuma vietas izvēle, tās raksturojums, sniegts nivelēšanas darbu apraksts un parādīti nivelēšanas punkti. Detalizēti aprakstīta izvēlēto sensoru testēšana un instalācija zem ceļa klātnes. Apkopoti un analizēti iegūtie dati no 2019/2020. gada ziemas sezonas. Aprakstīti arī ar elektroizpēti iegūtie rezultāti, kā arī ar bezpilota lidaparātu (dronu) iegūtais digitālais zemes virsmas modelis (DEM) un šo datu iztīrījums. Grunšu fizikālo rādītāju noteikšana ir noslēgusies un ziņojumā iekļauti visi grunšu testēšanas rezultāti. Kopumā grunšu sala pacēluma testētās vērtības un kopējais potenciālais ceļa segas sala pacēlums tika iegūts līdzīgs, kā aprēķinot ceļa segas konstrukcijas sala pacēluma vērtības saskaņā ar "Ieteikumi ceļu projektēšanai. Ceļa sega". Ziņojumā aprakstīti arī citu valstu veiktie sasaluma dziļuma un sala pacēluma veiktie pētījumi un izmantotās metodes. Analizēta arī SAR satelīta sistēmu izmantošana ceļa klātnes, t.sk. sala pacēluma novērošanā un analizē. Tai ir liels potenciāls attīstoties jaunām satelītu platformām, taču pašlaik tas ir iespējams tikai ieguldot lielus finansiālus resursus. Interferometriskā analīze pašlaik nesniedz 100% ticamu rezultātu, kā arī pastāv		

problēmas datu saskaņotības novērtēšanā. Pielikumos sniegtas arī apkopojošas rekomendācijas turpmāko sala pacēluma, grunts temperatūras un mitruma profila monitoringa staciju izveidei gan attiecībā uz mēriekārtām, gan datu uzkrāšanu un pārraidi, gan vietas izvēli. Analizēta arī iespēja integrācijai ar esošajām ceļu meteostacijām.

Executive summary

The Final Report of the study describes the location of the monitoring station, its characteristics, provides a description of the levelling works and shows the levelling points. Testing and installation of selected sensors under the road surface have been described in detail. The data from the winter season of 2019/2020 have been compiled and analysed. The report also describes the results obtained by electrical resistivity tomography, as well as the digital elevation model (DEM) obtained with an unmanned aerial vehicle (drone) and the discussion of these data. The determination of the physical parameters of the soil has been completed and the report includes all the results of the soil testing. All in all, the tested values of ground frost heave and the total potential pavement frost heave were obtained similar to the calculation of the frost heave values of the pavement structure in accordance with "Recommendations for Road Design. Road Cover". The report also describes studies carried out in other countries on the frost penetration depth and the frost heave and the methods used. It analyses the use of SAR satellite systems in the monitoring and analysis of the road surface, incl. frost heave. It has a great potential with the development of new satellite platforms, but it is currently only possible with significant financial resources. Interferometric analysis does not currently provide 100% reliable results, and there are problems in assessing the consistency of the data. In the annexes, summarising recommendations are provided for the establishment of future monitoring stations for frost heave, ground temperature and humidity profile, both in terms of measuring equipment, data collection and transmission, and site selection. The possibility of integration with the existing road meteorological stations has also been analysed.

Pielietojums/pētījuma sfēra	Ceļu projektēšana
Papildus izstrādātie materiāli	-

SATURS

IEVADS	5
1. PĒTĪJUMU VIETAS IZVĒLE UN RAKSTUROJUMS	7
2. MONITORINGA PUNKTU IERĪKOŠANA	9
3. NIVELĒŠANAS PUNKTI PIEGUĻOŠAJĀ TERITORIJĀ	10
4. EKSTENCIOMETRA IEKĀRTA	12
4.1. Ekstenciometra ievietošana	12
4.2. Ar ekstenciometru iegūtie mērījumi	14
5. TERMISTORU KABELIS	19
5.1. Termistoru kabeļa ievietošana	19
5.2. Iegūtie dati no termistoru kabeļa mērījumiem	21
6. KOMBINĒTIE MITRUMA UN TEMPERATŪRAS UN SENSORI	24
6.1. Sensoru ievietošana	24
6.2. Iegūtie dati no temperatūras un mitruma sensoriem	28
7. ELEKTROIZPĒTE	32
8. PĒTĪJUMI AR BEZPILOTA LIDAPARĀTU (DRONU)	34
9. CEĻA KONSTRUKCIJA UN GRUNŠU ĪPAŠĪBAS	41
10. KAIMIŅVALSTU SASALUMA DZIĻUMA UN SALA PACĒLUMA MĒRĪJUMI	51
11. “SAR” SATELĪTU SISTĒMAS	56

IEVADS

Pēc valsts akciju sabiedrības „Latvijas Valsts ceļi” pasūtījuma sala pacēluma problemātikas pētījumi tika uzsākti 2018/2019. gada sezonā, projektā “Grunšu sala pacēluma īpašību novērtēšana ceļu segas projektēšanas vajadzībām”, vispirms apskatot sala pacēluma teorētiskos aspektus un salīdzinot pašreiz pasaulē lietotos izpētes standartus un metodes sasaluma un atkusuma ietekmes novērtēšanai uz gruntīm (tai skaitā laboratorijas apstākļos). Tika analizēts mēriekārtu tirgus piedāvājums un citu valstu pieredze praktiskā, in-situ sala pacēluma un sasaluma profila mērīšanā un monitoringā tieši zem ekspluatācijā esoša ceļa klātnes. Izrādījās, ka šādi in-situ sala pacēluma mērījumi pasaulē ir notikuši ļoti ierobežotā apjomā, tomēr tika sagatavoti optimāli priekšlikumi grunšu temperatūras, mitruma un sala pacēluma in-situ mērījumu veikšanai un monitoringa staciju izveidei.

Tomēr, pirms uzsākt šādu plašāka mēroga un apjoma monitoringa programmu, t.sk. finanšu ieguldījumu ziņā, bija nepieciešams praktiski izmēģināt un pārliecināties par mēriekārtu un tehniskā aprīkojuma pielietojamību reālos apstākļos, veicot sensoru instalāciju zem ceļa klātnes, nepieciešamās mēriekārtu kalibrācijas, mērījumus, novērtējot to stabilitāti, precizitāti Latvijas klimatiskajos apstākļos un iespēju robežās veicot datu verifikāciju. Līdz ar to, tas arī bija viens no šajā ziņojumā atainotā pētījuma “Grunšu sala pacēluma īpašību novērtēšana ceļu segas projektēšanas vajadzībām (2. kārtā)” galvenajiem uzdevumiem.

Kopumā pētījuma 2. kārtā ir noritējusi ļoti veiksmīgi un ir gūta pārliecība un pamatojums kā izveidot un aprīkot sasaluma dziļuma un sala pacēluma monitoringa stacijas kvalitatīvu un stabilu mērījumu datu iegūšanai. Izdevās pārliecināties par datu uzkrāšanas un pārraides iekārtu un sensoru instalācijas un darbības praktiskajiem aspektiem. Ziņojums, pārskatāmības labad, ir sadalīts 11. tematiskās nodaļās un katra no tām ir lasāma arī atsevišķi atkarībā no interesējošās tēmas. Katrā nodaļā atspoguļoti arī attiecīgās tēmas galvenie rezultāti un secinājumi. Tā pirmās trīs nodaļas apraksta nepieciešamos sagatavošanās darbus monitoringa vietā pirms sensoru instalācijas, tai skaitā, aprakstot arī pašu vietas izvēli. Tālākās trīs nodaļas (4. – 6. nodaļas) atspoguļo secīgi visu izmantoto sensoru veidu (ekstenciometrs, termistoru kabelis, kombinētie mitruma un temperatūras sensori) izmēģinājumus (kalibrācija, testēšana), instalāciju, mērījumu datus, kā arī novērotās problēmas un ieteikumus.

Turpmākās ziņojuma nodaļas katra atsevišķi analizē un sniedz secinājumus par vairākiem saistītajiem pētījuma aspektiem – elektroizpēte, pētījumi ar dronu (7. un 8. nodaļas), 9. nodaļā apkopoti tieši laboratoriskie grunšu pētījumi un attiecīgie rezultāti un secinājumi. Līdzīgā veidā 10. nodaļa pievēršas sasaluma dziļuma un sala pacēluma mērījumiem citās

valstīs, īpaši mūsu kaimiņvalstīs un 11. nodaļa analizē iespējas sala pacēluma novērojumiem izmantot t.s. “SAR” satelītu sistēmas (no angļu val. Synthetic Apperture Radar).

Šajā pētījumu kārtā tomēr neizdevās pārbaudīt LiDAR metodes izmantošanu sala pacēluma noteikšanā klimatisko apstākļu dēļ. Proti, izteikti siltajā 2019/2020. gada ziemas sezonā nebija pietiekami ilgstoša un pietiekami zemu temperatūru sala perioda, lai šo metodi varētu droši izmēģināt.

Kopumā pētījuma 2. kārtas rezultāti sniedz pietiekamu pamatu tālāku lēmumu pieņemšanai, lai varētu pārdomāti turpināt sala pacēluma un sasaluma dziļuma praktiskos novērojumus un monitoringa tīkla izveidi.

1. PĒTĪJUMU VIETAS IZVĒLE UN RAKSTUROJUMS

Pētījuma sākumā monitoringa staciju bija paredzēts ierīkot Ķekavas novadā uz autoceļa A7, netālu no A7 un P89 ceļu krustojuma. Taču, ņemot vērā lielo satiksmes intensitāti uz A7, plānotais izpētes un monitoringa punkts tika pārcelts uz autoceļa P89 posmu starp krustojumiem A7-P89 un P89-P90. Tomēr, spriežot pēc ģeoloģiskajām kartēm M 1:50 000 un topogrāfiskajiem materiāliem M 1:10 000, pastāvēja vidēji augsta varbūtība, ka izvēlētajā posmā varētu būt sastopami glacigēnie nogulumi, kurus veido morēnas smilšmāls vai mālsmilts. Veicot detalizētu ģeoloģisko izpēti un ierīkojot virkni urbumu (dziļumā līdz 2 m), izvēlētajā posma garumā tika konstatēta smalka un putekļaina smiltis. Tādējādi tika nolemts, ka pastāv pārāk augsts risks, lai ierīkotu sala pacēluma monitoringa staciju nogulumos, kuros iespējamais pacēlums var nenotikt, vai arī veidoties novērojumu kļūdas robežās.

Visbeidzot, ņemot vērā pētījuma *“Frost Heave Properties Assessment of the Soils for the Road Pavement design”* rezultātus, pamatojoties uz ģeoloģisko uzbūvi un LVC meteostacijas novietojumu, monitoringa stacija tika ierīkota uz Vidzemes šosejas (autoceļš A2) aiz Siguldas, virzienā uz Cēsīm, autobusu pieturā “Laugas” (1. un 2. att.), šosejas 58,75 km kreisajā pusē (LKS92 336691.3; 558633.3). Precīzu sensoru instalācijas vietas izvēli noteica ceļa uzbēruma biezums, grāvju dziļums un teritorijas ģeoloģiskās īpatnības. Priekšizpētes gaitā, veicot LIDAR DEM izpēti un ģeoloģisko urbšanu, zemākais ceļa uzbēruma (no 0,5 līdz 0,7 m) ar seklākajiem grāvjiem konstatēts pieturas “Laugas” apkārtnē profilā E-F (3. attēls). Šķērsprofilā A-B konstatētais ceļš virs pieguļošās teritorijas paceļas no 1 līdz 1,7 m, profilā C-D no 1,1 līdz 2 m, savukārt profilā G-H no 1 līdz 1,2 m.



1. attēls. Monitoringa urbumu novietojums. Skats no Cēsu uz Rīgas pusi, iekrāsotā ceļa daļa parāda veikto monitoringa urbumu vietas. Fotografijas labajā pusē redzamie divi koka stabiņi parāda nivelēšanas vietas blakus ceļam.



2. attēls. Priekšizpētes gaitā izvietotie ceļa šķēršprofili grāvju dziļuma un uzbēruma biezuma mērījumiem. Apzīmējumi: sarkanās līnijas – šķēršprofili; sarkanais kvadrāts – izvēlētā monitoringa vieta.

2. MONITORINGA PUNKTU IERĪKOŠANA

Pirms monitoringa stacijas ierīkošanas Siguldas novadā, pieturā “Laugas”, 2019. gada 6. novembrī veikta ģeoloģiskās situācijas precizēšana, ierīkojot trīs urbumus pie autobusu pieturas, divus urbumus aiz grāvja no pieturas Z virzienā un divus urbumus zemes virsmas nivelēšanas laukumā (atklātā laukā aptuveni 25 m uz ZA no pieturas). Ģeoloģiskās izpētes gaitā konstatēti glaciofluviālie nogulumi 0,25 – 0,50 cm biezumā, zem kuriem iegul mālsmilts, tādējādi apstiprinot kamerālo pētījumus rezultātus. Ņemot vērā, ka monitoringa sensori šajā laikā vēl nebija pasūtīti, tika nolemts ierīkot nivelēšanas punktus, lai uzsāktu potenciālā sala pacēluma monitorēšanu pirms aukstās sezonas sākšanās.

Lai novērtētu ne tikai ceļa klātnes vertikālās kustības, bet arī apkārtējās teritorijas virsmas izmaiņas aukstajā sezonā, 2019. gada 9. novembrī ierīkoti kopumā 23 nivelēšanas punkti (3. att.). 18 no tiem ierīkoti atklātā laukā uz ZR no pieturas “Laugas”, divi punkti uz pieturas, viens pāris metrus no potenciālo monitoringa urbumu vietas un divi punkti pie asfalta seguma aptuveni 3 un 10 m ZA virzienā no Laugām. Decembra vidū jau izveidotajiem nivelēšanas monitoringa punktiem, pievienoti 22 punkti uz ceļa klātnes (3. att.), kurus izveidoja LiMAP, UAB, veicot lāzerskenēšanu.



3. attēls. Nivelēšanas monitoringa punktu izvietojums.

3. NIVELĒŠANAS PUNKTI PIEGUĻOŠAJĀ TERITORIJĀ

Nivelēšanas punkti ierīkoti, kā atbalstu izmantojot N1 klases Valsts ģeodēziskā tīkla punktu 1508a, kurš atrodas 560 m no autoceļa A2 58. km staba, ceļa labajā pusē, 20 m no ceļa ass. Punkta x, y koordinātas LKS-92 TM sistēmā ir attiecīgi 336546 un 558500, bet augstums (LAS-2000,5) pēc ģeometriskās nivelēšanas ir 124,206 m. Pieguļošā lauka teritorijā pēc mutiskas vienošanās ar zemes īpašnieku nevienmērīgā režģī zemes virskārtā iesprausti 18 gab. 15 cm gari plastmasas dībeļi (4.att.). Šāda tipa dībeļi izmantoti arī autoostai pieguļošajā teritorijā blakus asfalta klātnei. Ņemot vērā, ka lauku izmanto siena vākšanai un retumis ganībām, kā arī, lai izvairītos no pašu dībeļu ietekmes uz siltuma pānesi no atmosfēras uz dziļāku zemes kārtu, netika izmantoti metāla analogi. Asfalta klātnē monitoringa punktu izveidei izmantotas metāla nivelēšanas naglas. Nivelēšanas monitoringa punktu pamatinformācija apkopota 1. pielikumā.



4. attēls. Pieguļošajā laukā izmantotie plastmasas dībeļi monitoringa punktu atzīmēšanai.

Punktu ģeogrāfiskā piesaiste veikta ar EMLID Reach RS2 GNNS uztvērēju un nivelēšana ar Leica Sprinter 150M (5. att.). Faktiskā aprēķinātā kļūda, kas radusies GNNS piesaistes laikā ir ± 7 mm, savukārt katras pārnivelēšanas gaitā tā maksimāli variē līdz ± 2 mm. Pašlaik iegūtie dati liecina, ka monitoringa gaitā ir notikušas pakāpeniskas teritorijas virsmas variācijas, bet vērtības atrodas mērinstrumenta kļūdas robežās. Vienīgās būtiskās izmaiņas ir vērojamas tieši pieguļošajā laukā, kur pēc pēdējā nivelēšanas gājiena 20. martā, konstatēts, ka atsevišķi punkti ir pacēlušies, līdz pat 0,5 cm. Savukārt monitoringa punktus uz ceļa, izmaiņas, salīdzinot ar iepriekšējo nivelēšanas reizi, tikai pāris punktus sasniedz atšķirības, kas ir lielākas par 1 mm. Lielās izmaiņas laukā visticamāk saistītas ar to, ka vietējo māju bērni lauku izmanto kā mototrasu un ar kvadraciklu cenšas pēc iespējas tuvāk nobraukt monitoringa vietu apzīmējošiem kociņiem, kuriem blakus iesprausti dībeļi. Tādējādi nav izslēgts, ka novērotais

punktu pacēlums ir radies tieši no kvadraciklu riteņiem, kas ir nedaudz izspieduši grunti pie monitoringa punktiem.



5. attēls. Monitoringa punktu nivelēšana (attēls pa kreisi) un ģeogrāfiskā piesaiste ar reālā laika GNSS (pa labi).

Pašlaik vienīgās konstatētās problēmas saistāmas ar ceļa virsmā ievietotajām nivelēšanas naglām un diviem plastmasas dībeļiem netālu no autobusa pieturas. Pirmkārt, nivelēšana pie pašas brauktuves, saistībā ar intensīvu kravas auto kustību, ir diezgan laikietilpīga un bīstama. Tādējādi, lai arī metodika ir pietiekami precīza, to nebūtu ieteicams izmantot noslogotos ceļa posmos. Otrkārt, pēc pirmajām sniega tīrīšanām tika konstatēts, ka atzīmes stabi, kuri parāda plastmasas dībeļu novietojumu, ir izkustināti, tādējādi, visticamāk arī paši monitoringa punkti ir nedaudz izkustināti. Svarīgi piezīmēt, ka viena nivelēšanas nagla, kas bija novietota uz auto pieturas piebraucamā ceļa, pēc sniega tīrīšanas ir izrauta.

Ar nivelēšanas metodiku iespējams nomērīt ļoti nelielas zemes virsmas kustības, ņemot vērā to, ka mērīšanas kļūda variē ± 2 mm, vairumā gadījumu tā ir ± 1 mm. Nivelēšana būtībā ir precīzākā metodika, ja neskaita sauszemes LIDAR, ko ir iespējams izmantot sala pacēluma monitoringam. Praktiski visās valstīs, kur tiek veikti sala pacēluma mērījumi (skat. 10. nodaļu), dati tiek verificēti ar nivelēšanu. Tomēr šai metodikai būtisks trūkums ir bīstamība, mērot intensīvas satiksmes posmos, ja attiecīgais ceļa posms nav vismaz daļēji noslēgts. Jāpiezīmē, ka lielākās nivelēšanas kļūdas ir saistāmas tieši ar satiksmes intensitāti - garām braucošās kravas mašīnas ar vēja plūsmu sekmē mērlatas kustības.

4. EKSTENCIOMETRA IEKĀRTA

4.1. Ekstenciometra ievietošana

Monitoringa sensoru instalācija veikta 2019. gada 28. novembrī. Izvēlētajā vietā sākotnēji asfaltā tika izzāgēts laukums 1,2 m garumā un 40 cm platumā (6. att.), lai tiktu līdz ceļa uzbērumam un ar rokas urbi ierīkotu trīs urbumus līdz 2.55 m dziļumam sensoru ievietošanai (7. att.). Detalizēta shēma ar grunts temperatūras, mitruma un seguma virsmas pārvietojuma monitoringa iekārtu izvietošanu un dziļumu pievienota 2. pielikumā.



6. attēls. Asfalta kārtas demontāža un kabeļu novada izveide.



7. attēls. Ceļa uzbērumā izveidotais urbums (pa labi) un rokas urbis (pa kreisi).

Lai veiktu tiešus sala pacēluma mērījumus izvēlētajā monitoringa punktā, tika izmantota ekstenciometra iekārta *EXLINE-1100* (R.S.T. INSTRUMENTS Ltd., Kanāda). Pirms ekstenciometra ievietošanas monitoringa urbumā tika veiktas vairākas pārbaudes laboratoriskos apstākļos, lai pārlicinātos vai iekārta darbojas un vai tā sniedz patiesus mērījumus. Pirmajā etapā veiktas iekārtas grunts enkura iestiprināšanas procesa simulācijas. Grunts enkurs tika vairākkārtīgi atbrīvots un atkal salikts, lai enkura ievietošanas laikā lauka apstākļos nerastos kļūdas, kuru dēļ iekārta tiktu nostiprināta neprecīzā dziļumā vai neatgriezeniski sabojāta.

Otrajā etapā iekārta laboratorijas apstākļos tika salikta un ieslēgta darba režīmā. Tika pārbaudīts, vai ir iespējams veiksmīgi pieslēgties iekārtai un veikt nolasījumus, kā arī, vai patiesais izstiepums atbilst tam, ko iekārta reģistrē. Izmantojot kalibrētu metāla lineālu, ekstenciometra mērījumu stienis tika gan izstiepts, gan saīsināts. Abos gadījumos tika konstatēts, ka iekārtas sniegtās vērtības atbilst patiesajam pārvietojumam.

Pēc laboratorisko testu veikšanas iekārta tika sagatavota ievietošanai monitoringa urbumā. Monitoringa urbuma sienas virsējā daļā (167 cm) tika nostiprinātas ar PVC cauruli (8. att.), lai samazinātu iespējamību, ka urbums aizbruks. Urbuma aizbrukšana varēja radīt ekstenciometra darbības traucējumus.



8.attēls. Urbuma nostiprinātā daļa ar PVC cauruli (pa kreisi) un ekstenciometra enkurs (pa labi).

Ekstenciometra enkurs (8. att.) uzstādīšanas gaitā nostiprināts 2 m dziļumā (2. pielikums – šurfa griezum), kas faktiski ir maksimālais iespējamais dziļums, kādā enkuru ir iespējams nostiprināt. Veicot iestiprināšanu, iekārta tika iestatīta stāvoklī, kas ļauj veikt vertikālu grunts virskārtas kustību mērījumus ar amplitūdu līdz 10 cm, tādējādi ir iespējams nomērīt 7 cm sala pacēlumu, kā arī 3 cm ceļa virskārtas pazemināšanos no ievietošanas līmeņa. Ekstenciometra stiprinājuma plāksne (9. att.) atrodas 28 cm dziļumā zem asfalta. Tādējādi tiek mērīta grunts pacelšanās intervālā no 28 cm līdz 200 cm dziļumam.



9. attēls. Ekstenciometra stiprinājuma plāksne.

Ņemot vērā pieredzi, kas iegūta, veicot laboratorijas testus, kā arī uzstādīšanu lauka apstākļos, jāsecina, ka iekārta ir salīdzinoši vienkārši uzstādāma. Lielākās problēmas ir saistītas ar precīzu dziļuma izvēli, kurā enkurs tiek nofiksēts. Iespējamās problēmas var radīt pārsedzošās aukstā asfalta kārtas blīvēšana, jo šī procesa gaitā ir iespējama ekstenciometra virsējās plāksnes iespiešana lielākā dziļumā, kas savukārt izmaina sākotnējo iekārtas dziļuma novietojumu. Lielākais risks saistāms ar nejaušu iekārtas enkura aktivizēšanu neatbilstošā dziļumā, jo šādā gadījumā ir jāizveido šurfs, lai iekārtu varētu izņemt no grunts un uzstādīt atkārtoti.

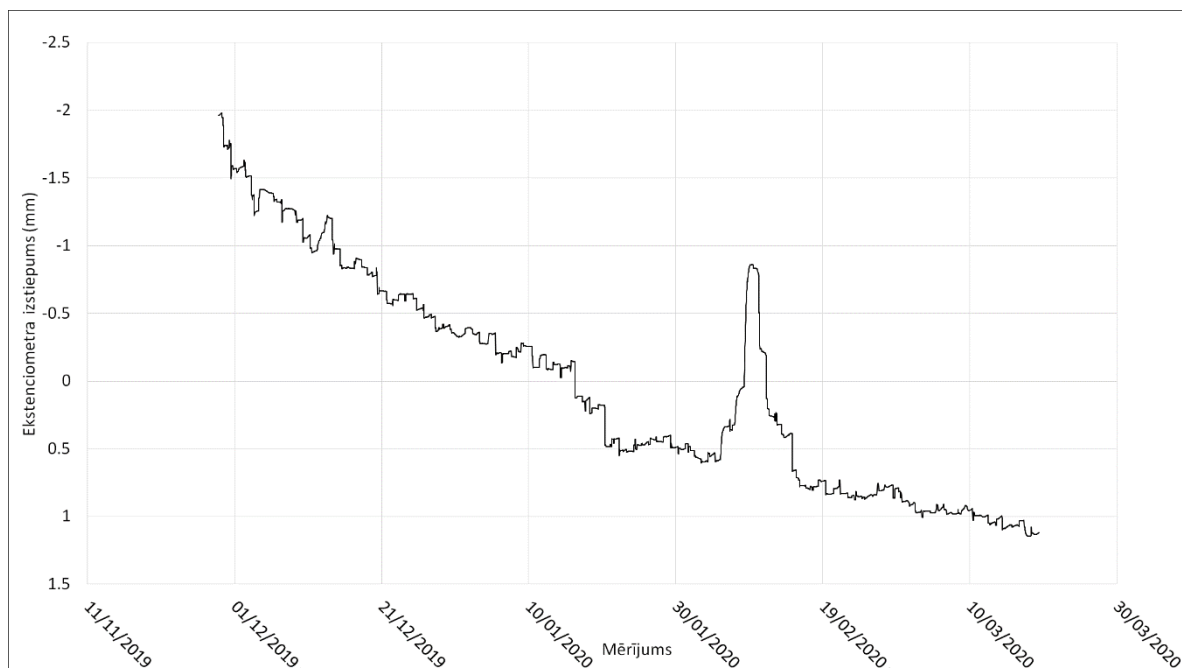
4.2. Ar ekstenciometru iegūtie mērījumi

Mērījumi ar ekstenciometru tika uzsākti 2019. gada 28. novembrī. Līdz 2020. gada 19. martam mērījumi tika veikti ik pēc 30 minūtēm. Šāds intervāls tika izvēlēts, lai varētu identificēt iespējamu autotransporta ietekmi uz mērījumu iekārtu. Iekārtas sākotnēji noteiktā vērtība ir -2 mm, nevis 0 (10. att.). Tas saistāms ar to, ka uzstādīšanas procesā nav iespējams nodrošināt netraucētu mēriekārtas ievietošanu gruntī. Minētā nobīde neradīs problēmas tālākai datu interpretācijai, jo iegūtās vērtības tiks apskatītas relatīvi.

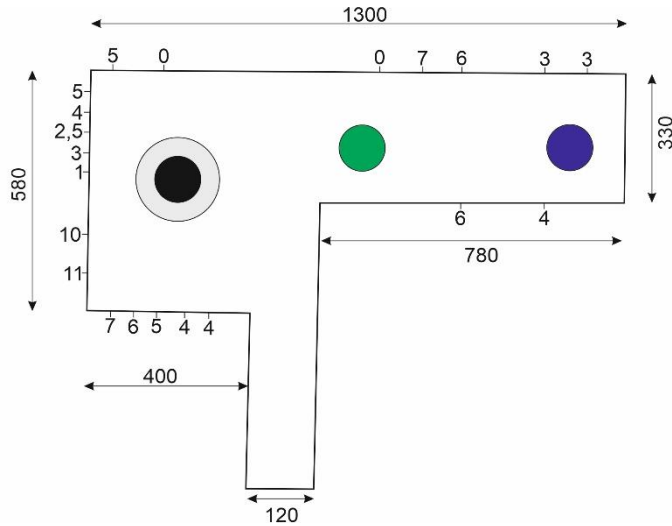
Iegūtie mērījumi (10. att.) norāda uz nelielu (3 mm) grunts sēšanos novērojuma punktā. Sēšanās saistāma ar virs un ap mērījumu punkta izveidotās smilts, grants un asfalta kārtas noblīvēšanos (11.att.), skaidri redzams, ka virs ekstenciometra urbuma vietas sēšanās ir notikusi dažu mm robežās. Tādējādi droši var secināt, ka ekstenciometrs strādā ļoti labi un spēj fiksēt pat nelielas vertikālās izmaiņas. Ņemot vērā 10. attēlā redzamās līknes raksturu, paredzams, ka sēšanās drīzumā (līdz šim iegūtie dati neļauj izdarīt precīzas prognozes) varētu beigties.

Iespējams, ka līdz šim novērotās izmaiņas varētu būt daļēji saistāmas ne tikai ar virskārtas sēšanos, bet arī ar grunts enkura “nostiprināšanos” ievietošanas vietā.

Līdz šim grunts ir atdzisusi līdz sasalšanas temperatūrai tikai vienu reizi novērojumu periodā (08.02.2020.-10.02.2020.). Ap šo laika intervālu ekstenciometra mērījumi norāda uz grunts pacelšanos līdz pat 1,5 mm (12. attēls). Grunts pacelšanās sākās, kad temperatūra grunts virskārtā vēl bija virs nulle grādiem. Tas varētu būt skaidrojams ar nelielām temperatūras atšķirībām abos urbumos. Urbums, kurā tika ievietots ekstenciometrs netika aizbērts, kas, iespējams, veicināja grunts virskārtas sasalšanu. Tiklīdz temperatūras rādījumi pie seklākā sensora sāk palielināties, ekstenciometrs norāda uz grunts virskārtas sēšanos (12. att.). Jāpiezīmē, ka izpētes periodā nav konstatētas negatīvas grunts temperatūras vērtības.

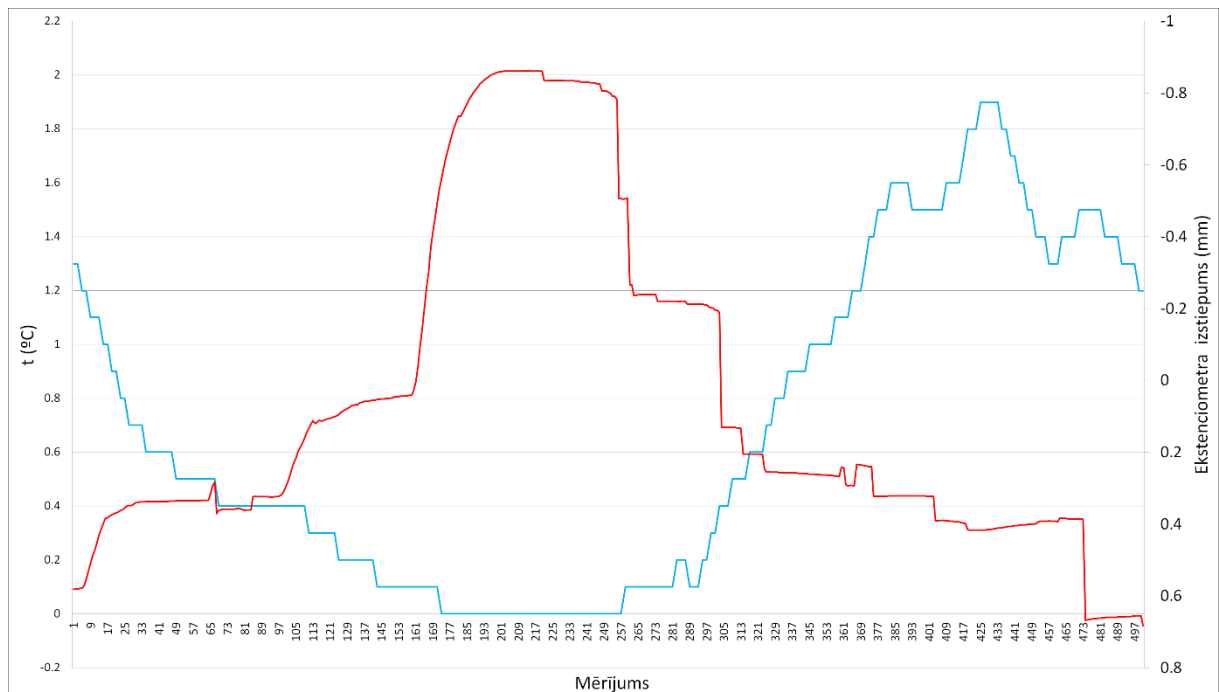


10. attēls. Ekstenciometra mērījumi laika posmam no 28.11.2019. līdz 19.03.2020. Grafikā negatīvas izstiepuma vērtības norāda uz grunts virskārtas pacelšanos.



11. attēls. Monitoringa urbumu izvietojuma shēma (pa labi) un sēšanās pazīmes izpētes vietā 25. martā (pa labi). Attēlā pa kreisi mērvienības norādītas mm un cipari pie laukuma norāda nomērīto aukstā asfalta sēšanos, salīdzinot ar pārējo asfaltēto daļu. *Apzīmējumi:* zilais aplis – termistoru kabeļa urbums; zaļais aplis – temperatūras un mitruma sensoru urbums; melnais aplis – ekstenciometra urbums; pelēkais aplis - ekstenciometra stiprinājuma plāksne.

Pēc novērotā sala pacēluma izzušanas ekstenciometra mērījumi norāda uz grunts virskārtas lēnu sēšanos, kas uzskatāma par procesa, kas tika novērots līdz sasalšanas periodam, turpinājumu. Īslaicīgais sala pacēlums nav izmainījis grunts sēšanās raksturu.



12. attēls. Ekstenciometra mērījumi (sarkanā līnija) kā arī temperatūra 40 cm dziļumā (zilā līnija) laika posmam no 05.02.2020. līdz 15.02.2020. Grafikā negatīvas izstiepuma vērtības norāda uz grunts virskārtas pacelšanos.

Līdz šim veiktie novērojumi liecina par to, ka ekstenciometra darbībā nav novēroti darbības traucējumi, turklāt iegūtie mērījumi pārlicinoši norāda, ka ir iespējams konstatēt pat nelielas izmaiņas, kuras tieši korelējas ar grunts temperatūras izmaiņām. Lai arī ir notikusi ekstenciometra kopējā sēšanās par 3 mm, tomēr jāņem vērā, ka tā ilgusi diezgan ilgā laika posmā no 28.11.2019. līdz 19.03.2020. Izvēlētā metodika, atstājot 3 cm rezervi virskārtas sēšanās gadījumā, sevi ir attaisnojusi, jo bez kopējās 3 mm sēšanās, jau pašā sākumā ir notikusi 2 mm sēšanās, ievietojot iekārtu un nostiprinot grunts enkuru. Novērojumi liecina, ka asfalta blīvēšana nav radījusi ietekmi uz ekstenciometra darbību. 2020. gada 22. maijā monitoringa urbumu vieta tika izolēta ar bitumenu un sīkšķembām, iestrādājot divās kārtās un pārberot ar smilti (13. att.).

Turpmākās rekomendācijas, uzstādot ekstenciometru, ir veikt virsējās kārtas noseģšanu ar karsto asfaltu, jo pašlaik aukstais asfalts ar paguļošo smilti ir nosēdies no 1 līdz 10 mm (11.att.). Ja tiks atrasts veiksmīgs risinājums attālinātai datu nolasīšanai, ieteicams būtu veikt monitoringa stacijas apsekošanu reizi dažos mēnešos, lai būtu iespējams novērtēt jaunuzklātā asfalta sēšanos un tās kopējo ietekmi uz datu kopu. Sīkāk par ekstenciometra un pārējo sensoru tehniskajiem parametriem, kā arī nākamā posma optimālāko iekārtu un sensoru komplektāciju un potenciālajām iespējām integrācijai ar esošajām ceļu meteostacijām skatīt 4. pielikumā.



13. attēls. Monitoringa vieta tūlīt pēc izolācijas (augšējais att.), un 1 mēnesi pēc izolācijas (apakšējais att.).

5. TERMISTORU KABELIS

5.1. Termistoru kabeļa ievietošana

Termistoru kabelis uzstādīts 2,4 m dziļā malējā urbumā (14. att.), lai varētu verificēt iegūtos datus ar centrālajā urbumā ievietotajiem temperatūras un mitruma mērītājiem. Faktiskās temperatūras mērījumi notiek no 40 līdz 233 cm dziļumam ik pēc 12,5 cm, kopumā kabelī ir 16 mērītāji (2. pielikums – šurfa griezumš). Ņemot vērā to, ka termistoru kabelis ir lokans, lai to noturētu taisnā līmenī, pie tā pamatnes tika piestiprināts 400 g smags atsvars (14.att.), kas ļāva kabeli ievietot pilnīgi taisnā līmenī, kā arī piespiest pie urbuma malas (15.att.).



14. attēls. Termistoru kabeļa ievietošana urbumā (pa labi) un kabeļa galā pieliktais atsvars.

Pēc kabeļa ievietošanas, urbums tika aizpildīts ar frakcionētu smilti (15. att.), tādējādi urbums tika pilnībā aizpildīts un termistoru kabelis nostiprināts, nepieļaujot tā vertikālās kustības. Pašlaik vienīgais joprojām neatbildētais jautājums ir par frakcionētās smilts aizpildījuma ietekmi uz faktiskajiem temperatūras rādījumiem. Visticamāk ietekme ir neliela, ņemot vērā to, ka kabelis tika piespiests pie urbuma sienas un tikai tad aizpildīts.

Vienīgais risinājums datu verificēšanai ir eksperimentālie pētījumi horizontālā tranšējā. Eksperimenta gaitā būtu jāizveido divas paralēlas tranšejas līdz 60 cm dziļumam. Pirmās tranšejas pamatnē ievietotu termistoru kabeli un apbērtu ar 10 cm biezu frakcionēto smilti, kuru pārklātu ar dabisko izrakto materiālu. Savukārt otrā tranšējā neizmantojot frakcionēto smilti un termistoru kabeli nosegtu ar dabisko izrakto materiālu. Pagaidām netiek saskatīta nepieciešamība pēc šāda teorētiskā eksperimenta, jo diez vai materiālais ieguldījums, būs tā vērts, lai noskaidrotu minimālu temperatūras nobīdi starp abām tranšējām. Jāņem arī vērā, ka vertikālā urbumā šāda tipa eksperimentu praktiski nav iespējams veikt.

Pirms faktisko monitoringa urbumu izveidošanas, sākotnēji tika plānots urbumu aizpildīt ar dabisko izurbto materiālu. Tomēr, veicot eksperimentālu temperatūras un mitruma sensoru ievietošanu (6. nodaļa), tika nonākts pie secinājuma, ka ar dabisku mālainu grunti bez

papildu blietēšanas nav iespējams vienmērīgi aizpildīt urbumu. Papildu blietēšana eksperimenta gaitā netika izmantota, jo pastāvēja pārāk augsta varbūtība sabojāt kabeli vai kādu no sensoriem. Savukārt, aizpildot urbumu ar dabisko materiālu bez blietēšanas, veidojas kavernas, kurās var uzkrāties papildu ūdens un veidoties apstākļi, kas nav raksturīgi apkārtesošajam grunts masīvam.

Pašlaik vienīgais teorētiskais risinājums, lai varētu izmantot no urbuma iegūto mālaino materiālu tā aizpildīšanai, ir izmainīt mālainās grunts konsistenci no sīkstas-cietas uz ļoti mīkstu. Šādas konsistences grunts dabiski aizpildītu visus tukšumus un pašsvara rezultātā noblietētos, tomēr jāņem vērā, ka slāņotā grunts masīvā, lai konkrētos urbumu intervālus aizpildītu ar atbilstošu materiālu, ar sekojošo aizpildīšanas metodiku, būtu laukietilpīgi, bet ne neiespējami realizēt.



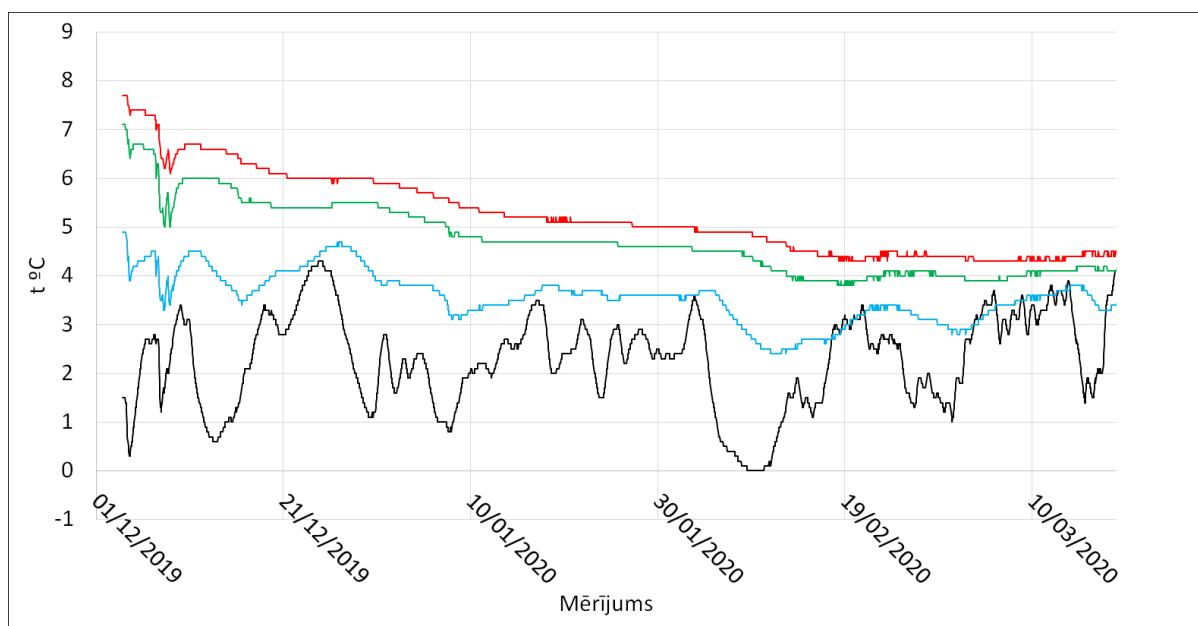
15. attēls. Termistoru kabeļa augšējais sensors atrodas 0,38 cm no asfalta virsmas (pa kreisi augšējais att.). Urbuma aizbēršana ar frakcionētu smilti (pa kreisi apakšējais att.). Aizbērts urbums un nostiprinātais kabelis.

Galvenais ierobežojošais faktors ir laiks, līdz grunts izmaina konsistenci no ļoti mīkstas līdz mīkstai-sīkstai, lai varētu turpināt aizpildīšanu. Ja aizpildīšanu turpinātu ar nākamā slāņa materiālu, nenogaidot konsistences izmaiņas paguļošajā slānī, veidotos labvēlīgi apstākļi nogulumu inversijai, jeb jaunuzbērtā grunts ieplūstu zemāk esošajā. Tādējādi aizpildošais

materiāls nebūtu tāds pats kā aptverošie nogulumi. Jāņem vērā, ka, mainoties konsistencei, mainās ūdens saturs, kas tieši ietekmē tilpuma izmaiņas, kas nozīmē, ka monitoringa urbumus ar asfaltu varēs pārklāt ātrākais tikai pēc dažām dienām. Ja asfalts tiktu uzklāts pārāk ātri un urbumu aizpildošais materiāls turpinātu samazināt tilpumu, visticamāk ceļa virsmā vai nu veidotos iesēdums, vai arī tukšums starp asfaltu un urbuma augšgalu.

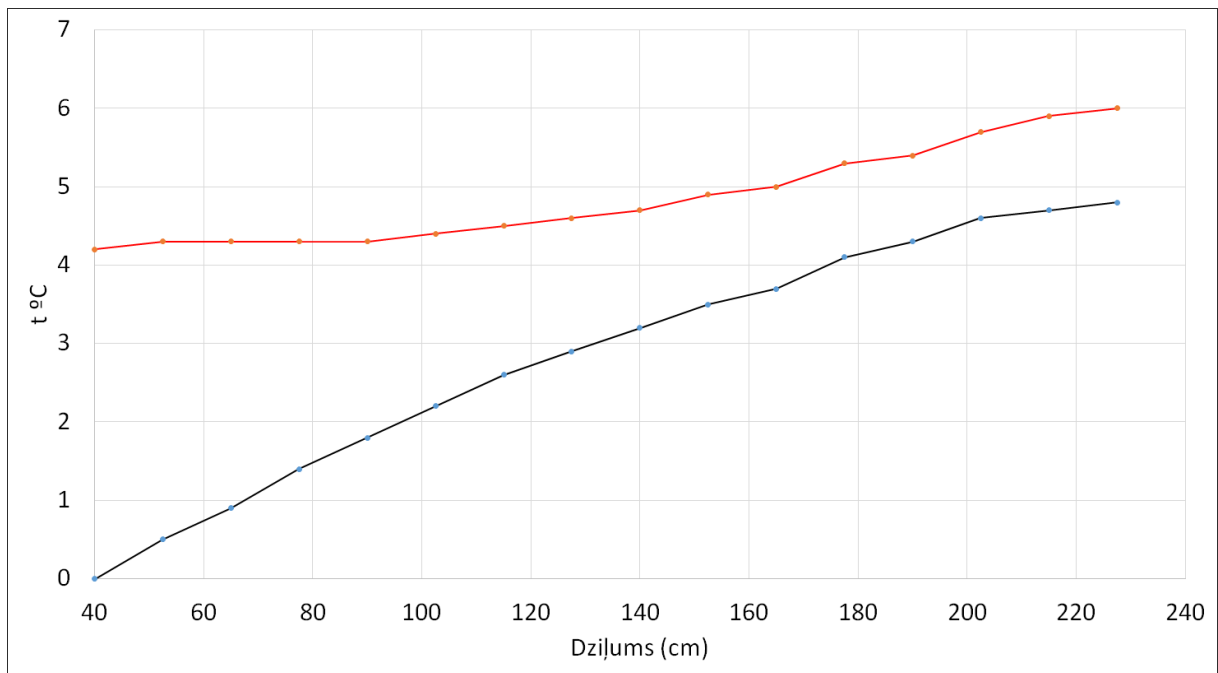
5.2. Iegūtie dati no termistoru kabeļa mērījumiem

Mērījumi ar termistora kabeli tika uzsākti 28.11.2019. Laika posmā no 28.11.2019. līdz 05.12.2019. mērījumi (16.att.) veikti ik pēc 2 minūtēm. Ņemot vērā to, ka tika konstatēts, ka temperatūras izmaiņas iespējams detalizēti fiksēt, veicot mērījumus reizi stundā, tika pieņemts lēmums turpmāk mērījumus veikt vienu reizi stundā. Turklāt jāņem vērā, ka datu uzkrājumam ir diezgan ierobežots datu apjoms, ko tas var saglabāt, kas arī ir vienīgais būtiskais konstatētais termistoru kabeļa trūkums.



16. attēls. Termistora kabeļa mērījumi laika posmam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020. Sarkanā līnija atbilst 227,5 cm dziļumam. Zaļā līnija atbilst 177,5 cm dziļumam. Zilā līnija atbilst 115 cm dziļumam. Melnā līnija atbilst 40 cm dziļumam.

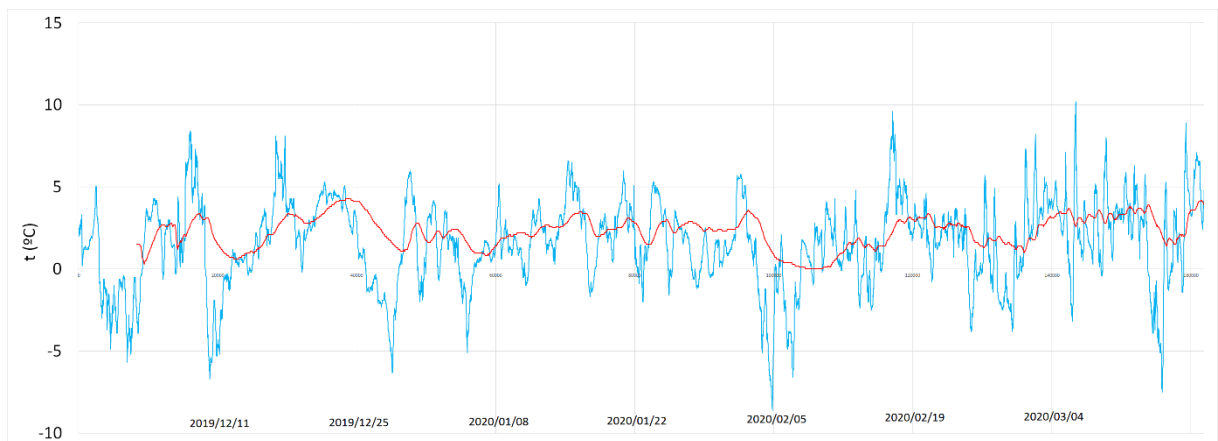
Iegūtie mērījumi liecina par temperatūras svārstību amplitūdas samazināšanos, palielinoties dziļumam (16. att.), kas arī tika sagaidīts. Grunts dziļākajos slāņos temperatūra pakāpeniski krītas, kas saistāms ar vidējās gaisa temperatūras samazināšanos ilgākā laika periodā. Tāpat novērojams, ka īslaicīga temperatūras palielināšanās grunts virskārtā neietekmē temperatūras izmaiņu tendenci lielākā dziļumā.



17. attēls. Termistora kabeļa mērījumi. Melnā līnija 10.02.2020. (fiksēta zemākā temperatūra grunts virskārtā). Sarkanā līnija 25.12.2019. (fiksēta augstākā temperatūra grunts virskārtā).

Apskatot temperatūras profilu (skat. 17. att.), redzams, ka temperatūra, palielinoties dziļumam, palielinās pakāpeniski. Turklāt iegūtie mērījumi liecina par to, ka temperatūru lielākā dziļumā ietekmē tikai ilglaicīgas temperatūras izmaiņas. Temperatūras svārstības, kas ir straujākas par dažām nedēļām, kopumā temperatūru dziļumā, kas lielāks par 2 m, neietekmē.

Salīdzinot temperatūras mērījumus gruntī ar gaisa temperatūras mērījumiem monitoringa stacijā LV02, redzams, ka, pazeminoties gaisa temperatūrai, ar nelielu nobīdi, samazinās arī grunts temperatūra (18. att.).

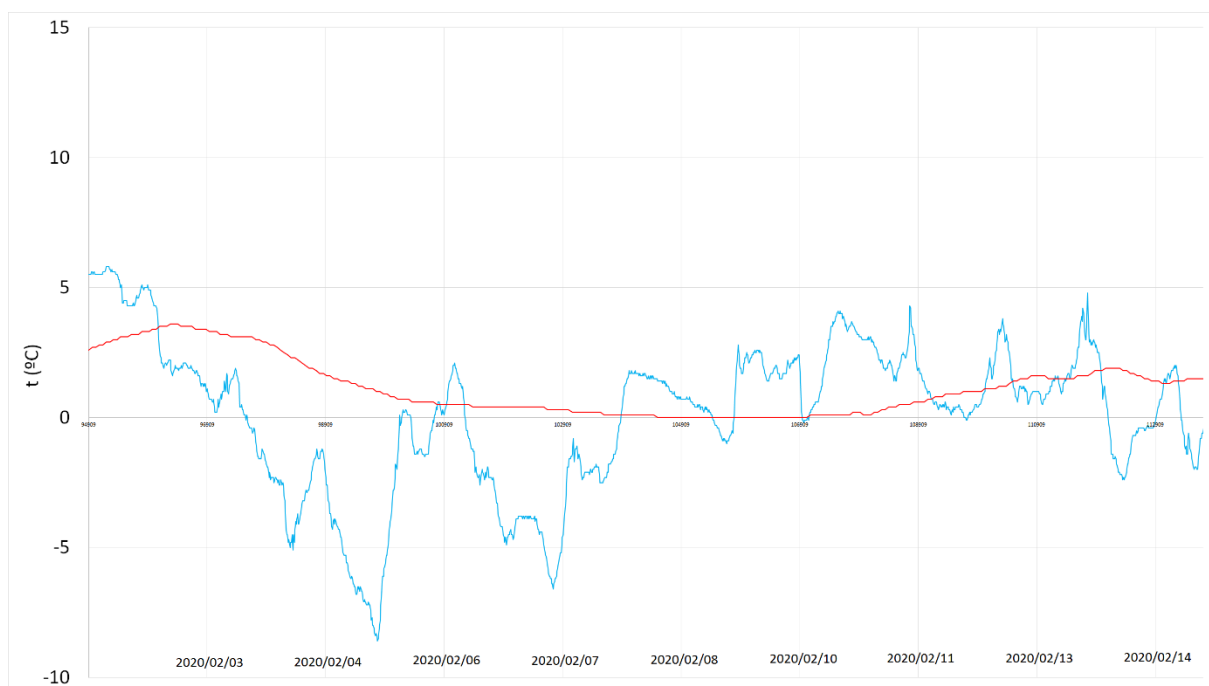


18. attēls. Gaisa temperatūras un grunts temperatūras salīdzinājums periodam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020. Ar zilu līniju attēlota gaisa temperatūra, kas noteikta LVC monitoringa stacijā LV02. Ar sarkanu līniju attēlota temperatūra 40 cm dziļumā.

Nobīde saistāma ar to, ka pirmais sensors atrodas 40 cm dziļumā un aukstuma vilnis līdz šim dziļumam nenonāk momentāni. Laika nobīde starp minimālo gaisa temperatūru un minimālo grunts temperatūru novērojumu periodā ir aptuveni 30 h līdz 100 h. Atzīmējams, ka

aiztures laiks atkarīgs no grunts tā brīža temperatūras, kā arī no tā, par cik grādiem relatīvi ir pazeminājusies gaisa temperatūra (18. att.).

Apskatot laika posmu, kurā novērots arī sala pacēlums, redzams, ka gaisa temperatūras pazemināšanās līdz aptuveni -10°C dažās dienās (19. att.), ir pietiekama, lai uzsāktos grunts sala pacēlums. Turklāt novērojumi liecina par to, ka šāda aukstuma periods var nebūt nepārtraukts. Novērotais sala pacēlums izveidojies periodā, kad gaisa temperatūra divas reizes nokritusies zemāk par -5°C , bet starp šīm epizodēm pat īslaicīgi ir novērota pozitīva gaisa temperatūra (19. att.). Kopējais dominējoši negatīvās gaisa temperatūras periods, kas izraisīja grunts temperatūras pazemināšanos līdz 0°C , bija nedaudz ilgāks par 4 diennaktīm.



19. attēls. Gaisa temperatūras un grunts temperatūras salīdzinājums periodam no 01.02.2020. līdz 15.02.2020. Ar zilu līniju attēlota gaisa temperatūra, kas noteikta LVC monitoringa stacijā LV02. Ar sarkanu līniju attēlota temperatūra 40 cm dziļumā.

Sala pacēluma izveidošanās galvenokārt ir atkarīga no aukstuma perioda ilguma un grunts sākotnējās temperatūras. Piemēram, mērījumu perioda beigu posmā tika novērota krasa gaisa temperatūras pazemināšanās, taču grunts sākotnējā temperatūra bija pārāk augsta, kā arī gaisa temperatūras pazemināšanās bija pārāk īslaicīga, lai notiktu grunts sasalšana līdz 40 cm dziļumam.

Novērojumu periodā netika novēroti termistoru kabeļa darbības traucējumi vai neizskaidrojamas temperatūras svārstības. Var secināt, ka iegūtie dati labi korelējas ar meteoroloģiskās stacijas gaisa temperatūras un ekstenciometra mērījumiem. Vienīgais trūkums termistoru kabelim, salīdzinot ar temperatūras un mitruma sensoriem, ir datu manuālā nolasīšana, tādējādi faktiskie novērojumi nav tiešsaistē skatāmi.

6. KOMBINĒTIE MITRUMA UN TEMPERATŪRAS UN SENSORI

6.1. Sensoru ievietošana

Vidējā monitoringa urbumā tika ievietoti arī kombinētie mitruma un temperatūras sensori (2. pielikums – šurfu griezumus). Pirms sensoru ievietošanas monitoringa urbumā, to ievietošana grunts masīvā tika izmēģināta lauka apstākļos. Sākotnēji sensori tika iesprausti morēnas smilšmālā, kas atsedzas Mašēnu karjera sienā. Tas tika veikts, lai pārliecinātos, vai sensorus iespējams iespraust salīdzinoši blīvā gruntī, tos nedeformējot. Eksperimenta laikā konstatēts, ka, gadījumā, ja ievietošanas vietā atrodas olis, pastāv augsta varbūtība ievietot sensoru nekvalitatīvi vai pat saliekt vienu no adatām.

Otrajā testēšanas kārtā tika izmēģināta iekārta, kas paredzēta sensoru ievietošanai urbumā. Aptuveni 20 m attālumā no plānotās monitoringa urbuma vietas tika ierīkots urbums, kurā ar specializētu iekārtu (20. att.) sensors tika iesprausts urbuma sienā. Pēc tam tika izrakts šurfs, lai atgūtu sensoru, kā arī iegūtu grunts paraugus (20. att.) laboratoriskajiem pētījumiem. Testa laikā tika konstatēts, ka specializētā iekārta ir piemērota sensoru ievietošanai morēnas nogulumos.



20. attēls. Sensoru ievietošanas iekārtas izmēģinājumi (pa kreisi) un grunts paraugu ņemšana laboratoriskajiem pētījumiem.

Iegūtie morēnas paraugi tika izmantoti sensoru kalibrācijas līkņu aprēķināšanai. Iegūtais paraugs tika kvartēts un piesātināts ar ūdeni. Piesātinājuma pakāpe variēja no 0% līdz 28% mitruma no kopējas parauga masas. Paraugi tika pārvietoti 8 plastmasas paraugtraukos, un tika nolasīts mitruma daudzums no ievietotā sensora. Lai noteiktu parauga faktisko mitrumu, neliels parauga daudzums, pēc temperatūras mērījumu veikšanas, tika pārvietots metāla žāvētraukā un

izžāvēts 105°C. Faktiskais mitrums tika salīdzināts ar nolasīto sensoru vērtību, un tika sastādīts kalibrācijas vienādojums.

Izveidotajā monitoringa urbumā ar diametru 110 mm kopumā tika ievietoti 10 sensori (2. pielikums – šurfu griezums). Deviņi sensori tika uzstādīti dziļuma intervālā no 2 līdz 1,3 m, pēdējais sensors ievietots 0,9 m dziļumā no asfalta virsmas. Uzsākot sensoru ievietošanu (21. att.), tika konstatēts, ka vienā urbumā ievietot vairāk par 5 sensoriem ir sarežģīti.



21. attēls. Sensors ielikts sensoru ievietošanas iekārtā (pa kreisi augšējais attēls). Sensora ievietošana precīzā dziļumā (pa kreisi apakšējais attēls). Vadu sakārtošana pirms nākamā sensora uzstādīšanas (pa labi).

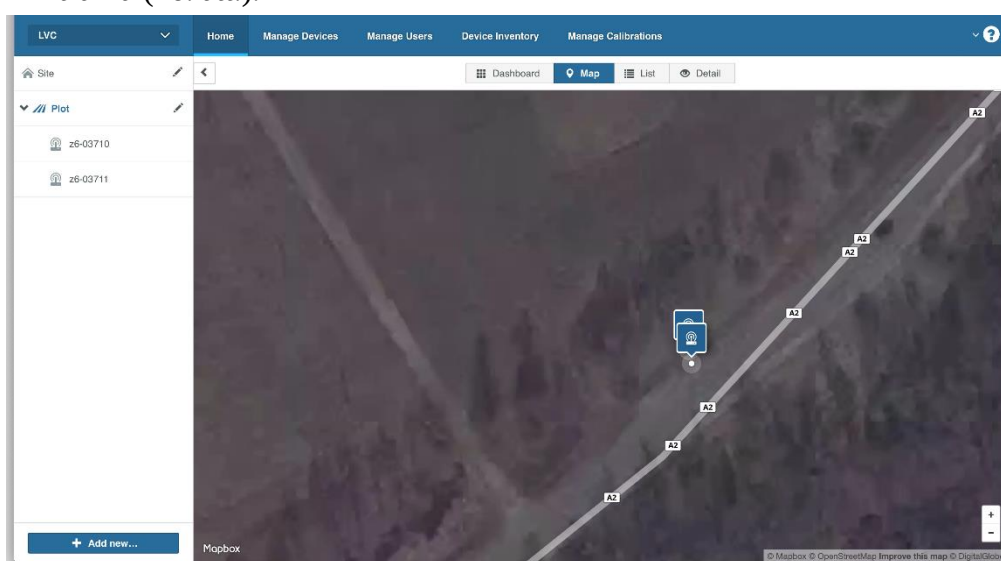
Lielākās problēmas rada vadi, kas savieno sensoru ar datu uzkrājēju (21. att.). Minētie vadi būtiski traucē jaunu sensoru ievietošanu, jo, ievietojot jaunu sensoru, pastāv risks pārdurt vadu, kas savieno kādu no jau ievietotajiem sensoriem ar datu uzkrājēju. Sensoru ievietošanas laikā viens no sensoriem šādā veidā tika sabojāts. Sensoru ievietošanas laikā kāds no jau ievietotajiem sensoriem bieži tika izrauts, jo ar ievietošanai paredzēto iekārtu tika aizķerts tā savienojuma vads. Izrauto sensoru atkārtota ievietošana bija vēl problemātiskāka, nekā to pirmreizējā iespraušana, jo sensors bija jāievieto dziļāk par jau ievietotu sensoru.

Lai sensoru pēc uzstādīšanas būtu vieglāk atbrīvot no uzstādīšanas iekārtas, tā tika smērēta ar vazelīnu, kas faktisko problēmu atrisināja tikai daļēji. Būtiskas problēmas sagādāja nogulumu blīvums dziļuma intervālā no 1,3 līdz 0,4 m no asfalta virsmas. Iepriekšminētajā

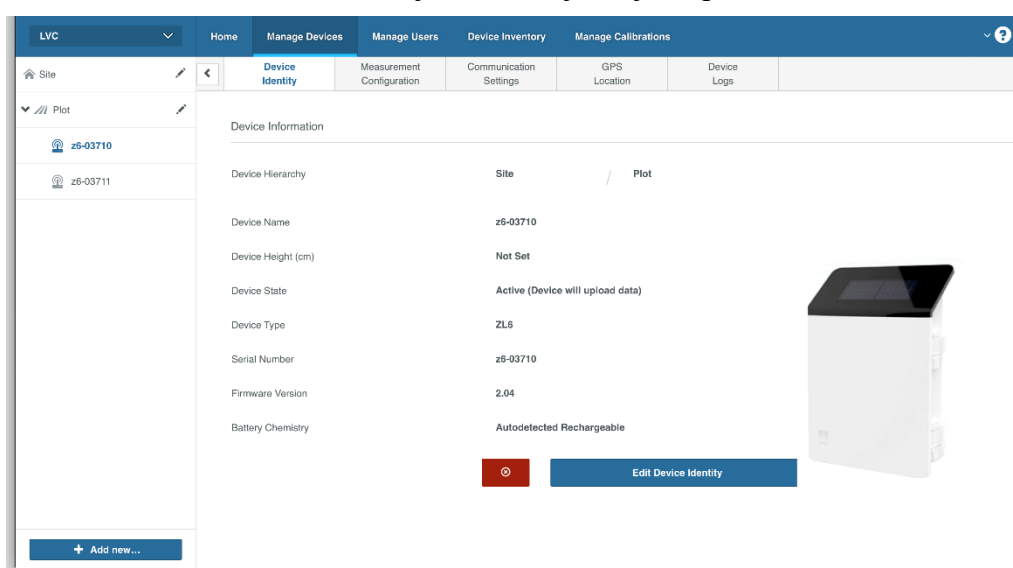
dziļumā izdevās ievietot tikai vienu sensoru saistībā ar to, ka nogulumu bija pārāk irdeni un sensori tajos nevarēja noturēties.

Lai atrisinātu vadu jautājumu, būtu nepieciešams lielāka diametra urbums, tomēr jāņem vērā, ka šādā gadījumā sensoru ievietošanas iekārta būtu neizmantojama, jo tā nav paredzēta lielākiem urbumiem par 110 mm. Teorētiski vienīgais risinājums būtu sensoru rindu izvietot divos urbumos.

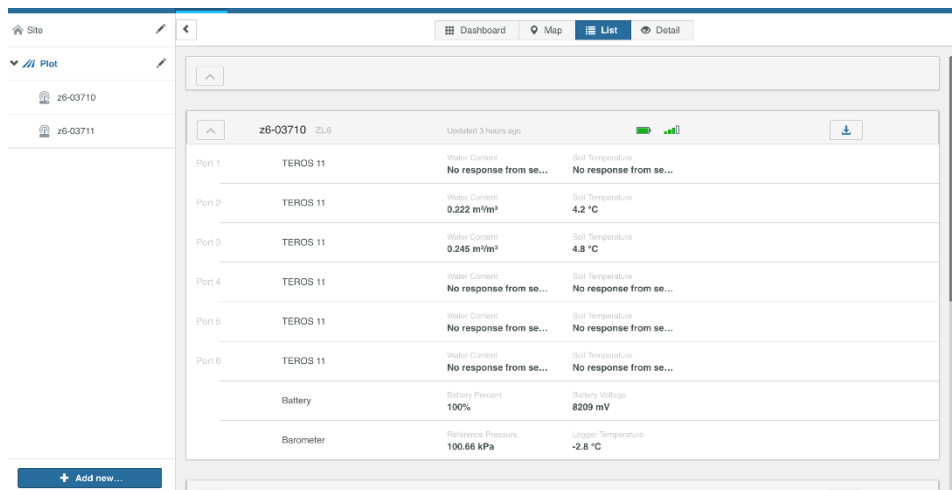
Pašlaik būtiskākā priekšrocība izvietotajiem sensoriem ir ražotāja izstrādātā attālinātā datu nolasīšanas iespēja, kas plašāka monitoringa tīkla ietvaros, ļauj viegli apskatīt interesējošo monitoringa vietu (22. att.), attālināti konfigurēt katru datu nolasītāju (23. att.), apskatīties faktisko baterijas un sensoru stāvokli (24. att.), kā arī redzēt faktisko grunts temperatūru (25. att.) un mitrumu (26. att.).



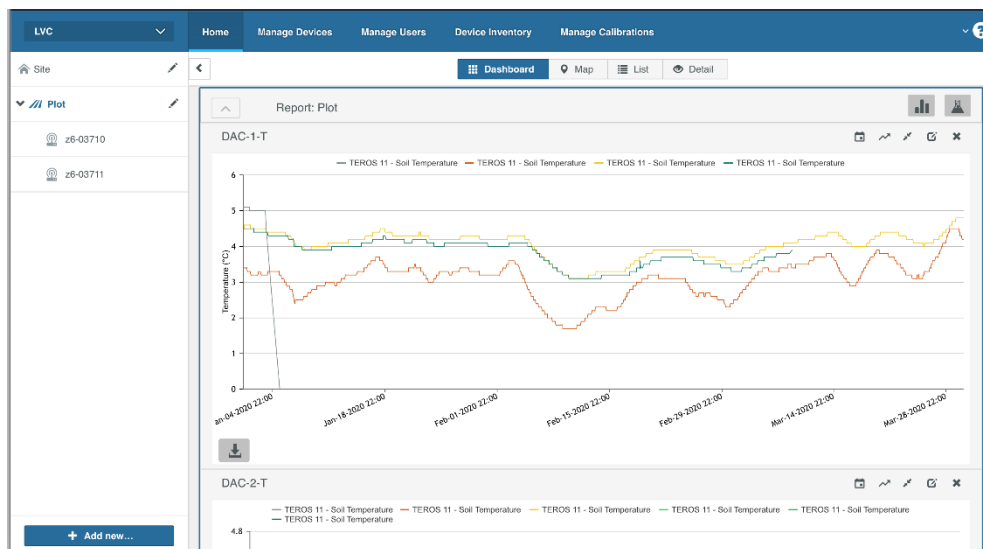
22. attēls. Temperatūras-mitruma sensoru datu nolasīšanas stacijas faktiskais novietojuma attēlojums ražotāja mājas lapā.



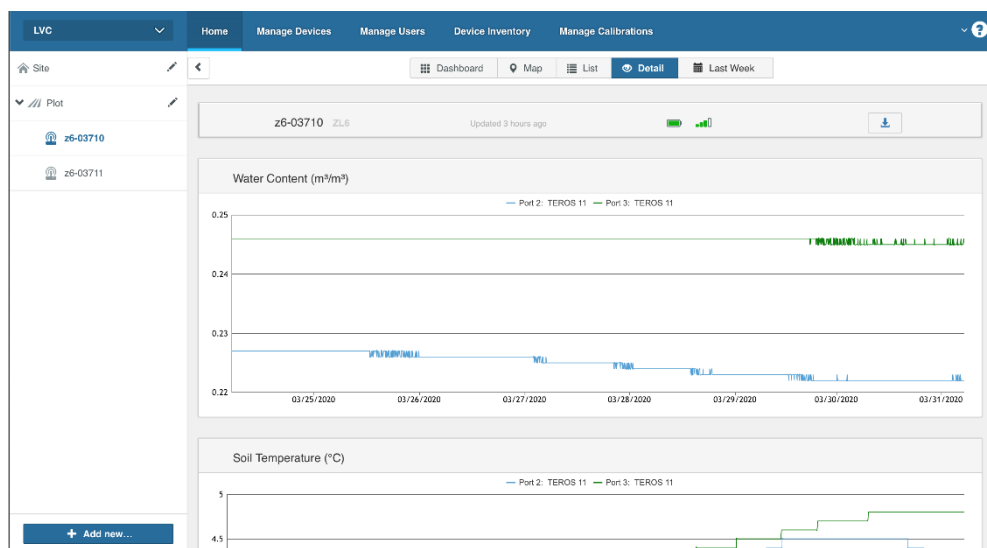
23. attēls. Datu uzkrājēja attālinātās konfigurācijas iespējas.



24. attēls. Informācija par datu uzkrājēja baterijas, pārraides signāla un sensoru stāvokli.



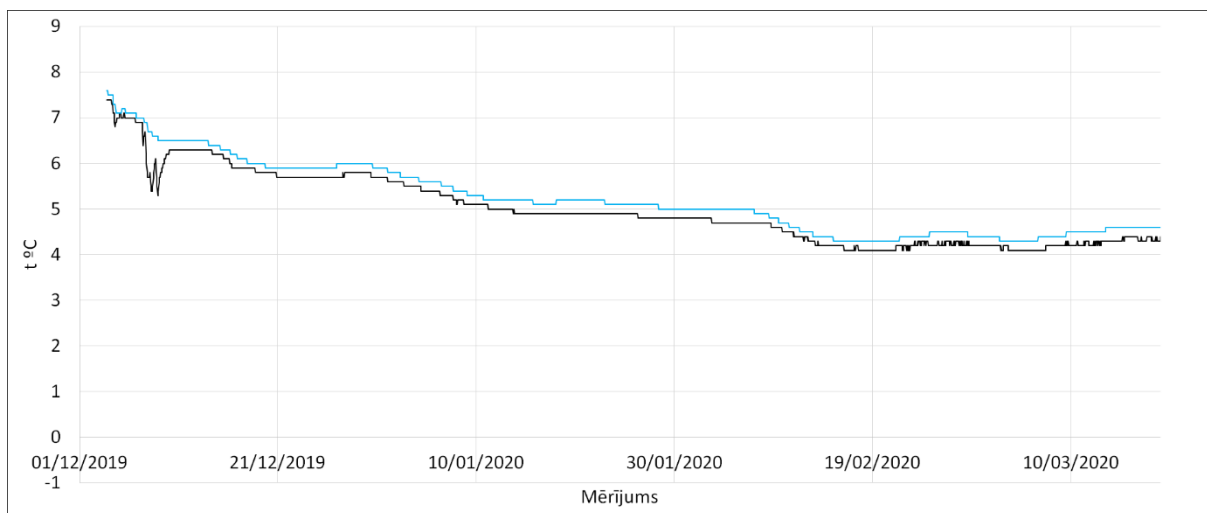
25. attēls. Faktisko temperatūras līkņu attēlojums tiešsaistē.



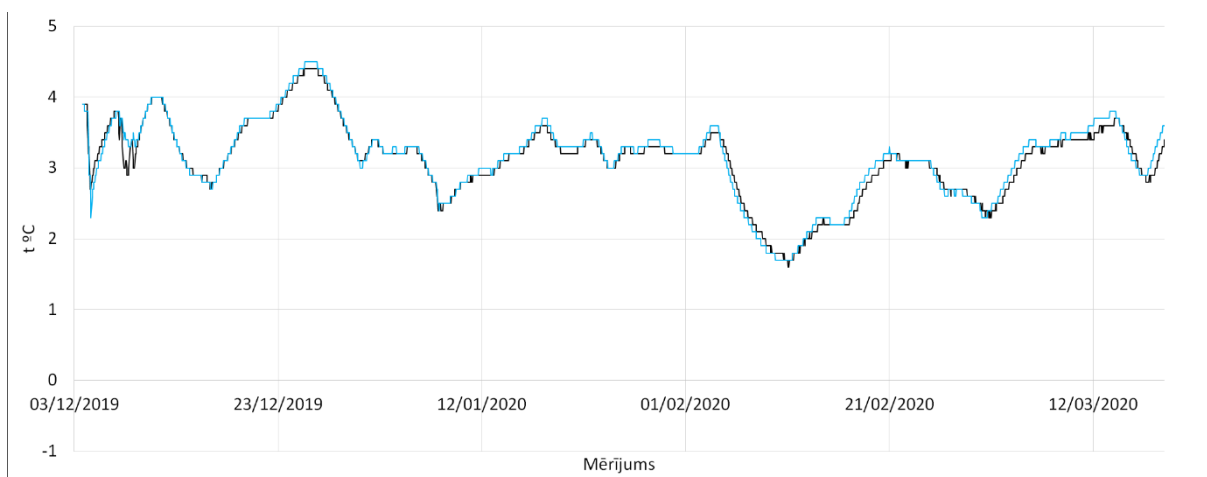
26. attēls. Faktisko mitruma līkņu attēlojums tiešsaistē.

6.2. Iegūtie dati no temperatūras un mitruma sensoriem

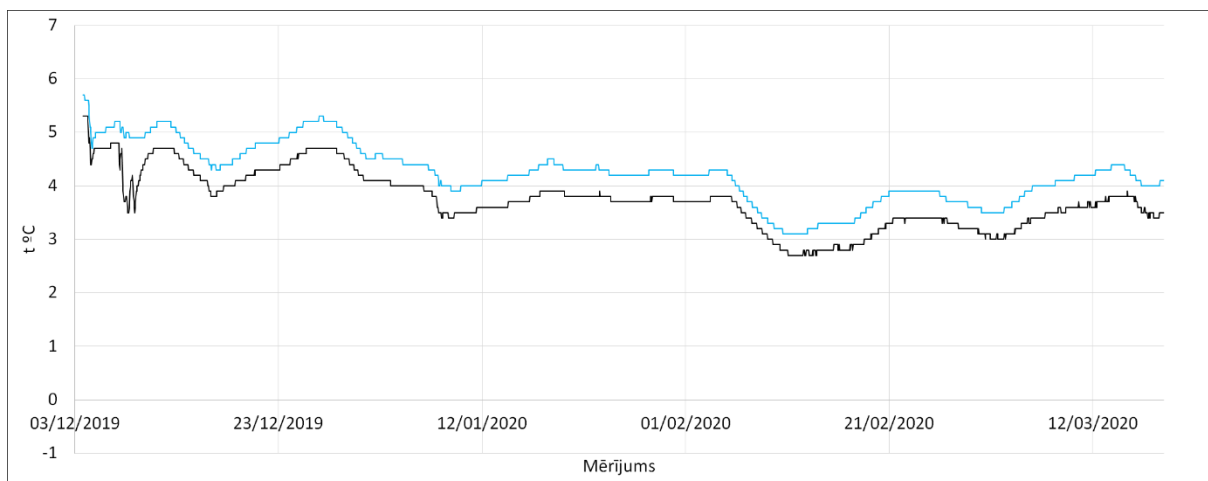
Salīdzinot termistoru kabeļa un temperatūras-mitruma sensoru, redzams, ka atšķirības ir ļoti nelielas (27. un 28. att.) Faktiski lielākās atšķirības, kas tika novērotas sensoriem 1,3 m dziļumā, ir tikai 0,2°C (29.att.). Atšķirības galvenokārt saistāmas ar sensoru ievietošanu. Ievietojot sensorus nepieciešamajā dziļumā, tie tika iespiesti gruntī ar tam paredzēto iekārtu. Iespējams, ka kāda no trīs sensora adatām nav ciešā kontaktā ar grunti, kas potenciāli varētu izraisīt minimālas temperatūras atšķirības, salīdzinot ar termistoru kabeli. Līdz ar to secinām, ka ar abām izmantotajām iekārtām tiek iegūti faktiski identiski mērījumi un kādas konkrētas iekārtas izvēle, visticamākais, neietekmēs iegūtos temperatūras mērījumus.



27. attēls. Temperatūras mērījumu salīdzinājums laika posmam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020.. Ar zilu līniju attēlots sensora mērījums 1,9 m dziļumā. Savukārt ar melnu līniju attēlots termistoru kabeļa mērījums 1,9 m dziļumā.

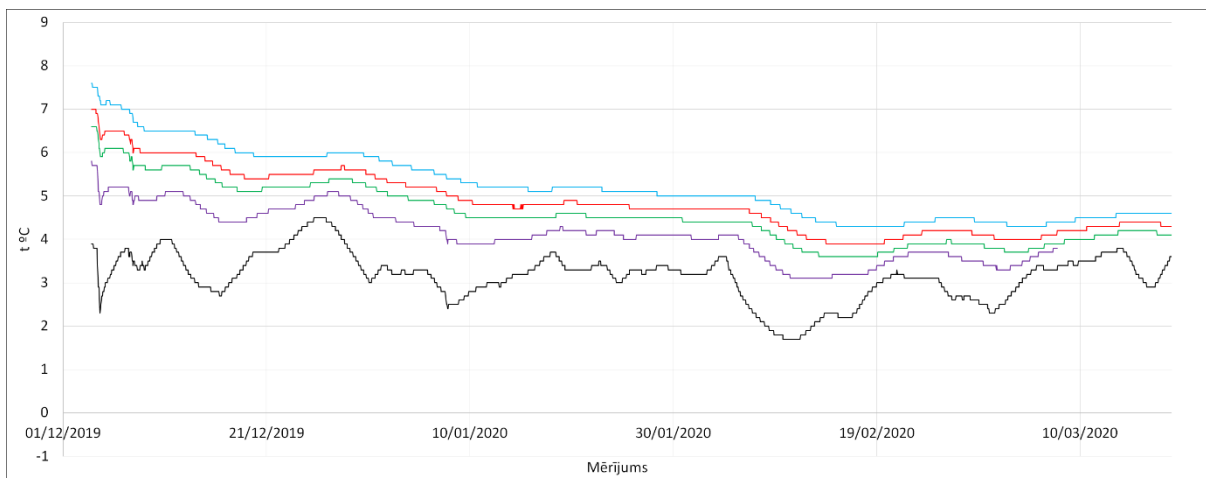


28. attēls. Temperatūras mērījumu salīdzinājums laika posmam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020.. Ar zilu līniju attēlots sensora mērījums 0,9 m dziļumā. Savukārt ar melnu līniju attēlots termistora kabeļa mērījums 0,9 m dziļumā.



29. attēls. Temperatūras mērījumu salīdzinājums laika posmam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020.. Ar zilu līniju attēlots sensora mērījums 1,3 m dziļumā. Savukārt ar melnu līniju attēlots termistora kabeļa mērījums 1,275 m dziļumā.

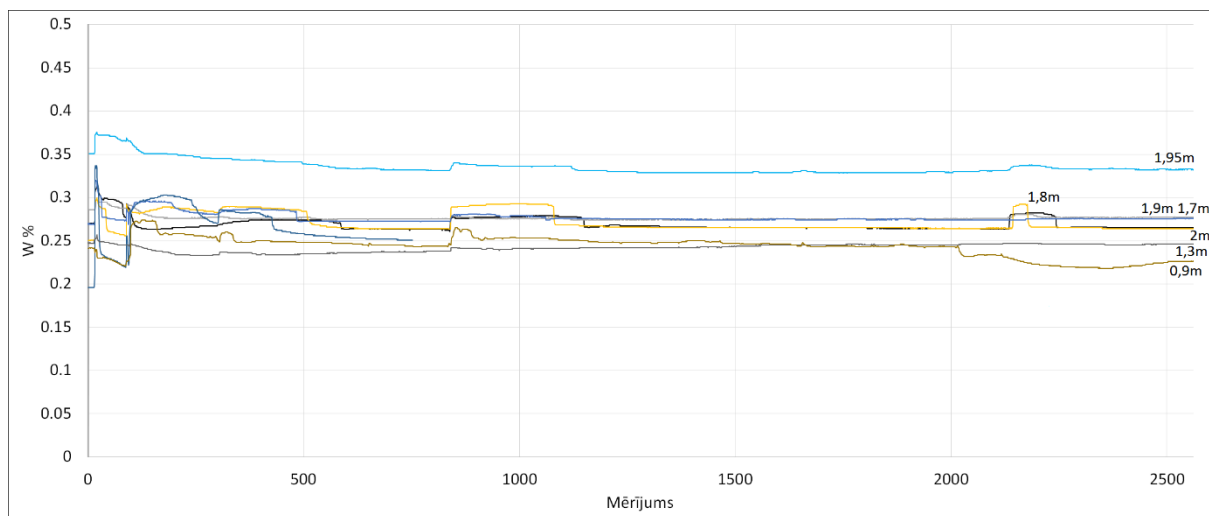
Atzīmējams, ka mērījumu perioda sākumā ar termistora kabeli tika konstatēta strauja un īslaicīga grunts slāņu atdzišana (17. attēls). Šādas izmaiņas ar sensoriem netika reģistrētas (30. attēls). Šobrīd mums ir grūti izskaidrot, kāpēc ar termistora kabeli tika konstatēta šāda īslaicīga grunts temperatūras pazemināšanās, iespējams, tas būtu saistāms ar īslaicīgu mitruma pieaugumu pēc pirmā īslaicīgā sasaluma perioda (31. att.).



30. attēls. Sensoru mērījumi laika posmam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020. Zilā līnija atbilst 200 cm dziļumam. Sarkanā līnija atbilst 180 cm dziļumam. Zaļā līnija atbilst 170 cm dziļumam. Violetā līnija atbilst 140 cm dziļumam. Melnā līnija atbilst 90 cm dziļumam.

Te jāņem vērā, ka mitruma pieaugums notika pēc sāls kaisīšanas uz ceļa klātnes. Pastāv varbūtība, ka sāļais ūdens, kam ir paaugstināta elektrovadītspēja, ieplūda pie mitruma mērītāja un sensors, kas mēra elektrovadītspēju, interpretē signālu kā salīdzinoši lielu ūdens satura pieaugumu, lai gan reālais ūdens saturs ir izmainījies nedaudz. Ja pieņemam, ka uz īsu brīdi zem ceļa klātnes varēja pieplūst sālūdens vai pat sājūdens, tad šādam ūdenim temperatūra būs zemāka, nekā gruntsūdenim. Līdz ar to sālūdens intrūzija minimāli ietekmēs sensorus, kuri ir

iesprausti mazcaurlaidīgos mālainos nogulumos, bet tieši var ietekmēt termistoru kabeli, kuram viena puse ir piespiesta pie urbuma sienas, savukārt otra puse atrodas caurlaidīgās smiltīs.



31. attēls. Mitruma sensoru mērījumi laika posmam no 03.12.2019. līdz 19.03.2020. Zilā līnija norāda 1,95 m dziļumu.

Mitruma izmaiņas visos sensoros novērojumu periodā ir bijušas minimālas (skat. 31. att.), lielākās variācijas ir redzamas dzeltenās un zaļganbrūnās līknes sensoros, kuri attiecīgi izvietoti 1,8 un 0,9 m dziļumā. Seklākā no diviem sensoriem variācija ir izskaidrojama ar tā atrašanos smilšainā gruntī, kurai, salīdzinot ar pārējo grunts masīvu, ir augstāka filtrācija, tādējādi arī lielākas mitruma izmaiņas aerācijas zonā. Lai arī urbšanas gaitā netika sasniegts gruntsūdens līmenis, tomēr tika novērots, ka līdz ar dziļumu pieaug mitruma saturs. Visticamāk, tika sasniegta kapilārā ūdens pacelšanās zonas augšējā daļa, kas mālainās gruntīs var sasniegt dažus metrus. Līdz ar to ir skaidrojams, kāpēc 1,95 m dziļumā mitruma izmaiņas ir minimālas un, ilgtermiņā skatoties, arī stabilas, bet 1,8 m dziļumā ir vērojamas fluktuācijas.

Nemot vērā to, ka temperatūras atšķirības starp termistoru kabeli un temperatūras - mitruma sensoriem praktiski nepastāv, izņemot 0,2 °C 1,3 m dziļumā, secinām, ka urbumu aizpildošais materiāls neietekmē temperatūras mērījumus (5. nodaļa). Dakšīņu sensoriem būtiskākais trūkums ir to korekta ievietošana urbumā, kuru sarežģī nepietiekamais grunts blīvums, sastopamie oļi un no urbuma izejošais vadu kūlis. Datu uzkrājējs atbalsta sešu sensoru pievienošanu, ja urbumā izvietotu sensorus ik pa 30 cm, tad būtu iespējams veikt nolasījumus līdz 1,7 m dziļumam, pie nosacījuma, ja 1. sensors ievietots 20 cm dziļumā, tādējādi šāda metodika varētu tikt pielīdzināta pašlaik izmantojamajai Lietuvā.

Jāpiezīmē, ka kopš monitoringa uzsākšanas ir pārstājuši darboties divi sensori. Pirmais no tiem darbību pārtrauca 4. janvāri un otrs 9. martā. Darbības traucējumi pašlaik nav skaidri, un datu uzkrājējam nav konstatēti vizuāli bojājumi, vai atvienojušies kontakti. Visticamāk,

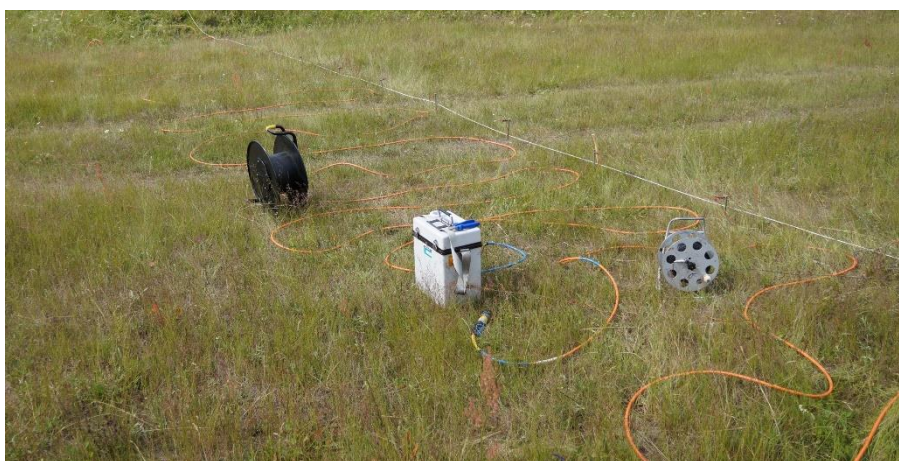
gruntī ievietotie sensori nav bojāti, bet datu ieraksta traucējumi ir skaidrojami ar problēmām vadu starpposma pagarinājumā starp datu kolektoru un izvadiem no urbuma (32. att.). Konkrētā problēma tika konstatēta momentāni, tomēr, izvērtējot riskus saistībā ar pagarinājuma atrakšanu, kontaktu pārbaudi un hidroizolācijas nodrošināšanu pagarinājumā, tika nolemts līdz pavasarim neriskēt ar kopējo monitoringa sistēmu.



32. attēls. Pagarinājuma atrašanās vieta apzīmēta ar balto apli.

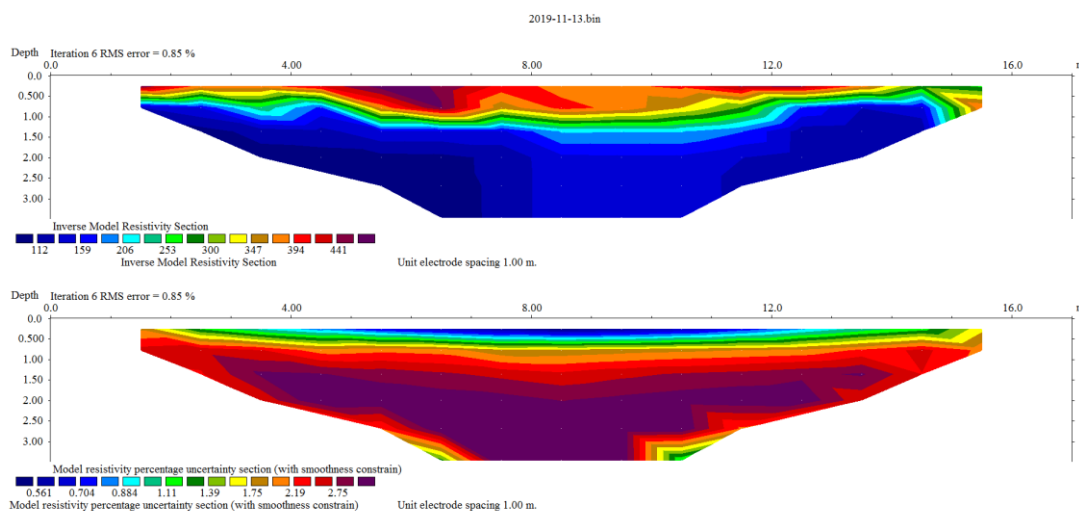
7. ELEKTROIZPĒTE

Pētījuma laikā eksperimentāli tika pārbaudītas elektroizpētes metodes izmantošanas iespējas grunts sasalušuma dziļuma novērtēšanā. Ņemot vērā to, ka sasalušas grunts elektrovadītspēja ir ievērojami zemāka nekā nesasalušas grunts elektrovadītspēja, teorētiski, detalizēti grunts elektrovadītspējas mērījumi var sniegt informāciju par sasalušuma dziļumu. Izpētes teritorijā tika ierīkots viens monitoringa profils, gar kuru veikti elektrovadītspējas mērījumi paralēli grunts virsmas nivelēšanai. Pētījumā izmantota *SyscalPro switch72* elektroizpētes iekārta (33.att.).



33. attēls. Mērījumu veikšanai, monitoringa profilā uzstādīta *SyscalPro switch72* elektroizpētes iekārta.

Uz izveidotā monitoringa profila kopumā 18 elektrodi tiek izkārtoti ar 1 m atstarpi. Tādējādi ir iegūts 12 m garš profils. Ieraksts veikts izmantojot Šlumbergera tipa elektrodu konfigurāciju un dati apstrādāti ar *Res2dinvx64* datu apstrādes programmu.



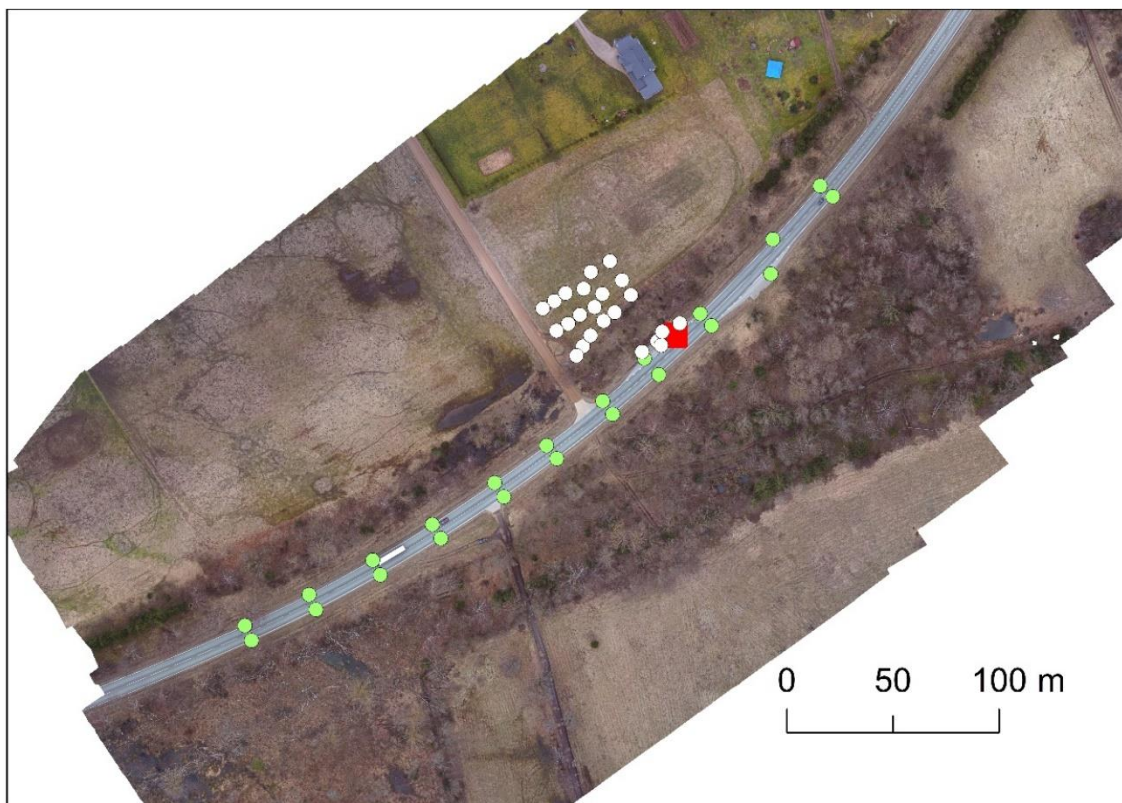
34. attēls. 2019.gada 13.novembrī veikto elektrovadītspējas mērījumu rezultāti.

Līdz šim mērījumi veikti četras reizes (skat. 34. att.). Iegūtie rezultāti norāda uz to, ka pētījumu teritorijā grunts virskārtā ir slānis ar augstāku pretestību, kas saistāms ar smilts slāni, zem kura ieguļ slānis ar relatīvi zemu pretestību – morēnas smilšmāls. Iegūtais grunts griezums atbilst novērojumiem, kas tika veikti netālu ierīkotajā šurfā.

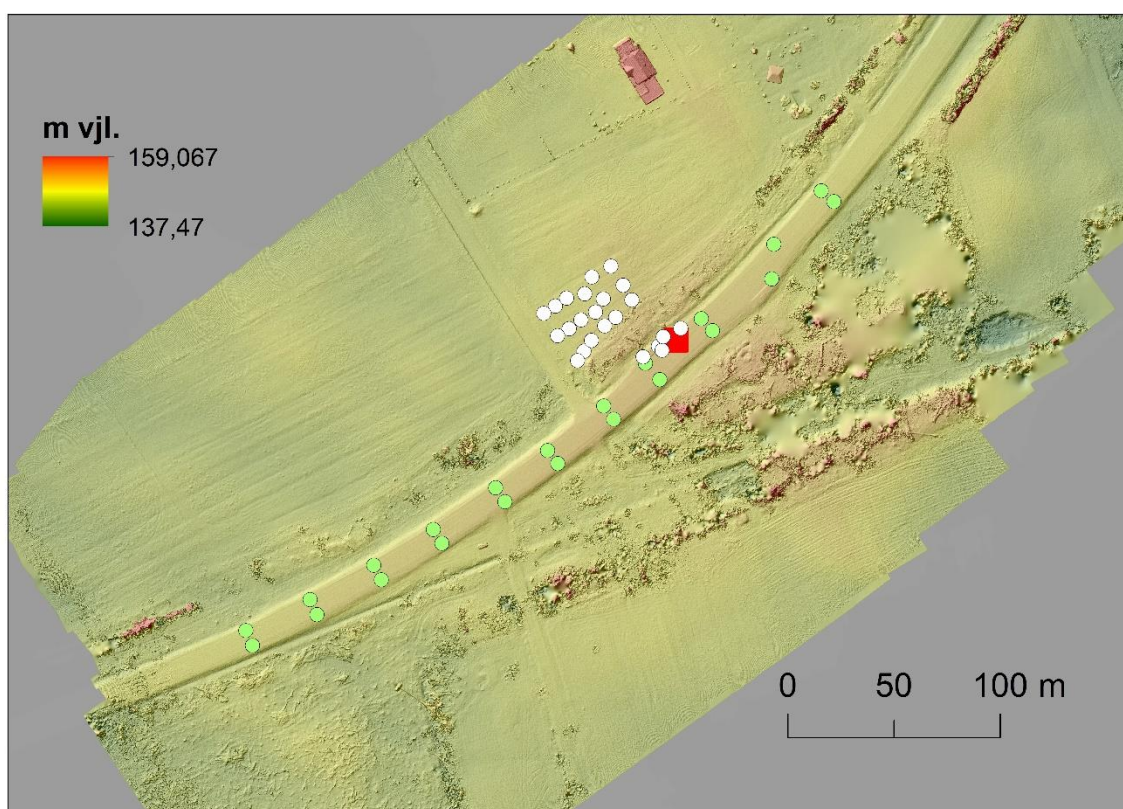
Ņemot vērā to, ka grunts virskārtas sasalšanas periods šajā sezonā bija salīdzinoši īss, kā arī atsevišķajās aukstajās dienās nebija iespējams pārplānot akadēmisko darbību, lai operatīvi dotos lauka izpētē, tad šajā sezonā neizdevās novērot grunts elektrovadītspējas izmaiņas, kas saistāmas ar grunts sasalšanu.

8. PĒTĪJUMI AR BEZPILOTA LIDAPARĀTU (DRONU)

Ortomozaīka (35. att.) un digitālais reljefa virsmas modelis (36. att.) izveidoti, izmantojot fotogrammetrijas metodoloģiju. Ortofotogrāfiju iegūšanai tika izmantots *DJI Mavic 2 Pro* bezpilota lidaparāts (drons). Lidojuma kontrolei izmantota programma *Drone Harmony*, kas automātiski aprēķina lidojuma trajektorijas, nodrošinot vienādu pārklājumu starp uzņemtām fotogrāfijām. Lidošanas augstums tika iestatīts 60 m virs drona pacelšanas punkta. Šāds lidojuma augstums tika izvēlēts, lai drona pārvietojumam netraucētu koki un būves. Pieņemot šādu lidojuma augstumu, katra pikseļa platība atbilst 1.41 cm^2 dabā. Fotogrāfiju pārklājuma iestatījumi ir bijuši 80% pret 60%. Lidojuma ātrums 6 m/s.



35. attēls. Izveidotā ortomozaīka no bezpilota lidaparāta fotogrāfijām. Apzīmējumi: baltie punkti – nivelēšanas punkti uz zemes virsmas; zaļie punkti – nivelēšanas punkti uz ceļa; sarkanie kvadrāti – monitoringa urbumi.

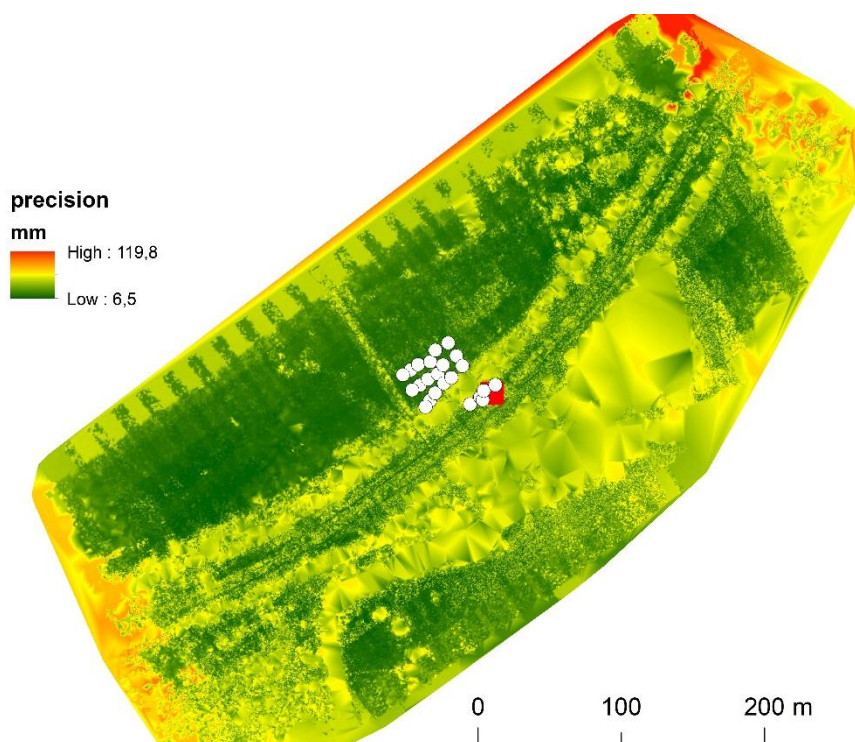


36. attēls. Izveidotais digitālais zemes virsmas modelis. Apzīmējumi: baltie punkti – nivelēšanas punkti uz zemes virsmas; zaļie punkti – nivelēšanas punkti uz ceļa; sarkanie kvadrāti – monitoringa urbumi

Fotogrāfiju piesaistei koordināšu tīklam izmantoti zemes atbalsta punkti (*ground control points*), kas tika izvietoti visā izpētes teritorijā tā, lai nodrošināt vienādu pārklājumu. Kopā tika izvietoti 10 atbalsta punkti – 5 no tiem tika izmantoti modeļa piesaistīšanai koordināšu telpai, savukārt pārējie 5 tika izmantoti modeļa validācijai. Visi atbalsta punkti tika nomērīti ar augstas precizitātes reāla laika GNSS iekārtu *Emlid Reach RS2*. Par atbalstu tika izmantots RTK tīkls LATPOS, kuru nodrošina LĢIA. Nomērīto koordināšu precizitāte ir ~7mm.

Fotogrammetrijas apstrāde veikta programmā *Agisoft Metashape 1.6.2*. Par pamatu tika izmantota apstrādes procedūra, ko iesaka programmas ražotājs. Rezultātā tika izveidota ortomozaīka (skat. 35. att.) un digitālais reljefa virsmas modelis (DSM) (skat. 36. att.).

Ir zināms, ka fotogrammetrijas procesa izpildes rezultātā tiek pieņemts atslēgas punktu atlases nejaušības princips (James et al. 2017). Tādejādi katrs izveidotais modelis ir unikāls, jo tiek izmantots noteikts punktu skaits, kā arī noteikta punktu kopa. Līdz ar to ir nepieciešams aprēķināt kļūdas vērtību, kas attiecās uz fotogrammetrijas procesu. Šādas kļūdas noteikšanai izmantota punktu precizitātes noteikšanas metodika (James et al. 2017). Izveidotam modelim tika mainīti precizitātes radītāji un modelis tika pārveidots. Kopumā ir veikti 4000 mēģinājumu, kā rezultātā tika iegūta punktu precizitātes karte (37. att.), jeb karte, kas ļauj kritiski novērtēt virsmas modeļa kļūdas 4000 dažādu digitālo modeļu variāciju gadījumā.



37. attēls. Punktu precizitātes karte. Apzīmējumi: baltie punkti – nivelēšanas punkti uz zemes virsmas; sarkanie kvadrāti – monitoringa urbumi.

Punktu precizitātes kartē (skat. 37. att.) redzams, ka lielākās kļūdas veidojas gar modeļa ārējām robežām, kas ir tieši saistāms ar fotogrāfiju pārklājumu. No agrāko pētījumu pieredzes bija zināms, ka šādas neprecizitātes veidojas, tādējādi konkrētajā pētījumā ap ceļa posmu tika nolidota plašāka teritorija, lai interesējošajā ceļa posmā minimizētu punktu neprecizitāti. 36. un 37. attēlā redzami vairāki laukumi ar nedabiskām augstuma izmaiņām, kuros ir zema precizitāte, tie ir tieši skaidrojami ar koku un krūmu novietojumu (skat. 35. att.). Ceļa un tieši tam pieguļošās teritorijas virsmas modeļa kļūda variē no 6,5 līdz 12 mm.

Lidojuma laikā kopumā iegūtas 378 fotogrāfijas, kuras aptver izpētes laukumu un tam pieguļošo teritoriju, tādējādi uzmērītās teritorijas platība ir 0.0943 km². Fotogrāfiju uzņemšanas laikā tika konstatēts, ka viens atbalsta punkts, no brīža kad tas ir uzmērīts līdz brīdim, kad beidzas lidojums, ir ticis izkustināts. Savukārt vienam punktam tika iegūtas nedabiski lielas kļūdas. Abi punkti netika izmantoti apstrādes procedūrā. Pārējie punkti tika atzīti par derīgiem. Visiem atbalsta un verifikācijas punktiem tika aprēķinātas precizitātes, kas ir dotas 8.1. un 8.2. tabulā.

8.1.tabula. Atbalsta punktu precizitātes.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
Point 1	0.138568	-0.163707	-0.0630863	0.223564	2.802 (10)
Point 3	-0.0789883	0.0112397	-0.0479957	0.0931079	6.047 (9)
Point 4	0.0470126	0.183295	0.0931916	0.210931	3.765 (11)
Point 8	-0.0374016	0.0224855	-0.00993361	0.0447566	7.041 (8)
Point 10	0.22202	-0.224526	0.148135	0.348782	7.715 (10)
Total	0.125173	0.149292	0.0860358	0.212976	5.692

8.2. tabula. Validācijas punktu precizitātes.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
Point 2	-0.0319794	0.0716332	-0.51657	0.522493	2.341 (9)
Point 5	0.265823	-0.285307	1.43705	1.48902	2.296 (9)
Point 9	-0.24373	0.241098	-1.81669	1.84875	1.510 (10)
Total	0.209036	0.219591	1.3702	1.40334	2.067

Kopēja atbalsta punktu precizitāte ir 0.213 m. Precizitāte tika novērtēta kā vidēja. Šādu kļūdu var skaidrot ar izpētes teritorijas īpatnībām (samērā liela veģetācija, lielu koku daudzums izpētes teritorijā, kustīgi objekti fotogrāfiju uzņemšanas laikā (mašīnas)) (skat. 35. att.). Augstāku precizitāti ir iespējams iegūt, veicot papildu darbus teritorijā, piemēram, pļaušanu, kā

arī norobežojot satiksmi fotografēšanas laikā. Papildus neprecizitāti dotos ievieš arī laika apstākļi, lai gan tie bija labvēlīgi fotografēšanai ar bezpilota aparātu. Turpmākajos pētījumos vēlams pieturēties pie vienotas metodoloģijas un veikt fotogrāfiju uzņemšanu bezvējā un nedaudz mākoņainā laikā.

Modeļa validācijas algoritma rezultātā tika secināts, ka fotogrammetrijas kļūdas vidējā vērtība ir 20 mm. Lielāko daļu no šīs vērtības sastāda tieši augstuma koordināte (Z), kuras vidējā kļūda ir 41 mm. Punktu precizitāte X un Y asīs ir bijusi attiecīgi 9,5 un 9,4 mm.

Diskusija par DEM iegūšanu ar bezpilota lidaparātu

Fotogrammetrijas procesa rezultātā tika secināts, ka atbalsta un validācijas punktu kļūdas vērtība (skat. 8.1. un 8.2. tab.) kā arī fotogrammetrijas procesā radītā kļūda (skat. 37. att.) ir lielas, lai šos rezultātus varētu izmantot tiešiem mērījumiem, kas ir saistīti ar sala pacēluma izpēti. Aplūkojot virsmas modeli (skat. 36. att.), tika konstatēts, ka teritorijas daļās, kur atrodas veģetācija, kā arī koki, ir novērojami datu trokšņi, kas ir saistīti ar to, ka veģetācija un koki šūpojas, kā arī uz ceļa fotografēšanas laikā ir diezgan intensīva satiksme. Šādas kustības izraisa nedabiski lielus pārvietojumus fotogrāfijās, līdz ar to izraisot nekorektus aprēķinus fotogrammetrijas procesā. Vietās, kas ir bijušas stabilas fotografēšanas laikā (piemēram, ceļa klātne), šādas kļūdas netika novērotas, kas atstāj iespēju izmantot fotogrammetriju par vienu no metodēm, ar kurām var pētīt sala pacēlumu vai izmaiņas ceļa klātnē, ņemot vērā veikto mērījumu kļūdas lielumu.

Lai mazinātu fotogrammetrijas procesā iegūtas kļūdas, ir nepieciešams ievērot sekojošas rekomendācijas:

- 1) Fotogrāfijas ir nepieciešams iegūt no mazāka augstuma, ja to atļauj konkrētie apstākļi. Augstuma izvēli ir nepieciešams balstīt uz virsmas paraugošanas attāluma (*ground sampling distance*) kalkulatoru.
- 2) Nepieciešams sekot līdzī laika apstākļiem. Fotografēšana ir jāveic bezvējā, kā arī nedaudz mākoņainā laikā, lai fotogrāfijās tieša saules ietekme neveidotu pārlietu lielu kontrastu.
- 3) Izpētes teritoriju ieteicams iepriekš sagatavot, piemēram, ir nepieciešams nopļaut zāli, novākt traucējošos objektus no izpētes teritorijas.
- 4) Nepieciešams mazināt satiksmi un vēlams izvietot atbalsta punktus tieši uz ceļa klātnes.
- 5) Ieteicams izmantot lielu atbalsta punktu skaitu, ievērojot sekojošus norādījumus: punktiem ir jābūt redzamiem no drona lidojuma augstuma; punkti nevar tikt izvietoti

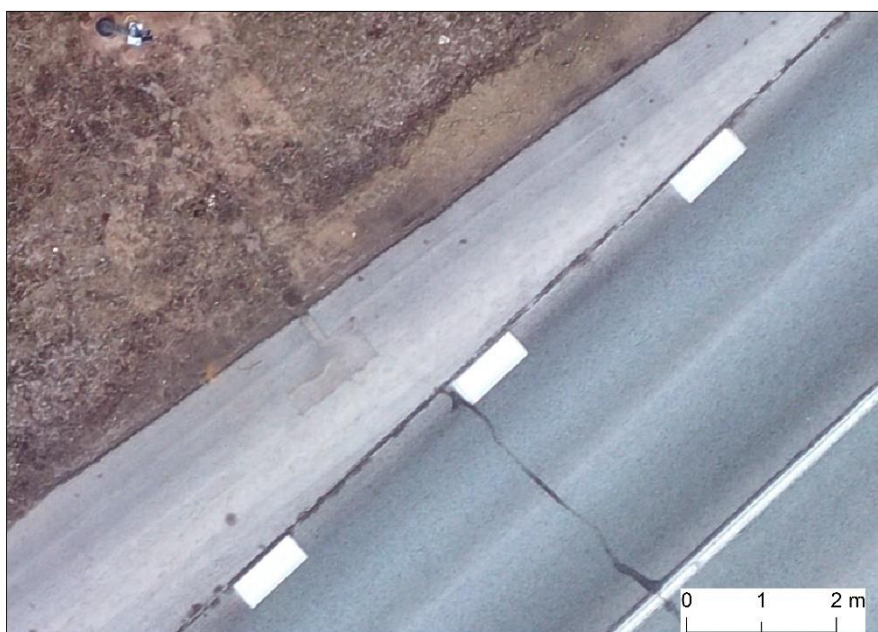
zem kokiem vai koku zariem; punktiem ir skaidri jābūt apzīmētai koordināšu mērīšanas vietai; punktiem ir jābūt izkārtotiem pa visu izpētes teritoriju vienmērīgi.

- 6) Pārklājumam starp secīgām fotogrāfijām ir jābūt optimālam – maksimāli iespējama pārkāpums ar nosacījumu, ka fotografēšana neaizņem ļoti ilgu laiku. Ilglaicīga fotografēšana var izraisīt papildu kļūdas, jo mainās apgaismojums dienas laikā, kā arī ir iespējamās izmaiņas laika apstākļos.

Ar bezpilota lidaparātu iegūtā ortofotokarte ir ar krietni augstāku izšķirtspēju, nekā tā ir 6. aerofotografēšanas cikla kartēm (38. att.), kas ļauj kvalitatīvi novērtēt ceļa klātnes stāvokli kamerālajos pētījumos un konstatēt relatīvi nelielus ceļa segas bojājumus (39. att.). Protams, ar bezpilota lidaparātu ir sarežģīti iegūt detalizētas ortofotokartes, kas nepieciešamas ļoti gariem ceļa posmiem, bet tas neizslēdz iespēju izmantot dronu relatīvi īsākiem posmiem, kuriem, piemēram, ir nepieciešams veikt rekonstrukciju vai klātnes kvalitatīvo novērtējumu.

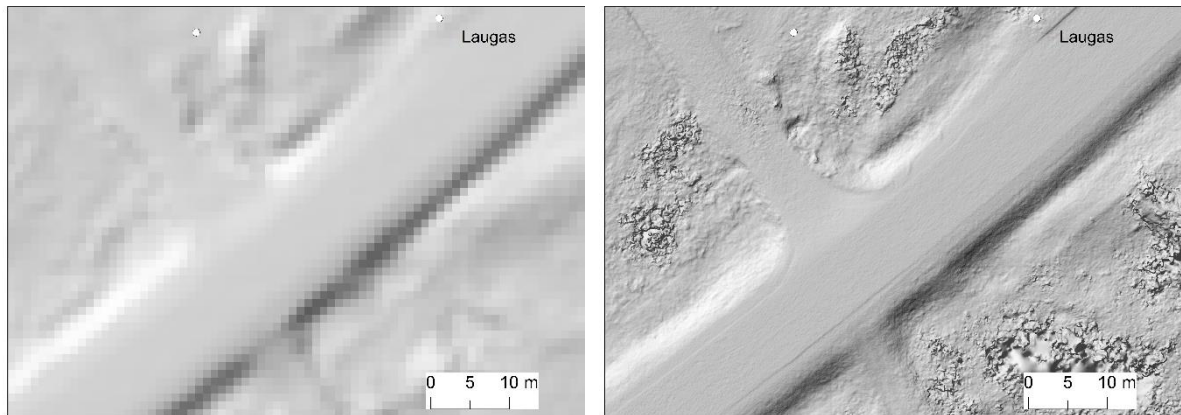


38. attēls. Ar bezpilota lidaparātu iegūtā ortofotokarte (pa kreisi) un 6. aerofotografēšanas cikla karte (pa labi).



39. attēls. Ar bezpilota lidaparātu iegūtajā ortofotokartē redzami nelieli ceļa segas bojājumi. Pa kreisi no otrās līnijas redzams aukstā asfalta klājums virs monitoringa punktiem.

Precīzo zemes virsmas mērījumu veikšanai var tikt izmantoti *LIDAR* dati, ko piedāvā LĢIA. Kopš 2014. gada Latvijā tiek veikta valsts teritorijas lāzerskenēšana. Dati ir publiski pieejami gan izveidoto virsmu karšu veidā (DEM un DSM), gan punktu mākoņu jēldatu veidā. Vidēji, izveidoto *LIDAR* karšu precizitāte ir 12 cm. Šāda precizitāte nav pietiekami augsta, lai dati būtu izmantojami sala pacēluma novērtēšanai. Salīdzinot pieejamo lāzerskenēšanas DEM ar dronu iegūto DEM, var acīmredzami konstatēt, ka pēdējais ir ar augstāku izšķirtspēju (40. att.).



40. attēls. LĢIA pieejamais lāzerskenēšanas DEM (pa kreisi) un ar dronu iegūtais DEM (pa labi).

Tomēr jāpiezīmē, ka, salīdzinot ar fotogrammetrijas metodi, lāzerskenēšana var sniegt precīzākus datus, ja datu iegūšana notiek pēc pasūtījuma konkrēto mērķu sasniegšanai. Lāzerskenēšanas metodes priekšrocība ir augstāka precizitāte vietās, kur plaši sastopama veģetācija, jo lāzerskeneris spēj nomērīt reljefa augstumu arī zem veģetācijas. Savukārt fotogrammetrijas metodes priekšrocība ir tās relatīvi zemāka cena.

9. CEĻA KONSTRUKCIJA UN GRUNŠU ĪPAŠĪBAS

Monitoringa sensori tika uzstādīti autobusu pieturas paplašinājumā, kur konstatēta sekojoša ceļa segas konstrukcija:

- karstais asfalts – 28 cm
- smilts – grants maisījums – 10 cm
- akmeņaina smilts – 62 cm
- mālaina/putekļaina grunts (augšējā) – 30 cm;
- mālaina/putekļaina grunts (apakšējā) – tālāk.

Grunšu īpašības

Projekta gaitā ir veikta grunšu sekojošu fizikāli-mehānisko īpašību noteikšana:

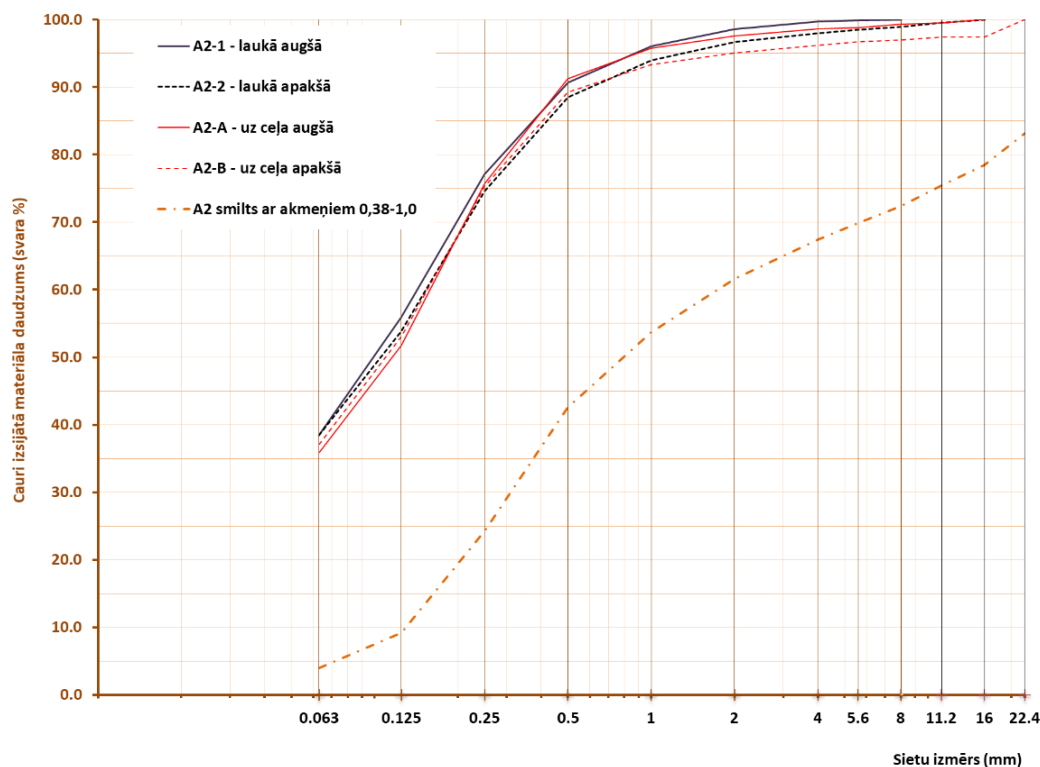
- granulometriskais sadalījums;
- Atterberga robežas;
- organisko savienojumu saturs;
- grunts cieto daļiņu blīvums;
- grunts blīvums pie esošā un optimālā mitruma;
- tūlītējais nestspējas indekss esošajā un optimālajā mitrumā;
- Kalifornijas nestspējas rādītājs (CBR) esošajā un optimālajā mitrumā;
- elastības modulis;
- sala pacēlums esošajā un optimālajā mitrumā pēc 1, 2 un 3 sasaldēšanas – atkausēšanas cikliem.

Grunšu fizikālās īpašības

Grunšu granulometriskais sadalījums attēlots 9.1. tabulā un 41. att., Atterberga robežas – 9.2. tab., organisko savienojumu saturs un grunts cieto daļiņu blīvums – 9.2. tab.

9.1. tabula. Grunšu granulometriskais sadalījums.

	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4
Sieti, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4
A2-1 - laukā augšā	38,4	55,9	77,1	90,7	96,1	98,6	99,7	99,9	100,0			
A2-2 - laukā apakšā	38,4	53,8	74,6	88,5	94,0	96,7	98,0	98,5	98,9	99,5	100,0	
A2-A - uz ceļa augšā	35,9	51,8	75,8	91,2	95,8	97,6	98,6	98,8	99,3	99,5	100,0	
A2-B - uz ceļa apakšā	37,1	53,1	75,3	89,2	93,3	95,1	96,2	96,7	97,0	97,4	97,4	100,0
A2 smilts ar akmeņiem 0,38-1,0	4,0	9,2	24,3	42,6	53,7	61,6	67,4	69,9	72,4	75,4	78,5	83,2
Aerometriskā metode	0,002	0,0063	0,02	0,063								
A2-1 - laukā augšā	9,5	16,7	23,7	40,1								
A2-2 - laukā apakšā	16,2	23,6	30,0	39,2								



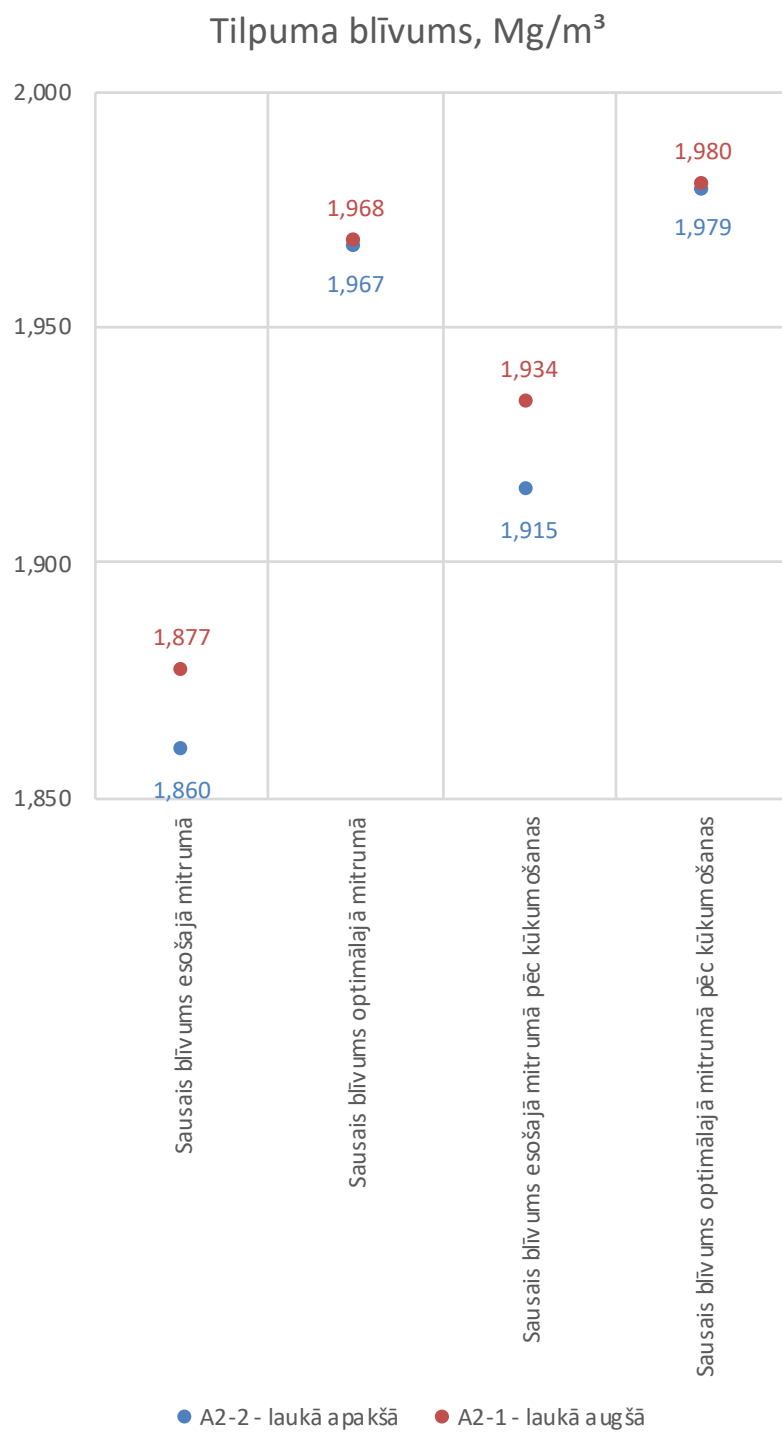
41. attēls. Granulometriskā sadalījuma grafiki.

Pēc granulometriskā sastāva augšējā grunts ir ar smalkgraudaināku kopējo struktūru nekā apakšējā grunts. Kopējais māla un putekļu daļiņu saturs abām gruntīm vērtējams kā līdzīgs, kā arī neliels un līdzīgs abām gruntīm ir organisko daļiņu saturs. Māla daļiņu saturs nedaudz lielāks ir apakšējai gruntij. Pēc grunšu klasifikācijas parametriem abas grunts ir līdzīgas, uz robežas starp rupju/smalku – plastisku/neplastisku – putekļainu/mālainu.

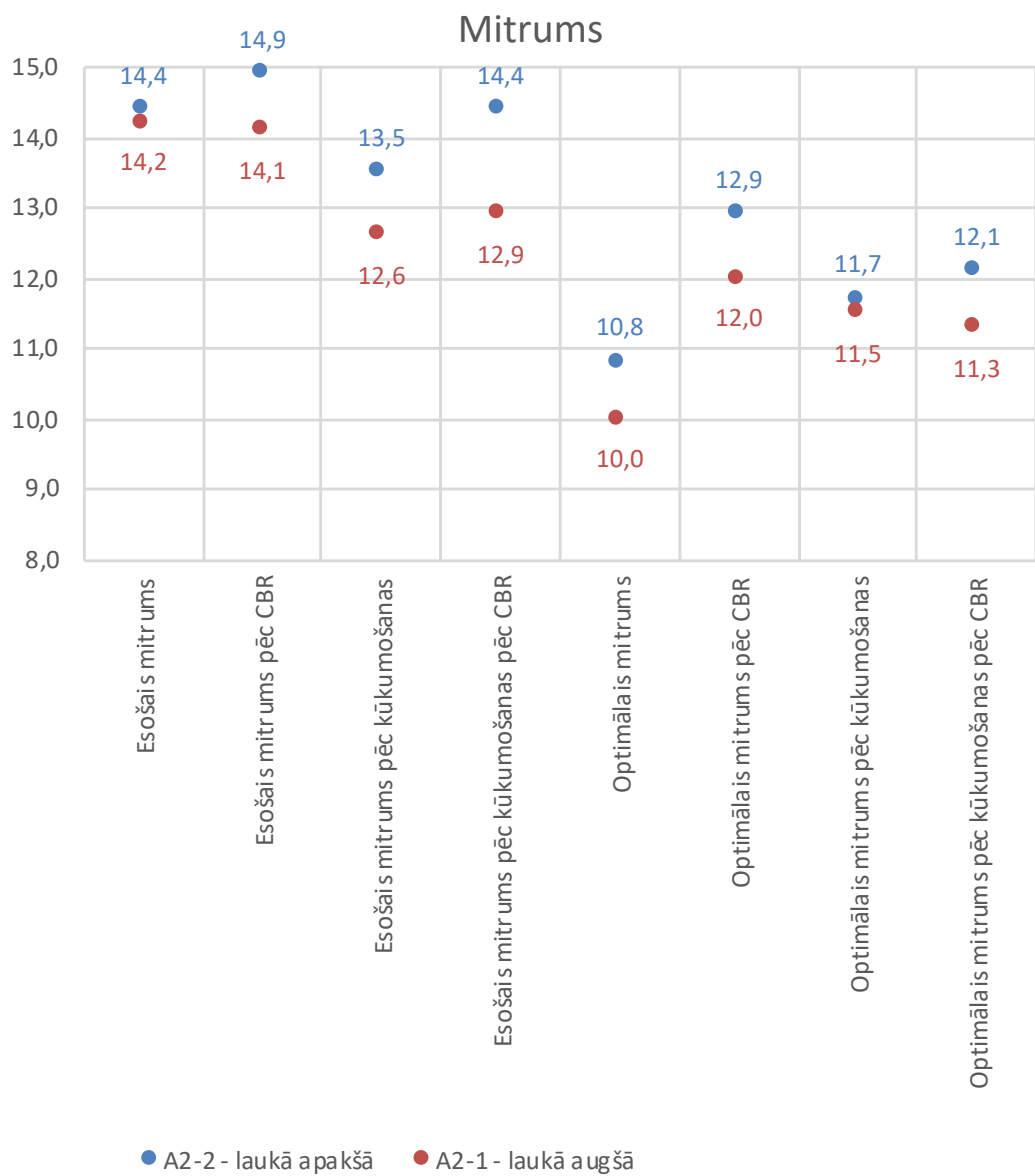
9.2. tabula. Grunts paraugu Atterberga robežas, cieto daļiņu blīvums un organiskais saturs.

	Atterberga robežu noteikšana <i>LVS EN CEN ISO/TS 17892-12:2005 (60g/60°)</i>					Organisko savienojumu saturs, %	Daļiņu blīvums (G.pielikums 0/31,5 mm) ³⁾ , Mg/m ³
	Parauga esošais mitruma saturs, %	Plastiskuma robeža W _p , %	Plūstamības robeža W _L (60g/60°), %	Plastiskuma indekss I _p	Plūstamības indekss I _L		
A2-1 - laukā augšā	14,6	14,0	16,7	2,8	0,24	1,2	2,666
A2-2 - laukā apakšā	15,5	13,7	22,8	9,1	0,19	1,3	2,647
A2-A - uz ceļa augšā	13,4	14,0	20,0	6,0	-0,10	-	-
A2-B - uz ceļa apakšā	14,5	12,5	19,3	6,9	0,30	-	-
A2 smilts ar akmeņiem 0,38-1,0	4,8	-	-	-	-	-	-

Grunšu blīvums un mitrums ir savstarpēji saistīti. Pie lielāka grunts blīvuma ir mazāks grunts mitruma saturs, pie mazāka grunts blīvuma ir lielāks grunts mitruma saturs (42. att.).



42. attēls a) Grunts tilpuma blīvuma un mitruma savstarpējā sasaiste.

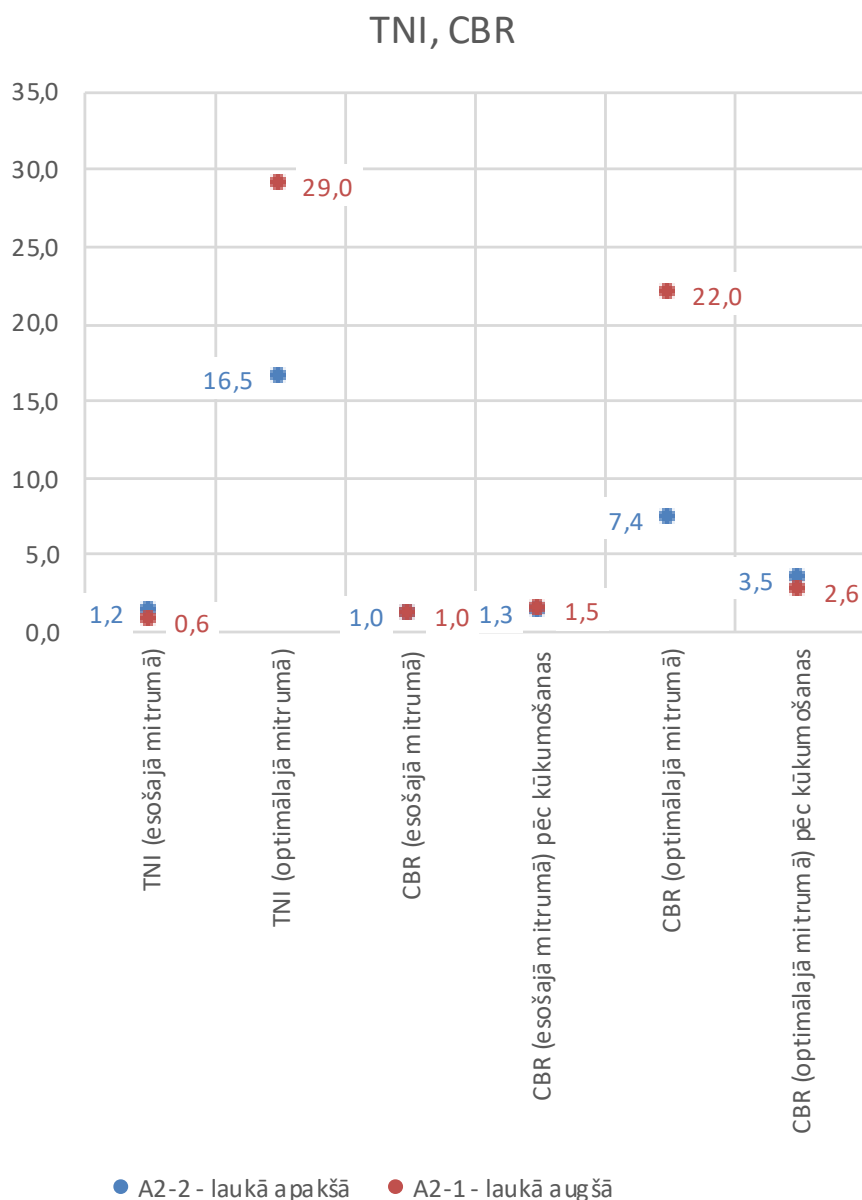


42. attēls b) Grunts tilpuma blīvuma un mitruma savstarpējā sasaiste.

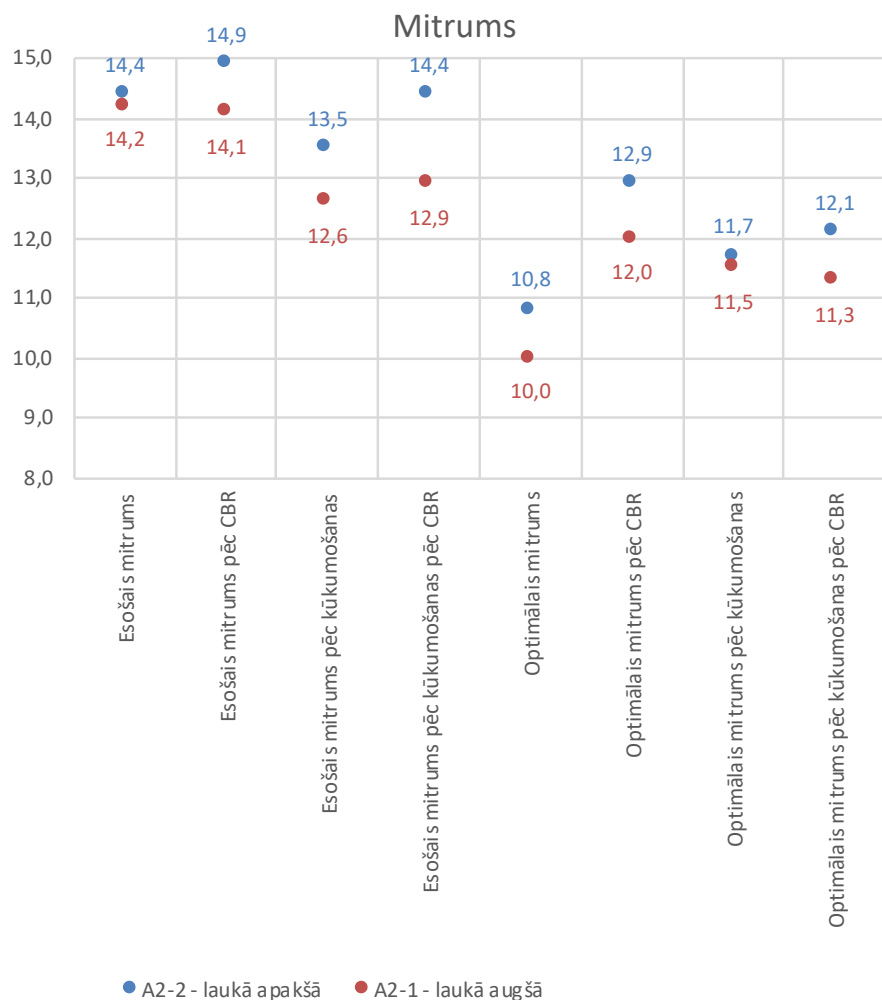
Tūlītējās nestspējas indekss (TNI), Kalifornijas nestspējas vērtība (CBR), elastības modulis

Konstatēts, ka izturot paraugu ūdenī CBR testam, pārsvarā mitruma saturs pieaug, vairāk tas pieaug pie optimālā mitruma (kurš ir mazāks par esošo mitrumu). Bet mitruma saturs var arī nepieaugt, ja tas sākotnēji jau ir virs optimālā mitruma satura.

TNI optimālajā mitrumā (43. att.) ir ievērojami labāks, nekā pie lielāka mitruma satura, un līdz ar to arī zemāka sablīvējuma. CBR esošajā mitrumā līdzīgs TNI, kas ir ļoti zems (43. att.). CBR optimālajā mitrumā labāki rādītāji, bet atkarībā no grunts īpašībām ūdens ietekme uz dažādām gruntīm ir dažāda, līdz ar to CBR ir atšķirīgs – šajā gadījumā augšējās grunts CBR rādītājs ir ievērojami labāks.



43. attēls a) TNI, CBR un mitruma satura salīdzinājums



43. attēls b) TNI, CBR un mitruma satura salīdzinājums

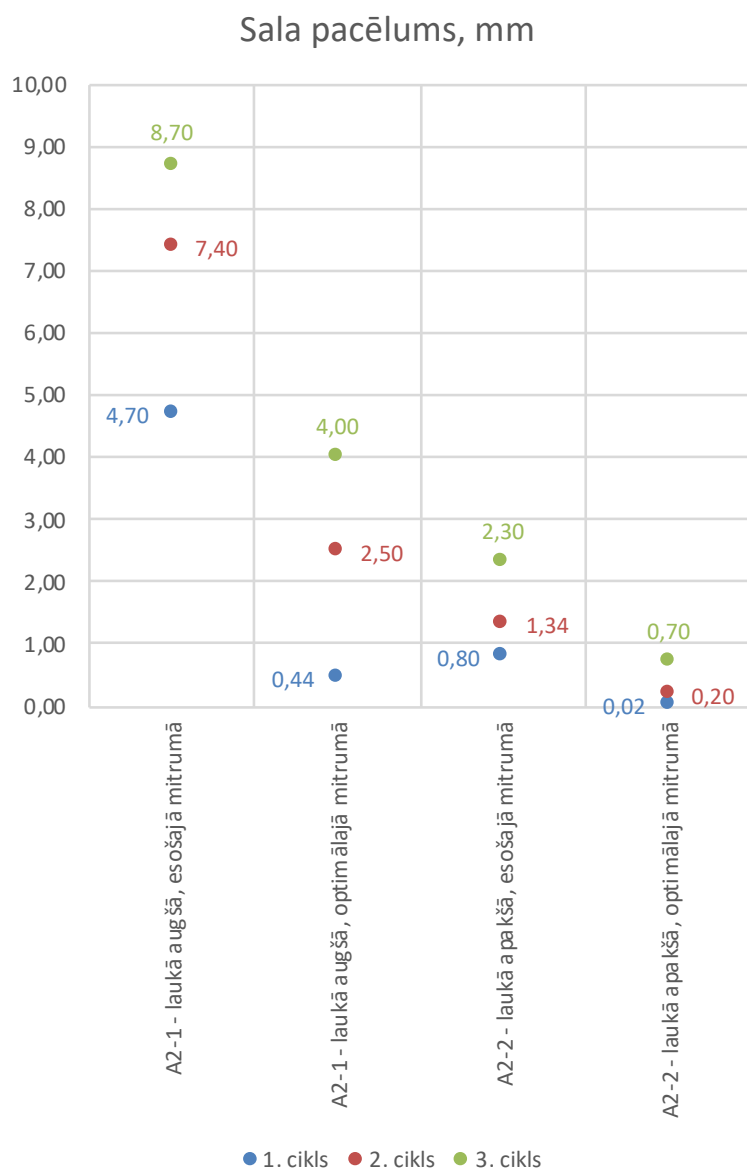
Sala pacēlums

Pēc sala pacēluma testa esošajā mitrumā CBR apmēram tikpat zems kā pirms (43. att.) Optimālajā mitrumā pēc sala pacēluma testa CBR ir nedaudz augstāks nekā esošajā mitrumā, bet salīdzinot ar CBR pirms sala pacēluma testa, CBR kritums ir ļoti liels, kas saistīts ar mitruma pieaugumu sala pacēluma testa laikā (43.att.).

Katrai gruntij veikti 3 secīgi sala pacēluma testi. Ar katru nākamo grunts sasaldēšanu sala pacēluma vērtība pieaug. Turpinot sasaldēšanas/atkausēšanas ciklus, visticamāk, sala pacēlums turpinās pieaugt, bet, balstoties uz citu valstu pētījumu rezultātiem (piemēram, H. Brandl, Freezing-thawing behaviour of Soils and Unbound Road layers, 2008) un racionāliem apsvērumiem, 3 sala pacēluma cikli dod pietiekamu informāciju par grunts potenciālajām sala pacēluma vērtībām, un tālāka ciklu skaita palielināšana sala pacēlumu ietekmēs nebūtiski.

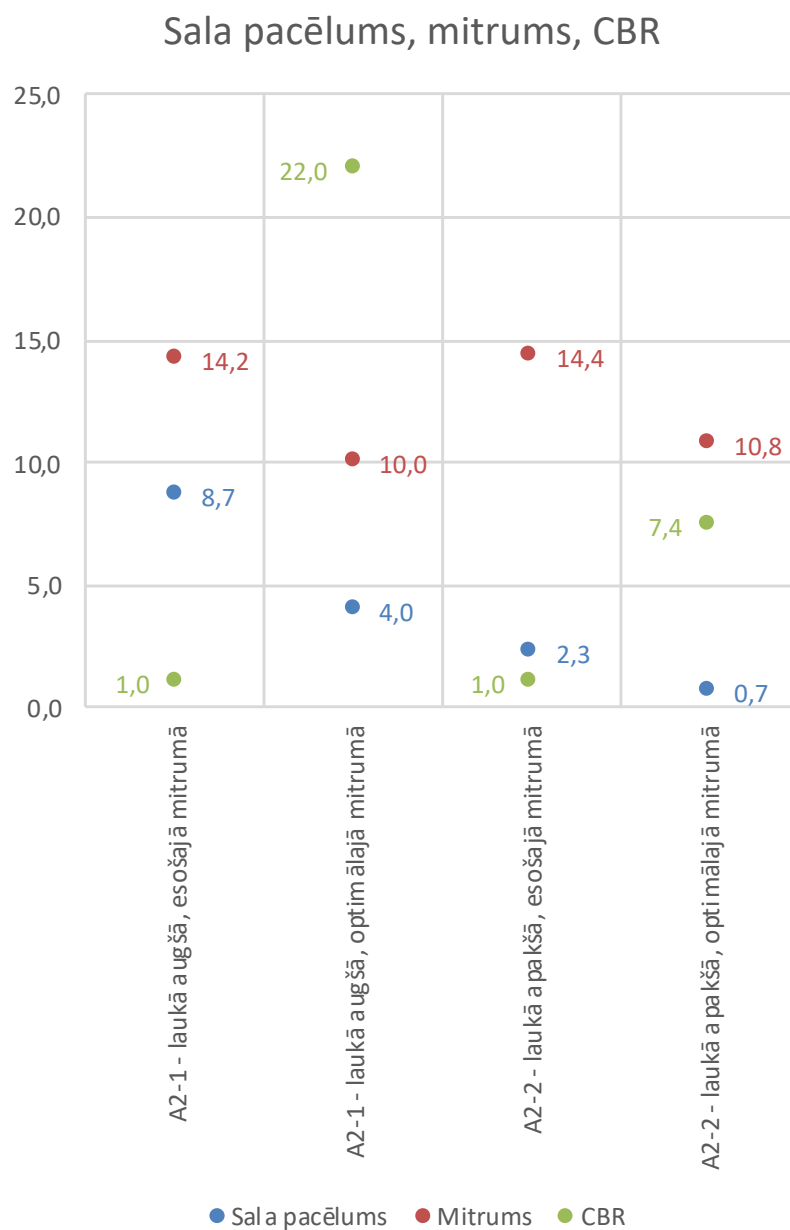
Laboratorijas testēšanā konstatēts, ka sala pacēlums ir lielāks gruntij augšējā kārtā un mazāks gruntij apakšējā kārtā (44. att.) Ar katru sasaldēšanas-atkausēšanas ciklu sala pacēlums abām gruntīm pieaug.

Sala pacēlums testēts pēc GOST 28622-90. Saskaņā ar GOST 28622-90 grunšu kūkumošanas klasifikāciju, augšējā grunts esošajā mitrumā pēc 3 sala pacēluma cikliemsaskaņā ar

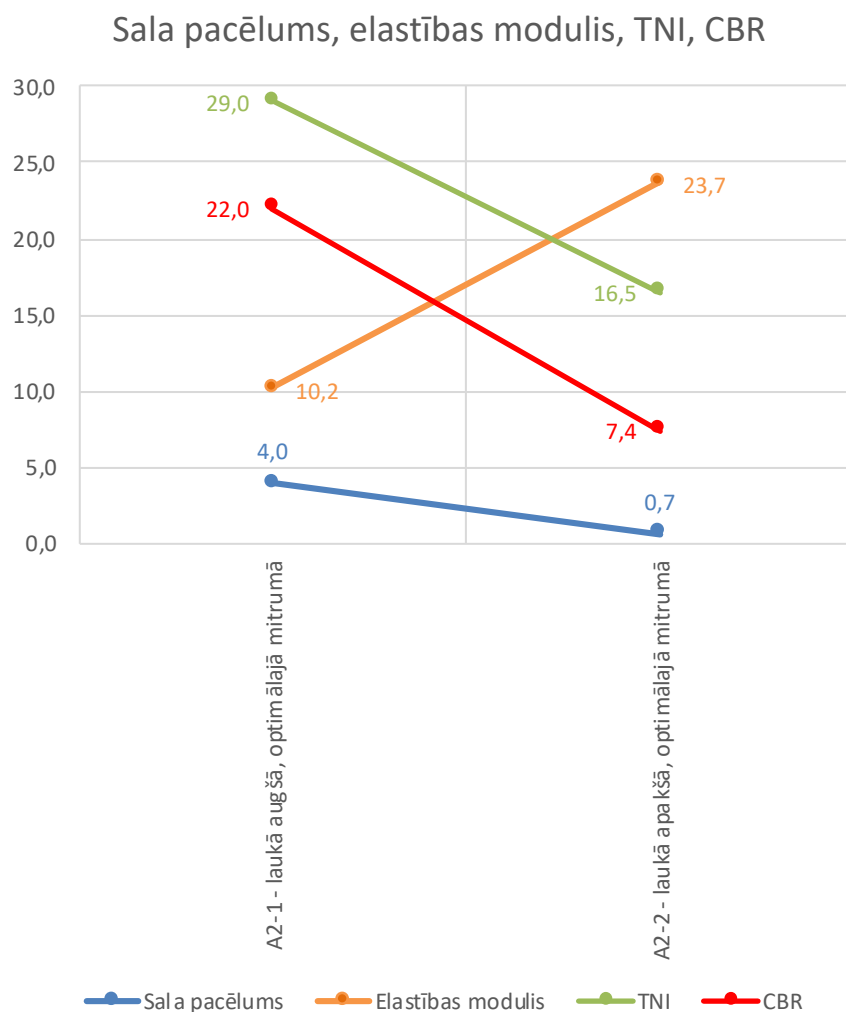


testēšanas rezultātiem (8,7 mm) ir vērtējama kā vidēji kūkomojoša (5,25 – 10,5 mm), kas ir pie stipri kūkumojošas grunts klasifikācijas robežas (10,5 – 15,0 mm), savukārt apakšējā grunts esošajā mitrumā pēc 3 sala pacēluma cikliem saskaņā ar testēšanas rezultātiem (2,3 mm) ir vērtējama kā vāji kūkumojoša (1,5 – 5,25 mm).**44. attēls.** Laboratorijā konstatētās sala pacēluma vērtības.

Pie lielāka grunts mitruma un mazāka blīvuma, mazāks ir CBR un lielāks ir sala pacēlums (45. att.). Pie mazāka grunts mitruma un lielāka blīvuma, lielāks ir CBR un mazāks ir sala pacēlums.



45. attēls a) Sala pacēluma, mitruma, CBR, TNI un elastības moduļa sasaiste.



45. attēls b) Sala pacēluma, mitruma, CBR, TNI un elastības moduļa sasaiste.

Var secināt, ka gruntij ar lielāku blīvumu un mazāku mitruma saturu būs lielāka nestspēja un mazāks sala pacēlums, nekā tai pašai gruntij ar mazāku blīvumu un lielāku mitruma saturu. Konstatēts, ka atšķirīgas ir grunšu nestspējas vērtības testējot TNI un CBR, vai testējot elastības moduli. Ja augšējās grunts TNI un CBR vērtības ir augstākas par apakšējās grunts TNI un CBR, tad elastības modulis ir ar augstāku vērtību apakšējai gruntij.

Ceļa segas salizturības pārbaude (aprēķins)

Ceļa segas salizturības pārbaude veikta, to aprēķinot esošajai ceļa konstrukcijai saskaņā ar "Ieteikumi ceļu projektēšanai. Ceļa sega. 2020" (Ieteikumi). Grunts apzīmējums saskaņā ar norādēm *Ieteikumos* pieņemts - "putekļaina mālsmilts", kas tiek raksturota kā stipri kūkumojoša, ar grunts kūkumošanās lielumu 7 – 10 cm.

Esošajai ceļa segas konstrukcijai aprēķinātais sagaidāmais sala pacēlums gadījumā, ja kapilārā ūdens pacelšanās augstums ir zem sasaluma dziļuma robežas (saskaņā ar ieteikumiem sasaluma dziļums šajā reģionā ceļiem ir jāpieņem 1,5 m), ir 3,03 cm. Savukārt, gadījumā, ja grunts visā sagaidāmajā sasaluma dziļumā atrodas kapilārā ūdens pacelšanās zonā, tad sagaidāmais sala pacēlums ir 5,47 cm.

Saskaņā ar Ieteikumos norādīto pieļaujamais sala pacēlums ir šāds:

- 1. ceļa kategorija – 3,5 cm;
- 2. ceļa kategorija – 4,0 cm;
- 3. ceļa kategorija – 5,0 cm;
- 4. ceļa kategorija – 5,5 cm;
- 5. ceļa kategorija – 6,2 cm;
- 6. ceļa kategorija – 12,0 cm.

Saskaņā ar veikto grunšu sala pacēluma testēšanu pēc trīs sasaldēšanas-atkausēšanas cikliem gruntīm esošajā mitrumā sala pacēlums attiecīgi ir: augšējai gruntij – 8,7 mm, apakšējai gruntij – 2,3 mm. Testējamā parauga augstums ir 150 mm, attiecīgi interpolējot pret kārtas biezumu, pie sasaluma dziļuma 1,5 m, pieņemot, ka ceļa segas konstruktīvās kārtas ir nekūkumojošas, kopējais sala pacēlums ceļa konstrukcijai saskaņā ar testēšanas rezultātiem sagaidāms – 2,1 cm (t.i. $8,7\text{ mm} \times 300/150\text{ mm} + 2,3\text{ mm} \times 200/150\text{ mm} = 20,5\text{ mm} = 2,1\text{ cm}$).

Secinājumi

Pēc veiktajiem grunšu testiem nav iespējams viennozīmīgi secināt, kādas grunšu fizikāli-mehāniskās īpašības būtiski ietekmē sala pacēluma vērtības. Vienas grunts ietvaros šīs tendences ir acīmredzamas, piemēram, palielinoties grunts mitrumam vai/un samazinoties grunts tilpuma blīvumam – sala pacēlums pieaugs un otrādi, bet savstarpējās dažādu grunšu sala pacēluma vērtību atšķirību ietekmes, veicot tradicionālu grunšu īpašību testēšanu, netika identificētas.

Pēc norādēm *Ieteikumos* (ICP) grunšu viennozīmīga klasificēšana aprēķinam ir apgrūtināta, jo grunšu nosaukumi *Ieteikumos* (ICP) nav viennozīmīgi identificējami ar kādu konkrētu grunšu klasifikācijas sistēmu vai konkrētām, notestējamām, grunšu īpašībām.

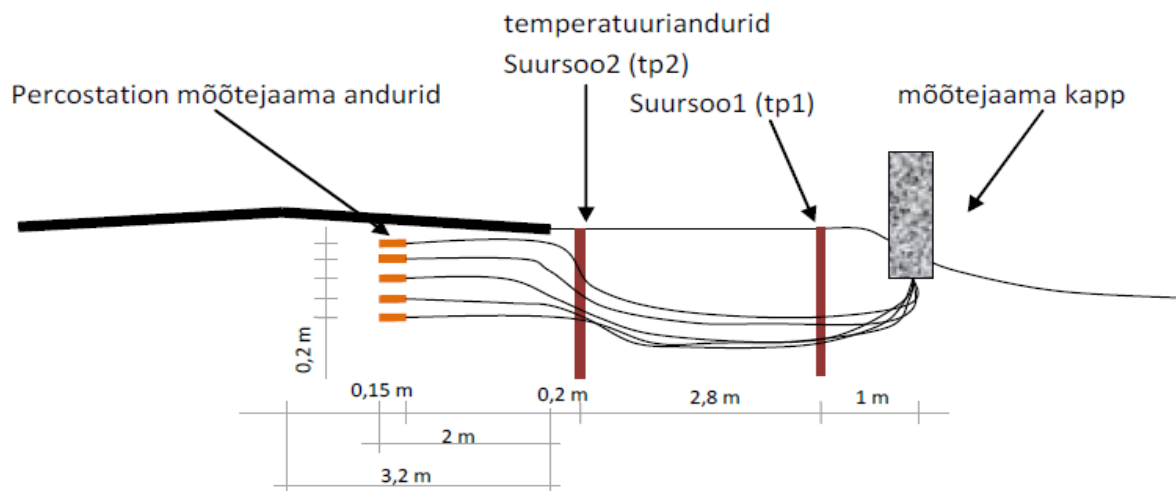
Kopumā var uzskatīt, ka pētījumā iekļauto grunšu sala pacēluma testētās vērtības un kopējais potenciālais ceļa segas sala pacēlums, tika iegūts līdzīgs, kā aprēķinot ceļa segas konstrukcijas sala pacēluma vērtības saskaņā ar "Ieteikumi ceļu projektēšanai. Ceļa sega".

10. KAIMIŅVALSTU SASALUMA DZIĻUMA UN SALA PACĒLUMA MĒRĪJUMI

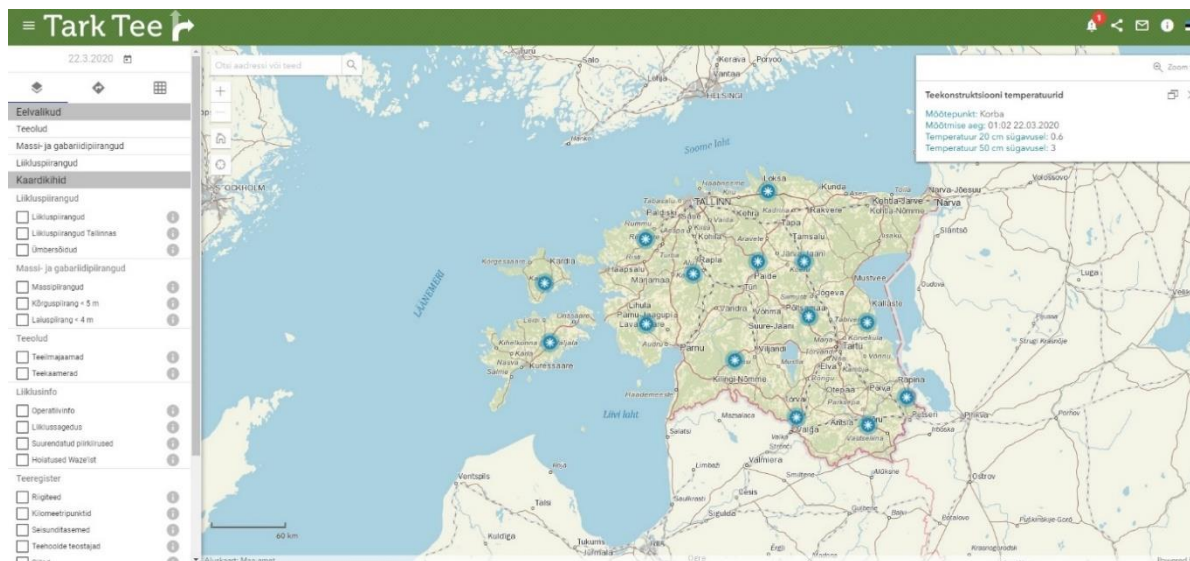
Ir veikta Latvijas kaimiņvalstu pētījumu identificēšana un literatūras avotu apzināšana. Jau grunšu sala pacēluma projekta 1. posma rezultāti parādīja, ka pētījumu un eksperimentālo datu par sala pacēlumu ir ļoti maz.

Igaunija un Lietuva

2011. gadā tika īstenots projekts, kura laikā tika uzstādītas četras monitoringa stacijas, kurās tiek mērīta grunts temperatūra zem ceļa (Kaal and Jentson 2011). Sensori tika ievietoti zem ceļa 2 m no ceļa malas kā arī 3 m attālumā no ceļa, izmantojot urbšanu no sāniem (46. att.). Tika mērīta temperatūra, dielektriskā caurlaidība un elektrovadītspēja. Mērīšanas dziļums ir līdz 2,5 m. Sensori tika ievietoti ik pa 10 cm un seklākais sensors ir 20 cm dziļumā. Mērījumu precizitāte ir 0,1 °C un mērījumi tika veikti ik pa divām stundām. Monitoringa stacija kā enerģijas avotu izmanto baterijas, bet ir uzstādītas arī saules baterijas. Ir iespējama attālināta datu nolasīšana.



46. attēls. Projekta laikā izveidoto monitoringa staciju tehniskā shēma.

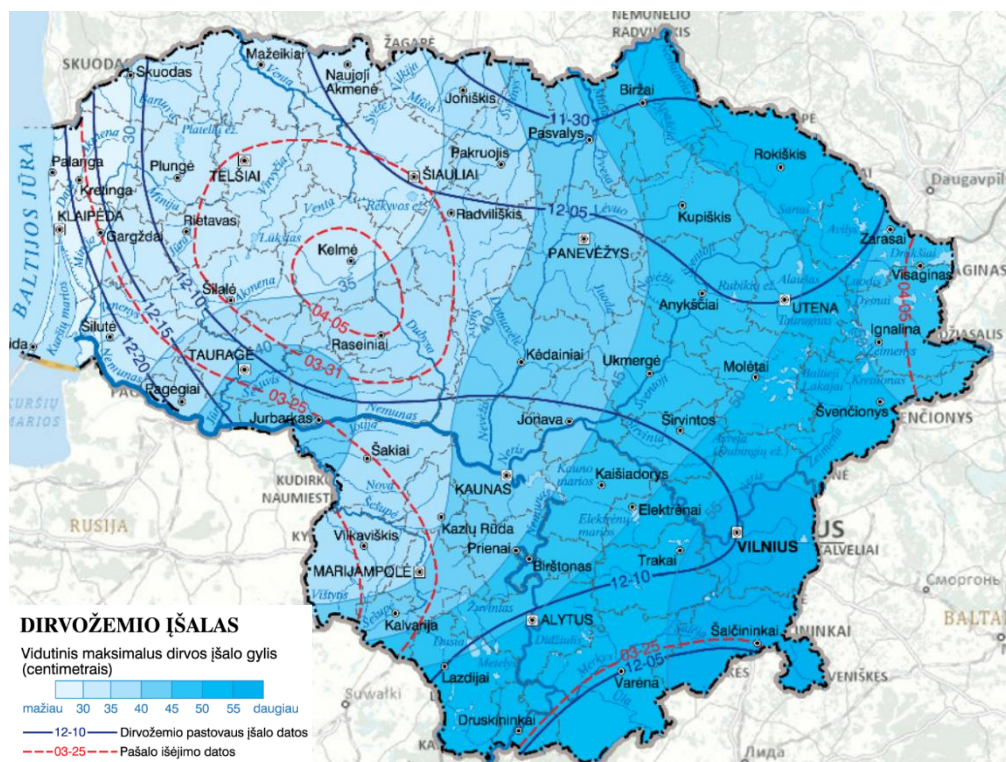


47. attēls. Ekrānšāviņš ar interneta vidē pieejamo informāciju par grunts sasaluma dziļumu Igaunijā.

Šobrīd Igaunijā ir izvietotas 15 grunts temperatūras mērījumu stacijas (skat. 47. att.). Temperatūra tiek mērīta ar 10 cm intervālu un seklākais no sensoriem ir ievietots 20 cm dziļumā. Temperatūras mērījumi tiek veikti vai nu līdz 2,5 m dziļumam vai arī tikai 1,5 m dziļumam. Dažās stacijas ir izvietoti pat divi temperatūras profili. Dati par temperatūru 20 cm un 50 cm dziļumā ir brīvi pieejami interneta vietnē (<https://tarktee.ee/#/en>). Uzņēmums “Teede Tehnokeskus AS” ir atbildīgs par monitoringa tīkla uzturēšanu un datu pieejamības nodrošināšanu interneta vidē, savukārt Igaunijas ceļu pārvalde ir galvenais datu izmantotājs. Minētā uzņēmuma pārstāvis minēja, ka dati tiek izmantoti, lai norādītu, kuri ceļi ziemas periodā ir piemēroti īpaši smagu kravu pārvadāšanai. Sala pacēluma mērījumi Igaunijā netiekot veikti.

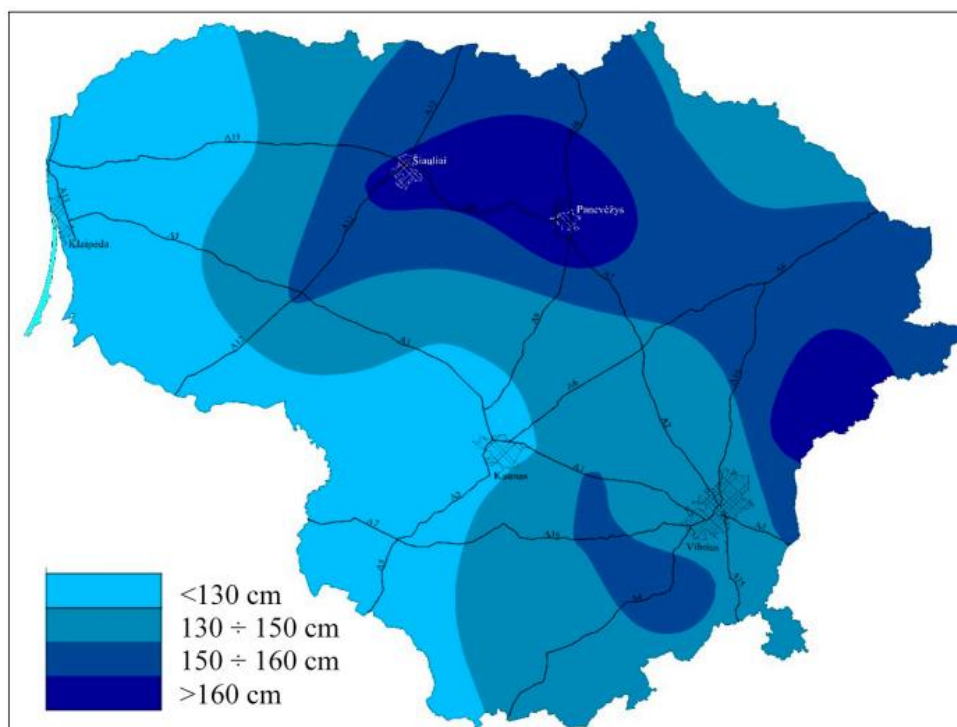
Lietuvā 26 ceļa meteoroloģiskās stacijas ir aprīkotas ar temperatūras mērījumiem dažādos dziļumos. 1999. gadā temperatūras sensori uzstādīti līdz 1,4 m dziļumam, tomēr pētījuma gaitā konstatēts, ka sasaluma dziļums ir lielāks, tādējādi kopš 2012. gada temperatūras monitorings tiek veikts līdz 2 m dziļumam. Būtiskākais secinājums ir, ka meteoroloģiskajās stacijās konstatētais sasaluma dziļums, variē no 0,3 līdz 0,6 m (48. att.), retumis sasniedzot 0,8 līdz 0,9 m (Galvonaite et al., 2013). Savukārt temperatūras mērījumi ceļa konstrukcijā, kas tiek veikti ar 15 min. intervālu, parāda, ka sala dziļums pārsniedz 1,4 m, sasniedzot pat 1,79 m (49. att.). Līdz ar to ceļa meteostaciju mērījumi, saistībā ar ceļa konstrukcijas sasalumu, sniedz

atbilstošākus sasaluma dziļuma datus nekā valsts meteoroloģisko staciju dati (Vaitkus et al, 2016).



48. attēls. Lietuvas grunšu sasalšanas dziļuma karte, sastādīta izmantojot valsts meteoroloģisko staciju novērojumus (Galvonaite et al., 2013).

Ceļu projektēšanā tiek ņemts vērā salizturīgās kārtas biezums, atbilstoši ceļu meteostacijās novērotajam sasaluma dziļuma maksimumam, zemes klātnes sasaluma klase un ceļa konstrukcijas klase. Tādējādi tiek veikta salizturīgās kārtas korekcija atbilstoši ģeogrāfiskajam novietojumam un tehniskajiem apstākļiem. Jāpiezīmē, ka Lietuva ir adaptējusi Polijā un Vācijā izmantoto salizturīgās kārtas biezuma korekcijas praksi.



49. attēls. Sasaluma dziļuma karte, sastādīta izmantojot autoceļu meteoroloģisko staciju novērojumus.

Lietuvā sasaluma dziļuma mērījumi norisinās ar temperatūras profila zondi PT100, pirmie mērījumi tiek veikti virsmā, 7 cm un 20 cm dziļumā, tālāk līdz 2 m, sensori novietoti ar 0,3 m intervālu. Jāpiezīmē, ka mitruma izmaiņas netiek veiktas, līdz ar to nav zināma mitruma ietekme uz sasaluma dziļumu, kā arī nav uzstādīti faktiskā pacēluma sensori.

Citas valstis

Sala pacēluma un sasaluma dziļuma pētījumi ir veikti vairākās valstīs, kurās notiek sezonāla grunts virskārtas sasalšana. Vairākus pētījumus, saistībā ar dzelzceļa uzbērumu stabilitāti, ir veikuši Ķīnas zinātnieki. Atsevišķos pētījumos uzmanība ir pievērsta dzelzceļa uzbēruma sēšanās procesam, ko izraisījusi “sala cilāšana” (Hou et al. 2013). Dažos pētījumos uzmanība ir pievērsta tieši sala pacēluma mērījumiem dzelzceļa vai ceļa uzbērumā (Miao et al. 2019, Yu et al. 2016). Šajos pētījumos izmantotā metodika faktiski ir tāda pati kā šajā pētījumā izmantotā metodika. Yu et al. (2016) izmantoja nivelēšanu, lai noteiktu asfalta segas augstuma izmaiņas sala pacēluma ietekmē, bet grunts temperatūras profils tika noteikts, izmantojot termistoru kabeli, kas sniedzās līdz pat 15m dziļumam. Temperatūras mērījumu veikšana līdz 15m dziļumam uzskatāma par nelietderīgu, jo grunts sasalšanas dziļums apskatītajā teritorijā bija vairākas reizes mazāks. Miao et al. (2019) sala pacēluma novērtēšanai izmantoja iekārtas, kas līdzīgas šajā pētījumā izmantotajam ekstenciometram. Pēc būtības iekārta darbojas tāpat kā Zviedrijas nacionālajā ceļu un transporta pētījumu institūtā izstrādātā iekārta STOR96

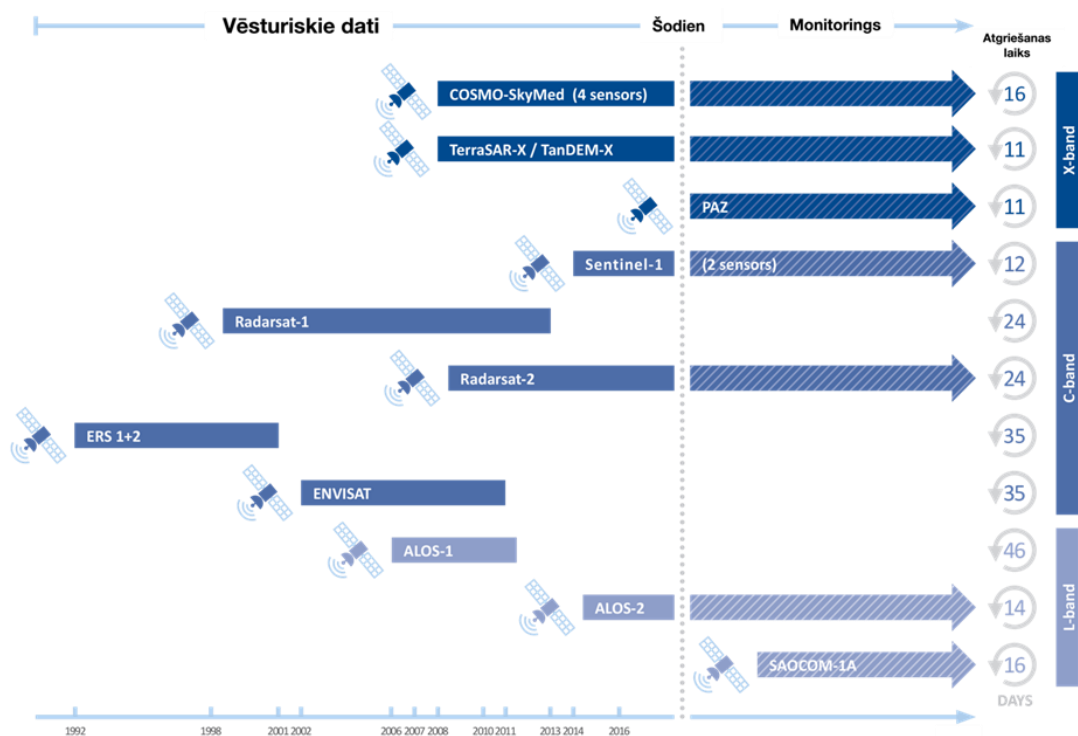
(Hermansson 2004). Hermansson (2004) līdzīgu sala pacēluma mērījumu veica 1999. gadā, ievietojot iekārtu STOER96 zem ceļa. Miao et al. (2019) pētījumā grunts pacēlums tika mērīts relatīvi trīs dažādiem dziļumiem, tomēr tas saistāms ar to, ka pētītajā reģionā sala pacēluma dziļums potenciāli ir liels un ir lietderīgi mērīt detalizēti grunts sasalšanas dziļuma izmaiņas. Temperatūras mērījumi arī šajā pētījumā tika veikti, izmantojot termistoru kabeli.

Nivelēšana sala pacēlumu mērīšanai ir tikusi izmantota arī vairākās rietumu valstīs. Tā piemēram Berthling et al. (2001) noteica sala pacēlumu Norvēģijas dienvidos kādā ielejā, veicot lielu akmeņu nivelēšanu 4 gadu intervālā. Vikstrom (2007) veica nivelēšanu 2 km garam ceļa posmam Zviedrijā. Šajā pētījumā papildus nivelēšanai tika veikti arī grunts temperatūras un porūdens spiediena mērījumi. Par nivelēšanas atbalsta punktu tika izmantots 4 m dziļumā noenkurots stienis. Tāpat nivelēšana tika veikta 4 atsevišķiem stieņiem ar atšķirīgu noenkurošanas dziļumu (50cm, 100cm, 150cm, 200cm). Šādā veidā tika noteikts sala pacēlums relatīvi dažādiem dziļumiem.

Sala pacēluma mērījumi ir tikuši veikti, arī pielietojot komplicētākas iekārtas. Tā piemēram Korshunov et al. noteica sala pacēlumu, ievietojot gruntī magnētiskus objektus ik pa 30 cm mērījumu vietā aptuveni 20 km attālumā no Arhangaļskas. Blakus tika ierīkots urbums, kurā tika mērītas magnētiskā lauka izmaiņas. Paceļoties grunts virskārtai, magnētiskie objekti maina savu savstarpējo attālumu, kā rezultātā mainās nomērītais magnētiskais lauks. Veicot iepriekšēju metodes kalibrāciju laboratorijā, pētniekiem izdevās noteikt sala pacēluma lielumu.

11. “SAR” SATELĪTU SISTĒMAS

Satelītu sistēmas tiek plaši izmantotas Zemes reljefa analīzē. Mūsdienās ir pieejamas tālīzpētes platformas (50.att.), kas sniedz dažāda veida datus – aerofoto ainas, laika apstākļu novērtējumus, reljefa mainību. Starp satelītu sistēmām ir pieejamas platformas ar SAR (synthetic aperture radar) sensoriem, kas tiek izmantoti, lai novērtētu temporālas izmaiņas reljefā.

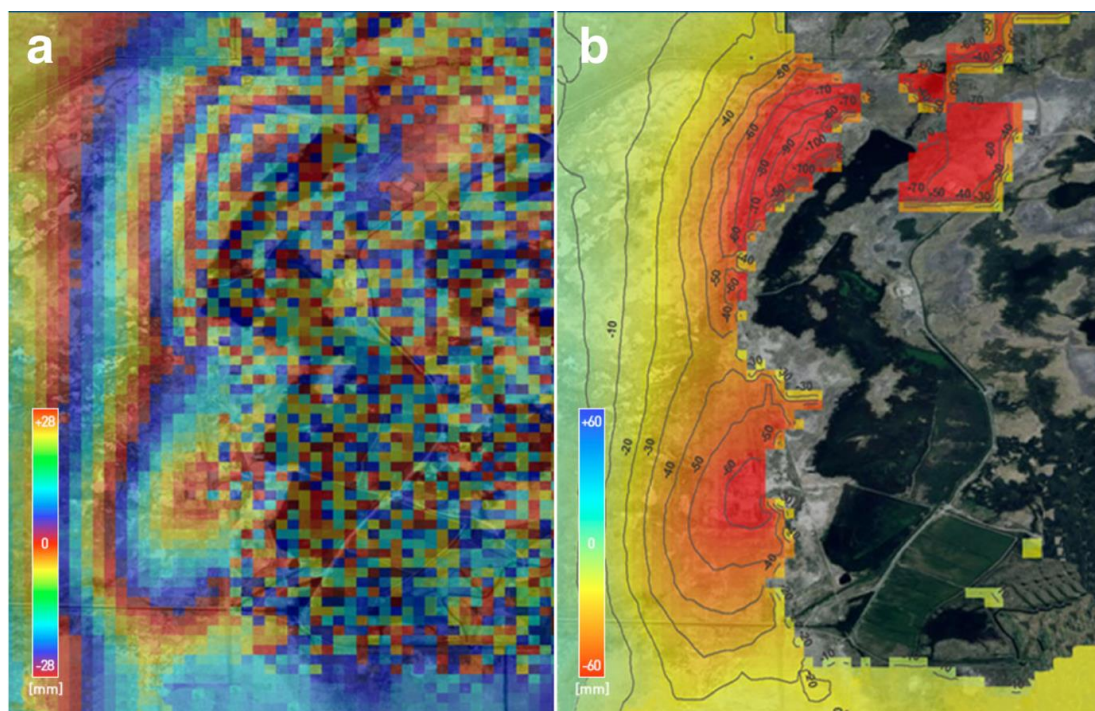


50.attēls. SAR satelītu sistēmas (pārtulkots no TRE Altamira, 2020).

SAR sensors ir bāzēti uz radara platformas, kas darbojas mikroviļņu spektra daļā. SAR satelīta sensors nepārtraukti izstaro radara signālu, kas ir vērsts pret Zemes virsmu. Ņemot vērā sensora uzbūves specifiku, sensors atrodas nelielā leņķī pret skenējošo virsmu, tādējādi nodrošinot lielāku skenēšanas zonu. Šis leņķis ir atšķirīgs dažādām satelītu platformām un svārstās vērtībās no 20 ° līdz 50 ° (Banner, Ahern 2014). Leņķis nav statisks un tiek mainīts skenēšanas laikā, lai radara izstarojumu pielāgotu kalnainam reljefam.

Radara signālus raksturo divas pamatīpašības: amplitūda un fāze. Amplitūda ir saistīta ar atpakaļ uztvertā signāla enerģiju. Metāliem un cietiem priekšmetiem (dabiskiem vai mākslīgiem) ir raksturīgi atstarot lielu daudzumu no signāla enerģijas, un tāpēc atstarotā signāla amplitūda ir augsta. Signālu amplitūdas raksturlielumus klasiski vizualizē melnbaltā krāsā.

Fāze ir saistīta ar attālumu no sensora līdz mērķim. Tieši šo radara signāla īpašību izmanto, lai novērtētu pārvietojumu, pielietojot interferometrisko analīzi.



51.attēls. SAR satelītu rezultāti. A – satelīta interferograma, B – noteikta pārvietojuma karte (TRE Altamira 2020).

Interferometriskās analīzes būtība ir divu pārlidojumu salīdzināšana – tiek ņemta vērā fāzes vērtība katrā pārlidojumā un tiek aprēķinātas fāzes nobīdes, kas pēc tam tiek pārrēķinātas uz pārvietojumiem milimetros (51. att.). Ņemot vērā to, ka SAR radars darbojas mikroviļņu elektromagnētiskā spektra daļā, tad, analizējot atstaroto signāla fāzi, ir iespējams precīzi noteikt relatīvo attālumu katram ieskenētajam pikselim. Metodes trūkums ir šaurais analīzes logs, jo ir īss viļņa garums, līdz ar to pārvietojuma fiksācija var tikt noteikta, ņemot vērā šo ierobežojumu. Šī analīzes loga robežu vērtības var atšķirties starp dažādām sensoru platformām, bet vidēji starp visām platformām maksimālās pārvietojuma vērtības, kuras ir iespējams noteikt starp divām interferogramām ir 56 mm (Massonnet, Feigl 1995). Minimāls pārvietojums, kādu ir iespējams aprēķināt, izmantojot SAR satelītu datus ir 2 – 3 mm. Ja ir nepieciešams noteikt lielākus pārvietojumus par 56 mm, tad datu analīzē ieteicams izmantot papildus attēlus, kas ir iegūti starp diviem pārlidojumiem. Veicot interferometrisku analīzi, ir jānovērtē datu precizitāte, un iegūtajiem satelītu mērījumiem ir nepieciešams ieviest atmosfēras korekcijas. Katrai satelītu sistēmai ir savi rīki un algoritmi, kā tas tiek darīts, bet universāla pieeja ir izmantot ESA rīku SNAP (ESA 2020), kas apvieno visas satelītu sistēmas un ļauj vienlaicīgi analizēt datus no vairākiem un dažādiem sensoriem. Jāmin, ka programma tiek izplatīta par brīvu un tai tiek sniegts liels atbalsts no zinātnieku puses.

Uz doto brīdi pastāv 7 aktīvas SAR sistēmas. Ir iespējams iegūt vēsturiskus datus vēl no četrām sistēmām, bet jāsecina, ka vecāko paaudžu sistēmām ir bijis ilgs atgriešanās laiks un zema izšķirtspēja (skat. 50. attēlu). Aktīvo satelītu sistēmu apkopojums veikts 11.1.tabulā.

11.1. tabula. SAR satelītu sistēmu salīdzinājums

Satelītu sistēma	Satelītu skaits	Atgriešanās laiks, dnn	Izšķirtspēja	Īpašnieks	Datu pieejamība	Aptuvenas cenas
Cosmo-SkyMed	4	16	No 1 m līdz 100 m	Italian Space Agency	Komerčiāli	5700 EUR par 10 x10 km ar 1 x 1 m izšķirtspēju
TerraSAR - X/TanDEM-X	1	11	No 1 m līdz 16 m	German Aerospace Center	Komerčiāli	5625 USD par 10 x 5 km ar 1 x 1 m izšķirtspēju
PAZ	1	11	No 1 m līdz 15 m	Hisdesat	Komerčiāli	5625 USD par 10 x 5 km ar 1 x 1 m izšķirtspēju
Sentinel-1	2	12	No 5 m līdz 100 m	European Space Agency	Publiski pieejami	Brīvi pieejami dati
Radarsat-2	1	24	No 1 m līdz 100 m	Canadian Space Agency	Komerčiāli	6000 USD par 18 km platu joslu (garums variē, atkarībā no izvēlēta skenēšanas leņķa) ar 1 x 1 m izšķirtspēju
ALOS-2	1	14	No 1 m līdz 100 m	JAXA	Komerčiāli	~4650 EUR par 25 x 25 km ar 3 x 1 m izšķirtspēju
SAOCO M-1A	1	16	No 7 m līdz 100 m	Argentinas Space Agency	Komerčiāli	3300 USD par 40 x 74 km ar 10 x 10 m izšķirtspēju

Visas satelītu sistēmas galvenokārt atšķiras ar satelītu skaitu, atgriešanās laiku un izšķirtspēju. Visas sistēmas piedāvā dažādus komerciālus produktus analīzes veikšanai, kā arī ir iespējams veikt pasūtījumus konkrētai teritorijai. Tomēr piedāvātie produkti atšķiras ar izšķirtspēju. Liela daļa no augstās izšķirtspējas produktiem ir pieejama tikai uz pasūtījuma bāzes, proti satelīta orbīta tiek piekorigēta, lai nākamajā pārlidojumā tiktu uzņemta konkrēta teritorija un tiktu iegūti augstākās izšķirtspējas dati. Bez specializētiem pasūtījumiem, sistēmu pārvaldības aģentūras piedāvā tikai zemas izšķirtspējas datus (20 un 100 m vienā pikselī). Lai veiktu pārvietojuma analīzi ir nepieciešams veikt atkārtotos pārlidojumus, līdz ar to, pasūtījums uz augstās izšķirtspējas datiem ir jāveic vairākkārt. Eiropas kosmosa aģentūra (ESA) piedāvā

publiski pieejamus datus ar izšķirtspējām no 5 m līdz 20 m. Augstās izšķirtspējas dati nav pieejami visām teritorijām un teritoriju izvēli veic pati ESA. Galvenokārt, teritoriju izvēle augstās izšķirtspējas datiem tiek novirzītā okeanogrāfiskiem pētījumiem. Analizējot pieejamos publiskus datus, tika secināts, ka 5 m izšķirtspējas dati Latvijas teritorijai šogad nav iegūti.

Interferometriskās analīzes rezultāts ir balstīts uz datu ticamības metrikas – saskaņotības (coherence) metodiku. Metrika norāda uz to, vai konkrētas analīzes rezultāti ir ticami un starp diviem pārlidojumiem teritorijas pārvietojums atrodas atļautajās vērtībās (< 56 mm). Ja pārvietojuma vērtības ir lielākas, tad saskaņotības vērtība ir zema, savukārt, ja pārvietojums ir bijis mazāks par 56 mm, metrikas vērtība ir tuvu 1. Veicot pētījumus, saistībā ar sniega segu izpētes teritorijās, tika konstatēts, ka ziemas periodā saskaņotības vērtība starp pārlidojumiem ir tuvu 0, kas norāda uz to, ka sniega sega ir traucējoša interferometriskās analīzes veikšanai (Wickramanayake et al. 2011). Tika secināts, ka vasarā saskaņotības vērtība samazinās blīvi apbūvētās teritorijās. Tas tiek skaidrots ar veģetācijas uzplaukumu pilsētās. Teritorijās ar nelielu veģetācijas īpatsvaru, saskaņotības vērtība paliek augsta pat salīdzinot interferogrammas, kas ir iegūtas ar gada nobīdi, savukārt mežainā apvidū tika novērota saskaņotības vērtības samazināšanās gada griezumā, kas tiek skaidrota ar būtiskām veģetācijas izmaiņām.

Interferometriskās analīzes izmantošanai, sala pacēluma noteikšanai, ir sekojoši būtiski apgrūtinājumi:

1) Lielākai daļai satelītu sistēmu ir pieejami tikai zemas izšķirtspējas produkti (> 5 m vienā pikselī). Lai saņemtu augstākās izšķirtspējas produktus ir nepieciešams veikt individuālus pasūtījumus, kuru rezultātā tiek koriģēta satelīta orbīta un veikta teritorijas skenēšana, izmantojot augstās izšķirtspējas režīmu. Cenu piedāvājumi šādai skenēšanai ir atkarīgi no apjoma, kurš tiek realizēts vienā pārlidojumā. Zemas izšķirtspējas dati nav pietiekami, lai veiktu sala pacēluma novērojumus ceļa klātnei, jo pikseļa izmērs ir pārāk liels, lai nodrošinātu kvalitatīvu analīzi, salīdzinājumā ar ceļā klātnes platumu.

2) Iepriekš veiktie pētījumi ir apstiprinājuši hipotēzi, ka, temperatūrai sasniedzot 0 grādu atzīmi, tiek novērots teritorijas pacēlums. Savukārt, ja temperatūra īsā laika posmā sāk celties, teritorija atgriežas iepriekšējā stāvoklī. Satelītu pārlidojuma laiks ir pietiekami ilgs, lai pacēluma epizodes cikls pilnībā iekļautos laikā, kamēr satelīts veic atkārtoto pārlidojumu. Līdz ar to, šādas epizodes netiks atspoguļotas datos. Ir iespējams kombinēt interferogrammas, kas ir iegūtas ar dažādām satelītu sistēmām, bet līdz ar to, pieaug rezultātu kļūda, jo satelītu sistēmām ir dažādas orbītas, kā arī sensora leņķis pret Zemes virsmu. Šīs kombinācijas prasītu arī papildus finansiālus ieguldījumus, jo ir jāveic vairāki datu pasūtījumi.

3) Kā tika secināts, sniega segas esamība izpētes teritorijā samazina saskaņotības vērtības, līdz ar to, analīzes rezultāts kļūst mazticams. Pirms analīzes veikšanas ir iespējams

veikt papildus sniega tīrīšanu no ceļa klātnes, lai palielinātu saskaņotības vērtības. Tomēr jāsecina, ka saskaņotības vērtība tiek aprēķināta visai satelīta ainai un tiek aprēķināts vidējais saskaņotības novērtējums. Ceļa klātnes tīrīšana nebūtiski palielinātu šo vērtību, līdz ar to, kopējais saskaņotības novērtējums paliks zems un dati nebūs pietiekami ticami.

SAR satelītu izmantošanai ceļu klātnes analīzē ir liels potenciāls. Attīstoties jaunām satelītu platformām, plašām teritorijām būtu iespējams iegūt kvalitatīvus un ticamus datus sala pacēluma analīzei. Uz doto brīdi tas ir iespējams tikai ieguldot lielus finansiālus resursus. Interferometriskā analīze pašlaik nesniedz 100% ticamu rezultātu, kā arī pastāv liels risks datu saskaņotības novērtēšanā.

Šajā nodaļā izmantotā literatūra

- Aleksei A. Korshunov, Sergei V. Churkini and Alexander L. Nevzorov. In-situ measurements of frost penetration and frost heave by automatic monitoring system. Japanese Geotechnical Society Special Publication. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Banner, A.V., Ahern, F.J. 2014. Incidence angle effectson the interpretability of forest clearcuts using airborne C-HH SAR imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21(1).
- ESA 2020. SNAP – ESA Sentinel Application Platform v7.0.0. <http://step.esa.int/>.
- Galvonaite, A., Valiukas, D., Kilpys, J., Kitriene, Z., Misuniene, M. 2013. *Lietuvos Klimato Atlasas. Dirvožemio įšalas*. Lithuanian Hydrometeorological Service under the Ministry of Environment: Vilnius, Lithuania. Pieejams - <https://www.geoportal.lt/map/#>
- Hermansson, A. 2004 Laboratory and field testing on rate of frost heave versus heat extraction *Cold Regions Science and Technology* 38, 137– 151
- Ivar Berthling, Trond Eiken and Johan Ludvig Sollid Frost Heave and Thaw Consolidation of Ploughing Boulders in a Mid-Alpine Environment, Finse, Southern Norway PERMAFROST AND PERIGLACIAL PROCESSES Permafrost Periglac. Process. 12: 165–177 (2001) DOI: 10.1002/ppp.367
- Yu, Fan, Qi, Jilin, Lai, Yuanming, Sivasithamparam, Nallathamby, Yao, Xiaoliang, Zhang, Mingyi, Liu, Yongzhi, Wu, Guilong, Typical embankment settlement/heave patterns of the Qinghai–Tibet highway in permafrost regions: Formation and evolution, *Engineering Geology* (2016), doi: 10.1016/j.enggeo.2016.10.013
- James et al. 2017. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps fo.0r ground control and directly georeferenced surveys, *Earth Surf. Proc. Landforms*, doi:10.1002/esp.4125
- Jinfang Hou, Rongli Wang, Jun Feng, 2013. Field Test Study on Frost-Heave of Subgrade in Seasonal Frozen Region along Haerbin-Dalian Passenger Dedicate Line. *Advanced Materials Research Vols. 671-674* pp 45-49
- Kaal, T., Jentson, M. 2011. Muldkehade lābikūlmumise, ilmastikutingimuste ja erinevate teede kandevōime seoste uuringuteks vajalike seadmete – Percostation mōōtejaam ja 6 vertikaalset temperatuuriandurit – ostmine ja paigaldamine. 43 pp.
- Massonnet, D., Feigl, K.L. 1995. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophysical Research Letters*, 22(12).
- Q. Miao, F. Niu, Z. Lin, et al., Comparing frost heave characteristics in cut and embankment sections along a high-speed railway in seasonally frozen ground of Northeast China, *Cold Regions Science and Technology*(2018), <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102921>

- Vaitkus, A., Gražulyte, J., Skrodenis, E., Kravcovas, I. 2016. Design of Frost Resistant Pavement Structure Based on Road Weather Station (RWSs) Data. *Sustainability*.8, 1328. 1-13.
- Vikstrom, L. 2007. Comparison between measured and calculated frost heave and frost depth.
- Wickramanayake, A., Hobbs, S., Henschel, M., Sjoberg, J., Lindgren, T., Fernando, P. 2011. SAR interferometry with seasonally changing snow cover. Proc. 'Fringe 2011 Workshop', Frascati, Italy, 19-23 September 2011.

1. Pielikums

Tabula 1. Nivelēšanas punktu mērījumi laukā

Nosaukums	Koordinātas (WGS84)	Nivelēšanas etapi							
		9.11.19	22.11.19	28.11.19	05.12.19	03.01.20	17.01.20	04.02.20	20.03.20
Point 1	24.9686951346 57.1694273106 145.345284	125.040	125.037	125.039	125.040	125.043	125,041	125,04	125,044
Point 2	24.9685832392 57.1695231887 145.256192	124.938	124.937	124.938	124.939	124.943	124,941	124,941	124,946
Point 3	24.9684776521 57.1696202365 145.166308	124.839	124.837	124.839	124.840	124.847	124,845	124,844	124,85
Point 4	24.9683865979 57.1695898729 144.958456	124.612	124.611	124.612	124.613	124.615	124,612	124,611	124,615
Point 5	24.9684911987 57.1694943156 145.039136	124.708	124.706	124.707	124.708	124.709	124,707	124,706	124,711
Point 6	24.96864424 57.1693878654 145.135028	124.789	124.786	124.787	124.788	124.789	124,787	124,786	124,792
Point 7	24.9687560889 57.1694728872 145.463364	125.134	125.133	125.134	125.134	125.136	125,134	125,133	125,138
Point 8	24.9686769784 57.16956057 145.338232	124.993	124.992	124.992	124.993	124.995	124,994	124,994	124,997
Point 9	24.9685661109 57.1696529718 145.109496	124.765	124.764	124.766	124.766	124.771	124,769	124,77	124,773
Point 10	24.968707229 57.1696704626 145.173264	124.819	124.817	124.819	124.820	124.823	124,822	124,821	124,827
Point 11	24.9687900581 57.1695925904 145.32734	124.995	124.993	124.995	124.996	124.999	124,997	124,997	125,004
Point 12	24.9688606998 57.1695338023 145.536992	125.223	125.221	125.222	125.222	125.224	125,222	125,221	125,225
Point 13	24.9689468018 57.1695690506 145.684192	125.363	125.361	125.362	125.363	125.365	125,363	125,362	125,365
Point 14	24.9688530951 57.1696482242 145.342008	125.032	125.031	125.032	125.033	125.035	125,033	125,032	125,037
Point 15	24.9687655515 57.1697415225 145.295	124.996	124.995	124.996	124.997	125.000	124,997	124,997	125,002
Point 16	24.9689145661 57.1697857335 145.677188	125.374	125.371	125.373	125.374	125.377	125,374	125,377	125,381
Point 17	24.9690085724 57.1697042206 145.694692	125.383	125.382	125.384	125.384	125.388	125,386	125,386	125,394
Point 18	24.9690743937 57.1696412217 145.80758	125.516	125.514	125.517	125.518	125.520	125,518	125,517	125,523
Point 19	24.9691563338 57.1694001725 146.257632	125.944	125.943	125.945	125.945	125.945	125,944	125,944	125,945
Point 20	24.969276269 57.1694439725 146.267092	125.947	125.948	125.950	125.948	125.949	125,947	125,948	125,949
Point 21	24.9693056073 57.1694266225 146.137128	125.799	125.801	125.803	125.802	125.802	125,8	125,785	125,787
Point 22	24.9693164265 57.1694838913 145.922124	125.600	125.603	125.603	125.602	125.604	125,599	125,604	125,601
Point 23	24.969452498 57.1695186471 145.989436	125.649	125.651	125.651	125.652	125.654	125,65	125,65	125,654

Tabula 2. Nivelēšanas punktu mērījumi uz ceļa

Nosaukums	Koordinātas (WGS84)	Nivelēšanas etapi					
		05.12.19	17.12.19	03.01.19	17.01.20	04.02.20	20.03.20
1	24.9660805053 57.1682021308 144.245653846	125.021	125.021	125.019	125,021	125,021	125,021
12	24.9660301838 57.1682664871 144.311731915	124.845	124.844	124.845	124,845	124,845	124,845
11	24.9665346563 57.1683930523 145.33014	125.064	125.063	125.063	125,063	125,063	125,062
2	24.9665856183 57.1683289389 145.51572	125.249	125.250	125.249	125,249	125,249	125,249
3	24.9670918263 57.1684723693 145.702513333	125.430	125.430	125.430	125,43	125,43	125,429
10	24.9670336971 57.1685345283 145.48908	125.234	125.234	125.233	125,234	125,234	125,233
9	24.9675018394 57.1686821227 145.59602	125.361	125.361	125.360	125,361	125,361	125,361
4	24.9675680966 57.1686230451 145.836333333	125.558	125.557	125.558	125,558	125,558	125,557
5	24.9680632172 57.1687955089 145.94536	125.715	125.713	125.714	125,714	125,714	125,713
8	24.9679926814 57.1688546625 145.7466	125.511	125.510	125.509	125,51	125,51	125,51
7	24.9684014357 57.1690094589 145.956133333	125.709	125.708	125.708	125,707	125,706	125,707
6	24.9684793731 57.1689543017 146.116493333	125.914	125.912	125.912	125,913	125,91	125,912
13	24.9689197965 57.1691382443 146.297246667	126.038	126.038	126.037	126,036	126,036	126,038
22	24.9688437637 57.1691947101 146.12612	125.828	125.827	125.828	125,826	125,826	125,827
21	24.9691732932 57.1693722711 146.059826667	125.808	125.808	125.808	125,806	125,805	125,808
14	24.9692837948 57.1693030762 146.360613333	126.079	126.078	126.078	126,076	126,077	126,078
15	24.9697007873 57.1695065872 146.265346667	125.915	125.914	125.916	125,912	125,913	125,914
20	24.9696143503 57.1695577461 146.03042	125.714	125.713	125.712	125,71	125,713	125,713
19	24.9701882398 57.1698685392 145.584366667	125.303	125.302	125.303	125,3	125,3	125,301
18	24.9705624523 57.1700911587 145.267266667	124.948	124.948	124.948	124,945	124,946	124,946
17	24.9706605931 57.1700455025 145.44768	125.160	125.161	125.160	125,158	125,158	126,162
16	24.9701668029 57.1697223587 145.98184	125.693	125.693	125.694	125,691	125,691	125,694