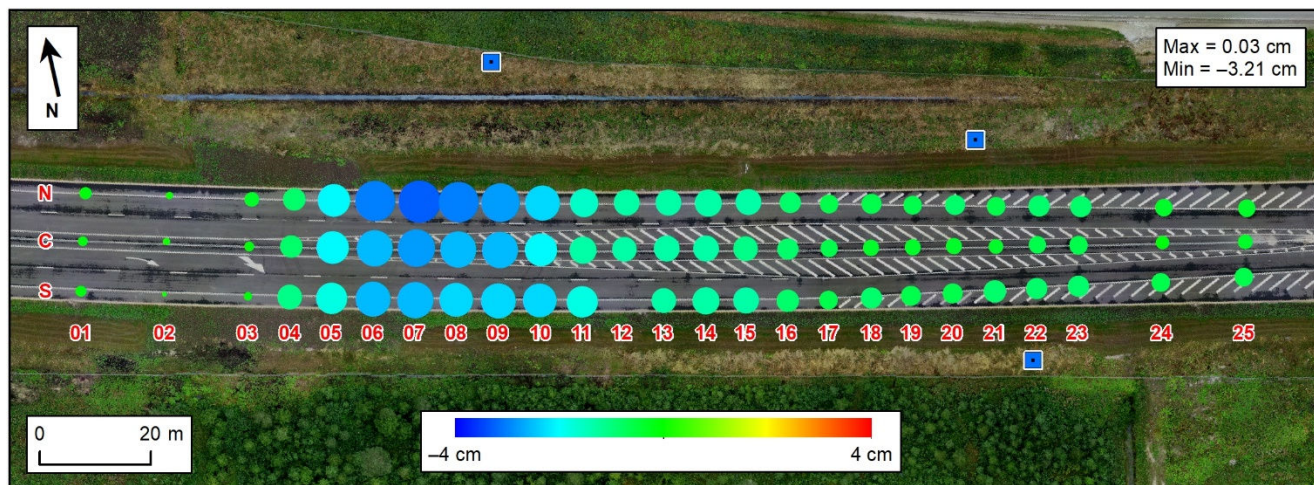


TAL TECH

Võõbu tee-ehitusliku katselõigu geodeetilise monitooringu ja geotehnilise analüüsiga seotud uuringud

Lõpparuanne



Tallinn 2021

Võõbu tee-ehitusliku katselõigu geodeetilise monitooringu ja geotehnilise analüüsiga seotud uuringud

Lõpparuanne

Tellija:

GRK Infra AS

Aadress: Ringtee 25, 50105 Tartu

Kontaktisik: Priit Paabo (e-post: priit@estroad.ee)

Teostaja:

Tallinna Tehnikaülikool (TalTech)

Ehituse ja Arhitektuuri instituudi teedehituse ja geodeesia uurimisrühm

Aadress: Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Kontaktisik: Artu Ellmann (e-post: artu.ellmann@taltech.ee)

Uuringumeeskond:

Sven Sillamäe – TalTech projektijuht, aruande autor;

Artu Ellmann PhD – TalTech professor, lepingu vastutav täitja, aruande kaasautor;

Sander Varbla – TalTech doktorant, geodeetilised mõõtmised;

OÜ Geotehnika Inseneribüroo G.I.B. – 2019. a. ehitusgeoloogilised uuringud.

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Ülevaade	5
2. Eelkoormatud turba vajumise analüüs.....	9
2.1. Konsolideerumise ajaline kulg	9
2.2. Koormamise vajalik suurus ja konsolideerumise ajaline pikkus	15
2.3. Arvutuslik vajum võrrelduna mõõdetuga.....	17
2.4. Vajumid ristlõikes	21
3. Ehitusgeoloogilised mõõtmised ja vahekokkuvõte enne teekatendi ehitamist.....	24
4. Teekatendi rajamine	27
5. Vajumid tee kasutamise perioodi jooksul.....	30
Kokkuvõte.....	34

Sissejuhatus

Üheks komponendiks tee-ehituse jalajälje vähendamiseks on minimeerida vajaminevate ehitusmaterjalide koguseid kasutades maksimaalselt juba kohapeal olevaid pinnaseid, isegi neid, mis on traditsiooniliselt ehituseks sobimatud, mille hulka kuulub ka turvas.

Olenevalt ehituse alla minevast piirkonnast võib olla võimatu vältida alasid, kus olemasolevaks pinnaseks on turvas (Eesti territooriumi pindalast moodustavad turbalasundiga kaetud alad umbes 22%). Kuna turvas on tugevalt kokkusurutav, nõrk ja ajas lagunev pinnas, mis teeb sellele ehitamise problemaatiliseks nii lühi- kui pikaajalises perspektiivis, siis reeglina nähakse ette selle väljakaeve ja asendamine paremakvaliteedilise materjaliga.

Samas on turbaalad väga efektiivsed süsiniku neelajad, mistõttu varem kuivendatud märgalasid ka taastatakse ning mistõttu on ebasoovitav neid teedehituse otstarbeks uuesti kuivendada. Kui turvast kasutatakse teedehituses aluspinnasena seda asendamata ja ümbritsevat ala kuivendamata, on tegemist keskkonna seisukohast lihtsustatult öeldes topelt kasuliku tegevusega, mistõttu on see maailma keskkonnaeesmärke silmas pidades väga huvipakkuv võimalus.

Aastal 2015 (ehitus lõpetati oktoobris) ehitati riigiteel nr 2 Tallinn – Tartu – Võru – Luhamaa km 67,067 – 67,256 viiest sektsioonist koosnev 1,9...3,6 m paksusele turbapinnasele katselõik. 14. augustil 2020 avati liiklusele Kose – Võõbu teelõik, mille koosseisu jäi ka vaadeldav katselõik. Käesolev aruanne annab ülevaate katselõigu järelmonitooringust nii enne kui pärast teelõigu liiklusele avamist.

1. Ülevaade

Katselõigu projekteerimist, ehitamist, ehitusaegset monitooringut ning osaliselt ka järelmonitooringuid on kajastatud järgmistes aruannetes ja artiklites, mistõttu detailset ülevaadet katselõigu nendest osadest siinkohal ei anta (edaspidi on alljärgnevatele töö sisus viidatud kui allikad vastavalt nende nummerdamise järjekorrale):

1. E263 Tallinn – Tartu – Luhamaa km 67-68 Kose – Võõbu katselõik. Lõpparuanne. Skepast&Puhkim, Tallinn 2016;
2. Võõbu katselõigu ülekoormuse eemaldamisega seonduvate deformatsioonide geodeetilise monitooringu aruanne. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn 2018;
3. Forsman, J., Dettenborn, T., Skepast, P., Mets, M., Olep, M., Ellmann, A., Vallas, I., Tõnts, T., Kontson, K. (2016). Road Embankment Test Sections over Soft Peat Layer, Võõbu, Estonia. Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference. Lithuania, 22–24 September 2016. ISSN 2424-5968 / ISBN 978-609-457-957-8;
4. Dettenborn, T., Forsman, J., Skepast, P., Ellmann, A., Olep, M., Vallas, I., Tõnts, T., Kontson, K. (2017). Challenges and solutions in construction of Tallinn-Tartu highway over peat deposits. In: The 29th Baltic Road Conference, 27-30 August 2017 (1–10). Tallinn, Estonia : BALTIC ROAD ASSOCIATION;
5. Forsman, J., Dettenborn, T., Skepast, P., Mets, M., Olep, M., Ellmann, A., Vallas, I., Tõnts, T., Kontson, K. (2016). Full scale reinforced road embankment test sections over soft peat layer, Võõbu, Estonia. The 17th Nordic Geotechnical Meeting, Reykjavik Iceland, 25th - 28th of May 2016.

Lühikokkuvõtteks moodustub katselõik 5+1 sektsioonist, milles „1“ on võrdluseks tehtud massivahetus ning „5“ erinevate lahendustega turbapinnasele ehitatud 30 m pikkused katsesektsioonid:

1. sektsioon 1 – 1x sarrustav geotekstiil (foto 1):
 - a. turbalasundi paksus sektsiooni keskel 2,1 m;
 - b. keskmine veesisaldus enne töödega alustamist 669%;
 - c. muldkeha alaosasse paigaldati üks kiht kootud sarrustamise funktsiooni täitvat geotekstiili maksimaalse tõmbetugevusega 600/50 kN/m;
 - d. maksimaalne koormus turbakihi peal oli 97 kPa (vastab umbes 4,85 m muldkehale);
 - sellest 56 kPa muldkeha ja 41 kPa ülekoormus*;
2. sektsioon 2 – 2x sarrustav geotekstiil:
 - a. turbalasundi paksus sektsiooni keskel 2,4 m;
 - b. keskmine veesisaldus enne töödega alustamist 620%;
 - c. muldkeha alaosasse paigaldati kaks kihti kootud sarrustamise funktsiooni täitvat geotekstiili maksimaalse tõmbetugevusega alumine 400/50 kN/m ja ülemine 200/50 kN/m, mille omavaheline kaugus oli 0,5 m;
 - d. maksimaalne koormus turbakihi peal oli 76 kPa (vastab umbes 3,8 m muldkehale);
 - sellest 35 kPa muldkeha ja 41 kPa ülekoormus*;

3. sektsioon 3 – geokärg (foto 2):
 - a. turbalasundi paksus sektsiooni keskel 3,1 m;
 - b. keskmine veesisaldus enne töödega alustamist 695%;
 - c. muldkeha alaosasse paigaldati eraldav III-profiili geotekstiil, Tensar TriAx 160 geovõrk, mille peale ehitati ühesuunalist geovõrku Tensar RE560 kasutades 1 m kõrgune geokärje struktuur, mis täideti killustikuga fr 0/63 mm;
 - d. maksimaalne koormus turbakihi peal oli 79 kPa (vastab umbes 4 m muldkehale);
 - sellest 69 kPa muldkeha ja 10 kPa ülekoormus*;
4. sektsioon 4, kergkruus (fotod 3 ja 4):
 - a. turbalasundi paksus sektsiooni keskel 3,4 m;
 - b. keskmine veesisaldus enne töödega alustamist 690%;
 - c. muldkeha alaosasse paigaldati kootud sarrustamise funktsiooni täitev geotekstiil maksimaalse tõmbetugevusega 400/50 kN/m, servadesse ehitati umbes 1 m kõrgused permid, mille vahele paigaldati 1...1,5 m paksune kergkruusa (põletatud savi terasuurusega 10/20 mm) kiht, mis kaeti eraldava III-profiili geotekstiiliga;
 - d. maksimaalne koormus turbakihi peal oli 60 kPa (vastab umbes 4 m muldkehale);
 - sellest 44 kPa muldkeha ja 16 kPa ülekoormus*;
5. sektsioon 5, EPS (vahtpolüstüreen, fotod 5 ja 6):
 - a. turbalasundi paksus sektsiooni keskel 3,5 m;
 - b. keskmine veesisaldus enne töödega alustamist 660%;
 - c. muldkeha alaosasse paigaldati kootud sarrustamise funktsiooni täitev geotekstiil maksimaalse tõmbetugevusega 400/50 kN/m, 50 cm täitematerjali, mille peale EPS plokid (neli kihti, millest kõige alumine oli EPS 120 ja kolm pealmist EPS 200), mis eraldati ümbritsevast pinnasest geotekstiiliga. Plokkide peale paigaldati geomembraan (0,5 mm LLDPE), I-profiili geotekstiil ja 40x40 kN/m geovõrk;
 - d. maksimaalne koormus turbakihi peal oli 42 kPa (vastab umbes 2,1 m muldkehale);
 - sellest 12 kPa muldkeha ja 30 kPa ülekoormus*.

***Märkus:** andmed muldkeha ja ülekoormuse suurusest on allikates [1], [3] ja [5] igaühes erinevad, mistõttu ei ole kindlust, mis oli tegelik olukord. Allikates [1] ja [4] esitatud koormused on samad ning kuna need on viidatud allikatest uusimad, lisaks allikas [1] on katselõigu ametlik ja tellija poolt vastu võetud aruanne, siis eeldatakse, et nendes esitatud andmed on korrektsed.

Sektsioonide paigutus on antud joonisel 1, millelt on näha ka astmelised ülekoormused.



Fotod 1 ja 2. Geotekstiilide ja geokärje sektsioonid nende ehitamise ajal.



Fotod 3 ja 4. Kergkruusaga sektsioon selle ehitamise ajal (esiplaanil on geokärje sektsioon).



Fotod 5 ja 6. EPS sektsioon selle ehitamise ajal.



Joonis 1. Ülevaade ülekoormuse all seisvast katselõigust peale selle valmimist. Sektsioonide 1 → 5 paiknemine on suunaga Tartust Tallinna poole.

Katselõigu ehitamise ja monitoorimise ajatelg on olnud järgmine:

- katselõigu ehitamise algus: juuli 2015;
- muldkeha valmimine ja pindamine 02.10.15 peale mida jätkati ülekoormuse paigaldamisega;
- katselõigu ehitamise lõpp: 15.10.15, kui tehti geodeetiline mõõtmine ülekoormuse paigaldamise järgselt;
- geodeetiline monitoorimine peale katselõigu valmimist:
 - 30.10, 16.11, 30.11, 15.12 ja 29.12.15; 15.01, 29.01, 16.02, 29.01 ja 15.03.16;
 - vahemikus 29.03.16...27.09.16 mõõtmine kord kuus;
 - 04.06.18 mõõtmine vahetult enne ülekoormuse eemaldamist;
- ülekoormuse eemaldamine: 15.06.18, kui paljandunud pindamine mõõdeti geodeetiliselt;
- teekatend valmis: 07.08.20, kui asfaltkate mõõdeti geodeetiliselt;
- teelõik avati liiklusele: 14.08.20;
 - geodeetilisi mõõtmisi tehti seejärel veel kuupäevadel 14.11.20, 12.06.21 ja 02.10.21, mil teelõik on olnud liikluse poolt kasutatav.

Enne teekatendi ehitamisega alustamist teostati 09. ja 10.10.19 katselõigul geotehnilised uuringud (AS Geotehnika Inseneribroo G.I.B töö nr 2978), mille põhjal otsustati, et see sobib kasutamiseks uue tee muldkehana. Sama järeldus tehti ka aastal 2016 avaldatud katselõigu lõpparuandes (allikas [1]).

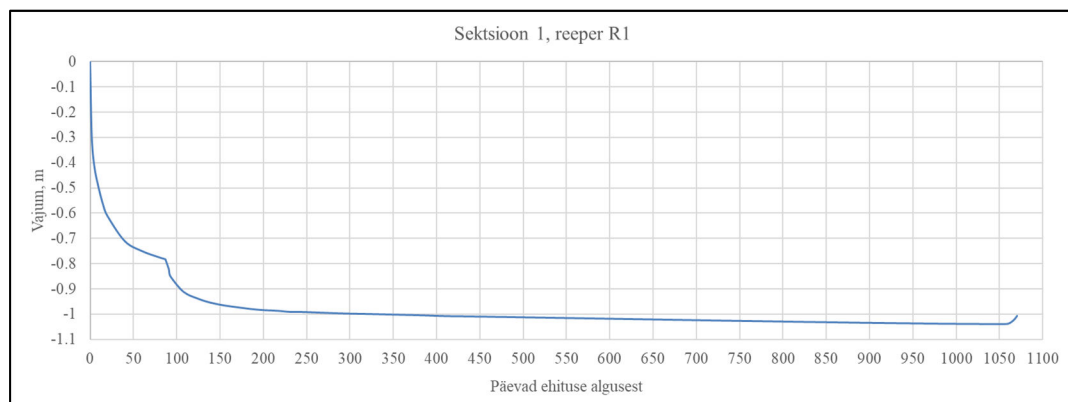
2. Eelkoormatud turba vajumise analüüs

2.1. Konsolideerumise ajaline kulg

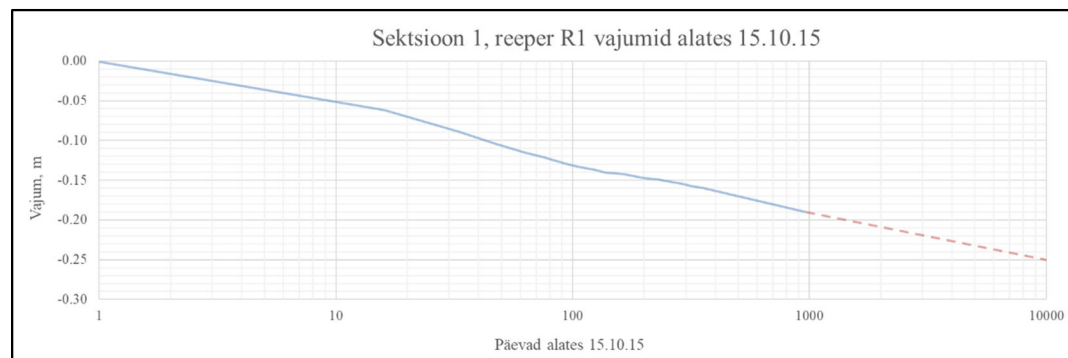
Katselõigu vajumeid monitooriti alates ehituse algusest kuni ülekoormuse eemaldamiseni, mille osas antakse alljärgnevalt ülevaade tuginedes sektsiooni keskel olevale turbapinnasele toetuvale reeperile.

Sektsioon 1 (1xGTX), reeper „R1“, joonis 2:

- koguvajum 1,04 m;
- turba kihipaksus algselt 2,1 m, millest vajum moodustab 50%;
- tõus peale ülekoormuse eemaldamist 0,033 m (3,3 cm);
- joonisel 3 on esitatud logaritmilisel graafikul vajumid alates kuupäevast 15.10.15 (ehk esimene mõõtmine peale ülekoormuse paigaldamist), kus punase katkendjoonega on trendi pikendatud 10'000 päevani ehk aastani 2042, mille järgi oleks oodatav vajumise lisandumine ca 6 cm (ülekoormusega koormatud muldkeha vajum kokku 25 cm) eeldusel, et tingimused jäävad samaks.



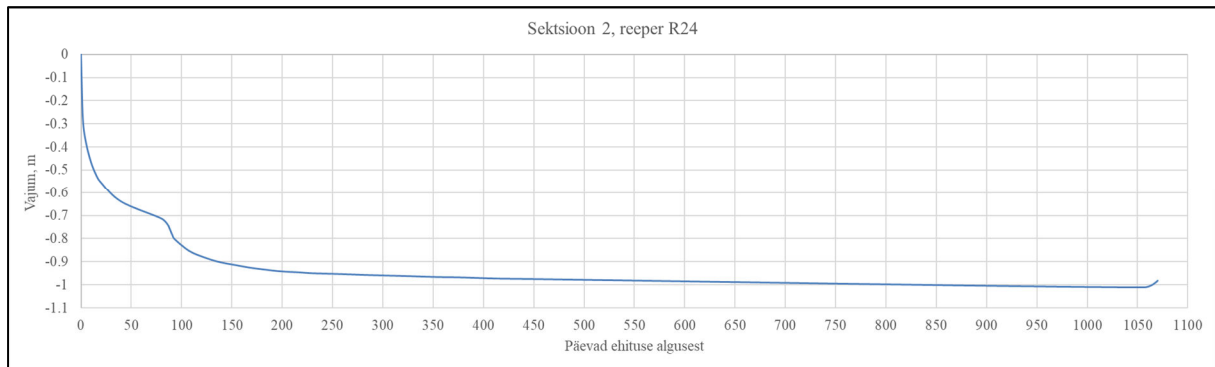
Joonis 2. Sektsiooni 1 keskel asunud turbareeperi „R1“ vajumigraafik.



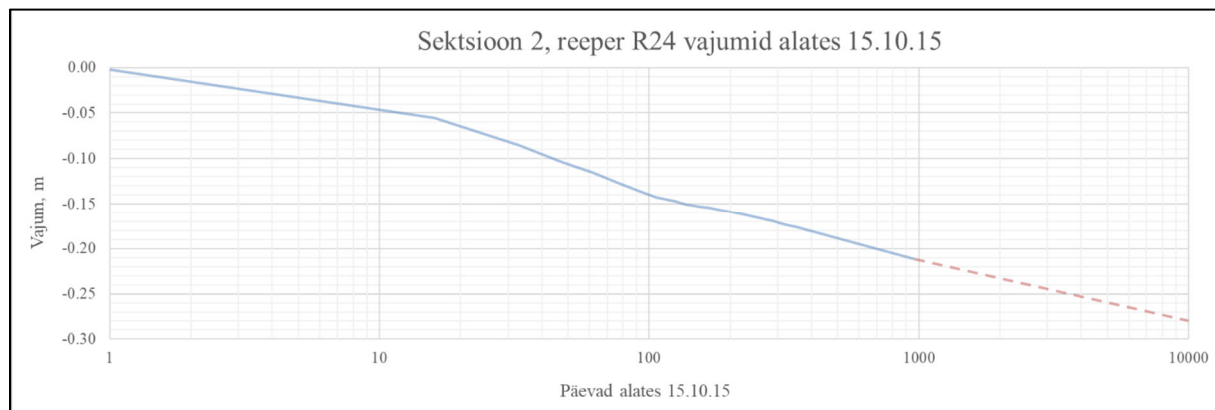
Joonis 3. R1 konsolideerumine alates kuupäevast 15.10.15. Punane katkendjoon on prognoos/tuletus eelnevate mõõteandmete põhjal.

Sektsioon 2 (2xGTX), reeper „R24“, joonis 4:

- koguvajum 1,01 m;
- turba kihipaksus algselt 2,4 m, millest vajum moodustab 42%;
- tõus peale ülekoormuse eemaldamist 0,029 m (2,9 cm);
- joonise 5 alusel lisandunuks aastaks 2042 mõõdetud vajumile veel ca 7 cm (ülekoormusega koormatud muldkeha vajum kokku 28 cm).



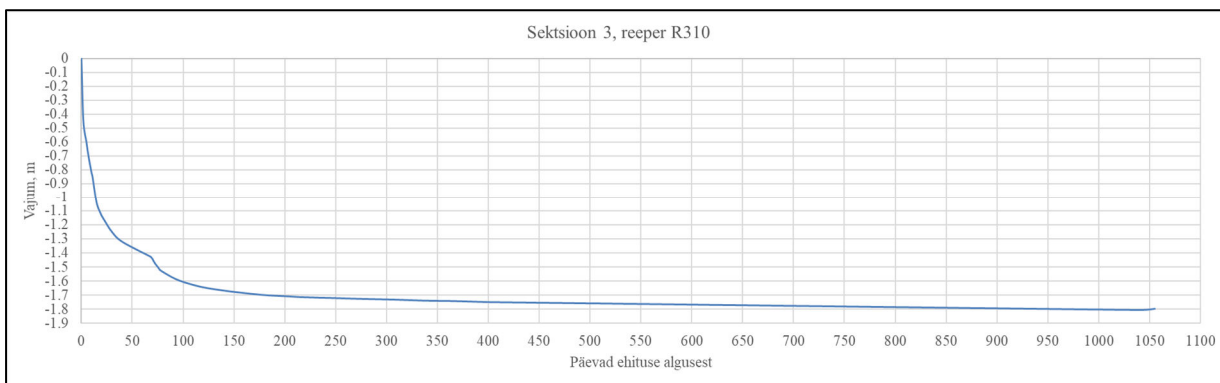
Joonis 4. Sektsiooni 2 keskel asunud turbareeperi „R24“ vajumigraafik.



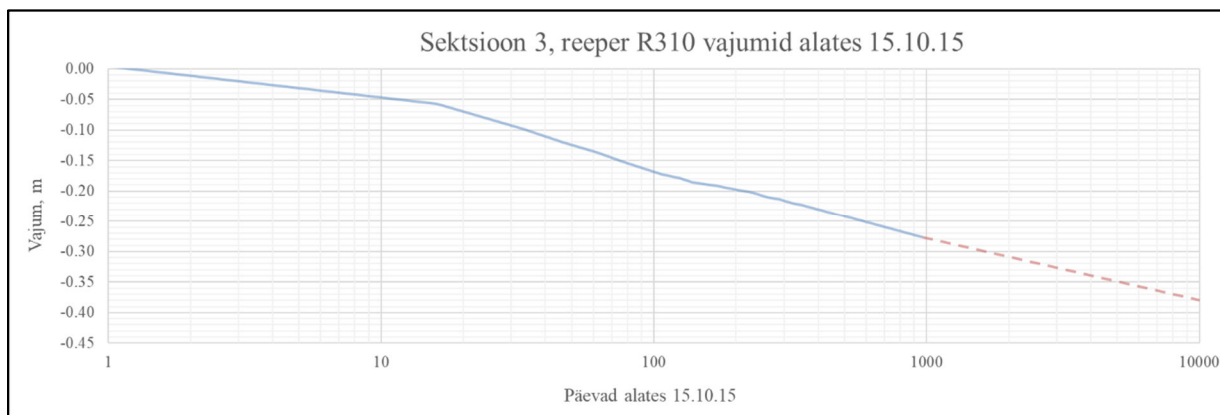
Joonis 5. R24 konsolideerumine alates kuupäevast 15.10.15. Punane katkendjoon on prognoos/tuletus eelnevate mõõteandmete põhjal.

Sektsioon 3 (geokärg), reeper „R310“, joonis 6:

- koguvajum 1,81 m;
- turba kihipaksus algselt 3,1 m, millest vajum moodustab 58%;
- tõus peale ülekoormuse eemaldamist 0,009 m (0,9 cm) – eelmiste lõikudega võrreldes väiksema tõusu suurusest järeldub, et ülekoormus oleks võinud olla suurem; arvestades turbakihi paksust oli antud sektsioonis võrreldes sektsiooniga 2 ca 20% ja sektsiooniga 1 ca 45% vähem koormust, millest tulenevalt on siin oodata ka mõnevõrra suuremaid järelvajumeid, kuigi oodatavad erinevused jäävad piiridesse, mida teekasutaja kuigivõrd ei tunneta;
- joonise 7 alusel lisandunuks aastaks 2042 mõõdetud vajumile veel ca 10 cm (ülekoormusega koormatud muldkeha vajum kokku 38 cm).



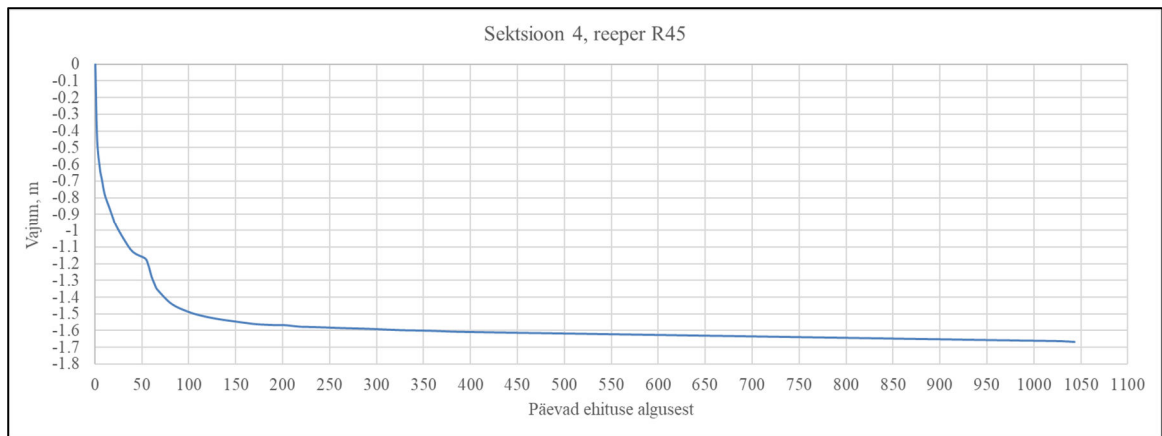
Joonis 6. Sektsiooni 3 keskel asunud turbareeperi „R310“ vajumigraafik.



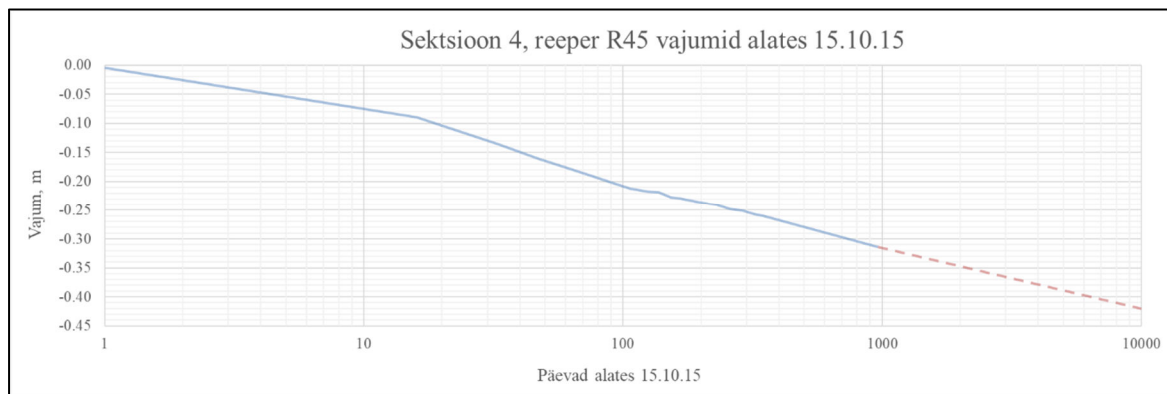
Joonis 7. R310 konsolideerumine alates kuupäevast 15.10.15. Punane katkendjoon on prognoos/tuletus eelnevate mõõteandmete põhjal.

Sektsioon 4 (kergekruus): reeper „R45“, joonis 8:

- koguvajum 1,66 m;
- turba kihipaksus algselt 3,4 m, millest vajum moodustab 49%;
- peale ülekoormuse eemaldamist registreeriti veel 0,004 m (0,4 cm) vajum ehk tõusu ei toimunud;
- joonise 9 alusel lisandunuks aastaks 2042 mõõdetud vajumile veel ca 11 cm (ülekoormusega koormatud muldkeha vajum kokku 42 cm).



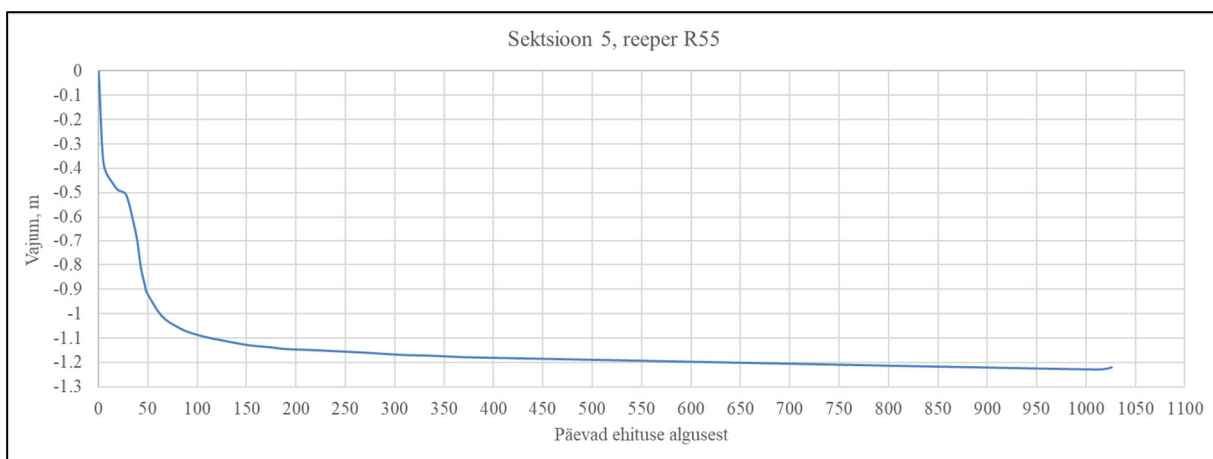
Joonis 8. Sektsiooni 4 keskel asunud turbareeperi „R45“ vajumigraafik.



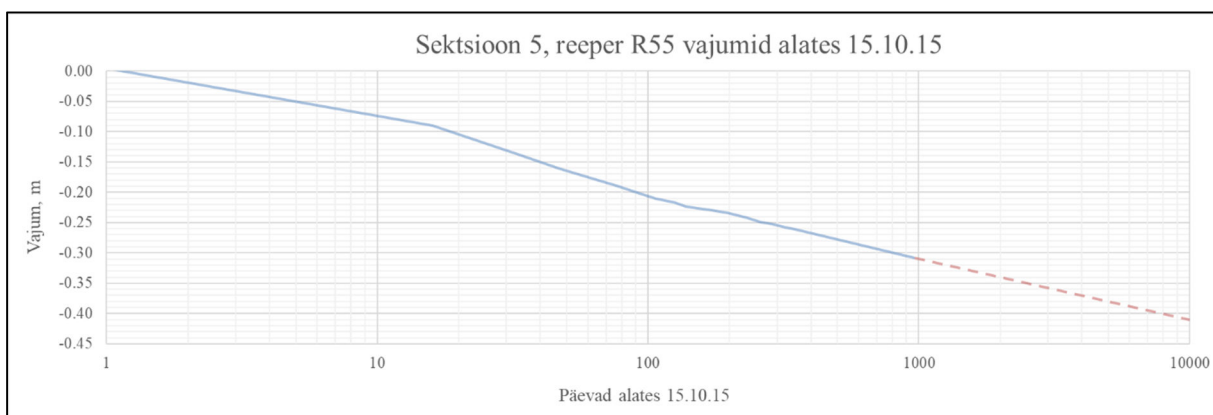
Joonis 9. R45 konsolideerumine alates kuupäevast 15.10.15. Punane katkendjoon on prognoos/tuletus eelnevate mõõteandmete põhjal.

Sektsioon 5 (EPS): reeper „R55“, joonis 10:

- koguvajum 1,23 m;
- turba kihipaksus algselt 3,5 m, millest vajum moodustab 35%;
- tõus peale ülekoormuse eemaldamist 0,009 m (0,9 cm);
- joonise 11 alusel lisandunuks aastaks 2042 mõõdetud vajumile veel ca 10 cm (ülekoormusega koormatud muldkeha vajum kokku 41 cm).

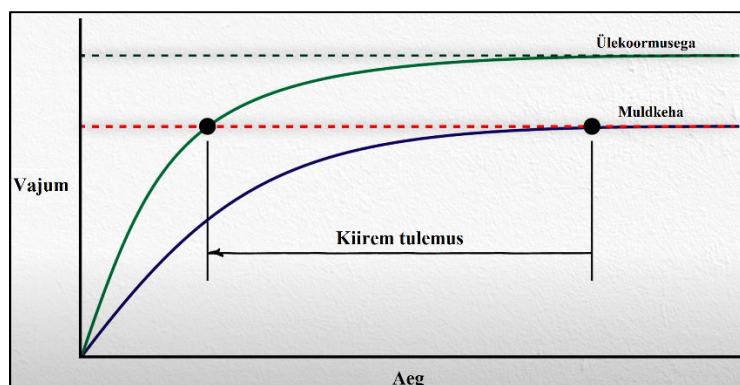


Joonis 10. Sektsiooni 5 keskel asunud turbareeperi „R55“ vajumigraafik.



Joonis 11. R55 konsolideerumine alates kuupäevast 15.10.15. Punane katkendjoon on prognoos/tuletus eelnevate mõõteandmete põhjal.

Mõõtmisandmetest nähtub see, et suurem osa konsolideerumisest toimus suhteliselt kiiresti (mida näitas ka enne katselõigu ehitamist tehtud laboriuuringud), mistõttu nii pikk konsolideerumise aeg, kui kasutati Võõbu katselõigul, ei oleks tegelikult vajalik ning piisaks, kui ooteaeg oleks minimaalselt nii pikk, et saavutataks sama vajum kui ilma ülekoormuseta maksimaalselt eeldatakse, vastav näidis on esitatud joonisel 12.



Joonis 12. Ülekoormuse kasutamise eesmärgi graafiline selgitus, teisisõnu võimaldab koormuse suurendamine saavutada tulevikus pikemaajaliselt toimuvaid vajumeid lühema ajaga (joonise allikas „*Practical Engineering*“).

Erinevates sektsioonides toimunud vajumised järgmise kiirusega:

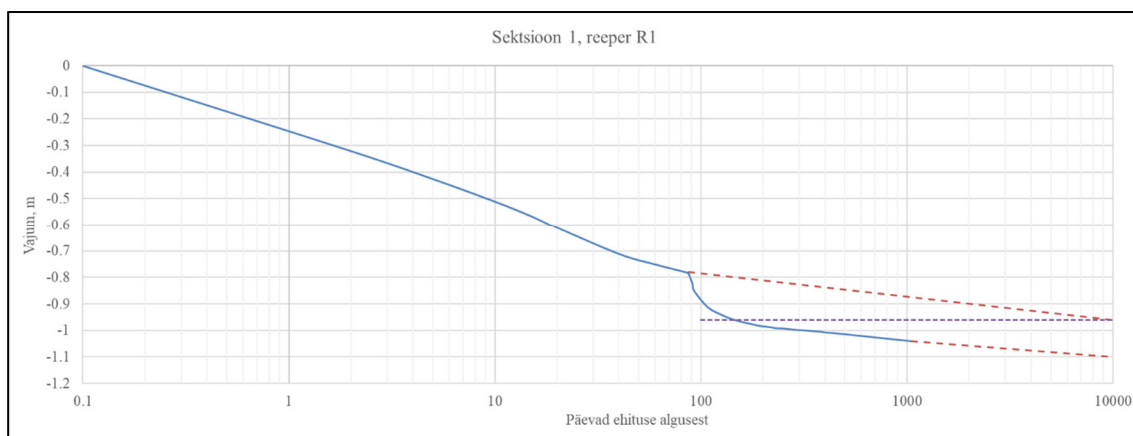
- sektsioon 1:
 - 56 kPa muldkeha vajus 80 päeva jooksul 77 cm; 90% sellest toimus 35 päevaga;
 - 41 kPa ülekoormus vajus 32 kuu jooksul 26 cm (alguseks on arvestatud kuupäev 02.10.15, mil ülekoormust hakati paigaldama), millest 88% toimus aasta jooksul; ülejäänud 20 kuuga oli vajum 3,1 cm, mis taastus ülekoormuse eemaldamisel tõusuga täielikult;
 - 90% maksimaalsest kogu konsolideerumise jooksul toimunud vajumist toimus 125 päevaga ja 95% 200 päevaga;
- sektsioon 2:
 - 35 kPa muldkeha vajus 80 päeva jooksul 71 cm; 90% sellest toimus 35 päevaga;
 - 41 kPa ülekoormus vajus 32 kuu jooksul 30 cm (alguseks on arvestatud kuupäev 02.10.15, mil ülekoormust hakati paigaldama), millest 88% toimus aasta jooksul; ülejäänud 20 kuuga oli vajum 3,6 cm, millest taastus ülekoormuse eemaldamisel tõusuga 2,9 cm;
 - 90% maksimaalsest kogu konsolideerumise jooksul toimunud vajumist toimus 150 päevaga ja 95% 280 päevaga;
- sektsioon 3:
 - 69 kPa muldkeha vajus 65 päeva jooksul 142 cm; 90% sellest toimus 30 päevaga;
 - 10 kPa ülekoormus vajus 32 kuu jooksul 39 cm (alguseks on arvestatud kuupäev 02.10.15, mil ülekoormust hakati paigaldama), millest 85% toimus aasta jooksul; ülejäänud 20 kuuga oli vajum 5,4 cm, millest taastus ülekoormuse eemaldamisel tõusuga 0,9 cm;
 - 90% maksimaalsest kogu konsolideerumise jooksul toimunud vajumist toimus 110 päevaga ja 95% 230 päevaga;
- sektsioon 4:
 - 44 kPa muldkeha vajus 50 päeva jooksul 117 cm; 90% sellest toimus 30 päevaga;
 - 16 kPa ülekoormus vajus 32 kuu jooksul 50 cm (alguseks on arvestatud kuupäev 02.10.15, mil ülekoormust hakati paigaldama), millest 89% toimus aasta jooksul;

ülejäänud 20 kuuga oli vajum 5,4 cm, millele lisandus ülekoormuse eemaldamise järgselt veel 0,4 cm;

- 90% maksimaalsest kogu konsolideerumise jooksul toimunud vajumist toimus 100 päevaga ja 95% 215 päevaga;
- sektsioon 5:
 - 12 kPa muldkeha vajus 36 päeva jooksul 64 cm; 90% sellest toimus 30 päevaga;
 - 30 kPa ülekoormus vajus 32 kuu jooksul 59 cm (alguseks on arvestatud kuupäev 02.10.15, mil ülekoormust hakati paigaldama), millest 92% toimus aasta jooksul; ülejäänud 20 kuuga oli vajum 4,8 cm, millest taastus ülekoormuse eemaldamisel tõusuga 0,9 cm;
 - 90% maksimaalsest kogu konsolideerumise jooksul toimunud vajumist toimus 80 päevaga ja 95% 300 päevaga.

2.2. Koormamise vajalik suurus ja konsolideerumise ajaline pikkus

Joonisel 13 on esitatud sektsiooni 1 graafik selliselt, kus nii muldkeha kui ülekoormuse vajumise graafikuid on logaritmilisel graafikul pikendatud ning nende põhjal leitud, mis oleks vajalik ülekoormuse pealhoidmise aeg, et ennetada muldkeha samadel tingimustel tulevikus toimuvaid vajumisi. Andmetest nähtub, et ülekoormuse all peaks turvas seisma ca 4 kuud ning enam-vähem sama tulemus tuleb kõikide sektsioonide vaates. Antud juhul ei ole arvestatud sellega, et muldkehale lisandub hiljem veel teekatend ning arvestama peaks ka liiklusvahendite poolt põhjustatava dünaamilise lisakoormusega, kuid seda peaks tegema eelkõige ülekoormuse suuruse või kergtäitematerjalidega koormuse vähendamise arvestamisel.



Joonis 13. Kui muldkeha oleks ehitatud ilma ülekoormust rakendamata, oleks selle vajumine toimunud sarnaselt ülemise katkendjoonega. Rakendades sobiva suurusega ülekoormust, saavutatakse ca 30 aastaga toimuv vajum vähem kui poole aastaga.

Kõikides sektsioonides toimusid vajumised suhteliselt sarnase ajaga:

- esimese umbes 30 päevaga toimus valdav osa (ca 90%) muldkeha konsolideerumisest;
- ülekoormuse paigaldamisel vajumid küll selgelt suurenesid, kuid oluliselt väiksemas mahu, nt sektsioonides 1 ja 2 lisati ülekoormuse näol muldkehale juurde veel lähes sama koormus, kuid

30 päeva möödudes lisandus sellest lisaks veel vaid vastavalt ca 19% (77+15 cm) ja 20% (71+15 cm); erandiks on EPS sektsioon, kuid kergtäitematerjale käsitletakse allpool eraldi;

- ca 90% kogu mõõdetud vajumitest (muldkeha + ülekoormus) toimus umbes esimese 100 päevaga. Teistest mõnevõrra aeglasemalt on vajunud sektsioon 2, mis erines selle poolest, et ülekoormus on olnud suurem, kui muldkeha koormus ning turba algne veesisaldus on olnud väiksem.

Seega nii pikka konsolideerumise aega, kui oli Võõbu katselõigul (ca 1000 päeva ehk ca 33 kuud) ei oleks vajadust tulevikus taolistel objektidel kasutada. Katselõigult saadud andmete põhjal piisaks, kui ülekoormus seisaks muldkehal umbes 4...6 kuud, kuigi olenevalt olukorrast võib piisata ka vähemast või hoopis vajatakse enam. Oluline on muldkeha vajumeid regulaarsete geodeetiliste mõõtmistega monitoorida, mis võimaldaksid teha kaalutletud otsuse koormuse eemaldamiseks või ootamisperioodiga jätkamiseks.

Vaadates katselõikude ülesehitusi ja nende vajumise näitajaid, siis sektsioonis 1 oleks võinud kasutada väiksemat ning sektsioonides 2 ja 3 suuremat ülekoormust. Kui turbakihi paksus ei ole ühtlane, siis toimuvad ka tulevikus järelvajumid ebaühtlaselt – kus on algselt olnud suurem kihipaksus, seal on ka järelvajumid suuremad ja vastupidi, kuid seda saab ennetada sellega, et suurema turbakihi paksuse korral rakendatakse suuremat koormust. Seega on üllatav, et katselõik ehitati üles põhimõttel, et suurema turbapaksusega sektsioonis 3 kasutati väiksemat koormust kui õhema turbaga sektsioonis 1 – see toob kaasa selle, et esimene vajub teise suhtes suhteliselt rohkem, kuid eesmärk oleks, et need vajuksid ühtlaselt. Näiteks toimusid sektsioonides 1...3 viimase 20 kuuga vajumised vastavalt 3.1, 3.6 ja 5.4 cm, kuid ideaalis pidanuks need olema võrdsed. Samuti oli tõusu suurus peale ülekoormuse eemaldamist erinev, vastavalt 3.1, 2.9 ja 0.9 cm, mis samuti oleks võinud olla võrdsed. Seda oleks saavutatud, kui ülekoormus oleks olnud üles ehitatud praegusega vastupidiselt, s.t suurema turbakihi sektsioonis oleks ülekoormus (või eemaldatav koormus) olnud enam kui väiksema turbapaksusega sektsioonis.

Tuleb rõhutada, et kuna turvas on nõrga kandevõimega pinnas, siis valimatult ja lõputult koormuse suurendamist ei saa siiski jätkata ning otsus tuleb teha hoolikalt arvestades kohapealsete oludega. Näiteks koormuse suurendamisest tulenevat ohtu muldkeha purunemisele saab vältida kasutades lisaks geosüntetidetele veel perme või laugemaid nõlvasid. Variantideks on ka turba osaline eemaldamine ja/või koormamine vähendatud koormusega selliselt, et konsolideerumise lõpus asendatakse osa muldkeha mineraalmaterjalist kergtäitematerjaliga.

Vaadates katselõigu kergtäitematerjalide sektsioone 4 ja 5, tuleb kõigepealt nentida, et seal esinenud turbakihi paksuste korral (ca 3,5 m) ei ole kergtäitematerjalide kasutamine hinna poolest õigustatud. Vaadates ka nende sektsioonide vajumeid, siis vähemalt kergkruus ei ole täitnud püstitatud ootusi. Tegelikult on see järeldus antud juba ka allikates 1 ja 4. Teisalt on hea, et kergtäitematerjalid olid katselõigu kahte sektsiooni kaasatud, mis võimaldasid saada suurepäraseid kogemusi ja teadmisi.

Sektsioonis 4 kasutati 1,0...1,5 m paksust (nõlvades õhem, keskel suurem) kergkruusakihti umbes 3,4 m turba peal. Turbakihi konsolideerumise suurus peale ülekoormuse eemaldamist oli 49%, mis on 9 protsendipunkti vähem kui sektsioonis 3 ja mida ei saa hinnata piisavaks. Kergtäitematerjaliga muldkeha pidanuks vajuma vähem, nii nagu see toimis sektsioonis 5, kus muldkeha oli tõesti kerge (vaid 12 kPa) ning kogu konsolideerumise perioodi jooksul vähenes turbakihi paksus 35%. Vaadates tõuse peale

koormuse eemaldamist, siis sektsioonis 4 seda ei toimunud ja sektsioonis 5 oli sarnane sektsiooniga 3. Teades nüüd ka valmis teekatendi vajumeid (peatükk 5), saab järeldada, et sektsioonides 4 ja 5 oli turbas saavutatud tasakaal muldkeha koormuse vahel, kuid eelkoormus (või kergtäitematerjalist tulenev koormuse vähenemine) ei olnud piisavad, et efektiivselt takistada liikluse alla jääva teekonstruktsiooni täiendavaid vajumisi.

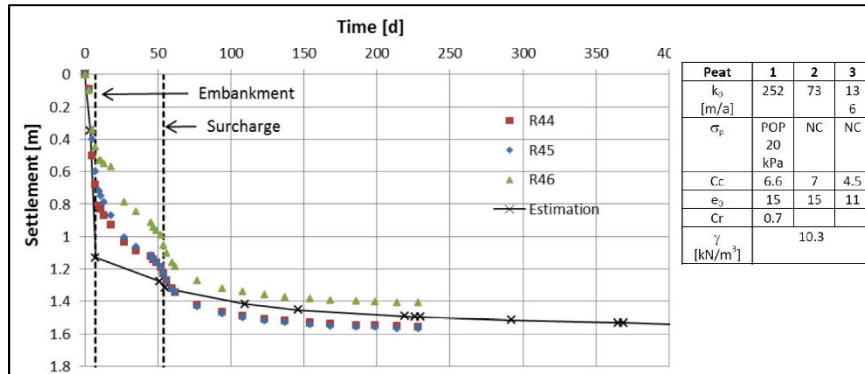
Kergtäitematerjali kasutamist turbapinnasele ehitamise korral saaks soovitada eelkõige teede rekonstrueerimise kontekstis – näiteks kui olemasolev tee on ehitatud ülekoormust kasutamata, siis esinevad seal ebaühtlased vajumid, mida võimendatakse uute materjali- või asfaldikihtide paigaldamisega lisades probleemsetesse kohtadesse lisakoormust. Kui sellises olukorras rekonstrueerimisega vähendatakse koormust turbale, siis on eelnev teekonstruktsioon käitunud kui ülekoormus ning vajumised peatuvad või oluliselt aeglustuvad.

Kergtäitematerjali kasutamine uute teede puhul võiks olla õigustatud paksude (>5m) ja kõrge veesisaldusega (>1000%) turbakihtide korral tingimusel, et projektlahendus tõesti võimaldab tekitada turbale taolise koormusolukorra, mis väldib edasisi vajumeid teekonstruktsiooni valmimisel, näiteks lahendus, kus osa turvast eemaldatakse, see asendatakse EPSiga (põhjamaades kasutatakse ka vahtklaasist killustikku, mida käesoleva aruande kirjutamise hetkel oleva info põhjal hakatakse tootma ka Eestis) sellises paksuses, mis võimaldab kompenseerida peale tuleva teekonstruktsiooni kaalu nii, et koormus turbale ei suureneks. Või paigaldatakse kõigepealt osa kergtäitematerjali, seejärel rakendatakse eelkoormust, mis hiljem eemaldatakse asendades see osa täiendava kergtäitematerjaliga, mille peale rajatakse teekatend.

2.3. Arvutuslik vajum võrrelduna mõõdetuga

Ei ole päris selge, kui põhjalikult ja mis vajumiarvutusi katselõigu sektsioonidele tehti ning kas valmis ehitatud lahendus oli ka just selliste koormustega, mis arvutustes kasutati. Allikas 1 on antud laborikatsete kokkuvõtte puurauk nr 13 põhjal, kuid seal ei sisaldu vajumiarvutusi. Allikas 3 on esitatud sektsiooni 4 vajumiarvutus, mille tulemus korreleerus tegelike mõõdetud vajumite osas suhteliselt hästi, joonis 14. Tuleb märkida, et kuna pinnased on heterogeensed materjalid, siis vajumiarvutused on reeglina hinnangud või suurusjärgud, mida ei ole võimalik väga täpselt prognoosida, eriti turbapinnaste puhul, kuna tegemist on väga tugevalt kokkusurutava pinnasega.

V. Jaaniso raamatus „Madalvundamendi arvutus“ öeldakse peatükis 8.1: „Pinnas on sedavõrd keerukas kooslus, et ükski reaalselt insenerarvutusteks kasutatav mudel ei suuda kõiki konkreetset juhul võimalikke iseärasusi hõlmata. Seepärast kasutatakse lihtsustatud meetodeid, mida on praktikas piisavalt kontrollitud. Arvutatud vajumid ei ole täpsed suurused, vaid ligikaudsed hinnangud. Põhilised vead vajumi arvutusel sõltuvad siiski mitte arvutusskeemi valikust, vaid pinnase kokkusurutavuse hindamise õigsusest“. Selle arvestusega võib öelda, et joonisel 14 antud võrdlus arvutatu ja tegeliku osas on piisavalt täpne.



Joonis 14. Allikast [3] pärinev joonis vajumiarvutuste ja tegelikult toimunud vajumiste võrdlusest.

Käesoleva aruande autorile teadaolevalt on Võõbu katselõigu vajumiarvutusi tehtud vähemalt kahel korral – üks eelprojekti raames ja teine projekti realiseerimisel. Ei ole välistatud, et eksisteerib veel muidki arvutusi, kuid neid ei ole avaldatud ega töö autorile kättesaadavad.

Eelprojekti arvutuste kohaselt leiti, et kui turba $C_c = 7$ ja $C_v = 35$ m²/aasta, siis

- kui turbakihi paksus on 2,0 m ja koormus sellele 100 kPa, tekib poole aasta jooksul vajum 1,04 m, millele lisandub aasta täitumisel 2,0 cm, 2 aasta täitumisel 3,6 cm ja 10 aasta täitumisel 7,1 cm järelvajum;
 - katselõigu vajumid olid 2,1 m turbapaksuse ja 97 kPa korral poole aasta jooksul 0,98 cm, millele lisandus 1 aasta täitumisel umbes 3 cm ja 2 aasta täitumisel umbes 5 cm;
- kui turbakihi paksus on 3,0 m ja koormus 60 kPa, siis tekib poole aasta jooksul vajum 1,05 m, millele lisandub aasta täitumisel 1,5 cm, 2 aasta täitumisel 3,8 cm ja 10 aasta jooksul 8,2 cm järelvajum;
 - katselõigu vajumid olid 3,4 m turbapaksuse ja 60 kPa korral poole aasta jooksul 1,57 m, millele lisandus 1 aasta täitumisel umbes 3,4 cm ja 2 aasta täitumisel umbes 5 cm.

Vahetult enne katselõigu ehitust leiti katseseptsioonide eeldatavad vajumid, mille tulemused on kajastatud tabelis 1 (andmed puuduvad sektsiooni nr 3 osas).

Tabel 1. Arvutatud ja mõõdetud vajumiste erinevused

Sektsioon	Arvutatud 2015	Mõõdetud 2018	Erinevus
Nr 1	92 cm	104 cm	-13%
Nr 2	92 cm	101 cm	-10%
Nr 3	??	181 cm	??
Nr 4	155 cm	166 cm	-7%
Nr 5	115 cm	123 cm	-7%

Allikas [1] oli tabelis 5.3 esitatud hinnanguline teisene mulde keskjoone vajum. Nüüd on võimalik võrrelda ka selle prognoosi tõesust tabeli 2 alusel, kus on esitatud 2016. ja 2018. a. prognoositud vs tegelike mõõteandmete näitajad.

Tabel 2. Allikas [1] toodud prognoosi võrdlus tegelike vajumitega

Tabel 5.3. Hinnanguline teisene mulde keskoone vajum, mis põhineb joonisel 5.3 esitatud kõveratel ja tasandustel. Hinnang ei võta arvesse ülekoormuse eemaldamist.

Aeg	12/2016	12/2017	12/2018	12/2019	12/2020	12/2030	12/2040	12/2070	12/2116	2016 vs 2018
Vajumiplaat										
Teisese tihendamise vajumi erinevus alates alguskuupäevast 12/2016										
R1	0	7	11	14	17	19	20	22	23	31 mm
R24	0	9	15	19	22	25	27	28	30	36 mm
R305	0	15	24	30	35	39	42	45	48	58 mm
R45	0	13	21	26	30	34	37	39	42	54 mm
R55	0	13	21	26	31	34	37	40	42	48 mm

Kõik arvutused ja prognoosid näitasid turbakihi vajumeid tegelikust väiksemana, kuid teisalt ei ole erinevused suured ning antud hinnanguid võib pidada heaks. Tulevikus võib sarnaste objektide korral arvestada vajumiarvutuste täpsuseks kuni ca 20% tegelikest vajumistest väiksemateks, mis on pigem väga hea arvutustäpsus.

Võrdluse mõttes võib vaadelda ka nii RMK metsateede projekteerimise, ehitamise ja hooldamise juhises kui roadex.org esitatud Rootsi Transpordiameti meetodit (STA ehk *Swedish Transport Administration*) turba esmase konsolideerumise leidmiseks. Selleks vajatakse vaid teavet turba veesisaldusest, mis teeb meetodi kasutamise väga lihtsaks ja kiireks, sest ei vajata rikkumata struktuuriga proovide võtmist ega kompressioonikatsete läbiviimist. Antud juhul on meetodiga leitud esmane konsolideerumine selliselt, et arvestatud ei ole vee üleslükkejõudu, mis veidi vähendaks tegelikku koormust. Üleslükkejõuga ei oldud arvestatud ka allikas [1] esitatud muldkeha koormustega.

Kui arvestame esiteks vaid muldkeha koormusega (tinglikult katselõigu ehitusetapp I, mis lõppes pindamiskihiga paigaldusega), siis saadakse järgmised näitajad:

- sektsioon 1: turvas 2,1 m, $w = 669\%$, koormus 56 kPa → mõõdetud 77 cm (suhteline vajum 37%), STA meetodi abil tuletatud 80 cm (suhteline vajum 38%);
- sektsioon 2: turvas 2,4 m, $w = 620\%$, koormus 35 kPa → mõõdetud 71 cm (30%), tuletatud 70 cm (29%);
- sektsioon 3: turvas 3,1 m, $w = 695\%$, koormus 69 kPa → mõõdetud 142 cm (46%), tuletatud 133 cm (43%);
- sektsioon 4: turvas 3,4 m, $w = 690\%$, koormus 44 kPa → mõõdetud 117 cm (34%), tuletatud 119 cm (35%);
- sektsioon 5: turvas 3,5 m, $w = 660\%$, koormus 12 kPa → mõõdetud 64 cm (18%), tuletatud 42 cm (12%).

STA meetodi abil tuletatud esmased konsolidatsioonid muldkeha koormusest on üpris sarnased sellele, mida tegelikult mõõdeti. Suuremad erinevused tulid sektsioonidest 3 ja 5, kuid see võib olla seotud nii tegeliku turba oleva veesisalduse kui muldkeha koormuse erinevusega.

Kui arvestada maksimaalse koormusega, siis saadakse järgmised STA meetodiga tuletatud esmase konsolideerumise näitajad, mida on võrreldud 200 (detsember 2015, mida allikas [1] hinnati teisese konsolideerumise alguseks) ja 1000 (viimane mõõtmine juunis 2018) päeva mõõtetulemustega:

- sektsioon 1: koormus 97 kPa → tuletatud 1,01 m (suhteline vajum 48%); 200 päeva mõõdetud 0,98 m ja 1000 päeva mõõdetud 1,04 m;
- sektsioon 2: koormus 76 kPa → tuletatud 0,96 m (40%); 200 päeva mõõdetud 0,94 m ja 1000 päeva mõõdetud 1,01 m;
- sektsioon 3: koormus 79 kPa → tuletatud 1,43 m (46%); 200 päeva mõõdetud 1,70 m ja 1000 päeva mõõdetud 1,81 m;
- sektsioon 4: koormus 60 kPa → tuletatud 1,36 m (40%); 200 päeva mõõdetud 1,57 m ja 1000 päeva mõõdetud 1,66 m;
- sektsioon 5: koormus 42 kPa → tuletatud 1,12 m (32%); 200 päeva mõõdetud 1,14 m ja 1000 päeva mõõdetud 1,23 m.

Võrdlusest nähtub, et STA meetodiga tuletatud konsolideerumise väärtused on mõõdetud väärtustega üprisriki sarnased, kuigi sektsioonides 3 ja 4 on tegelikkuses olnud siiski mõnevõrra suuremad vajumid.

Siinkohal on võimalik võrrelda ka esmase ja teise konsolideerumise väärtusi nii mõõdetud kui joonistelt 3, 5, 7, 9 ja 11 tuletatavate andmetega. Tabelist 3 nähtub, et esmane konsolideerumine moodustab STA meetodiga leitud väärtuse osas ca 80...90% ja mõõdetud väärtuste osas ca 90% maksimaalsest tekkivast vajumist. Teisisõnu lisandub esmasele konsolideerumisele teise konsolideerumise näol vajumeid veel ca 10...20%.

Tabel 3. Rootsi Transpordiameti turba konsolideerumise hindamise meetodi (STA) ja mõõdetud andmete põhjal saadud võrdlus esmase konsolideerumise ulatusest võrreldes teise konsolideerumise väärtusega.

Sektsioon nr	Esmase konsolideerumine, m		Teisene konsolideerumine, m		Esmane maksimaalsest, 1000 ja 10'000 päeva, %	
	STA meetod	200 päeva mõõdetud	1000 päeva mõõdetud	10'000 päeva ekstrapoleeritud	STA meetod	Mõõdetud
1	1,01	0,98	1,04	1,10	97 ja 92%	94 ja 89%
2	0,96	0,94	1,01	1,08	95 ja 89%	93 ja 87%
3	1,43	1,70	1,81	1,91	79 ja 75%	94 ja 89%
4	1,36	1,57	1,66	1,77	82 ja 77%	95 ja 89%
5	1,12	1,14	1,23	1,33	91 ja 84%	93 ja 86%

Saadud tulemused näitavad, et vaid veesisalduse andmetel põhinev esmane konsolideerumise tuletamine STA meetodiga on esmase hinnangu andmiseks vägagi sobilik, mis on seega hästi kasutatav näiteks madalaklassiliste teede ja eelprojektide koostamisel. Olenevalt turbaproovide võtmise ja katsetamise ning arvutamise kvaliteedist võib STA meetodiga saada isegi täpsemaid tulemusi kui arvutuste teel saadavatega. STA meetodiga leitud konsolideerumise väärtus on umbes 80...90% koguvajumitest, teisisõnu leitud väärtusele tuleb lisada ca 10...20% teise konsolideerumise osa.

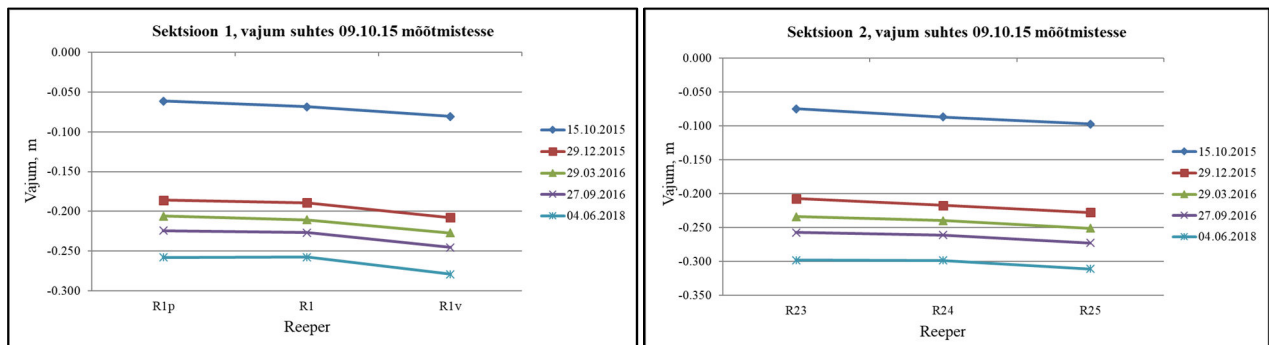
2.4. Vajumid ristlõikes

Eelnevalt käsitleti katseseksioonide vajumeid vaid lõigu keskel olevatel reeperitel tuginedes. Muldkeha ja sellele rajatava tee kasutamise vaatest on olulised ka vajumid ristlõikes, s.t kas ja kuivõrd säilivad põiklalded. Teema on juba käsitletud allikates [1] ja [2], kuid käesolevalt antakse ristlõigete vajumitest kokkuvõtte.

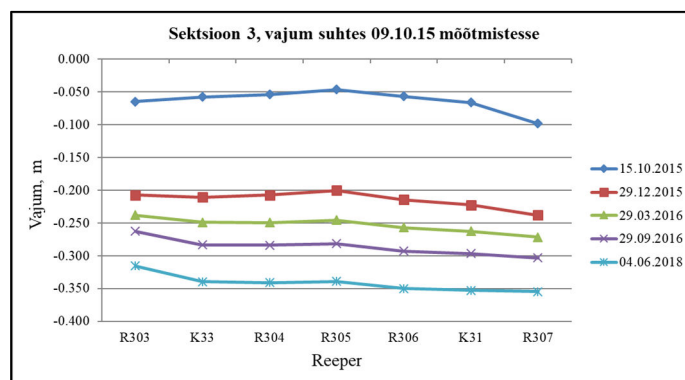
Mõõtmised näitasid, et vajumierinevused servade ja keskkoha vahel on väikesed, kuid põhjapoolne muldkeha külg (suunaga Tallinnast Tartu poole vasakpoolne serv) vajus kõikides, v.a EPS sektsioonis enam kui muu tee. Võttes aluseks 09.10.15 mõõtmise, siis suhtes sellesse oli 04.06.18 mõõtmiste alusel vajunud muldkeha ääres olev reeper võrreldes keskel oleva reeperiga:

- sektsioon 1: R1v vs R1: -2,17 cm;
- sektsioon 2: R25 vs R24: -1,27 cm;
- sektsioon 3: K31 vs R305: -1,33 cm;
- sektsioon 4: R46 vs R45: -0,82 cm;
- sektsioon 5: R54 vs R55: +1,96 cm (keskkoht on vajunud enam kui serv).

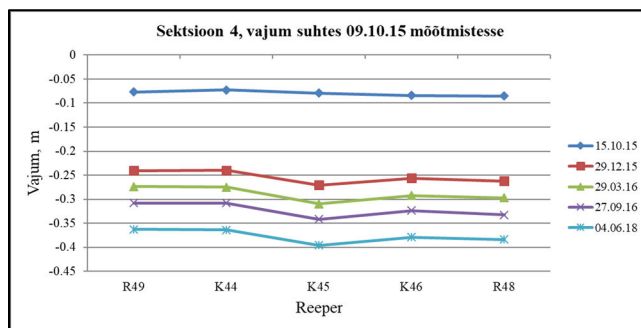
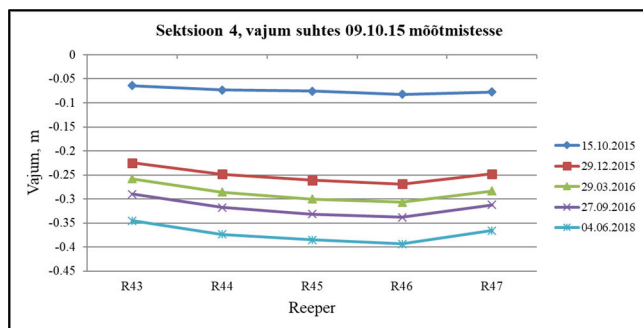
Ristlõigete vajumigraafikud suhtes 09.10.15 mõõtmistesse on esitatud joonistel 15...21, mille reeperite asukohad on kujutatud joonisel 22.



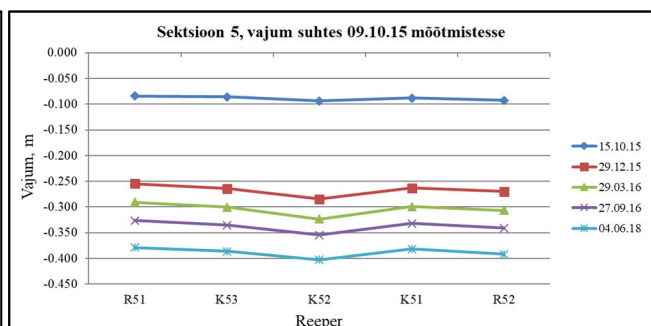
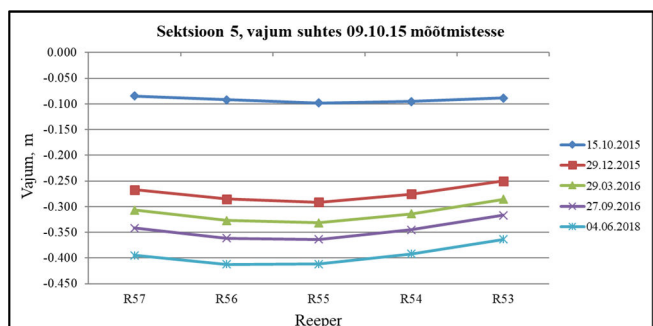
Joonised 15 ja 16. Sektsioonide 1 ja 2 ristlõigete vajumid suhtes 09.10.15 tehtud mõõtmistesse.



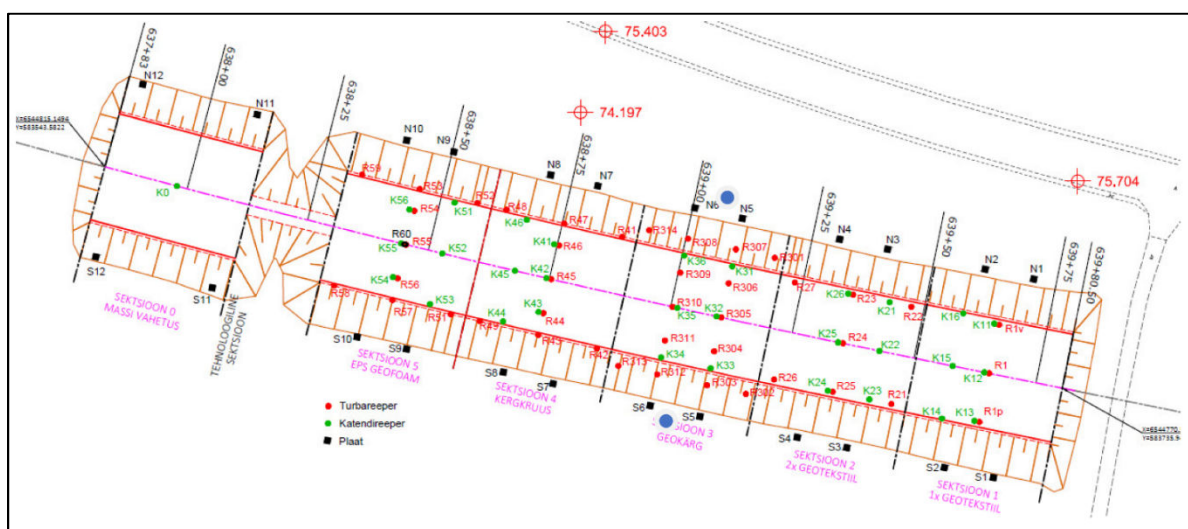
Joonis 17. Sektsiooni 3 ristlõike vajumid suhtes 09.10.15 tehtud mõõtmistesse.



Joonised 18 ja 19. Sektsiooni 4 kahe ristlõike vajumid suhtes 09.10.15 tehtud mõõtmistesse.



Joonised 20 ja 21. Sektsiooni 5 kahe ristlõike vajumid suhtes 09.10.15 tehtud mõõtmistesse.



Joonis 22. Võõbu katselõigu vaatlusreeperite nummerdamine ja paigutus. Siniste sõõridega on tähistatud veemööduutorude asukohad teemulde põhja- ja lõunaservas.

Ristlõike joonistelt nähtub, et iga ühisnimetajaga sektsioon on käitunud erinevalt:

- geotekstiilidega sektsioonid on kogu muldkehana vajunud kaldu põhjapoole;
- geokärje sektsioon on säilitanud suhteliselt hästi oma profiili, mis on ka ootuspärane arvestades, et muldkeha all on tugevalt armeeritud kõrge nihketugevusega 1 m kõrgune aluskiht;

- kergkruusa ja EPSi sektsioonides on erinevad ristlõiked vajunud erinevalt ning nende üleminekutsoon on käitunud teisiti, kui sektsiooni keskelt saadud mõõtetulemused, mille põhjus on teadmata;
 - peatükis 5 käsitletava eksploatatsioonijärgsete mõõtmiste põhjal näib, et sektsioonide 4 ja 5 üleminekul konsolideerumata osa (võrdle jooniseid 18 ja 20 joonistega vastavalt 19 ja 21) on nüüd järgi vajunud, nimelt reeperite K46 ja K51 asukohas on hiljem toimunud sarnased vajumid kui varasemalt K45 ja K52 juures, mille põhjus on teadmata.

Üheks selgeks erinevuseks muldkeha põhja- ja lõunapoolse serva vahel on allikas [2] peatükis 6 käsitletud veetasemete vaatlustulemused, mille põhjal leiti ka seos teemulde kõrvale paigaldatud turbaplaatide vertikaalliikumistega. Katselõigu muldkeha põhjaküljel (Tallinn-Tartu mnt. poolses servas) on veetase igas mõõtettsükli olnud mõnevõrra (ca 2...4 cm, kuid ka rohkem) kõrgem kui (soopoolisel) lõunaküljel. Veetasemete (või ka turba veesisalduse) erinevused on pidanud mõjutama (ja tõenäoliselt mõjutavad ka edaspidiselt) muldkeha ristsuunalist konsolideerumist. Nimelt on veetaseme kõikumised potentsiaalsed täiendavate (ebaühtlaste) vajumiste initsiaatoriteks.

3. Ehitusgeoloogilised mõõtmised ja vahekokkuvõte enne teekatendi ehitamist

Aastal 2019 tehti katselõigule geotehnilised uuringud (AS Geotehnika Inseneribroo G.I.B töö nr 2978, oktoober 2019, käesolevalt lisas 1), mille käigus võeti turbast veesisalduse proovid.

Proovidest nähtus, et turba algne ca 500...900% veesisaldus on langenud vahemikku ca 100...400%, tabelis 4 on esitatud keskmiste väärtuste tulemused. Kogu katselõigul oleva turbamassiivi keskmine veesisaldus oli enne ehituse algust 666%, mis oli oktoobriks 2019 vähenenud 273% peale. Suurim vähenemine (448,7%) on toimunud sektsioonis 1, kus oli looduslikult kõige õhem turbakiht ning kus kasutati suurimat koormust. Sektsioonide 2 – 4 keskmise veesisalduse muutus jäi vahemikku 365,6 – 373,7%. Sektsioonis 5 oli looduslikult kõige suurem turbakihi paksus, kuid pinnase keskmise veesisalduse muutus on olnud võrreldes kõrvalsektsiooniga kõrgem (410,7%), mida on võinud mõjutada kõrval asetsev truup tagades paremad vee äravoolu tingimused.

Ehitusgeoloogilistele uuringutele tuginedes leiti, et konsolideerumise perioodi jooksul oli turba dreenimata nihketugevus kasvanud ca 2,5...3x, tabel 5.

Tabel 4. Turba keskmise veesisalduse (W_n) muutused

Sektsioon	Keskm. W_n 2015. a. juunis %	Keskm. W_n 2019. a. oktoobris %	Muutus ajavahemikul %
Nr 1 - geotekstiil	668,9	220,1	-448,7
Nr 2 - 2x geotekstiil	620,9	255,0	-365,9
Nr 3 - geokärg	693,9	328,3	-365,6
Nr 4 - kergkruus	688,2	314,6	-373,7
Nr 5 - EPS	658,7	248,1	-410,7

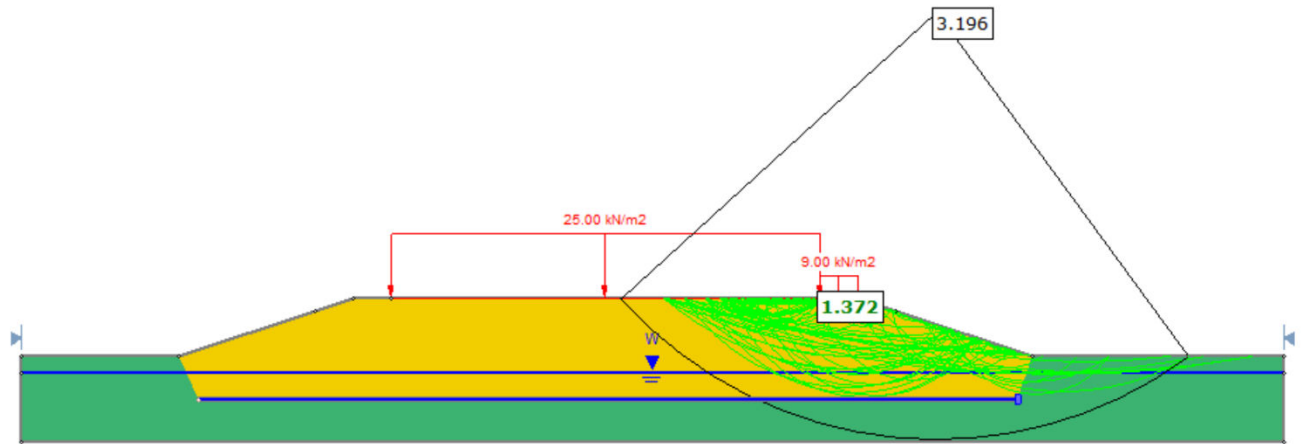
Tabel 5. Turba keskmine nihketugevus sektsioonide kaupa

Sektsioon	Keskm. C_{uf} , kPa 2015. a. juunis	Keskm. C_{uf} , kPa 2019. a. oktoobris
Nr 1 - geotekstiil	6,0	17,0
Nr 2 - 2x geotekstiil	5,0	16,0
Nr 3 - geokärg	6,0	14,0
Nr 4 - kergkruus	6,0	14,0
Nr 5 - EPS	7,0	16,0

Teades turbakihi dreenimata nihketugevust, on võimalik kontrollida kogu konstruktsiooni stabiilsus ja leida varutegur FS. Stabiilsusarvutuste kohaselt on konsolideerunud teekonstruktsiooni stabiilsus suure varuga tagatud. Kui teha arvutus järgmiste tingimustega:

- konsolideerunud turbakihi paksus on 1,7 m;
- turba dreenimata nihketugevus on 14 kPa;
- teekonstruktsiooni koormus turbal on 80 kPa (nagu valmis teel sektsioonis 3);
- muldkeha nõlvus maapinnast ülalpool on 1:3;
- teekatendi olemasolu on ignoreeritud, muldkeha materjali sisehõõrdenurk on 35°;
- muldkeha all on kasutatud geosünteti maksimaalse lühiajalise tõmbetugevusega 400 kN/m (pikaajaline tõmbetugevus 216 kN/m);
- konstruktsiooni peale on äärtest 1,5 m ulatuses paigaldatud lauskoormus 9 kPa, ülejäänud osale 25 kPa, mis iseloomustavad liikluskoormuse mõjusid;
- kasutatud on Eurokoodi osavarutegurite süsteemi AV1.2, mis andis kõige ebasoodsama arvutustulemuse;
- varutegur on leitud Bishopi meetodiga;

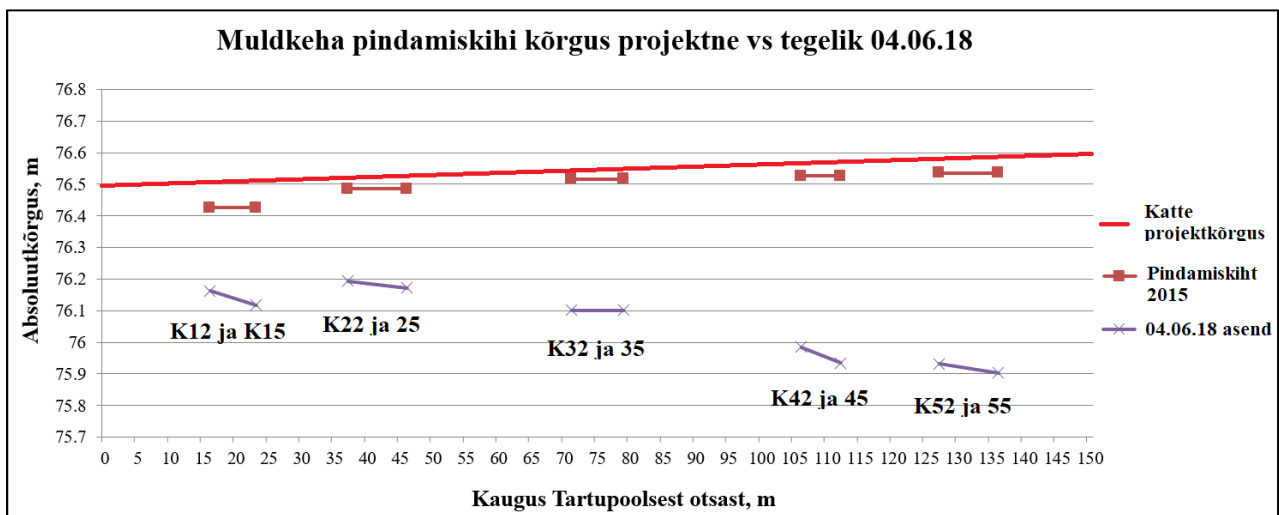
...siis GEO (*failure of the ground*) $FS = 3.2$ (FS ehk *factor of safety* peab olema suurem ühest). Arvutuste järgi on valmis teekonstruktsiooni osas määravamaks konstruktsiooni enda sisemine püsivus (STR ehk *failure of the structures*), kuid ka selle varutegur on enam kui piisav arvestades sellega, et muldkeha peal paikneb veel ka oluliselt suurema nihketugevusega teekatend, millega praegustes arvutuses ei ole arvestatud. Siin näidatud valmis konstruktsiooni stabiilsus oleks väga napilt ($FS = 1,008$) tagatud ka juhul, kui selle all ei oleks üldse geosünteti, kuid ilma viimaseta ei oleks olnud võimalik muldkeha ehitada ega ülekoormata ilma turbapinnase purunemiseta, mistõttu on selle kasutamine olnud hädavajalik.



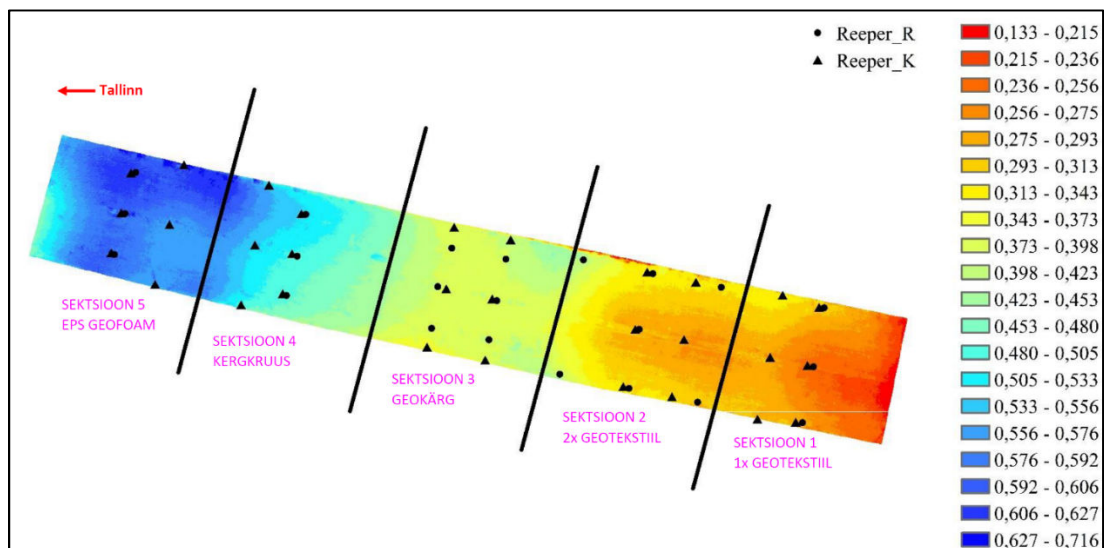
Joonis 23. Rocscience Slide programmiga tehtud muldkeha stabiilsusarvutus arvestades eelnevalt kirjeldatud tingimusi. Varuteguri GEO osas on joonisel tähistatud vaid kõige väiksem leitud väärtus (FS = 3,196).

4. Teekatendi rajamine

Peale konsolideerumise perioodi eemaldati ülekoormus kuni pindamise kihini ehk muldkehani. Algselt oli viimane rajatud tee „punase jooneni“, mis ülekoormuse rakendamisel vajas kuupäevani 04.06.18 joonisel 24 kujutatud määral, kus aluseks on võetud muldkeha keskel asetsenud katendireeperid. Joonisel 25 on laserskaneerimise tulemustest saadud kogu pindamiskihi vajum kuupäevade 02.10.15 ja 04.06.18 võrdluses.



Joonis 24. Põhimaantee teekatte „punase joone“, 02.10.15 paigaldatud pindamiskihi ja 04.06.18 kõrguse võrdlused, teisisõnu erinevus, kui palju muldkeha oli ülekoormuse tagajärjel konsolideerumise perioodi jooksul vajunud ning mis kõrguseni tuleb teekattepind tee valmimisel tõsta.



Joonis 25. 2018. aasta laserskaneerimise (ülekoormusest puhastatud katendil) tulemustest moodustatud 3D andmemudeli erinevused 2015 terrestrial laser scanning (pindamisjärgselt, enne ülekoormuse

paigaldamist) tulemusega. Ringide ja kolmnurkadega on tähistatud vastavalt turba- ja katendireeperite asukohad. Ühik on meeter.

14.08.20 liiklusele avatud põhimaantee projekteeritud „punane joon“ ehk asfaltkatte kõrgus pidi olema vahemikus 76,61 – 76,51 m (BK77 kõrgussüsteemis). Muldkehale rajati järgnev katendikonstruktsioon, mille jaoks tuli kas muldkeha eemaldada või täita olenevalt sellest, kui palju oli turvas konkreetsetes kohas konsolideerunud:

1. 3,5 cm SMA 16 (paigaldatakse hiljem);
2. 5 cm AC 16surf;
3. 5 cm AC 20base;
4. 7 cm AC 32base;
5. 12 cm fr. 2/31,5 mm tardkivikillustik;
6. 25 cm fr 31,5/63 + 16/31,5 mm settekivikillustik;
7. geokomposiit 50/50 kN/m;
8. min. 45 cm täitematerjal 105 (möödukalt ühtlaseterine keskliiv);
9. bentoniitmatt kapillaartõusu tõkestamiseks (bentoniidi sisaldus matis min 4000 gr/m²).
10. katselõigu muldkeha.

Kui arvestada asfaltkatte keskmiseks mahumassiks 2400 kg/m³, killustikalusel 1800 kg/m³ ja liival 2000 kg/m³, siis põhjustab rajatud katend koormuse ca 20 kPa. Teisisõnu selle kompenseerimiseks tuleks eemaldada kokku vähemalt 1 m paksune ülekoormuse või muldkeha osa, et teekatendist ei tuleneks turbapinnasele täiendavat koormust. Lisaks tuleks juurde arvestada veel ka liikluskoormuse osakaal, milleks allikas [1] olevates arvutustes oli muutuvkoormusena kasutatud 25 kPa.

Vaadates ülekoormuse, muldkeha ja teekatendi koormuse bilanssi turbale peale teekatendi valmimist, siis on see tee telge arvestades sektsioonide lõikes järgnev (eeldades, et allikas [1] esitatud muldkeha ja ülekoormuse väärtused on korrektsed):

- sektsioon 1:
 - muldkeha 56 kPa;
 - ülekoormus pindamiskihi peal 41 kPa, mis eemaldati;
 - 04.06.20 pindamiskihi ja „punase joone“ vahekaugus 38 cm;
 - teekatendi paksus 99 cm, seega tuli eemaldada 61 cm muldkeha ehk ca 12 kPa;
 - seega praegune teekonstruktsiooni koormus turbal on $56 - 12 + 20 = 64$ kPa, mis on $97 - 64 = 33$ kPa väiksem, kui koormus eelkoormamise ajal ja mis kompenseerib küllaldaselt ka liikluskoormuse poolt tekitatava lisakoormuse;
- sektsioon 2:
 - muldkeha 35 kPa,
 - ülekoormus pindamiskihi peal 41 kPa, mis eemaldati;
 - 04.06.20 pindamiskihi ja „punase joone“ vahekaugus 35 cm;
 - teekatendi paksus 99 cm, seega tuli eemaldada 64 cm muldkeha ehk ca 13 kPa;
 - seega praegune teekonstruktsiooni koormus turbal on $35 - 13 + 20 = 43$ kPa, mis on $76 - 43 = 33$ kPa väiksem, kui koormus eelkoormamise ajal ja mis kompenseerib küllaldaselt ka liikluskoormuse poolt tekitatava lisakoormuse;

- sektsioon 3:
 - muldkeha 69 kPa;
 - ülekoormus pindamiskihi peal 10 kPa, mis eemaldati;
 - 04.06.20 pindamiskihi ja „punase joone“ vahekaugus 46 cm;
 - teekatendi paksus 99 cm, seega tuli eemaldada 53 cm muldkeha ehk ca 10 kPa;
 - seega praegune teekonstruktsiooni koormus turbal on $69-10+20 = 79$ kPa, mis on sama koormus kui eelkoormamise ajal. Kuna muldkeha koormus oli suhteliselt kõrge, turba konsolideerumine antud sektsioonidest suurim, konsolideerumise aeg pikk ja olemasolev teekonstruktsioon turbal on massiivne, siis peaks see olema piisav ka liikluskoormuse kontekstis, et mitte põhjustada üleliigseid täiendavaid vajumeid, kuid nagu märgiti juba ka eelnevalt, siis sektsioonis 3 oleks võinud ülekoormus olla tegelikult suurem;
- sektsioon 4:
 - muldkeha 44 kPa;
 - ülekoormus pindamiskihi peal 16 kPa, mis eemaldati;
 - 04.06.20 pindamiskihi ja „punase joone“ vahekaugus 63 cm;
 - teekatendi paksus 99 cm, seega tuli eemaldada 36 cm muldkeha ehk ca 7 kPa;
 - seega praegune teekonstruktsiooni koormus turbal on $44-7+20 = 57$ kPa, mis on $60-57 = 3$ kPa väiksem kui koormus eelkoormamise ajal, kuid nagu konsolideerumise mõõteandmete analüüsist selgus, siis ei olnud eelkoormus või koormuse vähendamine turbakihi jaoks piisav, et liikluskoormuse tagajärjel vajumid täiendavalt ei suureneks;
 - arvestades joonise 25 andmeid, siis sektsiooni põhjapoolses osas on toimunud ca 72 cm vajumine suhtes punasesse joonde, mistõttu on teekonstruktsiooni koormus seal praegu sisuliselt sama, mis oli konsolideerumise perioodil ehk teisisõnu ülekoormust turbale justkui ei olnudki;
- sektsioon 5:
 - muldkeha 12 kPa;
 - ülekoormus pindamiskihi peal 30 kPa, mis eemaldati;
 - 04.06.20 pindamiskihi ja „punase joone“ vahekaugus 68 cm;
 - teekatendi paksus 99 cm, seega tuli eemaldada 30 cm muldkeha ehk ca 6 kPa;
 - seega praegune teekonstruktsiooni koormus turbal on $12-6+20 = 26$ kPa, mis on $42-26 = 16$ kPa väiksem kui koormus eelkoormamise ajal. Koormuse erinevus võinuks olla pisut suurem, et vältida liikluskoormuse tagajärjel tekkivaid vajumeid tulevikus.

Järgmine peatükk vaatleb valminud tee vajumeid liikluskoormuse tingimustes.

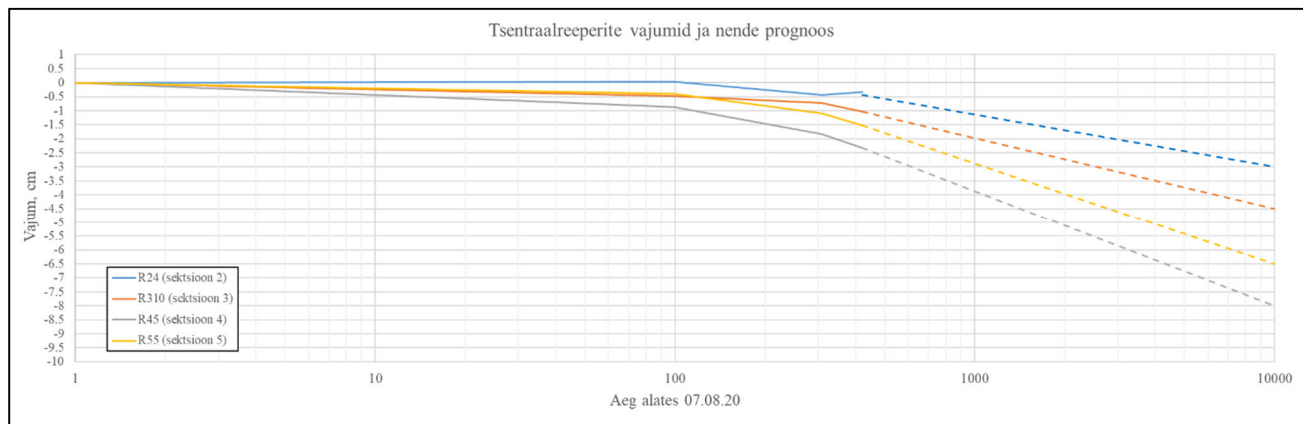
5. Vajumid tee kasutamise perioodi jooksul

Geodeetilisi mõõtetulemusi, mis on saadud peale teekatendi valmimist, on kajastatud lisades 2 ja 3 olevates aruannetes. Ehituse käigus hävisid mitmed varasemalt jälgitud reeperid, kuid mõned õnnestus säilitada, kuid mis vajasid kas pikendamist või mis said ehituse käigus kannatada, mistõttu ei ole võimalik varasemat aegrida jätkata ning alustada tuleb uuest nullpunktist. Analüüsi ja võrdluse kuupäevaks võetakse teekatendi valmimine 07.08.20.

Joonisel 26 on esitatud logaritmilisel graafikul tsentraalreeperite R24, R310, R45 ja R55 vajumid. Katselõigu projekteerimisel oli tellija üheks nõudeks, et peale teekatendi valmimist 30 aastase perioodi jooksul ei tekiks üle 100 mm (10 cm) vajumeid. Kui pikendada tsentraalreeperite mõõtetrendi 10'000 päevani (27 aastat), siis esitatud nõue on tagatud.

Kõige väiksemaid vajumeid on oodata sektsioonides 1 ja 2 (kuna sektsiooni 1 tsentraalreeper ei ole säilinud, siis eeldame samu vajumise väärtusi, mis toimub sektsioonis 2), kuid ka sektsioonis 3 ei saa toimuma märkimisväärsed ja teekasutaja poolt nähtavaid ega tuntavaid vajumeid. Kõige enam vajub sektsioon 4 ning sektsioon 5 asetub sektsioonide 3 ja 4 vahepeale. Oodatavad tsentraalreeperite vajumid praeguse trendi jätkumisel aastaks 2050 on järgmised:

- sektsioonid 1 ja 2: umbes 3 cm;
- sektsioon 3: umbes 4,5 cm;
- sektsioon 4: umbes 8 cm;
- sektsioon 5: umbes 6,5 cm.

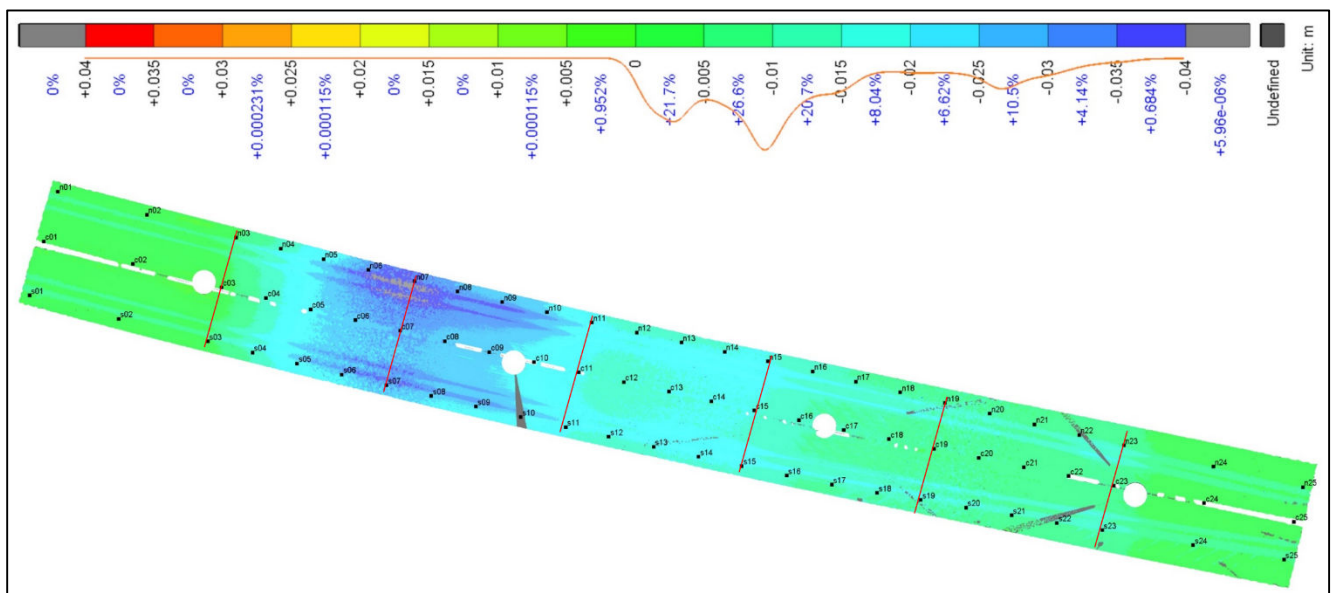


Joonis 26. Katselõigu sektsioonide tsentraalreeperite vajumid alates 07.08.20 ja nende prognoos aastaks 2050.

Katendireeperite ja laserskanneerimise tulemustest nähtub, et nii nagu ka konsolideerumise perioodil, nii on ka tee kasutamisel vajunud sektsioonide 4 ja 5 üleminekusektsioon põhjapoolses osas rohkem kui ülejäänud tee (võrreldes tee keskkohaga on põhjaserv vajunud oktoobriks 2021 5 mm rohkem). Selle tõenäoliseks põhjuseks on see, et:

- põhjapool mullet on veetase kõrgemal kui lõunapool, mistõttu on seal ka turba veesisaldus veidi kõrgem põhjustades ebaühtlast vajumit;
- sektsioonis 4 ei kasutatud konsolideerimise perioodil piisavalt kõrget ülekoormust ja/või oli koormuse vähenemine võrreldes teekatendi valmimisel turbale avalduva koormusega ebapiisav.

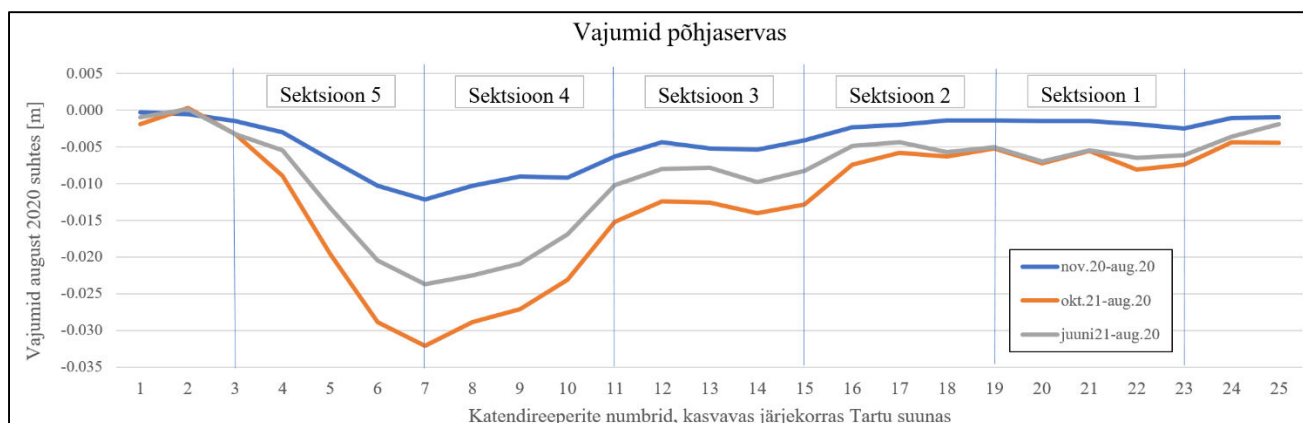
Joonisel 27 on esitatud laserskanneerimise koondtulemus, kus võrreldud on mõõtmisi augustis 2020 ja oktoobris 2021. Näiliselt on katselõigu sektsioonide teekattesse tekkinud suurem roobas, kui eelnevas ja järgnevas lõigus, kuid siinjuures tuleb arvestada, et roobaste kohal on summeerunud nii roopa sügavus kui kogu teekonstruktsiooni enda vajumid. Teekattesse on ühe aastase kasutusperioodi käigus tekkinud umbes 5 mm sügavune roobas kogu skanneeritud tee pikkuses. Jooniselt järeldub, et sektsioonides 4 ja 5 on vajumeid põhjustanud liikluskoormuse mõjud, sest näiteks sektsioon 3 on vajunud tervikuna suhteliselt ühtlasemalt.



Joonis 27. Laserskanneerimise võrdlus mõõtmiste august 2020 ja oktoober 2021 vahel.

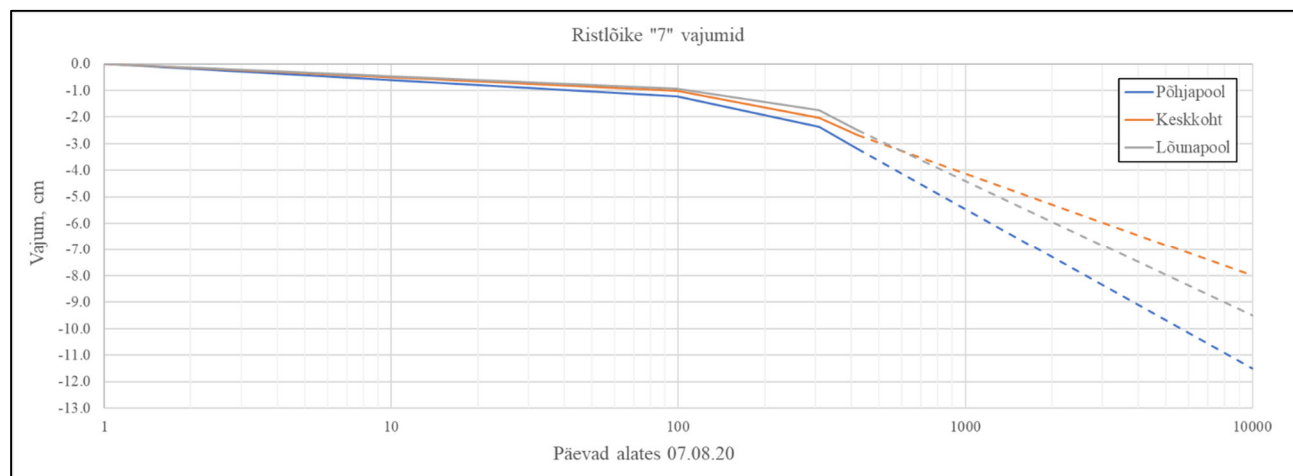
Vaadeldes lisast 3 ka varasemaid laserskanneerimise tulemusi, siis nähtub, et kui algselt on rohkem hakanud vajuma sektsioon 4, siis hiljem on suuremad vajumid täheldatavad hoopis sektsioonis 5. Probleemseimaks kohaks on sektsioonide 4 ja 5 üleminekukoht suunal Tartust Tallinna poole. Kuigi konsolideerumise andmetest nähtus, et sektsiooni 4 koormus on liiga väike ning et põhjapoolne külg vajub veidi enam kui ülejäanud muldkeha, siis nii kiiret vajumise eskaleerumist olemasolevate andmete põhjal ei osatud oodata.

Joonisel 28 on kujutatud tee põhjapoolsete katendireeperite vajumid suhtes augustis 2020 tehtud mõõtmistesse, mis näitab selgelt, et enim vajub sektsioonide 4 ja 5 üleminekukoht. Võimalikud põhjused lisaks eelnevalt mainitud veetasemete erinevusele ja vähesele eelkoormusele on, et sektsioonid ei ole omavahel hästi ühildatud ning liikluskoormus tekitab üleminekukohas dünaamilist lööki ehk täiendavat koormust.



Joonis 28. Katselõigu põhjapoolse asfaltkatte serva vajumid suhtes august 2020 tehtud mõõtmistesse.

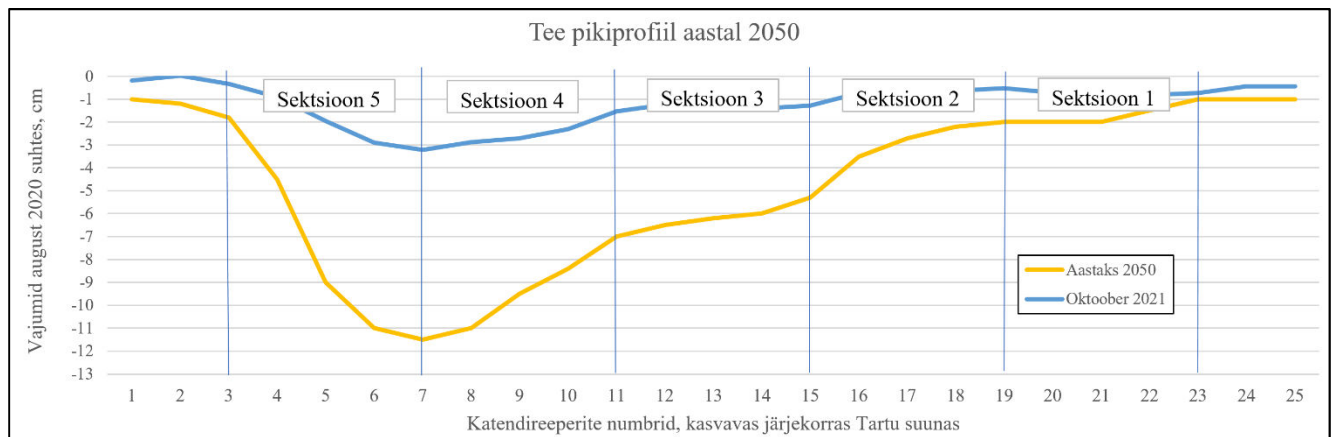
Joonisel 29 on kujutatud reeperirea nr 7 ristlõiget, mille mõõtmise andmeid on pikendatud logaritmilisel skaalal mõõtmistega sama trendi mööda kuni 10'000 päevani ehk ca aastani 2050, millelt nähtub, et tee servad, eriti põhjapoolne külj vajub kiiremini kui tee keskkoh. Seega negatiivset põikkallet teele see ei tekita ning vee äravool saab olema tagatud. Põhjapoolne teesosa on suhtes tee keskkohale vajunud selliselt, et praeguseks on põikkalde erinevuseks tekkinud ca 0,1-protsendipunkti (s.t kui tee valmimisel oli põikkalle 2,5%, siis nüüdseks on see ca 2,6%). Põikkalle ajas suureneb ja jõuab praegustele andmetele ja prognoosidele tuginedes aastaks 2050 ca 3,0% juurde.



Joonis 29. Ristlõike „7“ (v.t jooniselt 27 ristlõiget s07, c07 ja n07) vajumid logaritmilisel graafikul ja selle prognoos aastaks 2050.

Jooniselt 29 nähtub, et kui tsentraalreeperite arvestuses ei ole üle 10 cm vajumid aastaks 2050 prognoositavad, siis sektsiooni 4 ja 5 üleminekupiirkonna põhjapoolses servas on oodata ka veidi suuremaid vajumeid. Joonisel 30 on esitatud logaritmiliselt graafikult tuletatud tõenäoline põhjaserva pikiprofiil aastal 2050 eeldusel, et vajumid jätkavad praegusega registreeritud sama trendi. Ei ole välistatud, et tegelikud vajumid saavad olema ka suuremad, mis sõltub piirkonna veerežiimist, aga ka sellest, et vajumisest tekkiv ebasisasus teekonstruktsiooni peal põhjustab turbale täiendavat dünaamilist koormust. Teisalt ei ole välistatud ka see, et tegelik vajum saab olema prognoositust väiksem arvestades seda, et vajumise kiirus ajas pidevalt väheneb.

Kuigi joonisel 30 paistab vajumise muutus suur, siis tegelikkuses on see teekasutaja poolt vaevu märgatav ja tajutav, sest ühe sektsiooni pikkus on 30 m, mistõttu reeperite nr 3 ja 7 vahele tekib pikiprofiili muutus vaid ca 0,3-protsendipunkti ulatuses (nt kui algselt on 0%, siis pärast 0,3%). Suhteliselt järsk muutus sektsiooni 5 ja massivahetuse vahel on tekkinud sellest, et puudub üleminekukiil oluliselt tugevamalt pinnaselt nõrgemale. Seda oleks pidanud planeerima juba katselõigu alguses. Ka sektsiooni 1 ja massivahetuse vahel ei ole üleminekukiilu, kuid seal on muutused vaid minimaalsed, sest ülekoormus turbale oli konsolideerumise perioodil piisavalt kõrge.



Joonis 30. Katselõigu põhjapoolse serva pikiprofiili tõenäolised muutused aastaks 2050 eeldusel, et vajumid jätkavad logaritmilisel graafikul sama trendi, mis olemasolevate mõõtmistega leitud.

Kokkuvõte

Riigiteel nr 2 Tallinn – Tartu – Võru – Luhamaa km 67,067 – 67,256 asetsev turbapinnasele rajatud Võõbu katselõik on käesoleva aruande kirjutamiseks olnud liikluse poolt kasutatav 1 aasta ja 3 kuud. Selle aja jooksul on turba konsolideerumisest tingituna lisandunud vajumid vahemikus ca 0,5...3,5 cm. Olenemata vajumitest on teekonstruktsiooni stabiilsus ja turvalisus tagatud.

Katselõigu konsolideerumine ei ole täielikult peatunud, eriti sektsioonides 4 ja 5, ja tuginedes logaritmilises ajateljes saadud prognoosidele on oodata aastaks 2050 vajumiste suurenemisi kuni ca 11 cm peale sektsioonide 4 ja 5 üleminekukohas. Tee pikiprofiil muutub sellest kuni ca 0,3- ja põikprofiil 0,5-protsendipunkti võrra. Tee funktsionaalsust ja kasutamise turvalisust muudab see tühiselt, kuid kuna tekkivad vajumid on ebaühtlased, siis saavad need olema nähtavad ja tuntavad.

Konsolideerumise andmetel enne teekatendi ehitamist prognoositud tee ekspluatatsioonijärgsete oodatust suuremate ja jätkuvate vajumite põhjuseks on sektsioonides 4 ja 5 turba liiga vähene eelkoormamine või liiga väike koormuse vähendamine, mistõttu liikluse poolt tulenev koormus turbale on suurem „ajaloolisest“ koormusest põhjustades sellega täiendavat konsolideerumist.

Katselõigu põhjal on sobivaimaks viisiks tee ehitamisel turbapinnasele muldkeha armeerimine geosüntetidega ning eelkoormuse rakendamine selliselt, et viimase eemaldamisel jääks „ajalooliseks“ koormuseks enam kui teekatendi rajamise ja liikluskoormusega lisandub. Vastasel juhul konsolideerumine jätkub. Põhimaanteedel peaks liikluskoormuseks arvestama minimaalselt 25 kPa, tugi- ja kõrvalmaanteedel on tõenäoliselt sobilik kasutada väiksemat, ca 10...20 kPa. Metsa- ja muudel taolise iseloomuga teedel ei ole ülekoormuse kasutamine tingimata vajalik, kui arvestatud on teisese konsolideerumise poolt põhjustatud järelvajumitega.

Ülekoormuse planeerimisel tuleb arvestada turbakihi paksusega ja sellega, et turvas vajub ehitamise käigus pidevalt „eest ära“. Seega paksema turbakihiiga kohtades tuleb kasutada suuremat täitekihti, mis omakorda tekitab ohu muldkeha purunemiseks. Ka peaks suurema turbakihiiga kohtades rakendama suuremat ülekoormust, kui õhema kihipaksuse korral. Nii turbale kui muudele nõrkadele pinnastele teede planeerimisel tuleb samaaegselt arvestada nii vajumite kui stabiilsusega. Tulevikus esinevaid vajumeid on võimalik suurema ülekoormusega vähendada, kuid see tekitab ohu, et nõrk pinnas puruneb, mille osas tuleb rakendada vastumeetmeid. Seega on arvutusolukorra näol tegemist omamoodi tasakaaluvõrrandiga. Ka kergtäitematerjalide kasutamisel tuleb projektlahendus planeerida eelnevaga sarnaselt nii, et tee kasutamisel ei tekiks turbale suuremaid koormusi kui on olnud „ajalooline“ koormus.

Võõbu katselõik on näidanud, et kui projektlahendus on korrektne arvestades turba iseloomulike omadustega, siis on ka põhimaanteedehitus turbapinnastele võimalik ilma viimaseid eemaldamata.

Jätkutegevustena tuleks Võõbu katselõiku aastas korra geodeetiliselt mõõdistada jätkates käesoleva aruandega saadud aegrida. See võimaldab siin antud prognoose täpsustada ning saada pidevat ülevaadet katselõigu seisukorrast.

Lisa 1, ehitusgeoloogiline aruanne 2019



2978

GEOTEHNILISED UURINGUD

**Mnt nr 2 Tallinn - Tartu - Võru - Luhamaa
Kose - Võõbu katselõik km 67,067-67,256
Paide vald, Järvamaa**

Puurmeister

T.Zimovets

Autor

Kaarel Grünberg

Tallinn, 2019

SISUKORD

I Tekst

1. Üldosa
2. Geoloogiline ehitus ja pinnaseomadused
3. Puuraukude kirjeldused ja turba looduslik veesisaldus Wn
4. Uuringupunktide kataloog

II Lisad

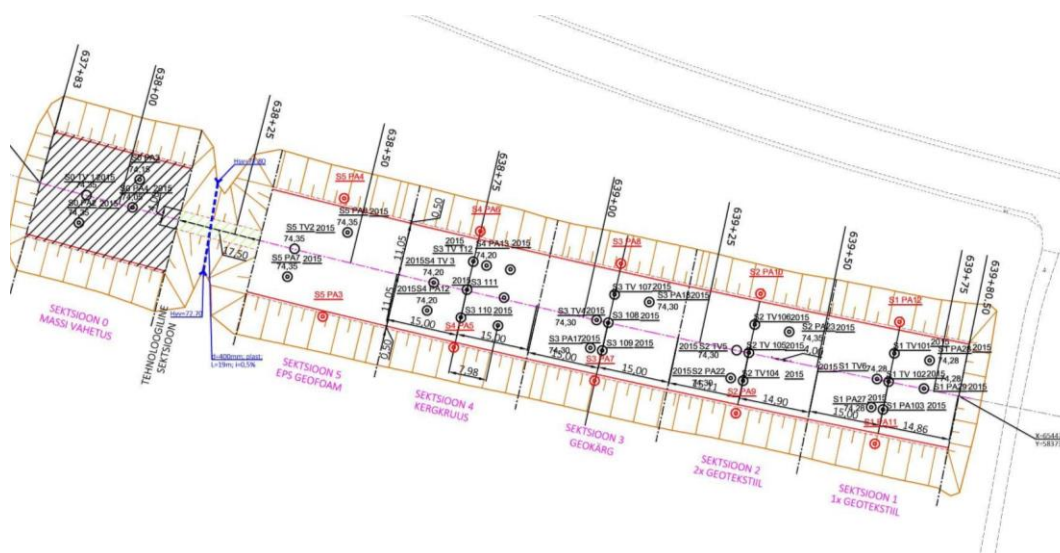
- Labori analüüside tulemused
- Puuraukude asendiplaan (Joonis 1.1)

1. ÜLDOSA

Asukoht ja ehitise iseloomustus

Uuritud katselõik paikneb Järvamaal Paide vallas riigimaantee nr 2 Tallinn – Tartu – Võru – Luhamaa km 67,067-67,256 läheduses ca 30m tee teljest paremal. Katselõik on jagatud erinevate konstruktsioonide kaupa 6 erinevaks u 30m pikaks sektsiooniks (sektsioonid 0 – 5). Konstruktsioonid jagunevad tüübilt kolme kategooriasse, massivahetus (sektsioon 0), kerg-konstruktsioonid (sektsioonid 4 ja 5) ning nn. ujuvad geotekstiiliga konstruktsioonid (sektsioonid 1-3).

Käesolevad uuringud on jätkuks katselõigul 2015. aastal teostatud uuringutele eesmärgiga hinnata turba omaduste muutust ajas katselõigu konstruktsioonide all.



Joonis 1. Katselõigu konstruktsioonide skeem

Tellijä

Uuringud tellis TalTech Inseneriteaduskond, Ehituse ja arhitektuuri instituut, Teedeehituse ja geodeesia uurimisrühm, kontaktisik Sven Sillamäe.

Kasutatud raportid

- „Mnt nr 2 Tallinn - Tartu - Võru – Luhamaa Kose - Võõbu lõik km 40,0 - 68,0“, OÜ Reaalprojekt töö nr GL14017, juuli 2014.
- „Mnt nr 2 Tallinn - Tartu - Võru – Luhamaa Kose - Võõbu katselõik km 67,067-67,256“, AS Geotehnika Inseneribroo G.I.B töö nr 2622, juuni 2015.

Uurimistööde mahud

Välitööd tehti 09-10. oktoobris 2019 a. Geoloogilise ehituse uurimiseks puuriti 10 puurauku (PA) 4,0...5,9 meetri sügavuseni teepinnast puurmasinaga GM65 GTT tigupuurimismeetodiga läbimõõduga 110mm. Igas sektsioonis tehti 2 puurauku mõlemal

pool muldkeha servas, väljaarvatud massivahetuse sektsioonis, kust on turvas juba väljakaevatud. Puuraukudest võeti kokku 60 veesisalduse proovi, mida teimiti Eesti Keskkonnauuringute Keskuse geotehnikalaboris. Saadud katseprotokollid on lisatud käesoleva köite koosseisu.

2015. aastal paigaldati igasse sektsiooni läbi teekonstruktsiooni spetsiaalsed torud tiivikkatsete teostamiseks. Torude otsi ei olnud enam konstruktsioonide peal näha ning nende seisukord oli teadmata, mistõttu teostati 3. sektsioonis kontrollkaevamised torude seisukorra hindamiseks. Kaevamiste käigus tiivikkatsete jaoks varasemalt paigaldatud torusid ei leitud ning tõenäoliselt eemaldati need ehituse käigus. Seetõttu polnud algselt planeeritud tiivikkatseid võimalik teostada ja turba omadused määrati tuginedes veesisaldusele.



Foto 2. Tiivikkatsete jaoks paigaldatud torude otsimine

Puuraukudes esinenud kihid kirjeldati, mõõdeti ja talletati hilisemaks töötluseks välipäevikusse. Samuti registreeriti puuraukudes esinenud pinnasevee tase.

Välitööde käigus paigaldati 1. sektsiooni muldkeha kõrvale ka 2 reeperit (RP), mis toetuvad aluspõhja lubjakivile. RP-1 paigaldati 4,7 m ja RP-2 4,5 m sügavusele maapinnast. RP-1 varraste kogupikkus on 5,0 m ja RP-2 4,66 m. Teostatud puuraukude ja paigaldatud reeperite asukohad on toodud puuraukude asendiplaanil (*joonis 1.1*).

Tööd teostasid puurmeister Tõnu Zimovets ja Uku Ostrat. Aruande koostas Kaarel Grünberg. Uuringute tegemisel ja aruande koostamisel on juhindatud MKM-i määrusele nr 32 „Ehitusgeoloogilistele uuringutele esitatavad nõuded“.

2. GEOLOOGILINE EHITUS JA PINNASEOMADUSED

Reljeef

Reljeefi üldine tõus on loodest kagu suunas (Koselt Võõbu poole). Vaadeldav katselõik kulgeb Kõrvemaa maastikul asetseval sool. Pindmise loodusliku kihina esineb katselõigul turvas ja muda. Turba ja muda lamamiks on tolmliid, fluvioglatsiaalsed liivad, saviliivad ning moreen (glatsiaalse tekkega pinnas).

Geoloogiline ehitus ja turba omadused

Kihid eraldati välja välitöödel saadud puurimistulemuste ja laborianalüüside andmete järgi. Pinnaste täpsemad kirjeldused ja lasumissügavused on toodud lõigul eelnevalt teostatud uuringutes.

Puuraukude kirjeldused on toodud raporti lõpus. Laborianalüüside tulemused on esitatud lisas.

Käesolevate uuringute käigus keskenduti katselõigu konstruktsioonide all oleva turba omaduste määramisele tuginedes pinnase veesisaldusele. Kõige suurem turbakihi keskmise veesisalduse muutus (448,7%) toimus 1. sektsioonis, mida võib põhjendada ka sellega, et antud piirkonnas oli looduslikult kõige õhem turbakiht. Sektsioonide 2 – 4 keskmise veesisalduse muutus jäi küllaltki sarnasesse suurusjärku (365,6 – 373,7 %). 5. sektsioonis oli looduslikult kõige suurem turba paksus, kuid pinnase keskmise veesisalduse muutus oli eelnevatest sektsioonidest suurem (410,7%). Vaadates 3. peatükis toodud pinnase veesisalduse graafikuid, siis 5. sektsioonis toimub järsem muutus just turbakihi ülemises osas, mida võib põhjendada sellega, et kõrval olev massivahetuse sektsioon mõjus antud lõigu pealmisele osale dreniivalt.

	Keskm. Wn 2015.a juunis %	Keskm. Wn 2019. a oktoobris %	Muutus ajavahemikul %
Sektsioon 1 - geotekstiil	668,9	220,1	-448,7
Sektsioon 2 - 2x geotekstiil	620,9	255,0	-365,9
Sektsioon 3- geokärg	693,9	328,3	-365,6
Sektsioon 4 - kergkruus	688,2	314,6	-373,7
Sektsioon 5 - EPS geofaam	658,7	248,1	-410,7

Tabel 1. Turba keskmise veesisalduse Wn muutus

Turba looduslik veesisaldus Wn jääb vahemikku 64,4...429,7%, 2015. a juunis enne katselõigu ehitust oli pinnase veesisaldus vahemikus 600...800%. Loodusliku veesisalduse ja puuraukude kirjelduste täpsemad graafikud on esitatud peatükis 3.

Graafikutelt on veesisalduse järgi eristatav kolm erinevat horisontaalset turba kihti, mille omadused on järgnevad:

- 1) Tugevalt konsolideerinud turvas veesisaldusega 100...200%

Dreenimata nihketugevus $C_{uf} = 19$ kPa

- 2) Keskmiselt konsolideerinud turvas veesisaldusega 200...300%

Dreenimata nihketugevus $C_{uf} = 16$ kPa

- 3) Vähem konsolideerinud turvas veesisaldusega 300...400%

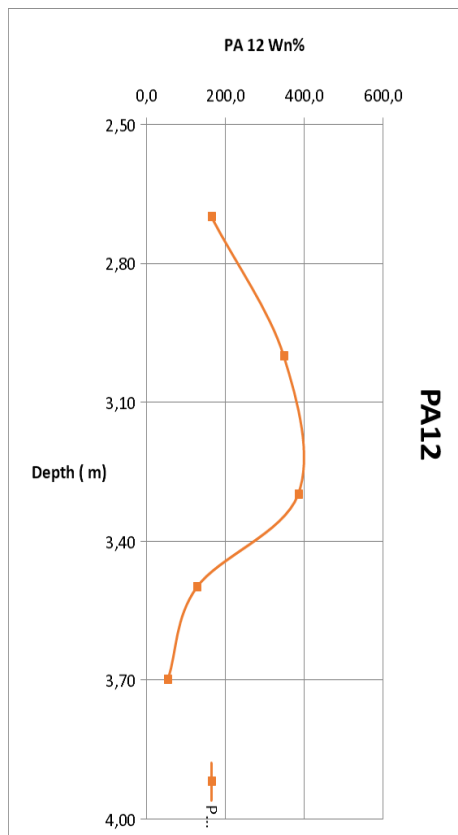
Dreenimata nihketugevus $C_{uf} = 14$ kPa

Keskmsed nihketugevused sektsioonide kaupa on toodud tabelis 2. Kuna antud uuringute käigus ei olnud võimalik tiivikkatseid teostada, siis on nihketugevuse väärtused antud vastavalt M. Metsa poolt koostatud üldistatud Eesti turvaste geotehniliste omaduste tabelile, mis on toodud M. Metsa TTÜ pinnasemehhaanika loengukonspektis.

	Keskm. C_{uf} kPa 2015. a juunis	Keskm. C_{uf} kPa 2019. a oktoobris
Sektsioon 1 - geotekstiil	6,0	17,0
Sektsioon 2 - 2x geotekstiil	5,0	16,0
Sektsioon 3- geokärg	6,0	14,0
Sektsioon 4 - kergkruus	6,0	14,0
Sektsioon 5 - EPS geofoam	7,0	16,0

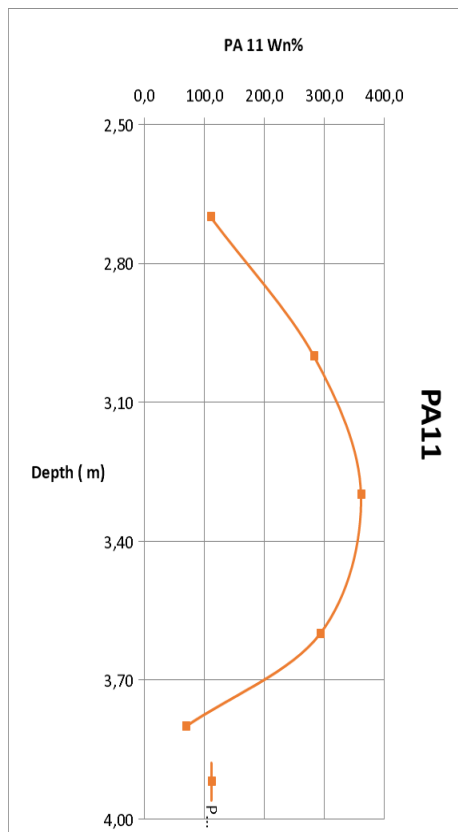
Tabel 2. Turba keskmine nihketugevus sektsioonide kaupa

3. PUURAUKUDE KIRJELDUSED JA TURBA LOODUSLIK VEESISALDUS Wn



PA - 12 – 1. sektsioon, vasak

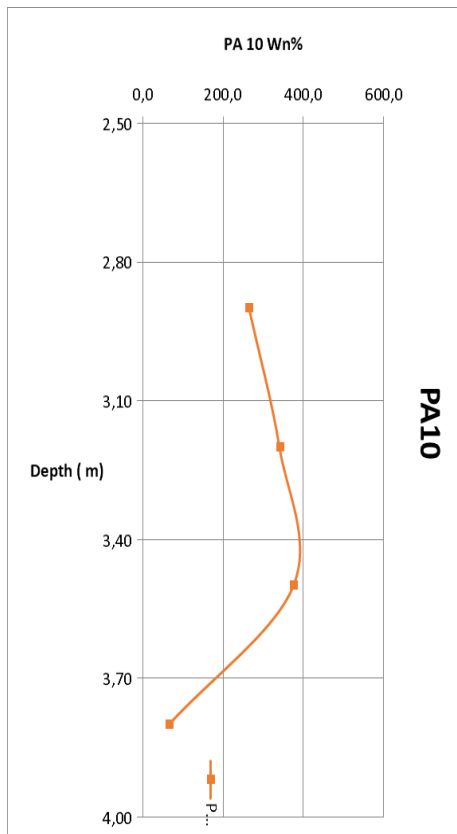
0.0 - 2.65 Täide
2.65 - 3.80 Turvas, alates 3,6 m mudane
3.80 - 4.00 Peenliiv, hall, tihe



PA - 11 – 1. sektsioon, parem

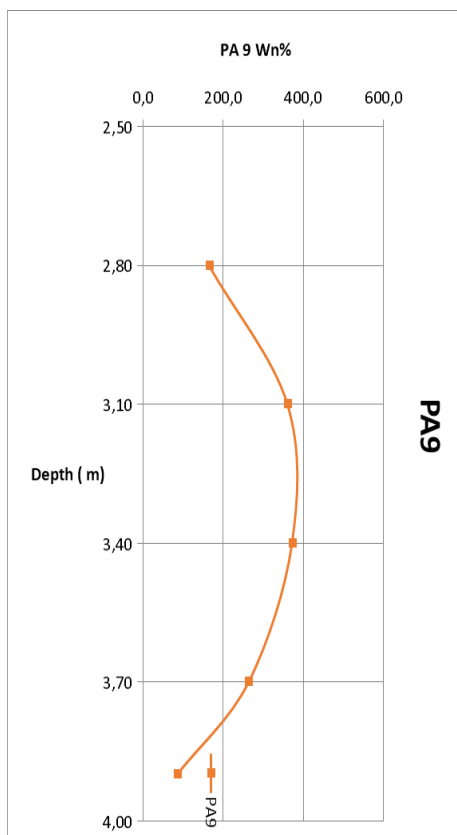
0.0 - 2.70 Täide
2.70 - 3.75 Turvas
3.75 - 3.90 Mudane turvas,
hästilagunenud
3.90 - 5.00 Peenliiv, hall, kesktihe,
veeküllastunud

Vesi 1.90



PA - 10 – 2. sektsioon, vasak

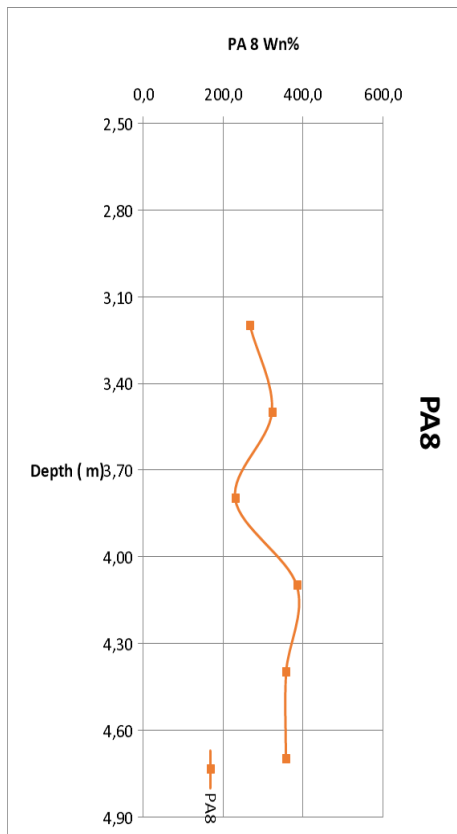
0.0	- 2.80	Täide
2.80	- 4.00	Turvas
4.00	- 4.30	Peenliiv, hall, tihe



PA - 9 – 2. sektsioon, parem

0.0	- 2.80	Täide
2.80	- 3.60	Turvas
3.60	- 4.00	Mudane turvas
4.00	- 4.20	Peenliiv, hall, tihe, veeküllastunud

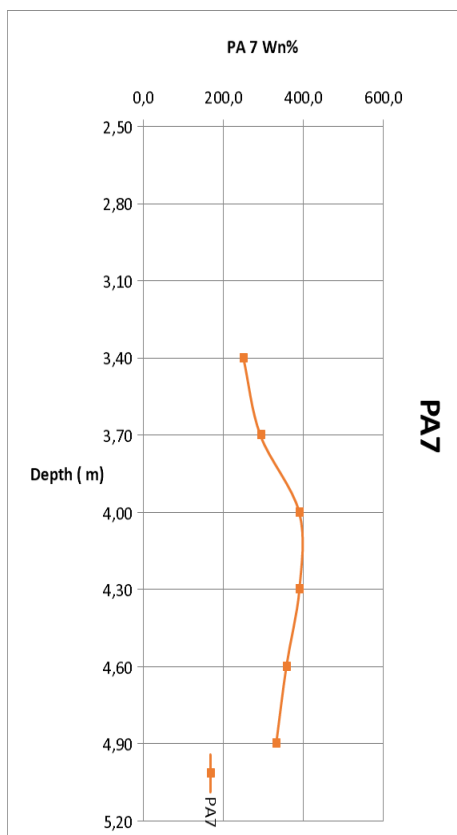
Vesi 1.90



PA - 8 – 3. sektsioon, vasak

0.0 - 3.10 Täide
 3.10 - 4.80 Turvas
 4.80 - 5.00 Peenliiv, hall, tihe,
 veeküllastunud

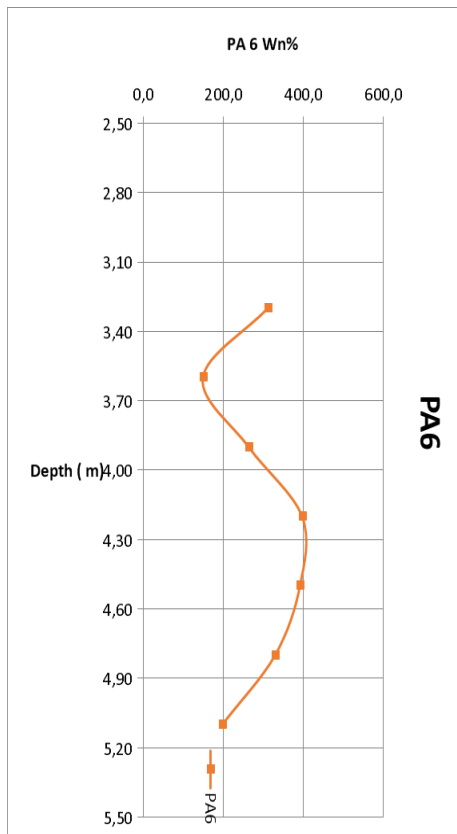
Vesi 0.25



PA - 7 – 3. sektsioon, parem

0.0 - 3.30 Täide
 3.30 - 4.50 Turvas
 4.50 - 5.00 Mudane turvas,
 hästilagunenud
 5.00 - 5.30 Peenliiv, hall, tihe,
 veeküllastunud

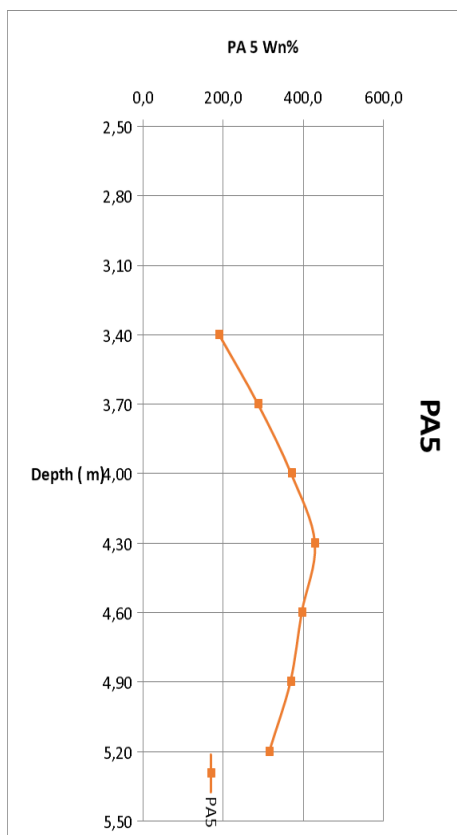
Vesi 1.30



PA – 6 – 4. sektsioon, vasak

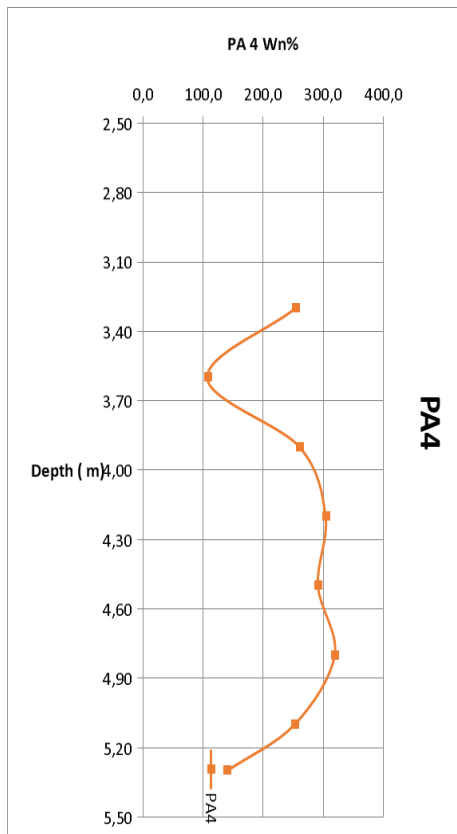
0.0 – 1.70 Täide
 1.70 - 3.20 Kohev graanulitäide
 3.20 - 5.20 Turvas
 5.20 - 5.30 Savimöll, hall, pehmeplastne
 5.30 – 5.50 Peenliiv, hall, kesktihe, veeküllastunud

Vesi 1.20



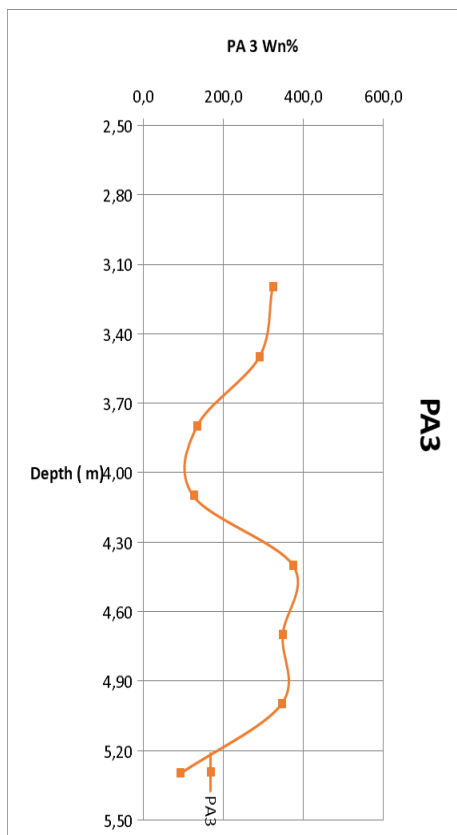
PA – 5 – 4. sektsioon, parem

0.0 – 2.40 Täide
 2.40 - 3.40 Graanulitäide
 3.40 - 4.60 Turvas
 4.60 - 5.30 Turvas, mudane, hästilagunenud
 5.30 - 5.60 Savimöll, hall, pehmeplastne, veeküllastunud
 5.60 - 5.90 Peenliiv, hall, tihe, veeküllastunud



PA - 4 – 5. sektsioon, vasak

0.0 - 3.25 Täide
 3.25 - 5.15 Turvas
 5.15 - 5.30 Järvelubi
 5.30 - 5.50 Peenliiv, hall, tihe,
 veeküllasutnud



PA - 3 – 5. sektsioon, parem

0.0 - 3.10 Täide
 3.10 - 5.10 Turvas
 5.10 - 5.30 Turvas järvelubjaga
 5.30 - 5.50 Peenliiv, hall, tihe,
 veeküllastunud

4. UURINGUPUNKTIDE KATALOOG

PA	Sektsioon	X koordinaat	Y koordinaat
3	5	6544787.21	583602.73
4	5	6544811.94	583607.23
5	4	6544780.75	583630.17
6	4	6544805.06	583635.72
7	3	6544773.79	583659.65
8	3	6544798.30	583665.20
9	2	6544766.96	583689.27
10	2	6544791.97	583694.43
11	1	6544760.58	583718.35
12	1	6544786.10	583723.52

Tabel: 1 LOODUSLIK VEESISALDUS	Objekt: Kose-Võõbu katselõik	Teimiprotokoll: 19GB - 19
--	--	-------------------------------------

Labori nr.	PA nr.	Proov		Kiht	W _n %	Labori nr.	PA nr.	Proov		Kiht	W _n %	Labori nr.	PA nr.	Proov		Kiht	W _n %
		Süga- vus m	Abs.kõr- gus m					Süga- vus m	Abs.kõr- gus m					Süga- vus m	Abs.kõr- gus m		
1690	PA8	3.20			267.6	1711	"	5.10			252.7	1732	"	4.00			390.8
1691	"	3.50			322.4	1712	"	5.30			140.1	1733	"	4.30			391.1
1692	"	3.80			230.6	1713	PA6	3.30			311.8	1734	"	4.60			358.5
1693	"	4.10			385.0	1714	"	3.60			149.8	1735	"	4.90			333.2
1694	"	4.40			358.1	1715	"	3.90			264.4	1736	PA5	3.40			190.4
1695	"	4.70			357.5	1716	"	4.20			397.9	1737	"	3.70			287.7
1696	PA10	2.90			265.2	1717	"	4.50			392.6	1738	"	4.00			370.4
1697	"	3.20			341.0	1718	"	4.80			330.4	1739	"	4.30			429.7
1698	"	3.50			376.1	1719	"	5.10			198.3	1740	"	4.60			396.6
1699	"	3.80			65.4	1720	PA11	2.70			111.0	1741	"	4.90			368.3
1700	PA12	2.70			165.4	1721	"	3.00			283.1	1742	"	5.20			315.5
1701	"	3.00			349.0	1722	"	3.30			361.7	1743	PA3	3.20			324.0
1702	"	3.30			385.0	1723	"	3.60			293.6	1744	"	3.50			291.1
1703	"	3.50			127.7	1724	"	3.80			70.0	1745	"	3.80			134.8
1704	"	3.70			54.7	1725	PA9	2.80			164.7	1746	"	4.10			126.0
1705	PA4	3.30			254.1	1726	"	3.10			361.1	1747	"	4.40			375.3
1706	"	3.60			107.1	1727	"	3.40			372.5	1748	"	4.70			349.4
1707	"	3.90			261.0	1728	"	3.70			264.1	1749	"	5.00			346.0
1708	"	4.20			304.1	1729	"	3.90			85.0	1750	"	5.30			92.8
1709	"	4.50			291.5	1730	PA7	3.40			251.2						
1710	"	4.80			319.4	1731	"	3.70			293.5	Proovid on toodud: 11.10.2019					

Lisa 2, geodeetilised mõõdistused 2020

**VÕÕBU TEE-EHITUSLIKU KATSELÕIGU
KATENDIREEPERITE PAIGALDAMISE, ESMASE
KÕRGUSMÄÄRANGU JA LASERSKANEERIMISE**

ARUANNE



**Teedehituse ja geodeesia uurimisrühma juht
Artu Ellmann**

Tallinn 2020

Sisukord

1. Sissejuhatus ja lühikokkuvõte.....	3
2. Katendireeperite paigaldamine	4
3. Olemasolevate vaatlusreeperite kaasamine	6
4. Nivelleerimise lähtereeperid	8
5. Reeperite nivelleerimine.....	10
5.1. Nivelliiri ja lattide kontrollid	10
5.2. Nivelleerimise tulemused	11
5. Katendi terrestriline laserskaneerimine.....	18
6. Kasutatud instrumendid ja töövahendid.....	19
6.1. Trimble DiNi 03 digitaalnivelliir.....	19
6.2. Trimble R8 GNSS vastuvõtja	20
6.3. Trimble S6 robot-tahhümeeter	22
6.4. Leica ScanStation C10 terrestriline laserskanner	23
7. Üleantavad materjalid	24

Käesoleva aruande illustatsioonideks on töötäitjate pildimaterjal ja ekraanikuvad.

1. Sissejuhatus ja lühikokkuvõte

Käesolev aruanne käsitleb ettevõtte GRK Infra (edaspidi Tellija) ning Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja Arhitektuuri instituudi vahel 17.06.2019 sõlmitud teadus- ja arendustööde töövõtulepingu nr 17-06-2019 „Võõbu teedehitusliku katselõigu (PK 637+83 - 639+80) ja külgnevate lõikude geodeetiline monitooring ja geotehniline analüüs 2019-2021“ raames katendireeperite paigaldamist, nende kõrgusmäärangut ning terve katselõigu laserskaneerimist. 150 m pikkune Võõbu katselõik on osa 08/2020 valmisehitatud (liiklus avatud 14.08.2020) Ardu-Võõbu neljarealisest maateelõigust riigiteel nr. 2 Tallinn-Tartu-Võru–Luhamaa, paiknedes vahetult enne Tartu poolset ühendust endisaegse maanteega vt Foto 1 ja Joonis 2.



Foto 1. Võõbu katselõik osana riigiteest nr 2 (Tallinn-Tartu-Võru –Luhamaa); (ülemine) vaade Tartu suunale, (alumine) vaade Tallinna suunale. Märka, et katselõik paikneb vahetult enne uue 4-realise teelõigu ühendumist olemasoleva 2-realise maanteega. Sestap on katselõigu mõlemas suunas enamuses üherealine liiklus, mis katselõigu Tallinna poolses osas läheb üle kaherealiseks.

Käesolev aruanne on jätkuks meie poolt 2019. aastal esitatud Võõbu katselõigu 2015-2019 mõõtmiste geotehnilisele üldanalüüsile. Käesolev aruanne keskendub katendireeperite paigaldamisele, nende esmasele kõrgusmäärangule ning laserskaneerimise tulemustele ja on järgnevalt lähteks 2021 läbiviidavale geotehnilisele lõppanalüüsile.

Kogu katselõik koosneb viiest erinevast teemulde seksioonist järgnevalt (loetletuna Tartu poolt Tallinna suunda liikudes): ühe- ja kahekihiline geotekstiil, geokärg, kergkruus- (LWA) ja vahtpolüstüreen- (EPS) mulle.

Iga seksioon on 30 meetri pikkune. Mõõtmistesse kaasati ka katselõigule külgnevad massivahetusega alad, katselõigu mõlemast otsast laienedes kuni 50 m kaugusele.

Mõõtmistel kasutati kõrgtäpset nivelleerimist (kõrgusmääranguks), elektron-tahhümeetriat (lähtepunktide ning katendireeperite plaanilise asendi tuvastamiseks/väljamärgimiseks) reaajalisi RTK-GNSS (*Global Navigation Satellite System*) satelliitmõõtmisi (varempaigaldatud reeperite otsing, baasjoone otspunktide koordineerimine) ning terrestilise laserskaneerimise tehnoloogiat (katendi mõõdistamine). Kõrgusmääranguks kõrgtäpse nivelleerimisega kasutati digitaalnivelliiri Trimble DiNi03, kahte 2 m pikkust invarlatti ja kuni 4 m pikendatavat ribakoodiga mõõdulatti. Töös kasutatud laserskanner Leica ScanStation C10, robot-tahhümeeter Trimble S6, RTK-GNSS seade Trimble R8 ja litsentseeritud tarkvara Leica Cyclone on soetatud Eesti teaduse infrastruktuuride teekaardi objekti „Eesti Keskkonnaobservatoorium“ (projekt AR12019) poolt eraldatud vahenditest.

Geodeetilised tööd korraldas TTÜ Ehituse ja Arhitektuuri instituut, teedehituse ja geodeesia uurimisrühma juht professor Artu Ellmann, kes koostas ka käesoleva aruande. Laserskaneerimise andmetöötlus viidi läbi 3D punkt pilve töötlustarkvaraga Leica Cyclone 9.0 Sander Varbla poolt. Mõõtmistel osalesid lisaks eelnimetatutele veel Sven Sillamäe ja Angelina Jerjomina.

2. Katendireeperite paigaldamine

Katendireeperid paigutati koheselt peale teekatemärgistuse pealekandmist 07.08.2020 nn. profiilikolmikutena mõlemasse teeserva ning Tallinna suunduva sõidusuuna äärmisesse vasakpoolsesse serva (seega siis tee keskele paigaldatud jämeplekist pörkepiirde vahetusse lähedusse, vt Foto 2). Katendireeperitena kasutati ca 5 cm pikkuseid spetsiaalseid asfaldinaelu, vt Foto 3.



Foto 2. Vaade katselõigule, Tallinna suund.



Foto 3. Kasutatud katendireeperid. Märka, et kollakast metallist 2 mm sügavuse tsentreerimisavaga katendireeperid n- ja s-profiilides tähistavad skaneerimistähiste (vt Foto 4) asukohti.

Et peamised probleemkohad võivad olla eri seksioonide üleminekud, siis paigutati katendireeperid seksioonide piiridele. Seksioonisiselt paigaldati aga keskele, veerand- ja kolmveerandkaugustele ($\frac{1}{4}$ ja $\frac{3}{4}$). Seega saab iga seksiooni geomeetria iseloomustada 15 katendireeperiga, millest seksioonipiiride katendireeperid on ühised naaberseksiooniga. Katselõiguga külgnevatele massivahetusega lõikudele paigaldati katendireeperid 15 ja 30 meetri kaugusele mõlemale poole katselõigu otstest. Kokku paigaldati 07.08.2020 seega $3 \times 25 = 75$ uut katendireeperit.

Mõõtepunktid nummerdati kasvavalt alates mõõdistuspiirkonna Tallinna poolsest servast. Tallinna suunduva sõidusuuna (ilmakaarte suunas orienteeritult on see põhjapoolne) parempoolse serva punktid kuuluvad nn. n-profiili, tee keskel on c-profiil ning Tartu sõidusuuna parempoolne serv (lõunapoolne) on s-profiil. Näiteks n01 tähistab esimest mõõdistuspunkti Tallinna suunduva sõidusuuna parempoolses servas, samas kui s25 tähistab Tartu sõidusuuna parempoolse serva viimast mõõdistuspunkti.

Teemärgistusest tulenevalt paigaldati katendireeperid n- ja s-profiilides äärejoonest välisserva. Parema leitavuse huvides paigutati need lähima nn. „saki“ kohale ning tähistati punase markervärviga, vt Foto 4. Tee keskele pörkepiirde lähedusse paigutatud katendireeperite tähistus on näidatud Fotol 5.

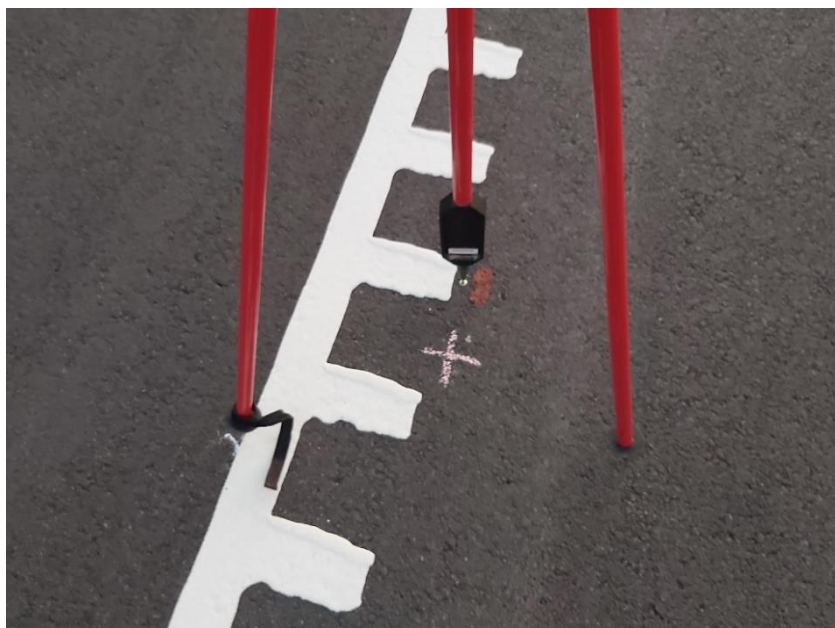


Foto 4. Katendireeperite paigutus ja tähistus äärejoonte läheduses. Märka, et esialgselt väljamõõdetud asukoht on tähistatud kriidist ristiga.



Foto 5. Põrkepiirde lähedusse paigutatud katendireeperite tähistus.

3. Olemasolevate vaatlusreeperite kaasamine

Lisaks uutele katendireeperitele kaasati käesolevatesse mõõtmistesse ülekoormuse eemaldamise järgselt säilinud pikavardalised reeperid, mis 2015 paigutati teemulde alust turbakihti katva geotekstiili pealispinnale. Säilinud reeperite ülevaade on toodud Tabelis 1. Nende reeperite puhul on seega sisuliselt tegemist jätkumõõtmistega Maanteeameti poolt 2015-2016 tellitud Võõbu katselõigu mõõdistustele, mida kajastab lõpparuanne lingil https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/2016_11_18_voobu_lopparuanne.pdf.

Seonduvat geodeetilist monitooringut teostas toonane TTÜ teedeehituse instituut. Eelnevaid geodeetilisi töid on üksikasjalikult kirjeldatud eelnevates tööaruannetes:

Ellmann (2015) Võõbu katselõigu vaatlusreeperite paigaldamise ja kõrgusmäärangu aruanne, TTÜ Teedeinstituut, 11/2015.

Ellmann (2016a) Võõbu katselõigu vaatlusreeperite 2015.a IV kvartali monitooringu aruanne, TTÜ Teedeinstituut, 01/2016.

Ellmann (2016b) Võõbu katselõigu vaatlusreeperite 2016. a I kvartali monitooringu aruanne, TTÜ Teedeinstituut, 10/2016

Ülekoormuse eemaldamise järgseid 21.06.2020 mõõtmistulemusi kajastab aruanne:

Ellmann (2018) Võõbu katselõigu ülekoormuse eemaldamisega seonduvate deformatsioonide geodeetilise monitooringu aruanne, TTÜ Ehituse ja Arhitektuuri instituut, teedeehituse ja geodeesia uurimisrühm, 07/2018

Järgneva tee-ehituse käigus pidi projektikohaselt (tuli ju senise teemulde pealmised kihid eemaldada ning asendada teistsuguse materjaliga) hävima suur osa uue katendi alale jäävatest reeperitest. Kokkuleppel ehitajaga (projektijuht Priit Paabo) õnnestus sektsioonide 2, 3, 4 ja 5 tsentraalreeperid siiski säilitada. Tee-ehituse edenedes tuli teeteljel paiknevaid sektsioonide tsentraalreepereid 2019-2020 jooksul mitmeid kordi käia pikendamas ja sirgendamas.

Okt. 2019 õnnestus sirgendada sektsioonide 3, 4 ja 5 tsentraalreeperite ülemised osad, kuid sügavamal võivad reeperivarda osad olla pisut kõverdunud. Pikendamist võimaldas tsentraalreeperite eelnevalt keermetatud tipp, mille otsa keerati 5 cm pikkune üleminekumuhv, millesse kruviti keermevarras, vt Foto 6. Täies ulatuses olid säilinud ka

3. sektsiooni nõlvareperid ning mõned 4. ja 5. sektsiooni teepeenra ribale paigutatud reeperid, vt Foto 7. Mõnda neist tuli ka oluliselt sirgendada. Täiendavaid muldreepereid 2020 ei paigaldatud.



Foto 6. Katselõigu uude kruusakihti mattunud tsentraalreepereite väljakaevu ja pikendamine oktoobris 2019.



Foto 7. Tsentraalreepereite pikendamine (vasakul), vaade kolmanda sektsiooni säilinud nõlvareperitele (paremal), oktoobris 2019.

Kuna puudub kindlus varasemate reeperivarraste sirguse osas, siis käesolevas uuringus lähtutakse kindluse mõttes 07.08.2020 mõõtmistest, nn. 0-tsüklis (teeserva ning nõlvareperite puhul ehk õnnestub kindlamalt taastada side

2015-2016 mõõtmistega, kuna need on vähem kannatada saanud). Enne katendi paigaldamist käidi aprillis 2020 tsentraalreepereid veelgi pikendamas selliselt, et need peale katendi projektkõrguse saavutamist ulatuksid teekattest pisut välja, vt Foto 8.



Foto 8. Tsentraalreepereite pikendamine aprillis 2020, enne katendi paigaldamist

4. Nivelleerimise lähtereeperid

Kõikidel väljasõitudel toimus ka reeperitippude kõrgusmäärang, mille lähteks kasutati töötsoonist välja jäävat pinnasreepereid, vt. Foto 9. See paigaldati 2015. aastal ning kujutab endast puursüdamikku, mis ulatub kuni paekihini. Seega eeldatavalt võib seda stabiilseks lugeda. Et käesolev geodeetiline monitooring toimuks ühtses kõrgussüsteemis, siis pinnasreepere kõrgusväärtusena kasutati algset Balti 1977 aasta kõrgussüsteemi kõrgusväärtust 74.197 m. BK77 kõrguste erinevus praegu kehtiva kõrgussüsteemi EH2000 suhtes on 0.202 m. Abireeperitena kasutakse täiendavaid pinnasreepereid, mis analoogsetena paigutati 2019. aasta oktoobris, vt Fotod 10 ja 11. Edasistes nivelleerimistes lähtutakse vajadusel kõikidest pinnasreepereitest.



Foto 9. Geodeetilise nivelleerimise lähtepunkt, 2015. aastal paigaldatud pinnasreeper RP.



Foto 10. Katselõigust põhjasuunda 2019. aastal paigaldatud pinnasreeper RPN.



Foto 11. Katselõigust lõunasuunda 2019. aastal paigaldatud pinnasreeper RPS.

2019. aastal paigaldatud abireeperite kõrgused määrati invarlattidega 2015 pinnasreeperi suhtes võrdõlgse geomeetrilise nivelleerimisega. Tulemuskõrgused ja koordinaadid on esitatud Tabelis 1.

Tabel 1. Lähtereeperite koordinaadid ja omavahelised kõrguskasvud

Reeperi nimetus	Koordinaat X	Koordinaat Y	07.08.2020 määratud kõrguskasvud	Kõrgussüsteemi BK77 kõrgusväärtus
2015 a paigaldatud pinnasreeper	6544826,071	583639,120	0	74.1970
Katsealast põhja suunas 2019 a paigaldatud pinnasreeper RPN	6544793,407	583721,157	+0.290 m	74.487
Katsealast lõuna suunas 2019 a paigaldatud pinnasreeper RPS	6544752,577	583722,639	- 0.127 m	74.070

5. Reeperite nivelleerimine

Nivelleerimisel kasutati digitaalnivelliiri Trimble DiNi03 (seerianumber 730171), mis on kujutatud Fotel 12. Nivelleerimiskomplekti kuulus:

- Trimble nivelliir DiNi03 ja 1 kruvikinnitusega standardstatiiv
- Kaks 2 m pikkust invarribaga koodlatti LD12 seerianumbritega 037800 ja 037648.
- Kuni 4 meetrini pikendatav ribakoodiga mõõdulatt
- mõõdulint nivelleerimismärkide asukohtade määramiseks
- välilehed



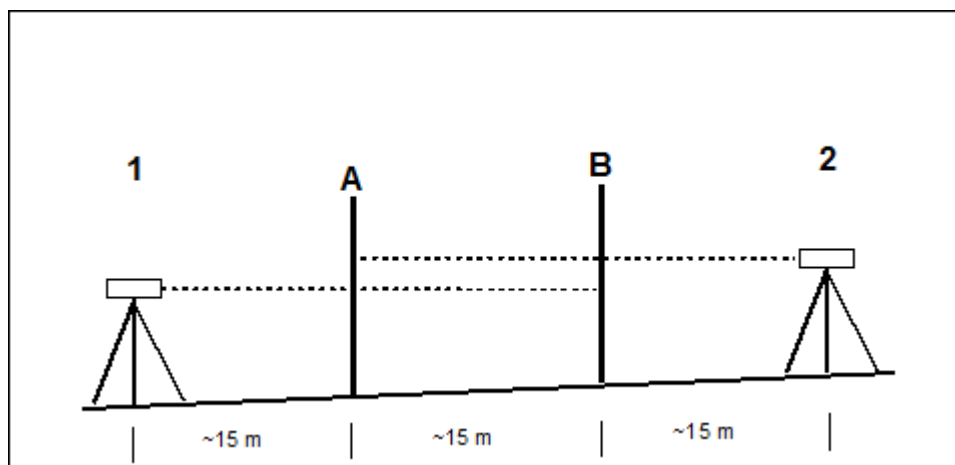
Foto 12. Nivelleerimisel kasutatud digitaalnivelliir Trimble DiNi03 (esiplaanil) suunatuna 4-meetri pikkusele mõõdulatile.

5.1. Nivelliiri ja lattide kontrollid

Nivelliiri vaatekiire horisontaalsuse kontroll

Nivelliiri viseerimiskiire ja horisontaaltasapinna vahelist nurka, i , kontrolliti vahetult enne mõõtmiste algust *Nähbauer* meetodil. Selle kontrollimeetodi kohaselt paigutatakse nivelleerimislatid (A ja B) teineteisest ca 15 m kaugusele, vt joonis 1.

Nivelliir asetati esimesse seisupunkti (~15 m kaugusel latist A) ning võeti lugemid mõlemalt latilt (esmalt A siis B). Seejärel pöörati latid vastassuunda ning teises seisupunktis (~15 m kaugusel latist B) võeti lugemid vastupidises järjekorras (nüüd B, siis A). Kontrolli käigus võeti järjestikku kolm väärtust. Kontrolli tulemusena saadud visiirkiire kõrvalekalde keskmine väärtus ($-8.0''$ kaare-sekundit, vt Tabel 1) salvestati nivelliiri andmekandjale ja kasutati seda nivelleerimistulemuste parandina.



Joonis 1. Nivelliiri viseerimiskiire horisontaalsuse kontroll Nähnauer'i meetodil

Tabel 2. Nivelliiri viseerimiskiire horisontaalsuse kontrolli tulemused

Kontroll			Vaatekiire kõrvalekalle horisontaal- asendist, c_{-} ["]
kuupäev	Kellaeg vööndiaeg (suveaeg GMT +3h)	Temperatuur C	
2020-08-07	19:15	+22	-8.0

Vaatekiire kõrvalekallet horisontaalasendist c_{-} ["] arvutati järgmise valemi kohaselt:

$$c_{-} = \frac{(a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)}{(d_{a2} - d_{b2}) - (d_{a1} - d_{b1})} \rho'' \quad (1)$$

kus a_1 on lähima lati lugem esimesest seisust ja b_1 on kaugema lati lugem esimesest seisust ning a_2 on kaugeima lati lugem teisest seisust ja b_2 on lähima lati lugem teisest seisust, vastavad kaugused on tähistatud d -ga.

Nivelliiri tarkvara arvestab saadud kõrvalekalde parandit latilugemi võtmisel. Seega ka koodlattice tulemused on vastavalt korrigeeritud. Ilma selle parandita tooks näiteks 10" kaaresekundiline vaatekiire mittehorisontaalsus kaasa 2 mm vea 35 m õlapikkuse juures ($\tan(i) \cdot 35 \text{ m}$). Et kõrgusväärtused määratakse nn. vahevaadetena, siis on vaatekiire mittehorisontaalsuse korrektne arvessevõtmine siin väga vajalik. Vahevaadete puhul määratakse esmalt instrumendi horisondi kõrgus kindelpunkti suhtes, misjärel määratakse nivelleerimismärkide kõrgused instrumendi horisondi suhtes.

5.2. Nivelleerimise tulemused

Nivelleerimisele vahevaadete meetodil kuulusid nii katendi- kui ka turbareeperite tipud, ca 1-2 mm täpsusega. Nivelleerimisel salvestati M5 RecE formaadis nivelliiri andmekandjale järgmised suurused:

- Lähtepunkti number (antud juhul 7570) ja kõrgusväärtus
- Latipunkti number (1V, 011.... jne)
- kellaeg (kohalik vööndiaeg)
- lati lugemid (ühik 0.00001 m)
- instrumendi ja lati vaheline kaugus (ühik 0.001 m)
- kõrgusväärtus

vt. ka alljärgnevat näidist mõõtmistulemustest.

```

For M5|Adr 1|TO 20200807.dat
For M5|Adr 35|TO Backsight | | |
For M5|Adr 36|KD1 RP | | |Z 74.19700 m |
For M5|Adr 37|KD1 RP 19:36:561 |R 3.63964 m |HD 40.037 m | |
For M5|Adr 38|TO Intermediate sight. | | |
For M5|Adr 39|KD1 n01 19:38:171 |Rz 1.43031 m |HD 50.775 m |Z 76.40633 m |
For M5|Adr 40|KD1 n02 19:38:381 |Rz 1.43911 m |HD 35.887 m |Z 76.39753 m |
For M5|Adr 41|KD1 n03 19:38:591 |Rz 1.44727 m |HD 21.480 m |Z 76.38937 m |
For M5|Adr 42|KD1 n04 19:39:171 |Rz 1.45810 m |HD 14.747 m |Z 76.37854 m |
For M5|Adr 43|KD1 n05 19:39:331 |Rz 1.46590 m |HD 9.473 m |Z 76.37074 m |
For M5|Adr 44|KD1 n06 19:39:501 |Rz 1.47343 m |HD 8.201 m |Z 76.36321 m |
For M5|Adr 45|KD1 n07 19:40:061 |Rz 1.47886 m |HD 12.780 m |Z 76.35778 m |
For M5|Adr 46|KD1 n08 19:40:211 |Rz 1.47396 m |HD 18.999 m |Z 76.36268 m |
..... jne .....

```

Nivelleerimistulemuste salvestamisel ning välimaterjalides juhinduti vaatlusreeperite eelnevalt määratud numbritest, vt Tabelid 3 ja 4.

Tabel 3. Säilinud pikavardaliste reeperite kõrgusväärtuste koond, kõrgused Balti 1977 kõrgussüsteemis

Säilinud reeperid seisuga 21.06.2018, nende tüüp ning number	Ülekoormuse eemaldamise järgne kõrgus 21.06.2018, vt Ellmann 2018 aruanne	Reeperi-tippude kõrgused 09.10.2019	Tsentraal-reeperi varraste pikendamise järgsed kõrgusväärtused 09.10.2019	Reeperi-tippude kõrgused 24.04.2020	Tsentraal-reeperi varraste pikendamise järgsed kõrgusväärtused 24.04.2020	Reeperi-tippude kõrgused 07.08.2020
Tsentraal-reeper R24	76.26278	76.13387		76.12648	76.76736	76.75433
Nõlvareeper R301	76.7733	76.68956		76.68573		76.67870
Nõlvareeper R302	76.67301	76.67817		76.67546		76.66895
Nõlvareeper R303	76.60581	76.58291		76.57914		76.57457
Nõlvareeper R307	76.60791	76.56876		76.56513		76.56153
Nõlvareeper R308	76.29061	76.30630		76.30218		76.29756
Nõlvareeper R312	76.47902	76.47509		76.47110		76.46590
Nõlvareeper R313	76.43104	76.42418		76.41883		76.41094
Nõlvareeper R314	76.51158	76.48910		76.48299		76.47552
Tsentraal-reeper R310	76.26603	75.80744	76.01498	76.00943	76.71559	76.70313
Peenrareeper R47	76.84875	76.62003		76.61170		76.59271
Peenrareeper R48	76.7663	76.66963		76.65898		76.63993
Tsentraal-reeper R45	76.241	75.74892	76.16098	76.15456	76.71548	76.69560
Peenrareeper R51	76.63236	76.60458		76.59423		76.58067
Peenrareeper R52	76.62722	76.57010		76.55817 m		76.52666
Tsentraal-reeper R55	76.53147	76.41060		76.40968	76.85053	76.81439

Reeperinumbri teine positsioon tähistab kuuluvust vastavasse sektsiooni (nt R302 on kolmanda sektsiooni reeper).

Hallil taustal on esile tõstetud võimalikud ebausaldusväärsed tulemused, mis võivad olla põhjustatud reeperivarraste kõverdumisest mulde ehitamise ajal. Turbakihi kõrgused saab arvutada reeperivarraste pikkuste põhjal, vt Ellmann (2018) aruanne Tabel 1.

Tagamaks deformatsioonidele usaldusväärsed tulemusi üritatakse järgnevad mõõtmistsüklid läbi viia sarnase mõõtmismetoodika järgi ja samadest asukohtadest. Nii tähistati punase markervärviga asfaldil N-tähega nivelleerimisjaamade asukohad ning X-tähisega skaneerimisjaamade asukohad, vt Foto 13 ja Joonis 3.



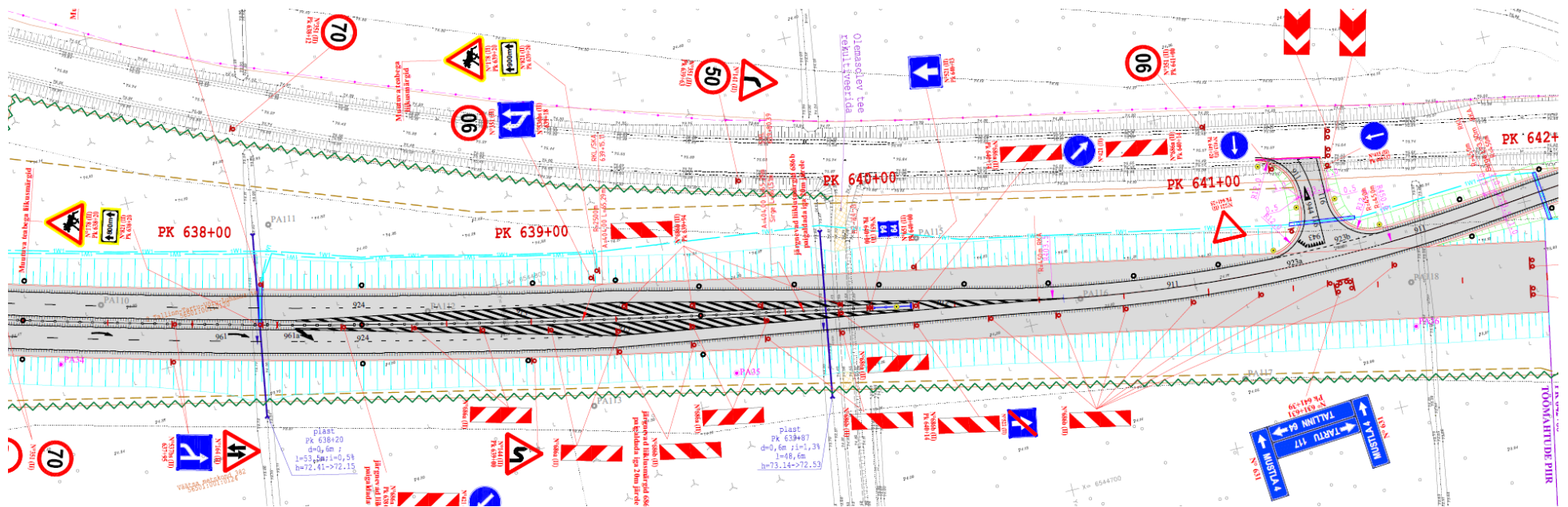
Foto 13. nivelleerimisjaamade asukohad punase markervärviga N-tähega tähistatult asfaldil

07.08.2020 vaatlustulemused on omakorda lähteks järgnevate mõõdistustulemuste omavahelisele võrdlusele ja saadud erinevustele. Katendi- ja turbareeperite vaatlustulemused (lähteks 2015. ja 2019. aastal paigaldatud stabiilsed pinnasereeperid, mis toetuvad turbakihi all oleva paekihini) võimaldavad tuvastada mulde osade üldvajumid, kusjuures vajumite detailid tuvastatakse laserskaneerimisega.

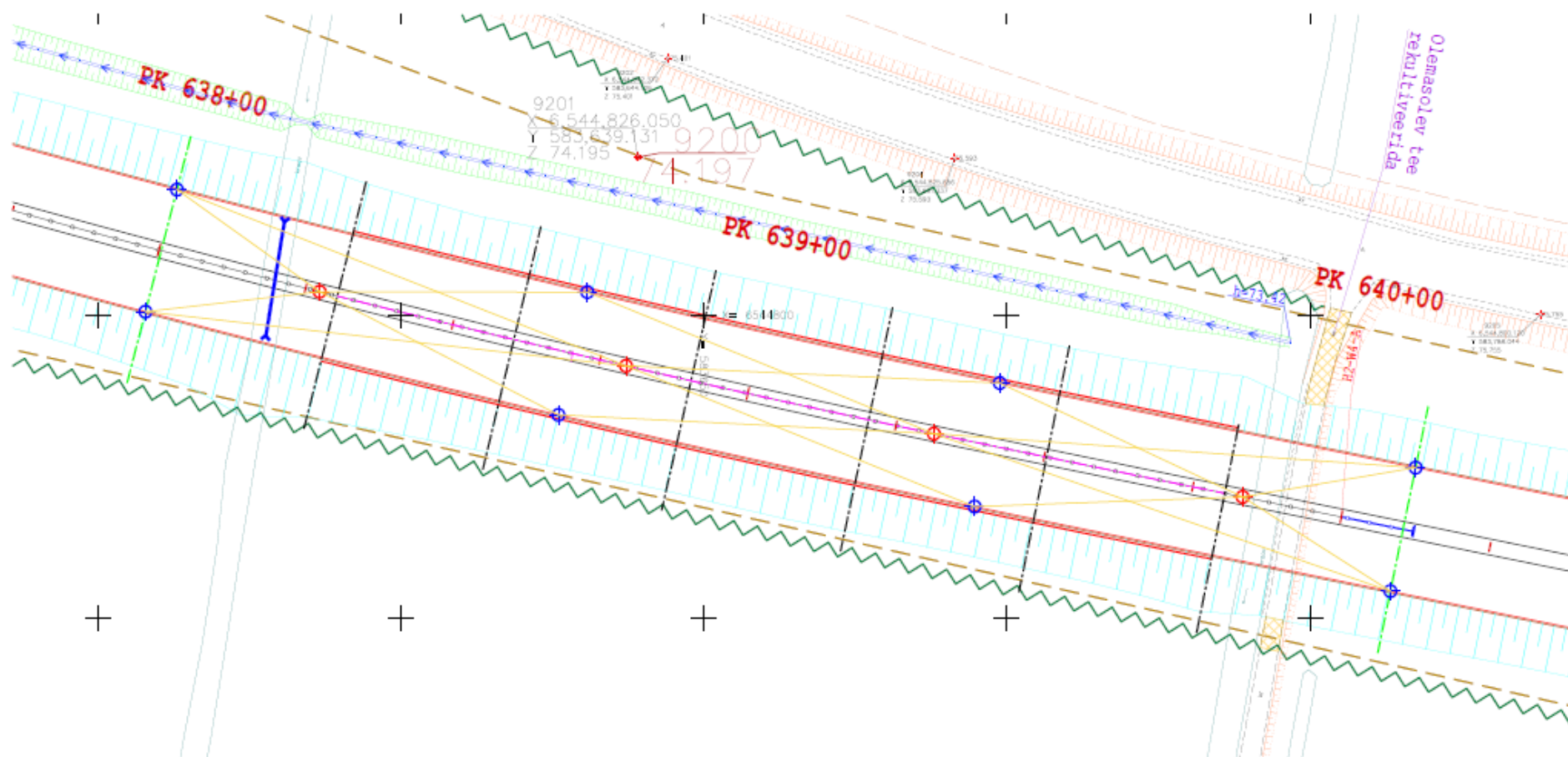
Reeperite asukohtade koordinaadid mõõdeti elektrontahhümeetriga, vt jaotis 6.3, tuginedes satelliitnavigatsioonisüsteemi reaajalisi RTK-GNSS mõõtmisi võimaldava GNSS seadmega rajatud baasjoonele. Katendireeperite kõrgusmäärangu tulemused on toodud Tabelis 4.

Tabel 4. Katendireeperite kõrgusmäärangu tulemused 07.08.2020

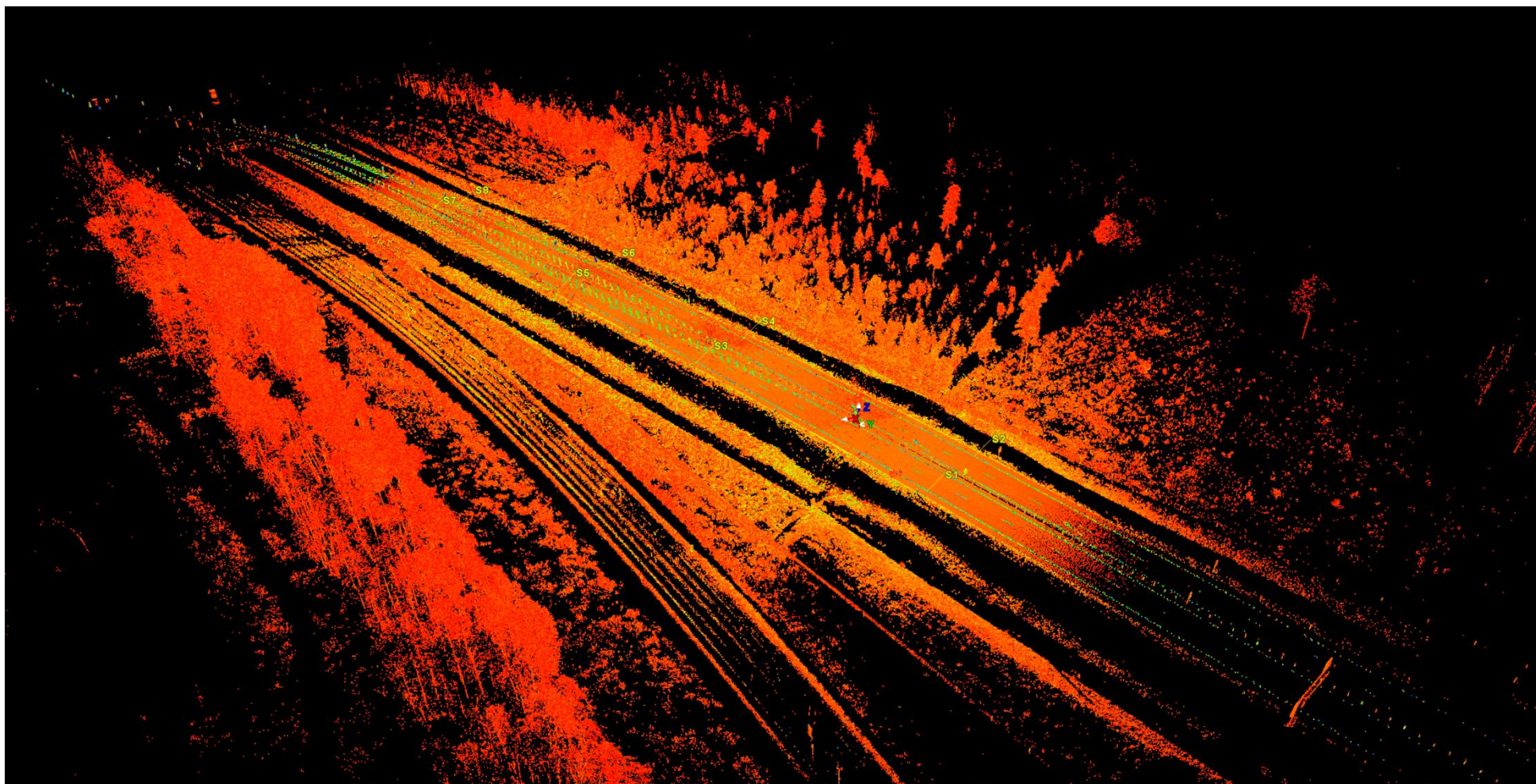
Sektsioon	Punkt	Piketaaz	Koord. X	Koord. Y	H _{R8+S6} (m)	Nivell (m)	D _{CEI} μ •
W • Z i % } } o v		2015 projekt	L-EST	L-EST	EH2000	BK77	
Massivahetus	n01	638+00.38	6544819,151	583562,740	76,605	76,406	Skaneerimistähis S
	n02	638+15.38	6544815,342	583577,275	76,599	76,398	
Sektsioon 5 Ä Z s % } o ° (EPS)	n03	638+30.38	6544811,650	583591,827	76,592	76,389	
	n04	638+37.88	6544809,851	583599,121	76,582	76,379	
	n05	638+45.38	6544808,123	583606,121	76,574	76,371	
	n06	638+52.88	6544806,352	583613,418	76,567	76,363	
Sektsioon 4 kergkruus- (LWA)	n07	638+60.38	6544804,491	583621,015	76,561	76,358	
	n08	638+67.88	6544802,834	583628,020	76,565	76,363	
	n09	638+75.38	6544801,084	583635,319	76,558	76,356	Skaneerimistähis S
	n10	638+82.88	6544799,414	583642,642	76,557	76,354	
Sektsioon 3 P } C E F	n11	638+90.38	6544797,748	583649,945	76,558	76,355	
	n12	638+97.88	6544796,116	583657,285	76,555	76,352	
	n13	639+05.38	6544794,496	583664,607	76,549	76,347	
	n14	639+12.88	6544792,961	583671,660	76,547	76,345	
Sektsioon 2 kahekihiline geotekstiil	n15	639+20.38	6544791,418	583678,700	76,545	76,343	
	n16	639+27.88	6544789,783	583686,041	76,546	76,343	
	n17	639+35.38	6544788,116	583693,062	76,543	76,343	Skaneerimistähis S
	n18	639+42.88	6544786,344	583700,354	76,551	76,349	
Sektsioon 1 ° Z] Z } o geotekstiil	n19	639+50.38	6544784,606	583707,671	76,550	76,348	
	n20	639+57.88	6544782,878	583714,967	76,550	76,347	
	n21	639+65.38	6544781,120	583722,274	76,548	76,346	
	n22	639+72.88	6544779,397	583729,573	76,542	76,339	
Massivahetus	n23	639+80.38	6544777,669	583736,887	76,542	76,341	
	n24	639+95.38	6544774,235	583751,500	76,544	76,343	
	n25	640+10.38	6544770,839	583766,122	76,532	76,334	Skaneerimistähis S
Tee telg							
Massivahetus	c01	638+00.38	6544810,988	583560,398	76,828	76,627	
	c02	638+15.38	6544807,321	583574,962	76,809	76,607	
Sektsioon 5 Ä Z s % } o ° (EPS)	c03	638+30.38	6544803,491	583589,461	76,802	76,600	
	c04	638+37.88	6544801,773	583596,732	76,785	76,584	
	c05	638+45.38	6544799,901	583604,016	76,782	76,579	
	c06	638+52.88	6544798,147	583611,310	76,768	76,566	
Sektsioon 4 kergkruus- (LWA)	c07	638+60.38	6544796,402	583618,637	76,765	76,562	
	c08	638+67.88	6544794,692	583625,929	76,756	76,556	
	c09	638+75.38	6544792,919	583633,218	76,766	76,563	
	c10	638+82.88	6544791,262	583640,527	76,754	76,553	
Sektsioon 3 P } C E F	c11	638+90.38	6544789,611	583647,847	76,761	76,558	
	c12	638+97.88	6544788,048	583655,177	76,756	76,555	
	c13	639+05.38	6544786,454	583662,544	76,720	76,553	Koordinaadid GNSS-
	c14	639+12.88	6544784,903	583669,481	76,748	76,548	
Sektsioon 2 kahekihiline geotekstiil	c15	639+20.38	6544783,397	583676,500	76,750	76,548	
	c16	639+27.88	6544781,784	583683,774	76,747	76,547	
	c17	639+35.38	6544780,196	583691,126	76,754	76,552	
	c18	639+42.88	6544778,715	583698,483	76,733	76,533	
Sektsioon 1 ° Z] Z } o geotekstiil	c19	639+50.38	6544777,142	583705,840	76,738	76,536	
	c20	639+57.88	6544775,665	583713,188	76,728	76,528	
	c21	639+65.38	6544774,131	583720,548	76,728	76,526	
	c22	639+72.88	6544772,668	583727,866	76,714	76,514	
Massivahetus	c23	639+80.38	6544771,124	583735,252	76,717	76,515	
	c24	639+95.38	6544768,269	583749,977	76,702	76,502	
	c25	640+10.38	6544765,219	583764,644	76,688	76,487	
S • μ v % } } o v							
Massivahetus	s01	638+00.38	6544802,179	583558,097	76,604	76,404	Skaneerimistähis S
	s02	638+15.38	6544798,351	583572,636	76,608	76,407	
Sektsioon 5 Ä Z s % } o ° (EPS)	s03	638+30.38	6544794,664	583587,217	76,602	76,399	
	s04	638+37.88	6544792,842	583594,511	76,594	76,391	
	s05	638+45.38	6544791,056	583601,807	76,583	76,380	
	s06	638+52.88	6544789,267	583609,105	76,576	76,373	
Sektsioon 4 kergkruus- (LWA)	s07	638+60.38	6544787,505	583616,401	76,570	76,367	
	s08	638+67.88	6544785,758	583623,722	76,567	76,364	
	s09	638+75.38	6544784,039	583631,025	76,557	76,356	Skaneerimistähis S
	s10	638+82.88	6544782,314	583638,348	76,560	76,357	
Sektsioon 3 P } C E F	s11	638+90.38	6544780,656	583645,683	76,560	76,357	
	s12	638+97.88	6544779,080	583652,719	76,564	76,362	
	s13	639+05.38	6544777,458	583660,042	76,556	76,353	
	s14	639+12.88	6544775,825	583667,386	76,551	76,350	
Sektsioon 2 kahekihiline geotekstiil	s15	639+20.38	6544774,324	583674,443	76,549	76,347	
	s16	639+27.88	6544772,739	583681,800	76,549	76,347	
	s17	639+35.38	6544771,275	583689,169	76,544	76,345	Skaneerimistähis S
	s18	639+42.88	6544769,934	583696,576	76,550	76,348	
Sektsioon 1 ° Z] Z } o geotekstiil	s19	639+50.38	6544768,753	583703,704	76,554	76,352	
	s20	639+57.88	6544767,506	583711,101	76,554	76,351	
	s21	639+65.38	6544766,276	583718,525	76,552	76,350	
	s22	639+72.88	6544765,031	583725,943	76,553	76,351	
Massivahetus	s23	639+80.38	6544763,821	583733,353	76,553	76,351	
	s24	639+95.38	6544761,407	583748,200	76,558	76,357	
	s25	640+10.38	6544759,035	583763,045	76,551	76,353	Skaneerimistähis S



Joonis 2. Uue 4-realise teelõigu projektikohane ühendumine olemasoleva 2-realise maanteega Võõbu katselõigu piirkonnas



Joonis 3. Katselõigu ja külgnervate alade laserskaneerimise skeem. Skaneerimisjaamad on tähistatud punasega, sidepunktid sinisega ning kollasega on jaamade sidumine. Sidepunktid (kollakast metallist katendireeperid, vt Foto 3 ja 4) ühtivad nivelleerimise reeperitega. Katselõik on tähistatud topelt punaste joontega ja mustade kriipsjoontega; rohelised kriipsjooned teega risti tähistavad +30 m osasid.



Joonis 4. Katendi terrestrilise skaneerimise 07.08.2020 tulemusena saadud punktipilve ekraanikuva.

5. Katendi terrestriline laserskaneerimine

07.08.2020 tehti kõikide sektsioonide katendi terrestriline laserskaneerimine, mis sooritati laserskanneriga Leica ScanStation C10, vt Foto 14.



Foto 14. Teekatendi laserskaneerimine 07.08.2020 laserskanneriga Leica ScanStation C10.

Tööde läbiviimisel lähtuti mõõdistamismetoodikast, mis tagas 3 mm mõõtmistäpsuse skaneerimispunktide plaanilisele ja kõrguslikule asendile. Skaneerimise mõõdistuspunktide ruumiline lahutatavus seadistati nii, et skaneerimispunktide omavaheline vahemaa ei ületaks 35 m kaugusel 3 cm, kuid skaneerimisjaamade lähiümbruses oli see enamasti ~1 cm piires.

Mõõtmisteks valiti TLS seisupunktid (jaamad) nii, et neist oleks näha võimalikult suur osa mõõdistatavast katendiosast. Instrument seadistati nii, et selle sensor jäi maapinnast u. 1.9 m kõrgusele. Erinevatest jaamadest mõõdistatavate punktipilvede ühendamiseks kasutati spetsiaalseid tähiseid (Foto 15), mis mõõdistati tiheskaneerimisega. TLS-jaamade ja tähiste asukohad (vt Tabel 4 ja Joonis 3) on nummerdatud üldreeglina vastavalt skaneerimise läbiviimise järjekorrale. Skaneerimisega alustati Tallinna poolt ning liiguti järgemööda Tartu suunas.



Foto 15. Twin Target tähis paigutatuna koordineeritud asukohta katendil.

Naaberpunktide ühendamiseks on vaja, et igas jaamas paistaks vähemalt kaks tähist, mis on skaneeritud kõrvaljaamadest. Antud töös on iga punktide pilv ühendatud nelja tähisega (vt joonis 3). Mõõdistuse sidumiseks L-EST97 plaanilise koordinaatsüsteemiga kasutati mõõdetud 3D koordinaate, vt tabel 4. Laserskaneerimise andmetöötluse tööjärjekord oli kokkuvõtvalt järgmine:

- Andmesiire instrumendist töötlusprogrammidesse
- Kindelpunktide koordinaatide leidmine ja süstematiseerimine
- Andmete transformeerimine L-EST koordinaatsüsteemi
- Skaneerimisandmete liitmine ühtseks punktide pilveks
- Punktide pilve puhastamine kõrvalistest andmetest

Skaneerimisandmete esialgseks töötluks kasutati 3D punktide pilve töötlustarkvara Leica Cyclone 9.0. Kindelpunktide koordinaate kasutades registreeriti punktide pilv ühtseks tervikuks ja transformeeriti esialgsed skanneri koordinaadid (koordinaatide alguspunkt skanneri peegli tsentris) ümber L-EST koordinaatsüsteemi ja BK77 kõrgussüsteemi ning leiti registreerimise veahinnangud. Pilve ühendamise keskmised vead olid enamasti alla 5 mm. Katendi skaneerimise tulemus on toodud joonisel 4.

6. Kasutatud instrumendid ja töövahendid

6.1. Trimble DiNi 03 digitaalnivelliir



Foto 16. Nivelleerimisel kasutatud digitaalnivelliir Trimble DiNi03

Digitaalnivelliiri Trimble DiNi03 peamised tehnilised spetsifikatsioonid on järgnevad:

- Täpsus (DIN 18723 kohaselt):
 - 1 km edasi-tagasisuunalise nivelleerimiskäigu kõrguskasv ± 0.3 mm
 - Vahemaade mõõtmine ca' ± 2 cm
- Väikseim mõõdühik:
 - kõrguskasvud 0.01 mm
 - vahemaad 1 mm
- Pikksilma suurendus: 30×
- Kompensaator (vaatekiire horisontaalsuse tagamiseks):
 - horisonteerimistäpsus $\pm 0.2''$
 - tööpiirkond ca $\pm 15'$ kaareminutit
- Vajalik latikujutise vahemik latilugemi võtmisel: 30 cm

Nivelliiri alusena (sarnaselt TLS seadmele ning elektron-tahhümeetriale) kasutati puidust standardstatiivi, mille jalgade pikkust saab kruvikinnitustega reguleerida. Komplektis Trimble DiNi03 nivelliiriga kasutati täppisnivelleerimiseks kahte invarlatti. Invarlattide tootjafirmaks on NEDO GmbH ning need on kohandatud vastavaks Trimble lugemissüsteemile. Mõlema invarlati ümarvesiloodi telje paralleelsust latiga kontrolliti ja justeeriti perpendikulaarselt paigutatud kahe elektron-tahhümeetri abil enne välitööde algust. Nivelliiri alusena kasutati jalgade pikkuse reguleerimisvõimalusega puidust statiivi.

6.2. Trimble R8 GNSS vastuvõtja

Reeperi asukohtade väljamärkimiseks ning mulde mõõdistamiseks kasutati GNSS (*Global Navigation Satellite System*) vastuvõtjat Trimble R8 (joonis 61). GNSS seadme tehnilised näitajad on järgmised:



Foto 17. Trimble R8 GNSS vastuvõtja ja TSC3 kontrolleri

Mõõtmistäpsus:

- Kõrge täpsusega Static tüüpi GNSS maamõõtmine
 - Horisontaalne.....3 mm + 0,1 ppm RMS
 - Vertikaalne.....3,5 mm + 0,4 ppm RMS
- Static and FastStatic tüüpi maamõõtmine
 - Horisontaalne.....3 mm + 0,5 ppm RMS
 - Vertikaalne.....5 mm + 0,5 ppm RMS
- RTK (reaalajas kinemaatiline) maamõõtmine (üks baasjoon <30 km)
 - Horisontaalne.....8 mm + 1 ppm RMS
 - Vertikaalne.....15 mm + 1 ppm RMS
- Võrgupõhine RTK maamõõtmine

Horisontaalne.....8 mm + 0,5 ppm RMS
Vertikaalne.....15 mm + 0,5 ppm RMS

- Samaaegselt jälgitavad satelliidisignaale:
 - GPS: L1C/A, L2C, L2E (Trimble meetod L2P jälgimiseks), L5
 - GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A (ainult GLONASS M), L2P
 - SBAS: L1C/A, L5
 - Galileo GIOVE-A ja GIOVE-B
- Initsialiseerimise aeg - tavaliselt <8 sekundit
- Initsialiseerimise usaldusväärsus - tavaliselt >99,9%
- Mõõtmised (laius × kõrgus) - 19 cm × 11,2 cm (koos ühendustega)
- Kaal - 1,34 kg (koos sisemise akuga, sisemise raadioga, standardse UHF antenniga)
3,70 kg (kogu RTK liikurseade koos akudega, mõõtemastiga ja kontrollieriga)
- Töötemperatuur: −40°C kuni +65°C
- Hoiutemperatuur: −40°C kuni +75°C
- Vee/tolmukindlus: IP67 tolmuindel, kannatab ajutist veesolemist kuni 1 minut
- Välise mobiiltelefoni ühendamise võimalus GSM/GPRS/CDPD modemite kasutamiseks RTK ja VRS toimingutes

Reaalajaliseks RTK-GNSS mõõtmisteks kasutati Trimble VRS Now püsijaamade võrgu teenust (joonis 5).



Joonis 5. Trimble VRS Now püsijaamad võrk Eestis (allikas: www.vrsnow.ee).

6.3. Trimble S6 robot-tahhümeeter

Mõõdistustel kasutati elektrontahhümeetrit Trimble S6 koos vajalike mõõtetarvikutega (Foto 18).

Tahhümeetri tehnilised näitajad on järgmised:

- Vertikaal- ja horisontaalnurga mõõtmise täpsus (standardhälve vastavalt DIN 18723) 2"
- Kaheteljeline automaatne horisontaalsuse kompenseerimine täpsusega 0,5" ning ulatusega 5,4'.
- Kauguse mõõtmise täpsus (ruutkeskmise viga) prismaga mõõtes 2 mm + 2 ppm ning laserkiirega mõõtes samuti 2 mm + 2 ppm
- Mõõteaeg prismale (joonis 5b, 5c ja 5d) mõõtes 1,2 s ning laserkiirega mõõtes 1-5 s
- Mõõteulatus prismale mõõtes kuni 2500 m, laserkiirega mõõtes kuni 1300 m (peegelduvusel 90 %), kiirega betoonile mõõtes 600-800 m
- Laserkiire hajumine horisontaalsuunas 4 cm/100 m ning vertikaalsuunas 8cm/100 m
- Optiline suurendus 30 kordne
- Fookuskauguse vahemik: 1,5 m kuni lõpmatuseni
- Servomootoriga, automaatse pööramisega
- Kaal: 5,25 kg
- Töötemperatuuride vahemik: -20 °C kuni +50 °C
- Tolmu- ja veekindlus: IP66



Foto 18. Elektrontahhümeeter Trimble S6 (a) koos prismadega: 360° prisma (b), miniprisma (c), käiguprisma (d)

6.4. Leica ScanStation C10 terrestriline laserskanner

Katendi mõõtmine sooritati terestrilise laserskanneriga (TLS) Leica ScanStation C10 (Foto 19). Kasutatud instrumendi peamised tehnilised spetsifikatsioonid on järgnevad:

- Skaneerimise ulatus alates 0.5-300 m (90% peegeldumiskoefitsiendiga pinnalt)
- Skaneerimise tööpiirkond horisontaalsuunaliselt 360 kraadi, vertikaalsuunaliselt vähemalt 270 kraadi (joonis 2c)
- Skaneerimise sagedus vähemalt 50000 Hz (50 000 punkti sekundis)
- Lasertäpi läbimõõt mitte suurem kui 7 mm 50 m kaugusel
- Individuaalse skaneerimispunkti kauguse täpsus 4 mm vähemalt 50 m kaugusel
- Individuaalse punkti 3D asukoha määramise täpsus 6 mm vähemalt 50 m kaugusel
- Punktipilve statistiline modelleerimistäpsus 2 mm
- Kaheteljelise 2" täpsusega kompensaatori olemasolu
- Punktipilve resolutsioon kuni 2x2 cm 100 meetri peale
- Sisseehitatud digitaalne foto- ja videokaamera mõõdistusobjektide välisilme salvestamiseks (zoomi võimalusega), fotokujutise resolutsioon kuni 4 megapiksli, iga pildi ulatus on 17 x 17 kraadi. Kaamera on kaugusmõõtjaga ko-aksiaalne.
- Tähiste mõõtmistäpsus vähemalt 2 mm 50 m vahemaale

Erinevate skaneeringute ühendamiseks kasutati spetsiaalsed tähiseid (Foto 19), mille keskpunkt määrati spetsiaalsest tihedast skaneeringust automaatselt. Kahe tähisega „twin target“ (Foto 19) alumise tähise kõrgus maapinnast on 0,2 m. Andmetöötluseks kasutati peamiselt tarkvarapaketti Cyclone.

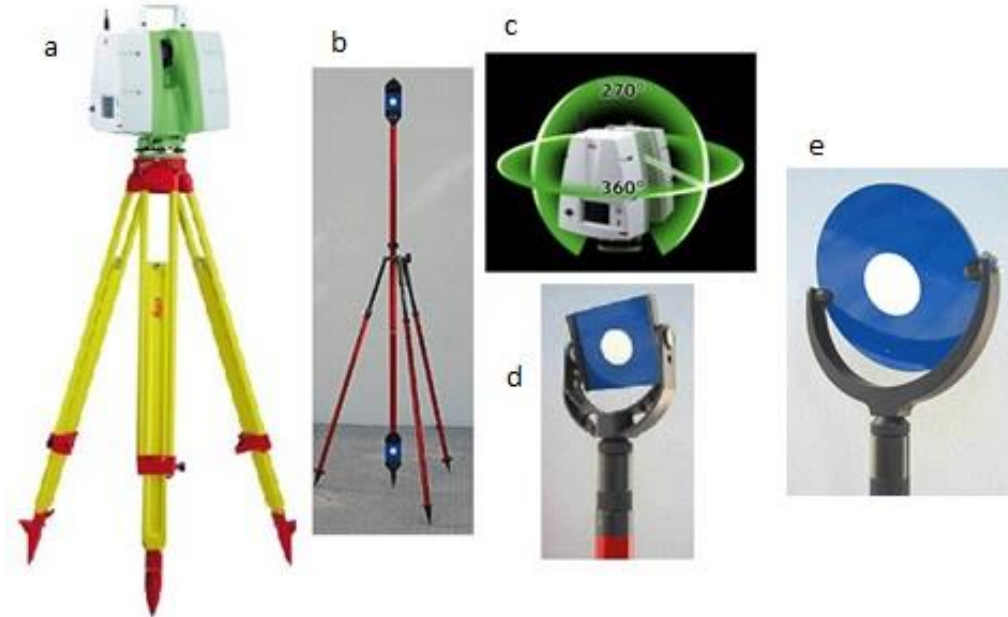


Foto 19. Laserskanner (a), „twin-target“ tähis (b), 3 tolline tähis (d), 6 tolline tähis (e) ning laserskanneri mõõtmisulatus (c)

7. Üleantavad materjalid

Tellijale edastatakse Tööde teostamise aruanne, mis sisaldab tööde teostamise kirjeldust ja saavutatud tulemusi

2021 aastasse on ette nähtud kaks mõõtmiskorda järgnevalt:

- a) Reeperite kõrgusväärtuste määramine (nn. nivelleerimise 1-tsüklil), kevad 2021 (mõõtmised viiakse läbi mais-juunis, peale võimalike külmakergete taandumist, lisaks fotod katendist, võimalike defektide dokumenteerimine)
- b) Reeperite kõrgusväärtuste määramine (nn. nivelleerimise 2-tsüklil) ning 300 m pikkuse katselõigu laserskaneerimine (sammuga 2x2 cm), sügis 2021 (oktoober)

Mõõtmistulemuste põhjal koostatakse iga sektsiooni ja külgnervate lõikude kohta geotehniline analüüs.

Mõõdistuste toorandmed (nivelleerimise ja laserskaneerimise andmefailid) säilitatakse süstematiseerituna TTÜ teedehituse ja geodeesia uurimisrühma arvutites, osapooltel võimaldatakse nendele ligipääs. Tööde viimase etapi lõppedes edastatakse digitaalsed toorandmed koos analüüside tulemustega Tellijale.

Käesolevas aruandes on kakskümmend viis (25) järjestikku
nummerdatud lehekülge.

24.09.2020

Lisa 3, geodeetilised mõõdistused 2021

**VÕÕBU TEE-EHITUSLIKU KATSELÕIGU REEPERITE JA
KATENDIREEPERITE NIVELLEERIMISTE JA LASERSKANEERIMISTE
PÕHJAL VAJUMITE MÄÄRAMINE**



Koostas: Artu Ellmann, Teedehituse ja geodeesia uurimisrühma juht
oktoober 2021

Vastavalt ettevõtte GRK Infra (edaspidi Tellija) ning Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja Arhitektuuri instituudi vahel 17.06.2019 sõlmitud teadus- ja arendustööde töövõtulepingu nr 17-06-2019 „Võõbu teedehitusliku katselõigu (PK 637+83 - 639+80) ja külgnevate lõikude geodeetiline monitooring ja geotehniline analüüs 2019-2021“ raames viidi läbi katendireeperite paigaldamine, nende kõrgusmäärangud ning terve katselõigu laserskaneerimised. Viie sektsiooniline 150 m pikkune Võõbu katselõik on osa 08/2020 valmishitatud (liiklus avatud 14.08.2020) Ardu-Võõbu neljarealisest maateelõigust riigiteel nr. 2 Tallinn-Tartu-Võru–Luhamaa, paiknedes vahetult enne Tartu poolset ühendust endisaegse maanteega (alates 2021 a. septembrist põkkudes uue teelõiguga)

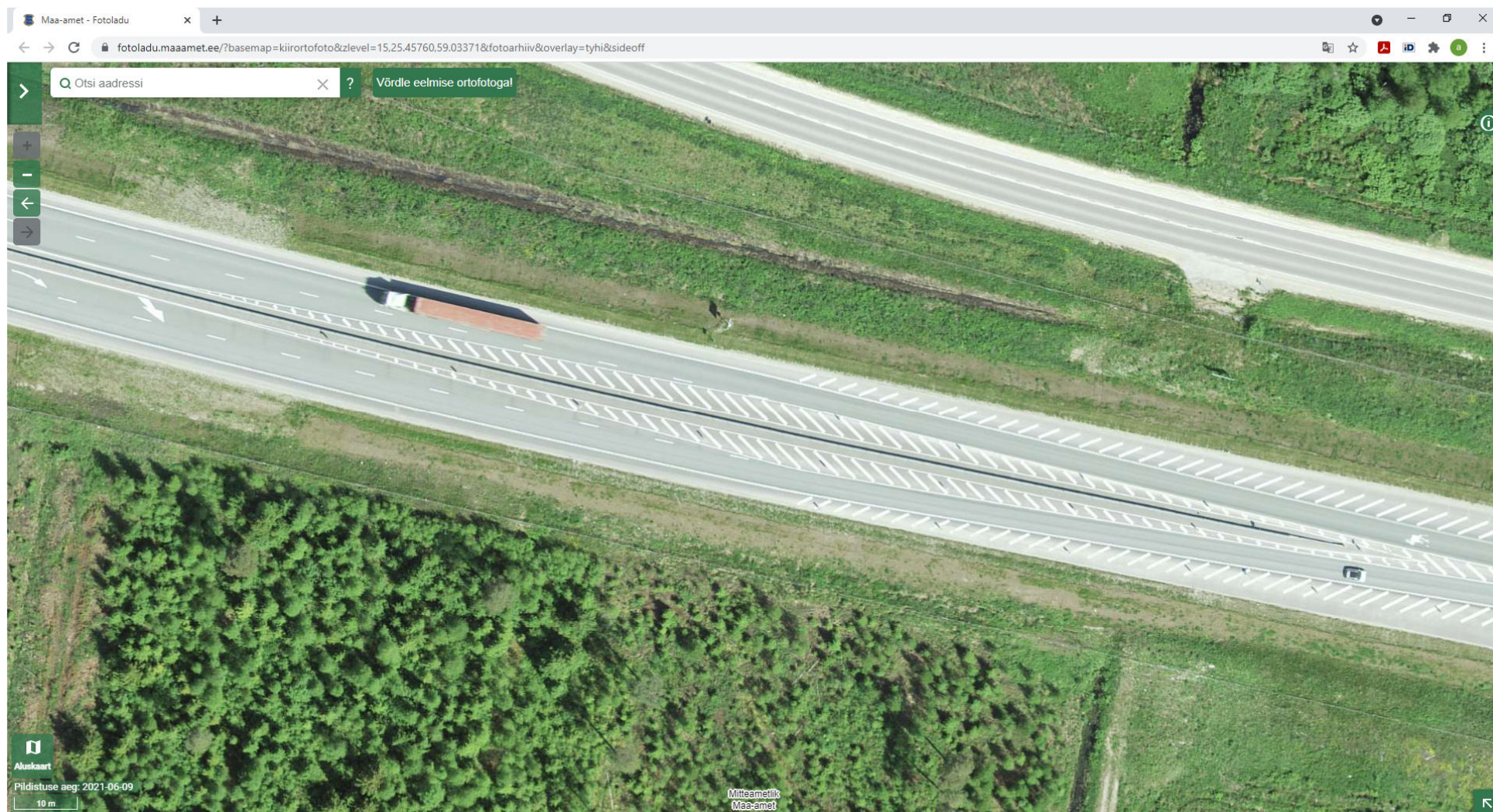


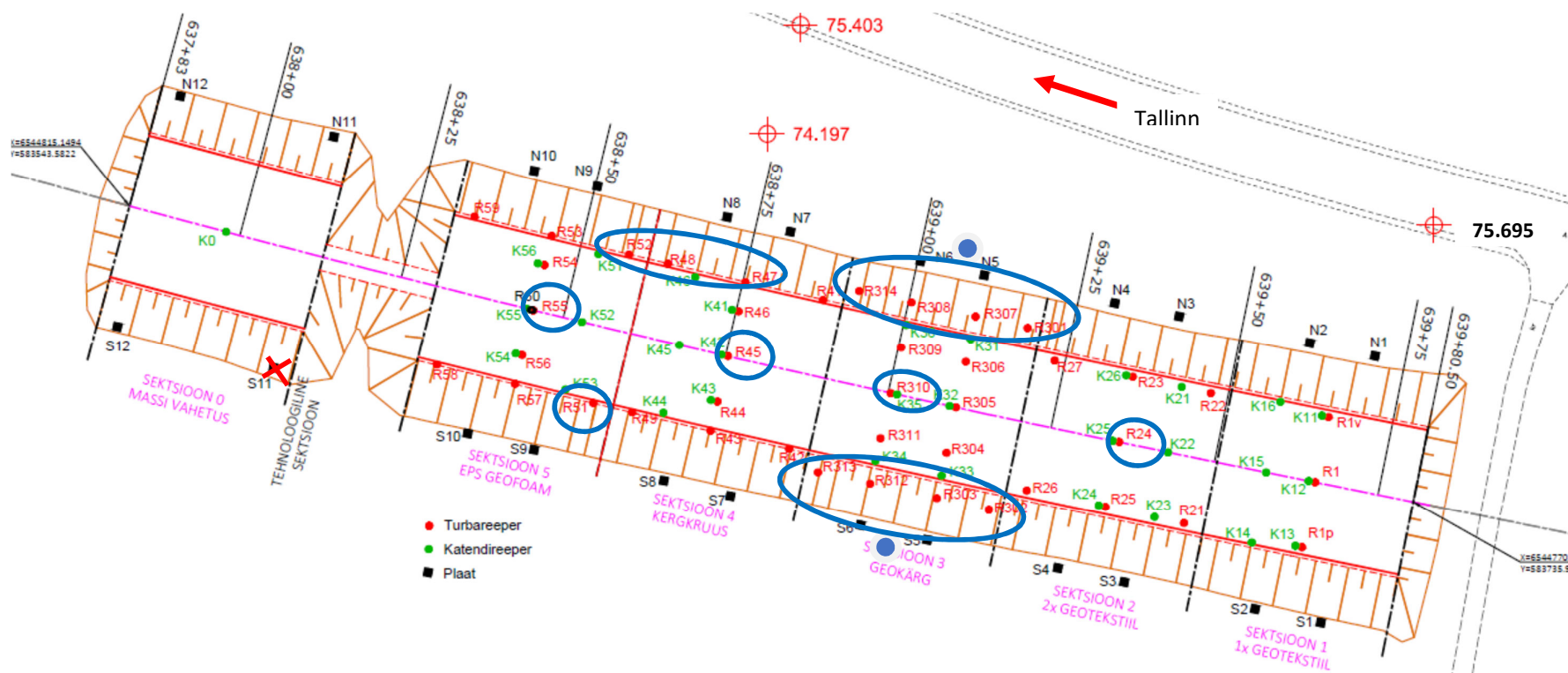
Foto 1: Vaade teelõigule augustis 2020, st vahetult peale eksploatatsiooni andmist

Käesolev aruanne on jätkuks septembris 2020 esitatud Ellmann (2020) VÕÕBU TEE-EHITUSLIKU KATSELÕIGU KATENDIREEPERITE PAIGALDAMISE, ESMASE KÕRGUSMÄÄRANGU JA LASERSKANEERIMISE tööaruandele

Käesolevas kirjutuses välhitakse eelnimetatud aruandes esitatud info dubleerimist, keskendudes vaid numbrilistele tulemustele ning nende illustreerimisele.

Teelõigu ekspluatatsiooni ajal viidi läbi nivelleerimised ja laserskaneerimised kokku kolm korda: 14.11.2020, 12.06.2021 ja 02.10.2021. Tulemuste parema võrreldavuse huvides järgiti ühetaolist metoodikat, mis on kirjeldatud 2020 septembri aruandes. Numbrilised tulemused, arvutuskäik ja illustratsioonid on leitavad juurdelisatud Exceli tabelarvutusfailides.

Esmalt võrreldakse 2015 a turba pealispinnale asetatud ning teekatendini pikendatud varrasreeperite kõrgusväärtuseid (vt Tabel 1) ning tuvastati nende vajumid. Ülekoormuse eemaldamise (2018) ning tee-ehituse järgselt säilunud reeperid on alloleval joonisel tähistatud sõõridega



Joonis 1. Võõbu teelõigu vaatlusreeperite nummerdamine ja paigutus. Siniste sõõridega on tähistatud säilunud pikavardaliste reeperite asukohad.

Tabel 1. Säilinud pikavardaliste reeperite kõrgusväärtuste koond, kõrgused Balti 1977 kõrgussüsteemis

Säilinud reeperid seisuga 21.06.2018, nende tüüp ning number	Ülekoormuse eemaldamise järgne kõrgus 21.06.2018, vt Ellmann 2018 aruanne	Reeperi- tippude kõrgused 09.10.2019	Tsentraal- reeperi varraste pikendamise järgsed kõrgusväärtused 09.10.2019	Reeperi- tippude kõrgused 24.04.2020	Tsentraal- reeperi varraste pikendamise järgsed kõrgus- väärtused 24.04.2020	Reeperi- tippude kõrgused 07.08.2020	Reeperi- tippude kõrgused 14.11.2020	Reeperi- tippude kõrgused 12.06.2021	Reeperi- tippude kõrgused 02.10.2021
Tsentraal-reeper R24	76.26278	76.13387		76.12648	76.76736	76.75433	76.75465	76.74986	76.751
Nõlvareeper R301	76.7733	76.68956		76.68573		76.67870	76.67410	76.67357	76.66490
Nõlvareeper R302	76.67301	76.67817		76.67546		76.66895	76.66453	76.66578	76.659
Nõlvareeper R303	76.60581	76.58291		76.57914		76.57457	76.57157	76.56927	76.565
Nõlvareeper R307	76.60791	76.56876		76.56513		76.56153	76.55781	76.55682	76.55034
Nõlvareeper R308	76.29061	76.30630		76.30218		76.29756	76.29446	76.29288	76.28893
Nõlvareeper R312	76.47902	76.47509		76.47110		76.46590	76.46356	76.46281	76.45579
Nõlvareeper R313	76.43104	76.42418		76.41883		76.41094	76.41041	76.41090	76.40396
Nõlvareeper R314	76.51158	76.48910		76.48299		76.47552	76.47274	76.47179	76.46750
Tsentraal-reeper R310	76.26603	75.80744	76.01498	76.00943	76.71559	76.70313	76.69836	76.69583	76.69287
Peenrareeper R47	76.84875	76.62003		76.61170		76.59271	76.57802*	76.57107* sirgendatud	76.57096
Peenrareeper R48	76.7663	76.66963		76.65898		76.63993	76.62838	mõõtmata	76.61111
Tsentraal-reeper R45	76.241	75.74892	76.16098	76.15456	76.71548	76.69560	76.68695	76.67729	76.67233
Peenrareeper R51	76.63236	76.60458		76.59423		76.58067	76.57323	76.56802	76.56024
Peenrareeper R52	76.62722	76.57010		76.55817 m		76.52666	76.51453	mõõtmata	76.49407
Tsentraal-reeper R55	76.53147	76.41060		76.40968	76.85053	76.81439	76.81051	76.80348	76.79907

Reeperinumbri teine positsioon tähistab kuuluvust vastavasse sektsiooni (nt R302 on kolmanda sektsiooni reeper, sektsioonide tee-ehituslik kirjeldus on leitav Tabelis 2 ja Joonisel 1).

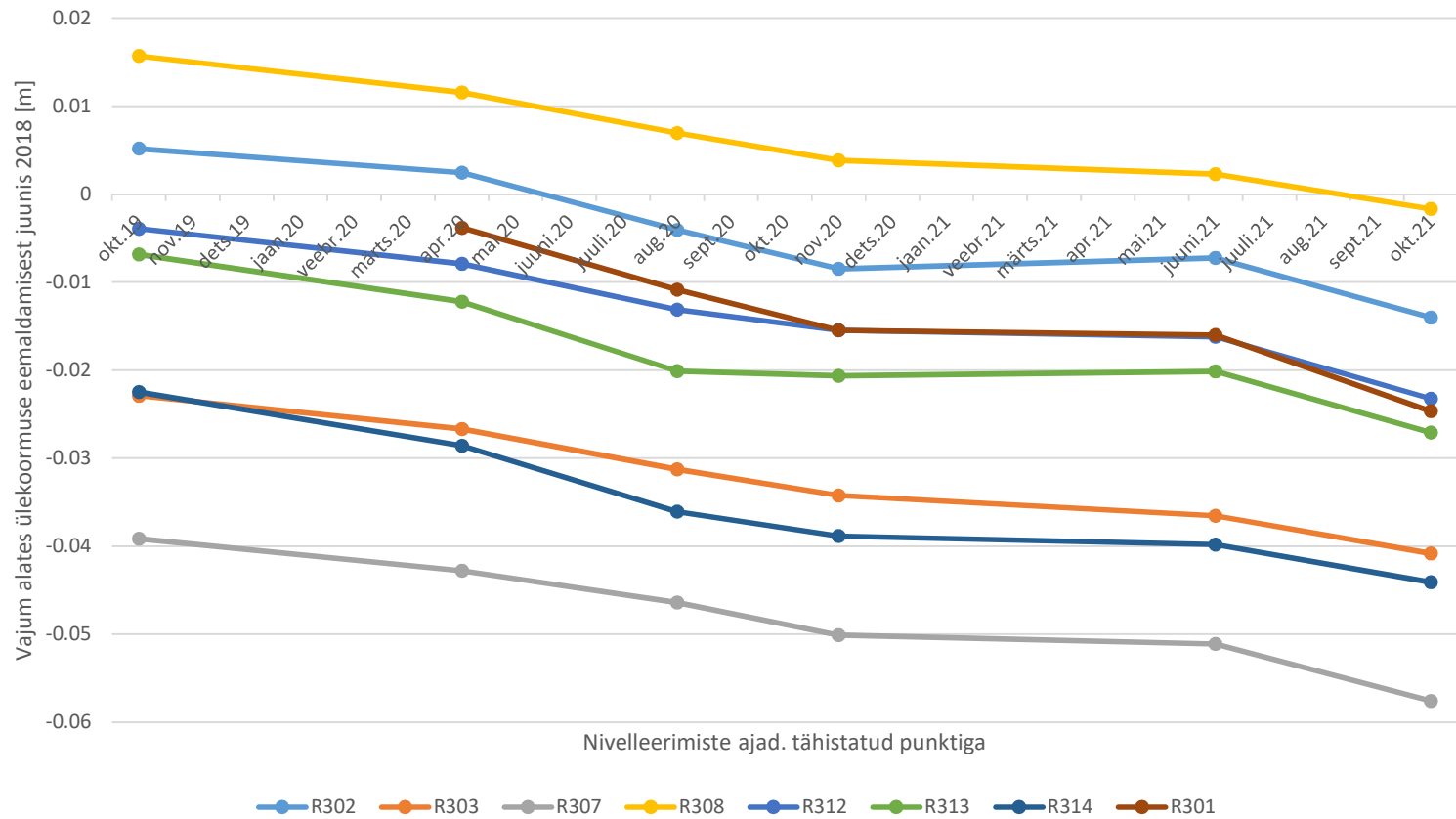
Hallil taustal on esile tõstetud võimalikud ebausaldusväärsed tulemused, mis võivad olla põhjustatud reeperivarraste kõverdumisest mulde ja/või katendi ehitamise ajal. Turbakihi kõrgused saab arvutada reeperivarraste pikkuste põhjal, vt Ellmann (2018) aruanne Tabel 1.

*Reeperi 47 kõverdunud tipp 14.11.2020 (esiplaanil, vaade Tallinna suunda), vt järgmine lehekülg.



Tulenevalt säilinud pikavardaliste reeperite paiknemisest on reeperite vajumid grupeeritud kolmeks – 3. sektsiooni nõlvareeperid, 4-5. sektsiooni peenrareeperid ning 2-5 sektsioonide tsentraalreeperid, vt allolevaid jooniseid

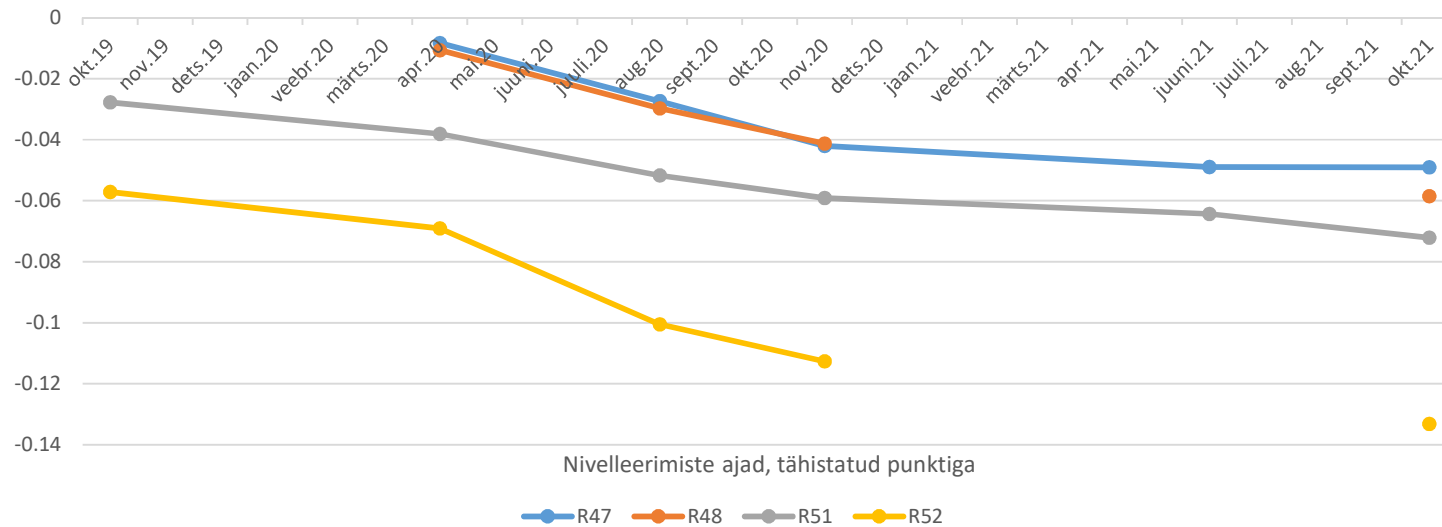
3. sektiooni nõlvareeperite vajumid

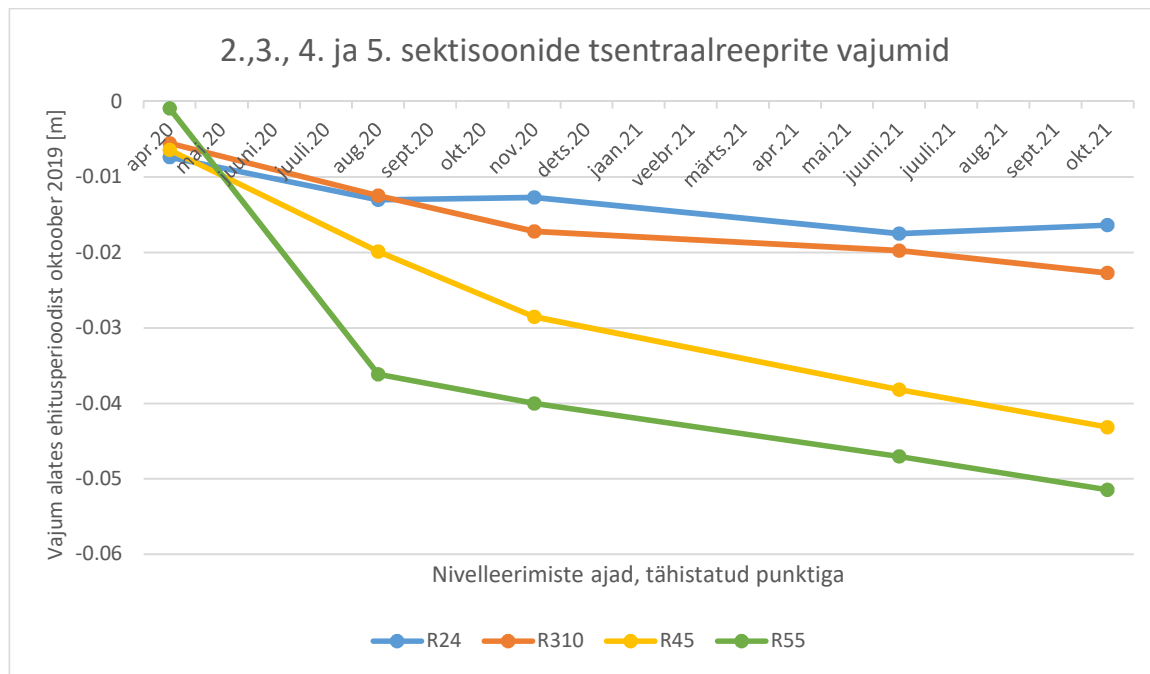


4. ja 5. sektsiooni peenrareeperite vajumid*

tõenäoliselt on R47 ja R48 koguvajum suurem, kuid vahemikus juuni 2018 ning okt 2019 ehituse tõttu kõverdunud
reeperivarraste tõttu seda ei õnnestu kindlaks teha

Vajum alates ülekoormuse eemaldamisest juunis 2018 [m]





Eelolevate jooniste aluseks olev arvutuskäik on toodud käesoleva arunade lisaks olevates elektroonilistes Excel tabelarvutusfailides.

Katendireepeerite paigaldamise põhimõtted on kirjeldatud eelmises aruandes, vt allolevat joonist ning Tabel 2



Katendireeperite asukohad on toodud Tabelis 2, kollasel taustal on sektsioonide serva paigutatud katendireeprid, hallil taustal sektsiooni keskele jäävad katendireeprid

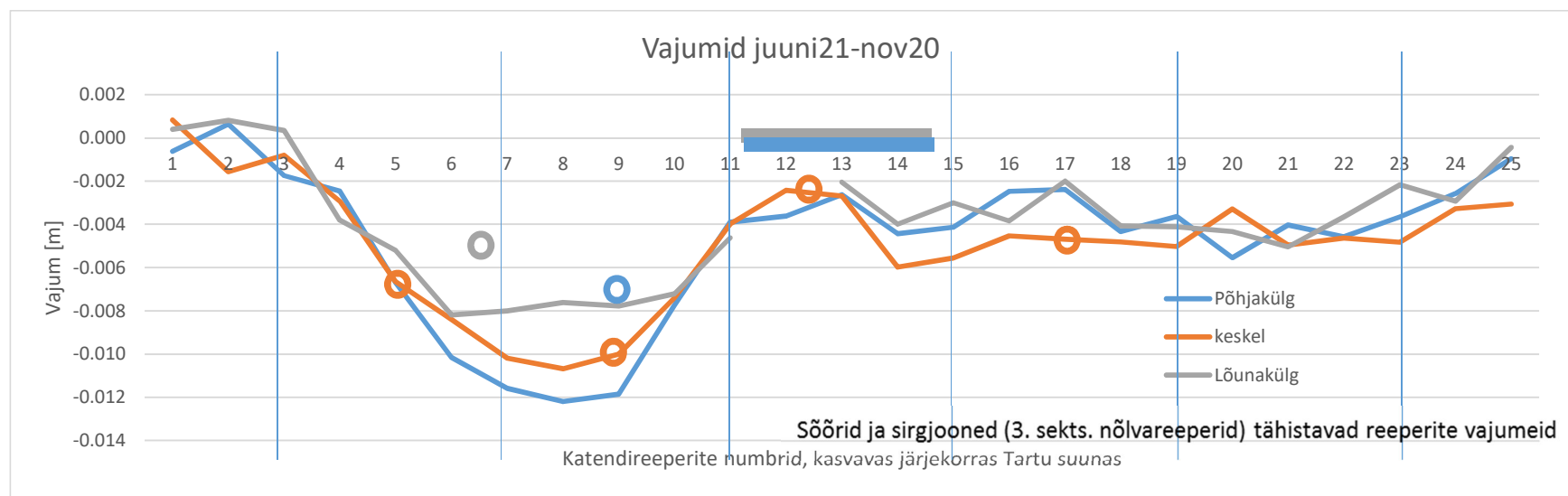
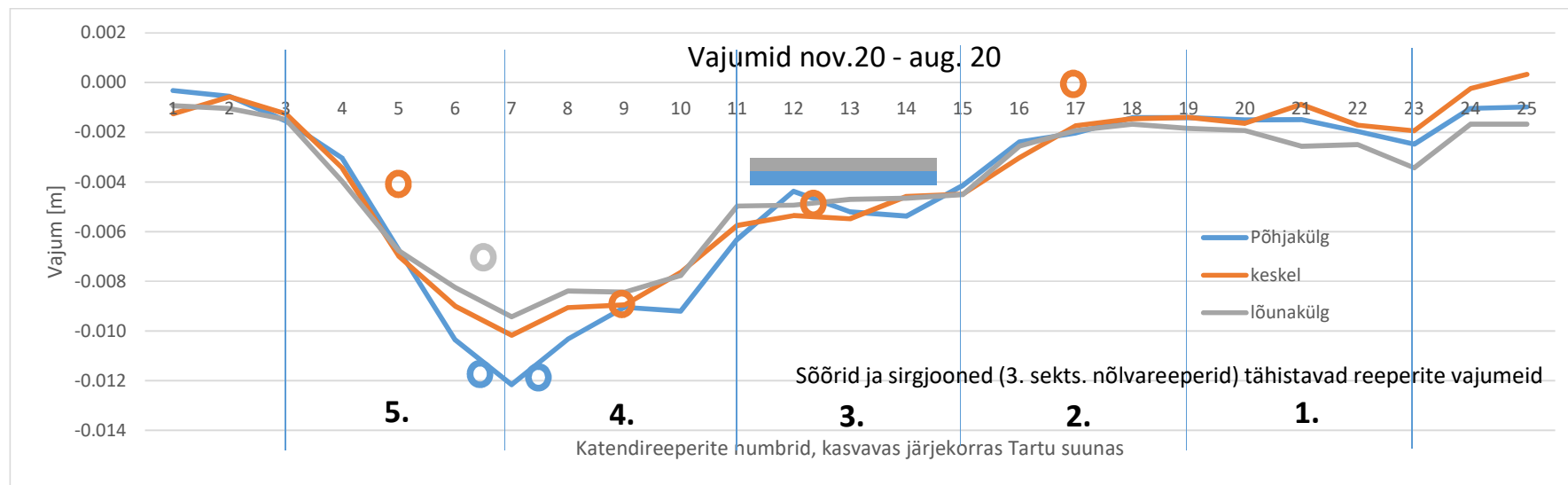
Tabel 2. Katendireeperite paigutus sektsioonides

Sektsioon	Punkt	Piketaaz
Põhjapoolne äärejoon		2015 projekt
Massivahetus	n01	638+00.38
	n02	638+15.38
Sektsioon 5 vahtpolüstüreen (EPS)	n03	638+30.38
	n04	638+37.88
	n05	638+45.38
	n06	638+52.88
Sektsioon 4 kergruus- (LWA)	n07	638+60.38
	n08	638+67.88
	n09	638+75.38
	n10	638+82.88
Sektsioon 3 geokärg	n11	638+90.38
	n12	638+97.88
	n13	639+05.38
	n14	639+12.88
Sektsioon 2 kahekihiline geotekstiil	n15	639+20.38
	n16	639+27.88
	n17	639+35.38
	n18	639+42.88
Sektsioon 1 ühekihiline geotekstiil	n19	639+50.38
	n20	639+57.88
	n21	639+65.38
	n22	639+72.88
	n23	639+80.38
Massivahetus	n24	639+95.38
	n25	640+10.38

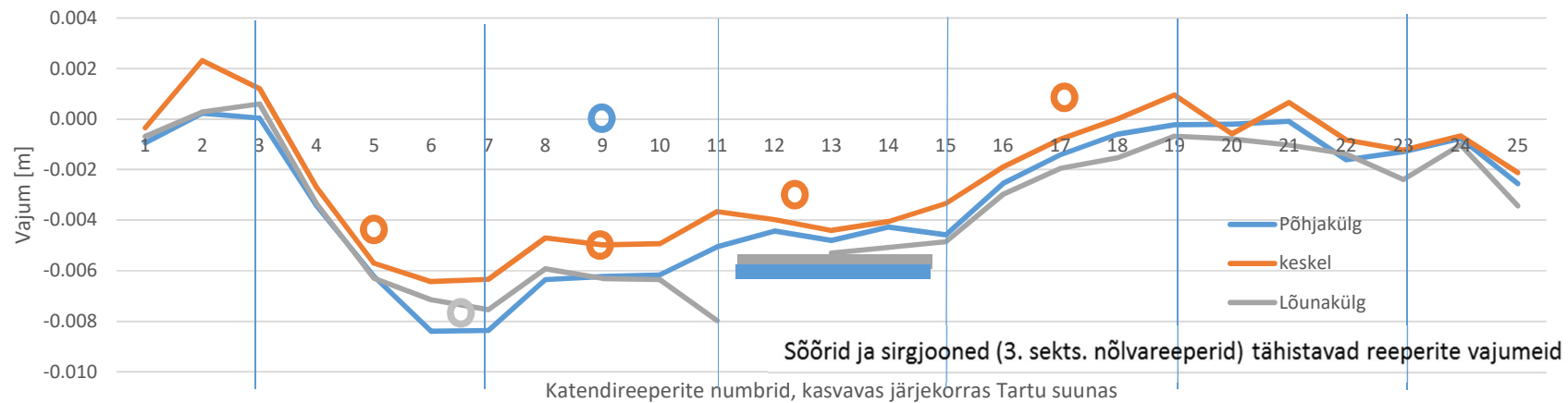
Tee telg		
Massivahetus	c01	638+00.38
	c02	638+15.38
Sektsioon 5 vahtpolüstüreen (EPS)	c03	638+30.38
	c04	638+37.88
	c05	638+45.38
	c06	638+52.88
Sektsioon 4 kergruus- (LWA)	c07	638+60.38
	c08	638+67.88
	c09	638+75.38
	c10	638+82.88
Sektsioon 3 geokärg	c11	638+90.38
	c12	638+97.88
	c13	639+05.38
	c14	639+12.88
Sektsioon 2 kahekihiline geotekstiil	c15	639+20.38
	c16	639+27.88
	c17	639+35.38
	c18	639+42.88
Sektsioon 1 ühekihiline geotekstiil	c19	639+50.38
	c20	639+57.88
	c21	639+65.38
	c22	639+72.88
	c23	639+80.38
Massivahetus	c24	639+95.38
	c25	640+10.38
Lõunapoolne äärejoon		

Massivahetus	s01	638+00.38
	s02	638+15.38
Sektsioon 5 vahtpolüstüreen (EPS)	s03	638+30.38
	s04	638+37.88
	s05	638+45.38
	s06	638+52.88
Sektsioon 4 kergruus- (LWA)	s07	638+60.38
	s08	638+67.88
	s09	638+75.38
	s10	638+82.88
Sektsioon 3 geokärg	s11	638+90.38
	s12	638+97.88
	s13	639+05.38
	s14	639+12.88
Sektsioon 2 kahekihiline geotekstiil	s15	639+20.38
	s16	639+27.88
	s17	639+35.38
	s18	639+42.88
Sektsioon 1 ühekihiline geotekstiil	s19	639+50.38
	s20	639+57.88
	s21	639+65.38
	s22	639+72.88
	s23	639+80.38
Massivahetus	s24	639+95.38
	s25	640+10.38

Katendinaelte nivelleerimise tulemuste põhjal arvatud järjestikuste mõõtmistsüklite vajumid on profiilidena alljärgnevatel joonistel (märka et katendireeper s12 hävis 2020/2021 talveperioodil, arvatavalt teehoolduse käigus)

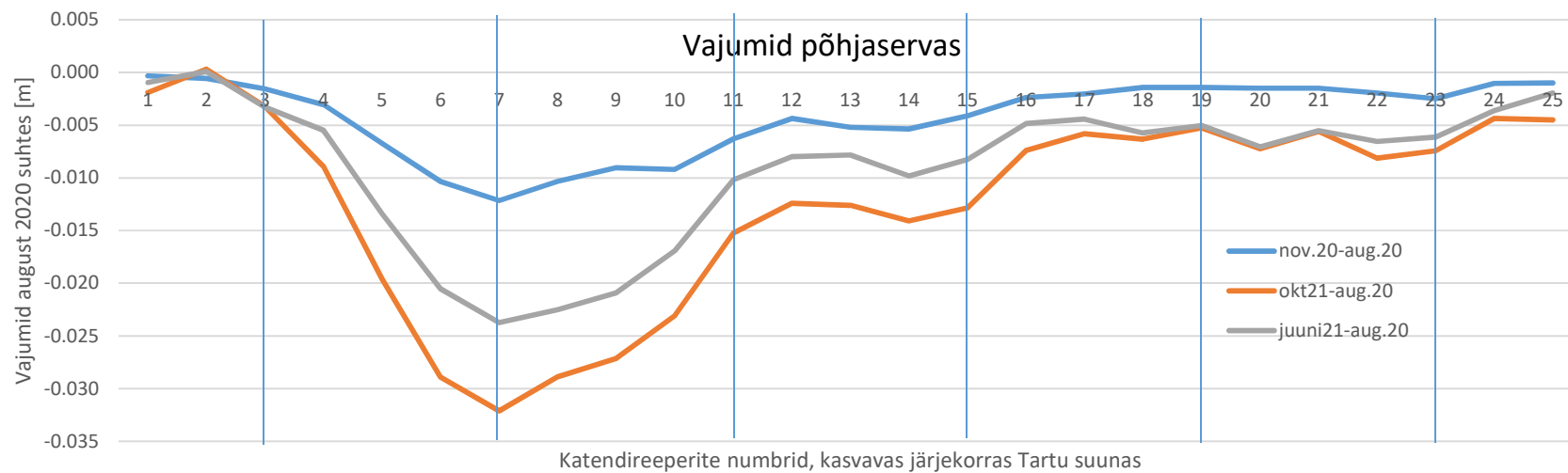


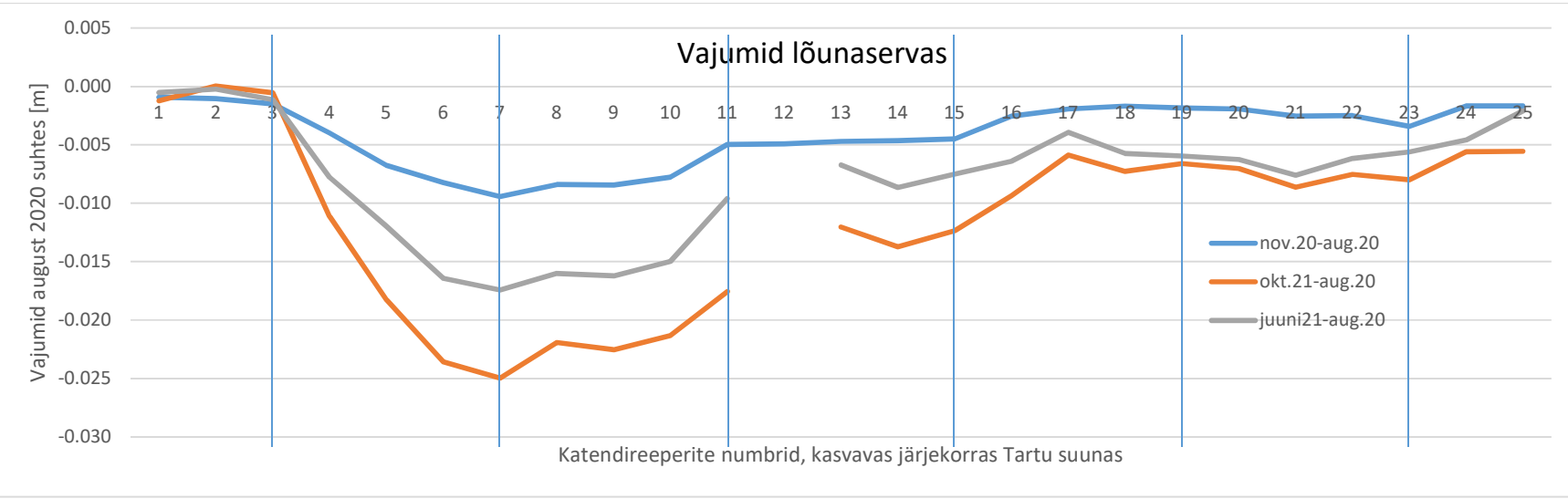
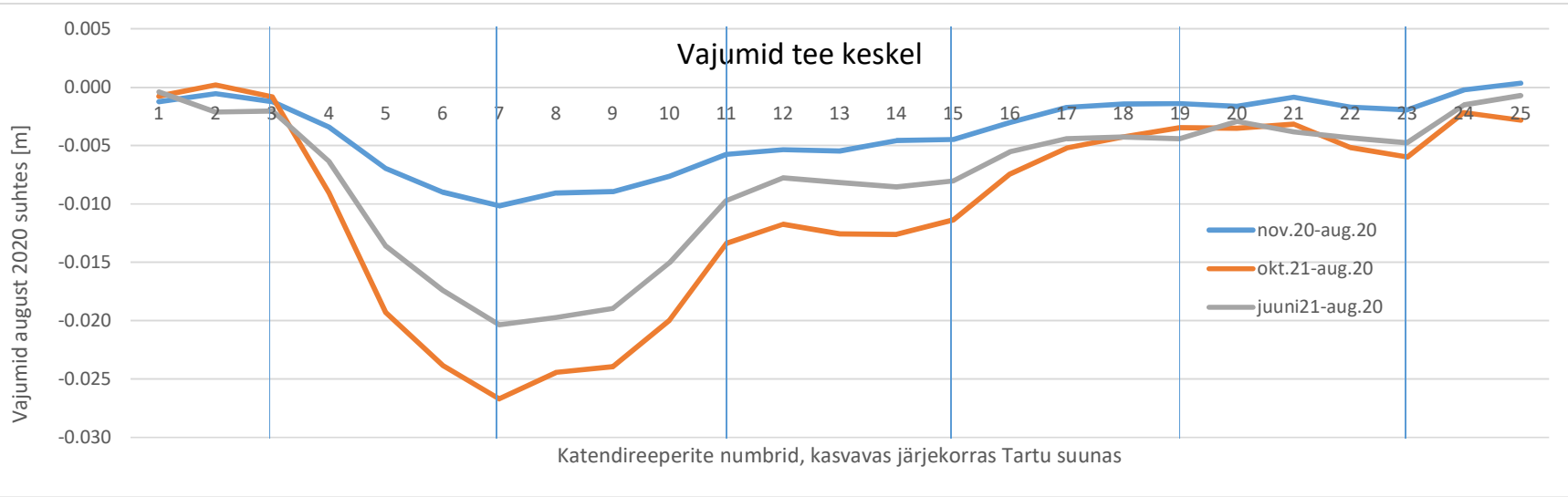
Vajumid okt. 21- juuni21



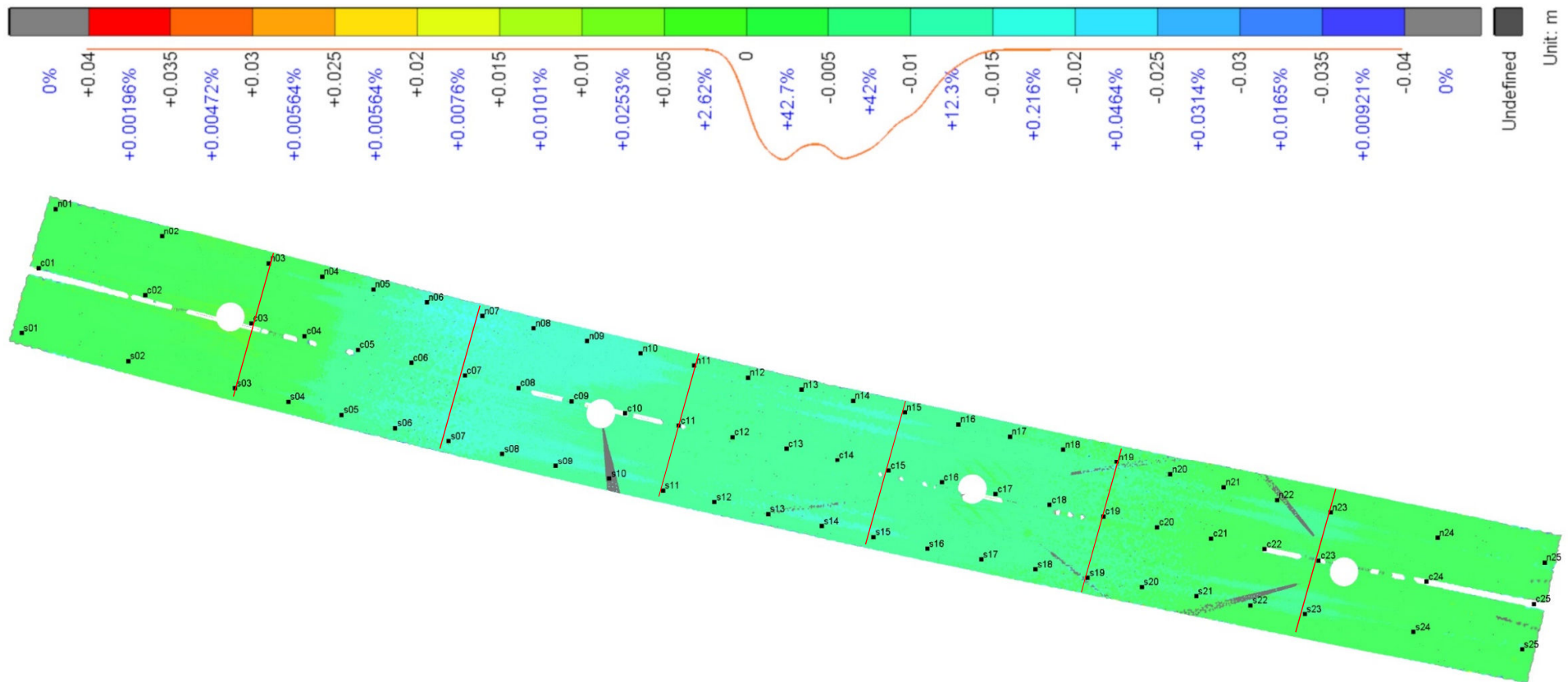
Katendireeperite nivelleerimise tulemuste põhjal arvutatud järjestikuste koguvajumid on pikiprofiilidena alljärgnevatel joonistel.

Vajumid põhjaservas

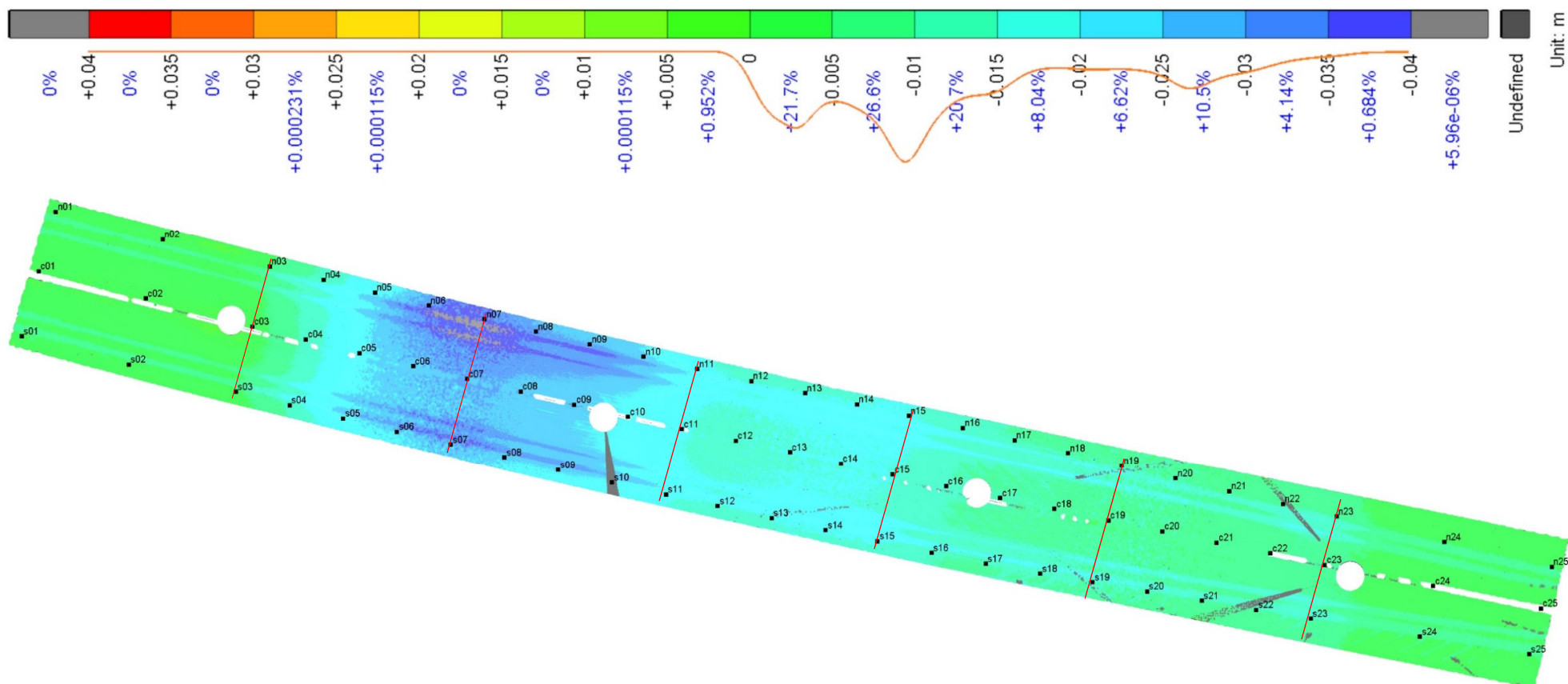




Lisaks nivelleerimistele skaneeriti ära ka terve testlõigu ning põkkuvate (massivahetusega) teelõikude katend. Alljärgnevatel joonistel on kujutatud testlõigu katendi vajumeid tee eksploatatsioonieelsete (aug. 2020) kõrguste suhtes. Märka ka teeroobaste arengut



Joonis. Testlõigu deformatsioonid nov. 2020 laserskaneerimise tulemuste põhjal (nov.2020 miinus aug. 2020)



Joonis. Testlõigu deformatsioonid oktoober 2021 laserskaneerimise tulemuste põhjal (okt. 2021 miinus aug. 2020)

Tallinnas, 28.10.2021