

Tallinna Tehnikaülikool
Energeetikateaduskond
Mäeinstituut



AAGMM

Henri Prank, 122104

Magistritöö AKM70LT

ID 2537

KILLUSTIKU JA AHERAINEKILLUSTIKU
VÄÄRINDAMINE

Juhendaja:

Jüri-Rivaldo Pastarus, Ph.D.

Tallinn

Juuni 2015

SISUKORD

Tabelid.....	3
Joonised.....	3
Sissejuhatus	7
1. Kasutatud mõisted	9
2. Killustiku tootmine ja toore.....	9
2.1 Killustiku tootmine Aru-Lõuna lubjakivikarjääris	10
2.2 Killustiku tootmine Suurkõrtsi karjääris.....	11
2.3 Põlevkivi.....	11
2.3.1 Põlevkivi aheraine	11
2.3.2 Tootmine Estonia kaevanduses	12
3. Veeimavuse vähendamise teoreetiline alus.....	13
3.1 Kasutatud sideained ja muud immutusvahendid	14
3.1.1 Tsement	14
3.1.2 Kustutatud lubi	15
3.1.3 Naatriumvesiklaas	15
3.1.4 Bituumenemulsioon	15
3.1.5 Põlevkivibituumen	15
3.1.6 Epoksüvaik	16
3.1.7 Põlevkivituhk	16
4. Metoodika.....	16
5. Algsed katsetulemused	18
5.1 Täitematerjalide terakoostis ja peenosiste sisalduse määramine	18
5.2 Täitematerjali tera kuju (plaatsustegur) määramine	19
5.3 Täitematerjalide purunemiskindluse määramine.....	20
5.4 Täitematerjalide terade tiheduse ja veeimavuse määramine	21
5.5 Täitematerjalide külmakindluse destilleeritud vees	23
5.6 Täitematerjalide külmakindluse 1% NaCl lahuses.....	24
6. Killustiku immutamine ja katseteks ettevalmistamine.....	24
6.1 Immutamine bituumenemulsiooniga	25
6.1.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks emulsiooniga.....	27
6.2 Immutamine põlevkivibituumeniga.....	29
6.2.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks põlevkivibituumeniga.....	32
6.3 Immutamine teetsemendiga, põlevkivituhaga ja kustutatud lubjaga.....	32
6.3.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks teetsemendiga, põlevkivituhaga ja kustutatud lubjaga.....	35
6.4 Immutamine naatriumvesiklaasiga	36
6.4.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks naatriumvesiklaasiga	37
6.5 Immutamine epoksüvaiguga.....	38
6.5.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks epoksüvaiguga.....	38
7. Katsetamine ja tulemused immutatud killustikega.....	39
7.1 Veeimavuse määramine immutatud killustikega.....	40
7.2 Veeimavuse määramine immutatud killustikega peale güreerimist	41
7.3 Külmakindluse määramine immutatud killustikele destilleeritud vee ja soola lahuses.....	43
7.4 Lisakatsed epoksüvaiguga	44
8. Diskussioon.....	46

9. Kokkuvõte	50
KASUTATUD KIRJANDUS	51

TABELID

Tabel 1. LA koefitsent, fraktsioon 4/16 mm [10]	12
Tabel 2. Kasutatud kontsentratsioonid pulbriliste immutusvahenditega	35
Tabel 3. Vesiklaasi kontsentratsioonid.....	36
Tabel 4. Veeimavused immutatud killustikel.....	41
Tabel 5. Veeimavused immutatud ja güreeritud killustikel	42
Tabel 6. Külmakindluse näitajad immutatud killustikel	43
Tabel 7. Los Angeles näitaja epoksüvaiguga kaetud killustike puhul	45

JOONISED

Joonis 1. Purustuskeem Lõuna-Aru karjääris [5]	10
Joonis 2. Estonia kaevanduse aherainekillustiku tootmisel kasutatavad lintkonveierid [12]	13
Joonis 3. Katsetatud killustike terakoostis [5].....	19
Joonis 4. Killustike plaatsustegur fr 12,5/40 mm [5]	20
Joonis 5. Los Angelese purunemiskindluse näitaja fr 10/14 mm, kajastatud protsentides [5]	21
Joonis 6. Killustike veeimavus WA24 fr 4/31,5 mm	22
Joonis 7. Emulsioon külma aheraine peal (3,3% emulsiooni)	25
Joonis 8. Segamismeetod emulsiooni ja põlevkivibituumeni puhul. Pildil segamine põlevkivibituumeniga.....	26
Joonis 9. Referentskivi visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Emulsiooni kogused alates vasakult: 1,8%; 3,4%; 3,7%	26
Joonis 10. Aheraine visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Emulsiooni kogused alates vasakult: 2,9%; 3,6%; 4,2%	27
Joonis 11. Bituumenemulsiooni lisamine sugurisse Tecnotest [5]	28
Joonis 12. Põlevkivibituumeni lisamine referentskivile seguris SRC. Emulsiooniga toimus lisamine ja segamine analoogselt.[5]	29
Joonis 13. Põlevkivibituumen külma referentskivi pinnal	30
Joonis 14. Referentskivi visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Põlevkivibituumeni kogused alates vasakult: 2,0%; 2,4%; 2,9%	31
Joonis 15. Aheraine visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Põlevkivibituumeni kogused alates vasakult: 2,3%; 2,6%; 3,0%	31
Joonis 16. Algne immutamise meetod aheraine ja tsemendi puhul, lohud katmata.....	33
Joonis 17. Immutamine üleküllastumisega lubja puhul	33
Joonis 18. Referentskivi visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Lubja kogused alates vasakult: 0,7%; 1,2%; 2,1%	34
Joonis 19. Vesiklaasi lahusega(0,2 %) kaetud aheraine kohe peale segamist.....	37
Joonis 20. Aheraine visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Epoksüvaigu kogused alates vasakult: 1,2%; 1,4%; 1,6%	38
Joonis 21. Referentskillustiku käsitsi katmine epoksüvaiguga	39

Joonis 22. Epoksüvaiguga kaetud aheraine, peale kuivamist lahti murtud	40
Joonis 23. Güraatortihendiga töödeldud epoksüvaiguga kaetud aheraine	42
Joonis 24. Aheraine peale külmakindluse katset 1%-ses NaCl lahuses. Vasakul pool pildil on purunenud materjal enne 8 mm sõelast läbi pesemist, paremal peale pesu	44
Joonis 25. Aheraine üleni kaetud epoksüvaiguga peale külmutuskatset soolalahuses. Paremal pool pilti on alla 8 mm tükisuurusegamaterjal	45
Joonis 26. Immutamise mõju referentskillustiku veeimavusele [5]	46
Joonis 27. Immutamise mõju aherainekillustiku veeimavusele [5]	47
Joonis 28. Immutamise mõju peale güreerimist [5]	48
Joonis 29. Külmakindlus destilleeritud vees [5]	48
Joonis 30. Külmakindlus soolalahuses (1% NaCl) [5]	49

ABSTRACT

Increase in value of aggregate and waste rock aggregate

Henri Prank

Over many decades of oil shale mining in Estonia millions of tons of waste rock has been stored. Every year the amount of waste rock has the potential to grow. Waste rock is being used to produce low-quality aggregate.

The aim of the present study was to examine the hypothesis that some type of impregnation of waste rock aggregate can improve the material's resistance to freeze-thaw cycles. Simultaneously same experiments were carried out on a typical limestone aggregate.

The results of the tests did not show any significant improvement in the quality of aggregates. Some positive effects were notable whilst using oil shale bitumen, bitumen emulsion and epoxy resin.

Extra tests with epoxy resin gave good results in lowering water absorption and Los Angeles coefficient. It also improved the resistance to freeze-thaw cycles. That goes to show that the right use of the right material can improve the quality of oli shale waste rock.

SISSEJUHATUS

Eestis leiduvate maavarade kättesaadavuse ja leviku tingimused on määratud Eesti maavarageoloogiaga. Valdavalt on Eestis maavarade näol tegemist settekivimitega, mis on tekkinud kunagise mere põhjasetetena. Settekivimitest käsitletakse lubja- ja dolokivi ning põlevkivi tootmisel kõrvalproduktina üle jäävat aherainet.

Eesti põlevkivitööstusest jääb energiatööstuse kõrvalproduktina igal aastal üle miljoneid tonne aherainet, millest väiksem osa suudetakse turustada killustikuna. Kirde-Eestisse erinevatesse kuhilatesse on aastakümnete jooksul kogunenud suurtes kogustes aherainet, mille kvaliteet võib olla kohati vägagi kõikuv. Aherainekillustikku kasutusalasid piiravad selle kvalitatiivsed näitajad, eelkõige Los Angelese koefitsient ja külmakindluse näitaja. Samuti piirab aherainekillustiku kasutamist selle tekkepiirkond läbi transpordi kalliduse.

Aherainest toodetud killustiku kasutamist suurendavad selle suhteliselt väike hind, jäätmete ladustamise maksustamine ja Eesti riigi kohati kaevandamisvaenulik keskkonnapoliitika. Energiatööstuse kõrvalprodukti edukas kasutamine on kasulik nii töösturile kui ka Eesti riigile. Hetkel näivad aheraine kasutamist piiravad tingimused ületavat kasutamist soodustavaid aspekte.

Siinses lõputöös käsitletakse hüpoteesi aheraine kvaliteedi võimalikku parandamise kohta läbi veeimavuse võimaliku vähendamise. Hüpotees püstitati 2010 aastal AS Teede Tehnokeskuse poolt teostatud ülevaateuuringus „Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses“.

Esialgset tulemusel on saavutatud viie aherainekillustiku ja viie karbonaatse mitteaheraine killustiku kvaliteedinäitajate katsetamisel. Edasised katsed on tehtud paralleelselt ühe kindla aherainekillustikuga ja ka ühe kindla lubjakivikillustikuga. Lubjakivi pärineb aherainekillustike tootmise lähipiirkonnas asuvast lubjakivikarjäärast. Veeimavuse vähendamiseks immutati ja kaeti killustikke erinevate sideainete ja immutusvahenditega. Katsetati teetsementi, kustutatud lupja, naatriumvesiklaasi, bituumenemulsiooni, põlevkivibituumenit, epoksüvaiku ja põlevkivituhka. Peale killustiku katmist erinevate ainetega korraldati katsed, mis tõid esile killustiku kvaliteedinäitajad. Kasutatavad sideained ja immutusvahendid valiti välja AS Teede Tehnokeskuse ja TTÜ Virumaa Kolledži Põlevkivi Kompetentsikeskuse koostöös.

Töö on teostatud AS Teede Tehnokeskuse poolt läbi viidud teadus- ja arendustöö „Aheraine killustiku omaduste kaardistamine Eestis ning nõrga kivi vääristamise teadusuuringud“ raames. Immutuskatsete väljatöötamise, teostamise ning katsete kirjelduste ja tulemuste kajastamise maht oli 240 tundi, millest 95% on teostatud käesoleva magistritöö autori poolt. Immutuskatsed ja tulemused on autori poolt kajastatud ka teadus- ja arendustöö aruandes.

Töö on aktuaalne, sest käsitleb kaevandamisjätmeid ja on seotud teemaga AR12007 - Põlevkivi kadudeta ja keskkonnasäästlik kaevandamine. Magistritöö juhendajaks oli Jüri-Rivaldo Pastarus TTÜ Mäeinstituudist.

1. KASUTATUD MÕISTED

Fraktsioon – teatud tunnustega killustikust väljaeraldatav osa. Antud töös on tunnuseks suuruslik mõõde.

Aheraine – kivim, mis kaasneb koos kasuliku maavaraga ja tuleb eraldada, et saada kätte kasulik osa. [1]

Sideaine – käsitletakse pulbrilist materjali, mis kaastoimel veega moodustab voolitava ja kergesti töödeldava massi. Teatud ajaperioodi möödudes muutub mass järkjärgult jäigemaks ja kaotab oma plastsuse ning tekib kivisarnane struktuur. [2]

Sideained jaotuvad üldiselt mineraalseteks ja orgaanilisteks. Mineraalsete sideainete all mõeldakse pulbreid nagu kips, lubi ja tsement. Orgaanilisteks sideaineteks loetakse plastmasse, vaike, polümeere ja liime. Ehituses on kasutusel peamiselt mineraalsed sideained. [3]

Aherainekillustik – põlevkivi aherainest toodetud killustik

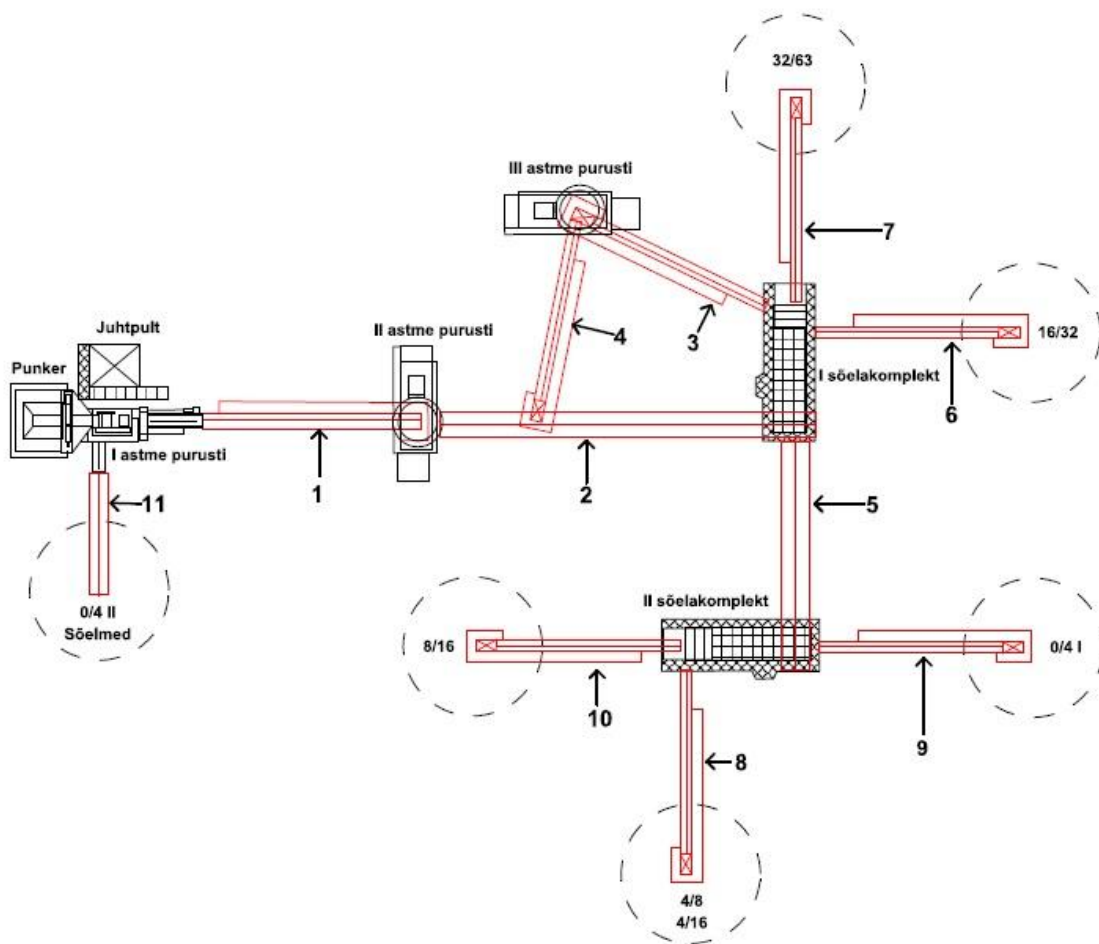
2. KILLUSTIKU TOOTMINE JA TOORE

Eestis kaevandatud maavaradest toodetakse ehituses kasutatavat killustikku looduslikust kruusast (ka graniitse koostisega veeristest ja rahnudes, mis on kogutud põldudelt ja mujalt), lubjakivist, dolokivist ja põlevkivi aherainest. Iga erineva maavaraga kaasnevad töötlemisel kõrvalproduktid ja jäägid/jäätmed. Põlevkivi aherainet peetakse üldiselt suhteliselt väikese väärtusega kõrvalproduktiks põlevkivi tootmise kõrval.

Eestis toodetavad lubjakivikillustikud on tihtipeale toodetu sarnaselt. Enamasti kobestatakse kaljune kivim puur- ja lõhektöödega, millele järgneb kahe või kolmeastmeline purustite süsteem. Vibreerivate sõeltega sõelutakse välja vajalikud fraktsioonid ja turustatakse. Aherainekillustiku toodetakse enamasti põlevkivi aheraine fraktsioonidest 25/100 mm ja 100/300 mm. [4]

2.1 Killustiku tootmine Aru-Lõuna lubjakivikarjääris

Looduslikus olekus lubjakivi kobestatakse lõhketöödega. Maksimaalne lõhatud kivi mõõde peaks jääma alla 600 mm, mida arvestatakse ka lõhkevõrgu koostamisel. Juhul kui tekib ülegabariidilisi tükke, töödeldakse neid ekskavaatori ette paigaldatud hürdovasaraga. Alla 600 mm tükid laaditakse kalluritele ja viiakse purustussõlme (Joonis 1). Jälgitakse purustite ühtlast koormamist, et tagada hea kvaliteediga killustik. Purustussõlm koosneb lõugpurustist ja kahest koonuspurustist. Purusti vastuvõtukolu mahutab korraga kaks autokoormat lõhatud lubjakivi. Purustitega läbitöödeldud materjal liigub mööda lintkonveiereid kahe erineva vibreeriva sõeltekomplekti juurde, kus toimub lõpp-produkti sõelumine. [5]



Joonis 1. Purustuskeem Lõuna-Aru karjääris [5]

2.2 Killustiku tootmine Suurkõrtsi karjääris

Mäemassiivi kobestamine toimub lõhketööde abil. Lõhkevõrk puuritakse, et tagada tükisuurus alla 1000 mm. Kasutatakse kaheastmelist purustussõlme, mille esimeseks astmeks on lõugpurusti. Lõugpurusti läbinud materjalist sõelutakse välja fraktsioon 0/20 mm või 0/32 mm. Ülejäänud puhtam ja suurem killustik viiakse purusti teise astmesse. Teine aste on rootorpurusti, mis koos sõelumisega toodab valmistoodangut fraktsioonidega 0/4 mm, 4/16 mm, 16/32 mm ja 32/64 mm. [6]

2.3 Põlevkivi

Eestis leiduv põlevkivi on üks tähtsamaid mineraalseid varasid Eesti jaoks. Tööstuslikult kasutatav kihind asub Eesti põlevkivimaardlas ja jääb paksuselt 1,4 ja 3,0 meetri vahele. Põlevkivi tekke alguseks loetakse umbes 460 miljoni aasta tagust aega, kui Ordoviitsiumi ajastul ladestus madal mere põhja suur hulk vetikate jäänuseid. Aja möödudes lademed tihenesid ja tekkis põlevkivi. Põlevkivi koosneb mitteorgaanilisest ja orgaanilisest osast. Mitteorgaaniline osa koosneb karbonaatsest osast ja liiva-savi osakestest ehk terrigeensest osast. [7]

Eestis leiduv põlevkivi eristub teistest maailmas leiduvatest läbi sellele omistatud nime „kukersiit“. Nimi tuleneb saksakeelsest sõnast „Kuckers“, mis oli Kukruse mõisa algne nimi. Põlevkomponentideks on kukersiidis süsinik ja vesinik. Üldiselt koosneb põlevkivi orgaanilisest ehk põlevast osast ja mitteorgaanilisest osast. Tähtsatud on, et mida suurem on vesiniku ja süsiniku aatomsuhe, seda rohkem sisaldub põlevkivis õli. Põlevkivide mineraalosa koosneb terrigeensest materjalist (savi, kvarts, päevakivi) ja/või karbonaatidest (kaltsiit, dolomiit). 1000 tonnist põlevkivist moodustab põlev osa ligikaudu 35%, tuhka tekib ligi 55% ja vett on ligi 10%. [8]

2.3.1 Põlevkivi aheraine

Põlevkivi kaevandamisega kaasneb Eestis aheraine teke. Aheraine on kasuliku maavaraga kaasnev kivim, mida ei saa lugeda maavara kasulikuks osaks. Selleks, et saavutada vajalik kütteväärtus kaubapõlevkivile, väljatakse põlevkivi selektiivselt või rikastatakse seda rikastusvabrikus.

Eestis on madala kvaliteediga killustiku tootmiseks vajalikku aherainet ligi 200 mln tonni. Sellisest varust piisaks ilma aheraine pideva juurdetekketa aastakümneteks. Olemasolevate aheraineladestute ümbertöötamisel madala kvaliteediga killustikuks tekib uus probleem. Aheraine ümbertöötlemisel jääb üle arvestatavates kogustes peenpõlevkivi, mille kasutusala on alles arengujärgus. [9]

Üheks kvaliteedinäitajaks on Los Angelese katsega saadav koefitsent. Tavaliselt jääb LA koefitsent aherainest toodetava killustiku puhul 30-35% vahele. Selektiivsel, C/D vahekihi väljamisega, väljamisel saadava killustiku puhul võib tulemus olla isegi alla 30-e. Purunemiskindlus sõltub purustamise astmete kogusest (Tabel 1). Eksisteerib seos, et suurema purustamisastmetega killustik on purunemiskindlam ja omab väiksemat LA koefitsenti. Kuid veemavuse näitaja sõltuvus erinevatest purustamisastmetest on väike. [10]

Tabel 1. LA koefitsent, fraktsioon 4/16 mm [10]

LA, %	tõenäosus	
25-29	0,00	1 purustustsükkel
30-34	0,50	Keskmine: 36,5
25-39	0,33	
40-44	0,17	

LA, %	tõenäosus	
25-29	0,00	2 purustustsükli
30-34	0,67	Keskmine: 33,2
25-39	0,33	
40-44	0,00	

LA, %	tõenäosus	
25-29	0,00	3 purustustsükli
30-34	1,00	Keskmine: 30,5
25-39	0,00	
40-44	0,00	

2.3.2 Tootmine Estonia kaevanduses

Suurejoonelise killustikukompleksi rajamisega Estonia kaevanduse kõrval alustati 2007. aastal. Aastane maksimaalne tootmisvõimsus on 1,2 mln tonni. Toota saab fraktsioone 4/16 mm, 16/32 mm ja 32/64 mm. Toodetav killustik vastab IV kvaliteediklassile. Aheraine eraldumine põlevkivist toimub rikastamise teel. [11]

Ohtlike ainete ülemäärast sisaldust põlevkivikihtis täheldatud ei ole. Samuti on tunduvalt alla lubatud maksimumpiiri radioaktiivsed kiirgused. Põlevkivi rikastamisprotsessis kasutatakse magnetiidipulbri ja veesegu, mis hiljem pestakse aherainelt maha ning lõpptoodangusse see ei satu. Teisi keemilisi ühendeid killustiku tootmise tehnoloogilises protsessis ei kasutata. Aherainekillustiku tootmine iseseisvana algab peale rikastamisprotsessi, kui osa aheraine suunatakse killustiku kompleksi. Killustiku tootmisel kasutatakse kahte fraktsiooni 25/125 mm ja 125/300 mm. Tehnoloogiline skeem lubab kompleksi jaoks toota aherainet selekteeritult kolmelt tehnoloogiliselt liinilt, mis võimaldab paralleelset väljalaadimist nii aheraine punkritesse kui ka killustiku kompleksi. Tänu sellele põhitootmine ei sõltu killustiku tootmisest ja kompleksi täislaadimine aherainega on garanteeritud vabriku töötamise ajal. Erinevad fraktsioonid saadakse sõelumise ja purustamise teel ning transporditakse lattu konveieritega (Joonis 2). Metallesemete eemaldamine rikastusjääkide voolust toimub pidevalt töötava automaat-rauaeemaldiga ja lisaks on paigaldatud metalliotsija, mis fikseerib raudesemete arvu ja juhib elektrimagnetit. [12]



Joonis 2. Estonia kaevanduse aherainekillustiku tootmisel kasutatavad lintkonveierid [12]

3. VEEIMAVUSE VÄHENDAMISE TEOREETILINE ALUS

Täitematerjalide kasutamist piirab tihti peale nende suhteliselt halb külmaskindlus. Põlevkivi tööstusest pärit aheraine puhul on probleemi tekitajaks nõrgemate terade olemasolu, mis tihti sisaldavad põlevkivi. Põlevkivi sisaldavatel teradel on suurem veeimavus ja halvem Los Angelese näitaja. [10]

Mainitud terad on suurema poorsusega, mis tagab vee juurdepääsu ja seeläbi võimalikud suuremad kahjustused teradele vee jäätumisest tingitud paisumise tagajärjel. Vältimaks nõrgemate terade purunemist prooviti leida viisi parandamiseks müügiks mineva killustiku kvaliteedinäitajaid. Püstitati hüpotees, et teatud tüüpi immutamine vähendab killustiku veeimavust ja seeläbi tõstab külmakindlust.

Tähtsaimad omadused, mis mõjutavad killustiku veeomadust on lahtiste pooride suurus ja nende paigutus kivi struktuuris, keemiline ja mineraalne koostis, pinna karedus ja vettimisomadused. [13] Käesolevas töös vaadeldakse mainitud omaduste koosmõjust tulenevat veeimavust.

Antud lõputöös käsitletavat meetodit vähendamaks killustiku veeimavust, ei ole eelnevalt uuritud ega katsetatud (andmed ei ole kättesaadavad).

Kasutatavad sideained ja muud immutusvahendid valiti välja AS Teede Tehnokeskuse ja TTÜ Virumaa Kolledži Põlevkivi Kompetentsikeskuse koostöös. Edasises töös käsitlet sõnu aheraine ja aherainekillustik ühetähenduslikena.

3.1 Kasutatud sideained ja muud immutusvahendid

Katsetati teetsementi (edaspidi tsement), kustutatud lupja (edaspidi lubi), naatriumvesiklaasi (edaspidi vesiklaas), bituumenemulsiooni (edaspidi emulsioon), põlevkivibituumenit, epoksüvaiku ja põlevkivituhka. Kasutatud vahendite pealekandmine on kirjeldatud peatükis „Metoodika“. Esialgsest hinnati potentsiaalsemateks vahenditeks vesiklaasi, emulsiooni, põlevkivibituumenit ja epoksüvaiku. Juhul kui immutusvahend tuli segada kokku veega, kasutati selleks destilleeritud vett.

3.1.1 Tsement

Tsement on sideaine, mis seob tahke materjali osakesed üheks ühtseks tervikuks. Hüdrateerumine on keemiline reaktsioon, mis toimub tsemendi aktiivsete komponentide (C_3S , C_2S , C_3A ja C_3AF) ja vee vahel. Reaktsioon aitab kaasa hilisemale kivistumisele. [5]

Tsemendi kasutamisega loodeti katta ja täita ära suuremad praod killustiku terades, mille kaudu vesi saab teradesse imenduda. Sooviti tekitada killustiku terade peale väiksema veeimavusega pind.

3.1.2 Kustutatud lubi

Lupja peetakse üheks vanemaks sideaineks. Kustutamata lubi (CaO) saadakse lubjakivide kuumtöötlemisel 1000 – 1200 °C. Kustutatud ehk hüdraatlubi saadakse kustutamata lubjale vee lisamisel kontrollitud tingimustel. Kasutatud lubjakivi koostisest olenevad lubja omadused ja kvaliteet. [5]

Lubja kasutamisel loodeti lubja võimele moodustada vee toimel siduvat kristallstruktuuri, mis täidaks ära killustiku terades esinevad praod. Pragude täitmine võiks vähendada veeimavust.

3.1.3 Naatriumvesiklaas

Vesiklaaside koostises on naatriumsilikaadid üldvalemiga $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$. Vesiklaasi on vees lahustuvad ehituses ja erinevates tööstustes laialt kasutusel olev aine. Esineb enamasti vesilahusena erinevates kontsentratsioonides. Naatriumvesiklaas on keemiliselt võimeline reageerima vaba kaltsiumhüdroksiidiga ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Läbi reaktsiooni moodustub püsiv kattekihi. Põlevkivitööstusest tulenevas aheraines vaba kaltsiumhüdroksiidi ei leidu, seega keemilisi sidemeid tõenäoliselt ei teki. Seega oodati vesiklaasi lahusega töötlemisel ainult pinna katmist ja pooride täitumist. Sellega kaasnev võimalik hüdrofobiseeruv efekt võib vähendada veeimavust ja seeläbi suurendada killustiku külmakindlust ja kvaliteeti. [5]

3.1.4 Bituumenemulsioon

Naftabituumenid on naftatöötlemisprotsesside produktid, mis koosnevad põhiliselt pikaahelalistest ja aromaatsetest süsivesinikest. Bituumenemulsioone (bituumen 5%, emulgaator 0.01 kuni 5%, ülejäänud vesi) kasutatakse pindade ja täitematerjalide katmiseks nende veekindlaks tegemiseks ja kaetavate pindade (osakeste) hüdrofoobseks muutmiseks. Keemilisi reaktsioone põlevkiviga, lubjakiviga ega dolokiviga ei oodatud. Seega peaks loodetav veekindluse tõus tulenema vett tõrjuva kihi moodustumisest terade pinnal. [5]

3.1.5 Põlevkivibituumen

Põlevkivibituumenid on põlevkiviõli raskete fraktsioonide oksüdeerimise produkt analoogiliselt oksüdeeritud naftabituumenitele. Sideainena kasutatakse

põlevkivibituumeneid nii pindamisel kui ka asfaldisegude valmistamisel. Nagu ka naftabituumenite korral, ei ole oodata keemilisi reaktsioone põlevkiviga, lubjakiviga ega dolokiviga. Tema toime põhineb vett tõrjuva kihi moodustumisel killustiku osakeste pinnale. [5]

3.1.6 Epoksüvaik

Kasutati kahekomponentset täiteaineteta epoksüvaiku, mis peaks killustiku tera pinnale moodustama polümeerse kaitsekihi. Kaitsekiht peaks tõrjuma soolasi, vett, aluseid ja happeid. Kasutatud epoksüvaik on madala viskoossusega ja suure kapillaarse aktiivsusega. Tänu sellele peaks väikesed avad ja kapillaarid täituma isegi madalatel temperatuuridel. See on üldiselt kasutatav krundina lahustivabadele põrandasüsteemidele, kuid ka tihendusmaterjal tsemendi baasil pindadele, näiteks töökodadesse, tööstushoonetesse, mitmekorruselistesse parkimismajadesse. [14]

3.1.7 Põlevkivituhk

Põlevkivituhka tekib energiatootmises ja tahkesoojuskandjaga õli tootmisel suurtes kogustes. Sellest on tingitud suur huvi nii selle uurimise, kui võimaliku kasutamise vastu. Põlevkivituha omadused sõltuvad suuresti selle tekkimise tehnoloogiast, erinevast toorainest ja ladustamise tingimustest. Põlevkivituhast loodetav veeimavust vähendav efekt on sama kui tsemendi ja lubja puhul. [5]

Aasta jooksul tekib Narva elektrijaama keevkihtkateldes ligi üks miljon tonni tuhka. Kahjuks jääb aastatega hästi tsementeeruvaid tuhkasid aina vähemaks tänu vastaval tolmupõletustehnoloogial põhinevate tehaste sulgemisele. See tähendab suuremaid koguseid keevkihtkatlast pärit elektrifiltri tuhka, mis on tsementeerumise poolest halbade omadustega. [15]

4. METOODIKA

Katsetulemuste baasi ülesehitamiseks valiti kokku 10 killustikku Kirde-Eestist ja Kesk-Eestist: viis aherainekillustikku ja viis karbonaatkillustikku (edaspidi referentskillustik). Referentskillustikud olid pärit Röstla paekarjäärast, Sopimetsa II lubjakivikarjäärast, Otisaare lubjakivikarjäärast, Aru-Lõuna lubjakivikarjäärast ja Suurkõrtsi lubjakivikarjäärast. Aherainekillustikud olid pärit Estonia kaevandusest, Ojamaa kaevandusest, Somp

kaevandusest, Ahtme kaevandusest ja Põhja-Kiviõli karjäärist. Kõik valitud killustikud olid tootja poolt märgitud ära fraktsioonina 16/32 mm.

Kõikidele killustikele tehtud katsed:

- terastikuline koostis – katsemeetod EVS-EN 933-1;
- peenosiste sisaldus – katsemeetod EVS-EN 933-1;
- purunemiskindlus Los Angelese katsel – katsemeetod EVS-EN 1097-2;
- terakuju – katsemeetod EVS-EN 933-3;
- külmakindlus – katsemeetod EVS-EN 1367-1;
- terade tihedus – katsemeetod EVS-EN 1097-6;
- veeimavus – katsemeetod EVS-EN 1097-6;
- eriaktiivsused (vt. EVS 901-1).
- petrograafiline kirjeldus
- külmakindlus soolalahuses, 1% NaCl
- orgaanilise aine sisaldus; [5]

Katsed viidi läbi vastavuses standarditele ja AS Teede Tehnokeskuse poolt väljatöötatud katsetoodikatele. Peale baasandmete loomist 10 killustiku katsetulemuste põhjal, valiti välja üks aherainekillustik ja üks referentskillustik immutuskatseteks. Valiti kõige iseloomulikumad killustikud kahest grupist.

Vajalike immutusvahendite kontsentratsioonid valiti välja visuaalsel vaatlustel põhineval analüüsil, tehes iga immutusvahendiga kolme erineva kontsentratsiooni juures eraldi katse. Võrreldi ühtlast katvust ja immutusvahendi paksust killustiku pinnal. Sooviti saada võimalikult ühtlase paksusega, ligi 100% katvust. Valiti välja iga immutusvahendi kohta kindel kontsentratsiooni suurusjärk. Seejärel kaeti referentskillustik ja aherainekillustik iga immutusvahendiga eraldi. Peale vajalikku kuivamise perioodi või kivistumist korrati veeimavuse ja külmakindluse katset (destilleeritud vees ja 1% NaCl lahuses). Erandina korrati epoksüvaiguga kaetud killustikele purunemiskindluse katset Los Angelese meetodi läbi. Saadud tulemusi võrreldi esialgsete katsetulemustega.

5. ALGSED KATSETULEMUSED

Katsed viidi läbi vastavalt katse standarditele ja AS Teede Tehnokeskuse poolt välja töötatud katsemetoodikatele (põhinesid vastavatel standarditel). Kõiki katseid teostati üks kord ja korduskatseid ei sooritatud.

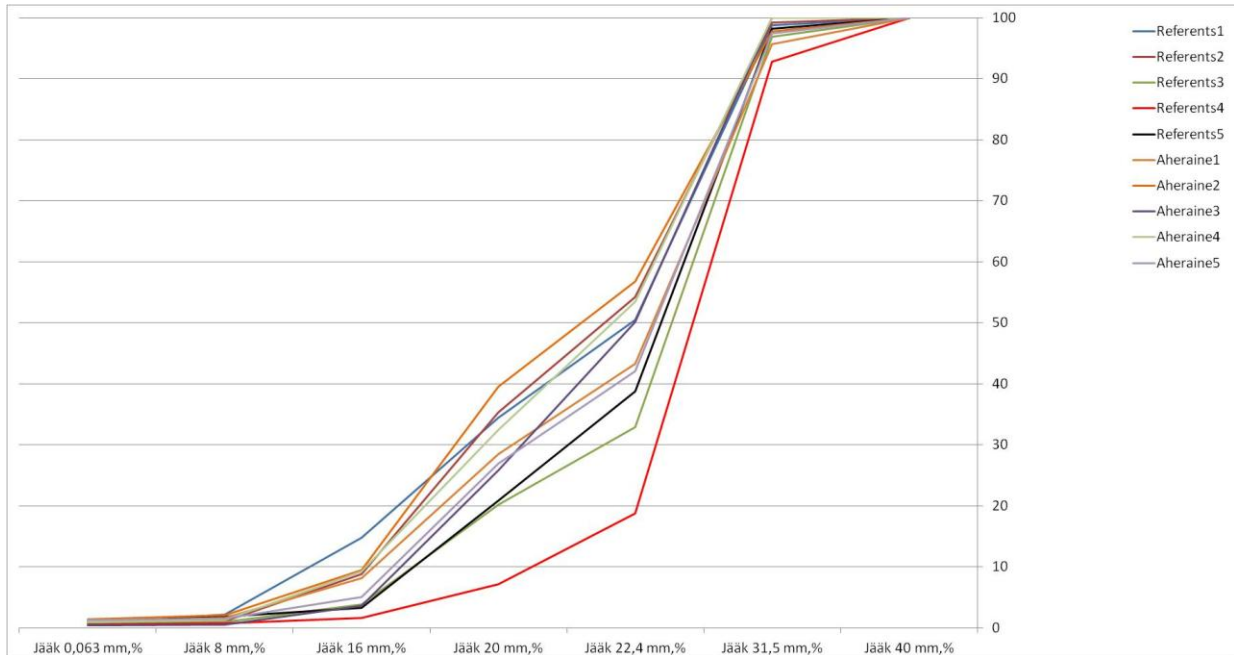
Aherainekillustiku tulemused on järgnevatel graafikutel kajastatud tähistega: „Aheraine1“, „Aheraine2“ jne. Referentskillustikud on graafikutel kajastatud tähistega: „Referents1“, „Referents2“ jne. Kuigi läbi töö kajastatakse mainitud tähistustega (nummerdustega) killustikke alati sama killustikuna, ei ole siinses töös nende algne järjekord määratletud (kindlat killustikku ei ole soovitud kokku viia kindla tootjaga ega tootmiskohaga).

Katsetatud referentskillustike ja aherainekillustike enamikke katsetulemusi tuleb vaadelda ühtselt moodustunud andmebaasidena. Igale erinevale killustikule tehti algandmete kindlaks tegemiseks üks katse ilma korduskatseteta. Korduskatsete mittesooritamine suurendab juhusliku vea esinemise tõenäosust ja seetõttu on soovitatav esialgselt vaadelda killustike katseid kahe viiest killustikust koosneva grupina.

5.1 Täitematerjalide terakoostis ja peenosiste sisalduse määramine

Standard (EVS-EN 933-1:2012) kirjeldab täitematerjalide kahte terakoostise määramise meetodit: pesemise ja sõelumise ning kuivisõelumise. Katse seisneb täitematerjali jaotamises sõeltekomplekti abil mitmeks kindlaks määratud vähenevate mõõtmetega fraktsiooniks. Kasutatavaks meetodiks oli pesemine ja sõelumine. [16]

Katseproov asetati anumasse ja kallati veega üle, seejärel proov segati. Edasi pesti proov läbi 63 µm sõela, selle kohale oli asetatud suurema avaga kaitsesõel. 63 µm ja suurema avadega sõeltele jäänud materjal kuivatati temperatuuril $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ konstantse massini, lasti jahtuda ning kaaluti. Pestud ning kuivatatud materjal kallati sõeltekomplektile. Sõeltekomplekti raputati mehaaniliselt ja hiljem käsitsi. Sõelumine loeti lõppenuks, kui sõelale püsima jäänud materjali kogus üheminutilise sõelumisega ei muutunud rohkem kui 1,0%. [16] Saadud tulemused on esitatud ühtse graafikuna (Joonis 3).



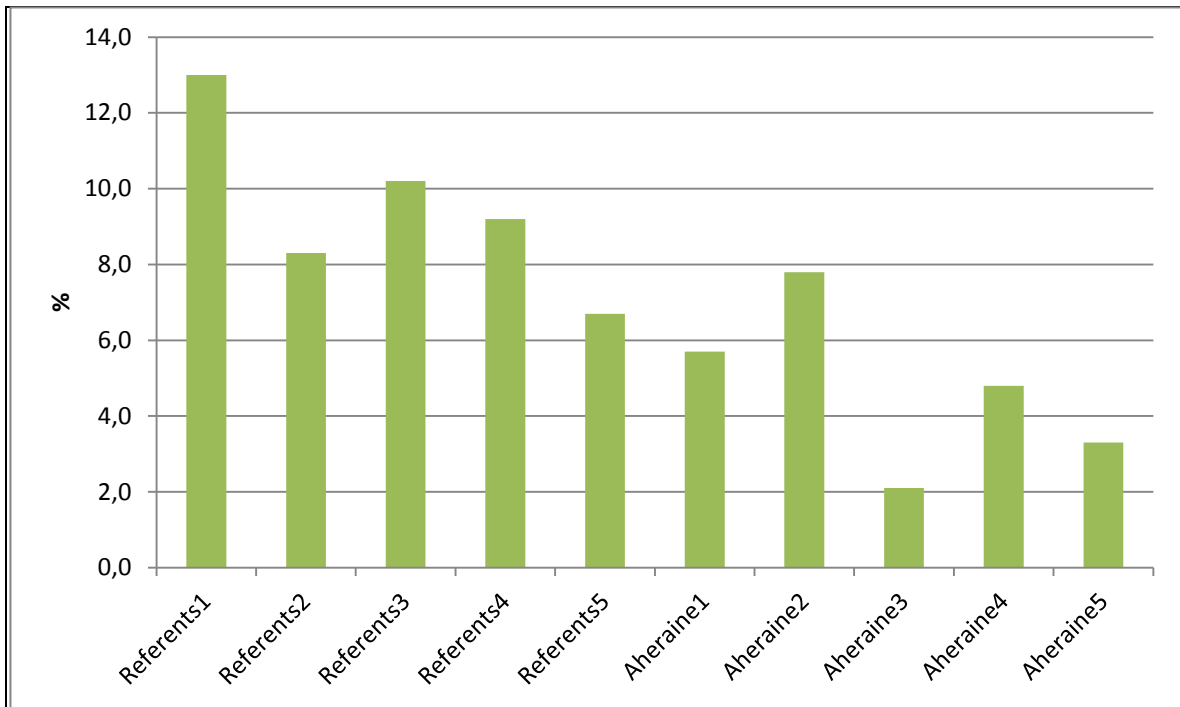
Joonis 3. Katsetatud killustike terakoostis [5]

Kõigi katsetatud killustike lõimisetegur c_u jääb alla kolme. Materjale saab pidada ühtlase terasuurusega materjalideks. Sorteeritust näitav lõimisetegur tekib näitajate D_{60} ja D_{10} jagatisena. D_{60} ja D_{10} on suurused (diameeter), millest vastavalt 60% ja 10% osakekestest on väiksemad. Arvestust peetakse masside suhte järgi. [17]

5.2 Täitematerjali tera kuju (plaatsustegur) määramine

Standard (EVS-EN 933-3) rakendub looduslike, tehis- ja töödeldud täitematerjalidele. Katse koosneb kahest eraldiseisvast sõelumisest. Kasutades katsesõelu (nagu EVS-EN 933-1 puhul), jaotatakse proov esmalt erinevateks, kindlateks fraktsioonideks. Seejärel sõelutakse iga fraktsioon uuesti kindla laiustega paralleelsete piludega varbsõelitel. Proovi plaatsustegur arvutatakse kõigi varbsõelu läbinud terade summaarse massina protsentuaalse suhtena katsetatud materjalikogusesse üldisest kuivast massist. Varbsõeltega sõelumine toimub käsitsi ja peab tagama täieliku plaatsete osakeste eraldumise.[18]

Saadud tulemused on esitatud ühtse graafikuna (Joonis 4).



Joonis 4. Killustike plaatsustegur fr 12,5/40 mm [5]

Referentskillustikel kõikus plaatsustegur 13,0% ja 6,7% vahel ning keskmine plaatsustegur oli 9,5%. Aherainekillustikel kõikus plaatsustegur 7,8% ja 2,1% vahel ning keskmine oli 4,7%. Aherainekillustiku väiksem plaatsustegur võib olla põhjustatud üldisest killustiku tootmisprotsessist. Tootmisprotsess tõenäoliselt ümardab nõrgemaid osakesi, murdes osakeste äärtest väiksemaid tükke lahti.

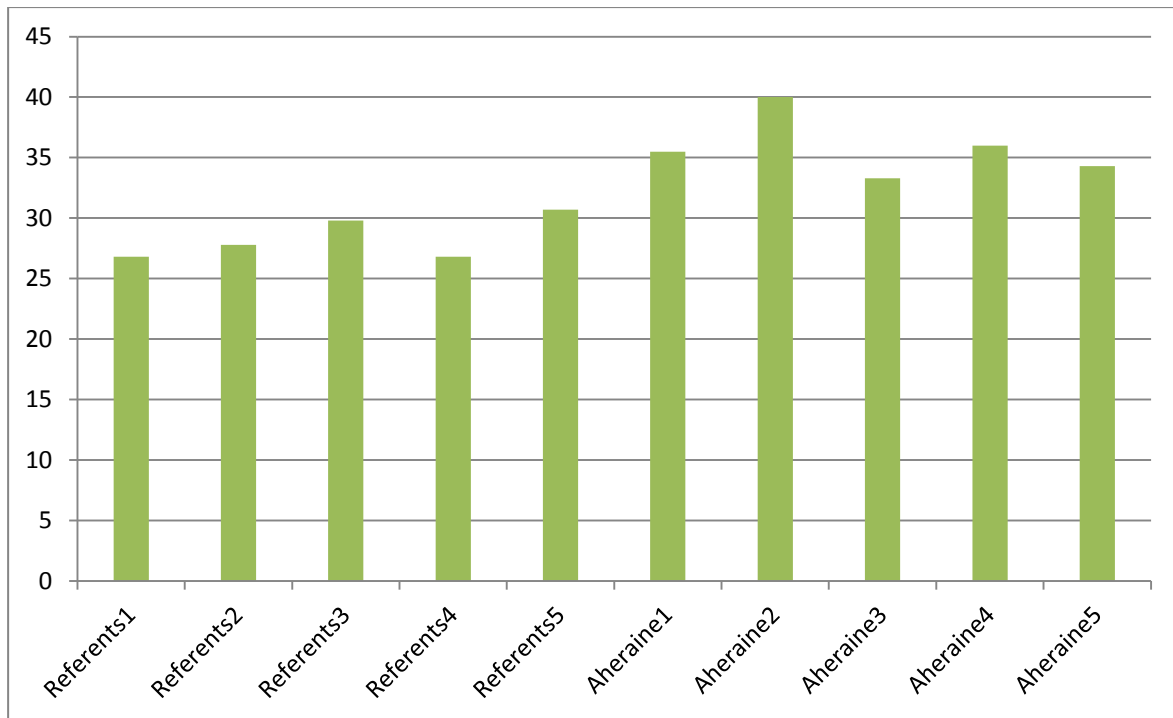
5.3 Täitematerjalide purunemiskindluse määramine

Katse teostati standardi „Täitematerjalide purunemiskindlus (EVS-EN1097-2)“ põhjal. Täitematerjali proovi lastakse pöörelda trumlis koos teraskuulidega. Pärast pöörlemise lõpetamist määratakse materjali jääk 1,6 mm sõelal. Katse tuleb teostada täitematerjaliga, mis läbib 14 mm sõela ja jääb 10 mm sõelale. Lisaks sellele peab katseproovi terastikuline koostis vastama ühele järgmistest nõuetest:

- 12,5 mm sõela läbinud peab olema 60% kuni 70%
- 11,2 mm sõela läbinud 30% kuni 40% [19]

Tolmuvabad ja kuivatatud fraktsioonid segatakse omavahel, moodustades laboratoorse proovi, osakestest suurusega 10 mm kuni 14 mm, mille terastikuline koostis täidab ülaltoodud nõudeid. Katseproovi mass peab olema (5000±5) g. Enne trumli täitmist

kontrollitakse trumli puhtust. Seejärel asetatakse trumliisse esmalt kuulid (katsetatavale fraktsioonile vastav kogus) ja siis katseproov. Trumli täiteava suletakse kaanega ja lastakse konstantsel pöörlemissagedusel 31 p/min kuni 33 p/min teha 500 pööret. Trummel tühjendatakse, puhastatakse, eemaldades kõik peenosised, pöörates erilist tähelepanu tõsteriuli ja trumli ühenduskohtadele. Kuulid võetakse ettevaatlikult anumast välja nii, et täitematerjali osakesed ei läheks kaotsi. Anumast võetud materjal analüüsitakse pesemise ja sõelumisega sõelal 1,6 mm. Jääk 1,6 mm sõelal kuivatatakse temperatuuril (110 ± 5) °C konstantse massini. [19]



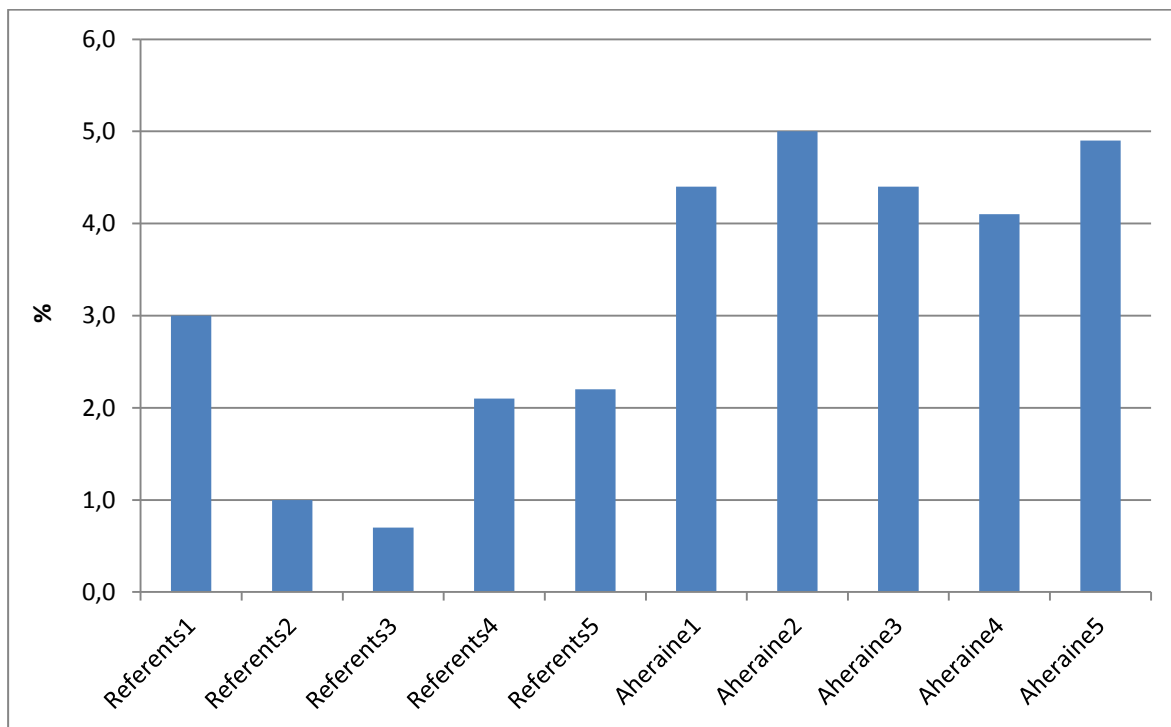
Joonis 5. Los Angelese purunemiskindluse näitaja fr 10/14 mm, kajastatud protsentides [5]

Referentskillustike keskmine Los Angelese (fr 10/14) näitaja oli 28,4% ja aherainekillustikel 35,8% (Joonis 5).

5.4 Täitematerjalide terade tiheduse ja veemavuse määramine

Standardi EVS-EN 1097-6:2013 põhjal tehti kindlaks terade veemavus. Meetodid on kasutatavad tavalisel täitematerjalil. Kasutati traatkorvimeetodit püknomeetrimetodi alternatiivina, kasutatud täitematerjali terad olid suuremad kui 4 mm. Terade tihedus arvutatakse massi ja mahu suhtena. Massi määramiseks kaalutakse katseproov esmalt küllastatud pindkuivas olekus ja seejärel väljakuivatatud olekus. Maht määratakse

väljatõrjutud vee massist lähtudes, traatkorvimeetodi puhul massi vähenemise alusel. Katseproov peab olema enne katsetamist toasoe, kuna teistsugused temperatuurid võivad mõjutada terade veeimavust. Poorse täitematerjali veeimavus ja tihedus sõltuvad katsetatava fraktsiooni terasuurusest. Ettevalmistatud katseproov pannakse traatkorvi ja uputatakse temperatuuril (22 ± 3) °C oleva veega täidetud anumasse nii, et veetase oleks vähemalt 50 mm üle korvi ülemise serva. Kohe pärast uputamist eemaldatakse katseproovist kaasatud õhk. Korv koos täitematerjaliga jäetakse uputatult temperatuuril (22 ± 3) °C olevasse vette $(24\pm 0,5)$ tunniks. Seejärel korvi koos katseprooviga raputatakse ja kaalutakse temperatuuril (22 ± 3) °C olevas vees. Korv koos täitematerjaliga tõstetakse veest välja ja lastakse nõrguda. Täitematerjal kallatakse korvist välja kuivale vett imavale rätikule. Täitematerjali pinda kuivatatakse ning kui rätik on veega küllastunud, tõstetakse täitematerjal teisele kuivale vett imavale rätikule. Täitematerjali terad laotatakse ühekordse kihina rätikule ja jäetakse õhu kätte seisma (terad peavad olema varjatud otsese päikesevalguse eest ning eemal soojallikatest) kuni nähtav veekiht terade pinnalt kaob, kuid täitematerjal näib niiskena. Täitematerjal asetatakse alusele ja kuivatatakse ventileeritavas kuivatuskapis temperatuuril (110 ± 5) °C kuni konstantse massini. Kaalumiste tulemused registreeritakse täpsusega 0,1% katseproovi massist. [20]



Joonis 6. Killustike veeimavus WA24 fr 4/31,5 mm

5.5 Täitematerjalide külmakindluse destilleeritud vees

Standardi EVS-EN 1367-1:2007 alusel määrati killustike külmakindlus destilleeritud vees. Tulemusi saab kasutada killustike ilmakindluse hindamiseks. Katse on sobiv täitematerjalidele terasuurusega 4 mm kuni 63 mm. Standard käsitleb meetodit täitematerjali vastupidavuse hindamiseks külmutamise ja sulatamise tsüklilisele toimele. Valmistatakse ette ühtlase terasuurusega materjal (nt 16/31,5 mm), mis immutatakse plekknõudes destilleeritud veega 24±1 tunni jooksul. Peale immutamist kaanetatakse plekknõud koos vee ja materjaliga ning asetatakse külmikusse. Suletud plekknõud asetatakse külmkappi, jälgides, et plekknõude ääred oleksid vähemalt 50 mm kaugusel külmkapi seintest. Plekknõud ei tohi omavahel kokku puutuda. Läbi selle tagatakse ühtlane soojusvahetus kõikides suundades. Seejärel allutatakse plekknõud koos materjaliga 10 külmutus-sulatustsüklile. Tsükkel algab külmutamisest temperatuuril -17,5 °C ja sellele järgnevast sulatamisest temperatuuril +20 °C. Proovide katsetamine külmikus kümne külmutus- ja sulatustsükli jooksul koosneb järgnevatest osadest:

1. Temperatuur alandatakse temperatuurilt (20±3)°C temperatuurini 0°C (150±30) minuti jooksul ja hoitakse 0°C tasemel (210±30) minutit.
2. Temperatuur alandatakse temperatuurilt 0°C temperatuurini (-17,5±2,5)°C (180±30) minutiga ja hoitakse tasemel (-17,5±2,5)°C vähemalt 240 minutit
3. Temperatuur külmkapis ei tohi langeda alla -22°C
4. Iga külmutustsükli lõppemisel uputatakse plekknõud vette, mille temperatuur on ligikaudu 20°C ja sulatatakse. Sulatamine loetakse lõppenuks, kui temperatuur plekknõus on tõusnud temperatuurini (20±3)°C
5. Pärast iga sulatusfaasi hoitakse plekknõud suletuna vees temperatuuril (20±3)°C kuni 10 tundi. Iga külmutus-sulatustsükli kestus on vähemalt 24 tundi

Peale tsüklite lõppemist uuritakse täitematerjali omaduste muutumist läbi sõelumise. Katsetatud materjal kuivatatakse ja sõelutakse läbi sõela, mis vastab poolele esialgse fraktsiooni väiksemale nimimõõtmele. 16/31,5 mm fraktsiooni katsetamise korral sõelutakse katsetatud materjal läbi 8 mm sõela. Sõela läbinud massi loetakse kaoks, mis kajastataks protsentuaalselt võrreldes esialgse massiga. Massikadu kirjedab materjali võimet esitada vastupanu külmutamise ja sulatamise tsüklilisele toimele (suurem massikao protsent viitab nõrgemale materjalile). [21]

5.6 Täitematerjalide külmakindluse 1% NaCl lahuses

Standardi EVS-EN 1367-6:2008 alusel määrati killustike külmakindlus 1% NaCl lahuses. Külmakindluse määramine 1%-lises NaCl lahuses toimub sarnaselt võrreldes külmakindluse määramisega destilleeritud vees (5.5), kuid destilleeritud vesi asendatakse 1%-se NaCl lahusega. [22]

6. KILLUSTIKU IMMUTAMINE JA KATSETEKS

ETTEVALMISTAMINE

Immutuskatseteks valiti välja eelpool joonistel tähistatud killustikud: Referents⁴ ja Aheraine⁵. Väljavahitud referentskillustiku veeimavus oli 2,1% ja aherainekillustikul 4,9%. Külmakindluse näitajad (fr 16/31,5 mm) olid destilleeritud vee puhul aherainel 6,8% ja referentskillustikul 0,8% ning 1% NaCl puhul vastavalt 72,6% ja 80,1%.

Eelduslikult peaks immutamine sulgema killustiku poorid ning seega takistama vee tungimist materjali ehk vähendama veeimavust. Juhul kui vesi ei pääse pooridesse, ei teki killustikus veega küllastumist ning seega peaks parenema ka külmakindluse näitajad nii puhtas vees kui soolalahuses (1% NaCl).

Edasiseks veeimavuse määramiseks ja guraatortihendamiseks vajaminev materjal fraktsioneeriti pestud originaalmaterjalist ja oli tükisuurusega üle 4 mm. Külmakindluse määramiseks vajaminev materjal oli samuti pestud originaalmaterjal, kuid fraktsioneeriti kui 16/31,5 mm.

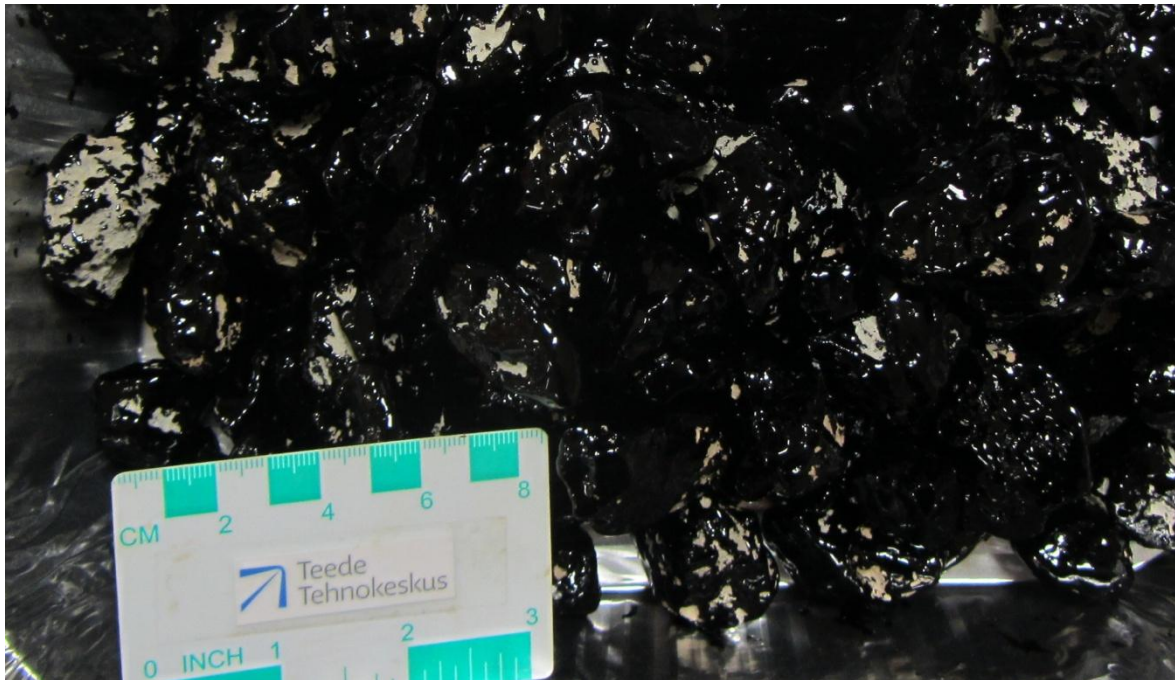
Immutuskatsed teostati järgmiste ainetega:

- bituumenemulsioon C60 B4;
- vedel põlevkivibituumen PB-2;
- teetsement, Hydraulic road binder HRB 32,5E EVS 766:2000;
- ehituslubi e. kustutatud lubi, kaltsiumhüdroksiid $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- põlevkivituhk EE keevkihtkatla elektrifiltri I välja tuhk;
- epoksüvaik, kahekomponentne;
- vesiklaas, naatriumsilikaat ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$). [5]

Killustike immutamine ja katseteks ettevalmistamine on autori poolt kajastatud ka teadus- ja arendustöös „Aheraine killustiku omaduste kaardistamine Eestis ning nõrga kivi väärindamise teadusuuringud“ lisas nr 10. Pildid on pärit autori erakogust.

6.1 Immutamine bituumenemulsiooniga

Bituumenemulsiooni puhul tuleb arvestada, et ära on märgitud emulsiooni, mitte puhta sideaine (bituumeni) osakaal. Esmajärjekorras prooviti emulsiooni lisamist külmale (toasoe) kivile. Emulsioon muutus väga kiiresti kleepuvaks ja ei läinud kivi peal laiali (Joonis 7). Emulsioon ise oli samuti toasoe, vältimaks selle keemilist lagunemist.



Joonis 7. Emulsioon külma aheraine peal (3,3% emulsiooni)

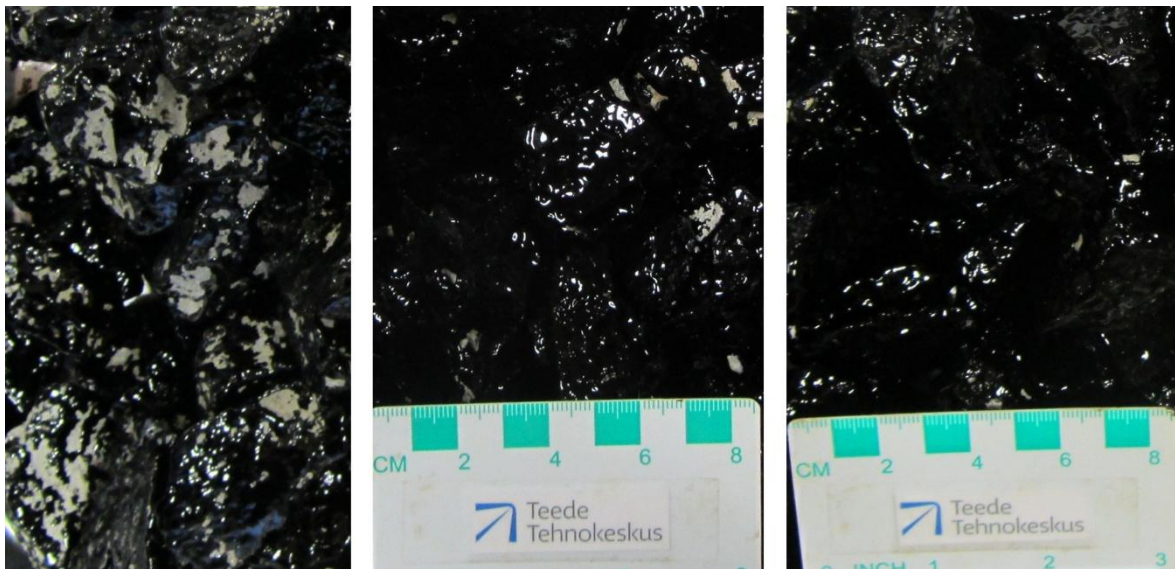
Kiht jäi tuntavalt paks ja kattuvus oli halb. Seepärast otsustati järgmisteks segamisteks killustik soojendada 70–80 °C-ni. Seejärel segati kokku, kolme erineva emulsiooni kontsentratsiooni juures, visuaalseks hindamiseks proovid, iga kontsentratsiooniga üks proov ca 3 kg proov. Kolme proovi põhjal valiti välja sobilik kontsentratsioon ja sellest tuletati sobiv kontsentratsiooni vahemik. Valitud vahemik sai edaspidise segamise aluseks. Plaatjamaid kive oli raskem katta kui ümaramaid, seega aheraine katmine oli kiirem.

Visuaalse hinnangu jaoks tehtud proovid segati käsitsi kokku katsepanni peal kasutades krohvikellut (Joonis 8).



Joonis 8. Segamismeetod emulsiooni ja põlevkivibituumeni puhul. Pildil segamine põlevkivibituumeniga

Referentskillustiku puhul segatud kontsentratsioonid olid 1,8% kuni 3,7% (Joonis 9).

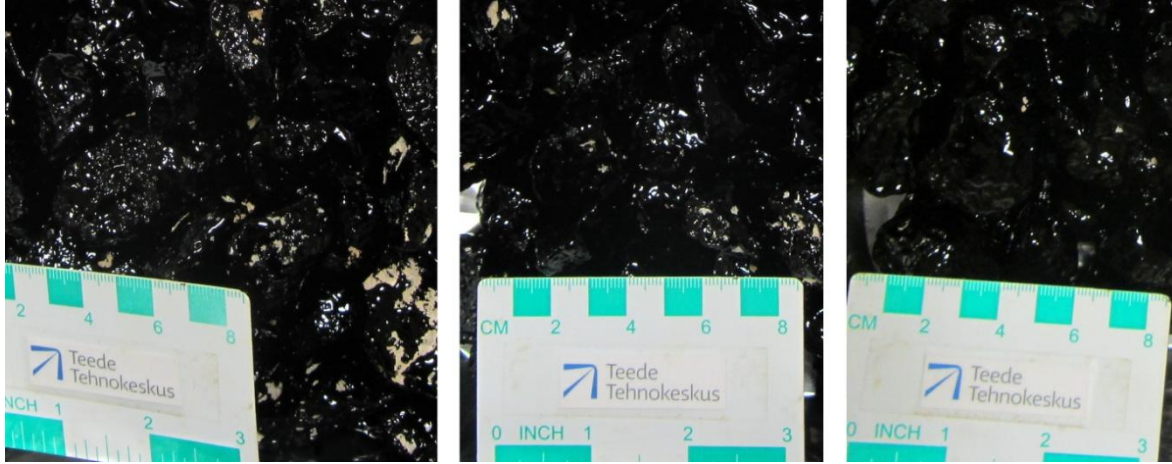


Joonis 9. Referentskivi visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Emulsiooni kogused alates vasakult: 1,8%; 3,4%; 3,7%

1,8% juures olid osakesed halvasti kaetud. Plaatjad kivid jäid suhteliselt katmata. Segama pidi kiiresti, sest emulsioon aurustus sooja kivi peal kiiresti. 3,4% juures jäid samuti kohati

katmata laigud, mis tundusid olema killusiku pinna süvenditest põhjustatud. 3,7% puhul oli kohati kiht killustiku pinnal väga paks.

Aherainekillustiku puhul segatud kontsentratsioonid olid 2,9% kuni 4,2%.



Joonis 10. Aheraine visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Emulsiooni kogused alates vasakult: 2,9%; 3,6%; 4,2%

2,9% emulsiooni kontsentratsiooni juures oli aherainekillustiku pinnal näha kohati katmata kohti. 3,6% juures oli katvus parem kui 2,9% juures, näha oli üksikuid katmata kohti. Kõige suurema kontsentratsiooniga kivid (4,2%) olid kaetud vägagi paksu kihiga.

Hinnates kolme proovi mõlema killustiku puhul sai selgeks, et referentskillustiku puhul peaks emulsiooni kogus jääma 3–3,5% juurde ja aherainekillustiku puhul 3,5–4,5% juurde. Käsitsi segamine tundus väga ebaefektiivne, sest emulsiooni kihti oli kivide peal paks, aga katmata kohti jäi siiski kõikidele proovidele. Katsetusteks minevad kogused otsustati segada seguritega.

6.1.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veemavuse katseteks emulsiooniga

Veeimavuseks ja güratortihendamiseks vajaminevate killustiku koguste segamine toimus seguriga Tecnotest (Joonis 11). Segamisel kasutati segamismõu soojendust ja eelnevalt välja selgitatud kontsentratsiooni vahemikku. Kasutati sooja (70–80 °C) killustikku. Segamismõusse valati 8 kg killustikku ja peale vajalik kogus emulsiooni ning segati masinaga. Segamine kestis 2–3 minutit, et kivi kattuks korralikult ja masin ei hakkaks kive lõhkuma. Kivide kattumine emulsiooniga oli nähtavalt ühtlasem kui käsitsi segades. Peale

segamist tõsteti kaetud killustik pannidele ja lasti laboris toatemperatuuril seista vähemalt 3 ööpäeva. Peale vähemalt kolme ööpäevast seismist tehti veeimavuse katse ja tihendati materjal güraatortihendiga ning viidi tihendatud materjaliga läbi veeimavuse katse.



Joonis 11. Bituumenemulsiooni lisamine sugurisse Tecnotest [5]

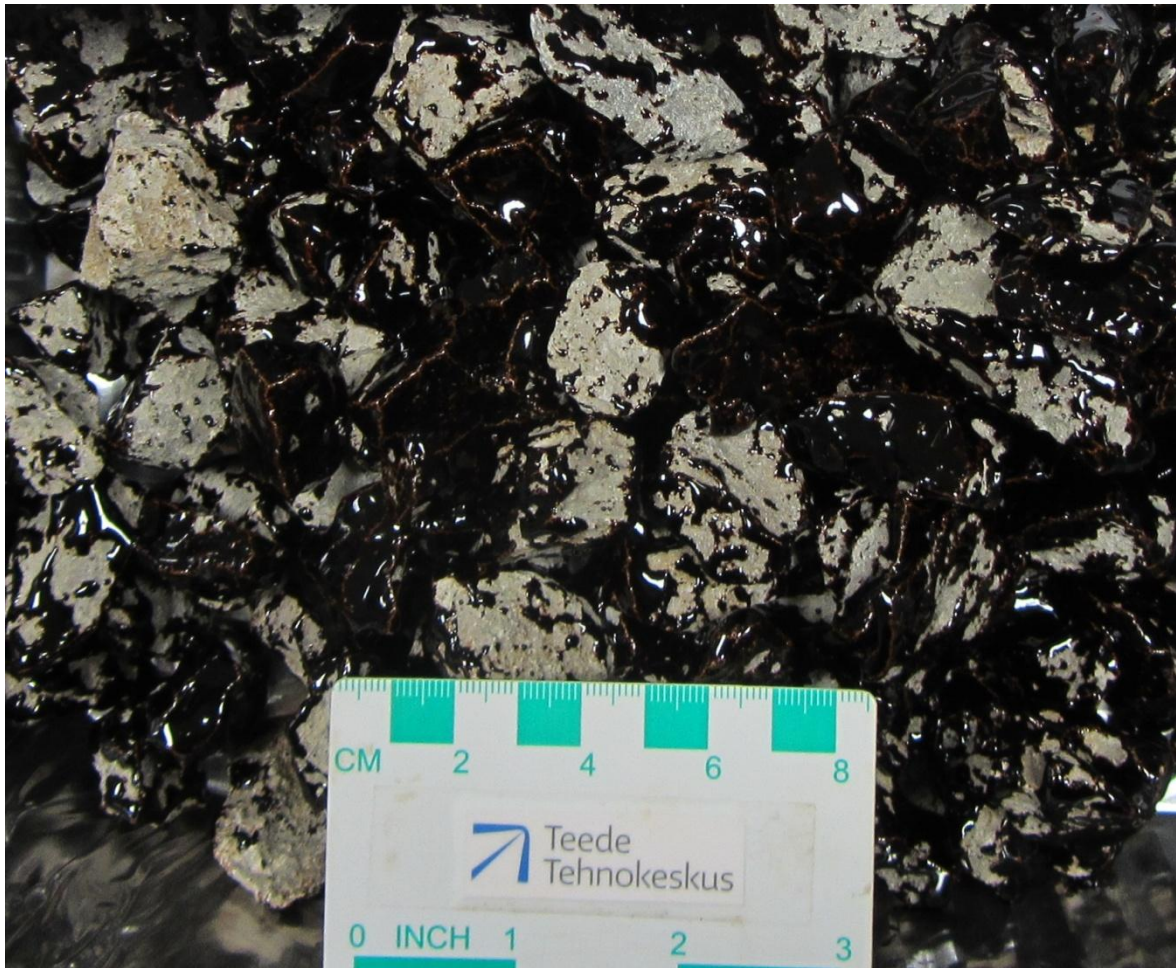
Valitud kontsentratsiooniga segamine toimus asfaldiseguris SRC (Joonis 12). Kasutati seguri soojendust ja eelnevalt soojendatud (70–80 °C) kivi. Korruga segati 25 kg killustikku. Peale segamist lasti killustikel seista toatemperatuuril vähemalt 3 ööpäeva.



Joonis 12. Põlevkivibituumeni lisamine referentskivile seguris SRC. Emulsiooniga toimus lisamine ja segamine analoogselt.[5]

6.2 Immutamine põlevkivibituumeniga

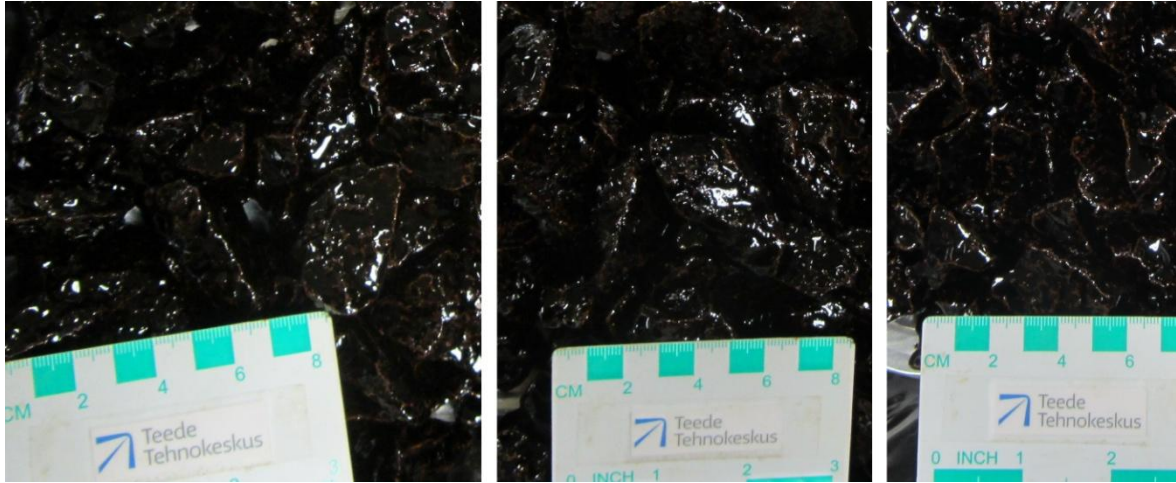
Kõikide segamiste jaoks kuumutati põlevkivibituumen 130 °C-ni, et vähendada immutusvahendi viskoossust. Esimeseks prooviti bituumeni lisamist külmale (toasoe) killustikule. Bituumen muutus väga kiiresti kleepuvaks (15 sekundit) ega läinud killustiku pinnal laiali (Joonis 13).



Joonis 13. Põlevkivibituumen külma referentskivi pinnal

Seepärast otsustati järgmisteks proovimisteks kivi soojendada 70–80 °C-ni. Seejärel segati kokku, kolme erineva põlevkivibituumeni kontsentratsiooni juures, katseproovid. Iga kontsentratsiooniga segati üksik proov ca 3 kg. Tulemusi hinnati visuaalselt. Kolme proovi põhjal valiti välja sobilik kontsentratsiooni vahemik. Valitud vahemik sai edaspidise segamise aluseks.

Visuaalse hinnangu jaoks tehtud proovid segati kokku käsitsi katsepanni peal kasutades krohvikellut (Joonis 8).



Joonis 14. Referentskivi visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Põlevkivibituumeni kogused alates vasakult: 2,0%; 2,4%; 2,9%

Kõigi kolme erineva kontsentratsiooni juures oli kivi kattuvus hea. 2,0% puhul olid märgatavad üksikud katmata lohud ja 2,9% juures oli märgata liiga paksu põlevkivibituumeni kihti.



Joonis 15. Aheraine visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Põlevkivibituumeni kogused alates vasakult: 2,3%; 2,6%; 3,0%

Hinnates kolme proovi mõlema killustiku puhul sai selgeks, et referentskillustiku puhul peaks bituumeni kogus jääma 2–2,5% juurde ja aherainekillustiku puhul 2,5% juurde. Käsitsi segamine tundus väga ebaefektiivne, sest bituumeni kihti oli kivilidel ebaühtlane. Katsetusteks minevad kogused otsustati segada seguritega.

6.2.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks põlevkivibituumeniga

Killustikku, mis läks veeimavuse määramiseks ja güraatortihendamiseks, valitud põlevkivibituumeni kontsentratsiooni juures, segati seguriga Tecnotest (Joonis 11). Segamisel kasutati segamisnõu soojendust. Kasutati eelsoojendatud (70–80 °C) killustikku. Segamisnõusse valati 8 kg killustikku ja peale vajalik kogus bituumenit ning segati masinaga. Segamine kestis 2–3 minutit, et kivi kattuks korralikult ja segur ei hakkaks killustikku lõhkuma. Kivide kattumine põlevkivibituumeniga oli nähtavalt ühtlasem kui käsitsi segades. Peale segamist tõsteti kaetud killustik pannidele ja lasti laboris toatemperatuuril seista vähemalt kolm ööpäeva.

Valitud kontsentratsiooniga segamine toimus asfaldiseguris SRC (Joonis 12). Kasutati seguri soojendust ja eelnevalt soojendatud (70–80 °C) kivi. Korraga segati 25 kg killustikku.

6.3 Immutamine teetsemendiga, põlevkivituhaga ja kustutatud lubjaga

Algselt prooviti immutamist ette arvatud protsendiga lisati kaalutud killustikule kaalutud vee ja pulbri segu. Selline meetod jättis katmata sügavamad lohud (Joonis 16). Protsenti suurendades jäid sügavamad lohud ikkagi katmata ja kaetud pinnad kaeti liiga paksu kihiga.



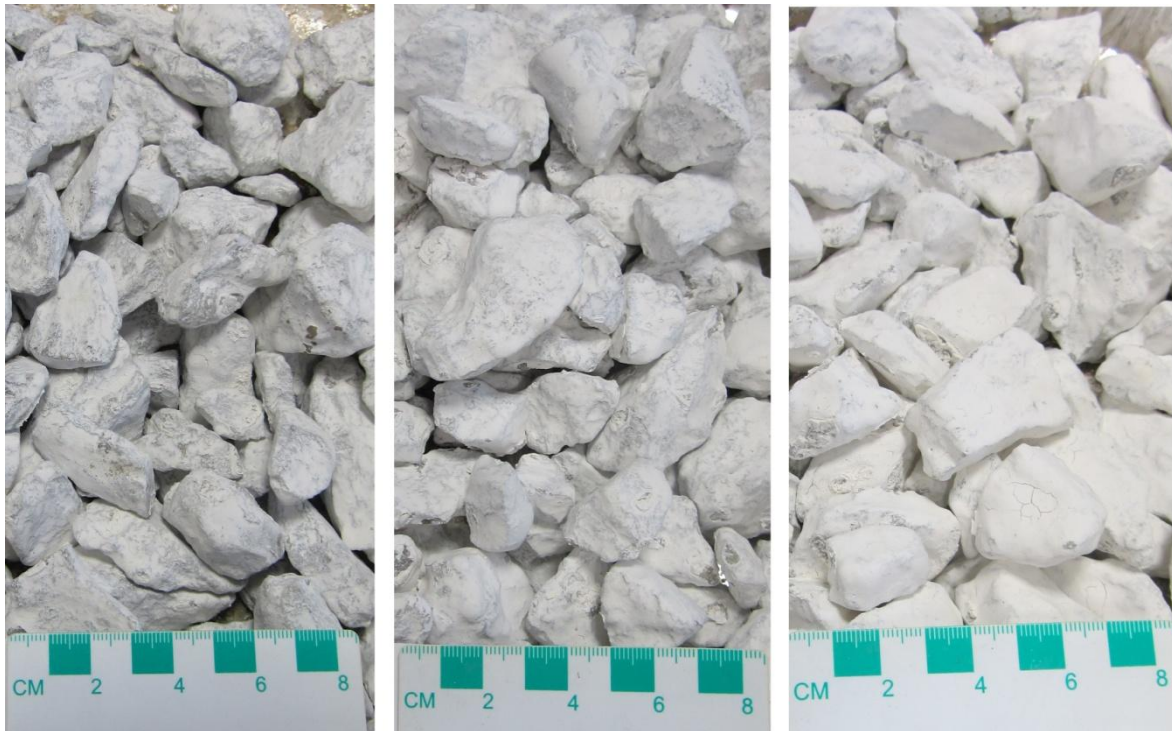
Joonis 16. Algne immutamise meetod aheraine ja tsemendi puhul, lohud katmata

Seejärel otsustati üleküllastumisega (Joonis 17) immutamise kasuks. Peale ühtlast kattumist nõrutati killustik üleliigsest ja asetati kivistuma. Sellise meetodi puhul oli kattuvus väga hea ja ühtlane ning seda kasutati analoogselt tsemendi, lubja ja põlevkivituha puhul.



Joonis 17. Immutamine üleküllastumisega lubja puhul

Immutamiseks vaja minevate immutusvahendite koguste määramiseks tehti mõlema killustikuga proovisegamine immutusvahendite kolme erineva kontsentratsiooniga (Joonis 18). Katseliselt testiti erinevaid immutusvahendite kontsentratsioone kivi suhtes. Sooviti saavutada ühtlast ligi 100%-list katvust. Kõik proovid kaaluti enne ja pärast immutamist ning arvutati immutusvahendi kogus killustiku pinnal. Proovi immutamisel saadud tulemusi hinnati visuaalselt ning valiti edasisteks katseteks (veeimavus ja külmakindlus) iga immutusvahendiga välja minimaalne kontsentratsioon, mille puhul oli võimalik saavutada ühtlane katvus (Tabel 2). Liiga madalate kontsentratsioonide korral ei katnud immutusvahend killustikku täielikult ning liiga suurte kontsentratsioonide korral kippus kiht jääma väga ebaühtlane, ning kuivades tekkisid mahukahanemisest tingitud praod.



Joonis 18. Referentskivi visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Lubja kogused alates vasakult: 0,7%; 1,2%; 2,1%

Tabel 2. Kasutatud kontsentratsioonid pulbriliste immutusvahenditega

	Referentskillustik		Aherainekillustik	
	Aine/vesi	Aine/kivi	Aine/vesi	Aine/kivi
Tsement	0,53	0,5%	0,53	0,7%
	0,64	1,6%	0,62	1,4%
	0,80	2,6%	0,73	2,8%
Põlevkivituhk	0,72	1,4%	0,65	1,3%
	0,79	2,1%	0,73	2,1%
	0,88	3,2%	0,79	2,8%
Lubi	0,40	0,7%	0,33	0,5%
	0,46	1,2%	0,40	0,9%
	0,54	2,1%	0,53	2,7%

Tsemendi ja põlevkivituha puhul valiti mõlemat tüüpi killustiku puhul kontsentratsiooni vahemikuks 1-1,5%. Lubja puhul valiti vastavaks vahemikuks 0,7-1,0%.

6.3.1 Killustike ettevalmistamine külmaskindluse ja veemavuse katseteks teetsemendiga, põlevkivituhaga ja kustutatud lubjaga

Kõik kasutatav materjal kuivatati enne katsetusi 105 °C juures konstantse massini. Valitud kontsentratsiooniga segamine toimus 10 liitrites ämbrites. Kaalutud killustiku kogusele valati peale pulbri ja vee segu, mille kontsentratsioon oli määratud. Pulbri ja vee segu valmistati vahetult enne kasutamist. Killustiku segati käsitsi ämbris käsitsi ringjate liigutustega ja ka ämbrist ämbrisse kallates. Immutamine toimus nõ üleküllastumisega. Segamine kestis keskmiselt 1,5 minutit. Peale segamist lasti üleliigsel segul killustiku pealt ära valguda 1 minuti jooksul. Seejärel tõsteti seguga kaetud killustik tühja ämbrisse, kaaluti, tähistati ja kaanetati. Seejärel asetati ämbrid konstantse temperatuuriga (20 °C) ruumi. Ruumi niiskustase ei omanud antud katsetamisel rolli, sest ämbrid olid suletud õhukindlalt. [5]

Keemilise sideme tekitamiseks säilitati proove peale immutamist erinev ajaperiood. Põlevkivituhaga immutatud killustik jäeti ühtlase temperatuuri ja oma niiskuse juurde seisma 28 ööpäevaks. Lubja ja tsemendi puhul oli säilitamise aeg 7 ööpäeva.

6.4 Immutamine naatriumvesiklaasiga

Segati kokku nelja erineva vesiklaasi kontsentratsiooni (Tabel 3) juures hindamiseks proovid, iga kontsentratsiooniga üks proov ca 3 kg (Joonis 19). Peale segamist lasti proovidel õhu käes kuivada ja seejärel hinnati tulemust visuaalselt. Nelja proovi põhjal valiti välja sobilik kontsentratsiooni vahemik. Valitud vahemik sai aluseks edaspidistele immutamistele.

Tabel 3. Vesiklaasi kontsentratsioonid

	Referentskillustik		Aherainekillustik	
	Aine/vesi	Aine/kivi	Aine/vesi	Aine/kivi
Vesiklaas		1,3%		1,7%
	0,19	0,2%	0,16	0,2%
	0,50	0,5%	0,39	0,5%
	2,01	0,9%	1,34	0,9%

Valituks osutus ligikaudu 1%–ne vesiklaasi kogus. Selline kogus jättis killustiku peale kuivamist läikima ja tekitas näiliselt ühtse kihi kivide pinnal. Väiksemad kontsentratsioonid jätsid killustiku pinna tuhmiks.



Joonis 19. Vesiklaasi lahusega(0,2 %) kaetud aheraine kohe peale segamist

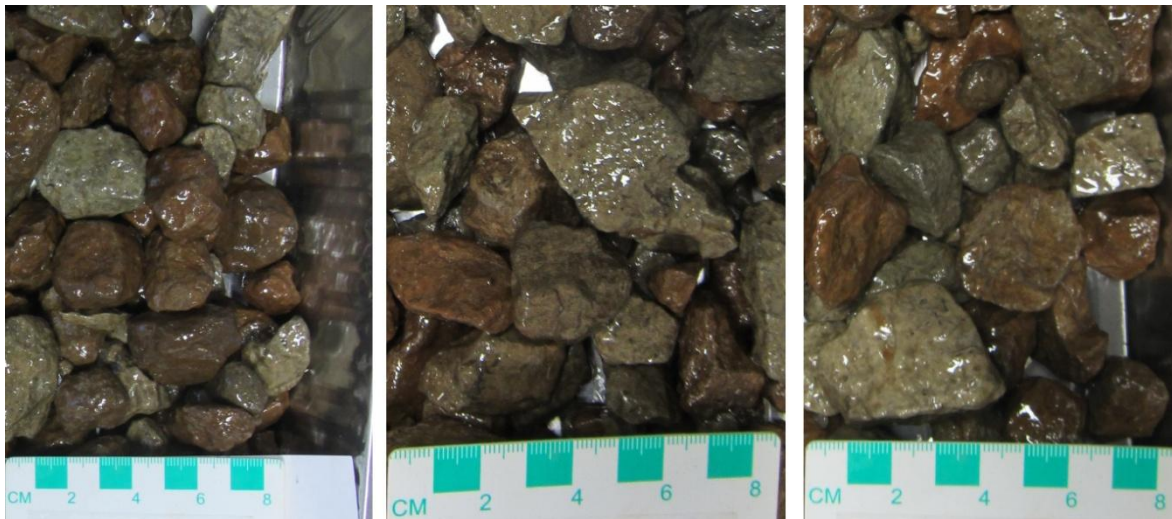
6.4.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks naatriumvesiklaasiga

Veeimavuse määramiseks, guraatortihendamisel ja külmakindluse määramisel, vaja läinud killustike koguste segamine toimus 10 liitristes ämbrites. Kaalutud killustiku kogusele (9 kg) valati peale vesiklaasi ja vee segu, mille kontsentratsioon oli määratud. Vesiklaasi ja vee segu valmistati vahetult enne kasutamist. Killustikku segati ämbri käsitsi ringjate liigutustega ja ka ämbri ämbri kalletes. Immutamine toimus nõ üleüllastumisega. Segamine kestis keskmiselt 1,5 minutit. Peale segamist lasti üleliigsel vedelikul killustiku pealt maha valguda ühe minuti jooksul. Seejärel jäi kivi laborisse lahtiselt kuivama 7 ööpäevaks. Et selle ajaga ei aurustunud piisavalt vett ära, asetati kivi kaheks ööpäevaks 50 °C juurde ventileeritud kappi. Varasemalt oli probleeme kuivamata vesiklaasiga, sest see lahustus vee keskkonnas kivi pealt maha. Segamine oli lihtne ja kivi märgamine toimus kiiresti.

6.5 Immutamine epoksüvaiguga

Kasutati kahekomponentset epoksüvaiku. Kokkusegamisel järgiti toote segamisvahekorda (2 osa A komponenti ja 1 osa B komponenti). Korraga segati ligikaudu 150 grammi epoksüvaiku.

Kasutati materjali alates 4 mm. Segati kokku kolme erineva epoksüvaigu kontsentratsiooni juures hindamiseks proovid (Joonis 20), iga kontsentratsiooniga üks proov ca 3 kg proov. Peale segamist lasti proovidel õhu käes kuivada ja seejärel hinnati tulemust visuaalselt. Kolmest proovi põhjal valiti välja sobilik kontsentratsiooni vahemik. Valitud vahemik sai edaspidise segamise aluseks.



Joonis 20. Aheraine visuaalseks hindamiseks tehtud proovid. Epoksüvaigu kogused alates vasakult: 1,2%; 1,4%; 1,6%

Aherainekillustiku ja referentskillustiku puhul segati kolm proovi samade kontsentratsioonide juures. Hinnates kolme proovi mõlema killustiku puhul ei eristunud ükski kõrgematest kontsentratsioonidest. Kõige madalamate kontsentratsioonide juures jäid üksikud katmata lohud, seepärast välistati kõige madalam kontsentratsioon.

6.5.1 Killustike ettevalmistamine külmakindluse ja veeimavuse katseteks epoksüvaiguga

Valitud kontsentratsiooniga segamine toimus 10 liitristes ämbrites. Kaalutud killustiku kogusele (6 kg) valati peale epoksüvaik, mis segati kokku vahetult enne. Killustiku segati ämbri käes ringjate liigutustega. Üleküllastumist ei toimunud, vaid kivile valati peale

kindla kontsentratsiooni saamiseks vajalik kogus vaiku (lisati 10 grammi ämbri seintele jääva kao jaoks). Segamine kestis keskmiselt 7 minutit. Kaetud killustik valati pannidele 3 kg kaupa ja asetati kolmeks ööpäevaks ventileeritud kappi 30 °C juurde. Segamine oli raske ja vaik hakkas kleepuma. Ühtlane kaetus saavutati pikaajalise segamisega. Plaatjaid kive oli raskem üleni katta. 1,4% epoksüvaigu kontsentratsiooni juures oli mõlema killustiku katvus 100%.



Joonis 21. Referentskillustiku käsitsi katmine epoksüvaiguga

7. KATSETAMINE JA TULEMUSED IMMUTATUD KILLUSTIKEGA

Olenevalt immutusvahendist lasti töödeldud killustikel seista spetsiifiliste tingimuste juures, et tagada immutusvahendi parimate omaduste esiletulek. Pulbriliste immutusvahendite puhul loodeti keemiliste sidemete teket ja nende tugevnemist aja jooksul. Põlevkivibituumeni ja emulsiooni puhul oodati immutusvahendite kuivamist ja korralikku nakkumist kivi pinnaga. Vesiklaasi ja epoksüvaigu puhul oodati immutusvahendi kuivamist vastavalt toote spetsifikatsioonidele.

7.1 Veeimavuse määramine immutatud killustikega

Viidi läbi veeimavuse määramine vastavalt standardile EVS-EN 1097-6:2013 traatkorvi meetodil. Pulbriliste immutusvahendite puhul oli vajalik killustiku õrn pesemine enne traatkorviga katse läbiviimist, sest veekeskkonnas seismine leotas lahti osa immutusvahendit. Pesemata jätmise oleks suurendanud võimalikku katseviiga. Põlevkivibituumeni ja emulsiooniga kaetud killustike puhul oli tähtis kasutada kuni 20 °C-ist vett, sest soojem vesi oleks pehendanud immutusvahendi kihti, mis omakorda oleks katse käigus eemaldunud ja vähendanud katsetulemuste õigsust. Epoksüvaiguga kaetud killustike terad olid üksteise külge jäigalt seotud. Simuleerimaks kõige halvemat stsenaariumi, murti kõik osakesed üksteise küljest lahti. Selline tegevus tekitas killustiku pinnale katmata pindu (Joonis 22). Murdumine toimus enamasti pruunima värvusega osakeste küljest.



Joonis 22. Epoksüvaiguga kaetud aheraine, peale kuivamist lahti murtud

Tabel 4. Veeimavused immutatud killustikel

	Referents	Aheraine
	WA24, %	
Algne	2,1	4,9
Vesiklaas	1,8	3,4
Tsement	2,3	4,2
Põlevkivituhk	2,7	4,5
Lubi	2,3	3,9
Epoksüvaik	1,9	3,1
Põlevkivibituumen	1,6	2,8
Emulsioon	1,6	3,5

Referentskillustiku puhul vähenes veeimavus võrreldes algsega vesiklaasi, epoksüvaigu, põlevkivibituumeni ja emulsiooniga kaetud killustikul (Tabel 4). Aherinekillustiku puhul oli veeimavuse vähenemist märgata kõikide katsetatud immutusvahendite puhul.

7.2 Veeimavuse määramine immutatud killustikega peale güreerimist

Imiteerimaks teedehitusel ja hilisemal tee ekspluatatsiooni käigus toimuda võivad purunemist tehti täiendavad veeimavuse määramise katsed güraatortihendajaga töödeldud materjalile. Veeimavuse määramiseks teostati güraatoris 120 pööret ning määrati veeimavus uuesti. Güraatorit kasutati tingimusel: 120 pööret, survejõud 600 kPa, vorm diam 150 mm, tihendusnurk 17,5 mrad, pöörete arv tihendamisel 26,5 rpm. Antud parameetrid määrati ära eelnevate katsetamistega. Peale güraatortihendajaga töötlemist (Joonis 23) sõeluti immutatud materjal läbi 4 mm sõela. Selle näitaja abil sai hinnata immutusvahendi mõju killustiku tugevusele. Läbi uue veeimavuse katse sai hinnata murdunud nurkade võimalikku mõju veeimavusele (Tabel 5).



Joonis 23. Güraatortihendiga töödeldud epoksüvaiguga kaetud aheraine

Tabel 5. Veeimavused immutatud ja güreeritud killustikel

Güreeritud	Referents	Aheraine
	WA24, %	
Algne	2,1	4,9
Vesiklaas	1,8	3,3
Tsement	2,1	3,9
Põlevkivituhk	2,5	4,0
Lubi	2,1	3,8
Epoksüvaik	1,8	3,2
Põlevkivibituumen	2,1	3,9
Emulsioon	2,3	4,3

Referentskillustikul vähenes veeimavus võrreldes algsega vaid vesiklaasi ja epoksüvaiguga. Aheraine puhul oli vähenemist märgata kõikide immutusvahendite puhul.

7.3 Külmakindluse määramine immutatud killustikele destilleeritud vee ja soola lahuses

Immutatud killustikel määrati külmakindlus destilleeritud vees vastavalt standardile EVS-EN 1367-1 (tähistus F, %) ja 1%-ses NaCl lahuses vastavalt standardile EVS-EN 1367-6 (tähistus FNaCl, %). Külmakindlust katsetati fraktsioonile 16/31,5 mm. Külmakindluse tulemused põlevkivibituumeni ja emulsiooni korral võivad anda hinnanguliselt kuni ühe protsendipunkti suuruse vea katsetaja kasuks, sest osa purunenud peenikeset materjalist võis jääda immutusvahendi külge (Joonis 24). Vea vähendamiseks pesti igat põlevkivibituumeniga ja emulsiooniga töödeldud proovi peale külmakindluse määramist läbi 8 mm sõela, kuni näiliselt kõik peenemad osad olid eraldunud. Seejärel vaadati iga proov üksikasjalikult läbi. Külmakindluse näitajad kajastati protsentides (Tabel 6).

Tabel 6. Külmakindluse näitajad immutatud killustikel

	Referents	Aheraine	Referents	Aheraine
	F, %		FNaCl, %	
Algne	0,8	6,8	80,1	72,6
Vesiklaas	12,3	17,7	77,9	68,6
Tsement	10,5	21,8	72,1	70,2
Tuhk	2,7	6,7	76,0	73,2
Lubi	1,4	6,8	73,2	70,8
Epoksüvaik	0,4	3,2	50,8	45,9
Põlevkivibituumen	0,4	5,0	67,5	54,9
Emulsioon	0,7	4,8	51,1	58,5



Joonis 24. Aheraine peale külmakindluse katset 1%-ses NaCl lahuses. Vasakul pool pildil on purunenud materjal enne 8 mm sõelast läbi pesemist, paremal peale pesu

7.4 Lisakatsed epoksüvaiguga

Algsete katsete tegemiseks murti peale kuivamist epoksüvaiguga kaetud kivid üksteise küljest lahti, vabastades veele vabad pinnad kivisse tungimiseks. Lisakatseted tehti aheraine killustikule analoogselle fraktsioonile. Peale epoksüvaiguga katmist jäeti iga individuaalne kivi kuivama ilma, et see puutuks kokku mõne teise kiviga. See tagas killustiku täieliku katmise ja murtud pindu ei tekkinud. Peale kuivamist tehti veeimavuse katse, ning määrati külmakindlus destilleeritud vees ja NaCl lahuses.

Aherainekillustikul, mis oli üleni epoksüvaiguga kaetud, ega omanud vabu pindu oli veeimavus 0,7%. Külmakindlus destilleeritud vees oli sellel 0,0% ja 1%-ses NaCl lahuses 13,3% (Joonis 25).

Lisaks tehti epoksüvaiguga kaetud killustikele purunemiskindluse katse Los Angeles meetodiga. Katsetati fraktsioone 10/14 mm (purustatud) ja 16/31,5 mm (purustamata). Fraktsiooni 10/14 mm puhul vähenes aheraine LA näitaja 13,7 protsendipunkti ja

referentskillustiku puhul 13,4 protsendipunkti. Võrdluseks teostati Los Angeles katse fraktsiooniga 16/31,5 mm (Tabel 7).

Tabel 7. Los Angeles näitaja epoksüvaiguga kaetud killustike puhul

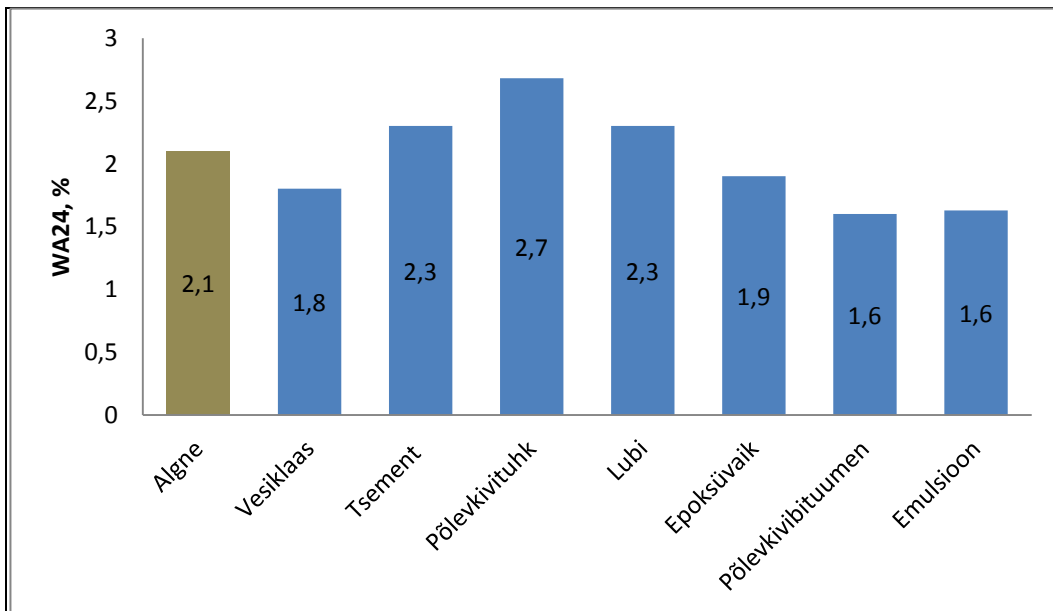
		LA, fr 16/31,5 mm	LA, fr 10/14 mm
		LA, %	LA, %
Aheraine	Algne	37,7	34,3
	EPO	21,2	20,6
Referents	Algne	27,6	26,8
	EPO	13,1	13,4



Joonis 25. Aheraine üleni kaetud epoksüvaiguga peale külmutuskatset soolalahuses. Parem pool pilti on alla 8 mm tükisuurusegamaterjal

8. DISSKUSSIOON

Immutamise mõju güreerimata referentsmaterjali veeimavusele oli väga väike. Vesiklaasi, epoksüvaigu, põlevkivibituumeni ja emulsiooni korral oli veeimavuse vähenemine vahemikus 0,3 ja 0,5 protsendipunkti (algne veeimavus 2,1%) (Joonis 26). Sellist vähenemist ei saa lugeda piisavaks, sest hinnanguline katsevigaga võis ulatuda 0,3 protsendipunktini, vähendades veeimavust näiliselt. Pulbriliste immutusvahendite korral veeimavus hoopis suurenes, mis võis tuleneda immutusvahendite ebapiisavast kivistumisest või ka immutusvehendi ebasobivatest omadusest veeimavuse ärahoidmisel. Tõenäoliselt tekitasid pulbrilised immutusvahendid killustiku pinnale suurema veeimavusega pinna, kui killustik ise.

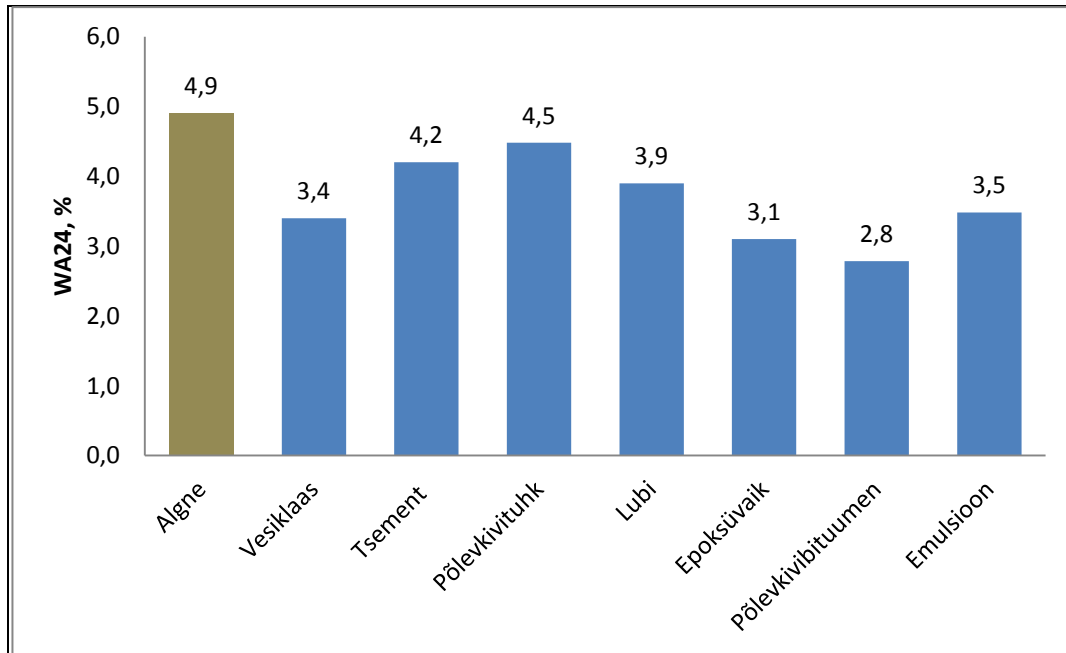


Joonis 26. Immutamise mõju referentskillustiku veeimavusele [5]

Aherainekillustiku puhul vähendasid kõik proovitud immutusvahendid veeimavust. Kõige suurema efekti andsid oodatult põlevkivibituumen, emulsioon, epoksüvaik ja vesiklaas (Joonis 27). Veeimavus vähenes algselt 4,9%-lt parimal juhul (põlevkivibituumen) 2,8%-ni. Pulbriliste immutusvahendite mõju oli 0,4 kuni 1,0 protsendipunkti.

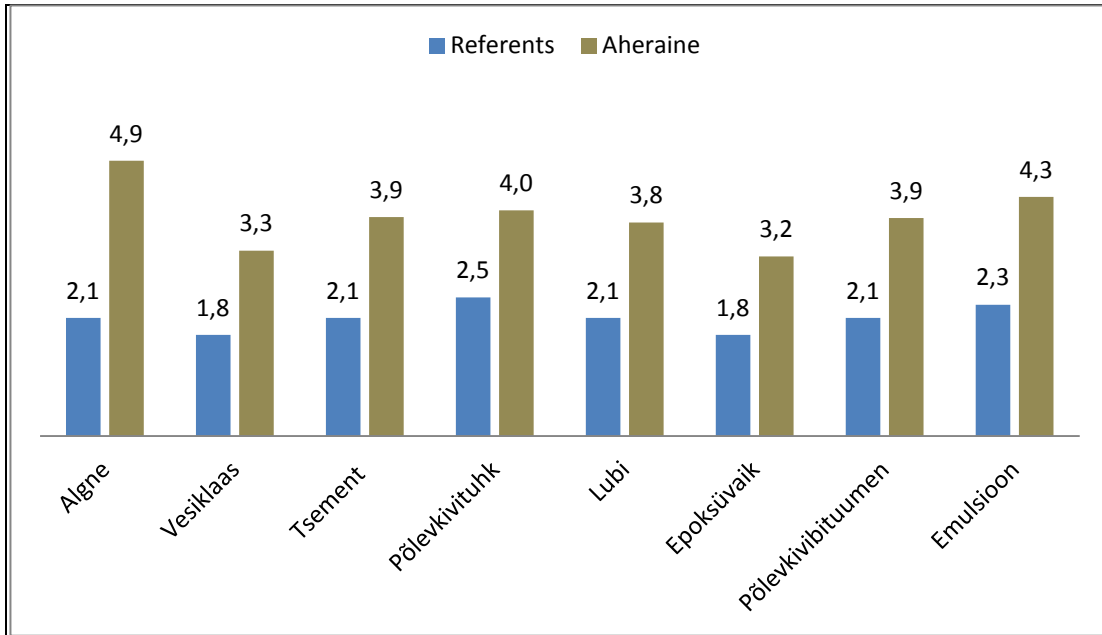
Üldiseid katsetulemusi veeimavuse vähendamise kohta ei saa lugeda rahuldavateks. Veeimavuse vähenemise korral oli vähenemine marginaalne, ega tõstnud killustiku kvaliteeti tuntavalt. Vähenemise mõju oli pulbriliste immutusvahendite puhul teatud mastaabis eeldatav. Üllatust tekitas põlevkivibituumeni ja bituumenemulsiooni väga väike mõju

veemavusele. On võimalik, et nende immutusvahendite potentsiaalne mõju sai kompromiteeritud killustike käsitlemisel enne külmutuskatseid. Võisid tekkida katmata nurgad mööda mida vesi sai imbuda sügavale killustikuterasse.



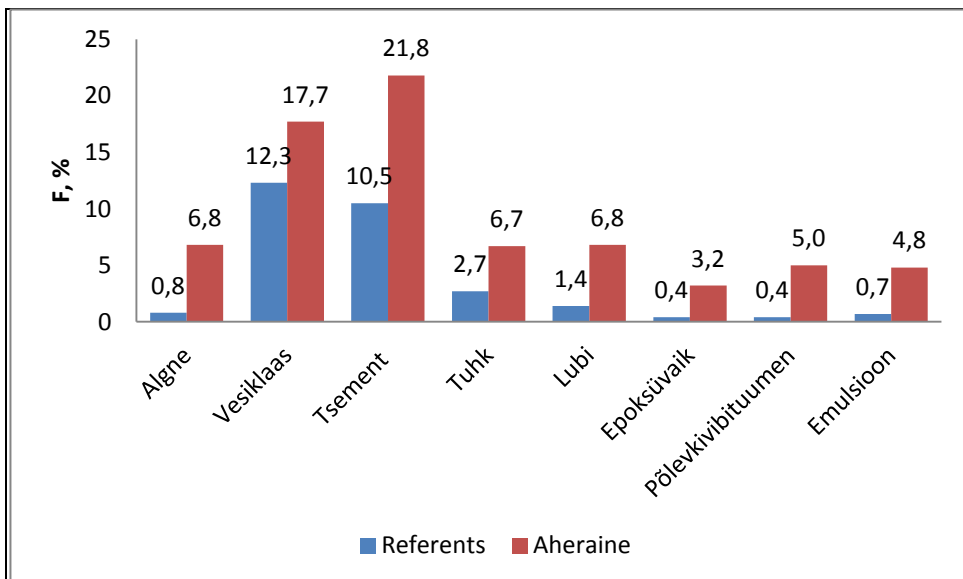
Joonis 27. Immutamise mõju aherainekillustiku veemavusele [5]

Killustiku käitlemisel ja paigaldamisel ning tihendamisel teetööde käigus võib killustiku nõrgemad osad teatud määral puruneda. Seda imiteeriti guraatortihendamise teel. Üldised tendentsid jäid samaks võrreldes güreerimata immutatud materjalidega (Joonis 28). Vabade pindade tekkega oli oodata veemavuse suurenemist. Referentskillustiku puhul jäi veemavus vahemikku 1,8–2,5% ning aherainekillustiku korral vahemikku 3,2–4,3%. Parimaks osutusid epoksüvaik ja vesiklaas.



Joonis 28. Immutamise mõju peale güreerimist [5]

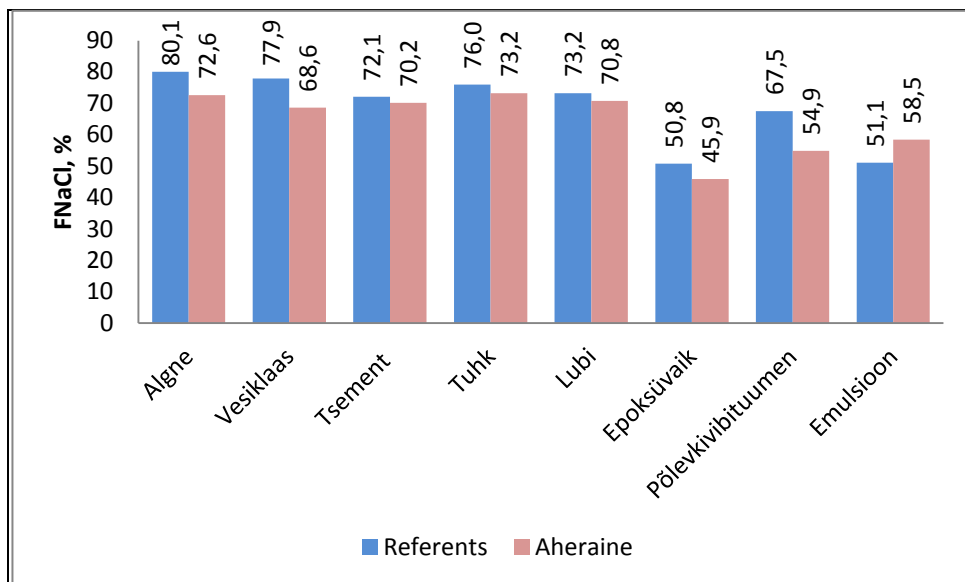
Immutamise mõju külmakindlusele oli suurema tähendusega, kui veemavuse muutus. Referentskillustiku puhul muutusid destilleeritud vees külmakindluse näitajad totaalselt halvemaks vesiklaasi ja tsemendi puhul (Joonis 29). Toetudes sellele infole tuleks teetsemendi kasutamist teetarindis rohkem katsetada veendumaks, et see ei vähenda teekonstruktsioonide külmakindlust. Sama tendents oli näha ka aherainekillustiku puhul. Parimaid tulemusi andsid mõlema killustiku puhul epoksüvaik, põlevkivibituumen ja emulsioon.



Joonis 29. Külmakindlus destilleeritud vees [5]

Nagu ka destilleeritud vees, näitavad ka soolalahuses läbi viidud katsed aheraine- ja referentskillustiku omaduste mõningast paranemist bituumenemulsiooni ja epoksüvaigu puhul (Joonis 30). Aherainekillustiku külmaskindlus paranes nende toel 72% tasemelt 45,9–58,7% tasemele ning peakillustiku puhul 80,1% tasemelt 50,8–51,1 % tasemele. Ülejäänud immutusvahendid mõjutasid külmaskindlust NaCl lahuse puhul vähe. Tulemused aheraine korral jäid vahemikku 68,6–73,2% ja referentskillustiku korral vahemikku 67,5–77,9%.

Huvi tekitas külmaskindluse halvenemine naatriumvesiklaasiga ja teetsemendiga töötlemise puhul. Võimalikuks põhjuseks võivad kummaski immutusvahendi koostises leiduvad veeslahustuvad soolad. Selliste soolade olemasolu tekitab soolvee keskkonna ja seletaks külmaskindluse vähenemist.



Joonis 30. Külmaskindlus soolalahuses (1% NaCl) [5]

Kõige paremad ja seeläbi huvitavamad tulemused andsid epoksüvaiguga tehtud lisakatsed. Aherainekillustikul, mis oli üleni epoksüvaiguga kaetud oli veeimavus ainult 0,7% võrreldes algse 4,9%. Külmaskindlus destilleeritud vees oli aherainel 0,0% ja 1%-ses NaCl lahuses vaid 13,3%. Sellised katsetulemused näitavad kindlat potentsiaali edasiste uuringute jaoks. Positiivset joont toetavad Los Angelese katse tulemused. Fraktsiooni 10/14 mm puhul vähenes aheraine LA näitaja 13,7 protsendipunkti ja referentskillustiku puhul 13,4 protsendipunkti. Sellised purunemiskindluse näitajaid võib lugeda on vägagi olulisteks.

9. KOKKUVÕTE

Eestis on ladustatud ning tekib iga aasta juurde miljoneid tonne aherainet. Põlevkivikaevandamisest üle jäävat aherainet kasutatakse suhteliselt madalate kvaliteediomadustega killustiku tootmiseks. Aherainekillustik leiaks tõenäoliselt suuremat kasutust, kui selle omadused oleksid paremad. Antud lõputöös käsitleti hüpoteesi aherainekillustiku kvaliteedi võimaliku parandamise kohta. Prooviti aherainekillustiku immutamist erinevate vahenditega, lootes vähendada veeimavust ja seeläbi tõsta killustiku külmakindlust. Paralleelselt tehti samad katsed referentskillustikule ehk lubjakivile, mis oli pärit lubjakivikarjäärist.

Katsete tulemused ei näidanud immutamise olulist mõju killustiku kvaliteediomaduste tõstmisele. Teatavad positiivsed mõjud saavutati põlevkivibituumeni, bituumenemulsiooni ja epoksüvaiku kasutades. Kuid esines ka kvaliteedi alanemist (naatriumvesikaasi ja teetsemendi puhul).

Lisakatsed epoksüvaiguga andsid väga häid tulemusi veeimavuse, külmakindluse ja LA näitaja kontekstis. See näitab, et epoksüvaigu korrektne võib anda positiivseid tulemusi. Õige viis, kuidas epoksüvaiku kasutada, saab põhineda ainult teadmistel, mis võivad tekkida järeluuringute käigus.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] **Mäendusõpik** [Võrgumaterjal].
Saadaval:<http://maeopik.blogspot.com/2011/11/aheraine.html>. [Kasutatud 10 Mai 2015].
- [2] **Helves, H.**, Ajalooliste lubimörtide uurimise analüütiline probleem, Tartu: Tartu Ülikool, 1996. lk 4-5
- [3] **Jürman, K.**, Lubja kui ehitusmaterjali ja selle erinevate tootmismeetodite keskkonnaalane analüüs, Tartu: Tartu Ülikool, 2004. lk 4-6
- [4] **Mäendusõpik**, [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<http://maeopik.blogspot.com/2012/05/polevkivi-aheraine.html>. [Kasutatud 5 Mai 2015].
- [5] **Truu, M., Siht, S., Prank, H., Meikas, M., Riisalu, H.**, Aheraine killustiku omaduste kaardistamine Eestis ning nõrga kivi vääristamise teadusuuringud, Teede Tehnokeskus AS, Maanteeamet, Tallinn, 2015.
- [6] **AS Kiviluks.**
- [7] **Koel, M.**, „Estonian Oil Shale,“ 1999.
- [8] **Geoloogiainstituut**, „Geoturism Eestis ja Lõuna-Soomes,“ [Võrgumaterjal].
Saadaval: <http://geoeducation.info/geoturism/>. [Kasutatud 9 Aprill 2015].
- [9] **OÜ Inseneribüroo Steiger**, „Põlevkivi kasutamise riikliku arengukava 2016–2030 koostamiseks vajalike andmete analüüs,“ Tallinn, 2012.
- [10] **Tohver, T.**, „Utilization of Waste Rock from Oil Shale Mining,“ TTÜ Mäeinstituut, Tallinn, 2011.
- [11] **Eek, P., Raudsep, R.**, Aheraine pole tingimata aher aine ehk Aherainemägedes peitub leevendus ehitusmaavarade puudusele, Eesti Päevaleht; Ärioleht, 2008.
- [12] **Eesti Energia Kaevandused AS.**
- [13] **Lee, D.-Y., Guinn, J. A.** Absorption of Asphalt Into Porous Aggregates, National Research Council, Washington, 1990.
- [14] **Bauchemie, GI 110, Tehniline kaart, Üldkasutatav vaik**.
- [15] **Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut**, Narva Elektri jaamade keevkihtkatelde tuha ja tuhki/tsemendisegude vastavus Portland-põlevkivitsemendi standarditele ja keskkonnaohutuse uuring, KIK, 2014.
- [16] **Eesti Standardikeskus.** EVS-EN 933-1:2012, Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 1: Terastikulise koostise määramine. Sõelumismeetod, Standard.
- [17] **TTÜ Teedeinstituut**, „Elastsete teekatendite projekteerimise juhendi pinnaste klassifikatsiooni kohandamine EVS-EN ISO 14688-1 ja 2 klassifikatsioonile Ühtlaseteralise liiva (CU<3) geotehnilisi omadusi mõjutavad tegurid,“ Maanteeamet, Tallinn, 2014.
- [18] **Eesti Standardikeskus.** EVS-EN 933-3:2012, Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Osa 3: Tera kuju määramine. Plaatsustegur, Standard.
- [19] **Eesti Standardikeskus.** EVS-EN 1097-2:2010, Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid, Standard.
- [20] **Eesti Standardikeskus.** EVS-EN 1097-6:2013, Täitematerjalide mehaaniliste ja

füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 6: Terade tiheduse ja veeimavuse määrimine, Standard.

- [21] **Eesti Standardikeskus.** EVS-EN 1367-1:2007, Täitematerjalide soojuslike omaduste ja ilmastikukindluse katsetamine. Osa 1: Külmakindluse määrimine, standard.
- [22] **Eesti Standardikeskus.** EVS-EN 1367-6:2008, Täitematerjalide soojuslike omaduste ja ilmastikukindluse katsetamine. Osa 6: Külmakindluse määrimine soolalahuses (NaCl), standard.