EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Maaehituse ja veemajanduse õppetool

Laura Laisk

RINGLUSSEVÕETUD BETOONI TAASKASUTUS

RECYCLED RETURNED CONCRETE

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: dotsent Mihkel Kiviste, PhD

Tartu 2020

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Laura Laisk		Õppekava: Maaehitus (382)	
Pealkiri: Ringlussevõetud betooni taaskasutus			
Lehekülgi: 76	Jooniseid: 28	Tabeleid: 7	Lisasid: 6
Osakond/õppetool: ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Juhendaja: Kaitsmiskoht ja aasta:		Maaehituse osakond Tsiviilehitus T220 Mihkel Kiviste (PhD) Tartu, 2020	

Käesolevas magistritöös uuriti tagastatud vedela betooni taaskasutamist uue betoonisegu koostamisel. Töö annab ülevaate taaskasutamisest nii Eestis kui ka mujal maailmas. Üha rohkem on üle maailma hakatud pooldama ja tegelema taaskasutamisega, kuna toorainetena kasutatavaid loodusvarasid ei jätku lõpmatuseni. Betoon on maailmas ka enim kasutatav ehitusmaterjal ja enimkasutatud ressurss vee järel. Tagastatud betoon on segu, mis tuuakse betooniveokitega tehasesse tagasi ja nimetatakse üleliigseks materjaliks. Töö eesmärk on uurida betoonisegusid, mis sisaldavad tagastatud betooni.

Magistritöös uuriti erinevaid betoonisegusid, mis sisaldasid 0%, 20%, 40% ja 60% taaskasutatavat seisvat betooni. Uuriti betoonisegude omadusi, nagu survetugevus, töödeldavus, lisatud vee mõju, õhusisaldust ning tsemendi tardumisaega. Kivistunud betooni puhul võrreldi survetugevust valmis segatud ja aeglaselt tarduvas betoonis, mis on segatud uuesti ringlusse võetud betooniga.

Katseteks kasutati kahte erineva tugevusklassiga betooni ning selgus, et teatud kogus betoonisegust on võimalik asendada taaskasutatava betooniga. Paremad tulemused saadi betooni tugevusklassiga C35/45, kus vajaliku tugevuse saavutasid kõik katsekehad. Tund aega seisnud taaskasutatav betoon (segus 60%) oli segatud värske betooniga (segus 40%) ning peale 28 päeva saadi keskmiseks survetugevuseks 48,71 MPa. Kaks tundi seisnud taaskasutatav betoon (segus 40%) segati värske betooniga (segus 60%) ning keskmiseks survetugevuseks saadi 49,08 MPa. Kolm tundi seisnud taaskasutatav betoon (segus 20%) segati värske betooniga (segus 80%) ning keskmiseks survetugevuseks saadi 50,79 MPa.

Tugevama tugevusega (C50/60) betoonil tuleb kasutada väiksem kogus taaskasutatavat betoonisegu. Tund aega seisnud taaskasutatav betoon (segus 60%) oli segatud värske betooniga (segus 40%) ning peale 28 päeva saadi keskmiseks survetugevuseks 57,76 MPa. Kaks tundi seisnud taaskasutatav betoon (segus 40%) segati värske betooniga (segus 60%) ning keskmiseks survetugevuseks saadi 55,14 MPa. Kolm tundi seisnud taaskasutatav betoon (segus 20%) segati värske betooniga (segus 80%) ning keskmiseks survetugevuseks saadi 61,47 MPa.

Katsete põhjal saab järeldada, et kolm tundi seisnud betooni on võimalik kasutada kogu tema olekus uuesti värske betooni koostamisel. Asendades 20% värsket betooni taaskasutatava betooniga saab vajaliku survetugevuse kätte.

Edaspidi tuleks täiendavalt uurida, milline on taaskasutatava betoonisegu külmakindlus.

Märksõnad: taaskasutus, betoon, keskkonnamõjud, ressursid, transport

Estonian University of Life Sciences

Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

Abstract of Master's

Author: Laura Laisk

Curriculum: Rural Building (382)

Title: Recycled returned concrete

Pages: 76	Figures: 28	Tables: 7	Appendixes: 6

Chair:	Chair of Rural Building and Water Management
Field of research and (CERC S) code:	Civil engineering T220
Supervisors:	Mihkel Kiviste (PhD)
Place and date:	Tartu, 2020

In this master's thesis, the reuse of returned liquid concrete in the making of a new concrete mix was investigated. The work provides an overview of reuse both in Estonia and elsewhere in the world. There is growing support around the world and deal with recovery because resources do not last indefinitely. Concrete is also the most used building material and resource after water in the world. Returned concrete is a mixture that is brought back to the factory by concrete trucks and is called surplus material. The aim of the work is to study concrete mixtures that contain returned concrete.

In the master's thesis, different concrete mixtures were studied, which contained 0%, 20%, 40% and 60% recyclable standing concrete. In the case of hardened concrete, the compressive strength was compared in ready-mixed and slow-setting concrete mixed with recycled concrete. The concrete mixtures were studied with Abrams cone, added water, air content in the concrete, compressive strength and setting time of the cement.

Two different strength classes of concrete were used for the experiments and it was found that a certain amount of concrete mix can be replaced by recycled concrete. Better results were obtained with a lower strength class (C35/45), where the required strength was achieved by all test specimens. The recyclable concrete (in the mixture 60%) that had been standing for one hour, was mixed with fresh concrete (in the mixture 40%) and after 28 days the average compressive strength was 48,71 MPa. After two hours the recycled concrete (in the mixture 40%) was mixed with fresh concrete (in the mixture 60%) and the

average compressive strength was 49,08 MPa. After three hours the recycled concrete (in the mixture 20%) was mixed with fresh concrete (in the mixture 80%) and the average compressive strength was 50,79 MPa. For stronger strength (C50/60) concrete, a smaller amount of reusable concrete mix must be used. The recycled concrete (60% in the mix) that had been standing for one hour was mixed with fresh concrete (40% in the mix) and after 28 days the average compressive strength was 57.76 MPa. After two hours, the recycled concrete (in the mixture 40%) was mixed with fresh concrete (in the mixture 60%) and the average compressive strength was 55,14 MPa. After three hours the recycled concrete (in the mixture 20%) was mixed with fresh concrete (in the mixture 80%) and the average compressive strength was 61,47 MPa.

From the tests, it can be concluded that the concrete, which has been standing for three hours, can be used in its entire state in the preparation of fresh concrete. By replacing 20% of fresh concrete with recycled concrete, the required compressive strength is obtained.

The frost resistance of the recycled concrete mix should be further investigated in the future.

Keywords: recycling, concrete, environmental effects, resource, transport

SISUKORD

SISSEJUHATUS 8
MÄÄRATLUSED 10
1. ÜLEVAADE BETOONI JA TSEMENDI TOOTMISEST, EHITUS- JA LAMMUTUSJÄÄTMETEST NING BETOONI JA JÄÄTMETE TAASKASUTAMISEST 11
1.1. Betooni ning ehitus- ja lammutusjäätmete kogused maailmas 11
1.2. Betoon ja selle tootmisega tekkivad probleemid 13
1.3. Tsemendi tootmine ning sellega kaasnev energiatarbimine 15
1.4. Materjalide ringlussevõtu algus ja taaskasutamine erinevates riikides 17
1.5. Betooni taaskasutamisele võtmine ja selle olulisus 21
1.6. Transpordi kiirus betooni vedamisel ja selle meetodid 24
2. TEHNOLOOGIA VEDELA BETOONI TAASKASUTAMISEKS, KATSED TAASKASUTATAVA BETOONIGA JA TSEMENDI TARDUMISAEG 27
2.1. Uus tehnoloogia taaskasutatava betooni graanuliteks muutmisel, selle meetodid ja saadud tulemused 27
2.2. Ringlussevõetud täitematerjali kasutamine betoonisegus 31
2.3. Ringlussevõetud täitematerjali karboniseerumiskindlus 32
2.4. Ringlussevõetud betooni täitematerjali omadused erinevatel kõvenemistingimustel 34
2.5. Värskete betoonjäätmete taaskasutamise võimalused 35
2.6. Tsemendi tardumisaja määramine 36
3. KATSED TAASKASUTATUD VEDELA BETOONIGA 39
3.1. Materjal ja metoodika 39
3.2. Tsemendi tardumisaja määramine 46
3.3. Katse käik 46
3.4. Katse tulemused 48
3.5. Survetugevusandmed 53

KOKKUVÕTE 61
KASUTATUD KIRJANDUS 64
Lisa 1. Laborikatsete plaan (autori koostatud) 69
Lisa 2. Jääkbetooni sisaldava kivistunud betooni katsetamine TMB Elemendi laboris, katse nr. 1 (autori koostatud) 70
Lisa 3. Jääkbetooni sisaldava kivistunud betooni katsetamine TMB Elemendi laboris, katse nr. 2 (autori koostatud) 71
Lisa 4. Katsed Vicat´ seadmega. 72
Lisa 5. Esimese katse 28-päevaste kuubikute purunemispildid, betoon C35/45 73
Lisa 6. Teise katse 28-päevaste kuubikute purunemispildid, betoon C50/60 74

SISSEJUHATUS

Ehitus- ja lammutusjäätmed on probleemiks keskkonnale ning iga aastaga jäätmete hulk suureneb. Seetõttu on oluline võtta materjale ringlusesse ja taaskasutusse, et hoida kokku kulusid ja vähendada keskkonnamõjusid. Eestis on kahjuks taaskasutamise määr veel suhteliselt madal, kuna kujunenud on arusaam, et kergem ja odavam on toota ja ehitada uuest materjalist.

Käesolevas magistritöös on välja toodud betooni jäätmete suurusjärgud ja selle taaskasutus. Suurem osa taaskasutatud betoonist läheb uute materjalide tootmise asemel täiteks kõnniteede ja maanteede aluspinnasesse. Säästmaks keskkonda on oluline teada, kuidas saab betooni taaskasutada ning millised on selleks kõige tõhusamad ja keskkonnasõbralikumad meetodid.

Materjali transportimisega tuleb suuremal või väiksemal määral segu tagasi tehasesse. Tegemist on valmisbetooniga, mis tavaliselt viiakse prügilasse. Sellega seoses on oluline kasutusele võtta meetmed, mis võimaldaksid betooni kivistunud või vedelal kujul taaskasutada. Kivistunud betooni kasutatakse täitematerjalina või tehakse killustikuks, et seda saaks kasutada uues betoonis. Vedelal kujul tagasitulevat betooni on võimalik kasutada järgmise betoonisegu koostamisel, millel põhineb ka käesolev magistritöö. Lisaks eelnevatele variantidele on betoonisegu komponendid võimalik eraldada üksteisest pesemise teel või kasutada segu uute toodete valmistamiseks.

Käesolev töö käsitleb tagastatud betooni taaskasutamist täies mahus uue betoonisegu koostamisel. Teema on aktuaalne keskkonnast saadud ressursside üha suureneva kasutamise tõttu, mistõttu on hakatud varasemast aina rohkem tähelepanu pöörama taaskasutamisele. Ehituses on betoon väga olulisel kohal ja suures mahus kasutatav materjal. Antud punktid on peamised teema valiku põhjused.

Töös püstitatud hüpoteesid:

- Peale teatud aja möödumist on võimalik seisnud segu uuesti kasutada värske betooni segamisel, seejuures on tagatud vajaminev survetugevus.
- Taaskasutatud betoon vähendab uute (looduslike) materjalide kasutamist betoonis.

Töö teoreetiline osa on suunatud taaskasutamisele ning selle olulisusele antud sajandil. Esimeses peatükis antakse ülevaade ehitus- ja lammutusjäätmete ning betoonisegu valmistamise suurustest. Lisaks tuuakse välja probleemid, mis kaasnevad tsemendi ja betooni tootmisega. Teine osa peatükist räägib ringlussevõtu algusest ning erinevate jäätmete ja betooni taaskasutamisest riikides. Pööratakse tähelepanu betooni transpordi kiiruse olulisusele ja õigete transpordivahendite valikutele. Teine peatükk annab ülevaate taaskasutatava betooniga tehtud katsetest ja uuringutest ning kirjeldab uut granuleerimise tehnoloogiat, mis võimaldab betoonil muutuda keemiliste ainete kaasabil püsivaks täitematerjaliks. Lisaks tuuakse välja tsemendi tardumisaja määramise tingimused ning kui oluline on tehastel teada tardumisaja algust, meetodeid ja kuidas seda kiirendada. Ülevaade antakse kõige sobivamast välistemperatuurist, et kiirendada tardumist ning meetoditest, mida kasutada talvistes tingimustes.

Empiirilise osa alguses tuuakse välja materjalid ja meetodid katsete sooritamiseks. Katsekehade valmistamisel kasutatakse taaskasutatavat betooni segatult värske betooniga, millest valmistatud kuubikutel mõõdetakse survetugevust. Katsed viidi läbi OÜ TMB Elemendis ja kasutati nende tehase betoonisegude retsepte. Tardumisaja mõõtmise katse viidi läbi Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboris ning võrdlevad andmed saadi OÜ TMB Elemendi tehaselt.

Autor tänab juhendajat Mihkel Kivistet töö teemaga kaasatulemise ja juhendamise eest. Lisaks tänab autor OÜ TMB Elementi, kes tagas kõigi katsete läbiviimiseks materjali ja võimaldas need läbi viia ettevõtte oma laboris.

MÄÄRATLUSED

Betoonisegu – Valmissegatud betoon, mis on veel sellises olekus, et seda on võimalik valitud meetodil tihendada. [EVS-EN 206-1:2002]

Kahetunnised katsekehad – Betoonisegu, mis sisaldab kaks tund seisnud taaskasutatavat segu. Sisaldab 40% taaskasutatavat segu ja 60% värsket betoonisegu.

Kolmetunnised katsekehad – Betoonisegu, mis sisaldab kolm tund seisnud taaskasutatavat segu. Sisaldab 20% taaskasutatavat segu ja 80% värsket betoonisegu.

Nulltunnised katsekehad – Betoonist katsekehad, mis sisaldavad looduslikku materjali ja betoonist segu on tehtud värske

Ringlussevõtt – Jäätmete taaskasutamise moodus, kus materjali kasutatakse tootmises esialgsel või muul otstarbel.

Taaskasutamine – Varem kasutusel olnud materjali või selle jäägi uuesti kasutamine.

Taaskasutatav betoon – Ehitusplatsilt tagasitulev/järelejäänud vedel betoon.

Tagastatud betoon – Kasutamata betoon, mis tuuakse betooniveokitega tehasesse tagasi, tegemist on üleliigse materjaliga.

Ühetunnised katsekehad – Betoonisegu, mis sisaldab üks tund seisnud taaskasutatavat segu. Sisaldab 60% taaskasutatavat segu ja 40% värsket betoonisegu.

Ümbertöötlemine – Algsest materjalis uue tegemine või selle kasutamine uuel otstarbel.

1. ÜLEVAADE BETOONI JA TSEMENDI TOOTMISEST, EHITUS- JA LAMMUTUSJÄÄTMETEST NING BETOONI JA JÄÄTMETE TAASKASUTAMISEST

1.1. Betooni ning ehitus- ja lammutusjäätmete kogused maailmas

Üks nõutumaid ja enim tarbitavaid materjale ehituses on betoon. Selle koostis on kõva ning keemiliselt vastupidav. Segu koosneb erinevat tüüpi liivast ja kruusast, mida ühendab omavahel tsement ja vesi. (Babor et al. 2009)

Maailmas toodetakse igal aastal 20-25 miljardit tonni betooni (Ferrari et al. 2014). 2006. aastal tarbiti kogu maailmas 21-31 miljardit tonni betooni, selle koguse tootmiseks läks vaja 2,54 miljardit tonni tsementi. 1950. aastal tarbiti maailmas kõigest 2-2,5 miljardit tonni betooni ning tsementi kulus 200 miljonit tonni. Järgnevad 20-30 aastat on oodata nõudluse kahekordistumist (Kalinowska-Wichrowska 2020). Aasias, Lõuna-Ameerikas ja Aafrikas on tsemendi ja betooni tarbimine 4,8 miljardit tonni aastas ning numbrid üha kasvavad (Ferrari et al. 2014). Hiina ja India toodavad ning tarbivad 50% maailma betoonist (*The Cement Sustainability* … 2009).

Ehitus- ja lammutusjäätmed oma järjest suurenevate mahtudega on üheks probleemiks keskkonnale. Ehitussektoris ei ole taaskasutamine uus tegevus. Sellega hakati tegelema juba Rooma ajal ning on tänapäeval jõudsalt edasi arenenud. Peale Teist maailmasõda oli Euroopas saadaval suurtes kogustes taaskasutatavat killustikku, sest uute materjalide tootmiseks ei jätkunud enam ressursse. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Tahkeid jäätmeid tekib erinevates valdkondades (näiteks kaubandus, majapidamised, ehitustööstused ja muud tööstused) aastas 7-10 miljardit tonni. (Turkyilmaz et al. 2019) Nendest jäätmetest ladustatakse 85% koheselt prügilatesse, minimaalne kogus läheb taaskasutusse ja ringlussevõtuks. Suur osa tööstusjäätmeid tekib ehitussektoris, mis liigitub ehitus- ja lammutusjäätmeteks. Ehitustööstuse hulka kuulub ülemaailmselt 13-30%

tekkivatest jäätmetest. Ehitus- ja lammutusjäätmete osakaal on igal aastal ning riiki või kontinenti võrreldes erinev. 2014. aastal saadi Hongkongis 23% ehitus- ja lammutusjäätmeid ning Jaapanis osutus jäätmete suuruseks 77 miljonit tonni. 2010. aastal oli Araabia Ühendemiraatidel jäätmete hulk 80% ning Singapuris 2011. aastal 59%. Iga aastaga suureneb eluasemete nõudlus, millega koos kasvab ka jäätmete hulk. Tavaliselt viiakse hoonete lammutamise, remondi ja ehitamisega tekkivad jäätmed prügilatesse. Prügilasse viimisega kaasnevad transpordikulud ja ladustamise kulud. (Turkyilmaz et al. 2019)

Eestis käideldavate ehitus- ja lammutusjäätmete kogused on suurenenud 1,7 miljonilt tonnilt 2011. aastal 2,7 miljoni tonnini 2017. aastal. Vaheladustatud jäätmete suurusjärk jääb 400 - 630 tuhande tonnini. 2017. aasta vaheladustati betooni ning tema gruppi kuuluvaid jäätmeid (tellised, plaadid ja keraamikatooted) 112 729,7 tonni. (Taaskasutamist või kõrvaldamist … 2018) Vaheladustatud jäätmete kogumahuks on 24 miljonit tonni. Maavarade kaevandamisest ning maavarade füüsikalisest ja keemilisest töötlemisest tekib 95,5% jäätmetest ning 1,8% kuulub ehitus ja lammutusjäätmetele. (Jäätmete vaheladustamise ülevaade … 2018)

Ehitus- ja lammutusjäätmete kogus ja taaskasutamise määr Eestis (aastatel 2010-2016) (Leevik 2017):

- 2010.a 659 tuhat tonni, millest taaskasutati 67%;
- 2011.a 859 tuhat tonni, millest taaskasutati 72%;
- 2012.a 799 tuhat tonni, millest taaskasutati 70%;
- 2013.a 999 tuhat tonni, millest taaskasutati 85%;
- 2014.a 794 tuhat tonni, millest taaskasutati 85%;
- 2015.a 933 tuhat tonni, millest taaskasutati 88%;
- 2016.a 869 tuhat tonni, millest taaskasutati 86%.

Viimasel kümnendil on Aasia ehitustööstuste areng viinud suure hulga ehitus- ja lammutusjäätmete tekkimiseni. Alates 1990. aastatest on ehitustegevus hoogustunud Kasahstanis. Kasahstanis on üle 4000 prügila, 10% neist töötavad seaduslikult. Antud riigis on madal jäätmekäitlus ja taaskasutus, mida on hakatud muutma ja sisse võtma välist abi probleemi parandamiseks, kuna riigisisesed teadmised on vähesed. Õigusliku punkti juures

puuduvad riigil ka määrused, mis paneks liigsete prügilate tekkimist vähendama. (Turkyilmaz et al. 2019)

Ameerika Ühendriikides moodustavad ehitus- ja lammutusjäätmed 25% jäätmete kogumahust, millest 70% on betoon. Ehitustöödega saadakse 21,7 miljonit tonni ja lammutamisega 353,6 miljonit tonni jäätmeid. Taaskasutusse võetakse sellest 140 miljonit tonni betooni. (Leblanc 2017) Betooni ringlussevõtt on kasutusele võetud ka Hollandis, Jaapanis, Belgias ja ka Saksamaal (*The Cement Sustainability* … 2009).

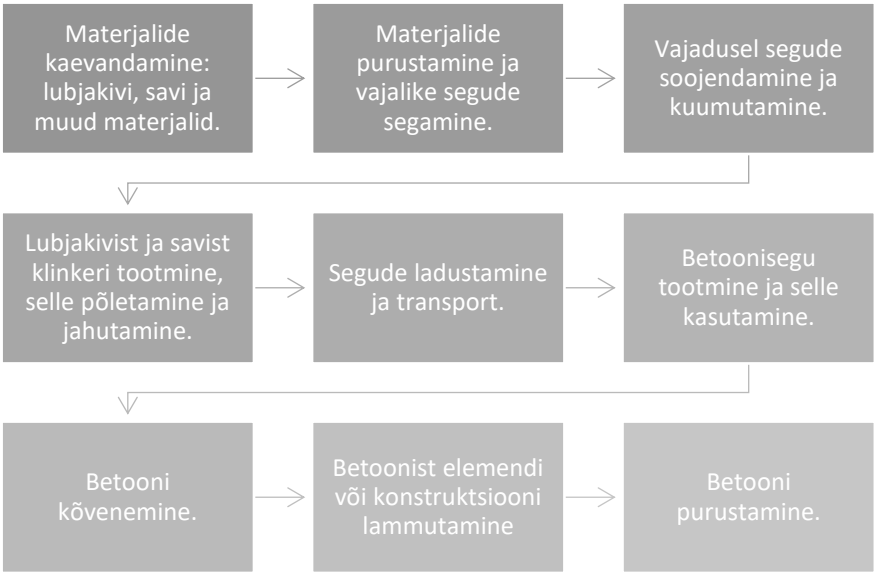
2010. aastal selgus Euroopa Liitu kuuluvate 29 riigi andmetest, et 60% jäätmetest saadakse ehitus- ja lammutustöödega ning kaevandamisega (Jäätmed-probleem … 2019). 2016. aastal tekkis Euroopas ehitus – ja lammutusjäätmeid 25-30% (Turkyilmaz et al. 2019), mille suurusjärk on 850 miljonit tonni (Sforza 2018). Jäätmete vähendamiseks loodi eesmärk liikuda taaskasutusühiskonna poole. Selleks sätestati Euroopa Liidus eesmärk, et 2020. aastaks peavad Euroopa Liitu kuuluvad riigid aastas ringlusse võtma vähemalt 70% mitteohtlikke ehitus- ja lammutusjäätmeid. (*Construction and Demolition* … 2019) Antud tegevus hoogustab materjalide taaskasutamist, mis vähendaks prügilatesse ladustamist ja ebaseaduslikke jäätmevedusid (Jäätmed-probleem … 2019).

1.2. Betoon ja selle tootmisega tekkivad probleemid

Betoonisegu saamiseks segatakse peen täitematerjal, jäme-täitematerjal, tsement, vesi ja vajadusel erinevad lisandid ühtseks massiks. Lisanditega saab reguleerida kivistumisaega ja segu plastsust. Tsementi veega segades muutub tooraine geelitaoliseks aineks, mis täidab tühimikud betoonis olevate täitematerjalide vahel. Seejärel algab hüdrauliline protsess ehk betooni tardumine ja kivinemine. Kogu betooni omadused tulenevad segusse lisatavatest ainetest ja nende tüüpidest. (Babor et al. 2009)

Betooni valmistamiseks kasutatakse erinevaid materjale, nende soetamine ja lõpp-produkti saamine on mitme-etapiline (joonis 1). Betooni tootmiseks läheb vaja toorainet, mille allikad on tehasest kaugemal, seega on vaja kasutada transpordienergiat. (Babor et al. 2009) Transport tekitab probleeme keskkonnale, seoses tolmu eraldumise ja liigse lärmi

tekitamisega. Sellegipoolest on kaevandamine ainus võimalus saada lubjakivi, savi, peen- ja jämematerjali, mis tuleb purustada või segada. Erinevad segud vajavad erinevat valmistusviisi. Nende soojendamise või kuumutamise käigus paisatakse õhku CO_2 produkte, 60% sellest pärineb lubjakivist ja 40% kütusest. Peale lubjakivi ja savi kuumutamist tekib klinker, mille maha jahutamiseks kulub omakorda energiat. (Greenspec 2020)



Joonis 1. Betooni valmistamise etapid ning selle käigus toimuvad protsessid (Greenspec 2020).

Nii tsement kui ka betoon tekitavad õhusaasteaineid. Silmale kõige nähtavamaks saasteks on tolm, mis tekib nii tsemendi kui ka betooni tootmisel. Tsemendi tootmisel on parim viis tolmuga toime tulemiseks osakeste kogumine ja nende taaskasutamine. Tolmu kogutakse osaliselt mehaaniliste kollektorite, elektriliste seadmete ja riidest filtritega, kuid siiski on tolmu taaskasutamine suhteliselt keeruline. Betooni tootmisel on suurematekstolmu tekitavateks allikateks täitematerjalide kaevandamine, materjalide teisaldamine ning ladustamine. (Babor et al. 2009)

Teine keskkonnaprobleem materjalide tootmisel on veereostus. Seadmete puhastamisega kaasnev pesuvesi juhitakse ümbruses olevatesse tiikidesse, kus toimub tahkete ainete settimine. Tagastatud betoon jõuab settetiikidesse, et hiljem täitematerjal välja pesta ja seda taaskasutada. (Babor et al. 2009)

Betoonisegudes on hakatud kasutama traditsiooniliste täitematerjalide asemel teisi alternatiive. Ümbertöödeldud ja purustatud betooni saab kasutada uue betooni täitematerjalina, mille käigus kasvab kõige energiamahukam betooni komponent ehk tsemendi kogus. (Babor et al. 2009)

1.3. Tsemendi tootmine ning sellega kaasnev energiatarbimine

Teadaolevalt kasutasid assüürlased ja babüloonlased betooni sideainena savi või tsementi. Egiptuses kasutati lupja või kipstsementi. Moodsamat betoonisegu valmistati Suurbritannias inglise leiutajate poolt 1824. aastal, kus materjalid moodustasid peale veega segunemist tarduva ja kivineva massi. Praegu tuntakse seda portlandtsemendi nime all, mis on jäänud peamiselt kasutatavaks tsemendiks tänapäeval. (Babor et al. 2009)

Tsement on üheks oluliseks koostisosaks betooni valmistamisel, kuid selle tootmine tekitab suuri keskkonnaprobleeme energiatarbimises. Tegemist on ühe suurima energia kasutajaga, ühe tonni tsemendi tootmiseks kulub 1758 kWh energiat. Enamus energiast kulub pöörlevate tsemendiahjude töötamiseks. (Babor et al. 2009)

Tsemendi segu kõige tähtsamateks koostisosadeks on kaltsium ja räni. Kaltsiumiks võetakse tavaliselt lubjakivi, merglit või kriiti ning räniks kasutatakse savi, liiva või põlevkivi. Spetsiifilisemate omaduste andmiseks lisatakse tsemendi segule alumiinium- ja rauamaaki, mida saab asendada ka ümbertöödeldud metallidega. (Babor et al. 2009) Vajaminevad toorained jahvatatakse peeneks ja segatakse omavahel kokku. Seejärel pannakse kogu segu pöörlevasse tsemendiahju. Tsemendiahi on pikk silindrilise kujuga ahi, mis pöörleb aeglaselt ja kus on kasutusel kõrged temperatuurid. Ahjus toimuvad mitmed keemilised ja füüsikalised muutused ning protsessid, mis määravad tsemendi omadused ja klassid. (Babor et al. 2009)

Tsemendi-ahjus toimuvad protsessid (Babor et al. 2009):

- lubjakivi (algselt kaltsiumkarbonaat) kaltsineerimine lubjaks (kaltsiumoksiidiks) ja süsinikdioksiidiks, mis toimub 900°C juures;

- kaltsiumoksiidi ja silikaatide omavaheline sidumine, millest saadakse dikaltsiumi ja trikaltsiumi silikaadid;
- väikestes kogustes saadakse trikaltsiumaluminaat ja tetrakaltsium.

Tänapäeva kuivtöötlemisahjud on võrreldes vanasti kasutusel olnud märgprotsessidest energiatõhusamad, sest enam ei kulu energiat niiskuse eraldamisele. Kuivtöötlemisahjudes kasutatakse koostisosade soojendamiseks eelsoojendit, mis aitab vähendada kuni 50% energia tarbimisest. (Babor et al. 2009)

Tsemendi tootmisel tekib kaks erinevat süsinikdioksiidiheite allikat (Babor et al. 2009), mis põhjustavad 4-5 protsenti süsinikdioksiidi koguheitest (Greenspec 2020). Neist suurimaks osutub fossiilsete kütuste põletamine pöördahju käitlemisel ja 3/4 tonni süsinikdioksiidi ühe tonni tsemendi kohta. Lubjakivi lubjaks kaltsineerimine on teine protsess, mis tekitab õhku liigset CO_2. Mõlemad allikad eraldavad atmosfääri ühe tsemendi tonni kohta 1,25 tonni CO_2. Kogu maailmas põhjustab tsemendi tootmine lausa $1{,}6 \cdot 10^9$ tonni CO_2 heitmeid. Heitmete vähendamiseks tuleb tähelepanu pöörata taastuvate kütuste ja tsemendiahjude energiatõhususe parandamisele, mida on hakatud viimaste aastakümnete jooksul tegema. Alternatiivina on võimalik minna üle maagaasile ja põllumajandusjäätmetele. (Babor et al. 2009)

2006. aastal toodeti maailmas kokku 2,54 miljardit tonni tsementi, suurimateks tootjateks osutusid Aasia riigid (*The Cement Sustainability* … 2009):

- USA 3,9%;
- ülejäänud Ameerika 13%;
- sõltumatute riikide ühendus 3,4%;
- Euroopa Liit 10,6%;
- ülejäänud Euroopa 0,2%;
- Muu 2,3%
- Aasia 69,4%;
    - Hiina 47,3%;
    - India 6,2%;
    - Jaapan 2,7%;
    - Ülejäänud Aasia 13,2%.

Elektrijaamad toodavad aastas miljoneid tonne lendtuhka, mis ladustatakse otse prügilatesse. Tegu on ainega, mida saab kasutada portlandtsemendi asendajana, parandades sellega ka betooni tugevust. Lendtuhk on võetud kasutusele telliste, plokkide ja sillutiste koostisainena. USA-s kasutati 1929. aastal Hooveri tammi ehitusel lendtuhka, mille tulemusel selgus, et sellega saab vähem tsementi kasutada. Segades materjal lubja ja veega moodustub ühend, mis sarnaneb portlandtsemendiga. Omalaadne lendtuha osakeste kuju vähendab segu hõõrdumist, suurendab konsistentsi ja liikuvust, mistõttu on võimalik segu pumpamispikkust pikendada. Kasutades lendtuhka kivisöeküttel töötavatest elektrijaamadest aitab see lahendada liigsete tahkete jäätmete tekke ja suure energiatarbimise probleeme, 15-35% tsemendist võib asendada lendtuhaga. Lendtuhka kasutatakse Euroopas autoklaavitud kärgbetoonplokkide tootmisel. (Babor et al. 2009)

1.4. Materjalide ringlussevõtu algus ja taaskasutamine erinevates riikides

Erinevate materjalide ringlussevõtuga hakati tegelema 400 aastat eKr, selle tõestuseks on erinevad arheoloogilised leiud. Näiteks Bütsantsi ajast pärinev klaas võeti ringlusesse Sagalassose linnas, tänapäeva Türgis. Roomlased kasutasid pronksmünte, mille töötlemisega saadi kujukesed, mis olid kordades väärtuslikumad kui algne materjal. Sõjaaegadel sulatati metalli, millest tehti ehteid ja münte. Enne tööstusrevolutsiooni kasutati Suurbritannias põlengute käigus tekkivat tolmu ja tuhka, mis läks täitematerjaliks telliste valmistamisel. Ringlussevõtt aeglustus 1940.-1950. aastatel, kuna jäätmete prügilatesse ladustamine muutus kordades odavamaks. Keskkonnateadlikkus suurenes 1960. aastatest alates ja sellega muutus taaskasutamine populaarsemaks ning suuremaks. (*History of recycling* 2013)

2018 aasta seisuga võetakse Saksamaal ringlusesse 66,1% jäätmetest. Selleks on välja töötatud kuue kasti sorteerimissüsteem, mis on eristatavad värvide järgi (must tavajäätmetele, sinine paberile, kollane plastikule, valge klaasile, roheline värvilisele klaasile ning pruun kompostiks) ning sorteerimisega tegelevad inimesed ise. 2018 aasta seisuga võtab Wales taaskasutusse 63,8% kõikidest jäätmetest ja kõrval asuv riik Inglismaa

42,8%. 2011. aastal lõpetas Wales kilekottide jagamise ning nende kasutamine vähenes 70%. Waleses on seadusega kehtestatud jäätmete ringlussevõtt, mistõttu on taaskasutamise protsent küllaltki suur. Singapuri taaskasutamise suuruseks 2018 aastal on 61%, mis on tekkinud tänu mitteametlikele ringlussevõtjatele. Teadaolevalt koguti 2016. aastal 20% taaskasutatavat materjali, kuid riiklikud ettevõtted kogusid sellel ajal ainult 2%. Lõuna - Koreas on samuti toimunud suured arengud ringlussevõtu suunas, 59% jäätmetest võetakse 2018 aastal uuesti kasutusse. Suured probleemid olid Lõuna-Koreas just toidujäätmete osas, mis ladustati prügilatesse suurtes kogustes, selleks võttis riik kasutusele biolagunevad prügikastid. Hiina Vabariigis on hakatud suurendama taaskasutamise teadlikkust ja 2018. aastal suudetakse 58% jäätmetest ringlusesse võtta. 2018. aastal taaskasutas Holland 56,6% jäätmetest. Suur edasiminek on toimunud plastiku taaskasutamise osas. Eraldi ettevõte on loodud paberi töötlemiseks, mida kasutatakse isolatsioonimaterjalina. Austria taaskasutuselevõtu osa on 2018. aastal 55,9%. Riigi tänavatelt on keeruline leida prügikaste ning see tuleneb peamiselt valitsuse algatusest, kus inimesed peavad kasutama korduvkasutatavaid pakendeid. Viinis asub kolm jäätmepõletusega tegelevat tehast, kus põletatakse jäätmeid, mida ei saa ringlusesse võtta. Viinist eemal asuv Pfaffenau jäätmejaam suudab pakkuda energiat 50 000 kodu kütmiseks ja varustab 25 000 kodu elektriga. Sloveenia on 2 miljoni elanikuga riik, kuid taaskasutusse võtab 53,9% jäätmetest 2018. aastal. Belgia on Euroopa riikidega võrreldes ringlussevõtu suurimaid riike, kus võetakse 2018. aastaks taaskasutusse 53,5% jäätmetest. 2016. aastal võttis Belgia taaskasutusse 10 miljonit lambipirni, millest toodeti uut elektroonikat. Šveitsi ringlussevõtt hoogustus 1990. aastal, kui kehtestati põhimõte, et saastaja maksab, 52,7% jäätmetest võetakse riigis 2018. aastal uuesti kasutusse. Põhja-Itaalias on ringlussevõtt suurelt edasi arenenud. 2017. aastal võttis Mantua linn 80% jäätmetest ringlusesse, seevastu Lõuna-Itaalias Catania linnas 2017. aastal 9,34%. Kogu Itaalia riik võtab 2018. aastal taaskasutusse 52,6% jäätmeid. 2018 aasta seisuga võetakse Luksemburigs ringlusesse 48,3% jäätmeid, Rootsis 48,1%, Taanis 46,3% ja Šotimaal 44,2%. (*Recycling* … 2019) Eestis on jäätmete arv aastatega suurenenud, 2000. aastal oli jäätmete kogumass 11,616 miljonit tonni, millest 13% võeti taaskasutusse. 2018. aastal saadi Eestis 23,517 miljoni tonnini jäätmeid, millest taaskasutati 41%. (Jäätmete ladestamine ja taaskasutus 2018)

Paljud riigid ei tegele taaskasutamise ja ringlussevõtuga või teevad seda vähesel määral. Andorra on riik, kus ei tegeleta taaskasutamise või ringlussevõtuga, kuid sorteeritakse eraldi paber, alumiinium ja plastik. Aserbaidžaanis on kasutusel mitmed loata prügilad. 2015. aastal avati Bakuus jäätmete sorteerimiseks ja nende põletamiseks tehas, kuid taaskasutusse ei võeta ühtegi materjali. Aafrikas Senegali ranniku lähistes Cabo saarel tekib suur osa jäätmeid turismindusega seonduvalt ning randa on sõudnud jäätmeid vähemalt kahekümne viiest teisest riigist. Makedoonia ja Ukraina on samuti riigid, kes ei võta jäätmeid uuesti kasutusse, vaid ladustavad prügilatesse. (*Recycling* … 2019)

Probleemid, mis tekivad seoses jäätmetega leiavad suuremal või väiksemal määral aset kogu maailmas. Väiksemates piirkondades võib olla ringlussevõtuks vähe materjali kui arengumaades. Kunagistes sõjapiirkondades on palju sortimata lammutusjäätmeid, kuid teadmised taaskasutamiseks või ringlussevõtuks on vähesed. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Ehitusobjektil jäätmemajandusega tegelemine saab alguse eelarve paika panemisel ja meeskonna valmisolekust sellega tegeleda. Ehitus- ja lammutusjäätmetega kaasnev üleliigne materjal võib osutuda heaks taaskasutamise materjaliks. Mitmed Euroopa riigid on võrreldes Eesti taaskasutamisega palju ees. Taanis on paika pandud eraldi grupp inimesi, kes on spetsialiseerunud taaskasutamisele. Enne lammutustöid hinnatakse kogu objekt üle ning antakse tagasiside kuidas ja mida lammutada taaskasutamise teostamiseks. Austrias on ehitushangetesse sisse pandud protsent, kui palju materjale tuleb uuesti kasutada. Eestis taaskasutatavate materjalide pooldamine ja tarbimine on väike, kuna kergem on toota uuest materjalist. Materjalide taaskasutamisele aitaks kaasa lammutamise käigus materjalide puhtana hoidmine ja mitteseguneminе teiste jäätmetega. (Kiisler 2020)

Materjali ringlussevõtul on mitmeid eeliseid, kuid võib esineda ka puuduseid või takistusi. Betooni ringlussevõtt erinevates riikides on olnud võrreldes alumiiniumi ja terasega madalam. Seadustest ja määrustest tulenevalt on rohkem taaskasutust leidnud rehvid ja plastpudelid. Tabelis 1 on toodud materjalide taaskasutamise protsendid Euroopas, Ameerika Ühendriikides ja Jaapanis. Taaskasutamisega tegeletakse, kuid teatud materjalide puhul vähesel määral. Betooni taaskasutamine Euroopas on 30%, Ameerika Ühendriikides ja Jaapanis 80% või rohkemgi. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Tabel 1. Taaskasutatavate materjalide protsent Euroopas, Ameerika Ühendriikides ja Jaapanis (*The Cement Sustainability* … 2009)

Materjalid	Taaskasutamine Euroopas (%)	Taaskasutamine Ameerika Ühendriikides (%)	Taaskasutamine Jaapanis (%)
Betoon / ehitus- ja lammutusjäätmed	30	82	80
Alumiiniumist joogipurgid	58	52	93
Alumiinium hoonetes	96	-	80
Klaasmahutid	61	22	90
Plii akud	95	99	99
Paber / papp	63	56	66
Plastpudelid	39	24	66
Rehvid	84	86	85
Terasest mahutid	66	63	88

Ehitus- ja lammutusjäätmete ringlussevõtu kohaselt on Euroopa riikidega võrreldes esikohal Belgia. Euroopa Liitu kuuluvate riikide mahtude põhjal võtab Saksamaa ringlusesse 68 miljonit tonni jäätmeid. Protsentuaalselt suudab 90% materjalist taaskasutada Holland. Brüsselis on kaasatud omavalitsusi ja ehitusettevõtteid eraldamaks lammutamise käigus materjale (metalli, puitu, kipsi ja betooni) ning seejärel saadetakse ringlussevõtukeskustesse. Ühe näitena võib tuua vana hoone lammutamise Brüsselis, kust saadi 120 ruutmeetrit ülesvõetud plaate, mida hiljem kasutati uue hoone ehitusel. (Sforza 2018)

2009. aastal tekkis Eestis üle 1,2 miljoni tonni ehitus- ja lammutusprahti, millest taaskasutati ligi 92% (Ideon et al. 2010). 2013. aastal saadi 1,95 miljonit tonni ehitus- ja lammutusjäätmeid, millest taaskasutati 851 tuhat tonni (Ehitus- ja lammutusjäätmete … 2015). 2011. aastal saadi Eestis 1,45 miljonit tonni ehitus- ja lammutusjäätmeid, millest taaskasutusse võeti 72% ehk 851 tuhat tonni. Euroopa Liidus sätestatud eesmärgi kohaselt peaks 2020. aasta 1. jaanuarist taaskasutusse, korduvkasutusse või ringlusse võtma 70% ehitus- ja lammutusjäätmeid. Enamus taaskasutatavast materjalist läheb Eestis pinnase täiteks või teedeehitusse. Puidujäätmetest toodetakse vähemal määral küttegraanuleid ja klaasist soojustusmaterjali. Metalljäätmeid saadi 2011. aastal 348 tuhat tonni, mida taaskasutati enamasti väljaspool Eestit. Eesti püüdleb ehitus- ja lammutusjäätmete taaskasutamisega 75 protsendini 2020. aastal. (Riigi jäätmekava … 2014)

1.5. Betooni taaskasutamisele võtmine ja selle olulisus

Tsemenditööstused on hakanud üha rohkem tundma huvi säästva arengu vastu, selleks on koostatud Tsemendi Jätkusuutlikkuse Algatus (CSI). Säästva arengu poole püüdlevad 18 riiki, kes on ühinenud Maailma Säästva Arengu Ettevõtlusnõukoguga (WBCSD). CSI arvamus on, et betoon on ringlussevõetav ja taaskasutatav materjal, kuid kõik riigid ei püüdle tsemendi ja betooni taaskasutuse poole. (*The Cement Sustainability* … 2009) Tööstused aitavad lahendada erinevaid probleeme, näiteks tsemendiahjudes kütusena kasutatavate ohtlike jäätmete põletamine ja lendtuha kasutamine betoonisegudes. Betoon on osutunud ehitus- ja lammutusjäätmete üheks suurimaks komponendiks, millega ei osata edasi tegutseda. (Babor et al. 2009)

Betoon on sobilik materjal, mis võimaldab ehitada pikaajalisi hooneid. Betooni taaskasutamine algsel kujul on harva võimalik, mistõttu jaotatakse järelejäänud vedel betoon väiksemateks plokkideks või tahke betoon täitematerjaliks pinnasesse. Üha rohkem on hakatud betooni uuesti ringlusse võtma või on loodud eraldi ettevõtted, kes purustavad betooni ning kasutavad saadud täitematerjali, mis on odavam variant materjali taaskasutamiseks. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Valmissegatud tagastatud betooni kogus võib olla 0,4-0,5% kogutoodangust, kõrgperioodidel 5-9%. Prognooside kohaselt tekib ülemaailmselt 125 miljonit tonni tagastatud betooni. Tagastatud betoon on kasutamata betoon, mis tuuakse betooniveokitega tehasesse tagasi ning mis on üleliigne materjal. Kogused võivad olla minimaalsed, näiteks segisti põhjas olev väike kogus või suuremad kogused, mida ehitusplatsil ära ei kasutatud. (Ferrari et al. 2014)

Taaskasutataval betoonil on mitmeid eeliseid (*The Cement Sustainability* … 2009):

- prügilate ja jäätmete arvu vähenemine;
- prügilate maamaksu ja lõivu tasude vähenemine;
- loodusest saadavate materjalide ja keskkonnakulude vähenemine;

- transpordikulude vähenemine;
- betooni suur tihenemisomadus annab võimaluse materjali kasutada teistes valdkondades (teede aluspindades);
- taaskasutamisega kaasnevate töökohtade arvu suurenemine.

Ringlussevõetud täitematerjalide uurimisega alustati juba 1940. aastatel. Rohkem ajendas selle teema kohta uurima 1973. aastal toimunud naftakriis, kus Jaapan uuris ringlussevõtu kasutamist. (*The Cement Sustainability* … 2009) 1987. aastal asutati Ameerika Ühendriikides ringlussevõtu tehas, Recycled Materials Company, kus alustati betooni taaskasutamist selle koostisosade eraldamise teel (*Recycled Materials Company* … 2009).

Taaskasutatavat betooni on võimalik asendada kandetarindites 20% või enamgi, mis ei tekita ohtu konstruktsioonidele. Sellise jäätmete taaskasutamise taseme on praeguseks saavutanud Holland ja Jaapan. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Erinevates riikides toimub suuremal või väiksemal määral betooni taaskasutamine. Ameerika Ühendriikides kasutab ümbertöödeldud betooni 38 osariiki. Nendest 11 on kasutusele võtnud meetmed, kus ümbertöödeldud betooni kasutatakse uue betoonisegu koostamisel. Brasiilias on rajatud mitmed ringlussevõtu ettevõtted Sao Paulosse ja Belo Horizontesse. Riik kasutab purustatud betooni teede aluspinnastes. Holland on keelanud betoonijäätmeid sisaldavad prügilad. Kogu betoon võetakse uuesti ringlusesse, välja arvatud osa töötlemisjäätmetest. Soomes on kehtestatud seadusandlusega peaaegu kogu lammutatava materjal uuesti ringlusesse võtmine. Kosovos oli peale sõda 10 miljonit tonni ehitusprahti, mida hakati ümber töötlema ja kasutati täitematerjalina. Belgias on peale 2005. aastat Pakistanis Kashmiris toimunud maavärinat ettevõtete teadmisi edasi arendatud ja hakatud tegelema materjalide korduvkasutamise ja taaskasutamisega. Araabia Ühendemiraadide ja Katari keskkonnaprobleemid tulenevad jäätmetest, selle vähendamiseks on hakatud looma programme materjalide ringlussevõtuks. Lõuna-Aafrikas asuvasse Kaplinna on rajatud turg, mis tegeleb ringlussevõetud täitematerjalidega. Ülejäänud Aafrika piirkondadest pole teada laialdasest betooni taaskasutamisest. Hiinas toimub suur taaskasutamine ja huvi sellega tegelemiseks üha kasvab. Ehitus- ja lammutusjäätmetest kasutatakse uuesti 90% ja betooni puhul on 95%. Jaapanis kasutatakse ehitus- ja lammutusjäätmeid teede aluspinnastes. Tais kasutatakse järelejäänud vedelat betooni

kogukonnaprojektide jaoks, kuid betoonist ehitus- ja lammutusjäätmete eraldamist veel ei teostata. Austraalias kasutatakse ringlussevõetud betooni uutes betoontoodetes. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Betooni taaskasutamise juures on mitmeid tegureid, mis määravad sellega tegelema hakkamise või taaskasutusest loobumise (*The Cement Sustainability* … 2009):

- looduslike materjalide lähedus;
- ehitus- ja lammutusjäätmete kvaliteet, materjali kättesaadavus ning ringlussevõtukohad;
- arusaamad ringlussevõtu olulisusest;
- riigipoolsed stiimulid;
- standardid ja määrused, mis kehtestavad nõuded ringlussevõetavatele materjalidele;
- looduslike materjalide ning prügilate maksud ja lõivud.

Betooni põhiline taaskasutamine toimub sidumata kujul täitematerjalina maanteede aluspinnases. Selle materjali kvaliteedi tagab eelnev töötlemine ja kokkupuude muude materjalide või ainetega. Korrektselt puhastatud taaskasutatav materjal on võrreldav looduslike täitematerjalidega, kuid esineda võib tugevusega seonduvaid piiranguid. (*The Cement Sustainability* … 2009)

USA-s edendatakse betooni taaskasutamist teedel, teekatetes ja aluspinnastes. Selleks on Föderaalne Maanteeamet viinud läbi vastavad uuringud nende sobivuse kohta. Soome on täheldanud, et ringlussevõetud betoon võimaldab teede aluskihtide paksusi, materjali headele tugevusomadustele, vähendada. Levinud arusaam on, et ringlussevõetud betooni ei tohi kasutada konstruktsioonides. USA on katsetega välja selgitanud, et 10% taaskasutatud betooni uues segus sobib kõikidesse betoonkonstruktsioonidesse. Suurbritannia uuringud lubavad kasutada 20% taaskasutatud betooni uutes konstruktsioonides ja Austraalia 30%, ilma, et kaoks töödeldavus või oleks märgata tugevuses erinevusi. Mida suuremates kogustes taaskasutatavat betooni uue betooni sisse lisada, seda rohkem hakkab takistusi ilmnema. (*The Cement Sustainability* … 2009)

Saksamaal toodetakse taaskasutatavat täitematerjali sisaldavat betooni Boral, mida on kasutatud Austraalia, Saksamaa, Šveitsi ja paljude teiste riikide ehitusprojektides. (*The*

Cement Sustainability … 2009) USA-s kasutatakse ringlussevõetud betooni veekogudes riffide rajamiseks, mis toetavad austrite taastamise programmi. Purustatud betooni pinnad ja poorid pakuvad austritele röövloomade eest kaitset. Kanadas kasutati 450 000 tonni taaskasutatavat betoonkillustikku Toronto lennujaamas uute perroonide alustena. (*The Cement Sustainability* … 2009)

1.6. Transpordi kiirus betooni vedamisel ja selle meetodid

Kaubabetoon on poolik materjal, mis hakkab oma tegelikku eesmärki täitma vormi valamisel koos raketisega. Betooni omaduseks on kiire tardumisvõime, mis võib alata juba 30 minutiga. Mida rohkem on materjal tahenema hakanud, seda raskem ja keerulisem võib olla segu masinast välja saada ja õigesse kohta paigaldada. Tuleb arvestada asjaoluga, et kui viivituste tõttu peaks betooni paika panemine kauem aega võtma võib sellega kaasneda lisakulutusi. Segu paremaks töötlemiseks ja vedelas olekus tardumise aja pikendamiseks lisatakse erinevaid keemilisi aineid, mida nimetatakse plastifikaatoriteks. Keemilistel ainetel on kindel aeg, kui nende toime on kõige tõhusam. Betooni transport ja selle valamine peab toimuma kiiresti. (Rõõmusoks, Rahu 2004)

Erinevad parandused nagu betooni segule vee lisamine võib näida tõhus tegevus, kuid see muudab betooni tugevust 2-3,5 MPa võrra väiksemaks. Suur mõju on sellisel tegevusel kõrgemate kui C35/45 survetugevusklassi betoonidele. (Rõõmusoks, Rahu 2004)

Betooni transportimisel on oluline jälgida ümbritsevaid keskkonnaparameetreid. Töödeldavuse kahanemine muutub üha kiiremaks, kui keskkonnatemperatuur on kõrge ja suhteline niiskus madal. Betooni pinnalt hakkab selliste tingimustega vesi kiiremini aurustuma, mis tekitab materjali sisse pragusid ja kaotab oluliselt oma tugevust. (Rõõmusoks, Rahu 2004) Pragude vältimiseks tuleb betooni kaitsta tuule ja päikesekiirguse eest. Esimesel päeval, kui kivinemisprotsess algab ja välisõhk on 20 kraadi, võib betoon tarduda 6 tundi, edasise temperatuuri languse korral muutub tardumise aeg pikemaks. Keskkonnas, mille temperatuur on 15 kraadi, on tardumise aeg 13-15 tundi ja kui temperatuur langeb 0 kraadi juurde pikeneb tardumine 18-20 tunnini. (Uustalu 2000)

Teine oluline punkt on transportimiseks valida õige meetod, mis ei kahjustaks betooni kvaliteeti. Transport toimub kahes etapis, tehasest tööplatsile ning tööplatsilt edasi betooni vajaminevasse kohta. (*How to choose* … 2020) Betooni vedamisel tuleb tagada, et selle käigus ei muutuks vee ja tsemendi suhe, segus olev õhusisaldus ning üldine homogeensus (Jamal 2017). Väiksemate vahemaade ja mahtudega tööde korral tuleb betoon transportida ehitusplatsile 30 minutiga (Patel 2019).

Transpordiliigi valimisel tuleb enne betoonisegu väljasaatmist arvestada mitmete teguritega (Patel 2019):

- millise betooniseguga on tegemist;
- ilmastikuolud (kõrge või madal temperatuur, õhuniiskus ja tuule kiirus);
- ehituse suurus ja tüüp;
- geograafiline kaugus ehitusplatsist;
- transpordi maksumus.

Vedela betooni transportimine tööplatsile toimub betoonisegistiga või mahulise segistiga. Betoonisegisti kujutab endast veoki külge kinnitatud trumlit, mis võib sõidu ajal pöörelda ja segu segada. Antud masin sobib betooni transportimiseks kiiresti ja lähedale. Mahuline segisti segab segu valmis transportimise ajal, kui segisti sõidab tehasest kaugemal asuvasse ehitusplatsile. Tegemist on masinaga, mille eeliseks on võimalus muuta kohapeal segu konsistentsi. (*How to choose* … 2020) Segistid, mis transportimisel segavad segu tuleb kahe tunni jooksul masinast eemaldada ja mittesegavate segistitega masinate korral piirduda ühe tunniga (Patel 2019).

Tööplatsile jõudnud betoonisegu tuleb edasi tarnida kõrgemale või madalamale töökohale. Selleks saab kasutada erinevaid masinaid või käru ja labidat. (*How to choose* … 2020) Maapinnast kõrgemale vedamiseks kasutatakse koppasid ja köisraudteesid. Meetodit saab kasutada nii horisontaalseks kui vertikaalseks betoonisegu vedamiseks. Köied ja kopad sobivad betooni töödeks orgude, tammide ja jões olevate muulide ehitamisel. Kõrghoonete puhul kasutatakse tõstukeid, kus betoon vinnatakse üles. Renne kasutatakse betooni transportimiseks maapinnast madalamale ja vähese ruumi korral. Lintkonveiereid kasutatakse 5-10 meetriste vahemaade korral, mis võimaldab transportida segu suurtes

kogustes. Antud transpordi viise ei soovitata kasutada liigse päikese ja kuumaga. Betooni saab juhtida vajaminevasse kohta ka pumpade ja torustikega, kus segu imetakse torusse ja juhitakse mööda torus edasi. Oluline on valida õige toru läbimõõt, kõrgemale juhtides tuleks kasutada peenemaid läbimõõte. (Patel 2019)

Autobetoonsegistid mahutavad maksimaalselt 7,5 m^3 betoonisegu (Ropka betoon 2020). Betooni väljalaadimiseks seguautost kasutatakse renni. Mehaanilise renni pikkuseks on kuni 3 m ja võimaldab 1,5 m kõrgusele betooni valada. Hüdraulilise renni pikkus on kuni 6 m, mis võimaldab 1m kõrgusele valada betooni. (Betoonimeister 2020) Pumbaga segurautodel on erinevad masti pikkused ja betooni mahtuvused. Masinad masti pikkusega 24 m mahutavad maksimaalselt 4,5 m^3 ja masti pikkusega 28 m mahutavad 3,5 m^3 betoonisegu. Tavaliste pumpautode mastid võivad olla kuni 36 m pikad. (Ropka betoon 2020)

2. TEHNOLOOGIA VEDELA BETOONI TAASKASUTAMISEKS, KATSED TAASKASUTATAVA BETOONIGA JA TSEMENDI TARDUMISAEG

2.1. Uus tehnoloogia taaskasutatava betooni graanuliteks muutmisel, selle meetodid ja saadud tulemused

Uut tehnoloogiat hakati uurima Jaapanis RMC ettevõtte ühingu poolt. Betoon muudetakse graanuliteks, mida on võimalik kasutada uue segu täitematerjalina. Meetod põhineb mittetoksilistel, hõlpsasti kasutatavatel lisanditel, mida lisatakse veoautode segistite trumlisse. Antud tehnoloogia vähendab jäätmete kõrvaldamise ning täitematerjalide tarnimisega jäätmete teket, loodusvarade kaevandamist ja kulusid. (Ferrari et al. 2014)

Tagastatud betoon viiakse tehasesse ja tühjendatakse määratletud asukohta. (Ferrari et al. 2014) Betoon ladustatakse peale kõvenemist otse prügilasse või purustatakse täitematerjali jaoks. Tagasitulevat betooni kasutatakse vähesel määral osade betoonelementide tootmiseks, vundamendi või tugiseinte plokkide tegemiseks. Suuremad betoonitehased on kasutusele võtnud eralduse meetodid. Taaskasutamiseks eraldatakse jämematerjal ja tehnoloogiline vesi, ladustatakse ka jämedamat liiva. Antud meetod nõuab suuremat investeeringut ja nõuetekohast tegutsemist.

Uuel taaskasutataval meetodil on neli etappi. Esimese etapi käigus lisatakse superabsorbeerivat polümeeri (SAP) tagastatud betooni vedava auto segistisse. Lisatav kogus on 0,4-0,8 kg SAP/m^3 tagastatud betooni kohta. Arvestada on vaja vee ja tsemendi suhet, milline tsement on kasutusel ning millised on kliimatingimused. Lisatud polümeer neelab endasse segus oleva vaba vee ning peale mõneminutilist segamist (2-3 minutit) muutub betoon graanuli sarnaseks tükiks. Graanul sisaldab tuuma (joonis 2), milleks on eelnevalt vedelas segus olnud täitematerjal. Tuum kattub tsemendi abil valmistatud

komposiitmaterjali pastaga, mis koosneb liivast ja superabsorbeerivast polümeerist. (Ferrari et al 2014)

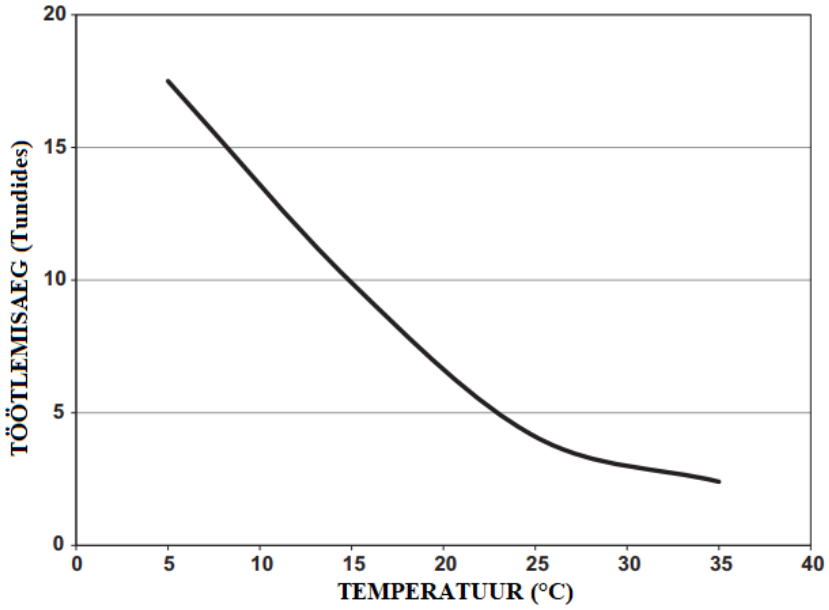
Joonis 2. Värske granuleeritud materjal peale SAP-i lisamist (Ferrari et al. 2014).

Teise etapiga lisatakse alumiiniumsulfaadil põhinevat etringiidi ühendeid ning segatakse kaks kuni kolm minutit. Lisatav kogus on 4-8 kg/m^3 tagastatud betooni kohta. Etringiit kaotab graanulites olevat vett ja muudab materjali järgnevaks töötlemiseks tugevamaks. (Ferrari et al. 2014)

Kolmandas etapis kallatakse granuleeritud materjal maapinnale ning ladustatakse virna. Selle käigus tuleb vältida liiga kõrge kuhja tekkimist, vältimaks surve tekkimist põhjakihtidele. (Ferrari et al. 2014)

Neljanda etapiga kõvendatakse granuleeritud materjal. Selleks on vaja ladustatud segu 24 tunni jooksul ümber tõsta ja segada haaratsitega vähemalt kahel korral. Eesmärk on suured graanuli tükid üksteise küljest lahti saada. (Ferrari et al. 2014)

Materjali töötlemisel on tähtis jälgida töötlemise aega. Tükkide vahelised sidemed muutuvad seistes tugevamaks, kui ladustatud hunnikut ette nähtud ajal ei liigutata. Seetõttu on tükkide eraldamiseks vaja kasutada tavalisest rohkem energiat. Õigeaegselt segatud ja tõstetud granuleeritud materjali võib ladustada sarnaselt teiste täitematerjalidega. Joonisel 3 on näidatud töötlemisaja sõltuvus betooni temperatuurist. Joonis näitab, kuidas kliimatingimused mõjutavad protsessi töötlemisaega. (Ferrari et al. 2014)



Joonis 3. Töötlemisaja ja betooni temperatuuri suhe (Ferrari et al. 2014).

Uue täitematerjali tihedus on madalam võrreldes algsete looduslike materjalide tihedusega. (Ferrari et al. 2014) Looduslikud materjalid on 2,6 kg/l granuleeritud täitematerjali kohta raskemad ning mida väiksem on graanuli suurus, seda väiksemaks tihedus läheb. Põhjus seisneb väiksematel jäätmematerjali tükkidel, mis on suurema katmise protsendiga kui suuremad tükid. Uute jäätmematerjalide puhul vastavad keemilised omadused sulfaatide ja kloriidide osas Euroopa tehnilise standardi EN 12620:2008 piirnormidele, vastavalt 0,8 ja 0,04 massiprotsenti.

Teise etapi käigus lisatud ained tekitavad betoonile hüdratatsiooni esimese 24 tunni jooksul, suurendades etringiiti 0,5% tagastatud betooni massist. Primaarne etringiit moodustab tsemendi alumiiniumfaaside reageerimise sulfaatidega esimestel tundidel peale segamist. Betoonkonstruktsioonidele on see kahjutu, kuna sellega kaasnev paisumine ei põhjusta lokaalset ja häirivat toimet, sest protsess toimub deformeeruvas betoonis. Samal ajal võib primaarne etringiidi lagunemine ja sellele järgnev reaktsioon sulfaatidega mõjuda betoonelementidele kuude või aastate pärast heterogeenselt. Paisumine toimub protsessis jäigalt ja võib hakata tekitama betoonikonstruktsioonides purunemist ja killustamist. Sulfaatide sisaldus on Euroopa standardites ette nähtust madalam, kuid sisemine sulfaadi rünnak võib ohtlikuks muutuda juhul, kui kasutada granuleeritud materjali 50% või

rohkemgi uue segu koostamisel. Seetõttu on antud uuring täiustamisel ja otsitakse etringiidi ühendit, mis ei põhineks sulfaatidel. (Ferrari et al. 2014)

Katse läbi viimiseks koostati kontrollsegu ja segu, mis sisaldas 30% granuleeritud täitematerjali. Survetugevuskatsetest selgus, et kuigi ringlussevõetud seguga betoon oli väiksema tihedusega (3-5%) kui kontrollsegu, ei mõjutanud 30% taaskasutatava täitematerjali kasutamine betooni tugevust (tabel 2). (Ferrari et al. 2014)

Tabel 2. Kontrollsegu ja uue tehnoloogiaga segu tiheduse ja tugevuse andmed (Ferrari et al. 2014)

Kõvenemisaeg (päevades)	Kontrollsegu		Uue tehnoloogiaga segu	
	Tihedus; kg/m3	Tugevus (MPa)	Tihedus; kg/m3	Tugevus (MPa)
1	2455	5,8	2330	4,8
2	2420	12,5	2320	11,1
7	2425	24,5	2360	24,4
28	2365	36,0	2280	36,1
56	2375	39,5	2290	40,1

Uuringu käigus viidi läbi teste kloriidide läbitungimise kohta. Betooniproovid asetati $CaCl_2$ lahusesse ja mõõdeti kloriidide läbitungimist fenoolftaleiiniga. Tulemused on nii kontrollbetooni ja 30% sisaldusega taaskasutatud betooni seguga sarnased (tabel 3). (Ferrari et al. 2014)

Tabel 3. Kloriidide läbitungimine kontrollsegus ja 30% taaskasutatavas segus (Ferrari et al. 2014)

Segu tüüp	Kloriidide läbitungimine; mm			
	7p	14p	28p	90p
Kontrollsegu	9,5	14,4	17,3	24,2
30% taaskasutatavat segu	9,3	14,6	17,2	24

Sooritatud katsed kinnitavad, et segud, mis on valmistatud looduslikest täitematerjalidest ja 30% uutest täitematerjalidest on sarnaste tulemustega, kuid pikaajalisemad katsed sulfaatide sisalduse vähendamisega jätkuvad. (Ferrari et al. 2014)

2.2. Ringlussevõetud täitematerjali kasutamine betoonisegus

Raudbetoonist ehitise lammutamise käigus saadakse hoone massist 50% ulatuses betoonijäätmeid (Wijayasundara et al. 2016). Saadud jäätmed purustatakse ja jämedam osa võetakse täitematerjaliks, mida nimetatakse jämedaks ringlussevõetud materjaliks ja peenemat osa peeneks ringlussevõetud materjaliks. Uue segu koostamise käigus kasutatakse teatud kogus ringlussevõetavaid materjale looduslike asemel. Üha rohkem on hakatud sellist taaskasutust pooldama, kuna see tekitab betoonijäätmete säästva kasutuse ja vähendab ladustamist prügilatesse. Teisalt vähendab taaskasutus nõudlust looduslike materjalide vastu ja vajadust kaevata suuri koguseid karjääridest. (Wijayasundara et al. 2016)

Teostatud katses selgus, et ringlussevõtu protsessiga on võimalik jäätmevaba betoonijäätmete kasutuselevõtt, mille tulemusena saadakse kvaliteetne jämematerjal ja tsemendimört. Paremad omadused on võimalik saada, kui kasutada lisaks looduslikele materjalidele ka ringlussevõetud materjale. (Kalinowska-Wichrowska 2020)

Uues betoonis aitavad ringlussevõetud materjalid vähendada süsinikdioksiidide õhku paiskamist ja nõudlust looduslike materjalide ladustamiseks. Viimastel aastatel on üha olulisem leida alternatiive vähendamaks loodulike materjalide kasutamist. Lahendusena võib betoonis täitematerjalina kasutada asfalditehastes tekkivaid peeneteralisi jäätmeid, mis aitavad betoonil tihedamaks muutuda. (Kalinowska-Wichrowska 2020)

Katses kasutati purustatud betooni killustikku, mida töödeldi termomehaanilise meetodiga. (Kalinowska-Wichrowska 2020) Kuumutamistemperatuuriks valiti 650 kraadi 60 minuti juures. Protsess viidi läbi neljas etapis. Kõigepealt saadi lammutamise käigus betoonijääk, mis purustati kuni 40 mm tükkideks. Purustiga saadud tükid asetati edasi termoahju. Ahjus kasutati võimsust 11 kW ja kuumutamistemperatuuri 1250 kraadi. Peale protsessi eraldus täitematerjalist tsemendimört. Ahjust võetud killustik asetati mehaaniliseks töötlemiseks koos viie teraskuuliga järgmisesse trumlisse. Selle tulemusena eemaldus tsemendimört täielikult jämematerjali küljest. Viimasena jahutatud materjal sõeluti läbi nelja sõela ning jagati peenfraktsiooniks kuni 4 mm ja jämedaks fraktsiooniks üle 4 mm. (Kalinowska-Wichrowska 2020)

Saadud jäämaterjali kasutati betoonisegu koostamisel ja kontrolliti survetugevuskatsetega. Termilise ja mehaanilise töötlemise käigus saadi täitematerjal, mis oli kvaliteetne ja kasutatav uue betoonisegu koostamisel. Antud töötlus parandab betooni tugevusparameetreid 10% ning ei muuda teisi parameetreid kehvemaks. Peale jäämaterjali saadi antud protsessi käigus ringlussevõetud tsemendimördi kujul ka peenmaterjal. Antud materjali on võimalik kasutada autoklaavitud toodete valmistamisel kuni 20% lubja ja liiva massist. Kaltsineerides materjali temperatuuril kuni 650 kraadi on võimalik saadud peent materjali kasutada tsemendi asendajana komposiitsetes materjalides kuni 25%, mille tulemusel suureneb survetugevus 10% võrreldes looduslike materjalide kontrollseguga. (Kalinowska-Wichrowska 2020)

Väljatöötatud seadmetega saab eraldada killustikku betoonkonstruktsioonidest. Termilise töötlemise käigus on võimalik materjale üksteisest eraldada, mille tulemusena saab killustikku jäätmevabalt ringlusse võtta, võimaldades tooteid uuesti kasutada. Protsess on kooskõlas säästva arengu ideega ja keskkonnakaitsenõuetega. (Kalinowska-Wichrowska 2020)

2.3. Ringlussevõetud täitematerjali karboniseerumiskindlus

Uues betoonis kasutatakse ringlussevõetud betooni, kus uuritakse selle mõju karboniseerumisele. Antud aspekt ei ole kirjanduses suurelt kajastatud, sest põhirõhku on teadusuuringutes pööratud vee ja tsemendi suhte ning survetugevuse uurimisele, mis muudab käesoleva uuringu oluliseks infoks inseneerias. (Leemann, Loser 2019)

Taaskasutatud täitematerjali kasutamine betoonis vähendab reostuse mõju keskkonnale. Selleks on toodud välja kaks peamist punkti (Leemann, Loser 2019):

1) tsemendi kasutamine vähendatud klinkeri sisaldusega;
2) betooni korduvkasutamine, kus lammutamisel tekkinud jäätmeid taaskasutatakse.

Väljatoodud punktid on peamised lähenemisviisid Šveitsi ehitustööstuses, mida kasutatakse hoonete püstitamisel. (Leemann, Loser 2019) Uuringus on kasutatud kolme betoonitüüpi,

milles varieeruvad tsemendisisaldus ning vee ja tsemendi suhe. Ühe võimalusena on kasutatud betoonitüüpi, mille minimaalne tsemendisisaldus on 280 kg/m^3 ja maksimaalne vee ja tsemendi suhe 0,65, teise variandina on minimaalne tsemendisisaldus 300 kg/m^3 ja maksimaalne vee ja tsemendi suhe 0,60 ning kolmanda variandina on minimaalne tsemendisisaldus 300 kg/m^3 ja maksimaalne vee ja tsemendi suhe 0,50. Nendes betooniklassides jääb asendus ringlussevõetud täitematerjaliga 25 ja 50 massiprotsendi vahemikku.

Katse sooritatakse betoonist kuubikutega, mille survetugevust mõõdeti tuginedes standardile EVS-EN 12390-3:2009 ja karboniseerumise koefitsent määrati standardiga SN 262/1. Kuubikutest näidised asetati 24 tunniks vette, seejärel hoiti kaks päeva 20 kraadises ja 57 protsendilises suhtelise niiskusega kambris. 28 päeva pärast asetati kuubikud 63 päevaks karboniseerumiskambrisse, ümbritsevas keskkonnas oli 4% CO_2 ning 57% suhtelist niiskusesisaldust. Iga 7, 28 ja 63 päeva järel määrati karboniseerumise sügavus. Tulemuste kontrolliks tehti ka teine katse, kus karboniseerumist mõõdeti looduslikes oludes. Erinevusena eelneva katsega asetati 28 päeva möödudes kuubikud välitingimustesse. (Leemann, Loser 2019)

Karboniseerumissügavuse määramiseks on ette nähtud viis mõõtmist igal küljel. Seega ühe kuubiku puhul tuleb sooritada 20 mõõtmist. Karboniseerumissügavust mõõdeti kahel erineval viisil (Leemann, Loser 2019):

1) jäeti tähelepanuta ringlussevõetud täitematerjali kasutamine betoonis ja määrati karboniseerimispinna sügavus toodetud betoonisegu tsemendipastas;
2) võeti arvesse ringlussevõetud täitematerjali kasutamist betoonis ja määrati karboniseerumissügavus.

Proovikehade tootmisel kasutati kolme erinevat tsemendi sisaldust. (Leemann, Loser 2019) Esimene proovikeha sisaldas lubjakivi pulbrit 15 massiprotsenti, tulemused ringlussevõetud betooni survetugevuse ja karboniseerumise sügavuse puhul on samad, mistõttu pole märgata ringlussevõetud materjali kasutamist. Teisel proovikehal, mis sisaldas lubjakivi pulbrit 15 massiprotsenti ja põletatud põlevkivi 15 massiprotsenti, oli karboniseerumise koefitsient suurenenud võrreldes esimese proovikehaga. Kolmas proovikeha sisaldas 66 massiprotsenti

räbu ja ringlussevõetud betooni täitematerjali, millel oli oluliselt märgata proovikeha karboniseerumist.

2.4. Ringlussevõetud betooni täitematerjali omadused erinevatel kõvenemistingimustel

Uuringus „Ringlussevõetud betooni täitematerjali omadused erinevatel kõvenemistingimustel“ selgus, et keskkonnasõbraliku betooni tootmine vähendab loodusvarade tarbimist ja betoonijäätmete ladustamist prügilatesse. Enne taaskasutatud betooni massilist kasutamist tuleb sooritada katseid ja läbi viia uuringuid sobivuse hindamiseks. Antud katses uuriti ringlussevõetud täitematerjali mehaanilist käitumist. Selleks sooritati kuivatamise katse, kus betoon saab piisavalt vett, et tagada tsemendi hüdratatsioon. (Abdel-Hay 2017)

Katse sooritamiseks valmistati neli betoonsegu, kus kasutati jämedat ümbertöödeldud täitematerjali ja asendusi dolomiidiga (0:100%, 25:75%, 50:50%, 100:0%). Segud töödeldi kolme erineva kuivatamismeetodiga, milleks oli avatud õhk, veega küllastunud olek ja betooni värvimine. Peale kõvenemisperioodi viidi läbi katsed survetugevuse ja lõhenemistugevuse määramiseks. (Abdel-Hay 2017)

Betooni survetugevust mõõdeti 150 mm kuupproovidel 3, 7 ja 28 päeva vanuselt. Betoonisegudena valmistati üks kontrollbetoonisegu ja kolm ringlussevõetud täitematerjaliga segu, mille asendussuhted olid 25%, 50% ja 100%. Tsemenditüübina kasutati portlandtsementi, liivast ränikivi 2,73 kvaliteediklassiga ja looduslikku dolomiiti, mille nimimõõt oli 25 mm. Kogu segu segati tavalise kraaniveega. Kokku toodeti 250 kuubikut mõõtmetega 15x15x15 cm, 28 päeva möödudes purustati kuubikud ringlussevõetud jämedama täitematerjali saamiseks. (Abdel-Hay 2017)

Survetugevust uuriti katsekehadega, mis olid valatud ringlussevõetud täitematerjaliga, kuid säilitati sama vee ja tsemendisuhe 0,55. Katsest leiti, et kontrollsegude vees tahkunud betooni survetugevus oli suurem kui õhu käes kõvenenud betoonil. Õhu käes tahkunud betoon, mille taaskasutatud täitematerjali protsendid olid 25 ja 50 protsenti, andsid võrreldes

vees kõvenenud betooniga (vanuses 3, 7 ja 28 päeva) suurema survetugevuse. Tugevdades betooni värvimisega saadi võrreldes teiste kõvenemiskatsetega kõige suuremad survetugevuse väärtused, väljaarvatud täielikult taaskasutatud materjalidest toodetud katsekehadel. (Abdel-Hay 2017)

Kõigi kõvenemisjuhtude puhul tõusis betoonivanuse suurenedes ka selle survetugevus. Parim suhe taaskasutatud ja looduslike täitematerjalide puhul on 50%, kui selle suhtega katsekehad olid õhu käes või värvitud saavutati survetugevuse maksimaalne väärtus 28 päeva pärast. Niiskes keskkonnas kõvenemisel saadi täitematerjali täielikul asendamisel kõige suurem survetugevus 28 päeva möödumist. (Abdel-Hay 2017)

2.5. Värskete betoonjäätmete taaskasutamise võimalused

Värsked betoonijäätmed kahjustavad keskkonda ja on ohuks sealsele elustikule. Värske betoon on aluseline ja võib põhjustada inimese nahale põletusi ning kahjustada pinnast ja vett. Tagasitulnud betooni liigitatakse ületellitud betooniks ja ülejäävaks betooniks. Tellimisel ülejääva betooniga võib tekkida olukord, kus pole võimalik segu järgmisele kliendile viia või piisavalt kiiresti tehasesse tagasi transportida. Selliseid olukordi võib tekkida, kui kasutusel on tellija jaoks odavad segud, kuid betoonitarnijatele osutub see kordades kallimaks. Ülejääv betoon tuleb segistite trumlite pesemisega. Trumli sisemusse võib jääda koguni 300-350 kg jääki, mis mõjutavad tehast kui keskkonda. Tänapäeval on kasutusel mitmeid tagastatud betooni meetodeid ning iga tehas tegutseb erinevalt. (Kazaz, Ulubeyli 2016)

Olemasolevad betooni tagastamise meetodid (Kazaz, Ulubeyli 2016):

- Sobitamine - kui üle jääv kogus on liiga suur proovitakse see viia järgmisele kliendile;
- jäägi valamine settebasseinidesse - kasutusel väikese ja keskmise suurusega tehastes;
- jäägi tühjendamine maapinnale - segul lastakse kõveneda ja alles kõvenenud betoon visatakse prügilasse või purustatakse täitematerjali saamiseks;

- betoondetailide tootmine tehastes – piirangud võivad tekkida kohalik turu poolt või tehase enda vähestest võimalustest (toodetakse tugiseinu, tugiposte ja vaheseinte plokke);
- mehaaniline taaskasutus - kasutusel üle tellitud või suure koguse järelejäänud betoonisegude korral, segust eraldatakse jämedam liiv ja killustik, mida kasutatakse osaliselt uue segu koostamisel;
- seisnud segu kasutamine uues betoonis;
- seisnud segu kasutamine plokkide tootmiseks;
- hüdratatsiooni stabilisaatorite lisamine – tegemist on superplastifikaatoritega, kus betoonisegu saab olla deaktiveeritavas olekus maksimaalselt 3 päeva;
- SAP-i kasutamine – lisatakse segistisse superabsorbeeruvat polümeeri, mis muudab segu täitematerjali sarnasteks tükkidega.

2.6. Tsemendi tardumisaja määramine

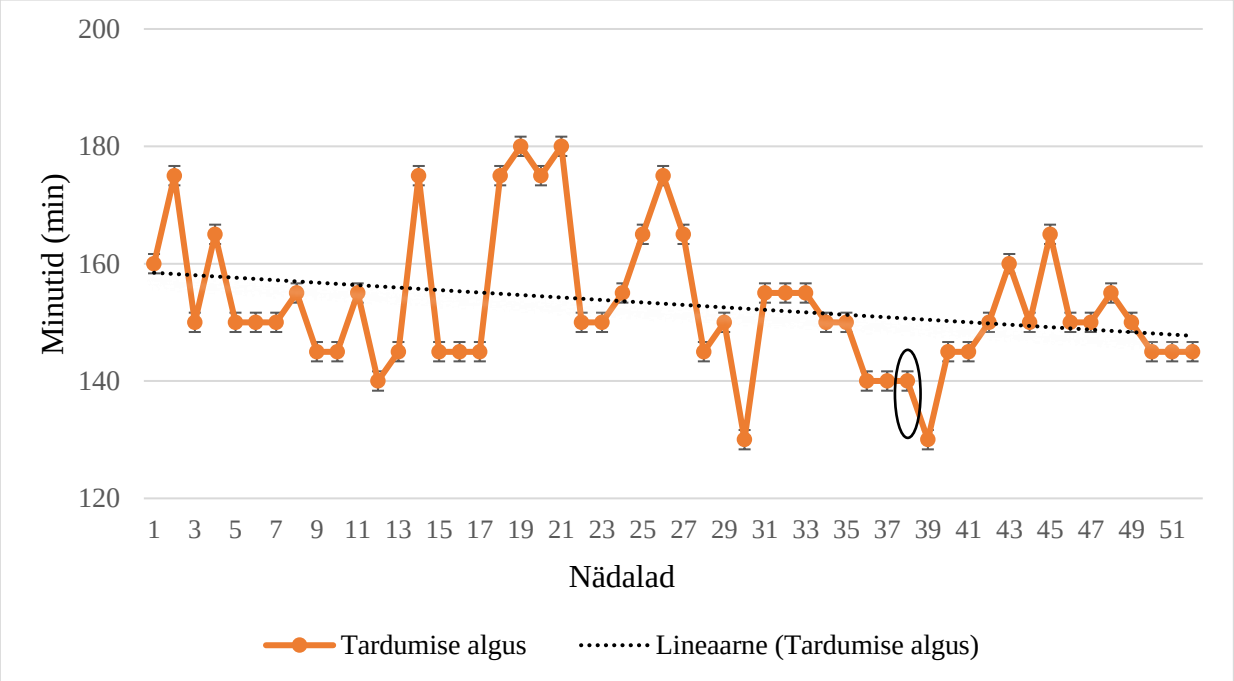
Tardumisaja alguseks loetakse vee segunemist tsemendiga, antud protsessi nimetatakse tsemendi tardumisajaks. Tsemendis toimuvaid keemilised protsessid jagatakse kolmeks etapiks. Tsemendis sisalduvad ühendid hakkavad kokkupuutes veega reageerima ja moodustavad massi, mis hakkab tahkuma. Tegemist on hüdrolüüsi ja hüdratatsioonietapiga, mille tulemusel saadakse vesiniksilikaadid. Järgmises etapis hakkavad ühendid töötama liimina, aine muutub paksemaks ja kinnitub täitematerjalide külge. Seejärel tekib küllastunud segu, mis ei võta vett enam vastu. Kolmandas etapis muutub mass kristalseks, mille tulemusel tekib kõvenenud, tugev kristallide ja geeli massi. (*The Constructor* 2020)

Talvistes tingimustes, kui temperatuur on alla 10ºC, muutub tsemendi tardumine aeglasemaks. Alla 0ºC temperatuuri korral võib tsemendi tardumine hoopiski lõppeda. 0-5ºC juures algab tardumine 6-10 tunni pärast ja võib lõppeda 19-20 tunni möödudes. Tardumisaja kiirendamiseks tuleb hoida piisavalt soojust ja talvel on vaja inimesel ise sooja juurde tekitada. Kasutusele tuleb võtta erinevad meetmed, näiteks betooni katmine spetsiaalsete soojusvahenditega, ajutiste telkide püstitamine, betooni kuumutamine soojuskaablitega või kõigi variantide korraga kasutamine. Tsemendi tardumise soodsamad

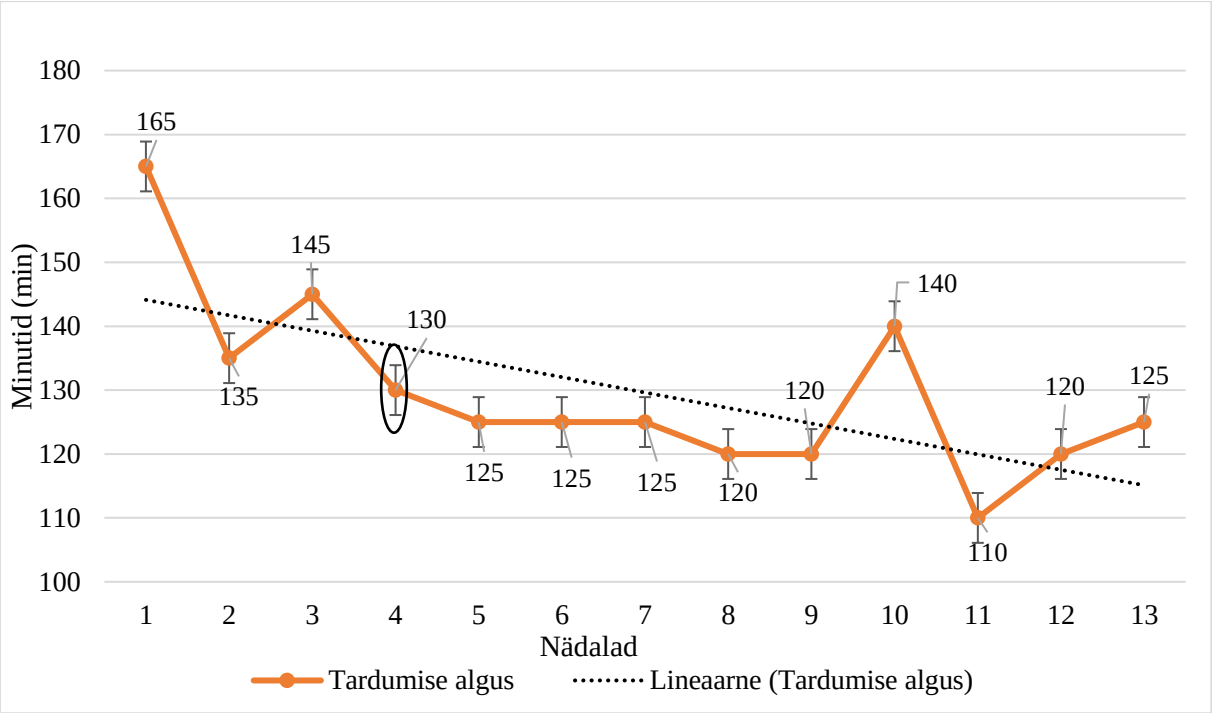
tingimused on +22 kuni +25 ºC, siis tuleb jälgida, et liigne päikesevalgus ei satuks kuivava koha peale. (Gillmanbuilders 2020)

Tsement hakkab peale vormi valamist kõvenema, kuid selle tugevus tuleb aja jooksul. Tehastel on seetõttu oluline teada millal ja kui ruttu tardumine pihta hakkab ning mis seda saaks kiirendada. Esimest etappi nimetatakse haaramiseks, mis toimub esimese 24 tunni jooksul. Teine etapp on karistamine, kus toimub segu kõvenemine 30 päeva jooksul. (Gillmanbuilders 2020)

Tsemendi tardumisaja algus on igal tsemendi tüübil ning klassil erinev. Joonisel 4 ja joonisel 5 on välja toodud tehase tardumisajad CEM I 52,5R tsemendiga, mida mõõdetakse igal nädalal. Joonistel on autor ümbritsenud musta ringiga nädala, kui kasutati CEM U 52,5R tsementi ja viidi läbi magistritöö katsed taaskasutatava betooniga.



Joonis 4. Tsemendi tardumisaja algused nädalate kaupa 2019. aastal (andmed võetud TMB Element 2020, autori tehtud joonis).



Joonis 5. Tsemendi tardumisaja algused nädalate kaupa 2020. aasta (andmed võetud TMB Element 2020, autori tehtud joonis).

2019. aastal (joonis 4) sooritati esimesed katsed 40-ndal nädalal, mil tsemendi tardumisaja alguseks oli 145 minutit. Maksimaalne tardumisaeg 2019. aastal oli 180 minutit, antud tulemused saadi 19-ndal ja 21. nädalal. Minimaalne fikseeritud tardumisaeg oli 130 minutit, tulemused saadi 30-ndal ja 39-ndal nädalal. Aasta keskmine tardumisaeg oli 153 minutit.

2020. aastal (joonis 5) 4-ndal nädalal viidi läbi teine magistritöö katseseeria ja tsemendi tardumisaeg oli 130 minutit. 2020. aasta andmetest on teada kuni 13 nädalat, kus katsete tulemusena on saadud kõige kiirem tardumisaeg, milleks oli 110 minutit. Esimesel nädalal saadi maksimaalne tulemus, kui tsement hakkas tarduma 165. minutil.

3. KATSED TAASKASUTATUD VEDELA BETOONIGA

3.1. Materjal ja metoodika

Töö katselises osas uuriti erinevate proportsioonide käitumist valmis segatud betoonis ja aeglaselt tarduvas betoonis, mis oli segatud uuesti ringlusse võetud betooniga. Uuriti segu vananemist peale ühte, kahte ja kolme tundi. Seisnud taaskasutatav betoon segati värske betooniga. Uuriti segude töödeldavust Abramsi koonusega, lisatud vett, õhusisaldust betoonis ja survetugevust. Uuringu eesmärk on vähendada ettevõtte kulusid ja keskkonnaprobleemi muresid, mis kaasnevad tagasituleva betooniga tehasesse. Lisaks uuriti eraldi katsega tsemendi tardumisaega, mis viidi läbi Eesti Maaülikooli ehitusmaterjalide laboris. Aja määramiseks kasutati Vicat´ seadet.

Betoonisegud koostatakse OÜ TMB Elemendis kasutusel olevate retseptide järgi. Autor viis läbi kaks katseseeriat survetugevusklassidega C35/45 ja C50/60. Betooni survetugevusklass näitab 95% minimaalset normtugevust, mida väljendatakse silindrilise (esimene arv murru ees) või kuubikulise (teine arv murru järel) survetugevusega (Otsmaa 2000). Katsekehade mõõtmed kuubikulistel katsekehadel on 100 · 100 · 100 mm või 150 · 150 · 150 mm ning kuubikuid katsetatakse 28- päevaselt. Antud töös kasutati kahte betooni survetugevusklassi, nõrgim oli C35/45 ja tugevaim C50/60. Katseteks vajaminevad kogused olid 40 ja 10 liitrit betoonisegu. Segude koostamisel kasutatakse liiva, killustikku, tsementi, plastifikaatorit ja vett. Vajaminevad retseptid koguste kohta on toodud tabelis 4.

Tabel 4. Laboratoorsed segud erinevatel survetugevusklassidel (autori koostatud)

Kogus	40 liitrit		10 liitrit	
Survetugevusklass	C35/45	C50/60	C35/45	C50/60
Materjalid	Kogused (g)			
Liiv (0/8)	28826	26294	7207	6573
Killustik (4/16)	30349	44526	7587	11132
Killustik (8/16)	14397	-	3599	-
Tsement	13800	17400	3450	4350
Plastifikaator	125	226	31	57

Taaskasutatav betooni kogus saadakse 40 liitrisest segust, mis seisab kuni kolm tundi. Algselt viiakse läbi katsed värske betooniseguga ja saadakse null tunnised katsekehad, mis ei sisalda taaskasutatavat betooni. Järgnevad katsekehad saadakse värske betooni ja taaskasutatava segu kokku segamisel. Uus värske betoon saadakse 10 liitrise segu retseptiga. Tabelis 5 on toodud vee kogused C35/45 ja C50/60 survetugevusklassidele. Esimese katse käigus kasutati nõrgema betooni survetugevusklassi, kus 40 liitri betoonisegu koostamisel kasutati 8095 g vett ja 10 liitrise segu koostamisel 2024 g vett. Teine katse sooritati tugevama survetugevusklassiga ning 40 liitrise segu koostamisel kasutati 8992 g vett ja 10 liitrises segus 1612 g vett.

Tabel 5. Vee kogused betoonisegude koostamisel (autori koostatud)

Survetugevusklass	Katse nr.	Segu kogus (l)	Vee kogus (g)
C35/45	1. katse	40	8095
		10	2024
C50/60	2. katse	40	8992
		10	1612

Katsetatavate segude jaoks kaalub autor vajaminevad materjalid 40 ja 10 liitrilistele segudele. Eraldi tuleb kaaluda vee kogus, et saavutada vajaminev betooni töödeldavuse klass.

Proovisegude tegemiseks valas autor töötavasse segistisse (joonis 6) materjale järgnevalt:

- liiva ja killustikku, mida segas omavahel ühe minuti;
- lisas tsementi ja lasi kogu segul ühe minuti seguneda;
- lisas segule aeglaselt osa veest, seejärel kaalutud plastifikaatori ja ülejäänud vee.

Joonis 6. Betoonisegu valmistamise segisti C165, tootja Matest (autori pilt).

Segu konsistent määratakse käesolevas töös koonuse vajumi järgi. Selleks on välja toodud vajumiklassid (tabel 6), mida saab järgida õige betooni survetugevusklassi saavutamiseks. Betooni vajaminev vajumiklass survetugevusel C35/45 on S4 ja C50/60 on S5. Vajumiklassi läbiviimiseks läheb vaja alust, koonuse kujulist vormi (Abramsi koonus), metallist varrast, segu tõstmiseks kühvlit ning kellut, millega viimane lisatud kiht koonusel sirgeks siluda. Koonuse all olev plaat pritsiti üle õliga, mis ei lase betoonil alust rikkuda ja hiljem on kergesti puhastatav. Õli lükatakse kummist harjaga laiali ja üleliigne osa maha. Koonus asetati alusele ja segu hakati tõstma koonusesse. Betoon tõstetakse kolmes kihis anumasse, igat kihti on vaja tühimike vältimiseks 25 korda surkida. Anuma täitumisel betooniga tõstetakse koonus ettevaatlikult üles ja lastakse segul valguda oma raskuse jõul laiali. Samal ajal keeratakse koonus tagurpidi segu kõrvale ja pannakse metallist varras anuma peale ja viiakse läbi mõõtmised (joonis 7). Mõõtmiseks kasutati mõõdulinti, mis on mm täpsusega. Saadud tulemus määras ära antud betoonisegu töödeldavuse.

Tabel 6. Betoonisegu vajumiklassid ehk töödeldavusklassid (Kiviste 2010)

Klass	Vajum, mm
S1	10…40
S2	50…90
S3	100…150
S4	160…210
S5	≥220

Joonis 7. Vajumikatse mõõtmine Abramsi koonuse abil (pilt A.Viiding).

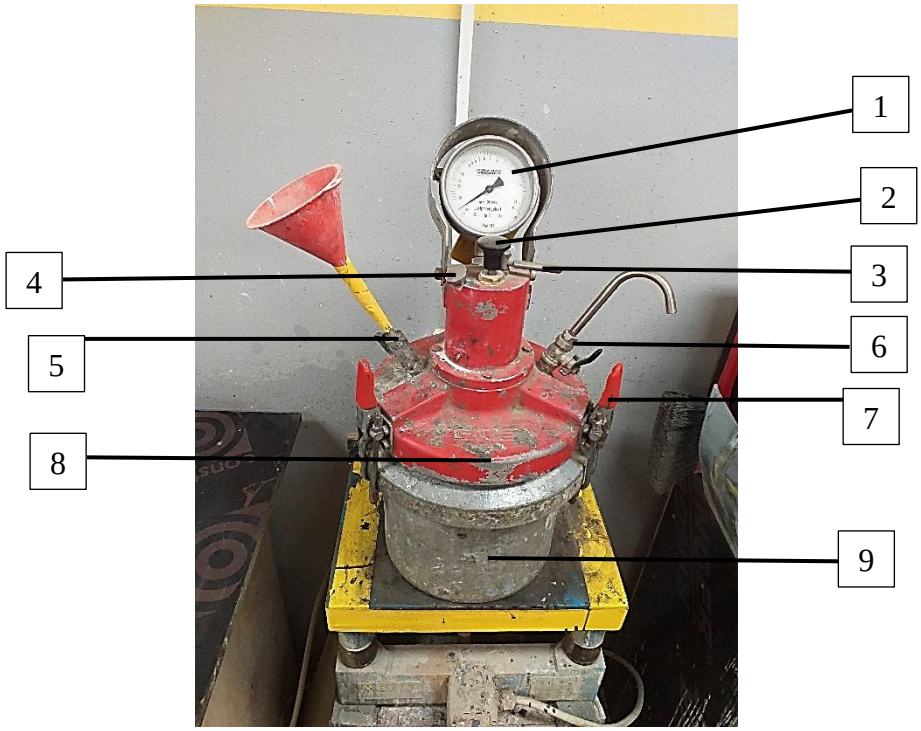
Autor mõõdab betoonisegude temperatuuri digitaalse termomeetriga (*Digital Thermometer*) (joonis 8). Mõõtepiirkond (*range*) -50 ºC kuni 300 ºC, mõõtetäpsus (*accuracy*) 0,1 ºC. Selleks on termomeetril varras, mis asetatakse segu sisse. Peale mõnesekundilist segus hoidmist annab aparaat tulemuse.

Joonis 8. Digitaalne termomeeter (*Digital Thermometer*) betoonisegu temperatuuri mõõtmiseks (autori pilt).

Segu tiheduse leidmiseks võeti tühi nõu, mis tuli ära kaaluda. Antud katsetes kasutati selleks nõuks tühja kuubikute vormi. Nõu täideti betooniga ja tihendati. Nõu peal olev betoonipind tuli tasandada kelluga või metalljoonlauaga. Seejärel kaaluti kogu nõu koos betooniga ja lahutati sellest nõu kaal.

Õhusisaldust segudes mõõdeti Luftporengehalt 8 liitrise B2020 aparaadiga, tootja Form+Test Seidner ja Co. GmbH (joonis 9). Mõõtepiirkond 0-50% ja mõõtetäpsus 1%. Selleks tuli aparaadi alumisse nõusse (9) valada betoonisegu, mis vibreerides tihendati ning üleliigne osa tuli pealt ära pühkida. Nõu servad oli vaja lapiga betoonist puhtaks teha, misjärel asetati mõõtmisosa (8) nõule ja kinnitati kolme kinnitiga (7). Seejärel tuli avada käepidemeid ülesse pöörates aparaadi küljes olevad ventiilid (5 ja 6). Ventiilist 5 oli vaja valada vett sisse, mis hakkas ventiili 6 kaudu välja tulema. Vee valamine tuli lõpetada, kui ventiilist 6 hakkas vesi välja jooksma. Selle protsessiga tuli üleliigne õhk aparaadist välja. Seejärel oli vaja vabastada õhunupp (2), mida pidi pöörama vastupäeva ja seda oli vaja pumbata seni kuni manomeetri näit oli 10 mm üle punase kriipsu. Seejärel tuli peenseade kruvi keerata vastupäeva nii palju, et manomeetri osuti jääks seisma täpselt punasel kriipsul.

Peenseade kruvi (4) tuli päripäeva pööramisega sulgeda ning kinni keerata ventiilid viis ja kuus. Katse algas kangi (3) vajutamisega, mida oli vaja all hoida umbes 20 sekundit kuni manomeetri osuti ei liikunud enam. Vajadusel võib sõrmega manomeetri klaasile (1) koputada veendumaks, et osuti on paigale jäänud. Manomeetrilt on näha tulemust, mis on protsentides. Kui tulemus oli teada, tuli ventiilid viis ja kuus avada ning rõhk, ventiili keerates vastupäeva, välja lasta. Seejärel oli vaja eemaldada kogu mõõteosa ja tühjendada nõu segust. Seadme mõlemad osad tuli hoolikalt segust puhastada.



Joonis 9. Õhusisaldust (%-des) määrav seade Luftporengehalt (autori pilt).

Peale betoonisegude uurimist valati segu vormidesse (joonis 10). Vormide mõõtmeteks valiti 100 · 100 · 100 mm. Kindlat tüüpi segude tuvastamiseks lisas autor esialgse sedeli, kus oli peal mitme tunnise seguga on tegu.

Joonis 10. Betoonisegu vormides (autori pilt).

Teisel päeval võeti tahenenud katsekehad vormidest välja ning iga katsekeha peale kirjutati, mis kuubikuga tegemist on (joonis 11). Kuubikute markeering sisaldas vormidesse valamise kuupäeva, mitme tunnise kuubikuga oli tegemist (0, 1, 2, 3), kuubiku järjekorranumber (1- 10) ja kuubik vanust (2 päeva, 7 päeva, 28 päeva).

Joonis 11. Vormidest väljavõetud markeeringutega kuubikud (autori pilt).

Enne survetugevuse mõõtmist kaalus autor kõik katsekehad Ohaus Ranger kaalul (joonis 12) tiheduse arvutamiseks. Maksimaalne raskus 12 kg ja kaalu loetavus on 1 g.

Joonis 12. Kaal Ohaus Ranger, katsekehade kaalumiseks (autori pilt).

Survetugevuse määramiseks kasutati katsetamisseadet Controls 50-C46V2 (joonis 13), mille maksimaalne survetugevus on 2000 kN. Masina maksimaalne vertikaalne vahemik on 350 mm ja horisontaalne vahemik on 310 mm. Kuubikute andmed sisestati Digimax Plus näidikusse, mille ekraanile ilmus survetugevuse näit megapaskalites (MPa).

Joonis 13. Survetugevuse katsetamisseade 50-C46V2 Controls ja näidik Digimax Plus 50-Q0802 (autori pilt).

3.2. Tsemendi tardumisaja määramine

Alguses tuli paika saada tsemendi taina normaalkonsistent, mille õige konsistentsiga jääb Vicat´ seadme silindriline detail segus peatuma 5-7 mm põhjast. Tabelis 7 on saadud segude tulemused, kus silinder jäi peatuma proovi põhjast 5 mm. Tardumisaega mõõdeti kolmel proovil, selleks segati kokku tsement ja vesi. Esimese tsemendi massi puhul jäi taigen liiga kuivaks, seega lisas autor 11 g vett juurde, mida oli liiga palju. Seetõttu oli vaja segule tsementi juurde lisada. Normaalse konsistentsi saavutamiseks lisati 20,5 g tsementi juurde. Teise segu koostamisel võeti nii tsementi kui ka vett rohkem, et saaks täita kaks silindrit tardumise mõõtmiseks. Lisas 4 on toodud pilte katsest.

Tabel 7. Tsemenditaigna normaalkonsistents (autori koostatud)

Katse nr	Tsement g	Vesi		Silindri peatumine proovi põhjast (mm)
		g	%	
1	420,5	131	31,15	5
2 ja 3	595	195	32,82	5

Tardumisaja alguseks saadi esimese proovi korral 125 minutit, mis sisaldas 420,5 g tsementi ja 131 g vett. Teise ja kolmanda proovi tardumisaja alguseks saadi 123 minutit, mille segu sisaldas 595 g tsementi ja 195 g vett.

3.3. Katse käik

Laborikatsete jaoks koostati plaan, kuna aeg oli oluline tegur antud katse puhul. Katse läbiviimiseks tuli täpselt teada, mida teha oli vaja ja mis järjekorras. Kõik mõõtmised, betooni vormidesse valamised, uue segu materjali kaalumised ja kokku segamised tuli teha kindlas järjekorras (lisa 1).

Null tunniste katsekehade (kontrollkatsekehad) jaoks valmistati 40 liitrit betoonisegu, millel määrati temperatuur, töödeldavus, õhusisaldus ja seejärel tõsteti segu vormidesse. Töödeldavuse klass katsete puhul oli S4 ja S5. Katsekehade vormide suuruseks valiti 100 · 100 · 100 mm. Peale segu vormidesse tõstmist tuli neid vibreerida, et betoon oleks vormis ühtlaselt. Null tunniseid katsekehasid valmistati 10 tükki. Seisma jääv betoon võeti segistist välja ja hoiustati ämbris.

Kolmkümmend minutit seisnud taaskasutatava betooniseguga viidi läbi pooletunnised katsed. Selleks segati enne katsete sooritamist segu segistis üks minut. Seejärel mõõdeti töödeldavust (Abramsi koonusega) ja temperatuuri. Taaskasutatav segu hoiustati ämbris, millele pandi peale polüetüleenkile, et kaitsta segu otsese õhu eest.

Tund aega seisnud taaskasutatav segu tõsteti segistisse, mida segati üks minut. Seejärel mõõdeti seisnud betooni töödeldavus, temperatuur ja jääkbetooni tihedus. Samal ajal tuli segada ka värske kümneliitrine betoonisegu, mille materjal kaaluti eelneva poole minuti jooksul valmis. Omavahel segati kokku 40% värsket betooni ja 60% taaskasutatavat betooni. Algse betooni töödeldavuse saamiseks tuli lisada segule vett, mis liideti juurde segus olevale vee kogusele. Saadud uuel segul (värske + jääk) määrati töödeldavus, temperatuur, õhusisaldus ja seejärel tõsteti segu vormidesse. Ühe tunniseid katsekehasid valmistati 10 tükki.

Ämbris seisnud taaskasutatava betooniga viidi läbi pooleteise tunnised katsed. Mõõdeti töödeldavust Abramsi koonusega ja segu temperatuuri. Enne katsete sooritamist segati segu üks minut segistis.

Taaskasutatav betoon seisis kaks tundi polüetüleenkilega kaetud ämbris. Seisnud betooniga viidi läbi töödeldavuse katse, mõõdeti temperatuuri ja jääkbetooni tihedust. Samal ajal tuli segada uus värske kümneliitrine betoonisegu. Eelnevalt kaaluti vajamineva koguse jaoks materjal. Omavahel segati kokku 60% värsket betooni ja 40% taaskasutatavat betooni. Algse betooni töödeldavuse saamiseks tuli segule lisada vett, mis liideti juba segus olevale vee kogusele. Seejärel määrati uue segu (värske + jääk) töödeldavus, temperatuur, õhusisaldus ning pärast mõõtmisi tõsteti segu vormidesse. Kahe-tunniseid katsekehasid valmistati 10 tükki.

Kaks ja pool tundi seisnud taaskasutatava seguga viidi läbi töödeldavuse katse Abramsi koonusega ja mõõdeti segu temperatuur. Enne katsete sooritamist segati segu üks minut segistis.

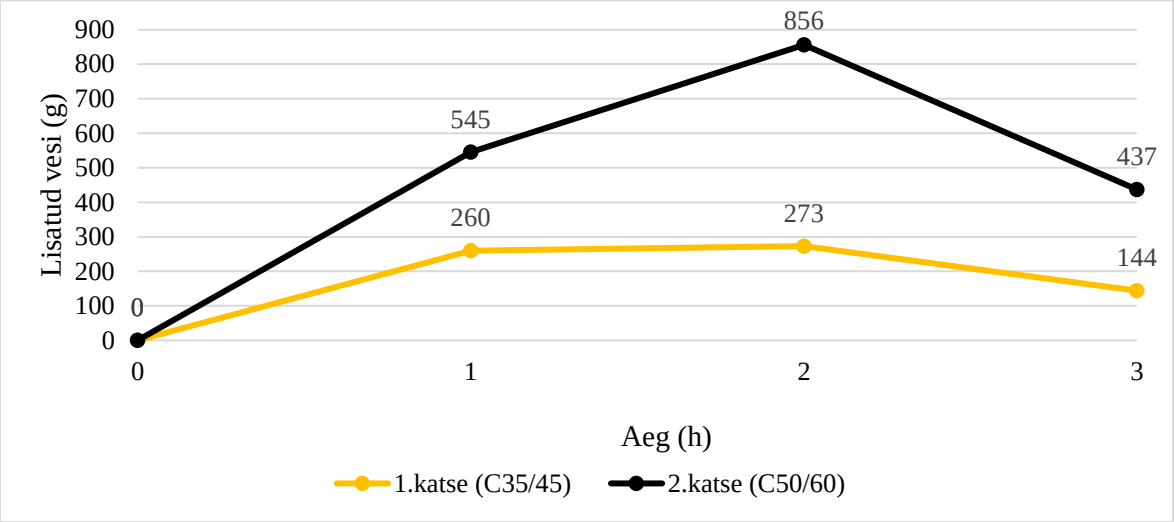
Taaskasutatav betoon oli seisnud polüetüleenkilega kaetud ämbris kolm tundi, kui viidi läbi seisnud betooniga töödeldavuse katse, mõõdeti temperatuur ja jääkbetooni tihedus. Samal ajal tuli segada uus värske kümneliitrine betoonisegu, milleks kaaluti vajaminev kogus materjali eelneva poole tunni jooksul. Omavahel segati kokku 80% värsket betooni ja 20% taaskasutatavat betooni. Algse betooni töödeldavuse saamiseks tuli segule lisada vett, mis liideti juba segus olevale vee kogusele juurde. Uuel segul määrati (värske + jääk) töödeldavus, temperatuur, õhusisaldus ja tõsteti seejärel vormidesse. Kolme-tunniseid katsekehasid valmistati 10 tükki.

3.4. Katse tulemused

Katsetulemuste võrdluseks tehti kontrollsegu 0 tundi, mida võrreldakse taaskasutatud betoonisegu sisaldavate kuubikutega. Ühetunnine betoonisegu sisaldas 60% taaskasutatud segu, mis seisis üks tund, millele lisati 40% värsket (taaskasutamata) betooni. Kahetunnine betoonisegu sisaldas 40% taaskasutatud segu, mis seisis kaks tundi, millele segati juurde 60% värsket betooni. Kolmetunnine betoonisegu sisaldas 20% taaskasutatud segu, mis seisis kolm tundi, millele segati 80% värsket betooni lisaks.

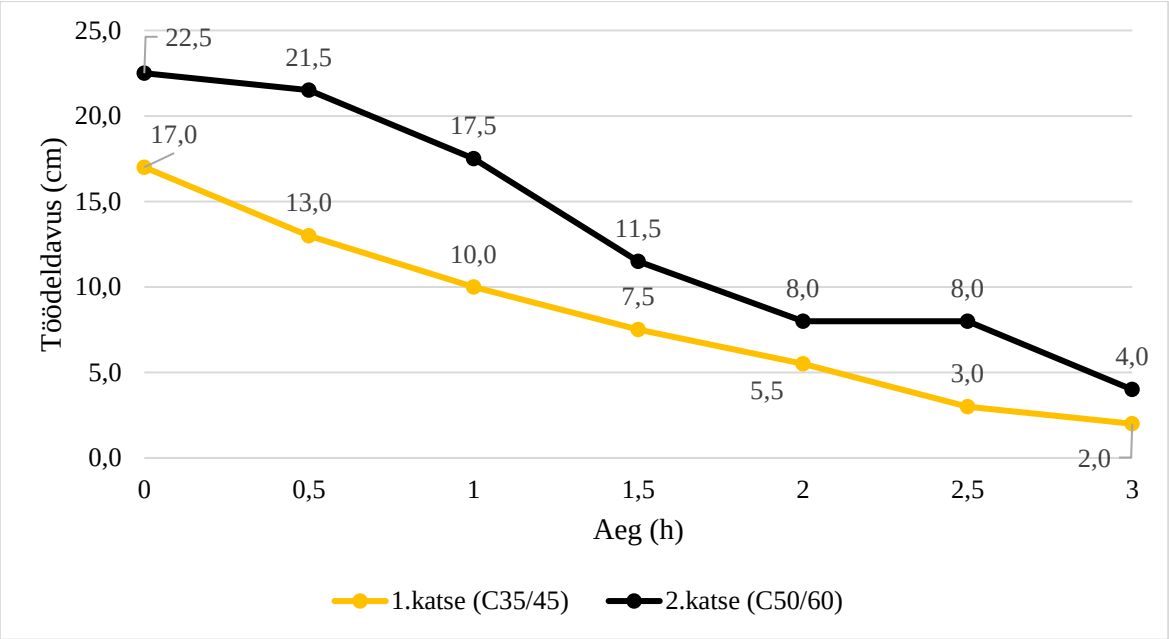
Esimene oluline aspekt oli kindla koguse vee määramine segus, et saavutada vajaminev töödeldavus. Jooniselt 14 on näha, et taaskasutatava ja uue segu kokku segamisel tuli kasutada lisavett. Juba ühe tunni möödudes oli vaja segule täiendavat vett vajaliku töödeldavuse saavutamiseks ning vee kogus tõusis lisaks kahetunnise segu korral. Kolme tunnise segu puhul vee kogus vähenes. Märgatav veekoguste vahe tulenes erinevatest survetugevusklassidest. Betoon survetugevusklassiga C50/60 segu vajab oluliselt rohkem vett kui nõrgema survetugevusklassiga C35/45 olev betoonisegu, mis on tingitud ka erinevatest vajumiklassidest. Esimene katse sooritati C35/45 seguga. Ühe tunni möödudes lisati 260 g vett, kahe tunni möödudes 273 g vett ning kolme tunni möödudes lisati 144 g

vett. Teine katse sooritati C50/60 seguga, millele ühe tunni möödudes lisati 545 g vett, kahe tunni möödudes 273 g vett ja kolme tunni möödudes 437 g vett.



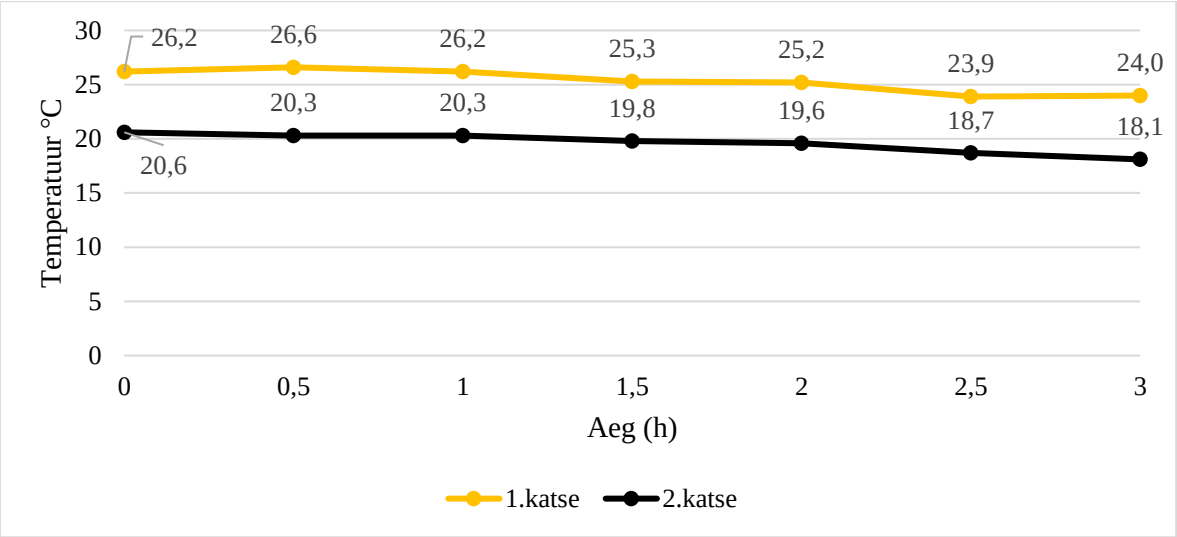
Joonis 14. Betoonisegude C35/45 ja C50/60 vanuse h ning lisavee g suhe (autori koostatud).

Taaskasutatava segu töödeldavust uuris autor iga poole tunni tagant. Esimese ja teise katse tulemused on toodud joonisel 15. Esimese katse algne töödeldavus oli 17,0 cm, mis hakkas seistes järjest vähenema. Peale ühe tunni möödumist oli segu töödeldavus 10 cm, kahe tunni möödudes 5,5 cm ning peale kolme tundi 2,0 cm. Teise katse algse segu töödeldavus oli 22,5 cm. Peale esimest tundi vähenes töödeldavus ning oli 17,5 cm, peale kahte tundi 8,0 cm ja peale kolme tundi 4,0 cm. Kasutades taaskasutatavat betooni, mis on teatud aja seisnud, hakkab betoon tahenema ning töödeldavus muutub kehvemaks. Esimese katse käigus taaskasutatava segu töödeldavus langes iga poole tunniga stabiilselt, ei olnud märgata järske töödeldavuse muutuseid. S4 klassi kuuluvast vajumiklassist segu töödeldavus langes 15,0 cm. Teise katse käigus oli suurt töödeldavuse kadu näha 1 - 1,5 tunni vahel, mil segu töödeldavus oli 6 cm. Segu töödeldavus püsis 2 - 2,5 tunni vahel ning vajum oli 8,0 cm. Peale kolme tunni möödumist oli mõõtmistulemuseks 4 cm. Võrreldes esimest ja teist katset, siis esimese katse segu töödeldavus langes stabiilselt, kuid teise katsega toimus kiire langus katseperioodi keskel ja lõpus oli segu stabiilne.



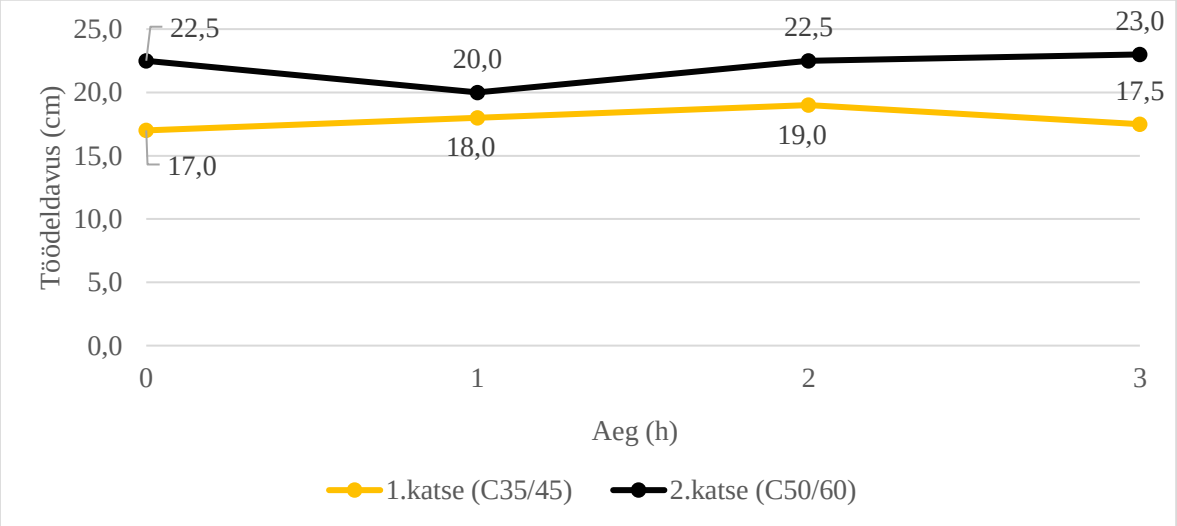
Joonis 15. Taaskasutatava betoonisegu töödeldavus cm võrreldes ajaga h (autori koostatud).

Iga segu puhul tehti temperatuuri kontroll, et teada saada temperatuuri muutuse mõju vajumi kiirusele (joonis 16). Esimene katse viidi läbi sügisel 04.10.2019, kui väline soojem õhutemperatuur ei mõjutanud labori sisetemperatuuri. Värske segu temperatuur oli esimese katse puhul 26,2ºC. Pool tundi seisnud segu muutus 0,4ºC soojemaks. Tund aega seisnud segu temperatuur oli 26,2ºC, mis jätkas langust kuni kahe ja poole tunnini. Esimese katse lõpuks oli taaskasutatava segu temperatuuriks 24,0ºC ning võrreldes eelneva mõõtmisega tõusis 0,1ºC. Segu jahtus seismise käigus 2,7ºC. Temperatuuri stabiilne ja aeglane langus muutis ka töödeldavuse languse lineaarseks. Teine katse toimus talvel 24.01.2020, kui väljas oli võrreldes sügisese kuuga jahedam ning labori temperatuuri vähendas ka ukse lahti tegemine. Värske segu temperatuuriks oli 20,6ºC. Taaskasutatava segu temperatuur langes pidevalt kogu katse jooksul kokku 2,5ºC. Külmemal kuul tehtud katsete temperatuur hoidis segu töödeldavust paremana, kui see oli esimese katse puhul, mil katse sooritati soojemates tingimustes. Kuivamisel kiirendavad kõrgemad temperatuurid betooni kivistumist, mis sai tehtud katsetega kinnitust.



Joonis 16. Taaskasutatava segu temperatuuri ºC andmed võrreldes nulltunnise segu andmetega (autori koostatud).

Joonisel 17 on välja toodud betoonisegu andmed, kus segud 1h, 2h ja 3h sisaldavad taaskasutatavat betooni ja värsket betooni, mis on omavahel kokku segatud. Nulltunnise segu andmed on looduslike materjalidega tehtud betoonisegu. Ümbertöödeldud betooni töödeldavuse parandamiseks on lisatud segule lisavett ning võimalusel on saadud ligilähedane vajum nagu oli nulltunnisel kontrollsegul. Esimese katse keskmiseks vajumiks saadi 17,9 cm, mis jääb S4 klassi. Teise katse keskmine vajum oli 22 cm, mis jääb S5 klassi.

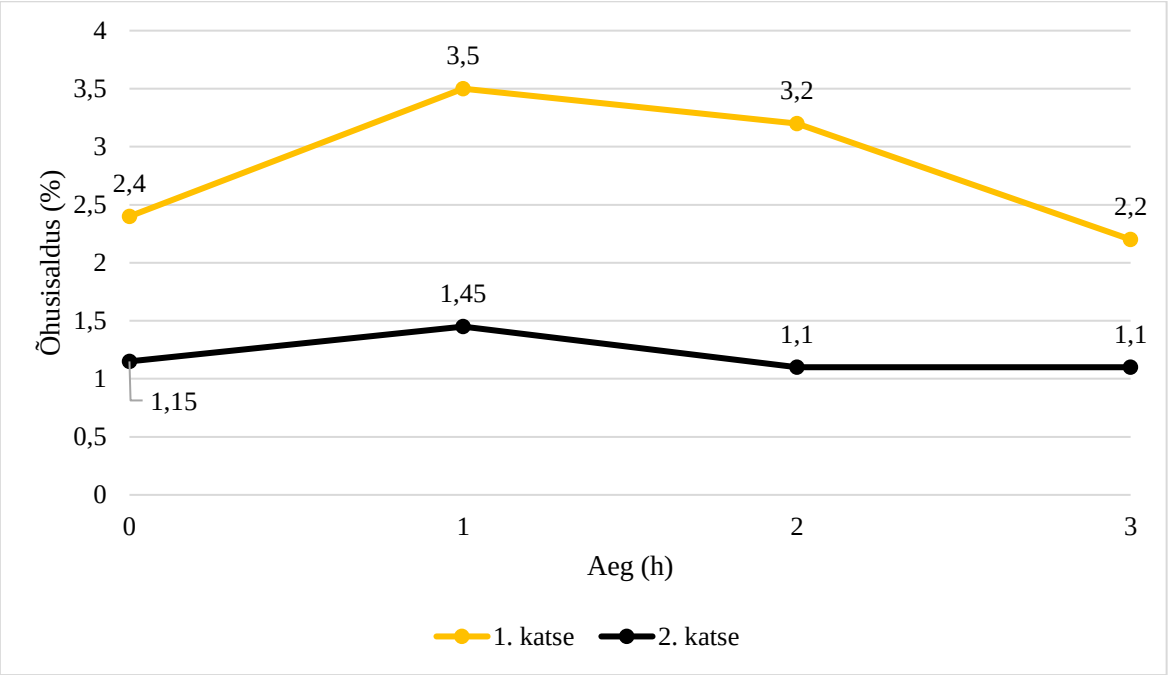


Joonis 17. Betoonisegude (taaskasutatud + värske betoon) töödeldavuse cm ja aja h suhe (autori koostatud).

Ümbertöödeldud segu õhusisaldust uuriti Luftporengehalt aparaadiga (joonis 9). Vähendamaks betoonisegu avatust õhule, kaeti segu polüetüleenkilega kinni. Joonisel 18 on välja toodud õhusisalduse protsendid ümbertöödeldud segudes. Esimese katse puhul oli betoonisegu temperatuur kõrgem kui teisel katsel, millest on tingitud esimese katse suurem õhusisalduse protsent kui teisel katsel.

Esimese katse värske betoon sisaldas 2,4% õhku. Tund aega seisnud taaskasutatava segu õhusisaldus suurenes 1,1% võrra, jäädes 3,5% juurde. Edasi hakkas õhusisaldus langema, kahe tunni möödudes sisaldas 3,2% õhku. Kolm tundi seisnud segu õhusisalduseks oli 2,2%.

Teise katse värske betoon sisaldas 1,15% õhku. Tund aega seisnud taaskasutatava segu õhusisaldus oli 1,45%, seega tõusis õhusisaldus 0,3%. Edasi hakkas õhusisaldus langema, kahe tunni pärast sisaldas betoonisegu 1,1% õhku, mis jäi peale kolme tundi muutumatuks.

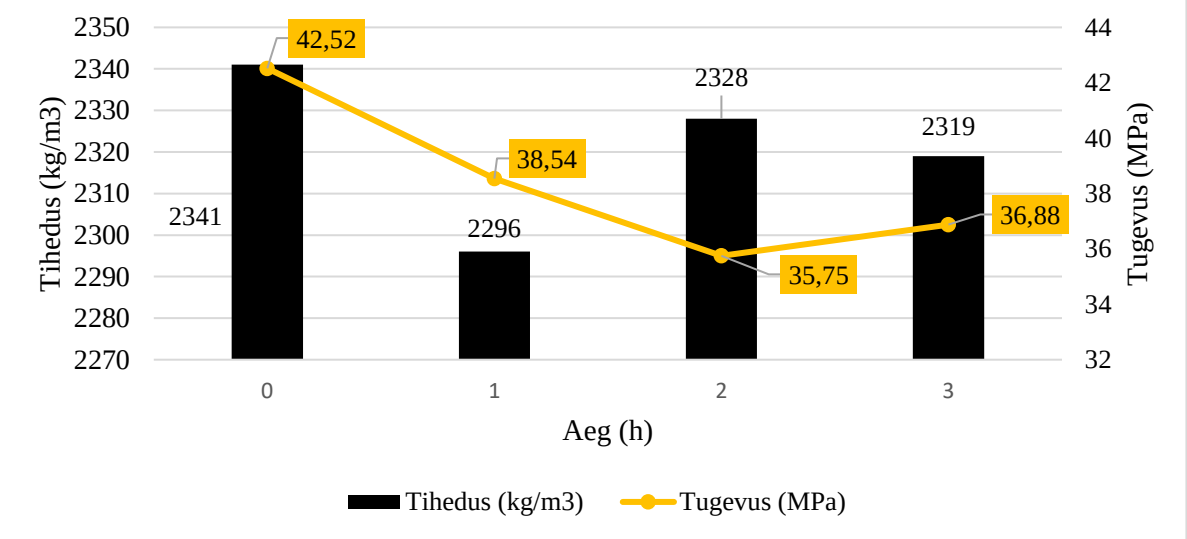


Joonis 18. Õhusisalduse % ja aja h suhe betoonisegudes (taaskasutatud + värske betoon) (autori koostatud).

3.5. Survetugevusandmed

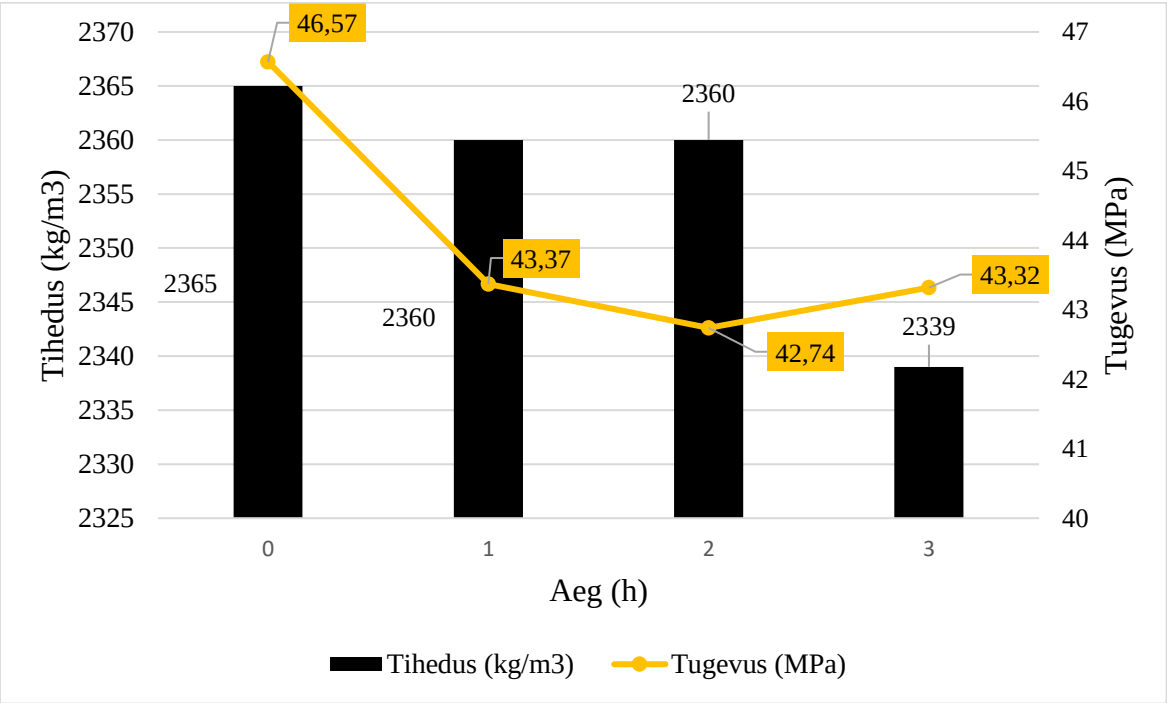
Käesolevas töös uuris autor taaskasutatavast betoonist valmistatud kuupide survetugevusandmeid. Nii esimeses kui ka teises katses valmistati 40 kuupi. Mõlema katse jaoks tehti kontrollsegust 10 kuupi ning iga tunni möödudes (kokku kolm tundi) 10 kuubikut, mis jagunesid 2, 7 ja 28 päevasteks. Kahepäevaseid katsekehasid oli ühe katse kohta 12 kuupi, seitsmepäevaseid 12 tükki ja 28-päevaseid 16 tükki. Joonistel on toodud katsetulemuste keskmised andmed, lisas 2 ja 3 on toodud kõikide kuubikute survetugevuste ja tiheduste andmed.

Kahepäevased survetugevusandmed on toodud joonistel 19 ja 20. Esimeses katses (joonis 19) kasutati betooni, mille survetugevusklassiks oli C35/45. Kontrollsegu kuubikute keskmine tihedus oli 2341 kg/m^3 ja keskmine tugevus 42,52 MPa. Ühetunnise katsekeha tihedus 2296 kg/m^3 ja keskmine tugevus 38,54 MPa. Kahetunnise katsekeha tihedus oli 2328kg/m^3 ja keskmine tugevus 35,75 MPa. Kolmetunnise katsekeha tihedus 2319 kg/m^3 ja keskmine tugevus 36,88 MPa. Kuubikud, mis sisaldavad taaskasutatud betooni, olid kaalult kergemad kui kontrollsegu, mis oli tehtud värskest materjalist. Kuubikud, mis sisaldasid taaskasutatavat betoonisegu olid tugevuselt nõrgemad kui kontrollsegu. Kontrollsegu ja esimese tunni kuubikute tugevuse erinevus oli 3,98 kg/m^3, teise tunni kuubikute tugevus erines 6,77 kg/m^3 ning kolme tunniste kuubikute tugevus erines 5,64 kg/m^3.



Joonis 19. Esimese katse 2-päevaste kuubikute survetugevusandmed MPa ja tihedused kg/m^3 (autori koostatud).

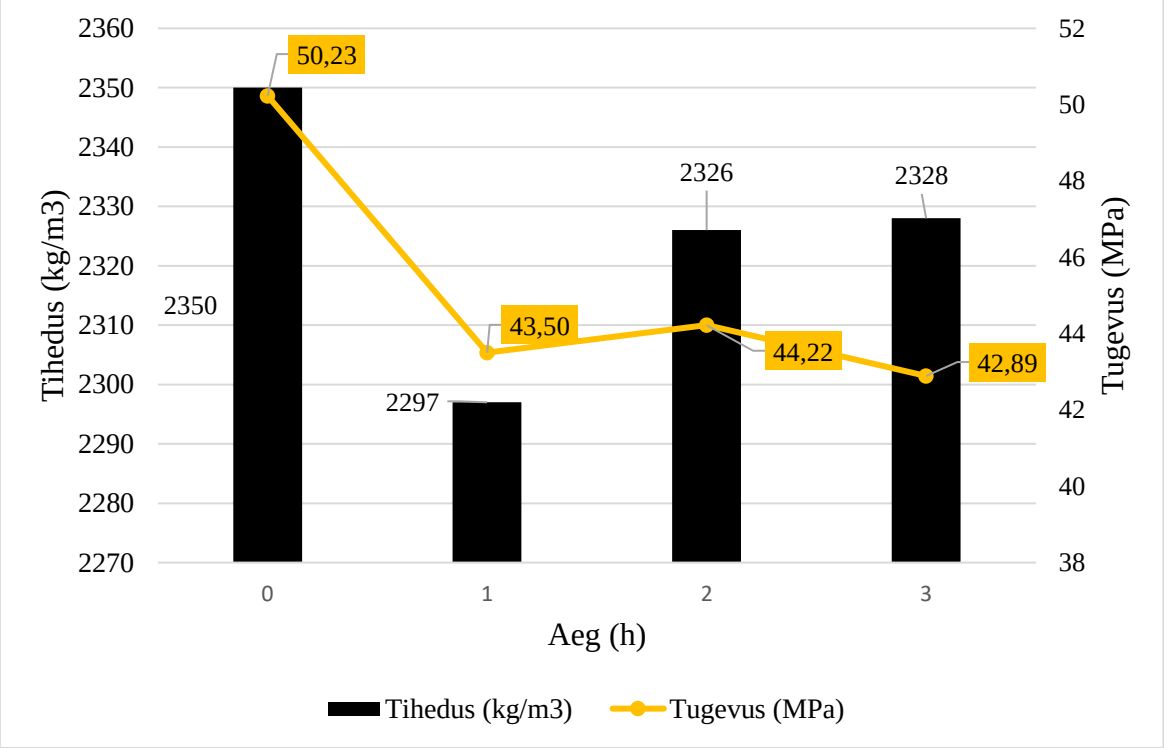
Teise katse kahepäevased tulemused on joonisel 20, kus kasutati betooni, mille survetugevusklass oli C50/60. Kontrollsegu kuubikute keskmine tihedus oli 2365 kg/m^3 ja keskmine tugevus 46,57 MPa. Ühetunnise katsekeha tihedus 2360 kg/m^3 ja keskmine tugevus 43,37 MPa. Kahetunnise katsekeha tihedus oli 2360 kg/m^3 ja keskmine tugevus 42,74 MPa. Kolmetunnise katsekeha tihedus oli 2339 kg/m^3 ja keskmine tugevus 43,32 MPa. Kuubikute tihedus oli esimese ja teise tunnistel katsekehadel sarnane nagu kontrollsegul, vahe oli 5 kg/m^3. Taaskasutatavat betoonisegu sisaldanud kuubikutel oli märgata tugevuse langemist. Kontrollsegu ja esimese tunni kuubikute tugevuse erinevus oli 3,20 kg/m^3, teise tunni kuubikute tugevus erines 3,83 kg/m^3 ning kolme tunni kuubikute tugevus erines 3,25 kg/m^3.



Joonis 20. Teise katse 2-päevaste kuubikute survetugevusandmed MPa ja tihedused kg/m^3 (autori koostatud).

Seitsmepäevaste kuubikute survetugevusandmed on toodud joonistel 21 ja 22. Esimeses katses (joonisel 21) kasutati betooni, mille survetugevusklassiks oli C35/45. Kontrollsegu kuubikute keskmine tihedus oli 2350 kg/m^3 ja keskmine tugevus 50,23 MPa. Ühetunniste

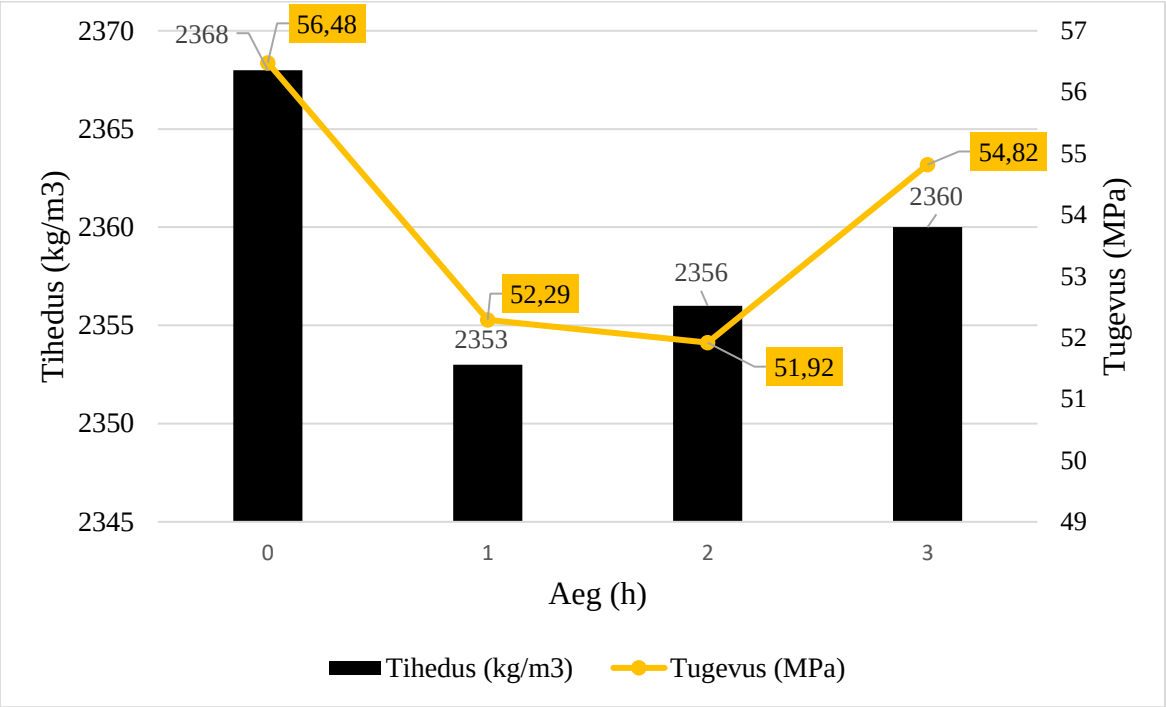
katsekehade keskmine tihedus oli 2297 kg/m^3 ja keskmine tugevus 45,50 MPa. Kahetunniste katsekehade keskmiseks tiheduseks saadi 2326 kg/m^3 ja keskmiseks tugevuseks 44,22 MPa. Kolmetunniste katsekehade keskmine tihedus oli 2328 kg/m^3 ja keskmine tugevus 42,89 MPa. Kuubikud, mis sisaldasid taaskasutatavat betooni olid tiheduselt kergemad kui kontrollsegu, mis on tehtud värskest materjalist. Kuubikud, mis sisaldasid taaskasutatavat betoonisegu, olid tugevuselt nõrgemad kui kontrollsegu kuubikud. Kontrollsegu ja esimese tunni kuubikute tugevuse erinevus oli 6,73 kg/m^3, teise tunni kuubikute tugevus erines 6,01 kg/m^3 ning kolme tunni kuubikute tugevus oli 7,34 kg/m^3 väiksem.



Joonis 21. Esimese katse 7-päevaste kuubikute survetugevusandmed MPa ja tihedused kg/m^3 (autori koostatud).

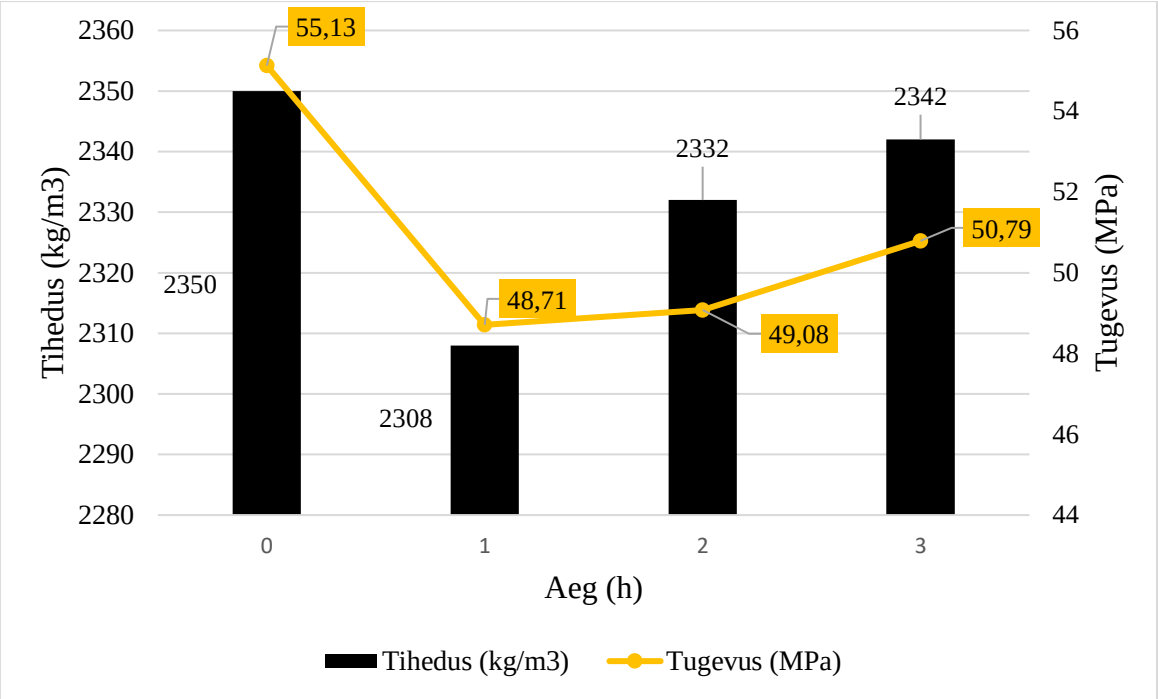
Teise katse seitsmepäevased tulemused on joonisel 22, kus oli kasutusel betoonisegu, mille survetugevusklassiks oli C50/60. Kontrollsegu kuubikute keskmiseks tiheduseks mõõdeti 2368 kg/m^3 ja keskmiseks tugevuseks 56,48 MPa. Ühetunnise katsekeha tiheduseks saadi 2353 kg/m^3 ja keskmine tugevus 52,29 MPa. Kahetunnise katsekeha tihedus oli 2356 kg/m^3 ning keskmine tugevus 51,92 MPa. Kolmetunnise katsekeha tihedus oli 2360 kg/m^3 ja

keskmine tugevus 54,82 MPa. Kontrollsegu ja esimese tunni kuubikute tugevuse erinevus oli 6,42 kg/m^3. Teise tunni kuubikute tugevus oli 6,05 kg/m^3 väiksem ning kolme tunni kuubikute tugevus vähenes 4,34 kg/m^3 võrreldes kontrollsegu kuubikutega.



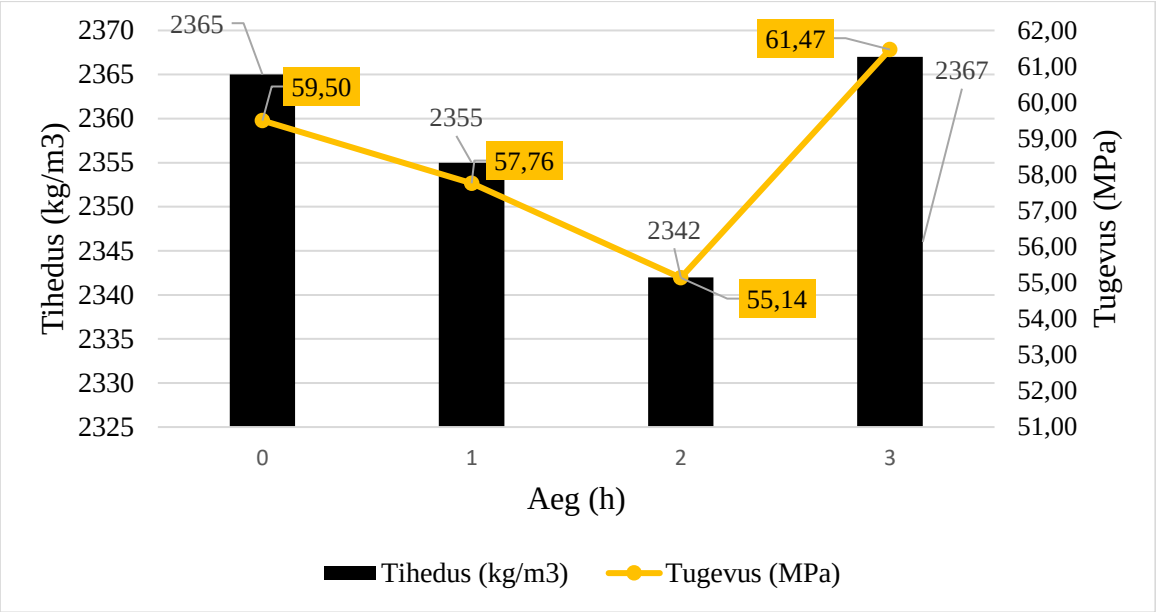
Joonis 22. Teise katse 7-päevaste kuubikute survetugevusandmed MPa ja tihedused kg/m^3 (autori koostatud).

Esimese katse 28-päevaste kuubikute tulemused on joonisel 23, kus oli kasutusel betoonisegu, mille survetugevusklass oli C35/45. Kontrollsegu kuubikute keskmiseks tiheduseks saadi mõõtmisel 2350 kg/m^3 ja keskmiseks tugevuseks 55,13 MPa. Ühetunnisete katsekehade tihedus oli 2308 kg/m^3 ja keskmine tugevus 48,71 MPa. Kahetunnisete katsekehade tiheduseks saadi 2332 kg/m^3 ja keskmiseks tugevuseks 49,08 MPa. Kolme tunnise katsekeha tihedus oli 2342 kg/m^3 ja keskmine tugevus 50,79 MPa. Kontrollsegu ja esimese tunni kuubikute tugevuse erinevus oli 6,42 kg/m^3, teise tunniste kuubikute tugevus 6,05 kg/m^3 vähem ning kolme tunniste kuubikute tugevus võrreldes kontrollseguga oli 4,34 kg/m^3 väiksem.



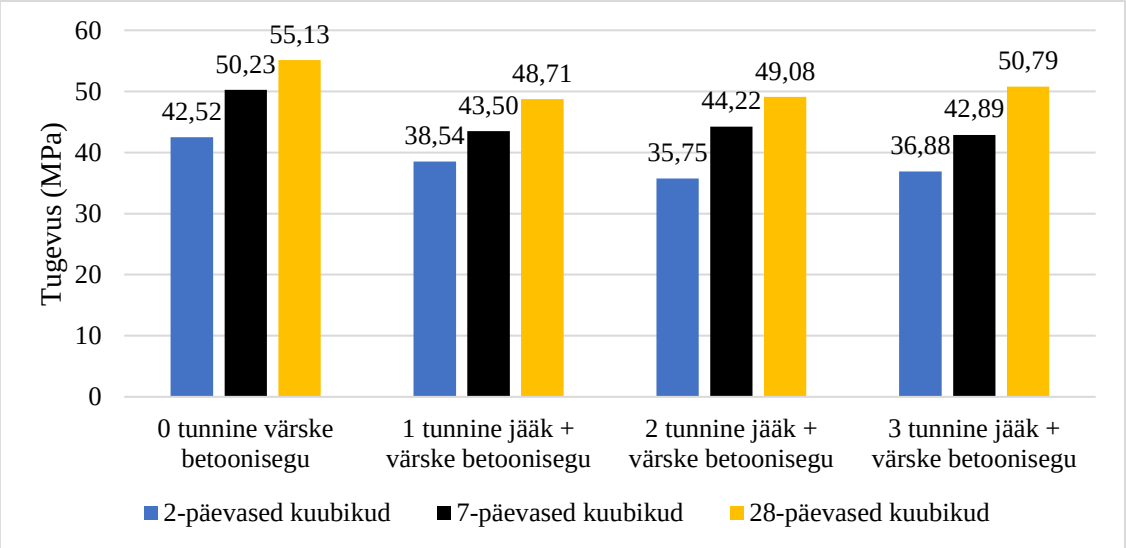
Joonis 23. Esimese katse 28-päevaste kuubikute survetugevusandmed MPa ja tihedused kg/m^3 (autori koostatud).

Teise katse 28-päevased tulemused on joonisel 24, kus oli kasutatud betoonisegu, mille survetugevusklass oli C50/60. Kontrollsegu kuubikute keskmine tihedus oli 2365 kg/m^3 ja keskmine tugevus 59,50 MPa. Ühetunniste katsekehade tihedus oli 2355 kg/m^3 ja keskmine tugevus 57,76 MPa. Kahetunniste katsekehade tihedus oli 2342 kg/m^3 ja keskmine tugevus 55,14 MPa. Kolmetunnise katsekeha tiheduseks saadi 2367 kg/m^3 ja keskmiseks tugevuseks 61,47 MPa. Kontrollsegu ja esimese tunni katsekehade tugevuse vahe oli 1,74 kg/m^3 väiksem, teise tunniste kuubikute tugevus erines 4,36 kg/m^3 ning kolme tunniste kuubikute tugevus muutus suuremaks -1,97 kg/m^3. Kolmetunniste katsekehade survetugevused olid ettenähtud tugevusest paremad.



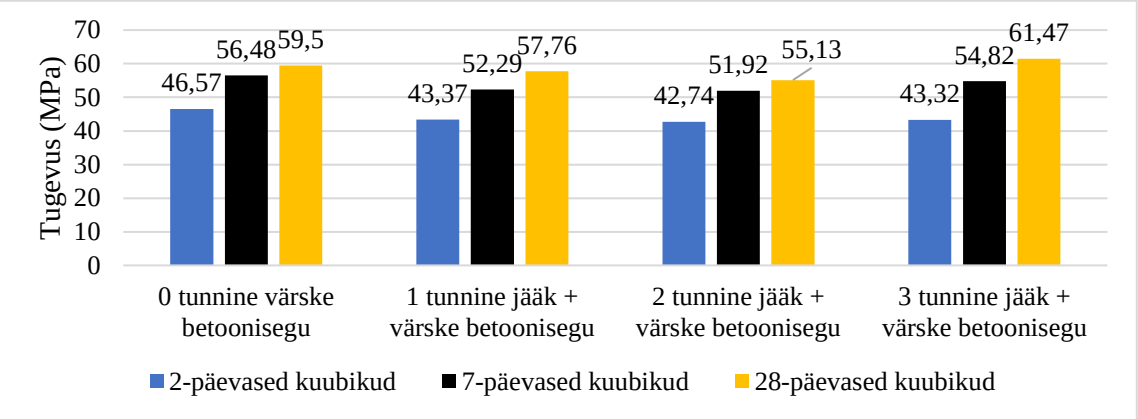
Joonis 24. Teise katse 28-päevased kuubikute survetugevusandmed MPa ja tihedused kg/m^3 (autori koostatud).

Joonisel 25 on toodud esimese katse kuubikute keskmised survetugevused 2, 7 ja 28- päeva vanuselt, kus on jälgitav tugevuse kasv. Null tunnised katsekehad on valmistatud värskest betoonisegust. Ühe, kahe ja kolmetunnised kuubikud sisaldavad taaskasutatavat betooni.



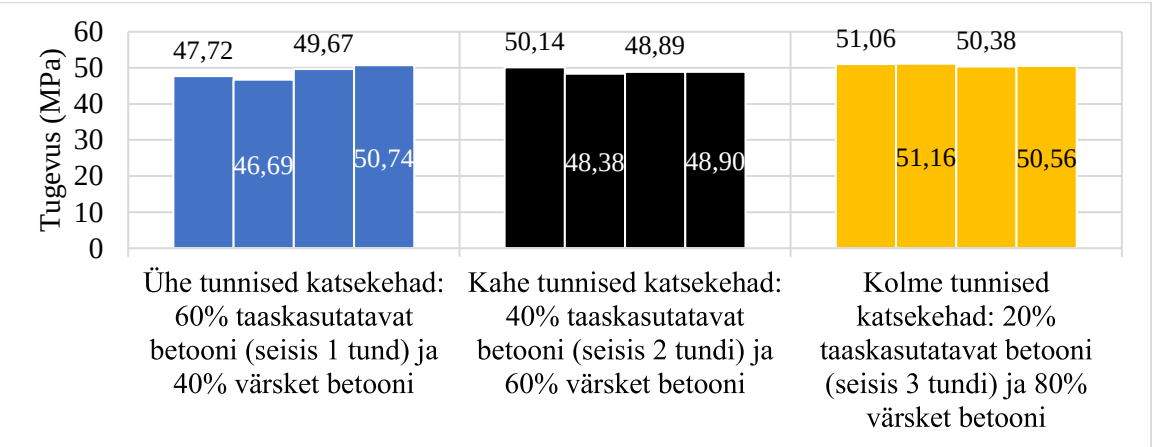
Joonis 25. Esimese katse kuubikute (2-päevaste, 7-päevaste, 28-päevaste kuubikute) keskmised survetugevused (MPa), betooni klassiga C35/45 (autori koostatud).

Joonisel 26 on välja toodud teise katse survetugevusandmed, kus kasutati betoonisegu klassiga C50/60. Jälgitav on tugevuse kasv nii null, ühe, kahe ja kolmetunnistel betoonisegudel. Null tunniste kuubikute tugevused on võrdlevateks andmeteks teiste kuubikutega, mis sisaldavad taaskasutatavat betoonisegu.



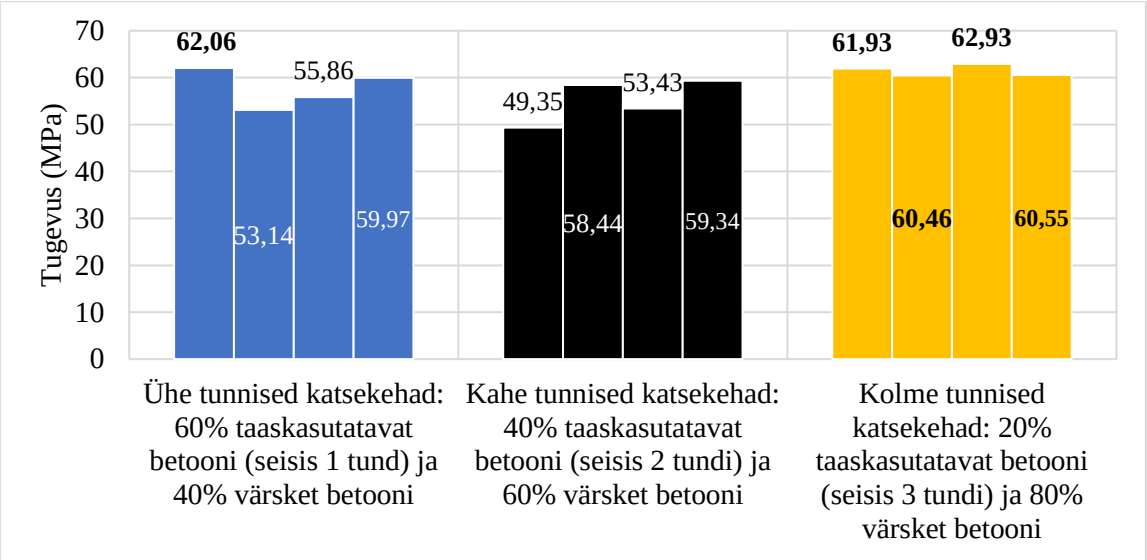
Joonis 26. Teise katse kuubikute (2-päevaste, 7-päevaste, 28-päevaste kuubikute) keskmised survetugevused (MPa), betooni klassiga C50/60 (autori koostatud).

Esimese katse 28-päevased kuubikud peaksid mõõtmisel andma tugevuse 45 MPa või rohkem. Katsetulemustest selgus, et kõik katsekehad, mis sisaldasid taaskasutatavat betooni ületasid 45 MPa (joonis 27). Töö alguses püstitatud hüpotees, et peale teatud aja möödumist on võimalik segu uuesti kasutada, millega oleks tagatud peamised betooni omadused (näiteks survetugevus), peab valmistatud betoonisegude puhul paika.



Joonis 27. Esimese katse 28-päevaste (ühe, kahe ja kolme tunniste) katsekehade survetugevusandmed (MPa) (autori koostatud).

Teise katse kuubikute tulemused (joonis 28) peaksid mõõtmisel andma 60 MPa või rohkem, mis kehtis kolme tunniste katsekehade puhul, kus segu sisaldas 20% taaskasutatavat ja 80% värsket betoonisegu. Seega pidas teise katse puhul püstitatud hüpotees osaliselt paika. Joonisel 28 on toodud välja kuubikud, mille survetugevused on üle 60 MPa.



Joonis 28. Teise katse 28-päevaste (ühe, kahe ja kolme tunniste) katsekehade survetugevusandmed (MPa) (autori koostatud).

Tugevama survetugevusklassiga (antud juhul C50/60) betoonisegude puhul tuleb jälgida taaskasutatava betooni koguseid, mis lisatakse värskele betoonile. Esimese katse katsekehade purunemispildid on toodud lisas 5 ja teise katse pildid lisas 6.

KOKKUVÕTE

Töö annab ülevaate taaskasutamisest nii Eestis kui ka mujal maailmas. Üha rohkem on hakatud pooldama ja tegelema taaskasutamisega, sest ressursse ei jätku lõpmatuseni. Värske betoonijäätmete kõrvaldamine või selle minimeerimine toob kaasa mitmeid eeliseid, mille hulka kuuluvad taastumatute loodusvarade tarbimise, prügilate, energiatarbimise ning tsemendi tootmise käigus tekkiva reostuse vähenemine. Taaskasutamisega alustati tegelemist 1940-ndatel aastatel. Praeguseks on antud valdkond palju edasi arenenud ning juurde on loodud erinevaid võimalusi taaskasutamiseks. Varasemad katsed 10%, 20%, 30%, 40% ja 50% taaskasutatava betooni kasutamisel uue betooni valmistamiseks on oldud edukad. Nendest uuringutest võib järeldada, et betooni segamisel taaskasutatava betooniga võib saada paremaid tulemusi kui täielikult looduslikke materjale sisaldava seguga.

Käesoleva magistritöö eesmärk oli uurida tagastatud betooni taaskasutamist uue betoonisegu koostamisel. Katsete tulemused annaksid ettevõtetele võimaluse kokku hoida täiendavaid kulusid, mis tekivad seoses prügilas käimiste ja uute materjalide hankimisega.

Magistritöös uuriti erinevaid betoonisegusid, mis sisaldasid 0%, 20%, 40% ja 60% taaskasutatavat seisvat betooni. Autor uuris betoonisegude erinevate proportsioonide käitumist valmis segatud betoonis ja aeglaselt tarduvas betoonis, mis on segatud uuesti ringlusse võetud betoonist. Katsetes uuriti segude töödeldavust Abramsi koonusega, lisatud vett, õhusisaldust betoonis, survetugevust ja lisaks tehti tsemendi tardumise katse. Katsekehad valmistati TMB Elemendi laborites, kus viidi läbi kõik survetugevuskatsed. Kokku tehti 80 katseseeriat, esimese katsega kasutati betooniklassi C35/45 ja teisel korral kasutati betooniklassi C50/60. Antud katsete eesmärk oli teada saada, kas seisnud betooni saab uuesti kasutada värskes betoonisegus, milles oleks tagatud vajaminev betooniklass. Esimesel ja teisel katsel valmistati neli segu. Esimesena valmistati nulltunnised katsekehad, mis sisaldasid värskest materjalist valmistatud betoonisegu. Ühetunnised katsekehad sisaldasid 60% taaskasutatud betooni, mis seisis tund aega, mis segati 40% värske betooniga. Kahetunnised katsekehad sisaldasid 40% taaskasutatud betooni, mis oli kaks tundi seisnud

ning kuhu lisati 60% värsket betooni. Kolmetunnised katsekehad sisaldasid 20% taaskasutatud betooni, mis seisis kolm tundi ja segati 80% värske betooniga. Kokku valmistati kahe katsega 80 katsekeha, mis olid suuruses 100 · 100 · 100 mm. Katsekehad jaotati kahepäevasteks, kus oli 24 kuupi, seitsmepäevasteks, kus oli 24 kuupi ning 28-päevasteks, kus oli 32 kuubikut.

Taaskasutatava betoonisegu (C35/45 betooniklass) keskmine töödeldavus seitsmes seerias oli 7,4 cm. Betooniklassi C35/45 töödeldavus esimesel katsel mõõdeti 17 cm ning peale kolme tunni möödumist mõõdeti vajumiks 2 cm. Teisel katsel mõõdeti betoonisegu (C50/60 betooniklass) keskmiseks töödeldavuseks seitsmes seerias 13,3 cm. Teine katse toimus betooniklassiga C50/60, kus mõõdeti algseks töödeldavuseks 22,5 cm ja peale kolme tundi saadi vajumiks 4 cm. Värske betooni ja taaskasutatava betooni kokku segamisel oli vaja töödeldavuse parandamiseks juurde lisada vett. Katsete käigus selgus, et vajaminev vee kogus kasvas vanuse suurenedes kahe tunnini ja seejärel hakkas vähenema. Esimesel katsel lisati ühetunnisele segule 260 g vett, kahetunnisele segule 273 g vett ja kolmetunnisele segule 144 g vett. Teisel katsel lisati ühetunnisele segule 545 g vett, kahetunnisele segule 856 g vett ja kolmetunnisele segule 437 g vett. Katsete käigus mõõdeti taaskasutatava segu temperatuurimuutuseid. Esimesel katsel oli värske betooni temperatuur 26,2ºC, mis langes kolmanda tunni lõpuks 24,0ºC. Teisel katsel oli värske betoonisegu temperatuur 20,6ºC ja kolm tundi seisnud betoonisegul mõõdeti temperatuuriks 18,1ºC. Sisetingimustes tehtud katsete temperatuuride erinevus esimese ja teise katse puhul oli tingitud välistemperatuurist, mis mõjutas laboriõhu temperatuuri. Esimene katse sai sooritatud oktoobris, kui väljas oli soojem ja teine katse sooritati jaanuaris, kui väljas oli jahedam. Temperatuuride erinevusest selgus, et väline temperatuur mõjutas labori temperatuuri, mis omakorda mõjutas betoonisegude temperatuuri.

Survetugevust uuriti katsekehadel kolmes jaos ehk 2-päevastel, 7-päevastel ja 28-päevastel kuubikutel. Koos survetugevusega mõõdeti kuubikute tihedust, millega selgus, et taaskasutatava segu lisamine muudab kuubikud kergemaks. Esimese katse betooniklassiks oli C35/45, mille survetugevusklass kuubikutel peab olema 45 MPa või rohkem. Nulltunniste kontrollkuubikute katseseeria keskmiseks survetugevuseks saadi 55,13 MPa. Järgnevad katsekehad sisaldasid taaskasutatavat betoonisegu ning tulemustest selgus, et kõik katsekehad andsid vajaliku tugevuse (vähemalt 45 MPa). Katsekehade keskmised tulemused

olid ühetunnistel kuubikutel 48,71 MPa, kahetunnistel 49,08 MPa ja kolmetunnistel 50,79 MPa. Esimeses katses saadi kõikide kuubikute tugevused üle 45 MPa. Teise katse betooniklassiks oli C50/60 ja vajaminev survetugevus kuubikutel peab olema vähemalt 60 MPa. Nulltunniste kontrollkuubikute keskmiseks survetugevuseks mõõdeti 59,50 MPa. Neljast kuubikust andsid vajamineva tugevuse (vähemalt 60 MPa) kaks kuubikut, tugevuseks mõõdeti 61,53 MPa ja 61,99 MPa. Järgnevad katsekehad sisaldasid taaskasutatavat betoonisegu, millest selgus, et teise katse kõik kuubikud ei täitnud etteantud tugevuse nõuet. Ühetunniste katsekehade keskmine tugevus oli 57,76 MPa, neljast kuubikust ühel saadi tugevuseks 62,06 MPa. Kahetunniste kuubikute keskmine survetugevus oli 55,14 MPa, neljast kuubikust ei täitnud ükski kuubik nõutavat tugevuse normi. Kolmetunniste katsekehade keskmiseks survetugevuseks mõõdeti 61,47 MPa ning kõigi nelja kuubiku mõõtmistulemused olid rohkem kui 60 MPa.

Katsetulemustest selgus, et taaskasutatavat betoonisegu, betooniklassiga C35/45, on võimalik kasutada uues betoonisegus. Sellega saab vähendada värskete looduslike materjalide lisamist uue segu koostamisel. Tulemustest selgus, et mida suurem on taaskasutatava betoonisegu kogus uue segu valmistamisel, seda rohkem tuleb lisada vett, mis parandab betoonisegu töödeldavust, kuid ei suurenda oluliselt survetugevust. Betooniklassiga C50/60 tuleb uue segu valmistamisel arvestada taaskasutatava segu kogusega. Värskele betoonisegule saab ilma survetugevuse vähenemiseta juurde lisada 20% taaskasutatavat segu. Seega töös püstitatud hüpoteesid, et peale teatud aja möödumist on võimalik segu uuesti kasutada, millega on tagatud peamised betooni omadused (näiteks survetugevus) peavad käesolevas töös paika. Teine hüpotees, taaskasutatud betoon vähendab uute materjalide kasutamist betoonis, saab samuti kinnitust, kuna vajaminevat värsket materjali kulub betoonisegu valmistamiseks vähem.

Magistritöös tehtud katsete puhul tuleks täiendavalt uurida, kuidas käitub taaskasutatavat segu sisaldav betoon külma korral.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Abdel-Hay, A. S.** (2017). Properties of recycled concrete aggregate under different curing conditions. – Lehed 271-276. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404815000553 (17.04.2019)
2. **Babor, D., Plian, D., Judele, L.** (2009) Environmental Impact of Concrete. https://www.researchgate.net/publication/40497595_Environmental_Impact_of_Concrete/download (22.06.2019).
3. Betoonimeister, (2020). Betooni transport. Betoonimikser ehk autobetoonsegisti. [Veebileht] https://betoonimeister.ee/betoon/betooni-transport/betoonimikser/ (16.04.2020)
4. Construction and Demolition Waste (CDW), (2019). Waste. European Commission. Environment. https://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm (25.04.2020)
5. Ehitus- ja lammutusjäätmete käitlusnõuete mõju analüüs. (2015). Keskkonnaministeerium. https://www.envir.ee/sites/default/files/ehitus_ja_lammutusjaatmete_kaitlusnouete_moju_analuus.pdf (19.05.2020)
6. **Ferrari, G., Miyamoto, M., Ferrari, A.** (2014). New sustainable technology for recycling returned concrete. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814000324 (09.02.2020)
7. **Gebremichael, N. N., Mahmoud, S., Karein, M., Karakouzian, M., Jadidi, K.** (2019). Investigation of setting time and compressive strength of ready-mixed concrete blended with returned fresh concrete. 428-435 lk. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818328903 (17.04.2019)
8. Gillmanbuilders. Tsemendi kuivamise aeg. [Veebileht] https://est.gillmanbuilders.com/vremja-shvatyvanija-cementa (02.04.2020)
9. Greenspec. The Environmental Impacts of Concrete. http://www.greenspec.co.uk/building-design/environmental-impacts-of-concrete/ (14.02.2020)
10. History of recycling, (2013). All-Recycling-Facts. http://www.all-recycling-facts.com/history-of-recycling.html (09.05.2020)
11. How to choose the best method of transporting concrete, (2020). The Concrete Network. https://theconcretenetwork.co.uk/choose-best-method-transporting-concrete/ (16.04.2020)

12. **Ideon, T., Osjamets, M., Tamm, I.** (2010). Ehitus- ja lammutusjäätmete sortimisuuring. https://www.envir.ee/sites/default/files/ehitus-lammutusjtmete_uuring_2010.pdf (19.05.2020)
13. Jäätmed – probleem või ressurss? (2019). Euroopa Keskkonnaagentuur. https://www.eea.europa.eu/et/eka-signaalid/signaalid-2014/artiklid/jaatmed-2013-probleem-voi-ressurss (28.04.2020)
14. Jäätmete ladestamine ja taaskasutus, (2018). Keskkonnaagentuur. https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/jatu19.xlsx (19.05.2020)
15. Jäätmete vaheladustamise ülevaade 2011-2017, (2018). Keskkonnaagentuur. (https://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/jaatmete_vaheladustamise_2011-2017_ulevaade-ok.docx (19.05.2020)
16. **Jamal, H.** (2017). Methods of Transportation of Concrete. About civil engineering. https://www.aboutcivil.org/concrete-transportation.html (15.04.2020)
17. **Kalinowska-Wichrowska, K., Pawluczuk, E., Bołtryk, M.** (2020) Construction and building materials. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819328594 (14.02.2020)
18. **Kazaz, A., Ulubeyli, S.** (2016). Current Methods for the Utilization of the Fresh Concrete Waste Returned to Batching Plants. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816327035 (21.09.2019)
19. **Kiisler, E.** (2020). Ehitusjäätmete sortimine on tulevik. Ehitaja 1,2 (243), lk 40-44.
20. **Kiviste**, **M.,** Ehitusmaterjalid, Eesti Maaülikool, Tartu 2010, lk 32
21. **Leblanc, R.** (2017). The Importance of Concrete Recycling. Concrete is the largest component of the C&D Waste Stream. https://www.thebalancesmb.com/the-importance-of-concrete-recycling-2877756 (09.04.2020)
22. **Leemann, A., Loser, R.** (2019). Carbonation resistance of recycled aggregate concrete. – Lehed 335-341. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819301941 (14.03.2019)
23. **Leevik, M.** (2017). Jäätmete taaskasutus numbrites 2006-2016. http://www.ejkl.ee/wp-content/uploads/2015/11/Jaatmete-taaskasutus-numbrites.pdf (19.05.2020)
24. **Otsmaa, V.** (2000). Betooni klass, selle mõiste ja määramine. Ehitaja 9 (51). https://www.knc.ee/system/files_force/assets/document/betooni_klass_selle_moiste_ja_maaramine.pdf?download=1 (26.05.2020)
25. OÜ TMB Element, Betooni õhusisalduse mõõtja B2020 kasutusjuhend, Tartu 2020.
26. **Patel, H.** (2019). 11 Best Methods for Transportation of Concrete. https://gharpedia.com/blog/method-for-transportation-of-concrete/ (16.04.2020)

27. Recycled Materials Company, Inc. (2008-2009). About RMCI. https://web.archive.org/web/20091230133414/http://www.rmci-usa.com/about.html (09.04.2020)
28. Recycling: the countries which are best and worst, (2019) https://www.lovemoney.com/gallerylist/89902/recycling-countries-best-worst (09.05.2020)
29. Riigi jäätmekava 2014 - 2020, (2014). Keskkonnaministeerium. https://www.envir.ee/sites/default/files/riigi_jaatmekava_2014-2020.pdf (18.05.2020)
30. **Rõõmusoks, M., Rahu, I.** (2004). Kaubabetoon rikneb kiiresti. Materjal ja tehnoloogia: Ehitaja 5 (93). https://www.betoon.org/wp-content/uploads/2019/08/Kaubabetoon-rikneb-kiiresti-2004-5.pdf (14.03.2020)
31. Ropka betoon, (2020). Betooni transport. [Veebileht] https://www.ropkabetoon.ee/betooni-transport/ (16.04.2020)
32. **Sforza, M.,** (2018). Recycled construction waste: building a more sustainable future. https://www.youris.com/environment/recycling/recycled-construction-waste-building-a-more-sustainable-future.kl (03.05.2020)
33. Taaskasutamist või kõrvaldamist ootavad järjest suuremad jäätmekogused, (2018). Keskkonnaagentuur. https://www.keskkonnaagentuur.ee/et/uudised/taaskasutamist-voi-korvaldamist-ootavad-jarjest-suuremad-jaatmekogused (18.05.2020)
34. The Cement Sustainability initiative. Recycling Concrete. (2009) - *World Business Council for Sustainable Development.* https://www.soas.ac.uk/cedep-demos/000_P508_EAEMS_K3736-Demo/casestudies/media/CS!-Res2%20CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf (27.02.2020)
35. The Constructor. Civil Engineering Home. Setting Time of Cement Concrete- Stages and Processes. [Veebileht] https://theconstructor.org/concrete/cement-setting-time-stages-processes/7573/ (01.04.2020)
36. TMB Element 2019. Tsemendi kvaliteedi informatsioon. (01.04.2020)
37. TMB Element 2020. Tsemendi kvaliteedi informatsioon. (01.04.2020)
38. **Turkyilmaz, A., Guney, M., Karaca, F., Bagdatkyzy, Z., Sandybayeva, A., Sirenova, G.** (2019). A Comprehensive Construction and Demolition Waste Management Model using PESTEL and 3R for Construction Companies Operating in Central Asia. https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1593/pdf (25.04.2020)
39. **Uustalu, E.**, (2000). Talvine betoneerimine. Ehitus: Ehitaja 11 (53). https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:1hsvSKcnbxwJ:https://www.knc.ee/system/files_force/assets/document/talvine_betoneerimine.pdf%3Fdownload%3D1+&cd=1&hl=et&ct=clnk&gl=ee (14.03.2020)

40. **Wijayasundara, M., Mendis, P., Zhang, L., Sofi, M.** (2016). Financial assessment of manufacturing recycled aggregate concrete in ready-mix concrete plants. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916300271 (27.09.2019)

LISAD

Lisa 1. Laborikatsete plaan (autori koostatud)

Tegevuste järjekorra nr	Aeg (h)	Taas-kasutatav betoon (jääk)	Värske betoon	Tegevused	Betooni maht	Katse-kehad
1	0		X	betoonisegu valmistamine	40 l	
2	0		X	temperatuur, töödeldavus, õhusisaldus, katsekehad	10l	10 tk
3	0,5	X		temperatuur, töödeldavus		
4	1	X		temperatuur, töödeldavus, jääkbetooni tihedus		
5	1		X	betoonisegu valmistamine	10l	
6	1	X	X	jäägi ja värske betooni segamine 60%/40%	15l + 10l	
7	1	X	X	temperatuur, töödeldavus, õhusisaldus, katsekehad		10 tk
8	1,5	X		temperatuur, töödeldavus		
9	2	X		temperatuur, töödeldavus, jääkbetooni tihedus		
10	2		X	betoonisegu valmistamine	10l	
11	2	X	X	jäägi ja värske betooni segamine 40%/60%	6,7l + 10l	
12	2	X	X	temperatuur, töödeldavus, õhusisaldus, katsekehad		10 tk
13	2,5	X		temperatuur, töödeldavus		
14	3	X		temperatuur, töödeldavus, jääkbetooni tihedus		
15	3		X	betoonisegu valmistamine	10l	
16	3	X	X	jäägi ja värske betooni segamine 20%/80%	2,5l + 10l	
17	3	X	X	temperatuur, töödeldavus, õhusisaldus, katsekehad		10 tk

Lisa 2. Jääkbetooni sisaldava kivistunud betooni katsetamine TMB Elemendi laboris, katse nr. 1 (autori koostatud)

Valmist. Kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. Kuupäev	Vanus; päevades	Kaal; g	Mõõtmed; mm			Tihedus; kg/m3	Tugevus; MPa	Keskmine tihedus; kg/m3	Keskmine tugevus; Mpa
						a	b	h				
02.10.2019	0-1	C35/45	04.10.2019	2p	2342	100	100	100	2342	42,00		
02.10.2019	0-2	C35/45	04.10.2019	2p	2333	100	100	100	2333	43,03		
02.10.2019	0-3	C35/45	04.10.2019	2p	2348	100	100	100	2348	42,54	2341	42,52
02.10.2019	0-4	C35/45	09.10.2019	7p	2337	100	100	100	2337	50,02		
02.10.2019	0-5	C35/45	09.10.2019	7p	2358	100	100	100	2358	49,94		
02.10.2019	0-6	C35/45	09.10.2019	7p	2379	101	100	100	2355	50,72	2350	50,23
02.10.2019	0-7	C35/45	30.10.2019	28p	2368	101	100	100	2345	55,00		
02.10.2019	0-8	C35/45	30.10.2019	28p	2369	101	100	100	2346	55,03		
02.10.2019	0-9	C35/45	30.10.2019	28p	2382	101	100	100	2358	55,30		
02.10.2019	0-10	C35/45	30.10.2019	28p	2391	101	100	100	2367	55,19	2354	55,13
02.10.2019	1-1	C35/45	04.10.2019	2p	2299	100	100	100	2299	37,46		
02.10.2019	1-2	C35/45	04.10.2019	2p	2290	100	100	100	2290	38,46		
02.10.2019	1-3	C35/45	04.10.2019	2p	2298	100	100	100	2298	39,70	2296	38,54
02.10.2019	1-4	C35/45	09.10.2019	7p	2317	100	100	100	2317	44,90		
02.10.2019	1-5	C35/45	09.10.2019	7p	2293	100	100	100	2293	43,30		
02.10.2019	1-6	C35/45	09.10.2019	7p	2282	100	100	100	2282	42,31	2297	43,50
02.10.2019	1-7	C35/45	30.10.2019	28p	2324	101	100	100	2301	47,72		
02.10.2019	1-8	C35/45	30.10.2019	28p	2320	101	100	100	2297	46,69		
02.10.2019	1-9	C35/45	30.10.2019	28p	2319	100	100	100	2319	49,67		
02.10.2019	1-10	C35/45	30.10.2019	28p	2316	100	100	100	2316	50,74	2308	48,71
02.10.2019	2-1	C35/45	04.10.2019	2p	2331	100	100	100	2331	36,19		
02.10.2019	2-2	C35/45	04.10.2019	2p	2337	100	100	100	2337	36,87		
02.10.2019	2-3	C35/45	04.10.2019	2p	2316	100	100	100	2316	34,19	2328	35,75
02.10.2019	2-4	C35/45	09.10.2019	7p	2324	100	100	100	2324	44,94		
02.10.2019	2-5	C35/45	09.10.2019	7p	2342	101	100	100	2319	43,31		
02.10.2019	2-6	C35/45	09.10.2019	7p	2334	100	100	100	2334	44,42	2326	44,22
02.10.2019	2-7	C35/45	30.10.2019	28p	2330	100	100	100	2330	50,14		
02.10.2019	2-8	C35/45	30.10.2019	28p	2327	100	100	100	2327	48,38		
02.10.2019	2-9	C35/45	30.10.2019	28p	2341	100	100	100	2341	48,89		
02.10.2019	2-10	C35/45	30.10.2019	28p	2353	101	100	100	2330	48,90	2332	49,08
02.10.2019	3-1	C35/45	04.10.2019	2p	2338	101	100	100	2315	35,01		
02.10.2019	3-2	C35/45	04.10.2019	2p	2334	100	100	100	2334	38,08		
02.10.2019	3-3	C35/45	04.10.2019	2p	2309	100	100	100	2309	37,55	2319	36,88
02.10.2019	3-4	C35/45	09.10.2019	7p	2320	100	100	100	2320	40,82		
02.10.2019	3-5	C35/45	09.10.2019	7p	2348	101	100	100	2325	44,63		
02.10.2019	3-6	C35/45	09.10.2019	7p	2338	100	100	100	2338	43,23	2328	42,89
02.10.2019	3-7	C35/45	30.10.2019	28p	2366	101	100	100	2343	51,06		
02.10.2019	3-8	C35/45	30.10.2019	28p	2363	101	100	100	2340	51,16		
02.10.2019	3-9	C35/45	30.10.2019	28p	2343	100	100	100	2343	50,38		
02.10.2019	3-10	C35/45	30.10.2019	28p	2342	100	100	100	2342	50,56	2342	50,79

Lisa 3. Jääkbetooni sisaldava kivistunud betooni katsetamine TMB Elemendi laboris, katse nr. 2 (autori koostatud)

Valmist.	Katsekeha	Betooni	Katset.	Vanus;	Kaal;	Mõõtmed; mm			Tihedus;	Tugevus;	Keskmine	Keskmine
Kuupäev	tähistus	klass	Kuupäev	päevades	g	a	b	h	kg/m3	MPa	tihedus;	tugevus;
22.01.2020	0-1	C50/60	24.01.2020	2p	2370	100	100	100	2370	47,04		
22.01.2020	0-2	C50/60	24.01.2020	2p	2370	100	100	100	2370	46,59		
22.01.2020	0-3	C50/60	24.01.2020	2p	2355	100	100	100	2355	46,08	2365	46,57
22.01.2020	0-4	C50/60	29.01.2020	7p	2365	100	100	100	2365	53,95		
22.01.2020	0-5	C50/60	29.01.2020	7p	2366	100	100	100	2366	58,92		
22.01.2020	0-6	C50/60	29.01.2020	7p	2372	100	100	100	2372	56,56	2368	56,48
22.01.2020	0-7	C50/60	19.02.2020	28p	2368	101	100	100	2345	61,53		
22.01.2020	0-8	C50/60	19.02.2020	28p	2372	100	100	100	2372	57,26		
22.01.2020	0-9	C50/60	19.02.2020	28p	2377	100	100	100	2377	61,99		
22.01.2020	0-10	C50/60	19.02.2020	28p	2366	100	100	100	2366	57,21	2365	59,50
22.01.2020	1-1	C50/60	24.01.2020	2p	2358	100	100	100	2358	41,98		
22.01.2020	1-2	C50/60	24.01.2020	2p	2382	101	100	100	2358	44,39		
22.01.2020	1-3	C50/60	24.01.2020	2p	2386	101	100	100	2362	43,74	2360	43,37
22.01.2020	1-4	C50/60	29.01.2020	7p	2364	100	100	100	2364	53,63		
22.01.2020	1-5	C50/60	29.01.2020	7p	2349	100	100	100	2349	51,03		
22.01.2020	1-6	C50/60	29.01.2020	7p	2346	100	100	100	2346	52,21	2353	52,29
22.01.2020	1-7	C50/60	19.02.2020	28p	2352	100	100	100	2352	62,06		
22.01.2020	1-8	C50/60	19.02.2020	28p	2350	100	100	100	2350	53,14		
22.01.2020	1-9	C50/60	19.02.2020	28p	2367	100	100	100	2367	55,86		
22.01.2020	1-10	C50/60	19.02.2020	28p	2373	101	100	100	2350	59,97	2355	57,76
22.01.2020	2-1	C50/60	24.01.2020	2p	2372	100	100	100	2372	44,00		
22.01.2020	2-2	C50/60	24.01.2020	2p	2370	100	100	100	2370	43,43		
22.01.2020	2-3	C50/60	24.01.2020	2p	2337	100	100	100	2337	40,79	2360	42,74
22.01.2020	2-4	C50/60	29.01.2020	7p	2348	100	100	100	2348	51,75		
22.01.2020	2-5	C50/60	29.01.2020	7p	2380	100	100	100	2380	52,45		
22.01.2020	2-6	C50/60	29.01.2020	7p	2340	100	100	100	2340	51,57	2356	51,92
22.01.2020	2-7	C50/60	19.02.2020	28p	2340	100	100	100	2340	49,35		
22.01.2020	2-8	C50/60	19.02.2020	28p	2339	100	100	100	2339	58,44		
22.01.2020	2-9	C50/60	19.02.2020	28p	2324	100	100	100	2324	53,43		
22.01.2020	2-10	C50/60	19.02.2020	28p	2366	100	100	100	2366	59,34	2342	55,14
22.01.2020	3-1	C50/60	24.01.2020	2p	2332	100	100	100	2332	41,30		
22.01.2020	3-2	C50/60	24.01.2020	2p	2328	100	100	100	2328	44,16		
22.01.2020	3-3	C50/60	24.01.2020	2p	2356	100	100	100	2356	44,49	2339	43,32
22.01.2020	3-4	C50/60	29.01.2020	7p	2379	101	100	100	2355	56,25		
22.01.2020	3-5	C50/60	29.01.2020	7p	2371	100	100	100	2371	56,19		
22.01.2020	3-6	C50/60	29.01.2020	7p	2355	100	100	100	2355	52,02	2360	54,82
22.01.2020	3-7	C50/60	19.02.2020	28p	2332	99	100	100	2356	61,93		
22.01.2020	3-8	C50/60	19.02.2020	28p	2373	100	100	100	2373	60,46		
22.01.2020	3-9	C50/60	19.02.2020	28p	2404	101	100	100	2380	62,93		
22.01.2020	3-10	C50/60	19.02.2020	28p	2360	100	100	100	2360	60,55	2367	61,47

Lisa 4. Katsed Vicat´ seadmega.

1. Katseks vajaminevad materjalid ja seadmed (autori pilt).

2.Tardumisaja määramine (autori pilt).

Lisa 5. Esimese katse 28-päevaste kuubikute purunemispildid, betoon C35/45

1. Nulltunnine katsekeha (autori pilt)

2. Ühetunnine katsekeha (autori pilt)

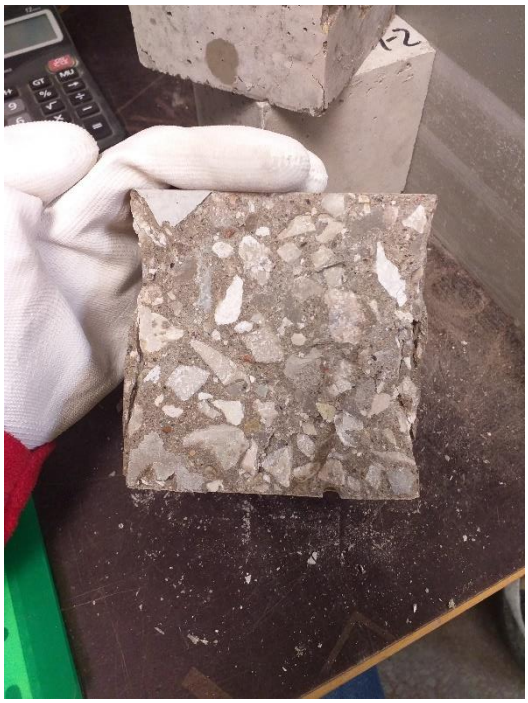
3. Kahetunnine katsekeha (autori pilt)

4. Kolmetunnine katsekeha (autori pilt)

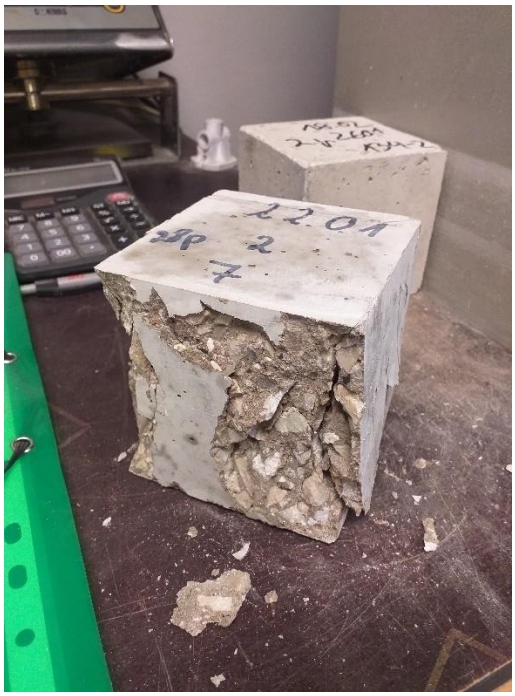
Lisa 6. Teise katse 28-päevaste kuubikute purunemispildid, betoon C50/60

a) b)

1. Nulltunnine katsekeha (autori pilt); a) purunemispilt b) vaade kuubiku sisule

a) b) 

2. Ühetunnine katsekeha (autori pilt); a) purunemispilt b) vaade kuubiku sisule

a) b) 

3. Kahetunnine katsekeha (autori pilt); a) purunemispilt b) vaade kuubiku sisule

a) b)

4. Kolmetunnine katsekeha (autori pilt); a) purunemispilt b) vaade kuubiku sisule

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Laura Laisk,
sünniaeg 12.11.1995,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Ringlussevõetud betooni taaskasutus, mille juhendaja on Mihkel Kiviste,
    1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
    1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
    1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 11.06.2020

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)