

Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses

Tallinna Tehnikakõrgkool

2011-23



MAANTEEAMET

Tallinn 2011

KOHALIKE MINERAALMATERJALIDE OPTIMAALSE KASUTAMISE UURING EESTI TEEDEMAJANDUSES

Tardkivimist ja karbonaatsetest sette kivimitest valmistatud täitematerjalidest aluste vastupidavuse erinevuste väljaselgitamine koos elukaare analüüsi ja kasutamiskriteeriumite ettepanekutega alustes.

Töö koostajad:

Prof. Priit Vilba. Tallinna Tehnikakõrgkooli Rajatiste õppetooli juhataja

Sven Sillamäe, MSc. Tallinna Tehnikakõrgkooli Rajatiste õppetooli lektor

Uurimistöö valmimisele aitasid kaasa:

Konstruksioonid ehitasid katseseadmesse Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengid Raiko Baikov, Markus Mänd, Kaspar Karik, Kaur Rand ja Priit Dolenko

Raul Oja, Karel Saar (TTK), Reino Poom (AASAT Professional OÜ), Taavi Tõnts ja Mart Sepp (MNT), Peeter Talviste (IPT Projektijuhtimine), Ain Kendra (Ramboll Eesti AS), Margus Leetberg (Lemminkäinen AS), Paekivitoodete Tehas AS, Rudus Eesti AS, AS Teede Tehnokeskus, Eesti Keskkonnauuringute Keskus, Tallinna Teede AS, AS TREV-2, ABT Revador AS, Baltifalt AS, Nordecon Infra AS, Kiirkandur AS, OÜ Englo

SISUKORD

Sissejuhatus	4
1. Lähteandmed ja töö käik.....	5
1.1 Katsetatavate konstruktsioonide olemus.....	5
1.2 Konstruktsioonide ehitamine	7
1.2.1 Sideainega sidumata materjalid.....	7
1.2.2 Andurite paigutus	9
1.2.1 Sideainega seotud materjalid.....	13
1.3 Koormuse parameetrid.....	14
1.4 Katse käik.....	15
1.4.1. Proovivõetud	16
1.4.2. Killustikuproovid	17
2. Tulemuste analüüs	19
2.1 Üldine konstruktsiooni toimivus.....	19
2.1.1 Tardkivi sisaldava konstruktsiooni toimivus.....	20
2.1.3 Konstruktsioonide kui tervikute võrdlus	26
2.1.4 Anduritelt saadud info analüüs ja võrdlus.....	28
2.2 Hinnang killustike vastupidavusele	31
2.2.1 Lubjakivi kasutamisest	35
2.3 Majanduslik analüüs	37
2.4 Arutelu võimalike lahendite üle, kuidas leida viis kasutamaks kohalikke mineraalmaterjale	38
Kokkuvõte	40
Kasutatud kirjandus	43
Lisad	44

SISSEJUHATUS

Maanteeameti peadirektori käskkirja nr 133 (27.06.2006) p.5 järgselt peab ühekihiliste aluste ja aluste pealmiste kihtide ehitamisel teedel, mille liiklussagedus on suurem kui 8000 autot ööpäevas, kasutama tardkivikillustikku LA25. Teada on, et tardkivi on lubjakivist vastupidavamate omadustega koormuste, külmakindluse ja kloriidide suhtes ning nende koosmõjudele teekonstruktsioonides. Põhjamaades on alustes kasutusel olnud peamiselt tardkivikillustik ning selle vastupidavusega on neil senini head kogemused.

Eestis on probleemiks tardkivi kasutamisel vaid üks oluline asi – see ei ole kohalik materjal, mistõttu tuleb seda lähiriikidest importida. Importimine suurema elukallidusega põhjamaadest on seotud korduvate ümberlaadimistega, mis omakorda tõstab tardkivikillustiku maksumust veelgi. Iga ümberlaadimine suurendab samas ka optimaalsete segude segregeerumist, mida peab kvaliteedi jälgimisel arvestama. Lubja- ja tardkivikillustiku maksumuste erinevused võivad ulatuda kolmekordseks.

Seega on oluline teada saada, kas reaalses situatsioonis konstruktsioonis töötades on tardkivikillustik oluliselt vastupidavam, kui lubjakivikillustik, mistõttu oleks selle kasutamine kõrgema maksumuse korral õigustatud.

Uuring viidi läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli teekonstruktsioonide simuleerimise laboratooriumis, millega võrreldi kahte konstruktsiooni kasutades samu koormuseid, erinevuseks vaid kasutatud killustik.

Katsetuse lähteülesanne on esitatud lisas 1.

1. LÄHTEANDMED JA TÖÖ KÄIK

Uurimustöö peamine eesmärk oli selgitada identsetes konstruktsioonides ja koormuste all tard- ja lubjakivi erinevused. Eesmärk oli kasutada kõige kvaliteetsemat lubjakivi (mille omadused oleksid võimalikult lähedased tardkivile) ning tardkivi, mida kasutatakse igapäevaselt teedehituses. Võimalusi selleks on kolm: aastatepikkune jälgimistöö mõnel reaalselt eksisteerival teelõigul (sellega veniks uurimustöö väga pikaks ning pole kontrollitav, st me ei tea koormusi); HVS (heavy vehicle simulator – oleks ideaalne vahend, kuid Eestil seda pole ning selle kas ehitamisega või rentimisega kaasnevad kulud ja sellest tulenev uurimustöö maksumus käiks meile ilmselt üle jõu); teekonstruktsiooni koormamine dünaamiliselt hüdrotsilindriga, millega antud uuring ka teostati.

1.1 Katsetatavate konstruktsioonide olemus

Uuringu läbiviimiseks katsetati kahte konstruktsiooni, mis erinesid üksteisest vaid killustikaluses kasutatava materjali poolest.

Konstruktsioonide olemus oli järgnev, muutus vaid killustikalus, esimesel juhul oli see tardkivist, teisel lubjakivist:

- 4cm AC16surf 70/100. Gc_{90/15}, C_{100/0}, LA₂₅, A_{N14}; F₁, FI₂₀, f₁. Sideaine B_{5,3}.
- 6cm AC32base 70/100. Gc_{90/15}, C_{100/0}, LA₃₀, F₄, FI₂₀, f₄. Sideaine B_{3,8}.
- 25cm killustikalus fraktsiooniga 16/32 kiilutuna 8/16, 25kg/m². Nõuded põhifraktsiooni materjalile: LA₂₅, FI₂₀, C_{100/0}, F₂, f₂;
- Eraldav geotekstiil (120...180g/m²);
- 105cm kvartslüüv filtratsioonimooduliga <2m/ööp;
- 100cm paekivikillustik 0/4 (kasti põhjas).

Täpsustada tuleks „paekivikillustiku 0/4“ korrektne nimetus: vastavalt GOST 25100-95 määrati materjali nimetuseks „kruusliiv“ ja vastavalt EVS 1997-1:2003 „rohke kruusaga jämeliiv“.

Konstruktsioonid ehitati Tallinna Tehnikakõrgkooli teekonstruktsioonide simulatsiooniseadmesse:

- Tegemist on metallist kastiga (mõõtmed 3,3x3,3x2,3m (pikkus, laius, kõrgus)), kuhu sisse ehitatakse teekonstruktsioon koos aluse ja kõikide vajalike kihtidega täies mahus. Tänu oma suurtele mõõtmetele ei mõjuta kasti servad pingeolukorda (joonis 1);
- Võimaldab uurida tervet konstruktsiooni tervikuna ja välja töötada ning testida erinevaid lahendeid;
- Koormamine toimub läbi hüdrosilindri, mille seadistust on võimalik vastavalt vajadusele igati muuta – koormuse ja kontaktpinna suurus, rakendamise aeg ja intervall;
- Kihtides olevad andurid annavad vajalikku informatsiooni näiteks pingeolukorrast, vajumitest, nihetest, poorivee rõhust, veesisaldusest ja temperatuurist – nii tagame, et võrdlevate katsete tingimused oleks samad ning saame pidevalt infot, mis toimub katte all;
- Katse niiskusraja on võimalik muuta;
- Konstruktsiooni on võimalik läbi külmutada ja üles sulatada;

Kokkuvõttes hõlbustab seade oluliselt vastuse saamist küsimusele, kuidas meil alustes kasutatavad materjalid töötavad ja vastu peavad. Võimalik on katsetada ja kontrollida erinevaid lahendeid, kuidas kasutada paremini ja efektiivsemalt meil esinevaid ehituslikke maavarasid, kaotamata sealjuures kvaliteedis.



Joonis 1. Tallinna Tehnikakõrgkooli teekonstruktsioonide simulatsiooniseade

1.2 Konstruksioonide ehitamine

1.2.1 Sideainega sidumata materjalid

Kõik materjalid toodi katseseadmesse kasutades laadurit ning planeeriti käsitsi. Tiheduse mõõtmiseks kasutati paekiviliivas Inspector 2te ning kvartslivas lisaks penetromeetrit. Killustiku tihedusaste määrati Inspector 2/3ga. Kõikide sideainega sidumata kihtide tihendamiseks kasutati vibroplaati Ammann AVP 3520 (massiga 255kg). Paekiviliiv tihendati iga 25cm koheva materjali paigaldamise järelt, sama kvartslivaga. Killustikukiht (25cm) tihendati mõlemas katses kahes kihis.

Liivad

Paekiviliivas tiheduse mõõtmiseks ei ole olemas ühtegi juhendit väljaarvatud määramine mahumasside kaudu. Kuna paekiviliiv asus kattest nii sügaval ei omandanud selle tihedus katse käigule erilist mõju. Igat paigaldatud kihti tihendati vähemalt kolme läbikuga, visuaalsel hinnangul piisas sellest tiheduse saavutamiseks (tihendamise ajal jälgiti vibroplaadi käitumise muutuseid, tihendamine lõpetati hetkel, kui plaat hakkas „hüppama“).

Siiski kontrolliti ka Muldkeha Pinnaste Tihendamise ja Tiheduse Tontrolli Juhistes (kinnitatud MNT peadirektori käskkirjaga nr 264) esitatud nõuetele vastavust. Juhendis käsitletakse küll kvartslivast ehitatud kihte ja üks-ühele ei ole võimalik neid rakendada paekiviliiva puhul, kuid indikatsiooni, kas materjal on tihe või mitte, saab.

Kvartsliva (täpseks nimetuseks määrati laboratoorselt vastavalt GOST 25100-95 „jämeliiv“) tihendamine oli töömahukam kui paekiviliivas, kuna selle terad on suurusjärgu võrra tugevamad ning ei purune ja seeläbi ei „mugandu“ üksteisega saavutamaks kiiresti kompaktsust. Kvartsliva tihendamisel kasutati ka veega ülekastmist.

Tardkivikatsetuse ehitamise ajal saavutati penetromeetriga mõõtes killustiku alt tiheduseks 1.0 (mis vastas 31le löögile, võttes aluseks keskliiva tabeli). Penetromeetriga kontrolliti tihedust ka pärast katsetsükli möödumist (võttis aega umbes 17 päeva) ning löökide arvuks saadi 37, mis vastab tihedusele 1,006, kusjuures kontroll sooritati koormuse rakendamise punktist umbes 1m eemal.

Lubjakivikatse ettevalmistamise käigus eemaldati katseseadmest kõik kvartsliv kuni paekiviliivani, mis jäeti alles, kuna tingituna konstruktsiooni mahust selle peal, ei mõjutanud see kuidagi katse käiku. Eesmärk oli saavutada samasugused tingimused nagu esimese katse puhul, st liivalus ehitati uuesti puistest võetud materjalist.

Lubjakivikatse ehitamise aeg oli augusti teine pool ning seetõttu olid ilmad juba jahedamad ja niiskemad. Laoplatsil seistes oli liiva niiskussisaldus suurenenud võrreldes tardkivikatsega ning ehituse käigus selgus, et materjal ei kipu tihenema. Ajaliste piirangute tõttu ei olnud võimalik oodata liiva kuivamist. Kvartšliiva tihendusastmeks on nõutud killustiku all 1,0, kuid saavutati 0,995; penetromeetriga mõõtmisel kasutati keskliivale vastavaid tabelväärtusi. Inspectoriga saadi mõõtetulemuseks 112MPa (vastavalt juhendis [6] esitatud valemile arvutati tihendustegur samuti 0,995).

Killustikalus

Kasutatud killustiku omadused on esitatud lisas 2 Tähtsamad omadused on esitatud tabelis 1 Sõelkõverad koos analüüsiga on esitatud tabelis 4 peatükis 3.2.

Tabel 1. Kasutatud killustike omadused

Omadus	Tardkivi (graniit)	Lubjakivi
Tootja	Rudus	AS Paekivitoodete tehas
Fraktsioon	16/32	16/32
LA	19	25
Plaatsustegur	10%	9%
Nordic katse	7,5%	30,7%
Külmakindlus	0,1%	1,1%
Külmakindlus 1% NaCl lahuses	0,1%	75%
Peenosiste sisaldus	0,8%	1,3%
Veeimavus	0,2%	1,7%

Killustikukihi alla paigaldati eraldav geotekstiil, mille peale andurid vastavalt joonisele 2. Killustik tihendati kahes kihis (12,5cm ja 12,5cm). Alumiselt kihilt tihedust ei mõõdetud. Pealmine kiht tihendati visuaalsel hinnangul tihedaks, kiiluti fraktsiooniga 8/16 ning jätkati tihendamist, kuni saavutati nõutav tihedusaste (minimaalne nõutav väärtus oli 170MPa). Mõlema katsetuse puhul saadi keskmiseks mõõtetulemiks 187MPa (kandevõimed olid identsed).

1.2.2 Andurite paigutus

Pingeandurid

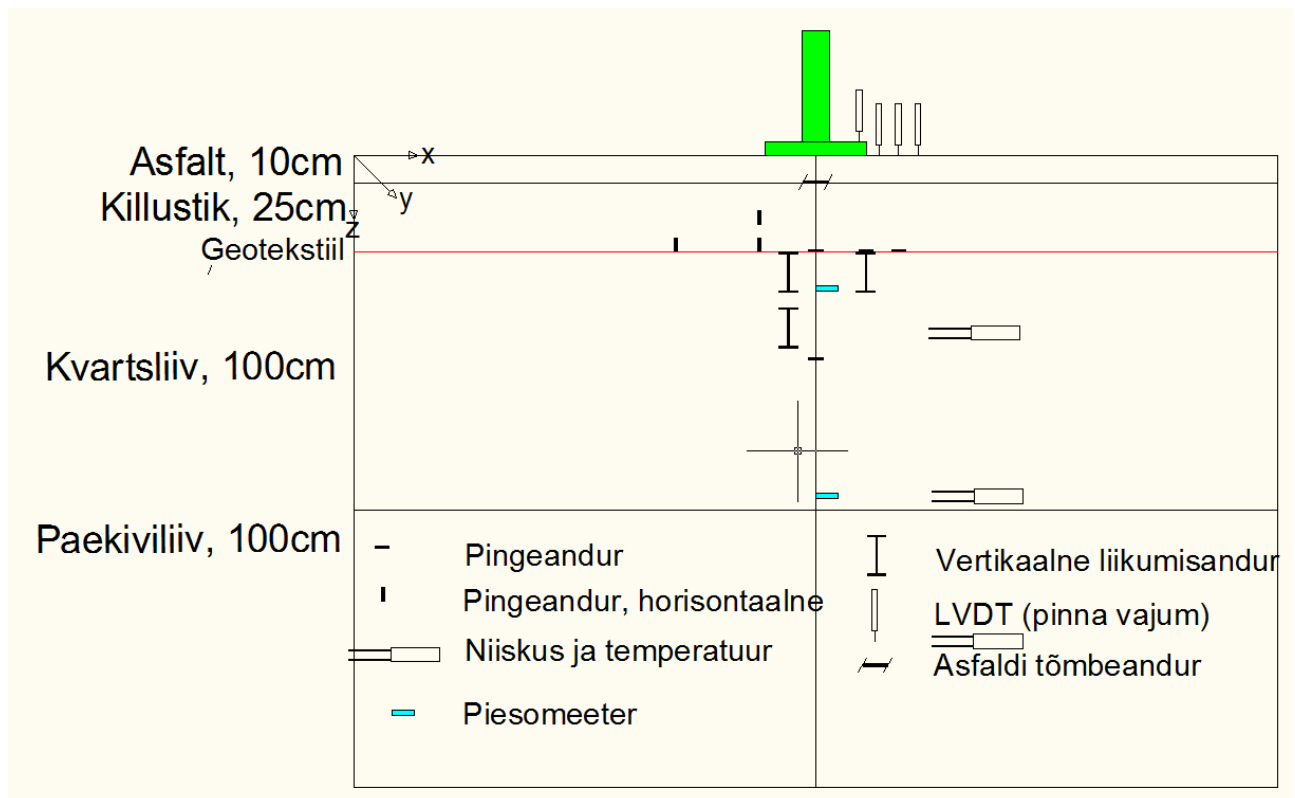
Katse ettevalmistamisel oli kasutada kaks erinevat pingeandurit, esimesed läbimõõduga 50mm ja paksusega 11,4mm, mis on arendatud eelkõige pidades silmas mudeleksperimente, kus katse mõõdud on suhteliselt väikesed. Katsetustes kasutati nende tähistuseks „KDE nr“. Teised andurid olid läbimõõduga 100mm ja paksusega 20,5mm. Katsetuses kasutati tähistuseks „KDC nr“. Viimased soetati eesmärgiga paigaldada killustikku, kus nad oleks eeldatavasti oma mõõtmete poolest paremini vastu pidanud. Samuti on nad valmistatud roostevabast materjalist, mis võimaldaks viia läbi killustikaluse katsetusi soolvees rikkumata nii andurit.

Tardkivikatse lõpus selgus, et KDC-andurid on tundlikumad ülekoormuste suhtes. Katseid planeerides arvestati koormusega, mis tekitab katte peal erisurve 0,6MPa (vastavalt Elastsete teekatendite projekteerimise juhendile), kuid mida suurendati peatükis 2.3 ja lähteülesandes kirjeldatud põhjuste tõttu 0,8MPa-ni. Andurite „taluvuspiir“ oli 0,5MPa. Killustikukihi põhjas tekkisidki pinged 500...550kPa, mis põhjustasid seal olnud KDC-andurite purunemise. Väiksemad, KDE-andurid, pidasid see-eest katsed vastu. Järgnevate katsetuste tervis on tellitud juba suurema vastupidavusega andurid.

Andurid paigaldati vastavalt joonisele 2 ja lisas 4 olevatele täpsustatud joonistele järgides tootjapoolseid juhendeid ja soovitusi sarnastelt katsetustelt erinevatest muudest aruannetest [7 ja 12]. Pingeandurid paigaldati killustikukihi alla (vertikaal- ja horisontaalpingeid mõõtvad, joonis 3) ja üks horisontaalpingeid mõõtev andur tuli killustikukihi keskele (joonis 4). Kõik andurid paigaldati liiva sisse. Kahe killustikukihi vahel oleva anduri liiv oli ümbritsetud samuti marliga takistamaks liiva sattumist killustikuproovi ja moonutamaks nii tulemusi.

Liiv andurite ümber oli vajalik ühtlase surve saavutamiseks andurite ümber. Vastasel juhul on võimalik, et mõni killustikutera mõjutab andurit suurema punktkoormusega ning tulemus on mittekorrektne. Pingeandurid vajavad kogu oma pindala ulatuses ühtlast survet.

Pingeandurite kasutamine antud uurimuse lõpptulemuse jaoks (st määrata killustike vastupidavuse erinevused) vajalik ei olnud, kuid pidades silmas võimalikke tulevasi uurimustöid, siis tänu nendele on võimalik kasutada suuremat hulka andmeid, mis toimub konstruktsioonide sees. Samuti tänu saadud andmetele on võimalik näha, kuidas käitub (jagab koormusest tulevaid pingeid alusele) tugevam tardkivi võrreldes nõrgema lubjakiviga (kui seal on üldse erinevusi).



Joonis 2. Andurite paigutus teise katsetuse ajal (vaata täpsustatud jooniseid lisast 4)



Joonised 3 ja 4. Andurite paigutus killustikukihi alla ja keskele. Kasutatud marli killustikukihtide vahel

Muud andurid

Piesomeetrid

Piesomeetreid kasutati kontrollimaks, kas katsete tingimused on võrdsed ja andmete kogumiseks võimalikeks järgnevateks töödeks ja analüüsideks. Katse ajal valitses aluses veega mitte küllastunud

olukord, seega ei mõjuta poorivee rõhk kuigi palju aluse käitumist (mingil määral siiski, kuid mitte märkimisväärselt), seega analüüsi nendelt tulemustelt siin aruandes ei esitata.

Piesomeetrite vajalikkust veeküllastatud pinnases (st poorid on vett täis ja vesi ei saa liikuda koormuse käigus kiiresti ühest kohast teise) näitab fakt, et sellisel juhul tekib hõõre ainult teradevahelise efektiivsurve tõttu [14] (st pinnaseosakesed võtavad vastu vaid nihkepingeid ja survepinged kantakse poorides olevasse vette). Seetõttu väljendatakse nihkepinge valemit järgnevalt:

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan \varphi \quad (1)$$

kus,

c - pinnase nidusus;

σ – normaalpinge;

u – poorivee rõhk;

φ – pinnase sisehõõrde nurk.

Piesomeetrid paigaldati mõlema katse puhul koormustalla alla (kasti keskkoha) sügavusele, katte pinnast mõõdetuna, 45cm ja 125cm sügavusele.

Vajumiandurid killustiku all liivas

Nende eesmärk oli registreerida vajumeid kvartslüiva kihi peal ja sellest 20cm allpool. Kasutatud andur on kujutatud joonisel 5. Tardkivikatse puhul paigaldati andurid lihtsalt liiva, kuid katse käigus saadav info oli arusaamatu. Nimelt oli lugemigraafik „hüplev“ ehk joon ei olnud sirge, vaid kõikus suurel määral üles-alla (joonis L5.9 lisas 5). Konstruktsiooni lahti võttes, selgus et tegelik vajum oli oluliselt suurem, kui näitas andur. Samuti selgus, et liivaterad olid tunginud anduri liikuva osa vahele kiiludes selle kinni, mis tõenäoliselt oli lugemi ebakõla põhjuseks.



Joonised 5 ja 6. Kasutatud vajumiandur koos isolatsiooniga (mis pole veel paigaldatud) ning anduri paigaldamine liivakihti

Teise katse puhul üritati anduri kinnikiilumist vältida paigaldades selle ümber veetoru isolatsioon, mille sisemine diameeter oli andurile sobiv (joonis 6), kuid ka see ei parandanud olukorda, liiv oli ka seekord kiilunud liikuva osa vahele. Seega pole antud aruandes võimalik käsitleda nendelt anduritelt saadud näite. Praeguseks hetkeks on andurid täiendatud tasemeni, kus liiv ega tolm saa takistada selle toimivust.

Andurid paigaldati soovitud kohta kaevates käsitsi tihendatud materjalis vajalikus sügavusega augu ja tihendades tagasitäite uuesti käsitsi.

Niiskus- ja temperatuuriandurid

Selleks kasutati Trime® Pico64 andurit, mis registreerib nii veesisalduse kui temperatuuri. Katse eesmärk ei olnud modelleerida näiteks olukorda, kus pinnased on veeküllastunud. Seega kasutati andurit vaid jälgimiseks, kui kiiresti muutub veesisaldus pinnases ja tagada mõlema katse puhul sarnased olukorrad. Tingimused hoiti võrdsetena – killustiku all püsis niiskus kogu katse vältel 6,5% juures.

Temperatuur mõjutab vaid bituumeniga seotud materjalide käitumist. Kahjuks ei olnud võimalik katse käigus seda hoida võrdsel tasemel, kuna õhutemperatuur ruumis oli sarnane väljas olnud temperatuuriga. Tardkivikatse sooritati kuupäevadel 28.06.2011 – 15.07.2011, õhutemperatuurid nendel kuupäevadel kõikusid vahemikus 16... 29°C, kusjuures enamiku ajast oli temperatuur üle 20°C (EMHI andmed igast päevast kell 17.00, laborile lähimast mõõtejaamast). Paekivikatse toimus kuupäevadel 18.08.2011 – 05.09.2011, õhutemperatuurid kõikusid vahemikus 15...24°C, kusjuures enamiku ajast oli temperatuur alla 20°C.

Vajumiandurid asfaldi peal

Võimaldasid registreerida katendi elastset reaktsiooni koormusele, samuti üldvajumit (tulemustest peatükis 3.1). Andurite paigutus on kujutatud joonistel 2 ja 19. Andurite vahekauguste määramisel arvestati näiteks Tampere ülikooli sarnase seadmega läbiviidud katsete ülesehitusega [9] ning Perkinsi, 1999 katsetustega.

Asfaldi tõmbeandur

Paigaldati asfaltkihi alapinda (joonised 7 ja 8) eesmärgiga saada infot tekkivatest tõmbepingetest seoses aluse võimaliku vajumisega. Ka selle anduri alla paigaldati marlitükk, kuna testkatse ajal selgus, et asfaltbetoonis olev mastiks (bituumeni ja peenosiste segu) jääb osaliselt killustikkihi pinnale ja võib moonutada sõelkõvera analüüsi. Andmed vajavad veel täiendavat analüüsi ja uusi katsetusi võrdlusmaterjaliks, kuid põgus selgitus peatükis 3.1.4. Anduri kasutamine seondub pigem asfaltbetooni omaduste ja käitumisega. Hetkel saadud andmeid saab kasutada tulevikus uuringute ja analüüside võrdlus- ja täiendmaterjaliks.



Joonised 7 ja 8. Asfaltbetoonkihi alla paigaldatud tõmbeandur

1.2.1 Sideainega seotud materjalid

Asfaltbetoon paigaldati katseseadmesse, sarnaselt sideainega sidumata materjalidega, käsitsi tuues see sisse laaduriga. Paigaldamisel kasutati professionaalide abi – esimese katse puhul paigaldas mõlemad kihid AS Tallinna Teed ja teises katses alumise AS TREVV2 ning pealmise AS Tallinna Teed.

Tardkivikatse puhul kasutati vaid ühte, kerget (80kg) vibroplaati mõlema kihi tihendamiseks (joonis 9). Tulemus ei olnud kuigi hea, jäävpoorsused ületasid nõutud näitajad: ACbase keskmine

jäävpoorsus oli 11,8% ja tihedustegur 0,96 ning ACsurf näitajad vastavalt 9,3% ja 0,92, kuid see-eest oli ehitatud kihid nõutust paksemad. (proovivõtu kohtadest) vastavalt 6,5 ja 5,3cm paksud. Tulemused selgusid mitte kohe, vaid alles katse käigus, seetõttu ei vahetatud asfaltkatet välja.



Joonised 9 ja 10. Asfaltbetooni tihendamiseks kasutatud vibroplaadid

Teise konstruktsiooni puhul kasutati kahte vibroplaati – 80kg ja 185kg (joonis 10), millega tihendati nii ACbase kui ACsurf kihid. Jäävpoorsus võeti suurkehal keskmine (st poorse ja tiheda asfaltbetooni keskmine) ja tulemus oli 2,5% ning tihedustegur 0,99, keskmised kihipaksused proovivõtukohtadest ACsurf 4,5cm ja ACbase 6,1cm. Esimene tihedus anti kergema plaadiga ning laskmata segul maha jahtuda, jätkati raskemaga.

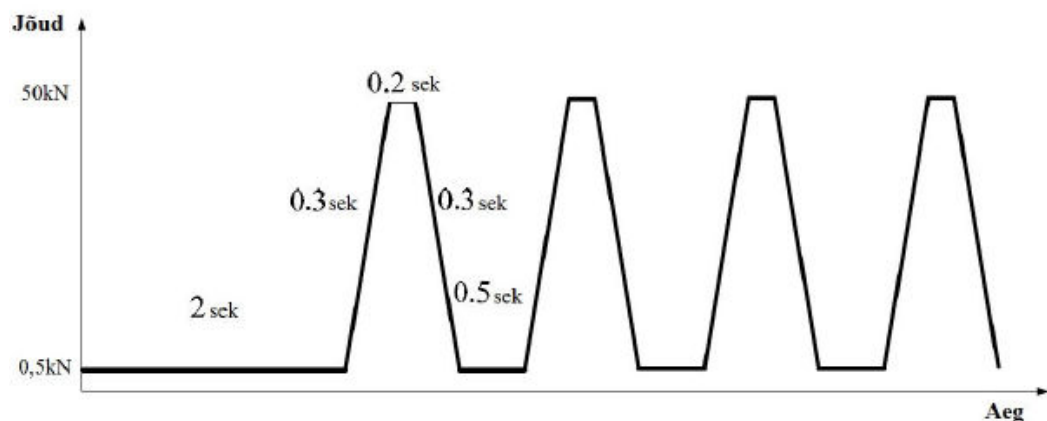
1.3 Koormuse parameetrid

Koormusparameetrid määrati vastavalt Elastsete teekatendite arvutamise juhendile 2001-52 (ratta jälje arvutuslikuks diameetriks 37cm). Juhend määrab erisurveks 0,6MPa [1], kuid tulenevalt sellest, et tänapäevaste veokirehvide rõhk on kasvanud 0,8MPa-ni ja rohkem [13], kasutati erisurve suurusena hüdrosilindri talle alla sama väärtust. Selleks oli vajalik maksimaalne jõud katte peal 86kN (plaadi diameeteri 37cm puhul). Vältimaks hüdrosilindri „hüppamist“ katte peal ja imiteerimaks raskeveoki telje sujuvat liikumist (koormus tuleb ja läheb ühtlaselt), kasutati algsurvena 10kN.

Elastsete teekatendite projekteerimise juhend määrab üksikkoormuse kestvuseks 0,1sek, mida seoses kasutatava hüdroüsteemi tõttu võimalik saavutada pole ja mis antud katsetuse puhul ei olnud ka eraldi eesmärgiks. Ei katse ettevalmistamise, katse käigus ega ka kokkuvõtte kirjutamise ajal pole leitud teaduslikku põhjendatust erinevate koormusintervallide kasutamiseks. Seega antud katsetuste ajal on lähtutud mujal maailmas tehtud analoogsetes katsetustes kasutatud parameetritest, näiteks kasutas Han, 2011 [8] geosünteedide uuringus sarnase kasti puhul sama koormusintervalli

(0,77Hz), Perkins, 1999 [7] see-eest 0,67Hz, kusjuures märkuseks oli juurde lisatud, et kasutatud koormussüsteem ei võimaldanud kiiremat koormustsükli. Selles uuringus kasutatud koormustsükli olemus (0,77Hz) on kujutatud joonisel 11.

Koormustsüklite arv mõlemal katsetusel oli 1000000. Kogemuslikult on teada, et tugevam paekillustik ($LA < 30$) võib hakata lagunema konstruktsioonis peale 10a konstruktsioonis olemist. Määramaks seega olulisi muutusi killustiku sõelkõveras, oleks vajalik modelleerida selline arv koormustsükleid, mis vastaks nimetatud perioodile. Vastavalt Soome normatiividele (kus normtelg on meie käsitlesega võrreldes sama) vastaks selline tee liiklussagedusele 3000AKÖL, mis meie projekteerimismäärade kohaselt on III-klassi maantee. Üks miljon tsüklit valiti antud katsesse ajalistel põhjustel (minimaalne katsetusaeg ilma pausideta oleks umbes 15 ööpäeva). Tinglikult võib katsetulemusi laiendada ka suurematele koormustele, kuna tuleb arvestada, et siin on tegemist kiirendatud katsega, st kõik 1milj koormustsükli langevad katendile praktiliselt ilma „puhkepausideta“.



Joonis 11. Koormusintervall ja kasutatud jõud

1.4 Katse käik

Mõlema katse alguses ja lõpus kontrolliti kogu konstruktsiooni elastset vastet, st palju konstruktsioon koormusest läbi vajub ja palju läbipaindest taastub. Uuring viidi läbi kahes osas, esimeses tehti kümme koormamist, paus 10sek ja nii kümme tsüklit järjest. Seejärel, vähemalt 10min möödudes alustati järgmisega, milles oli samuti kümme koormamist, paus 60sek ja kümme tsüklit järjest (tardkivikatse alguses tehti viis tsüklit). Enne elastse vaste määramist tehti 100 koormustsükli. Tulemused on kirjas peatükis 3.1.

Katse käigus oli mõningaid pause, st etteantud 1milj tsükli ei läbitud ühtejutti. Pausid olid enamasti tingitud tehnikast, näiteks kuumenes hüdroüsteemi õli kuumade ilmadega liigselt lülitades süsteemi välja. Seetõttu võib näiteks pingegraafikutelt näha muutusi. Samas annavad pausid võimaluse analüüsida konstruktsiooni taastumist ja käitumist uuesti käivitamisel.

1.4.1. Proovivõtud

Kõikidest kasutatud materjalidest võeti proovid puistest laboratoorseteks analüüsideks. Kvarts- ja paekiviliivas määrati terastikuline koostis (sh peenosiste sisaldus), materjali liigitus vastavalt GOST 25100-95 ning EVS 1997-1:2003; filtratsioonimoodulid Sojuzdornii meetodil. Töö viis läbi Eesti Keskkonnauuringute Keskus. Killustiku puhul kontrolliti eelpool nimetatud nõuetele vastavust (tulemused lisas 2) AS Teede Tehnokeskuses.

Uurimistöö peamine eesmärk oli määrata lubja- ja tardkivikillustiku vastupidavuserinevused samades tingimustes. Peamiseks viisiks selle määramiseks on leida muutused sõelkõveras, st määrata kas ja kui palju kivi on purunenud. Seega tehti sõelkõvera analüüs enne ja pärast katsetust.

Põhjamaades on tardkivikillustikuga suured kogemused ja selle vastupidavus on teada. Selle materjali puhul eeldati, et tihendamise käigus ta ei purune või on see väga marginaalne. Seega võeti esimene proov kastist pärast materjali lõplikku tihendamist, koormustsentrilt eemal (joonised 12 ja 13). Teine võeti pärast katset otse koormustsentrilt.



Joonised 12 ja 13. Tardkivikillustikust võetud proovid pärast tihendamist

Lubjakivikillustikus võeti proovid enne tihendamist puistest, pärast tihendamist (üks proov kastist ja teine väljapoole ehitatud katselõigult (peatükk 2.4.2) ning pärast katsetust, ehk kokku neli erinevat proovi – 16/32, millele lisati 8/16 (kiilekillustik) puistest, kiilutud ja tihendatud proovid ning proov pärast katsetust (kõik tulemid on esitatud lisas 3 ja peatükis 3.2).

1.4.2. Killustikuproovid

Killustikalused ehitati ja tihendati kahes kihis. Peale alumise kihi ehitust paigaldati tihendusproovi võtmise kohta ning koormamise koha alla kahe kihi vahele marlitükk (joonis 4), mille eesmärgiks oli takistada peenosiste, mis võiksid tekkida tihendamise ja katse käigus tekkiva purunemise tõttu, settimine kihi alla. Kõik marlile settinud materjal (sh peenosid) koguti kokku ning lisati killustikuproovidele.

Kõik killustikuproovid võeti kuni 12,5cm sügavuseni, seda seetõttu, kuna kõige suuremad pinged materjalis tekivadki vahetult asfaldi all, siis eeldatavasti ka seal toimub kõige suurem purunemine. Osaliselt tingis sellise meetodika ka proovivõtuks kasutatud kast, mis oli mõõtmetega 56x37x23cm (vastavalt laiused ja sügavus). Eesmärk oli saada võimalikult täpne proov, seega kaevati proovivõtu koht sarnane kasti kujule. Kolmas põhjus killustikukiht „poolitada“ olid pingeandurid killustikukihi all, mis olid sängitatud kvartsiiva, mille olemasolu oleks takistanud saamast täit pilti sellest, palju katse käigus killustikkihi koostis muutus (joonis 3).



Joonised 14 ja 15. Lubjakivikillustikust võetud proovid pärast tihendamist kastist

Lubjakivikatse ajal võeti kaks sõelanalüüsi tihendatud killustikust – üks kastist (joonised 14 ja 15) (samamoodi toimiti ka esimese katse puhul) ja teine katselõigult (joonised 16 ja 17). Kastist võetud proovi kohast mõõdeti pärast tihendamist kandevõimeks Inspector 3ga 190MPa. Kahjuks ei olnud võimalik mõõta kandevõimet katselõigul, kuid tihendamine seal lõpetati siis, kui killustiku pinda ei tekkinud enam plaadist jälgi ning tihendaja hakkas kergelt „hüppama“. Samuti kontrolliti olukorda, kas tihendatud pinnale paigutatud killustikutera puruneks sõites sellest üle staatilise rulliga.

Väljapoole katseseadet ehitati ka väike katselõik (joonis 16), millega leida killustiku purunemine tihendamise käigus ja mille tulemust saaks võrrelda kastis saadud tulemusega. Katselõigul oli killustikkihi paksus 20cm, ehitati samuti kahes kihis ja kiilumismeetodil. Proovilõigu alla oli

paigaldatud geotekstiil, mille all oli omakorda suhteliselt tugev killustikalus. Killustiku proov võeti katselõigu keskelt (joonis 17).



Joonised 16 ja 17. Tihendatud killustiku proov kastist ja katselõik teise katse puhul

2. TULEMUSTE ANALÜÜS

Kõik järgnevad tulemused kehtivad vaid antud katsetingimuste puhul ning on esitatud põhinedes katsetingimustel. Veel täpsemaks uuringuks ja kindlamateks järeldusteks on vajalik lisada külmutus-sulatustsüklid ning soovitatavalt soolalahus, kuna teatavasti lubjakivikillustiku külmakindlus ei ole võrreldav näiteks tardkivikillustikuga rääkimata olukorrast, kus materjalid puutuvad kokku kloriididega. Tulemused põhinevad vaid kahel katsel, igasuguste hajumiste ja vigade kõrvaldamiseks on vaja oluliselt rohkem. Siiski on tulemid piisavad võimaldamaks mõningaid järeldusi.

2.1 Üldine konstruktsiooni toimivus

Peatükis tuuakse üldiselt välja eraldi, mis juhtus tard- ja lubjakivikatsetuses. Keskendutakse pigem muudele teguritele, kui killustiku vastupidavusele ja püütakse leida vastust, miks üks või teine nähtus juhtus.

Konstruktsioonide paremaks võrdluseks mõõdeti enne katsete algust ja lõpus katendi koormustaastuvust ning taastumatut deformatsiooni. Taastuvuskatsete ajal tehti kõigepealt 10 koormamist, millele järgnes 10sek puhkepaus, nii 10 korda; seejärel vähemalt 10min möödudes uuesti 10 koormamist, millele järgnes 1min puhkepaus, nii 10korda (tardkivikatse alguses tehti viis tsüklit). Konstruktsiooni elastsusmoodul arvutati valemiga 2 (valem kehtib staatilises olukorras jäiga plaadi poolt põhjustatud läbipainde korral, seega esitatud elastsusmoodulite suurused ei ole võrreldavad näiteks FWD-mõõtetulemitega. Valemiga arvutatud elastsusmoodul on kasutusel vaid nende kahe konstruktsiooni omavaheliseks võrdlemiseks). Elastse vaste väärtused saadi mõõtes konstruktsiooni vajum, mis tekkis 0,2sek koormusest ja kui oli möödunud 50sek koormuse eemaldumisest (selleks ajaks oli taastumine täielikult stabiliseerunud).

Katsetuse (põhikatse) käigus tekkisid mõningad seisakud, mis andsid võimaluse jälgida koormustaastumist (läbi selle elastsusmooduli muutust) läbi katse. Mõõtmispõhimõte oli sama – mõõdeti erinevused koormuse rakendumise ajal ning selle eemaldudes pärast konstruktsiooni stabiliseerumist.

2.1.1 Tardkivi sisaldava konstruktsiooni toimivus

Nimetatud viisil mõõdetud elastne vaste kogu konstruktsioonil katse alguses oli 0,79mm ja sellest valemiga 2 [3] arvutatud elastsusmoodul 268MPa. Esimese 150 koormamisega tekkis taastumatu deformatsioon 1,6mm. Elastse vaste mõõdeti ka pärast katsetust, tulemuseks saadi 0,60mm ja sellest arvutatud elastsusmoodul on 352MPa

$$w_0 = \frac{\pi(1 - \nu^2)qa}{2E} \quad (2)$$

kus,

w_0 – elastne vajum;

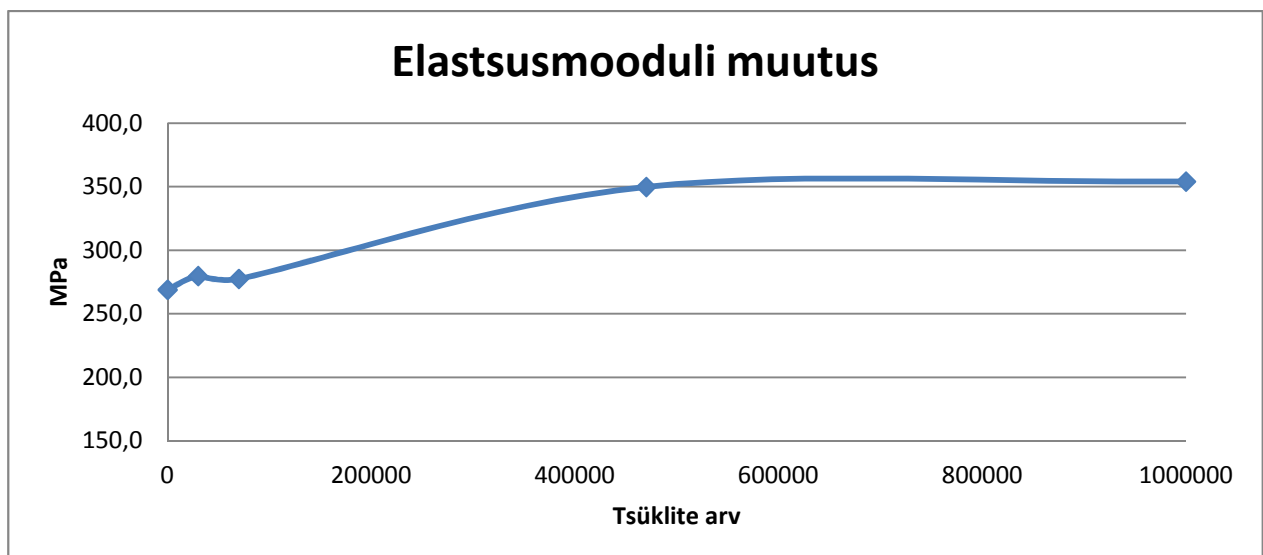
ν – Poisson (kasutati 0,3);

q – surve (0,8MPa);

a – koormustalla raadius;

E – elastsusmoodul

Tardkivikatses oli võimalik jälgida tervikkonstruktsiooni elastsusmooduli muutumist tänu katseseeria käigus tekkinud pausidele. Muutus on esitatud joonisel 18 (täpsem sellekohane arutelu peatükkides 2.1.3 ja 2.2.1).



Joonis 18. Elastsusmooduli muutus tardkivikatses

Vajum tekkis koormustalla alla mõõdetuna asfaldi pealt 5,5cm (joonised 19 ja 21) (profiili jälgiv mõõtmistehnoloogia [10] ja vajumiandur näitas vajumit 3,1cm.



Joonised 19 ja 20. Olukord pärast katset

Asfaltkihi paksus peale katset mõõdetuna koormustalla alt oli umbes 8cm (joonis 21). Jäävpoorsuse protsent näitab tegelikult õhu sisaldust kihis. Lahutades selle väärtuse maha (ACsurf – 5,3cm ja 9,3% ning ACbase – 6,5cm ja 11,8%), saame et kihipaksus ilma poorideta oleks 10,54cm ehk erinevuseks tuleb 1,26cm. Laboratoorset analüüsi katsest väljunud materjalile ei tehtud, kuid visuaalselt hinnates olid koormustalla all kõik poorid kokku surutud. Järelejäänud 2,54cm pidi kahanema nihkumise tõttu. Võis olla võimalus, et talle all olid kihipaksused veidike teistsugused, kui puurkehade võtmiskohast (tegu oli ikkagi käsitööga).



Joonised 21 ja 22. Asfaldikiht peale katsetust lammutamise käigus ja kihipaksus koormustalla all

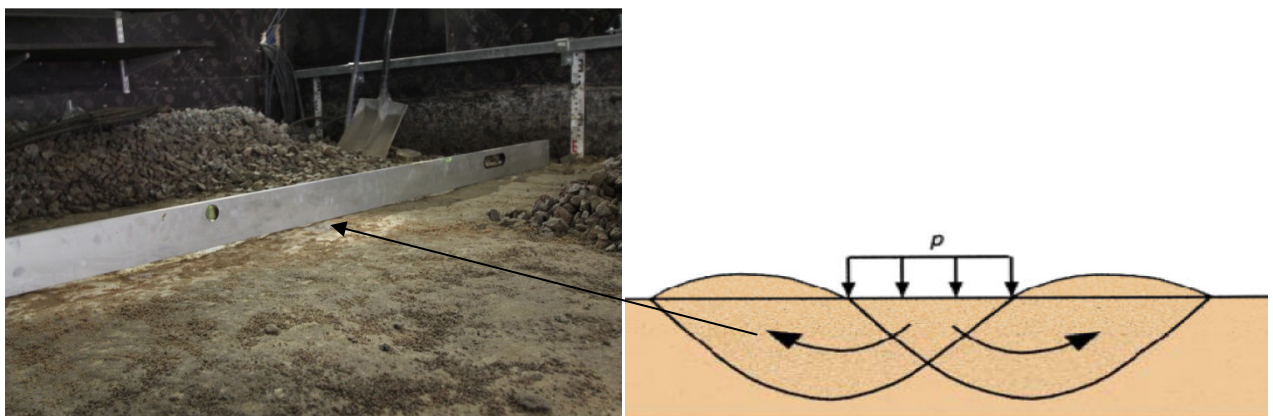
Katse näitas, et halvasti tihendatud materjal oli nihkekindlus väiksem (hiljem käsitletakse lubjakivi sisaldanud konstruktsiooni katset, kus vajum asfaldis oli oluliselt väiksem). Osaliselt võis probleem olla tingitud ka katsetamise ajal valitsenud kõrgest õhutemperatuurist (enamus ajast oli õhutemperatuur üle 20°C, kohati lähedal +30°C.).

Peale asfaltbetooni eemaldamist oli võimalik mõõta vajum killustiku pinnalt ja võtta proov laboratoorseks analüüsiks. Vajumi suuruseks mõõdeti umbes 1,7cm (joonised 23 ja 24). Tuleb märkida, et tulemust enam täpsemalt pole võimalik esitada, kuna osa killustikku oli asfaltbetoonikihi alapinna küljes ning katte eemaldamine nihutas mingil määral ka allesjäänud killustikukterasid.



Joonised 23 ja 24. Vajum killustiku peal

Vajum killustiku alt ehk kvartslüüa pealt mõõdeti maksimaalselt 2cm, kusjuures see oli toimunud mitte koormustalla keskel vaid oli nihutatud sellesse külge, kuhu tald oli rohkem vajunud (nagu on kujutatud joonisel 21). Vaadates joonist 25 näeme, et vähesel määral on liivas toimunud väljasurumine joonisel 26 kujutatud viisil ehk nihkepinged materjalis on koormusega ületatud. Seda sama näitab ka Elastsete teekatendite juhendi 2001-52 alusel sooritatud arvutus katsetatud konstruktsioonile.



Joonised 25 ja 26. Nihkepinged said katse käigus liivas ületatud

Killustikus mõõdeti vajumiks 1,7cm, seega võrreldes liivast mõõdetud 2cm`ga oleks justkui 3mm „kadunud“. Põhjuseid võib olla selleks kaks. Esiteks juba ehitamise käigus ei pruugitud suuta tagada absoluutselt tasast killustiku pinda. Liiva puhul on seda käsitsi ehitades kergem saavutada,

nimelt saab latiga siluda pinna peale tihendamist täiesti loodi, kuid jämedamaterjalise killustiku puhul on seda võimatu teha, eriti kui tegemist on juba tihendatud materjaliga. Seega võis koormustalla all olla 3mm kõrgune „muhk“. Teine põhjus võib olla juba nimetatud mõõtmises, kuna asfaldi eemaldamisega ei jää alles siledat pinda, vaid selle alapinda jääb kinni mõningal määral materjali.

Liites kokku kõik erinevates kihtides tekkinud vajumid, saame et 2cm tuli liivast ja 3,8cm asfaldist (maksimaalne võimalik väärtus), saame koguarvuks 5,8cm. Vajumiandur pinna peal näitas see-eest 3,1cm. Pöördudes tagasi joonise 20 juurde näeme, et andur oli paigaldatud sellele osale, mis oli vajunud vähem. Liivas tekkinud 2cm mõõdeti see-eest rohkem kaldus oleva poole alt. Tagantjärele võiks öelda, et tulnuks kasutada kahte vajumiandurit – üks ühel ja teine teisel pool koormustalda, kuid lõpptulemuse analüüsimist see fakt ei sega.

Vajumikausi laiuseks/suuruseks killustiku pealt mõõdeti umbes 50cm ja liivas umbes 100cm (ala, kus latt ei puutunud alust).

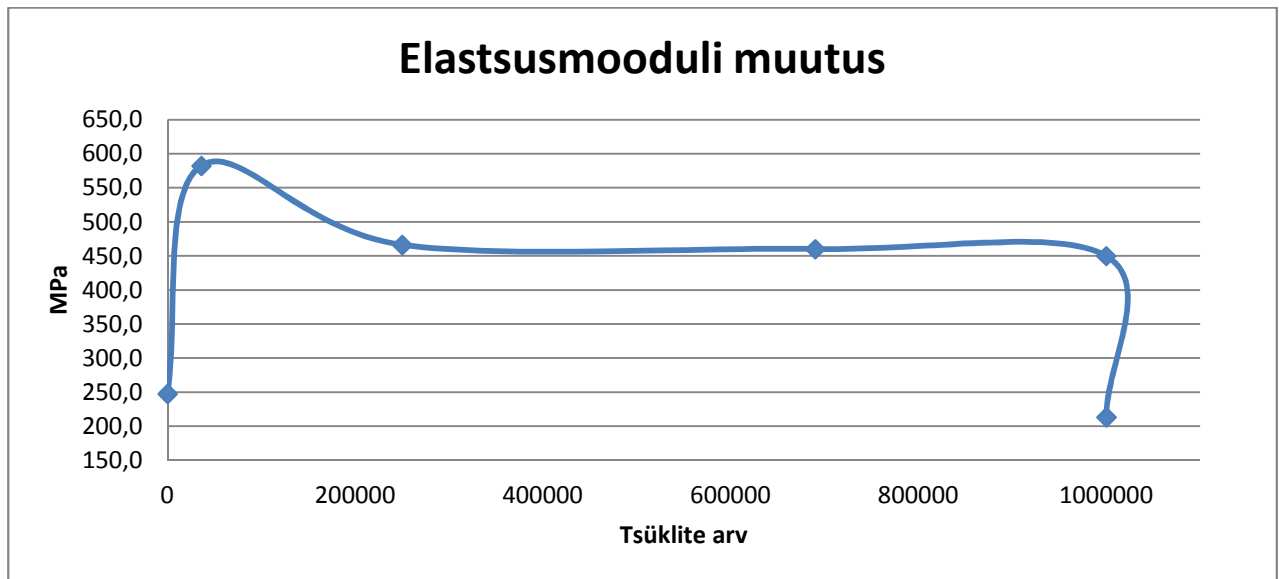
2.1.2 Lubjakivi sisaldava konstruktsiooni toimivus

Esimesest katsetusest saadi hulgaliselt kogemusi, mida üritati teise katsetuse puhul ära kasutada ja vältida eelnevalt tehtud vigu. Eelpool oli juba kirjeldatud muudetud asfaltsegu tihendamismetoodikat ning see andis paremaid tulemusi. Lisaks värviti kogu koormatava ala ümbrus valgeks nägemaks pragude teket katte peal.

Elastne vaste kogu konstruktsioonil katse alguses kasutades eelpool nimetatud mõõte- ja arvutustehnoloogiat oli 0,85mm ja sellest arvutatud elastsusmoodul 247MPa. Esimese 200 koormamisega tekkis taastumatu deformatsioon 0,65mm. Samad näitajad katse lõpus vastavalt 0,99mm ja 213MPa.

Lubjakivikatsetuse ajal jälgiti samuti elastse vaste muutumist ajas, kuid siin on mõningad küsitavused. Tardkivikatse elastsusmooduli tulemused kasvasid pidevalt, kuid lubjakivikatses katse käigus saadud lugemid näitavad oluliselt suuremaid väärtuseid, kui alguses ja lõpus tehtud elastse vaste spetsiaalkatsed. Samuti katse käigus registreeritud lugemid ületavad elastsusmooduli poolest oluliselt tardkivikatse omi. Näiteks saadi väärtusteks 582, 466, 460, 450MPa (joonis 27). Hetkel on põhjust raske selgitada, kuna kasutatud koormused ja mõõtemetoodika olid samad. Seega tuleks mõningase ettevaatlikkusega suhtuda kõigisse siin esitatud elastsusmoodulite väärtustesse, kuna ei ole teada, miks elastse vajumi spetsiaalkatsed, mis mõlemad tehti vastavalt vahetult enne ja pärast

põhikatsetust, ja katsesisesed erinevad nii kardinaalselt. Siiski on võimalik hoomata elastsusmooduli vähenemise trendi (täpsem sellekohane arutelu peatükkides 2.1.3 ja 2.2.1).



Joonis 27. Lubjakivikonstruktsiooni elastsusmooduli graafik. Alguse- ja lõpupunktid on elastse vaste spetsiaalkatsetest, muud punktid katsesisesed

Vajum tekkis koormustalla alla mõõdetuna asfaldi pealt 3...4cm (profili jälgiv mõõtmistehnoloogia [10], olenevalt kohast ja mis nurgast mille alt mõõta. Hoolimata korralikust tihedusest vajus ka seekord üks pool rohkem kui teine ning sealt, kus vajumiandurit ei olnud) ja vajumiandur näitas suurst 2,2cm (joonised 28 ja 29)



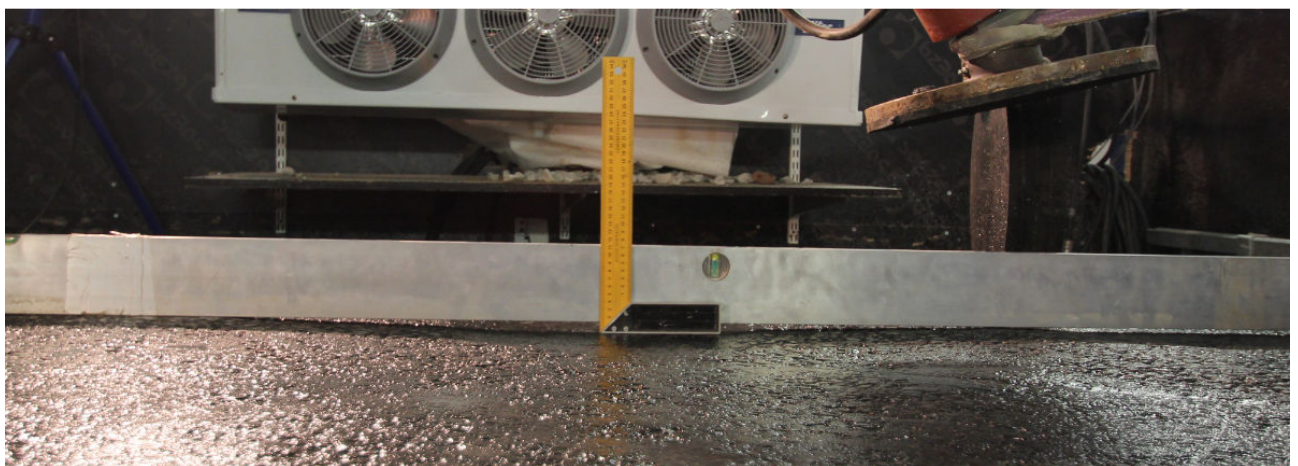
Joonised 28 ja 29. Asfaltbetooni pealmine pind pärast lubjakivikatset

Vajum mõõdetuna killustiku pealt oli 1,5cm ja liiva pealt 2,0cm. Tõenäoliselt tekkis 0,5cm vahe sellest, et ei suudetud tagada killustikukihi absoluutset siledust vaid koormustalla alla jäi enne katte paigaldamist kerge muhk (joonis 30).



Joonis 30. Killustiku pind peale tihendamist

Puurkehad asfaldist näitasid keskmist kihipaksust pealmisele segule 4,5cm ja alumisele 6,1cm. Peale katsetust konstruktsiooni lammutades mõõdeti asfaltbetooni kihipaksuseks 9cm. Samuti selgus, et pealmise segu kihipaksus oli 4cm asemel 3,6cm ja alumisel 6cm asemel 5,4cm. Mingil määral oli kihipaksuse vähenemine tingitud kokkusurumisest pooride arvelt (maksimaalselt võis see olla 0,25cm) ja väljanihkumisest. Märkida tuleb ka seda, et asfaltbetooni paigaldusega ei õnnestunud saada siledat pinda vaid koormustalla alla jäi umbes 1cm sügavune lohk. Sellel võib olla mitu selgitust. Esiteks käsitsi laotades on keeruline saavutada täiesti siledat pinda ja ühtlast kihipaksust; teiseks tekkis juba tihendamise käigus materjali kerge väljanihkumine küljele (joonis 31).



Joonis 31. Asfaltbetooni pind peale pealmise segu paigaldamist

Liites kokku kõik erinevates kihtides tekkinud vajumid, saame et 2cm tuli liivast ja 1...2cm asfaldist (maksimaalne võimalik väärtus), saame koguarvuks 3...4cm. Vajumiandur pinna peal näitas see-eest 2,2cm. Põhjus oli jälle selles, et andur oli paigaldatud sellele osale, mis oli vajunud vähem. Kahjuks ei olnud veel võimalik selles katses kasutada kahte vajumiandurit talla peal.

Vajumikausi laiuseks/suuruseks killustiku pealt mõõdeti umbes 70cm ja liivas umbes 100cm (ala, kus latt ei puutunud alust).

2.1.3 Konstruktsioonide kui tervikute võrdlus

Mõlemad katsed näitasid, et põhiline vajum konstruktsioonis tekkis asfaltbetoonis ja liivakihis killustikaluse all. Liivakihtide tihedused ei olnud ehitamise lõppedes absoluutselt samad (tardkivi sisaldava konstruktsiooni puhul 1,0 ja lubjakivi 0,995), kuid lõpptulemus oli võrdne – mõlemal mõõdeti täpselt 2cm. Vajumikausi suuruseks killustiku pinnas mõõdeti tardkivikatses 50cm ja liivakihi pinnas 70cm ning lubjakivikatses vastavalt 70cm ja 100cm. Tulemuste erinevus võib olla hajuvus või tingitud katte omadustest (tardkivikatse poorem asfaltbetoon ja kõrgem õhutemperatuur võis tingida halvema koormusjaotuse).

Selgelt oli eristatav asfaltbetooni toimivus. Esimeses katses jättis tihedus soovida, seega deformeerus kiht märgatavalt rohkem ning väljanihkumine oli oluliselt suurem.

Elastsed vasted ja nendest (tinglikult)arvutatud elastsusmoodulid konstruktsioonile enne ja pärast katsetust on esitatud tabelis 2. Siinjuures tuleb veelgi toonitada, et numbrid on vaid võrdlusemomendi saamiseks.

Tabel 2. Konstruktsioonide elastsusmoodulite võrdlused

Konstruktsioon	Elastne vaste enne katset	Elastsusmoodul enne katset	Elastne vaste pärast katset	Elastsusmoodul pärast katset
Tardkivi	0,79mm	268MPa	0,60mm	352MPa
Lubjakivi	0,85mm	247MPa	0,99mm	213MPa

Katsete ajal olnud pausid andsid võimaluse jälgida elastsusmoodulite muutuse ja tsüklite arvu omavahelist seost. Tardkivikonstruktsiooni elastsusmoodul kasvas katse käigus, arvatavasti oli põhjus eelkõige asfaltbetoonkihi, kuid mingil määral ka kogu konstruktsiooni tihenemises.

Lubjakivikonstruktsioon seevastu näitas katse käigus oluliselt suuremat elastsusmoodulit, kui alguse ja lõpu spetsiaalkatsed. Seega ei ole kindlust väita, mis elastsusmoodulitega peaks arvestama ning mis on see number, millega võrrelda kahte katsetust omavahel. Suurim väärtus oli 528 (katseseeria algusest) ja väikseim 213,3MPa (katse lõpu elastse vaste katsetus). Selliseid erinevusi on hetkel raske selgitada.

Siiski on eristatav see, et lubjakivikonstruktsioonil elastsusmoodul katse käigus langes. Võttes aluseks elastse vaste spetsiaalkatse tulemused algusest ja lõpust saame, et erinevus on -13,8%. Tardkivikonstruktsiooni puhul elastsusmoodul seevastu tõusis 24%. Hetkel on võimatu öelda kuivõrd üks või teine tegur neid numbreid mõjutas (elastsusmoodulit võis mõjutada õhutemperatuur ja asfaltbetooni olukord (selle poorsus) ning võibolla vähesel määral ka aluse niiskus (mis ei olnud katsete sooritamise ajal 100% võrdne)). Teisalt võis mõõtmiste sooritamiste ajal olla tegemist mõne meetoodilise veaga (katseid on vaid kaks, seega pole millegagi võrrelda).

Soome teeprojekteerimise normid arvestavad sellega, et killustikukihi elastsusmoodul kõigub vahemikus 100...280MPa seotuna terastikulise koostisega [11], ehk mida peenem on optimaalse killustiksegu koostis, seda väiksem on selle elastsusmoodul. Sama kehtib ka kõikide muude materjalide puhul – kandevõime on otseselt seotud terakoostisega. Vaadeldes lubjakivi sõelkõveraaid (tabel 4 ja joonis 32) näeme, et terakoostis oli mingil määral peenenenud. Otseselt peenosiste suurenemine oli väike (1,3%→1,8%; tabel 4), kuid katse käigus toimus peamine muutus 20mm sõela läbitavuse juures – peale katset suurenes läbitavus 3,9% ehk niipalju peenes materjal selles vahemikus.

Hoolimata mõningatest küsitavustest seoses elastsusmoodulitega, oli võimalik täheldada selget erinevust konstruktsioonide käitumises – tardkivikonstruktsiooni kandevõime suurenes või püsis paigal, lubjakivil vähenes pidevalt. Samuti oli võimalik täheldada erinevust konstruktsioonide elastsusmoodulite vahel. Kindlat protsenti ei ole hetkel võimalik öelda, selleks oli katsete arv liiga väike. Kindlasti ei saa olla korrektne meie katendi arvutustes kasutatav killustiku elastsusmoodul 280MPa mõlemale materjalile. Samuti on väga tõenäoline, et killustike elastsusmoodul LA-väärtuse vahel on selge seos (mida suurem LA, seda rohkem materjal dünaamilise koormuse all puruneb, seda rohkem materjal peeneneb ja seda väiksemaks muutub elastsusmoodul).

Leiaime, et üks viisidest, kuidas leida optimaalseid kasutusvõimalusi kohalikule lubjakivikillustikule, on alustuseks määrata selle õige LA. Uurimustööd peavad kindlasti jätkuma, nendest kahest katsetusest lõplike järelduste ja soovitude tegemiseks ei piisa. Selge on see, et lubjakivil on võrreldes tardkiviga madalam elastsusmoodul, seega tuleks leida ka viisid, kuidas seda kompenseerida.

2.1.4 Andurilt saadud info analüüs ja võrdlus

Kahjuks esines anduritega ja nendelt saadud tulemustega mitmeid probleeme, mis takistavad tulemuste lõplikku analüüsimist. Samuti katsete vähesus takistav võimalike hajuvuste tasandamist.

Võrdlus andurite vahel on toodud tabelis 3. Kui jooniste lisas 5 ning tabelis 3 on mõni näit negatiivne, siis sisuliselt tähendab see, et koormust pole või on see marginaalne. Pingeandurid on valmistatud mingisuguseks teatud koormuseks (antud juhul oli maksimaalne taluvus 500kPa) ning täpsus on kalibreeritud eelkõige seda silmas pidades. Väga väikestel koormustel hakkab lugemeid mõjutama mitmed tegurid, mis põhjustavad kõikumist (kaasaarvatud seda, et nullpunkti näidatakse negatiivse lugemina). Kui andmeid on palju, võetakse lugemiks kõikumiste keskmine. Nähtust on võimalik täheldada ka siin – mida väiksem lugem, seda ebatasasem on graafik. Tegemist on normaalse nähtusega ning vaadeldes sarnaste katsetuste aruandeid mujalt maailmast, näeme samasugust pilti.

Tabel 3. Andurinäitude võrdlus tard- ja lubjakivikonstruktsioonis

Anduri asukoht	Tardkivi	Lubjakivi	Viide graafilisele lugemile(lisas 5)
	Lugem, kPa		
1. Killustikukihi vahel, horisontaalpinged	-25(ehk pingeid pole)	55...60	Joonis L5.1
2. Killustiku all, 10cm	~500 (andur purunes katse käigus)	550→400	Joonised L5.2
3. Killustiku all, 18,5cm	300→350→400→500→350	380→200→120	Joonised L5.3
4. Killustiku all, 30cm	Andur purunes	120→220→200	Joonised L5.4
5. Horisontaalpinged, 30cm	25→30	Ebausaldusväärne	Joonised L5.5
6. Horisontaalpinged, 50cm	Ebausaldusväärne	0→90	Joonised L5.6
7. Tõmbeandur asfaldi alapinnas	Tõmbepinge kasv 6000N→18700N	Tõmbepinge kasv 7000N→15500N	Joonised L5.7
8. Horisontaalpinged muldes katte pinnast kahekordse talla läbimõõdu sügavusel (74cm katte pinnast)	Konstantne 130kPa (mille sees omakaalust 40kPa)	110→130kPa (mille sees omakaalust 35→40kPa)	Joonised L5.8

Ainukene sarnasus on andurite vahel, mis asusid killustiku all 10cm kauguses tsentrist. Kahjuks katse käigus tardkivis olev andur purunes ning andmed on saadavad vaid väga katsetuse algstaadiumist (esimesed umbes 75000 koormustsükli).

Probleemid esinesid ka horisontaalpingeid mõõtvates andurites. Näiteks andur, mis asetses kahe killustikukihi vahel, näitas tardkivikatse puhul koormuse all negatiivset väärtust ning koormuse lõpetades positiivset, ehk pinge koormuse rakendudes hoopis vähenes (kas koormusjaotusnurk läks andurist „läbi“ nihutades selle ees ja taga olevat materjali nii, et antud koht jäi koormusest puutumata?). Tõenäoliselt näitab see, et koormusjaotusnurk tardkivis oli väiksem kui lubjakivis?

Killustikukihi põhjas paiknenud horisontaalpingeid mõõtnud andurid olid end katse ehitamise või katse käigus pikali keeranud (ehk hakanud mõõtma vertikaalpingeid), seetõttu on tabelis märges „ebausaldusväärne“. Seega peaks lubjakivikatse puhul andurid ridadelt nr 4 ja 5 tabelis 3 näitama samu väärtusi, kuid vaadeldes jooniseid L5.4 ja L5.5 (see, mis puudutab lubjakivi) nii pole. Arvatav põhjus oli see, et katse lammutamise käigus selgus, et andur nr 5 oli vajunud umbes 45° nurga alla, seega on saadud lugem ebausaldusväärne.

Erhola, 1996 [2] kirjeldas jämedateralisest materjalist ehitatud katendikihtide toimivust, et jämedateralistes materjalides jäikus kasvab peapinge kasvades. Peeneteralistes materjalides pinge kasvatamine toimib vastupidiselt – jäikus väheneb.

Asfaltkatte väsimuspragunemise teke on seoses selle alapinda tekkiva tõmbepingega. Katte paindumine ja läbi selle tekkiva tõmbepinge suurus sõltub katte all oleva sidumata kihi (aluse) jäikusest. Mida jäigem alus, seda väiksem on katte paindumine ja seda väiksem alapinda tekkiv tõmbepinge.

Teljekoormuste kasvades kasvab ka aluse jäikus. Asfaldil on olukord vastupidine. Seetõttu kandev kiht annab vähem järgi ehk kate kannab koormuse üle kõvemale pinnale ning seetõttu katte deformeerumise risk kasvab rohkem kui prognoositi.

Roobaste ja ebatasasuste tekkeks annab olulise osa aluspinna (dreenikihi või mulde ülaosa) deformeerumine. Kui aluspind on peeneteralistest materjalidest, on vajumite tekke risk loomulikult suurem kui jämedateralistes materjalides. Teljekoormuste kasvades aluspinnal pinge kasvab. Seetõttu väheneb ka selle jäikus ja risk deformatsioonidele kasvab rohkem, kui oleks osatud oodata.

Vaadeldes anduritelt saadud andmeid võiks väita, et lubjakivialus oli tardkivist jäigem. Nimelt vaadates rea nr 3 andureid näeme, et lubjakivis vähenesid pinged katse lõpupoole oluliselt rohkem (ning kandusid suuremale alale vaadates, kuidas kasvas real nr 6 oleva anduri näit (joonis L5.6), kui tardkivil. Kahjuks oli tardkivikatses 50cm horisontaalandur „keerand end külili“, kuid see-eest saame infot, mis toimus selles kohas vertikaalpingetega. Jooniselt L5.6 selgub, et koormamisest tingitud pinge kasv oli väike (30...40kPa). Samuti oli asfaldianduri lõppnäit väiksem. Muidugi vajaks antud väite esitamine rohkem katseid ehk tõestust. Tulemused võisid olla tingitud mitmetest teguritest, mis võisid põhjustada ka ekslikke järeldusi.

Üks põhjus, miks lubjakivi jaotas koormust paremini, võib olla seotud tema mineraloogiaga, nimelt juba katsete ehitamise käigus killustikalust tihendades selgus, et tardkivi tiheneb oluliselt raskemalt, kuna materjaliosad on niivõrd tugevad ning ei mugandu üksteisega. Samal põhjusel võis koormuse jaotus ehk jäikus materjalis olla ka kehvem. Teisalt võis erinevus peituda ka asfaltbetoonis, kuna tardkivikonstruktsioonis oli selle tihedus väiksem, mis viis halvema koormusjaotuseni.

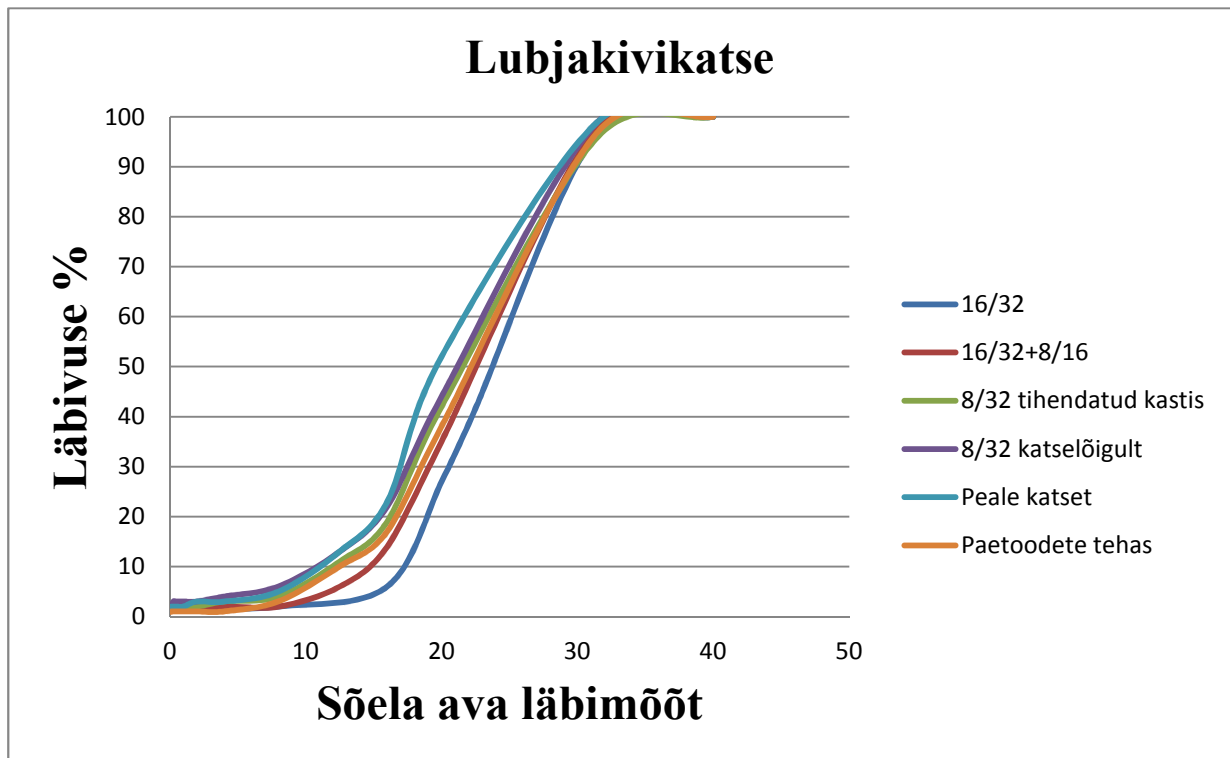
2.2 Hinnang killustike vastupidavusele

Katsetes kasutatud lubjakivi on parim, mis Eestist on võimalik saada, kaevandatud Vão karjäärist. Kasutatud tardkivi (graniit) oli pärit Soomest ja tarnijaks Rudus Eesti AS. Mõlema killustiku omadused on esitatud tabelis 1 ja lisas 2

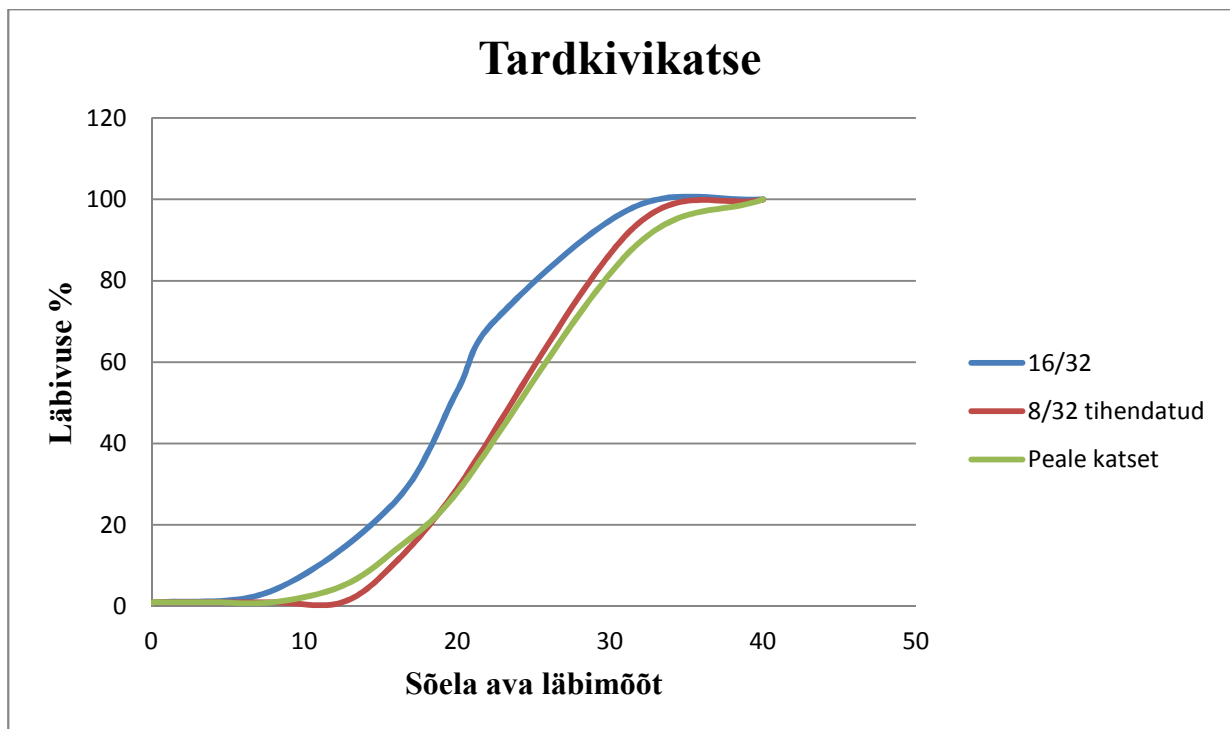
Mõlema katse korral tehti sõelanalüüsid põhikillustikust 16/32 (terastikuline koostis ja peenosiste sisaldus vastavalt EVS-EN 933-1:2007) enne katset puistest, pärast tihendamist nõutud tasemeni ja pärast katsetsükli lõppu. Tardkivi puhul eeldati, et tihendamise käigus see ei purune või on nii marginaalne, et võimalik sõelkõvera muutus jääks hajuvuse tõttu märkamatuks. Lubjakivikatse korral tehti sõelkõveraanalüüs lisaks eelpool nimetatutele veel puistest, kui sinna on lisatud normikohane kogus (25kg/m^2) killustikku fraktsiooniga 8/16; pärast tihendamist kastist ja katselõigult. Proovivõtu meetoodika on kirjeldatud peatükis 2.4.2. Koondtulemused sõelkõverale on esitatud tabelis 4 ja joonistel 32 ning 33 (dubleeritud lisas 6). Enne antud aruandes kirjeldatud katse sooritamist tehti täismahuline testkatse, mida rahastas AS Paekivitoodete tehas. Selle katsetuse detailides hetkel ei peatu, kuid tabelis 4, joonisel 32 ja tabelis 5 on kujutatud ka selle katsejärgsed killustiku tulemused. Katse oli siin aruandes kirjeldatud lubjakivikatsega suures osas sarnane, k.a kasutatud killustiku omadused.

Tabel 4. Killustike sõelkõverate võrdlus

Killustiku fraktsioon ja märkused	Läbib sõela ava (mm) massi %-des														
	40	31,5	22,4	20	16	12,5	10	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Lubjakivi															
16/32	100	97	41	27	6	-	-	2	-	-	-	-	-	-	1,3
16/32+8/16	100	98		35	14	6	3	2	2	-	-	-	-	-	1,3
8/32 tihendatud kastis	100	96	-	42	19	11	-	4	3	2	2	2	2	2	1,6
8/32 katselõigult	100	99	-	44	22	13	-	6	4	3	3	3	3	2	2,1
Peale katset	100	99	-	52	23	13	-	5	3	3	2	2	2	2	1,8
Paetoodete tehas	100	97	-	38	17	10	-	3	1	1	1	1	1	1	0,9
Tardkivi															
16/32	100	98	70	53	26	-	-	4	-	-	-	-	-	-	0,8
8/32 tihendatud	100	93	-	29	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8
Peale katset	100	88	-	28	14	5	-	1	1	1	1	1	1	1	0,8



Joonis 32. Killustiku sõelkõverad graafiliselt lubjakivikatse puhul (detailsem joonis lisas 6)



Joonis 33. Killustiku sõelkõverad graafiliselt tardkivikatse puhul (detailsem joonis lisas 6)

Lubjakivikatsed näitasid, et tihendamisel sõelkõver muutub peenemaks ja sama trend jätkub ka koormamisel konstruktsioonis. Lõplike järelduste ja väidete tegemiseks oleks vaja lisa katseid ehk vaid ühest ei piisa. Vaadeldes tabelit 4 ja joonist 32 näeme, et mõningane materjali peenenemine on toimunud. Peenosiste (terasuurus $<0,063\text{mm}$) suurenemine oli väga minimaalne – 1,3% enne katset ja 1,8% peale katsetust. Katselõigult, kus tihendati intensiivsemalt, kui kastist, saadi tulemuseks 2,1%. Kõige suuremad muutused toimusid just „keskmiste“ sõelte piirkonnas, mis on 12,5 (läbimise protsendi muutus 6->11(13)->13%), 16 (14->19(22)->23%) ja 20mm (35->42(44)->52%), kusjuures koormamise käigus toimus suurem muutus vaid viimase puhul. Väga väikest muutust täheldati ka 8 ja 4mm sõela juures.

Vaadeldes „Paekivitoodete tehase“ katsetuse lõpptulemust saame sõelkõvera, mis on väga sarnane lubjakivikatse tihendatud olekus proovidega. Metoodika oli sama, kasutatud kivi oli sama (kuigi laborikatse näitas LA väärtuseks 23, sertifikaat deklareeris 25). Kolmanda katse puhul võiks oletada, et sõelkõver jääks nende kahe vahepeale. Siiski on näha, et lubjakivi puruneb mingil määral.

Enamus lubjakivi purunemisest on toimunud tihendamise käigus, koormamise ajal jätkus vaid 20mm osakeste purunemine.

Tardkivikatse sõelkõvera puhul on arusaamatu 16/32 tulemus, kuna proov sai võetud suvalisest kohast puistehunnikust ning tihendatud ja pärast katsetust proovid (mõlemad sisaldasid ka fraktsiooni 8/16) näitasid „normaalset“ terakoostist. Visuaalsel hinnangul ei olnud antud kohas peenosiseid ning kõik ümbritsev materjal oli sarnane. Siinjuures on pigem tähtis tulemus katsest. Sõelkõvera jooned on sarnased, kuid mitte identsed. Põhjus võib olla materjali purunemine, kuid ka hajuvus. Peenosiste sisaldus jäi muutumatuks. Põhjus võib peituda ka tarnitud materjalis, nimelt oli kohati mõningates kohtades paekiviliiva koostisele sarnanevat peenemat materjali (joonis 34). Visuaalsel vaatlusel pärast katset ei olnud võimalik eristada vahet, kas killustik on olnud koormustalla all või sellest eemal. Selge on see, et tardkivi pidas katses paremini vastu, mis oli ka oodatav tulemus, kuna kasutatud materjali LA oli oluliselt lubjakivist parem. Samuti tuleb suur erinevus materjalide mineraloogiast.



Joonis 34. Tarnitud graniitkivikillustikus oli kohati ohtralt peenemat puru

Peale katsetust otsustati määrata ka LA väärtus pidades silmas võimalust, et koormamise käigus on tekkinud paekivi osakestes mikropragusid. Tulemused on esitatud tabelis 5.

Tabel 5. Võrdlus LA tulemustest

Katsetus	Enne katset, LA (16/32)	Pärast katset, LA (.../32)
AS Paekivitoodete tehase katsetus	23	25
Lubjakivikatse	25	26
Tardkivikatse	19	16

Katse LA-väärtusi praktiliselt mõjutanud ei olnud. Üks selgitus, miks lubjakivi LA-väärtus veidi tõusis võib peituda selles, et kiilumiseks kasutatud killustik 8/16 oli LA27 ning sellest tugevamat sellise fraktsiooniga killustikku Eestis keegi ei tooda. Enne katset oli LA võetud põhifraktsioonist. Paekivitoodete tehase LA23 võis olla juhuslik, kuna tootja oli deklareerinud selle väärtuseks 25. Sarnane lugu võib olla ka tardkivikillustiku puhul, kuna LA väärtus katse lõpus hoopis tõusis.

2.2.1 Lubjakivi kasutamisest

Eelmisest peatükist selgus, et lubjakivi purunes, kuid vähe. Konstruksioonis killustiku purunemisest toimunud vajumisi kasutusel olevate mõõtemetoditega fikseerida ei õnnestunud, põhilised probleemid tekkisid asfaltbetoonis ja drenliivas.

Katse käik näitas lubjakivikonstruktsioonis elastsusmooduli väärtuse vähenemist, kuid sellekohased andmed vajaksid veel lisauuringuid ja kinnitamist, seega ei saa selles punktis midagi kindlat väita, võibolla vaid seda, et elastsusmoodul katse lõpuks oli võrreldes katsealgseolukorraga veidi vähenenud. Hetkeste andmete põhjal võiks oletada, et lubjakivikonstruktsiooni elastsusmooduli vähenemine toimus just tingituna kasutatud killustiku mõningasest peenenemisest, kuid väide vajaks kindlasti edasist kontrollimist, kuna elastsusmoodulit mõjutavaid tegureid on teisigi (asfaltbetoon ja aluspinnas). Selle võimaluse tõttu on ülimalt oluline pöörata tähelepanu sellele, et kasutades teekatendite killustikalustes lubjakivi, ei tohi seada seda olukorda, kus koormused (liiklus- ja ilmastikukoormused) ületaksid kriitilise piiri.

Esiteks on lubjakivi võrreldes tardkiviga oluliselt tundlikum sulamis-külmumis tsüklitele ja eriti, kui protsessi on kaasatud ka kloriidid. Ainuüksi selles uuringus tehtud üks külmakindluskatse 1%NaCl lahuses näitas suurt erinevust tard- ja lubjakivi vahel (tardkivil külmutuskatse destilleeritud vees, massikadu 0,1% ja soolvees 0,1%; lubjakivil vastavalt 1,1% ja 75%). Teemat on käsitlenud ka Regina Petrova oma magistritöös aastal 2008 ning järeldus näitas samuti lubjakivi suurt kloriidikartlikkust.

Seetõttu on lubjakivi kasutamisel teede-ehituses äärmiselt oluline hoida tee kate heas korras. Uus asfaltkate laseb vett läbi, kuid väga minimaalsel määral [2] ning vaieldav on see, kui võrd suur on läbiminev kloriidikogus; vananedes mikropragude ja hiljem juba nähtavate pragude kaudu tuleb (sool)vett oluliselt rohkem juurde. Probleeme võib tekitada ka asfaltkatte kulumine, kuna seetõttu väheneb kihipaksus ja teoreetiliselt ka kandevõime; samuti jääb (sool)vesi roobastesse seisma, mis suurendab võimalust selle jõudmiseks alusesse.

Teiseks tuleb määrata lubjakivile õige elastsusmoodul. Soome teeprojekteerimismõõdetes on 280MPa **maksimaalne** elastsusmoodul **tardkivikillustikule**. Katsetest nähtus, et sama koormuse ja tingimuste juures lubjakivikillustik purunes, seega ei saa elastsusmoodul olla tardkiviga võrdne. Sama näitas ka tervikkonstruktsioonide elastsusmoodulite võrdlemine. Kasutades lubjakivi „õiget“ elastsusmoodulit kindlustame arvutamisel selle, et materjalile lubatav koormusest tulenev kriitiline piir ei saaks ületatud.

Hoolimata elastsusmooduliprobleemidest võib katsetest saadud andmete põhjal väita (**kasutatud koormuste juures**), et tugeva (LA~25) lubjakivi kasutamine tee vastupidavuse mõttes on võrreldav tardkiviga niikaua, kui hoitakse teed rangelt seisundinõuetega määratletud korras (sellega vähendatakse oluliselt ilmastikukoormuse mõju võrreldes hooldamata teega, kuid vähesel määral ka liikluskoormusi pidades silmas teekatete kulumist). Ülekatteid, pindamisi, aukude ja pragude lappimisi ei tohi edasi lükata. Kuna tardkivi antud juhul näitas peaaegu mitte mingisugust nõrkust külmakindlusele (kloriidilahuses), siis „andestab“ selle kasutamine mõningaid viivitusi hooldetöodes, kuigi sellist võimalust tee projekteerimisel ja ehitamisel ei tohiks mingil juhul arvestada. Hooldetööde prioriteet on ikkagi liiklusohutuse ja turvalise liiklemise tagamine ning sellega viivitamine ei ole nende põhimõtetega kooskõlas rääkimata sellest, et juba tekkinud üks defekt põhjustab ja kiirendab järgnevate defektide teket [2].

Hetkel olemasolevatele andmetele ja teede rekonstrueerimisel saadud kogemustele tuginedes võib väita, et kui tee on projekteeritud **korrektselt** (st katend on dimensioneeritud vastavalt ennustatavale liiklus- ja ilmasikukoormusele ning drenaaž toimib laitmatult) ning **korrapäraselt** hooldatud (vajalikud kulumisest ja asfaltbetooni vananemisest või külmakergetest tingitud (mikro)pragunemisest tulenevad lappimis-, pindamis- ja ülekattetööd õigeaegselt tehtud ning veeärajuhtimissüsteemide toimivus tagatud) ei ole vahet kas kasutada tugevamat lubjakivi (LA~25) või tardkivi hoolimata tee klassist. Antud kahe katsetuse korral oli kasutatud koormus teekonstruktsioonile äärmiselt ränk (lakkamatu koormamine praktiliselt ilma puhkepausideta) ning asfaltbetoonkate suhteliselt õhuke.

Katsetuste lõppedes oli võimalik täheldada mõningat materjali peenenemist lubjakivis, kuid siinjuures oli tegemist fraktsioneeritud killustikuga, st kui suuremad osakesed purunevad, muutub kiht tihedamaks ja tema paksus muutub (mida selle uuringuga küll ei õnnestunud fikseerida – kihipaksuse muutus oli kas niivõrd väike või seda ei olnud üldse). Aastal 2009 korregeeriti Elastsete teekatendite projekteerimise juhendit 2001-52 muutes killustikaluste elastsusmooduli väärtust ja terakoostise nõudeid optimaalsetele segudele, mis tähendab, et killustikaluses on piisavalt peenemaid osiseid, mis täidavad enamiku ruumi, kus fraktsioneeritud killustiku puhul oleks õhk (ehk poorid). Antud muudatus välistab selle, et võimaliku purunemise korral muutuksid kihipaksused. Samas, kui muutub sellise kihi terastikuline koostis, muutub ka filtratsioonimoodul ning väheneb kandevõime (ehk veelkord on õhus küsimus elastsusmoodulite väärtusest). Kahjuks vastust nendele probleemidele antud uuring ei võimalda.

Hinnates killustike vastupidavust, tuleb märkida veel juhendis 2001-52 tabelis 11.1 toodud nõuet elastsusmoodulite erisuse kohta. Ehk otse killustikalusele ei tohiks paigaldada asfaltbetoonkihte, vaid nende vahel peab olema killustikust suurema ja asfaldist väiksema elastsusmooduliga materjalist kiht. Suurte liikluskoormusega teedel on hetkel väga levinud mustkillustiku kasutamine (elastsusmooduliga 800MPa), mis muudab olukorra teedel katsetatust oluliselt soodsamaks ehk vähendab tekkivaid potentsiaalselt lubjakivikillustikku purustavaid pingeid. Kindlasti oleks suurte liiklussageduste ja –koormustega teedel soovitatav kasutada asfaltkatte kõige pealmises kihis SMAd (mis toimib kulumiskihina), mille all on tihedast asfaltbetoonsegust kiht, mis mõlemad takistaksid soolvee imbumist alumistesse kihtidesse.

Siitamaani ei ole suudetud tõestada märkimisväärsete kloriidikoguste jõudmist killustikku, vähemalt ei ole sellest kirjutatud üheski avalikus dokumendis/aruanDES. Näiteks Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuringus Eesti teedemajanduses (AS Teede Tehnokeskus, 2010) lisas 6 on kirjeldatud proovide võtmine kloriidikoguste määramiseks Tallinn – Narva maanteelt Liiapeksi – Loobu lõigult parema sõidusuuna asfaltkatte alusest. Maksimaalseks keskmiseks koguseks määrati 0,012%, mis erineb oluliselt külmakindluskatsetes kasutatavast 1% NaCl kogusest [5]. Sellele faktile tuginedes ei tohiks kloriidide olemasolu teedel probleemiks olla. Teema vajab muidugi täpsemaid uuringuid ning ei kuulu selles aruanDES täpsema arutlemise alla.

Esitatud põhjendustele tuginedes ning järgides eelpool nimetatud nõudeid ei ole antud katsetuse põhjal erinevust, kas kasutada teekonstruktsioonis killustikaluses lubja-või tardkivikillustikku, kuid esimese LA peab olema $\leq 25(26?)$. Kahjuks info elastsusmoodulite kohta on hetkel võrdlusmaterjalide puuduse tõttu ebausaldusväärne, seega tuleks teemaga kindlasti edasi tegeleda. Mõningad nägemused ja ettepanekud sellest on esitatud peatükis 3.4

2.3 Majanduslik analüüs

Antud uurimustöö lähteülesande lõpus oli esitatud kolm elukaareanalüüsiga seonduvat nõuet:

„Pärast erinevate vastupidavuste väljatoomist koormustele tuleb teostada tasuvusarvutused 30a võrdlusperioodi jooksul (diskontomäär 5%, baasaasta 2012), kus võrreldakse erinevate investeeringu suurusi, remondivajadusi kindla võrdlusperioodi jooksul, teostatakse nõ elukaareanalüüs.

Analüüsi tulemusena tuleb esitada täpsemad kasutuskriteeriumid tardkivi ja lubjakivi killustikaluste kohta (nt 8000 AKÖL piiri muutmine või täiendavate nõuete seadmine tardkivikillustikule nt $E_{\text{vaj}}=300\text{MPa}$ väärtus, vms).

Katsete ja analüüsiga peab selgelt välja tulema kumb on suure liikluskoormusega teedel tasuvam kasutada kas lubjakivi või tardkivikillustik ja mis liiklus-või koormuspiirist alates.“

Katsetustes täheldati peamiste erinevustena lubjakivikillustiku mõningane peenenemine ning sellest ehitatud killustikalust sisaldava teekonstruktsiooni väiksem elastsusmoodul võrreldes tardkivikillustikuga ning need võivad olla aluseks esitatud probleemidele vastamisel. Hetkel on siiski andmeid liiga vähe ning lõplike ja kindlate järelduste tegemiseks on vaja lisauuringuid.

2.4 Arutelu võimalike lahendite üle, kuidas leida viis kasutamaks kohalikke mineraalmaterjale

Siinjuures on esitatud autori nägemus, mis suunas võiks veel uurimistöid kaaluda ning sellel põhinev teoreetiline arutelu. Esitatud arutelu on muidugi lihtsam, kui tegutsemine ning õhus on veel mitmed küsimused.

Elastsete teekatendite juhend 2001-51 määrab killustikule elastsusmooduliks 280MPa, mis kehtib nii lubja- kui tardkivikillustikule hoolimata terastikulisest koostisest. Teada on, et mida rohkem materjal on peenosiseid, seda väiksem on sellest ehitatud kihi kandevõime. Näiteks Soome normid arvestavad sellega, ning killustikukihi elastsusmoodul kõigub vahemikus 100...280MPa seotuna terastikulise koostisega [11]. Kas peaksime ka meie oma optimaalsetes killustiksegudes sellega arvestama hakkama?

Mida väiksema LA väärtusega materjal, seda rohkem ta puruneb mingi kindla koormuse korral ehk teoreetiliselt peaks olema võimalik leida seos LA ja elastsusmooduli vahel. Küsimus, kuidas seda seost leida, tuleb veel lahendada.

Arvatavasti lihtsam meetod oleks leida iga mingisuguse LA vahemiku puhul kriitiline dünaamilisest koormusest tekkiv pinge, mis hakkab materjali purustama ja seetõttu halveneb konstruktsiooni toimivus, sh elastsusmoodul. Nii saaks arvestada arvutamisel materjali nõrgemate omadustega. Arvutustega saab hõlpsasti määrata, kui suured pinged mõjutavad mingil sügavusel ja mingite kihtide all paiknevat paekivi. Kui pinge jääb sellesse LA vahemikku lubatavasse paekivi vahemikku ja kui muud katendi näitajad sobivad, siis võib seda kohalikku lubjakivikillustikku kasutada. Muidugi tulevad juurde veel mitmed muud tegurid, k.a konstruktsiooni maksumus (nt suurendades

asfaltkihtide paksusi võib olla kulukam, kui kasutada imporditavat tardkivikillustikku, kuid ettepanek annaks võimaluse asutada kohalikke materjale ja mõelda välja uusi katendikonstruktsioone selleasemel, et lihtsalt keelustada mingi materjal ja asendada see näiteks mõne muuga, mida peab väga kaugelt transportima). Küsimus oleks veel, palju lubada purunemist ja kui mingisugune pinge väärtus hakkab alguses purustama, siis kas purunemine stabiliseerub?

Dünaamilise pinge ja mingi LA väärtusega kivi omavahelist seost saaks määrata näiteks mõnes katseanumas, mida koormatakse hüdrosilindriga. Antud viisil katsetamine ei ole kallid ning on kiire ja annab võimaluse mitmeteks kombinatsioonideks (nt vee sees, külmutamine, kloriidid jm).

Pingete leidmiseks arvutuslikult (kontrollimaks kas killustikaluse peal olev konstruktsioon jaotab pingeid piisaval määral või mitte) oleks võimalik kasutada lihtsat Excelil põhinevat arvutiprogrammi, mille saaks ühildada KAP-iga (KatendiArvutusProgramm). Läbi selle saab insener otsustada, missuguseid materjale ja missugust konstruktsiooni kasutatakse välistamata seejuures igasuguse ehitusobjektile lähedaloleva lubjakivimaardla.

KOKKUVÕTE

Aruandes käsitletud temaatika on suunatud suure liiklusintensiivsusega teedele ning esitatud tulemid kehtivad vaid tugevast lubjakivikillustikust (LA25) ehitatud aluse puhul.

Peamised muutused koormamisest toimusid liivaluses ja asfaltbetoonis, kusjuures tard- ja lubjakivikonstruktsioonid töötasid suures laastus identselt. Lubjakivikillustik purunes tihendamise ja katse käigus mõningal määral ning see võis mõjutada kogu konstruktsiooni elastsusmooduli vähenemise (väide vajab lisauuringuid, kuna võrdlusmaterjali ega võimalikku hajuvust kõrvaldavaid katseid pole). Katsetus sooritati kuivas olekus, st ei kaasatud vee, sulamis- külmumistsüklite ega kloriidide mõjutegureid.

Teadagi on, et lubjakivi laguneb kloriidide olemasolul, mida tuleb teede projekteerimisel, ehitamisel ja hooldamisel kindlasti arvestada. Näiteks tuleks nendel teedel, millel tehakse talvist libedusetõrjet sooladega, kindlasti kattes kasutada tihedat asfaltbetoonsegu, drenaaž peab olema korrektselt projekteeritud, ehitatud ja hooldatud; suurt tähelepanu tuleb pöörata katete õigeaegsele hooldusele, st kattes oleks võimalikult vähe pragusid, auke ja roopaid (mis on ka liiklusohutuse seisukohalt ülimalt oluline).

Katsetustega tuleks jätkata, vaid kahest katsest lõplike järelduste tegemiseks ei piisa. Oluline on ka määrata/täpsustada lubjakivikillustiku elastsusmoodul ning võimalusel siduda see materjali tugevusega (LA või survetugevus) ja terakoostisega, mis annab juba projekteerimise käigus katendeid arvutades võimaluse arvestada materjali omadustega.

Lähteülesande punktis 6 on esitatud punktid analüüsiks ja järeldusteks. Siinkohal on esitatud kokkuvõtte nõutud punktide kaupa:

- „Koormamiskatse käigus saadud kõiki nii andurite poolt fikseeritud kui ka laboratoorseid andmeid tuleb komplekselt analüüsida ning teha järeldused 2 erineva aluse materjali vastupidavusest koormustele, tuues välja mitu korda on materjalide vastupidavused erinevad jm näitajad. Eriti oluline on fikseerida killustike põhifraktsiooni (fr 16/32) peenenemised (sõelkõvera muutused enne ja peale koormamist) ning analüüsida seda andurite poolt saadud väärtustega koos.“

Tihendamise ja katse käigus purunesid lubjakivi (LA25) osakesed eelkõige sõelade 20...12,5mm vahemikus. Lubjakivikonstruktsiooni elastsusmoodul katse käigus mingil määral vähenes ja üks põhjus selleks võis olla killustiku purunemine ja peenemate osiste (kuid mitte peenosiste) teke. Väide vajab edasiste uuringute näol veel kontrollimist. Peenosiste (osakese läbimõõt $>0,063\text{mm}$) suurenemine oli minimaalne ($1,3 \rightarrow 1,8\%$). Tardkivikillustik (LA19/16) katse ajal ei purunenud. Mõlemate konstruktsioonide koguvajum oli tekkinud täielikult drenliivas. Suuri probleeme esines asfaltkatte vastupidavusega.

Anduritelt saadud info põhjal jagunes lubjakivikonstruktsioonis koormus aluses suuremale pinnale kui tardkivis. Erinevus võib olla materjalide mineraloogias (lubjakiviosakesed mugandusid üksteisega paremini) või ka katte omadustes (tardkivikatses oli asfalt poorsem, seega võis pingejaotuserinevus saada alguse juba sealt). Saadud konkreetne info koos muude andmetega on äärmiselt vajalik võrdlus- ja referentsmaterjaliks järgmistele katsetustele.

- „Pärast erinevate vastupidavuste väljatoomist koormustele tuleb teostada tasuvusarvutused 30a võrdlusperioodi jooksul (diskontomäär 5%, baasaasta 2012), kus võrreldakse erinevate investeeringu suurusi, remondivajadusi kindla võrdlusperioodi jooksul, teostatakse nõ elukaareanalüüs.“

Tingituna katsete vähesusest ja esilekerkinud mõningatest küsitavustest ei ole võimalik täpsetele ja põhjendatud andmetele tuginedes esitada elukaareanalüüsi. Siiski on tänu antud uuringule olemas võrdlus- ja referentsmaterjal, mis oleks üheks aluseks esitatud probleemile. Uurimustöö sel teemal peab jätkuma ning käesolevas aruandes on esitatud selleks mõningad soovitusel.

- „Analüüsi tulemusena tuleb esitada täpsemad kasutuskriteeriumid tardkivi ja lubjakivi killustikaluste kohta (nt 8000 AKÖL piiri muutmine või täiendavate nõuete seadmine tardkivikillustikule nt E_{v} =300MPa väärtus, vms).“

Kahe katse tulemusena ning arvestades erinevatelt teedelt kogutud informatsiooni killustikalustes kasutatud lubjakivi vastupidavuse kohta võib öelda, et kui tee on projekteeritud ja hooldatud korrektselt jälgides täpselt sätestatud nõudeid, ei ole olulist erinevust tugeva lubjakivi (LA25) ja tardkivi vahel.

Katsetus näitas, et lubjakivikonstruktsiooni elastsusmoodul oli väiksem tardkivist, kuid täpsemate andmete esitamiseks on vaja lisauuringuid. Tõenäoliselt täpsustaks kasutuskriteeriumeid täpsem informatsioon lubjakivikillustiku elastsusmoodulite kohta.

- „Katsete ja analüüsiga peab selgelt välja tulema kumb on suure liikluskoormusega teedel tasuvam kasutada kas lubjakivi või tardkivikillustik ja mis liiklus-või koormuspiirist alates.“

Kindlate järelduste tegemiseks ja võimalike katsetustes tekkinud hajuvuste kõrvaldamiseks on vajalik uurimustööga jätkata. Mida suuremad koormussagedused teedel on, seda suuremat elastsusmoodulit on teekatendile vaja. Katsetused näitasid, et lubjakivikillustik on tardkivist nõrgem (vastupidavus dünaamilisele koormusele väiksem), kuid katsete vähesuse tõttu kindlaid numbrilisi suurusid välja tuua pole võimalik. Saades teada lubjakivikillustiku reaalse elastsusmooduli, on võimalik antud uuringust saadud informatsiooni edasi analüüsida ja võrrelda saadud tulemeid teekatendi arvutustulemustega.

Käesolev uuring andis järgmisteks töödeks suurepäraseid kogemusi ning infot lubja- ja tardkivikillustikust ehitatud aluste käitumise ja vastupidavuse kohta. Samuti täpsustus nägemus võimalike järgnevate tööde osas nii katsete ülesehituse kui teostamise poole pealt, ning andis väga vajaliku aluse võrdlusmaterjaliks.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001-52 ning selle vigade parandused ja täiendused 2009
2. Erhola, E. Liikenneväylien rakennesuunnitelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki 1996
3. Huang H. Y. Pavement Analysis and Design. 2004
4. Graniitkillustiku kui kohaliku ehitusmaterjali kasutusvõimalused, lubjakivi asendusväärtuse eksperthinnang. AS Teede Tehnokeskus 2009
5. Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses. AS Teede Tehnokeskus 2010
6. Muldkeha pinnaste tihendamise ja tiheduse kontrolli juhised. Maanteeamet 2006
7. Perkins, S.W. (1999). "Mechanical response of geosynthetic- reinforced flexible pavements," *Geosynthetics International*, 6(5): 347-382
8. Qian, Y., Han, J., Pokharel, S.K., and Parsons, R.L. (2010). Experimental study on triaxial geogrid-reinforced bases over weak subgrade under cyclic loading. *Proceedings of ASCE Geo-Institute GeoFlorida 2010*, West Palm Beach, Florida, February 20 to 24
9. Reflex Report T3:02. Laboratory studies on asphalt – steel net compound system and unbound granular material – steel net compound system. Final report
10. Sõidutee roopa sügavuse mõõtmistulemuste kasutamine. AS Teede Tehnokeskus. 2007
11. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. Tiehallinto 2005
12. Timm, D; Priest, A; McEwen, T. Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NACT Test Track. NCAT Report 04-01. 2004
13. Vaimel, A. Probleemid. Teeleht nr.2, juuni 2003
14. Valdo Janiso Pinnasemehaanika konspekt

LISAD

Lisa 1. Katsetuse lähteülesanne

Lisa 2. Kasutatud killustike omadused

Lisa 3. Killustike katsetulemused

Lisa 4. Andurite täpsustatud paiknemisjoonised

Lisa 5. Andmed anduritelt

Lisa 6. Killustike detailsemad sõelkõverajoonised

Lisa 1



MAANTEEMET

Hr Priit Vilba
Tallinna Kõrgem Tehnikakõrgkool
Pärnu mnt 62
10135 TALLINN

13.01.2011 nr 19-6/11-00316/001

Hinnapäring

Palume Teil esitada hinnapakumuse teadus- ja arendustööle: Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses. Tardkivimist ja karbonaatsetest settekivimistest valmistatud täitematerjalidest aluste vastupidavuse erinevuste väljaselgitamine koos elukaare analüüsi ja kasutamiskriteeriumite ettepanekutega alustes.

Hinnapakumuse palume esitada teadus- ja arendustöö tehnilises kirjelduses toodud tegevuste kaupa detailselt, tuues välja tööde ühikhinnad ja kogused.

Hinnapakumuse palume esitada hiljemalt 31.01.11.

Lugupidamisega,

Andri Tõnstein
Peadirektori asetäitja kohusetäitja
hoolde ja arengu alal

Lisa: Teadus- ja arendustöö tehniline kirjeldus - 5 lehel

Taavi Tõnts 611 9331
taavi.tõnts@mnt.ee

Teadus- ja arendustöö tehniline kirjeldus

Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses. Tardkivimist ja karbonaatsetest settekivimitest valmistatud täitematerjalidest aluste vastupidavuse erinevuste väljaselgitamine koos elukaare analüüsi ja kasutamiskriteeriumite ettepanekutega alustes.

Probleemipüstitus

Maanteeameti peadirektori käskkirja nr 133 (27.06.2006) p.5 järgselt peab ühekihiliste aluste ja aluste pealmiste kihtide ehitamisel teedel, mille liiklussagedus on suurem kui 8000 autot ööpäevas, kasutama tardkivikillustikku LA25. Teada on, et tardkivi on lubjakivist vastupidavamate omadustega koormuste, külmakindluse ja kloriidide suhtes ning nende koosmõjudele teekonstruktsioonides. Põhjamaades on alustes kasutusel olnud peamiselt tardkivikillustik ning selle vastupidavusega on neil senini head kogemused.

Eestis on probleemiks tardkivi kasutamisel vaid üks oluline asi – see ei ole kohalik materjal mistõttu tuleb seda lähiriikidest importida. Importimine suurema elukallidusega põhjamaadest on seotud korduvate ümberlaadimistega, mis omakorda tõstab tardkivikillustiku maksumust veelgi. Iga ümberlaadimine suurendab samas ka optimaalsete segude segregeerumist, mida peab kvaliteedi jälgimisel arvestama. Lubjakivi ja tardkivi killustiku maksumuste erinevused võivad ulatuda kolmekordseks.

Eksporditava tardkivi ja Eestis leiduva lubjakivi vastupidavuste erinevuste väljaselgitamine on vajalik lisaks maanteedele ka omavalitsustele suuremate tänavate jaoks, kus tuleb kõne alla alternatiivse materjalina tardkivikillustiku kasutamine suure perspektiivse liikluskoormuse vastuvõtmiseks.

Töö eesmärk

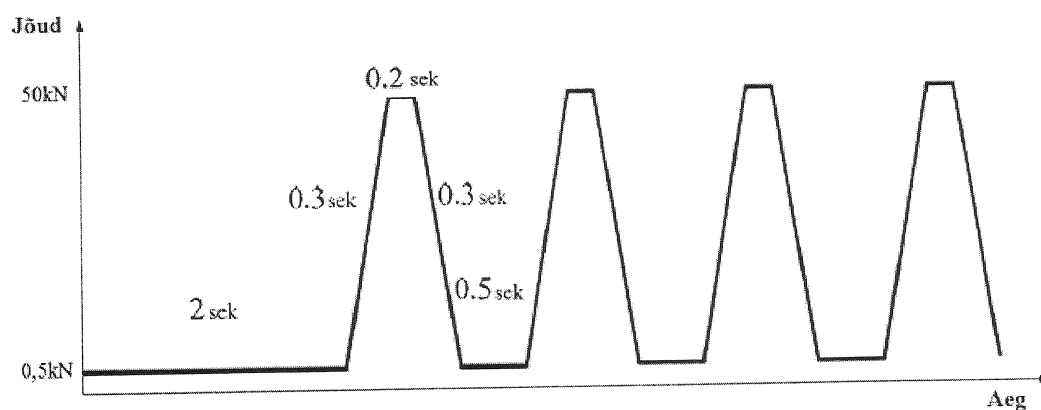
Teadustöö eesmärgiks on teada saada, kas pikaajaliselt konstruktsioonis töötades on tardkivikillustik oluliselt vastupidavam kui lubjakivikillustik, mistõttu oleks selle kasutamine kõrgema maksumuse korral õigustatud. Uuringute, katsetuste ja analüüsi tulemusena on vajalik eelpool nimetatud käskkirjas nr 133 toodud 8000 autot/ööpäevas piir täpsustada ning vajadusel teha muutmise ettepanek.

Metoodika

Kuna erinevate killustikaluste katsetamine reaalses situatsioonis teekonstruktsioonides võtab 5-10aastat, et liikluskoormusest põhjustatud purunemised olulisel määral avalduksid, ei ole antud juhul otstarbekas nii kaua oodata. Teada on, et maailmapraktikas kasutatakse palju erinevaid koormusstende, et laboratoorsetes tingimustes saaks erinevate teede konstruktsioonide vastupidavust katsetada. Laboratoorsed katsetused koormusstendide ja raskeliikluse simulaatoritega on suhteliselt kiired ning annavad küllaltki palju ja täpseid andmeid võrreldes reaalselt teekonstruktsioonides asetleidvatega protsessidega.

Kõige täiuslikumad konstruktsioonide katsetuste seadmed on kindlasti veereva rattaga raskeliikluse simulaatorid (HVS), mis on aga kordades kallimad kui tsüklilised vertikaalsed koormusstendid. Kuna antud teadusliku katsetöö käigus võrreldakse 2 praktiliselt identset konstruktsiooni, kus on vaid aluse materjalina kasutatud erinevaid kivimaterjale, siis on eeldatavasti materjalide erinevat käitumist ja vastupidavust võimalik kindlaks teha ka lihtsama katseseadmega, kus kasutades vertikaalset tsüklilist koormamist veereva koormuse asemel.

Seega tuleb käesoleva töö raames ehitada katsestendi jaoks 2 identse paksuse, tiheduse ja materjalidega konstruktsiooni, muutes ühel konstruktsioonil vaid aluses tardkivi lubjakivikillustiku vastu. Seejärel tuleb konstruktsioone võrdsetes tingimustes ja võrdse arvul koormata. Koormustsüklite arv peab olema piisav, et erinevates killustikaluste materjalides tekiksid eristatavad käitumised koormuse all ning purunemised. Koormamisel tuleb kasutada kontaktpinna survet 0,8MPa. Tsüklilise koormuse kestvus tuleb valida joonis 1 järgselt.



Joonis 1 Liikluskoormuse simuleerimise sagedus katsestendil.

Koormamise käigus tekkivad pinged ja vajumid tuleb konstruktsioonis andurite abil fikseerida. Koormamiskatse käigus saadud kõiki andmed tuleb komplekselt analüüsida ning teha järeldused 2 erineva aluse materjali vastupidavusest koormustele, tuues välja mitu korda on materjalide vastupidavused erinevad. Analüüsis võetakse arvesse lisaks andurite poolt fikseeritud väärtustele killustikaluse purunemise suurused koormuse all (sõelkövera muutused enne ja peale koormamist).

Pärast erinevate vastupidavuste väljatoomist koormustele saab teostada tasuvusarvutused nt 30a võrdlusperioodi jooksul, kus võrreldakse erinevate investeeringu suurusi, remondivajadusi kindla võrdlusperioodi jooksul, teostatakse nõ elukaareanalüüs. Analüüsi tulemusena tuleb esitada täpsemad kasutuskriteeriumid tardkivi ja lubjakivi killustikaluste kohta (nt 8000 AKÖL piiri muutmine või täiendavate nõuete seadmine tardkivikillustikule nt $E_{vaj}=300\text{MPa}$ väärtus, vms).

Tegevused

Alljärgnevalt on välja toodud tööd, mida on vaja koormusstendil ja hilisemal andmete analüüsil minimaalselt teha. Töövõtjal tuleb vajadusel kõiki töid ja lähteparametreid täpsustada enne tööde algust, et oleks tagatud lõppeesmärgi – erinevate killustike vastupidavuse fikseerimine ning selle analüüsid.

1. Katsetatavate konstruktsioonid ja materjalid on toodud alljärgnevas tabelis 1.

Tabel 1

Jrk. nr.	Kihi paksused, cm	KONSTRUKTSIOON I Kiilutud <u>lubjakivist</u> alus fr. 16/32	KONSTRUKTSIOON II Kiilutud <u>tardkivist</u> alus fr. 16/32
1.	4	AC16 Surf 70/100* Gc90/15, C _{100/0} , LA ₂₅ , AN14; F ₁ , F _{NaCl4} , Fl ₂₀ , f ₁ . Sideaine: B _{5,3}	AC16 Surf 70/100* Gc90/15, C _{100/0} , LA ₂₅ , AN14; F ₁ , F _{NaCl4} , Fl ₂₀ , f ₁ . Sideaine: B _{5,3}
2.	6	AC32 Base 70/100* Gc90/15, C _{100/0} , LA ₃₀ , F ₄ , Fl ₂₀ , f ₄ . Sideaine: B _{3,8}	AC32 Base 70/100* Gc90/15, C _{100/0} , LA ₃₀ , F ₄ , Fl ₂₀ , f ₄ . Sideaine: B _{3,8}
3.	25***	Killustikaluse nõuded**: LA ₂₅ , Fl ₂₀ , C90/3, F ₂ ; f ₂ Kiilekillustiku fr 12/16, 25kg/m ²	Killustikaluse nõuded**: LA ₂₅ , Fl ₂₀ , C90/3, F ₂ ; F _{NaCl8} ; f ₂ Kiilekillustiku fr 12/16, 25kg/m ²
4.	-	Eristuseks geotekstiil (120...180g/m ²)	Eristuseks geotekstiil (120...180g/m ²)
5.	>1,5m	Peenliiv, keskliiv või jämeliiv, min drenivus 2m/ööp.	Peenliiv, keskliiv või jämeliiv, min drenivus 2m/ööp.

Märkused:

* Segu jäävpoorsus peab vastama kehtiva Asfaldist katendikihtide ehitamise juhises tabel 7 toodud väärtustele.

- ** Aluses kasutatud täitematerjalil peab A_n olema ka määratud enne katset.
- *** Killustikalus ehitatakse 2-kihis, kasutades põhifraktsioonina ainult 16/32 (materjalide erinevad purunemised katsetöös paremini fikseeritavad).

2. Konstruktsiooni ehitamine

- a. Teekonstruktsioon ehitatakse valmis ja tihendatakse vastavalt kehtivatele nõuetele;
- b. Katsetöö käigus toimub ehitamine kopplaaduriga, materjali käsitsi viimistledes ja plaattihendajaga tihendades. Tiheduse kontroll teostatakse dünaamilise koormamise meetodil (penetromeetriga, Loadman või Inspector seadmega).
- c. Asfaltsegu paigaldamine toimub katsetöö raames käsitsi ning tihendamine plaattihendajaga (vajalik proovilõigu tegemine). Tiheduse kontroll teostatakse suurkehas laboris vastavalt nõuetele.

3. Konstruktsiooni paigaldatavad andurid. Ehituse ajal paigaldatakse konstruktsiooni sisse vajalikud andurid vastavalt andurite paigaldusjuhendile olles need eelnevalt kalibreerinud:

- a. Kõikidesse sideainega sidumata kihtidesse niiskus- ja temperatuuriandurid kontrollimaks, et võrreldavate katsete tingimused oleks samasugused;
- b. Muldesse vertikaalne vajumiandur kontrollimaks, kui palju vajub mulde pealmine pind tingituna koormusest. See on üheks indikaatoriks ehitatud konstruktsiooni tugevusest/nõrkusest;
- c. Killustikukihi alla ja keskele koormuse telgjoonele ning vastavalt pingajaotusteoriale telgjoonest arvutustega leitavale kaugusele, samale kõrgusele pingandurid. Nendega leiame pingete jagunemise koormamise kestel. See on teiseks indikaatoriks konstruktsiooni, eelkõige kasutatud killustiku, tugevusest/nõrkusest ja vastupidavusest;
- d. Asfaldikihi alapinda paigaldatakse tõmbeandur kontrollimaks kas ja kui suured tõmbepinged seal tekivad ja kuidas asfaltbetoon ühes ja teises olukorras vastu peab. On võimalik tõmmata paralleelse pingeseisundi, aluse ja pealmise pinna vajumisega;
- e. Asfaltbetooni paigaldatakse temperatuuriandur;
- f. Teekonstruktsiooni peale paigaldatakse pinna vajumi andurid.

4. Laboratoorsed katsetused peavad kõik olema tehtud akrediteeritud katselaboris:

- a. Määrata kasutatava täiteliiva sõelkõver ja liigitus GOST 25100-95 järgi ning filtratsioon;
- b. Määrata kasutatavate killustike omadused, vastavalt tabel 1;
- c. Määrata paigaldatud ja tihendatud killustike kihist sõelkõverad enne ja pärast koormamist (põhifraktsioonist 16/32);
- d. Määrata Sojuzdornii meetodil killustike veeläbilaskvuse tegur enne ja pärast katsetust tihendatud kihist;
- e. Määrata AC12 Surf ja AC Base 32 segu vastavus tabel 1 toodud nõuetele.

5. Koormamine

- a. Kahe identse paksusega konstruktsiooni tuleb koormata ühte moodi. Koormamisel tuleb kasutada kontaktpinna survet 0,8MPa. Tsüklilise koormuse kestvusintervallid tuleb valida joonis 1 järgselt.
- b. Koormamistsüklite arv peab olema mõlemal konstruktsioonil 1miljon korda.
- c. Pärast ettenähtud koormuse rakendamist teekonstruktsioon lammutatakse ettevaatlikult ja võetakse vajalikud proovid (killustiku sõelkõverad);
- d. Kõik tegevused nii ehitamise, katse kui lammutamise käigus dokumenteeritakse ja salvestatakse visuaalselt (fotod, videod).

6. Andmete analüüs ja järeldused

- a. Koormamiskatse käigus saadud kõiki nii andurite poolt fikseeritud kui ka laboratoorseid andmed tuleb komplekselt analüüsida ning teha järeldused 2 erineva aluse materjali vastupidavusest koormustele, tuues välja mitu korda on materjalide vastupidavused erinevad jm näitajad.
- b. Eriti oluline on fikseerida killustike põhifraktsiooni (fr 16/32) peenenemised (sõelkõvera muutused enne ja peale koormamist) ning analüüsida seda andurite poolt saadud väärtustega koos.
- c. Pärast erinevate vastupidavuste väljatoomist koormustele tuleb teostada tasuvusarvutused 30a võrdlusperioodi jooksul (diskontomäär 5%, baasaasta 2012), kus võrreldakse erinevate investeeringu suurusi, remondivajadusi kindla võrdlusperioodi jooksul, teostatakse nõ elukaareanalüüs.
- d. Analüüsi tulemusena tuleb esitada täpsemad kasutuskriteeriumid tardkivi ja lubjakivi killustikaluste kohta (nt 8000 AKÖL piiri muutmine või täiendavate nõuete seadmine tardkivikillustikule nt $E_{vaj}=300\text{MPa}$ väärtus, vms).
- e. Katsete ja analüüsiga peab selgelt välja tulema kumb on suure liikluskoormusega teedel tasuvam kasutada kas lubjakivi või tardkivikillustik ja mis liiklus-või koormuspiirist alates.

Tähtaeg

Tööde teostamise tähtaeg on 01.12.11, milles sisaldub teadustööks vajalike kõikide katse- ja analüüsi tööde teostamiseks kuluv aeg.

12.01.2011

Lisa 2

TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO
Pärnu mnt 62,
10135 Tallinn



Akrediteeritud L036

Katseprotokoll nr 1335/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: TTK laborist toodud graniitkillustiku fr 16/32 mm katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 20.06.11 ja toodi laborisse katsetamiseks samal päeval tellija esindaja poolt.
Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT 1 (graniit) - puistest.
Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 1760.

Katsetamine ja tulemused: Los Angelese ja kulumiskindluse katsete jaoks vajamineva fraktsioonide saamiseks purustati proov eelnevalt laboratoorses lõugpurustis.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	1760	16/32	-	0,8 %	f
2.	Terakuju plaatsusteguri järgi	EVS-EN 933-3:2007	1760	16/32	12,5/40	10 %	FI
3.	Purunemiskindlus Los Angelese katsel	EVS-EN 1097-2:2010	1760	16/32	10/14	19	LA
4.	Kulumiskindlus Nordic katsel	EVS-EN 1097-9:2007	1760	16/32	11,2/16	7,5 %	A _N
5.	Osakeste näivtihedus	EVS-EN 1097-6:2007 (traatkorvi meetod)	1760	16/32	11,2/16	2,65 Mg/m ³	ρ _a
6.	Osakeste tihedus välja-kuivatatud olekus		1760	16/32	11,2/16	2,63 Mg/m ³	ρ _{rd}
7.	Osakeste tihedus küllastatud pindkuivas olekus		1760	16/32	11,2/16	2,64 Mg/m ³	ρ _{ssd}
8.	Veeimavus		1760	16/32	11,2/16	0,2 %	WA ₂₄

9. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des					
	40	31,5	22,4	20	16	8
1760	100	98	70	53	26	4

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori spetsialist

Regina Efremova

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOOI
Pärnu mnt 62
10135 TALLINN



27.07.11 nr 3-7/3179

Katseprotokoll nr 1639/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOI – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: TTK laborist toodud graniitkillustiku fr 16/32 mm katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 20.06.11 ja toodi laborisse katsetamiseks samal päeval tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT 1 (graniit) - puistest.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 1760.

Katsetamine ja tulemused:

* - Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt akrediteerimata katse.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Külmakindlus	EVS-EN 1367-1:2007	1760	16/32	16/31,5	0,1 %	F
2.	Külmakindlus 1%-lises NaCl lahuses	*EVS-EN 1367-6:2008	1760	16/32	16/31,5	0,1 %	F _{NaCl}

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori peaspetsialist

 Märt Hain

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.
Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

Katseprotokoll nr 1589/11

Lk 1/2

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud paekivikillustiku proovi fr 16/32 mm katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 19.07.11 kell 14.00 ja toodi laborisse katsetamiseks 19.07.11 tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT katse nr 2 (paekivi). Puistest.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 2385.

Katsetamine ja tulemused: Los Angelese katse jaoks vajamineva fraktsiooni saamiseks purustati proov eelnevalt laboratoorses lõugpurustis.

Terade tiheduse ja veeimavuse ning terakoostise andmed on toodud katseprotokolli lisas lk 2/2.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	2385	16/32	-	1,3 %	f
2.	Purunemiskindlus Los Angelese katsel	EVS-EN 1097-2:2010	2385	16/32	10/14	25	LA
3.	Terakuju plaatsusteguri järgi	EVS-EN 933-3:2007	2385	16/32	12,5/40	9 %	FI
4.	Kulumiskindlus Nordic katsel	EVS-EN 1097-9:2007	2385	16/32	11,2/16	30,7 %	A _N

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori peaspetsialist

 Märt Hain

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

Katseprotokoll nr 1589/11 Lisa



Lk 2/2

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
5.	Osakeste näivtihedus	EVS-EN 1097-6:2007 (traatkorvi meetod)	2385	16/32	11,2/16	2,73 Mg/m ³	ρ_a
6.	Osakeste tihedus väljakuivatatud olekus		2385	16/32	11,2/16	2,61 Mg/m ³	ρ_{rd}
7.	Osakeste tihedus küllastatud pindkuivas olekus		2385	16/32	11,2/16	2,66 Mg/m ³	ρ_{ssd}
8.	Veeimavus		2385	16/32	11,2/16	1,7 %	WA ₂₄

9. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des					
	40	31,5	22,4	20	16	8
2385	100	97	41	27	6	2

17.08.11 nr 3-7/3639

Katseprotokoll nr 1917/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOI – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud paekivikillustiku proovi fr 16/32 mm katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 19.07.11 kell 14.00 ja toodi laborisse katsetamiseks 19.07.11 tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT katse nr 2 (paekivi). Puistest.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 2385.

Katsetamine ja tulemused: * - Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt akrediteerimata katse.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Külmakindlus	EVS-EN 1367-1:2007	2385	16/32	16/31,5	1,1 %	F
2.	Külmakindlus 1%-lises NaCl lahuses	*EVS-EN 1367-6:2008	2385	16/32	16/31,5	75,0 %	F _{NaCl}

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori spetsialist

Regina Efremova

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÖRGKOOL – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud paekivikillustiku proovi fr 8/32 mm katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 02.08.11 ja toodi laborisse katsetamiseks 05.08.11 tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT katse nr.2. Paekivi. Puistest (fraktsioonile 16/32 lisatud kiilekillustik)

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 2763.

Katsetamine ja tulemused:

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	2763	8/32	-	1,3 %	f

2. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des							
	40	31,5	20	16	12,5	10	8	4
2763	100	98	35	14	6	3	2	2

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori spetsialist

Regina Efremova

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

Lisa 3

29.06.11 nr 3-7/2507

Katseprotokoll nr 1175/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO L – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: TTK laborist, punktist nr 3 võetud graniitkillustiku proovi katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 20.06.11 ja toodi laborisse katsetamiseks samal päeval tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT 1 (graniit) - tihendatud ja kiilutud.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 1761.

Katsetamine ja tulemused: Los Angelese katse jaoks vajamineva fraktsiooni saamiseks purustati proov eelnevalt laboratoorses lõugpurustis.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	1761	-	-	0,7 %	f
2.	Purunemiskindlus Los Angelese katsel	EVS-EN 1097-2:2010	1761	-	10/14	17	LA

3. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des												
	63	31,5	20	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125
1761	100	93	29	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori peaspetsialist

Märt Hain

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

Katseprotokoll nr 1850/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGGKOOI – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud graniitkillustiku proovi katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 28.07.11 ja toodi laborisse katsetamiseks 05.08.11 tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud: MNT katse nr.1. Graniit. Katse lõpp. .../32.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 2762.

Katsetamine ja tulemused: Los Angelese katse jaoks vajamineva fraktsiooni saamiseks purustati proov eelnevalt laboratoorses lõugpurustis.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	2762	-	-	0,8 %	f
2.	Purunemiskindlus Los Angelese katsel	EVS-EN 1097-2:2010	2762	-	10/14	16	LA

3. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des												
	63	31,5	20	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125
2762	100	88	28	14	5	1	1	1	1	1	1	1	1

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori spetsialist

Regina Efremova

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOI – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud paekivikillustiku proovi katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 04.08.11 ja toodi laborisse katsetamiseks järgmisel päeval tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud – MNT katse nr.2. Paekivi. Peale tihendamist. E=190 .../32.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 2764.

Katsetamine ja tulemused:

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	2764	-	-	1,6 %	f

2. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des												
	63	31,5	20	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125
2764	100	96	42	19	11	4	3	3	2	2	2	2	2

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

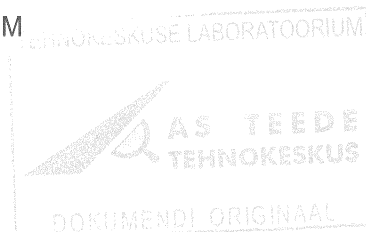
Vastutav teostaja: Labori spetsialist

Regina Efremova

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO
Pärnu mnt 62,
10135 Tallinn



14.09.11 nr 3-7/4304

Katseprotokoll nr 2337/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud paekivikillustiku proovi katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 08.09.11 ja toodi laborisse katsetamiseks samal päeval tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud: MNT katse nr.2. Paekivi. Proov võetud tihendatud katselõigult väljaspoolt kasti. .../32.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 3395.

Katsetamine ja tulemused:

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	3395	-	-	2,1 %	f

2. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des												
	63	31,5	20	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125
3395	100	99	44	22	13	6	5	4	3	3	3	3	2

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori peaspetsialist

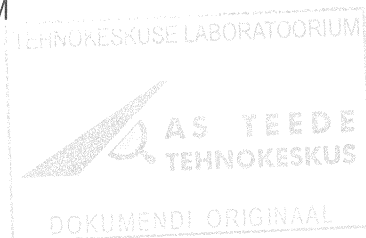


Märt Hain

Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO
Pärnu mnt 62,
10135 Tallinn



14.09.11 nr 3-7/4303

Katseprotokoll nr 2336/11

Lk 1/1

Tellija: TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO – hr Sven Sillamäe

Töö ülesanne: Nõmme tee 47b võetud paekivikillustiku proovi katsetamine.

Proovide kirjeldus: Proov võeti 07.09.11 ja toodi laborisse katsetamiseks 08.09.11 tellija esindaja poolt.

Proov oli tellija poolt tähistatud: MNT katse nr.2. Paekivi. Katse lõpp. .../32.

Laboris registreeriti proov registreerimisnumbriga 3394.

Katsetamine ja tulemused: Los Angelese katse jaoks vajamineva fraktsiooni saamiseks purustati proov eelnevalt laboratoorses lõugpurustis.

Jrk nr	Omadus	Katsemeetod	Proovi		Katsetamise		Tähis
			nr	fr mm	fr mm	tulemus	
1.	Peenosiste sisaldus	EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine)	3394	-	-	1,8 %	f
2.	Purunemiskindlus Los Angelese katsel	EVS-EN 1097-2:2010	3394	-	10/14	26	LA

3. Terakoostis EVS-EN 933-1:2007 (pesemine ja sõelumine) järgi:

reg. nr	Läbib sõela ava (mm) massi %-des												
	63	31,5	20	16	12,5	8	6,3	4	2	1	0,5	0,25	0,125
3394	100	99	52	23	13	5	4	3	3	2	2	2	2

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovide kohta.

Vastutav teostaja: Labori peaspetsialist



Märt Hain

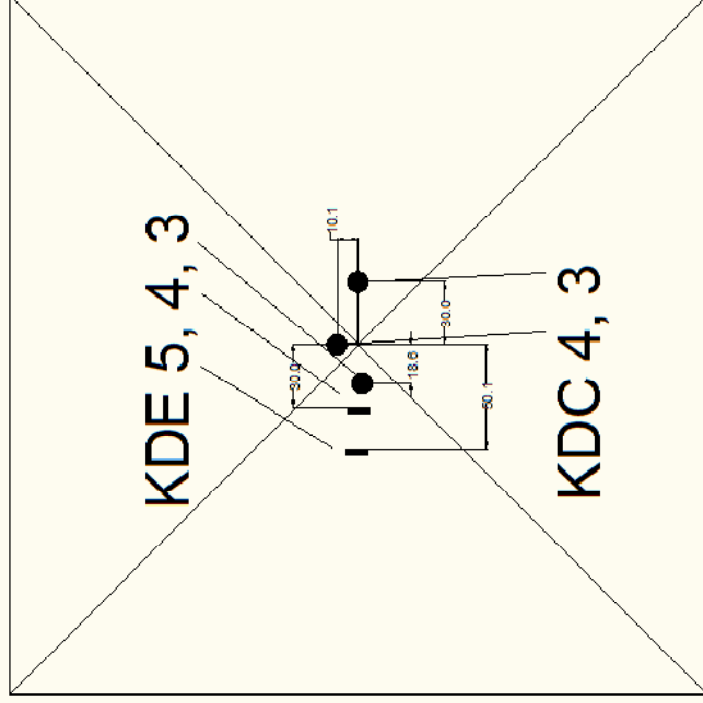
Protokolli osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori kirjalik luba.

Labor väljastab ainult värvilise templiga katseprotokolle.

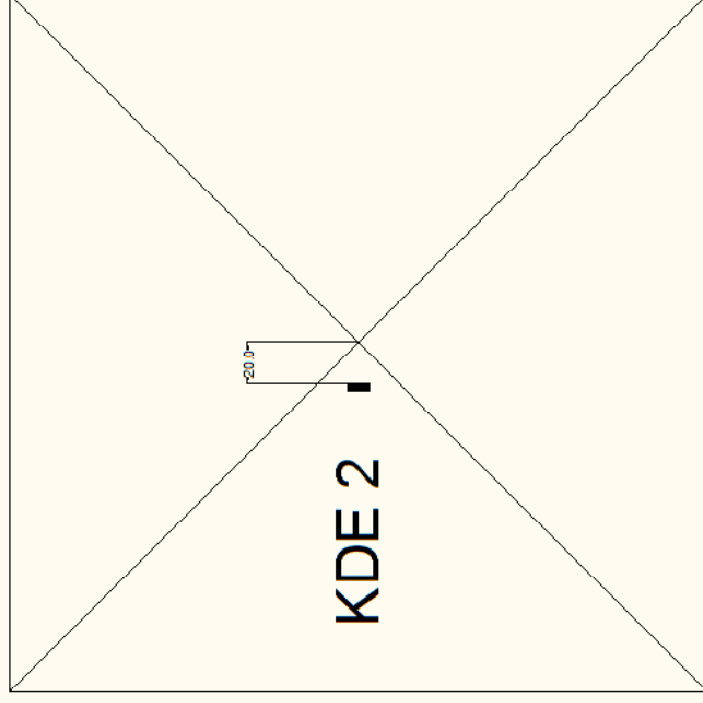
Lisa 4

Tardkivi

Z=geotekstiili peal

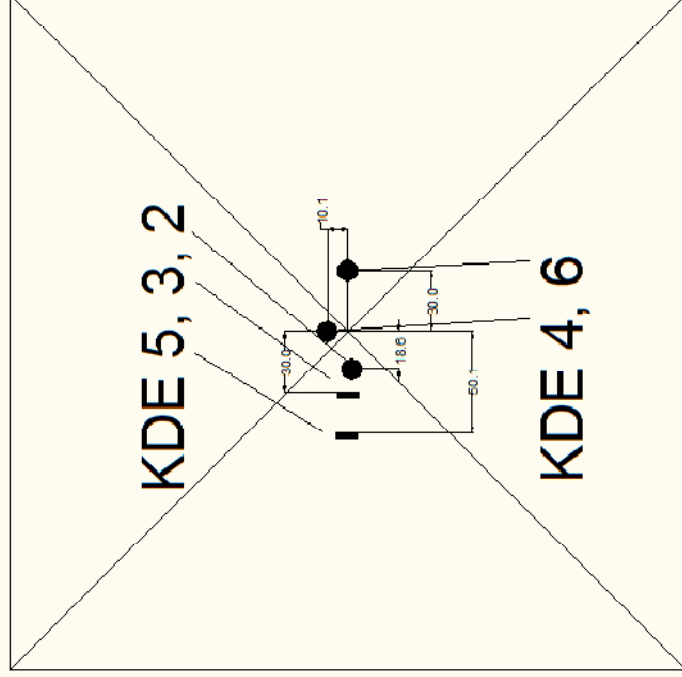


Z=killustiku keskel

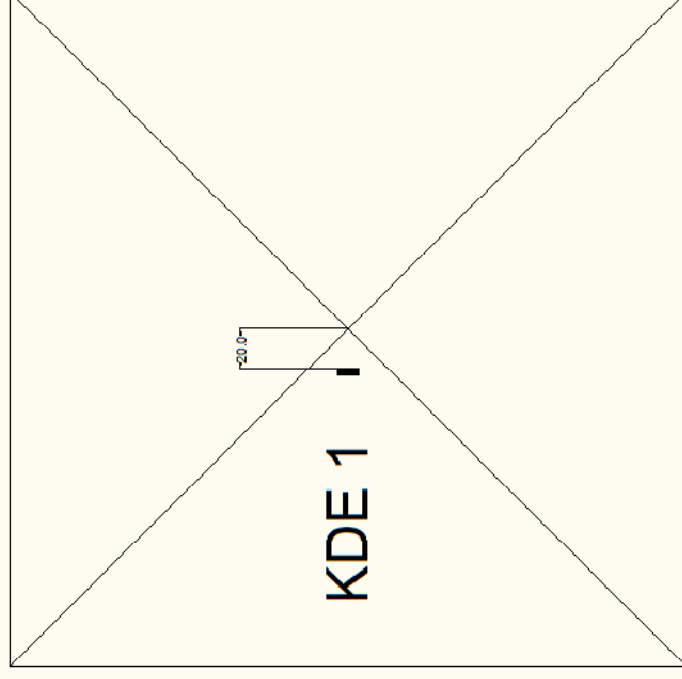


Lubjakivi

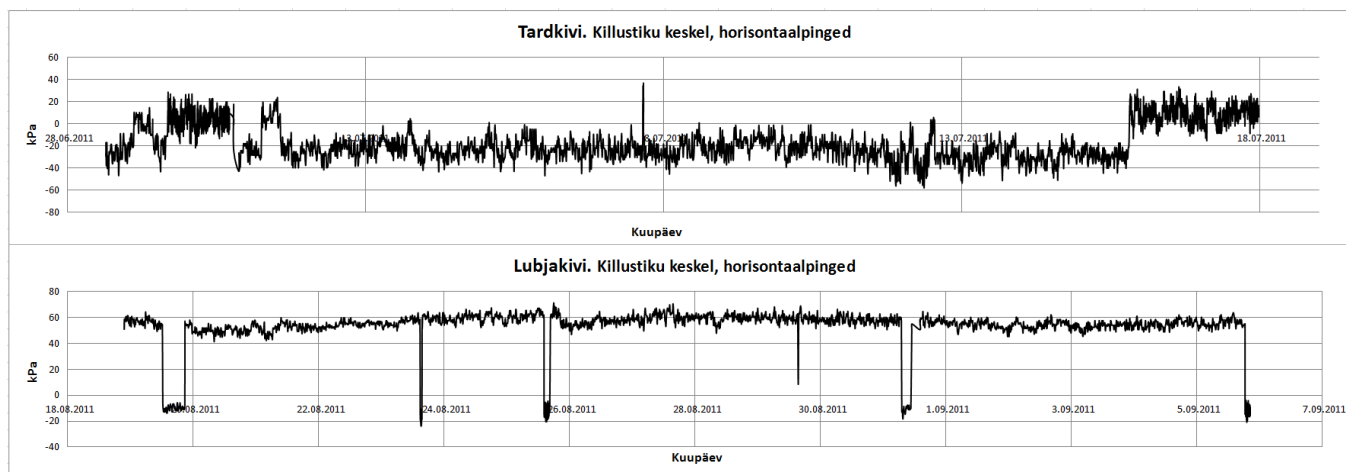
Z=geotekstiili peal



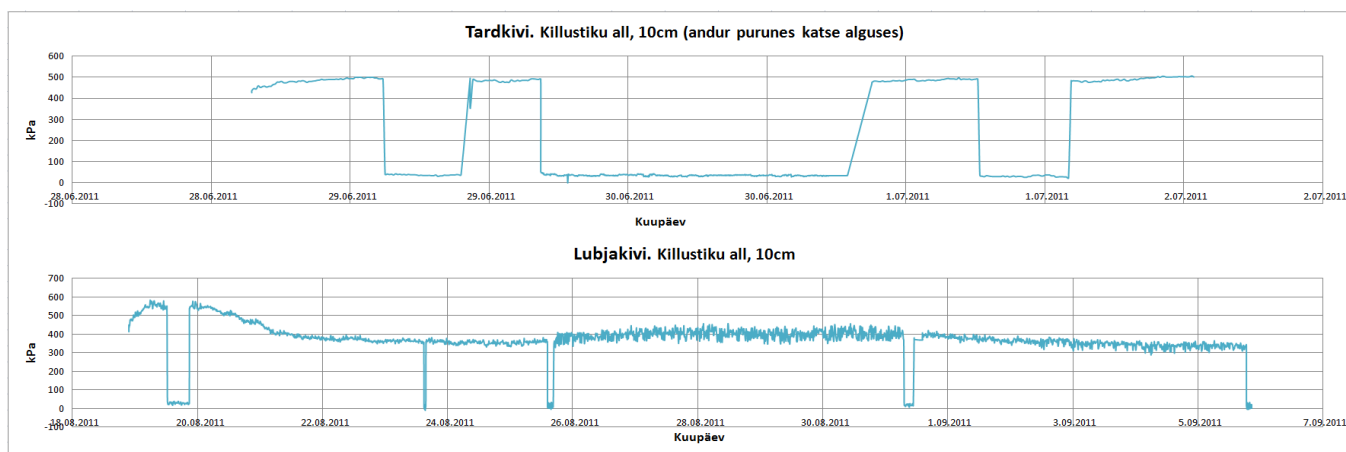
Z=killustiku keskel



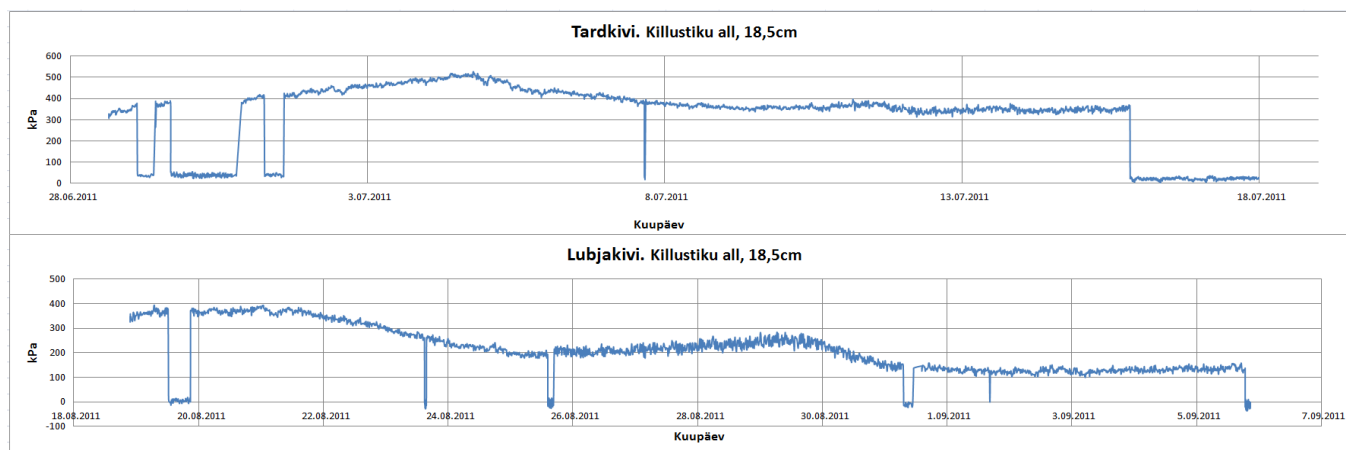
Lisa 5



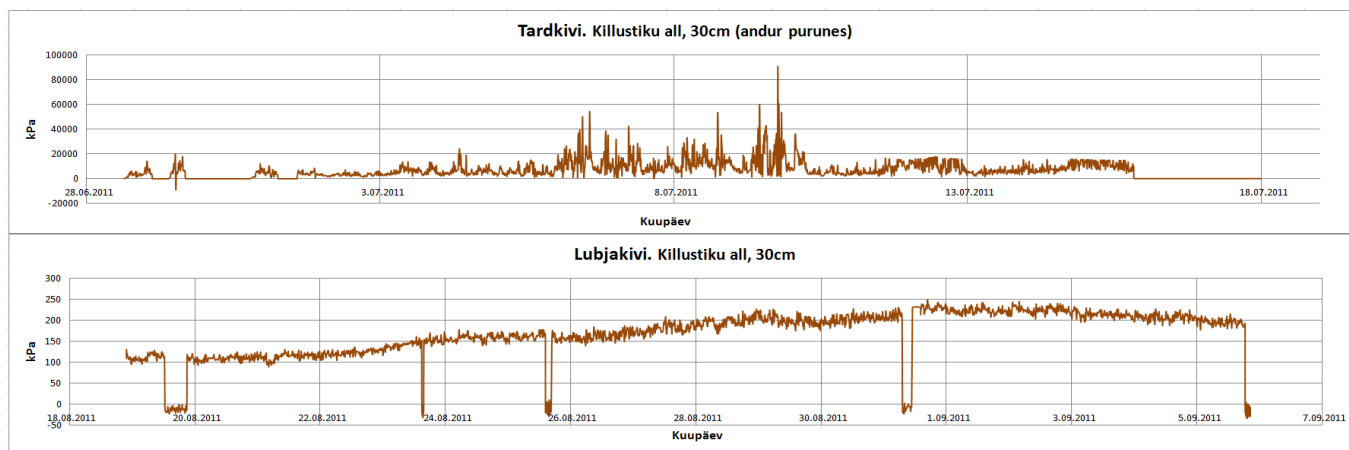
Joonis L5.1 Killustiku keskel, 20cm tsentrist asuv horisontaalpingeid mõõtev andur



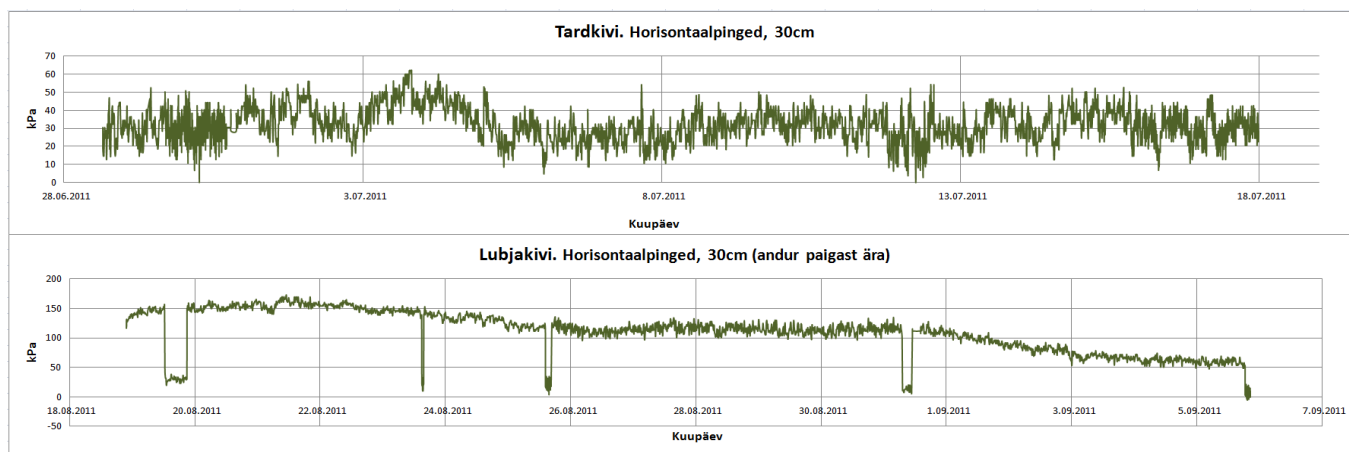
Joonis L5.2 Killustiku all, 10cm tsentrist asuv vertikaalpingeid mõõtev andur. Tardkivikatses andur purunes üpris kiiresti katse alguses ning esitatud on vaid andmed ajast, mil ta veel töötas



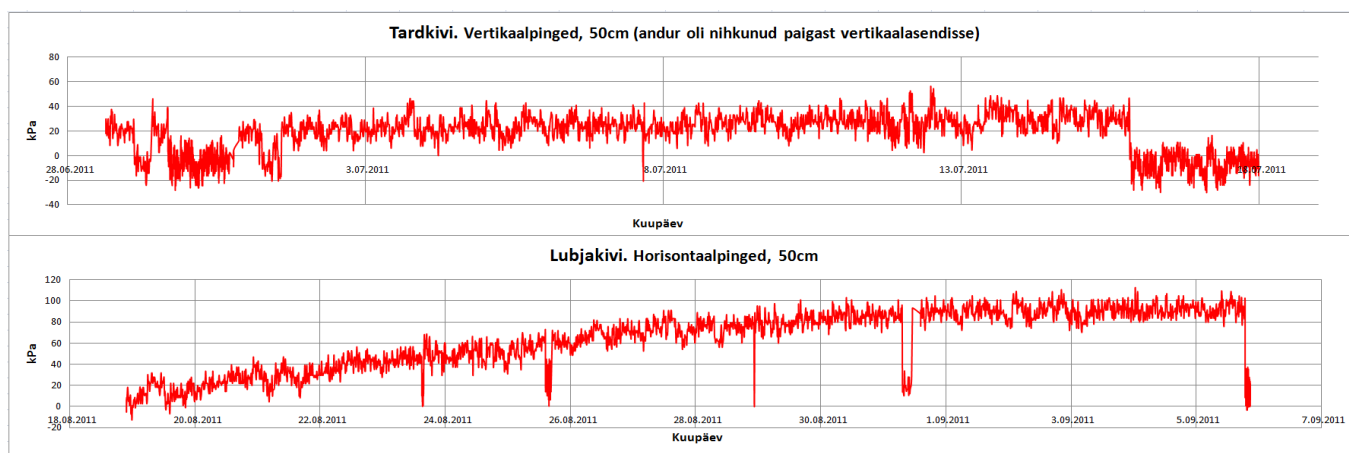
Joonis L5.3 Killustiku all, 18,5cm tsentrist asuv vertikaalpingeid mõõtev andur



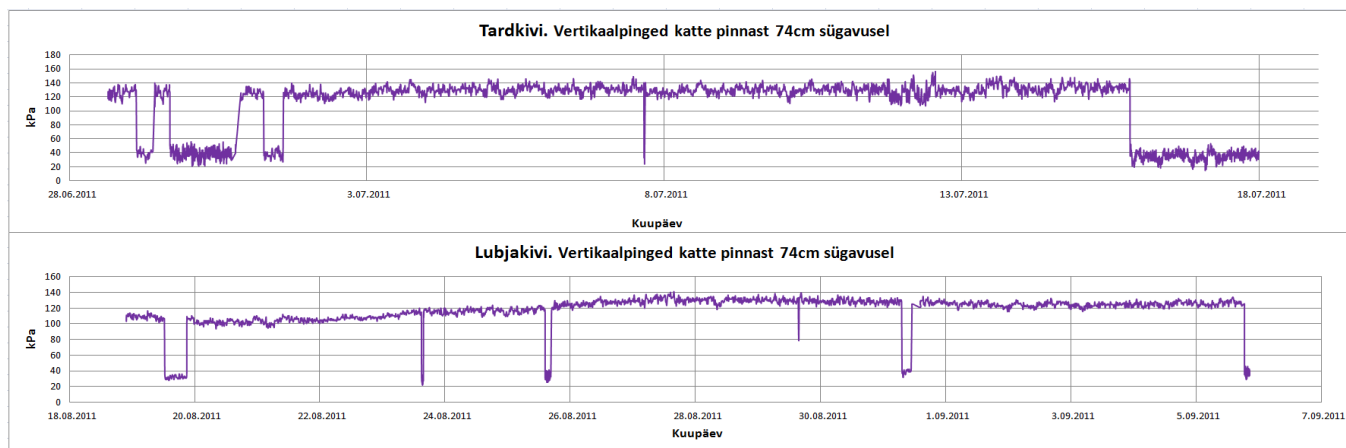
Joonis L5.4 Killustiku all, 30cm tsentrist asuv vertikaalpingeid mõõtev andur. Tardkivikatses purunes andur kohe alguses andmata igasugust infot (seetõttu on skaala erinev)



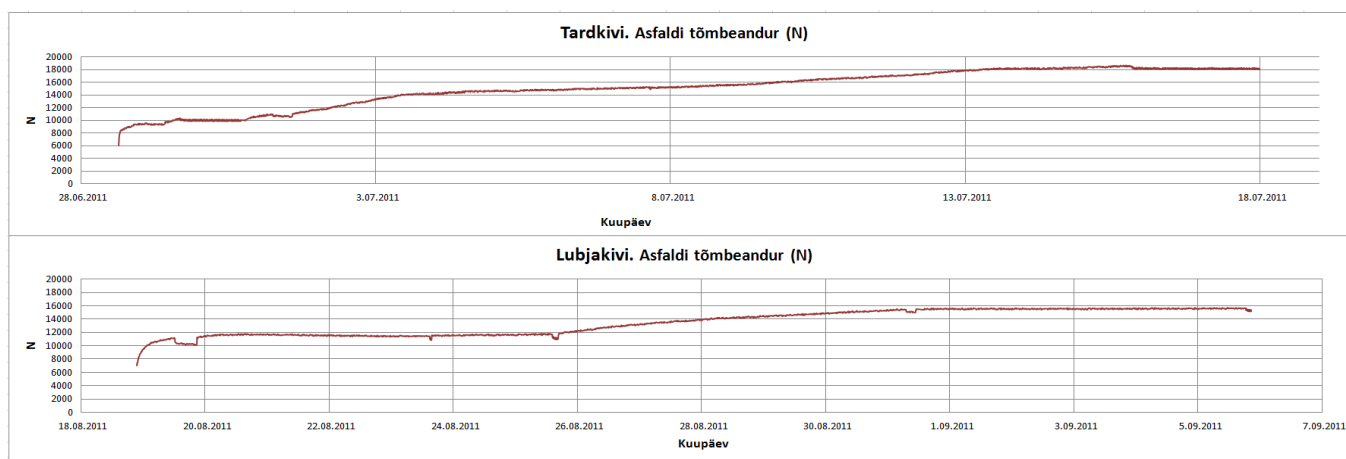
Joonis L5.5 Killustiku all, 30cm tsentrist horisontaalpingeid mõõtev andur. Lubjakivikatsetuses liikus andur paigast ning graafikult nähtavad andmed ei ole korrektsed



Joonis L5.6 Killustiku all, 50cm tsentrist horisontaalpingeid mõõtev andur. Tardkivikatses oli andur „pööranud“ end vertikaalasendisse, seega mõõtis antud punktis vertikaalpingeid



Joonis L5.7 Muldes, sügavusel 74cm (kahekordse koormusplaadi läbimõõd) asetsev vertikaalpingeid mõõtev andur



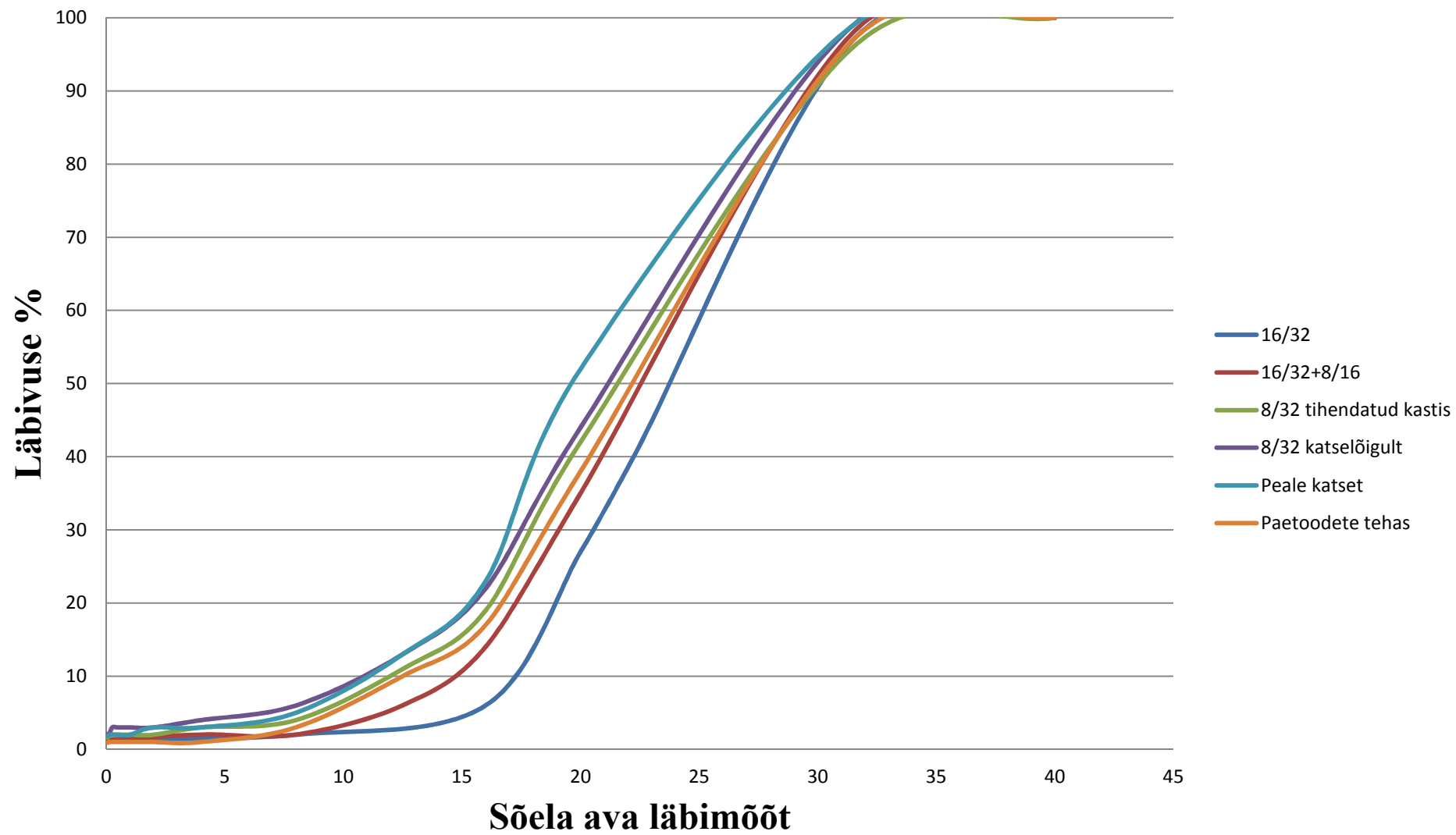
L5.8 Asfaldi tõmbeandur



L5.9 Näide vajumianduri andmetest

Lisa 6

Lubjakivikatse



Tardkivikatse

