Ressursitõhus killustiku tootmine ehitus- ja lammutusjäätmetest ettevõtte Väo Paas OÜ näitel

Magistritöö

Üliõpilane: Brigitta Uibo, 211638LARM

Juhendajad: Karin Robam, spetsialist, MSc

Tony Hand, projektijuht, PhD

Õppekava: Maapõueressursid (LARM18/20)

Tallinn 2023

Autorideklaratsioon

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

Autor: Brigitta Uibo

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.
Juhendaja: Karin Robam

[allkiri ja kuupäev]

Töö on lubatud kaitsmisele.
Kaitsmiskomisjoni esimees:

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Annotatsioon....4
Abstract....5
Jooniste loetelu....7
Tabelite loetelu....8
1. Sissejuhatus....9
2. Ressursitõhus tootmine ning ümbertöötlemine....10
3. Jäätmeteke....11
3.1. Ehitusjäätmete tekkimise maht....11
3.2. Ümbertöödeldud ehitus- ja lammutusjäätmete uuritus ja taaskasutamine Eestis....15
3.2.1 Ümbertöödeldud materjalide varasem taaskasutamine Eesti ehitussektoris....16
3.2.2 Küsimustik Harju maakonnas ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise kohta....17
3.3. Ümbertöödeldud ehitus- ja lammutusjäätmete uuritus ja taaskasutamine mujal....17
3.3.1. Ümbertöödeldud materjalide varasem taaskasutamine ehitussektoris....18
3.4 Ehitusjäätmetega kaasnevad mittemineraalsed materjalid ja nende kasutusvõimalused....20
4. Metoodika....23
4.1 Materjali kvaliteedi hindamine ja toimivus....23
4.2 Materjali keskkonnamõju analüüs....23
4.3 Majandusarvutused....24
4.4 Ümbertöödeldud materjalidest killustiku tootmise tehnoloogiline skeem....24
5. Ehitusjäätmetest ümbertöödeldud killustiku geomeetrilised omadused....25
5.1 Purustatud betooni terastikulise koostise hindamine....25
5.1.1 Materjali katsetamine....25
5.1.2 Arvutused....26
5.1.3 Katsete tulemused ja järeldused....26
5.1.4 Näidis-toimivusdeklaratsioon materjali turustamiseks....27
6. Ehitusjäätmetest killustiku tootmise tehnoloogiline skeem ettevõtte Väo Paas OÜ näitel....30
7. Lubjakivikillustiku ja ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkiva keskkonnamõju analüüs....33
7.1 Keskkonnamõju analüüsi metoodika....33
7.2 Tavakillustiku tootmisprotsess....33
7.2.1 Tavakillustiku tootmisel tekkivad süsinikdioksiidi heited....37
7.3 Ümbertöödeldud killustiku tootmisprotsess....38
7.3.1 Ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkivad süsinikdioksiidi heited....39
7.4 Süsinikujalajälje võrdlus lubjakivist ja ümbertöödeldud materjalidest killustiku tootmisel....39
8. Majandusarvutused....42
8.1 Lubjakivi killustiku tootmise tonni omahind....42
8.2 Ümbertöödeldud materjalist killustiku tootmise tonni omahind....43

9. Nõuded killustikule Eestis 45
9.1 Teedeehitus 45
9.1.1 Nõuded ridakillustikule ja fraktsioneeritud killustikule 46
9.1.2 Nõuded sidumata segudele 46
9.1.3 Nõuded mustkillustikule 47
9.2 Betoon 47
9.3 Turupotentsiaal ümbertöödeldud killustikule Eestis 48
Analüüs ja tulemused 49
Arutelu ja järeldused 50
Kokkuvõte 52
Tänuavaldused 53
Kirjanduse loetelu 54
Lisa 1. Ehitus- ja lammutusjäätmetest killustiku tootmise tehnoloogiline skeem ettevõttes Väo Paas OÜ 59
Lisa 2. Kirjavahetus Kiili valla ja Loksa linna esindajatega 60
Lisa 3. Masinate CAT 336 ja Liebherr 934 CO2 jäätme tekkemahud (A. Sarv, Avesco OÜ esindaja, 31.03.2023) 61
Lisa 4. Kütusearvutaja mudel (Väo Paas OÜ, 20.03.2023) 62

Annotatsioon

Ehitiste kasutusest välja langemisel või rekonstrueerimisel tekib iga aasta märkimisväärne kogus ehitus- ja lammutusjäätmeid. Ringmajanduslikust perspektiivist lähtuvalt tuleb üha enam jäätmeid käsitleda ressursina ning neid ringlusesse tagasi suunata. Sellele tuginedes uuriti käesoleva magistritöö raames, kas ettevõttes Väo Paas OÜ on mineraalsetest jäätmetest killustiku tootmine keskkonda säästvam ning majanduslikult kasumlikum kui lubjakivist killustikku tootes. Samuti uuriti, kuidas on võimalik ebaühtlaste füüsikaliste omadustega materjali turundada, milline on materjali turupotentsiaal ning millise tehnoloogilise skeemi alusel on ettevõttes olemasoleva masinapargi abil võimalik jäätmeid täitematerjalideks ümber töödelda.

Töö keskkonnamõju analüüsi osas arvutati ettevõtte Väo Paas OÜ tingimustes, ühest tonnist lubjakivist ning ühest tonnist mineraalsetest jäätmetest killustiku tootmisel tekkivad CO_2 jäätmemahud, mida masinad toodavad. Ümbertöödeldud killustiku turundamiseks ettevõttes, viidi karjääri katselaboris läbi purustatud betoonmaterjali geomeetriliste omaduste katsed, et saadud tulemuste põhjal koostada nõuetekohased toimivusdeklaratsioonid, mille alusel on võimalus ümbertöödeldud materjale nõuetekohaselt müüa. Tuginedes karjääri töö vaatlustele koostati tehnoloogiline skeem, mille järgi on võimalik jäätmetest toota ümbertöödeldud täitematerjale.

Magistritöös selgus, et ümbertöödeldud killustiku tootmisel on oluliselt suurem CO_2 jalajälg kui lubjakivist killustiku tootmisel. Seda põhjustab ennekõike vajadus jäätmeid suurtes kogustes transportida lammutusplatsilt ettevõtte tootmisterritooriumile. Keskkonnasõbralikuma lahendusena pakuti välja purustus- ja sõelaseadme transportimist jäätmete tekkekohta, et minimeerida vajadust jäätmete transportimiseks suurtes mahtudes. Purustatud betooni katsetulemuste käigus saadud tulemuste põhjal koostati materjalidele toimivusdeklaratsioonid, mille baasil on võimalik materjali turustada sidumata segudena ja millel on deklareeritud geomeetrilised omadused. Materjali turupotentsiaal on autori hinnangul eraisikud ning ehitusettevõtjad, kelle hinnangul on geomeetriliste omaduste garantii antud materjali puhul ammendav.
Majandusarvutuste tulemused näitasid, et ehitus-ja lammutusjäätmetest toodetud killustiku tonni omahind on märkimisväärselt madalam kui lubjakivist toodetud killustiku puhul, kuid Harju maakonna jäätmete tekkemahud ei suuda katta ettevõtte tavapärast tootmisvõimsust.

Magistritöö lõppjäreldusena väidab autor, et ettevõttel on edukalt võimalik lisategevusena tegeleda mineraalsete jäätmete ümbertöötlemisega ning saadud materjalide müügiga, pikendades nii karjääri eluiga ning panustades seejuures ka materjalide ringlusse suunamisega. Autori hinnangul võiks töö tulemustele tuginedes Eesti eri piirkondades asuvad paekivi karjäärid võtta samuti vastu ehitus- ja lammutusjäätmeid, andes nii ka eraisikutele kui ka ettevõtetele võimaluse oma tekkivad jäätmed taas ringlusesse suunata.

Resource-efficient production of aggregates from construction and demolition waste: a case study from Väo Paas

Abstract

As buildings fall out of use or are reconstructed, a significant amount of construction and demolition waste is generated every year. From a circular economy perspective, more waste must be treated as a resource in order to be recycled. Based on this, within the framework of this master's thesis, it was investigated whether the production of aggregates from mineral waste in the company Väo Paas is more environmentally friendly and economically profitable than the production of limestone aggregates. It was also investigated how it is possible to market a material with heterogenous physical properties, what is the market potential of the material and on the basis of which technological scheme it is possible to reprocess waste into aggregares with the help of the company's existing machinery.

Regarding the analysis of the environmental impact of the work, under the conditions of the company Väo Paas OÜ, the volumes of CO_2 waste generated by the machines produced during the production of crushed stone from a ton of limestone and mineral waste were calculated. In order to market the recycled crushed stone in the company, tests of the geometric properties of the crushed concrete material were carried out in the quarry test laboratory, in order to draw up appropriate performance declarations based on the obtained results, on the basis of which it is possible to properly sell the recycled materials. Based on the observations of the quarry work, a technological scheme was drawn up, according to which it is possible to produce recycled aggregates from waste.

In the master's thesis, it was revealed that the production of recycled aggregates in the company has a significantly larger CO_2 footprint than the production of limestone crushed stone, which is primarily caused by the need to transport waste in large quantities from the demolition site to the company's production territory. As a more environmentally friendly solution, the transportation of the crushing and screening device to the place of waste generation was proposed to minimize the need to transport waste in large volumes. Based on the results obtained during the test results of crushed concrete, performance declarations were prepared for the materials, on the basis of which it is possible to market the material as unbound mixtures with declared geometric properties. According to the author, the market potential of the material is private individuals and construction companies, in whose opinion the guarantee of geometric properties is exhaustive for the material. The results of economic calculations showed that the company's cost per ton of crushed stone produced from waste is significantly lower than in the case of limestone crushed stone, but the amount of waste generated in Harju County cannot cover the company's normal production capacity.

As the final conclusion of the master's thesis, the author claims that the company can successfully deal with the reprocessing of mineral waste and the sale of the obtained materials as an additional activity to the production of crushed stone from limestone, extending the life span of the quarry and contributing to the recycling of materials. According to the author, based on the results of the work, limestone quarries located in different regions of Estonia could receive construction and

demolition waste, giving private individuals and companies the opportunity to take the generated waste to the nearest quarry, where by reprocessing the waste, it can be recirculated.

Jooniste loetelu

Joonis 1. Ehitus- ja lammutusjäätmete mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS) 12
Joonis 2. Ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS) 12
Joonis 3. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 tekkemahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS) 13
Joonis 4. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 taaskasutamise mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS) 13
Joonis 5. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 tekkemahud Harju maakonnas vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS) 14
Joonis 6. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 taaskasutamise mahud Harju maakonnas vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS) 15
Joonis 7. Kunsthaus Zürich'i hoone, mille ehitamisel kasutati 98% ulatuses betoonillustikku. (Kunsthaus Zürich kodulehekülg, kasutatud 25.03.2023, https://www.kunsthaus.ch) 19
Joonis 8. Ehitus- ja lammutusjäätmete purustamisel purustusseadmest magnetite abil välja juhitud metallijäätmed ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumil, 12.09.2022. 21
Joonis 9. Purustatud betoonijäätmed ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumil metalli lisandiga (paremal) ja plastiku lisandiga (vasakul), 03.05.2023. 22
Joonis 10. Purustatud betoonist täitematerjal fraktsiooniga 0/63 katseproovid, 02.05.2023. 26
Joonis 11. Katsetatud materjalile koostatud toimivusdeklaratsioon standardi EVS-EN 13242:2006+A1:2008 järgi. 28
Joonis 12. Katsetatud materjalile koostatud toimivusdeklaratsioon standardi EVS-EN 13285:2018 järgi. 29
Joonis 13. Sõelaseadme jaoks ülegabariitsete jäätmete purustatamine hüdrovasaraga (vasakul) ja materjali laadimine ekskavaatoriga purustusseadmesse (paremal), 03.05.2023. 30
Joonis 14. Purustusseadmes eelsõelutud fraktsiooniga 0-32 mm, mis suunatakse puistangusse (vasakul). Purustatud materjal fraktsiooniga 32-64 mm suunatakse purusti tagumises osas puistangusse (paremal), 03.05.2023. 31
Joonis 15. Purustatud materjal fraktsiooniga 0-32 mm liigub purustusseadmest sõelaseadmesse. 04.05.2023. 31
Joonis 16. Purustatud ja sõelutud materjal fraktsioonidega 0-4 mm, 4-16 mm ja 16-32 mm liiguvad sõelaseadmest lintide abil masinast välja puistangutesse, 04.05.2023. 32
Joonis 17. Karjääris korraga lõhatavate plokkide ja katendi paksused. 34
Joonis 18. Ühe tonni killustiku tootmisel tekkivad CO2 jäätmed ettevõttes Väo Paas OÜ 40
Joonis 19. Ühe tonni ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkivad CO2 jäätmed ettevõttes Väo Paas OÜ 41

Tabelite loetelu

Tabel 1. Ehitus- ja lammutusjäätmete tekkimise ja taaskasutamise mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse infosüsteem JATS).....11
Tabel 2. Ettevõtjate hinnang ehitus- ja lammutusjäätmete kohapeal sorteerimisest liigiti (Ehitus- ja lammutus..., 2015, lk 69).....16
Tabel 3. Katseproovide terastikulise koostise katsetamise tulemused, materjali läbind (%) nimisõeladest. 27
Tabel 4. Ettevõttes Väo Paas OÜ kasutatavad masinad, nende kütusekulu ning ühe ploki lubjakivi lõhkamiseks kuluvad töötunnid. 37
Tabel 5. Ettevõttes Väo Paas OÜ lubjakivist killustiku tonnihinna kujunemine.....43
Tabel 6. Ettevõttes Väo Paas OÜ ümbertöödeldud killustiku tonnihinna kujunemine.....44
Tabel 7. Nõuded killustiku omadustele alustes (Majandus- ja taristuministri 3.augusti 2015. a määrus nr 101 „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“, Lisa 9).....45
Tabel 8. Killustiku nõutavad omadused pindamisel (Majandus- ja taristuministri 3.augusti 2015. a määrus nr 101 „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“, Lisa 12).....46

1. Sissejuhatus

Eestis ning muudes arenenud ühiskondades on suur ühiskondlik suundumus keskkonnasõbralikuma ja ressursitõhusama tootmise ning tarbimise poole. Selle saavutamiseks on oluline minimeerida ka jäätmete teket, suunates need võimalusel tagasi ringlusesse. Hoonete ja rajatiste ehitamisel kasutatakse suurtes kogustes killustikku ning muid ehitusmaterjale, mille tõttu nõudlus materjalidele püsib. Suurte koguste materjalide kasutamisega kaasnevad ka suured jäätmemahud pärast seda kui ehitised kasutusest välja langevad. Jäätmete käsitlemine uue ressursina aitab vähendada kahte probleemi – suurte jäätmekoguste teket ning vajadust uute toormaterjalide kasutuselevõtule.

Ettevõte Väo Paas OÜ on paekivist killustikku tootev ettevõte, mis asub Harjumaal, Venekülas. Ettevõttes kasutatakse paekivi kaevandamisel ja töötlemisel kaasaegset tehnoloogiat ning ettevõttele on oluline toimida keskkonda säästval viisil. Väo Paas OÜ turuosa Eesti killustikumüügist on 10-15% (Väo Paas.., i.a). Magistritöö keskendub ettevõttes ehitus- ja lammutusjäätmetest ümbertöödeldud killustiku tootmisele ning analüüsib majanduslikke, tehnoloogilisi ja keskkonna-alaseid aspekte, mis selle tegevusega kaasnevad. Käesolev töö on loodud küll silmas pidades konkreetset ettevõtet, kuid töös analüüsitut ja selle põhjal kujundatud seisukohti on võimalik arvesse võtta ka teistes Eestis killustikku tootvates ettevõtetes, kes kaaluvad lisaks tavapärasele tegevusele toota täitematerjale ka mineraalsetest jäätmetest.

Käesoleva magistritöö teoreetilises osas antakse ülevaade Harju maakonnas tekkivatest mineraalsete ehitus- ja lammutusjäätmete tekke- ja taaskasutamise mahtudest. Töö annab ülevaate Eestis ning mujal maailmas mineraalsete jäätmete omaduste uuritusest, senisest ümbertöötlemisest ja taaskasutamisest teiseste täitematerjalidena.

Magistritöö eesmärgiks oli leida vastused järgmistele küsimustele:

- Millise tehnoloogilise skeemi alusel on võimalik ettevõttes Väo Paas OÜ mineraalseid ehitus- ja lammutusjäätmeid killustikuks ümber töödelda?
- Kas Harju maakonnas tekkinud jäätmetest killustiku tootmine on CO_2 jäätmete tekkemahtu silmas pidades keskkonnasäästlikum kui lubjakivist killustiku tootmine ettevõtte Väo Paas OÜ näitel?
- Kas jäätmetest killustiku tootmine ettevõttes Väo Paas OÜ on majanduslikult otstarbekas ning kas Harju maakonnas tekkivad jäätmekogused suudavad ettevõtte tavapärast tootmismahtu teenindada?
- Milliste geomeetriliste omadustega on ettevõtte laos olev mineraalsetest jäätmetest ümbertöödeldud fraktsioneerimata betoonkillustik ning millise toimivusdeklaratsiooni alusel on võimalik materjali kliendile turustada?

2. Ressursitõhus tootmine ning ümbertöötlemine

Euroopa Liidu liikmesriigina peab Eesti pürgima ressursitõhusama majanduse ning keskkonna poole, pidades silmas Euroopa rohelises kokkuleppes püstitatud eesmärke, milles üheks eesmärgiks on säilitada Euroopa Liidu loodusressursse. Rohelise kokkuleppe kohaselt hõlmab ringmajanduse tegevuskava kesktlike toodete poliitikat toetades toodete ringluspõhist kavandamist ning seades esikohale ressursside vähendamise ning korduskasutamise (Fetting, 2020).

Eesti ringmajanduse arendamisel ja selle toimimisel on erinevatel ühiskonnna liikmetel erinevad rollid ning vastutus. Ettevõtjate vastutuseks on luua tooteid ja teenuseid vastutustundlikult, tagades oma tegevuses minimaalse keskkonnamõju. On oluline, et keskkonnateadlik hoiak on juurdunud kõigis ühiskonnakihtides, mis tagab nii kestlikke tootmis- kui ka tarbimisotsuseid. Ringmajanduse rakendamisel on võtmetähtsusega toimiv koostöö erinevate valdkondade ja sektorite vahel. Riigi ning ettevõtjate panus ja koostöö seisneb digitaalsete platvormide loomises, milles jagatava info põhjal on võimalik ringmajanduse põhimõtetest lähtuvat materjalivoogusid jälgida ning tootmist planeerida. Magistritöös on eeskätt kõne all koostöö killustikutooja ning ehitus- ja lammutusteenust pakkuvate ettevõtete vahel, et ehitusjäätmed ringluses oleksid (Ringmajanduse valge.., 2022).

Vabariigi Valitsuse Strateegia „Eesti 2035“ üks viiest sihist on tugev ja uuenduslik majandus, mis hõlmab endas paindlikku, uuendusmeelset ja vastutustulndlikku ettevõtlust ja kohalike ressursside väärindamist. Eesti majanduskeskkond kutsub ettevõtteid investeerima, looma ja katsetama uusi lahendusi, millest on ühiskonnale laiemalt kasu (Vabariigi Valitsuse..., i.a).

Riigi jäätmekava 2022-2028 olemasoleva olukorra loomisel on lähtutud põhimõttest, et tooteid hoitaks kasutuses võimalikult kaua, see hõlmab toodete korduskasutust, ümberkujundamist, parandamist, renoveerimist ning kasutusotstarbe muutmist. Uue kava kolm põhisammast on ohutu materjaliringluse suurendamine, kestlik ja teadlik tootmine ja tarbimine, jäätmetekke vältimine ja korduskasutuse edendamine ning jäätmekäitlusest tulenevate mõjudega arvestamine nii inim- kui ka looduskeskkonnale tervikuna. Alates 1. jaanuarist 2020 kehtestatud piirmäära, mille kohaselt tuleb vähemalt 70% ehitus- ja lammutustegevuses tekkinud materjale ringlusesse võtta, on Eesti seda nõuet täitnud, kuid jäätmeid kasutatakse valdavalt tagasitäimiseks, mis ei ole jäätmete potentsiaalipärane taaskasutamine (Riigi jäätmekava..., 2020).

Organiseeritud ja läbimõeldud jäätmete kogumine, käitlemine, ümbertöötlemine ning taaskasutus aitavad liikuda lähemale ringmajanduse mudelile, maksimeerides ressursside kasutamist ning minimeerides võimalike jäätmete tekkimist.

3. Jäätmeteke

Jäätmeseaduses (2004, § 22[1], Lg 1) kirjeldatud jäätmehierarhia asetab jäätmehooldusmeetmed ja rakendamised prioriteetselt järgmiselt:

1. Jäätmetekke vältimine;
2. Korduskasutuseks ettevalmistamine;
3. Ringlussevõtt;
4. Muu taaskasutamine nagu energiakasutus;
5. Kõrvaldamine.

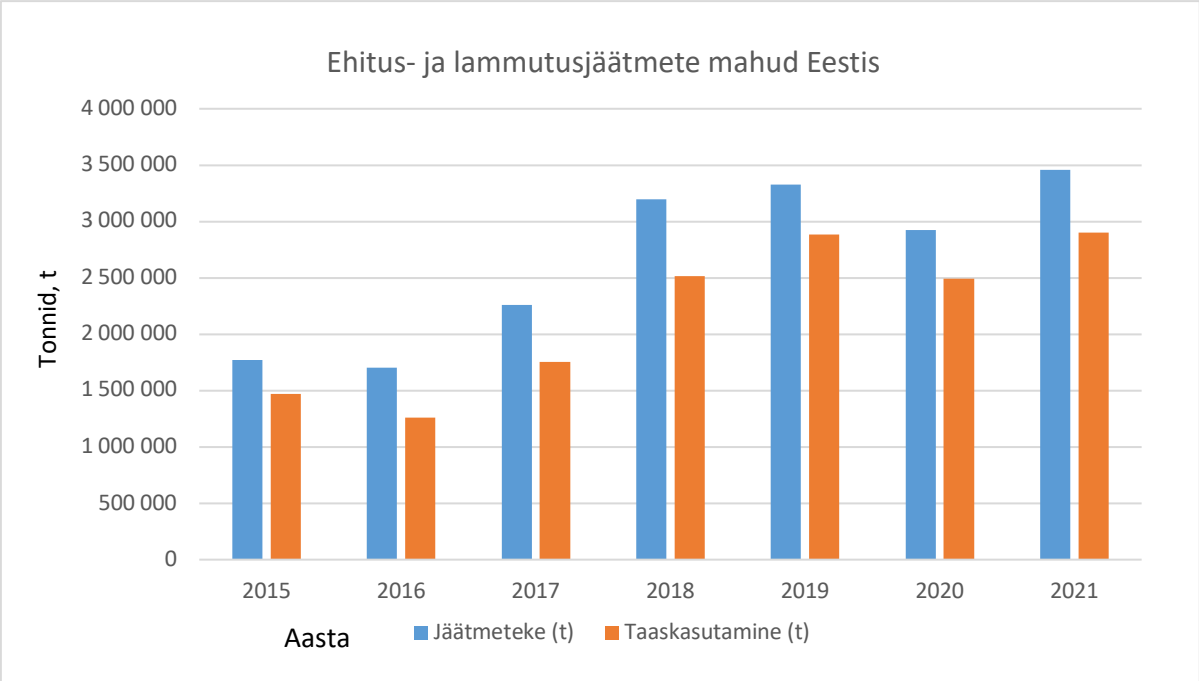
Magistritöös keskendun ehitus- ja lammutusjäätmetest killustiku ümbertöötlemisel eelkõige jäätmehierarhia 2. ja 3. punkti rakendamisele, pidades silmas jäätmehierarhia hea tava.

3.1. Ehitusjäätmete tekkimise maht

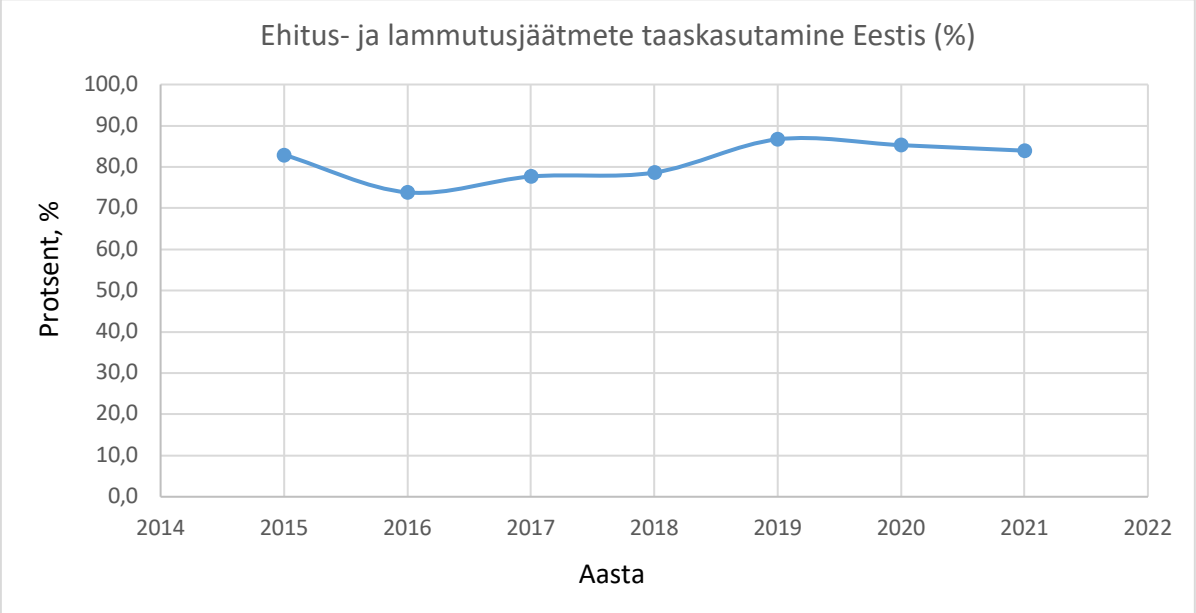
Eestis tekib viimastel aastatel ligikaudu kolm miljonit tonni ehitus- ja lammutusjäätmeid aastas ning jäätmete taaskasutamise protsent on ligikaudu 80%. Tabelis 1 (Joonis 1) toodud kogustatistika jäätmete kohta kajastab kõiki ehitus- ja lammutusjäätmeid, mis on Eestis aastate 2015-2021 lõikes tekkinud. Samas ajavahemikus jäätmete taaskasutamise statistika (Joonis 2) kajastab kõiki taaskasutamise toiminguid alates materjalide teisesest kasutamisest kuni madala väärtusega kasutamisest pinnasetäitena.

Tabel 1. Ehitus- ja lammutusjäätmete tekkimise ja taaskasutamise mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse infosüsteem JATS).

Aasta	Jäätmeteke, t	Taaskasutamine, t	Taaskasutamine, %
2021	3 455 401	2 901 019	84,0
2020	2 921 931	2 492 109	85,3
2019	3 325 008	2 882 906	86,7
2018	3 197 348	2 514 498	78,9
2017	2 259 154	1 754 954	77,7
2016	1 705 052	1 258 977	73,8
2015	1 770 833	1 469 014	83,0

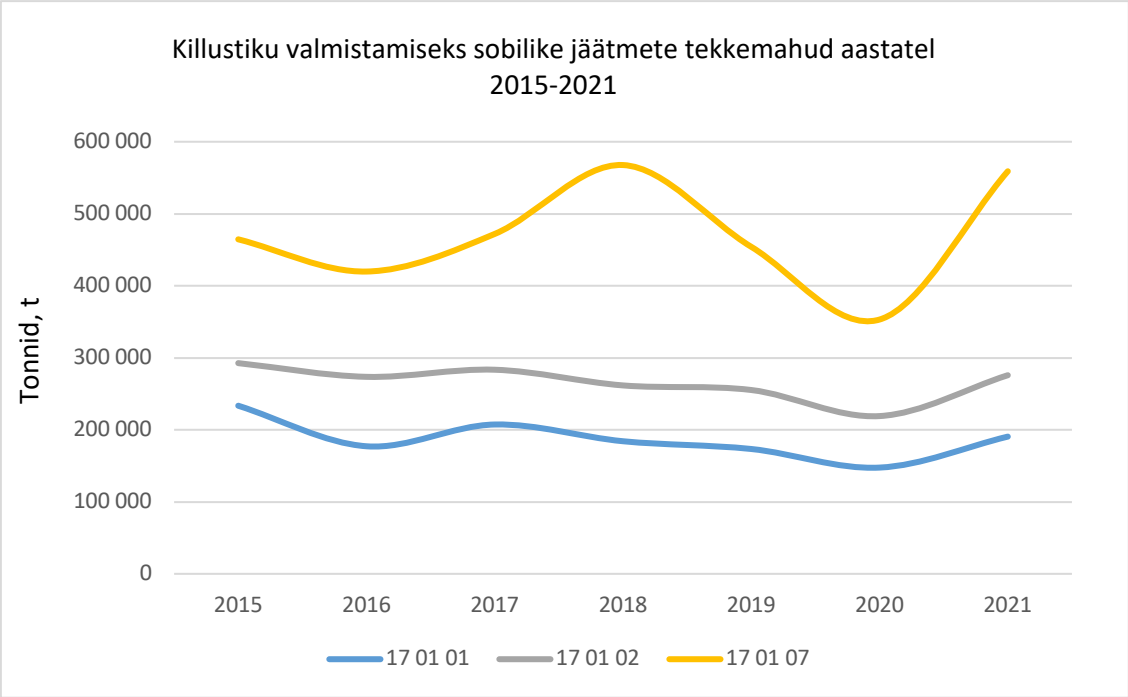


Joonis 1. Ehitus- ja lammutusjäätmete mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS)

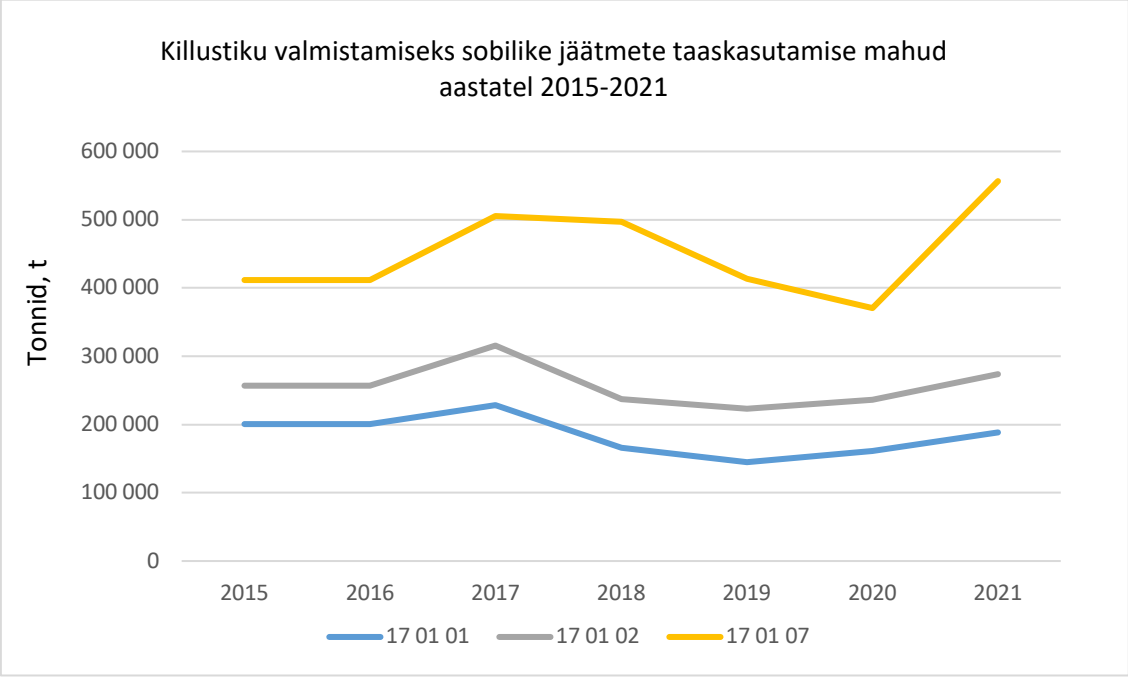


Joonis 2. Ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS)

Ehitus- ja lammutusjäätmed, mis on oma sisalduselt ning omadustelt sobilikud killustiku tootmiseks, on jäätmekoodidega 17 01 01 (Betoon), 17 01 02 (Tellised) ja 17 01 07 (Betooni-, tellise-, plaadi- või keraamikatootesegud, mida ei ole nimetatud koodinumbriga 17 01 06). Nimetatud jäätmete tekkemahte iseloomustab joonis 3 ning suur vastavate jäätmete taaskasutamine (joonis 4) viitab jäätmete kõrgele väärtusele tootmis- ja ehitussektoris.



Joonis 3. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 tekkemahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS)

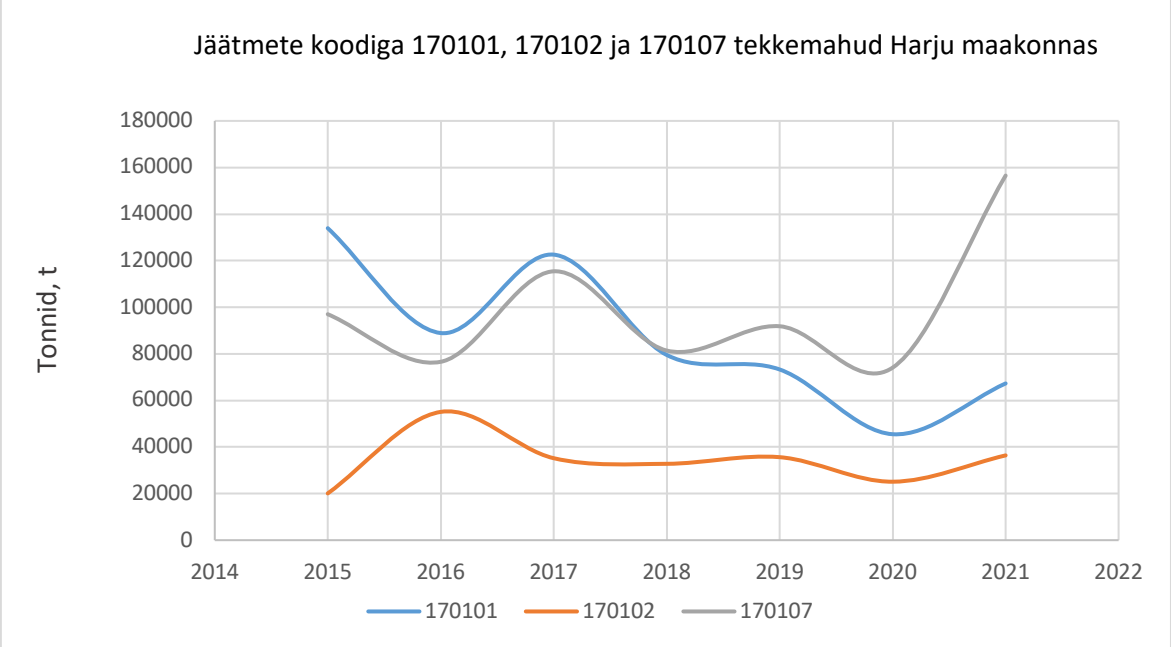


Joonis 4. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 taaskasutamise mahud Eestis vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS)

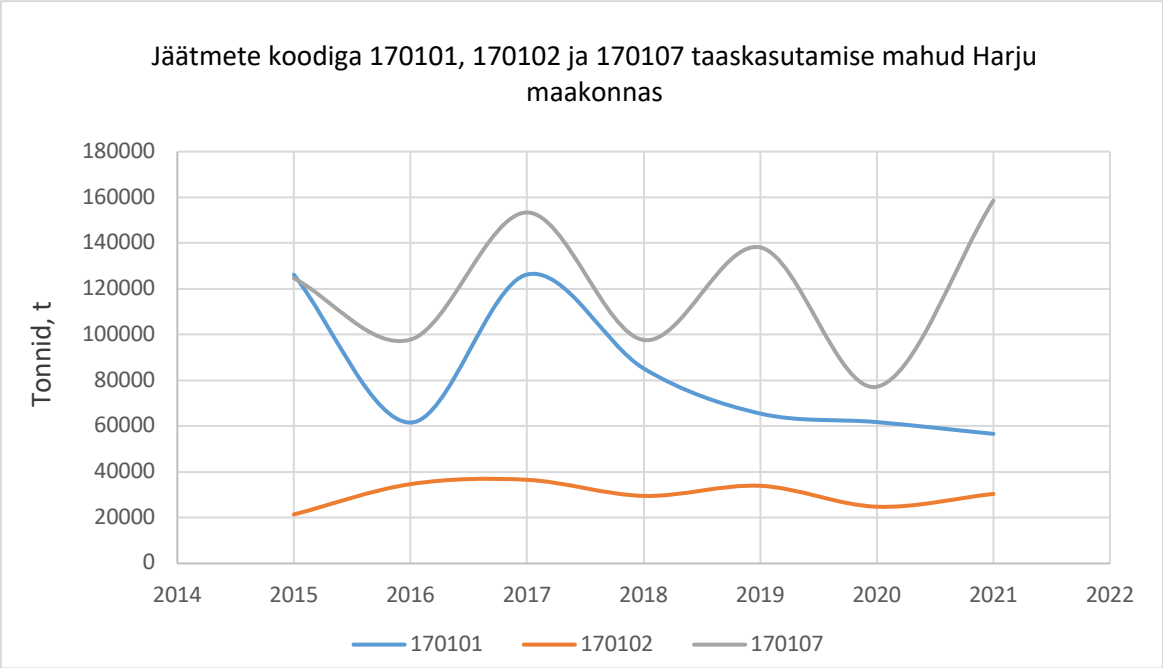
Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna professor Mihkel Kiviste hinnangul on ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise mahud võrdlemisi suured ning ligi 84% materjalist jõuab tagasi ringlusesse. Märkimisväärne kogus ehitus- ja lammutusjäätmetest aga ei leia teisest kasutamist ja potentsiaalipärast väärindamist, see leiab kasutust pigem vaid pinnasetäitena. Lahendusena pakub Mihkel Kiviste välja läbimõeldud lammutamist, kus hoone justkui demonteeritakse, pidades silmas väärtusliku materjali säästmist ning liigiti kokku kogumist (Traks, 2023).

Aastaks 2050 langeb kasutusest välja ligikaudu 5000 korterelamut ning 10 000 mitteeluhoonet, mis kuuluvad lammutamisele (Hoonete rekonstrueerimise.., 2020). Sellest võib järeldada, et ringlusesse satub lähikümnenditel suur hulk ehitusjäätmeid, mida on võimalik taaskasutada ning ümber töödelda. „Ehitus- ja lammutusjäätmete tekke prognoosi andmine on keeruline ülesanne. Prognoosida näiteks Tallinnas tekkivate ehitus- lammutusjäätmete teket lähimaks 10...20 aastaks ei ole alusmaterjali.“ (Ideon ja Osjamets, 2010, lk 61).

Ehitus- ja lammutusjäätmete transportimine jäätmete tekkekohast ümbertöötlemise kompleksi, ehk käesoleva töö raames ettevõttes Väo Paas OÜ tööstusterritooriumile, on majanduslikult kulukas ning koormab ühtlasi ka keskkonda. Et hoida transpordikulud optimaalsed ning minimeerida transportimisel tekkivat keskkonnajalajälge, on mõistlik ümber töödelda vaid jäätmeid, mis tekivad Harju maakonna piires. Harju maakonnas tekkinud ehitus- ja lammutusjäätmete tekke ja taaskasutamise mahud, millest on võimalik ümbertöödeldud killustiku toota, on nähtavad joonistel 5 ja 6.



Joonis 5. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 tekkemahud Harju maakonnas vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS)



Joonis 6. Ehitus- ja lammutusjäätmete 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 taaskasutamise mahud Harju maakonnas vahemikus 2015-2021 (Jäätmearuandluse süsteem JATS)

3.2. Ümbertöödeldud ehitus- ja lammutusjäätmete uuritus ja taaskasutamine Eestis

„Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlemise turuosalised on ehitus- ja lammutusettevõtted, jäätmete vedajad, ümbertöötlejad, edasimüüjad ning ladestajad. Mitmed lammutusettevõtted tegelevad ka jäätmete ümbertöötlemisega ning killustiku müügiga, samuti nagu mitmed prügilad tegelevad ehitus- ja lammutusjäätmete ümbertöötlemise ja edasi müügiga.“ (Ehitus- ja lammutus..., 2015, lk 31). Eestis tegelevad ehitus- ja lammutusjäätmete ümbertöötlemisega ettevõtted ATI Grupp OÜ (Ati Grupp..., i.a), Aspen Grupp OÜ (Aspen Grupp.., i.a), Purustaja OÜ (Purustaja OÜ.., i.a), Crushtec OÜ (Crushtec OÜ.., i.a), Karimek OÜ (Karimek OÜ.., i.a), Kalsep OÜ (Kalsep OÜ.., i.a), OÜ Vectra (OÜ Vectra.., i.a), Arula Veod OÜ (Arula.., i.a), Killumeister OÜ (Killumeister.., i.a), Verostiil OÜ (Verostiil.., i.a) ja OÜ Mantrum (OÜ Mantrum.., i.a).

Ehitus- ja lammutusettevõtjate seas läbi viidud küsitluse kohaselt koguvad 282 ettevõttest 26% jäätmeid segaehitusprahina ning 74% sorteerivad jäätmeid liigiti. Ettevõtjad osutasid küsitluses jäätmete liigiti kogumisel probleemiks vajaduse objektidel suuremahuliste konteinerite järgi, mis võtavad enda alla palju ruumi. Kuna ehitus- ja lammutustegevuse kõrvalt jäätmete liigiti sorteerimine on ettevõtjale lisakulu, nii ajaliselt kui majanduslikult, leiavad mitmed ettevõtjad, et neil on otstarbekam jäätmed kokku koguda ning anda üle jäätmekäitlejale, kes vastutab jäätmete transpordi, sorteerimise ja edasise saatuse üle (Ehitus- ja lammutus..., 2015, lk 33-34). Sama küsitluse raames küsiti ettevõtjatelt kui lihtne või keeruline on nende hinnangul ehitus- ja lammutusjäätmete kohapeal sorteerimine liigiti eri jäätmekategooria kohta. Küsitluse vastuseid kirjeldab tabel 2.

Tabel 2. Ettevõtjate hinnang ehitus- ja lammutusjäätmete kohapeal sorteerimisest liigiti (Ehitus- ja lammutus..., 2015, lk 69).

	„Seda materjali on lihtne välja sortida“	**„Selle materjali välja sorteerimine nõuab palju lisatööd“**	**„Seda materjali on peaaegu võimatu välja sortida“**
Savitellis	40%	49%	12%
Silikaattellis	46%	45%	9%
Betoon	53%	37%	10%
Muud mineraalsed jäätmed	31%	44%	12%

Ehitusjäätmeid käitleva ja taaskasutusse suunamisega tegeleva ettevõtte Slops OÜ esindaja Tarmo Varik nendib, et ehitusmaterjalide ringlusessevõttu soodustaks oluliselt nõuded ehitusprojektides, mis näeksid ette teatava hulga ehitusjäätmete kasutamist ehitusobjektidel. Pikalt ehitusfirmat Lemmiknkäinen Eesti juhtinud praegune teedeehitusfirma TREV-2 juht Sven Pertensi sõnul teeb jäätmete lammutamise käigus sorteerimine nende taaskasutuse oluliselt lihtsamaks. Ettevõtte Purustaja OÜ esindaja Kuido Kaskla hinnangul leiavad mineraalsed ehitusjäätmed kasutust maa-alade tõstmisel, kuid jäätmete omadused on paekillustikust oluliselt madalamad ning seetõttu ei ole tegu tugeva alternatiiviga. AS Nordeconi esindaja Meelis Kanni sõnul on ettevõtetel igati lihtsam anda jäätmed üle jäätmekäitlusluba omavale ettevõttele. Lisaks toonitas ta, et ettevõtjaid heidutab hirm keskkonnaametnike ja sanktsioonide ees, mistõttu sooviks Keskkonnaametilt paremat teavitustööd, kuidas ettevõtjad saavad hõlpsalt ning ka enda huve silmas pidades materjale taaskasutada (Rauk, 2015).

Ida-Virumaal Kiviõlis viidi läbi rakendusuuring, kus selgitati kortermaja lammutamisel tekkivate materjalide korduvkasutuse ja ringlussevõtu võimalusi. Uuringu käigus läbi viidud esialgsed laboratoorsed katsed näitasid, et lammutamisel saadud silikaatkividest purustamise teel toodetud killustikku on võimalik kasutada sisetingimustes, kasutamiseks betoonmaterjalide tootmisel ning metsateedel. Saadud killustikku ei ole omaduste poolest sobilik kasutada tee-ehituses ja alustena kandvates osades. Kuna silikaatkillustiku tugevus, kuluvus, külmakindlus ja veeimavus jäävad alla lubjakillustiku omadustele, saab silikaatkillustikku kasutada betoonsegudes osalise täitematerjali asendajana (Ilomets jt, 2022).

3.2.1 Ümbertöödeldud materjalide varasem taaskasutamine Eesti ehitussektoris

Aastal 2011 rekonstrueeriti Maardu-Raasiku maanteel 425-meetrine katselõik, milles kasutati ehitus- ja lammutusjäätmetest ümbertöödeldud betoonkillustikku fraktsiooniga 0-32 mm. Erinevalt varasematele praktikatele Eesti teedeehituses, kus taaskasutatud materjale kasutati vaid täitematerjalina, paigutati katselõigul materjal asfaltkihi alla. Rekonstrueerimisel kasutati kasutatud raudbetooni, äärekive ja laepaneele. Materjali kvaliteeti ja paigaldamist hindas ning teelõigu seiret teostas Tallinna Tehnikaülikooli teedelabor (Rüütelmann, 2012).

Rekonstrueeritud katselõigule anti 3,5 aastat pärast teelõigu valmimist eksperthinnang (Rüütelmann ja Lill, 2015), kus võrreldi 2011. aastal ehituses kasutatud betoonkillustikku ning 2015.

aastal üles kaevatud betoonkillustiku proove. Võrdlusest järeldus, et betoonkillustik pidas tee konstruktsioonis (liikluskoormusele alla 200 auto ööpäevas) hästi vastu. Katselõigul puudusid silmaga eristatavad defektid ja materjali ükski omadus ei olnud halvenenud. Hinnangu autor soovitab jätkata ümbertöödeldud materjalide omaduste uurimist, et võimalusel selle kasutust laiendada ka suurema liiklussagedusega teedele.

3.2.2 Küsimustik Harju maakonnas ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise kohta

Käesoleva töö raames saatsin küsimustiku Harju maakonna kõigile 16 omavalitsusüksuse esindajatele viimastel aastatel ehitusjäätmete taaskasutamise mahtude ning tulevikuperspektiivide kohta. Vastused andsid Kiili ja Loksa omavalitsuste esindajad.

Loksa linnas on kasutatud freesasfaldit teede rekonstrueerimisel ning purustatud telliseid ja betooni Loksa Konsumi hoone ehitamisel. Taaskasutatava materjali koguseid ning tulevikuperspektiive linna esindaja ei kommenteerinud. Kiili vallavalitsus on aastatel 2020-2022 kasutanud teehoiutöödel freesasfaldit 8343 m^3 ning vajaduse korral plaanivad ehitus-ja lammutusjäätmeid kasutada ka edaspidi (Lisa 1).

3.3. Ümbertöödeldud ehitus- ja lammutusjäätmete uuritus ja taaskasutamine mujal

Lammutus- ja ehitusjäätmeid on võimalik taaskasutada teedeehituses (Poon ja Chan, 2004), betooni (Yang jt, 2010) ja mördi (Braga jt, 2012) tootmisel. Skandinaavias tehtud uuringu (Klang jt, 2002) analüüsi kohaselt on eelnevalt kasutatud ja puhastatud telliste taaskasutamine ehituses jätkusuutlik, seda nii keskkondlikust kui ka majanduslikust perspektiivist lähtuvalt. Iraanis läbi viidud uuringu kohaselt sobivad töödeldud lammutusjäätmed teedeehitusse rakendamiseks eelkõige tee alumistes kihtides (Esfahani, 2018).

Sao Paulos katsetati lammutusjäätmetest killustiku omadusi laboratoorselt ja reaalsetes tingimustes. Tulemustest järeldus, et ümbertöödeldud killustik sobib kasutamiseks ka suure liikluskoormusega teede aluskihtides. Materjali jäikus suurenes ajas, kuid soovitatav on 3% mahust tsemendi või hüdreeritud lubja lisamine killustiku omaduste ja tee kvaliteedi tõstmiseks (Beja jt, 2020).

Flandrias tegutsev organisatsioon, mis ühendab Belgia ligi 10 000 ehitusalast ettevõtet, keskendub ehitusjäätmete maksimaalsele väärindamisele. Ühendus propageerib piirkonnas jätkusuutlikku ehitussektori tegevust ning rõhub tungivalt hoonete selektiivsele lammutusele, tänu millele on Flandrias ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise maht 90%. Pinnase- ja mullatööde käigus tekkinud jäätmete taaskasutamine on 95% (Embuild Vlaanderen.., i.a).

Austrias näeb seadus ette, et hoone, mille lammutamise käigus tekib vähemalt 750 tonni jäätmeid, tuleb lammutada selektiivselt, et võimalikult suur hulk lammutusjäätmetest oleks võimalik taaskasutada (Austria Business.., i.a).

Lissabonis läbi viidud ehitusjäätmete elutsükli uuringus (Coelho ja de Brito, 2011) leiti, et traditsiooniline hoonete lammutamine on selektiivsest lammutamisest kuluefektiivsem, kuid selektiivse lammutamise käigus tekkinud jäätmeid on võimalik paremini taaskasutada ja turustada. Oluline on selektiivse lammutamise käigus tekkinud jäätmeid taaskasutada ja müüa teiseste ehitusmaterjalidena, sest madala väärtusega materjali taaskasutamise, näiteks pinnasetäite puhul, ei ole majanduslikku ja keskkondlikku eelist traditsioonilise lammutamise ees.

Ehitusjäätmetest taastoodetud killustiku kasutamine betoonis täitematerjalina, täielikult tavakillustiku asemel, vähendab betooni survetugevust märkimisväärselt. Delhi Tehnikaülikoolis läbiviidud uuring ja katsed (Abera, 2022) näitavad, et tavakillustiku asendamine ümbertöödeldud killustikuga, kuni 40% ulatuses, ei too kaasa märkimisväärseid negatiivseid mõjusid kerghoonete ja kergliiklusteede vastupidavusele.

Hiinas moodustavad betoon, tellised ja keraamika 80% kogu ehitus- ja lammutusjäätmetest. Taaskasutatud killustikust toodetud betooni vastupidavus väheneb lineaarselt taaskasutatud killustiku mahu suurenemisega betoonsegus. Jäätmete ümbertöötlemisel, mördi eemaldamine ning materjali karboniseerimine aitavad kaasa killustiku omaduste parandamisele, mis väljendub betooni survetugevuse tõusus, kus taaskasutatud killustikku on täitematerjalina kasutatud (Ma jt, 2019).

Hollandis moodustavad betooni- ja müürimaterjalid 64% kõigist taaskasutatud ehitusjäätmetest, sellest omakorda 78% taaskasutatakse teedeehituses teede alusmaterjalina ning 19% pinnasetäitena. Tegu on ehitusjäätmete madala väärtusega taaskasutamisega (*downcycling*) ning prioriteediks on leida võimalusi ning tehnoloogiaid materjali potentsiaalipärasemaks taaskasutamiseks. Prognoosi järgi tekib tulevikus betoonijäätmeid rohkem kui neid on võimalik teedeehituses rakendada. Uuringus ilmnes, et andmete vähesus ehitus- ja lammutusjäätmete tekkimise ning liikumise kohta pärsib oluliselt võimalike taaskasutus- ja ümbertöötlemise tehnoloogiate ja skeemide väljatöötamist (Zhang jt, 2020).

Belgias ja Egiptuses läbi viidud uuringutes (Di Maria jt, 2018; Marzouk ja Azab, 2013) ilmnes, et ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamise hulk on otseselt seotud jäätmete prügimäele ladustamise maksumusega ning vastav seadusandlus ja jäätmeladustamise kõrgem hinnastamine muudab jäätmete taaskasutamise ettevõtjatele majanduslikult ahvatlevamaks.

3.3.1. Ümbertöödeldud materjalide varasem taaskasutamine ehitussektoris

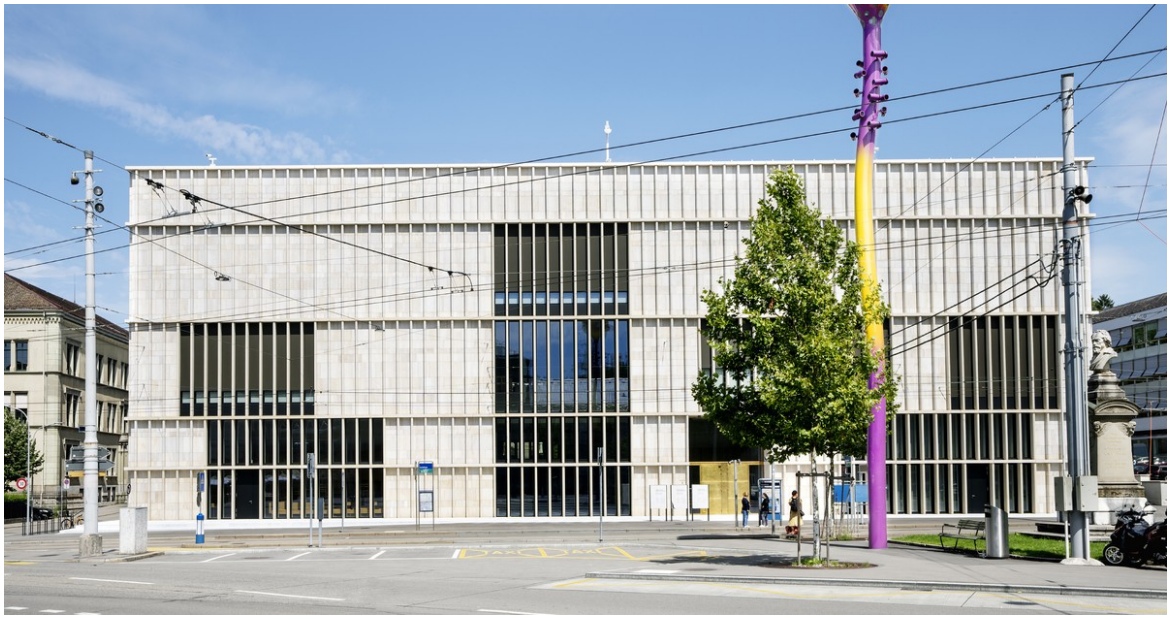
Euroopa Liidu teadusuuringute ja innovatsiooni raamprogrammi „Euroopa horistont“ raames viiakse läbi projekt CINDERELA, mis uurib ja edendab ärimudelit ja aitab ehitusettevõtjatel luua edukaid ringmajanduse ärimudeleid. Projekt hõlmab endas erinevaid pilootprojekte ja demosid, kus ehitus- ja lammutusjäätmeid võetakse teisese ehitusmaterjalina ringlusesse pärast jäätmete purustamist, sõelumist ja segamist (CINDERELA.., i.a).

Pilootprojekti raames kasutatakse Sloveenia linnas Mariboris, Hispaania pealinnas Madriidis ning Makedoona pealinnas Skopjes suures mahus ümbertöödeldud ehitus- ja lammutusjäätmeid geotehnilistes maaparandustöödes. Materjal laotatakse kihtidena alale ning tihendatakse, pärast

mida seiratakse ala, et teha järeldused materjalide sobivusest. Samades linnades katsetatakse ümbertöödeldud jäätmete kasutamist teedeehituses asfalti pinnakatte jaoks (CINDERELA.., i.a).

Maribori linnas ehitatakse projekti raames ühekorruseline hoone, kuhu rajatakse konverentsi saal, labor, kontorihooned ning tualettruumid. Hoone põranda ja seinade ehituseks kasutatakse „rohelist betooni“, mille täitematerjaliks kasutatakse ümbertöödeldud ehitusjäätmetest killustikku. Vundament ehitatakse taaskasutatud pinnasest ning soojusisolatsiooni materjaliks on taaskasutatud tellised ja klaas. Skopjes rajatavas pilootprojekti hoones kasutatakse 368 tonni ümbertöödeldud killustikku moodulbetoonplokkide valmistamiseks (CINDERELA.., i.a).

Šveitsi suurim linn Zürich on ehituses jäätmete kasutamise poolest eesrindlik. Aastal 2002 rajatud koolimaja ehitamisel kasutati 80% ulatuses taaskasutatud betooni. Kolm aastat hiljem jõudis linn otsusele, et kõik avalikud hooned tuleb ehitada kasutades täitematerjalidena vähemalt 25% ümbertöödeldud betooni. Linna kunstimuuseumi Kunsthaus'i (Joonis 7) ning uue haigla ehituses kasutatakse vastavalt 98% ja 95% ulatuses betoonkillustikku (Gretler, 2021).



Joonis 7. Kunsthaus Zürich'i hoone, mille ehitamisel kasutati 98% ulatuses betoonillustikku. (Kunsthaus Zürich kodulehekülg, kasutatud 25.03.2023, https://www.kunsthaus.ch)

Taani keskkonnaministeeriumi ning kahe eraettevõtte koostööl läbi viidud projekti raamess rajati laohoone, mille ehitusel kasutati samas asukohas varasemalt lammutatud hoonest tekkinud jäätmeid. Jäätmed purustati, sorteeriti, töödeldi ja betoon valmistati objektil koha peal, elimineerides transpordikulud- ja emissioonid ning vajaduse uute kaevandatud täitematerjalide järele (Fibo.., i.a).

Ameerika Ühendriikides, Chicago O'Hare rahvusvahelises lennujaamas, viidi läbi juhtumiuuring 2009. aastal, kus moderniseerimisprojekti käigus testiti laboratoorselt ümbertöödeldud killustiku omadusi, mis oli eemaldatud lennujaamast tekkinud betoonijäätmetest. Eksperimendi tulemuste kohaselt näitas ümbertöödeldud killustik tavakillustikule sarnaseid mehaanilisi omadusi. Laboratoorsele katsele järgnesid välikatsed lennuradadel, kus kõrvuti kasutati tava- ja

ümbertöödeldud killustikku. Pärast 5-kuulist monitoorimist ja andmete kõrvutamist ei ilmnenud radade tugevusnäitajates erinevusi (Portland.., i.a).

Poolas on viimastel aastatel hakatud rajama üha enam betoonteid. Aastaks 2025 on kavas ehitada riigis kokku üle 500 km betoonteid. Poola Maanteede ja Riigimaanteede peadirektoraat ehk GDDKiA keskendub teede ehitamisel ja rekonstrueerimisel betoonsillutiste killustikuks purustamisele ehk rubblizingu tehnoloogiale. Meetod aitab teede ehitamisel säästa oluliselt aega, raha ning vähendada tavapärast ehitusmaterjali veoga tekkivat keskkonnajalajälge. Tehnoloogia seisneb vana betoonsillutise purustamises objektil ning saadud materjali taaskasutamisel kandevkihtides, sillutiste pealmiste kihtide jaoks. GDDKiA hinnangul aitab tehnoloogia hoida sillutiste remondikulusid kokku kuni 50% ulatuses ning meetodit saab kasutada linna- ja maateede, lennujaamades, parklates ja erinevatel väljakutel (Kiisler, 2018).

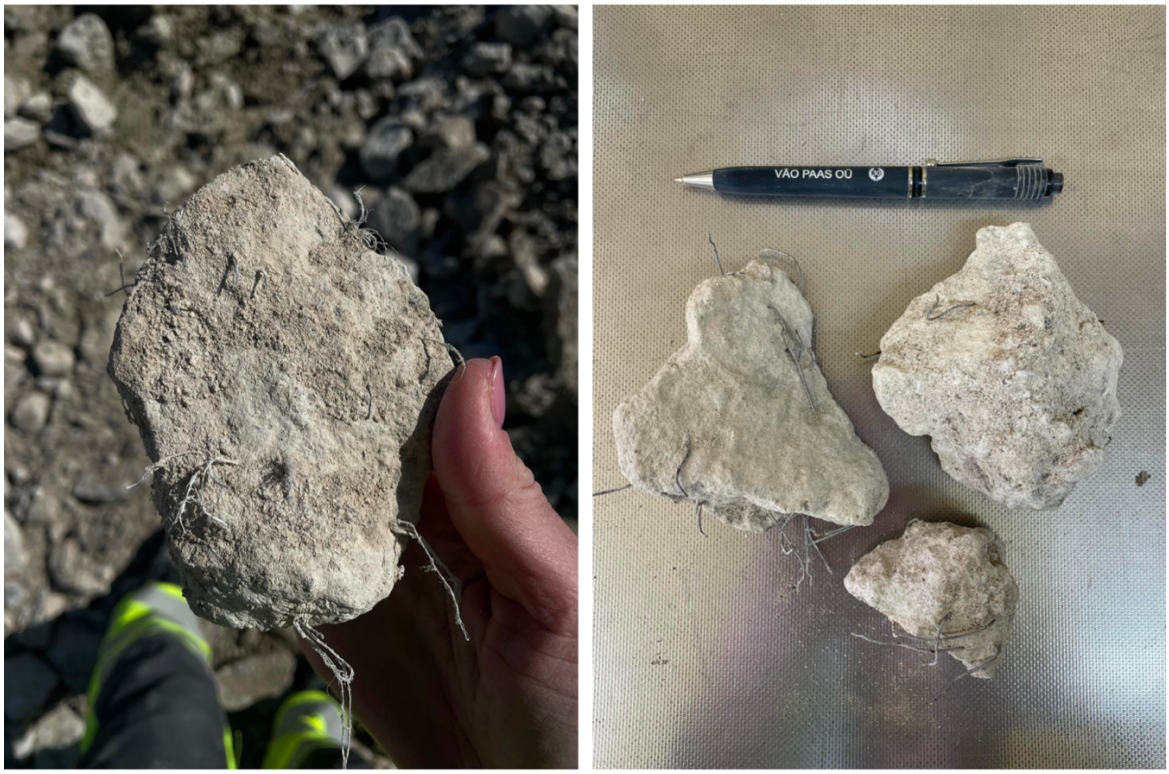
3.4 Ehitusjäätmetega kaasnevad mittemineraalsed materjalid ja nende kasutusvõimalused

Magistritöös käsitlen killustikuks ümbertöötlemiseks, potentsiaalsete ehitus- ja lammutusjäätmetena, järgmisi jäätmeliike 17 01 01 (Betoon), 17 01 02 (Tellised) ja 17 01 07 (Betooni-, tellise-, plaadi- või keraamikatootesegud, mida ei ole nimetatud koodinumbriga 17 01 06). Betoonjäätmetega põhilised võimalikud kaasnevad mittemineraalsed jäätmed on armatuurraud, mis eemaldatakse materjalist purustusseadmes asuva magneti abil (Joonis 8). Ettevõte ei ole spetsialiseerunud metallide utiliseerimisele, seega on parim lahendus transportida metalljäätmed lähimasse metalli kokkuostuga tegelevasse ettevõttesse.

Joonis 8. Ehitus- ja lammutusjäätmete purustamisel purustusseadmest magnetite abil välja juhitud metallijäätmed ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumil, 12.09.2022.

Hoonete lammutamise käigus võib betoonkonstruktsioonides esineda ka erinevaid plastiktorusid, elektrikaableid ja kaablikõrisid, mis jäätmete liigiti kogumise käigus võivad betoonijäätmete sisse võivad sattuda. Betoonjäätmete ümbertöötlemisel võivad väikese koguse korral märkamatult ka plastjäätmed koos betoonjäätmetega sattuda purustus- ja sõelaseadmesse, jõudes sealt ümbertöödeldud killustiku hulka, sest purustusseade suudab purustatavast massist separeerida vaid metallist materjale. Visuaalsel vaatlusel leiduvad plastmassjäätmed tuleks jäätmetest käsitsi või ekskavaatori abil eraldada, et need hiljem plastjäätmeid utiliseerivaasse ettevõttesse toimetada.

Purustatud betoonijäätmetes leidub ka peent metalli- ja plastmaterjali, mida ei ole jämeda killustiku puhul võimalik materjalist eemaldada, sest see materjal on väiksemõõduline, tihe ja materjalist läbi põimunud (Joonis 9). Purustatud betoonist killustiku puistangus, visuaalselt materjali hinnates, nähtus, et ka materjali, mis jääb fraktsiooni 0-63 mm piiridesse, leidub metalli- ja plastiku lisandeid. Purustis asuv magnet ei suuda väiksemõõdulisest materjalist läbipõimunud peent metalli materjali hulgast eraldada ning lisanditega materjal jõuab purustist välja puistangusse ehk lõpp-tootesse.



Joonis 9. Purustatud betoonijäätmed ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumil: metalli lisandiga (paremal) ja plastiku lisandiga (vasakul), 03.05.2023.

4. Metoodika

Käesolevas töös uurisin, kas ehitus- ja lammutusjäätmetest ümbertöödeldud täitematerjali tootmine on ettevõttes Väo Paas OÜ perspektiivikas, seda nii toodetud materjali kvaliteeti, majanduslikku kasu kui ka keskkonnahoidu silmas pidades.

4.1 Materjali kvaliteedi hindamine ja toimivus

Materjali kvaliteedi hindamiseks viisin töö käigus läbi laboratoorsed katsed purustatud betooni geomeetriliste omaduste hindamiseks. Otsustasin materjali omadustest katsetada vaid geomeetrilisi omadusi just seetõttu, et selline katsetamise võimekus on ettevõttes koha peal olemas ning muid omadusi ei plaani ettevõte ümbertöödeldud materjalide tootmisel hinnata jäätmete heterogeensuse ning majandusliku ebaotstarbekuse tõttu. Materjali katsetamiseks kogusin Tondi V karjääri purustatud betooni laost kümme katseproovi ning viisin läbi katsed kuivsõelumise meetodil, standardi EVS-EN 933-1:2012 kohaselt. Saadud tulemuste analüüsi põhjal koostasin katsetatud materjalile toimivusdeklaratsioonid standardite EVS-EN 13242:2006+A1:2008 „Ehitustöödel ja tee-ehituses kasutatavad sidumata ja hüdrauliliselt seotud täitematerjalid“ ja EVS-EN 13285:2018 „Sidumata segud. Spetsifikatsioonid“ järgi, mille järgi on võimalik tagasitäitmiseks kasutatavat materjali ümbertöödeldud täitematerjali ja sidumata seguna turustada.

4.2 Materjali keskkonnamõju analüüs

Võttes arvesse, et idee ehitus- ja lammutusjäätmetest killustikku toota tuleneb globaalsest suundumusest keskkonnasõbralikuma tootmise poole, otsustasin hinnata tavakillustiku ja ümbertöödeldud killustiku keskkonnajalajälgi, et neid võrrelda ja jõuda järeldusele, kas ümbertöödeldud killustik on ka keskkonda säästvam. Töös käsitlen keskkonnajalajälge materjali tootmisel tekkiva CO_2 jäätmehulga näol. Võrdlusanalüüsi aluseks valisin karjääris tavapäraselt ühe lõhkamisega raimatava materjali koguse.

Lubjakivi killustiku tootmise tsükliks valisin operatsioonid maa-alalt katendi eemaldamisest kuni toodetud killustiku transportimiseni materjali ladudesse. Esmalt arvutasin, mitu tundi peavad vastavad mäemasinad kogu tsükli käigus töötama ning kui palju nende töötundide jooksul kütust tarbima, et toota ühe korraga lõhatavast mäemassist killustik. Saadud töötundide alusel arvutasin iga masina poolt toodetavad CO_2 jäätmehulgad ühe tsükli jooksul ning saadud tulemused taandasin ühele tonnile toodetud materjali kohta.

Ümbertöödeldud killustiku tootmise tsükliks valisin operatsioonid jäätmete transportimisest Harjumaa piires ehk 40 km raadiuses kuni ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumile, toodetud killustiku transportimiseni materjali ladudesse. Arvutasin kallurite veokilometraaži jäätmete transportimiseks, et toimetada karjääri ühe tavapärase lõhketööga saadav materjali kogus. Analoogselt lubjakivi killustiku tootmise keskkonnamõju analüüsiga arvutasin ka ümbertöödeldud killustiku tootmisel kuluvad masinate vajalikud töötunnid ning nende põhjal tekkivad CO_2 kogused kogu tsükli jooksul. Saadud jäätmekoguste tulemused taandasin ühele tonnile toodetud materjali kohta. Analüüsi tulemuseks sain ühe tonni lubjakivi killustiku ning ühe tonni jäätmetest ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkiva CO_2 jäätmekoguse.

4.3 Majandusarvutused

Hindamaks ettevõttes jäätmetest täitematerjalide tootmise majanduslikku otstarbekust, arvutasin nii lubjakivist kui ka jäätmetest toodetud killustiku tonni omahinnad. Arvutusteks kogusin ettevõttest otseselt materjali tootmisega seotud aastased kuluallikad ning jaotasin need kolme eri tsüklisse. Esimese tsükli kuluallikad on karjääri ettevalmistus- ja teeninduskulud, teise tsükli kuluallikad on materjali ettevalmistamise ja raimamise kulud, kolmanda tsükli kulud on killustiku tootmiskulud. Killustiku tonni omahinnaks arvutasin kolme tsükli kuluallikate summa ja aastase toodangu suhte.

Ehitus- ja lammutusjäätmetest toodetud killustikule arvutasin kaks erinevat tonni omahinda kahe erineva stsenaariumi järgi – ühel juhul arvestasin, et ettevõte võtab jäätmeid vastu tasuta ning teisel juhul valisin jäätmete vastuvõtu hinnaks lähima turukonkurendi jäätmete vastuvõtu hinna. Jäätmetest ümbertöödeldud killustiku tonni omahinna arvutamisel lähtusin samast arvutusmudelist, mis lubjakivi killustiku omahinna arvutustes, erinevus seisneb esimese ja teise tsükli kuluallikates, sest ümbertöödeldud killustiku tootmisel ei teki kaevandamisõiguse tasu, karjääri paljandamise kulusid, puur- ja lõhketööde ning lõhkamise järelvalve raudtee-teemehaaniku teenust.

4.4 Ümbertöödeldud materjalidest killustiku tootmise tehnoloogiline skeem

Jäätmetest killustiku tootmise protsesside kirjeldamiseks koostasin ploki diagrammi formaadis tehnoloogilise skeemi ettevõtte Väo Paas OÜ näitel. Skeemi koostamisel lähtusin lubjakivist killustiku tootmise vaatlustele karjääris ning kirjeldasin, milliste protsessidega ja millises järjekorras on võimalik karjääris ümbertöödeldud killustikku toota, kasutades karjääris olemasolevat tehnikat.

5. Ehitusjäätmetest ümbertöödeldud killustiku geomeetrilised omadused

Mineraalsetest jäätmetest ümbertöödeldud killustiku puhul on ettevõttes Väo Paas OÜ võimalik katsetada ja hinnata materjali geomeetrilisi omadusi. Käesoleva töö raames võtsin Väo V karjäärist purustatud betooni proovid, et neid karjääris asuvas katselaboris korraliselt katsetada. Purustatud betooni materjal on purustatud purustusseadmega ning ei ole läbinud sõela seadet. Materjali proovid võtsin karjääri laost, kus materjal on mitu kuud juba seisnud. Katsetulemusi lugedes tuleb arvesse võtta, et adekvaatseima info saab kui katsetada värskelt purustatud killustikku, mis on võetud otse purusti lindilt. Katsetatav materjal ehk purustatud betoonkillustik on vaid purustatud, kuid mitte sõelutud kahel põhjusel. Esiteks, purustatud betoonist killustikku on otstarbekas müüa fraktsioneerimata killustikuna, et minimeerida väiksemõõduliste sõelmete ehk täiendavate jäätmete teket. See tähendab, et lubjakivi killustiku puhul, kus algmaterjal fraktsiooniga 0-63 mm sõelutakse väiksemateks fraktsioonideks nagu 0-4 mm, 4-16 mm, 16-32 mm ning 32-63 mm asemel toodetakse vaid materjali fraktsiooniga 0-63 mm. Teiseks põhjuseks on sõelumise mehaaniline mõju purustatud materjalile, kus sõelumise käigus tekib materjali sõelmeid ja peenosiseid oluliselt juurde. Laboratoorsete katsete eesmärk on purustatud betooni geomeetriliste omaduste hindamine ning nende põhjal näidis-toimivusdeklaratsiooni koostamine, mis tuleb materjali turustades kliendile anda.

5.1 Purustatud betooni terastikulise koostise hindamine

Täitematerjalide terastikulise koostise määramise kuivsõelumismeetodil viisin läbi standardi EVS-EN 933-1:2012 kohaselt. Katse seisnes täitematerjali jaotamises sõeltekomplekti abil, lahtisõelumise teel, kahanevate mõõtmetega fraktsioonideks. Igale sõelale jäänud materjali massi kaalusin ning võrdlesin kogu katseproovi algmassiga. Iga sõela läbinud materjali massi esitasin numbriliselt ning sellest arvutasin materjali iga nimisõela läbinud protsendi.

5.1.1 Materjali katsetamine

Võtsin karjäärist katsetamiseks 10 purustatud betooni proovi fraktsiooniga 0-63 mm (Joonis 10), seejärel kuivatasin 110° C juures 24 tundi kuni kontstantse massini. Sõelumiseks panin kokku sõeltekomplekt, mis koosnes ava mõõtude vähenemise järjekorras üksteise otsa asetatud sõeltest, komplekti alla asetasin põhja ning peale kaane. Komplektis olevad sõelad vastavad EVS-EN 933-2:2020 standardis ette nähtud nimimõõtmetega sõeltele – metallvõrksõelad nimimõõtmetega 0,063 mm ja 1 mm ning perforeeritud metallplaatsõelad nimimõõtmetega 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm, 63 mm ja 80 mm. Iga katseproovi kallasin sõeltekomplekti, mida raputas vibroseade mehaaniliselt 15 minutit. Eraldasin sõelad komplektist, kaalusin ja dokumenteerisin igale sõelale ja sõeltekomplekti põhjale jäänud materjali koguse.

Joonis 10. Purustatud betoonist täitematerjal fraktsiooniga 0/63 katseproovid, 02.05.2023.

5.1.2 Arvutused

Kõik arvutused viisin läbi tuginedes EVS-EN 933-1:2012 standardi juhendile. Igale sõelale jäänud materjali massiprotsendi arvutasin katseproovi algkuivmassist. Peenosiste ehk materjali, mis läbis sõela avadega 0,063 mm ja jõudis raputamisel sõeltekomplekti põhjale, protsendi katseproovi kogumassist arvutasin järgmiselt:

$$f = \frac{100 \cdot P}{M_1}$$ (EVS-EN 933-1:2012, 2012)

Kus:

f - peenosiste protsent, %
P - põhjale jäänud materjali mass, kg
M_1 - katseproovi kuivmass, kg

Täisläbind protsentides, ehk protsent katseproovist, mis läbis igat konkreetset nimisõela arvutasin järgmiselt:

$$100 - \Sigma\left(100 \cdot \frac{R_i}{M_1}\right)$$ (EVS-EN 933-1:2012, 2012)

Kus:
R_i – vastavale sõelale jäänud materjali mass, kg

5.1.3 Katsete tulemused ja järeldused

Võttes arvesse, et täitematerjalil fraktsiooniga 0-63 mm on terasuuruste varieeruvus suur ning korraga katsetatava materjali hulk on piiratud sõelte suurusega, võtsin 10 katseproovi tulemustel arvesse kõikide proovitulemuste aritmeetilist keskmist, mis annab minu hinnangul adekvaatseima ülevaate materjali geomeetrilistest omadustest. Katseproovide terastikulist koostist iseloomustab protsent materjalist, mis läbis igat nimisõela. Saadud tulemused on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Katseproovide terastikulise koostise katsetamise tulemused, materjali läbind (%) nimisõeladest.

	Osa materjali kogumassist, mis läbis vastavat sõela, %									
Katse-proovi nr	**80 mm**	**63 mm**	**31,5 mm**	**16 mm**	**8 mm**	**4 mm**	**2 mm**	**1 mm**	**0,063 mm**	**Jääk põhjal**
1	100	94,4	50	37,7	26,1	19,4	16,1	12,7	4,8	4,8
2	100	100	55,5	38,1	27	19,7	12,1	8,9	4,5	4,5
3	100	94,9	54,6	37,6	23,3	18,1	13,5	11,7	6,8	6,8
4	100	93,3	58	41,6	30	21	16,4	12,3	6,7	6,7
5	100	96,2	54,5	35,6	26,4	18,7	17,5	14,7	5,6	5,6
6	100	98,4	51,3	37,9	24,5	18,2	12,5	10,2	4,6	4,6
7	100	95,8	62,4	44,6	31,9	23	18,3	12,7	7,2	7,2
8	100	96,7	55,7	39,5	28,2	21,4	15,8	12,1	4,7	4,7
9	100	93,1	48,6	39	29,8	22,4	17,7	14,6	5,3	5,3
10	100	94,7	49,7	37	24,8	15,5	12,2	10,8	3,5	3,5
Kesk-mine	**100,0**	**95,8**	**54,0**	**38,9**	**27,2**	**19,7**	**15,2**	**12,1**	**5,4**	**5,4**

5.1.4 Näidis-toimivusdeklaratsioon materjali turustamiseks

Katsetatud purustatud betoonkillustikku fraktsiooniga 0-63 mm on võimalik tootjal ehk käesoleva lõputöö kontekstis ettevõttel Väo Paas OÜ deklareerida standardi EVS-EN 13242:2006+A1:2008 „Ehitustöödel ja tee-ehituses kasutatavad sidumata ja hüdrauliliselt seotud täitematerjalid“ järgi sidumata seguna 0-63 mm. Katsetulemuste põhjal võib koostada materjalile toimivusdeklaratsiooni, mida kirjeldab joonis 11.

TOIMIVUSDEKLARATSIOON nr 1

1. Tootetüübi identifitseerimiskood: EN 13242, sidumata segu 0/63 mm
2. Identifitseerimise märk: Väo V karjäär
3. Kasutusotstarve: Ehitustöödel ning tee-ehituses sidumata kujul ja hüdrauliliselt seotuna kasutatavad täitematerjalid
4. Tootja: OÜ Väo Paas
   Reg.nr. 10055887, Lagedi tee 32a, Rae vald, Veneküla, Harjumaa 13816
   Tel. +372 6349 600
   vaopaas@vaopaas.ee, www.vaopaas.ee
5. Ehitustoote toimivuse püsivuse hindamise ja kontrollimise **süsteem 2+**
6. Teavitatud asutus Tallinna Sertifitseerimisasutus OÜ (registrikood 16078731)
7. Deklareeritud toimivus:

Põhiomadused		Toimivus	Harmoneeritud tehniline kirjeldus
Tera kuju, suurus ja tihedus	Tera suurus	0/63	EVS-EN 13242:2006+A1:2008
	Terastikulise koostise kategooria	G_A85	
	Tüüpiline terastikuline koostis	GT_ANR	
	Tera kuju	FI_{NR}	
Purunemiskindlus		LA_{NR}	
Puhtus	Peenosiste kategooria	f_7	
Koostisosad	Koostisosade kategooria	Rc_{90}	
		R_{cug90}	
		Rb_{NR}	
		Ra_{NR}	
		Rg_{NR}	
		X_{1-}	

8. Eespool kirjeldatud toote toimivus vastab deklareeritud toimivusele. Käesolev toimivusdeklaratsioon on välja antud kooskõlas määrusega (EL) nr 305/2011 eespool nimetatud tootja ainuvastutusel.

Joonis 11. Katsetatud materjalile koostatud toimivusdeklaratsioon standardi EVS-EN 13242:2006+A1:2008 järgi.

Koostasin samale materjalile toimivusdeklaratsiooni ka standardi EVS-EN 13285:2018 „Sidumata segud. Spetsifikatsioonid“ alusel, seda iseloomustab joonis 12.

TOIMIVUSDEKLARATSIOON nr 2

1. Tootetüübi identifitseerimiskood: EN 13285, sidumata segu 0/63 mm
2. Identifitseerimise märk: Väo V karjäär
3. Kasutusotstarve: Ehitustöödel ning tee-ehituses sidumata kujul ja hüdrauliliselt seotuna kasutatavad täitematerjalid
4. Tootja: OÜ Väo Paas
   Reg.nr. 10055887, Lagedi tee 32a, Rae vald, Veneküla, Harjumaa 13816
   Tel. +372 6349 600
   vaopaas@vaopaas.ee, www.vaopaas.ee
5. Ehitustoote toimivuse püsivuse hindamise ja kontrollimise **süsteem 2+**
6. Teavitatud asutus Tallinna Sertifitseerimisasutus OÜ (registrikood 16078731)
7. Deklareeritud toimivus:

Põhiomadused		Toimivus	Harmoneeritud tehniline kirjeldus
Tera kuju, suurus ja tihedus	Tera suurus	0/63	EVS-EN 13285:2018
	Ülemõõdulised terad	*OC 90*	
	Üldised terakoostise piirid	*G p*	
Puhtus	Maksimaalne peenosiste sisaldus	*UF 7*	
	Minimaalne peenosiste sisaldus	*LF 4*	

8. Eespool kirjeldatud toote toimivus vastab deklareeritud toimivusele. Käesolev toimivusdeklaratsioon on välja antud kooskõlas määrusega (EL) nr 305/2011 eespool nimetatud tootja ainuvastutusel.

Joonis 12. Katsetatud materjalile koostatud toimivusdeklaratsioon standardi EVS-EN 13285:2018 järgi.

6. Ehitusjäätmetest killustiku tootmise tehnoloogiline skeem ettevõtte Väo Paas OÜ näitel

Ehitus- ja lammutusjäätmete killustikuks ümbertöötlemine ettevõtte Väo Paas OÜ territooriumil algab jäätmete vastuvõtust ja maha laadimisega karjääri tootmisterritooriumil. Kõik töötlemiseks kasutatavad masinad on mobiilsed ehk materjali mahalaadimise asukoht karjääris on paindlik ning vastavalt vajadusele. Vastu võetud materjalis leiduvad purustusseadme jaoks ülegabariitsed jäätmed purustatakse hüdrovasaraga Liebherr R943 + Rammer 4092 (Joonis 13). Saadud sobiva suurusega materjal laaditakse ekskavaatoriga Caterpillar 336 mobiilsesse purustusseadmesse Keestrack R6 (Joonis 13). Purustusseade eelsõelub materjali fraktsiooniga 0-32 mm ning suunab selle puistangusse purustusseadme kõrvale (Joonis 14). Materjal suurusega >32 mm liigub purustusseadmes edasi suure kiirusega pöörlevale rootorile, millel olevad haamrid materjali purustavad. Saadud purustatud materjal läbib purustusseadmes sektsiooni, kus asuvad magnetid, mis eraldavad materjalis leiduvad metallosad. Metallosad suunatakse lindiga multilifti kasti, mis asub purustusseadme küljes. Purustatud materjal fraktsiooniga 32-63 mm eraldatakse ülejäänud materjalist ning suunatakse purustusseadme kõrvale puistangusse (Joonis 14). Alles jäänud purustatud materjal, fraktsiooniga 0-32 mm, liigub konveierilt edasi purustusseadmest sõelaseadmesse Keestrack C6 (Joonis 15). Sõelaseadmes asuvate sõelaplaatide abil eraldab materjal kolm erinevat killustikufraktsiooni; 0-4 mm, 4-16 mm ning 16-32 mm ning suunab need seadmest välja puistangutesse (Joonis 16). Eraldatud fraktsioone on võimalik vastavalt vajadusele muuta, valides ja kombineerides sõelaseadmes asuvaid sõelte suurusi teisiti. Saadud killustikud fraktsioonidega 0-32 mm, 32-63 mm, 0-4 mm, 4-16 mm ja 16-32 mm transporditakse seadmete kõrval asuvatest puistangutest ladudesse, kust omakorda antud materjal laaditakse kliendi transpordivahendile. Käesoleva töö (Lisa 1) tehnoloogiline skeem kirjeldab eelpool mainitud protsesse jäätmete vastuvõtmisest kuni valmis killustiku tootmiseni.

Joonis 13. Sõelaseadme jaoks ülegabariitsete jäätmete purustatamine hüdrovasaraga (vasakul) ja materjali laadimine ekskavaatoriga purustusseadmesse (paremal), 03.05.2023.

Joonis 14. Purustusseadmes eelsõelutud fraktsiooniga 0-32 mm, mis suunatakse puistangusse (vasakul). Purustatud materjal fraktsiooniga 32-64 mm suunatakse purusti tagumises osas puistangusse (paremal), 03.05.2023.

Joonis 15. Purustatud materjal fraktsiooniga 0-32 mm liigub purustusseadmest sõelaseadmesse. 04.05.2023.

Joonis 16. Purustatud ja sõelutud materjal fraktsioonidega 0-4 mm, 4-16 mm ja 16-32 mm liiguvad sõelaseadmest lintide abil masinast välja puistangutesse, 04.05.2023.

7. Lubjakivikillustiku ja ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkiva keskkonnamõju analüüs

Ehitus- ja lammutusjäätmetest killustiku tootmisel on positiivne mõju keskkonnale läbi jäätmetekke vähendamise. Selleks, et vältida „rohepesu“ efekti, kus toimitakse pealtnäha keskkonnasõbralikult, kuid jäetakse arvesse võtmata erinevad keskkonda mõjutavad faktorid, analüüsisin magistritöös nii lubjakillustiku kui ka jäätmetest ümbertöödeldud killustiku tootmisprotsessi.

Analüüsi eesmärk on kaardistada, hinnata ja jõuda järeldusele, kas jäätmete killustikuks ümbertöötlemise protsess on tavakillustiku tootmisprotsessist keskkonnasõbralikum. Analüüs ei hõlmanud killustiku kogu elutsükli faase nagu selle edasist kasutamist ehituses, sest minu hinnangul on oluline käesoleva töö käigus välja selgitada, kas jäätmete ümbertöötlemise protsess killustikuks on keskkonnahoiu mõttes õigustatud.

Põhilised kasvuhoonegaasid atmosfääris on süsinikdioksiid (CO_2), metaan (CH_4), dilämmastikoksiid (N_2O) ja fluooritud gaasid. Aastal 2020 moodustasid Ameerika Ühendriikides CO_2 emissioonid 79% kõigist kasvuhoonegaasidest (United States.., i.a) ning sarnast protsenti on näha ka Euroopas 2021. aasta statistikast (Eurostat.., i.a). Statistikale tuginedes hindan keskkonnamõju analüüsis just tootmisprotsessides kulutatavat energiat ning selle käigus tekkivaid keskkonda paisatavaid CO_2 emissioone, sest selle kasvuhoonegaasi kontsentratsioon on atmosfääris märkimisväärseim.

Mõlema killustikutüübi puhul on tootmisprotsessi põhiline erinevus materjali hankimine. Ümbertöödeldud materjali puhul transporditakse ehitusobjektidelt jäätmed killustiku tootmiseks kalluritega Väo Paasi territooriumile, tavakillustiku puhul toimub algmaterjali hankimine puur- ja lõhketööde käigus, millele eelneb maa-alalt ka katendi eemaldamine.

7.1 Keskkonnamõju analüüsi metoodika

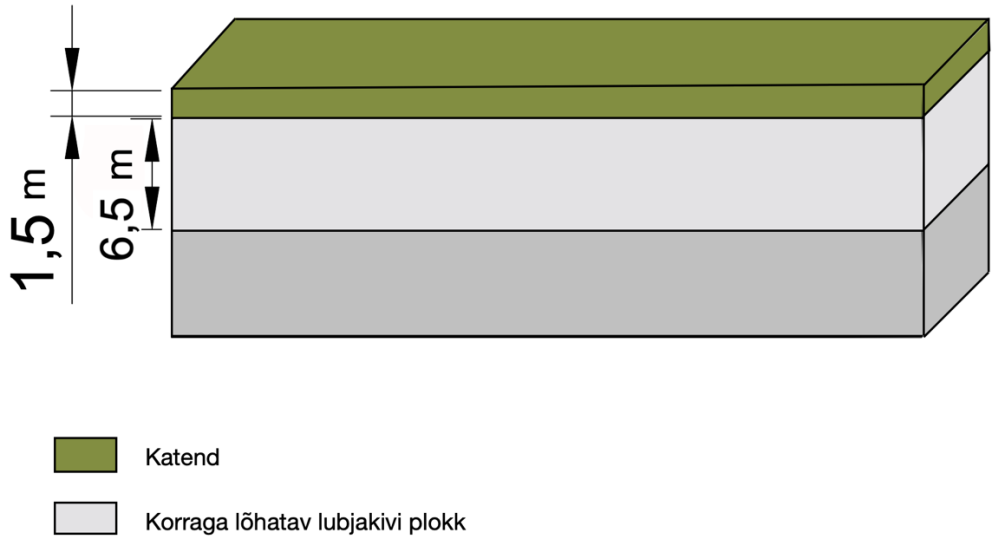
Analüüsi aluseks valisin ettevõttes Väo Paas OÜ tavapärase ühe korraga lõhatav lubjakivi koguse 2000 m^3, millest omakorda toodetakse 5400 t lubjakivi killustikku. Ühe lõhkamisega saadud materjalikoguse tootmiseks kuluvat energiat, maa-ala paljandamisest valmis killustiku transportimiseks ladudesse, võrdlesin sama koguse ehitus- ja lammutusjäätmete transpordist ettevõtte Väo Paas OÜ territooriumile kuni ümbertöödeldud lõpptoote transportimiseni ladudesse. Analüüsi läbiviimisel valisin jäätmete transporditee pikkuseks 40 km.

7.2 Tavakillustiku tootmisprotsess

Lubjakivist killustiku tavapärane tootmise skeem kronoloogilises järjestuses Väo Paasi territooriumil on alalt katendi eemaldamine ja mujale transportimine ekskavaatoriga (Caterpillar 336) ja laaduriga (Liebherr 576), lõhkeaukude puurimine puurmasinaga (Sandvik Ranger 800), lõhkeaukude laadimine lõhkeainega (ANFO), lõhkeaukude monteerimine ning lõhkevõrgu detoneerimine, purustatud materjali järelpurustamine hüdrovasaraga (Liebherr R943 + Rammer 4092), purustatud materjali laadimine ekskavaatoriga (Caterpillar 336) purustusseadmesse (Keestrack R6), materjali purustamine purustusseadmes (Keestrack R6), materjali edasiliikumine purustusseadmest

sõelaseadmesse (Keestrack C6), valmis killustiku saamine sõelaseadmest, saadud killustiku laaduriga (Liebherr 576) transportimine ladudesse.

Puur- ja lõhketöödele eelneb maa-alalt katendi eemaldamine, mille keskmine paksus karjääris on 1,5 m. Ühe lõhkamisega raimatakse karjääris keskmiselt 2000 m^3 ehk 5400 tonni lubjakivi. Astang lõhatakse kahes osas, ülemise ja alumise ploki kaupa (Joonis 17). Puur- ja lõhketöödel puuritakse 25 puurauku sügavusega 6,5 m. Lõhkamiseks kasutatakse lõhkainet ANFO (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023).



Joonis 17. Karjääris korraga lõhatavate plokkide ja katendi paksused.

Maa-ala pindala, kus puur- ja lõhketööd läbi viiakse arvutasin järgmiselt:

$$A = \frac{b}{c}$$

$$A = \frac{2000}{6{,}5} = 307{,}7\ m^2$$

Kus:
b – korraga lõhatava ploki ruumala, m^3
c - korraga lõhatava ploki kõrgus, m

Eemaldatava katendi mahu arvutasin järgmiselt:

$$D = k \cdot A$$
$$D = 1{,}5 \cdot 307{,}7 = 461{,}6\ m^3$$

Kus:
k - katendi keskmine paksus karjääris, m (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023).
A - maa-ala, kust katend eemaldatakse, m^2

Eemaldatava katendi massi arvutasin järgmiselt:

$$M_{katend} = p \cdot l$$
$$M_{katend} = 1{,}8 \cdot 461{,}6 = 830{,}8\ t$$

Kus:
p – katendi keskmine erikaal ettevõtte tootmisterritooriumil, t/m^3 (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023)
l - katendi maht, m^3

Tavapäraselt lõhatakse karjääris astang kahes osas, saades kokku 4000 m^3 materjali. Käesolevas analüüsis võtsin võrdluse aluseks 2000 m^3 materjali ja kaasan keskkonnaanalüüsi arvutuslikust eemaldatava katendi mahust vaid poole ehk 230,8 m^3.

Katendi eemaldamine hõlmab kahte operatsiooni – pinnase eemaldamine ekskavaatoriga ning materjali äravedu laaduriga. Masinate samaaegsel töötamisel on pinnase eemaldamise ja äraveo kiirus ligikaudu 200 t/h (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023).

Katendi eemaldamiseks ja äraveoks kuluvad töötunnid arvutasin järgmiselt:

$$T_1 = \frac{\frac{M}{2}}{t_{e+l}}$$

$$T_1 = \frac{\frac{830{,}8}{2}}{200} = \frac{415{,}4}{200} = 2{,}1\ h$$

Kus:
$\frac{M}{2}$ - eemaldatav ja teisaldatava katendi mass, t
t_{e+l} - ekskavaatori ja laaduri tootlikkus koostöötamisel, t/h

Plokk lõhatakse 25 lõhkeauguga, iga lõhkeaugu sügavus on 6,5 m, sügavus ühtib lõhatava ploki kõrgusega. Puurmasina tootlikkus on ligikaudu 80 m/h (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023). Ühe ploki lõhkamiseks vajalike puuraukude läbindamiseks kuluvad töötunnid arvutasin järgmiselt:

$$H_{puur} = \frac{n_{puurauk} \cdot c}{t_{puur} =}$$

$$H_{puur} = \frac{25 \cdot 6{,}5}{80} = \frac{162{,}5}{80} = 2\ h$$

Kus:
$n_{puurauk}$ - puuraukude arv
c - puuraukude sügavus ehk lõhatava ploki kõrgus, m
t_{puur} - puurmasina tootlikkus, m/h

Lõhkamiseks kasutatakse lõhkeainet ANFO. Ploki lõhkamiseks kuluva lõhkeaine kulu arvutasin järgmiselt:

$$M_{ANFO} = e_{ANFO} \cdot b$$
$$M_{ANFO} = 0{,}38 \cdot 2000 = 760\ \text{kg}$$

Kus:
e_{ANFO} - lõhkeaine ANFO erikulu ettevõtte Väo Paas OÜ karjääri tingimustes, kg/m^3 (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023)

Lõhatud materjal läbib viieosalise tootmiskompleksi, millesse kuuluvad hüdrovasar, ekskavaator, purustusseade, sõelaseade ning laadur. Viis masinat töötavad samaaegselt – lõhatud materjal järelpurustatakse hüdrovasaraga, laaditakse ekskavaatoriga purustusseadmesse. Sealt liigub materjal edasi sõelaseadmesse, millest väljuva killustiku transpordib laadur puistangutesse. Viieosalise tootmiskompleksi tootlikkus on 250 t/h (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023).

Korraga lõhatava ploki materjali töötlemiseks valmis killustikuks kuluvad töötunnid arvutatakse järgmiselt:

$$H_{plokk} = \frac{M_{plokk}}{t_{kompleks}}$$

$$H_{plokk} = \frac{5400}{250} = 21{,}6\ \text{h}$$

Kus:
M_{plokk} - korraga lõhatava ploki mass, t
$t_{kompleks}$ - tootmiskompleksi tootlikkus, t/h

Ühe ploki lubjakivi kaevandamiseks ja töötlemiseks kasutatavate masinate vajalikud töötunnid ja kütusekulu on esitatud tabelis 4. Masinate keskmine kütusekulu tunnis pärineb ettevõtte mäetööde juhi suulisel teabel (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023)

Tabel 4. Ettevõttes Väo Paas OÜ kasutatavad masinad, nende kütusekulu ning ühe ploki lubjakivi lõhkamiseks kuluvad töötunnid.

Masin	**Mudel**	**Kütusekulu, l/h**	**Masina töötunnid 5400 t lubjakivi tootmiseks, h**
Puurmasin	Sandvik Ranger 800	60	2
Hüdrovasar	Liebherr R943 + Rammer 4092	24	21,6
Ekskavaator	Caterpillar 336	26	23,7
Purustusseade	Keestrack R6	52	21,6
Sõelaseade	Keestrack C6	10	21,6
Laadur	Liebherr 576	13	23,7

7.2.1 Tavakillustiku tootmisel tekkivad süsinikdioksiidi heited

Ühes töötunnis toodab karjääris kasutatav puurmasin Sandvik Ranger 800, ettevõtte Sandvik esindajalt saadud e-kirjas oleva informatsiooni kohaselt, 67 kg CO_2 jäätmeid töötunnis (V. Harju, 06.04.2023).

Lõhketööde läbiviimisel lõhkeainest ANFO tekkiv CO_2 jäätmekoguse arvutasin järgmiselt:

$$X_{ANFO} = E_{ANFO} \cdot M_{ANFO}$$

$$X_{ANFO} = 0{,}189 \cdot 760 = 143{,}6 \text{ kg}$$

Kus:
E_{ANFO} - ANFO emissioonimäär, $\frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg ANFO}}$ (Appendix 6.1-B, 2015)
M_{ANFO} - ühel lõhkamisel kasutatav ANFO kogus, kg

Ühes tunnis ekskavaatori Caterpillar 336 poolt tekkiv CO_2 jäätmekoguse arvutasin järgmiselt:

$$X_{ekskavaator} = \frac{X_{CAT_eluiga}}{H_{CAT_eluiga}}$$

$$X_{ekskavaator} = \frac{1040}{20\,000} = 52 \text{ kg}$$

Kus:
X_{CAT_eluiga} - masina Caterpillar 336 elueal tekkiv CO_2 jäätmekogus, t (Lisa 2)
H_{CAT_eluiga} - masina Caterpillar 336 eluiga töötundides, t (Lisa 2)

Ühes tunnis hüdrovasara Liebherr R934 poolt tekkiv CO_2 jäätmekoguse arvutasin järgmiselt:

$$X_{vasar} = \frac{X_{Liebherr_eluiga}}{H_{Liebherr_eluiga}}$$

$$X_{vasar} = \frac{1130}{20\,000} = 56\ \text{kg}$$

Kus:
$X_{Liebherr_eluiga}$ - masina Liebherr R934 elueal tekkiv CO_2 jäätmekogus, t (Lisa 2)
$H_{Liebherr_eluiga}$ - masina Liebherr R934 eluiga töötundides, t (Lisa 2)

Karjääris kasutatava laaduri Liebherr 576 poolt tekitavat keskmist CO_2 jäätmekogust ei olnud masinatootjal võimalik esitada, seega lähtusin Ameerika Ühendriikide California osariigi transpordiameti poolt kindlaks tehtud ja avaldatud keskmise laaduri poolt tekitatava CO_2 heitekogusest.

Ühes töötunnis laaduri poolt tekkiv CO_2 jäätmekoguse arvutasin järgmiselt:

$$X_{laadur} = E_{laadur} \cdot f_{laadur}$$

$$X_{laadur} = 3190 \cdot 10{,}92 = 34{,}8\ \text{kg}$$

Kus:
E_{laadur} - laaduri keskmine emissioonimäär, $\frac{g}{\text{kg kütus}}$ (Barth jt, 2008)
f_{laadur} - ühes tunnis ekskavaatori poolt tarbitav kütuse kogus, kg

Purustusseade ning sõelaseade tekitavad 5400 t materjali töötlemisel ehk 21,6 töötunni vältel vastavalt 3,48 t ja 0,67 t CO_2 jäätmeid. Heitkogused arvutasin kasutades ettevõttes Väo Paas OÜ kasutatavat „kütusearvutaja“ mudelit, mis on ettevõttesisene allikas (Lisa 3).

7.3 Ümbertöödeldud killustiku tootmisprotsess

Ehitus- ja lammutusjäätmetest killustiku tootmise skeem kronoloogilises järjestuses ettevõttes Väo Paas OÜ on jäätmete transport kalluriga Väo Paasi tootmisterritooriumile ja mahalaadimine, materjali eelpurustamine hüdrovasaraga (Liebherr R943 + Rammer 4092), purustatud materjali laadimine ekskavaatoriga (Caterpillar 336) purustusseadmesse (Keestrack R6), materjali purustamine purustusseadmes (Keestrack R6), materjali edasiliikumine purustusseadmest sõelaseadmesse (Keestrack C6), valmis killustiku saamine sõelaseadmest, killustiku laaduriga (Liebherr 576) transportimine ladudesse.

Ehitus- ja lammutusjäätmed transporditakse Väo Paas OÜ tootmisterritooriumile kalluritega, mille keskmine veovõime on 28 t (I. Marist, suuline teave, 15.03.2023). Võttes analüüsi aluseks võrdse materjali mahu, mille saab ühe ploki lubjakivi lõhkamisega, arvutasin vajalik materjali vedude arvu jäätmete algasukohast Väo Paas OÜ tootmisterritooriumile järgmiselt:

$$n_{veod} = \frac{M_{plokk}}{v_{kallur}}$$

$$n_{veod} = \frac{5400}{28} = 193$$

Kus:
M_{plokk} - materjali mass, t
v_{kallur} - keskmine kalluri veokoorem, t

Ettevõtte tootmisterritooriumile mahalaaditud materjal töödeldakse viieosalise tootmiskompleksi abil analoogselt nagu on kirjeldatud peatükis 5.2. Käesolevas töös keskendusin majanduslikust otstarbekusest lähtudes ennekõike Tallinnas ja Harjumaal tekkinud jäätmete ümbertöötlemisele. Seetõttu arvestasin jäätmete transpordi keskkonna jalajälje arvutustes veodistantsiga kuni 40 km.

Veokilometraaži 5400 tonni jäätmete transportimiseks ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumile arvutasin järgmiselt:

$$L_{kogu} = n_{veod} \cdot L_{üksik}$$
$$L_{kogu} = 192 \cdot 40 = 7680 \text{ km}$$

Kus:
$L_{üksik}$ - arvestuslik üksik veotee maksimaalne pikkus, km

7.3.1 Ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkivad süsinikdioksiidi heited

CO_2 jäätmete mahu 5400 tonni jäätmete transportimisel ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumile arvutasin järgmiselt:

$$X_{kallur} = L_{kogu} \cdot v_{kallur} \cdot E_{kallur}$$

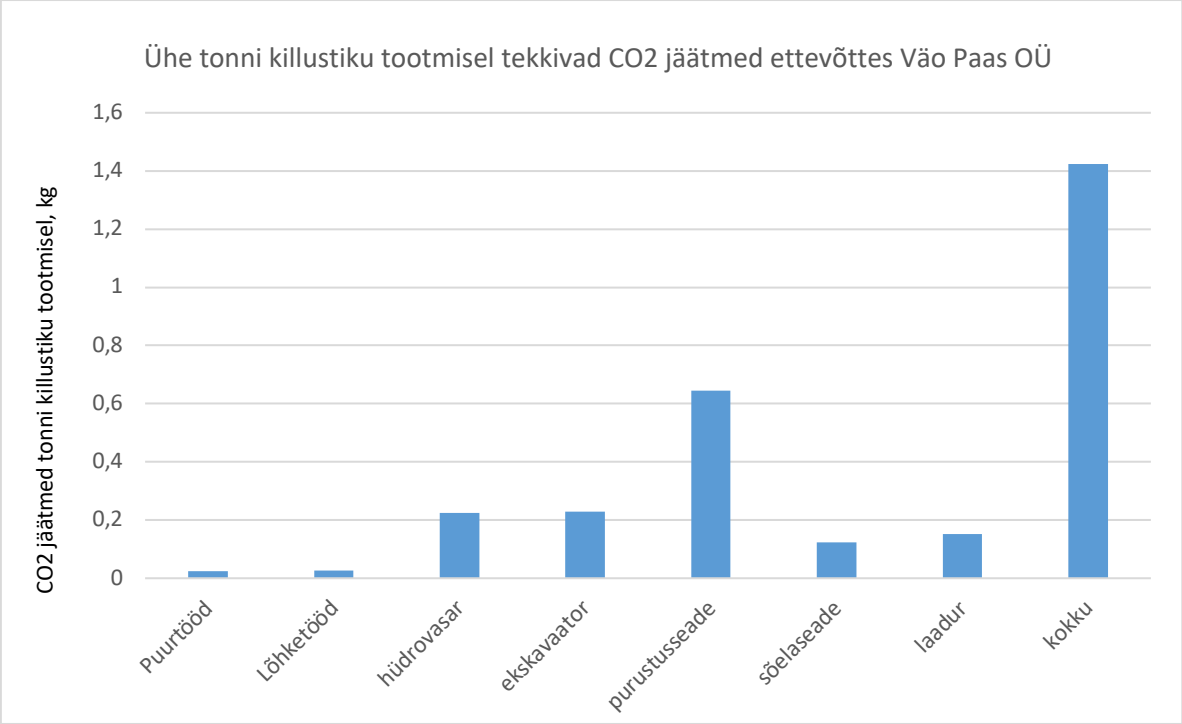
$$X_{kallur} = 7680 \cdot 28 \cdot 61 = 13{,}1 \text{ t}$$

Kus:
E_{kallur} - maanteetranspordi heitetegur, $\frac{g\ CO_2}{t-km}$ (Guidlines for.., 2011)

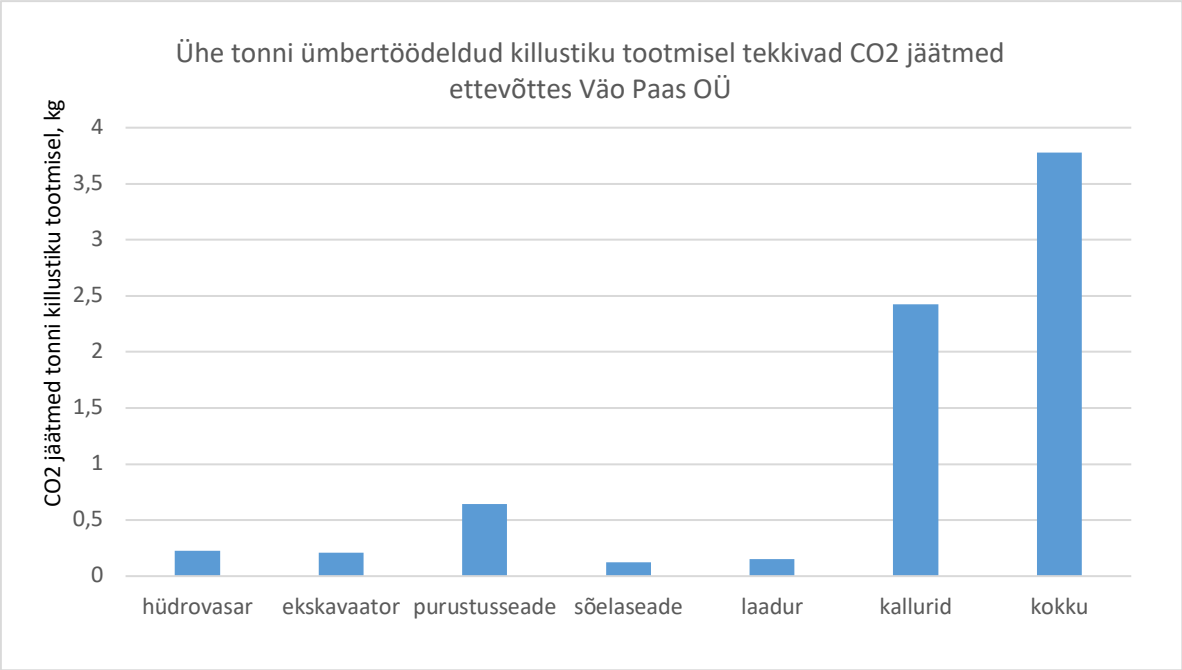
Ümbertöödeldud killustiku tootmisel läbib materjal viieosalise tootmiskompleksi analoogselt lubjakivist killustikuga, seega hüdrovasara, ekskavaatori, purustusseadme, sõelaseadme ning laaduri poolt tekitatavad CO_2 jäätmehulgad on samad, mis arvutati peatükis 5.2.1.

7.4 Süsinikujalajälje võrdlus lubjakivist ja ümbertöödeldud materjalidest killustiku tootmisel

Tuginedes peatükkides 5.2.1 ja 5.3.1 arvutatule, vastavalt tavakillustiku ja ümbertöödeldud killustiku tootmisel kasutatavate masinate ning lõhkeaine ANFO poolt tekkivate CO_2 jäätmete mahtudele ilmnes, et ühe tonni tavakillustiku tootmisel tekib 1,4 kg ning ümbetöödeldud killustiku tootmisel 3,8 kg CO_2 jäätmeid. Märkimisväärne CO_2 jäätmehulga erinevus on tingitud ehitus- ja lammutusjäätmete transportimisest ettevõtte Väo Paas OÜ tootmisterritooriumile. Mõlema killustikutüübi tootmisel tekkivaid süsinikujäätmete koguseid ühe tonni materjali tootmisel kirjeldavad joonised 18 ja 19. Analüüsis ei võtnud arvesse, et lisaks materjali kohaletoomisele sõidavad kallurid tühja veokastiga ka tagasi, ehk kallurite poolt tekitatavad CO_2 jäätmed on reaalsuses suuremad kui graafikutelt nähtub.



Joonis 18. Ühe tonni killustiku tootmisel tekkivad CO2 jäätmed ettevõttes Väo Paas OÜ



Joonis 19. Ühe tonni ümbertöödeldud killustiku tootmisel tekkivad CO2 jäätmed ettevõttes Väo Paas OÜ

8. Majandusarvutused

Tallinnas ja Harjumaal võetakse mineraalseid ehitus- ja lammutusjäätmeid jäätmejaamades vastu hinnavahemikus 14 – 93 €/t. Tallinna linna Jäätmejaamades (Tallinna linna.., i.a) võetakse nii betoonijäätmeid, telliseid kui ka keraamikat vastu hinnaga 30€ m^3. Eelsorteerimata jäätmeid võetakse igas käitluskohas vastu veelgi kallimalt, mis on ehitusettevõtjatele väga motiveeriv, et hakata ehitus- ja lammutusjäätmeid ka ise liigiti koguma ja sorteerima.

Väo Paas OÜ vahetus läheduses asuva turukonkurendi ja ettevõtte Paekivitoodete Tehase OÜ Väo Karjääri territooriumil ehitus- ja lammutusjäätmeid vastuvõtva ja nendest ümbertöödeldud killustiku müügiga tegelev ettevõte ATI Grupp OÜ võtab betoonijäätmeid vastu hinnaga 7 €/t (ATI Grupp.., i.a), mis on ehitusettevõtjatele jäätmejaamadest oluliselt odavam lahendus. Edasistes majandusarvutustes lähtutakse jäätmete vastuvõtmisel samast hinnast.

Ettevõttes Väo Paas OÜ lubjakivikillustiku tootmisel tekkivad kulud jaotati killustiku tonni omahinna arvutamisel kolme eri tsüklisse. Esimene tsükkel hõlmab karjääri territooriumi haldamise kulusid, teine tsükkel toormaterjali hankimisega seotud kulusid ning kolmas tsükkel materjali purustamise ja töötlemisega seotud kulusid. Kõik tootmisega seotud kulud pärinevad ettevõttest Väo Paas OÜ saadud informatsioonist, mis ei ole avalik.

8.1 Lubjakivi killustiku tootmise tonni omahind

Arvutused põhinevad karjääri töötamisel 220 päeval aastas, kus reaalselt killustikku toodetakse 7 tundi tööpäevas. Killustiku tootmisliini tootlikkus on 200 t/h, seega võtsin arvutuste aluseks, et aastane tootmismaht karjääris on 308 000 tonni killustikku ühevahetuselise tööpäeva korral. Killustiku tonni omahind on kõigi tootmiskulude summa ja aastase tootmismahu suhe. Lubjakivist killustiku tonni omahind ettevõttes on 4,6 €/t (Tabel 5). Tabelites 5 ja 6 arvutustes kasutatud kuluallikate aastased kulud pärinevad ettevõtte Väo Paas OÜ pearaamatupidajalt saadud informatsioonist (L. Palumäe, suuline teave, 27.04.2023).

Tabel 5. Ettevõttes Väo Paas OÜ lubjakivist killustiku tonnihinna kujunemine	
Kuluallikas	Kulu aastas, €
I tsükkel (karjääri ettevalmistus- ja teeninduskulud)	
Maa rent	16 019,85
Kaevandamisõiguse tasu	370 000
Vee pumpamine	11 520
Keskkonnatasud	11 000
Karjääri paljandustööd	57 000
II tsükkel (Materjali ettevalmistamise ja raimamise kulud)	
Puur- ja lõhketööde teenus	207 288
Lõhkamise järelvalve raudtee-teemehaaniku teenus	15600
Ekskavaatori Caterpillar 336 amortisatsioonikulu	33000
Ekskavaatori Caterpillar 336 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	50000
Hüdrovasara Liebherr R943 +Rammer 4092 amortisatsioonikulu	13200
Hüdrovasara Liebherr R943 + Rammer 4092 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	86000
2 masinaoperaatori brutopalk + tööandja maksud	79 800
III tsükkel (killustiku tootmiskulud)	
Purusti Keestrack R6 amortisatsioonikulu	50760
Sõelaseadme Keestrack C6 amortisatsioonikulu	22950
Laaduri Liebherr 576 (2 masina) amortisatsioonikulu	70000
Purusti Keestrack R6 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	188570
Sõelaseadme Keestrack C6 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	32700
Laaduri Liebherr 576 (2 masina) kütusekulu + remont + varuosade maksumus	92000
2 masinaoperaatori brutopalk + tööandja maksud	79 800
Kulud kokku	**1 417 208**
Tonni omahind kokku	**4,6**

8.2 Ümbertöödeldud materjalist killustiku tootmise tonni omahind

Ehitus- ja lammutusjäätmetest toodetud killustiku tonni omahinnad arvutasin analoogselt peatükis 6.1 kirjeldatud metoodikale, kus karjäär töötab aastaringselt, tootlikkusega 200 t/h. Killustiku tonni omahinna kujunemise oluline faktor on I tsüklis olevad jäätmete vastuvõtu kulud. Ümbertöödeldud materjalist killustiku tootmisel ei ammutata materjali maapõuest ehk ei maksta kaevandamisõiguse tasu. Materjali hankimiseks võetakse ehitus- ja lammutusjäätmeid vastu ehitusettevõtetelt ning tonni omahindade arvutamisel lähtuti kahest võimalikust variandist.

Variandi 1 kohaselt võetakse 308 000 t ehitusjäätmeid vastu hinnaga 7 €/t, mille tõttu on kõigi tsüklite aastase kulu summa negatiivne ehk tegemist on ettevõttele sissetulekuga. Variandi 2 kohaselt võetakse ehitusjäätmeid ettevõttes vastu tasuta ehk materjali kui ressursi aastane kulu on 0 €. Variandi 1 kohaselt on ettevõttes toodetava killustiku tonni omahind negatiivne ehk -4,3 €/t, sest materjali vastuvõtust saadud tulu ületab kõigis tootmistsüklites tekkivaid kulusid. Variandi 2 kohaselt on killustiku tonni omahind 2,7 €/t (Tabel 6).

Tabel 6. Ettevõttes Väo Paas OÜ ümbertöödeldud killustiku tonnihinna kujunemine		
Kuluallikas	**Variant 1**	**Variant 2**
	Kulu aastas, €	**Kulu aastas, €**
I tsükkel (karjääri ettevalmistus- ja teeninduskulud)		
Maa rent	16 019,85	16 019,85
Vee pumpamine	11 520	11 520
Toormaterjali (jäätmete) vastuvõtt	-2 156 000	0
Keskkonnatasud	5000	5000
II tsükkel (Materjali ettevalmistamise ja raimamise kulud)		
Ekskavaatori Caterpillar 336 amortisatsioonikulu	33000	33000
Ekskavaatori Caterpillar 336 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	50000	50000
Hüdrovasara Liebherr R943 +Rammer 4092 amortisatsioonikulu	13200	13200
Hüdrovasara Liebherr R943 + Rammer 4092 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	86000	86000
2 masinaoperaatori brutopalk + tööandja maksud	79 800	79 800
III tsükkel (killustiku tootmiskulud)		
Purusti Keestrack R6 amortisatsioonikulu	50760	50760
Sõelaseadme Keestrack C6 amortisatsioonikulu	22950	22950
Laaduri Liebherr 576 (2 masina) amortisatsioonikulu	70000	70000
Purusti Keestrack R6 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	188570	188570
Sõelaseadme Keestrack C6 kütusekulu + remont + varuosade maksumus	32700	32700
Laaduri Liebherr 576 (2 masina) kütusekulu + remont + varuosade maksumus	92000	92000
2 masinaoperaatori brutopalk + tööandja maksud	79 800	79 800
Laaduri Liebherr 576 (2 masina) kütusekulu + remont + varuosade maksumus	92000	50760
Kulud kokku	**-1 324 680,2**	**831 319,9**
Tonni omahind kokku	**-4,3**	**2,7**

Võttes arvesse, et aastatel 2015-2021 tekkis Harju maakonnas aastas keskmiselt betoonjäätmeid 87 293 tonni, telliseid 34 322 tonni, keraamikajäätmeid 98 932 tonni ning taaskasutusse jõudis vastavalt 83 317 tonni, 30 184 tonni ning 121 086 tonni (Joonis 5 ja 6) ning eeldades, et jäätmemahtude trend on lähitulevikus analoogne, ei suudaks Harju maakonnas tekkiv vastavate jäätmeliikide maht teenindada ettevõtte Väo Paas OÜ tavapärast tootmisvõimsust, seda isegi juhul, kui ettevõte haaraks piirkonnas ainsana ka mineraalsete ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutuse rolli.

Maakondlikku jäätmemahtu arvesse võttes järeldub, et ettevõte võib tegeleda mineraalsete jäätmete ümbertöötlemisega ning saadud killustiku müügiga kõrvaltegevusena, seda aga lisaks lubjakivist killustiku tootmise, et pikendada karjääri ja ettevõtte eluiga, kuid ettevõte ei suudaks majanduslikult ära elatuda vaid ümbertöödeldud materjalide tootmisest ja müügist.

9. Nõuded killustikule Eestis

Killustiku põhilised kasutusvaldkonnad on täitematerjalina tee-ehituses ning betoonis. Ehitus- ja lammutusjäätmetest ümbertöödeldud killustiku omadustest on realistlik ettevõttes Väo Paas OÜ juhtida ja hinnata vaid geomeetrilisi omadusi, sest jäätmete füüsikalised omadused varieeruvad oluliselt ning materjal ei ole ühetaoline. Võttes arvesse, et ettevõttes ehitusjäätmeid vastu võttes on võimalus, et jäätmeid hakatakse tooma erinevatelt objektidelt ka väikeste mahtude kaupa, ei ole majanduslikult otstarbekas igalt objektilt toodud materjalile teha eraldi füüsikaliste omaduste katsetamisi nii, et oleks võimalik väiksele kogusele toodangule väljastada eraldi toimivusdeklaratsiooni, mis kirjeldaks lisaks geomeetrilistele omadustele ka materjali füüsikalisi omadusi. Materjalide füüsikaliste omaduste, näiteks purunemis- ja külmakindluse hindamiseks läbiviidavad laboratoorsed katsed tuleks ettevõttel Väo Paas OÜ tellida vastavaid katseid läbiviivalt ning vastavat akrediteerimistunnistust omavalt ettevõttelt. Käesolevas peatükis annan ülevaate Eestis täitematerjalidele kehtivatele nõuetele ning hindan, kas ümbertöödeldud killustikule, mille puhul on deklareeritud vaid geomeetrilised omadused, on turupotentsiaali.

9.1 Teedeehitus

Eestis kehtivad avalikele riigiteedele ehitusseadustiku § 96 lõike 3 alusel tee ehitamise kvaliteedi nõuded, mis määratleb ka nõuded ehitusmaterjalide omadustele. Määruse lisas 9 on täpsustatud nõuded killustiku omadustele teede alustes (Tabel 7) (Tee ehitamise.., 2015). Seitsmest kvaliteediparameetrist on ümbertöödeldud killustiku puhul võimalik tootjal hinnata ja juhtida vaid kolme – terastikulist koostist, plaatsustegurit ning peenosiste sisaldust. Määruse lisas 12 on täpsustatud killustikule nõutavad omadused pindamisel (Tabel 8). Üheksast kvaliteediparameetrist on ümbertöödeldud killustiku puhul võimalik tootjal hinnata ja juhtida vaid kolme – terastikulist koostist, plaatsustegurit ning peenosiste sisaldust.

Tabel 7. Nõuded killustiku omadustele alustes (Majandus- ja taristuministri 3.augusti 2015. a määrus nr 101 „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“, Lisa 9)

Omadus			**Katsestandard**
Terastikuline koostis	Kategooria	Gc 80/20	EVS-EN 13242
Petrograafiline kirjeldus		Määratakse katseliselt	EVS-EN 932-3
Purunemiskindlus	Kategooria		EVS-EN 1097-2
Külmakindlus	Kategooria		EVS-EN 1367-1
Külmakindlus 1%-lises NaCl lahuses	Kategooria		EVS-EN 1367-6
Plaatsustegur	Kategooria		EVS-EN 933-3
Peenosiste sisaldus	Kategooria		EVS-EN 933-1

Tabel 8. Killustiku nõutavad omadused pindamisel (Majandus- ja taristuministri 3.augusti 2015. a määrus nr 101 „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“, Lisa 12)

Omadus		**Olemasolev liiklussagedus, autot/ööp**				**Standard**
		>8000	2501-8000	501-2500	<500	
Terastikuline koostis	Kategooria	Gc90/15				EVS-EN 13043
Purunemis-kindlus	Kategooria	LA_{20}	LA_{25}	LA_{30}	LA_{30}	EVS-EN 1097-2
Kulumis-kindlus	Kategooria	A_N10	A_N14	A_N19	PN	EVS-EN 1097-9
Külmakindlus	Kategooria	F_1	F_2	F_2	F_4	EVS-EN 1367-1
Külmakindlus 1%-lises NaCl lahuses	Kategooria	F_{NaCl4}	PN	PN	PN	EVS-EN 1367-6
Plaatsustegur	Kategooria	FI_{15}	FI_{15}	FI_{20}	FI_{25}	EVS-EN 933-3
Nake bituumen-sideainega löögimeetodil	%	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	EVS-EN 12272-3
Peenosiste sisaldus	Kategooria	$f_{0,5}$	f_1	f_1	F_2	EVS-EN 933-1

9.1.1 Nõuded ridakillustikule ja fraktsioneeritud killustikule

Transpordiameti killustikust katendikihtide ehitamise juhendis on määratud minimaalsed nõuded täitematerjalide omadustele aluste ehitamisel ridakillustikust või fraktsioneeritud killustikust, seda vastavalt rajatava tee oletatavale liiklussagedusele. Suurima liiklussagedusega teedel on tee kahekümnenda kasutusaasta oletatav liiklussagedus vähemalt 6000 autot ööpäevas ning väikseima liiklussagedusega teel kuni 500 autot ööpäevas. Viimane liigitub jalg- ja jalgrattateede ning parklatega samasse kategooriasse. Kõikide teede puhul on minimaalsed nõuded määratud terastikulise koostise, petrograafilise kirjelduse, purunemiskindluse, külmakindluse, plaatsusteguri ja peenosiste sisalduse kategooriate kohta. Suurima liiklussagedusega teedel on täitematerjali nõutav purunemiskindlus LA_{30} ja madalaima liiklussagedusega teedel LA_{40}. Külmakindluse nõutavad väärtused on vastavalt F_2 ja F_8 (Killustikust katendikihtide.., 2022).

9.1.2 Nõuded sidumata segudele

Ehitustöödel ja tee-ehituses kasutatavad sidumata ja hüdrauliliselt seotud täitematerjale käsitlev standardi EVS-EN 13242:2006+A1:2008 ja asfaltsegude ning teede, lennuväljade ja muude liiklusalade pindamiskihtide täitematerjale käsitleva standardi EVS-EN 13043:2004 kohaselt materjali füüsikaliste omaduste katsetamise ja deklareerimise vajalikkus määratakse täitematerjali konkreetsele kasutusviisile ja lõppkasutusele. Kui omadus ei ole nõutav, kasutatakse deklareerimisel kategooriat „Nõue puudub“ (EVS-EN 13242:2006+A1:2008, 2008; EVS-EN 13043:2004, 2004).

Minimaalsed nõuded sidumata segudele ja sidumata segudes kasutatavale täitematerjalile EVS-EN 13285 standardi kohaselt hõlmavad nõutavat maksimaalset ja minimaalset peenosiste sisaldust, ülemõõduliste terade, üldise terakoostise kategooriat, petrograafilist kirjeldust, purunemiskindlust, külmakindlust ning plaatsustegurit. Suurima liiklussagedusega teedel on täitematerjali nõutav purunemiskindlus LA_{25} ja madalaima liiklussagedusega teedel LA_{35}. Külmakindluse nõutav väärtus on kõigi F_4 (Killustikust katendikihtide.., 2022).

Teedel, mille oletatav liiklussagedus on tee kahekümnendal kasutusaastal vähemalt 3000 autot ööpäevas, on sidumata segudes taaskasutatavate täitematerjalide kasutamine keelatud. Materjali omaduste nõuetele vastavuse korral on taaskasutatavate materjalide kasutamine lubatud 3000 autost ööpäevas väiksema liiklussageduse korral, seal hulgas sõiduautodele mõeldud parklate ja jalg- ning rattateede alustes (Killustikust katendikihtide.., 2022).

9.1.3 Nõuded mustkillustikule

Bituumensideainega töödeldud aluste ehitamisel kasutatakse mustkillustikku. Mustkillustikus kasutatav jämetäitematerjal peab vastama standardi EVS-EN 13043 kohaselt terastikulise koostise kategooriale $G_c85/20$, purunemiskindluse kategooriale LA_{30}, plaatsusteguri kategooriale FI_{25}, külmakindluse kategooriale F_4 ja peenosiste sisalduse kategooriale f_4 (Killustikust katendikihtide.., 2022).

9.2 Betoon

Betooni spetsifitseerimist, toimivust, tootmist ja vastavust käsitlev standard EVS-EN 206:2014+A2:2021 toob välja soovitused taaskasutatava täitematerjali kohta. Standardi järgi jaotatakse taaskasutatav täitematerjal kahte kategooriasse. Tüüp A puhul on jämematerjali nõutav terade kuivtihedus ≥2100 kg/ m^3 ning tüüp B puhul ≥1700 kg/m^3. Mõlema tüübi puhul peab materjal vastama purunemiskindluse väärtusele $\leq LA_{50}$, plaatsusteguri väärtusele $\leq FI_{50}$, vees lahustuvate sulfaatide sisaldus väärtusele $\leq SS_{0,2}$ ning mõju tardumise algusele vastama väärtusele $\leq A_{40}$ (EVS-EN 206:2014+A2:2021, 2021).

Mõlema killustikutüübi puhul on määratletud ka nõutav komponentide sisaldus materjalis. Tüübi A puhul peab materjal sisaldama ≥90% betooni ning ≥95% sidumata täitematerjali. Materjali nõutav savist kivimaterjalide sisaldus on ≤10%, ≤1% bituumenmaterjale, ≤2% ujuvaid materjale ning ≤1% muid materjale. Tüübi B puhul peab materjal sisaldama ≥50% betooni ning ≥70% sidumata täitematerjali. Materjali nõutav savist kivimaterjalide sisaldus on ≤30%, ≤5% bituumenmaterjale, ≤2% ujuvaid materjale ning ≤2% muid materjale (EVS-EN 206:2014+A2:2021, 2021).

Betooni täitematerjale käsitlev standard EVS-EN 12620:2005+A1:800 näeb alajaotuses number 4 ette, et täitematerjal peab vastama konkreetsetele geomeetrilistele nõuetele, mis on standardis välja toodud. Standardi alajaotused 5 ja 6 näevad ette, et jaotistes kindlaks määratud omaduste katsetamise ja deklareerimise vajalikkus määratakse lähtuvalt materjali kasutusviisist, lõppkasutusest ja päritolust.
Jaotis 5 kirjeldab purunemiskindluse, kulumiskindluse, poleerituse, lihvimiskindluse, terade tiheduse, veeimavuse, puistetiheduse, külmakindluse, mahupüsivuse, leelis-räni-reaktiivsus,

koostisosade sisalduse kategooriaid. Jaotis 6 kirjeldab keemilisi nõudeid materjalile. Kui omadustele nõudeid ei esitata, kasutatakse kategooriat „Nõue puudub“ (EVS-EN 12620:2005+A1:2008, 2008).

9.3 Turupotentsiaal ümbertöödeldud killustikule Eestis

Heterogeensete ehitus- ja lammutusjäätmete korral on ettevõttel Väo Paas OÜ realistlikult võimalik hinnata ja juhtida jäätmetest ümbertöödeldud killustiku puhul geomeetrilisi omadusi. Võttes vastu vaid sorteeritud ning sobiva jäätmekoodiga jäätmeid on üldiselt võimalik kontrollida ja hinnata ka komponentide sisaldust materjalis visuaalsel vaatlusel ja korralisi laborikatseid läbi viies. Killustikuks ümbetöötlemisse jõudev betoonmaterjal võib sisaldada metall- ja polümeerkiude, täitematerjalina nii graniit- kui paekivikillustikku, mis annab eos suure füüsikaliste omaduste varieeruvuse betoonmaterjalides.

Võttes arvesse, et betooni täitematerjalide standardi EVS-EN 12620:2005+A1:800 kohaselt täitematerjali keemiliste ja füüsikaliste omaduste katsetamise ja deklareerimise vajalikkus oleneb materjali edasisest kasutusest ja kliendi vajadusest, on võimalik ümbertöödeldud killustikku kasutada ehituses kui ehitusettevõtja hinnangul on vaid materjali geomeetriliste omaduste garantii talle rahuldav.

Nõuded täitematerjalide purunemis- ja külmakindlusele elimineerivad ümbertöödeldud killustiku kasutamist aluste ehitamisel riigiteedel, sest mineraalsed jäätmed on oma olemuselt heterogeensed ning ühtseid füüsikalisi omadusi, mida nõutakse, nagu külmakindlus ja purunemiskindlus ei ole võimalik hinnata ega deklareerida.

Eelnevale tuginedes on ümbertöödeldud killustikule turupotentsiaal olemas ehituses betooni täitematerjali näol kui projekteerija hinnangul on säärane täitematerjal sobiv, mille puhul on vaid geomeetriliste omaduste vastavus määratud. Riskide maandamiseks on võimalik ümbertöödeldud killustikku vaid osaliselt tavakillustikuga asendada. Materjal võib sobida ka eraisikutele, kes ehitustöid silmas pidades peavad oluliseks materjali hinda ning tugevusnäitajad ei ole määrava tähtsusega. Riigiteede ehituseks turupotentsiaal puudub, sest materjali nõutavaid füüsikalisi omadusi ei ole võimalik hinnata ega garanteerida.

Analüüs ja tulemused

Magistritöö keskkonnamõju analüüsis arvutatud CO_2 jäätmetekke mahud, nii lubjakivist kui mineraalsetest jäätmetest killustiku tootmisel, näitavad just jäätmete transportimisel nende tekkekohast tootmiskompleksi suurimat negatiivset mõju keskkonnale. Ühe tonni lubjakivist ja jäätmetest toodetud killustiku tootmisel tekib ettevõttes Väo Paas OÜ vastavalt 1,4 kg ja 3,8 kg CO_2 jäätmeid (Joonis 18 ja 19). Sellele lisaks kaasnevad mineraalsete jäätmete ümbertöötlemisega ka teisesed mittemineraalsed jäätmed, nagu näiteks metalli- ja plastmaterjalid, mis tuleb purustatavast materjalist eraldada ning seejärel utiliseerida.

Võttes ettevõttes Väo Paas OÜ aluseks tavapärase lubjakivist killustiku aastase tootmismahu selgus, et samas mahus ümbetöödeldud killustiku tootmine on tonni omahinda arvesse võttes odavam kui lubjakivist killustikku tootmine. Lubjakivist killustiku tootmise tonni omahind on 4,6 € samal ajal kui tasuta vastu võetud mineraalsetest jäätmetest toodetud killustiku tonni omahind on 2,7 €. Hinnaga 7 €/t vastu võetud jäätmete ümbertöötlemisel on saadud killustiku tonni hind -4,3 €, mis tähendab, et ainuüksi jäätmete vastuvõtmisest saadav tulu ületab ettevõttes tootmiskulusid (Tabel 5 ja 6). Harju maakonnas aastatel 2015-2019 tekkinud mineraalsete ehitus- ja lammutusjäätmete tekkemahu (Joonis 5) kohaselt aga ei ole võimalik tekkivate jäätmetega karjääri tavapärast tootmisvõimsust täies mahus teenindada.

Olemuselt heterogeensetest ehitus- ja lammutusjäätmetest purustatud ja toodetud fraktsioneerimata täitematerjali geomeetriliste omaduste katsetamisel ettevõtte Väo Paas OÜ katselaboris selgunud tulemuste põhjal (Tabel 3) loodud toimivusdeklaratsiooni alusel on materjali võimalik turustada standardite EVS-EN 13285:2018 ja EVS-EN 13242:2006+A1:2008 järgi sidumata seguna (Joonis 11 ja 12).

Ettevõtte Väo Paas OÜ masinapargiga on võimalik tehnoloogiliselt eelsorteeritud mineraalsetest jäätmetest killustikku toota ning seda iseloomustab magistritöö käigus loodud tehnoloogiline skeem (Lisa 1). Paratamatult betoonjäätmetega, eriti raudbetooniga kaasnevad suuremõõdulised metallist lisandid suudab karjääri purustusseade purustatud materjalist eemaldada (Joonis 8), kuid väiksemõõdulisi metallobjekte purustis asuv magnet materjalist eraldada ei suuda ning ümbertöödeldud killustik võib sisaldada erinevaid väiksemõõdulisi metalli ja plasti lisandeid (Joonis 9).

Arutelu ja järeldused

Mineraalsete ehitusjäätmete taaskasutamine ehitusmaterjalidena on perspektiivikas valdkond selleks, et jõuda mõistliku ning ressursisäästliku materjalide tootmiseni. Jäätmete ümbertöötlemise teeb ettevõtjatele realistlikuks rajatiste läbimõeldud lammutamine, kus jäätmed kogutakse ka liigiti. Selle propageerimiseks võtavad ka jäätmekäitlejad liigiti kogutud jäätmeid vastu oluliselt odavamalt kui segajäätmeid.

On oluline, et positiivne keskkonna jalajälg ning majanduslik otstarbekus motiveeriksid ettevõtjaid kaaluma jäätmete ümbertöötlemist. Magistritöös arvutatud CO_2 jäätmetekke mahud, seda nii lubjakivist kui jäätmetest killustiku tootmisel, näitavad just jäätmete transportimisel tootmiskompleksi suurimat negatiivset mõju keskkonnale. Sellest lähtuvalt pakun välja, et CO_2 jäätmete minimeerimiseks on mõistlik transportida purustusseade jäätmete tekkekohta, näiteks lammutusplatsile, kus oleks kohapeal võimalik jäätmeid purustada ja ümber töödelda, jättes nii ära suurte jäätmekoguste transportimise karjääri. Selline lahendus aga eeldab suuremat eeltööd ehitusettevõtjalt – hea lahendus oleks kaardistada objekti lammutamisel tekkivate jäätmete liigid ja mahud juba varakult, et oleks võimalik planeerida ümbertöödeldud jäätmete edasise ringlusesse suunamise ja turustamise. Sarnast meetodit on kasutatud edukalt Poolas teede rekonstrueerimisel (Kiisler, 2018) ning Taanis (Fibo.., i.a) ja Sloveenias (CINDERELA.., i.a) hoonete ehitusel, kus ehitusjäätmed on purustatud ja sõelutud objektil kohapeal ning need on samas asukohas uue objekti ehitusel ka kasutusele võetud. Kui ettevõtja ei ole motiveeritud ise jäätmete ümbertöötlemisest ja kasutuselevõtust, on keskkonnahoiu mõttes mõistlik jäätmed transportida just lähimasse ettevõttesse, kes tegeleb jäätmete ümbertöötlemisega, lähimasse jäätmejaama või lähimasse karjääri, kes võtab mineraalseid jäätmeid vastu tagasitäitmiseks.

Ümbertöödeldud täitematerjalidel on suure jäätmete omaduste heterogeensuse tõttu kvaliteediparameetritest ettevõttes Väo Paas OÜ tootjana deklareeritud vaid geomeetrilised omadused. Ebaselged füüsikalised omadused välistavad ümbetöödeldud materjalide kasutamise riigiteede ehituses, mille tõttu on potentsiaalseimad kliendid materjalile just eraisikud ning ehitusettevõtjad juhul kui projekteerijate hinnangul on materjal objektil kasutamiseks sobiv. Ehituses ümbertöödeldud täitematerjale kasutuselevõttes on võimalik kvaliteediriskide maandamiseks lubjakivist täitematerjale ümbertöödeldud materjalidega ka vaid osaliselt asendada. Sellist materjalide osalist asendamist ümbertöödeldud killustikuga on uuritud Delhi Tehnikaülikoolis tehtud katsete käigus (Abera, 2022) ning lahendusena välja pakutud Ida-Virumaal läbi viidud pilootprojekti raames (Ilomets jt, 2022).

Jäätmete suuremale ringlussevõtule aitaks minu hinnangul kaasa riigi poolt avalike teede ehitamiseks kasutatavatele materjalidele kehtestatud nõuete kohandamine, alustades täitematerjalidest, mida kasutatakse kergeliiklusteede ja parklate ehitusel. Leian, et ringmajanduslikust vaatest oleks mõistlik uurida ja kaardistada nõudlus ning turupotentsiaal ümbertöödeldud täitematerjalidele ning võtta saadut arvesse ümbertöödeldud materjalide tootmist planeerides.

Tuginedes Harju maakonnas aastatel 2015-2021 tekkinud mineraalsete ehitus- ja lammutusjäätmete jäätmekoodidega 17 01 01, 17 01 02 ja 17 01 07 tekkemahtudele (Joonis 5) ei

suudaks samade jäätmekoguste juures kogu maakonnas tekkivad jäätmed ettevõtte Väo Paas OÜ tavapärast tootmisvõimsust teenindada. Eelnevale tuginedes järeldan, et ettevõte võib jäätmeid vastu võttes, neid ümber töödeldes ning müües ümbertöödeldud täitematerjalide kasutamisega ettevõtte eluiga pikendada, kuid ei suudaks ainuüksi sellest majanduslikult ära elatuda.

Harju maakonna jäätmetekke mahtudele ning töös tehtud keskkonnamõju analüüsile lähtudes olen arvamusel, et erinevad dolo- ja lubjakivi karjäärid üle Eesti võiksid mineraalseid jäätmeid vastu võtta ning nendest ümbertöödeldud materjale toota. Sellega koos pikendatakse karjääride eluiga ning jäätmed jõuaksid maksimaalses koguses ringlusesse üle riigi, luues nii ka olukorra, kus eraiaisikutel ja ettevõtetel oleks samuti võimalik mineraalsed jäätmeid viia lähimasse karjääri ümbertöötlemiseks. Jäätmetest täitematerjalide tootmiseks on kaevandamisega tegeleval ettevõtetel vaja omada jäätmete käitlemise luba. Antud luba on võimalik taotleda Keskkonnaametist. Ühe võimalusena, kuidas riik saaks karbonaatsete maavarade kaevandamisega tegelevate ettevõtete seas edendada jäätmete ringlussevõttu on minu hinnangul maavara kaevandamise loa sidumine ja väljastamine koos jäätmete käitlemise loaga.

Kokkuvõte

Käesolevas töös selgus, et ehitus- ja lammutusjäätmetest killustiku tootmine on karjääri tavapärast tootmisvõimsust arvesse võttes tulus ning ümbertöödeldud killustiku tonni omahind on oluliselt odavam lubjakivist toodetud killustiku tonni omahinnast. Seda nii ettevõtete kui ka eraisikute jäätmeid, nii tasuta kui tasu eest vastu võttes. Võttes jäätmeid vastu sama hinnaga, kui lähim turukonkurent, on jäätmete vastuvõtmisel teenitav tulu suurem kui materjali töötlemise ja karjääri haldamisele kulud. Võttes aga aluseks Harju maakonnas tekkivad mineraalsete jäätmete tekkemahud, ei suuda ettevõte enda tavapärast tootmisvõimsust maakonnas tekkivate jäätmetega katta ja teenindada. Sellest järeldub, et ettevõte Väo Paas OÜ saab edukalt jäätmeid täitematerjalideks ümber töödelda ainult lisategevusena lubjakivist killustiku tootmise kõrval.

Analüüsides lubjakivist ja jäätmetest toodetud killustiku transpordi- ja tootmisprotsesse ettevõtte Väo Paas OÜ näitel selgus, et ümbertöödeldud killustiku transportimisel ja töötlemisel tekib masinate töötamisel üle kahe korra rohkem CO_2 jäätmeid kui lubjakivist killustiku tootmisel tavapärasel viisil puur-lõhketöödega.

Ettevõttes on võimalik olemasoleva masinapargi abil mineraalsetest jäätmetest toota ümbertöödeldud killustikku. Tehnoloogilise skeemi järgi ettevõtte tootmisterritooriumile transporditud materjal järelpurustatakse vajadusel hüdrovasaraga, mille järel materjal laaditakse ekskavaatoriga purustusseadmesse, kus lisaks materjali purustamisele eemaldatakse seadmes oleva magneti abil materjalist ka metallobjektid. Purustusseadmest liigub materjal edasi sõelaseadmesse, kus materjal sõelutakse lahti sobiva fraktsiooniga materjaliks ning saadud killustiku fraktsioonid transporditakse killustiku ladudesse laaduritega.

Töös laboratoorselt katsetatud purustatud betoonkillustiku geomeetriliste omaduste katsetulemustest koostatud toimivusdeklaratsiooni alusel on võimalik materjali turustada kui sidumata segu, millel on deklareeritud vaid geomeetrilised omadused. Materjalile on turupotentsiaal eraisikute ning ehitusettevõtjate näol, kelle hinnangul on purustatud betooni geomeetrilised omadused materjali kasutuselevõtuks piisavad.

Tänuavaldused

Soovin tänada kõiki inimesi, kes aitasid kaasa minu magistritöö valmimisele. Tänan enda juhendajaid Karin Robamit ja Tony Hand'i töö juhendamise ning tagasiside eest. Soovin väga tänada ettevõtte Väo Paas OÜ kogu kollektiivi mu töö valmimisele kaasa elamast, eriti Veljo Haubet, Ivar Maristit ning Liivi Palumäed, kes varustasid mind tööks vajaliku informatsiooniga, vahetasid minuga mõtteid, andsid head nõu ning vastasid minu lõpututele küsimustele. Samuti soovin tänada õppejõud Heidi Elisabet Soosalu, kes andis palju häid soovitusi töö koostamise kohta ning süstis entusiasmi. Tänan ka enda kaastudengit Carina Potaginit, kes oli suureks moraalseks toeks töö valmimise perioodil.

Kirjanduse loetelu

Abera, Y. S. A. (2022). Performance of concrete materials containing recycled aggregates from construction and demilition waste. *Results in Materials, 14.* 100278. https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100278

Appendix 6.1-B. Greenhouse Gas Emission Inventory Summary for KGHM Ajax Mine. (2015). Stantec Consulting Ltd. https://iaac-aeic.gc.ca/050/documents/p62225/104540E.pdf

Arula Veod OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 21.02.2023, https://www.arulaveod.ee/killustiku-muuk

Austria Business Service Portal kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 03.02.2023, https://www.usp.gv.at/en/umwelt-verkehr/abfallsammlung-und-abfallbehandlung/pflichten-bei-bau-und-abbruchtaetigkeiten.html

Aspen Grupp OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 19.03.2023, https://aspen.ee/?action=viewmenu&menu=KESKKOND&submenu=1#

ATI Grupp OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 15.02.2023, https://atigrupp.ee/

Barth, M., D. Dubrin, T., Miller, W. ja Scora, G. (2008). Evaluating the Emissions from Heavy-Duty Construction Equipment. California Department of Transportation (Caltrans), Division of research and Innovation, 24. https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/f0016796-rta-650197.pdf

Beja, I. A., Motta, R. ja Bernucci, L. B. (2020). Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. *Construction and Building Materials, 258.* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119520

Braga, M., de Brito, J. ja Veiga, R. (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials, 36*. 960-968. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031

CINDERELA kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 13.03.2023, https://www.cinderela.eu

Coelho, A. ja de Brito, J. (17.-19.03.2010). *Traditional vs. Selective Demolition – Comparative Economic Analysis Applied to Portugal* [Conference paper]. Portugal SB10 – Sustainable Building Affordable to All, Algarve, Portugal.

Crushtec OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 19.03.2023, https://www.crushtec.ee

Di Maria, A., Eyckmans, J. ja Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management, 75.* 3-21. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028

Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüs. (2015). Kasutatud 189.02.2023, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjqr-

OH6qH9AhXDtYsKHbsuCjkQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fenvir.ee%2Fmedia%2F5292%2Fdownload&usg=AOvVaw00jZlvpBkVVeRtAYD0ZtOT

Embuild Vlaanderen kodulehekülg. (i.a). Focus on circular constructon. Flemish Construction Confederation blogi. Kasutatud 14.02.2023, https://www.circulairebouweconomie.be/en/

Eurostat kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 28.03.2023, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_AINAH_R2__custom_5217930/default/bar?lang=en

Esfahani, M.A. (2018). Evaluating the feasibility, usability and strenght of recycled construction and demolition waste in base and subbase courses. *Road Materials and Pavement Design*. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1483259

EVS-EN 13242:2006+A1:2008. (2008). Ehitustöödel ja tee-ehituses kasutatavad sidumata ja hüdrauliliselt seotud täitematerjalid. Eesti Standardikeskus.

EVS-EN 13042:2004. (2004). Asfaltsegude ning teede, lennuväljade ja muude liiklusalade pindamiskihtide täitematerjalid. Eesti Standardikeskus.

EVS-EN 206:2014+A2:2021. (2021). BETOON Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus. Eesti Standardikeskus.

EVS-EN 12620:2005+A1:2008. (2008). Betooni täitematerjalid. Eesti Standardikeskus.

EVS-EN 933-1:2012. (2012). Täitematerjalide geomeetriliste omaduste katsetamine. Eesti Standardikeskus.

Fetting, C. (2020). „The European Green Deal", ESDN Report, December 2020, ESDN Office, Vienna. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN

Fibo Intercon kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 19.03.2023, https://fibointercon.com/business-cases/recycled-concrete-buildings/

Gretler, C. (27.09.2021). How Zurich Blazed a Trail for Recycled Concrete. Bloomberg. Kasutatud 19.03.2023, https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-27/using-recycled-concrete-for-sustainable-construction

Guidelines for Measuring and Managing CO2 Emission from Freight Transport Operations. (2011). https://www.ecta.com/wp-content/uploads/2021/03/ECTA-CEFIC-GUIDELINE-FOR-MEASURING-AND-MANAGING-CO2-ISSUE-1.pdf

Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia. (2020). Kasutatud 13.02.2023, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiYwv2Qz_n8AhWqXvEDHW8tCnsQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mkm.ee%2Fmedia%2F155%2Fdownload&usg=AOvVaw2qa7ClAt6Mah1FAYvUZk6-

Ideon, T. Ja Osjamets. M. (2010). Ehitus- ja lammutusjäätmete sortimisuuring.

Ilomets, S., Kiviste, M., Tuisk, T., Paalandi, K., Kallavus, U., Hain, T., Pikas, E., Rebane, K., Mitt, M. ja Kalamees, T. (2022). Tühjenenud korterelamu lammutamisel tekkivate materjalide korvuskasutuse ringlussevõtu rakendusuuring – 1. etapi vaheraport. 122-123. https://eehitus.ee/wp-content/uploads/2022/04/Kivioli_lammutusuuringu_1_etapi_aruanne_20220325_Lisadega.pdf

Jäätmearuandluse infosüsteemi kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 15.03.2023, https://jats.keskkonnainfo.ee/main.php?public=1

Jäätmeseadus (01.05.2004). *Riigi Teataja*. Kasutatud 10.02.2023, https://www.riigiteataja.ee/akt/123032015204?leiaKehtiv

Kalsep OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 21.03.2023, https://www.kalsep.ee

Karimek OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 19.03.2023, https://www.karimek.ee

Kiisler, E. (2018). Betoonteed, tehnilised lahendused Poolas. *Ehitaja, 225.*

Killumeister OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 21.02.2023, http://killumeister.ee/teenused-raudbetooni-purustamine-ja-soelumine

Killustikust katendikihtide ehitamise juhend. (2022). Transpordiamet. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjJw_yKmKX-AhWn-ioKHUyWCq0QFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.transpordiamet.ee%2Fmedia%2F2716%2Fdownload&usg=AOvVaw0vTHbhKyMFie-zMaabu5-i

Klang, A., Vikman, P. ja Brattebø, H. (2003). Sustainable management of demolition waste – an integrated model for the evaluation of environmental, economic and social aspects. *Resources, Conservation and Recycling, 38* (4). 317-334. https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00167-2

Kunsthaus Zürich kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 25.03.2023, https://www.kunsthaus.ch

Ma, Z., Tang, Q., Yang, D. ja Ba, G. (2019). Durability Studies on the Recycled Aggregate Concrete in China over the Past Decade: A Review. *Advances in Civil Engineering, 2019*. 1-19. https://doi.org/10.1155/2019/4073130

Marzouk, M. ja Azab, S. (2013). Environmental and economic impact assesment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservatory and Recycling, 82.* 41-49. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015

OÜ Mantrum kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 21.03.2023, http://www.mantrum.ee/Killustiku_muuk_795

OÜ Vectra kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 21.03.2023, http://www.vectra.ee/materjalide-muuk/betoonkillustik/

Poon, C. S. Ja Chan, D. (2004). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials, 20* (8). 569-577. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044

Portland Cement Association kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 13.03.2023, https://www.cement.org/learn/concrete-technology/concrete-design-production/recycled-aggregates

Purustaja OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 19.03.2023, https://www.purustaja.ee/teenused/lammutusjargsed-tood/

Rauk, K. (11.08.2015). Jäätmete uuele ringile saatmine kallis. *Äripäev*. Kasutatud 22.03.2023, https://www.aripaev.ee/uudised/2015/08/11/jaatmete-uuele-ringile-saatmine-kallis

Riigi jäätmekava 2022-2028 olemasolev olukord. (2022). Kasutatud 15.02.2023, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjbqrLLy5f9AhU5g_0HHZdWCJYQFnoECBkQAQ&url=https%3A%2F%2Fenvir.ee%2Fmedia%2F8081%2Fdownload&usg=AOvVaw2TI2P4cDJYu98pMawTpd3g

Ringmajanduse valge raamat. (2022). Kasutatud 15.02.2023, https://ringmajandus.envir.ee/sites/default/files/2022-10/Ringmajandus%20valge%20raamat%20%282%29.pdf

Rüütelmann, M. (08.11.2012). Katselõik Maardu-Raasiku maanteel: tee rajamisel kasutati ehitus- ja lammutusprahti. *Maaleht*. Kasutatud 20.03.2023, https://maaleht.delfi.ee/artikkel/65226976/katseloik-maardu-raasiku-maanteel-tee-rajamisel-kasutati-ehitus-ja-lammutusprahti

Rüütelmann, M. ja Lill, K. (2015). Ekspertarvamus. Katselõiku paigaldatud taaskasutatava materjali (purustatud betooni) omaduste hindamine 3,5 aastat peale katselõigu rajamist.

Zhang, C., Hu, M., Yang, X., Miranda-Xicotencatl, B., Sprecher, B., Di Maio, F., Zhong, X. ja Tukker, A. (2020). Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production, 266.* 121718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121718

Tallinna linna kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 04.04.2023, https://www.tallinn.ee/et/keskkond/jaatmejaamad-tallinnas

Tee ehitamise kvaliteedi nõuded. (03.08.2015). *Riigi Teataja*. Kasutatud 10.04.2023, https://www.riigiteataja.ee/akt/107082015001

Traks, K. (19.01.2023). Lähimate aastakümnete jooksul vajub rusudeks kümneid tuhandeid maju. Mida jäätmetega teha? *Delfi Ärileht.* Kasutatud 05.02.2023, https://arileht.delfi.ee/artikkel/120130620/lahemate-aastakumnete-jooksul-vajub-rusudeks-kumneid-tuhandeid-maju-mida-jaatmetega-teha?fbclid=IwAR2d-oRtjYKcVSYRji5Qj5_ccVuOicjVpSrwUBjQXcHvLLVZ4SGdLjNLuTk

United States Environmental Protection Agency kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 29.03.2023, https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases

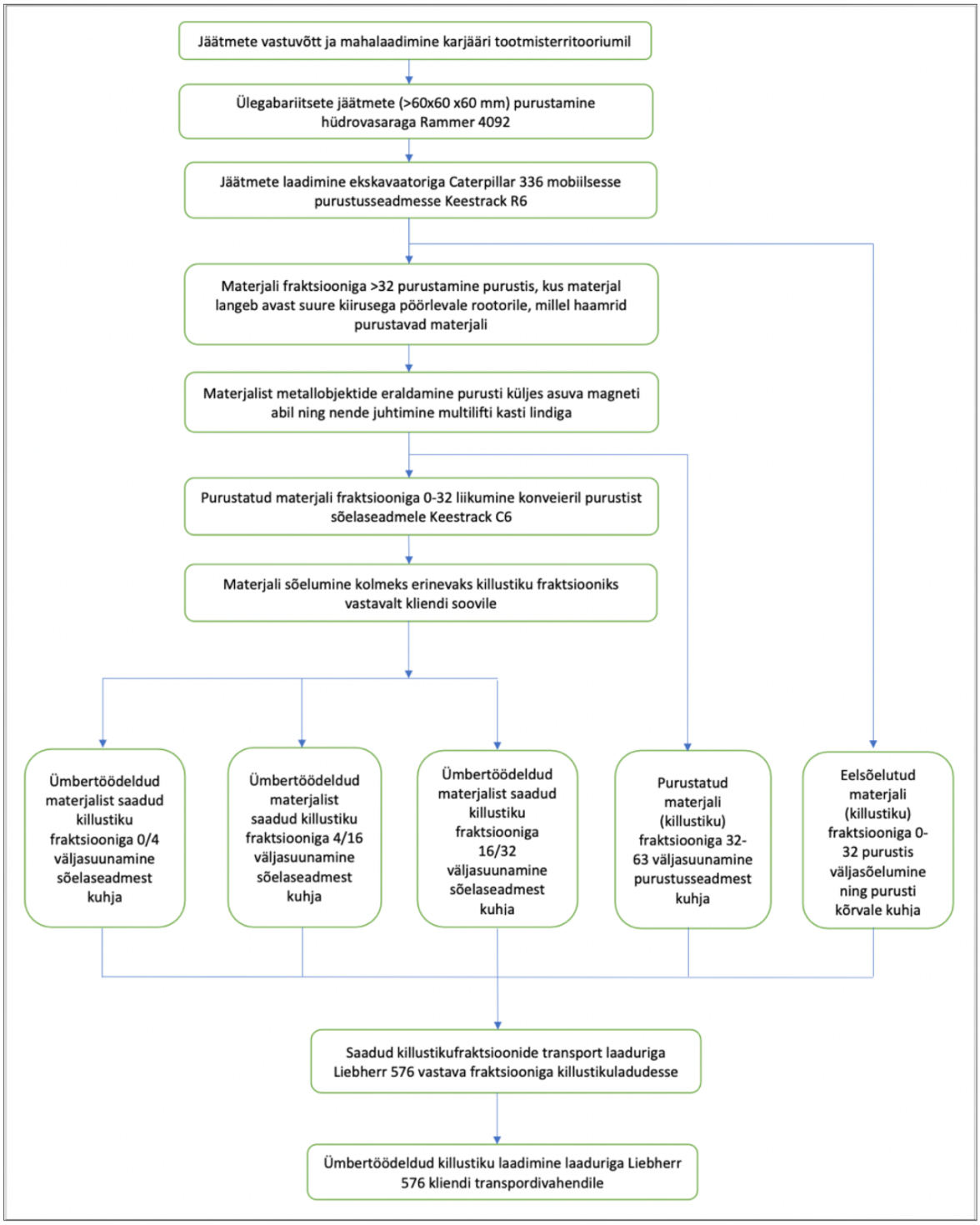
Vabariigi valitsuse kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 15.02.2023, https://valitsus.ee/strateegia-eesti-2035-arengukavad-ja-planeering/strateegia/aluspohimotted-ja-sihid

Verostiil OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 21.02.2023, https://www.verostiil.ee/materjali-muuk/

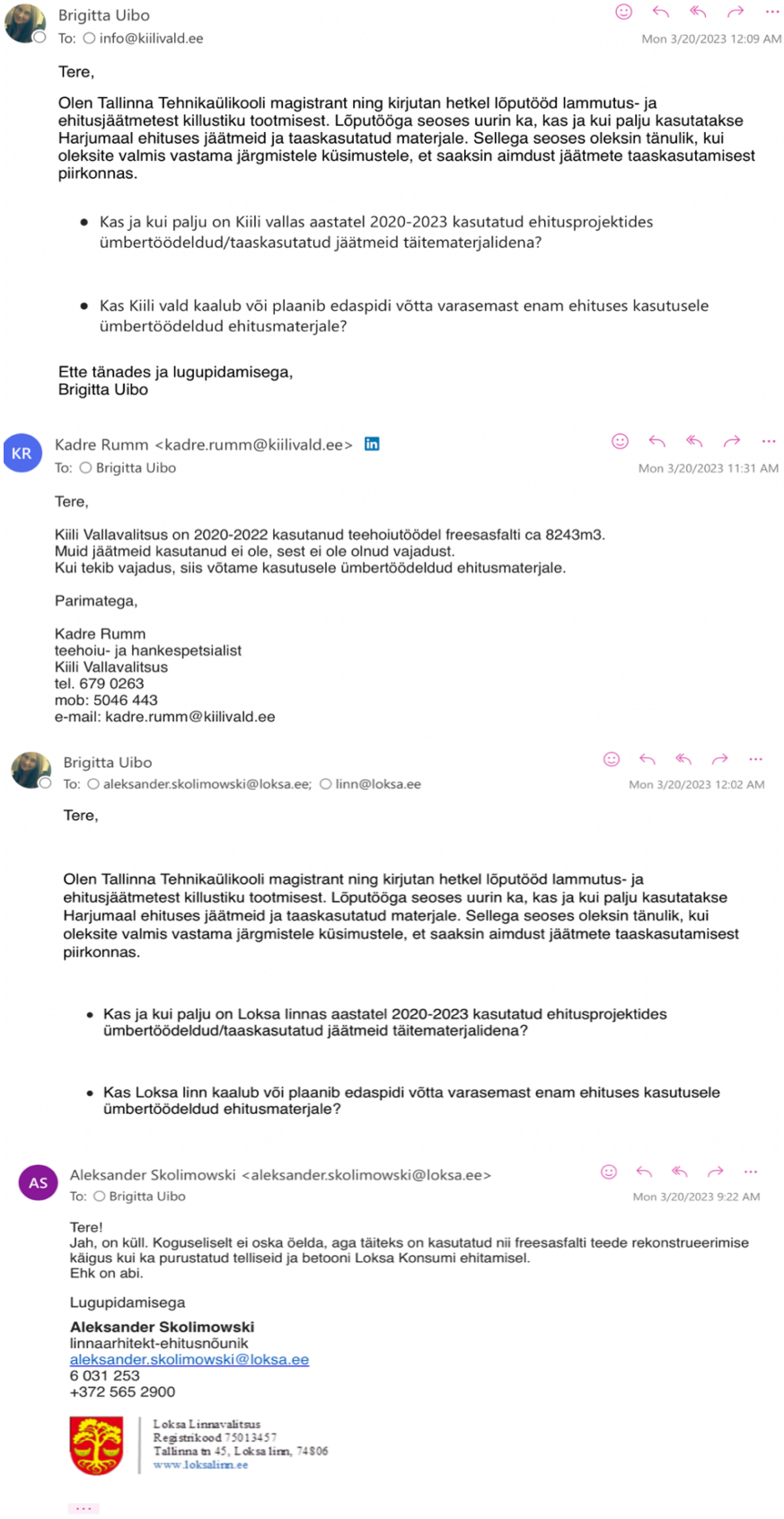
Väo Paas OÜ kodulehekülg. (i.a). Kasutatud 10.04.2023, http://vaopaas.ee/firmast/

Yang, J., Du, Q. ja Bao, Y. (2010). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials, 25* (4). 1935-1954. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063

Lisa 1. Ehitus- ja lammutusjäätmetest killustiku tootmise tehnoloogiline skeem ettevõttes Väo Paas OÜ



Lisa 2. Kirjavahetus Kiili valla ja Loksa linna esindajatega



Brigitta Uibo
To: info@kiilivald.ee
Mon 3/20/2023 12:09 AM

Tere,

Olen Tallinna Tehnikaülikooli magistrant ning kirjutan hetkel lõputööd lammutus- ja ehitusjäätmetest killustiku tootmisest. Lõputööga seoses uurin ka, kas ja kui palju kasutatakse Harjumaal ehituses jäätmeid ja taaskasutatud materjale. Sellega seoses oleksin tänulik, kui oleksite valmis vastama järgmistele küsimustele, et saaksin aimdust jäätmete taaskasutamisest piirkonnas.

- Kas ja kui palju on Kiili vallas aastatel 2020-2023 kasutatud ehitusprojektides ümbertöödeldud/taaskasutatud jäätmeid täitematerjalidena?
- Kas Kiili vald kaalub või plaanib edaspidi võtta varasemast enam ehituses kasutusele ümbertöödeldud ehitusmaterjale?

Ette tänades ja lugupidamisega,
Brigitta Uibo

KR
Kadre Rumm <kadre.rumm@kiilivald.ee>
To: Brigitta Uibo
Mon 3/20/2023 11:31 AM

Tere,

Kiili Vallavalitsus on 2020-2022 kasutanud teehoiutöödel freesasfalti ca 8243m3.
Muid jäätmeid kasutanud ei ole, sest ei ole olnud vajadust.
Kui tekib vajadus, siis võtame kasutusele ümbertöödeldud ehitusmaterjale.

Parimatega,

Kadre Rumm
teehoiu- ja hankespetsialist
Kiili Vallavalitsus
tel. 679 0263
mob: 5046 443
e-mail: kadre.rumm@kiilivald.ee

Brigitta Uibo
To: aleksander.skolimowski@loksa.ee; linn@loksa.ee
Mon 3/20/2023 12:02 AM

Tere,

Olen Tallinna Tehnikaülikooli magistrant ning kirjutan hetkel lõputööd lammutus- ja ehitusjäätmetest killustiku tootmisest. Lõputööga seoses uurin ka, kas ja kui palju kasutatakse Harjumaal ehituses jäätmeid ja taaskasutatud materjale. Sellega seoses oleksin tänulik, kui oleksite valmis vastama järgmistele küsimustele, et saaksin aimdust jäätmete taaskasutamisest piirkonnas.

- Kas ja kui palju on Loksa linnas aastatel 2020-2023 kasutatud ehitusprojektides ümbertöödeldud/taaskasutatud jäätmeid täitematerjalidena?
- Kas Loksa linn kaalub või plaanib edaspidi võtta varasemast enam ehituses kasutusele ümbertöödeldud ehitusmaterjale?

AS
Aleksander Skolimowski <aleksander.skolimowski@loksa.ee>
To: Brigitta Uibo
Mon 3/20/2023 9:22 AM

Tere!
Jah, on küll. Koguseliselt ei oska öelda, aga täiteks on kasutatud nii freesasfalti teede rekonstrueerimise käigus kui ka purustatud telliseid ja betooni Loksa Konsumi ehitamisel.
Ehk on abi.

Lugupidamisega

Aleksander Skolimowski
linnaarhitekt-ehitusnõunik
aleksander.skolimowski@loksa.ee
6 031 253
+372 565 2900

Loksa Linnavalitsus
Registrikood 75013457
Tallinna tn 45, Loksa linn, 74806
www.loksalinn.ee

Lisa 3. Masinate CAT 336 ja Liebherr 934 CO2 jäätme tekkemahud (A. Sarv, Avesco OÜ esindaja, 31.03.2023)

CAT

Contact name: Ivar Marist
Company: Väo Paas OÜ
Location: Väo, EST

VALUE SUMMARY REPORT DETAILS

	Cat 336-07 (1x New)	Liebherr R 934 LITRONIC LC (1x New)	Liebherr R 938 LITRONIC LC (1x New)
Usage			
Working hours (lifetime)	20,000 hr	20,000 hr	20,000 hr
Ownership period	5 years	5 years	5 years
Ownership costs			
Acquisition type	New	New	New
Transaction price		263,000 €	304,000 €
Resale value		37,571 €	49,884 €
Ownership cost (lifetime)		225,429 €	254,116 €
Operating costs			
Fuel & DEF	573,482 €	624,300 €	626,688 €
Diesel price	1.47 €/l	1.47 €/l	1.47 €/l
DEF price	1 €/l	1 €/l	1 €/l
Fuel consumption (hourly)	19.18 l/hr	20.81 l/hr	20.48 l/hr
Fuel consumption (lifetime)	383,600 l	416,200 l	409,600 l
DEF consumption (hourly)	0.48 l/hr	0.624 l/hr	1.229 l/hr
DEF consumption (lifetime)	9,590 l	12,486 l	24,576 l
Maintenance & repair	258,600 €	259,200 €	285,000 €
Maintenance cost	1.63 €/hr	1.86 €/hr	1.65 €/hr
Repair cost	11.3 €/hr	11.1 €/hr	12.6 €/hr
Misc. operating costs	0 €	0 €	0 €
Operating cost (lifetime)	832,082 €	883,500 €	911,688 €
Sustainability			
CO_2 estimate (lifetime)	1,040 tonne	1,130 tonne	1,110 tonne
TOTAL COST (LIFETIME)		1,108,929 €	1,165,804 €
Cost per hr	Varies by machine	55.45 €/hr	58.29 €/hr

Lisa 4. Kütusearvutaja mudel (Väo Paas OÜ, 20.03.2023)

"Kütusearvutaja" mudel, purustusseadme Keestrack R6 sisendandmed

Kütusekulu B arvutatakse massiühikutest (t) soojusühikuteks (GJ).

B1=B*Qr , GJ			48,972						
B - kütusekulu (t)			1,123						
Qr - alumine küttevääртus (MJ/kg)			43,6						
Sr - väävlisisaldus %			0,09						
P - põletuseadme soojusvõimsus			1,62	MW th					
qi - eriheide			Mi (t/a)	Mpi (g/s)					
PM	100		0,0049	0,1620					
SO2	0,09		0,0020	0,0669		hetkeline SO2=20*P*Sr/Qr			
NO2	100		0,0049	0,1620					
CO	100		0,0049	0,1620					
LOÜ	1,5		0,0001	0,0024					
CO2			3,4842						
raskmetall	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Cr	Ni	V
eriheide	0,03	0,04	10	11	6	6	2	4	2
	0,0000	**0,0000**	**0,0005**	**0,0005**	**0,0003**	**0,0003**	**0,0001**	**0,0002**	**0,0001**
	0,0000		**0,0162**	**0,0178**	**0,0097**	**0,0097**	**0,0032**	**0,0065**	**0,0032**

Saasteainete kogus **Mi=10^{-6}*B1*qi,** (t)	0,0000010	Hetkeline heitkogus **Mpi=10^{-3}*P*qi** (mg/s)
CO2 eriheide **Mc=10^{-3}*B1*qc*Kc**	0,0010000	P - põletusseadme soojusvõimsus
qc - c eriheide (tC/TJ) 19,6	0,02	**Mco2=0,001*B1*Kc*qc*44/12**
Kc - oksüdeerunud C osa 0,99		

"Kütusearvutaja" mudel, sõelaseadme Keestrack C6 sisendandmed

Kütusekulu B arvutatakse massiühikutest (t) soojusühikuteks (GJ).

B1=B*Qr , GJ			9,418						
B - kütusekulu (t)			0,216						
Qr - alumine küttevääртus (MJ/kg)			43,6						
Sr - väävlisisaldus %			0,09						
P - põletuseadme soojusvõimsus			0,41	MW th					
qi - eriheide			Mi (t/a)	Mpi (g/s)					
PM	100		0,0009	0,0410					
SO2	0,09		0,0004	0,0169		hetkeline SO2=20*P*Sr/Qr			
NO2	100		0,0009	0,0410					
CO	100		0,0009	0,0410					
LOÜ	1,5		0,0000	0,0006					
CO2			0,6700						
raskmetall	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn	As	Cr	Ni	V
eriheide	0,03	0,04	10	11	6	6	2	4	2
	0,0000	**0,0000**	**0,0001**	**0,0001**	**0,0001**	**0,0001**	**0,0000**	**0,0000**	**0,0000**
	0,0000		**0,0041**	**0,0045**	**0,0025**	**0,0025**	**0,0008**	**0,0016**	**0,0008**

Saasteainete kogus **Mi=10^{-6}*B1*qi,** (t)	0,0000010	Hetkeline heitkogus **Mpi=10^{-3}*P*qi** (mg/s)
CO2 eriheide **Mc=10^{-3}*B1*qc*Kc**	0,0010000	P - põletusseadme soojusvõimsus
qc - c eriheide (tC/TJ) 19,6	0,02	**Mco2=0,001*B1*Kc*qc*44/12**
Kc - oksüdeerunud C osa 0,99		

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Brigitta Uibo

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
„Ressursitõhus killustiku tootmine ehitus- ja lammutusjäätmetest ettevõtte Väo Paas OÜ näitel,

mille juhendajad on Karin Robam ja Tony Hand

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

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

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

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

30.05.2023