



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Tartu kolledž

**BETOONIJÄÄTMETEST TOODETUD KILLUSTIKU
KASUTUSVÕIMALUSED BETOONSEGUDES**

**POSSIBILITIES OF USING AGGREGATE PRODUCED
FROM CONCRETE WASTE IN A NEW CONCRETE MIX**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kristjan Langebraun

Üliõpilaskood: 153887EAEI

Juhendajad: Mihkel Kiviste, Professor
Aime Ruus, Dotsent

Tartu, 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

24. mai 2021

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." 20.....

Juhendaja:

.....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." :20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, Kristjan Langebraun,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Betoonijäätmetest toodetud killustiku kasutusvõimalused betoonsegudes,

mille juhendajad on professor Mihkel Kiviste ja dotsent Aime Ruus

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

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. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **KRISTJAN LANGEBRAUN**

Üliõpilaskood: **153887EAEI**

Õppekava: **EAEI02/12 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peeriala: Ehitiste projekteerimine ja arhitektuur

Lõputöö teema:

BETONIJÄÄKIDEST TOODETUD KILLUSTIKU KASUTUSVÕIMALUSED BETONSEGUDES

Possibilities of using aggregate produced from concrete waste in a new concrete mix

Juhendaja: **Professor Mihkel Kiviste**

mihkel.kiviste@taltech.ee

Dotsent Aime Ruus

aime.ruus@taltech.ee

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida betoonijäätmetest toodetud täitematerjalide omadusi.
2. Uurida betoonijäätmetest toodetud killustiku kasutusvõimalusi betoonsegudes.

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teema püstitus ja metoodika välja töötamine	31.01.2021
2.	Kirjanduse läbi töötamine ja töö esimese peatüki kirjutamine	26.02.2021
3.	Küsitluste läbi viimine ja analüüs	04.03.2021
4.	Katsetatava materjali hankimine, liiva ja killustikuga katsete läbi viimine	24.03.2021
5.	Betoonisegude ja katsekehade valmistamine	08.04.2021
6.	Katsekehade katsetamine	06.05.2021
7.	Katsetulemuste vormistamine	13.05.2021
8.	Töö vormistamine	18.05.2021
9.	Kokkuvõtte eesti keeles	18.05.2021
10.	Kokkuvõtte inglise keeles	18.05.2021

Lõputööde 95% ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

30.04.2021

Lõputöö esitamise tähtaeg:

24. mai 2021

Lõputöö ülesanne välja antud: 01.03.2021

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Avalikustamise piirangu
tingimused: puuduvad

SISUKORD

EESSÕNA	10
MÄÄRATLUSED	11
SISSEJUHATUS	12
1. ÜLEVAADE BETOONI TOOTMISEGA TEKKIVATEST PROBLEEMIDEST JA BETOONI JÄÄKIDE KASUTAMISE VÕIMALUSTEST	14
1.1. Betooni tarbimine ja sellest tekkivad keskkonnaprobleemid	14
1.1.1. Kasutatavad ressursid	14
1.1.2. Kasvuhoonegaaside emissioonid	15
1.1.3. Toodetavad ehitusjätmed	16
1.2. Ringmajanduse kontsept ja betoon	16
1.3. Ehitusjätmete ja betooni taaskasutus Eestis ja maailmas	17
1.4. Potentsiaalsed keskkonnakahjude vähendamise võimalused	18
1.4.1. Tsemendi lisandite kasutamine	19
1.4.2. Vee koguse vähendamine	20
1.4.3. Kokkuhoid täiteainetelt	20
1.5. Valikuline lammutamine ja materjalide sorteerimine	21
1.6. Taaskasutatud betooni kasutusvõimalused	22
1.7. Jämeda taaskasutatud täitematerjali kasutusvõimalused	22
1.8. Peene taaskasutatud täitematerjali kasutusvõimalused	23
1.9. Taaskasutatud täiteainega betoon	24
1.10. Betooni taaskasutuse tehnoloogiad	25
1.11. Varem tehtud uurimused taaskasutatud täiteainega betoonisegude tugevusnäitajatele	26

1.11.1. India	26
1.11.2. Hispaania	26
1.12. Taaskasutatud täiteaine kasutamist betoonisegus puudutav regulatsioon eri maades	27
1.12.1. Saksamaa	27
1.12.2. Inglismaa	28
1.12.3. Holland	28
1.12.4. Belgia	28
1.12.5. Šveits	29
1.12.6. Portugal	29
1.12.7. Jaapan	30
1.12.8. Itaalia	30
1.12.9. Hispaania	30
1.12.10. Hiina	31
1.12.11. Eesti	31
1.13. Nõuded taaskasutatud jämetäiteainele Eestis	32
2. KÜSIMUSTIK BETOONIJÄÄTMETE UTILISEERIMISEST	34
2.1. Grupp 1 – Küsimustik ehitusettevõtetele	34
2.2. Grupp 2 – Küsimustik Betoonijäätmetega tegelevatele ettevõtetele	35
3. BETOONIST TOODETUD TÄITEAINE OMADUSTE KATSELINE UURIMINE	38
3.1. Ülevaade	38
3.1.1. Katsetatav materjal	38
3.2. Liiva katsetamine	41
3.2.1. Liiva puistetihedus	41
3.2.2. Liiva näivtihedus	44
3.2.3. Liiva tühiklikkus	46
3.2.4. Liiva terastikuline koostis	47

3.2.5. Taaskasutatud liiva veesisalduse määramine.....	52
3.2.6. Huumusesisaldus.....	53
3.2.7. Katse tulemuste võrdlus	55
3.3. Killustiku füüsikaliste omaduste katseline uurimine.....	56
3.3.1. Killustiku puistetihedus.....	56
3.3.2. Killustiku näivtihedus	58
3.3.3. Killustiku tühiklikkus	61
3.3.4. Plaatjate ja nõeljate terade sisaldus	62
3.3.5. Veeimavus.....	63
3.3.6. Jämetäitematerjali koostise komponentide määramine	64
3.3.7. Katsetulemuste võrdlus	67
3.4. Taaskasutatud täiteainega betooni katsetamine	67
3.4.1. Ülevaade	67
3.4.2. Betoonisegu koostise arvutamine.....	68
3.4.3. Taaskasutatud täiteaine kasutusprotsendid ja koostatud betoonisegud	71
3.4.4. Betoonisegude töödeldavuse hindamine Abramsi koonusega	72
3.4.5. Betoonkatsekehade tihedus	73
3.4.6. Betoonkatsekehade niiskuse mõõtmine	75
3.4.7. Betoonkatsekehade survetugevuse hindamine Schmidt'i vasaraga	76
3.4.8. Betoonkatsekehade survetugevuse leidmine purustaval meetodil.....	78
3.4.9. Tulemused	79
KOKKUVÕTE	81
SUMMARY.....	83
KASUTATUD KIRJANDUS	85
LISAD	93

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema sõnastasid töö autor ning juhendajad professor Mihkel Kiviste ja dotsent Aime Ruus. Töö eesmärgiks on uurida betooni taaskasutamise võimalusi ning betoonijäätmetest toodetud täitematerjale. Katsed viidi läbi Taltech Tartu kolledži laboris vanemlektor Egge Haiba ja prof. Mihkel Kiviste juhendamisel.

Magistritöö raames uuriti betoonijäätmete erinevaid kasutusvõimalusi ning seda puudutavat seadusandlust. Viidi läbi küsitlused ehitusettevõtete ning ehitusjäätmetega tegelevate ettevõtete hulgas, et saada ülevaade hetkeolukorrast Eestis. Katseteks vajalik purustatud betoonijääk saadi ettevõttelt Karimek. Saadud materjali puhul uuriti selle erinevaid füüsilisi ja keemilisi omadusi. Seejärel koostati taaskasutatud materjali kasutades betoonkatsekehad. 28 päeva möödudes viidi läbi katsekehade survetugevuskatsed ning võrreldi tulemusi.

Autor tänab nõuannete ja meeldiva koostöö eest juhendajaid Mihkel Kivistet ja Aime Ruusi, Egge Haibat abi eest katsete läbi viimisel, katsetes kasutatava täitematerjaliga varustamise eest ettevõtet Karimek, lisaks kõiki küsitlusele vastanud inimesi.

Võtmesõnad: taaskasutus, betoon, betoonkillustik, magistritöö

MÄÄRATLUSED

Taaskasutatav täitematerjal – täitematerjal, mis on saadud varem ehituses kasutatud anorgaanilise materjali ümbertöötlemise tulemusena (EVS-EN 12620:2005, 2005).

Peentäitematerjal – täitematerjal, mille terasuuruse ülemine mõõde on väiksem või võrdne 4 millimeetriga (EVS-EN 12620:2005, 2005).

Jämetäitematerjal – täitematerjal, mille terasuuruse ülemine mõõde on suurem või võrdne 4 millimeetriga ning alumine mõõde on suurem või võrdne 2 millimeetriga (EVS-EN 12620:2005, 2005).

Peenosis – täitematerjal, mille osised läbivad 0,063 mm avadega sõela (EVS-EN 12620:2005, 2005).

Betoon – materjal, mis saadakse omavahel segatud tsemendist, jäme- ja peentäitematerjalist ja veest ning millele võib lisada või mitte lisada keemilisi ja peenlisandeid või kiudu ja mille omadused kujunevad tsemendi hüdratsiooni tulemusena (EVS-206:2014, 2014).

Normaaltihedusega täitematerjal – täitematerjal, mille osakeste kuivtihedus määratuna EN-1097-6 kohaselt on $>2000 \text{ kg/m}^3$ ja $<3000 \text{ kg/m}^3$ (EVS-206:2014, 2014).

SISSEJUHATUS

Käesolevas magistritöös uuritakse betoonijäätmetest purustamise teel saadava killustiku kasutusvõimalusi uues betoonisegus. Batoon on üks enim kasutatud ehitusmaterjale maailmas. Tänapäeval toodetakse ehituses ja lammutusel suurel hulgal jäätmeid ning betooni tootmiseks kulutatakse palju ressursse, seega on oluline leida võimalusi, kuidas ühelt poolt jäätmete hulka vähendada ning teiselt poolt hoida kokku tarbitavatelt loodusressurssidelt. Batoonijäätmetel on suur potentsiaal killustiku alternatiivina, seeläbi aitab nende efektiivsem tarvitamine kaasa betoonijäätmete kasutusvõimaluste suurendamisele.

Töös antakse ülevaade betooni tootmistahtudest ning sellega tekkivatest probleemidest. Uuritakse kehtiva seadusandlusega määratletud taaskasutatud täitematerjali kasutusvõimalusi nii Eestis kui maailmas ning vaadeldakse varasemaid sel teemal läbi viidud uuringuid. Lisaks küsitletakse Eestis tegelevaid ehituse- ning ehitusjäätmetega tegelevaid ettevõtteid, et saada ülevaade hetkeolukorrast ning ettevõtete arvamusel sel teemal. Magistritöö raames katsetatakse ka ettevõttelt Karimek saadud 0-32 fraktsiooniga purustatud betoonijäätmeid. Materjalist eraldatakse 0-4 mm fraktsiooniga liiv ja 8-16 mm fraktsiooniga killustik ning uuritakse nende erinevaid füüsikalisi ja keemilisi omadusi. Seejärel võrreldakse saadud tulemusi loodusliku liiva ja killustiku omadustega ning standardis toodud piirväärtustega betoonis kasutatavale täiteainele. Katsetatud materjalist toodetakse betoonkatsekehad ning uuritakse taaskasutatud täiteaine mõju betooni survetugevusele. Täiteaine asenduse protsendid - 50% ja 20% -, on valitud vastavalt EVS-EN 206 toodud piirväärtustele, mida on maksimaalselt lubatud erinevates keskkonnaklassides kasutada. Lisaks on tehtud ka 20% jäme- ja 20% peentäitematerjali asendusega katsekehad, et näha taaskasutatud peentäitematerjali mõju. Katsekehad on valmistatud taaskasutatud täitematerjali kasutamata, et katsed oleksid võrreldavad samades tingimustes valminud tavapärase betooniga. Kokku on valmistatud iga täiteaine asenduse protsendiga viis katsekeha ehk kokku 20.

Töös püstitatud hüpoteesid on järgmised:

1. Jääkidest saadavat killustikku on võimalik kasutada piisava survetugevusega betooni tootmiseks.
2. Batoonis survetugevus väheneb, mida rohkem kasutada taaskasutatud täiteaineid.

3. Liiva asendamisel peenefraktsioonilise taaskasutatud materjaliga väheneb betooni tugevus märgatavalt ning seda segus kasutada ei tohiks.

1. ÜLEVAADE BETOONI TOOTMISEGA TEKKIVATEST PROBLEEMIDEST JA BETOONI JÄÄKIDE KASUTAMISE VÕIMALUSTEST

Peatükis antakse ülevaade betooni tarbimise mahtudest, sellega kaasnevatest probleemidest ning ka võimalikest lahendustest. Vaadeldakse purustatud betoonist saadava peen- ja jämetäitematerjali taaskasutamise võimalusi. Antakse ülevaade betoonkillustiku kasutamise võimalustest uues betoonisegus ning seda puudutavast seadusandlusest.

1.1. Betooni tarbimine ja sellest tekkivad keskkonnaprobleemid

Aastate 1900 ja 2010 vahel on ehituse ja infrastruktuurile kulutatavate loodusressursside maht suurenenud 23-kordselt (Krausmann, et al., 2017). Betoon on vee järel teine kõige rohkem kasutatav materjal. Arvatakse, et maailmas toodetakse umbes 25 miljardit tonni betooni igal aastal (The Cement Sustainability Initiative, 2009). Betooni tootmine on aga väga suure keskkonnamõjuga. Peamiselt võiks betooni mõju keskkonnale jaotada kolmeks – tsemendi tootmisest ja materjalide transpordist tulenev õhku paisatav CO₂, kulutatavad ressursid nagu liiv, killustik, vesi ning tekitatavad jäätmed.

1.1.1. Kasutatavad ressursid

Betoon koosneb peenest (enamasti liiv) ja jämetäiteainest (enamasti killustik), veest ja tsemendist. Kõik need ressursid on piiratud. Seetõttu on suureks probleemiks ressurside vähesus. Maailmas kõige suurema mahuga kaevandatakse liiva ja killustikku, seda on rohkem kui fossiilseid kütuseid. (Torres, Brandt, Liu, & Lear, 2017)

Agregaadid on ehituses kasutatavad mineraalset päritolu täitematerjalid, mida enamasti kaevandatakse karjääridest. Nõudluse kasv ehituses kasutatavatele agregaatidele on küll aeglustunud, kuid uuringute põhjal oli nõudlus 2015. aastal umbes 48,3 miljardit m³. Suurimad tarbijad on Aasia riigid, eesotsas Hiina ja Indiaga, kus kasutatakse 67% kogu maailma agregaatide mahust (The Freedonia Group, 2012). Euroopa Liidus kasutati 2018. aastal 2,894 miljonit tonni agregaatide, millest 321 miljonit tonni oli

taaskasutatud. Seega ligi 11% kogu kasutatavast agregaadist on taaskasutatud. Eestis on vastavad numbrid 19 miljonit tonni ja 0,3 miljonit tonni. See tähendab, et Eestis on taaskasutatava agregaadid hulk pisut üle 1% kogumahust. Kõige suurem taaskasutatud agregaadid kasutus on näiteks Hollandis 24%, Prantsusmaal 26%, Belgias 19%. (European Aggregates Association, 2021)

Lisaks on betooni valmistamiseks vajalik puhas vesi, mis samuti piirkonniti on suures defitsiidis. Betooni tootmiseks ei sobi soolane või liigsete orgaaniliste ainete sisaldusega vesi, kuna see võib tekitada ebakorrapärasusi betoonis, armatuuri korrosiooni, betoontarindi eluea vähenemist, kandevõime vähenemist.

Suurima keskkonnamõjuga on tsemendi tootmine, mis üksi moodustab 4% kogu maailmas toodetavast süsihappegaasist (Olivier, 2020). Lisaks tuleb tootmisele juurde arvestada ka transpordi, paigalduse ja vana betooni utiliseerimisest tulenevad energiakulud. Seetõttu on oluline muuta kogu protsessi energiatõhusamaks, et vähendada oma ökoloogilist jalajälge.

1.1.2. Kasvuhoonegaaside emissioonid

Globaalne kasvuhoonegaaside tootmise tõus jätkub aastas umbes 1.1% võrra. 2019. aastal oli toodetav kogus ekvivalentne 52,4 gigatonni CO₂-ga. Kasv on võrreldes selle sajandi esimese kümnendiga aeglustunud (keskmiselt 2,6%), kuid näitab siiski stabiilselt tõusvat trendi. Maailma kuus suurimat kasvuhoonegaase tootjat on vastutavad 62% kogu kasvuhoonegaaside hulga eest. Hiina on suurim tootja (26%), millele järgnevad USA (13%), Euroopa Liit (9%), India (7%), Venemaa (5%) ja Jaapan (3%). Riigiti olid 2019. aasta andmetel suuremad kasvuhoonegaaside tõusud Hiinas +3.1% (420Mt CO₂ ekvivalenti), Indoneesias +5.5%, Vietnamis +12.8%. Mõlemas riigis 50Mt CO₂ ekvivalenti, Indias +1.4%. Kasvuhoonegaaside tootmine vähenes Euroopa Liidus -3.0%, ehk 140Mt CO₂ ekvivalenti, USA-s -1.7% ehk 110Mt CO₂ ekvivalenti, Jaapanis -1.6%. (Olivier, 2020)

Erinevate kasvuhoonegaaside osakaal on järgmine: CO₂ (72%), CH₄ (19%), N₂O (6%) ja F- gaasid (3%). Vaadates suurima osakaaluga süsihappegaasi peamisi tekkeallikaid, võib näha, et 39% süsihappegaasist põhjustab kivisöe-, 31% õli-, 18% loodusliku gaasi põletamine ning 4% tsemendiklinkeri tootmine. Järelikult on tsemendiklinkeri tootmine

ligikaudu 2.9% kogu maailmas toodetavate kasvuhoonegaaside põhjustajaks. (Olivier, 2020)

1.1.3. Toodetavad ehitusjäätmed

Aina suurenevaks probleemiks on tekkivad jäätmed. Eurostati andmetel oli kogu Euroopas toodetav jäätmete hulk 2018. aastal 2 364 miljonit tonni. Samal aastal oli ehitus- ja lammutustegevusest tulenev mineraalsete jäätmete hulk 329,5 miljonit tonni (Eurostat, 2021), mis moodustab 14% kõigist Euroopas toodetavatest jäätmetest. Rahvaarvu kasvuga pidevalt suurenev hoonestuse ja infrastruktuuri vajadus teeb ehitussektorist ühe suurima jäätmete tekitaja. Jäätmete mõju keskkonnale ja majandusele on ulatuslik, seetõttu on oluline hinnata erinevaid alternatiive jäätmete majandamisel, et leida kõige mõistlikum lahendus antud probleemile.

On tehtud mitmeid uuringuid, võrdlemaks ehitusjäätmete kasutamise majanduslikke ja keskkondlikke aspekte. Uurimustes vaadeldakse peamiselt kaht alternatiivi: jäätmete prügilates hoiustamine ning nende laialdane taaskasutamine ja ümbertöötlus. Samuti võrreldakse prügilates hoiustamisel tekkivate keskkonnakahjude ära hoidmiseks tehtavaid kulutusi ja energiat ning taaskasutamisele kuluvat energiat ja keskkonnamõju. Kairo Ülikooli uuringu käigus leiti, et ehitusjäätmete taaskasutamisega on võimalik vähendada heitgaaside ja energia hulka ning kokku hoida vaja minevate prügilate pindalalt (Marzouk & Azab, 2014).

Portugalisis läbi viidud ehitusjäätmete elutsükli uuringus leiti, et taaskasutamisel on alati suurem keskkondlik kasutegur. Majanduslikud investeeringud taaskasutusele on küll suuremad, kuid samas on suur potentsiaal ka taaskasutatud materjalide järelturule. (Coelho & de Brito, 2011)

Mõlemas uuringus leiti, et mõistlik on ehitusjäätmel võimalikult suures mahus taaskasutada.

1.2. Ringmajanduse kontseptsioon ja betoon

Ringmajandusliku mudeli eesmärgiks on majanduskasv saavutada võimalikult väikese esmase tooraine kasutusega ning seeläbi luua võimalikult väikeste kadudega tootmis- ja tarbimissüsteem (Keskkonnaministeerium, 2021). Selle puhul ei võeta tooraineid tarbimistsüklist välja, vaid püütakse tänu targale ja kokkuhoidlikule kasutusele nende

kasutusiga võimalikult palju pikendada. Ringmajanduse eesmärk peaks olema taaskasutusest saadava materjali kõrgema kvaliteedi saavutamine ja alaväärtustamise vältimine, mitte lihtsalt taaskasutuse võimalikult suur maht. Taaskasutatud materjalid peaksid toimima sama hästi kui toormaterjalist toodetu. Betooni taaskasutuse puhul on selle saavutamine keeruline. Tavapärase praktika see, et tekkinud betoonijäätmed kasutatakse madalama taseme ehitusmaterjalidena. Sellega väheneb materjali väärtus ja jääb realiseerimata potentsiaalne kasutusvõimalus, näiteks kandvates konstruktsioonides. Sellist materjalide väärtuse vähenemist (*downcycling*) taaskasutuse protsessis püüab ringmajanduslik mudel vältida. (ECW/WMGE work programme, 2020)

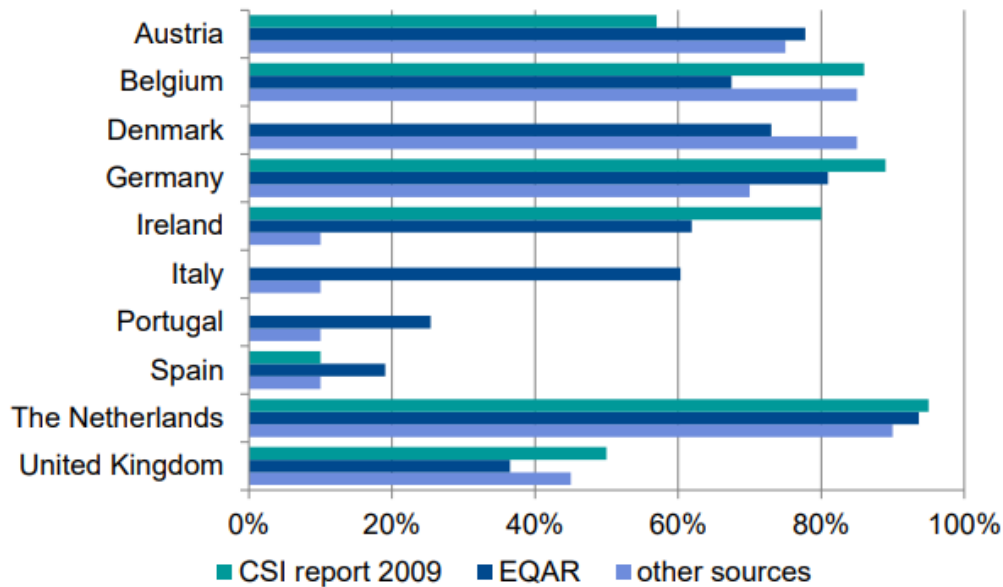
Betooni toomise sidumine ringmajandusse on problemaatiline peamiselt seetõttu, et betooni tootmine on pöördumatu. Valmis tehtud betooni ei ole enam võimalik alkomponentideks eraldada. Lisaks peab arvestama ka taaskasutamiseks kuluvat energiat. Mõnedes valdkondades on materjali taaskasutamine madalamal tasemel mõistlikum, sest niiviisi kulutatakse vähe lisanduvat energiat. Seega on oluline uurida materjalide taaskasutamise potentsiaali ning võimalusi nii asukoha- kui ka materjalipõhiselt.

1.3. Ehitusjäätmete ja betooni taaskasutus Eestis ja maailmas

Lammutusel saadaval materjalil on kõrge potentsiaal taaskasutuseks. Ehitiste lammutusjäätmetest saadaval agregaadil on kasutusvõimalusi, näiteks pindamise ja teedehitusel nii sidumata kui ka hüdrauliliselt seotud teede aluskihtides, kõnniteede puhul ka bituumeniga kattedkihtides, samuti hoonete ehituses (Silva, Brito, & Dhir, 2014). Ehitusjäätmete taaskasutamine on Euroopas riigiti väga erinev. Euroopas taaskasutatakse keskmiselt 88% ehitusjäätmetest. See näitaja on enamuses Euroopa riikides, kaasa arvatud Eestis, koguni üle 90%. (Eurostat, 2021)

Samas, kui vaadata ainult betooni taaskasutust, on see tunduvalt madalam. Kõrgeimad taaskasutuse protsendid on Hollandis ja Saksamaal, kus betoon taaskasutatakse umbes 90% ulatuses. Austrias, Belgias, Taanis ja Iirimaa on see 60-80%. Itaalias, Portugalis, Hispaanias on betooni taaskasutus umbes 20%. Peamiselt tulenevad suured erinevused sellest, et riigiti on loodusressursside kättesaadavus erinev. Näiteks Hollandis, Belgias, Austrias, Šveitsis on loodusliku killustiku ressursid rohkem piiratud. Lisaks on roll ka

prügilate mahul. Osades riikides ei ole lihtsalt piisavalt ruumi jäätmete hoiustamiseks ning seetõttu on neis riikides ka rohkem tegeletud jäätmete taaskasutusega. (European Cement Research Academy, 2015)



Joonis 1.1 Betooni taaskasutus riigiti (European Cement Research Academy, 2015)

1.4. Potentsiaalsed keskkonnakahjude vähendamise võimalused

Rahvaarvu suurenemine toob kaasa ka infrastruktuuri vajaduste suurenemise. Seetõttu võib eeldada, et ka betooni ja tsemendi tootmine ainult kasvab. Ehitussektori keskkondliku jalajälje vähendamine on kindlasti väga oluline. Ehituse puhul mängib olulist rolli betooni laialdane kasutamine. Betooni peamise koostisosa – portlandtsemendi -, tootmist peetakse üheks suuremaks keskkonda kahjustavaks teguriks kogu ehitussektoris. Betooni suurepärased ehituslikud omadused, nagu suur survetugevus, kestvus, tulekindlus on teinud selle nii populaarseks, et betoon on üks maailmas kõige rohkem kasutatud materjale. Betooni keskkonnakahjude vähendamine peaks toimuma betooni tootmistehnoloogia parandamise abil. Selleks on mitmeid võimalusi.

1.4.1. Tsemendi lisandite kasutamine

Peamine küsimus on tsemendi tootmine. On tehtud mitmeid uuringuid betoonisegusse lendtuha, ränidioksiidi, putsolaani, kõrgahjudest tuleva räbu lisamisega ning tsemendikoguse vähendamisega. On leitud, et osaline tsemendi asendamine võib koguni betooni kvaliteeti parandada. (Lie, 2006)

Lendtuhk on kivisöe põletamisel tekkiv kõrvalprodukt. Tegemist on laialdaselt aktsepteeritud tsemendi asendajaga, kuna betoonisegusse lisatuna parandab see tugevusnäitajaid ja betooni segunemist. Lendtuhk on jääkmaterjal, mistõttu on selle tsemendi asendajana kasutamine keskkonnasõbralik. Lisaks on selle tootmine väikesema energiakuluga kui tsemendi tootmine. Keskmine tsemendi asendamise protsent lendtuhaga on ligi 10-30%. (Rodriguez, 2021)

Ränidioksiidi saadakse ränisulamite tootmise kõrvalsaadusena. Kondenseeritud ränidioksiid on ülipeene, amorfne ja aktiivselt reageeriv mineraalne lisand. See reageerib portlandtsemendi hüdratsiooni käigus kaltsiumhüdroksiidiga. Ränidioksiidi lisamine parandab tugevusnäitajaid, samas kestvusnäitajate testimisel saadakse vastuolulisi tulemusi. Keskmine lisamise protsent on umbes 5-10%. Ühelt poolt on ränidioksiid vägagi lootustandev lisand kõrgtugeva betooni tootmisel. Teisalt on vajalik suur tähelepanu betoonisegu kokku segamisel, sest ebaühtlane ränidioksiidi lisand tekitab betoonis kestvuse probleeme. (Chandra & Berntsson, 1996)

Putsolaan on vulkaanilise päritoluga ränidioksiidi sisaldav kivim. See on vulkaaniliselt aktiivsetes piirkondades väga laialdaselt levinud ning ka betooni lisandina kasutust leidev. On leitud, et kuni 20% ulatuses on võimalik tsemendi asendajana vulkaanilist tuhka kasutada. Odava ja keskkonnasõbraliku piisavate tugevusnäitajate ja kestvusega vulkaanilise tuhaga valmistatud betooni tootmine on väga kasulik keskkonnale ja näiteks vulkaaniliste katastroofipiirkondade rehabiliteerimiseks. (Hossain & Lachemi, 2007)

Kõrgahjuräbu tekib metalli toomise kõrvalproduktina. Tegemist on küllaltki laialdaselt kasutatava lisandina betoonis. Peeneks jahvatatuna on kõrgahjuräbul tsementeeruvad omadused. On leitud, et 30% tsemendi asendamisel räbuga saadav betoon vastab Türgis portlandtsemendile esitatavatele standarditele. (Altun & Yilmaz, 2002)

Samuti on avastatud, et metalliräbuga betoon on heade tugevusomadustega ning vastupidav kloriidi ionidele. Selle puhul on vajalik piisavalt peene pulber, et tsementeeruvad omadused piisavalt head oleksid. Seetõttu on oluline arendada energiasäästlikke tehnoloogiaid räbu jahvatamiseks.

Lisaks on võimalik lisandina kasutada ka lubjakivi pulbrit, mis piisavalt peeneks jahvatatuna toimib tsemendi asendajana. On leitud, et kuni 20% lubjakivi sisaldus tsemendis annab võrreldavaid tulemusi tavatsemendiga. (Tsvilis, Batis, Chaniotakis, Grigoriadis, & Theodossis, 2000)

1.4.2. Vee koguse vähendamine

Betooni tootmiseks vajaliku vee kokkuhoid on samuti väga oluline. Mitte nii palju keskkonna ja CO₂ tootmise seisukohalt, vaid seetõttu, et betooni valmistamiseks vajalik puhas vesi on piirkonniti väga suur defitsiit. Enamasti kasutatav vee ja tsemendi suhe ehk vesitsementtegur on 0.45 ja 0.6 vahel. Tegelik tsemendi hüdratsiooniks vajalik vee kogus on umbes 0.3. Suurem vee kogus muudab betooni nõrgemaks, aga ka kergemini töödeldavaks ning seetõttu kasutatakse suuremat vesitsementtegurit. Betooni töödeldavust on võimalik mõjutada ka erinevate ainete ehk plastifikaatorite lisamisega. Seeläbi on võimalik vesitsementtegur madalam hoida. (Lie, 2006)

1.4.3. Kokkuhoid täiteainetelt

Lisaks on võimalik betooni tootmisel kokku hoida ka täiteainete arvelt, kasutades taaskasutatud täiteaineid. Seeläbi vähendatakse uue liiva ja kruusa kaevandamist ning tegeletakse osaliselt ka ehitustegevustest tekkivate jäätmete probleemiga.

Samuti on võimalik taaskasutada ehitusplatsilt tagasitulev betoon. Sel teemal on koostanud Laura Laisk Eesti Maaülikoolis lõputöö „Ringlusse võetud betooni taaskasutus“. Töös leiti, et betoonisegus on võimalik osaliselt kasutada kuni kolm tundi seisnud betoonisegu. Asendades 20% värsket betooni taaskasutatavaga, saavutati nõutav survetugevus. Seega peale teatud aja möödumist on võimalik betoonisegu endiselt kasutada ning sellega on võimalik kokku hoida uue materjali kasutamist betoonisegudes. (Laisk, 2020)

1.5. Valikuline lammutamine ja materjalide sorteerimine

Ehitusmaterjalide ja ehitusmeetodite mitmekesisus toob kaasa selle, et ehitiste lammutamisel saadav materjal on erinev nii koostisosadelt kui ka kvaliteedilt. Lammutustöid on võimalik teostada erinevalt. Peamine küsimus on selles, kui põhjalikult oleks mõistlik enne lammutust ning lammutusel saadavaid materjale sorteerida. Valikulise lammutuse puhul püütakse lammutatavad materjalid eraldada võimalikult suures mahus. Erinevaid olemasolevate ehitiste lammutamise suundasid ja elutsükli analüüse võrreldes on leitud, et valikulise lammutuse majanduslik mõistlikus on suuresti kohalikest oludest, nagu tööjõukulud ja taaskasutatava materjali turuhinnad. (Coelho & de Brito, 2011)

Keskondlikust suunast on valikulisele lammutusele selged eelised, mis peamiselt tulenevad sellest, et suurem hulk materjali on võimalik uuesti kasutada ning prügilatesse jõudev kogus on väiksem. Materjalide sorteerimisega vähendatakse ehitusjäätmetes esinevate saasteainete hulka ja seeläbi ka suuri keskkonnamõjusid: kliimamuutused, keskkonna hapestumine, sudu, nitrifikatsioon ja raskemetallide hulk. Hinnanguliselt on leitud, et taaskasutuse protsent peaks olema vähemalt 90%, et keskkonnakahjud väheneksid märgataval hulgal. (Silva, Brito, & Dhir, 2014)

Lissaboni Tehnikaülikoolis tehtud tavapärase ja valikulise lammutamise majanduslike analüüside võrdlus leiab, et keskmiselt on majanduslik eelis tavapärasel lammutusel, aga olenevalt objektist võib see ka teisiti olla. Tavalammutuse kulud on suuresti sõltuvad jäätmejaamade vastuvõtu kuludest. Valikulise lammutuse puhul on kulud ühtlasemalt jaotunud tööjõu, masinate, transpordi ja jäätmejaama viimise kulude vahel. Valikulise lammutuse materjalide suurem taaskasutamise võimalus ka samal objektil muudaks mitmed valikulise lammutuse projektid kasumlikemaks. Seetõttu on oluline mitte ainult kulude võimalikult madalal hoidmine, vaid ka saadud materjali turustamine ja uute kasutusvõimaluste leidmine. (Coelho & de Brito, 2011)

1.6. Taaskasutatud betooni kasutusvõimalused

Lammutusjätmetel on mitmeid keskkonnale kahjulikke mõjusid. Lammutus- ja ehitusjätmed viiakse prügilatesse, mis on üldjuhul suurematest metropolidest kaugel. Järelikult on jäätmete transpordiks kuluval energial suur roll kogukuludest ja seda ka peale materjali kasutuse lõppu. Ka liiva ja killustiku ressursid paiknevad enamasti suurematest linnadest kaugel, mis tähendab taaskord kulutusi nii kaevandamisele kui ka transpordile. (Goncalves, 2007)

Betooni taaskasutuse puhul räägitakse peamiselt purustatud betooni taaskasutamisest, seda nii jäme- kui peenagregaadina. Eluea lõpus olevad betoontarandid purustatakse selleks ette nähtud seadmetega, eemaldatakse armatuurteras, muud lisandid ja ehitusjätmed. Seeläbi saadakse betoonkillustik, mida on võimalik kasutada sarnaselt tavapärasele killustikule ning peenosised, mille kasutusvõimalused on rohkem piiratud.

Taaskasutatud agregaadid füüsilised ja keemilised omadused sõltuvad purustatavate jäätmete päritolust ja omadustest, purustustehnikatest ning jäätmete töötlemisest. Taaskasutatud agregaat jaotatakse sõltuvalt koostisest enamasti kahte rühma: taaskasutatud betoonagregaat ning taaskasutatud segatud agregaat. Esimese puhul on tegemist peamiselt betooniosakestest ja mitteseotud täiteainest koosneva materjaliga. Teine sisaldab lisaks ka keraamikat, asfaldi, kipsi, mörte. (Pacheco-Torgal, Ding, Labrincha, Tam, & Brito, 2013)

1.7. Jämeda taaskasutatud täitematerjali kasutusvõimalused

Betooni taaskasutamiseks on mitmeid võimalusi. Üks rohkem kasutatud meetod on purustatud betoonkillustiku kasutamine teede aluskihtides. Näiteks Poola Maanteed ja Riigimaanteed peadirektoriaat GDDKiA (Generalna Dyrekcja Drog Krajowych i Autostrad) uurib ja tegeleb olemasolevate betoonsillutiste killustikuks purustamise ja kasutamisega samal asukohal tee aluskihina. Selline purustus ehk rubblizing tehnoloogia aitab kokku hoida betoonsillutiste remontimisel palju aega ja raha peamiselt vana materjali teisaldamise ja uue kohale vedamise arvelt. Väidetavalt aitab antud tehnoloogia vähendada sillutise remondikuludid kuni 50%, võrreldes tavapärase vana purustatud materjali uuega asendamise ja selle ehitusobjektile transportimisega. (Kiisler, 2018) Eestis on see betoonijäätmete utiliseerimise meetod samuti populaarne.

Kuna aga Eestis veetakse teedehituses kasutatav purustatud betoonkillustik kohale mujalt, hoitakse kokku ainult uue killustiku arvelt ning kasutatakse ära betoonjätmeid, mis muidu kasutust ei leiaks. Üldiselt on betoonkillustik teede aluskihina heade kandeomadustega. CSI raporti andmetel kohati isegi paremate kandeomadustega kui uus killustik (The Cement Sustainability Initiative, 2009). Siinpuhul on oluline kasutatava betoonkillustiku kvaliteet. Eestis on kasutusel standard EVS-EN 13242:2006 „Ehitusel ja Tee Ehituses Kasutatavad Sidumata ja Hüdrauliliselt Seotud Täitematerjalid“, mis määratleb täitematerjalide nõutava kvaliteedi ja kasutusvõimalused.

Lisaks sellele on üks võimalik betoonkillustiku kasutusvõimalus ka maa-aluste kommunikatsiooniliinide aluskihina. Killustik aluskihis on vajalik, et aidata kaasa vee filtreerimisele. Selles osas oleks betoonkillustik alternatiiviks tavakillustikule. Samuti on olemas võimalusi betooni kasutamiseks tema originaalkujul. Suuremate betoonitükkide kasutamisevõimaluste hulgas on välja pakutud erinevaid pinnase tugimüüride lahendusi erosiooni takistamiseks. Traatkorvid täidetakse erineva suurusega betoonitükkidega ja paigutatakse tugevdamist vajavale nõlvale. Korvid, tuntud ka gabioonide nime all, takistavad selle taga oleva pinnase ära vajumist.

Üha rohkem otsitakse ka võimalusi taaskasutatud betoonkillustiku kasutamiseks uues betoonsegus. See on aga keerulisem, sest betoonis kasutatavale täitematerjalile esitatavad nõuded on karmimad. Kasutatav täitematerjal peab olema puhtam ning seda saavutada on raske, kuna lammutatavate betoontarindite kvaliteet on kõikumine ning ebavajalike lisandite eemaldamine vajab keerulisemaid tehnoloogiaid.

1.8. Peene taaskasutatud täitematerjali kasutusvõimalused

Betooni purustamisel killustikuks tekib ka suurel hulgal peeneid osiseid, mille kasutusvõimalused on piiratud. Kuigi taaskasutatud peentäitematerjali kasutamisel betoonis liiva asendajana oleks positiivne mõju keskkonnale ning see on laboritingimustes ka võimalik, on leitud, et taaskasutatud peene agregaadi (TPA) kasutamine on võrdlemisi problemaatiline. Seetõttu on hetkel peenosised kasutatavad ainult pinnasetäiteks. Peene taaskasutatud agregaadi omadused on väga erinevad looduslikust. Kujult on TPA muutunud ümarast nurgelisest, lisaks on osiste suurus väga

kõikuv. Keemilisel koostisel esineb mitmeid ebapuhtusi. On leitud, et taaskasutatud täitematerjalil on looduslikuga võrreldes suurem veeimavus, mis kasvab, mida väiksem on materjali osake. Suur veeimavus muudab betooni kehvemini töödeldavaks. Lisaks on taaskasutatud betooniagregaadi osakestel omadus kokku liimuda. Veeimavuse leidmine TPA puhul on keeruline materjali kõikuvate omaduste, nagu tsemendiosiste ja ebapuhtuste sisalduse osas. TPA sisaldab tsemendipuru, mille eemaldamine ei ole majanduslikult ega ka keskkonna seisukohast mõistlik, kuna see on väga kulukas. Kuigi TPA kasutamine betoonsegus on teoreetiliselt võimalik, puudub piisav regulatsioon ning vaja oleks väga kindlaid ja karme testimisnorme, et see ka tavapraktikas võimalik oleks. (Nedeljković, Visser, Šavija, Valcke, & Schlangen, 2021)

1.9. Taaskasutatud täiteainega betoon

Taaskasutatud täiteainega betooni kasutamine on üha enam populaarsust koguv. Hetkel on peamine suund jämeda täitematerjali osalisel asendamisel taaskasutatud jämetäitematerjaliga uutes betoonsegudes. Arendatakse erinevaid tehnoloogiaid betoonkillustiku puhastamiseks. Betooni taaskasutamiseks on Euroopas hetkel käimas mitmed Euroopa Liidu rahastatavad programmid, näiteks C2CA, HISER, IRCOW, VEEP. Hollandis tegelev ettevõtte Smart Crusher bv tegeleb betooni purustamise tehnoloogiate arendamisega, mille eesmärgiks on muuta betoon 100% taaskasutatavaks materjaliks. Lisaks kvaliteetse betoonkillustiku ja liiva eraldamisele püütakse eraldada ka tsemenditorm, millel on samuti mitmeid potentsiaalseid kasutusvõimalusi.

Peamised takistused betooni taaskasutamisele on madalad loodusliku täiteaine hinnad ning kõrged kulud betooni lammutamisest saadava kvaliteetse täiteaine saamiseks. Lisaks nõuab kvaliteetse materjali tootmine kõrget kvaliteedikontrolli kõigilt osapooltelt, et suuta toota stabiilselt hea kvaliteediga materjali. See on vajalik ka lõppkasutajate usalduse loomiseks ning seeläbi kasutuse populariseerimiseks. (ECW/WMGE work programme, 2020)

1.10. Betooni taaskasutuse tehnoloogiad

Et vähendada looduslike täiteainete tarbimist, on viidud läbi mitmeid uuringuid taaskasutatud täiteainete kasutamise osas. Oluline osa selle juures on välja selgitada täiteaine omadused ja kuidas see erinevates olukordades käitub. Peamiseks probleemiks taaskasutatud betoonagregaadi kasutamisel on sellele kinnitunud mört, millel on enamasti kõrge poorsus ja veeimavus. Need omadused tekitavad probleeme mehaanilistes näitajates ning kestvuses.

Kõrge taaskasutuse protsendiga jämetäitematerjali ja kasutatava peene osise saamiseks on välja töötatud mitmeid meetodeid. Euroopas on C2CA projekti raames loodud mehaanilise taaskasutamise süsteem, mille eesmärk on eluea lõpus olevast betoonist toota kõrgekvaliteedilist agregaat ja madala CO₂ jalajäljega toormaterjali betooniklinkeri tootmiseks. Protsess algab objekti hindamisega ning hoone lammutamisega. Sealjuures sorteeritakse välja sobiv materjal. See purustatakse ja sõelutakse 0-16mm osiseks. Järgmine etapp on Advanced Dry Recovery ehk ADR, kus eraldatakse jäme (4-16mm) ja peen (0-4mm) osis. Sel viisil saadud jämeagregaadi katsetamisel leiti, et see võib tõsta uue betooni poorsust ja seeläbi seda nõrgestada. Samas on lahenduseks pakutud vesi-tsementteguri madalamaks viimine ja töödeldavuse saavutamiseks superplastifikaatorite kasutamine. Selle programmi tulemusel leiti, et taaskasutatud agregaat on suures mahus sobiv alternatiiv looduslikule. Üle 50% asendamisel peaks aga olema ettevaatlik ja seda kasutama vaid kõige kergemates keskkonnaklassides. (Lotfi, Eggimann, Wagner, Mróz, & Deja, 2015)

Brasiilia teadlased on taaskasutamiseks välja töötanud meetodi, kus agregaat saadakse purustamisel lõugpurustiga ja seejärel saadud materjali puhastamisel pöördtrumlis. Tulemusena eemaldatakse suur osa kinnitunud tsemendiosakesi ja seeläbi alaneb ka veeimavus. (Pepe, Filho, Koenders, & Martinelli, 2014)

Veel üks välja töötatud lahendus on kuumutamise ja jahvatamise meetod. Betoonipuru kuumutatakse 300°C ja tänu tsemendi osalisele dehüdratsioonile nõrgeneb side agregaadiga ning tsemendi osakesed eralduvad (Shima, Tateyashiki, Matsuhashi, & Yoshida, 2005).

On tehtud ka uuringuid mikrolainetega kuumutamise osas, saavutamaks kõrgekvaliteedilist agregaat. Selle meetodi puhul kasutatakse mikrolaineid, et

nõrgestada Fe_2O_3 sisaldavaid sideaineid. Betoonis tekivad mikromõrad ja nõrgeneb nii tsemendiosakeste maatriks kui ka sideaine ja tsemendi vahelised sidemed. Pärast 180-sekundilist mikrolainetega kuumutamist saadi jämetäitematerjal, mis sisaldas vähem kui 5% tsemendi pastat ja peenagregaati. Omaduste poolest on saadud materjal väga sarnane looduslikule. (Choi, Kitagaki, & Noguchi, 2014)

On pakutud välja ka lahendusi agregaaadi puhastamiseks keemilise töötlemise abil. Robayo-Salazar (2017) on uurinud näiteks NaOH kasutamist. Teisalt Wang ja teised (2017) on leidnud, et tugevate hapete kasutamise asemel on mõistlikum äädikhappe kasutamine. Äädikhappes leotamine eemaldab efektiivselt tsemendimördi agregaaadi pinnalt. Kasutades väikeseid koguseid ei mõjutata eriliselt betooni omadusi, kus täiteainet kasutatakse. Lisaks ei toodeta ohtlikke saasteaineid.

1.11. Varem tehtud uurimused taaskasutatud täiteainega betoonisegude tugevusnäitajatele

1.11.1. India

Indias Graphic Era Hilli ülikoolis läbi viidud katsetes uuriti loodusliku jämetäiteaine 7%, 28% ja 35% asendamist taaskasutatud täiteainega. Viidi läbi katsed survetugevusele ning ka veeimavusele. Katsete tulemusena selgus, et betooni survetugevus väheneb, kui suureneb taaskasutatud materjali osakaal. Samas saadi ka suuremate asendusprotsentidega katsekehadel rahuldavaid survetugevusi. Veeimavus suurenes samuti taaskasutatud täiteaine sisalduse kasvuga. Leiti, et maksimaalseks taaskasutatud täiteaine protsendiks on 33%. Samas 100% täiteaine asendamisel on võimalik kokkuhoid kuludelt kuni 16%. (Shah, Gupta, Nainwal, Negi, & Kumar, 2021)

1.11.2. Hispaania

Hispaanias Extramadura Ülikoolis ja Eduardo Torroja nimelises Ehitusteaduste Instituudis P. Plaza jt uuringus uuriti taaskasutatud jäme- ja peenagregaadi kasutamise mõju betoonile, füüsilisi ja mehaanilisi omadusi ning CO_2 emissioone. Katsetati kuni 100% peen- ja jämetäitematerjalide asendamisega. Uuringus leiti, et taaskasutatud täiteainega betooni tugevusnäitajad on madalamad kui tavapärasel betoonil. Survetugevuse alanemine jämetäitematerjale asendades oli kõigil juhtudel väiksem kui 17%. Lisaks taaskasutatud peentäitematerjali kasutades on tugevuse alanemine suurem. Tõmbetugevuse näitajad tõusid, kui asendati jämetäitematerjale, ja langesid,

kui kasutati lisaks ka peentäitematerjale. Kõik saadud tulemused olid võrreldavad või isegi kuni 10% kõrgemad kontrollkatsekehade tulemustest. Paindetugevus on sarnane kontrollkatsekehadega, kui asenduse protsent on alla 75%. Kõrgemates asendusprotsentides oli tugevuse kadu kuni 15%. Lisaks leiti, et taaskasutatud täiteainete kasutamine vähendaks betooni globaalse soojenemise potentsiaali 25% jämetäitematerjali asendamisel 1,4% ja 100% jäme- ja 50% peentäitematerjali asendamisel 7%. (Plaza, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2021)

1.12. Taaskasutatud täiteaine kasutamist betoonisegus puudutav regulatsioon eri maades

Purustatud betooni kasutamine täiteainena uues betoonisegus on võimalik. See on problemaatiline, sest purustatud betoonist agregaat on erinev uuest agregaadist. Taaskasutatud täiteaine vajab puhastamist ning selle omadused ja tugevus võivad olla erinevad. Kindlate nõuete ja standardite puudumisel taaskasutatud täiteainele ei olda ka valmis seda võimalust kasutusele võtma. Vajalik oleks paika panna standardid, et tagada ohutus ning vajalik kvaliteet. Paljudes riikides on nõudeid ja standardeid taaskasutatud täiteainele juba olemas. Järgnevalt on välja toodud riigiti taaskasutatud täiteaine kasutamist puudutavad standardid ja võimalused. Igal juhul lisandub peale täiteaine materjalide sisalduse veel mitmeid täiendavaid nõudeid, mida kirjeldavad vastavate riikide standardid.

1.12.1. Saksamaa

Standard DIN 4266-100 „Täiteained betoonile ja mördile“ jagab betoonis ja mördis kasutatavad taaskasutatud täiteained algse materjali järgi nelja kategooriasse. Määratud on kõigile kategooriate minimaalsed lubatud tihedused ning lubatav maksimaalne veeimavus. Saksa Raudbetooni komisjoni (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) 2004. aastal välja antud juhised lubavad kasutada vaid taaskasutatud killustikku. Taaskasutatud liiva kasutamine lubatud ei ole. (Goncalves, 2007) Kandvates elementides on lubatud kasutada esimese ja teise kategooria täiteaineid. Kolmanda ja neljanda kategooria täiteaineid võib kasutada vaid mittekandvates betoontarindites. Lubatud on 25%-35% tavalise killustiku asendamine taaskasutatud killustikuga. Toodetavad betooniklassid võivad olla tugevusega kuni C25/30 35% asendamise korral ja C30/37 25% asendamisel. See tagab suured kasutusvõimalused, sest neid betooniklasse kasutatakse paljudes kandvates konstruktsioonides. DIN ei kasuta ka

lisanduvaid parandustegureid, see tähendab, et on eeldatud, et taaskasutatud täiteainega betoon ei erine tugevusnäitajates tavapärasest. (DIN 4226-100, 2002)

Tabel 1.1 Taaskasutatud killustiku rühmitamine sisalduse järgi (DIN 4226-100, 2002)

Koostisosad (massiprotsendi järgi)	Tüüp 1	Tüüp 2	Tüüp 3	Tüüp 4
Betoon ja looduslikud täiteained DIN 4226-1 järgi	≥90	≥70	≤20	≥80
Klinker, ilma poorse savitellise osakesteta	≤10	≤30	≥80	
Kaltsiumsilikaat tellised			≤5	
Teised mineraalsed materjalid nagu näiteks poorsed tellised, kergbetoon, kips jne	≤2	≤3	≤5	≤20

1.12.2. Inglismaa

Briti standard BS 8500:2 (2002) jagab taaskasutatava täiteaine kahte gruppi: taaskasutatud betooni agregaat ehk täiteaine (*recycled concrete aggregate, RCA*) ja taaskasutatud agregaat (*recycled aggregate, RA*). Erinevus on materjalide sisalduse osas, peene fraktsiooni kasutamise kohta piiranguid ei seata. Samuti ei ole piiranguid tiheduse ja veeimavuse osas. Peamiselt keskendutakse materjalisisaldusele. RA kasutamine on lubatud maksimaalse tugevusklassi C16/20 ja ainult väga vähenõudlike keskkonnaklasside puhul. RCA kasutamine on lubatud kuni tugevusklassi C40/50 ja ka keskkonnaklasside puhul on piiranguid vähem. Kasutada on lubatud kuni 20% jämeda täiteaine hulgast. (Goncalves, 2007)

1.12.3. Holland

Hollandis on kasutusel standard NEN-5905 (2005), lubab kasutada taaskasutatud täiteainet osakaaluga kuni 20% kogu täiteaine hulgast. Sealjuures on lubatud kasutada vaid jämetäitematerjale ja juhul kui materjali betooni ja sidumata täiteaine osakeste protsent on suurem kui 90%. (Plaza, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2021)

1.12.4. Belgia

Standard PTV 406 (2003) reguleerib taaskasutatud täiteaine kompositsiooni, mida tohib kasutada betooni tootmisel. Täiteaine jaotatakse kolme klassi: betoonist valmistatud, müüritisest valmistatud ja nende kahe segu. (Goncalves, 2007)

Standard NBN EN 12620 (2008) defineerib nõuded betooni täiteainele, sealhulgas ka taaskasutatud täiteainele. Lisaks on Belgias kasutusel betooni standard NBN B15-001 (2018), mis on rahvuslik lisa EN 206-1-le. Standard lubab 20% taaskasutatud täiteaine kasutamist. Keskkonnaklassidest on lubatud vaid X0 ja XC1. Maksimaalne tugevusklass on C25/30. (Vyncke & Vrijders, 2010)

1.12.5. Šveits

Šveitsis kasutatakse standardit OT 70085 (2006). Dokument võimaldab küllalt laia taaskasutatud täiteaine kasutamist. Lubatud on kuni 20% taaskasutatud täiteaine sisaldus, mille puhul ei ole projekteerimise osas mingeid muutusi tavapärase betooniga. Samuti lubatakse valmistada ka suure taaskasutatud täiteaine sisaldusega betooni, mille puhul on lubatud sisaldus kuni 100%. Sel juhul lisatakse betooni omadustele mitmeid parandustegureid. (Goncalves, 2007)

Dokument MB-2030 (2010) jagab taaskasutatud täiteained kolme klassi. RCA1 sisaldab <25% betooniosakesi, >75% sidumata täiteainet, <5% muid müüritisematerjale ja <1% asfaltiosakesi. Kasutada võib vaid jämetäitematerjali, maksimaalne asendusprotsent on 100% ning tugevusklassi ei piirata. (Plaza, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2021)

1.12.6. Portugal

Portugalis on LNEC (National Laboratory of Civil Engineering) välja töötatud standard E 471 „Juhised taaskasutatud jämeda täiteaine ning hüdrauliliste sideaine kasutamiseks betoonis“. Standardis pannakse paika kasutusreeglid ning nõuded täiteainele. Täiteaine on jaotatud kolme klassi - ARB1 ja ARB2 on taaskasutatud betoonist agregaadid ja ARC on betoonist ja müüritisest valmistatud agregaat. ARC on lubatud kasutada vaid mittekandvates elementides. ARB1 ja ARB2 on võimalik ka kandevelementides kasutada. (Goncalves, 2007)

Täiteainet võib asendada 25% ARB1 ja 20% ARB2 puhul. Maksimaalsed tugevusklassid on C40/50 ARB1 ja C35/45 ARB2 puhul. ARB1 ja ARB2 kasutus on lubatud keskkonnaklassides X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1. Lisaks peab täiteaine vastama mitmetele Euroopa standarditele EN 933-1, EN 933-11, EN 933-3, EN 1097-2, EN 1097-6, EN-1744-5, EN 1744-1, EN 1744-6, EN 12457-4. (LNEC-E 471, 2009)

1.12.7. Jaapan

Jaapanis on kasutusel standardid JIS A5021 (2011), JIS A5022 (2018), JIS A5023 (2018). Taaskasutatav täiteaine on jaotatud kolme gruppi. Klass H on taaskasutatud agregaat, mis on toodetud keerulisema tootmismetoodikaga ning on omadustelt võrreldav loodusliku täiteainega. Seetõttu ei ole ka piiratud klass H täiteaine kasutusvõimalusi. Klass M ja klass L on täiteained, mis toodetud lihtsamaid ja odavamaid meetodeid kasutades. Seetõttu sisaldavad klassid M ja L suurel hulgal kinnitunud tsemendiosakesi. Klass M puhul on sellest toodetud betooni suurim lubatud nominaalne tugevus 36 kN ja koonuse vajum 18 cm. Klassi L puhul on need näitajad 24 kN, infrastruktuuri puhul koonuse vajum 10 cm ja hoonete puhul 18 cm. Klass L on lubatud kasutada vaid vähenõudlikes keskkondades ja madala tugevuse juures. Klass M kasutamine on lubatud juhtudel, kui puuduvad kuivamiskahanemise oht ning külmumise sulamise tsüklid. Lubatud on kasutada vaid klass H peentäitematerjale. (JSCE, 2010)

1.12.8. Itaalia

Itaalias määratleb taaskasutatud täiteaine kasutuse Ehituse tehniline standard (NTC 2008, 2008). Täiteaine on jaotatud kolme klassi. Esimese klassi puhul peab betooniosakeste ja sidumata täiteaine osakaal olema >95%. Kõigis klassides on lubatud ainult jämetäitematerjali kasutus. Esimese klassi materjali võib looduslikuga asendada kuni 30% C30/37 klassi ja 60% C25/30 puhul. Teist klassi taaskasutatud materjali võib kasutada kuni 15%, aga maksimaalne tugevusklass on C45/55. Kolmandat klassi täiteaine puhul on asendusprotsent kuni 100%, kandevkonstruktsioonides kasutamine lubatud ei ole. (Plaza, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2021)

1.12.9. Hispaania

Standardi EN 206 rahvuslik lisa Hispaanias jaotab taaskasutatud täiteaine kolme klassi. Täiteaine, mille asfaldi osakaal on <1% ja müüritise (tellised jms) osakaal <5%, kasutus on lubatud jämetäitematerjalina, asenduse protsendiga 20% ja kuni tugevusklassini C40/50. Täiteaine, milles on betooni ja sidumata täitematerjali osakeste protsent >95% ning mörtide ja asfaldi sisaldus sama väike kui eelmises klassis, on võimalik kasutada asendusprotsendiga kuni 50%, tugevusklassi ei piirata. Kolmandas klassis peab betooni ja sidumata täitematerjali protsent olema >70% ja müüritiste osakaal <30%, asfaldi

osakaal <5%. Asendusprotsent kuni 50% ja tugevusklass kuni C30/37. (Plaza, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2021)

1.12.10. Hiina

Standard GB/T 25177 (2010) lubab kasutada nii peen- kui ka jämetäitematerjale. Materjal jaotatakse kolme kvaliteediklassi. Esimese tüübi puhul on maksimaalne asendusprotsent 100% ja jämetäitematerjali puhul tugevusklassi ei piirata, peentäitematerjalil on see C40/50. Teise tüübi puhul on asendusprotsent 30%. Jämetäitematerjalil tugevusklass kuni C40/50 ja peenmaterjalil C25/30. Kolmandas tüübis maksimaalne asendusprotsent samuti 30%. Tugevusklass jämetäitematerjalil kuni C25/30 ja peenet materjali kandevosades kasutada lubatud ei ole. (Plaza, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2021)

1.12.11. Eesti

Standard EVS-EN 206:2014 (2014) toob välja nõuded taaskasutatud täitematerjalile. Standard lubab betoonis kasutada taaskasutatud täiteaineid, mis on vastavuses standardiga Betooni täitematerjalid EN 12620:2002 ja vastavad EVS-EN 206-s antud piirväärtustele. EN 12620:2002 määratleb nõuded taaskasutatud täitematerjalidele, mille tihedus on vahemikus 1500 kuni 2000 kg/m³. (EVS-EN 12620:2005, 2005) Lisaks annab EVS-EN 206:2014 nõuded taaskasutatava täitematerjali omadustele, lubatava maksimaalse asendusprotsendi erinevates keskkonnaklassides. Taaskasutatava jämetäitematerjali diameeter $d \geq 4$ mm. Omadused, mis peavad vastama EN 12620:2002-le on peenosiste sisaldus, plaatsustegur, purunemiskindlus, terade kuivtihedus, veeimavus, materjali erinevate komponentide hulk, vees lahustuvate sulfaatide sisaldus, happes lahustuvate kloriidide sisaldus, mõju tardumise algusele. Standard jagab täiteained lisaks kahte klassi. Tuntud allikast pärinevad A-tüüpi taaskasutatavaid materjale võib kasutada nende keskkonnaklasside puhul, millele esialgne betoon on projekteeritud. Maksimaalne asendusprotsent on 30%. Tüüp B agregate ei tohiks kasutada betoonides, mille tugevusklass on >C30/37. Taaskasutatud täiteaineid on lubatud kasutada keskkonnaklassides X0 asendusega: tüüp A 50%, tüüp B 50%, XC1, XC2 asendusega vastavalt 30% ja 20%, XC3, XC4, XF1, XA1, XD1 asendusega 30% ja 0%. Teistes keskkonnaklassides pole taaskasutatud täiteaine kasutamine lubatud. (EVS-206:2014, 2014)

1.13. Nõuded taaskasutatud jämetäiteainele Eestis

Standardis EVS-EN 206:2014 on välja toodud soovitusel taaskasutatava jämetäitematerjali kohta. Nõuded kehtivad materjalile, mille osakese suurus on >4mm. Materjal jaotatakse kahte klassi. Tüübi A ehk kõrgema kvaliteedi materjali puhul on nõutud kuivtihedus >2100 kg/m³. Tüübi B puhul on kuivtiheduse minimaalseks suuruseks >1700 kg/m³.

Lisaks on määratletud nõutav komponentide sisaldus. Tüüp A peaks sisaldama vähemalt 90% betooni ja 95% betooni ja sidumata täitematerjali. Savist kivimaterjalide, silikaatmüüritise, poorbetooni sisaldus peaks olema väiksem kui 10%, bituumenmaterjalide sisaldus <1%, ujuva materjali, näiteks puidu ja paberi sisaldus <2 cm²/kg, muude materjalide, nagu savi, muld, metallid, plast, kips, klaas sisaldus <1%. Tüüp B puhul peab betooni sisaldus olema >50%, betooni ja sidumata täitematerjali sisaldus >70%. Savist kivimaterjali, silikaatmüüritise, poorbetooni sisaldus <30%, bituumenmaterjali <5%, ujuvmaterjali <2 cm²/kg, muu materjali sisaldus <2% kogusest. (EVS-206:2014, 2014)

Samuti on määratletud plaatsustegur, mis iseloomustab materjali tera kuju. See määratakse standardi EN 933-3 järgi. Plaatsusteguri määramise katse koosneb kahest sõelumisest. Esmalt jaotatakse proov erinevateks fraktsioonideks d/D. Seejärel sõelutakse iga fraktsioon uuesti D/2-laiuste paralleelsete piludega varbsõeltel. Üldine plaatsustegur avaldatakse kui kõiki varbsõelu läbinud terade summaarne mass protsentides katsetatud materjalikoguse üldisest kuivast massist. (EVS-EN 933-3, 2012). Plaatsusteguri väärtus peaks olema <F_{I50}. (EVS-EN 12620:2005, 2005)

Purunemiskindlust iseloomustatakse enamasti Los Angelese teguriga. Täitematerjali proov pööratakse trumlis koos teraskuulidega. Pärast seda määratakse materjali jääk 1,6mm avadega sõelal. Kaalutakse sõelale jäänud materjali mass ja arvutatakse selle abil Los Angelese tegur. (EVS-EN 1097-2:2020, 2020) Los Angelese tegur peab olema <LA₅₀. (EVS-EN 12620:2005, 2005)

Leitakse ka peenosiste sisaldus EN 933-1 järgi. Jämetäitematerjali puhul jääb peenosise läbimõõduga <0,063 mm maksimaalne massiprotsent 4% juurde. Lisaks tuleb hinnata peenosise ohtlikkust. (EVS-EN 12620:2005, 2005)

Terade veeimavus määratakse standardi EN 1097-3 kohaselt ja esitatakse deklareeritud väärtusena.

Vees lahustuvate sulfaatide sisaldus määratakse standardi EN 1744-1 kohaselt. Betoonisegus kasutatava materjali puhul peab selle väärtus massiprotsentides olema <0,2. (EVS-EN 12620:2005, 2005)

Happes lahustuvate kloriidide sisaldus määratakse standardi EN 1744-1 abil ning esitatakse deklareeritud väärtusena. (EVS-EN 12620:2005, 2005)

Täitematerjalis sisalduvate ainete mõju tardumise algusele hinnatakse vastavalt standardile 1744-1. Nende ainete sisaldus peab olema selline, et katsekehade tardumisaeg ei pikeneks rohkem kui 120 min ja katsekehade 28-päevane survetugevus ei väheneks rohkem kui 20%. (EVS-EN 12620:2005, 2005)

2. KÜSIMUSTIK BETOONIJÄÄTMETE UTILISEERIMISEST

Magistritöö käigus viidi läbi küsitlused nii ehitusettevõtete (grupp 1) kui ka betooni lammutuse, purustamise ja käitlemisega tegelevate ettevõtete hulgas (grupp 2). Küsitluse eesmärgiks on kaardistada hetkeolukorda ning saada ülevaade betooni taaskasutuse võimalustest Eestis.

2.1. Grupp 1 – Küsimustik ehitusettevõtetele

Grupp 1 puhul saadeti 11 küsimusest koosnev küsimustik kokku 15-le ehituse peatöövõtuga tegelevale firmale. Küsimused on välja toodud tabelis 2.1. Vastuseid saadi viielt ettevõttelt. Kõigi vastanud ettevõtete platsidel tegeletakse ka ehitusjäätmete sorteerimisega. Enamasti, kui kogused on piisavalt suured, tellitakse ka vastav prügikonteiner. Kuna erinevate materjalide vastuvõtul on erinevad hinnad ning segaprügi vastu võtmine on enamasti kallim, on platsil sorteerimine mõistlik. Betoonijäätmete eraldi käitlemise puhul oleneb palju kogustest. Väikeste koguste puhul on välja toodud, et seda kasutatakse platsil täiteks või lisatakse segaprügisse. Betoonimiksritest üle jääv betoon kallatakse maha või saadetakse tagasi tehasesse. Suuremate betoonhoonete lammutamise puhul tellitakse kohale betoonipurusti ning betoonijäätmed purustatakse killustikuks. Killustikku kasutatakse näiteks platsil täitena teede ja põrandate all või transporditakse jäätmekäitlusettevõttesse. Betoonkillustiku platsil uuesti kasutamine on igati mõistlik, sest hoitakse kokku nii transpordilt kui ka uue täiteaine pealt. Sealjuures peab saadav killustik olema piisavalt puhas ja vastama nõuetele. Betoonijäätmetest toodetava killustiku peamiste kasutusvõimalustena toodi välja kasutamist teede, platside ja põrandate alustes ning täitematerjalina. Uues betoonsegus kasutamise osas leiti, et sel oleks tulevikku juhul, kui suudetakse saavutada looduslike täitematerjalidega võrdne kvaliteet ja hind. Samuti toodi välja, et ilmselt on kasutada võimalik ainult vähenõudlikes ehitise osades ning mitte kandekonstruktsioonides. Viiest vastanust neli leidsid, et betoonijäätmeid võiks rohkem väärindada. Lisas 1, tabelis L 1.1 on välja toodud ehitusettevõtetelt saadud vastused.

Tabel 2.1 Ehitusettevõtetele saadetud küsimustik

1.	Kas teie ehitusplatsidel toimub jäätmete sorteerimist? Kui jah, siis millisteks sortimentideks jaotatakse?
2.	Kas betoon eraldatakse muudest ehitusjäätmetest?
3.	Kui tihedalt puutute kokku oma ehitusplatsidel betoonhoonete lammutamise ja betoonijäätmetega?
4.	Kuidas toimub Teie ehitusplatsidel betoonijäätmete käitlemine?
5.	Mida olete teinud näiteks krundil asuva lammutatava betoonhoonega? Kuidas toimus hoone purustamine? Milliseid masinaid kasutati?
6.	Kas jäätmeid kasutati mingil moel ka uuesti samal objektil?
7.	Kuhu jäätmed lõpuks toimetati?
8.	Kas platsil toimus ka betooni purustamine betoonikillustikuks? Kui jah siis mis ettevõtte seda teenust pakkus?
9.	Mis on Teie arvates betoonkillustiku peamised utiliseerimise võimalused? Milleks oleks võimalik betoonjääke veel kasutada?
10.	Kas olete kuulnud betoonkillustiku kasutamise võimalustest uues betoonisegus? Kas arvate, et Eestis oleks sel tulevikku?
11.	Kas leiate, et betoonijäätmeid peaks rohkem väärindama või on praegune süsteem toimiv ja piisav?

2.2. Grupp 2 – Küsimustik Betoonijäätmetega tegelevatele ettevõtetele

Grupp 2 puhul saadeti 14 küsimusest koosnev küsimustik kokku 24-le lammutuse või betooni purustamisega seotud firmale. Küsimustik on välja toodud tabelis 2.2. Vastuseid saadi viielt ettevõttelt. Leitakse, et betoonijäätmete peamiseks kasutusvõimaluseks on sellest betoonikillustiku tegemine. Seeläbi on killustikku võimalik kasutada nii teede, platside all kui ka ehituseaegsete teede rajamisel ning pinnase täiteks. Lisaks toodi välja kasutusvõimalusi torude all drenivate kihtide ja sadamate kaldakindlustuse alustes. Uues betoonisegus kasutamise kohta leiti, et kasutamine on teoreetiliselt mitte vastutusrikastes konstruktsioonides võimalik. Kuna peamiselt saadav materjal on nii puhtuselt kui ka fraktsioonilt väga erinev, ei ole see kasutusviis Eestis hetkel kasutusel. Samuti on praegu piisavalt ka turgu fraktsioonidele 0-70 ja 0-90 ning seetõttu ei ole killustiku puhastamisel ning sõelumisel erilist majanduslikku kasu. Üldiselt leiti, et betoonikillustiku uues betoonisegus kasutamisel on potentsiaali, kui suudetakse pakkuda

materjali, mis suudaks nii hinnalt kui kvaliteedilt konkureerida loodusliku killustikuga. Üks ettevõtte oli isegi uurinud koostöövõimaluste kohta betoonisegude tootjalt, aga kahjuks oli tootja loobunud. Viiest ettevõttest kolm leidsid, et Eestis oleks sel viisil betoonkillustiku kasutamisel tulevikku. Toodi välja, et selleks oleks vaja luua kvaliteetne ja sertifitseeritud toode, mis suudaks betooni hinda madalamaks viia. Peamiste probleemidena nähti materjali kõikuvat kvaliteeti, puhtust ning tugevusnäitajaid. Kuna praegu on toodetavale materjalile piisav nõudlus, ei ole uute kasutusvõimaluste leidmine esmatähtis. Sealjuures oleks vajalik ka betoonitootjate suurem huvi. Erinevate fraktsioonide koha pealt on pakutav valik küllaltki suur. Neli ettevõtet töid välja ka nende toodetavad fraktsioonid. Ühe ettevõtte puhul toodetakse ainult 0-70 fraktsiooni. Teiste puhul on toodetavaid fraktsioone rohkem. On olemas vastav tehnika ning vastavalt vajadusele on võimalik eraldada 0-4, 0-16, 0-32, 0-90, 4-16, 16-32, 32-64 ja 64-100 fraktsioone. Purustamine toimub enamasti laoplatsil või tehases, mõnel juhul ka platsil, aga see oleneb objektist. Enamasti on tekitatava müra ja tolmu tõttu platsil purustamine raskendatud. Saadava materjali puhastamisel kasutatakse metalli eemaldamiseks näiteks magneteid, muude kõrvalproduktide puhul suurem osa ekskavaatori ja väiksemad käsitsi. Ühe ettevõtte poolt toodi välja, et kuni on olemas turgu puhastamata materjalile, ei ole puhastamine vajalik. Seeläbi tõuseks märgatavalt hind ning peaks konkureerima karjäärast saadava materjaliga ning seega ei ole see majanduslikult mõistlik. Ühel ettevõttel on olemas ka sertifikaat purustatud taaskasutatava täitematerjali kasutamiseks teedehituses hüdrauliliselt seotud ja sidumata täitematerjalina. Betoonijätmete suurema väärindamise osas arvati, et pigem peaks seda tegema. Samas leiti, et kuna hetkel toodetavale materjalile on nõudlus olemas ning karjääriskillustikuga konkureerimine on keeruline, ei olda väärindamise osas väga optimistlikud. Leiti, et vaja oleks ka klientide suuremat huvi anda üle lisandita betoonijätmeid, et oleks võimalik ilma liigsete kuludeta saada parema kvaliteediga purustatud materjal. Lisa 1 tabelis L 1.2 on toodud saadud vastused.

Tabel 2.2 Betoonjätmetega tegelevatele ettevõtetele saadetud küsimustik

1.	Mis on Teie ettevõtte peamised tegevusalad?
2.	Kuidas olete seotud betoonkillustikuga? Kas näiteks tegelete betoonjääkide lammutamise, purustamise, kokkuostmise, müügi või muu taolisega?
3.	Milllega peab arvestama lammutussaaduste kokku ostmisel ja turustamisel? Kas on ka piiranguid müüdava materjali osas? Milliseid?
4.	Mis on Teie arvates betoonkillustiku peamised utiliseerimise võimalused? Milleks oleks veel võimalik betoonijäake kasutada?
5.	Kus on võimalik Teie betoonkillustikku kasutada? Kas on/oleks võimalik seda uues betoonisegus kasutada, et vähendada uue täiteaine kasutamist?
6.	Kui ei, siis kas olete sellest ideest kuulnud ja/ või sellele mõelnud?
7.	Kas arvate, et Eestis oleks sellel tulevikku?
8.	Millised on Teie arvates betoonkillustiku uues segus kasutamise peamised probleemid ja takistused?
9.	Kas leiate, et kvaliteetsema purustatud materjali saamisel oleks ka kasutusvõimalusi rohkem ehk kas teie arvates oleks sellele ka nõudlust või huvitatud osapooli?
10.	Kui tegelete betooni purustamisega, siis mis on Teie ettevõtte kasutatav betooni purustamisprotsess ja milliseid masinaid kasutatakse? Millised on saadused, fraktsioonid?
11.	Kas purustamine toimub objektil või tehases?
12.	Kas ja mil moel toimub purustatud betooni puhastamine muudest kõrvalproduktidest?
13.	Kas Teie ettevõtte toodangule on antud ka kvaliteedisertifikaate? Kui jah, siis milliseid?
14.	Kas leiate, et betoonijätmeid peaks rohkem väärima või on praegune süsteem toimiv ja piisav?

3. BETOONIST TOODETUD TÄITEAINE OMADUSTE KATSELINE UURIMINE

3.1. Ülevaade

Lõputöö katselises osas uuriti esmalt betoonist toodetud materjali omadusi ning võrreldi neid looduslike täitematerjalidega. Katsete eesmärk oli uurida taaskasutatud täiteaine füüsikalisi ja mehaanilisi omadusi ning kasutamise võimalusi uues betoonisegus. Seejärel toodeti saadud taaskasutatud materjali kasutades betoonkatsekehad ning uuriti nende survetugevusi. Saadud tulemusi võrreldi kontrollkatsekehadega, mille puhul taaskasutatud täiteaineid ei kasutatud. Katsed viidi läbi TalTech Tartu kolledži laboris.

3.1.1. Katsetatav materjal

Katsetes kasutatav purustatud betoon saadi ettevõttest Karimek. Saadud fraktsioon oli määratletud 0-32mm (joonis 3.1). Materjali päritolu ja betooni tugevusomaduste kohta enne purustamist infot ei olnud.



Joonis 3.1 Purustatud betoon, fraktsioon 0-32mm

Materjal kuivatati kuivatuskapis 110°C juures ning eraldati sõelade abil 16-32, 8-16, 4-8 ja 0-4 fraktsioonideks (joonis 3.2-3.5). Sõelumiseks kasutati CISA BA 300 N sõelumismasinat. Saagise osakaalud protsentides on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1 Saagise fraktsioonide protsentuaalne jaotuvus.

Fraktsioon, mm	Mass, g	Protsent
16-32	1005,75	10,2%
8-16	2278,86	23,3%
4-8	1896,8	19,4%
0-4	4612,8	47,1%
	9794,23	

Tabelist 3.1 selgub, et kõige suurem osakaal saagisest oli fraktsioonil 0-4. Seejärel uuriti 0-4 ja 8-16, kui kõige suurema massiprotsendiga fraktsioonide füüsikalisi omadusi. 0-4 mm fraktsiooni puhul uuriti selle puiste- ja näivtihedust, tühiklikkust, terastikulist koostist, veesisaldust ning huumuse sisaldust. 8-16 mm killustiku puhul uuriti selle puiste-, näivtihedust, tühiklikkust, plaatjate ning nõeljate terade hulka, veeimavust ja komponentide protsentuaalset sisaldust. Seejärel viidi läbi samad katsed loodusliku liiva 0-4mm ja killustikuga 8-16mm (joonis 3.6;3.7). Tulemusi võrreldi.



Joonis 3.2 Purustatud betoon, fraktsioon 16-32mm



Joonis 3.3 Purustatud betoon, fraktsioon 8-16mm



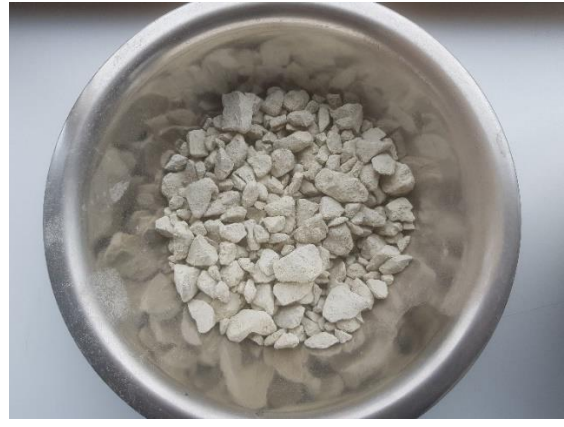
Joonis 3.4 Purustatud betoon, fraktsioon 4-8mm



Joonis 3.5 Purustatud betoon, fraktsioon 0-4mm



Joonis 3.6 Looduslik liiv, fraktsioon 0-4mm



Joonis 3.7 Looduslik killustik, fraktsioon 8-16mm

3.2. Liiva katsetamine

3.2.1. Liiva puistetihedus

Taaskasutatud liiva puistetiheduse määramiseks kasutati standardit EVS-EN 1097-3:2000. Täitematerjali proovid kuivatati temperatuuril 110°C. Seejärel eraldati sõelumise teel fraktsioon 0-4 mm. Puistetiheduse määramiseks kasutati katseanumat mahuga 2 liitrit. Anum kaaluti ning seejärel täideti liivaga. Liigne liiv eemaldati üle anuma ääre metallist joonlauaga. Seejärel katseanum kaaluti. Katset viidi läbi kolm korda. Iga proovi puistetihedus ρ_{0L} arvutati valemiga 3.1 ja lõplik puistetihedus esitati kolme katsetulemuse aritmeetilise keskmisena. (EVS-EN 1097-3, 2000)

$$\rho_{0L} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

ρ_{0L} - Puistetihedus, kg/m³

m_1 - Katseanuma mass, g

m_2 - Katseanuma ja katseproovi mass, g

V - Katseanuma maht cm^3

Taaskasutatud liiva puistetihedus:

1) Katse 1:

$$m_1 - 65,2 \text{ g}$$

$$m_2 - 2945,2 \text{ g}$$

$$V - 2000 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0L1} = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{2945,2 - 65,2}{2000} = 1,440 \text{ g/cm}^3 = 1440 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

2) Katse 2:

$$m_1 - 65,2 \text{ g}$$

$$m_2 - 2945,4 \text{ g}$$

$$V - 2000 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0L2} = \frac{2945,4 - 65,2}{2000} = 1,440 \text{ g/cm}^3 = 1440 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

3) Katse 3:

$$m_1 - 65,2 \text{ g}$$

$$m_2 - 2947,4 \text{ g}$$

$$V - 2000 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0L3} = \frac{2947,4 - 65,2}{2000} = 1,441 \text{ g/cm}^3 = 1441 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

4) Puistetiheduste aritmeetiline keskmine, valem 3.2.

$$\rho_{0L} = \frac{\rho_{0L1} + \rho_{0L2} + \rho_{0L3}}{3} = \frac{1440 + 1440 + 1441}{3} = 1440,3 \text{ kg/m}^3 \quad (3.2)$$

Loodusliku liiva puistetihedus:

1) Katse 1:

$$m_1 - 65,2 \text{ g}$$

$$m_2 - 3464,3 \text{ g}$$

$$V - 2000 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0L1} = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{3464,3 - 65,2}{2000} = 1,700 \text{ g/cm}^3 = 1700 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

2) Katse 2:

$$m_1 - 65,2 \text{ g}$$

$$m_2 - 3455,5 \text{ g}$$

$$V - 2000 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0L2} = \frac{3455,5 - 65,2}{2000} = 1,695 \text{ g/cm}^3 = 1695 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

3) Katse 3:

$$m_1 - 65,2 \text{ g}$$

$$m_2 - 3452,4 \text{ g}$$

$$V - 2000 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0L3} = \frac{3452,4 - 65,2}{2000} = 1,694 \text{ g/cm}^3 = 1694 \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

4) Puistetiheduste aritmeetiline keskmine, valem 3.2.

$$\rho_{0L} = \frac{\rho_{0L1} + \rho_{0L2} + \rho_{0L3}}{3} = \frac{1700 + 1695 + 1694}{3} = 1696,3 \text{ kg/m}^3 \quad (3.2)$$

Katsetest selgus, et loodusliku liiva puistetihedus on suurem. Taaskasutatud liiv sisaldab looduslikule materjalile lisaks ka muid koostisosi ning nende koostisosade tihedus on madalam.

3.2.2. Liiva näivtihedus

Liiva näivtiheduse leidmisel on kasutatud Egge Haiba koostatud TTÜ Tartu kolledži Ehitusmaterjalide õppeaine õppematerjale ning standardit (EVS-EN 1097-6:2013, 2013). Näivtiheduse leidmiseks kaaluti 200 g kuivatatud liiva. Liiv puistati mensuuri, kuhu on eelnevalt valatud teataval hulgal vett. Liivaterade ruumala määrati mensuuri lugemite vahena. Liiva näivtihedus ρ_L arvutati valemiga 3.3. Katset viidi läbi kolm korda ning seejärel leiti kolme katse keskmine.

$$\rho_L = \frac{m}{V_2 - V_1} * 1000 \quad (3.3)$$

ρ_L – Terade näivtihedus, kg/m³

m – Proovi mass, g

V_1 – Vee ruumala mensuuris, cm³

V_2 – Vee ja liiva ruumala mensuuris, cm³

Taaskasutatud liiva näivtihedus:

1) Katse 1:

V_1 – 250 cm³

m – 200 g

V_2 – 340 cm³

$$\rho_L = \frac{m}{V_2 - V_1} * 1000 = \frac{200}{340 - 250} * 1000 = 2222 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

2) Katse 2:

V_1 – 300 cm³

m – 200,13 g

$$V_2 - 390 \text{ cm}^3$$

$$\rho_L = \frac{200,13}{390 - 300} * 1000 = 2224 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

2) Katse 3:

$$V_1 - 400 \text{ cm}^3$$

$$m - 200,33 \text{ g}$$

$$V_2 - 490 \text{ cm}^3$$

$$\rho_L = \frac{200,33}{490 - 400} * 1000 = 2226 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

5) Näivtiheduste aritmeetiline keskmine, valem 3.4.

$$\rho_L = \frac{\rho_{L1} + \rho_{L2} + \rho_{L3}}{3} = \frac{2222 + 2224 + 2226}{3} = 2224 \text{ kg/m}^3 \quad (3.4)$$

Loodusliku liiva näivtihedus:

1) Katse 1:

$$V_1 - 300 \text{ cm}^3$$

$$m - 200,11 \text{ g}$$

$$V_2 - 382 \text{ cm}^3$$

$$\rho_L = \frac{200,11}{382 - 300} * 1000 = 2440 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

2) Katse 2:

$$V_1 - 350 \text{ cm}^3$$

m – 200,27 g

V₂ – 430 cm³

$$\rho_L = \frac{200,27}{430 - 350} * 1000 = 2503 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

2) Katse 3:

V₁ – 400 cm³

m – 200,46 g

V₂ – 480 cm³

$$\rho_L = \frac{200,46}{480 - 400} * 1000 = 2506 \text{ kg/m}^3 \quad (3.3)$$

6) Näivtiheduste aritmeetiline keskmine, valem 3.4.

$$\rho_L = \frac{\rho_{L1} + \rho_{L2} + \rho_{L3}}{3} = \frac{2440 + 2503 + 2506}{3} = 2483 \text{ kg/m}^3 \quad (3.4)$$

Selgus, et loodusliku liiva näivtihedus on üsna lähedal taaskasutatud liiva näivtihedusele. Sarnaselt puistetihedusele on taaskasutatud liiva näivtihedus siiski madalam.

3.2.3. Liiva tühiklikkus

Liiva tühiklikkuse leidmisel on kasutatud standardi EVS-EN 1097-3 põhjal (2000) Egge Haiba poolt koostatud TTÜ Tartu kolledži Ehitusmaterjalide õppeaine õppematerjale. Materjali tühiklikkus arvutatakse valemiga 3.5:

$$p_L = 1 - \frac{\rho_{0L}}{\rho_L} * 100 \quad (3.5)$$

ρ_{0L} - Puistetihedus, kg/m³

ρ_L – Terade näivtihedus, kg/m³

p_L – Tühiklikkus protsentides

Taaskasutatud liiva tühiklikkus:

$$p_L = 1 - \frac{\rho_{0L}}{\rho_L} * 100 = 1 - \frac{1440}{2224} * 100 = 35,25 \% \quad (3.5)$$

Loodusliku liiva tühiklikkus:

$$p_L = 1 - \frac{\rho_{0L}}{\rho_L} * 100 = 1 - \frac{1696}{2483} * 100 = 31,70 \% \quad (3.5)$$

3.2.4. Liiva terastikuline koostis

Liiva terastikulise koostise määramiseks viidi läbi sõelanalüüs vastavalt standardile EVS-EN 933-1:2012. Materjal jaotatati sõeltekomplekti abil mitmeks vähenevate mõõtmetega fraktsiooniks. Igale sõelale jäänud osakeste massi võrreldi algmassiga ning selle abil koostati sõelgraafik. Katses kasutati kuivisõelumismeetodit. Proovi suuruseks 4mm fraktsiooni juures valiti 2 kg. Kasutati sõelasid 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 mm. Sõelumist teostati 6 minutit. Seejärel eraldati sõelad ning iga sõela raputati paberi kohal ning lisati seda läbinud materjal järgmisele sõelale. Kaaluti eraldi sõeltele jäänud materjal, kaasa arvatud kõiki sõelu läbinud materjal. Seejärel arvutati valemite 3.6; 3.7; 3.8 abil erinevate fraktsioonide osakaalud. Sõelkõver koostati nii taaskasutatud liivale kui ka looduslikule liivale. Tulemused on esitatud tabelis 3.2 ja 3.3. Koostatud sõelgraafikud on näidatud joonisel 3.8.

$$a_i = \frac{R_i}{M} * 100\% \quad (3.6)$$

a_i – Osajääk sõelal, %

R_i – Jääk sõelal, g

M – Kogu proovi mass, g

$$A_i = a_{4,0} + \dots + a_i \quad (3.7)$$

A_i – Täisjääk sõelal, g

a_i – Osajääk sõelal, %

$$L_i = 100 - a_i \quad (3.8)$$

L_i – Kogu sõela läbinud materjal, g

a_i – Osajääk sõelal, %

Tabel 3.2 Sõelutud taaskasutatud materjali osakaalud

Sõela nr	Jääk sõelal R_i , g	Osajääk a_i , %	Kogujääk A_i , %	Läbinud L_i , %
4	0.5	0.03	0.03	99.97
2	354.1	17.71	17.73	82.27
1	337.7	16.89	34.62	65.38
0.5	327.3	16.37	50.98	49.02
0.25	374.9	18.75	69.73	30.27
0.125	367.5	18.38	88.11	11.89
0.063	147.2	7.36	95.47	4.53
Kokku R_i	1909.3	95.47		
P	87.1	4.36		

Tabel 3.3 Sõelatud loodusliku materjali osakaalud

Sõela nr	Jääk sõelal Ri, g	Osajääk ai, %	Kogujääk A, %	Läbinud Li, %
4	74.8	3.74	3.74	96.26
2	119.7	5.99	9.72	90.28
1	273.5	13.68	23.40	76.60
0.5	585.6	29.28	52.68	47.32
0.25	673.6	33.68	86.36	13.64
0.125	230.3	11.52	97.88	2.12
0.063	25.1	1.25	99.13	0.87
Kokku Ri	1982.6	99.13		
P	8.9	0.44		

Peensusmooduli järgi jaotatakse liivasid:

2,5 < FM – Jäme

2,0 < FM < 2,5 – Keskmine

1,5 < FM < 2,0 – Peen

Materjali peensusmoodul leiti valemiga 3.9.

$$FM = \frac{A_{4,0} + A_{2,0} + A_{1,0} + A_{0,5} + A_{0,25} + A_{0,125}}{100} \quad (3.9)$$

A_i – Täisjääk sõelal, g

FM – Peensusmoodul

Taaskasutatud materjali peensusmoodul.

$$FM = \frac{A_{4,0} + A_{2,0} + A_{1,0} + A_{0,5} + A_{0,25} + A_{0,125}}{100} \quad (3.9)$$

$$= \frac{0,03 + 17,73 + 34,62 + 50,98 + 69,73 + 88,11}{100} = 2,61$$

Loodusliku liiva peensusmoodul.

$$\begin{aligned} FM &= \frac{A_{4,0} + A_{2,0} + A_{1,0} + A_{0,5} + A_{0,25} + A_{0,125}}{100} & (3.9) \\ &= \frac{3,74 + 9,72 + 23,40 + 52,68 + 86,36 + 97,88}{100} = 2,74 \end{aligned}$$

Peenosade fraktsioon ehk <0,063 fraktsiooni osa betooni valmistamiseks sobiliku liiva puhul ei tohi olla suurem kui 4%. Peenosise protsent leiti valemiga 3.10.

$$f = \frac{P}{M} * 100\% \quad (3.10)$$

f – Peenosise protsent

P – Kõiki sõelu läbinud materjali mass, g

M – Kogu proovi mass, g

Taaskasutatud materjali peenosise protsent.

$$f = \frac{P}{M} * 100\% = \frac{87,1}{2000} * 100 = 4,36\% \quad (3.10)$$

Loodusliku materjali peenosise protsent.

$$f = \frac{P}{M} * 100\% = \frac{8,9}{2000} * 100 = 0,45\% \quad (3.10)$$

Tulemuste usaldusväarsust kontrolliti valemiga 3.11. Tulemus peab olema väiksem 1%.

$$\left(1 - \frac{\sum R_i + P}{M}\right) * 100\% \quad (3.11)$$

R_i – Jääk sõelal, g

P – kõiki sõelu läbinud materjali mass, g

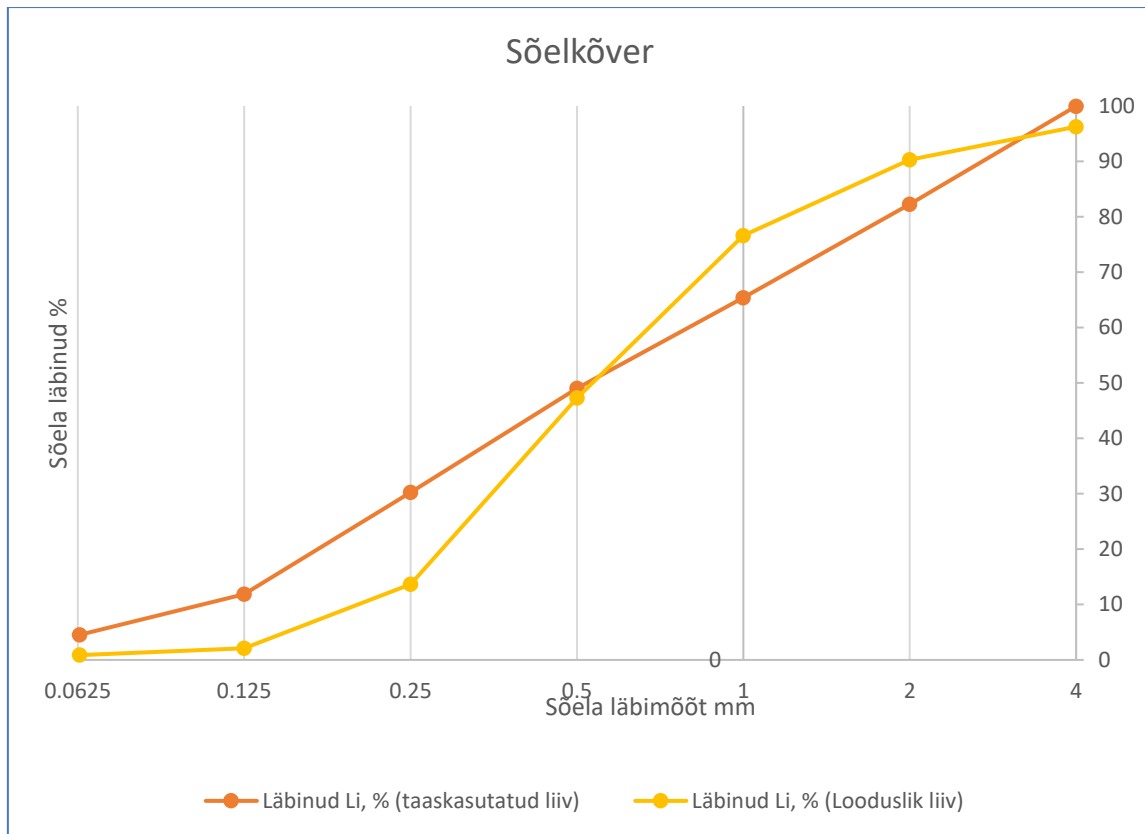
M – Kogu proovi mass, g

Taaskasutatud liiva tulemuste kontroll.

$$\left(1 - \frac{\sum R_i + P}{M}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{1909,3 + 87,1}{2000}\right) * 100 = 0,18\% < 1\% \quad (3.11)$$

Loodusliku liiva tulemuste kontroll.

$$\left(1 - \frac{\sum R_i + P}{M}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{1982,6 + 8,9}{2000}\right) * 100 = 0,425\% < 1\% \quad (3.11)$$



Joonis 3.8 Võrdlus betooni valmistamiseks sobiva liiva sõelkõveraga

3.2.5. Taaskasutatud liiva veesisalduse määramine

Liiva veesisalduse määramiseks võeti proov, mis kaaluti ning seejärel kuivatati 110 °C juures 2 ööpäeva kuni konstantse massini. Seejärel kaaluti proov uuesti ning leiti valemiga 3.12 liiva veesisaldus. Katse viidi läbi 3 prooviga ning tulemused on esitatud tabelis 3.4. (EVS-EN 1097-5, 2008)

$$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} * 100\% \quad (3.12)$$

M_1 – Katseproovi mass, g

M_3 – Kuivatatud katseproovi konstantne mass, g

w – Veesisaldus, %

Tabel 3.4 Taaskasutatud liiva veesisaldus

Algne kaal, g	Lõplik kaal, g	Veesisaldus, %
3180.8	2967.7	7.2
1687.5	1579.7	6.8
1489.9	1391.3	7.1
Keskmine veesisaldus		7.0

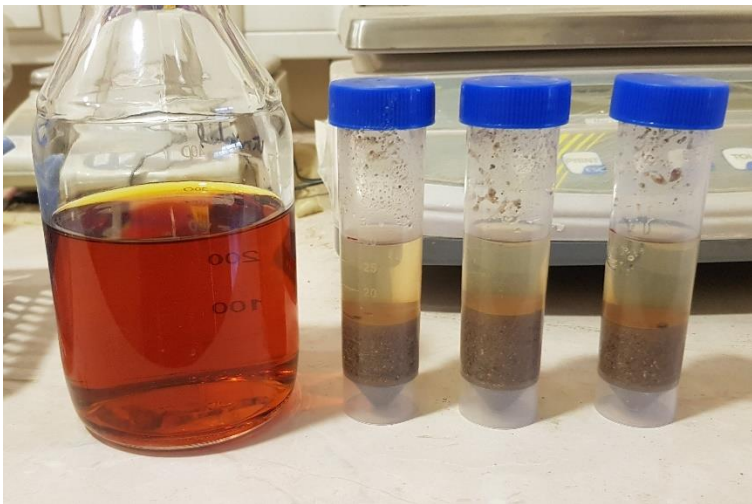
3.2.6. Huumusesisaldus

Huumuse sisalduse määramise põhimõtte seisneb selles, et huumus annab NaOH-ga reageerides tumeda värvuse. Huumuse sisalduse määramiseks valati 3%-line naatriumhüdroksiidi (NaOH) lahus klaaspudelisse umbes 80 mm kõrguseni. Lisati osa katseproovist, kuni lahuse ja proovi kõrgus on 120 mm. Proovi loksutati. Seejärel pudel suleti ja jäeti seisma 24 tunniks. 24 tunni pärast võrreldi lahuse värvust standardlahuse värvusega. Standardlahus saadakse, kui lahustada 45,0g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ja 5,50g $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 279,5 grammis vees, millele on lisatud 1ml kontsentreeritud HCl. (EVS-EN 1744-1:2010+A1:2012, 2013)

Katse viidi läbi kahe taaskasutatud ja ühe loodusliku liivaga. Taaskasutatud liivadeks oli Karimekist pärit 0-90 fraktsioonist sõelutud liiv (proov 1) ning 0-32 fraktsioonist sõelutud liiv (proov 3). Looduslik liiv on proov 2. Kõik proovid sõeluti enne läbi 4 mm avadega sõela. Iga liivaga tehti kolm seeriat. Joonistel 3.9-3.11 on toodud, erinevate proovide värvused peale 24 tunni möödumist. Kõrval on näha standardlahust, millega võrdlemise põhjal määratakse, kas huumuse sisaldus proovis on liiga suur.



Joonis 3.9 Huumuse sisalduse määramine, proov 1



Joonis 3.10 Huumuse sisalduse määramine, proov 2



Joonis 3.11 Huumuse sisalduse määramine, proov 3

Katse tulemusena selgus, et kõige tumedam oli proov 3 ehk taaskasutatud liiv, mis sõelutud fraktsioonist 0-32. Järgnes fraktsioonist 0-90 sõelutud taaskasutatud liiv ning kõige heledam oli looduslik liiv. Siiski olid kõik proovid tunduvalt heledamad kui standardlahus. Järelikult on taaskasutatud materjali huumuse sisaldus suurem kui looduslikul, kuid siiski vähene ning sobiv betooni valmistamiseks.

3.2.7. Katse tulemuste võrdlus

Liivaga läbi viidud katsete tulemused on esitatud tabelis 3.5. Selgus, et taaskasutatud liiva tihedus on madalam. Märkatavalt suurem on peenosise sisaldus, samas peensusmoodul on madalam. Järelikult on taaskasutatud liivas rohkem nii peeneid kui ka suuremaid osakesi. Huumuse sisaldus oli mõlemal juhul piisavalt madal, aga loodusliku liiva proovides oli lahus siiski heledam ehk seal on siiski huumust vähem.

Tabel 3.5 Liivaga läbi viidud katsete tulemused

	Looduslik liiv	Taaskasutatud killustik
Puistetihedus, kg/m ³	1696.3	1440.3
Näivtihedus, kg/m ³	2483	2226
Tühiklikkus, %	31.7	35.25
Peenosise sisaldus, %	0.45	4.36
Peensusmoodul	2.74	2.61
Huumuse sisaldus	Heledam kui standardlahus	Heledam kui standardlahus

3.3. Killustiku füüsikaliste omaduste katseline uurimine

3.3.1. Killustiku puistetihedus

Taaskasutatud killustiku puistetiheduse määramiseks kasutati standardit EVS-EN 1097-3:2000. Täitematerjali proovid kuivatati temperatuuril 110°C. Seejärel eraldati sõelumise teel fraktsioon 8-16 mm. Puistetiheduse määramiseks kasutati katseanumat mahuga 5,6 liitrit. Anum kaaluti ning seejärel täideti killustikuga. Liigne killustik eemaldati üle anuma ääre metallist joonlauaga. Seejärel katseanum kaalutakse täpsusega 0,1%. Katset viiakse läbi kolm korda. Iga proovi puistetihedus ρ_b arvutatakse valemiga 3.13 ja puistetihedus esitatakse kolme katsetulemuse aritmeetilise keskmisena. (EVS-EN 1097-3, 2000)

$$\rho_{0K} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.13)$$

ρ_{0K} - Puistetihedus, kg/m³

m_1 - Katseanuma mass, g

m_2 - Katseanuma ja katseproovi mass, g

V - Katseanuma maht cm³

Taaskasutatud killustiku puistetihedus:

1) Katse 1:

m_1 - 198,9 g

m_2 - 7113,2 g

V - 5600 cm³

$$\rho_{0K1} = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{7113,2 - 198,9}{5600} = 1,235 \text{ g/cm}^3 = 1235 \text{ kg/m}^3 \quad (3.13)$$

2) Katse 2:

$$m_1 - 198,9 \text{ g}$$

$$m_2 - 7136,7 \text{ g}$$

$$V - 5600 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0K2} = \frac{7136,7 - 198,9}{5600} = 1,239 \text{ g/cm}^3 = 1239 \text{ kg/m}^3 \quad (3.13)$$

3) Katse 3:

$$m_1 - 198,9 \text{ g}$$

$$m_2 - 7167,7 \text{ g}$$

$$V - 5600 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0K3} = \frac{7167,7 - 198,9}{5600} = 1,244 \text{ g/cm}^3 = 1244 \text{ kg/m}^3 \quad (3.13)$$

4) Puistetiheduste aritmeetiline keskmine, valem 3.14.

$$\rho_{0K} = \frac{\rho_{0K1} + \rho_{0K2} + \rho_{0K3}}{3} = \frac{1235 + 1239 + 1244}{3} = 1239 \text{ kg/m}^3 \quad (3.14)$$

Loodusliku killustiku puistetihedus:

1) Katse 1:

$$m_1 - 198,9 \text{ g}$$

$$m_2 - 8405,8 \text{ g}$$

$$V - 5600 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0K1} = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{8405,8 - 198,9}{5600} = 1,466 \text{ g/cm}^3 = 1466 \text{ kg/m}^3 \quad (3.13)$$

2) Katse 2:

$$m_1 - 198,9 \text{ g}$$

$$m_2 - 8398,6 \text{ g}$$

$$V - 5600 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0K2} = \frac{8398,6 - 198,9}{5600} = 1,464 \text{ g/cm}^3 = 1464 \text{ kg/m}^3 \quad (3.13)$$

3) Katse 3:

$$m_1 - 198,9 \text{ g}$$

$$m_2 - 8377,6 \text{ g}$$

$$V - 5600 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{0K3} = \frac{8377,6 - 198,9}{5600} = 1,460 \text{ g/cm}^3 = 1460 \text{ kg/m}^3 \quad (3.13)$$

4) Puistetiheduste aritmeetiline keskmine, valem 3.14.

$$\rho_{0K} = \frac{\rho_{0K1} + \rho_{0K2} + \rho_{0K3}}{3} = \frac{1466 + 1464 + 1460}{3} = 1463,3 \text{ kg/m}^3 \quad (3.14)$$

3.3.2. Killustiku näivtihedus

Killustiku näivtiheduse leidmiseks kasutati standardi (EVS-EN 1097-6:2013, 2013) põhjal Mihkel Kiviste poolt koostatud Eesti Maaülikooli Ehitusmaterjalide laboratoorsete tööde juhendmaterjale. Kaalutakse 500 g kuivatatud killustikku. Killustik puistatakse mensuuri, kuhu on eelnevalt valatud teataval hulgal vett. Killustiku terade ruumala määratakse mensuuri lugemite vahena. Killustiku näivtihedus ρ_b arvutatakse valemiga 3.15. Standard EVS-EN 12620:2005 Betooni täitematerjalid peab sobivaks vahemikuks taaskasutatud täitematerjale, mille kuivtihedus on 1500-2000 kg/m³.

$$\rho_K = \frac{m}{V_2 - V_1} * 1000 \quad (3.15)$$

ρ_K – Terade näivtihedus

V_1 – Vee ruumala mensuuris

V_2 – Vee ja liiva ruumala mensuuris

Taaskasutatud killustiku näivtihedus:

1) Katse 1:

$$V_1 - 500 \text{ cm}^3$$

$$m - 500,4 \text{ g}$$

$$V_2 - 720 \text{ cm}^3$$

$$\rho_L = \frac{m}{V_2 - V_1} * 1000 = \frac{500,4}{720 - 500} * 1000 = 2275 \text{ kg/m}^3 \quad (3.15)$$

1) Katse 2:

$$V_1 - 560 \text{ cm}^3$$

$$m - 500,0 \text{ g}$$

$$V_2 - 780 \text{ cm}^3$$

$$\rho_L = \frac{500,0}{780 - 560} * 1000 = 2273 \text{ kg/m}^3 \quad (3.15)$$

1) Katse 3:

$$V_1 - 645 \text{ cm}^3$$

$$m - 500,47 \text{ g}$$

$$V_2 - 870 \text{ cm}^3$$

$$\rho_L = \frac{500,47}{870 - 645} * 1000 = 2224 \text{ kg/m}^3 \quad (3.15)$$

5) Näivtiheduse aritmeetiline keskmine, valem 3.16.

$$\rho_{0K} = \frac{\rho_{0K1} + \rho_{0K2} + \rho_{0K3}}{3} = \frac{2275 + 2273 + 2224}{3} = 2257,3 \text{ kg/m}^3 \quad (3.16)$$

Loodusliku killustiku näivtihedus:

1) Katse 1:

$V_1 - 510 \text{ cm}^3$

$m - 500,76 \text{ g}$

$V_2 - 715 \text{ cm}^3$

$$\rho_L = \frac{500,76}{715 - 510} * 1000 = 2443 \text{ kg/m}^3 \quad (3.15)$$

1) Katse 2:

$V_1 - 540 \text{ cm}^3$

$m - 500,47 \text{ g}$

$V_2 - 740 \text{ cm}^3$

$$\rho_L = \frac{500,47}{740 - 540} * 1000 = 2502 \text{ kg/m}^3 \quad (3.15)$$

1) Katse 3:

$V_1 - 585 \text{ cm}^3$

$m - 500,43 \text{ g}$

$V_2 - 790 \text{ cm}^3$

$$\rho_L = \frac{500,43}{790 - 585} * 1000 = 2441 \text{ kg/m}^3 \quad (3.15)$$

6) Näivtiheduse aritmeetiline keskmine, valem 3.16.

$$\rho_{0K} = \frac{\rho_{0K1} + \rho_{0K2} + \rho_{0K3}}{3} = \frac{2443 + 2502 + 2441}{3} = 2462 \text{ kg/m}^3 \quad (3.16)$$

3.3.3. Killustiku tühiklikkus

Materjali tühiklikkus arvutatakse valemiga 3.17. Killustiku tühiklikkuse leidmisel on kasutatud standardi EVS-EN 1097-3 (2000) põhjal Egge Haiba poolt koostatud TalTech Tartu kolledži Ehitusmaterjalide õppeaine õppematerjale.

$$p_K = 1 - \frac{\rho_{0K}}{\rho_K} * 100 \quad (3.17)$$

ρ_{0L} - Puistetihedus, kg/m^3

ρ_L - Terade näivtihedus, kg/m^3

p_L - Tühiklikkus protsentides

Taaskasutatud killustiku tühiklikkus:

$$p_K = 1 - \frac{\rho_{0K}}{\rho_K} * 100 = 1 - \frac{1239}{2257} * 100 = 45,0 \% \quad (3.17)$$

Loodusliku killustiku tühiklikkus:

$$p_K = 1 - \frac{\rho_{0K}}{\rho_K} * 100 = 1 - \frac{1463}{2462} * 100 = 40,6 \% \quad (3.17)$$

3.3.4. Plaatjate ja nõeljate terade sisaldus

Plaatjate ja nõeljate terade sisalduse hindamiseks kasutati Mihkel Kiviste koostatud Eesti Maaülikooli Ehitusmaterjalide laboratoorsete tööde juhendmaterjale. Plaatjaks ja nõeljaks nimetatakse killustiku teri, mille paksus või laius on üle kolme korra väiksem pikkusest. Nende hulk määratakse vaatluse teel, kasutades vajadusel ka nihikut. Lubatavaks plaatjate ja nõeljate terade sisalduse piiriks raskebetooni puhul on 35%.

Plaatjate ja nõeljate terade sisaldus arvutatakse valemiga 3.18.

$$PN = \frac{m_1}{m_1 + m_2} * 100 \quad (3.18)$$

m_1 – Plaatjate ja nõeljate terade mass, g

m_2 – Normaalseste terade mass, g

Taaskasutatud killustiku plaatjate ja nõeljate terade sisaldus:

$$PN = \frac{m_1}{m_1 + m_2} * 100 = \frac{69,4}{69,4 + 283,8} * 100 = 19,6\% \quad (3.18)$$

Loodusliku killustiku plaatjate ja nõeljate terade sisaldus:

$$PN = \frac{m_1}{m_1 + m_2} * 100 = \frac{39,7}{39,7 + 260,3} * 100 = 13,2\% \quad (3.18)$$

Plaatjate ja nõeljate terade sisaldus on mõlemal puhul piisavalt madal ning materjal on sobilik kasutamiseks betoonisegus.

3.3.5. Veeimavus

Veeimavuse määramiseks kasutati standardi EN EVS 1097-6 meetodikat. Proov asetati veega täidetud anumasse. Proovi segati, et eemaldada osakeste vahele jäänud õhk. 24 tunni möödudes valati vesi ära ning proov asetati rätikule. Täitematerjali pind kuivatati. Seejärel lasti proovil ühekordse kihina õhu käes kuivada kuni nähtav veeikiht on kadunud, kuid proov näib endiselt niiske. Seejärel proov kaaluti ning määrati küllastunud pindkuiva proovi mass M_1 . Proov kuivatati 110°C juures konstantse massini, lasti jahtuda ning määrati proovi mass M_4 . Seejärel arvutati valemiga 3.19 proovi veeimavus. (EVS-EN 1097-6:2013, 2013)

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.19)$$

Taaskasutatud killustiku veeimavus:

Andmed:

M_1 – 2053,9 g

M_2 – 1924,1 g

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} = \frac{100 * (2053,9 - 1924,1)}{1924,1} = 6,8\% \quad (3.19)$$

Loodusliku killustiku veeimavus:

Andmed:

M_1 – 1943,1 g

M_2 – 1912,1 g

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_1 - M_4)}{M_4} = \frac{100 * (1943,1 - 1912,1)}{1912,1} = 1,6\% \quad (3.19)$$

Taaskasutatud killustiku veeimavus on märgatavalt suurem. Osakesed on poorsemad ning seetõttu täituvad suuremas mahus veega. Standard EVS-EN 1097-6 tabel H.3 määrab kasutuspiiriks normaalkaaluga täitematerjali veeimavusega väiksem kui 1,5%. Saadud tulemused ületavad lubatud piiri. Loodusliku killustiku puhul ollakse piirile küllaltki lähedal, kuid taaskasutatud materjali puhul on tulemus märgatavalt suurem. Suur veeimavus tekitab probleeme külmakindlusega, kuna pooridesse jäänud vesi külmub ning võib paisudes betooni nõrgestada.

3.3.6. Jämetäitematerjali koostise komponentide määramine

Metoodika taaskasutatud jämetäitematerjali komponentide määramiseks on kirjeldatud standardis EVS-EN 933-11:2009. Põhimõte seisneb proovi käsitsi erinevateks materjalideks jaotamisest ning nende osade massiprotsendi leidmisest, ujuvad osad on iseloomustatud ruumala kaudu. Killustiku 8/16 mm jaoks valiti proovi suurus 2 kg. Esmalt määrati kuivatatud proovi mass M_1 . Seejärel asetati proov vette ning eraldati ujuvad osad. Need kuivatati rätikuga pindmiselt ning asetati mõõtesilindrisse, milles oli teatud ruumalaga kogus vett. Ujuvad osad suruti kolviga vee alla, nii et kolb ise vette ei ulatuks. Määrati vee ruumala kasv ja seeläbi saadi teada ujuvate osade ruumala V_{FL} . Seejärel eraldati mitteujuv osa ning kuivatati konstantse massini 110°C juures. Seejärel eraldati proovist osis X ning määrati selle mass M_x . Ülejäänud osa kaaluti ning määrati selle mass M_2 . Proov sorteeriti ülejäänud komponentideks ning määrati iga komponendi mass ning arvutati iga osise kogus massiprotsendina. Kõik komponendid ja kogused on välja toodud tabelis 3.6. (EVS-EN 933-11:2009, 2009)

Tabel 3.6 Jämetäitematerjali komponentideks jaotamine ja kogused

Komponent	Kirjeldus	Kogus
Rc	Betoon, betooni produktid	67,87%
Ru	Sidumata ja hüdrauliselt seotud täitematerjal, looduslik kivi	22,52%
Rb	Savitellised ja müüritised, Silikaatmüüritised, kergbetoon	5,34%
Ra	Bituumenmaterjalid	2,15%
Rg	Klaas	0,15%
X	Savi ja pinnas, metallid, plastik, kumm, mitteujuv puit, kips	1,5%
FL	Ujuvad osad	2,08 cm ³ /kg

Andmed:

$$V_{FL}=4 \text{ ml}$$

$$M_1=1926,6 \text{ g}$$

$$M_x=28,9 \text{ g}$$

$$M_2=1897,7 \text{ g}$$

$$M_c=1307,6 \text{ g}$$

$$M_u=440,4 \text{ g}$$

$$M_b=104,5 \text{ g}$$

$$M_a=42,1 \text{ g}$$

$$M_g=2,9\text{g}$$

Ujuvad osad:

$$FL = \frac{V_{FL}}{M_1} * 1000 = \frac{4}{1926,6} * 1000 = 2,08 \text{ cm}^3/\text{kg} \quad (3.20)$$

Savi, pinnas, metallid, plastik, kumm:

$$X\% = \frac{M_x}{M_1} * 100 = \frac{28,9}{1926,6} * 100 = 1,50\% \quad (3.21)$$

Betooni produktid:

$$R_c\% = 100 * \left(\frac{M_2}{M_1}\right) * \left(\frac{M_{Rc}}{M_2}\right) = 100 * \left(\frac{1897,7}{1926,6}\right) * \left(\frac{1307,6}{1897,7}\right) = 67,87\% \quad (3.22)$$

Sidumata täitematerjal:

$$R_u\% = 100 * \left(\frac{M_2}{M_1}\right) * \left(\frac{M_{Ru}}{M_2}\right) = 100 * \left(\frac{1897,7}{1926,6}\right) * \left(\frac{440,4}{1897,7}\right) = 22,52\% \quad (3.23)$$

Tellised ja kergbetoon:

$$R_b\% = 100 * \left(\frac{M_2}{M_1}\right) * \left(\frac{M_{Rb}}{M_2}\right) = 100 * \left(\frac{1897,7}{1926,6}\right) * \left(\frac{104,5}{1897,7}\right) = 5,34\% \quad (3.24)$$

Bituumenmaterjalid:

$$R_a\% = 100 * \left(\frac{M_2}{M_1}\right) * \left(\frac{M_{Ra}}{M_2}\right) = 100 * \left(\frac{1897,7}{1926,6}\right) * \left(\frac{42,1}{1897,7}\right) = 2,15\% \quad (3.25)$$

Klaas:

$$R_g\% = 100 * \left(\frac{M_2}{M_1}\right) * \left(\frac{M_{Rg}}{M_2}\right) = 100 * \left(\frac{1897,7}{1926,6}\right) * \left(\frac{2,9}{1897,7}\right) = 0,15\% \quad (3.26)$$

Tabel 3.7 Komponentide sisalduse võrdlus standardis EVS 206:2014 esitatud taaskasutatud jämetäitematerjalile esitatavate nõuetega

Komponent	Saadud tulemus	Tüüp A	Tüüp B
Rc	67.87%	≥90%	≥50%
Rc+Ru	90.39%	≥95%	≥70%
Rb	5.34%	≤10%	≤30%
Ra	2.15%	≤1%	≤5%
X+Rg	1.65%	≤1%	≤2%
FL	2.08 cm ³ /kg	≤2 cm ³ /kg	≤2 cm ³ /kg

Katse tulemusena selgus, et kasutatava materjali komponentide sisaldus ei vasta kummalegi kategooriale. Materjal ei vasta üheski kategoorias taaskasutatavale

materjalile tüüp A. Tüüp B materjalile esitatavatest nõuetest ei vasta ainult ujuvate osade sisaldus, mis on vähesel määral üle normi. Kõik teised nõuded on täidetud.

3.3.7. Katsetulemuste võrdlus

Killustikuga läbi viidud katsete tulemused on esitatud tabelis 3.8. Taaskasutatud killustiku tihedus on madalam kui looduslikul. Tühiklikkus ja plaatjate ning nõeljate terade sisaldus on suurem. Märgatavalt suurem on taaskasutatud killustiku veeimavus, mis ei vasta ka vastavas standardis esitatud piirväärtusele. Täitematerjali suur veeimavus põhjustab probleeme külmakindlusega ning seetõttu on selle kasutamine betoonis raskendatud. Komponentide sisalduse osas looduslikku killustikku ei katsetatud. Taaskasutatud killustiku puhul saadi peaaegu kõigi komponentide puhul tulemuseks, et tegemist on B tüüpi taaskasutatud materjaliga. Ainult ujuvate osade sisaldus ületas vastavat piirväärtust.

Tabel 3.8 Killustikuga läbi viidud katsete tulemused

	Looduslik killustik	Taaskasutatud killustik
Puistetihedus, kg/m ³	1463.3	1239
Näivtihedus, kg/m ³	2462	2257.3
Tühiklikkus, %	40.6	45
Plaatjad ja nõeljad terad, %	13	19.6
Veeimavus, %	1.6	6.8
Komponendid	-	Rc50; Rc+Ru90; Rb10; Ra5; X+Rg2; FL5

3.4. Taaskasutatud täiteainega betooni katsetamine

3.4.1. Ülevaade

Taaskasutatud täiteainega betooni katsetamiseks otsustati võrrelda betooni survetugevusi, kui asendada osaliselt looduslikku täiteainet taaskasutatavaga. Esmalt arutati sobiv betoonisegu koostis, mis jäi kõigi katseseeriade puhul samaks. Muudeti

ainult kasutatavat täiteainet. Katsetati erinevaid asenduse protsente. Mõõdeti Abramsi koonusega betoonisegude töödeldavust. Seejärel valati 20 betoonkatsekeha mõõtudega 15x15x15 cm ning katsetati nende survetugevust peale 28 päeva möödumist.

3.4.2. Betoonisegu koostise arvutamine

Betoonisegu koostise arvutamisel kasutati Mihkel Kiviste koostatud Maaülikooli Ehitusmaterjalide labortööde juhendit. Koostise arvutamise eesmärgiks on saavutada piisavad tugevus- ja töödeldavusomadused ning samal ajal hoida tsemendi kulu minimaalsena. Arvutus tehti 1 m³ betooni valmistamiseks. Aluseks võeti varem leitud looduslike materjalide tihedused. Arvutuse aluseks võetud andmed on toodud tabelis 3.9.

Tabel 3.9 Arvutuse aluseks võetud andmed

Betooni klass	C25/30
Tsemendi aktiivsus	42,5 N/mm ²
Tsemendi eritihedus	3.1 g/cm ³
Täitematerjali kvaliteet	0,6
Liiva puistetihedus	1,696 g/cm ³
Liiva näivtihedus	2,483 g/cm ³
Killustiku puistetihedus	1,463 g/cm ³
Killustiku näivtihedus	2,462 g/cm ³
Ülehuulategur α	1,37

Esmalt määrati vesi-tsement tegur Bolomey valemi abil (valem 3.27).

$$f_{c,bet} = A * f_{c,ts} \left(\frac{T_s}{V} - 0,5 \right) \quad (3.27)$$

$f_{c,bet}$ – betooni nõutav survetugevus, N/mm²

$f_{c,ts}$ – tsemendi survetugevus, N/mm²

$\frac{T_s}{V}$ – Tsement- vesitegur

A – Tegur mis võtab arvesse koostismaterjalide kvaliteeti. (Kõrge kvaliteet A=0,65, keskmine kvaliteet A=0,60, madal kvaliteet A=0,55.

Avaldati valemist vesi-tsementtegur.

$$\frac{V}{T_s} = \left[\left(\frac{f_{c,bet}}{A * f_{c,ts}} \right) + 0,5 \right]^{-1} \quad (3.28)$$

Betooni klassiks valiti C25/30 ehk betooni nõutav survetugevus on 30 N/mm². Täitematerjali kvaliteet valiti keskmine ehk A=0,60. Tsemendi tugevuseks valiti 42,5 N/mm². Leiti antud andmetega vesi-tsementtegur.

$$\frac{V}{T_s} = \left[\left(\frac{30}{0,6 * 42,5} \right) + 0,5 \right]^{-1} = 0,596 \quad (3.29)$$

Kunda Tsemendi poolt koostatud graafiku alusel leiti vajalik vee kogus. Soovitavaks koonuse vajumiks võeti 4 cm, liivaks jämeliiv. Graafikult saadi vee kogus 185 liitrit 1 m³ betooni valmistamiseks.

Seejärel leiti vesi-tsement teguri abil vajalik tsemendi kogus.

$$T_s = \frac{V}{\frac{V}{T_s}} = \frac{185}{0,596} = 310,15 \text{ kg/m}^3 \quad (3.30)$$

V – vee kogus, l

$\frac{V}{T_s}$ – vesi-tsementtegur

T_s – tsemendi kogus, kg/m³

Seejärel leiti jämetäitematerjali kogus valemiga 3.31.

$$K = \frac{1000 * \rho_k}{1 + \alpha \left(\frac{\rho_k}{\rho_{ok}} - 1 \right)} = \frac{1000 * 2,462}{1 + 1,37 \left(\frac{2,462}{1,463} - 1 \right)} = 1272,3 \text{ kg/m}^3 \quad (3.31)$$

K – Jämetäitematerjali kogus kg/m³

ρ_k – Killustiku näivtihedus, g/cm³

ρ_{ok} – Killustiku puistetihedus, g/cm³

A – mördi ülehulgategur

Liiva kogus leiti valemiga 3.32.

$$L = \left[1000 - \left(\frac{T_s}{\rho_{ts}} + \frac{K}{\rho_K} + V \right) \right] \rho_l = \left[1000 - \left(\frac{310,15}{3,1} + \frac{1272,3}{2,462} + 185 \right) \right] 2,483 \quad (3.32)$$

$$= 492,0 \text{ kg/m}^3$$

Tabel 3.10 komponentide kogus kilogrammides 1 m³ betooni valmistamiseks.

Tsemendi kogus	310.15
Killustiku kogus	1272.34
Liiva kogus	492.04
Vee kogus	185.00

3.4.3. Taaskasutatud täiteaine kasutusprotsendid ja koostatud betoonisegud

Koostati neli erineva täiteaine sisaldusega segu: ainult looduslike täiteaineid sisaldav betoonisegu, 50% jämetäitematerjali asendusega segu, kus pool looduslikust killustikust asendati taaskasutatuga, 20% jämetäitematerjali asendusega segu ja 20% jäme- ning 20% peentäitematerjali asendusega segu. Asenduse protsendid on võetud standardist Betoon - Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus Lisa E Soovitused täitematerjali kasutamiseks, kus tabelis E.2 on välja toodud jämetäitematerjalide maksimaalne asendusprotsent erinevate keskkonnaklasside puhul. (EVS-206:2014, 2014) Kuna kasutatav taaskasutatud materjal on B tüüpi ehk pole teada materjali päritolu ja täpset koostist, valiti katsetamiseks X0 keskkonnaklassis maksimaalse asendusprotsendi 50% ja XC1 ja XC2 puhul maksimaalse lubatud asendusprotsendi 20%. Standardis on lubatud küll ainult jämetäitematerjali asendamine, kuid nägemaks peentäitematerjali asendamise mõju, katsetati ka 20% jäme- ja 20% peentäitematerjali asendamist. Võrdluseks koostati ka ainult looduslike täiteainetega segu. Iga versiooniga tehti 5 standardset 15x15x15cm katsekeha. Kogused on arvutatud 5 katsekeha kohta ning 15% varuga.

Tabel 3.11 Betoonisegudes kasutatud materjalide kogused kg.

Betoonisegu nimetus	Looduslik killustik	Taaskasutatud killustik	Looduslik liiv	Taaskasutatud liiv	Tsement	Vesi
0% asendusega	24.69	0	9.55	0	6.02	3.59
50% asendusega	12.34	12.34	9.55	0	6.02	3.59
20% asendusega	19.75	4.94	9.55	0	6.02	3.59
20/20% asendusega	19.75	4.94	7.64	1.91	6.02	3.59

3.4.4. Betoonisegude töödeldavuse hindamine Abramsi koonusega

Betoonisegu arvutamisel võeti eelduseks saavutada väheplastne segu koonuse vajumiga 4 cm. Valmis tehtud segude plastsusse hindamiseks ja koonuse vajumise leidmiseks kasutati Abramsi koonust.

Abramsi koonusega plastuse määramiseks asetati esmalt alusplaat tasasele pinnale. Selle peale tõsteti koonus, mis täideti seguga. Segu tihendati metallpulgaga 25 korda 1/3 2/3 ja 3/3 koonuse täitumise juures. Seejärel tasandati segu koonuse ülemise tasapinna järgi. Koonuse eemaldati ettevaatlikult. Mõõdeti segu koonuse vajumist joonlauaga. Katset korrati ja leiti tulemuste keskmine. Tulemused on esitatud tabelis 3.12. Leiti, et segude töödeldavus on madalam kui algselt eeldatud. Kõik segud jäävad vajumiklassi S1. Suure tõenäosusega tuleneb koonuse vajumi vähenemine taaskasutatud täiteainega segude puhul sellest, et taaskasutatud täiteaine sisaldab ka tsemendiosakesi, mis mõjutavad täiteaine veemavust.

Tabel 3.12 Abramsi koonusega määratud segu töödeldavus.

Betoonisegu nimetus	Betoonisegu töödeldavus cm
0% asendusega	1.7
50% asendusega	0.8
20% asendusega	0.75
20/20% asendusega	0.5



Joonis 3.12 Abramski koonusega segu plastsuse määramine

3.4.5. Betoonkatsekehade tihedus

Betoonkatsekehade tihedus määrati 28 päeva vanuselt. Katsekehad võeti veest välja ning pärast kuivamist kaaluti. Erinevate fraktsioonide tihedused on toodud tabelis 3.13. Tegemist on normaaltihedusega betooniga ehk tihedus on vahemikus $2000\text{-}2600\text{kg/m}^3$. Kuigi varasemalt katsete käigus selgus, et taaskasutatud täiteaine tihedus on väiksem, ei ole selle mõju betooni tihedusele eriti märgatav.



Joonis 3.13 Katsekehad 28 päeva vanuselt

Tabel 3.13 Betoonkatsekehade tihedused

	0%	50%	20%/20%	20%
1	8004.6	8033.6	8125.2	8065.2
2	8007.2	7883.8	8060.9	8075.4
3	8048.1	8014.2	7925.2	8086.2
4	8037.7	7974.9	7997.9	8023.9
5	8053.7	7921.5	7949.8	8120
Keskmine mass, g	8030.26	7965.6	8011.8	8074.14
Keskmine tihedus	2380	2360	2370	2390

3.4.6. Betoonkatsekehade niiskuse mõõtmine

Katsekehade niiskuse mõõtmine viidi läbi seadmega Trotec T610. Mõõdeti katsekehade kõiki külgi. Esmalt siis, kui katsekehad olid just veest välja võetud, ning uuesti 4 tundi hiljem. Katse tulemused on toodud töö lisas 2, tabelis L 2.1 ja L 2.2. Katse tulemusena selgus, et katsekehade niiskuse sisaldus erinevatel katsekehadel oli ühtlane ning ka vee välja kuivamine toimus ühtlaselt. Erinevate fraktsioonide vahel märgatavaid erinevusi ei leitud.



Joonis 3.14 Troteciga niiskuse sisalduse mõõtmine

3.4.7. Betoonkatsekehade survetugevuse hindamine Schmidti vasaraga

Betoonkatsekehade survetugevust hinnati esmalt mittepurustava meetodiga. Meetodika on kirjeldatud standardis EVS-EN 12504-2:2003 Konstruktsiooni betooni katsetamine Osa 2: Mittepurustav katsetamine, põrkearvu määramine. Katses kasutati põrkevasarat Proceq Digi Schmidt 2000. Seade töötab tagasipõrke printsiibil. Tagasipõrke suurus sõltub pinna kõvadusest. Surudes vasarat katsepinnale jõutakse punkti, kus pinge all ole vedru vabastatakse ja vedru jõul liikuma pandud mass lööb pinnaga kontaktis olevale kolvile. Kokkupõrkekolvilt tagasi põrganud massi tagasipõrke teekonna pikkust nimetatakse põrkearvuks. Põrkearvu on võimalik teisendada betooni survetugevuseks. Katsekehad koormati jõuga 40kN ning seejärel sooritati katsekehale Schmidt'i vasaraga 12 lööki. Katses kasutati B-PROCEQ teisenduskõverat. Saadud tulemused on esitatud tabelis 3.14. Kõigi asendusprotsentide juures saadi Schmidt'i vasaraga katsetades piisavad survetugevuse näitajad.



Joonis 3.15 Schmidt'i vasaraga survetugevuse määramine

Tabel 3.14 Schmidt'i vasara katse tulemused

Asenduse %	Kuup nr.	Põrkearvud													Põrkearvude mediaan	Survetugevus N/mm ²	Keskmine N/mm ²
0%	1	22	33	37	31	27	31	40	38	33	36	38	29	33.0R	30.1	31.8	
	2	35	38	28	36	30	38	35	30	37	36	23	36	35.5R	34.4		
	3	31	34	36	34	37	31	34	33	38	30	26	33	33.5R	30.9		
	4	30	32	34	33	35	31	27	33	33	29	35	26	32.5R	29.2		
	5	34	27	36	30	35	37	41	38	36	31	37	33	35.5R	34.4		
50%	6	37	38	37	38	30	33	43	35	42	42	40	36	37.5R	37.9	36.84	
	7	39	32	42	41	39	41	40	37	36	35	33	35	38R	38.8		
	8	35	36	41	34	38	41	37	45	36	36	41	33	36.5R	36.1		
	9	37	40	37	39	38	35	37	35	37	33	32	32	37R	37		
	10	35	36	35	36	35	41	40	35	26	34	37	36	35.5R	34.4		
20/20%	11	30	36	36	36	39	41	41	43	43	32	36	35	36R	35.2	37.2	
	12	42	39	38	37	39	37	37	43	38	35	41	40	38.5R	39.7		
	13	36	40	32	37	34	35	37	36	36	36	38	38	36R	35.2		
	14	37	43	43	41	41	40	34	41	39	39	39	33	39.5R	41.5		
	15	42	33	41	32	40	45	35	31	36	34	35	38	35.5R	34.4		
20%	16	38	40	38	38	38	39	38	39	41	36	38	38	38R	38.8	37.92	
	17	40	40	40	30	41	37	40	35	43	31	38	37	39R	40.6		
	18	36	35	32	37	32	35	37	36	34	40	39	34	35.5R	34.4		
	19	36	39	39	38	46	42	40	35	42	33	43	36	39R	40.6		
	20	30	34	31	36	37	36	44	40	36	36	31	26	36R	35.2		

3.4.8. Betoonkatsekehade survetugevuse leidmine purustaval meetodil

Lisaks katsetati katsekehade survetugevust ka purustaval meetodil. Selleks kasutati survepressi maksimaalse koormusega 2000kN. Katsekehad survestati kiirusega 5 kN/s kuni purunemiseni. Purustav jõud registreeritakse ning seejärel arvutati valemiga 3.33 maksimaalne survetugevus.

$$f_c = \alpha * \frac{F_c}{A} \quad (3.33)$$

α – Parandustegur, mis 150mm küljepikkusega kuubil on 1

F_c – Maksimaalne jõud survele

A – Katsekeha survepindala

Kuna katsed viidi läbi erinevatel päevadel on vajalik väärtused teisendada valemi 3.34 abil 28-päevaseks survetugevuseks, et saadud tulemusi oleks võimalik võrrelda. Katsed viidi läbi 28 ja 33 päeva pärast segude valmistamist. Seejärel leiti asendusprotsentide keskmised survetugevused. Välja jäeti mitterahuldava purunemispildiga kuupide tulemused. Saadud tulemused on esitatud tabelis 3.15. Kuupide erinevad purunemispildid on toodud joonisel 3.16.

$$f_{c,28} = f_{c,n} * \frac{\log 28}{\log n} \quad (3.34)$$

$f_{c,28}$ – 28 päevane survetugevus

$f_{c,n}$ – Survetugevus n päeva vanuselt

Tabel 3.15 Katsekehade survetugevused purustaval meetodil

Asenduse %	Kuup nr	Purustav jõud, kN	Survetugevus N/mm ²	28 päevane survetugevus N/mm ²	Keskmine	Purunemispilt
0%	1	914.8	40.66	40.66	40.50	Rahuldav
0%	2	975.3	43.35	43.35		Rahuldav
0%	3	852.4	37.88	37.88		Rahuldav
0%	4	902.9	40.13	40.13		Rahuldav
0%	5	806.1	35.83	35.83		Mitterahuldav
50%	6	1128.1	50.14	47.78	44.65	Rahuldav
50%	7	1053.5	46.82	44.62		Rahuldav
50%	8	1073.1	47.69	45.45		Rahuldav
50%	9	996.8	44.30	42.22		Rahuldav
50%	10	1019.1	45.29	43.16		Rahuldav
20/20%	11	1112.5	49.44	47.12	44.32	Rahuldav
20/20%	12	1008.3	44.81	42.71		Rahuldav
20/20%	13	1024.2	45.52	43.38		Rahuldav
20/20%	14	1059.1	47.07	44.86		Rahuldav
20/20%	15	1027.7	45.68	43.53		Rahuldav
20%	16	1086	48.27	46.00	45.68	Rahuldav
20%	17	1080.2	48.01	45.75		Rahuldav
20%	18	1051.9	46.75	44.55		Rahuldav
20%	19	1076.3	47.84	45.59		Rahuldav
20%	20	1097.7	48.79	46.49		Rahuldav

3.4.9. Tulemused

Betoonkatsekehadega läbi viidud katsete tulemusena ei täheldatud märgatavaid erinevusi katsekehade tihedustes. Taaskasutatud materjaliga katsekehade tihedus oli küll veidi madalam, kuid mitte oluliselt. Veesisalduse ja välja kuivamise osas erinevusi ei leitud. Survetugevused ületasid kõigil juhtudel etteantud lubatud minimaalseid väärtusi. Schmidti vasara katsete puhul andis kõige madalamad keskmised survetugevuse tulemused ilma taaskasutatud täiteaineta katsekehad. Sarnased tulemused saadi ka purustaval katsel. Ilma taaskasutatud täiteaineta kuupide keskmine survetugevus oli 40,5 N/mm². Taaskasutatud täiteainega kuupide puhul oli see näitaja 44,32 N/mm² kui asendada 20% jäme- ja 20% peentäitematerjali. Järgnesid 50% jämetäitematerjali asendusega katsekehad, mille survetugevuste keskmine oli 44.65 N/mm². Kõige paremad näitajad saadi 20% jämetäitematerjali asendusega betoonil,

survetugevuste keskmine oli 45,68. Tulemusena selgus, et erinevate taaskasutatud täitematerjali asendusprotsentide puhul betooni tugevusnäitajad ei vähenenud. Taaskasutatud täitematerjali kasutades saadi koguni paremaid tulemusi.



Joonis 3.16 Katsekehade purunemispildid

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida betoonijäätmetest toodetud täiteainete kasutusvõimalusi uues betoonisegus. Betoonijäätmete näol on tegemist suure kasutuspotentsiaaliga materjaliga, mis leiab ka praegu kasutust näiteks teede ja platside alustes täitematerjalina. Materjali sorteerides ning leides uusi kasutusvaldkondi, suurendaksime selle taaskasutatava materjali väärtust ning vähendaksime ka potentsiaalselt betooni tootmise hinda ning selle keskkondlikku jalajälge.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade betooni tarbimise mahtudest ning selle keskkonnamõjudest. Vaadeldakse erinevaid betoonijääkide kasutusvõimalusi ning taaskasutatud täitematerjalide betoonis kasutamisele kehtivaid norme ja standardeid. Lisaks tuuakse välja varasemalt tehtud uuringuid ning projekte, mis seda teemat käsitlevad.

Teises peatükis kirjeldatakse läbiviidud küsitluste vastuste põhjal betoonijäätmete kasutust Eestis. Koostati kaks küsimustikku, millest esimene saadeti ehitusettevõtetele ning teine betoonijäätmetega tegelevatele ettevõtetele. Ehitusettevõtete vastustest selgus, et ehitusjäätmete sorteerimisega tegeletakse platsil palju, kuid kõik oleneb kogustest. Väikeseid betoonijääkide koguseid kasutatakse kas platsil täiteks või lisatakse segaprügisse. Suuremate koguste puhul on sorteerimine majanduslikult mõistlik ning seda tehakse parema meelega. Taaskasutatud täiteaine betoonisegus kasutamise kohta leiti, et ilmselt oleks hinna ja kvaliteedi osas loodusliku materjaliga konkureerimine keeruline, kuid materjalide väärindamine oleks mõistlik, sest seeläbi oleks kasutusvõimalusi rohkem. Betoonijäätmetega tegelevate ettevõtete vastustest selgus, et kuna praegu toodetavale materjalile on turgu piisavalt, ei ole uute kasutusvõimaluste leidmine enamusele ettevõtetest vajalik. Kuna betoonijäätmete kvaliteet on väga kõikuv, on selle betoonisegudes kasutamine keeruline ning ei ole hetkel majanduslikult mõistlik. Materjali väärindamise osas arvati, et seda peaks pigem tegema, kuid kuna hetkel toodetavatele materjalidele on nõudlus olemas ning karjäärikillustikuga konkureerimine keeruline, ei olda selles osas väga optimistlikud.

Kolmandas peatükis antakse ülevaade ettevõttelt Karimek saadud 0-32 mm fraktsiooniga taaskasutatud betoonmaterjaliga läbi viidud katsetest. Materjalist eraldatakse 0-4 ja 8-16 mm fraktsioonid ning võrreldakse nende omadusi sama

fraktsiooniga loodusliku killustiku ja liivaga eesmärgiga leida suuremad erinevused ning leida, kas materjal vastab standardites antud nõuetele taaskasutatud materjalile. Lisaks koostatakse katsetatud materjalidest nelja erineva täitematerjali asendusprotsendiga betoonkatsekehad. Katsekehad tehakse 0%, 50%, 20% jämetäitematerjali asendusega ning 20% jäme- ja 20% peentäitematerjali asendusega. Seejärel uuritakse katsekehade tihedust, vee sisaldust ning survetugevust nii Schmidti vasara kui ka survepressiga.

Katsete tulemusena selgus, et materjal ei vasta kõigile EVS-EN 206 esitatud taaskasutatud täiteainele esitatud nõuetele. Samas katsekehade survetugevus oli kõigil juhtudel piisav. Püstitatud hüpoteesidest leidis kinnitust vaid esimene. Jääkidest saadavat killustikku on võimalik kasutada piisava survetugevusega betooni tootmiseks. Teine hüpotees kinnitust ei leidunud. Survetugevus oli katsekehadel küllaltki sarnane ning suuri erinevusi eri fraktsioonide kasutamisel ei leitud. Kolmas hüpotees lükati samuti ümber - liiva asendamisel survetugevus ei vähenenud.

Antud lõputöö ei käsitlenud betooni külmakindlust, mis on kasutusea seisukohalt väga oluline. Kuna katsete käigus leiti, et taaskasutatud materjali veeimavus erineb suuresti looduslikust on see kindlasti vajalik, et teha lõplikke järeldusi. Lisaks eelnimetatule oleks oluline vaadelda ka teisi täitematerjalide füüsikalisi ja keemilisi omadusi, mida antud töö ei käsitlenud, ning millele nõudeid esitatakse, nagu purunemiskindlus. Seeläbi on võimalik teemast täiemahuline ülevaade saada.

SUMMARY

This master's thesis is aimed at studying the use of aggregates produced from concrete waste in new concrete mixes. Concrete waste as a material has good potential and is mostly used today as a subbase for roads and pavements. But with better sorting and finding new uses can improve the value of this material and potentially lower the cost and the environmental impact of concrete.

The first chapter gives an overview of the volumes of concrete consumption and the environmental impact of it. Different possibilities of use for concrete waste are examined. A review of different norms and standards regarding the use of recycled concrete aggregates is given. Also, different research projects and studies regarding the subject are viewed.

The second chapter consists of an analysis on the usage of concrete waste in Estonia, on the basis of the two surveys conducted by the author. The first survey was sent to construction companies and the second one to companies working with concrete waste. From the answers given by the construction companies, it turns out that construction waste is recycled quite significantly, but it depends on the quantities. Smaller amounts of concrete waste are used on the site as landfill or added to mixed waste containers. Larger quantities are recycled more often because of its economical benefit. On the topic of using concrete waste aggregate in new concrete, it was pointed out that competing with natural aggregate on price and quality is difficult but adding additional value to recycled material is useful and can lead to more applications for use. From the answers given by the companies working with concrete waste, it was concluded that because there is sufficient demand for the recycled material produced today, new uses for concrete waste are not highly needed. Because of the high fluctuations in the quality of waste material, it is difficult to use recycled aggregate in concrete and therefore not economically reasonable for the companies. Regarding adding additional value to recycled materials, the companies found that it is reasonable, but as of now not likely because of sufficient demand on the market and difficulties competing with natural aggregates.

The third chapter consists of tests and research done on recycled concrete aggregate. The samples are from the company Karimek. The test material's particle size was 0-32 mm. This was sieved to 0-4 and 8-16 particle sizes and then their properties were

compared to natural aggregates with same particle sizes to find the differences between them and if the recycled material meets the requirements for the use in concrete given in the standards. Also, concrete cubes were made from the tested materials with four different aggregate replacement percentages. 0%, 50%, 20% of coarse aggregate and 20% of coarse and 20% of fine aggregate replacement was used. Then the density, water content and compressive strength was measured. Compression strength tests were done using the Schmidt hammer and a compression press.

Test results show that the material tested did not meet all the requirements given in standard EVS-EN 206. Although the compression strength was sufficient on all of the concrete test cubes. From all the hypotheses established, only the first one was confirmed. It is possible to produce concrete with sufficient strength using aggregate produced from concrete waste. The second hypothesis was disproved. Compressive strength was similar on all test cubes and there were no big differences when using different replacement percentages. The third hypothesis was also disproved. Compression strength did not decrease when using recycled sand.

This master's thesis did not cover cold resistance, which is a very important part of the service life of concrete. It was found that recycled materials have significant increases in water absorption, so studying cold resistance is very important to draw any final conclusions. Also, additional tests should be done on the physical and chemical properties of aggregates, that were not covered in this thesis. Only then the complete overview of the subject can be given.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Altun, A., & Yılmaz, İ. (2002). Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1247-1249. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602007639>
- BS 8500-2. (2002). Concrete- complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 2: Specification for constituent materials and concrete. British Standards Institution.
- Chandra, S., & Berntsson, L. (1996). Use of silica fume in concrete. (S. Chandra, Ed.) *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*, 554-623. Retrieved 02 23, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815513933500120>
- Choi, H., Kitagaki, R., & Noguchi, T. (2014). Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. *Journal of Environmental Protection*, 583-596. Retrieved 03 06, 2021, from https://www.researchgate.net/publication/276495800_Using_Microwave_Heating_to_Completely_Recycle_Concrete
- Coelho, A., & de Brito, J. (2011). Economic analysis of conventional versus selective demolition-A case study. *Resources Conservation and Recycling*, 382-392. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/251605183_Economic_analysis_of_conventional_versus_selective_demolition-A_case_study
- DIN 4226-100. (2002). Aggregates for concrete and mortar- Part 100: Recycled Aggregates. German Institute of Standardisation (Deutsches Institut für Normung).
- ECW/WMGE work programme. (2020). *Construction and Demolition Waste: Challenges and opportunities in a circular economy*. European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy.

- European Aggregates Association. (2021, 01 27). *UEPG- Figures- estimates on aggregates production*. Retrieved 01 27, 2021, from uepg.eu: <https://uepg.eu/pages/figures>
- European Cement Research Academy. (2015). *Closing the loop: What type of concrete re-use is the most sustainable option?* Duessendorf, Germany: European Cement Research Academy GmbH.
- Eurostat. (2021, 02 20). *Recovery rate of construction and demolition waste*. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/bar?lang=en
- Eurostat. (2021, 02 20). *Treatment of waste by waste category*. (Eurostat) Retrieved 01 14, 2021, from <https://ec.europa.eu/eurostat:https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- EVS-206:2014. (2014). *EVS-206:2014 Betoon- Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus*. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1097-2:2020. (2020). *Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine, Osa 2: Purunemiskindluse määramise meetodid*. Eesti standardikeskus.
- EVS-EN 1097-3. (2000). *EVS-EN 1097-3:2000 Täitematerjalide füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste katsetamine, Osa 3: Puistetiheduse ja tühiklikkuse määramine*. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1097-5. (2008). *Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine, Osa 5: Veesisalduse määramine ventileeritavas kuivatuskapis kuivatamise teel*. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1097-6:2013. (2013). *Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine, Osa 6: Terade tiheduse ja veeimavuse määramine*. Eesti Standardikeskus.

- EVS-EN 12620:2005. (2005). EVS-EN 12620:2005 Betooni Täitematerjalid. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 1744-1:2010+A1:2012. (2013). *EVS-EN 1744-1:2010+A1:2012 Täitematerjalide keemiliste omaduste katsetamine, Osa 1: Keemiline analüüs.* Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 933-1. (2012). *EVS-EN 933-1, Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine, Osa 1: Terastikulise koostise määramine, Sõelumismeetod.* Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 933-11:2009. (2009). Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine, Osa 11: Jämetäitematerjali komponentide klassifitseerimine. Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 933-3. (2012). *EVS-EN 933-3 Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine, Osa 3, Tera kuju määramine, Plaatsustegur.* Eesti Standardikeskus.
- EVS-EN 933-7. (2001). *EVS-EN 933-7, Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine, Osa 7: Merekarpide sisalduse määramine- Merekarpide protsent jämetäitematerjalis.* Eesti Standardikeskus.
- GB/T 25177. (2010). Recycled coarse aggregate for concrete. Standardization Administration of the People's Republic of China.
- Goncalves, P. C. (2007). *Concrete with recycled aggregates commended analysis of existing legislation.* Instituto Superior Technico, Universidade Technica de Lisboa. Lissabon: Universidade Tecnica de Lisboa. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137455646/RESUMO.pdf>
- greenspec.co.uk. (n.d.). *greenspec.co.uk.* Retrieved 01 14, 2021, from <https://www.greenspec.co.uk/building-design/environmental-impacts-of-concrete/>
- Hossain, K., & Lachemi, M. (2007). Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete. *Cement and Concrete Research, Volume*

- 37(Issue 5), 759-766. Retrieved 02 23, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000506>
- JIS A 5021. (2011). Recycled aggregate for concrete class H. Japanese Standards Association.
- JIS A 5022. (2018). Recycled aggregate for concrete class M. Japanese Standards Association.
- JIS A 5023. (2018). Recycled aggregate for concrete Class L. Japanese Standards Association.
- JSCE. (2010). *Standard Specifications for Concrete Structures-2007 "Materials and Construction"*. Japan Society of Civil Engineers. Retrieved 03 09, 2021, from https://www.jsce-int.org/system/files/JGC16_Standard_Specifications_Materials_and_Construction_1.1.pdf
- Keskkonnaministeerium. (2021, 02 21). www.envir.ee/. Retrieved from <https://www.envir.ee/et/ringmajandus>
- Kiisler, E. (2018). Betoonteed, tehnilised lahendused Poolas. *Ehitaja*, 225.
- Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Fishman, T., Schandl, H., . . . Miatto, A. (2017). Global Socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/313407407_Global_socioeconomic_material_stocks_rise_23-fold_over_the_20th_century_and_require_half_of_annual_resource_use
- Laisk, L. (2020). *Ringlussevõetud betooni taaskasutus*. Eesti Maaülikool. Tartu: Eesti Maaülikool. Retrieved from https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/6040/Laura_Laisk_2020_MA_EH_t%C3%A4istekst.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Lie, H. A. (2006). Concrete Recycling. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 14(2). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/277763564_Concrete_Recycling
- LNEC-E 471. (2009). *E 471 - 2009 Guide for the use of coarse recycled aggregates in concrete*. Laboratorio Nacional De Engenharia Civil.
- Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mróz, R., & Deja, J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, 95, 243-256. Retrieved 03 06, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181530043X?via%3Dihub>
- Marzouk, M., & Azab, S. (2014). Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 82, 41-49. Retrieved 03 26, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491300222X>
- MB 2030. (2010). Recycling concrete. Swiss Society of Engineers and Architects.
- NBN B 15-001. (2018). Concrete - Specification, performance, production and conformity . Bureau for Standardisation.
- NBN EN 12620. (2008). Aggregates for concrete. Bureau for Standardisation.
- Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 38. Retrieved 03 02, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221000528>
- NEN 5905. (2005). Aggregates for concrete. Royal Netherlands Standardization Institute.
- NTC 2008. (2008). Norme Tecniche per le Costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti.

- Olivier, P. (2020). *Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions*. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Retrieved from https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-trends-in-global-co2-and_total-greenhouse-gas-emissions-2020-report_4331.pdf
- OT 70085. (2006). Instruction technique Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris. Armasuisse.
- Pacheco-Torgal, Ding, Labrincha, Tam, & Brito, d. (2013). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Elsevier Science & Technology. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/book/9780857096821/handbook-of-recycled-concrete-and-demolition-waste>
- Pepe, M., Filho, R., Koenders, E., & Martinelli, E. (2014). Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 124-132. Retrieved 03 06, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181400703X>
- Plaza, P., Sáez del Bosque, I., Frías, M., Sánchez de Rojas, M., & Medina, C. (2021). se of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO2 emissions. *Construction and Building Materials*, 285. Retrieved 04 16, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821006863>
- PTV 406. (2003). Granulats de débris de démolition et de construction recyclés. COPRO.
- Robayo-Salazar, R. A., Rivera, J. F., Gutiérrez, d., & M., R. (2017). Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 149, 130-138. Retrieved 03 06, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817310073>
- Rodriguez, J. (2021, 02 21). Uses, Benefits, and Drawbacks of Fly Ash in Construction. *The Balance Small Business*. Retrieved 02 23, 2021, from <https://www.thebalancesmb.com/fly-ash-applications-844761>
- Shah, M., Gupta, K., Nainwal, A., Negi, A., & Kumar, V. (2021). Investigation of mechanical properties of concrete with natural aggregates partially replaced by

recycled coarse aggregate (RCA). *Materials Today: Proceedings*. Retrieved 04 16, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320401737>

Shima, H., Tateyashiki, H., Matsushashi, R., & Yoshida, Y. (2005). An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3, 53-67. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228402454_An_Advanced_Concrete_Recycling_Technology_and_its_Applicability_Assessment_through_Input-Output_Analysis

Silva, R., Brito, J., & Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217. Retrieved 03 04, 2021, from https://www.researchgate.net/publication/262453386_Properties_and_composition_of_recycled_aggregates_from_construction_and_demolition_waste_suitable_for_concrete_production

The Cement Sustainability Initiative. (2009). *Recycling Concrete*. World Business Council for Sustainable Development.

The Freedonia Group. (2012). *Word Construction Aggregates*. The Freedonia Group. Retrieved 03 02, 2021, from <https://www.freedoniagroup.com/brochure/28xx/2838smwe.pdf>

Torres, A., Brandt, J., Liu, J., & Lear, K. (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Sciencemag*, 357(6355), pp. 970-971. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/319535816_A_looming_tragedy_of_the_sand_commons

Tsivilis, Batis, Chaniotakis, Grigoriadis, & Theodossis. (2000, October). Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 30(10), pp. 1679-1683. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884600003720>

Vyncke, J., & Vrijders, J. (2010). *Recycling of C&W Waste in Belgium: State-of-the-art and opportunities for technology transfer*. Brussels: Belgian Building Research
91

Institute. Retrieved from
https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?lang=en&dtype=research&doc=SCO_2010_RecyclingCDWasteInBelgium.pdf

Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., & J, G. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432-441. Retrieved 03 06, 2021, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817305822?via%3Dihub>

LISAD

Lisa 1 Küsitluse vastused

Tabel L 1.1 Ehitusettevõtetele saadud vastused

1. Kas Teie ehitusplatsidel toimub ehitusjäätmete sorteerimist? Kui jah, siis millisteks sortimentideks jaotatakse?
Puit, pinnas, kivi, olme, ohtlik, muud jäätmed (kiled, sojustus, papp jne)
toimub, sorteerime puitu, ohtlike jäätmeid ja metalli
Jah. Ohtlikud jäätmed, ehituspraht (segajäätmed) ja puit.
Metall Paber ja kile Segajäätmed puit olmejäätmed ohtlikud jäätmed
Jah. Puidujäätmed, ehitus- ja lammutussegapraht, täitematerjal (tellised, betoon, kivid), asbesti sisaldavad jäätmed. Kui on suuremas koguses paberit, pappi või kile, siis ka need eraldi.
2. Kas betoon eraldatakse muudest ehitusjäätmetest?
Ei
jah
Jah, kui on betooni ülejääk kaubabetonist (üldiselt lastakse objektile mingi väiksem kogus maha ja see jääbki pinnasesse). Kui on suuremad kogused betooni üle, siis see läheb tagasi betoonitehasesse betoonimiksriga, kus siis sellest betoonplokke või silluseid valatakse. Maksame tagasi mineva betooni eest betoonitehastele eraldi. Kui jääb üle mingeid segukotte või väiksemaid (ca 25kg betooni) koguseid, siis läheb segaprügisse. Üldiselt ei tasu betooni segaprügisse visata, sest prügikonteineri tühjenduse puhul

maksame prügi massi peale ning teatavasti betooni erikaal on üpriski kõrge. Kui jääb üle mingi praak betoonelement, siis saadame selle tagasi betoonelemendi tootjale.

Olenevalt objektist ja jätmete kogusest. Väiksemad kogused jäävad segajätmetesse

Täitematerjali koosseisu kuulub üldjuhul.

3. Kui tihedalt puutute kokku oma ehitusplatsidel betoonhoonete lammutamise ja betoonijätmetega?

Vähe

igapäevaselt

Mitte väga tihedalt, kuid paari aasta jooksul vähemalt üks kord kindlasti.

Mitte väga tihti aga on olnud ka suuremahulisi lammutusobjekte.

Betoonhoonete lammutamisega harva, pigem vanad betoonpõrandad, seinad jmt.

4. Kuidas toimub Teie ehitusplatsidel betoonjätmete käitlemine?

Mis jääb üle, kas valatakse vormi või saadetakse autoga tagasi.

Kui maht on väike siis lähevad prügimäele. Kui maht on oluline siis purustame, kui võimalik objektil.

Kui räägime antud küsimuse puhul lammutatud hoone betoonijätmetest, siis need "krõmpsutatakse" ekskavaatori küljes olevate betoonikäridega katki ning eraldatakse armatuur purustis elektromagnetiga. Purustatud betoon läheb täitepinnaseks või teede ja hoone põrandate aluste ehitamiseks.

Kui on tegemist mingi vale- või defektse tootega siis on see jäänud nn süüdlase kraesse. Võiksemad tükid utiliseerib üldjuhul objektile valitud jäätmekäitleja.

Jäätmeid käitleb vastavat litsentsi omav ettevõtte, ladustatakse üldjuhul konteineritesse või töömaapiires hunnikusse ja transporditakse jäätmekäitlusega tegelevasse ettevõttesse.

5. Mida olete teinud näiteks krundil asuva lammutatava betoonhoonega? Kuidas toimus hoone purustamine? Milliseid masinaid kasutati?

Puudub kokkupuude.
Läheb reeglina täitekihtidesse põrandate alla
Eelmise küsimuse vastus ehk siis ekskavaatoriga purustatakse betoonkeha tükkideks ning see läheb purustisse, kus elektromagnet eraldab armatuuri ning purustab suuremad tükid täitsepinnasesse sobiva suurusega tükkideks. Lammutatud on ka põrandaid 4. korrusel, kus põrand piigati piikvasaratega ülesse käruga transporditavateks tükkideks ning visati aknast ehitusjätmete konteinerisse läbi prügitoru.
Hoone lammutati koppadega ja purustati kohale toodud betoonipurustiga killustikuks.
Otseselt hooneid ei ole lammutanud ega purustanud.
6. Kas jäätmeid kasutati mingil moel ka uuesti samal objektil?
Täitematerjalina
jah
Jah, kasutati teede ja põranda aluste ehitamiseks.
Osaliselt sai kasutatud ajutiste teede rajamisel ja ka aluste ehitusel, kus seda lubati .
Ei
7. Kuhu jäätmed lõpuks toimetati?
Jäätmeveo firma poolt jäätmejaama.
Kui jäätmed ei lähe kasutusse siis liiguvad nad tavaliselt kas lammutusfirma laoplatsile või prügimäele.
Ühel juhul ei viidud objektilt minema, teisel juhul viis OÜ Keskkonnateenused jäätmed kogumiskohta ja sealt ilmselt viiakse uuele objektile täitematerjaliks.
Ülejäänud jäätmed viidi ajutisse ladustusväljakule, kust siis ajapikku realiseeriti. Kuna killustik jäi lepingu põhiselt lammutajale siis puudub täpsem teave taaskasutuse kohta.
Vt. punkt 4.

8. Kas platsil toimus ka betooni purustamine betoonkillustikuks? Kui jah siis mis ettevõtte seda teenust pakkus?
Ei
Jah, Lustrum, Purustaja, Eldostar jne
Jah, seda pakkus meile OÜ Tartu Teenused. Ilmselt pakub seda teenus ka OÜ Terasteenus.
Suuremahuline purustamine toimus juba aastaid tagasi ja see ettevõtte on tänaseks tegevuse lõpetanud
Ei
9. Mis on Teie arvates betoonkillustiku peamised utiliseerimise võimalused? Milleks oleks võimalik betoonijäätke veel kasutada?
Täitematerjalina
Betoonkillustikku ei ole mõtet ju utiliseerida, ei sa küsimuse sisust aru.
Täitepinnaseks ja teede ning põrandate aluste ehitamiseks paekillustiku asemel.
Üldjuhul on see läinud ikkagi suuremahulisteks täideteks.
Teede- ja platside alused.
10. Kas olete kuulnud betoonkillustiku kasutamise võimalusest uues betoonsegus? Kas arvate, et Eestis oleks sel tulevikku?
Oleks tulevikku.
Võiks olla küll kuid ma ei usu et betoonijäätmete maht on nii suur et see katab betooni killustiku vajaduse
Ei ole kuulnud, kuid idee kõlab selliselt, et võiks ju toimida, kui betoonijäätmed pole päris "pehmed" ning annavad paekillustiku survetugevuse välja.
Ei ole kuulnud. Tuleks ilmselt kõne alla konstruktsioonides, kus ei ole oluline väga kindla betooni margi saamine. Kandekonstruktsioonides on see ilmselt keeruline.

Ei ole kuulnud ega antud teemaga ennast kursis hoidnud. Kui suudab hinnas konkureerida hetkel laialdaselt kasutatavate materjalidega, siis miks mitte.

11. Kas leiate, et betoonijätmeid peaks rohkem väärindama või on praegune süsteem toimiv ja piisav?

Peaks rohkem väärindama.

praegune süsteem on piisav

Võiks ikka rohkem väärindada, kuid usun, et praegu ka keegi betoonijätmeid metsa alla ei vii.

Usun küll. Hea oleks juba see kui see segajätmete hulka ei satuks.

Betoonijätmeid ja üleüldse jätmeid peaks rohkem väärindama ja soosima nende taaskasutamist.

Tabel L 1.2 Betooni lammutusega tegelevate ettevõtete vastused

1. Mis on Teie ettevõtte peamised tegevusalad?
Teede platside ehitus
Teedehitus ja hooldus valdkond, rasketehnika rent
Pinnase- kaevetööd, lammutustööd ja jäätmete utiliseerimine
Killumeister OÜ tegevusalaks on killustike tootmine kruusast, paekivist, betooni- ja asfaltbetoonijäätmetest. Meie seadmed on mobiilsed, mis võimaldavad teha töid üle Eesti.
Üldehitus ja lammutustööd
2. Kuidas olete seotud betoonkillustikuga? Kas näiteks tegelete betoonjääkide lammutamise, purustamise, kokkuostmise, müügi või muu taolisega?
Purustame (ainult Betoon detaile) lammutusega ei tegele kuna betoondetaili killustik on kvaliteetsem
Tegeleme teenuse pakkumisega, betooni jääkide ära vedu ja ladustamine
Betoonjäätmel ladustame oma platsil millest võetakse välja armatuur. Suuremad tükid purustatakse eri fraktsioonidesse mis müüakse tagasitäiteks erinevatele objektidele.
Lammutamisega, betoonijäätmete kokkuostmisega ja müügiga ei tegele. Purustame betoonijäätmel tellija poolt soovitud fraktsiooni killustikuks. Vajadusel teostame ka suuremate detailide eelpurustamist pulberdajaga varustatud ekskavaatoriga.
Lammutamisel on väga palju betoonist jääke. Ja enamus betooni jääkidest firma utiliseerib läbi firmade, kellel on olemas litsensid. Tihtipeale oleme andnud tasuta betoonijäätmel pinnase, aukude täitmiseks krundi omanikule.
3. Millega peab arvestama lammutusjäätmel kokku ostmisel ja turustamisel? Kas on ka piiranguid müüdava materjali osas? Milliseid?
Müüakse ka lammutus jäätmel betoonkillustiku nime all, lisaks segatakse

Enamasti makstaks selle eest, et saada ladustada betoonijääke. Nõudlus betoon killustikule on stabiilselt olemas. Hind on tunduvalt odavam kui karjääri materjal.

Materjali vastuvõtmisel peab arvestama just seda kui eelsorteeritud see on, ehk mineraalsetes materjalides ei oleks plastikut, puitu jne. Enamus mineraalne materjal sobib tagasitäiteks, oleneb fraktsioonidest ja seda on oluliselt lihtsam müüa.

Kokkuostja peaks ehitusjäätmete vastuvõtmisel kohe eraldama betoonijäätmed ja muud ehitusjäätmek, sest hilisem sorteerimine võib osutuda liiga kulukaks.

Piiranguid ei tohiks olla.

4. Mis on Teie arvates betoonkillustiku peamised utiliseerimise võimalused? Milleks oleks veel võimalik betoonijääke kasutada?

Meie ei utiliseeri vaid ehitame teid ja platse sellest, kõnniteedel tänavakivi alla, ehitusaegseid ajutisi teid jne

Betooni jääkidest killustiku tegemine on parim lahendus. Eriti teades, et maavara ressursid on piiratud. Betoon killustiku kasutamine teedehituses on olulise tähtsusega. Tihtipeale ületab nõudlus pakkumise.

Betoonkillustik sobib ikkagi tagasitäiteks ja tealusteks kus ei ole erilisi nõudeid. Samuti kasutatakse sadamate kaldakindlustuse alusmaterjalina.

Betoonkillustik sobib kõige paremini teede killustikaluste ehitamiseks. Sobib ka ehiatavate torustike drenivas aluspadjas kasutamiseks. Suurem fraktsioon, kus on metall eraldatud, sobib täitetöödeks.

Arvan, et pinnaste täitmisteks, teede aluskihtides .

5. Kus on võimalik Teie betoonkillustikku kasutada? Kas on/oleks võimalik seda uues betoonisegus kasutada, et vähendada uue täiteaine kasutamist?

Võimalik siis kui seda sõeluda eraldi fraktsioonidesse

Kuna ise ei tegele betooni tootmisega siis ei oska öelda. Aga arvan, et see on reaalne. Aga siis tuleb peen osis välja sõeluda. Tänapäev enam levinud materjal mida betooni jäätmekete purustamisel saadakse on 0 - 70 või 0 - 90, millel on turgu piisavalt.

Nagu eelnevalt vastatud siis kasutame antud toodet erinevate objektide tagasitäitena ja teealustena. Kas seda kasutada uuesti betoonsegus ei oska öelda. Eeldan, et antud betoonkillustik peab piinlikult puhas olema.

Teedehituses Maanteede projekteerimismääruste p.4.4 (10) alusel. Võiks kasutada ka mittevastutusrikastes betoondetailides (näit. betoonist vundamendiplokkides).

Minu teada uue betooni tegemisel veel rakendust ei ole

6. Kui ei, siis kas olete sellest ideest kuulnud ja/ või sellele mõelnud?

Kuna kaubabetooni ei tooda siis ei ole proovinud. Kogu killustik läheb meil ära teede alla ei ole

Ei ole sellest ideest kuulnud kuid antud ideel on kindlasti jumat kui arvestada mis maksab täna killustiku tonni hind ja purustatud betooni hind.

Oleme varem pakkunud ühele betoonisegudega tegelevale ettevõttele , aga nad loobusid.

Sellest pole veel kuulnud.Aga oleks tore ,kui saaks ära kasutada uue betooni tegemisel

7. Kas arvate, et Eestis oleks sellel tulevikku?

Kindlasti on

ei oska öelda, tõenäoliselt on siis vaja ühtlast purustatud materjali, millel oleks ka sertifikaadid.

Arvestades tänaseid turuhindasi ja kohe algavaid suur objekte (Rail Baltica) siis betoonkillustikuga võiks kindlasti betooni hinna madalamaks viia. Iseasi kas seda ka tehake :)

?

Arvan, et kindlasti oleks tulevikku

8. Millised on Teie arvates betoonkillustiku uues segus kasutamise peamised probleemid ja takistused?

Ei tea kuna ei tooda segusid

materjali erinev kvaliteet
Materjalu puhtus ja tugevus.
Betoonkillustiku omaduste kõikumus ja betooni ettevõtete umbusaldus.
Ei oska veel vastata
9. Kas leiate, et kvaliteetsema purustatud materjali saamisel oleks ka kasutusvõimalusi rohkem ehk kas teie arvates oleks sellele ka nõudlust või huvitatud osapooli?
Praegugi läheb kogu kaup ära aga usun et huvi oleks suurem
kindlasti, hind määrab kõik
Kindlasti oleks.
Lisanditeta betoonijäätmete puhul oleks võimalik peenemaid fraktsioone kasutada betoonitööstuses. See nõuaks betooni ettevõtete huvitatust. Kui paekivikillustiku hind on suhteliselt madal, siis on see väheusutatav (võib olla ma eksin ?).
Kindlasti nõudlust oleks
10. Kui tegelete betooni purustamisega, siis mis on Teie ettevõtte kasutatav betooni purustamisprotsess ja milliseid masinaid kasutatakse? Millised on saadused, fraktsioonid?
Purustame 0-70 fraktsiooni
0 - 16, 0 - 32, 0- 70, 0-90 ja 16 - 32
Betoon puhastatakse armatuurist objektil ekskavaatori ja näpitsatega/pulbristajaga. Kui objektile ei mahu siis viiakse laoplatsti kus laetakse purustisse millest oma korda sõela kust saab vastavalt vajadusele eri fraktsioone. peamiselt 0-16, 16-32, 32-64 ja 64-100
Meil on kaks mobiilset rootorpurustit: Terex Powerscreen XH320SR ja Kleemann Mobirex MR110Z Evo. Sõelumiseks kaks mobiilset sõela: Powerscreen 1400 ja 2100. Purusti oma integreeritud sõela ja ringvooluga saab fraktsioone 0/16, 0/32 ja 0/63.

Purustiga jadasse paigaldatud sõelumisseadmega saab fr 0/4, 4/16, 16/32, 32/63, 8/16 jt.
Olen kasutanud purustamisel ATV-d. Täpne info puudub
11. Kas purustamine toimub objektil või tehases?
Tehases
Ladustusplatsil, enamasti on objektil purustamine keelatud, tolm, müra jne.
Üldjuhul laoplatsil
Kohas, kus asuvad betoonijäätmed.
Oleneb tellijast, objektist, asukohast, naabritest jne
12. Kas ja mil moel toimub purustatud betooni puhastamine muudest kõrvalproduktidest?
Ei ole kõrvalprodukte peale metalli, mis eemaldatakse magnetiga
Kuni on puhastamata materjalile turgu ei ole vaja puhastada ja sõeluda. See tõstaks ka märgatavalt hinda. Purustatud materjal peab olema konkurentsivõimeline karjääri materjaliga.
Ekskavaatori haaratsite, pulbristaja ja käsitööna.
Betoonijäätmed peavad enne purustisse laadimist puhastatud kõrvalproduktidest.
Hoone lammutamisel koheselt eraldab ekskavaator betoonist kõik muud elemendid, k.a. ka armatuuri
13. Kas Teie ettevõtte toodangule on antud ka kvaliteedisertifikaate? Kui jah, siis milliseid?
Ei ole taodelnud kuna ei ole vajadust tekkinud
ei
ei ole

Meil on tootmisohje sertifikaat ehitusjätmetest purustatud taaskasutatava täitematerjali fr 0/16, 0/32, 0/63, 0/80, 16/32, 32/63 kasutamiseks ehituses ja teedehituses hüdrauliliselt seotud ja sidumata täitematerjalina.

ON olemas AAA

14. Kas leiate, et betoonijätmeid peaks rohkem väärindama või on praegune süsteem toimiv ja piisav?

On riike kes kasutavad seda enam

meile on piisav

Igasugune materjali väärindamine on mõistlik kui sellega suurendada antud toote laialdasemat kasutamist.

Võimalusel võiks, kui lammutajal või kogujal oleks huvi anda purustamiseks üle ilma lisanditeta betoonijätmed.

Peaks rohkem väärindama betoonijätmeid

Lisa 2 Trotec T610 tulemused:

Tabel L 2.1 Kell 11.00 läbi viidud katse tulemused

0%	1	2	3	4	5	
	79.1	79	81	79	83.3	
	82.3	76.1	79.7	79.3	77.7	
	80	84.9	77	80.7	76.7	
	83.3	80.3	84.6	79.6	83	
	79	75.7	74.4	78.7	80.3	
	87.5	86.2	86.6	86.6	88.6	
	81.86667	80.36667	80.55	80.65	81.6	81.00667
50%	1	2	3	4	5	
	81.6	77.4	78	82	78.7	
	79.7	78.4	82.3	85.2	82	
	82.6	84.3	80.3	83.9	72.5	
	80.3	76.7	83.3	81	80.3	
	74.1	81.3	76.1	83.6	77.4	
	89.5	77.7	85.2	87.5	83.6	
	81.3	79.3	80.86667	83.86667	79.08333	80.88333
20/20%	1	2	3	4	5	
	78	75.4	81.3	76.7	75.6	
	78.7	80	76.7	82.3	78.4	
	81.6	81.6	80.3	83.3	79.3	
	84.3	78	85.6	74.4	82.3	
	83.6	78.4	75.4	74.9	77.4	
	85.6	80	83.3	85.9	83	
	81.96667	78.9	80.43333	79.58333	79.33333	80.04333
20%	1	2	3	4	5	
	73.8	73.4	74.1	78.7	78.4	
	71.8	78.4	78	85.2	78	
	80	73.1	80	74.4	73.4	
	77.7	75.4	82.6	83.9	81	
	71.6	76.4	76.4	80.7	74.1	
	90.5	82	85.2	92.1	90.5	
	77.56667	76.45	79.38333	82.5	79.23333	79.02667

Tabel L 2.2 kell 15.00 läbi viidud katse tulemused

0%	1	2	3	4	5	
	75.1	76.1	70.2	74.4	71.8	
	82.2	78.6	77.7	75.7	76.1	
	75.7	74.1	75.1	78.3	73.5	
	79.6	77.7	76.4	79	72.5	
	74.1	81.6	76.1	73.9	71.8	
	81.3	72.5	83.2	80.6	78.3	
	78	76.76667	76.45	76.98333	74	76.44
50%	1	2	3	4	5	
	74.8	72.5	75.1	76.4	76.1	
	76.1	81.6	71.2	81.6	74.8	
	75.4	77.3	73.5	79	75.7	
	75.1	72.5	76.7	73.8	70.6	
	72.5	71.2	72.5	78.3	74.8	
	80.3	76.7	82.8	82.5	78.6	
	75.7	75.3	75.3	78.6	75.1	76
20/20%	1	2	3	4	5	
	76.4	74.4	74.1	74.4	76.7	
	75.4	68	65	72.5	74.8	
	79.3	78.3	75.1	70.2	79.9	
	80.9	71.2	73.1	78	80.3	
	79.6	75.1	75.7	73.5	72.5	
	80.3	79.3	80.6	86.4	80.3	
	78.65	74.38333	73.93333	75.83333	77.41667	76.04333
20%	1	2	3	4	5	
	81.9	75.4	81.6	79.9	74.4	
	80.3	76.4	75.7	77	76.4	
	74.8	73.1	74.1	76.4	74.4	
	74.1	76.4	72.2	72.5	75.4	
	79	73.1	70.2	76.1	80.3	
	83.5	79	84.5	81.9	79.3	
	78.93333	75.56667	76.38333	77.3	76.7	76.97667