

Lubjakivi kaevandusjääkide mõju betooni survetugevusele

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Hendrik Klaas (185332)

Juhendaja: Sander Kanter, Lektor, MSc

Õppekava: Maapõueressursid (LARB17/17)

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Hendrik Klaas

[allkirjastatud digitaalselt]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Lektor Sander Kanter

[allkirjastatud digitaalselt]

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Hendrik Klaas

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Lubjakivi kaevandusjääkide mõju betooni survetugevusele“,

mille juhendaja on Sander Kanter,

reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

03.06.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. jq 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Sisukord

Sissejuhatus	6
1. Varasem uuritus	7
2. Lubja- ja dolokivi üldiseloostus	8
3. Betoon	9
3.1. Täitematerjalid	9
3.1.1. Peentäitematerjalid.....	9
3.1.2. Jämetäitematerjalid.....	9
4. Killustiku tootmine karjääris.....	11
4.1. Sõelmed (fr. 0/4 mm)	11
5. Karjäärid	13
5.1. Talteri liivakarjäär (AS YIT Eesti, KMIN-102).....	13
5.2. Vao V lubjakivikarjäär (OÜ Vao Paas, KMIN-137).....	13
6. Lubjakivi peenosise alternatiivsed kasutusvõimalused.....	15
7. Materjalide toomine ja ettevalmistus.....	16
7.1. Välitööd	16
7.2. Materjalide ettevalmistus	17
7.2.1. Killustik (fr. 4/8 mm).....	17
7.2.2. Liiv (fr. 0/4 mm).....	18
7.2.3. Sõelmed (fr. 0/4 mm)	18
7.3. Betooni retseptid.....	20
8. Katsekehade valmistamine.....	22
8.1. Katsekehade survetugevuse katsetamine.....	23
9. Katsete tulemused.....	25
9.1. Keemilise analüüsi tulemused	26
9.2. Granulomeetria tulemused	27
Kokkuvõte.....	28
Kasutatud kirjandus.....	30
Lisad.....	32
Lisa 1. Katsekehade survetugevuse mõõtmistulemused	32
Lisa 2. Lasersedigraafi tulemused	33
Lisa 3. Purunenud katsekehad	34

Annotatsioon

Lubjakivi on enimkaevandatav ehitusmaavara Eestis ning selle kaevandamise ja töötlemise käigus tekib massiivne kogus kaevandusjääke – eelkõige sõelmeid, mis sisaldab lubjakivitolmu (peenosis). Tänapäevaks jääb sõelmete maht aastastest lubjakivi kogutoodangust 10 – 30 protsendi juurde ning pestud sõelmetest on võimalik ära kasutada vaid ligi 80 protsenti materjalist. Kahjuks pole ka sõelmete turg väga suur ning suur osa sellest seisab jäätmena, hõivates suuri maa-alasid. Ülejäänud, kasutuseta seisvale, materjalile pole siiani Eestis kasutust leitud. Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli leida kasutus lubjakivi peenosisele betoonitööstuses ning seejuures parandada betooni survetugevust. Läbiviidud uuringus katsetati betoonist katsekehade survetugevusi erineva peenosise sisalduse juures. Lubjakivitolmu lõimist analüüsiti lasersedigraafiga ning selle keemilise koostise analüüsiks rakendati röntgenfluoresentsanalüüsi (XRF). Survetugevuse katsetamiseks tehti erineva koostisega katsekehi kolm eksemplari, kokku 30 katsekeha. Survetugevuse katsete tulemusena selgus, et lisades betooni tavaretseptile 5% peenosist (liiva kogusest), on võimalik betooni survetugevust suurendada. Võrreldes 5 protsendilise peenosise lisandiga betooni kontrollseguga, milles puudus tolmu sisaldus, on näha, et survetugevus tõusis ligi 4% võrra. Teiste betoonsegude, mille tolmu sisaldus oli 12,5%, 25% ja 50% liiva kogusest, survetugevus langes kontrollsegust 7,6 kuni 10,3 protsendi võrra. Kokkuvõtteks võib öelda, et kasutades teatud kogust lubjakivi kaevandusjääke – lubjakivi peenosist – betoonsegude valmistamisel, on võimalik betooni survetugevust tõsta. Sellest tulenevalt oleks maksimaalse kasu saavutamiseks vajalik teha täpsemaid katseid, mille käigus katsetada erinevaid vee ja tsemendi koguseid vastavalt peenosise hulga segus.

Abstract

Limestone is the most mined resource for construction purposes in Estonia – jointly with the mining process, massive amounts of waste material, fines and crushed limestone quarry dust, is generated each day. Each year 10% – 30% of total production is made up of waste material which, in most cases, remains on site covering large areas in the mine. Since there is market for only 80% of such waste material as fines, limestone dust still remains unused, especially in Estonia. The purpose of this bachelor thesis was to find use for limestone quarry dust in concrete thereby improve its compressive strength. 30 concrete cylinders were tested with various amounts of limestone quarry dust added to each concrete mixture. Laser scattering and x-ray fluorescence spectrometry were implemented to analyze grain-size distribution and chemical composition of used limestone dust. Results showed, that by adding 5% limestone dust of sand weight, it is possible to improve concrete's compressive strength by 4,5%. With concrete mixtures containing 12,5%, 25% and 50% of limestone dust of sand weight, compressive strength decreased by 7,6% – 10,3%. In conclusion, it is possible to improve concrete's properties by adding waste material to its mixture. According to this and the previous studies, more experiments and thorough studies need to be conducted to find out the most effective amount of limestone quarry dust as an additive in the concrete mixture, thereby testing different water and cement concentrations in the mixture.

Sissejuhatus

Eesti Vabariigi 2019. aasta maavaravarude koondbilansi andmetel kaevandati Eestis 1 786 300 m³ ehk umbes 4 800 000 t ehituslubjakivi ning 690 400 m³ ehk ligikaudu 1 700 000 t ehitusdolokivi. Ehituslubjakivi kaevandatakse kokku 44 ja ehitusdolokivi 29 maardlas (Roosalu, 2020). Lubja- ja dolokivi kaevandamisel ja töötlemisel ei saa kõrvale hiilida jääkide ja kadude tekkest, küll aga on võimalik nende hulka parema tehnoloogia abiga vähendada. Ehitusmaavarade kasutamise riikliku arengukava 2011 – 2020 andmetel moodustas karjäärides tekkiva paekivikillustiku tootmisel tekkiva jäägi maht kuni 30% kogutoodangust ehk ligi 2 000 000 t (Eesti Vabariigi Keskkonnaministeerium, 2010).

Tänaseks jääb killustiku tootmisel tekkivate jääkide ehk sõelmete (fr. 0/4 mm) maht 10 – 30 protsendi juurde. Seni kasutatakse sõelmeid karjääride korrastamiseks, täitematerjaliks, põldude lupjamiseks ja paekiviliiva tootmiseks, kuid sellegipoolest on aastate jooksul kuhjunud suured sõelmete puistangud. Paekiviliiv (fr. 0,063/4 mm) saadakse sõelmete pesemisel, kuid selle tootmisel suudetakse ära kasutada 80 – 90 protsenti jääkmaterjalist. Ülejäänud 10 – 20 sellest moodustab peenosid ehk lubjakivitolmu (fr. 0/0,063 mm), millele pole siiani täies mahus kasutust leitud. Kui arvestada, et killustiku kogutoodangust 30% moodustavad sõelmed, siis ilma kasutuseta seisvat lubjakivi peenosist tekib ligi 300 000 t.

Lubjakivitolmu realiseerimisest oleks huvitatud ka ettevõtjad, kuna selle eest, nagu ka kogu muu kaevandatud maavara varu eest, on makstud ressursitasu. Lisaks tulu teenimisele on jäätmete kasutamine relevantne tänapäeval aina populaarsemaks muutuva ringmajanduse teemadel. Maavara on mõistlik ära kasutada täies mahus ning just seda aitaks sõelmetele kasutusala leidmine teha.

Käesoleva uuringu eesmärgiks ning uudsuseks on leida kasutus Eestis siiani kasutuna seisvale killustiku tootmisel tekkivale peenosisele betoonitööstuses. Antud uuringus kasutati lubjakivitolmu lisandina ning segule lisatava peenosise kogus määrati vastavalt liiva kogusele. Seniste uuringute põhjal võib õige kogus peenosist tõsta betooni survetugevust. Uuringuülesande püstitus lähtub laiemast eesmärgiks leida kasutus seni mittekasutatavale jääkmaterjalile, parandades seejuures betooni füüsikalisi omadusi.

Uuringu jaoks vajalikud materjalid (killustik, liiv, sõelmed) toodi Tallinna lähistel asuvatest lubjakivi- ja liivakarjääridest ning tsemendina kasutati Kunda Nordic Tsemendi poolt toodetud CEM I tüüpi portlandtsementi. Ehitusliiv on pärit AS YIT Eesti Talteri liivakarjäärist (KMIN-102), killustik ja sõelmed OÜ Vao Paas Vao V lubjakivikarjäärist (KMIN-137). Antud töös on kasutatud värsket materjali ehk peenosid on sõelmetest välja pestud laboratoorses tingimustes.

1. Varasem uuritus

Eelnevalt on paekivi peenosise kasutusvõimalustega tegeletud eelkõige suuremate kaevandustega riikides, kust tekkiva jäägi maht on tunduvalt suurem kui Eestis. Eestis on varasemalt uuritud sõelmete probleemi üldiselt ja piiratud on ainult väljapestud kiviliiva uuringutega (Kanter et al., 2021).

Eestis on paekivi kaevandamisel tekkivale peenosisele otsinud 2017. aastal kasutust Daniel Libman, kelle uuringu eesmärgiks oli uurida otstarvet ja kasulikkust tootmisprotsessis tekkivate sõelmete kasutamisel uute toodetena lubjakivi kaevandamise protsessis. Töös uuriti sõelmete tekkimist tootmisprotsessi erinevates staadiumites ning käsitleti võimalusi nende vähendamiseks. Kuna peenosist ehk hiiva tekib rohkem, kui karjääri aluspinna ehituseks vaja, siis tekivad raskused üleliigse materjali paigutamise ja edasise kasutamisega (Libman, 2017).

Türgis läbi viidud uuringus uuris Paki Turgut lubjakivitolmu ja klaasijääkide segu omadusi ehitusmaterjalina. Tulemuseks saadi materjal, mille survetugevus on üle 7 MPa. Homogeenseks segus segati kokku neli (0%, 10%, 20% ja 30%) erineva lubjakivi peenosise ja klaasitolmu sisaldusega segu, millele lisati vett ning millest vormiti tellised. Seejärel lasti nendel seista 28 päeva, et läbi viia katsed nende füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste välja selgitamiseks. Uuringu tulemusel selgus, et antud segul on potentsiaali ehitusmaterjalina, kuna selle survetugevus, paindetugevus, veeimavus, mahukaal ning ruumala- ja massikadu vastavad ehituseks vastavatele kvaliteedinõuetele (Turgut, 2008).

Indias – A.K. Singhi, V. Srivastava ja V.C. Agarwali poolt tehtud uuringus – uuriti karjäärides tekkiva lubjakivisõelmete mõju betooni survetugevusele. Katse käigus asendati betooni valmistamiseks vajalik peentäitematerjal, liiv, 0% - 100% ulatuses (10% sammudega) lubjakivisõelmetega. Tulemuseks saadi kivitoolmuga betoonisegu, mille survetugevus oli 8% - 27% suurem testsegust. Parim tulemus saadi liiva 60% asenduse juures, mil betooni 28-päevane survetugevus oli testsegust 9,61 MPa suurem (Singh et al., 2015).

Indias, S. Prakash ja H. Rao poolt läbi viidud uuringus uuriti samuti karjäärides tekkiva kivitoolmu ja sõelmete kasutust betoonis. Nagu ka eelnevalt väljatoodud artiklis, asendati Prakash ja Rao tehtud uuringus liiv määratud koguses sõelmetega. Töö käigus tehti betoonsegu erinevas tugevusklassis ning tulemusena avastati, et maksimaalse tugevuse saavutas betoonsegu, kui selle originaalretseptis olev liiv asendada 40% ulatuses karjääris tekkivate sõelmetega ning peale 50%-lise liiva asenduse korral hakkas segu survetugevus kahanema (Prakash & Rao, 2016).

2. Lubja- ja dolokivi üldisloomustus

Paekivi ehk paas on karbonaatsete kivimite – lubjakivi, dolokivi ja mergli – üldnimetus. Antud töös käsitletakse paekivi nimetuse all vaid lubja- ja dolokivi. Paekivid on iidse merepõhja setendid, mis üsna pea pärast ladestumist tsementeeriti lubiainega kemo- või biogeensel teel samas basseisin sadestunud karbonaatühendiga. Peamiseks mineraaliks on lubjakivis kaltsiit (CaCO_3) ning dolokiviks dolomiit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Lisaks nendele komponentidele sisaldab paas alati saviosakesi, vähesel määral ka liiva. Sõltuvalt loetletud komponentide vahekorrast ja nende paigutusest kivimis, on mõned paerimid kasutusel maavarana (Pirrus, 1999).

Paas sai maavara staatuse alles eelmise sajandi keskel, kuid ehitusmaterjalina on see kasutusele võetud juba alates esimesest aastatuhandest, kui sellest laoti peamiselt kindlustusi. Paekivi murti kohalikest kivimurdudest, seda võib lugeda kaevandamise alguseks Eesti aladel. Ehituseks sobivat paekivi leidub enamikus Ordoviitsiumi ja Siluri lademeis (Joonis 1), mis paljanduvad kõikjal Lääne-, Kesk- ja Põhja-Eestis (Reinsalu, 2011).

Paekivi on enimlevinud ehitusmaavara Eestis. Ehituskivina kasutatav paekivi peab olema hea survetugevusega, külmakindel ning löökidele ja kulumisele vastupidav. Sellistele nõuetele vastab kõige paremini keskordoviitsiumi Lasnamäe ja Uhaku lademesse kuuluv ehituslubjakivi, mida kasutatakse üle kogu Eesti. Suuremad ja tuntumad karjäärid, kus paasi kaevandatakse asuvad Harkus, Lasnamäel ja Väos (Pirrus, 1999). Eestis kasutatakse lubjakivi peamiselt ehituskivina ning tsemendi tootmiseks.



Joonis 1. Eesti aluspõhja geoloogiline kaart (Tartu Ülikooli geoloogia osakond, 2020).

3. Betoon

Betooniks nimetatakse mineraalse sideaine hüdratasiooni, tardumise ja kivinemise käigus kujunenud näitajatega materjali, mis saadakse omavahel segatud tsemendist, jäme- ja peentäitematerjalist ning veest, kuhu võib lisada ka keemilisi ja peenlisandeid. Betooni ja raudbetooni laialdane kasutamine ehituses on andnud ülisuurt efekti ehitusmaterjalide kättesaadavuse ja ehitise püstitamise kiiruse, aga ka nende arhitektuursete vormilahenduste mitmekesistamise suhtes. Betooni kui tehismaterjali tähtsaimaks ehituslikuks omaduseks on võimalus reguleerida segu lähtematerjalide valiku, seguvahekordade projekteerimise ja kivinemistingimuste kindlustamise kaudu moodustava tehiskivi tugevust ja püsivust kasutamisel kõige erinevates tingimustes (Raado, 2018).

3.1. Täitematerjalid

Täitematerjalid moodustavad kuni 70% betooni massist. Moodustunud skeletil on tugevuse andmisel betoonile oma roll, seetõttu tuleb kõrge tugevusega betoonides kasutada ka vastava tugevusega täitematerjale. Peale muude omaduste on täitematerjalid ka vähedeformeeruvad ja suhteliselt kõrge kulumiskindlusega. Täitematerjalide terastikulise koostise üldnõuded on määratud standardi EVS-EN 12620:2005+A1:2008 järgi (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2009) ning välja toodud alljärgnevas tabelis (Tabel 1).

3.1.1. Peentäitematerjalid

Peene täitematerjalina kasutatakse inertseid looduslikke kivimeid, nagu kvartslüüv, või tehismaterjale, nagu kergkruus. Betooni peentäitematerjal võib olla saadud kivimite või kruusa loomuliku murenemise tagajärjel või kivimite ja kruusa purustamise teel (Raado, 2018). Peentäitematerjali eesmärgiks betoonsegu on jämetäitematerjali vahele tekkinud tühimike täitmine ning seetõttu võib betooni tegemisel sellele juurde lisada lubjakivi peenosist või liiva asendada lubjakivi sõelmetega ning silmas tuleb pidada, et peentäitematerjalina kasutatav materjal ei sisaldaks orgaanilisi aineid. Lisades betoonsegu olevatele täitematerjalidele (üldjuhul killustik ja liiv) lubjakivi peenosist, aitab see täita tühimikke liiva ja killustiku vahel. Seetõttu on teatud määradel peenosise kasutamisega võimalik betoonsegu tugevdada, liigse lubjakivitolmu sisalduse juures tuleb hüpoteetiliselt suurendada ka tsemendi kogust, kuna segus oleva materjali eripindala suureneb.

3.1.2. Jämetäitematerjalid

Normaalbetooni jämetäitematerjaliks on kruus või killustik. Jämetäitematerjali ülesandeks on moodustada betooni skelett, mille tühikutesse paigutub peentäitematerjalist, tsemendist ja veest moodustuv mört. Olenevalt täitematerjali tihedusest jaotatakse need kergeteks või rasketeks. Rasketeks on näiteks graniit- ja Eestis kasutatav paekivikillustik, kergete hulka kuulub näiteks kergkruus (Raado, 2018).

Tabel 1. Täitematerjalide terastikulise koostise üldnõuded (Raado, 2018)							
Täitematerjal	Terasuurus, mm	Sõela läbind massiprotsentides					Kategooria, G
		2D	1,4D	D	d	d/2	
Jäme-	$D/d \leq 2$ või	100	98...100	85...99	0...20	0...5	$G_c 85/20$
	$D \leq 11,2$	100	98...100	85...99	0...20	0...5	$G_c 85/20$
	$D/d > 2$ ja $D > 11,2$	100	98...100	90...99	0...15	0...5	$G_c 90/15$
Peen-	$D \leq 4$ ja $d = 0$	100	95...100	85...99	-	-	$GF_F 85$

4. Killustiku tootmine karjääris

Paekivikillustiku tootmiseks on vaja vastavat maavara ning kohta kus seda kaevandada. Karjääride avamine algab geoloogilistest uuringutest ja vajalike lubade taotlemisest ning lubade kättesaamise järel võib alustada karjääri ala ettevalmistustöödega. Ettevalmistustööde maht sõltub rajatava karjääri asukohast ning selle alla kuuluvad näiteks taristu rajamine, metsa raadamine ning ala kuivendamine. Ettevalmistustöödele järgnevad paljandus-, koristus- ja rekultiveerimistööd.

Peale paljandustöid, mille käigus eemaldatakse katend, algab kivimite raimamine ehk kivimi kobestamine (irrutamine) massiivist. Kivimite väljamiseks on mitmeid erinevaid viise – seda on võimalik teha mehaaniliselt, puur- ja lõhketöödega, termiliselt (kuumutamine ja jahutamine) ja keemiliselt (lahustamine). Neist kõige tootlikum ja majanduslikult kõige tasuvam meetod on puur- ja lõhketööd. Puur- lõhketööde peamiseks töövahenditeks on puurmasinad, lõhkeaine ja muud lõhkematerjalid. Küll aga pole puur- lõhketööde läbiviimine igas piirkonnas teatud piirangute tõttu lubatud (näiteks tihedamad asustused). Sellisel juhul kasutatakse üldiselt kivimi mehaanilist väljamist – staatilist ja/või dünaamilist. Staatilist raimamist viiakse läbi tehnikaga, mis rakendavad kivimimassiivile staatilisi koormuseid. Mõned enimlevinud seadmed kivimi staatiliseks väljamiseks on ekskavaatorid, ripperid, skreeperid ja buldooserid. Kivimimassiivi on võimalik väljata ka dünaamilise ehk löökkkoormusega. Dünaamilise väljamise korral kasutatakse piik- ja hüdrovasaraid.

Kui maavara on maapõuest eemaldatud nimetatakse seda kaeviseks. Kaemis on looduslikust olekust eemaldatud kivimi või setendi tahke osis (Keskkonnaamet, 2017). Kaevise töötlemisel lõpp-produktiks on vajalik see eelnevalt purustada ning seejärel sorteerida. Selleks kasutatakse purustussõlme – lõugpurusti, rootorpurusti või koonuspurusti – ning sorteerimissõlme. Purustus- ja sorerimissõlmed võivad olla nii statsionaarsed kui ka mobiilsed. Viimase korral liigutatakse sõlm kaevandatava ala juurde, et vähendada kaevise transporti.

Kaevise purustamisele järgneb selle sorteerimine erinevatesse fraktsioonidesse kasutades erineva suurusega sõelu. Tüüpilisteks killustiku fraktsioonideks on fr. 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm, 16/32 mm ja 32/64 mm. Üldiselt leidub kasutust igale fraktsioonile, kuid suurem probleem on fr. 0/4 mm realiseerimisega mille tõttu kuhjub seda materjali igas Eesti paekivikarjääris.

Peale kaevandamise lõpetamist on vaja kaevandatud ala rekultiveerida ehk korrastada. Rekultiveerimine toimub vastavalt projektile ning selle üldisteks eesmärkideks võivad olla näiteks maavara kaevandamisväärsuse säilitamine, ümbruskonnast meeldivalt erineva looduskeskkonna kujundamine (kaasa arvatud veekogu moodustamine) või uue väärtusega maa loomine (võimaliku maapinna täitmine jääkide või jäätmete utiliseerimise teel) (Rammul et al., 2017).

4.1. Sõelmed (fr. 0/4 mm)

Sõelmed on killustiku peeneim fraktsioon, mis tihtipeale kasutust ei leia. Üldjuhul sobivad sõelmed kasutamiseks täitematerjalina liiva asemel filtratsiooni mitte nõudvates konstruktsioonides, sealhulgas ka betoonis. Lisaks sobivad paesõelmed kasutamiseks põllumajanduses põldude lupjamiseks. Sõelmetest on võimalik välja pesta peenosis, mis on kaevandamise ja töötlemise käigus tekkinud savi

ja tolmuosakesed (fr. 0/0,063 mm). Pestud sõelmed ehk päkiviliiv on suurema nõudlusega kui pesemata materjal, mistõttu väljapestud peenosis lõpetab tihtipeale settebasseinis ning selle pealt, nagu ka kogu muu kaevandatud maavara eest, tuleb maksta ressursitasu.

5. Karjäärid

5.1. Talteri liivakarjäär (AS YIT Eesti, KMIN-102)

Talteri liivakarjääris kaevandab Soome-Eesti ettevõtte AS YIT Eesti ehitus- ja täiteliiva. Karjäär asub Tallinna-Saku liivamaardlas ning mäeeraldise pindala on 31,17 ha. Kaevandamisluba KMIN-102 antud karjääris kestab AS YIT Eestil aastani 2033. Maavaravarude koondbilansi 2019. aasta andmetel on Talteri liivakarjääris ainsa aktiivse varuna arvel 551,4 tuh. m³ ehitusliiva, mille aastane kaevandamismaht oli 2019. aastal 163,1 tuh. m³. Kaevandatud maa kasutamise otstarbeks on määratud Männiku kõre ja kivisisaliku püsielupaik (Keskkonnaamet, 2020).



Joonis 2. Talteri liivakarjääri 3. värava poolne ala.

5.2. Vão V lubjakivikarjäär (OÜ Vão Paas, KMIN-137)

Vão V lubjakivikarjääris kaevandab kohalik ettevõtte OÜ Vão Paas kõrgemargilist ehituslubjakivi. Karjäär asub Vão lubjakivimaardlas ning selle mäeeraldise pindala on 13,68 ha. Kaevandamisluba KMIN-137 kestab OÜ Vão Paasil Vão V lubjakivikarjääris kuni 2028. aastani. Maavaravarude koondbilansi 2019. aasta andmetel on Vão V lubjakivikarjääris ehituslubjakivi aktiivse varu suurus 1263,4 tuh. m³, mille aastane kaevandamismaht aastal 2019 oli 175,7 tuh. m³. Kaevandatud maa kasutamise otstarbeks on määratud kinnisvara rajamiseks sobilik maa (Keskkonnaamet, 2021).



Joonis 3. Väo V lubjakivikarjääri killustiku ja sõelmete ladustamise ala.

6. Lubjakivi peenosise alternatiivsed kasutusvõimalused

Lubjakivikarjäärides tekkivale jäägile, lubjakivi peenosisele, on aastate jooksul otsitud mitmeid kasulikke kasutusvõimalusi, kuid Eestis on antud teemat väga vähe uuritud. Kuna tekkiva kivitolmu kogus on massiivne, on oluline selle tekke kogust vähendada või tekkinud jääke maksimaalselt ära kasutada. Lubjakivitolmu on võimalik kasutada näiteks täitematerjalina erinevates (ehitus-) materjalides, uute väiksematugevuseliste materjalide tootmiseks või hoopis isoleeriva kihina prügilates.

Fillerina ehk täitematerjalina on lubjakivi peenosist võimalik kasutada näiteks kummi- ja tsemendi- ning betoonitööstuses. Kummi tootmisel kasutatav lubjakivi tolmu materjali tugevusele häid omadusi juurde ei anna. Sellegipoolest on võimalik seda kummisegus fillerina kasutada, kuid vaid sellise materjali puhul, mille kasutusala ei nõua selle suurt tugevust (Sae-oui et al., 2009). Varasemate uuringute põhjal on selgunud, et lubjakivitolmu on võimalik kasutada betoonitööstuses, lisandina või liiva ja/või tsemendi asendusena. Kuna kivimi kvaliteet on pea igas paigas erinev, siis on ka peenosise keemiline koostis ehk selle mõju tsemendile ja betoonile erinev. Teatud koguste juures on lubjakivi peenosist kasutades betooni füüsikalisi omadusi võimalik parandada (Omar et al., 2012).

Kasutades lubjakivi tööstuse jääke koos lendtuha, sünteetilise kipsi ja veega – ilma ühegi kõrgekvaliteedilise agregaadita – on võimalik valmistada odav betoonilaadne ehituskivi. See on küll madalama survetugevusega, kuid seda on võimalik kasutada karjäärides korrastamistöodel ning muudel täitmistöodel (Shah, 2012). Peenosist on võimalik filterpressi abil pressida filterkookideks, mida saab edaspidi kasutada samuti prügilate ja karjääride põhja moodustuva isolatsioonikihi moodustamiseks (Libman, 2017).

Kuna lubjakivitolmu reageerib hästi elektrijaamade suitsugaasiga, siis on võimalik seda kasutada selleks, et vähendada suitsugaasis oleva SO_2 ja NO_x taset. Tolmu eeliseks kivimi jahvatamise ees on selle madalam hind. Lubjakivi asemel on selle jääktolmu võimalik kasutada ka klinkri tootmisel. Uuringu tulemusena oli tolmu kvaliteet piisav ning see aitaks kokku hoida eelkõige transpordikulude pealt. Lisaks on lubjakivi peenosist võimalik kasutada tööstusvee puhastamiseks. See aitab kontrollida vee happelisust ning seda protsessi on väga kerge kontrollida, kuna väike doseerimisviga ei põhjustaks vee pH taseme tõusu. Nagu igal teiselgi kasutusosal, aitab lubjakivitolmu kasutamine kokku hoida märkismisväärse summa (Baker et al., 2005).

7. Materjalide toomine ja ettevalmistus

7.1. Välitööd

Töös kasutatava materjali tõin kahest erinevast karjäärist. Ehitusliiv on pärit Tallinna-Saku liivamaardlas asuvast Talteri liivakarjäärist ning sõelmed pärinevad Vão lubjakivimaardlas asuvast Vão V lubjakivikarjäärist.

Talteri liivakarjäär oli liiva toomiseks sobilik koht sealse maavara kvaliteedi ning logistika poolest. Vajamineva koguse ehitusliiva võtsin 3. värava juurest, koordinaatidega 59.326868 N ja 24.696654 E. Loa materjali toomiseks ja kasutamiseks sain AS YIT Eesti Talteri liivakarjääri esindajalt Boleslav Kruglikult. Kuna kohapeal oli materjali kogusega kaalu puudumisel raske arvestada, siis võtsin seda varuga. Kokku tõin laboratooriumisse umbes 120 kg ehitusliiva (Joonis 4).

Betooni katsekehade valmistamiseks vajamineva killustiku (fr. 4/8 mm) ning sõelmed (fr. 0/4 mm) tõin Vão V lubjakivikarjäärist. Värsket materjali see päev paraku saada ei õnnestunud, mistõttu pidin killustiku ja sõelmed tooma lao alt, koordinaatidega 59.425885 N ja 24.915723 E. Sarnaselt liivaga ei õnnestunud ka killustikku ja sõelmeid kohapeal kaaluda ning võtsin materjali varuga. Kokku tõin karjäärist ligikaudu 120 kg killustikku ning 60 kg sõelmeid (Joonis 5).



Joonis 4. Katsekehade valmistamiseks vajalik ehitusliiv Talteri liivakarjääris.



Joonis 5. Katsekehade valmistamiseks vajalikud sõelmed Väo V lubjakivikarjääris.

7.2. Materjalide ettevalmistus

Materjalide katseteks ettevalmistamine toimus Tallinna Tehnikaülikoolis, energeetikamajas (NRG) asuvas geoloogia instituudi Mäendustingimuste laboratooriumis. Katsete läbiviimisel toimus kolimine uude laboratooriumisse, mistõttu olid mõningad etapid ruumipuuduse tõttu raskendatud.

7.2.1. Killustik (fr. 4/8 mm)

Betoonist katsekehade valmistamiseks tuleb killustik eelnevalt tolmust ja muust sodist puhtaks pesta, et katsed oleks võimalikult kontrollitavad ja korratavad. Kuna laboratooriumis puudus märgsõelumise võimalus, siis tuli seda teha käsitsi, mis ei pruugi olla sama tõhus. Killustiku pesemiseks kasutasin 4 mm avadega sõela. Sõela valisin vastavalt killustiku fraktsiooni väiksemale suurusle. Sõelale tõstsin korraga sellises koguses killustikku, et see ei oleks ülekoormatud. Ülekoormamisel võib sõel välja venida või hoopis katki minna. Seejärel pihustasin killustikku (samal ajal seda raputades ning segades) veega, et kogu muu materjal sellest välja pesta. Betoonsegus kasutatava killustiku (pestud) terastikulise koostise määramiseks moodustasin sõelkõvera. Selle jaoks kaalusin välja 1000 grammi materjali ning asetasin sõelumiseks masinasse, kasutades sõelasid avadega 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 6,3; 8; 10; 12 mm. Peale 15 minutist sõelumist 90% intensiivsuse juures kaalusin sõeladele jäänud materjali ning koostasid sõelkõvera (Joonis 6).

7.2.2. Liiv (fr. 0/4 mm)

Katsekehade valmistamiseks vajaminev ehitusliiv tuli kvaliteedi tagamiseks sõeluda läbi 4 mm avadega sõela. Laboratooriumis oli küll olemas sõelumismasin, kuid töö käigus selgus, et kiiremini sai liiv läbisõelatud käsitsi. Sõelale asetasin korraga maksimaalse lubatud koguse liiva, et sõel ei oleks ülekoormatud. Nagu ka killustikule, koostas liiva terastikulise koostise määramiseks sõelkõvera. Sarnaselt killustikule, kaalusin välja 1000 grammi ehitusliiva ning asetasin sõelmasinasse, kus kasutasin sõelasid avadega 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 6,3; 8; 10; 12 mm. Sõelumine kestis 15 minutit 90 protsendilise intensiivsusega ning seejärel kaalusin sõeladele jäänud materjali.



Joonis 6. Liiva ja killustiku sõelkõver.

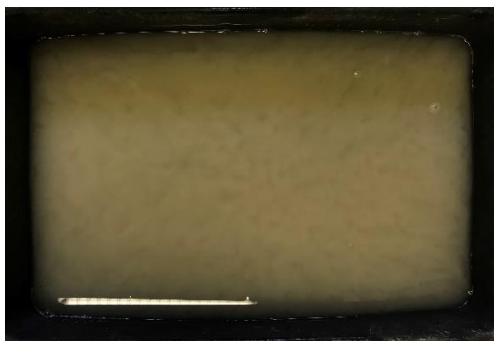
7.2.3. Sõelmed (fr. 0/4 mm)

Selleks, et sõelmetest kätte saada katsete läbiviimiseks vajalik lubjakivitoolm ehk peenos, tuli see märgsõelumise teel läbi sõeluda. Nagu mainitud, siis laboratooriumis puudus automaatseks märgsõelumiseks vajalik aparaat – seetõttu tuli sõelumine läbi viia käsitsi. Sõelmetest peenosise väljasõelumiseks kasutasin kahte sõela, 1 mm ja 0,063 mm avadega sõela. Suurema, 1 mm avadega, sõela eesmärgiks oli vähendada koormust peenemale sõelale ning hoida ära 0,063 mm avadega sõela suuremat ummistamist. Kuna 0,063 mm avadega sõel ei ole sama vastupidav kui suuremate avadega, siis tuli sõelmeid märgsõeluda üpris väikse koguse kaupa.



Joonis 7. Laborisse üles seatud sõelmete pesujaam.

Peenosise välja pesemiseks asetasin kõige alla anuma vee ja tolmu kogumiseks, selle peale 0,063 mm sõela ning peenema sõela peale omakorda jämedama, 1 mm sõela (Joonis 7). Seejärel tõstsin sõelmed 1 mm sõela peale ning alustasin selle pesemise ja sõelumisega. Et kasutatud vee kogus oleks minimaalne, tuli voolukiirus sättida võimalikult väikseks ning sõrmega piirata väljuva veejoo diameetrit. Tänu sellele oli võimalik suurendada vee survet, mistõttu oli see sõelmete pesemiseks efektiivseim võimalus.



Joonis 8. Värskest settima jäetud väljapestud peenosis. **Joonis 9.** 24 tundi settinud peenosis.

Selleks, et peenosis sõelmetest lõpuks kätte saada tuli 0,063 mm sõelast läbi voolav vesi jätta vähemalt 24 tunniks settima (Joonis 8). Selle aja jooksul vajus enamus väljasõelutud anuma põhja ning tolmu oli võimalik veest eraldada (Joonis 9). Järgmiseks kogusin üleliigse vee ettevaatlikult anumast ära ning põhja vajunud peenosise valasin ümber kuumakindlatesse anumatesse. Kuna katseteks oli vaja lubjakivi tolmu kuival kujul, siis asetasin liigniiske tolmutsegu 24 tunniks 105-kraadisesse ahju. 24 tunni jooksul on vesi aurustunud ning sain kätte betooni katsekehadeks vajaliku lubjakivi peenosise (fr. 0-0,063 mm) (Joonis 10).



Joonis 8. Peenosid peale 24 tundi kuivamist kuivatusahjus.

Sõelmetest väljapestud peenosisele tehti TalTech sedimentoloogia ja paleoökoloogia laboris koostöös Tiiu Alliksaarega granulomeetria analüüs (Lisa 2), et määrata tolmu terastikuline koostis.

7.3. Betooni retseptid

Betoonist katsekehade valmistamisel lähtusin AS Kunda Nordic Tsementi normaaltsemendi (portlandtsement CEM I, 42,5 N) pakendil asuvast C16/20 tugevusklassi retseptist (Tabel 2).

Tabel 2. KNC betooni retsept (20 liitri plastilise betoonsegu valmistamiseks).				
Betooni tugevusklass	Mahuline koostis liitrites			
	Tsement	Liiv	Killustik	Vesi
C8/10	3,5	11,5	17	4,0
C12/15	4,5	10,5	16,5	4,0
C16/20	5,5	9,5	16	4,0

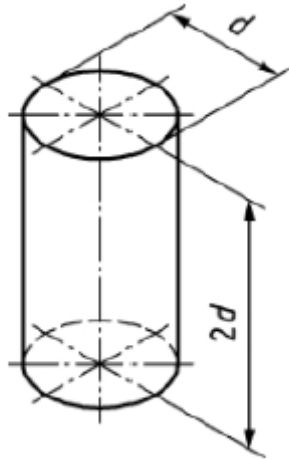
Lisatud peenosise kogus sõltus liiva kogusest. Kokku tuli teha 5 erinevat segu, igähte umbes 11,4 liitrit ning mille tolmu sisaldus oli 0; 5; 12,5; 25 ja 50 protsenti liivast. See teeb 0,3; 0,73; 1,46 ja 2,92 liitrit lubjakivitolmu vastavalt (Tabel 3).

Tabel 3. Betoonist katsekehade retseptid (liitrites).					
	Tsement	Liiv	Killustik	Vesi	Peenosis
A7 + A28 (0%)	3,4	5,8	9,8	2,5	0,0
B7 + B28 (5%)	3,4	5,8	9,8	2,5	0,3
C7 + C28 (12,5%)	3,4	5,8	9,8	2,5	0,73
D7 + D28 (25%)	3,4	5,8	9,8	2,5	1,46
E7 + E28 (50%)	3,4	5,8	9,8	2,5	2,92

8. Katsekehade valmistamine

Katsekehade valmistamiseks vajalike vormide valikul, katsekehade valmistamisel ja nende survetugevuse katsetamisel lähtusin Eesti standarditest EVS-EN 12390-1:2012, EVS-EN 12390-2:2019 ja EVS-EN 12390-3:2019.

Geoloogia instituudi laboratooriumis olid olemas standardile EVS-EN 12390-1:2012 vastavad silindrilised vormid (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2012). Enne kasutamist kontrolliti kindluse mõttes üle vormide mõõtmed, et need oleks katsete läbiviimiseks õiges mõõdus (Joonis 10). Valitud silindriliste vormide mõõtmed olid 100 x 200 mm.



Joonis 9. Standardile vastava silindri mõõtmed (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2012).

Katsekehade valmistamisel ja nende edasisel hoidmisel lähtusin standardist EVS-EN 12390-2:2019 (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019). Selle standardi järgi on määratud kõik katseks vajalikud tegevused – vormide ettevalmistamine ja täitmine, betooni tihendamine, tähistamine, katsekehade hoidmine jms. Kui katsekehade valmistamiseks vajalik betoonsegu sai valmis, tuli see valada vormidesse ning seejärel tihendada.

Standardis on märgitud, et betooni vormiga nakkumise vältimiseks tuleb sisepind enne täitmist katta õhukese mittereageeriva määrdet kihiga. Selleks, et veenduda, kas betoon nakkub vormi külge, tein katsetamiseks 3 katsekeha. Kuivanud betoonsilindrid vormi külge ei nakkunud, mistõttu polnud vajalik mingisugust määret kasutada.

Betoonsegu valmistamisel lisasin kõik selle vajalikud komponendid – killustik, liiv, tsement, vesi ja vajadusel ka lubjakivitoolm – ämbrisse ning segasin käeshoitava betoonimiksri abil homogeenseks seguks. Kui segu oli valmis, valasin selle kolmes või neljas järgus vormi, et tagada parim tihendamise kvaliteet.

Vormid täideti vedelamate segude (0; 5; 12,5 protsendiline tolmu lisand) puhul kolmes ning paksemate segude (25; 50 protsendiline tolmu lisand) puhul neljas jaos, et tihendamine oleks efektiivsem. Betooni tihendamiseks kasutati tihendamispulka. Kuna standardi järgi pole tihendamispulga diameeter fikseeritud, siis kasutati selleks 10 mm läbimõõduga alumiiniumvarrast. Igale vormi lisatud

betoonikihile rakendasin tihendamispulgaga 25 lööki ning seejärel koputasin kummihaamriga ettevaatlikult vormi külgedele – seni kuni tihendamispulga jäljed täitusid ja suurte õhumullide eraldumine lakkas. Tihendamispulga löökidega pidin olema tähelepanelik, et iga järgneva kihi tihendamisel ei lööks pulk sellest allpool asuvasse kihti. Üle vormi serva ulatuv betoon eemaldati kelluga ning koheselt peale seda siluti katsekeha pealispind.

Katsekehad tuleb tähistada selgelt ja vastupidavalt, ilma neid vigastamata. Nende tähistamiseks kasutasin tähti (A, B, C, D, E), kuivamiseks ettenähtud aja pikkust päevades (7, 28) ning eksemplari numbrit (1, 2, 3). Katsekehade koostis ning tähistus on väljatoodud allolevas tabelis (Tabel 4). Esialgselt tähistasin ära katsekehade vormid ning peale esialgset kivistumist ka katsekehad ise.

Tabel 4. Katsekehade tähistused.		
Tolmu sisaldus	Kuivamise aeg	
	7 päeva	28 päeva
0%	A7-1; A7-2; A7-3	A28-1; A28-2; A28-3
5%	B7-1; B7-2; B7-3	B28-1; B28-2; B28-3
12,5%	C7-1; C7-2; C7-3	C28-1; C28-2; C28-3
25%	D7-1; D7-2; D7-3	D28-1; D28-2; D28-3
50%	E7-1; E7-2; E7-3	E28-1; E28-2; E28-3

Katsekehi hoitakse ladustamiskohas vormide sees löökide, vibratsiooni ja kuivamise eest kaitstult – temperatuuril (20 ± 5)°C vähemalt 16 tundi, kuid mitte kauem kui 3 päeva. Antud töös lasin katsekehadel enne vormist välja võtmist kivistuda 48 tundi. Katsekehadele märgiti veekindla markeriga peale selle tähis ning tõsteti kuni menetluse kohase katsetamiseni vette, mida hoiti temperatuuril (20 ± 2)°C. Vee temperatuuri kontrolliti kord päevas, vajadusel lisati veidi sooja vett.

8.1. Katsekehade survetugevuse katsetamine

Kivistunud betoonist katsekehade katsetamine on määratud standardiga EVS-EN 12390-3:2019. Katsekehade katsetamisel koormatakse neid kuni nende purunemiseni survekatsemasinas – kõige hiljemalt 10 tunni jooksul katsekeha hoidmiskeskonnast väljavõtmist. Suurim koormus, mida katsekeha vastu võtab registreeritakse ja arvutatakse betooni survetugevus (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019). Selleks, et proovikeha koormamine oleks ühtlane, tuli lihvmasinaga abil lihvida selle ülemine osa. Olenevalt katsekehast, tuli ülemisest osast maha lihvida väljaulatuvad killustiku tükid – üldjuhul oli see 0-3 mm ning ei mõjutanud katsekeha ruumala. Katsekehade lihvimiseks kasutasin laboratooriumis asuvat Controls 55-C0201 lihvmasinat.

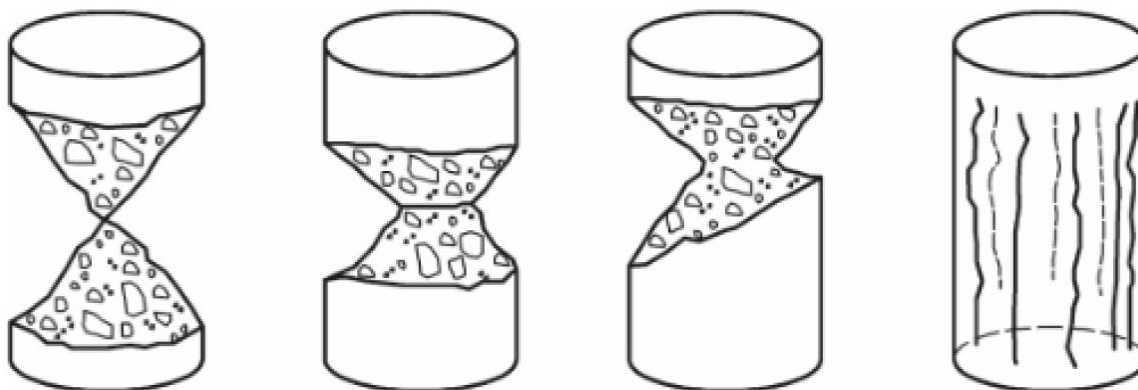
Kui katsekeha oli mõlemast otsast sile ja paralleelne, kuivatasin selle liigsest veest ning asetasin eelnevalt puhtaks pühitud pindadega katsemasinasse Controls Digimax Plus V1.2X 50-Q0902. Masin konfigureeriti vastavalt enne iga keha katsetamist. Kuna katsekehade mõõtmed, vanus ja koormamiskiirus olid konstantsed suurused, siis tuli enne iga katsekeha katsemist muuta vaid selle kaalu.

Peale survetugevusmasina konfigureerimist võisin alustada katsega. Selleks vaatasin üle, et katsekeha oleks asetatud katsemasina plaatide keskele. Kui katsekeha sai paika, sulgesin survetugevusmasina ukse ning lülitasin sisse mootori – liugur hakkas liikuma. Sel hetkel, kui liugur kontakteerus katsekehaga ning näidikule ilmus survetugevuse näit, tuli surveklapp õige surve reguleerimiseks liigutada ette. Peale katsekeha purunemist fikseerisin selle purunemistüübi ning masina näidikult vaatasin suurima kehale mõjunud survetugevuse. Seejärel laeti masin tühjaks ning sain alustada järgmise katsekeha katsetamisega.

9. Katsete tulemused

Peale katsekehade purunemist survekatsemasinas võtsin masina ekraanile ilmunud lugemi. Väljastatav lugem kuvati kilonjuutonites (kN) ning see tuli arvutuste abil teisendada megapaskalitesse (MPa) ehk N/mm^2 . Teisendamiseks vajalik valem on kujul $F = F_1 * \frac{1000}{A}$, kus F_1 on masina poolt väljastatud survetugevus kilonjuutonites (kN) ning A on masina poolt arvatud katsekeha ristlõikepindala (mm^2).

Selleks, et veenduda katsekeha kvaliteedis ning edukas survetugevuskatses, tuleb vaadelda betoonist katsekeha purunemistüüpi peale selle purunemist. Silindriliste katsekehade rahuldavad ja mitterahuldavad purunemispildid on väljatoodud Eesti standardis EVS-EN 12390-3:2019 ning reaalseid tulemusi ning katsekahade kvaliteeti saab nendega võrrelda (Joonis 12). Ideaalse purunemise korral on silinder purunenud ümberringi enam-vähem võrdselt ja plaatidega kontaktis olevate pindade vigastused on tavaliselt väiksed (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019). Tehtud töös tekkinud kõikide katsesilindrite purunemispildid olid rahuldavad ning on välja toodud töö lisades (Lisa 3). Sellistest tulemustest võib järeldada, et valmistatud ning katsetatud katsekehad olid kvaliteetsed ning ei esinenud muid füüsilisi vigastusi, mis oleks võinud tulemuste usaldusväärsust mõjutada.

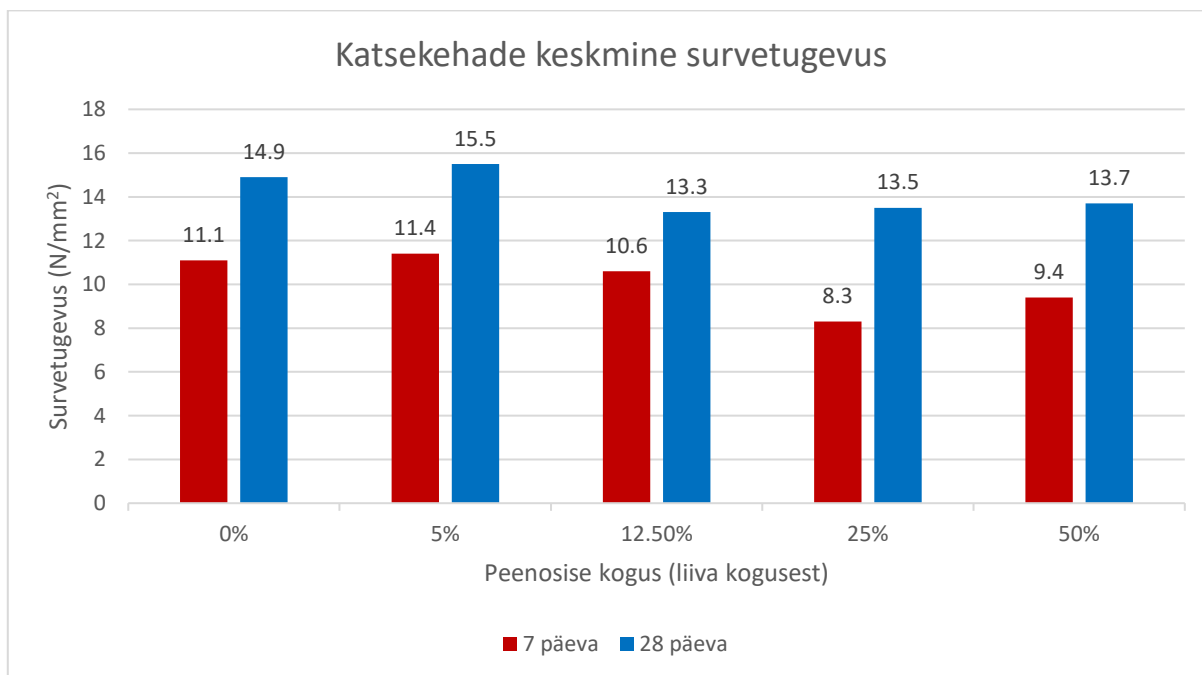


Joonis 10. Silindri rahuldavad purunemispildid (Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, 2019).

Ideaalsel juhul peaks tugevusklassi C16/20 kuuluva betoonsilindri survetugevus peale 28-päevast kuivamist olema 16 N/mm^2 ning peale 7-päevast kuivamist umbes 60% sellest ehk ligikaudu $9,6 \text{ N/mm}^2$. Käesolevas töös jäi esimese kolme segu (0%, 5% ja 12,5%) 7-päevane survetugevus 74 – 79 protsendi juurde 28-päevasest ning kahe segu (25% ja 50%) 7-päevane survetugevus 61 ja 68 protsendi juurde 28-päevasest (Lisa 1). Kuna katsekehade tihendamise- ning kivistumistingimused olid identsed, siis võib saadud katsetulemusi lugeda adekvaatseteks ning usaldusväärseteks.

Katsete tulemused olid ootuspärased seni, kuni peale survetugevuse langust 12,5% juures hakkas see – küll mitte suurel määral – uuesti tõusma (Joonis 11). Ootuste kohaselt oleks väiksema tolmu kogusega (5% ja 12,5%) betoonkeha survetugevus pidanud etalonkatsekehast suurenema ning sealt edasi suurema tolmu koguse juures hakkama pigem ühtlaselt langema, kuna segu oleks siis olnud üleküllastunud ning skeleti sidumiseks pole piisavalt tsementi. Sellised tulemused esinesid nii 7- kui ka 28-päevaste katsekehade survetugevuste korral, kusjuures 25 protsendilise katsekeha korral oli 7-

päevane survetugevus madalaim. Sarnaseid katsetulemusi on märgata ka teistes analoogsetes uuringutes – näiteks Singh, Srivastava ja Agarwali 2015. aastal läbiviidud uuringus, kus asendati betooni peentäitemarjalina olev liiv määratud koguses lubjakivi sõelmetega, mis omakorda sisaldab suures koguses lubjakivi peenosist (Singh et al., 2015). Eelduste kohaselt võib survetugevus veel peale 50 protsendilist lisandit vähemsel määral tõusta, kuid suurendades tolmu kogust liigselt hakkaks see suure tõenäosusega langema ning parim tulemus jäaks siiski 5 protsendilise lisandi juurde.



Joonis 11. Katsekehade keskmine survetugevus (N/mm²).

Lõputöö käigus läbi viidud katsete tulemusena õnnestus leida lubjakivi peenosise sisaldus betoonsegu (5% liiva kogusest), mille juures on betooni survetugevus maksimaalne. Leitud maksimaalne survetugevus pole kontrollkatsekehast küll suurel määral kõrgem, kuid see annab põhjuse antud teemat täpsemalt edasi uurida, et välja töötada uus retsept tugevama betoonsegu jaoks kasutades kaevandustes tekkivat jääkmaterjali.

9.1. Keemilise analüüsi tulemused

Proovi keemilise koostise määramiseks tehti röntgenfluoresentsanalüüs (XRF) sulatatud preparaadist. Sulatatud preparaadi valmistamiseks lahjendati 1 gramm proovi 1:10 suhtega liitium-metaboraadi ja -tetraboraadi 50/50 seguga ning saadud segust sulatati klaas disk. Analüüsidele eelnevalt määrati proovidest kuumutuskadu 950°C juures (LOI 950°C). Preparaate analüüsiti Rh anoodiga röntgentoruga Bruker S4 spektromeetriga kasutades Rahvusvahelise Geoanalüütikute Assotsiatsiooni karbonaatsete tugiproovide järgi kalibreeritud kalibreeringut ning määrati peenosise keemilised põhikomponendid SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃ (Tabel 5).

Lubjakivi keemilised koostised kipuvad oleval muutlikud ning isegi samas maardlas on tulemused erinevad, kuna kaevandatakse erinevaid kihte. Lubjakivitolmu keemiline koostis mängib olulist rolli eelkõige klinkri tootmisel, kus tähtsaimate keemiliste komponentide sisaldused on CaO > 44%, MgO <

3,2% ning $P_2O_5 < 0,5\%$ (Kanter et al., 2021). Kui kasutada lubjakivi peenosist lisandina betoonis, siis selle keemiline koostis nii suurt olulisust ei oma, peamine, et tolm ei sisaldaks orgaanikat ning et selle saviosakeste osakaal poleks suur. Saviosakeste sisaldusele peenosises viitab ühendite SiO_2 ja Al_2O_3 sisaldus.

Tabel 5. Peenosise määratud keemiline koostis.												
Proov	LOI 950° C (%)	Sisaldus, %										
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3
Peenos	34	13,40	0,245	3,692	2,856	0,116	4,189	38,92	0,116	1,148	0,812	0,616

9.2. Granulomeetria tulemused

Granulomeetriline analüüs viidi läbi koostöös Tiiu Alliksaarega Tallinna Tehnikaülikooli sedimentoloogia ja paleoökoloogia laboris. Lubjakivi peenosises olevate osakeste suurusjaotuse määramiseks kasutati HORIBA LA-950V2 laseranalüsaatorit. Analüüsimiseks vajaliku materjali kogus oli väike, umbes 1 gramm ning see segati enne laseranalüsaatorisse valamist veega homogeenseks seguks, et vältida tolmu tükki minemist. Analüüsi tulemusena selgus, et töös kasutatavas lubjakivitolmus oli ligikaudu 4% osakesi, mis olid suurema kui 0,063 mm (kuid väiksema, kui 0,140 mm) läbimõõduga (Lisa 2). See võib olla põhjustatud mitmest erinevast asjaolust – ruudukujulisest sõelast võis läbi minna diagonaalis suurema mõõduga (plaatjaid) terasid, sõelmete töötlemise käigus võis anumasse langeda suuremaid osakesi, sõel võib olla aastatega vigastatud või kleepus osa tolmust analüüsi käigu ajal kokku, kuid kuna suuremate osakeste osakaal tolmus on niivõrd väike, siis uuringu tulemusi see ei mõjuta.

Kokkuvõte

Antud lõputöös uuriti lubjakivi peenosise kasutusvõimalust betoonitööstuses, eesmärgiga parandada kaevandusjääke kasutades betooni survetugevust. Katsete läbiviimiseks kasutati killustikku (fr. 4/8) ja sõelmeid (fr. 0/4) Väo V lubjakivikarjäärist ning ehitusliiva (fr. 0/4) Talteri liivakarjäärist. Katsekehade valmistamine ning survetugevuse testimine toimus Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudi mäendustingimuste laboratooriumis. Tööks vajalik peenosise eraldati märgsõelumise teel käsitsi sõelmetest ning katsekehade ühtlase kvaliteedi tagamiseks pesti killustik ning sõeluti liiv eelnevalt läbi. Seejärel koostati killustiku ja liiva sõelkõver, peenosise granulomeetiline ning keemiline analüüs.

Betooni survetugevuse katsetamiseks tehti viis erineva koostisosaga betoonsegu, igaühte kolm eksemplari mõõtmistulemuste usaldusväärsuse tagamiseks ehk kokku 30 katsekeha. Katsekehad valati 100 x 200 mm mõõtmega silindrilistesse vormidesse ning survetugevust katsetati 7 ja 28 päeva möödudes. Betooni survetugevuse mõõtmiseks kasutati laboratooriumis asuvat Controls Digimax Plus V1.2X 50-Q0902 survekatsemasinat ning katsekehade pindade eelnevaks lihvimiseks Controls 55-C0201 lihvmasinat.

Betoonsegud valmistati 0; 5; 12,5; 25 ja 50 protendilise peenosise lisandiga liiva massist. Katsete tulemusena leiti, et betooni survetugevust on lubjakivi peenosisega võimalik efektiivselt tõsta. Viie protendilise peenosise lisandi juures oli betooni katsekeha survetugevus võrreldes etaloniga 4% suurem. 12,5% lisandi korral langes survetugevus järsult, kuid püsis samal tasemel võrreldes 25% ja 50% lisandiga. Selgus, et peenosise suurema lisandi – 25% ja 50% – korral tõusis 28-päevane survetugevus vähesel määral. Hüpoteetiliselt peaks survetugevus veelgi suurema lisandi korral siiski langema.

Lõputöö tulemusena saadud tulemus on lähedal oodatule. Saavutati töö eesmärk – parandati betooni survetugevust kasutades lubjakivi kaevandusjääke ning leiti peenosise kogus betoonsegus, mille lisamisel on survetugevus maksimaalne. Kuigi lõputöö tulemus on positiivne, oleks parima tulemuse saavutamiseks vajalik teha edasisi katseid uue betooni retsepi välja töötamiseks, kus tuleks täpsemalt uurida ja katsetada teiste betoonsegu komponentide (eelkõige tsemendi ja vee) erinevaid sisaldusi segus, kui sellele lisada lubjakivi peenosist. Lisaks, võttes eeskujul varasematest uuringutest lubjakivi sõelmete mõjust betoonis, tuleks katsetada ka uusi betooni retsepte, kus betoonsegus olev peentäitematerjal, ehitusliiv, oleks teatud määradel asendatud lubjakivi sõelmetega, et maksimaliseerida kaevandusjääkide kasutamist ning sealjuures parandada materjali omadusi ning säästa ehitusmaavarana tähtsal kohal asetsevat liiva.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Sander Kanterit varasema kaasamise eest projekti, mis andsid idee lõputöö tegemise teemaks ning töö sisuliste nõuannete eest. Mäeettevõtted OÜ Väo Paas ja AS YIT Eesti olid suureks abiks tööks vajaliku materjaliga. Lisaks tänan Siim Pajusaart ja Tiiu Alliksaart, kes olid suureks abiks laborianalüüside ja katsete läbiviimisel.

Kasutatud kirjandus

- Baker, R. J., van Leeuwen, J., & White, D. J. (2005). *Applications for Reuse of Lime Sludge from Water Softening*. Iowa State University.
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2009). *Betooni täitematerjalid EVS-EN 12620:2005+A1:2008*. Kasutamise kuupäev: 2. märts 2021. a., allikas <https://www.evs.ee/et/evs-en-12620-2005+a1-2008>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2012). *Kivistunud betooni katsetamine. Osa 1: Kuju, mõõtmed ja muud katsekehadele ja vormidele esitatavad nõuded. EVS-EN 12390-1:2012*. Kasutamise kuupäev: 2. märts 2021. a., allikas <https://www.evs.ee/et/evs-en-12390-1-2012>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2019). *Kivistunud betooni katsetamine. Osa 2: Tugevuskatse katsekehade valmistamine ja hoidmine. EVS-EN 12390-2:2019*. Kasutamise kuupäev: 2. märts 2021. a., allikas <https://www.evs.ee/et/evs-en-12390-2-2019>
- Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. (2019). *Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus. EVS-EN 12390-3:2019*. Kasutamise kuupäev: 2. märts 2021. a., allikas <https://www.evs.ee/et/evs-en-12390-3-2019>
- Eesti Vabariigi Keskkonnaministeerium. (2010). *Ehitusmaavarade kasutamise riiklik arengukava 2011-2020*. Kasutamise kuupäev: 15. märts 2021. a., allikas https://www.envir.ee/sites/default/files/ehitusmaavarade_kasutamise_riiklik_arengukava_2011-2020.pdf
- Kanter, S., Urtson, K., & Klaas, H. (2021). *Karbonaatkivimite sõelmete ümbertöötlemisel tekkivate peenosiste kasutamisvõimaluste rakendusuuring*. Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituut.
- Keskkonnaamet. (2017). *Kaevisel või katendi kasutamise*. Kasutamise kuupäev: 21. märts 2021. a., allikas <https://www.keskkonnaamet.ee/et/eesmargid-tegevused/maapou/kaevisel-voikatendi-kasutamine>
- Keskkonnaamet. (2020). *KMIN-102 Keskkonnaluba*. Kasutamise kuupäev: 18. märts 2021. a., allikas https://kotkas.envir.ee/permits/public_view?represented_id=&search=1&permit_nr=KMIN-102&owner_name=&issue_date_start=&issue_date_end=&valid_start_date_start=&valid_start_date_end=&search_location=&permit_status=ISSUED&permit_id=110118
- Keskkonnaamet. (2021). *KMIN-137 Keskkonnaluba*. Kasutamise kuupäev: 18. märts 2021. a., allikas https://kotkas.envir.ee/permits/public_view?represented_id=&search=1&permit_nr=KMIN-137&owner_name=&issue_date_start=&issue_date_end=&valid_start_date_start=&valid_start_date_end=&search_location=&permit_status=ISSUED&permit_id=121367
- Libman, D. (2017). *Tootmisjääkide kasutamine uute toodetena lubjakivi kaevandamisel Väo karjääri näitel*. [Bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool]. <https://digikogu.taltech.ee/>

- Omar, O. M., Ghada, D., Elhameed, A., Sherif, M. A., & Mohamadien, H. A. (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8(3), 193-203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2012.10.005>
- Pirrus, E. (1999). Maavarade geoloogia. rmt: E. Pirrus, *Maavarade geoloogia* (lk 68-69). Tallinna Tehnikaülikool.
- Prakash, S., & Rao, H. (2016). *Study on Compressive Strength of Quarry Dust as Fine Aggregate in Concrete*. Hindawi. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/1742769>
- Raado, L.-M. (2018). *Ehitusmaterjalid*. Sihtasutus Professor Karl Õigeri Stipendiumifond.
- Rammul, Ü., Niitlaan, E., Reinsalu, E., & Keerberg, L. (2017). *Ehitusmaavarade uuringu ja kaevandamisalade korrastamise käsiraamat*. OÜ Inseneribüroo STEIGER.
- Reinsalu, E. (2011). Eesti Mäendus. rmt: E. Reinsalu, *Eesti Mäendus* (lk 179-183). Tallinna Tehnikaülikool.
- Roosalu, R. (2020). *Eesti Vabariigi 2019. aasta maavaravarude koondbilansid (seisuga 31.12.2019. a.)*. Maa-amet.
- Sae-oui, P., Sirisinha, C., & Thaptong, P. (2009). Utilization of limestone dust waste as filler in natural rubber. *Journal of Material Cycles and Waste Management*(11), lk 166-171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10163-008-0230-4>
- Shah, H. (2012). *Controlled Low Strength Material (CLSM) Produced from Limestone Fines and Other Byproducts*. [Magistritöö, Missouri Ülikool]. <http://hdl.handle.net/10355/33172>
- Singh, A. K., Srivastava, V., & Agarwal, V. (2015). *Stone Dust in Concrete: Effect of Compressive Strength*. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR).
- Tartu Ülikooli geoloogia osakond. (2020). Kasutamise kuupäev: 24. märts 2021. a., allikas <https://www.facebook.com/142744972542541/posts/1779699155513773/>
- Turgut, P. (2008). Limestone dust and glass powder wastes as new brick material. *Materials and Structures*, 41, 805-813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1617/s11527-007-9284-3>

Lisad

Lisa 1. Katsekehade survetugevse mõõtmistulemused

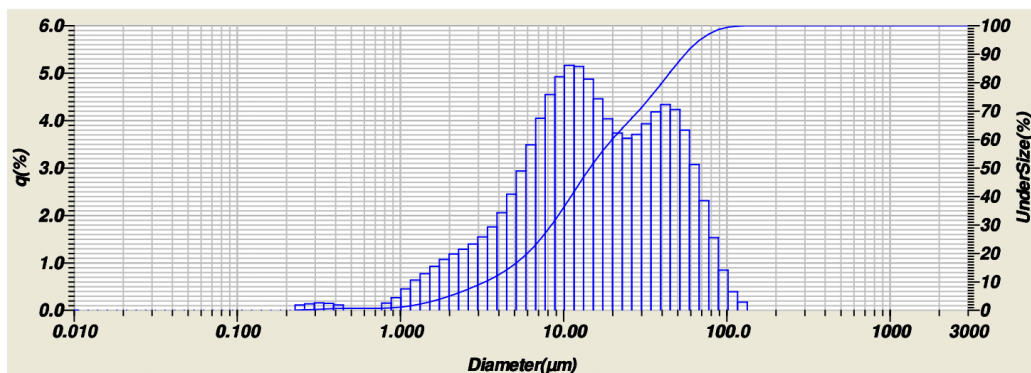
	g	mm ²	kN	N/mm ²	keskmine (N/mm ²)
A7-1	3676	31416	348,2	11,1	
A7-2	3671	31416	346,5	11,0	11,1
A7-3	3662	31416	347,3	11,1	
B7-1	3709	31416	362,0	11,5	
B7-2	3704	31416	356,4	11,3	11,4
B7-3	3698	31416	358,4	11,4	
C7-1	3652	31416	331,8	10,6	
C7-2	3677	31416	327,3	10,4	10,6
C7-3	3652	31416	335,6	10,7	
D7-1	3695	31416	261,4	8,3	
D7-2	3690	31416	255,9	8,1	8,3
D7-3	3709	31416	261,1	8,3	
E7-1	3695	31416	293,8	9,4	
E7-2	3684	31416	287,5	9,2	9,4
E7-3	3691	31416	300,2	9,6	
A28-1	3662	31416	480,7	15,3	
A28-2	3638	31416	451,1	14,4	14,9
A28-3	3625	31416	468,9	14,9	
B28-1	3708	31416	476,1	15,2	
B28-2	3693	31416	488,6	15,6	15,5
B28-3	3696	31416	500,0	15,9	
C28-1	3668	31416	403,5	12,8	
C28-2	3657	31416	418,6	13,3	13,3
C28-3	3670	31416	434,9	13,8	
D28-1	3697	31416	419,3	13,3	
D28-2	3691	31416	412,0	13,1	13,5
D28-3	3692	31416	439,3	14,0	
E28-1	3696	31416	452,5	14,4	
E28-2	3697	31416	415,4	13,2	13,7
E28-3	3688	31416	426,4	13,6	

Lisa 2. Lasersedigraafi tulemused

2021.05.10 14:15:14

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	:		Median Size	:	14.48507(μm)
ID#	:	202105101403757	Mean Size	:	23.09722(μm)
Data Name	:	Lubjakivi tolm 3	Std.Dev.	:	21.8617(μm)
Transmittance(R)	:	81.7(%)	Geo.Mean Size	:	14.1609(μm)
Transmittance(B)	:	74.9(%)	Geo.Std.Dev.	:	2.9615(μm)
Circulation Speed	:	5	Mode Size	:	10.8370(μm)
Agitation Speed	:	5	Span	:	OFF
Ultra Sonic	:	02:00 (5)	Diameter on Cumulative %	:	(2)10.00 (%) - 3.3196(μm)
Form of Distribution	:	Auto		:	(9)90.00 (%) - 55.4950(μm)
Distribution Base	:	Volume			
Refractive Index (R)	:	Lubjakivi[Calcium carbonate (1.620 - 0.000i),Water(1.333)]			
Refractive Index (B)	:	Lubjakivi[Calcium carbonate (1.620 - 0.000i),Water(1.333)]			
Material	:				
Source	:				
Lot Number	:				
Test or Assay. Number	:				



No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)
1	0.011	0.000	0.000	24	0.259	0.109	0.109	47	5.867	2.934	19.491	70	133.103	0.167	100.000
2	0.013	0.000	0.000	25	0.296	0.133	0.242	48	6.720	3.486	22.977	71	152.453	0.000	100.000
3	0.015	0.000	0.000	26	0.339	0.151	0.393	49	7.697	4.048	27.025	72	174.616	0.000	100.000
4	0.017	0.000	0.000	27	0.389	0.143	0.536	50	8.816	4.548	31.572	73	200.000	0.000	100.000
5	0.020	0.000	0.000	28	0.445	0.108	0.644	51	10.097	4.921	36.494	74	229.075	0.000	100.000
6	0.022	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.644	52	11.565	5.160	41.654	75	262.376	0.000	100.000
7	0.026	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.644	53	13.246	5.138	46.793	76	300.518	0.000	100.000
8	0.029	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.644	54	15.172	4.869	51.662	77	344.206	0.000	100.000
9	0.034	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.644	55	17.377	4.455	56.116	78	394.244	0.000	100.000
10	0.039	0.000	0.000	33	0.877	0.146	0.790	56	19.904	4.036	60.153	79	451.556	0.000	100.000
11	0.044	0.000	0.000	34	1.005	0.261	1.050	57	22.797	3.736	63.889	80	517.200	0.000	100.000
12	0.051	0.000	0.000	35	1.151	0.450	1.501	58	26.111	3.624	67.513	81	592.387	0.000	100.000
13	0.058	0.000	0.000	36	1.318	0.633	2.133	59	29.907	3.705	71.218	82	678.504	0.000	100.000
14	0.067	0.000	0.000	37	1.510	0.769	2.902	60	34.255	3.929	75.146	83	777.141	0.000	100.000
15	0.076	0.000	0.000	38	1.729	0.921	3.823	61	39.234	4.182	79.328	84	890.116	0.000	100.000
16	0.087	0.000	0.000	39	1.981	1.068	4.892	62	44.938	4.335	83.664	85	1019.515	0.000	100.000
17	0.100	0.000	0.000	40	2.269	1.185	6.077	63	51.471	4.230	87.894	86	1167.725	0.000	100.000
18	0.115	0.000	0.000	41	2.599	1.286	7.363	64	58.953	3.797	91.691	87	1337.481	0.000	100.000
19	0.131	0.000	0.000	42	2.976	1.396	8.758	65	67.523	3.069	94.760	88	1531.914	0.000	100.000
20	0.150	0.000	0.000	43	3.409	1.544	10.302	66	77.339	2.311	97.071	89	1754.613	0.000	100.000
21	0.172	0.000	0.000	44	3.905	1.756	12.058	67	88.583	1.530	98.601	90	2009.687	0.000	100.000
22	0.197	0.000	0.000	45	4.472	2.053	14.111	68	101.460	0.842	99.443	91	2301.841	0.000	100.000
23	0.226	0.000	0.000	46	5.122	2.447	16.557	69	116.210	0.390	99.833	92	2636.467	0.000	100.000

Lisa 3. Purunenud katsekehad



