

**Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring
Eesti teedemajanduses. Erinevatest karbonaatsetest
settekivimitest valmistatud aluste vastupidavuse erinevuste
väljaselgitamine. Kvarts- ja paekiviliivast mulde vastupidavuse
võrdlus koos tasuvusanalüüsiga. Materjalide kasutamis-
kriteeriumite ettepanekud**

Tallinna Tehnikakõrgkool

2013



MAANTEEAMET

Tallinn 2013



KOHALIKE MINERAALMATERJALIDE OPTIMAALSE KASUTAMISE UURING EESTI TEEDEMAJANDUSES

Erinevatest karbonaatsetest sette kivimitest valmistatud aluste vastupidavuse erinevuste väljaselgitamine. Kvarts- ja paekiviliivast mulde vastupidavuse võrdlus koos tasuvusanalüüsiga. Materjalide kasutamiskriteeriumite ettepanekud

Tellijaja: Eesti Maanteeamet

Pärnu mnt 463a, 10196 Tallinn

Tel. 6119300

Kontaktisik: Taavi Tõnts (e-mail: taavi.tonts@mnt.ee)

Teostaja: Tallinna Tehnikakõrgkool

Aadress: Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn

Telefon: 666 4500

Vastutav spetsialist: Sven Sillamäe (sven@tktk.ee)

Tallinn 2013

Uurimistöö valmimisele aitasid kaasa:

Konstruksioonid ehitasid katseseadmesse ja lammutasid Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengid Margus Vaino, Artjom Melnikov, Hendrik Kont, Jaago Kajalainen, Raimo Kivi, Sten-Kristjan Saarik, Kaspar Karik, Romm Jakovlev, Karli Ots, Ken Raima, Lauri Kanarbik

Katseseadmele ratta projekteeris, ehitas ja hooldas ning kes hoolimata mõningatest probleemidest väga edukalt hakkama sai:

Rando Purge, Baltflex AS

Projekti nõuandjad ja muud, kes abistasid uuringu valmimisel:

Taavi Tõnts (MNT), Janek Hendrikson (MNT), Priit Willbach, Jaanus Taro, Kurmo Roosipuu (Trev-2), Raul Oja, Karel Saar, Ain Kendra, Karli Kontson, Paekivitoodete Tehas AS, AS Teede Tehnokeskus, Nordecon Infra AS, Kiirkandur AS, Eesti Keskkonnauuringute Keskus

SISUKORD

Sissejuhatus	5
1. Katseseade	6
2. Katse ülesehitus	11
2.1 Projektne olukord	11
2.2 Konstruktsiooni ehitus	12
2.2.1 Teostus	14
3. Katse käik	22
4. Tulemused	31
4.1 Muldkeha ja drenkiht	31
4.2 Killustik	34
4.3 Asfaltbetoon.....	39
4.4 Tulemuste analüüs ja teise konstruktsiooni katsetus	41
5. Järeldused, kokkuvõtted ja soovitused	47
5.1 Pestud paekivisõelmed	47
5.2 Killustik ja asfalt.....	48
Kokkuvõte	51
Viidatud allikate loetelu	53

SISSEJUHATUS

Aastal 2009 hakati Eestis kasutama sidumata segusid killustikaluste rajamiseks. Kuna paljudel juhtudel on sidumata segudest valminud killustikalustes fikseeritud liialt suur tolmusisaldus, siis Maanteeamet nägi Killustikust katendikihtide ehitamise juhendis ette, et lõplik valik tuleb teha projekteerijal, lähtuvalt omast kogemusest, millisel kujul konkreetsel objektil killustikku kasutada. Projekteerijate senised kogemused on aga teel ehitatavatest killustikaluste toimimisest väga erinevad, mistõttu oleks otstarbekas materjale täiendavalt laboratoorselt testida ja katsetada.

Senini on teada vaid, et fraktsioneeritud killustiku korral ei ole tolmusisaldusega suuri probleeme ning materjal on ka piisavalt dreniiv, samas on oht, et killustikunurgad hiljem purunevad ning toimub järeltihenemine. Sidumata segu aga käitub suures osas vastupidiselt. Lahendusena on Maanteeameti poolt soovitatud ridakillustiku kasutamist, millel eeldatavasti on mõlema eelpoolnimetatud killustikaluse tüübi parimad omadused.

Teadus- ja arendustöö eesmärgiks on katseliselt määrata, milline kolmest Killustikust katendikihtide ehitamise juhendis toodud killustikaluste tüüpidest on pikaajaliselt konstruktsioonis töötades vastupidavam. Lisaks tuleb välja tuua kvartsiivast drenikihi all oleva paekiviliiva vastupidavuse tulemused, majanduslik võrdlus ning kasutamisevõimaluste analüüs.

1. KATSESEADE

Uuring viidi läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli teekonstruktsioonide laboratooriumis. Katseseade valmis aastal 2010 koosnedes metallkastist (foto 1) mõõtmetega 3,3x3,3x2,3m (laius, sügavus, kõrgus). Üle kasti kinnitatuna põrandale paigutati jõuraam ja selle külge dünaamiline koormusplaat (foto 2), mida juhitakse hüdroüsteemiga. Kasutades koormusplaati on võimalik varieeruda koormustsükli pikkust, rakendatavaid jõude ja kontaktpinna suurust. Maksimaalne võimalik avaldatav koormus on 15t ehk kolm korda suurem normtelje koormusparameetrist [1].



Fotod 1 ja 2. Katseseadme kast ja dünaamiline koormusplaat. Autor Sven Sillamäe

Maailemapraktikas on staatilised ja dünaamilised koormusplaadid laialt erinevates uuringutes kasutatavad. Näites sooritatakse nendega erinevaid geotehnilisi uuringuid ja geosünteedide mõjude hindamist kokkupuutes erinevate materjalidega kõikvõimalikes pinnasekonstruktsioonides. Dünaamilise koormusplaadiga on TTK katseseadmes sooritatud mitmeid uuringuid, tellijateks Eesti Maanteeamet, RMK, EAS ja Paekivitoodete tehas.

Ehitatud katseseadme eesmärk oli modelleerida võimalikult tõepäraselt tingimusi, mis esinevad reaalsel teel. Dünaamilise koormusplaadiga on võimalik katsetada ühte punkti ja määrata koormusparameetrid nii nagu need oleksid normtelje ülesõidul. Siiski jääb katsetus mõningate probleemide katsetamisel puudulikuks, kuna koormus avaldub vaid ühte punkti ja ei ole seetõttu liikuv. Näiteks asfaltbetoonide uurimisel jääb katse ülesehitus puudulikuks ja erinevate

konstruktsioonide võrdlemisel tekib küsitavusi ja probleeme, kas uue võrreldava konstruktsiooni ehitamisel saavutatakse ikka täpselt samad tingimused, mis esimesel juhul. Ka toimub koormamine jäiga plaadiga, mis ei arvesta elastsest õhkrehvist tekkivate jõududega, samuti on puudu kiirenduse ja pidurdamise efekt.

Arutledes Eesti Maanteeametiga sissejuhatuses tõstatatud probleemi üle tuldi järeldusele, et dünaamilise koormusplaadi kasutamine ei võimalda tõenäoliselt koormata konstruktsiooni nii, nagu killustikul reaalset 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 ja pidurdaks.

Vaadeldes erinevate uurimisasutuste poolt ehitatud katseseadmeid näeme väga mitmeid lahendusi alates väga väikestest (nt Soomes Oulu ülikoolis kasutusel olnud seade, joonis 1) kuni väga massiivseteni välja, vt viidatud allikaid [2] ja [3] või NCAT testrada USAs (joonis 2).



Joonised 1 ja 2. Oulu ülikooli rattakoormusseade, mis tänaseks päevaks on lammutatud. NCAT testrada [4]

Esineb näiteid, kus täismõõdulised katsed on taandatud mudeliteks nagu näiteks tehtud Inglismaal Nottinghami ülikoolis (fotod 3 ja 4).



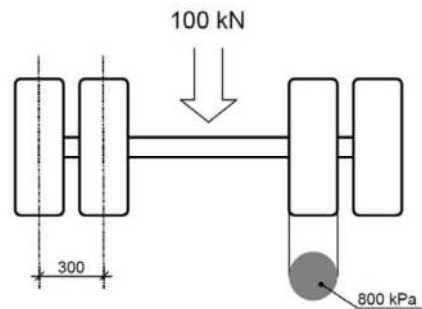
Fotod 3 [Sven Sillamäe] ja 4 [5]. Nottinghami ülikoolis olev katseseade.

Seadme valiku otsustab sisuliselt kasutusel olevad materjaalsed vahendid. Ideaalne katsetus on täpselt selline nagu reaalne tee on, nagu näiteks NCAT rada, kuid tegemist on üpriski ajamahukate ja veelgi enam ressursinõudvate katsetega. Põhjamaades (Soomes ja Rootsis) on tehtud palju katsetusi HVS-seadmega (Heavy Vehicle Simulator), mis on andnud häid tulemusi ja mille põhjal on leitud nii mõnegi lahenduse toimivus. Siiski, ka selle opereerimine on väga kallis ning seetõttu Soomes pole viimasel ajal seadet enam kasutatud. Kuskil esineb tasakaal katseseadme ehitusmaksumuse, opereerimiskulukuse ja saadavate tulemuste tõepärasuse vahel. Viimase all on mõeldud seda, paljude „taandamisteguritega“ peab arvestama, et katsetulemus vastaks 1:1 „päris“ olukorraga teel.

Tallinna Tehnikakõrgkooli katseseadmele liikuva ratta ehitusel püüti silmas pidada kõige optimaalsemat lahendust ehk sellist, mis oleks võimalikult ligilähedane reaalsele olukorrale, kuid mida saaks paigutada olemasolevatesse ruumidesse. Tingituna katsekasti mõõtmetest tuli teha mõningaid kompromisse. Kuidas neid tehtud kompromisse „välja taandada“ saamaks tulemuseks täpselt sama olukorra, mis valitseb teedel, tuleb veel õppida, kuid antud aruandes on püütud sellega vähemalt algust teha.

Eesmärk TTK katseseadme modifitseerimisel oli luua võimalikult reaallähedased 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 3,5t ja rehvirõhk 0,8Mpa (üritati saavutada joonisel 3 kujutatud olukorda). Normtelje kaaluks Eestis on 10t, millest paarisrattale (või „supersingle“ üksikrehvile) langeb 5t ja järelikult ühele rehvi 2,5t. Teoreetiliselt oleks saanud kasutada ka väiksemaid rehve (nt nagu Nottinghami ülikoolis) ja väiksemaid koormusi ning siis taandada olukord läbi kontaktjälje 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.



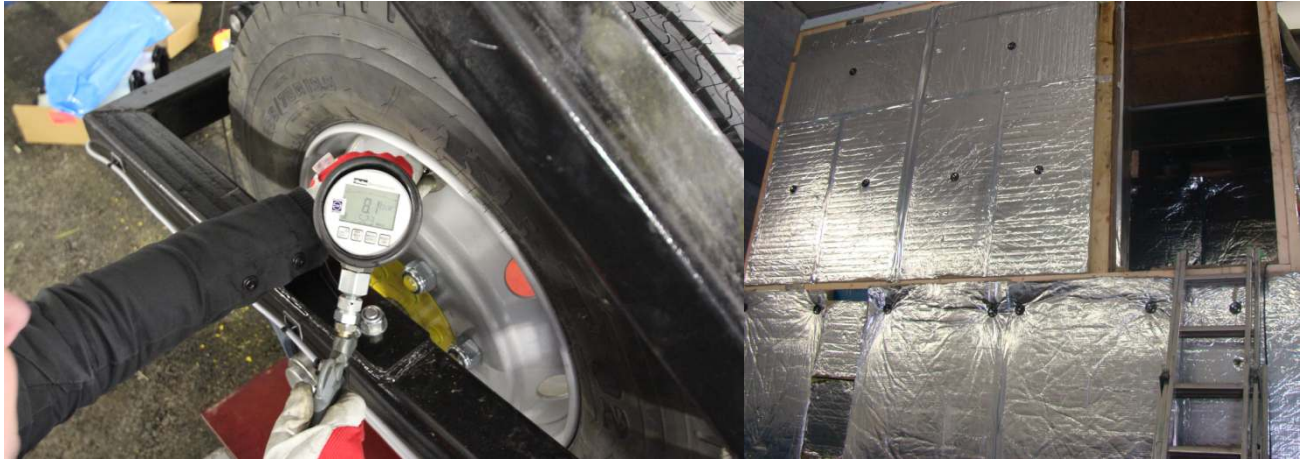
Joonis 3. Koormusparameetrid, mida oli eesmärgiks TTK katseseadmele [6]

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 3,5t puhul läbib ratas konstantse kiirusega kasti keskel 1,5m 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 1,5t, ka 2t taluv ratas oleks olnud liiga suur. Kasutades topeltratta asemel vaid ühte ratast tingis samuti ruumi puudus ja kasti mõõtmed.

Ülevaatlilikud pildid hetkesest olukorrast on esitatud fotodel 5...10.



Fotod 5 ja 6. Esimesed fotod pärast ratta valmimist. Katseseadme kalibreerimine. Autor Sven Sillamäe



Fotod 7 ja 8. Rehvirõhu kontroll. Külmutamise jaoks isoleeritud katsekast. Autor Sven Sillamäe

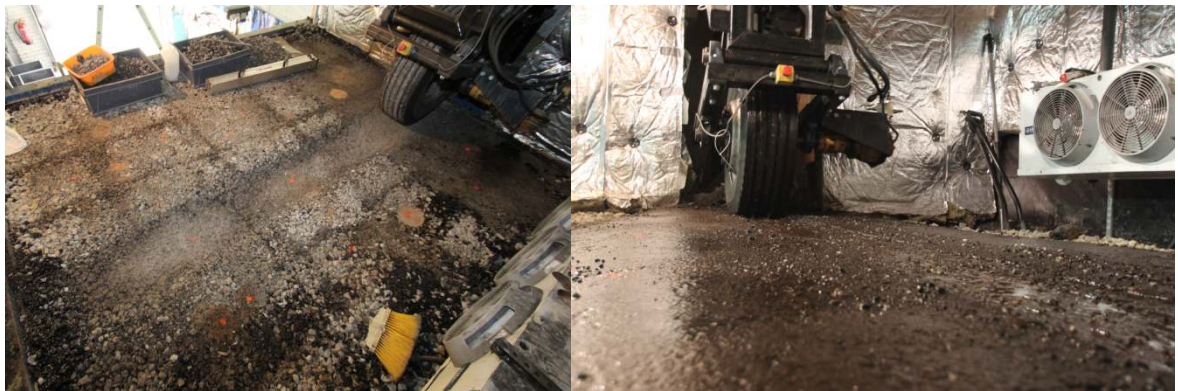


Foto 9 ja 10. Jälg, mis jäi killustiku pinnale pärast katse lõpetamist. Ratta küljes vasakul ääres on näha ka mootorit, mille abi toimub kiirendus ja pidurdamine. Autor Sven Sillamäe

2. KATSE ÜLESEHITUS

2.1 Projektne olukord

Uuringu põhieesmärk oli võrrelda kolme samast baaskivimist valmistatud killustikufraktsiooni ja vaadelda pestud paekivisõelmete käitumist. Eesmärk oli katsetada tabelis 1 esitatud konstruktsiooni. Punkti „6“ juurde peaks lisama täienduseks, et kasti täide oli ehitatud kahest kõrvutiasetsevast materjalist, mis olid eraldatud omavahel geotekstiiliga. Ratta liikumise suunas ehk pikisuunas oli kast jaotatud kaheks nii, et pool kasti oli täidetud pestud paekivisõelmetega ja teine pool Männiku karjääri kvartsiivaga. Selle peale ehitati samast Männiku kvartsiivast drenkiht, mis eraldati II profiili geotekstiiliga killustikust.

Tabel 1

Katsekonstruktsiooni projektikohane olemus

Jrk. nr.	Kihi paksus, cm	KONSTRUKTSIOON I 0/32	KONSTRUKTSIOON II fr 16/32	KONSTRUKTSIOON III fr 4/32
1.	4	AC16 Surf 70/100 Gc90/15, C100/0, LA25, AN14; F1, FNaCl4, FI20, fl. Sideaine: B5,3		
2.	6	AC32 Base 70/100 Gc90/15, C100/0, LA30, F4, FI20, f4, Sideaine: B3,8		
3.	25	Sidumata segust killustikaluse 0/32 nõuded: LA35; G _A ; C _{50/10} ; F ₄ ; FI25; UF3	Kiilutud killustikaluse fr 16/32 nõuded: LA35; G _C 80/20; C _{50/10} ; F ₄ ; FI35; f ₄ . Kiilekillustik fr 8/12 või 8/16, 25kg/m ²	Ridakillustikaluse fr 4/32 nõuded: LA35; G _C 80/20; C _{50/10} ; F ₄ ; FI35; f ₄ .
4.	-	Eristuseks vett läbilaskev geotekstiil		
5.	20	Peenliiv, keskliiv või jämeliiv, min drenivus 2m/ööp.		
6.	>150	Pestud paekiviliiv, min drenivus 1m/ööp.		

2.2 Konstruktsiooni ehitus

Katsekasti põhi iseoleeriti hüdroisolatsioonikihiga (foto 14) ja täideti hiljem 0,5m ulatuses puhta veega. Eesmärk vaadelda niiskussisalduse muutust pestud paekivisõelmetes ja hilisemalt näha, kuidas materjal veeküllastunud olukorras käitub. Paesõelmed eraldati kõrvalolevast kvartsiivast omavahel geotekstiiliga (fotod 11). Ehitus toimus väga hoolikalt, et kaks materjali omavahel ei seguneks. Paratamatult siiski sattus kvartsiiva paigalduse ajal paesõelmetele, kui see eemaldati alati enne järgmise kihi paigaldamists. Mõlemad materjalid paigaldati ja tihendati 25cm kihtide kaupa. Tihendamine toimus 255kg Ammann vibroplaadiga (foto 12) ja veega. Tiheduse kontrollimiseks kasutati penetromeetrit (foto 13), Inspector III ja paekivisõelmetes lõikerõngametoodikat. Paekivisõelmetest võeti ka terastikulise koostise proovid määramaks muutusi pärast tihendamist. Nii tihedusemõõtmisetulemused kui terakoostise muutused on esitatud peatükis 2.2.1.



Fotod 11 ja 12. Paesõelmed ja kvartslüiv eraldatü üksteisest geotekstiiliga. Muldkeha oli jagatud katsekeha pikisuunas täpselt pooleks. Tihendatid 255kg vibroplaadiga ja tihedust kontrolliti Inspectoriga. Autor Sven Sillamäe



Fotod 13 ja 14. Tihedust kvartslüivas kontrolliti ka penetromeetriga. Katseseadme põhjas on hüdroisolatsiooniks kile. Autor Sven Sillamäe

Dreenihi ehitus toimus sarnaselt kui muldkeha ehitus. Materjali peale paigaldati II profiili geotekstiil.

Killustiku paigaldamiseks tekitati kolm eraldatud tsooni puidust laudadega ja geotekstiiliga (foto 15). Enne tihendamist lauad eemaldati ja alles jäi geotekstiil. Enne asfalteerimist paigaldati killustiku peale marlitükid vältimaks asfaldist tulenevate peenosiste sattumist killustikku saamaks kätte proov terakoostise määramiseks pärast katset (foto 16).



Fotod 15 ja 16. Erinevad killustikud eraldati üksteisest. Asfaldi ja killustiku vahele paigaldati kerge marli. Asfaldi alapinda paigutati tõmbeandurid. Autor Sven Sillamäe

Mõlemad asfaldikihid paigaldati samal päeval katsekasti käsitsi ja tihendati kerge 70kg vibroplaadiga, mis muudeti raskemaks, kui tööline sellele kogu oma keha massiga toetus.

2.2.1 Teostus

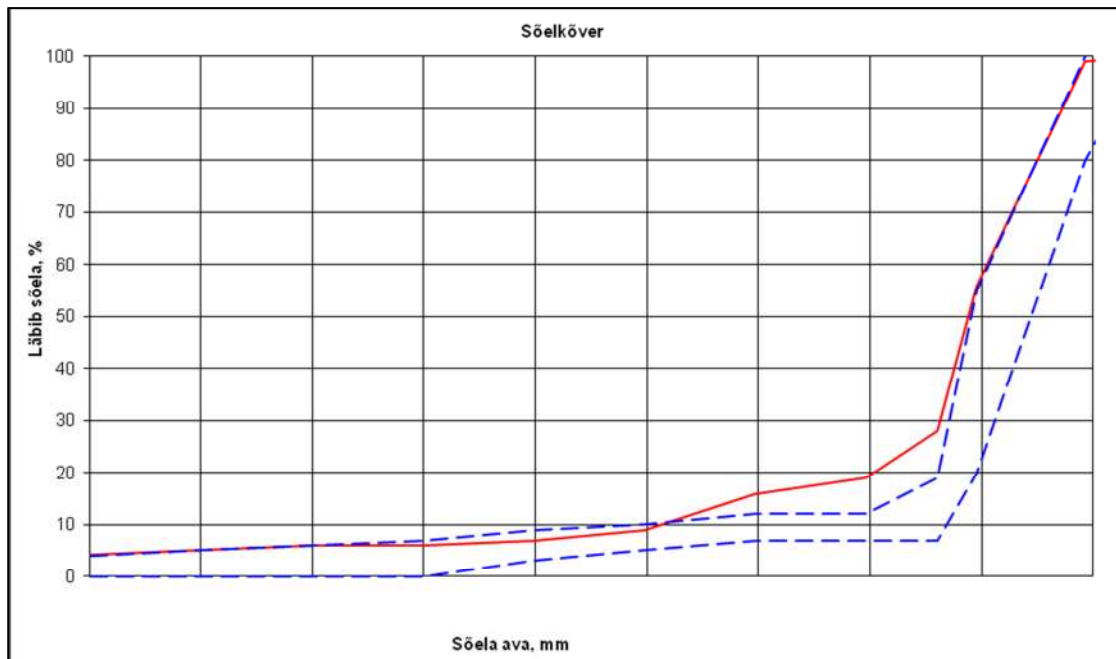
Alustades asfaltbetooni terakoostistest ja tihedusastmest, siis tulemused on näidatud lisas 1. Proovid asfaltkehadele tehti alles pärast katse lõppu, et mitte rikkuda katet enne katse algust. Soov oli võtta proov nii koormusjälje lähedalt kui võimalik, kuna peamine tihendusenergia keskendus sellele pirkonnale, mitte servadele.

Tiheda asfaltbetooni poorsus oli 3,3%, mis viitaks sellele, et tihedus oli korras, kuid määrares tihedust mahumassimeetodil saadi tihedusteguriks siiski vaid 0,93. Materjal töötas siiski visuaalsel hinnangul katse käigus väga hästi. Terastikuline koostis vastas nõuetele, lahustuva sideaine sisaldus oli 0,3% väiksem, kui tabelis 1 nõutud.

Poorse asfaltbetooni jäävpoorsus oli 7,8% ja mahumassimeetodil määratuna tihendatud tihendustegurile 1,0. Lahustuva sideaine sisaldus oli 2,9%, mis oli vähe ja samuti oli tugevalt paigast terastikuline koostis. AC23 base segu ei vastanud järelilikult tabelis 1 toodud nõuetele. Ehitamise ajal seda ei kontrollitud kahel põhjusel. Esiteks, kui segu on tellitud, siis eeldusel, et see on see, mis tellitud ja teiseks mõjutas tulemusi ajaline piirang. Mõlemad segud koos paigaldusmeeskonnaga olid tellitud kohale samaks päevaks ja pealmise segu paigaldust ei olnud võimalik lükata edasi aega, mil laboriproovid on käes.

Tegelikult oli katseseadmes AC32base asemel vastavalt terastikulisele koostisele ja sideainesisaldusele hoopis MUK 12/32 (joonis 4). Sõelkõver küll väljus kergelt ka MUKi sõelkõveraväljalt, kuid materjali peaks pigem nimetama MUKiks kui poorseks asfaltbetooniks. Sellele viitab ka 2,9% sideainesisaldus samal ajal kui MUKi nõuded näevad ette 2,6...3,2%. Miks

nii, on tagantjärei raske öelda, kuid poorse asfaltbetooni tootmisega on tihti nii, et esimene segu, mis tehasest väljub kipub olema pigem MUK kui PAB. Tõenäoliselt võibki asi olla selles, et poorne segu toodeti vaid antud katset silmas pidades ja tehas ei jõudnud veel end „soojaks“ töötada. Uuringu autor siiski leiab, et avastatud probleem siinjuures on pigem positiivne kui negatiivne ja selgitus sellele antakse peatükis 4.4.



Joonis 4. Kasutatud „poorse“ asfaltbetooni sõelkõver paigaldatud MUK 12/32 sõelkõverapiiridesse

Killustike puhul oli eesmärgiks, et kõik segud tuleks samast karjäärist ehk kõik oleks valmistatud samast baaskivimist. Eesmärgiks oli ka LA35. Kuna Tallinna vahetus ümbruses esineb selleks liiga tugev kivi, toodi materjal veidi kaugemalt. Materjalide laboratoorselt testitud omadused koos MNT killustikust katendikihtide ehitamise juhendist toodud nõuetega on näidatud tabelis 2. Puistest võeti kaks terastikulise koostise proovi igast materjalist ja tabelis on esitatud kahe keskmised tulemused.

Materjalide LA on 32, külmakindlus 2,3 ja külmakindlus 1% soolalahuses 67,6%. Plaatsus sidumata segul 12%, ridakillustikul 11% ja fraktsioneeritud killustikul 8%.

Tabel 2.

**Kasutatud killustike terastikuline koostis puistest, pärast tihendamist ja materjalidele
etteantud piirid ning lubatavad hälbed**

Materjal	40	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,063
0...32 min	100	85	63	43	30	22	15	5	0
0...32 max	100	99	77	57	42	33	30	15	3 (-3/+4)
0...32 puistest	-	95	76	57	38	26	19	15	8,8
0...32 tihendatud	-	99	78	60	43	33	24	19	11,2
4...32 min	100	89	45	22	0	0	-	-	0
4...32 max	100	99	72	52	20	0	-	-	3 (-3/+4)
2...32 min	100	85	58	30	5	0	-	-	0
2...32 max	100	99	75	51	25	5	-	-	3 (-3/+4)
4...32 puistest	100	98	69	35	12	8	-	-	4,6
4...32 tihendatud	100	98	60	31	15	11	-	-	5,7
16/32 puistest	100	94	9	-	-	-	-	-	1,6
16/32+4/16 puistest	100	99	30	6	5	4	-	-	2,6
16/32+4/16 tihendatud	100	99	38	16	11	9	-	-	4,6

Tabelist selgub, et sidumata segu peenosised puistest võetud proovist väljuvad üpriski märkimisväärselt lubatud makimaalsest, muud näitajad on korras. Ridakillustik sõelkõvera järgi tundub olevat hoopis 2/32 ja probleeme on jälle peenosiste ja 2mm sõela juures.

Tihendamine on materjalide terastikulisi koostisi muutnud peenemaks. Eriti selgelt tuleb see esile vaadates sidumata segu puhul 0,5mm ja peenosist, ridakillustikul peenosist ja 2mm ning muutusi on ka fraktsioneeritud killustiku puhul. Sidumata segu puhul väljub peenosiste protsent kindlalt etteantud hälbest; ridakillustiku puhul on probleeme 2mm juures.

Enne asfalteerimist mõõdeti killustikelt järgmised kandevõimeväärtused Inspector IIIga:

- 0/32 – 192 ja 200MPa;
- 4/32 – 266 ja 233MPa;
- 16/32 – 228 ja 193MPa.

Mis puutub peenosiste sisaldusi ja seda, et nende protsent sidumata segu puhul puistest võetud proovi puhul on nii suur võiks selgitada tõsiasi, et killustikutootmisest jäävad üle sõelmed, mida teinekord üritatakse paigutada valmis killustiku sekka väga lubatud normi piiri lähedale saamaks vähemaks tekkivaid jääke. Teinekord peenosiste sisaldus ületab lubatava ja teinekord jääb vajaliku piiri. Seekord saime materjali, milles oli liiga palju peenosiseid. Probleem sõelmetega on terav ja

teoreetiliselt võiks neid kasutada teede mullete ehitamisel saamaks nii vähendada tekkivate jääkmaterjalide hulka karjäärides seda enam, et traditsioonilisi materjale nagu kruusad ja liivad jääb järjest vähemaks. Ühes karjääris sõelmeid ka pestakse saamaks saueosakesed materjalist välja. Seetõttu on kasutati antud katsetusel pestud paekivisõelmeid muldkeha ehitusel.

Analüüsides terastikulisi koostisi **pestud paesõelmetest** saame vastakaid tulemusi. Kahjuks selgus viimasel hetkel, et kaks proovi oli eksikombel laborisse viimata ja seega on need andmed puudu.

Puistest võetud paekivisõelmete ja kvartslia terastikuline koostis on esitatud tabelis 3. Samas kohas on ka andmed pärast tihendamist ning filtratsioonimooduli mõõtmise tulemused.

Tabel 3.

Pestud paekivisõelmete katsetulemuste kokkuvõte

Paeliiv		6,3	2	1	0,63	0,425	0,2	0,1	0,06	0,02	0,006	0,002	Peenosis
Puistest		100	70	46,6	36,4	29	18,5	10,6	4	2,8	1,7	0,7	4
Filtratsioon	0,85	Filtratsioon 3x40, m/ööp											
Filtratsioon	3,78	Filtratsioon 3x25, m/ööp											
Puistest H=170		100	77	54	46	35	19	10	5,4	3,6	2,2	1,1	5,4
Tihendatud H=170		100	51	28,5	25	21	14	8,1	3,7	2,2	1,3	0,7	3,7
Tihendatud H=150		100	63	37	22	14,5	7,8	5,2	2,8	1,8	1	0,6	2,8
Tihendatud		100	75	52	42	34	22	12	5,9	3,9	2,2	1	5,9
Tihendatud		100	73	48	36	26	16,5	9,8	5,7	2,7	2	1	5,7
Kvartslia		99,5	95,5	84	69	41,5	5,3	2,4	1,7	0,9	0,4	0,1	1,7
Filtratsioon	13,8	Filtratsioon 3x40, m/ööp											
Filtratsioon	15,2	Filtratsioon 3x25, m/ööp											

Tulemusi on väga raske selgitada, kuna loogika neis puudub. Ühelt poolt on puistest võetud materjali peenosiste sisaldus 4% ja 5,4% ning pärast tihendamist võetud proovis 3,7%, 2,8% aga ka 5,9% ja 5,7%. Mingisugune peenosiste sisalduse kasv on näha, kuid see tundub olevat juhuslik. Probleem võib peituda ka kastis tihendamise ala väiksuses ja vibroplaadis, mida tuleb pidevalt keerata.

Nii kvartslia kui ka paekivisõelmetes mõõdeti puistematerjali filtratsioonimoodul. Kvartslial oli see 3x40 löökide juures 13,8m/ööp ja 3x25 puhul 15,2m/ööp, paekivisõelmetes vastavalt 0,85 (ehk 16x madalam, kui kvartslial) ja 3,78m/ööp. Terastikulisest koostisest lähtuvalt on paekivisõelmed tundlikud tihendamisele ja seetõttu filtratsioonimoodulit pärast tihendamist ja katset enam ei mõõdetud, kuna tulemus oleks olnud tõenäoliselt mõjutatud lisatihendamisest katsekolbi. Seda näitab ka, kuidas filtratsioonimoodul langeb oluliselt rohkem löökide arvu suurenedes paesõelmetes kui kvartslia. Seetõttu viidi läbi mitu mõõtmist nn sissevalamismeetodil.

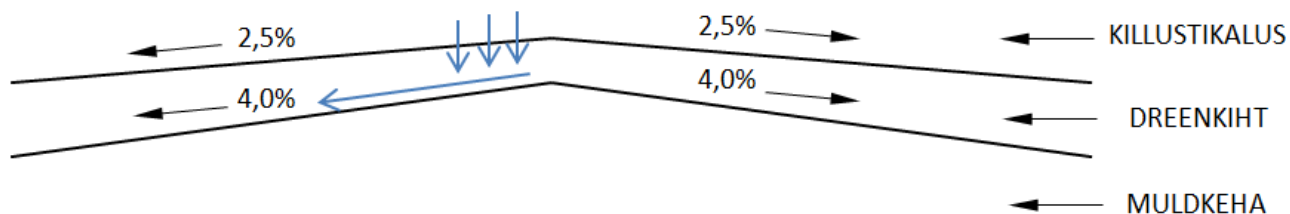
Sissevalamismeetodit tehti kolmel erineval moel. Alati oli materjal eelnevalt tihendatud.

Esimeseks variandiks meetod, kus liiva kaevati auk, iseoleeriti kilega ja valati sisse sama kogus vett (foto 17). Enne katset, kuid pärast tihendamist oli tulemuseks kvartsliaas 5min ja 25sek ning paesõelmeta 17min ja 8sek. Pärast katset tulemuseks kvartsliaas 1min ja 22sek ning paesõelmeta 10min ja 48sek.



Foto 17. Infiltratsioonikatse ettevalmistus tihendatud materjali pinnal. Autor Sven Sillamäe

Teiseks katseks tehti sissevalamine ühe silindriga (fotod 18 ja 19). Põhjuseks see, et tee all olev materjal peab suutma vett drenida välja ka külgedele, mitte vaid vertikaalis (joonis 5).



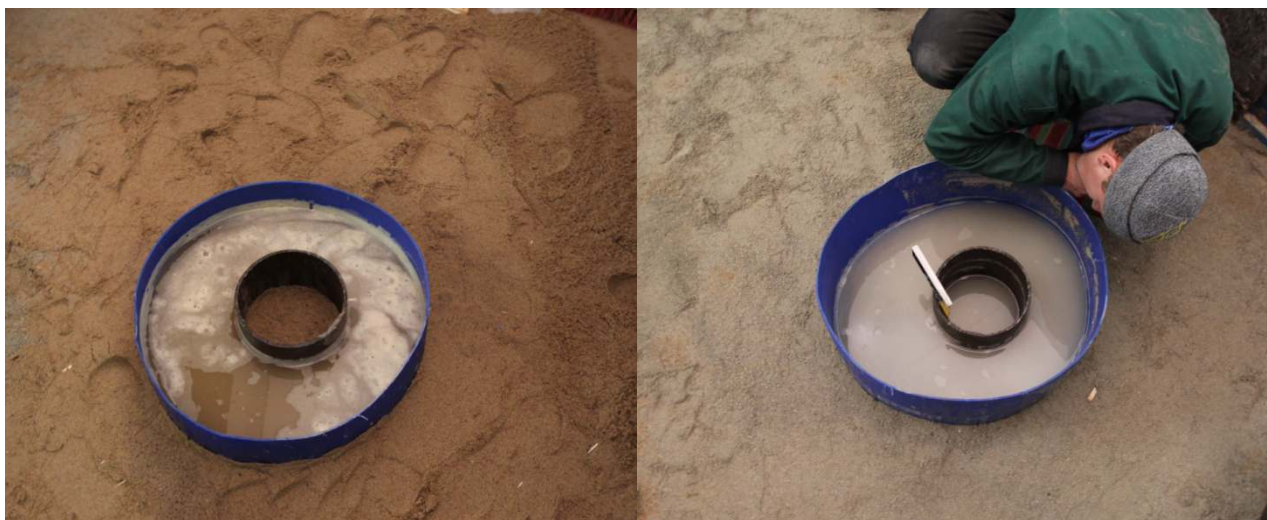
Joonis 5. Vee filtreerumine drenikihis. Autor Oliver Kiisler

Minimaalseks filtratsioonimooduliks pärast tihendamist saadi kvartsliaas ühe silindriga 41m/ööp ja paesõelmeta 5,14m/ööp. Pärast katset oli tulemuseks vastavalt 37,7m/ööp ja 13,63m/ööp. Kuidas selgitada seda, et paeliaas filtratsioonikiirus kasvas ei saa, kuna meetoodika oli täpselt sama ning katsekoht sai valitud hoolikalt, et miski tulemusi ei mõjutaks, ei suuda.



Fotod 18 ja 19. Infiltreerimiskatse ühe silindriga. Autor Sven Sillamäe

Kolmandaks tehti sissevalamine kahe silindriga (fotod 20 ja 21). Kõigepealt tuleb märkida, et paesõelmetesse oli juua ühte silindrit väga-väga vaeviline saada, kuna materjali tihedus oli nii suur. Seetõttu suurema silindri paigutus oli võimalik vaid see sisse uuristades. Kahe silindriga mõõdeti vaid pärast tihendamist ja kvartsliaivas oli tulemuseks 22,7m/ööp ja paesõelmetes oli tulemus 5,4m/ööp.



Fotod 20 ja 21. Infiltromeetri katse kahe silindriga. Autor Sven Sillamäe

Korrelatsiooni filtratsioonimoodulimääramisest ei ole võimalik leida. Kõige madalam väärtus võrreldes kvartsliaiva ja paesõelmeid tuleb laboriandmetest, kus 3x40 löökidega filtratsioonitorusse tihendades tuli erinevus 16-kordne. Kõik muud katsed näitasid oluliselt madalamat erinevust. Põhjus võib peituda siinjuures paekivisõelmete tihendmaises katsekasti.

Muldkeha **tihendusastet** mõõdeti kvartsliaivas penetromeetri ja Inspectoriga ning paesõelmetes Inspectori ja hiljem lõikerõngaga. Tavaliselt lõpetati paesõelmete tihendamine siis, kui vibroplaat

hakkas pinnal hüppama ja oli näha, et edasi tihendamine vaid lõhub materjali. Tihendamisel koheldi kvartslüiva ja paesõelmeid ses mõttes võrdselt, et mõlemaid tihendati 25cm (kohevalt) paksuste kihtide kaupa. Tabel 4 näitab mõõdetud väärtusi kihtide kaupa. „Tihendustegur valemiga“ tähendab MNT muldkehade tiheduse kontrolli juhises toodud valemit Inspectori näitude kohta. Need ei kehti küll paekiviliivale, kuid siin on need siiski välja toodud.

Tabel 4.

Kandevõime- ja tihedusmõõteväärtuste tulemused kihiti

Kiht	Materja	Inspector	Penetromeeter	Lõikerõngas
60cm	Kvartslüiv	78MPa (tihendustegur valemiga 0,97)	-	-
	Paesõelmed	96Mpa (tihendustegur valemiga 1,02)	-	-
130cm	Kvartslüiv	119MPa (tihendustegur valemiga 0,98)	0,996	-
	Paesõelmed	118MPa (tihendustegur valemiga 1,00)	-	-
150cm	Kvartslüiv	181MPa (tihendustegur valemiga 0,98)	-	-
	Paesõelmed	138MPa (tihendustegur valemiga 1,00)	-	0,85
170cm	Kvartslüiv	158MPa (tihendustegur valemiga 0,98)	0,999	-
	Paesõelmed	141MPa (tihendustegur valemiga 1,00)	-	0,86

Inspectoriga ja panatromeetriga mõõtes nähti katset ehitades, et tihedus on piisav, kuid hiljem lõikerõnga analüüse vaadates selgus, et paekivisõelmetel siiski tihedus korras ei olnud. Paekivisõelmeid ei olnud siiski võimalik edasi tihendada, kuna vibroplaadi all materjal purunes silmnähtavalt ja tihendatud kihile tekkis ca 5cm paksune koorik, mis oli pärast katse lõpetamist veel tugevam (fotod 22 ja 23).



Fotod 22 ja 23. Kui paesõelmed olid liiga niisked, purunesid terad kergelt ja kittisid vibroplaadi külge tugevalt kinni. Pärast katset oli paesõelmete pind nii tugev, et sai tänavaharjaga pinna puhastada.

Autor Sven Sillamäe

Paesõelmete puhul oli võimalik selgelt eristada tihendamise kohad, mis olid tugevamad ja mille all oli materjal veidi kohevam. Ühest kohast sai spetsiaalselt võetud ka proov nii, et materjal vaid sellest 5cm paksusest koorikust ja siis materjal vahetult selle all. Tulemused olid üllatavad ja esitatud tabelis 5, mis on täienduseks tabelile 3.

Tabel 5.

Terastikulise koostise tulemused võetuna tihendatud kihi pealt ja sellest 5cm sügavamalt

Materjal	6,3	2	1	0,63	0,425	0,2	0,1	0,06	0,02	0,006	0,002
Koorik	99,9	73,5	51	44,5	36,9	25,4	16,5	12	6,8	3,9	1,8
Kooriku alt	100	71	48,6	39	30,8	18,8	8,4	4	2,9	1,8	1

See tekitab küsimuse paekivisõelmete tihendamismetoodika kohta. Sama küsimus tõstatati ka juba viidatud allikas [7] ja mida ei suudetud lahendada ka antud uuringus. Kas lahenduseks võiks olla õhemad kihid ja staatiline koormus? Või tihendamine veega? Võimalik. Tõenäoliselt on erinevus ka juhtumil, kui tihendatakse vibroplaadi või teerulliga.

Katsetest nähtub, et paekivisõelmed peenenevad mõningal määral tihendamise all. Väga varieeruvate andmete tõttu on siiski raske hinnata suurust, kui palju. Uuring selles vallas veel jätkub.

3. KATSE KÄIK

Katsekeha ehitamine lõpetati novembri keskel 2012 misjärel hakati ehitama rattakonstruktsiooni. Katsetamine hakkas pihta veebruari keskel 2013 ehk konstruktsioon sai taheneda kolm kuud enne, kui koormus peale tuli. Veebruari lõpust kuni mai alguseni oli katsetamises väga heitlik aeg, kuna ilmnesisid mitmed „lapsehaigused“. Näiteks kaks korda purunes ratta mootor, kahel korral purunes ratta koormustelg (fotod 24 ja 25) ning oli ka muid probleeme. Seetõttu oli katsetamine sel ajaperioodil väga heitlik ja kahjuks kannatas sellest ka andmete kogumine anduritelt ja roopa mõõtmine. Maiks 2013 oli ratast täiendatud piisavalt ja pärast seda pole enam probleeme tekkinud.



Fotod 24 ja 25. Alguses ilmnesisid rattaga mitmed „lapsehaigused“, kuid need said kõrvaldatud ja enam probleeme pole esinenud. Autor Sven Sillamäe

Kokku sooritati 529193 koormustsükli koos 12 külmutus-sulatustsükliga. Algne eesmärk katse alustamisel oli 5000000 koormustsükli koos 50 külmutus-sulatustsükliga. Miks tegelikkuses tehti algsest plaanist oluliselt vähem peitus selles, et katsetatav konstruktsioon ei pidanud koormusele vastu ja maksimaalne tekkinud roopa sügavus katse lõpus mõõdeti 87mm (!) (foto 26). Seetõttu katset ei olnud otstarbekas enam jätkata.



Foto 26. Makimaalne roobas pärast katse lõppu oli 87mm. Autor Sven Sillamäe

Tabelites 7...9 on esitatud roopasügavuste väärtused koos mõõtmiskuupäeva ja läbitud tsüklite arvuga. Nendesse on märgitud ära ka tähtsamate muudatuste kuupäevad ning parempoolsesse tabeliossa koondatud mõõtmistevahelisel ajal läbitud tsüklite arv ja selle jooksul toimunud areng roopa sügavuses ratta jäljes. Roobast mõõdeti täpselt ratta jälje keskelt, jälje äärest ja seejärel iga 10cm vahedega 50cm kaugusele ratta jälje äärest. Tabelid 7...9 kujutavad roopast vaid 20cm kaugust vajumikaussi, kuna kaugemad mõõtmised ei andnud analüüsi mõttes midagi juurde. Vajadusel on andmed siiski olemas. Tabelites on toodud ka killustike pinnalt mõõdetud vajumise suurused.

Lisaks on tabelisse 6 uuesti koondatud teatud vahemike järel fikseritud roopa arengud, aga lisaks on koostatud veel sõltuvus tingimusest ja keskmisest roopa arengust iga 10000 tsükli möödudes.

Tabel 6.

Roopa areng seotuna tsüklite arvu ja tegevustega katse jooksul

Tingimus	Tsüklite arv	Killustik	Roopa areng, mm			10000 tsükli keskmine, mm		
			serv	keskel	serv	serv	keskel	serv
Kuivalt	210222	4...32	15	16	18,5	0,71	0,76	0,88
		16/32	14,5	13	13,9	0,69	0,62	0,66
		0...32	19	18,5	17,5	0,90	0,88	0,83
Külm	115760	4...32	-5	3	0,5	0	0	0
		16/32	1	1,8	1	0	0	0
		0...32	3	3	3	0	0	0
Puhas vesi külмага	90604	4...32	19	12	13,5	2,10	1,32	1,49
		16/32	17	21,2	21	1,88	2,34	2,32
		0...32	11	12	12	1,21	1,32	1,32
Soolvesi külмага	112607	4...32	31	33	25	2,75	2,93	2,22
		16/32	34	37	33	3,02	3,29	2,93
		0...32	28	36	32	2,49	3,20	2,84

Tabel 7.

Roopa sügavus 4...32 sektsioonis

			Roopa sügavus							Tsüklite juurdekasv	roopa suurenemine		
					serv	keskel	serv				serv	keskel	serv
			50	60	70	80	90	100	110		70	80	90
Ristlõike punkt 2, 4/32	Kuupäev	Tsüklid											
	15.02.2013	0	10	10	12	12	11,5	11,8	10,5				
	19.02.2013	8900	9,3	9,8	12,4	13	12,2	11,1	10,4	8900	0,4	1	0,7
	25.02.2013	17749	9,6	10	12,8	13,5	12,6	11,5	10,5	8849	0,4	0,5	0,4
	28.03.2013	96000	9,8	11	16,5	21	17,8	11,8	10,5	78251	3,7	7,5	5,2
	6.05.2013	210222	9	10,1	27	28	30	9	9	114222	10,5	7	12,2
	7.05.2013	Külmutus tööle, ratas sõidab ööpäevaringselt											
	8.05.2013	245417	9	10	26	30	30	8,8	9	35195	-1	2	0
	10.05.2013	280039	8,6	10,5	25	30	31	9,5	9,4	34622	-1	0	1
	21.05.2013	325982	9	10,1	22	31	30,5	9	9	45943	-3	1	-0,5
	21.05.2013	Ratas seisma ja külmutus tööle kuni 3. juunini											
	3.06.2013	Ratas sõitma, öösel külmutab, ratas seisab ja päeval sulatab, ratas sõidab. Kattele kohe puhast vett											
	6.06.2013	408619	7	10,2	37	40	40	8	8	82637	15	9	9,5
	6.06.2013	Kattele esimest korda soolvesi											
	7.06.2013	416586	8,5	10,2	41	43	44	8,5	8	7967	4	3	4
	10.06.2013	447074	8,1	9,9	50	56	54	8,6	8	30488	9	13	10
	11.06.2013	462232	-	-	54	61	59	-	-	15158	4	5	5
	12.06.2013	474603	-	-	56	63	59	-	-	12371	2	2	0
	17.06.2013	486634	7,5	8,5	58	67	63	8	7	12031	2	4	4
	18.06.2013	496962	-	-	62	70	68	-	-	10328	4	3	5
	19.06.2013	511527	-	-	64	76	72	-	-	14565	2	6	4
	21.06.2013	529193	-	-	72	76	69	-	-	17666	8	0	-3
	Killustikult		16	31	60	73	65	27	4				

Tabel 8.

Roopa sügavus 16/32 sektsioonis

			Roopa sügavus							Tsüklite juurdekasv	roopa suurenemine			
					serv	keskel	serv				serv	keskel	serv	
			Kuupäev	Tsüklid	50	60	70	80	90		100	110	70	80
Ristlõike punkt 3, 16/32	15.02.2013	0	11	12,1	13,5	14	12,1	11	9					
	19.02.2013	8900	10,9	12	14,1	14,1	12,5	10	9	8900	0,6	0,1	0,4	
	25.02.2013	17749	10,7	12	14,1	14,8	13	10,8	9	8849	0	0,7	0,5	
	28.03.2013	96000	10,9	12,5	18	20,5	18	11,5	9	78251	3,9	5,7	5	
	6.05.2013	210222	10,9	12	28	27	26	9	8	114222	10	6,5	8	
	7.05.2013	Külmutus tööle, ratas sõidab ööpäevaringselt												
	8.05.2013	245417	11	12	29	27	27	9,5	8,1	35195	1	0	1	
	10.05.2013	280039	11,2	12,8	30	30	28	10	9	34622	1	3	1	
	21.05.2013	325982	10,9	12,3	29	28,8	27	9	8	45943	-1	-1,2	-1	
	21.05.2013	Ratas seisma ja külmutus tööle kuni 3. juunini												
	3.06.2013	Ratas sõitma, öösel külmutab, ratas seisab ja päeval sulatab, ratas sõidab. Kattele kohe puhast vett												
	6.06.2013	408619	10,9	12,5	42	47	44	9	8	82637	13	18,2	17	
	6.06.2013	Kattele esimest korda soolvesi												
	7.06.2013	416586	10,8	12,1	46	50	48	9	7	7967	4	3	4	
	10.06.2013	447074	10	12	55	62	56	7,9	7,5	30488	9	12	8	
	11.06.2013	462232	-	-	60	68	63	-	-	15158	5	6	7	
	12.06.2013	474603	-	-	63	71	64	-	-	12371	3	3	1	
	17.06.2013	486634	9,9	11	69	75	69	9	7,4	12031	6	4	5	
	18.06.2013	496962	-	-	70	78	71	-	-	10328	1	3	2	
	19.06.2013	511527	-	-	75	82	75	-	-	14565	5	4	4	
	21.06.2013	529193	-	-	80	87	81	-	-	17666	5	5	6	
	Killustikult		3	5	63	76	62	4	-3					

Tabel 9.

Roopa sügavus 0...32 sektsioonis

Ristlõike punkt 4, 0/32			Roopa sügavus						Tsüklite juurdekasv	roopa suurenemine			
					serv	keskel	serv				serv	keskel	serv
	Kuupäev	Tsüklid	50	60	70	80	90	100		110	70	80	90
	15.02.2013	0	8,5	10	11	11,5	10,5	10,2	10,6				
	19.02.2013	8900	8,1	9	10	11,8	11,1	9,8	8,9	8900	-1	0,3	0,6
	25.02.2013	17749	8,1	9	10,2	12,4	11,5	10,6	9,6	8849	0,2	0,6	0,4
	28.03.2013	96000	8,2	9,5	15	18	15	11	9,8	78251	4,8	5,6	3,5
	6.05.2013	210222	8,5	9,5	30	30	28	8	9,6	114222	15	12	13
	7.05.2013	Külmutus tööle, ratas sõidab ööpäevaringselt											
	8.05.2013	245417	9	9,5	31	30	28	8,4	9,7	35195	1	0	0
	10.05.2013	280039	8	9,9	30	31	29	7,7	9,9	34622	-1	1	1
	21.05.2013	325982	8,2	9,9	33	33	31	7,5	10	45943	3	2	2
	21.05.2013	Ratas seisma ja külmutus tööle kuni 3. juunini											
	3.06.2013	Ratas sõitma, öösel külmutab, ratas seisab ja päeval sulatab, ratas sõidab. Kattele kohe puhast vett											
	6.06.2013	408619	8,6	10	40	43	39	8,5	10	82637	7	10	8
	6.06.2013	Kattele esimest korda soolvesi											
	7.06.2013	416586	8	9,5	44	45	43	8	10	7967	4	2	4
	10.06.2013	447074	8	9	52	53	48	7	9	30488	8	8	5
	11.06.2013	462232			54	61	59			15158	2	8	11
	12.06.2013	474603			58	58	55			12371	4	-3	-4
	17.06.2013	486634	6,5	7	59	63	56	7	7	12031	1	5	1
	18.06.2013	496962			63	66	60			10328	4	3	4
	19.06.2013	511527			68	71	62			14565	5	5	2
	21.06.2013	529193			72	81	75			17666	4	10	13
	Killustikult		0	2	15	63	51	10	0				

Esimesed tsüklid katsekehal sõideti **15. veebruar 2013**. Nagu näha, toimus katsetamine alguses ettevaatlikult ja vähe korraga. Väga suur hüpe mõõdetud andmetes on vahemikus 28.03 ja 06.05 nii ajalises kui tsüklilises mõttes. Probleem selle ajaperioodiga oligi rattakonstruktsiooni lagunemine ja katsetamine ning andmete kogumine oli väga heitlik.

Esimesed 210000 tsüklit tehti nõ tavatingimistes ehk ei muudetud temperatuuri ega lisatud vett. Tabelist 6 lähtuvalt oli roopa areng igas sektoris mõõdukas ja enam-vähem võrdne. Ääresektorites tekkis suurem rooba, kui keskel, kuid see on selgitatav ratta liikumiskiiruse aeglustumisega äärtes. Tiheda asfaltbetooni poorsus oli 3,3% ja poorse 7,8%, kihipaksuses vastavalt 4 ja 6cm. Teoreetiline kihipaksuse vähenemine sellest sai olla makimaalselt 6mm, kui tegelikkus oli kuni 3x suurem. Vaadates tabelist 6 äärmiste mõõtepunktide arengut näeme, et enamus muutuvad sel perioodil suuremast väiksemaks ning nende areng peatub kohe, kui pannakse tööle külmutus ehk roopa tekke põhjuseks sel ajal oli asfaltbetooni nihkumine külgedele (fotod 27 ja 28).



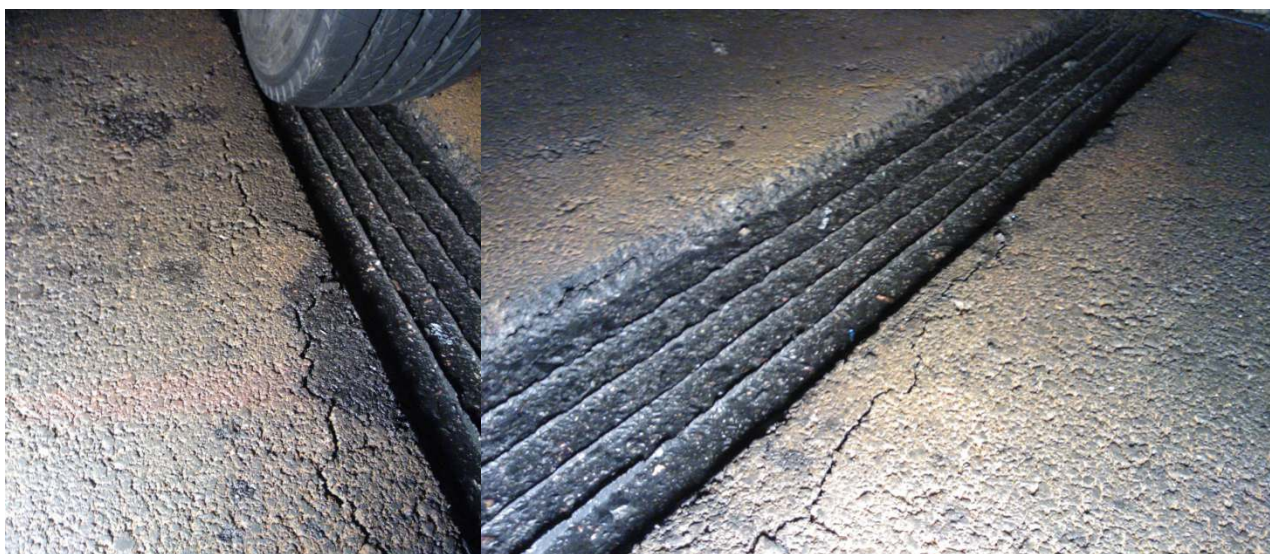
Fotod 27 ja 28. Olukord enne külmutamisega alustamist ehk peale ca 200000 tsükli läbimist, kuupäevaks 6. mai. Autor Sven Sillamäe

Külmutamisega alustati 07.05 ja paralleelselt jäeti ka koormusratas ööpäevaringselt sõitma. See toimus kuni 21. maini ja kokku läbiti ca 116000 koormustsüklit. Vaadeldes roopa arengut sel perioodil näeme, et see on väga marginaalne kui mitte täiesti olematu. Külmutamine sel perioodil ei õnnestunud selle mõttes, et miinustemperatuure asfaldis ei suudetud kordagi fikseerida, kuigi külmutusseade oli reguleeritud -15°C . Sel perioodil toimus üks seisak, kuna kahtlustati külmutusseadme viga, mida siiski ei tuvastatud. Varsti selgus, et ratta liikumine tekitab niipalju soojust, et külmutusseade ei suuda seda kompenseerida. Seade jäätus pidevalt kinni ja läks sulatusrežiimi, seetõttu tõusis ka katte temperatuur (v.t tabelit 10). 21. mail seisati koormusratta töö kuni 3. juunini. Kogu selle perioodi jooksul töötas külmutusseade -15°C ilma probleemideta.

Külmutamine lõpetati ajal, kui fikseeriti negatiivsed temperatuurid 65cm sügavusel katte pinnast. Sügavamale külmutamine oleks kulutanud liialt aega, mistõttu seda ei peetud otstarbekaks. Samuti poleks sügavamal külm püsinud seoses välistemperatuuriga ja uuesti külmutamine näiteks 1m sügavuseni katte pinnast oleks võtnud uuesti terve nädala. Ehk siis külmutusseadmega hoiti negatiivseid temperatuure kogu külmutustsüklite tegemise aja killustiku alumises pinnas.

3. juunil alustati uuesti koormamist ja kattele lisati puhast vett. Öösel toimus külmutamine -15°C juures ning ratas seisis ja päeval hoiti konstantset temperatuuri külmutusseadmega $+5^{\circ}\text{C}$ ringis eesmärgiga mitte lasta konstruktsiooni üles sulada ning koormusratas töötas. Lülitades külmutuse päeval täiesti välja tõusis temperatuur kattel kiiresti kuni $+17^{\circ}\text{C}$ (maksimaalne, mida nähti enne külmutuse uuesti sisselülitamist). Tabelis 10 on toodud mõõdetud kattetemperatuurid kuupäevaliselt.

Peale külmutustsüklitega alustamist ja vee lisamist hakkas roopa areng toimuma kordades kiiremini, kui lihtsalt koormates (võrdle tabelist 6) ning kattele ilmusid kiirest vajumisest praod (fotod 29 ja 30) Roopa areng kiirenes veel oluliselt peale soolvee lisama hakkamist. Tabelis on esitatud vee lisamine liitrites kuupäevaliselt ja lisaks soola hulgad.



Fotod 29 ja 30. Tulemus pärast vee lisamist ja külmutustsüklite sooritamist, kuupäevaks 6. juuni ja tsüklite arv ca 400000. Autor Sven Sillamäe

Tabel 10.

Lisatud vee ja soola hulgad ning fikseeritud temperatuurid

Kuupäev	Vesi, l	Sool, g	Temperatuurid	
3.juuni	26	-	19.veebr	8,5
4.juuni	16	-	25.veebr	10,6
6.juuni	10	-	29.märts	13,1
6.juuni	30	160	7.mai	12,5
7.juuni	10	-	8.mai	5
7.juuni	10	70	9.mai	4,5
11.juuni	30	-	10.mai	17
12.juuni	10	100	17.mai	17
12.juuni	10	-	21.mai	15
13.juuni	20	-	22.mai	1
13.juuni	10	50	24.mai	-8,5
17.juuni	40	200	27.mai	-12,8
18.juuni	40	150	29.mai	-12,2
19.juuni	60	300	31.mai	-10,6
Kokku	322	1030	3.juuni	-2,8
Konsentratsioon	0,3%		4.juuni	-4,5
			12.juuni	-1,3
			17.juuni	-9
			18.juuni	-4
			19.juuni	-2,4
Öösiti külmutati -15 kraadiga Päeval hoiti konditsioneeris vahemikus +5...+1 kraadi Päeval püsis katte temperatuur kuni +6 kraadi peal				

Näiliselt lähevad tabelis 10 esitatud temperatuurid vastuollu eelneva infoga seoses külmutamise pikkusest. Tegemist oli juhtumitega, kui külmutusseade liiga lülitas end liiga suure koormuse tõttu välja ja katte peale tekkis ajutiselt soojust. Nagu öeldud, ei olnud võimalik hoida külmutusseadet ja koormusratast tööl samaaegselt ja see kajastub ka tabelis 10. Pärast „ööpäevase rütmi“ sissetoomist, kui öösiti külmutati ja ratas seisis ning päeval hoiti konstantset temperatuuri ja ratas töötas, kõik normaliseerus ja oli võimalik teha külmutus-sulatustsükleid.

Kokku tehti 12 külmutus-sulatustsüklit pärast mida oli kate niivõrd deformeerunud, et katsega ei olnud võimalik enam jätkata.

4. TULEMUSED

4.1 Muldkeha ja drenkiht

Muldkeha materjaliks oli kasutatud pestud paekivisõelmeid ja Männiku hästifiltreeruvat drenliiva kõrvuti. Nende peal asetseb Männiku liivast 20cm dreenkiht. Killustiku all olevalt drenkihilt ei olnud võimalik mõõta mitte ühtegi deformatsiooni. Vajumiandur fikseeris kuni paari millimeetri suuruse liikumise, kuid mida konstruktsiooni lahtivõtmisel latiga mõõta ei suudetud (foto 31). Täpselt sama lugu oli muldkeha pinnaga.



Foto 31. Killustikualune pind oli täiesti tasane. Autor Sven Sillamäe

Tabelis 3 esitati paesõelmete terastikulised koostised puistest ja pärast tihendamist, samas peatükis esitati ka „sissevalamiskatse“ tulemused enne ja pärast katset ning lõikerõnga tulemused. Tabel 11 täiendab puuduvaid andmeid pärast katset. Kahjuks aruande kirjutamise ajal avastati, et kaks paesõelmete proovi on jäänud laborisse analüüsimiseks viimata ja seega on need andmed puudu. Analüüsimiseks on kasutada vaid kahe proovi andmed, millest esimene proov on võetud drenkihi alt ja teine pingandurite ümbrusest ca 10cm sügavamalt. Puuduvate proovide tulemused selguvad pärast aruande esitamise tähtaega.

Drenkihi alt olevast materjalist võetud lõikerõnga proov näitas tihendustegurit 0,92 ja andurite vahelt 0,915 (tabelis 4 toodud väärtused olid 0,86 ja 0,85). Seega on materjal katse käigus

tihenened, kuid siiski mitte tasemeni 1,0. Kahe analüüsi põhjal näeme ka, et materjal on veidi peenenenud, mis siiski ei mõjutanud filtratsioonimoodulit „sissevalamiskatsel“. Sama materjali filtratsioonimõõtmisel laboris ei annaks usaldusväärseid tulemusi, kuna materjali katsesilindrisse tihendamine purustab tõenäoliselt materjali veelgi.

Paekivisõelmete puhul oleks vaja määrata materjali terastikuline koostis enne ja pärast laboratoorset filtratsioonimõõtmist. Uuringuga jätkatakse ka pärast antud projekti lõppemist, seega andmeid on veel tulemas.

Tabel 11.

Pestud paekivisõelmete ja kvartslüüa terastikuline koostis pärast katset

Materjal	6,3	2	1	0,63	0,425	0,2	0,1	0,06	0,02	0,006	0,002	Peenos
Dreenikihi alt	99,9	76	55	45	37	23	13	7	4,6	2,7	1,4	7,1
Andurite vahelt	100	73,5	51,8	41	31,5	19	11	6,7	4,4	2,4	1,2	6,7
Dreenikihi keskelt	99,4	96	84,5	65	36	1,9	1	0,9	0,6	0,4	0,3	0,9
Dreenikihi pealt (4...32)	99,2	96,5	85,8	71,6	42,5	3,1	1,4	0,7	0,5	0,2	0,1	0,7
Dreenikihi pealt (16...32)	99,3	96,6	86,3	71,1	44,7	4,6	2,1	1,5	1,4	0,8	0,3	1,5

Asfaldi ja killustiku eemaldamise järel mõõdeti Inspector III-ga ka kandevõimeväärtused, mille tulemused on esitatud tabelis 12.

Tabel 12

Kandevõimed ja tihendustegurid pärast katsetust dreenkihilt ja muldelt

Kiht	Asukoht	Materjal	Inspector
Dreenkiht	Rattajalg	Kvartsiiv	208MPa (tihendustegur valemiga 0,96!!)
Dreenkiht	Rattajalg	Kvartsiiv	187MPa (tihendustegur valemiga 0,95!!)
Dreenkiht	Jälje kõrvalt	Kvartsiiv	170MPa (tihendustegur valemiga 1,01)
Dreenkiht	Kihi keskelt	Kvartsiiv	190MPa (tihendustegur valemiga 1,01)
Muldkeha	Dreenihi alt	Paeliiv	201MPa (tihendustegur valemiga 0,96)
Muldkeha	Dreenihi alt	Paeliiv	248MPa (tihendustegur valemiga 1,01)
Muldkeha	Dreenihi alt	Paeliiv	239MPa (tihendustegur valemiga 1,00)
Muldkeha	Dreenihi alt	Paeliiv	265MPa (tihendustegur valemiga 1,00)
Muldkeha	Dreenihi alt	Paeliiv	219MPa (tihendustegur valemiga 1,03)
Muldkeha	Dreenihi alt	Paeliiv	193MPa (tihendustegur valemiga 0,96!!)
Muldkeha	Dreenihi alt	Kvartsiiv	211MPa (tihendustegur valemiga 1,01)
Muldkeha	Dreenihi alt	Kvartsiiv	228MPa (tihendustegur valemiga 1,02)
Muldkeha	15cm sügavuselt	Paeliiv	190MPa (tihendustegur valemiga 0,96)
Muldkeha	15cm sügavuselt	Paeliiv	175MPa (tihendustegur valemiga 0,99)
Pärast "sissevalamiskatset" samas kohas (materjal märg)			
Muldkeha	15cm sügavuselt	Paeliiv	139MPa (tihendustegur valemiga 1,01)
Muldkeha	15cm sügavuselt	Paeliiv	130MPa (tihendustegur valemiga 1,01)
Muldkeha	15cm sügavuselt	Kvartsiiv	181MPa (tihendustegur valemiga 0,98)

4.2 Killustik

Killustike katsejärgsed terakoostised on näidatud tabelis 13 (täiendatud versioon tabelist 2).

Tabel 13.

Killustike terakoostised puistest, pärast tihendamist ja pärast katsetust

Materjal	40	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,063
0...32 min	100	85	63	43	30	22	15	5	0
0...32 max	100	99	77	57	42	33	30	15	3 (-3/+4)
0...32 puistest	-	95	76	57	38	26	19	15	8,8
0...32 tihendatud	-	99	78	60	43	33	24	19	11,2
0...32 ratta alt	-	100	73	57	40	30	23	19	12,3
4...32 min	100	89	45	22	0	0	-	-	0
4...32 max	100	99	72	52	20	0	-	-	3 (-3/+4)
2...32 min	100	85	58	30	5	0	-	-	0
2...32 max	100	99	75	51	25	5	-	-	3 (-3/+4)
4...32 puistest	100	98	69	35	12	8	-	-	4,6
4...32 tihendatud	100	98	60	31	15	11	-	-	5,7
4...32 ratta alt	100	99	71	42	23	17	-	-	9,9
16/32 puistest	100	94	9	-	-	-	-	-	1,6
16/32+4/16 puistest	100	99	30	6	5	4	-	-	2,6
16/32+4/16 tihendatud	100	99	38	16	11	9	-	-	4,6
16/32+4/16 ratta alt	100	95	39	17	12	10	-	-	7,5

Terastikuline koostis on peenenenud igal juhul ja seda märkimisväärselt. Arvestades seda, et drenkihi pealt ei mõõdetud mittemingisugust vajumit, on kogu roobas tekkinud asfaltbetoonist ja killustikust. Peale asfaldi eemaldamist ja ristlõigete sissekaevamist mõõdeti ka killustikukihtide järelejäänud paksusi võrreldes koormuses puutumata osaga. Tulemuseks oli, et kõikide killustike kihipaksused enne katset olid 24,5cm ja ristlõigete kaevamise kohast 4...32 ja 16...32 vahelisel alal 18cm ja 16...32 ning 0...32 vahelisel alal 19cm. Ehk võib öelda, et killustike kihipaksuses vähenesid katse käigus umbes 6cm nagu näitas ka mõõdetud roobas killustiku peal (fotod 32...35).



Fotod 32 ja 33. Killustiku pinda tekkinud roobas. Paremal pool on 4...32, keskel 16/32 ja vasakul 0...32. Pane tähele, kuidas peenosid on liikunud 0...32 peal 16/32 peale. Autor Sven Sillamäe



Fotod 34 ja 35. Fotod killustike 4...32 ja 16/32 pealt. Autor Sven Sillamäe

Killustik eemaldamisel oli võimalik näha nende konsistentsi. Katset hakati lammutama augusti lõpus 2013, kuid katsekeha koormamine lõppes 19. juuni. Killustikke eemaldades olid ratta jäljes fraktsioonid 4...32 ja 16...32 väga niisked ja kinnaste külge kleepus palju peenosiseid (foto 36). 0...32 oli see-eest täiesti kuiv, kuid väga tugevalt kokku pakkunud (foto 37). Järelikult sidumata segu filtreeris väga halvasti kui üldse.



Fotod 36 ja 37. Fraktsioonid 16/32 ja 4...32 olid väga niisked ja peenosis kleepus kinnaste külge kui savi, kuid 0...32 oli täiesti kuiv. Foto all on näha liiva sisse paigaldatud pingeandurit. Autor Sven Sillamäe

Pärast killustiku eemaldamist jäi drenikihti katma teise profiili geotekstiil, mille eemaldamisel paljastus pind, mis rattajälje kohal oli kaetud paekivitolmuga, mis sinna oli sattunud tõenäoliselt killustiku purunemisel (foto 38). Tolmu kuivades oli võimalik eraldada sellest kergelt kivistunud tükke ehk drenikihi peale oli tekkinud koorik. Kooriku paksus mõõdeti üles ja tulemused olid järgmised (foto 39):

- 4...32 – 15...30mm;
- 16/32 – 15mm;
- 0...32 – 3...5mm.



Fotod 38 ja 39. Tolm, mis oli settinud killustikukihtide alla. Autor Sven Sillamäe

Fraktsioneeritud killustiku ja ridakillustiku puhul oli paetolmu vaid rattajälje all, kuid sidumata segu puhul laiemas ulatuses. See viitab sellele, et viimase puhul jaotus kattele kallatud vesi asfaldi all

suuremale alale ja filtreerus läbi materjali oluliselt aeglasemalt (fotod 40 ja 41). Sellele viitab ka tehtud kloriidide analüüs, mis ei näidanud olulisemat madalamat kloriidide sisaldus sidumata segu all olevas kihis, kui mujal. Järelikult pidi soolvesi ka sealt läbi imbuma. Soola kontsentratsioon erinevates punktides on esitatud tabelis 14. Leitud paekivitolmust võeti proovid ning määrati nende terastikulised koostised (tulemused tabelis 15) ja ka filtratsioonimoodul tavalise Sojuždornii meetodil (tulemused tabelis 14).



Fotod 40 ja 41. Tolm, mis oli settinud killustikukihtide alla. Autor Sven Sillamäe

Tabel 14.

Kloriidide sisaldused ja killustiku alt võetud paetolmu filtratsioonimoodul Sojuždornii meetodil

Kloriidide sisaldus pärast katset	%		
puhas liiv	0,0007		
puhas paeliiv	0,0007		
puhas killustik	0,0014		
dreenikihi põhjast 16/32	0,0036		
dreenliiva keskelt 16/32	0,0028		
andurite ümbert paeliivas	0,0168		
paeliiv drenikihi alt 16/32	0,0178		
0..32 paetolmust	0,0149		
0...32 killustikust	0,0057		
4..32 paetolmust	0,0199		
16/32 paetolmust	0,023		
4...32 killustikust	0,0227	Sojuždornii, 3x25, m/ööp	ρ_d, g/cm³
4..32 alt drenikihi keskelt	0,0028	32,74	1,71
4..32 paetolmust	-	11,26	1,69
16/32 alt drenliivast otse paetolmu alt	-	2,11	1,77

Tabel 15.

Killustike all olnud paekivitolmu terastikulised koostised

Paetolm	6,3	2	1	0,63	0,425	0,2	0,1	0,06	0,02	0,006	0,002	Peenos
4...32 alt	97,5	94,7	84,7	73,4	50	16,4	14,6	14,4	11,5	7,8	3,8	14,4
4...32 alt	98,4	94,8	84,7	71,8	46,2	12,2	10,2	9,6	8,7	5,7	2,5	9,6
16/32 alt	99,1	95,5	83,9	67,6	41,7	11,5	10,7	10,5	7,4	5,3	2,3	10,5
0...32 alt	98,3	94	82,5	70	42	11,9	10,4	8,8	6,9	3,9	1,8	8,8

Paetolmule ja lisaks 10cm sügavuselt drenkihist võetud proovile määrati nende keemiline koostis leidmaks, kuivõrd palju sisaldub proovis kvartsiiva ja palju paetolmu. Tulemused on esitatud tabelis 16. Kvartsiiva näitaja on SiO₂, karbonaatse kivimi näitajad on CaO ja MgO, savi iseloomustavad põhiliselt Al₂O₃ ja K₂O.

Tabel 16.

Keemilise koostise analüüs paekivitolmule drenliival ja drenliivale 10cm sügavuselt võetud proovist

Komponent	Paetolm	16/32 alt 10cm drenliivast	4/32 alt 10cm drenliivast
SiO ₂	85,04	90,73	89,63
Al ₂ O ₃	3,68	3,9	4,08
CaO	3,55	0,6	0,6
Fe ₂ O ₃ üld	0,6	0,45	0,5
MgO	0,43	0,22	0,24
MnO	0,013	0,01	0,01
TiO ₂	0,06	0,05	0,06
P ₂ O ₅	0,06	0,06	0,06
K ₂ O	1,35	1,3	1,37
Na ₂ O	0,98	0,91	0,84

Tulemuste kohaselt on nn paetolm siiski enamuses kvartslüiv, milles ~5% paekivi ja ~4% saviosakesi. Paekivikillustikust on siiski saviosakesi jõudnud ka drenkihi keskele. Analüüs näitab, et savisisaldus materjalis on 4%. Mis ta algselt oli, ei ole teada, kuid kui vaadata tabelist 3 drenkihi terastikulist koostist näeme, et ka see viitab savisisalduse väiksele kasvule.

4.3 Asfaltbetoon

Peatükis toodi esile asfaltbetooni iseloomustavad näitajad. Selgus, et tegelik kate koosnes hoopis MUKist ja selle peale paigaldatud tihedast asfaltbetoonist. Katsekeha lammutamisel selgus, et MUK oli tiheda asfaltbetoonikihi all täiesti ära lagunenenud. Peaaegu iga üksik täitematerjali komponent oli visuaalsel vaatlusel üksteisest eraldi. Sideaine kattis vaid täiteaine materjaliosakesi, kuid ei hoidnud kihti enam koos. Sideaine oli täiesti kristalliseerunud ja rabe (fotod 42 ja 43).



Fotod 42 ja 43. Alumine asfaltbetoon oli lagunenud ja bituumen kristalliseerunud. Autor Sven Sillamäe

Paekivikillustikest oli peenosis tunginud MUKi alakihti ja tihti oli raskusi eristamaks, kust lõpeb sideainega seotud ja kust algab sideainega sidumata kiht. Kahte kihti oli võimalik omavahel eristada ja eraldada vaid katse alguses paigaldatud õhukese marlitüki abil. Eriti halb oli olukord 0...32 juures, kus peenosis ja taoline segunemine oli jõudnud tiheda asfaltbetoonkihi alapinda välja (fotod 44 ja 45). Ehk dūnaamiline koormus ja vee lisamine hakkas 0...32 peenosiseid välja pesema ja see võis olla üheks teguriks, miks ka sinna tekkis samasugune roobas kui mujalegi.



Fotod 44 ja 45. Dūnaamiline koormus ja vesi on pesnud 0...32 killustikust peenosise kõrvalolevasse 16/32 peale ja asfaltkihi vahele. Autor Sven Sillamäe

Kõige vähem oli peenosiseid MUKis 16/32 peal ning 4..32 jäi kahe vahepeale.

Purunenud MUKile ekstraheerimist ja terastikulise koostise analüüsi ei tehtud, kuna algselt seda ei peetud vajalikuks, kuid kogu materjal on veel alles ning vajadusel analüüsitav (foto 46).



Foto 46. Koormusratta alt kogutud MUK on veel alles. Materjaliosised on kaetud paekivitolmuga.

Autor Sven Sillamäe

Töö autor on seisukohal, et MUKi ekslik kasutamine poorse asfaltbetooni asemel tuli katse tulemusi analüüsides pigem kasuks kui kahjuks. Selgitus sellele järgmises peatükis.

4.4 Tulemuste analüüs ja teise konstruktsiooni katsetus

Kohe pärast analüüsitava katsekeha lammutamist ehitati uus konstruktsioon (foto 47) järgmiste andmetega:

- paekiviliivast muldkehaosa ei eemaldatud ja jäeti alles. Eesmärk uurida, kuivõrd muutuvad pestud paekivisõelmete omadused edasi katsetades ca poole aasta jooksul.
- kvartslüivast muldkehaosa segati 0,5m ulatuses läbi pestud paekivisõelmetega vahekorras 50/50.
- drenkihi asemel kasutatakse kvartslüiva ja pestud paesõelmete segu vahekordades 30/70 ja 50/50 kõrvutiasetsevate kihtidena.
- killustikaluse paksus on 25cm, killustikuks Vão lubjakivikarjäärast toodud ridakillustik 4...32.
- konstruktsioon on kaetud 7cm paksuse mustseguga.



Foto 47. Lisakatsetus. Autor Margus Vaino

Lisakatsetuste eesmärk on uurida pestud paekivisõelmete pikemaajalist vastupidavust pideva koormamise all. Talvel on plaanis alustada ka külmutus-sulatustsüklitega. Samuti uuritakse, kas ja mil määral materjali käitumine muutub segades seda kvartslüivaga. Sellega loodetakse leida selgemaid vastuseid paekivisõelmete kasutusvõimaluste kohta.

Esimene katseseeria eelpoolnimetatud konstruktsiooniga on läbi viidud. Tehtud tsüklite arv oli 165000, koormuseks 2,5t ja rehvirõhk 0,8MPa. Kuna põhieesmärk on vaadelda paekivisõelmeid, kasutatud killustiku tugevusomadusi veel ei määratud.

Katse tulemusel purunes kasutatud killustik täpselt samamoodi, kui antud katse puhulgi. Tulemused on veel analüüsimisel, kuid killustiku kihipaksus oli vähenenud ca 7cm ja oli visuaalsel hinnangul tugevalt purunenud (fotod 48 ja 49). Kiire muutus roopa suuruses ja vajumises hakkas toimuma peale vee lisamist.



Fotod 48 ja 49. Ka teises katses oli probleemiks vaid killustik ise, mis koormuse käigus purunes oluliselt. Autor Margus Vaino

Katse alguses sooritati ca tuhat koormustsükli kuivalt ja mustsegu peale tekkis 3mm roobas. Seejärel järgneva 10000tsükli käigus vett ei lisatud ja roobas arenes edasi 1mm.

Pärast 11000tsükli kuivalt läbimist hakati lisama mustsegu peale vett. Järgneva 10000tsükli jooksul arenes roobas edasi 10mm ja veel 8500 tsükli järel 6mm. Ehk vesi oli see, mis muutis paekivikillustiku pehmeks. Lõppkokkuvõtteks väheneski kihi paksus ca 70mm kusjuures drenikihi pealt ei fikseeritud ühtegi vajumit.

Paekivikillustik on poorne materjal, mis imab endasse vett ja muutub seetõttu pehmemaks. Mis on see „pehmenemise“ protsent, pole teada. Seetõttu hakkab raske dünaamiline koormus materjali purustama. Viidatud allikas [8] tõi tulemuseks välja, et paekivikillustiku terastikulises koostises pärast koormamist dünaamilise koormusplaadiga praktiliselt muutusi polnud, samuti oli kogu vajumine tekkinud drenliivas. Selle katse puhul vett kattele ei lisatud ja ei muudetud ka temperatuure. Ehk tulemus praeguste katsete puhul on vastupidine. Tulemuste suures esinevuses on kindlasti põhjus kasutatud koormamise viisil ja sellel, et esimesel juhul kasutatakse jäika koormusplaati ja koormamist läbi selle ning teisel juhul rehvi ja liikuvat koormamist. Kuid miks rattakoormuskatses drenkiht ei deformeerunud, kuigi koormus oli suur? Üheks põhjuseks võib olla see, et killustik muutus vee mõjul pehmeks ja kompenseeris deformatsiooni niimoodi.

Mustkillustiku kihis olevad täitematerjaliosad ei purunenud katse käigus, kuigi oli valmistatud samuti paekivikillustikust. See näitab, kui oluline on katta paekivikillustik ainega, mis sulgeks selle poorid, näiteks bituumeniga. Mustkillustikku on võimalik valmistada kuumalt siltekst bituumenist või ka külmalt bituumenemulsioonist.

MTÜ Eesti Asfaldiliidu 40. asfaldipäeval 28.11.12 oli ettekanne kompleksstabiliseerimise teemal, mis põhines TTK katseseadmes tehtud katsetusel dünaamilise koormusplaadiga. Ettekandes oli tsiteeritud Kuuno Meschinit, kes ütles ühes kirjavahetuses järgmist: „...on tõestatud, et kui lubjakivi on kaitstud kelmega, siis ta peab vastu agresiiivsele keskkonnale. Näiteks lubjakivikillustiku baasil tehtud betoonkuubikud, mis on nõuetekohase õhusisalduse ja vesitsementteguriga peavad vastu 5% NaCl lahuses üle 500 tsükli /.../. Oluline on, et lubjakivi oleks kaitstud kloriidide eest ka bituumeni või emulsiooniga. Tuleks uurida eri bituumenmaterjalide kaitseomadusi lubjakivikillustikule /.../.“ Kompleksstabiliseeritud kiht koosnebki sideainete poolest bituumenist ja tsemendist, mis mõlemad kaitsevad paekivikillustikku.

Asfaldiliidu ettekandes toodi välja ka katsetuse tulemused. Esimesed miljon tsükli, mis tehti „kuivalt“ tekitasid koguvajumiks 3mm. Seejärel alustati külmutus-sulatustsüklite ja soolvee lisamisega ning sellega lisandus veel 4mm vajumit. Ehk kokkuvõtteks pärast 5miljonit koormustsükli vajus teekonstruktsioon kokku vaid 7mm. See katse tehti küll dünaamilise koormusplaadi mitte liikuva rattaga, kuid võrreldes tulemusi viidatud allikaga [8] saame tulemuseks, et stabiliseeritud kihti sisaldav katendikonstruktsioon oli kordades vastupidavam kui vaid killustikalust sisaldav katend.

Mustkillustikul ja eriti stabiliseeritud kihil on omad puudused ja ohud, millega hetkel ei osata arvestada, kuid nagu näha, soovides kasutada teedehituseks pigem kohalikke materjale kui importmaterjale, tuleks teemaga tegeleda.

Analüüsides veel täpsemalt rattakoormuskatse tulemusi, vaatleme näite asfalditõmbe- ja killustiku all ratta jälje kõrval paiknevatelt pingeanduritelt ning üritame siduda tulemused ajalise teljega. Andurite maksimaalsed näidud on esitatud tabelis 17. Võrreldes tulemusi tabelis 6 esitatuga näeme, et põhiprobleemid vajumises hakkasid pihta pärast vee lisamist. Vee, külmutamise ja koormustsüklitega alustati 3. juuni. Enne seda konstruktsioon külmus ja enne seda üritati külmutada ja koormata samaaegselt. Perioodil, mil toimus külmutamine ja mil ratas sõitis, praktiliselt ühtegi vajumist konstruktsioonis ei toimunud. Asfalditõmbeandurid näitasid sel ajal konstantset väärtust ehk asfaldi alapinnas liikumisi ei toimunud.

Peale vee lisamist toimus väike viivitus ja peale 6. juunit näeme suurt muutust nii asfaldiandurite kui 4...32 oleva pingeanduri näituses. Kõrvutades kõike seda roopa tekke arenguga näeme, et

tõenäoliselt just sel ajal purunes MUKi kiht laiali ehk bituumen muutus väga rabedaks ja klaasistus ning killustik muutus pehmeks lubades aluspinnasele järjest suuremaid pingeid.

16/32 puhul pingeandurite näidud suurenesid oluliselt hiljem. Tõenäoline selgitus on see, et kuna materjal on oluliselt paremini filtreeruv, jäi vesi sinna pidama alles peale teatud purunemisastet või teatud veehulga juures.

0...32 fraktsiooni puhul pingeanduri näit oli konstantne kogu katse jooksul. Põhjus peitub selles, et materjal ei võtnud endale vett sisse ning seetõttu ei muutunud ka pehmeks. Samuti jaotas sidumata segu algusest peale võrreldes teistega pingeid paremini, kuna suur peenosiste sisaldus tekitas materjalile suurema survetugevuse.

Tabel 17.

Asfalditõmbeandurite ja pingeandurite näidud seoses kuupäevade ja tsüklite arvuga

		Algnäit	24.veebr	28.märts	7.mai	10.mai	6.juuni	7.juuni	10.juuni	11.juuni	13.juuni	19.juuni
Asukoht	Tähis	Tsüklid	17000	96000	210000	280000	408000	416000	447000	462000	480000	511000
4...32	HAS4	5250	6100	8900	13800	13800	17300	17500	18500			
16/32	HAS5	3750	4600	8900	9100	9100	16100	16100	16300			
0...32	HAS6	5100	6400	9700	11700	11500	13000	13100	15300			
Tsüklite vahemik			17000	79000	114000	70000	128000	8000	31000			
4...32	HAS4		600	2800	4900	0	3500	200	1000			
16/32	HAS5		500	4300	3300	0	7000	0	0			
0...32	HAS6		600	3300	2000	0	1500	100	2200			
Pingeandurid												
4...32	KDE15	0	-	117	93	120	157	175	186	179	188	180
16/32	KDE10	0	-	-	88	89	121	110	117	150	175	197
0...32	KDE13	0	-	48	48	48	48	48	50	50	50	50

5. JÄRELDUSED, KOKKUVÕTTED JA SOOVITUSED

5.1 Pestud paekivisõelmed

Alustades pestud paekivisõelmetega näeme, et statistilisi andmeid on kindlate järelduste tegemiseks vähe. Siiski näeme materjali kalduvust puruneda peale tihendamist ja hetkel tundubki see olevat materjali suurim nõrkus. Lõikerõngaste analüüs näitas materjalil suurt alatihendatust võrreldes normides nõutuga. Samas katse ehitamisel ei olnud materjali siiski võimalik rohkem tihendada, kuna oli näha vibroplaadi all terade purunemist. Niiske materjal kippus tugevalt kleepuma vibroplaadi aluse külge. Terastikuline analüüs näitas, et tihendatava kihi peale tekkis ca 5cm paksune koorik, mille peenosiste sisaldus oli oluliselt suurem, kui selle all. Põhjuseks võib olla vibroplaadi poolt tekitatav tihendusefekt ja pinnaserullidega ei pruugi olukord olla nii hull. Olukord võib olla parem, kui tihendatakse õhemate kihtide kaupa staatilise rulliga või suuremate kihipaksuste puhul madalama vibratsioonisagedusega, et tihendusefekt mõjuks sügavamale, kui vaid pealmisesse pinda. Ka on siiaaani probleemiks objektipealne tihedusemõõtmistehnoloogia. Antud uuringus mõõdeti väga mitmeid punkte Inspectoriga, mis näitas piisavat tihedusastet, kuid lõikerõngameetod seda ei kinnitanud.

Inspectoriga mõõdeti kandevõimed tihendatud paesõelmete pealt kuivalt ja pärast sissevalamiskatset ehk märjalt. Kui muidu olid tulemused võrreldavad kvartsliiduga, siis pärast niisutamist langes väärtus ca 30% (võrdle andmeid tabelist 12). Kui [1] kohaselt on keskliiva elastsusmoodul 120MPa, siis antud loogika kohaselt võiks pestud paesõelmete arvutuslikuks elastsusmooduliks lugeda 90MPa. Viidatud allikas nr [paeliiva aruanne] pakuti pestud paesõelmete arvutuslikuks elastsusmooduliks 80MPa, mida praegune uuring ka kinnitas.

Materjali uuringud ja parimad kasutamismetoodikad on hetkel veel lisakatsete näol TTK laboris testimisel ja tulemused selguvad 2014 kevadel.

Pestud paekiviliiva tonni hind on 3,5EUR+km (andmed www.limestone.ee, 15.11.13) ja täiteliival 4EUR+KM (andmed www.liiv24.ee, 15.11.13). Pestud paesõelmete maksimaalne kuivmahumass on 2kg/m³ ja Männiku kvartsliidul 1,73kg/m³. Ühes kuupmeetris on pestud paesõelmeid 1,15 korda kaalu poolest rohkem, kui kvartsliidu. Korrutades paesõelmete hinna 1,15 saame hinnaks 4EUR, mis on sama, kui täiteliivalgi. Nagu uuringust selgus, on paesõelmete tihendamistehnoloogia ikka veel

küsitab. Materjal küll tiheneb näiliselt oluliselt paremini, kui kvartslüü, kuid kas see tegelikult ka ikka tihedaks saadakse. Pestud paesõelmetest ehitatud muldkeha maksumus materjali poolest tuleks sama, kuid sama mahu maanteetransport nõuab omakorda 15% suuremat veomahtu, mis tõstab ehituskulu transpordi osa kallimaks.

5.2 Killustik ja asfalt

Konstruksioon töötas hästi niikaua, kuniks kaasatud ei olnud vesi. Roobas arenes rohkem kasti äärtes, kuna seal oli ratta liikumiskiirus väiksem ja hakkas peale pidurdustekond. Kasti keskel tekkis asfaltbetooni ca 210000 koormustsükli läbimise tagajärjel 13mm sügavune roobas, millest suurem enamus, kui mitte kõik toimus vaid sideainega seotud kihtides.

Alustades paralleelselt koormustsüklite läbimisega külmutustsüklite tegemist, roopa areng ca 100000 koormustsükli järel oli 0...3mm.

Lisades külmutusele juurde ka vee, kiirenes roopa teke 1,5x 0...32 sektoris, 1,7x 4...32 sektoris ja 3,8x 16/32 sektoris. Peale soolvee lisamist kiirenes roopa teke veel omakorda vastavalt 2,2, 1,4 ja 2,4 kordselt (andmed arvatud tabeli 6 andmete kohaselt). Peale soolvee lisamist hakkas kiiresti lagunema alumine asfaldikiht (kiht tervikuna lagunes koost) ja killustikaluse killustik. 17. juunil laiendati ratta poolt sisse sõidetud kanalit, et asfaldiservad ei rikuks rehvi. Katte temperatuur sel hetkel oli +1...+3°C ringis ning asfaltkate oli täiesti rabe ja lagunes kergelt.

Üheks probleemiks katsekeha lahunemisel oli kindlasti asfaltbetoonis kasutatud bituumen ja selle vastupidavus madalatele temperatuuridele. Probleem võis samas olla ka selles, et öösiti kattele lastud külm ei suutnud päriselt külmutada killustikus olnud soolvett. Kõikidel hommikutel ei fikseeritud killustiku all alati negatiivseid temperatuure, mis osutas sellele, et ühe öö pikkune külm ei suutnud päriselt alati kompenseerida päeval ratta liikumisest ja vee juurdevalamisest sinna juurde tulnud soojust.

Kõige paremini pidas koormusele vastu 0...32. Roopa areng oli just selles kõige aeglasem ja enamus sellest tekkis tõenäoliselt peenosiste väljapesemise kaudu. Materjal ei olnud siiski üldsegi filtreeruv. Lahtivõtmisel on killustik kuiv ning ka pingeanduri näit ei fikseerinud katse käigus muutusi, mis viitas sellele, et materjali koormusjaotusvõime püsis läbi katse konstantne.

4...32 ja kiilutud 16/32 käitusid läbi katse väga sarnaselt, kuigi roobas tekkis viimases kiiremini ja rohkem. Mõlemad materjalid läksid vee mõjul pehmeks ja hakkasid purunema. Pingeandurite näitude põhjal „pehmenemine“ toimus ridakillustikus kiiremini, kui fraktsioneeritud materjalis ja põhjuseks

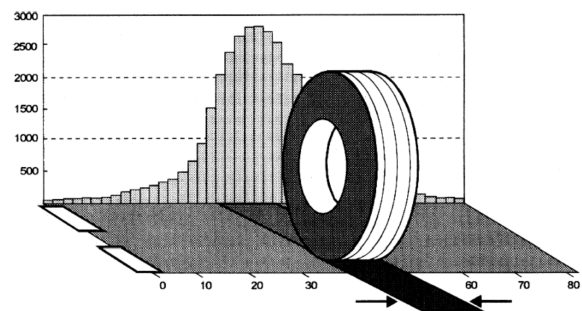
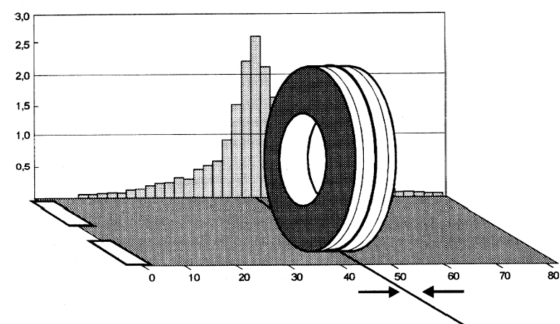
on tõenäoliselt erinevad filtratsioonimoodulid. 16/32 jõudis katse lõpus samasse punkti, kuna materjal oli selleks ajaks juba „piisavalt“ purunenud. 4...32 all oli kõige rohkem paekivitolmu segunenud drenliivaga.

Hoolimata kasutatud kasutatud killustikufraktsioonist, purunes paekivi vee mõjul kiiresti. Purunemine toimus vahetult asfaldi all ja vähenes järk-järgult kuni kihi lõpuni. Dreenkihil ühtegi vajumist fikseerida ei suudetud. Selles valguses on Eesti Maanteeameti otsus kasutada kõige kõrgemaklassiliste teede ehitamisel killustikaluse ülemises kihis tardkivikillustiku õige. Kohalike materjalide parema kasutuse huvides võiks kaaluda mustkillustiku või sellele sarnase materjali või stabiliseeritud kihtide kasutamist graniitkivikillustiku asemel.

Mis on selleks piiriks, alates kust võiks mitte aluste ülemistes kihtides enam paekivikillustikku kasutada? Seda on keeruline määrata, kuna paekivikillustik pidas koormusele väga hästi vastu selle hetkeni, kuniks seda kasteti veega, pärast mida hakkas väga kiire lagunemine ja mis ei olnud enam sõltuvuses tsüklite arvuga. Siinkohal võiks tuua uuesti sama järelduse, kui oli viidatud allikas [8] ehk paekivikillustikku tuleb kaitsta vee eest.

Kindlasti tuleb rõhutada seda, et tehtud katsetus oli võrreldes oludega looduses oluliselt kiirendatud ja mitmes osas liialdatud. Reaalselt saab teekonstruktsioon rohkem taastumisaega ja korruga kattele ning alusesse jõudva vee hulk on oluliselt väiksem. Katse siiski võimaldas võrrelda samades tingimustes töötavaid erineva fraktsiooniga killustikke.

Kokku sooritati katte peal 529193 koormustsüklit. Koormus rattale oli 3t ja rehvirõhk 0,8MPa. Enamasti toimus katsetamine ööpäevaringselt, ratas seisis vaid roopa mõõtmistel, öösiti külmutamisel ja tehniliste probleemide tõttu. Seetõttu sai katsetatav konstruktsiooni osaks väga suure koormuse. Ratas läbis kasti tsentrit iga 2,2sek järel ehk konstruktsioonile ei jäänud palju aega taastumiseks enne järgmist koormust. Ratta ülesõidul oli võimalik fikseerida visuaalselt asfaltkatte liikumine/vajumine. Lisaks sõitis ratas pidevalt ühes jäljes ja mitte mingisugust kõrvalekallet külgedele ei olnud. Tavapärasel liikluses toimub joonisel 5 kujutatul. Võttes aluseks vaid selle saame, et koormus oli normaalsest ca50% suurem. Võttes arvesse ka muud tegurid, on koormus veel suurem, kuid täpne number on veel selgitamisel.



Joonis 5. Teele mõjuvate koormuste hajumine, mida TTK katseseadmel ei ole [6]

KOKKUVÕTE

Tallinna Tehnikakõrgkooli katseseadmele ehitati aastal 2013 liikuv ratas, millega asendati seni koormamist teinud dünaamiline koormusplaat. Kaks katset on rattaga tänaseks läbi viidud ja seade on end õigustanud. Võib ausalt öelda, et täna on suurim probleem katseseadme kasutamisel ja tulemuste analüüsimiselt operaatori varasemate vastavate kogemuste puudumine ja tugev vajadus enesetäiendusele. Siiski on senised kogemused ja testtulemused andnud hea põhja, mida tuleb arendada edasi.

Uurimustöö põhitulemused on esitatud järgnevalt:

- paekivikillustik on hea ja tugev materjal kasutamiseks teede alustes kuniks see ei pea töötama raskeliikluse all väga niisketes oludes. Katse näitas, et vee lisamisel katsekehale, muutusid paekivi omadused momentaalselt ja roopa kasvamise kiirus kasvas isegi 5x, peatükis 4.4 kirjeldatud teise katse andmetele tuginedes lausa 10x (väärtustesse tuleb suhtuda muidugi äärmise ettevaatlikkusega, kuna statistilisi andmeid pole piisavalt ja paekivikillustiku koormusolukord oli tavaliiklusega võrreldes äärmuslik). Oma osa oli siin muidugi bituumeni omaduste kadumisel peale külmutamist ja seetõttu asfaltkihi totaalsel lagunemisel.
- Kõige paremini pidas katsele vastu 0...32, kuid seda põhjusel, et materjal ei olnud filtreeruv ja ei märgunud kogu katse jooksul üldse. 4...32 muutus vee mõjul kiiremini pehmeks kui 16/32 ja lubas alusele koormamisest tulenevaid suuremaid pingeid. Roobas arenes kõige kiiremini ja järsemini 16/32 sektoris peale vee lisama hakkamist.
- Praegustele andmetele tuginedes õigustab ridakillustik end hästi, kuna oli filtreeruv ja lagunemise kiirus oli aeglasem, kui fraktsioneeritud killustikul.
- Kõik killustikud hakkasid lagunema liikudes ülalt alla. Deformatsioone drenkiihis ei tekkinud. Seetõttu on õigustatud Eesti Maanteameti nõue kasutada kõige kõrgemakvaliteediliste teede killustikaluste ülaosas paekivist oluliselt ilmastikukindlamat graniitkivi.
- Tulemused asfaltbetoonist, õigemini mustkillustikust, rõhutavad vajadust muuta paekivi ilmastikukindlamaks. Kui see on täidetud, materjal ei lagune. Seetõttu tuleks tuleks

edaspidistes uuringutes keskenduda just sellele ja võimalusele kasutada laialdasemalt stabiliseeritud aluseid ning neid ka imporditava graniitkivikillustiku asemel.

- Paekiviliiva katsetulemusi statistika mõttes oli lõplike järelduste tegemiseks vähe. Terastikulise koostise ja filtratsioonimooduli tulemuste andmed olid vastuolulised. Tallinna Tehnikakõrgkool tegeleb teemaga edasi ja järgmised tulemused selguvad suveks 2014. Paekiviliiva arvutuslikuks elastsumsooduliks võiks arvestada 80MPa. Antud uuring kinnitas [9] uuringu tulemusi selles osas. Pestud paekiviliiva kasutamine muldkehade ehitamisel ei ole hetkel majanduslikult otstarbekas seoses materjali suurema mahukaalu ja sellest tuleneva lisatranspordivajaduse tõttu. Probleem tekib aga vaid juhul, kui materjal on tihendatud maksimaalsele tasemele, kuid teema on hetkel veel küsitav. Piisava tihendatuseni ei suudetud pestud paekiviliiva tihendada ei Rambolli uuringus [7] ega ka antud töös. Probleemiks on ka objektipealse kiire tiheduse mõõtmise hindamine, mis teeb materjali kasutamise objektile ka selles osas kallimaks.

Töö autor leiab, et uuring täitis oma eesmärgi maksimaalsel võimalikul viisil. Tegemist on hea võrdleva materjaliga muude kohalikke mineraalmaterjale uurivate uuringute kõrval. Järgnevalt tuleks koondada kokku kõik tehtud uuringud ja erinevad objektidelt saadavad kogemused ning leida korrelatsioone.

VIIDATUD ALLIKATE LOETELU

1. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001-52. Eesti Maanteeamet;
2. Significant Finding from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. NCHRP sunthesis 325;
3. Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses, lisa 21. AS Teede Tehnokeksus. 2010;
4. [www] <http://ecmns.eng.auburn.edu/eblasts/ncat/ncat-tst-trk-blast.html> (20.10.2013);
5. Pavement Test Facility. Nottingham. United Kingdom;
6. Road wear from Heavy Vehicles. Report nr 08/2008. NVF committee Vehicles and Transports;
7. Pestud paekiviliiva katsetööd. Lõpparuanne. Ramboll Eesti AS. Märts 2009;
8. Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses. Tardkivimist ja karbonaatsetest settekivimitest valmistatud täitematerjalidest aluste vastupidavuse erinevuste väljaselgitamine koos elukaare analüüsi ja kasutamiskriteeriumite ettepanekutega alustes. Tallinna Tehnikakõrgkool. 2011;
9. Pestud paekiviliiva kasutamine Tallinna teede ja tänavate ehitamisel, II etapp. Tallinna Tehnikakõrgkool 2010.

LISA 1. Asfaltbetoonkihtide katsetulemused

TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOI
Pärnu mnt 62
10135 TALLINN

KATSEPROTOKOLL NR 2814/13

03.09.2013 nr 3-7/4491

Lk 1/4

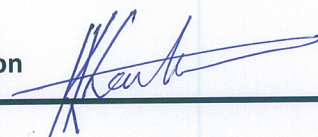
Tellija	TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOI – hr Sven Sillamäe
Tööülesanne	TTK laborist võetud kahekihilise väljaraide AC 16 surf 70/100 ja AC 32 base 70/100 kihtide katsetamine.
Proovide kirjeldus	Proov võeti 29.07.13 ja toodi laborisse katsetamiseks samal päeval tellija esindaja poolt. Laboris registreeriti tellija tähistusega „MNT rattakoormuskatse, pärast katseseeriat“ väljaraide proov registreerimisnumbriga 3472 ja laboris väljaraidest saetud proovikehad registreerimisnumbritega 3472-1 kuni 3472-5.
Katsetamine ja tulemused	Väljaraidest saetud proovikehade AC 16 surf 70/100 ja AC 32 base 70/100 kihtide katsetulemused on esitatud katseprotokollis lk 2/4. Väljaraidest eraldatud AC 16 surf 70/100 asfaltsegu sideaine sisaldus, terakoostis ja poorsusnäitajad on esitatud katseprotokollis lk 3/4. Väljaraidest eraldatud AC 32 base 70/100 asfaltsegu sideaine sisaldus, terakoostis ja poorsusnäitajad on esitatud katseprotokollis lk 4/4.

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja

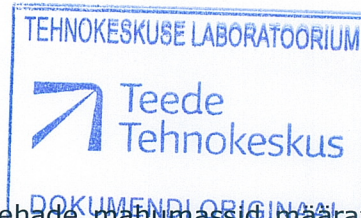
Amet Labori spetsialist

Nimi Karli Kontson



Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.



- 1.1** AC 16 surf 70/100 kihist saetud proovikehade mahumassid määrati EVS-EN 12697-6:2012 (meetod B) järgi. Tihendustegurite arvutamiseks valmistati laboratoorsed proovikehad EVS-EN 12697-30:2012 (2 korda 50 lööki) järgi. Jäävpoorsuste arvutamiseks määrati näiv erimass EVS-EN 12697-5:2010 + EVS-EN 12697-5:2010/AC:2012 (meetod A) järgi.

AC 16 surf 70/100 kihi katsetulemused:

AC 16 surf 70/100 kihi proovikeha							Asfaltsegu	
reg nr	mahumass Mg/m^3 ρ_{bssd}		jäävpoorsus % V_m		tihendustegur		mahumass Mg/m^3 ρ_{bssd}	erimass Mg/m^3 ρ_{mv}
	üksik	keskmine	üksik	keskmine	üksik	keskmine		
3472-1	2,332	2,322	9,9	10,3	0,93	0,93	2,503	2,589
3472-2	2,323		10,3		0,93			
3472-3	2,317		10,5		0,93			
3472-4	2,312		10,7		0,92			
3472-5	2,325		10,2		0,93			

- 1.2** AC 32 base 70/100 kihist saetud proovikehade mahumassid määrati EVS-EN 12697-6:2012 (meetod C) järgi. Kihi tihendustegurite arvutamiseks valmistati laboratoorsed proovikehad EVS-EN 12697-31:2007 (50 pööret) järgi. Jäävpoorsuste arvutamiseks määrati näiv erimass EVS-EN 12697-5:2010 + EVS-EN 12697-5:2010/AC:2012 (meetod A) järgi.

AC 32 base 70/100 kihi katsetulemused:

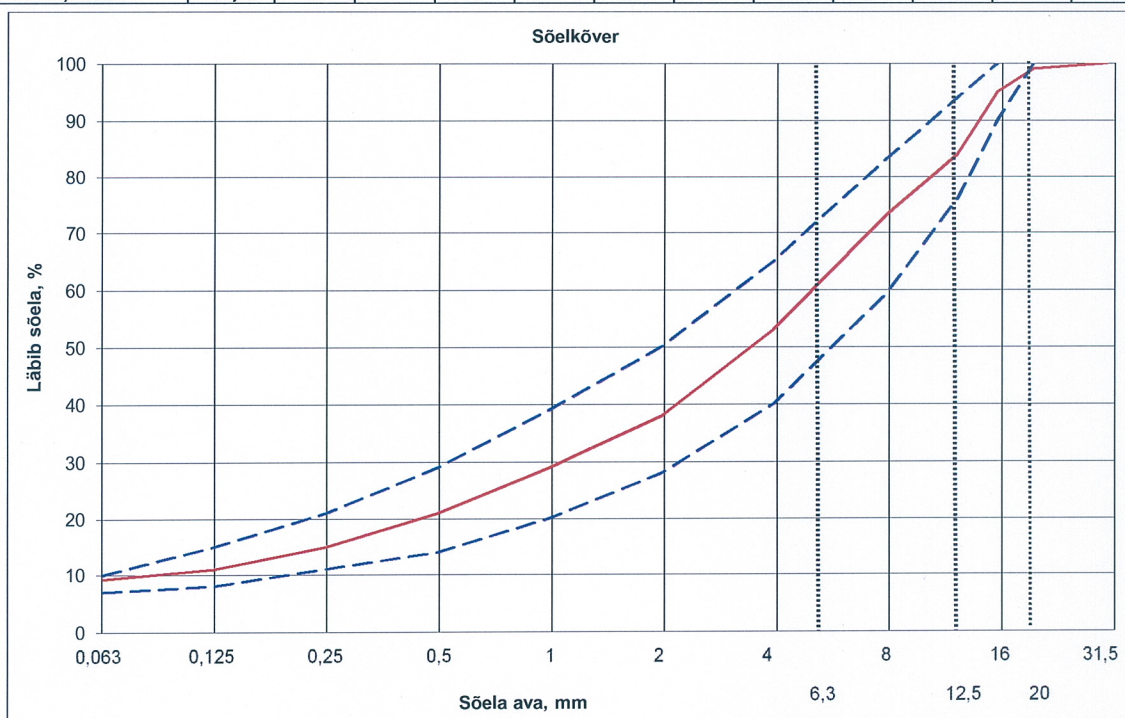
AC 32 base 70/100 kihi proovikeha							Asfaltsegu	
reg nr	mahumass Mg/m ³ ρ _{bsea}		jäävpoorsus % V _m		tihendustegur		mahumass Mg/m ³ ρ _{bsea}	erimass Mg/m ³ ρ _{mv}
	üksik	keskmine	üksik	keskmine	üksik	keskmine		
AC 32 base 70/100 - alumine kiht								
3472-1	2,385	2,414	8,9	7,8	0,99	1,00	2,414	2,617
3472-2	2,433		7,0		1,01			
3472-3	2,409		7,9		1,00			
3472-4	2,393		8,6		0,99			
3472-5	2,450		6,4		1,01			

2. Väljaraidest eraldatud AC 16 surf 70/100 asfaltsegu katsetulemused:

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Katsetamise tulemus	Tähis
2.1	Lahustuva sideaine sisaldus	EVS-EN 12697-1:2012 (massierinevuste meetod)	5,0 %	S
2.2	Näiv erimass	EVS-EN 12697-5:2010 + EVS-EN 12697-5:2010/AC:2012 (meetod A)	2,589 Mg/m ³	ρ_{mv}
2.3	Mahumass	EVS-EN 12697-6:2012 (meetod B)	2,503 Mg/m ³	ρ_{bssd}
2.4	Jäävpoorsus	EVS-EN 12697-8:2003	3,3 %	V_m
2.5	Skeletipoorsus		15,8 %	VMA
2.6	Bituumeniga täidetud pooride maht		79,0 %	VFB

2.7 Segu terakoostis EVS-EN 12697-2:2003+A1:2007 järgi:

Sõela ava, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	12,5	16	20	31,5
	Sõela läbind, % kivimaterjali massist											
Faktiline	9,3	11	15	21	29	38	53	73	84	95	99	100
Norm, min	7,0	8	11	14	20	28	40	59	76	90	100	
Norm, max	10,0	15	21	29	39	50	65	83	94	100		



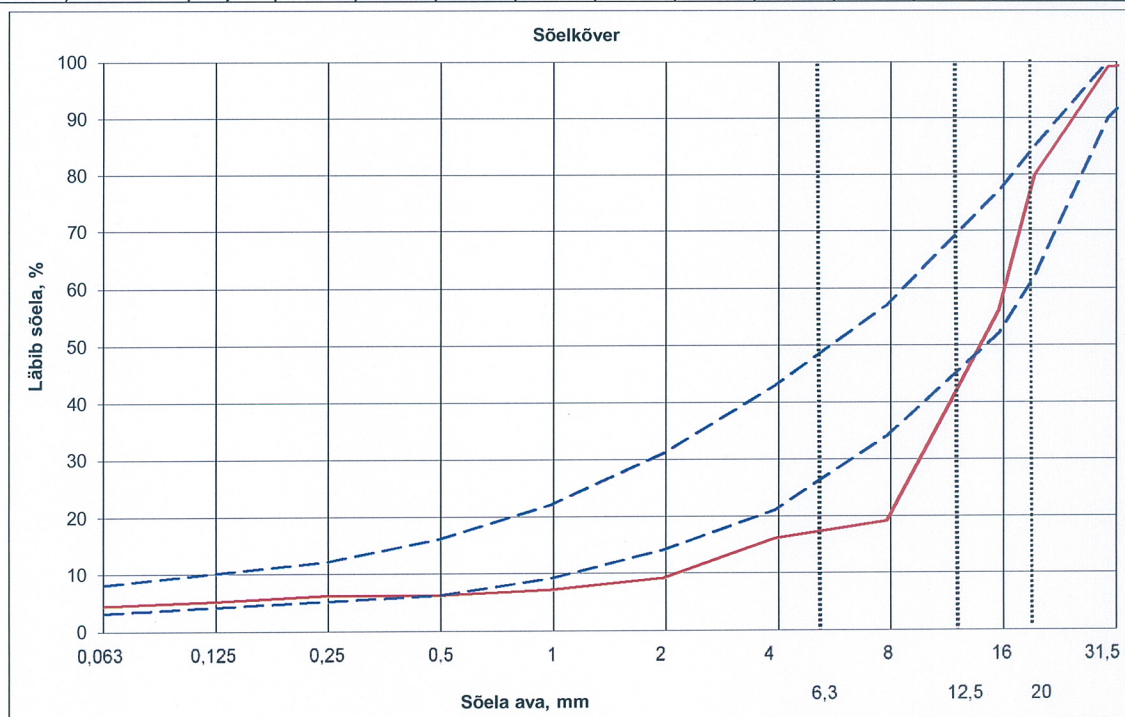
MÄRKUSED: Segukõvera välja piirid (Norm, min ja Norm, max) on võetud standardist EVS 901-3:2009 „Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud.“ Läbimine sõelast avaga 6,3 mm oli 68%.

3. Väljaraidest eraldatud AC 32 base 70/100 asfaltsegu katsetulemused:

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Katsetamise tulemus	Tähis
3.1	Lahustuva sideaine sisaldus	EVS-EN 12697-1:2012 (massierinevuste meetod)	2,9 %	S
3.2	Näiv erimass	EVS-EN 12697-5:2010 + EVS-EN 12697-5:2010/AC:2012 (meetod A)	2,617 Mg/m ³	ρ_{mv}
3.3	Mahumass	EVS-EN 12697-6:2012 (meetod C)	2,414 Mg/m ³	ρ_{bsea}
3.4	Jäävpoorsus	EVS-EN 12697-8:2003	7,8 %	V_m
3.5	Skeletipoorsus		14,8 %	VMA
3.6	Bituumeniga täidetud pooride maht		47,4 %	VFB

3.7 Segu terakoostis EVS-EN 12697-2:2003+A1:2007 järgi:

Sõela ava, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	20	31,5	45
	Sõela läbind, % kivimaterjali massist											
Faktiline	4,3	5	6	6	7	9	16	19	56	80	99	100
Norm, min	3,0	4	5	6	9	14	21	34	52	62	90	100
Norm, max	8,0	10	12	16	22	31	43	57	77	85	100	



MÄRKUSED: Segukõvera välja piirid (Norm, min ja Norm, max) on võetud standardist EVS 901-3:2009 „Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud.“ Läbimineki sõelast avaga 6,3 mm oli 18%, sõelast avaga 12,5 mm oli 28% ja sõelast avaga 25 mm oli 94%.