

Margus Vaino

**PESTUD PAEKIVISÕELMETE
KATSETAMINE TTK
TEEDELABORIS**

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond

Teedehitus eriala

Tallinn 2014

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	3
1. UURINGU VAJADUS.....	5
2. KATSESEADE.....	7
3. KATSE ÜLESEHITUS	11
3.1. Projektne olukord	11
3.2. Konstruktsiooni ehitus.....	12
4. KATSE KÄIK.....	20
4.1. Ratta töötamise ajal vaatluse käigus saadud informatsioon	21
4.2. Anduritelt saadud andmete töötlemine	23
4.3. Konstruktsiooni lammutamine	27
5. JÄRELDUSED	33
5.1. Paeliiv ja selle segu kvartslüivaga.....	33
5.2. Teised konstruktsioonis olnud materjalid.....	35
KOKKUVÕTE.....	36
SUMMARY	38
VIIDATUD ALLIKATE LOETELU.....	40
Lisa 1. Laboris tehtud skits pingesurveandurite paiknemise kohta muldkeha ülemises kihis.....	41
Lisa 2. Laboris tehtud skits pingesurve- ja vajumisandurite paiknemise kohta drenikihi peal	42

SISSEJUHATUS

Alates 2010. aastast on Tallinna Tehnikakõrgkoolil teede laboratoorium, kus viiakse läbi katseid, milles uuritakse erinevaid teekonstruktsioone. Sisuliselt on katseseadme ülesanne anda teavet kohalike teedehitus materjalide kohta. Kuidas need erinevates koormus, niiskus ja temperatuuri tingimustes võivad käituda. Peamine tähelepanu on suunatud kõigile neile materjalidele, mida võib leida Eesti maapõuest, aga võrdlusmaterjali saamiseks võib kasutada ka mitte kohalikke. Laboritöodes on võimalik kaasa lüüa neil tudengitel, kellele see võimalus huvi pakub. Neile, kes soovivad koolipingis omandatud teoreetilistele teadmistele saada juurde ka huvitavaid praktilisi kogemusi ja teadmisi laboritöös. Labori teeb tudengite jaoks atraktiivsemaks see, et taoline katseseade on ainukene kogu regioonis ja neid, kellel on võimalus sellega lähemalt tutvuda, on vaid vähesed. Laboriga on käinud tutvumas väga mitmed delegatsioonid Euroopa riikidest, mis näitab, et tegu on märkimisväärse saavutusega ja mujal maailmas tuntakse huvi siin tehtud uuringute kohta.

Seni on katseseadmes tehtud uuringuid, mis on puudutanud killustikke, aherainet, kompleksstabiliseeritud katendi kihte. Kõigi nende uuringute käigus on tehtud huvitavaid ja asjalikke järeldusi, mis on toonud täiendavat teavet ja muutusi teedehituses, kus vastavaid materjale kasutatakse. Käesoleva uuringu eesmärk on süveneda paekivikillustiku tootmisel ülejääva materjali - paesõelmetega seotud probleemidesse, küsimustesse. Hetkel liigitatakse seda Eestis kui kaevanduslik jääkmaterjal, mis on väga julge ja suhteliselt jäik seisukoht. Arvestades Eesti suhteliselt kesist maavaradega varustatust, siis tuleks iga materjal, mis maapõuest kaevandatakse maksimaalselt ära kasutada. Paesõelmed on üks neist probleemsetest materjalidest, millele ei suudeta Eestis leida piisavalt rakendust. Olukord on tekkinud vähesest teabest paesõelmete kui ehitusmaterjali kohta. Tallinna Tehnikakõrgkooli teede laboratooriumis võetakse vaatluse alla küsimused, mis on tekkinud aastakümnete käigus paesõelmeid teekonstruktsioonis kasutades. Peamised neist on paesõelmete pikaajaline vastupidamine ja külmakerkeoht. Katses kasutati pestud paesõelmeid ehk paeliiva ja paeliiva segusid Männiku karjäärist pärit kvartslivaga. Sooviti näha missugune efekt on segatud materjalidel, kas kvartslivaga segamine võib mõjutada kuidagi paeliiva ning kuidas. Osades katsetes kasutati võimalust külmutada konstruktsioon, et selgitada välja

missugust mõju võib see avaldada tulemustele ja neid võrrelda katsetega, kus külmutamist ei toimunud.

Uuringu käigus tutvustatakse üksikasjalikult katseseadme ehitust ja selle tööpõhimõtteid, kirjeldatakse katsekonstruktsioonide ehitamist ja lammutamist. Kõnealuseid kirjeldusi illustreerivad rohked fotod, mille tegemine on laboritööde üks osa, sest lisaks olukorra kirjeldamisele on neil oluline osa katsetulemuste analüüsimisel. Enamus andmed, mis aitavad luua seoseid ja teha järeldusi, saadakse konstruktsiooni paigaldatud anduritelt. Tarindis on erinevat informatsiooni koguvaid andmeid ja nende paigaldamine käib süstemaatiliselt ja täpselt, et hiljem oleks võimalik neilt saadud andmeid eristada ja võrrelda. Paesõelmete käitumise uurimiseks tehti viis katset, mis eeldas rohket tööd. Ehitamist ja lammutamist oli katsete käigus palju ja informatsiooni kogunes pidevalt. Informatsiooni töötlemiseks kasutati andmetöötlusprogramme, kust edasi hakati tulemusi võrdlema, et jõuaks uuringut puudutavate järeldusteni.

1. UURINGU VAJADUS

Eesti on väikene riik, olgu seda siis inimeste arvu, majanduslike ressursside või maavarade poolest. Selleks, et targalt enda maal toimetada tuleb olemas olevate võimalustega ja vahenditega targalt ning heaperemehelikult ringi käia. Eesti geoloogiline rikkus pole väga suur, aga samas kõik hädavajalik on olemas ja isegi natuke rohkem. Suur osa Eestis vajaminevast ehitusmaterjalist saadakse just maapõuest, seda siis teedehituse ja betooni tootmise seisukohast. Peamised materjalid mida ehitustegevuseks kaevandatakse on liiv, kruus ja paekivi. Paekivist toodetakse killustik, mis on teedehituses peamine aluste ehitusmaterjal ja samuti asfaldi tootmise üks komponente. Paekillustiku tootmisel jääb meeletus koguses üle materjali, mida nimetatakse paesõelmeteks. See on materjal, mida on kasutatud teedehituse aastakümneid, aga viimasel ajal üha vähem. Põhjendus sellele võiks olla järjest karmimaks muutuvad nõuded teedehituses, mille tulemusena on paesõelmed jäänud ehitusmaterjalina tagaplaanile. Ehitustegevuse käigus on tekkinud väga palju küsimusi seoses paesõelmetega. Antud uuringu eesmärk oli otsida vastuseid neile küsimustele ja pakkuda välja lahendusi, kus ja kuidas võiks paesõelmeid teedehitus kasutada.

Teatakse, et paesõelmed on materjal, mis on väga külmakerkeohtlik, seda just omaduse pärast imada endasse pinnases olevat niiskust. Olukord on põhjustatud suhteliselt suurest peenosiste sisaldusest. Kuidas ja kas oleks võimalik selle probleemiga võidelda? Kas piisab ainult sellest kui paesõelmetest kiht ehitatakse võimalikult muldkeha alumisse ossa või võib seda kasutada ka üleval pool?

Probleem, mis tekib alati päevakorda on paesõelmete vastupidavus, kas need on dünaamilisele koormusele vastupidavad ja kui pika aja möödudes need purunevad ehk pikaajaline vastupidavus. Kas on kuidagi võimalik kaitsta paesõelmeid purunemast konstruktsioonis ja pikendada nende eluiga?

Eestis leiduv paekivi jaguneb keemiliste ja mineraloogiliste erinevuste poolest lubjakiviks ja dolomiidiks. Mõlemat kasutatakse teedehituse. Aluspõhja geoloogilisest eripärast lähtuvalt jääb lubjakivi levikuala rohkem Põhja-Eestisse ja dolomiidi varud Kesk- ja Lääne-Eestisse.

Kõigile neile küsimustele vastuste otsimine ja leidmine annaks tunduvalt rohkem teavet, kuidas ja kus paesõelmeid oleks tark kasutada. See võimaldaks karjäärade esindajatel toimetada maavaradega ratsionaalsemalt, sest praegune olukord seda ei kinnita. Enamikus karjäärides seisavad paesõelmete hiiglaslikud varud. Mõned materjalide tootjad suudavad leida neile turgu, seda siis kohalike põllumeeste, trassiehitajate ja mõningate muude väljundite näol. Kahjuks see kogus mis hetkel suudetakse realiseerida on kordades väiksem kui tegelikult vaja oleks.

Uuringu käigus kogutud informatsioon ja järeldused oleks ehitajale ja projekteerijale abimaterjal, mis aitaks välja pakkuda paesõelmete kasutusvõimalusi ja mõistlikke lahendusi ehituses. Kõnealuse materjali kasutamist võiks kaaluda nii teede, platside kui ka hoonete alla rajatavas konstruktsioonis.

2. KATSESEADE

2010. aastal valmis Tallinna Tehnikakõrgkoolil teekonstruktsioonide laboratoorium, mille eesmärk on uurida Eestis juba kasutatavaid teekonstruktsioone ja pakkuda välja uusi lahendusi. Katsete käigus selgitatakse välja vaadeldavate konstruktsioonide vastupidavus erinevates kliimatilistes ja niiskus ning koormus tingimustes, esitatakse tasuvusanalüüsid. Analüüsitakse kohalike tee-ehitusmaterjalide vastupidavust, alternatiivsete tee-ehitusmaterjalide (aheraine, paesõelmed, paeliiv) kasutamisevõimalusi ja vastupidavust ning geosünteedide mõju erinevates konstruktiivsetes lahendustes.

Katseseade koosneb:

1. metallkast (Foto 1), mille mõõtmed on 3,3 m (laius), 3,3 m (sügavus), 2,3 m (kõrgus), mis koosneb monteeritavatest moodulitest;
2. üle kasti on ehitatud jõuraam, mis on kinnitatud põranda külge;
3. katseseadme valmides oli jõuraami külge kinnitatud dünaamiline koormusplaat (Foto 2), mida juhiti hüdrostsüsteemiga;
4. alates 2013. aastast koormatakse konstruktsiooni liikuva rattaga, veoautorehvi mõõtmetega 285/70 R19,5 (Foto 3), mida samuti juhivad hüdrostsüsteem;



Foto 1 ja 2. Metallkast ja dünaamiline koormusplaat [1]



Foto 3. Konstruktsiooni koormav ratas [1]

Katseseadme ringi ehitamise vajadus tekkis uuringu käigus, kus oli vaja määrata, milline kolmest Killustikust katendikihtide ehitamise juhendis toodud killustikaluste tüüpidest on pikaajaliselt konstruktsioonis töötades vastupidavam. [2]

Arutledes Eesti Maanteeametiga tuldi järeldusele, et dünaamilise koormusplaadi kasutamine ei võimalda tõenäoliselt koormata konstruktsiooni nii, nagu killustikud realsel teel toimima peaksid. Seda enam, et eesmärk oli võrrelda kolme killustikufraktsiooni omavahel, seetõttu oleks parim, kui neid võrreldaks täpselt samades tingimustes ja samaaegselt. Saamaks reaalsemat pilti killustike toimivusest otsustati ehitada katseseadme peale liikuv ratas, mis oleks ühendatud mootoriga ja mis ise kiirendaks ning pidurdaks. [2]

Katseseadme ringi ehitamine polnud sugugi mitte kerge, sest kavandamisel pidi arvestama olemasolevate võimalustega – katseseadme suurus, laboratooriumi suurus, jõuraami paigutus ja ehitus.

Eesmärk TTK katseseadme modifitseerimisel oli luua võimalikult reaalilähedased tingimused, kui võimalik. Seetõttu valiti katseseadme peale suurim võimalik veoautorehv, mis sinna mahtus. Tegemist on veokitreileri paarisratta ühe rehvi mõõtmetega 285/70 R19,5, mille maksimaalne lubatav koormus on 3,5 t ja rehvirõhk 0,8 Mpa. Normtelje kaaluks Eestis on 10 t, millest paarisrattale (või „supersingle“ üksikrehvile) langeb 5 t ja järelikult ühele rehville 2,5 t. Teoreetiliselt oleks saanud kasutada ka väiksemaid rehve ja väiksemaid koormusi ning siis taandada olukord läbi kontaktjalje pindala ja erisurve „päris mõõtmetele“, kuid see võib tekitada küsitavusi ja moonutada saadavaid tulemusi. Seetõttu otsustati kasutada võimalikult ligilähedast koormust, kuid tehes seega kompromiss ratta liikumiskiiruses ja läbitava vahemaa pikkuses. Mida väiksem ratas ja koormus katseseadmele peale sõitma panna, seda suuremat kiirust ja laiemat ala on võimalik kasutada seoses tekkiva inertsiga ja ratta füüsiliste parameetritega. [2]

Ratta paigutamisel katseseadme peale oli sooviks, et ratas hakkaks puhkeasendis toetuma kasti servadele, mitte ehitatud konstruktsioonile. Seoses jõuraami paigutusega ja ratta mõõtmetega ei olnud see kahjuks võimalik. Maksimaalkoormuse 3,5 t puhul läbib ratas konstantse kiirusega kasti keskel 1,5 m pikkuse ala misjärel pidurdab ja alustab uut kiirendust vastassuunas. Liikumiskiiruse ja vahemaa probleemi oleks saanud lahendada kasutades väiksemat ratast, kuid sel juhul oleks maksimaalseks koormuseks saanud kasutada kuni 1,5 t, ka 2 t taluv ratas oleks olnud liiga suur. Kasutades topeltratta asemel vaid ühte ratast tingis samuti ruumi puudus ja kasti mõõtmed. [2]

Lisaks sellele, et katseseadmes saab koormata teekonstruktsiooni, saab seal ka tekitada väga erinevaid kliimatilisi tingimusi. Kasti paigaldatud külmutusseade (Foto 4) võimaldab tekitada olukorra, kus saadakse konstruktsioon külmutada kogu selle ulatuses, kui on vajadus. Kõnealuse uuringu käigus näitas kõige sügavamale (150 cm katte pinnast) paigaldatud temperatuuriandur kõrghetkel $-1,8^{\circ}\text{C}$, aga konstruktsiooni kohal, seal kus ratas liigub, oli kuni -20°C . Võib arvata, et tegelikult oli konstruktsioon isegi sügavamalt külmunud. Selleks, et külmutamine oleks efektiivsem on katsekast igast küljest isoleeritud külma hoidva materjaliga (Foto 5).

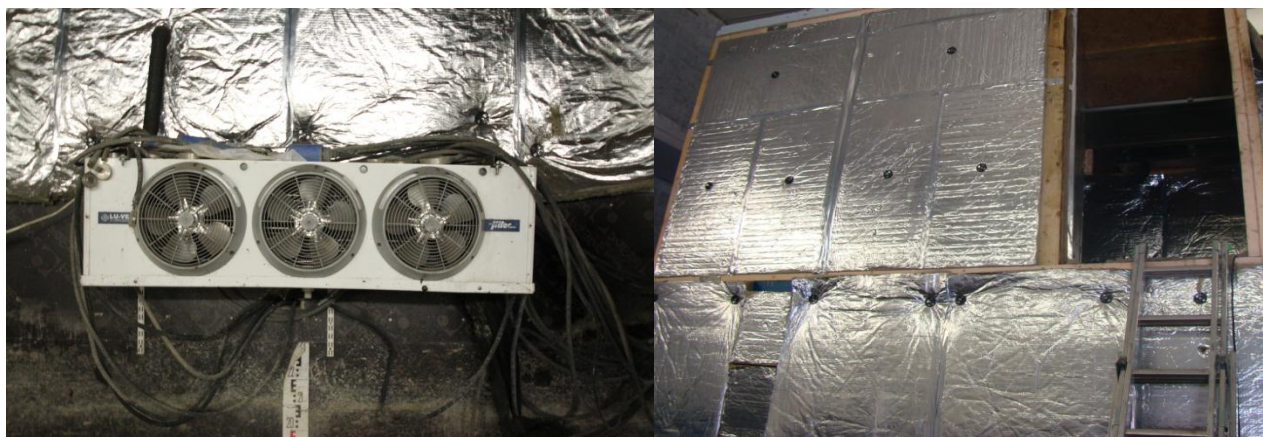


Foto 4 ja 5. Külmutusseade ja isoleeritud katsekast [1]

Antud katses toimus konstruktsiooni sulamine iseseisvalt ehk ilma abivahendeid kasutamata, aga võimalik on kasutada selleks ettenähtud lampe, mis on kinnitatud spetsiaalse raami külge, mis kiirendavad sulamist.

Ratas liigub ja koormab hüdroüsteemi jõul, mida juhib hüdrojaam (Foto 6). Selle käivitamine ja seiskamine; kiiruse, koormuse ja pidurdusaja reguleerimine toimub juhtpuldi (Foto 7) abil, mis asub labori kabinetis.



Foto 6. Hüdrojaam [1]



Foto 7. Juhtimispult [1]

3. KATSE ÜLESEHITUS

3.1. Projektne olukord

Katse käigus oli eesmärk saada teavet selle kohta, kuidas paesõelmed käituvad pikaajaliselt teekonstruktsioonis ning selgitada välja kõige optimaalsem segu paesõelmetest ja kvartslüivast. Katses kasutati Vao karjäärist toodud pestud paevisõelmeid, mida nimetatakse paelüivaks ja Männiku karjäärist toodud kvartslüiva. Katsekast oli jaotatud osadeks (sektoriteks), kus asusid erinevad paesõelmetest ja kvartslüivast segud.

Killustikaluse alla ehk drenikihi peale oli kogu ristlõike ulatuses paigaldatud geotekstiil. Lisaks kasutati geovõrku, mis ei katnud kogu kihti, vaid oli paigaldatud poolele tarindi osale risti ratta liikumisteega. Eesmärk oli uurida ja võrrelda, kui palju mõjutab geovõrgu kasutamine konstruktsioonis tekkivaid pingeid ja materjali stabiilsust. Selgituseks geosünteedide paigutusest lisan foto 8.



Foto 8. Geosünteedide paigutus tarindis [1]

Tabel 1

Katsekonstruktsioonide kirjeldused

Jrk. nr.	Kihi paksus cm	Materjalid									
		Konstruktsioon 1		Konstruktsioon 2		Konstruktsioon 3		Konstruktsioon 4		Konstruktsioon 5	
1	7	Mustsegu		Mustsegu		Mustsegu		Mustsegu		Mustsegu	
2	25	Ridakillustik 4/32		Ridakillustik 4/32		15 cm MUK; 10 cm ridakillustik 4/32		Ridakillustik 4/32		Ridakillustik 4/32	
3	-	Geotekstiil		Geotekstiil		Geotekstiil		Geotekstiil		Geotekstiil	
	-							Geovõrk		Geovõrk	
4	20	Dreenkiht		Dreenkiht		Dreenkiht		Dreenkiht		Dreenkiht	
		70/30	50/50	70/30	50/50	70/30	50/50	70/30	50/50	70/30	50/50
5	50	Muldkeha		Muldkeha		Muldkeha		Muldkeha		Muldkeha	
		Paeliiv	50/50	Paeliiv	50/50	Paeliiv	50/50	Paeliiv	50/50	Paeliiv	50/50
6	> 100	Paeliiv	Kvartslüiv	Paeliiv	Kvartslüiv	Paeliiv	Kvartslüiv	Paeliiv	Kvartslüiv	Paeliiv	Kvartslüiv

Märkused. 1. Paeliiv ehk pestud paekivisõelmed.

2. Tähis 70/30 on materjali segu, kus 70% on paeliiva ja 30% kvartslüiva.

3. Tähis 50/50 on materjali segu, kus 50% on paeliiva ja 50% kvartslüiva.

4. MUK – mustkillustik ehk bituumeniga segatud killustik.

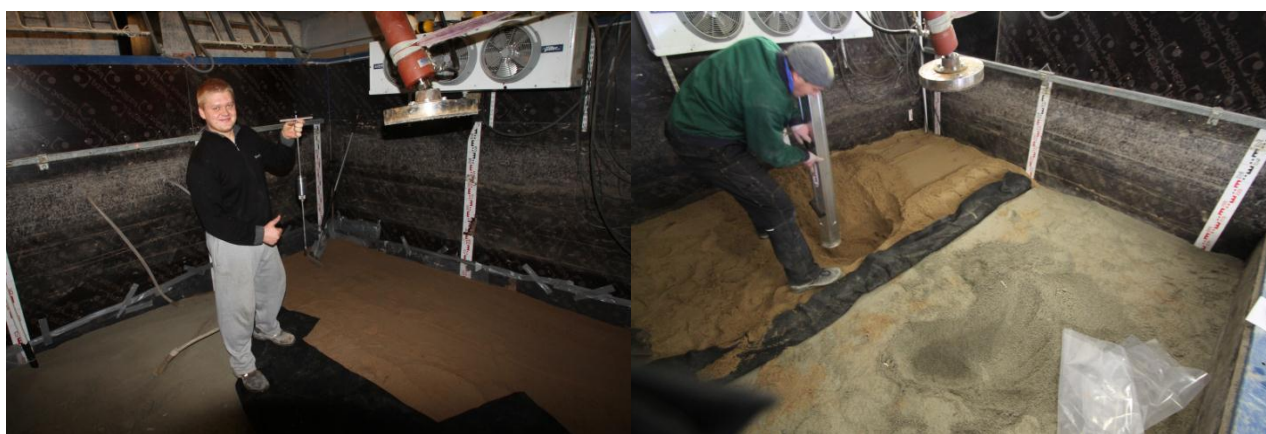
3.2. Konstruktsiooni ehitus

Osa muldkeha konstruktsioonist oli tegelikult eelmise katse käigus valmis ehitatud. Seda ei lammutatud, vaid säilitati, sest see andis võimaluse vaadelda paesõelmete käitumist pikaajalisemalt kui seda antud katse käigus oleks olnud võimalik teha. Muldkeha ülemist osa ehitati ringi, vastavalt käesoleva teadustöö eesmärkidele. Katsekasti põhi oli isoleeritud hüdroisolatsioonikihiga (tugev kile ja veekindel teip), et selle põhja saaks lasta 0,5 m vett (Foto 9). Eesmärk oli vaadelda, kuidas pestud paesõelmed käituvad veest küllastunud olukorras.

Muldkeha ise oli ehitatud järgmiselt. Katsekast oli jagatud kahte sektorisse piki kujutletavat rattajälge. Ühelt poolt oli pestud paekivisõelmed (paeliiv) ja teiselt poolt täiesti tavaline kvartslüiv, selle kihi paksus oli umbes 1 meeter. Järgmine osa muldkehast oli ehitatud selliselt, et kvartslüivale oli sisse segatud 50% paeliiva, aga teises sektsioonis olev materjal jäi samaks. Sektorid oli eraldatud geotekstiiliga, mis pidi vältima materjalide omavahelist segunemist (Foto 9). Muldkeha tihendamine toimus 25 cm kihtide kaupa ja selleks kasutati 255 kg vibroplaati Ammann (Foto 10). Tiheduse kontrollimiseks kasutati penetromeetrit (ainult liiva puhul), Inspector III ja paekivisõelmetes lõikerõngametoodikat (Fotod 11 ja 12).



Fotod 9 ja 10. Materjalide paigaldamine, eraldamine ning hüdroisolatsioonikiht; vibroplaadiga tihendamine [1]



Fotod 11 ja 12. Penetromeetriga ja Inspector III tiheduse määramine [1]

Muldkeha pealmisse kihti paigaldati 4 pingeandurit, mille ülesanne oli fikseerida ratta poolt tekitatud pingete tekkimine, muutumine. Andurid asusid ca 50 cm sügavusel katte pinnast, olenevalt katte paksusest. Nende paigaldamine on aeganõudev töö, sest igal anduril on oma väljamõõdetud koht, kus see asub. Paigaldamise käigus tuleb juhtmed asetada nii, et need järgnevate ülesannete täitmisel vigastada ei saaks. Järgnevad fotod illustreerivad kirjeldatud.



Fotod 13 ja 14. Pingeandurite paigaldamine [1]



Foto 15. Pingeandurite paigutus [1]

Järgmine konstruktsiooni osa oli drenikiht, mille paksus oli 20 cm. Dreenkiht oli jagatud samuti kaheks sektoriks ühel pool rattajälge asus materjalisegu 70/30, kus 70% oli paeliiva ja 30% kvartsiiva. Teises osas oli segu 50/50, kus paeliiva ja kvartsiiva oli ühe palju. Tihendamiseks kasutati, sarnaselt muldkehaga, 255 kg vibroplaati. Kihipaksus võimaldas selle tihendamist ühe korraga. Dreenkihi ülemisse kihti paigaldati üheksa pingeandurit ja kaks vajumiandurit, mis asusid ca 30 cm sügavusel katte pinnast. (Foto 16). Pingeandurite paigaldamisest anti ülevaade eelmise kihi ehitamise juures. Vajumiandurite paigaldamine on sarnane, aga vastavalt anduri ehitusele ja tööpõhimõttele on sellele vaja kaevata suurem ja sügavam süvis. Hoolikas tuleb olla augu tagasitäitmisel, et anduri ümber minev materjal saaks korralikult tihendatud ja töö käigus ei tohi kindlasti andurit vigastada (Foto 17).



Fotod 16 ja 17. Andurite paigutus drenkihis; vajumianduri paigaldamine [1]

Eelnevalt kirjeldatud tarindit võiks nimetada põhikonstruktsiooniks, sest seal erinevate katsete käigus kihipaksuseid ja materjale ei muudetud. Dreenkihile paigaldati veel geotekstiil.

Aluste ehitamisel tehti mõningaid muudatusi. Kahes katses paigaldati killustikaluse alla geovõrk. Sooviti tekitada olukord, kus osa tarindist töötab geovõrguga ja teine osa mitte. Eesmärk oli võrrelda pingete erinevusi ja saada informatsiooni geovõrgu efektiivsusest. Geosünteedide paigutus on näha alapeatükis 3.1. fotol 8.

Killustikaluse paksus oli 25 cm ja see ehitati Vao karjäärast toodud ridakillustikust fraktsiooniga 4/32. Tihendamiseks kasutati 255 kg vibroplaati (Foto 18), millega töötades pidi olema tähelepanelik, sest laboritingimustes on väga lihtne paekivikillustikku üle tihendada. See tähendab, et tihendamise käigus on killustik purunenud ja enam pole võimalik saavutada nõuetele vastavat kandevõimet. Sellise situatsiooni vältimiseks on vaja tihendamise käigus jooksvalt kontrollida killustikaluse tihedust. Selleks kasutati Inspector III. Ehituse käigus looditi väga hoolikalt killustikaluse pinda (Foto 19), et sinna oleks hiljem mugav mustsegust kiht paigaldada. Killustikalusesse paigaldati vajumiandur, mis asus keset konstruktsiooni (Foto 20).



Fotod 18 ja 19. Killustikaluse tihendamine; loodimine [1]



Foto 20. Vajumiandur killustikaluses [1]

Uuringu käigus otsustati ehitada selline konstruktsioon, kus alus koosneb 10 cm paksusest killustikalusest (ehitamisel kasutati sama materjali ja ehituspõhimõtteid, nagu eelnevates katseteski) ja 15 cm paksusest mustkillustiksegust. Mustkillustik ehk MUK on bituumeniga segatud killustik. Segu projekteerimise, valmistamise ja paigaldamisega tegeles OÜ Üle.

Retsept:

- fraktsiooniga 16/32 lubjakivikillustik;
- 5% bituumenemulsioon BE 60 M (Nynas);
- 3% bituumenit.

Segu valmistamine toimus kohapeal segumasinas, kus killustiku kuumutamiseks kasutati gaasipõletit. Killustik kuumutati 120° C, temperatuuri kontrolliti pidevalt vastava seadmega.

Paigaldamine käis samal põhimõttel, nagu kõigi teistegi materjalidega. Tihendati 255 kg vibroplaadiga. Järgnevad fotod kirjeldavad MUK-i valmistamist ja paigaldamist.



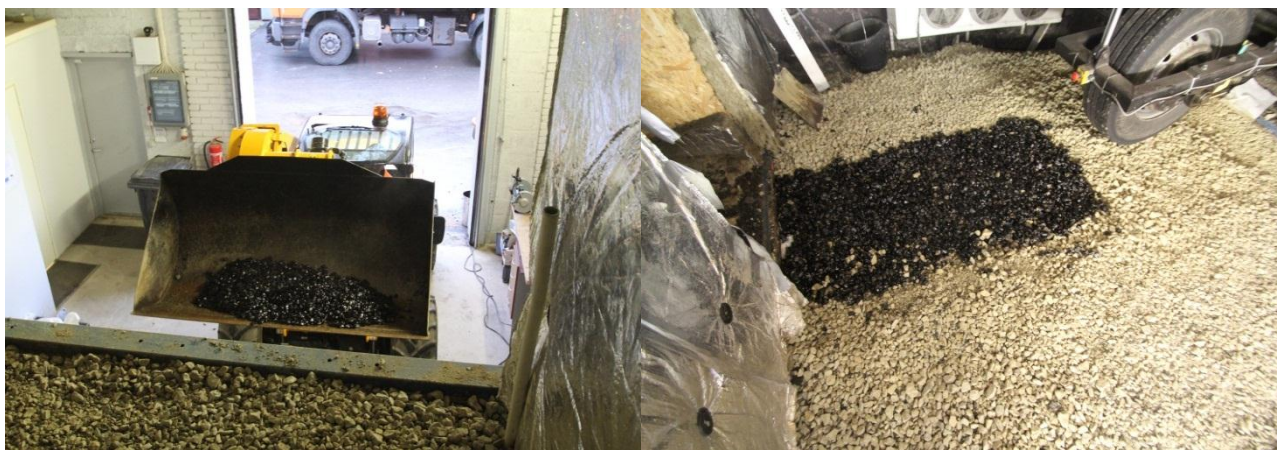
Fotod 21 ja 22. Gaasipõleti ja killustiku kuumutamine [1]



Fotod 23 ja 24. Bituumeni lisamine [1]



Fotod 25 ja 26. MUK-i valmistamine [1]



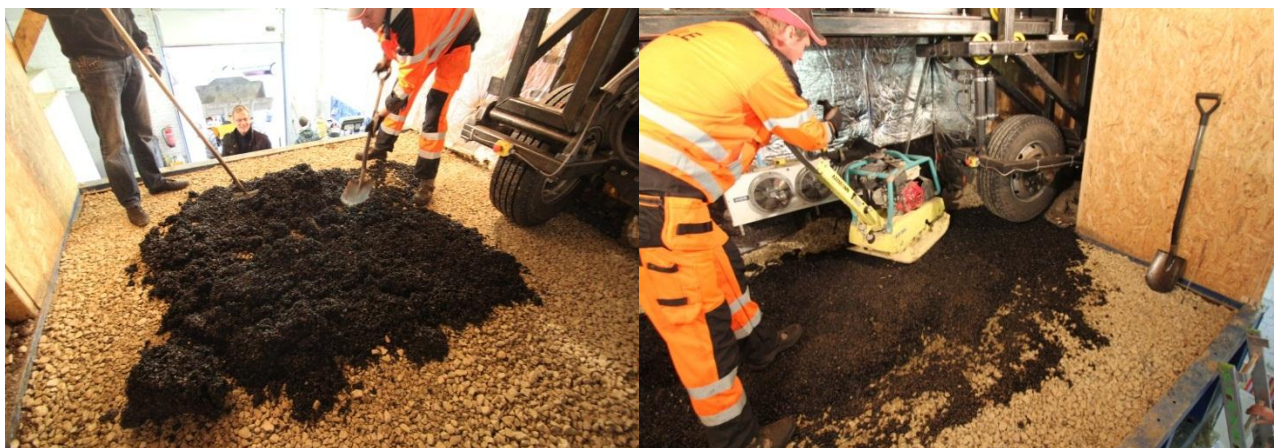
Fotod 27 ja 28. MUK-i paigaldamine [1]

Kõigil katsetel kasutati kattematerjalina mustsegu, mille samuti valmistas OÜ Üle. Neil oli samuti huvi uurida erinevaid variante, kuidas mustsegu võiks projekteerida, et missugune oleks kõige optimaalsem seguresept. Kasutades teekonstruktsioonide katseseadet said nad teavet materjali käitumise kohta koormuse all.

Mustsegu valmistati sarnaselt mustkillustikuga. Mustsegu valmistamiseks kasutati freespuru, bituumenemulsiooni BE 60 M (Nynas) ja tsementi. Katseseadme kõrval segumasinas tehti materjal valmis ja seejärel paigaldati alusele (Foto 29 ja 30). Laiali ajamine ja loodimine toimus käsitsi (rehadega, labidatega) ja tihendamiseks kasutati 255 kg vibroplaati (Foto 31 ja 32). Töötegija kontrollis katte kandevõimet vastava seadmega (Foto 33).



Fotod 29 ja 30. Mustsegu valmistamine [1]



Fotod 31 ja 32. Mustsegu paigaldamine; tihendamine [1]

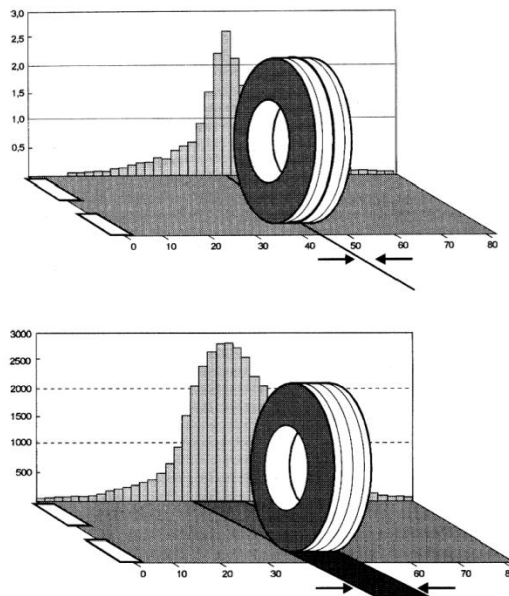


Foto 33. Mustsegust katte kandevõime mõõtmine [1]

4. KATSE KÄIK

Katsetustega alustati 2013. aasta sügisel ja lõpetati 2014. aasta kevadel. Uuringu käigus viidi teekonstruktsioonide laboratooriumis läbi viis katset, mille eesmärk oli saada informatsiooni paesõelmete käitumisest konstruktsioonis. Uuringu käigus pidi korduvalt tegelema konstruktsiooni lammutamise ja ehitamisega. Lammutustööde käigus saadi väga palju informatsiooni materjalide käitumise kohta tarindis, mida paralleelselt kasutati tulemuste analüüsimisel ja järelduste tegemisel. Teine osa andmetest saadi pinge-, vajumi-, temperatuuri- ja niiskusanduritelt. Kolmas osa analüüsimiseks vajaminevast informatsioonist saadi pideva vaatluse käigus, mis toimus kogu uuringu vältel. Tehti märkmeid ja mõõtmisi ratta töötamise ajal. Katsetuste käigus mingeid suuremaid probleeme katseseadmel ei esinenud, mis oleks kuidagi võinud mõjutada katsete käiku. Paesõelmetest muldkeha alumisel osal, mille paksus oli umbes 1 m, oli katse lõpetades ratas teinud 1,32 mln tsüklit.

Katse käigus läbib koormusratas kasti tsentrit iga 2,2 sek järel ehk konstruktsioonile ei jää palju aega taastumiseks enne järgmist koormust. Ratta ülesõidul oli võimalik fikseerida visuaalselt kattepinna liikumine/elastne vajumine. Lisaks sõitis ratas pidevalt ühes jäljes ja mitte mingisugust kõrvalekallet külgedele ei olnud (alljärgnev joonis 1 kujutab reaalsel teel olevat vaheldumist). Võttes aluseks selle ja teised mõjutajad nagu vähene taastusaeg, suur lisatud vee hulk saame, et koormus võis olla normaalsest kuni 10x suurem ehk reaalseks koormuseks võiks lugeda ca 13 milj. koormustsüklit.



Joonis 1. Reaalselt teel olev vaheldumine [1]

4.1. Ratta töötamise ajal vaatluse käigus saadud informatsioon

Pärast konstruktsiooni valmimist käivitati ratas. Kuna katseseade polnud mõned kuud töötanud, siis alustati rahulikult. Alguses lasti rattal korraga töötada ainult mõned sajad tsüklid. Raskus, millega ratas katse käigus pidi tarindit koormama oli 2500 kg. See peaks imiteerima veoauto poolt tekitatavat koormust, sest Eestis kasutatakse katendi arvutuses normtelge 10 t, mis on veoauto telg, aga kuna katseseadmepool on nelja rattalisest teljest ainult üks, siis on koormus jagatud samuti neljaks ehk ühele rattale normteljel langeb 2,5 t.

Alguses toimus kõigi katsete puhul kattes järeltihenemine, kas see oli tingitud ebapiisavast tihendamisest, mis on üsna tõenäoline või tekkis see olukord mingil muul põhjusel, selle kohta puudub informatsioon. Väljendus see roopa üsna kiires arenemises ehk enamuses katsetes, välja arvatud külmutamiskatses, tekkis esimese 100 tsükliga 1 cm roobas, hiljem roopa areng aeglustus. Hilisem pingeandurite analüüs annab samuti kinnitust sellele, sest pinged alumistes kihtides ei andnud põhjust arvata, et muutus oleks toimunud aluses. Pidevalt käidi roopa arengut mõõdmas, et fikseerida iga muutus, mis katse käigus aset leidis ning hiljem kasutati neid andmeid analüüsimisel (Fotod 34 ja 35). Mõõtetulemused kirjutati välipäevikusse ja hiljem sisestati need arvutisse.



Fotod 34 ja 35. Roopa sügavuse mõõtmine [1].

Järgmine märgatav muutus roopa arengus toimus siis, kui katet hakati kastma. Kogused mis korraga konstruktsioonile lisati polnud suured, umbes 7 - 20 l, aga näiteks esimeses katses kasutati niisutamiseks kokku 131 liitrit vett. Järgmises alapunktis räägitakse lähemalt selle mõjust alumistes kihtides. Kastmine toimus kastekannuga. Pärast seda kui katte oli piisavalt märg muutus ka roopa süvenemine. Maksimum roopa sügavus, mis lasti tekkida oli 4,5 cm, kui tulemused olid üle selle, siis võis ratta töö olla häiritud. Nimelt ratas jäi oma liikumistee otstes seisma (ei liikunud ilma kõrvalise abita paigast), sest seal oli sügavus alati suurem kui mujal. Olukord oli põhjustatud ratta pidurdamisest ja taas liikuma hakkamisest. Pidurdamine ja kiirendamine koormab teekonstruktsiooni veel rohkem kui lihtsalt seal peal sõitmine. Näiteks suure koormuse all olevad ristmikud või bussitaskud illustreerivad antud väidet kõige paremini. Deformatsioon võib tekkida erinevates konstruktiivsetes kihtides, aga põhjus mis neid tekitab on sama. Katseseadme seisma jäämise vältimiseks täideti probleemsed kohad olemasoleva materjaliga, mis saadi roopa serva lõhkumisest. Pärast seda lõpetati roopa süvenemise mõõtmine, sest taustolukorda oli muudetud ja uusi tulemusi oli raske eelnevatega võrrelda.

Külmutamiskatse käigus oli roopa arenemine kattel tunduvalt aeglasem kui neis katsetes, kus ei külmutatud. Sama tähelepanek tehti nii kuiva kui ka märja konstruktsiooni puhul (Tabel 2). Selleks, et koormus saaks konstruktsiooni mõjutada hakati tekitama külmumis- ja sulamistsükleid.

Tabel 2

Roopa areng kuiva ja märja konstruktsiooni korral				
Katse	Tsüklid	Roopa sügavus cm	Tsüklid	Roopa sügavus cm
1	10000 (kuivalt)	1,83	20000 (märjalt)	1,42
2		3,1		1,7
3		3,5		-
4		0,22		0,57
5		0,62		0,79

Märkused. 1. Punases kirjas on külmutuskatses olnud roopa areng.

Kastmisel tekkis probleem, kus kattele valatud vesi külmus hetkega, sest temperatuuriandurid nii katsekastis kui ka tarindi ülemistes kihtides näitasid väga tugevaid külmakraade. Olukord lahenes iseseisvalt, sest ratta töötamisel eraldus väga palju soojust, mis sulatas tekkinud jää.

Ratta poolt läbitud tsüklite arv oli päevade lõikes väga erinev, mis oli tingitud katseseadme tööaja varieeruvusest. Seda põhjustas mõõtmiste tegemine ja konstruktsiooni vaatlemine, sest sel ajal peab ratas seisma. Katseseadet ei käivitatud ja seiskatud alati ühel ja samal ajal, kuid töö käigus selgus, et 24 tunniga järjest töötades jõuab see teha ca 31000 tsüklit.

4.2. Anduritelt saadud andmete töötlemine

Peamine informatsioon saadi katse käigus pingeandurite ja temperatuuri- ning niiskusandurite andmete analüüsimisel ja sidumisel ratta poolt läbitud tsüklitega. Konstruktsiooni sees oli kokku 13 pingeandurit, millest neli asusid paesõelmetest muldkeha pealmises kihis (ca 50 cm sügavusel katte pinnast) ja üheksa drenikihi ülemises kihis, kohe killustikaluse all (ca 30 cm sügavusel katte pinnast). Pingeandurite paigalduse kirjeldus oli alapeatükis 3.2. Konstruktsiooni ehitus. Temperatuuri- ja niiskusandureid oli viis ja üks lisaandur, mis näitas ainult temperatuuri. Paigaldatud oli kolm vajumiandurit, millest kaks olid drenikihis ja üks killustikaluses. Laboris visandati skits, kus kujutati kõigi vajumi- ja pingeandurite asukohad (Lisa 1 ja 2).

Temperatuuriandurite paigutus ja tähistus:

1. PICO 1 – 65 cm sügavusel katte pinnast, paeliiva ja kvartslüiva segu vastavalt 70/30;
2. PICO uus – 65 cm sügavusel katte pinnast, paeliiva ja kvartslüiva segu 50/50;
3. PICO 2 – 100 cm sügavusel paesõelmetes;
4. PICO 3 – 150 cm sügavusel paesõelmetes;
5. PICO 4 – 150 cm sügavusel paesõelmetes;
6. Lisa andur – 25 cm sügavusel katte pinnast, killustikaluse alakihis.

Temperatuuri- ja niiskusandurite paigaldamise eesmärk oli fikseerida temperatuuri ja niiskussisalduse muutused konstruktsiooni erikihtides ja anda teavet, kas muutused mõjutavad kuidagi konstruktsiooni ja seal olevaid materjale (paesõelmeid).

Peamised tähelepanekud tehti siis, kui kasutati konstruktsiooni külmutamist. Alustades külmutamis-sulatamistsükklitega, mida oli kokku 21, toimus sulamisel külma liikumine soojemast kihist külmemasse, mitte vastupidi ehk madalamatesse kihtidesse (Tabel 3).

Tabel 3

Temperatuuri liikumine konstruktsioonis																		
	27.jaan		28.jaan				29.jaan		30.jaan		3.veebr		4.veebr		10.veebr		12.veebr	
	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%	C	%
Lisa andur	-11	-	-4,4	-	-3,7	-	-2,3	-	-5,6	-	-0,9	-	-2	-	0,4	-	1,9	-
PICO uus	-	-	-	6,2	-	6,2	-	6,3	-	6,4	-	6,6	-	6,6	-	6,7	-	7,1
PICO 1	-5,3	8	-5,1	8	-4,8	8,1	-3,9	8,1	-3,3	8,2	-3	8,3	-2,7	8,5	-2,4	8,7	-2,2	9,1
PICO 2	-2,8		-3	14,3	-3,1	14,3	-3,1	14,3	-3,4	14,2	-3,6	13,9	-3,7	13,7	-3,6	13,9	-3,7	13,8
PICO 3	0,3	39,4	0	39,5	-0,1	39,5	-0,2	39,6	-0,6	39,7	-1,1	39,6	-1,5	39,5	-1,8	39,7	-1,8	39,3
PICO 4	2,2	33,2	1,9	33,5	1,9	33,4	1,8	33,5	1,5	33,4	0,8	33,4	0,8	33,3	0,8	33,2	0,8	33,1

Külmutamiskatses seni kuni konstruktsioon oli ühtlaselt külmunud ei juhtunud midagi. Sama järeldus tehti ka eelmises alapeatükis, kus võrreldi roopa arengut. Peamised muutused toimusid siis, kui hakati katseseadmes külmutama ja sulatama vaheldumisi. Sulatamisel mingeid erivahendeid ei kasutatud, vaid mõned päevad või ööd olid sellised, kus külmutusseadet tööle ei pandud. Tänu erakordselt pehmele talvele, mis 2014. aasta jaanuaris ja veebruaris oli, toimis isegi selliselt korraldatud sulatamine, sest õhutemperatuurid olid peamiselt plussis. Katseseade, ratta liikumise käigus, eraldab väga palju soojust, mis aitab samuti sulamisele kaasa.

Anduritel kde 2, kde 4, kde 3 ja kde 5 toimus pingetes muutus just külmutamiskatse käigus. Täpsemalt toimus see pärast konstruktsiooni pikaajalist sulamist, kus enamus konstruktsioonist oli sulanud, ainult Pico 2 oli -1,6° C, see on pinganduritest veel pool meetrit sügavamal. Olukorra teeb oluliseks see, et teiste katsete käigus on pinged neil anduritel ühtlased madalad püsinud, aga pärast seda mõõtmist olid pinged tõusnud. Huvitav on veel see, et ühel pool rattajälge on pinged võrgu all suuremad kui ilma võrguta osal, aga teisel pool on olukord vastupidine. 50/50 paeliiva ja kvartsiiva segus oli geovõrgu all pinge tunduvalt suurem kui puhtas paeliivas. Geovõrguta katsel oli olukord vastupidi, aga pingete erinevus oli tunduvalt väiksem.

Teised andurid, mis samuti näitasid pingete muutumist ainult külmutamiskatses, olid kde 8 ja kde 12. Need andurid on paigutatud hoopis teistmoodi kui ülejäänud pingandurid. Tavaliselt paigutatakse need lapiti kihi sisse, aga need kaks on serva peal ehk risti. Pingete muutus toimus

hetkel kui terve konstruktsioon oli külmunud. Soojakraadide puhul vaheldusid negatiivsed pinged positiivsetega, aga külmunud tarindis olid pinged ühtlaselt positiivsed ja tunduvalt suuremad kui muidu. Nähti, et ilma võrguta olid pinged pisut suuremad kui võrguga. Antud olukorras võib pingete tõus olla seotud konstruktsiooni külmumise käigus tekkinud materjali paisumisega, mis surub andureid. Pärast sulamist taastub esialgne olukord, mitte küll täielikult, aga pinged vähenevad märgatavalt. Järgnevas tabelis 4 on esitatud kõigi eelpool nimetatud pingeandurite olukorrad külmutamiskatses.

Tabel 4

Pingeandurite olukord külmutamiskatses				
Andurid	Kuupäev	Tsüklite arv	Pinge (kpa)	Lisa
KDE 2	20.03.	456 458	209	Geovõrguga
KDE 3	20.03.	456 458	123	Geovõrguta
KDE 4	20.03.	456 458	119	Geovõrguga
KDE 5	20.03.	456 458	134	Geovõrguta
KDE 8	24.01.	4 675	80	Geovõrguga
KDE 12	24.01.	4 675	90	Geovõrguta

Tabelis esitatud andurid näitasid pingete muutusi ja kasvu peamiselt külmutamiskatses. Teiste katsete käigus olid näidud ühtlased ja pigem madalad kui kõrged. See annab kinnitust, et paesõelmed on väga temperatuuri tundlik materjal.

Põhjused, mis võisid tekitada pingete tõusu katseseadmes:

- liigniiskus konstruktsioonis, millele ei pea lubjakivikillustik vastu;
- pidev pikaajaline koormamine;
- koormuse muutumine;
- külmutamise käigus materjali paisumine.

Tabel 5

Pingeandurite analüüs läbi kõigi katsete

Katse	Andurid	Kuupäev	Tsüklite arv	Pinge (kpa)	Lisa	Põhjendus
1.	KDC 1	8.11.	166351	64		Katend liigniiske, mis tõttu toimus killustikaluse purunemine ja sellest tingituna ka pingete tõus dreenikihis.
	KDE 13	31.10.	82560	634		Katend liigniiske, mis tõttu toimus killustikaluse purunemine ja sellest tingituna ka pingete tõus dreenikihis.
	KDE 15	31.10.	82560	459		
	KDE 9	8.11.	166351	298		Pingete tõus on tingitud tarindi pidevast pikaajalisest koormamisest (30464).
2.	KDC 1	12.12.	105077	52		Katend liigniiske, mis tõttu toimus killustikaluse purunemine ja sellest tingituna ka pingete tõus dreenikihis.
	KDE 9	12.12.	105077	321		
	KDE 10	12.12.	105077	415		
	KDE 3	03.12.	45720	121		Pingete tõus on tingitud tarindi pidevast pikaajalisest koormamisest (23319).
	KDE 14	03.12.	45720	506		Pingete tõus on tingitud koormuse suurenemisest 1500 kg-lt 2500 kg-ni.
	KDE 3	27.11.	9839	119		
	KDE 9	27.11.	9839	270		
	KDE 13	27.11.	9839	422		
	KDE 14	27.11.	9839	414		
3.	KDE 2	20.03.	456458	209		Pingete tõus on tingitud tarindi pidevast pikaajalisest koormamisest 20.03. (31967) ja 14.03. (31508).
	KDE 3	20.03.	456458	123		
	KDE 4	20.03.	456458	119		
	KDE 5	20.03.	456458	134		
		14.03.	374744	134		
	KDE 8	24.01.	4675	80		Pingete tõus võib olla tingitud külmumise käigus materjali paisumisest.
	KDE 12	24.01.	4675	90		
4.	KDE 8	8.11.	166351	48	Geovõrgu(ga)	Pinged võrguga on suuremad ja jaotuvad ühtlasemalt, aga võrguta on väiksemad ja jaotuvad ebahühtlasemalt.
	KDE 12	8.11.	166351	39	Geovõrgu(ta)	
	KDE 2	3.12.	45720	103	Geovõrgu(ga)	Võrgu all olid maksimaalsed pinged väiksemad kui võrguta osas, aga kõik andurid näitasid läbi katse väga ühtlaseid tulemusi. <u>Ratas oli töötanud pikaajaliselt.</u>
	KDE 3	3.12.	45720	121	Geovõrgu(ta)	
	KDE 4	3.12.	45720	100	Geovõrgu(ga)	
	KDE 5	3.12.	45720	121	Geovõrgu(ta)	
5.	KDE 2	20.03.	456458	209	Geovõrgu(ga)	Sel kuupäeval oli pigete tõus märgatav. <u>Tingitud oli see pikaajalisest konstruktsiooni koormamisest.</u>
	KDE 3	20.03.	456458	123	Geovõrgu(ta)	
	KDE 4	20.03.	456458	119	Geovõrgu(ga)	
	KDE 5	20.03.	456458	134	Geovõrgu(ta)	
	KDE 8	20.03.	456458	56	Geovõrgu(ga)	Pinged võrgu all on väiksemad kui ilma võrguta osas.
	KDE 12	20.03.	456458	70	Geovõrgu(ta)	

4.3. Konstruksiooni lammutamine

Konstruksiooni lammutamiste käigus saadi veelgi informatsiooni, mis ühest küljest kinnitasid anduritelt saadud andmeid ja teisest küljest selgitasid neid. Tehti uusi avastusi, mis katseseadme töötamise käigus otseselt välja ei tulnud.

Selleks, et lammutamise käigus saada informatsiooni, tuleb olla väga hoolikas. Töö käib kihtide kaupa, sarnaselt ehitamisele. Iga osa võetakse lahti eraldi, tegutsemine on üsna aeglane ja tuleb olla tähelepanelik, et erinevaid materjale väga segamini ei aeta. Mõningate kihtidega oli probleeme, sest need olid segunenud katsekäigus. Näiteks mustsegust katte alumine osa oli vajunud killustikalusesse, mis tegi üsna keeruliseks katte materjalis vajumi määramise, aga see polnud igas katses nii. Killustikalusest saadi mustsegu päris hästi kätte, kui tugeva harjaga rahulikult pühitati. Osades katsetes oli vajumine toimunud nii kattes kui ka killustikaluses, aga näiteks esimeses katses me kattes vajumist ei fikseerinud (Foto 36).



Foto 36. Lammutamisel vajumi mõõtmine mustsegust kattel [1]

Põhiline purunemine oli toimunud killustikaluses (Foto 37 ja 38). Killustik purunes kõigis katsetes ühtmoodi ja pingeadurite andmed kõrvale panna, siis võib väita, et peamine põhjus oli liigniiskuse.



Foto 37 ja 38. Vajumi mõõtmine killustikaluses [1]

Esimeses katses oli killustikaluses vajumine 6 cm. Seda oli päris hea mõõta, sest drenikihi peale oli paigaldatud geotekstiil, mis ei võimaldanud killustikul paeliivaga seguneda. Pärast killustikaluse eemaldamist märgati, et paesõelmetest kihis polnud mingeid muutusi, vajumit ei fikseeritud. Kõigis järgnevatel katsetel oli olukord sarnane ehk killustik purunes ühtmoodi. Vajum jäi vahemikku 5 - 8 cm.

Mustkillustik (MUK) näitas tulemusi, mille põhjal võib väita, et see pidas paremini vastu kui killustikalus, mis on tegelikult teada. Purunemine polnud nii suur ja see toimus pikema koormamise tulemusena. Seda võib selgitada sellega, et tsüklite arv, mis ratas vastaval konstruktsioonil tegi oli päris suur – 518 tuh. Kattematerjal mustkillustiku peal hakkas pärast 59 tuh tsüklit roopast külgedele välja pressima, mida eelnevate katsete käigus polnud juhtunud ning külmutuskatse käigus oli sama olukord, aga pärast 65 tuh tsüklit.

Paesõelmetest kihil pärast esimest katset polnud mingeid muutusi märgata. Muutus tuli järgnevate katsete käigus. Pärast ratta poolt läbitud 793 tuh tsüklit oli paesõelmetest drenkihil vajum 14 mm, tulemus mõõdeti füüsiliselt kihi pealt (Foto 39 ja 40) ja seda kinnitasid konstruktsioonis olnud vajumiandurid.



Foto 39. Vajum paesõelmetest drenkihil [1]



Foto 40. Vajumi mõõtmine drenkihil [1]

Pärast mõõtmisi võeti välja kõik andurid ja hakati paesõelmetest osa lammutama. Lammutamise käigus võeti erinevatest kihtidest proovid, et need viia Geotehnika laborisse terastikulise koostise määramiseks. Sooviti näha, kas katsete käigus on paesõelmete ja paesõelmete kvartsiiva segu terastikuline koostis muutunud või mitte.

Järgnevalt esitatakse kõigi proovide võtmise kohad ristlõigete järgi. Kõik mõõtmised on toimunud drenkihi pealt ehk mustsegu ja killustikalus on eemaldatud. Proovid on võetud segudest 30/70 ja 50/50, kus vastavalt esimene protsent tähistab kvartsiiva hulka ja teine pestud paesõelmete (paeliiva) hulka segus. Sügavamal on võetud ainult paeliivast, mida pole kvartsiivaga segatud.

Proovide võtmise kohad (ristlõiked):

1. drenkihi pealt – kaks proovi 30/70 segust ja kaks proovi 50/50 segust;
2. drenkihi alt ehk 20 cm sügavuselt – kaks proovi 50/50 segust ja kaks proovi paeliivast;
3. 50 cm sügavuselt – kaks proovi 50/50 segust ja kaks proovi paeliivast;
4. 80 cm sügavuselt – paeliivast;
5. 120 cm sügavuselt – paeliivast;
6. 150 cm sügavuselt – paeliivast;
7. 180 cm sügavuselt – paeliivast;

8. 210 cm sügavuselt – paeliivast.

Neist samadest kihtidest ja materjalidest võeti proovid ka ehitamise ajal, et katsetamise lõppedes oleks andmeid mida võrrelda. Esimesed proovid viidi samuti terastikulise koostise määramisse Geotehnika laborisse. Proovide tulemused ja võrdlused on kirjas tabelis 6, kust tuleb välja, et paesõelmete segamine liivaga aitab kaitsta paesõelmeid purunemise eest.

Tabel 6

Terakoostiste võrdluse tabel

Koha nr	Asukoht	Nimetus	Sõela ava suurus (mm)												
			10	6,3	2	1	0,63	0,425	0,2	0,1	0,06	0,02	0,006	0,002	
1	30/70 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	99,9	99,9	80	62,4	51,2	34,9	11,4	4,8	2,9	2,1	1,2	0,6	
	30/70 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	99,8	98,9	81,6	62,9	47,2	28,8	7,6	3,8	3,6	2,2	1,3	0,6	
	30/70 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,8	99,7	84,7	68,2	53,1	32,8	9,1	4,6	3,4	2,4	1,2	0,3	
	30/70 segu, võrguga	kruusaga jämeliiv	99,9	99,5	76,5	58,2	38,1	23,4	8,9	5,3	3,9	2,9	1,6	1	
	50/50 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,8	99,8	85,2	68,6	54,4	34,2	9,3	5,1	4,6	2,3	1,3	0,4	
	50/50 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,8	99,8	80,2	63,2	47,4	31	12,6	7,1	4,8	3,5	3,1	0,9	
	50/50 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	100	99,1	83,7	68	55	35,6	9,9	4,9	2,8	2	1	0,5	
	50/50 segu, võrguta	kruusaga jämeliiv	99,7	99,2	79,8	62,7	43,3	24,6	7,6	4,7	4,6	2,7	1,6	0,5	
2	paeliiv, võrguga	kruusaga jämeliiv	100	100	77,6	55,1	44,6	32,9	17,3	8,2	4,2	3,2	1,6	0,8	
	paeliiv, võrguga	rohke kruusaga savikas jämeliiv	100	100	72,2	50	38,6	29,6	18,3	9,6	5,9	4,3	2,4	1,2	
	paeliiv, võrguta	rohke kruusaga jämeliiv	100	100	68,4	46,2	36,7	26,6	12,7	5,9	3,5	2,7	1,5	0,8	
			100	100	66,9	45,3	40	33,6	20	8,7	3,9	2,7	1,6	0,8	
	paeliiv, võrguta	rohke kruusaga savikas jämeliiv	100	99,9	71,8	50,8	38,8	28,7	15,4	7,9	5,6	3,9	2,1	1,1	
	50/50 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,6	99,5	84,2	68,1	59	42,6	16,1	7,4	3,4	2,4	1,4	0,4	
	50/50 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,9	99,9	81,8	64,8	46,1	27,3	8,1	4,7	2,8	2	1	0,3	
	50/50 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	99,7	99,5	81,5	63,8	49,4	30,8	8,7	4,3	2,8	2,1	1,1	0,4	
50/50 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	99,9	99,7	78,7	61,1	47	29	7,1	3,2	2,2	1,5	0,8	0,4		
3	50/50 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	100	99,9	76,2	56,9	44,5	27,9	7,8	3,6	1,9	1,5	0,8	0,3	
	50/50 segu, võrguta	kruusaga keskliiv	99,8	99,4	80,7	62,7	47,1	27,1	3,2	0,9	0,8	0,7	0,4	0,3	
	50/50 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,8	99,7	80,9	62,4	49,4	32,8	11,3	5,2	2,3	2	0,8	0,4	
	50/50 segu, võrguga	kruusaga keskliiv	99,7	99,3	82,5	65,6	52,6	33,3	7,5	2,6	1,5	1,2	0,6	0,5	

Märkused. 1. Koha nr – tähistab ristlõiget kust proovid võetud on (vt Proovide võtmise kohad).

2. 30/70 materjali segu, vastavalt 30% kvartsi liiva ja 70% paeliiva.

3. 50/50 materjali segu, vastavalt 50% kvartsi liiva ja 50% paeliiva.

4. Sinises kirjas varem võetud proov, punases kirjas lammutamisel võetud proov.

Lammutades nähti, et katsekasti põhjas oli sinna lastud vesi tõepoolest alles ehk paeliiv muldkeha alumises osas oli täiesti läbi vettinud olekus (Foto 41). Hüdroisolatsioon oli hästi enda ülesannet täitnud.



Foto 41. Vettinud olekus paeliiv muldkeha alumises osas [1]

5. JÄRELDUSED

Tallinna Tehnikakõrgkooli teekonstruktsioonide katseseadme kasutamisel uuringus jõuti mitmete huvitavate järeldusteni. Osad neist puudutasid muldkehas ja drenkihis olnud paeliiva ja selle erinevaid segusid kvartsliiivaga, mis oligi uuringu eesmärk. Teine osa järeldusi tehti teiste konstruktsioonis kasutatud materjalide käitumise kohta ja katseseadme töökorralduse kohta. Viimased järeldused aitavad tulevastes uuringutes ja katsetes kasutada katseseadet veel efektiivsemalt.

5.1. Paeliiv ja selle segu kvartsliiivaga

Katses kasutati pestud paesõelmeid ehk paeliiva ning selle segusid kvartsliiivaga, kus ühes segus oli 30% kvartsliiiva ja 70% paeliiva (30/70) ning teises segus oli mõlemaid materjale pooleks (50/50). Dreenkiht oli ehitatud selliselt, et piki rattaliikumiseljälge oli kiht jagatud kaheks, kus üks sektsioon oli ehitatud 30/70 segust ja teine 50/50 segust. Muldkeha ülemine osa paksusega 50 cm oli ehitatud samal põhimõttel, et ühel pool jälge oli paeliiv ja teisel pool 50/50 segu. Muldkeha alumine osa oli ehitatud paeliivast.

Pärast külmutamiskatse lõpetamist, kui konstruktsioon oli peaaegu üles sulanud, tõusid muldkeha ülemises kihis pinged märgatavalt võrreldes kõigi teiste katsetega. Ratas oli selleks hetkeks teinud üle 456 tuh tsükli. See olukord tekkis tänu konstruktsiooni sulamisele. Jääkristallide sulamise käigus olid need muutunud veeks, mis muutis paeliivast ja selle segust kihi pehmeks ja tänu sellele kadus kandevõime, mis põhjustas pingete tõusu. Mitte katsetingimustes peab pärast külmaperioodi lõppu arvestama asjaolusid, et neis kihtides kus on kasutatud paesõelmeid, võib tekkida kandevõime probleeme. Veest küllastunud olekus kaotab paesõelmetest kiht kandevõime.

Dreenkihti oli paigaldatud kaks pingeandurit, mis olid võrreldes ülejäänutega hoopis teistsuguses asendis ehk serva peal püsti. Põhimõtteliselt võib öelda, et need mõõtsid pingeid, mis liikusid konstruktsioonis horisontaalselt. Kõigi teiste katsete käigus ei tulnud nende andurite tulemustest midagi välja, aga külmutamiskatses näitasid need maksimaalseid pingeid ja seda siis, kui konstruktsioonis olid külmakraadid kõige tugevamad. Andurid olid materjalisegus 50/50. Pingete

tõusu võib selgitada materjalis oleva vee külmumisega. Eelnevate katsete käigus oli konstruktsioonile valatud piisavalt vett, mis imbus läbi katte ja aluse drenkihti. Niiskussisaldus drenkihis oli piisav, et külmudes hakkas materjal paisuma ja see põhjustaski pingete tõusu andurites. Siit järeldus, et kui kasutatakse paesõelmeid näiteks külmumispääst üleval pool ja seal on piisavalt niiskust, siis võib külmudes hakata materjal paisuma ja tekitada kattele külmakerkeid. Katseseadmes nende tekkimist ei täheldatud. Seda olukorda hinnates on täiesti põhjendatud paesõelmete kasutamise mittelubamine külmumispääst ülevalpool.

Selleks, et oleks võimalik hinnata paeliiva purunemist konstruktsioonis, võeti eri kihtidest erinevatel aegadel materjaliproovid. Esimesed proovid võeti enne külmutamiskatset ja viimased proovid konstruktsiooni lõpliku lammutamise käigus. Mõlematel proovidel lasti Geotehnika laboris määrata terastikuline koostis, et saaks võrrelda, kas on mingeid muutusi terakoostises toimunud. Võrreldes erinevaid tulemusi nähti, et puhas paeliiv oli purunenud isegi drenkihi all, aga kvartsliaivaga segatult oli selle terakoostis püsinud peaaegu muutumatu, seda isegi vahetult killustikaluse all. Paeliiva segamine kvartsliaivaga annab tulemust, sest kvartsliaiv kaitseb paeliiva terakeste purunemise eest koormuse all. See täidab tühimikud, mis jäävad suuremate terade vahele ja ei lase neil hakata liikuma ja hõõruda üksteise vastu, mis võib põhjustada tera purunemist, mis omakorda tõstab peenosiste sisaldust materjalis. Siinkohal toonitatakse, et materjalisegus peaks kasutama pestud paesõelmeid ehk paeliiva, et vältida peenosiste sattumist segusse, mis tekitab teisi probleeme.

Neis katsetes, kus kasutati geovõrku (Secugrid 30/30 Q) oli näha, et võrgu all olevad pingandurid näitasid väiksemaid pingeid kui need, mis polnud võrgu all. Võrgu paigaldamise mõte oli vaadata, kas on mingi erinevus konstruktsiooni kandevõimes või mitte. Geovõrgu ülesanne peaks olema armeerida katendi kihte ja katses nähti, et oli erinevus geosünteediga tarindi ja selle vahel, kus seda ei kasutatud. See tähendab, et paigaldatud geosünteed täitis oma ülesannet. Ainult ühes katses tekkis olukord, mis tekitas küsimusi.

Konstruktsioon oli peaaegu sulanud, viiest temperatuuriandurist üks näitas külmakraade ja see oli 100 cm sügavusel kattedest ehk ca 50 cm kõnealusest kihist allpool. Mõlemad andurid olid geovõrgu all ainult üks oli paigaldatud paeliiva ja teine 50/50 segusse. See andur, mis oli paeliiva ja kvartsliaiva segus näitas tunduvalt suuremaid pingeid kui see, mis oli puhtas paeliivas. Olukord võib olla selgitatav sellega, et neist kahest materjalist oli paeliiv suurema niiskussisaldusega, mis tingis konstruktsioonis paeliiva pisut aeglasema sulamise kui seda kvartsliaivaga segatult. Külmunult on kandevõime suurem ja seetõttu ka sellised tulemused pinganduritelt.

5.2. Teised konstruktsioonis olnud materjalid

Killustikalus ei pea vastu liigniiskusele (Foto 41), seda kinnitavad ka teised uuringud, mis on läbi viidud Tallinna Tehnikakõrgkooli teede laboratooriumis. Pärast pikaajalist konstruktsiooni kastmist kiireneb roopa areng kattel ja pinged killustikaluse all märgatavalt kasvavad.



Foto 41. Killustiku purunemine konstruktsioonis [1]

Olukorra tegi paremaks kui kasutati konstruktsioonis mustkillustikku (MUK). Antud juhul oli see lubjakivikillustik, mis on kuumutatud ja segatud bituumeniga. Bituumen tekitab ümber killustikutera kaitsekihi, mis aitab sellel vastu pidada konstruktsioonis olevale niiskusele ja tõstab paekivikillustiku eluiga. Katses nähti, et MUK purunes samuti, aga mitte nii kiiresti ja ulatuslikult kui tavaline killustik.

Eelnevate uuringute käigus polnud täheldatud, et pidev pikaajaline koormamine võib põhjustada konstruktsioonis pingete kasvu. Selles uuringus oli see paljudes olukordades pingete tõusu põhjuseks. Teedel juhtub täpselt sama asi, kui mingil põhjusel liiklusintensiivsus teel kasvab ja sellega pole projekteerimisel arvestatud, siis ei pruugi tee sellele koormusele vastu pidada. See tähendab, et edasipidi katseseadet kasutades tuleks tsükleid tekitada konstruktsioonil süstemaatilisemalt, et anduritelt saadav informatsioon oleks adekvaatsem ja paremini analüüsitavam.

KOKKUVÕTE

Teekonstruktsioonide katseseadme kasutamine käesolevas uuringus aitas selgitada ja põhjendada paesõelmetega seonduvaid probleeme. Katse käigus tehtud järeldused aitasid anda vastuseid küsimustele, mis on takistanud paesõelmete kasutamist teedehituses. Paesõelmed olid katsekonstruktsioonis pestud kujul ehk paeliivana, kus peenosid on materjalist eemaldatud. Pikaajalise vastupidamise kommenteerimine on katseoludes raske, kuigi tuli ikkagi välja, et tarindi sees olles paeliiv purunes. Muldkeha ülemises osas olnud paeliiv oli Geotehnika laboris tehtud terastikulise koostise määramise põhjal purunenud, mis tähendab, et pikaajaline vastupidamine paeliival on küsitav. Tunduvalt paremini pidas vastu paeliiva ja kvartslia segu, millest võeti samuti proovid ja tehti samad analüüsid, aga seal polnud purunemist praktiliselt olnudki. Mis kinnitab, et kvartslia segatult võiks paeliiva teekonstruktsioonis kasutada. Siin rõhutatakse paeliiv, sest sealt on peenosid välja pestud.

Külmutamiskatse käigus saadi jätkuvalt kinnitust sellele, et paeliiv on külmakartlik materjal, sest muldkeha ülemises osas hakkasid pinged muutuma suuremaks pärast sulamist. Enne külmutamiskatset ei näidanud need suuri pingeid. Lisaks kinnitasid andurid, mis olid 50/50 materjalisegust ehitatud drenkihis, pingete tõusu pärast konstruktsiooni täielikku külmumist. Tegu oli niiskust täis materjali paisumisega, mis tekitas pingeaandurites muutusi. Paeliiva kasutamine nii puhtalt kui ka kvartslia segatult on ohtlik külmumispiirist ülevalpool. See võib tekitada teedel külmakerkeid.

Katseseadme kasutamise käigus selgus, et pideva pikaajalise koormamise tõttu tõusid samuti konstruktsioonis pinged, mis tähendab, et katsetingimustes ei pea konstruktsioon sellisele koormusele vastu, vaid annab järgi. Siit tehti järeldus, et katseseadme kasutamisel on vaja läbi mõelda tsüklite tekitamine, seda oleks vaja teha läbimõeldumalt. Edaspidi ei tohiks tarindit nii pikalt järjest koormata, sest see võib tekitada eksitavaid järeldusi. Antud uuringu käigus saadi peale paesõelmeid puudutavat informatsiooni, ka taaskord õppida katseseadet veel paremini tundma ja kasutama selle võimalusi. Tulevastes katsetes saab kõik need küsimused ja kitsaskohad lahendatud,

mis selle katse käigus katseseadme kohta õhku jäid. Edaspidi saab andmeid ja vaatluses saadud järeldusi kiiremini ja efektiivsemalt analüüsida.

SUMMARY

The purpose of this investigation is to research about the use of mining residue in road construction. One of the main material in road construction in Estonia is limestone, what is used as primary goods to produce crushed stone. After getting crushed stone out of limestone, there is also side-product what is called limestone screenings. The amount of limestone screenings in quarries is remarkable and it is wise to find different possibilities of implementing it.

Currently are the limestone screenings considered as residue of crushed stone-producing process, but actually limestone screenings have been used widely in road construction earlier. Since the requirements of road projection and construction are getting more demanding, the limestone screenings are being forgotten as a potential road construction material.

The reason why current road constructors, road projectors and developers would not dare to use limestone screenings, is associated with characteristics of the material. It is known that the durability of limestone screenings is questionable. Firstly the investigation focuses on finding an answer to a question, how durable can limestone screenings as a road construction material be? Secondly the study deals with the problem of this materials ability to absorb water. Problem is caused by the fines content that bind itself with humidity. Is it possible to solve this problem and how?

This research was carried out in the laboratory of Tallinns University of Applied Sciences. The laboratory has a testing device which helps to test road constructions. The device is basically a vehicles tire with the mass of 2.5 tons. The wheel is driven on the testing road to study durability of the road construction and to give as realistic conditions as possible. The testing process contained five different tests, within was studied different road constructions which were built out of sand of limestone (fines content removed) and silica sand. The different mixtures of these sands were in the ratios of 30/70 (30% of silica sand and 70% sand of limestone) and another 50/50. Notes being made during the tests are considered in this studies analytical chapters. Furthermore, there were tension sensors built in the construction and the information from these sensors is also analyzed in

this investigation. Finally, a material sample was taken of the construction and it was sent to other laboratories for studying. The results have been analyzed in this study.

After testing period, an analysis was carried out. The results of tests showed that the durability of limestones-sand is questionable, because the material samples confirmed that the construction breaks. Mixes which consisted silica sand were more efficient. Sand of limestone mixed with silica sand was not substantially broken, so it has resulted that using these mixtures in road constructions is reasonable and it helps to increase limestones-sand life expectancy.

The studies also confirmed that the sand of limestone as a material does not bear cold well. In the so-called freezing test, the tension sensors showed that the tension increased, because the material dilated. After melting there were increased tensions in the construction. This phenomenon was noted due to the excessive humidity. The conclusions of this study point out that it is not reasonable to use sand of limestone in road construction above the freezing level. Its expansion may damage the construction.

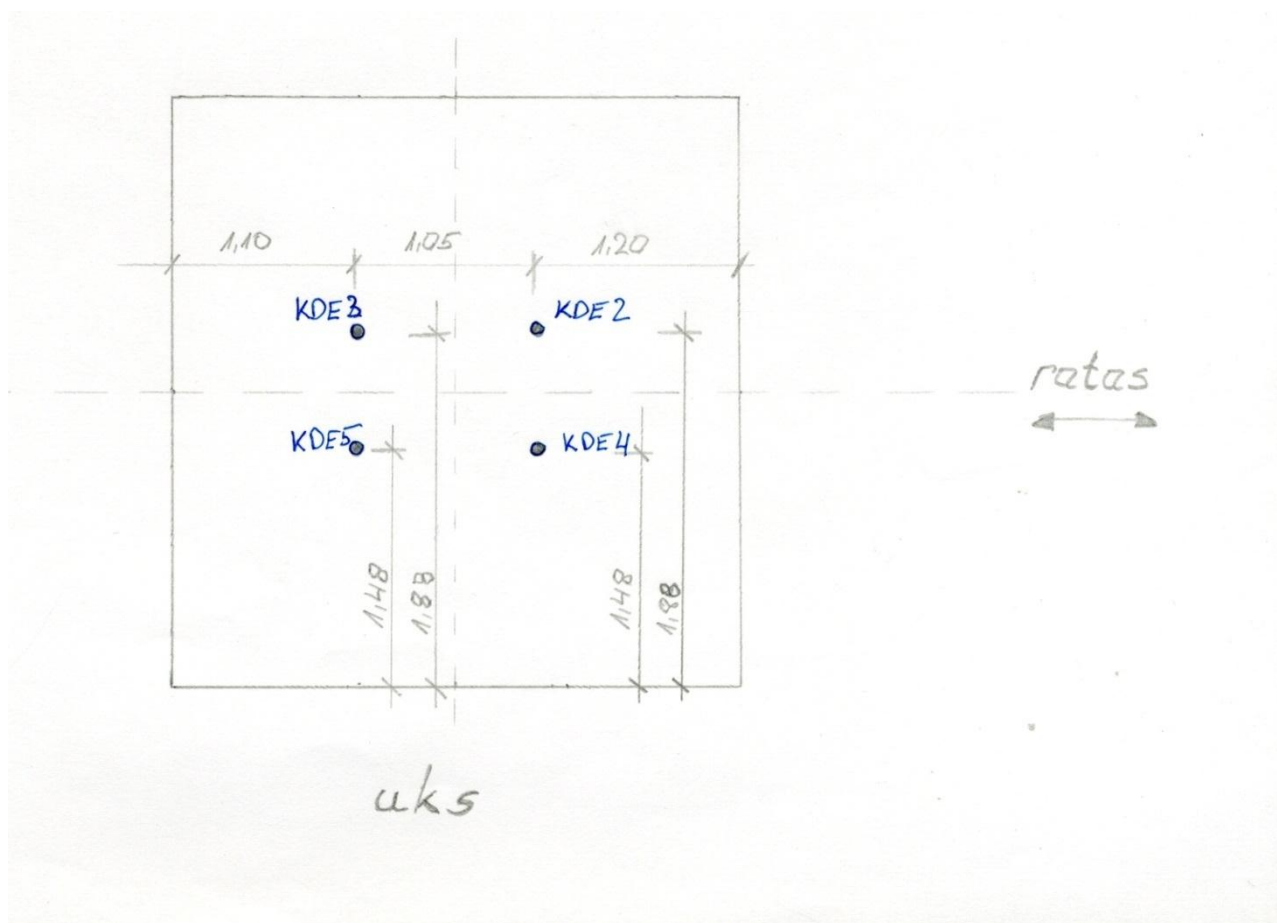
Current investigation confirmed the knowledge about problems with sand of limestone in use of road construction material and showed different causes why that is. Also, some solutions are offered in this research to eliminate some of the problems. This investigation could be an additional research to road projectors, road constructors and developers – it gives ideas how to use limestone screenings wisely and rationally.

VIIDATUD ALLIKATE LOETELU

[1] S. Sillamäe ja M. Vaino, Labori erakogu, Tallinn.

[2] S. Sillamäe, „Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses,“ Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn, 2013.

Lisa 1. Laboris tehtud skits pingeandurite paiknemise kohta muldkeha ülemises kihis (mõõdud meetrites)



Lisa 2. Laboris tehtud skits pinge- ja vajumiandurite paiknemise kohta drenakihi peal (mõõdud sentimeetrites)

