

Teede talviste ebatasasuste uuring

Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu
(vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring
Lõpparuanne

Töös osalesid:

Marek Truu - projektijuht, AS Teede Tehnokeskus

Anti Kasuk - analüüs, AS Teede Tehnokeskus

Romet Raun - analüüs, AS Teede Tehnokeskus (kuni märts 2023)

Veiko Tikas – tee seisundimõõtmised (maaradar, põikprofiil), AS Teede Tehnokeskus

Egon Horg – tee seisundimõõtmised (tasasus), AS Teede Tehnokeskus

Henri Prank – surfid ja laboratoorsed tööd, AS Teede Tehnokeskus

Markus Mänd – surfid ja laboratoorsed tööd, AS Teede Tehnokeskus

Priit Ilves – geoloogilised puurimised, Reaalprojekt OÜ

Vaiko Veeleid - droonmõõtmised, Hades Geodeesia OÜ

1. SISUKORD

1.	SISUKORD	3
2.	SISSEJUHATUS	4
3.	UURINGU EESMÄRK	5
4.	UURINGU METOODIKA	7
5.	UURINGUD	13
	Tasasus	13
	Lidar-uuringud	14
	Põikprofiili mõõtmine	16
	Voolavusanalüüs	17
	Täitedokumentatsiooni ülevaatus	19
	Kandevõime	23
	Maaradariuuring	24
	Geoloogilised puurimised	26
	Laboratoorsed katsed	30
6.	JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD	32
7.	KOKKUVÕTE	39
8.	KASUTATUD KIRJANDUS	40

2. SISSEJUHATUS

Uuring on koostatud Teede Tehnokeskus AS poolt Transpordiameti tellimusel vastavalt töövõtulepingule nr. 3.2-4221414-1 (16.06.2022).

Teede tasasus on üks peamisi teede seisundit iseloomustavaid näitajaid. Sõidukites viibijad tunnetavad tasasust sõidumugavusena – mida tasasem on tee seda vähem sõiduk „võngub“ ning seda mugavam on sõit. Ebatasasel teel sõit on väsitavam ning võib kaasa tuua tervisehäireid. Ebatasasused mõjutavad ka sõidukit – ebatasasusest tekkivad võnked ja vibratsioon kulutavad sõidukit kiiremini ja viimane vajab rohkem remonti. Seetõttu on teede tasasus üheks peamiseks teekasutajakulusid mõjutavaks komponendiks ning seda arvestatakse tasuvusarvutustes. Teisalt kulutab ebatasasel teel „võnkuv“ ka teed - ebatasasuste tõttu avaldavad sõidukid suuremaid dünaamilisi koormusi, mille tulemusena katte eluiga lüheneb. Seega – ebatasasem tee on ühiskonnale mitmes mõttes kulukam, millele lisandab rahas mittemõõdetav pahameel uue katte halvast seisundist. Kokkuvõtlikult - tasasus on tee omadus, mis iseloomustab nii mõju sõidukitele ja sõidukis viibijatele aga mõju on kahesuunaline ka vastupidi – see iseloomustab liikluse potentsiaalset mõju teele.

Tasasus muutub ajas – üldjuhul muutuvad teed tee kasutajate ja keskkonnast tulenevate mõjude toimel ajas ebatasasemaks kuid sellise muutumise kiirus võib olla objektiti erinev, sõltudes peamiselt ehitustegevuse eesmärgist ja kvaliteedist. Ehitamine võib piirduda nt. pindamisega, mille mõju hetketasasusele on pea olematu, samas võimaldab pindamine pidurdada tasasuse kiiret halvenemist. Seevastu uue tee ehitamise korral on oluliselt täpsemalt võimalik prognoosida ja arvesse võtta kõiki peamisi teekonstruktsioonile mõjuvaid jõude ja tagada esiteks - väga tasane lõpptulemus ja teiseks - ka selle väga aeglane muutumine ajas.

Enamasti on tasasuse muutumine ehitamise järgsetel aastatel aeglasem ning kiireneb koos esimeste defektide ning lappimistöödega, sõltudes defektide iseloomust ja hulgast ning lappimistöö meetodist ja kvaliteedist, samuti põhjustab tasasuse muutumise progresseerumist suurenev dünaamiline koormus.

Vähem on uuritud tasasuse muutumist aasta lõikes. Üldiselt on küll teada, et teekatte tasasus aasta lõikes muutub kuid seni on eeldatud, et selline muutumine on ebaoluline ning ei oma otsuste tegemisel tähtsust.

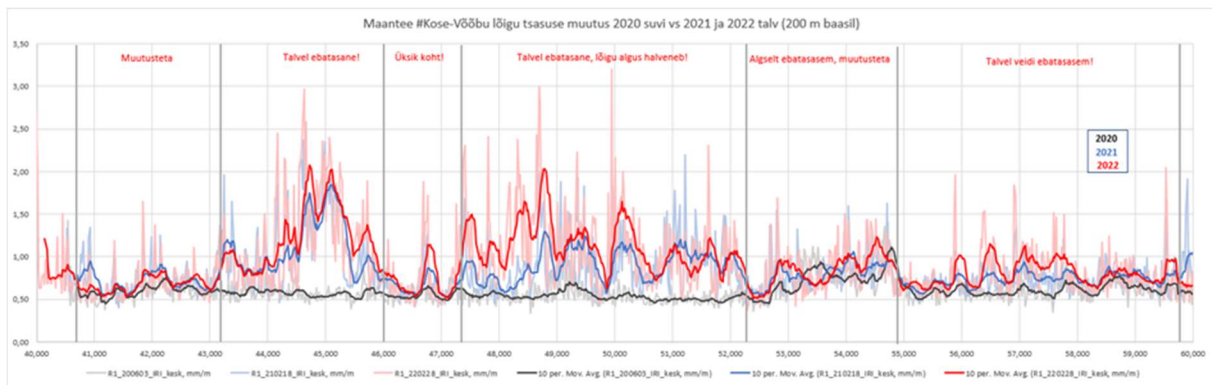
3. UURINGU EESMÄRK

Käesoleva uuringu eesmärk on selgitada välja, miks uuritaval teelõigul ebatasasused tekkisid ning pakkuda välja võimalikud lahendused sarnaste ebatasasuste ennetamiseks tulevikus. Töö laiem eesmärk on selgitada, kas talviste ebatasasuste mõõtmisi on võimalik tulevikus rakendada süsteemse meetmena teedevõrgu seisundi ja püsivuse suurendamiseks ning ühiskonna kulude vähendamiseks efektiivsema teehoiu kaudu.

Uuringu üheks ajendiks said põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa Kose-Võõbu teelõigul avastatud talvised tasasuse muutused juba esimesel talvel pärast liiklusele avamist. Tee ehitati kõrgeimate standardite järgi 2+2 maanteena valmis ning avati liiklusele 2020 suve alguses. Tegemist 100% uusehitusega kuid ehitati geoloogilistelt keerulistest oludes, läbides suures ulatuses soo-alasid. Katte tasasus oli valmides eeskujulik, jäädes valdavalt 0,5...0,6 m/km kohta (IRI), ühel lõigul vahemikku 0,8...1,0 m/km. 2020-2021 talvel märgati lõiguti ebatasasusi, mille kindlakstegemiseks viidi läbi tasasuse mõõtmised talvel, klass I mõõtmisseadmega.

Talvised tasasuse mõõtmised näitasid, et osadel lõikudel oli tasasus märgatavalt halvenenud, ulatudes ekstreemsematel juhtudel tasemeni 2,0 m/km kuid suvel ebatasasused taandusid. Samasugust tendentsi märgati ka 2021-2022 talvel, mistõttu tehti siis uued mõõtmised. Need kinnitasid eelneva talve kogemust – talvised mõõtmised näitavad suuremat ebatasasust. Lisaks on praktiliselt kõigis lõikudes keskmine ebatasasus võrreldes 2021 talvega suurenenud.

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne



Joonis 1. Talvise tasasuse andmed - suvine vs talv 2020-21 ja talv 2021-22

Seega näitasid talvised tasasuse mõõtmised, et tasasuse näitaja IRI suurenes talveperioodil kohati kuni 3 korda, samas kui oli lõike, kus tasasus praktiliselt ei muutunud.

Võib arvata, et talvised ebatasasused on põhjustatud teekonstruktsiooni ebaühtlastest külmarkergetest, kuid käesoleva uuringu üheks eesmärgiks oli uurida meetode, mis võimaldaksid efektiivselt ebatasasuste põhjuseid kontrollida ja tulevikus ennetada.

Külmarkerge on pinnasesse kogunenud niiskuse külmumise ning selle paisumise tagajärjel tekkinud pinnase kerkimine ülespoole. Külmarkerked pinnases on põhjustatud vee külmumisest pinnases, kus juures vaba vee olemasolul pinnases, võivad külmumispiiril tekkida ka jääläätsed. Jäälääts pinnases kasvab läbi kapillaaride või vee kondenseerumise ja pakseneb soojusülekanne suunas kuni veevarustus on ammendatud või kuni külmad tingimused pinnasel enam ei toeta edasist külmumist. Jäälääts kasvamisel pealolev pinnas ja sillutis kerkib üles poole, mis võib halvemal juhul tuua kaasa katte lagunemise Sellist probleemi esineb peamiselt pinnastes, mis sisaldavad külmatundlikke peeneid osakesi. Samas puhtad ja kvaliteetsed liivad ja kruusad, kus on väga vähe külmatundlikke osakesi on külmakindlad. Seega külmatundlikkuse määr pinnases väljendab peamiselt materjalis olevate peente osakeste protsenti. Paljud asutused kvalifitseerivad materjalid külma suhtes tundlikuks, kui 10% või enam materjalist läbib 0,075 mm sõela või kui 3% või enam materjalist läbib 0,02 mm sõela.[Vikipeedia]

Külmumise üldisi seaduspärasusi on käsitletud muuhulgas näiteks Transpordiameti uuringus „Muldkehades ja drenikihtides kasutatavate mineraalmaterjalide

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

veejuhtivus- ja tugevusomadused seotuna terastikulise koostisega. Lõpparuanne. Töö nr 2016-008".

Ebatasasuste tekkimiseks peab olema täidetud 3 tingimust samaaegselt:

- Ühte või mitmesse konstruktsioonikihti peab olema sattunud piisaval hulgal vett - pinnase/materjalipoorid peavad olema sisuliselt veeküllastunud
- Peab leidma aset konstruktsiooni külmumine sügavuses, kus paiknevad veeküllastunud kihid
- Pinnase/materjalikihid peavad olema ebaühtlaselt veeküllastunud

Teoreetiliselt, juhul kui kandevõime on tagatud ja oleks võimalik tagada konstruktsiooni ühtlane veeküllastumus ja ühtlane läbikülmumine, võiksid konstruktsioonikihid olla ka külmakartlikud, tagades külmumisel ühtlase külmakerke. Praktikas ei ole võimalik konstruktsioonides selliseid tingimusi tagada, mistõttu tuleb piirata külmakartlike pinnaste ja materjalide kasutamist.

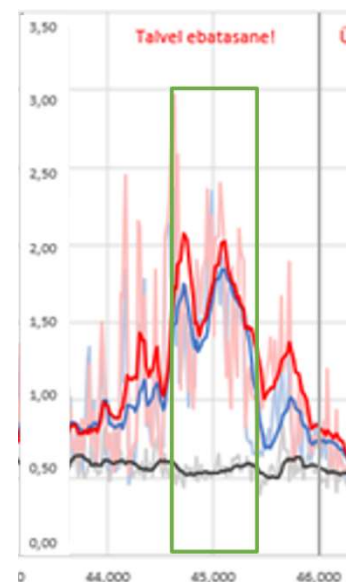
Käesolevast töös tuleb aru saada, milline kiht või kihid põhjustavad ebaühtlasi külmakerkeid. Tasasuse mõõtmine on küll väga heaks indikaatoriks tuvastamiseks, kas kõnealusel lõigul ebaühtlased külmakerked eksisteerivad kuid ei ole piisav, et külmakerkeid sisuliselt uurida. Seda tuleb teha teiste uurimismeetoditega käesolev uuring kombineeribki eesmärgini jõudmiseks mitmeid mõõtmis- ja uurimismeetode, mida on põhjalikumalt kirjeldatud allpool.

4. UURINGU METOODIKA

Käesolevas töös on ebaühtlaste külmakergete uurimiseks kasutatud mitmeid erinevaid meetode. Allpool on selgitatud, miks üht või teist meetodit kasutati ning millist kasu meetodi rakendamisest eeldati või mida andis.

Töös keskenduti eelnimetatud objekti talvetingimustes kõige ebatasasemaks osutunud lõigule PK 447+00 kuni 454+00 (parempoolsel joonisel roheline ala), kus talvise tasasuse näitaja IRI jäi vahemikku 1,5...2 m/km. Sama lõigu suvine tasasus jäi vahemikku 0,5...0,6 m/km.

Siiski vaadeldi uuringus referentsiks ka pikemat lõiku, tuvastamaks erinevusi tasasemate ja ebatasasemate lõikude vahel.



Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne



Joonis 2. Uuringu ala km 44,7...45,4 ning naabruskond



Joonis 3. Uuringu ala km 44,7...45,4

Uuringu alasse jääb samatasandiline, nn. fooridega loomaületuskoht.

Arusaadavalt tuli mitmed mõõtmised läbi viia võimalikult maksimaalse külmakerke perioodil.

Maksimaalse külmakerke tuvastamiseks jälgiti kogu talve vältel lähima mulde temperatuurianduri tööd. Sealt selgus, et külmumissügavus suurenes 2022 aasta lõpus kiiresti sügavusele 0,6...0,8m kuid edasiste sulade ja 2023 aasta maheda talve tõttu oodatud külmumissügavuse suurenemist ei toimunud vaid jäi kuni aprilli keskpaigani samale tasemele. Kahjuks on uuringu ajaks enamus mulde temperatuuriandureid rivist väljas ning Eesti kohta katvat infot saada ei olnud võimalik kuid ka ühest temperatuuriandurist oli hindamatu kasu. Siiski võib vaid oletada, et käesoleva antud talve külmakergete maksimumid võisid sel põhjusel jääda varasematest väiksemateks.

Uuringute raames viidi veelkord läbi **tasasuse mõõtmised**, et kinnitada senise mustri kordumist, kus talvel ebatasasus suureneb ning suvel taandub. Samuti võeti analüüsis arvesse 2022 aasta sügiseste mõõtmiste tulemused. Tasasus on kiire ja efektiivne meetod ebatasasuste, sh ebaühtlaste külmakergete piirkondade tuvastamiseks ning summeerib üleminekuid suurema külmakerkega alalt väiksemale ja vastupidi. Samas ei suuda tasasus kui indikaator täpsemalt välja tuua, kas ebatasasus tekkis külmakerkelt mittekuhmakerkele liikumisel või

vastupidi ning lisaks on määrangu resolutsioon suhteliselt madal (ca 10m). Seetõttu ei suuda tasasus anda infot külmakerke täpsemate asukohtade kohta nt meetri täpsusega.

Vaatamata tasasuse väärtuste ligi 3x suurenemisele jäid suhtelised pikisuunalised ebatasasused jäid siiski paari sentimeetri suurusjärku, mis tähendab, et külmakerke asukoha täpselt tuvastamiseks kasutatavad meetodite täpsus ja resolutsioon peavad olema väga head.

Siit tulenevalt oli vaja meetodi, mis võimaldaks hinnata külmakergete paiknemist teel täpsemalt, ca 1-2 m täpsusega plaanis. Kuna tasasust mõõdetakse paremast rattajäljest, oli kindlalt teada üksnes see, et külmkerkest tulenevad pikiprofiili muutused esinevad paremas rattajälgedes kuid külmakergete tegelik paiknemine ja katte piki- ning põikprofiil oli teadmata.

Eeldati, et üheks võimaluseks külmakergete tuvastamisel on maaradar. Maaradar ei näita küll otseselt katte kerkeid kuid arvasteses asjaolu, et külmakerkeid põhjustab konstruktsioonis vesi, peaks maaradar ühtlase paksusega kihtide puhul andma nõ anomaaliatena vihjed külmakergete asukohtadele. Selliste vihjete „lugemisoskus“ võimaldaks tulevikus külmakerkekohti või külmakerke potentsiaaliga kohti usaldusväärselt hinnata suhteliselt pikkadel lõikudel suhteliselt lihtsa meetodiga – veeküllastunud kihtides liigub signaal aeglasemalt ning need paistavad maaradari jaoks paksematena.

Eeldati, et mõningast teavet külmakergete potentsiaali kohta võivad anda kandevõime mõõtmised, eriti pidevmeetodil, kuivõrd kandevõime võiks potentsiaalselt näidata veeküllastunud kohti nõrgematena veeküllastumata kohtadest. Uuringu alal on teostatud mõõtmisi nii TSDD kui FWD seadmega ja neid andmeid on töös analüüsitud.

Eeldati, et külmakerkeid on võimalik tuvastada täpsete kõrguslike mõõtmiste teel lidartehnoloogiaga kui võrrelda saadud tasapinna projektsega. Seejuures pidi lidariga saadud punktipilv olema piisavalt detailne. Lidartehnoloogia võimaluste uurimiseks kasutati 5 meetodi:

- Terrestriline lidarskänner
- Droonilt mõõtmiseks sobiv lidarlahendus
- Katte põikprofiili mõõtmiseks kasutatav lidar
- Teede ja rajatiste üldiseks kaardistamiseks kasutatav EyeVi lidarlahendus

- Maa-ameti lidar-punktipilv

Mõõdetud punktipilv suudab iseloomustada küll katte profiili kuid külmakergete tuvastamiseks on vaja seda täiendada meetodiga, mis suudaks analüüsida kõrguse muutumist ja/või kõrguste erinevusi. Külmakergete iseloomustamiseks on seega vaja ka referentstasapinda, st vajalik on leida profiili muutused külmakergeteta tasapinna suhtes. Kuna uuritav teelõik on kahepoolse, pidevalt muutuva kaldega, paiknedes uuringu alas samaaegselt nii horisontaal- kui püstköveral, loodeti referentstasapinna loomisel ära kasutada täitedokumentatsioonis olevat projektset või kõrgusmõõtmiste infot, kuid see erines lidariga mõõdetud ja Maa-ameti punktipilvega joondatud punktipilvest kõrguslikult mitukümmend sentimeetrit ega olnud seetõttu 1-2 cm ebatasasuste tuvastamiseks kuidagi kasutatav. Seetõttu modelleeriti teekatte tegelik ja normaaltasapind (*3D surface model*) erinevaid punktipilvetasandustehnoloogiaid kombineerides nii, et tegeliku tasapinna ebatasasused nähtavale tuleks. Modelleerimise tulemusena saadi külmakergete kaart.

Külmakergete kaardil valiti välitöödeks kohad. Andmete võrreldavuse huvides valiti puurimiseks kohad sõidutee 1 parempoolse sõiduraja keskel ning surfideks kohad teepeenral. Uuritavad kohad valiti nii, et osad (1 surf ja 3 puurauku) jääksid suhteliselt rohkem kerkinud piirkondadesse ja osad (1 surf ja 2 puurauku) vähem kerkinud piirkondadesse. Puurimistega läbistati kõik rajatud kihid aluspinnaseni välja ja saadi hea ülevaade kihtide paiknemisest ja peamistest omadustest, surfid tehti sügavuseni 1 m ning need võimaldasid hinnata kihtide külmumist ja muid omadusi visuaalselt ning saada kõigiks katseteks vajalik minimaalne kogus materjali.

Materjal viidi katsetamiseks ja edasiste hinnangute andmiseks laborisse. Laboris määrati materjalide ja pinnaste omadused – veesisaldused, terastikulised koostised ning filtratsioonimoodulid. Kuigi töös võrreldi saadud tulemusi ka projektsega oli töö peamine eesmärk hinnata, kas saadud tulemused võisid põhjustada soovimatud ebaühtlasi külmakerked.

Lisaks loodi punktipilvede baasil laiem pinnamudel ja koostati voolavusanalüüs, mis aitab näha pinnavee liikumist ja vee võimalikke kogunemiskohti, st avastada piirkondi, kus vee äravool on takistatud või soodustab mulde veeküllastumist.

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

Töö käigus töötati läbi objekti ehituse täitedokumentatsioon, et näha, kas ja milline roll külmakergete ilmnemisel võib olla projektlahendusel ja kas need võivad ilmned tööde vastuvõtudokumentatsioonist, eesmärgiga anda võimalusel soovitusi projekteerimisnormide ja/või ehitustööde dokumenteerimise ja või tööde kõigus tehtavate kvaliteedi tagamise ja kontrollitoimingute kohta.

5. UURINGUD

Tasasus

Teekatte tasasus ja ebatasasus mõjutavad otseselt teekasutajate kulusid ning on ühed peamistest seisukorra hindamise parameetritest. Nende abil saab hinnata teedevõrgu seisukorrast põhjustatavat kulu ning remonditöödega saavutatavat majanduslikku tulu.

Teekatte tasasust iseloomustav näitaja on IRI-arv (International Roughness Index). IRI-arv on rahvusvaheliselt kasutatav sõidumugavust iseloomustav väärtus. See arvutatakse standardse sõiduki kere vertikaalsuunaliste võngete summana etteantud teelõigule. Selle mõõtühikuks on mm/m. IRI-arv näitab teekatte ebatasasusi lainepikkusel üle 500 mm. IRI-arvu kaudu tasasuse hindamine on standardiseeritud ja rahvusvaheliselt laialdaselt kasutatav. (Sayers, Gillespie, ja Paterson 1986)



Joonis 4. Katte tasasuse ja tekstuuri mõõteseade LTM-1

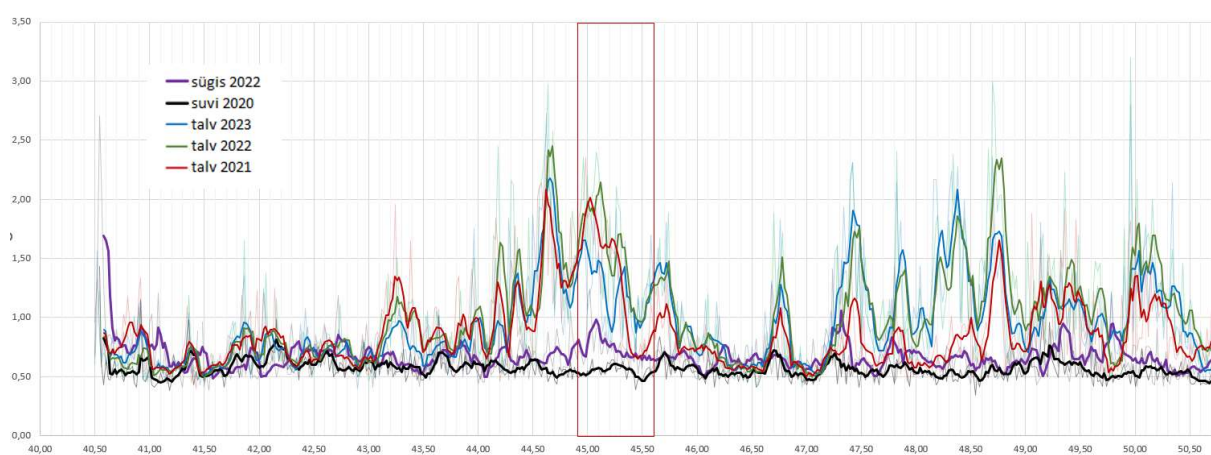
IRI-arv iseloomustab väga hästi teekasutaja poolt tunnetatud sõidumugavust. Sellel on ka otsene ja palju uuritud seos teekasutaja kulude, liiklusohutuse ja teekatte seisukorra muutumisega (Islam ja Buttlar 2012; Dewan ja Smith 2002). IRI-arv on ka oluline sisend remondivajaduse arvutamisel.

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

IRI-arvu mõõdetakse laserseadmega, mis kinnitatakse sõiduki külge mõõdetava jälje kohale. Selles uuringus kasutati nendel tänavatel IRI-arvu mõõtmiseks seadet LaserTextureMeter LTM-1. Sama seade mõõdab ka teekatte tekstuuri. Mõõtmiste kiirus maanteel mõõtes on keskmiselt 80 km/h. Seade on kalibreeritud ja läbinud rahvusvahelised võrdlusemõõtmised.

Teekatte tasasus ajas muutub. Tee valmides jääb kaasaegsete, rekonstrueeritud maanteede katte tasasuse IRI-arv vahemikku 0,6-1,0 m/km. Eksploatatsiooni käigus mõjuvad tee konstruktsioonile erinevad jõud (liikluse dünaamika, vee mõju, külmumise mõju, mille tulemusena hakkab katte tasasus aja jooksul halvenema. Samuti põhjustavad tasasuse halvenemist erinevad katte defektid ning nende likvideerimiseks tehtavad parendused - katte lappimine ja remont.

Tasasuse mõõtmises eristuvad selgelt lõigud, kus talvine tasasus suureneb märkimisväärselt võrreldes suvise tasasusega, samuti võib märgata, et ajas on talvised ebatasasused valdavalt kasvavas trendis, nagu ka suvised ebatasasused.



Lidar-uuringud

Lidar-uuringute detailsest analüüsist langes välja suhteliselt hõre Maa-Ameti punktipilv, samas oli viimane üheks komponendiks voolavusanalüüsi koostamisel. Töös kasutatud terestiline skanner on olemuselt kõige täpsem, samas on mõõdetava objekti iseärasuste tõttu (pikk horisontaaltasapinnaline objekt) antud meetod vähem efektiivne.

Teede üldiseks kaardistamiseks mõeldud mobiilse laserskanneerimise tulemusel saadav punktipilv nõuab vajaliku täpsuse saavutamiseks samuti suhteliselt mahukat andmetöötlust. Katte põikprofiili mõõtmiseks kasutatud lidarilt kasutati analüüsiks põikprofiili parameetreid (roopa sügavus, põikkalle, roopa maht) ning

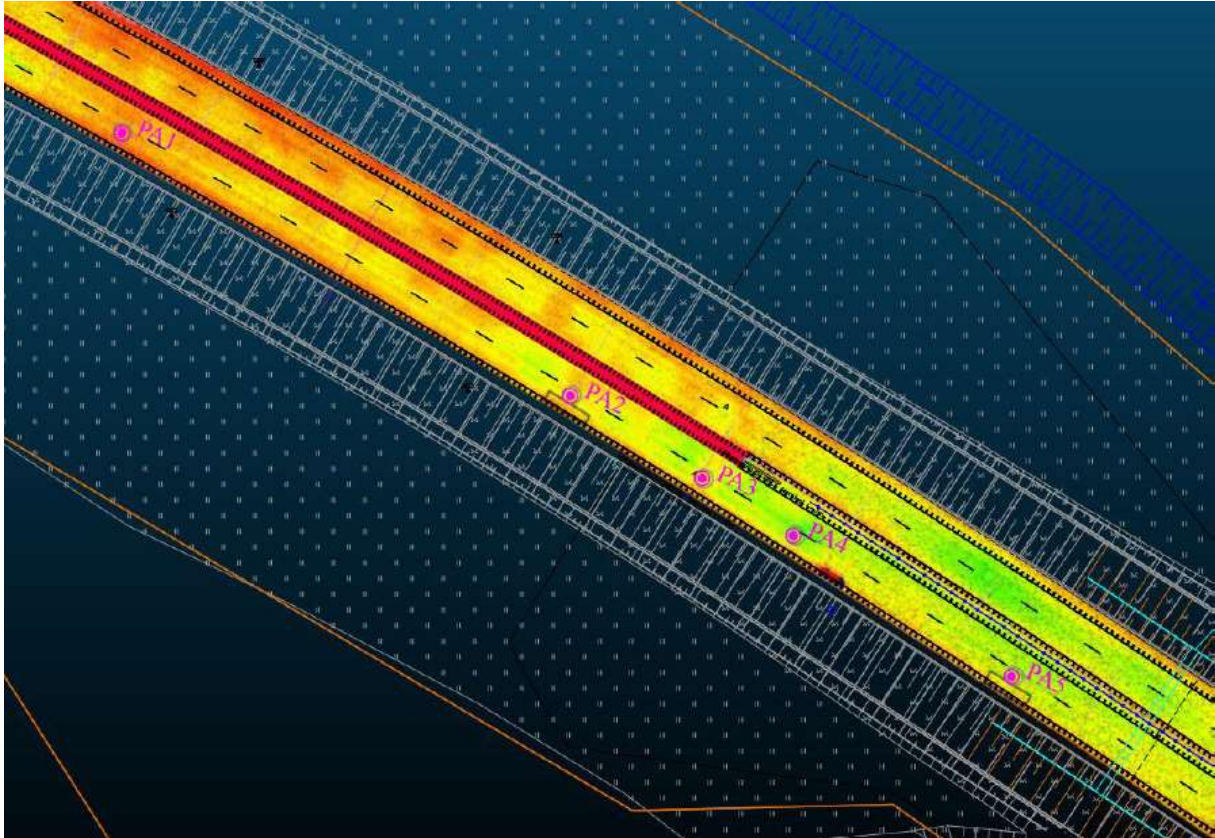
Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

analüüsi. Parima efektiivsusega antud ülesande jaoks osutus drooniga mõõdetud punktipilv.



Joonis 5. Täpsemaks uuringuks valitud kõigi lidar-seadmetega kaetud ala

Lidaruuringutega saadi täppis-uuritud alast detailne külmakergete kujutis, mis kinnitas oletust, et ebatasasel lõigul (tähistatud punaste mummudega), on ka lidariga tuvastatav kõrguste erinevus kus lokaalsed külmakerked on suuremad (st. külmakergete vahel on kerkimata alad) samas kui tasases piirkonnas sellist kõrguste erinevust pole. Lidarmõõtmiste tulemusena kavandati 5 uuringu kohta, neist uuringukohad 1...3 külmakerkelistesse kohtadesse (3 puurauku ja üks surf kohas 2) ning uuringukohad 4...5 mittekülmakerkelistesse kohtadesse (2 puurauku ja üks surf kohas 5)

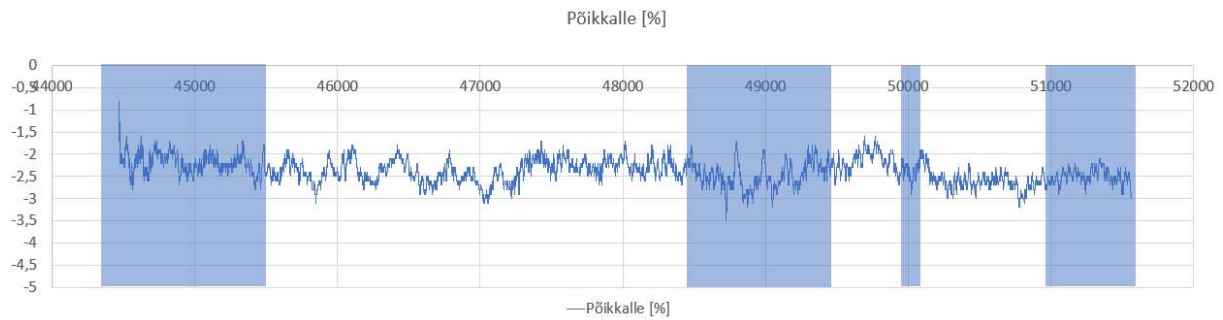


Joonis 6. Külmakerked. Punased alad – suurem kerge, rohelised alad – kergem kerge

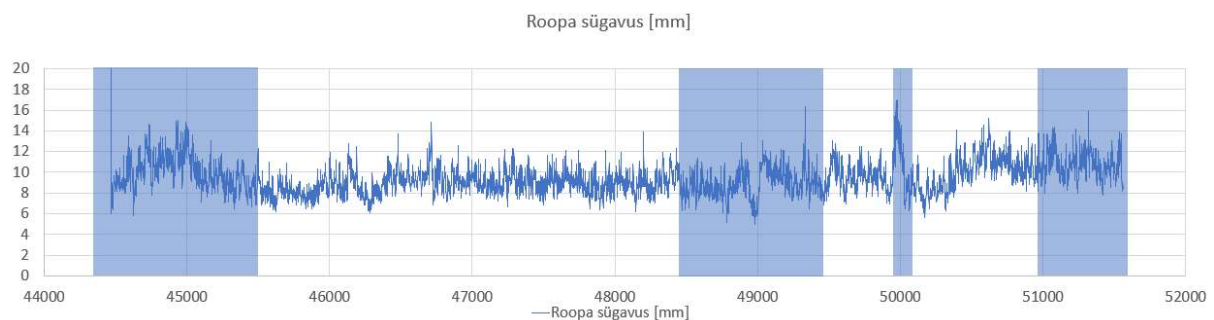
Põikprofiili mõõtmine

Lidarskanneerimise tulemustest katte põikprofiili ja roobaste mõõtmise seadmega arvutati välja roobaste sügavus, sõiduraja põikkalle ja roobaste ristlõike pindala ning uuriti, kas ebataasates, st ebaühtlaste külmakergete kohad on toonud talvetingimustes kaasa ka suuremad ebaühtlused ja profiili kõikumised katte põiksuunas nendes kohtades. Allolevatel joonistel võib näha, et uuritud näitajate kõikumine on küll arvestatav kuid need ei erine silmnähtavalt tasasematel ja ebataasematel (allolevatel joonistel tähistatud sinisega) lõikudel.

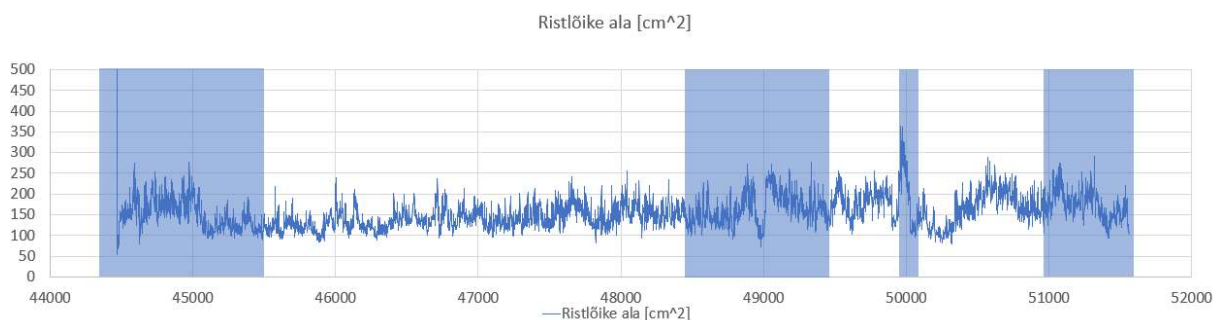
Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne



Joonis 7. Kalde muutused km 44...52 sõidurajal 1



Joonis 8. Roopa sügavuse muutused km 44...52 sõidurajal 1



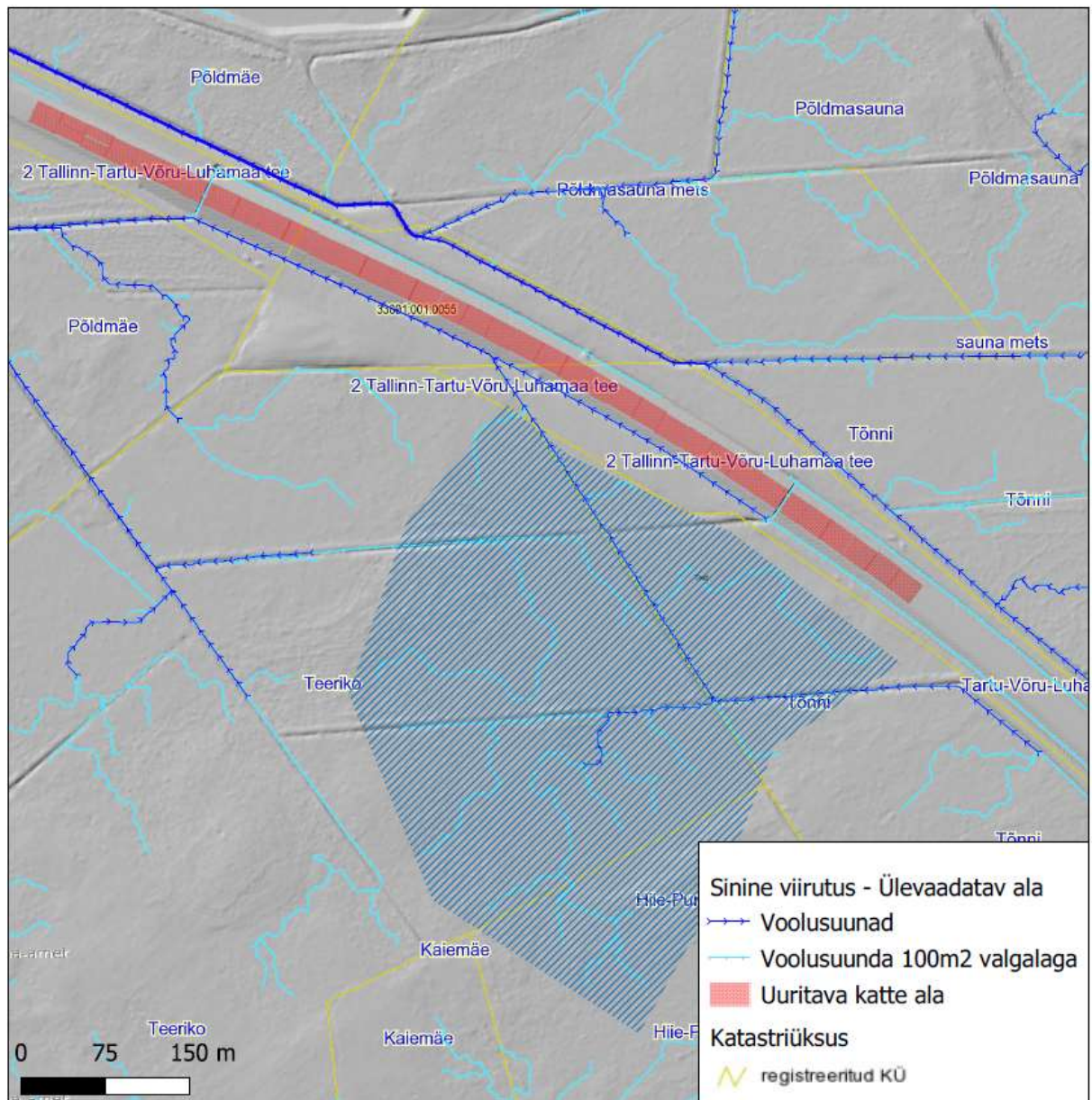
Joonis 9. Roobaste ristlõike ala muutused km 44...52 sõidurajal 1

Voolavusanalüüs

Voolavusanalüüsi eesmärk on näidata, kuidas kujunevad konkreetsetes piirkonnas valgalad ja kuhu suunduv vesi, võimaldades hinnata veeviimarite võimet saabuvat vett vastu võtta ning hinnata võimalikke veekogunemise või üleujutuse alasid. Sademete vee lihtsustatud top-down analüüsiks loodi Maa-ameti 2020 lidarandmete ning AS Teede Tehnokeskuse 2022 mobiilse kaardistamise laseskaneerimise andmete põhjal maapinna mudel. Maapinna mudelile rakendati referentsi saamiseks maapinda tasandavat algoritmi millel omakorda rakendati maapinnana kallete ja voolusuundade määramise algoritm. Saadud maapinna mudelite, varasemate kaardiandmete ning lihtsustatud sademevee voolusuundade

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

põhjal on alljärgneval joonisel sinise viirutusega märgitud soovitatav viia läbi täiendav veeviimarite korrastamine, et tagada võimalikult väikese täiendava veehulga jõudmine teekaitsevööndisse.

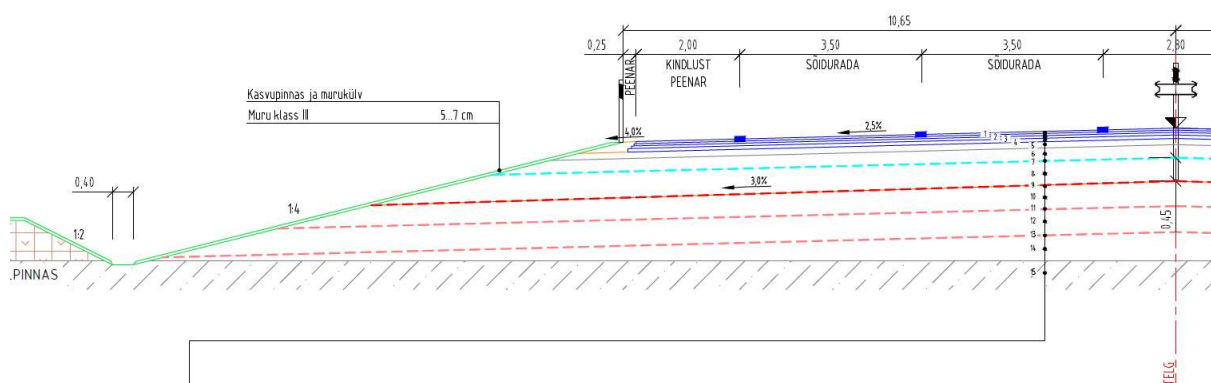


Joonis 10. Voolavavusanalüüsi resultaat

Tabel 1. Katendi tüüp II

Katendi tüüp II

1. Killustikmastiksfalt SMA 16x	4 cm
2. Tihe kuum asfaltbetoon AC 16 surf	5 cm
3. Kuum poorne asfaltbetoon AC 20 BASE	5 cm
4. Kuum poorne asfaltbetoon AC 32 BASE	7 cm
5. Tardkivimikillustik ridakillustik fr 2/32	12 cm
6. Settekivimikillustik fr 32/64+16/32+8/12	25 cm
7. Geotekstiil NorGeoSpec II profiil	
8. Täitematerjal __105 Kf>0,5 m/ööp	min 45 cm
9. Betoniit matt (min 4000 gr/m ²)	
10. Täitematerjal __90 Kf>0,2 m/ööp 1)	min 35 cm
11. Geotekstiil NorGeoSpec IV profiil	
12. Täitematerjal __150 Kf>0,5 m/ööp, max tera läbimõõt 200 mm	50 cm
13. Geotekstiil NorGeoSpec IV profiil 2)	
14. Täitematerjal __150 (jäme purdpinna max tera läbimõõt 500 mm) b) Täitematerjal __75 Kf>0,1 m/ööp	
15. Aluspinnas	



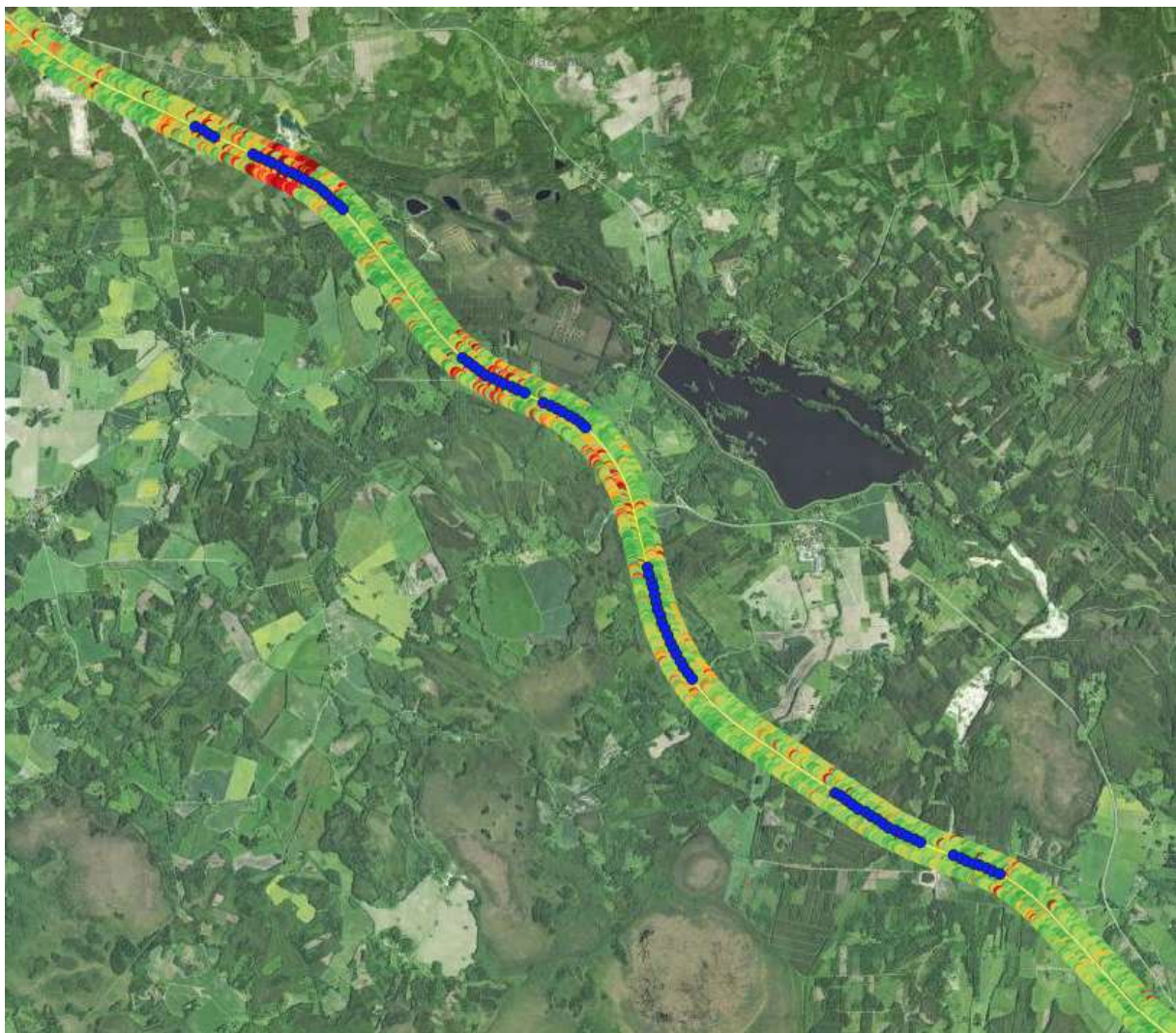
Joonis 12. Katendi tüüp II

Turbaalad on välja toodud allolevas tabelis.

Tabel 2. Turbaalade paiknemine täitedokumentatsiooni põhjal

Km 43,5-43,8 – paksusega 0,35-1,35 m
Km 44,4-45,9 – paksusega 0,10-1,65 m
Km 48,6-49,6 – paksusega 0,05-2,00 m (Vonka maardla, kuni 3,4 m)
Km 49,9-50,6 – paksusega 0,10-1,80 m (Vonka maardla)
Km 52,8-54,5 – paksusega 0,30-2,15 m (Vonka maardla)
Km 57,1-58,5 – paksusega 0,15-3,70 m
Km 59,0-59,7 – paksusega 0,10-1,85 m
Km 63,4-64,5 – paksusega 0,25-2,25 m (Epu-Kakerdi maardla, kuni 4,5 m)

Need alad kanti kaardile ning nende kõrvutamisel talviste tasasuste andmetega võib kuni km 49,6 näha mõningast seost, kus turbalõikudel tunduvad ebatasasused on suuremad. Alates km 49,6 selline seos tunnetatav ei ole.



Joonis 13. Talvised ebatasasused (punasemad kohad on ebatasasemad) ja turbaalad (sinisega)

Projekti ja teostuse uurimisel selgus, et projektis kapillaartõusu tõkestamiseks kavandatud vee toimel paisuv bentoniitmatt (kasutusel ainult turbaladel) oli ehituse käigus asendatud vundamentide hüdroisolatsiooni kaitseks mõeldud drenmatiga - dreneaži geokomposiidiga (dimpled high density polyethylene foil with polypropylene geotextile) Grilltex GXP Dren 8 SP. Vaatamata sellele, et materjali asendus ei pruugi pakkuda 100% identset toimet projektis ettenähtuga, täidab see suure tõenäosusega oma eesmärgi kapillaartõusu tõkestajana allolevatest kihtidest, piirates samal ajal ülevalt tuleva vee valgumisel allapoole. Seda kõike eeldusel, et kihti pole paigalduse käigus märkimisväärselt vigastatud. Alloleval juhuslikul pildil on näha, et drenmatti ülekatted on teekalde suunas ja drenmatti nähtaval osal puuduvad tunnused, mis viitaksid selle võimalikule vigastamisele.



Joonis 14. Dreneaži geokomposiidiga Grilltex GXP Dren 8 SP paigaldus (foto: TREV-2)

Tööde käigus tehti nii ehitaja kui järelevalve poolt arvukalt progressifotosid. Kuigi progressifotod on olemuselt „juhuslikud“, sõltudes fotograafi nägemusest jäädvustamist väärivatest tegevustest, annavad need kõrvalseisjale siiski väärtusliku ülevaate objektil toimunud. Fotodest oleks veelgi rohkem kasu kui kõik fotod oleksid varustatud koordinaatidega, veel parem kui oleks ka seos ehitustööde päeviku andmestikuga (mis töid ja kus tehti).

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

Kandevõime

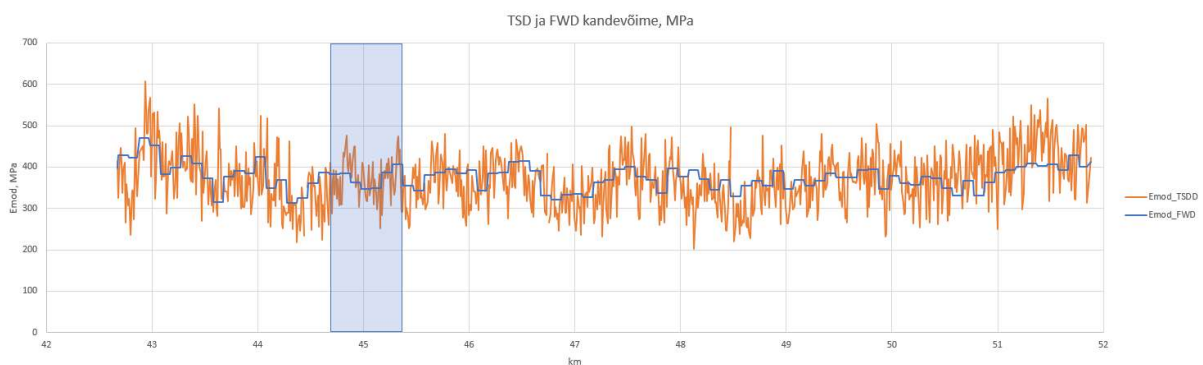
Kandevõime mõõtmised nii pidevmeetodil TSDD seadmega kui FWD seadmega viidi läbi 2021 aasta oktoobris, ca aasta pärast katte avamist liiklusele, talve eel.



Joonis 15. Greenwood TSDD ja Dynatest FWD kandevõime mõõteseade

Kandevõime pidevmõõtmise läbipainde andmed on 10m sammuga ja analüüsi eel oletati, et veeküllastunud kihtide korral peaks konstruktsiooni kandevõime näitajad paistma madalamad kui veeküllastumata kihtide korral.

Kandevõime analüüsi käigus ei tuvastatud, et kandevõime erinevate parameetrite väärtused või nende kõikumised oleksid seotud talviste ebatasasuste väärtustega. Alloleval graafikul on näha, et nii FWD kui TSDD põhjal leitud kandevõime kõikumised ja tasemed küll muutuvad tee ulatuses kuid ei ole seotavad konkreetsete ebatasaste kohtadega, nt. vahemikus km 44,7...45,3.



Joonis 16. TSDD ja FWD läbivajumite põhjal leitud kandevõime näitajate võrdlus

Maaradariuuring

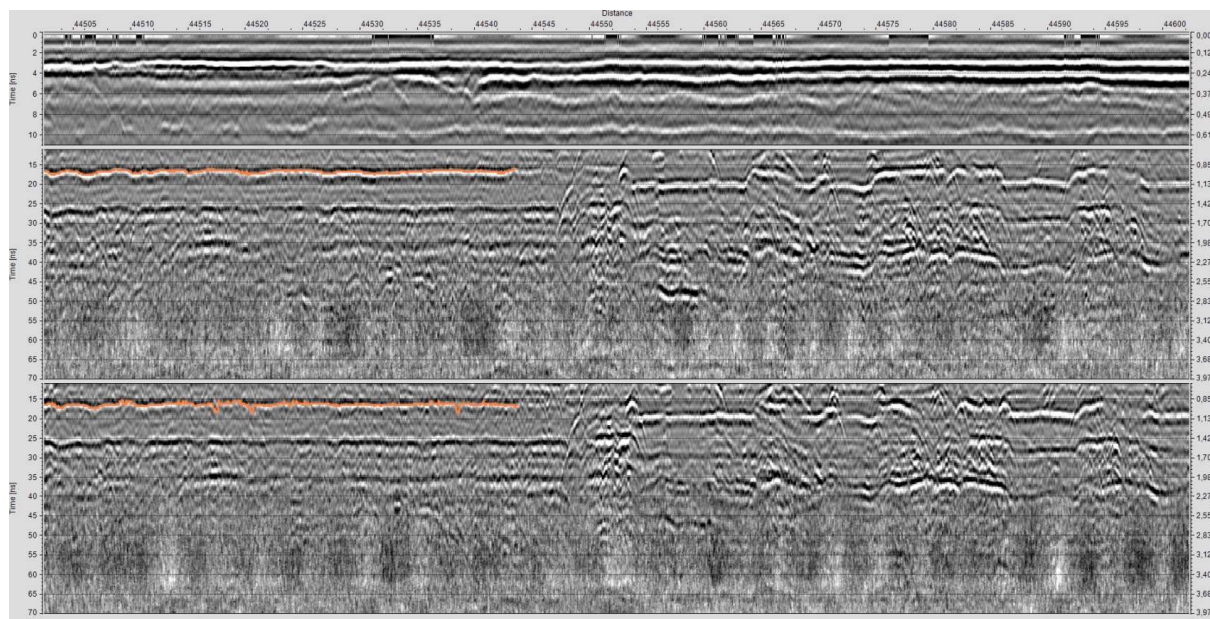
Maaradariuuringud viidi läbi erinevate sügavusvahemike jaoks, hõlmates sügavusi 0-1, 0-3 ja 0-10 m, et uurida kihtide homogeensust ja anomaaliaid. Mõõtmised viidi läbi antennidega 1GHz, 400MHz ja 100MHz antennidega, kuivades oludes.

Radargrammilt võib näha, et ca 1m sügavusel paiknev kihi joon muutub alates km 44,550 laineliseks, mis ühtlase paksuga kihtide puhul viitab kihi veesisalduse muutustele. Nimelt liigub signaal niiskemas keskkonnas üldjuhul aeglasemalt, mille tulemusena paistavad sellised kihid radargrammil paksemana.



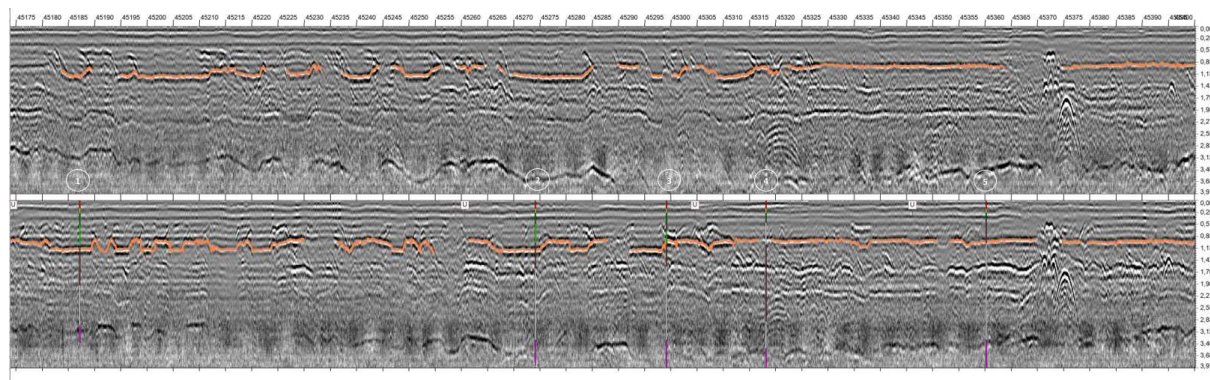
Joonis 17. Maaradar 400 MHz antenniga

Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne

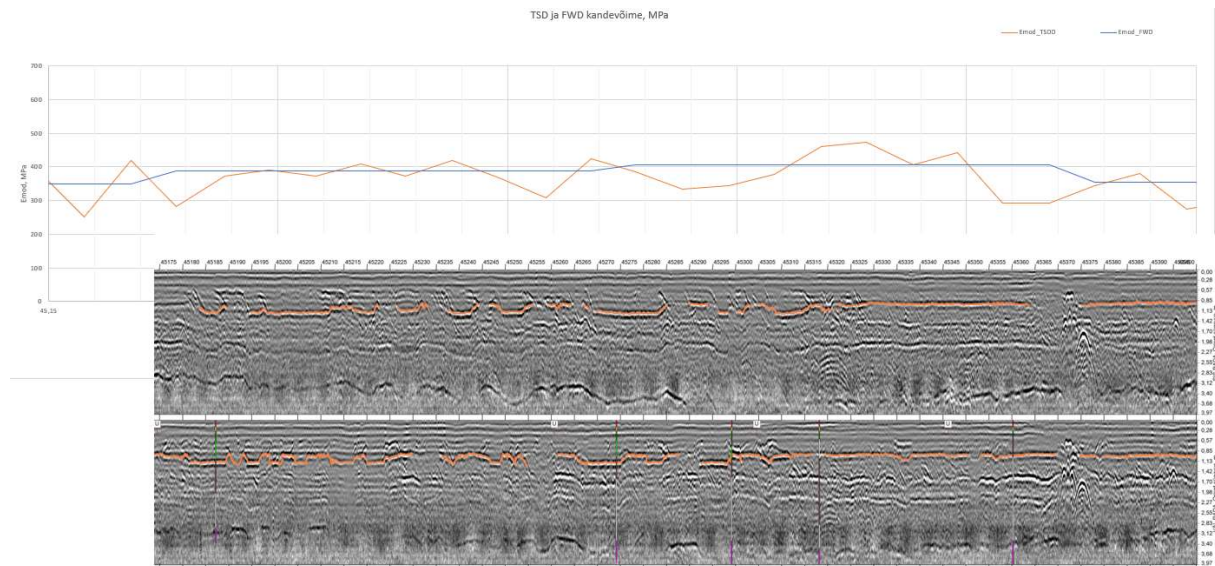


Joonis 18. Radargramm 1GHz (ülemine) ja 400MHz antennidega radadel 1 ja 2

Uuringualas on hästi näha kihtide näiline paksenemine uuringukohtades 1 ja 2, uuringukoht 3 jääb selle põhjal suurema veesisaldusega ala piirile ning uuringukohad 4 ja 5 piirkonda, kus kihtide niiskussisaldus on väiksem, mis selgitab, miks kihijoon taas ühtlasem.



Teede talviste ebatasasuste uuring. Põhimaantee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa, Kose-Võõbu (vahemikus PK 447+00 kuni 454+00) ebatasasuste uuring. Lõpparuanne



Joonis 19. Radargramm ja kandevõime TSDD ja FWD seadmetega

Nii radargramm kui lidar näitavad, et külmakerke nõ tipud on sageli ca 10 m sammuga, mis selgitab, miks isegi 10m sammuga TSD mõõtmised ei suuda eristada külmakerkelisi kohta mitte külmakerkelistest. Teoreetiliselt peaks olema seda võimalik teha FWD seadmega, kui kavandada mõõtmised väga tiheda sammuga – nt. 1m sammuga või täpselt külmakergete tippudesse ja põhjadesse.

Geoloogilised puurimised

Geoloogiliste puurimiste kohad valiti lidarmõõtmiste põhjal koostatud pinnamudeli võrdlusel saadud kohtadesse nii, et kohad 1, 2 ja 3 jääksid enamkerkinud kohtadesse ning 4 ja 5 vähemkerkinud kohtadesse. Kohtades 2 ja 4 tehti lisaks surfid. Geotehniliste uuringute välitöö toimus märtsis 2023. aastal. Tellija poolt etteantud kohtadesse rajati 5 puurauku, maksimaalse sügavusega 4,45 meetrit. Uuringu teostamiseks kasutati roomikutel puuragregaati GM 65 GTT ning südamikpuurimise meetodit. Puuraukude nr 2 ja 5 kõrvale kindlustatud teepeenrasse rajati samal ajal surfid. Surfide mõõtmed olid 0,5x1,0 meetrit ning sügavus 1,0 meetrit.



Joonis 20. Katte puurimised ja surfimistööd

Puuraukudes esinenud kihid kirjeldati ja mõõdeti kihtide paksused. Samuti kontrolliti puuraukudes pinnasevee esinemine ja mõõdeti selle tase. Saadud tulemuste põhjal vormistati aruandes sisalduvad geoloogilised profiilid puurtulpadena. Puuraukudest võeti 35 pinnaseproovi. Lähtuvalt antud töö eesmärgist uurida külmakergete tekkepõhjuseid, valiti laboris katsetamiseks proovid materjalidest, mis jäid külmumissügavuse piiresse (puurimisega tuvastati, et külmumissügavus ei ületanud 2023. aasta talve lõpul 1 meetrit). Proove teimiti EVS-EN ISO 17892-4; EVS-EN 1097-5 ja EVS 901-20 nõuete kohaselt ning pinnaste nimetused anti EVS-EN ISO 14688-2:2004+A1:2013 järgi. Puuraukude asukohad valiti tellija poolt lähtuvana eelneval skeemil illustreeritud olukorrast, kus punased alad väljendavad külmakerkeid (PA1...3) ja rohelised alad külmakerkest mõjutamata (või väiksemal määral mõjutatud) kohti (PA4...5).

Uuritud lõik asub soisel alal, kust turvas on tee muldkeha alt ehitamise käigus eemaldatud. Pinnakate koosneb valdavalt jääjärvelistest setetest, mis on kaetud täitematerjaliga (tee mulle ja konstruktsioon). Üldgeoloogiliste andmete põhjal paikneb uuritud lõik mattunud oru serval ning aluspõhja moodustab Ordoviitsiumi ladestu lubjakivi, milleni praeguste uuringute käigus ei puuritud. Järgnevalt on iseloomustatud uuritud ala geoloogilises lõikes väljaeraldatud pinnaseid kihi kaupa ülevalt alla:

Asfalt – moodustab teekatte paksusega 18...19 cm.

Graniitkillustik – on asfaldialuseks kihiks sügavusega 18...19 cm, paksusega 10...12 cm, materjal oli külmunud.

Lubjakivikillustik – asub sügavusel 29...30 cm, paksusega 16...25 cm ning materjal oli külmunud. Puuraukudes nr 2, 4 ja 5 oli kihi alumine osa visuaalsel vaatlusel veeküllastunud.

Geotekstiil – eraldab erinevaid tee mulde ja konstruktsiooni kihte. Puurimisega tuvastati kangas kuni kolmel erineval sügavusel: lubjakivikillustiku alusena ning liivade ja kruusade eraldajana.

Mölline liiv (mulde ülakihi materjal nn külmakerkelistes kohtades) – paikneb puuraukudes nr 1...3 sügavusel 55...70 cm, paksusega 35...50 cm. Materjal on pruuni värvi ning selged külmumismärgid olid näha kuni 70 cm sügavuseni. Laboris teimiti 3 proovi, mis sisaldasid kruusa 1...3%, liiva 75...84%, peenosiseid 15,1...23,6% ning saviosakesi 1,7...2,9%. Vastavalt standardile EVS 901-20:2013 Osa 20 on see materjal suure peenosise sisalduse tõttu ($\geq 8\%$) mittefiltreeriv. Siiski tehti kontrolliks materjalist ka filtratsioonikatsed, mille tulemusena saadi kihi filtratsioonimooduliks 0,3...0,4 m/ööp. Materjali veesisaldus oli 14,0...14,6%. Kihi ISO järgseks nimetuseks on siSa ning see kuulub A pinnasegruppi. Puuraugu nr 2 kõrvale rajatud surfist (Š2) võetud proovide laboriteimide andmetel on materjali veesisalduseks 15,4...17,6% ja filtratsioonimoodul 0,1...0,2 m/ööp.

Mölline liiv - esines puuraukudes ka loodusliku pinnasena. Kiht algas puuraukudes sügavusel 2,95...3,50 meetrit ning puurimisega on seda läbitud kuni 1,15 meetrit. Pinnas on halli värvi ning enne tee projekteerimist tehtud uuringu käigus võetud laboriproovide põhjal kuulub looduslik mölline liiv B pinnasegruppi.

Dreenmatt – paikneb sügavusel 1,00...1,07 meetrit tee pinnast. Dreenmatt koosneb vett mitteläbilaskvast rullmaterjalist, mille peale on paigaldatud geotekstiil.

Kruusane liiv – asetseb puuraukudes nr 3 ja 5 lubjakivikillustiku all sügavusel 45...55 cm, paksusega 15...55 cm ning selged külmumismärgid olid näha kuni 70 cm sügavuseni. Laboris teimiti puuraugust nr 5 võetud proov, mis sisaldas kruusa 21%, liiva 69%, peenosiseid 9,5% ning saviosakesi 1,9%. Kiht on nii terastikulise koostise põhjal mittefiltreeriv ning liiva veesisalduseks saadi 7,5%. Puuraukudes nr 1...4 asub materjali ka dreenmati all sügavusel 1,00...1,07 meetrit, paksusega 0,50...1,80 meetrit. Kiht on pruuni värvi, visuaalsel vaatlusel niiske ning sisaldab

veeriseid. Materjali ISO järgseks nimetuseks on grSa. Puuraugu nr 5 kõrvale rajatud surfist (Š5) võetud **dreenmati pealse proovi** laboriteimide andmetel on kihi veesisalduseks 5,5...8,6% ning filtratsioonimooduliks 0,1...0,5 m/ööp. **Dreenmati aluse kruusase liiva** veesisalduseks saadi 3,7% ning materjal on mittefiltreeriv.

Liivane kruus – paikneb puuraugus nr 4 lubjakivikillustiku ja niiskustõkke vahel sügavusel 52 cm, paksusega 35 cm, ning on pruuni värvi. Laboris teimiti 1 proov, mis sisaldab kruusa 61%, liiva 33%, peenosiseid 6,1% ning saviosakesi 1,2%. Materjal on terastikulise koostise järgi filtreeriv, filtratsioonikatse andis filtratsioonimooduliks 1,1 m/ööp ning materjali veesisaldus oli 1,9%. Kihi ISO järgseks nimetuseks on saGr. Materjal on esindatud kõikides puuraukudes ka sügavusel 1,55...2,85 meetrit, tusedusega 0,65...2,30 meetrit.

Pinnasevesi oli välitöö ajal (01.03.2023) puuraukudes nr 2...5 sügavusel 2,25...3,30 meetrit tee pinnast. Lisaks olid valdavalt veeküllastunud dreenmatil lasuvad liivpinnased ja kohati ka lubjakivikillustiku alumine osa.

Väljaraiete e surfide tegemisel avastati, et otse katte all olev tardkivikillustiku ülakiht on täielikult vett täis ja jäätunud, kuid oli sama paksusega (ca 6cm) nii tasases (külmakerkelises) piirkonnas kui ebatasases (mittekülmakerkelises) piirkonnas, mistõttu, arvestades kihi väikest paksust, ei nähtud sellel seost uuritavate ebatasasustega.



Joonis 21. Ca 6cm paksune veeküllastunud ja jäätunud tardkivikillustiku kiht katte all

Laboratoorsed katsed

Külmakergete põhjuste väljaselgitamiseks uuriti laboratoorsete katsetega põhjalikumalt külmumispiirkonda jäänud kihte ning tehti kindlaks, killustikukihid olid erinevates puuraukudes ja surfides nii visuaalselt kui laboratoorsete katsete põhjal sarnaste omadustega ega ole suure tõenäosusega ebaühtlaste külmakergete põhjusteks. Surfis 2 võeti materjali proov ka drenmati all olevast kihist, mille peenosise sisaldus oli ca 2x väiksem (9,2%) ja veesisaldus ca 4x väiksem (3,7%) drenmati peale jääva lihi vastavatest näitajatest. Seetõttu keskenduti laboratoorsete katsetega peamiselt killustiku ja drenmati vahele sügavuses 0,57..max 1,02m jääva täitematerjali kihi Tm105 ($k > 0,5$) omaduste võrdlemisele erinevates puuraukudes. Vastav koondtabel on allpool.

PA nr	Proovi kirjeldus	Peenosise* sisaldus, %	Savisisaldus*, %				Veesisaldus, %	Filtratsioonimoodu I K10*, m/ööp
		<0,063	<0,02	<0,006	<0,002			
1 PA	peenliiv	15,1	6,9	3,5	1,7	14,0	0,4	
2 PA	peenliiv	19,7	8,3	5,2	2,9	14,0*	0,3	
3 PA	peenliiv	23,6	9,2	5,4	2,7	14,6	<0,1	
4 PA	kruus	6,1	4,8	2,9	1,2	1,9	1,1	
5 PA	kruusane liiv	9,5	6,8	4,3	1,9	7,5	<0,1	
2 surf	peenliiv	19,0	-	-	-	16,5	0,1...0,2	
5 surf	kruusane liiv	4,9	-	-	-	7,1	0,1...0,5	

* Täpsemad selgitused katseprotokollides

Joonis 22. Täitematerjali Tm105 katsetulemused erinevates puuraukudes ja surfides

Laboratoorsete katsete tulemustest on üheselt näha, et drenkiht ei ole homogeenne – külmakerkeliste kohtade Tm105 kihi materjaliks **peenliiv** kus proovide **peenosise sisaldus** jääb vahemikku **15,1...23,6%** ning **veesisaldus** vahemikku **14...16,5%**. Mittekülmakerkeliste kohtade on TM105 kihi materjaliks aga **kruus või kruusane** liiv kus proovide peenosise sisaldus jääb vahemikku **4,9...9,5%** ning veesisaldus vahemikku **1,9...7,5%**.

Eeltoodust järeldub, et täitematerjalikiht **Tm105 on heterogeense koostisega, koosnedes vaheldumisi suurema ja väiksema peenosise sisaldusega materjalist**, mille tulemuseks on materjali erinev võime vett siduda ja kinni hoida ning mille tulemusena erineva veesisaldusega materjal paisub külmudes erinevalt, põhjustades erineva amplituudiga külmakerked, mille tulemuseks on ebatasasus.

Arvestades suurest peenosise sisaldusest tingitud kesisevõitu filtreerivaid omadusi, ei suuda vesi kuigi kiiresti konstruktsioonist külgsuunas lahkuda, samas

on vee allapoole liikumine takistatud drenmatiga. See võib olla ka põhjuseks, miks ebatasasused on kohati suuremad just drenmatiga lõikudel. Teisalt on suure peenosise sisaldusega materjal ka potentsiaalne „veekoguja“, „tõmmates“ juurde vett nt nõlvadelt.

Eeltoodu põhjal saab väita, et ebatasasused on põhjustatud **materjali heterogeensusest** kuna kasutatud materjalid omavad **erinevat** külmakerkepotentsiaali. Kõige paremini iseloomustab seda allolev kõrguste joonis – punased alad kollaste vahel ja kollased alad rohelistel vahel näitavad lokaalseid kõrgemaid kohti ehk suure peenosise tõttu suure kapillaartõusuga küllastunud ja ühtlasti halvastifiltreeruvaid ning seetõttu suhteliselt külmakerkelisemaid peenliiva koormaid ehk „pesad“ paremate omadustega materjalide vahel.



Joonis 23. Peenliivapesade esiletulek kõrgusliku kaardina

6. JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD

Uuringu tulemusena selgitati välja, millist teavet on võimalik saada talviste ebatasasuste mõõtmistest ning kas ja kuidas on võimalik saadud teavet tulevikus rakendada teedevõrgu seisundi ja püsivuse suurendamiseks ning ühiskonna kulude vähendamiseks efektiivsema teehoiuga.

Konkreetses uuringukohas oli 2020 rajatud täiesti uus ühtlase paksusega kihtidega konstruktsioon, korralikud kraavid. Uuringuala jäi keerulistesse geoloogilistesse tingimustesse, kus ehituse käigus eemaldati kogu turbakiht kuni 2 m ja asendati mineraalse täitematerjaliga. Täiendava meetmena paigutati ca 1m sügavusele kapillaartõusu takistav drenmatt. Oluline on märkida, et objekti kate on uuringute ajal väga heas seisukorras – kate on normaaltingimustes tasane, defektid puuduvad. Objekti nn. külmakerked on suhteliselt väikese amplituudiga ebatasasused, mis on ometi täpsete mõõteseadmetega hästi registreeritavad.

Uuringu peamiseks eesmärgideks oli selgitada välja, millist infot talvised ebatasasused teede kohta annavad ning anda hinnang konkreetse ehitusobjekti ebatasasuste tekkimise põhjustele.

Uuringu tulemusena selgus, et **ebatasasused olid tingitud ebaühtlastest külmakergetest, mille põhjustasid muldes sügavusvahemikus 0,55...1,0m (ehk mulde ülakihi, külmumistsoonis) paiknenud muldekihi Tm105 omadused** – külmakerked põhjustas muldes külmumistsooni jäänud suure peenosise sisalduse tõttu suure veesisaldusega (ja madala filtratsioonikoefitsiendiga) peenliivpinnas kuid ebatasasused olid põhjustatud asjaolust, et nimetatud peenliivpinnas vaheldus (kohati ca 10m sammuga) oluliselt väiksema peenosise sisalduse ja veesisaldusega kruuspinnasega, mille külmakeerge puudus või oli oluliselt väiksem.

Kõnealuse peenliivpinnase, st. külmakerkeliste kohtade Tm105 kihi materjaliks on **peenliiv** kus proovide **peenosise sisaldus** jääb vahemikku **15,1...23,6%** ning **veesisaldus** vahemikku **14...16,5%** ja **filtratsioon** alla **0,5 m/ööp**, mis **ei vasta projektis** antud kihile seatud **filtratsioonimooduli nõudele $k \geq 0,5 \text{ m/ööp}$** .

Kohtades, kus projekti **filtratsioonimooduli nõue $k \geq 0,5 \text{ m/ööp}$ oli täidetud**, külmakerke tunnused puudusid.

Lahenduste väljatöötamise seisukohalt on äärmiselt **oluline teha kindlaks põhjused**, mis on toonud kaasa ebasobiva (sh projekte mittevastava filtratsioonimooduliga materjali muldes. Allpool on toodud **mõned hüpoteesid, mis vajavad edaspidiste täiendavate uuringutega kinnitamist või ümberlükkamist**:

1. Muldes kasutatud materjali tolmsse osise osakaal võib olla suurenenud üle kriitilise piiri **tihendamise tulemusena**. Teadaolevalt kasutati antud kihis hea filtratsiooniga ($k > 10 \text{ m/ööp}$) materjali, mis viitab võimalusele, et selline materjal võib olla tavameetodil puudulikult tihenev. Kuigi ka filtratsioonkatse käigus tihendatakse materjal suure tihendusastmeni, erineb suletud vormis tihendamine oluliselt piiramata horisontaalse liikumisvõimalusega tihendusprotsessiga tee peal. Saavutamaks nõutud kandevõime väärtusi, võidi olla nõutud kandevõime saavutamiseks „sunnitud“ tihendama kihti viisil, mis viis materjali purunemiseni määral, mis viis tolmsisalduse mitmekordistumiseni. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, tuleb edasiste uuringutega üldiselt selgitada, kuidas erinevate karjäärade materjalid tihenevad, millised kandevõime väärtused saavutatakse ning kas ja mil määral selle käigus peenosise sisalduse ja filtratsiooni väärtused suurenevad.
2. Muldes kasutatud materjali tolmsse osise osakaal võib olla suurenenud üle kriitilise piiri **materjali purunemisel külmumis-sulamistsüklite käigus**. Uuringud näitasid, et muldes on piisaval hulgal vett, mis märgavad materjali ja mis külmumis-sulamistsüklite (ja koormuse) mõjul võivad viia vähemkülmakindlate materjaliosakeste purunemiseni ja tolmsse e. peenosise tekkeni. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, on oluline hinnata erinevate karjäärade materjalide külmakindlust – st. purunevust külmumis-sulamistsüklite käigus. Uuringu peamine eesmärk oli kontrollida, kas ja millist teavet talviste ebatasasuste mõõtmise annab ning kas ja milliseid seoseid saab luua teiste mõõtmistega ning millist praktilist kasu need mõõtmised annavad ehk kuidas külmakerkelisi piirkondi ebatasasuste kaudu efektiivselt tuvastada ning kuidas jõuda külmakergete poolt tingitud ebatasasuste täpsete põhjusteni.
3. Muldes kasutatud materjali tolmsse osise osakaal võib olla suurenenud üle kriitilise piiri ülemistes kihtides kasutatud või ehitamise või eksploatatsiooni

käigus tekkinud **ülemistes kihtides oleva peenosise kandumisel muldekihti**. Muldekiht eristas ülakihtidest geotekstiil kuid on võimalik, et tolmsed osakesed kandusid muldekiht läbi geotekstiili. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, tuleb järgnevate uuringutega teha kindlaks kas ja millised geotekstiilid toimivad/ei toimi peenosise kandumise tõkestajana ja/või selgitada kuidas tagada, et ülemistes kihtides kasutatavate materjalide peenosise osakaal jääks (ka ehitamise ja eksploatatsiooni tulemusena) piiridesse, mis ei võimaldaks nende kandumist muldesse.

4. Muldes kasutatud materjali tolmses osises osakaal võib olla üle kriitilise piiri põhjusel, et vaatamata rakendatud kvaliteedi tagamise meetmetele ja tellija kontrollidele, on võimalik, et **muldesse tarniti karjäärast projekte mittevastav materjal**. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, on oluline hinnata põhjalikult kogu kvaliteedi tagamise süsteemi ülesehitust ning tuvastada selle kitsaskohad, sh. tootja vastutus, ehitaja vastutus, järelevalve ja tellija roll süsteemis, sh. proovivõttude korraldus, sh. A- ja B-proovide käsitlemine, materjalide tarnete jälgitavus ja kaetus korrektsete saatelehtede ja vastavusdeklaratsioonidega jms.

Arvestades vee olulisust ja mõju külmakergete ja ebatasasuste tekkel, on oluline uurida ka vee sattumise võimalusi muldesse. Juhul kui erinevate meetmetega õnnestub märkimisväärselt vähendada vee sattumist muldesse, võimaldab see oluliselt vähendada külmakergete intensiivsust ja kate talviseid ebatasasusi ning sellest tulenevaid negatiivseid mõjusid tee elueale. Allpool on toodud **mõned hüpoteesid, mis vajavad edaspidiste täiendavate uuringutega kinnitamist või ümberlükkamist**:

1. Vesi satub muldesse ehitamise ajal – optimaalsel määral tihendamise ajal kuid sademete tõttu võib muldekiht pärast ehitamist veeküllastuda. Isegi drenmati kasutamisel on võimalik, et kate rajamisel on muldekiht veeküllastunud ja see ei jõua enne külmasid muldest välja imbuda. Uuring näitas, et külmakerked esinesid juba esimesel talvel pärast kate vastuvõtmist. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, on oluline järgnevate uuringutega selgitada, milliste

meetmetega saab vältida mulde veeküllastumist esimese ehitusjärgse talve eel.

2. Märkimisväärne kogus vett võib **sattuda muldesse läbi katte**. Üldlevinud arusaama järgi satub vesi läbi katte muldesse kattepragude kaudu. Käesoleval juhul on tegemist uue tiheda asfaltbetooniga ACsurf, mis ometi omab teatavat poorsust ning on võimalik, et vesi surutakse sõidukite rehvide mõjul läbi pooride kate alla ja sealt edasi muldesse. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, on oluline järgnevate uuringutega selgitada, kui palju vett (sh soolvett) sõltuvalt asfaldi omadustest – nt. asfaldi tüübist ja tihedusest läbi katte liigub. Selline teadmine võib olla vajalik, et hinnata konstruktsiooni veereziimi tervikuna ning sellise vee mõju katte all olevatele kihtidele.
3. Vesi võib sattuda muldesse **läbi kindlustamata peenra ja nõlvade**. Katte peenrad ja nõlvad võivad olla nii kattelt ülevoolava kui otse sadava vee peamised kandjad muldesse. Juhul kui edasise uuringutega selgitatakse hüpoteesi paikapidavus, on oluline järgnevate uuringutega selgitada, millised peenra ja nõlva lahendused millisel määral vett läbi lasevad ning millised kasutusel olevad tüüplahendused tagavad vee juhtimise kraavidesse või drenidesse (nt. pikidreenid) ja millised suunavad vee suuremal määral muldesse.
4. Vesi võib soolsuse tõttu sattuda muldesse läbi peenarde ajal, mil nõlvad on külmunud, mistõttu vesi jääb muldes „lõksu“ ega saa liikuda muldest välja. Juhul kui edasistes uuringutes leiab kinnitust, et mulde veega küllastumise põhjuseks on nõlvade külmumine, millega lõigatakse talvekuudel ära vee muldest väljumise võimalus nõlvade kaudu, on üheks leevendavaks abinõuks võib olla katte serva piirkond pikidreenide rajamine vahetult drenmati alla (läbi drenmati) koos väljaviikudega nõlvale drenmati alt. Seejuures tuleb veenduda, et väljaviigud ei jääks allapoole kõrgeimat veetaset kraavis. Pikidreenide rajamine tuleb töö korralikult projekteerida ning teostus dokumenteerida ja uuringuga toetada.
5. Vesi võib sattuda muldesse piki drenmatti juhul kui **drenmati kalle ei ole piisav**. On võimalik, et mulde järelvajumise ja pehmete aluspinnaste lihete tulemusena on drenmati 3% väljapoole rajatud kalle kadunud või muutunud vastassuunaliseks ning tekkinud osaline kauss, mis aitab kaasa peenardele ja nõlvadele sattunud vee toomisele mulde keskossa.

6. Vesi võib teoreetiliselt sattuda mulde ülakihti ka alumistest muldekihtidest kui seal peaks loodulikust pinnase aluspõhjapõhjakaallete tõttu tõusma kõrgusele, mil see surutakse läbi drenmati. Konkreetsetes uuringukohas eeldaks see piirkonna ulatuslikku üleujutamist, mille tunnuseid käesolevas uuringus ei tuvastatud.

Muud järeldused ja ettepanekud:

1. Uuring tõi välja, et talvine tasasuse mõõtmine võimaldab tuvastada uutel katetel kohad, kus konstruktsioonis esinevad ja eristuvad külmakerked.
2. Uuring kinnitas, et kaasaegsete pinnamudelite tasandus- ja võrdlusmeetoditega on võimalik efektiivselt tuvastada ja lokaliseerida erinevate punktipilvede pealt ka küllalt väikse amplituudiga (1-2cm) külmakerkeid, kasutades andmetena sobivaid, piisava täpsusega punktipilvi.
3. Täitedokumentatsiooni kontrollimisel selgus, et mulde materjaliks drenmati peales kihis oli projektis ette nähtud Tm105 filtratsioonimooduliga $k \geq 0,5\text{m/ööp}$, võetud proovides vastas ettenähtule ca 20% proovidest. Uuringupiirkonda jäänud ca 8000m³ TM105-kihi materjalist ehituse ajal võetud 2 proovi näitasid filtratsioonimooduli väärtusi $k > 10\text{m/ööp}$, ehk nende põhjal olid eelnimetatud nõuded täidetud.
4. Geoloogilised puurimised ja surfid koos laboratoorsete katsetustega näitasid, et killustiku ja drenmati vahel paiknev täitematerjalikiht Tm105 on heterogeense koostisega, koosnedes vaheldumisi mittefiltreerivast ja filtreerivast materjalist, mille tulemuseks on materjali erinev võime vett siduda ja kinni hoida. Selle tulemusena erineva veesisaldusega materjal paisub külmudes erinevalt, põhjustades erineva amplituudiga külmakerked, mille tulemuseks ongi ebatasasus.
5. Väljaraiete e surfide tegemisel avastati, et otse katte all olev tardsivikillustiku ülakiht on täielikult vett täis ja jäätunud, kuid oli sama paksusega (ca 6cm) nii tasases (külmakerkelises) piirkonnas kui ebatasases (mittekülmakerkelises) piirkonnas, mistõttu, arvestades kihi väikest paksust, ei nähtud sellel seost uuritavate ebatasasustega.

Uuring näitas seega, et **talvise tasasuse mõõtmise kaudu on võimalik tuvastada uute katetega teekonstruktsioonide külmakerkelisust** ning

täpsemate uuringute käigus on võimalik tuvastada külmakerke täpsed asukohad ning põhjused.

Nende põhjal saab omakorda **teha järeldusi sobivate ja mitesobivate lahenduste osas ning täpsustada nõudeid ja kvaliteedi tagamise mehhanisme**. Ettepanekute esimene osa on seotud talviste ebatasasuste mõõtmise kui meetodi kasutamisevõimaluse kirjeldamine, teine osa aga keskendub sellele, kuidas tagada mullete parem külmakindlus (külmakerkekindlus), st kuidas tagada, et muldes oleks projektikohane materjal.

Ettepanekud talvise ebatasasuste mõõtmismetoodika rakendamiseks

Võib arvata, et meetod töötab kõige paremini just uutel katetel - üldiselt tasasel kattel eristuvad suhteliselt väikesed ebatasasused paremini – käesolevas töös valitud kohas oli talvise tasasuse IRI näitaja ca 3x suvisest referentstasasuse näitajast kõrgem. Hinnanguliselt sobib meetod hästi just katetele nominaalse tasasusega kuni 1,0 m/km.

Talvise tasasuse mõõtmise suurimaks väljakutseks on ajaakna valik. Enamasti saavutatakse maksimaalne külmakerge märtsiks-aprilliks, mil üldjuhul valitsevad ka mõõtmisteks sobivaimad ilmaolud. Teisalt ei ole mingit garantiid, et see iga aasta nii on, mistõttu vältimaks olukorda, kus kõik või osad mõõtmised võivad jääda üldse tegemata, tuleks kompromissina teha talvised mõõtmised sobivate ilmadega veebruari teises pooles-märtsi alguses või veel parem – taastada mulde temperatuuriandurite võrgustik ja viia mõõtmised läbi kui külmumissügavus >0,5m. Lisaks võimaldavad temperatuuriandurid erinevate aastate mõõtmisi paremini omavahel võrrelda.

Meetod on ainulaadne mitmel põhjusel:

1. Võimaldab mulde probleeme tuvastada praktiliselt **kohe pärast ehitamist**, ehituse garantiiajal, enne defektide tekkimist. Senised meetodid lähtusid juba tekkinud defektidest ja neile ennetavalt tähelepanu pöörata ning lahendusi ei olnud võimalik. Tegelike defektide tekkimiseni kulub üldjuhul mitu aastat ning pahatihti saavutavad 6-8 aastat pärast ehitust taseme, mis nõuavad kogu katte kulukat remonti.
2. Meetod on sisuliselt pidevmeetod, mis suudab tuua muldeprobleemidega lõigud välja efektiivsemalt.

3. Meetod on kiire ja mittepurustav. Tasasuse mõõtmine ei kahjusta katet ja tasasuse mõõtmised on laialt levinud ning kasutatavad teede seisundi suvisel hindamisel mistõttu selle rakendamine talvetingimustes on suhteliselt lihtsalt juurutatav.

Eeltoodu põhjal soovitame käivitada pilootprojekt, mille raames:

1. Rakendada talvise ebatasasuse mõõtmist ühekordse projektina kõigil viimasel 4-5 aastal rajatud uutel katetel ning edaspidi kõigil uutel katetel (tasasus alla 1,0 mm/m)
2. Tuvastada lõigud, kus talvine tasasus ületab suvist baastaset 1,5x/2x/2,5x
3. Koostada pingerida eraldi uusehitiste, reki ja taastusremondilõikude kohta
4. Uusehitistel teha probleemsetes kohtades maaradariga sügisesed „veeküllastunud“ kohtade tuvastamised
5. Rekonstrueerimisobjektidel teha külmakergete ajal (soovitavalt temperatuuriandurite põhjal) probleemsemates kohtades lidariga kõrgusmõõdistused ja lokaliseerida külmakerkelised kohad
6. Taastusremondiobjektidel hinnata täiendavate uuringute vajadust eraldi
7. Kõikidel uutel katetel monitoorida katte tasasuse ja defektide arengut tavapärase võrgumõõtmiste baasil kogu garantiiaja vältel, võib oletada, et külmakerkeliste lõikude defektsus areneb kiiremini
8. Uurida täpsemalt täpselt tuvastatud külmakerkeliste kohtade ja kandevõime vahelisi seoseid, tehes kandevõimemõõtmised eelnevat kirjeldatud meetoditega tuvastatud külmakerkelistes ja võrdluseks mittekülmakerkelistes kohtades, võimalusel kevadiste külmakergete taandumise perioodil kui kattes on eeldatavalt piisavalt vett.

7. KOKKUVÕTE

Teekatte ebatasasused mõjutavad sõidukite kulumist ja kulusid ning käitumist teel ja sõidukite poolt teekatte ebatasasustest tingitud dünaamika omakorda põhjustab sõitjatele ebamugavust ning täiendavaid koormusi tee kattele ja tarindile ja mõjutab läbi selle tee eluiga. Külmakergetest tingitud teekatte ebatasasused mõjutavad teekonstruktsiooni enim kevadperioodil, mil külmakerked on maksimaalsed ning teekonstruktsiooni kandevõime veeküllastunud kihtide tõttu minimaalne ning tuua kaasa tee eluea vähenemise ning kulud ühiskonnale.

Uuringu tulemusena selgitati näite varal välja, millist potentsiaali sisaldavad talviste ebatasasuste mõõtmised ning milliste meetoditega ja kuidas on võimalik jõuda oluliste ja kasulike tulemusteni.

Talvised tasasuse mõõtmised näitasid, et see osutus uuel hea tasasusega kattel heaks vahendiks, tuvastamaks külmakerkelisi kohti. Eeldatavalt annab see täiesti uue, soodsa ja mittepurustava meetodi rajatud teede mullete kvaliteedi hindamiseks edaspidi ning lahenduste leidmiseks tee eluea tagamiseks.

Meetod toimib mitme-etapilisena, kus tasasuse mõõtmiste alusel saab määratleda probleemseid teelõigud, külmakergete kohtade esmase kaardistamise saab ühtlase paksusega kihtide korral viia läbi maaradariga ning külmakergete täpsema kaardistamise muudel juhtudel teha lidariga.

Meetodi plussiks on, et saab kasutada koheselt pärast uue katte valmimist väga tasase katte korral (hinnanguliselt valdavalt tasemel $IRI < 1,0$), mis on ühtlasi ka meetodi miinuseks – meetodi ei saa kasutada suhteliselt ebatasaste katete korral, st kui kate on juba muutunud ebatasaseks, nt. kattele tekkinud defektide tõttu pole meetod tõenäoliselt enam efektiivselt rakendatav.

Uutel ja rekonstrueeritud teedel aitab talvise tasasuse mõõtmisel baseeruv teede hindamise meetod hinnata mulde ehitustöö kvaliteeti (ühtlust), taastusremondil on meetod efektiivne viis kindlaks teha tulevast mulde remondivajadust kuid eeldusel, et mulle on ühtlase või ühtlaselt muutuva paksusega.

Uuritud objekti talvised ebatasasused olid tingitud muldematerjali ebaühtlusest.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et meetodil on edaspidi kasutamiseks suur potentsiaal kui selle võimalusi tuleb õppida kasutama suurema hulga erinevate objektide najal. Uuringus esitati ettepanekud meetodi rakendamiseks.

8. KASUTATUD KIRJANDUS

1. Vikipeedia