

Rakennus- ja purkujätteen kierrätys ja hyötykäyttö (RAPUA)

KOULUTUSKUNTAYHTYMÄ OSAON LOPPURAPORTTI

Tapio Patrikainen, Rauno Hurme



Euroopan unionin
osarahoittama



OSAO



SISÄLLYS

1	HANKKEEN KUVAUS.....	3
1.1	HANKKEEN KOHDERYHMÄ, TARVE JA TAVOITTEET	3
1.2	HANKKEEN TAVOITTEET	3
2	TOIMENPITEET	3
3	HANKKEEN TOTEUTUS JA TULOKSET (OSAO)	6
3.1	TP2 MURSKAUS- SEULONTA- KENTTÄLAJITTELU	6
3.2	TP3 SUHTEITTAMINEN - BETONIRESEPTIN KEHITTÄMINEN	9
3.2.1	Betonireseptin testaus 1	9
3.2.2	Betonireseptin testaus 2	16
	Kimmovasaratestien ja puristuslujuuksien vertailu testin 2 tuloksissa	19
3.2.3	Betonireseptin testaus 3	20
	Kimmovasaratestien ja puristuslujuuksien vertailu testin 3 tuloksissa	23
3.3	YHTEENVETO KOEKAPPALOIDEN VALMISTUKSESTA JA KÄYTETYN MATERIAALIN TESTAUKSISTA	24
4	KIRJALLISUUSELVITYS PURKUBETONIN KÄYTETTÄVYYDESTÄ.....	25
4.1	TAUSTAA.....	26
4.2	PURKUBETONIJAKEET	27
4.3	HIENOAINEEN KÄYTTÖ.....	28
4.4	KARBONOINNIN VAIKUTUS	31
4.5	YHTEENVETO AIHEESEEN LIITTYVÄSTÄ KIRJALLISUUDESTA	34
	LÄHTEET:	35
5	YHTEENVETO	36



1 Hankkeen kuvaus

Rakennus- ja purkujätteen kierrätys ja hyötykäyttö (RAPUA) on ollut Oulun ekosysteemisopimukseen ja siinä erityisesti Strategiseen kohdealaan 3. Kestävä kiertotalous ja puhtaat ratkaisut liittyvä hanke, jossa keskityttiin betonijakeen kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön. Hankkeessa tehtiin kokonaisvaltaisen selvitys jakeen kiertokulusta purkutyömaalta uudeksi tuotteeksi siihen liittyvät toimenpiteet raportoitiin. Hanke toteutettiin yhteistyössä Oulun yliopiston, OAMK:n, VTT:n ja Koulutuskuntayhtymä OSAOn kanssa. Päähakijana on ollut Oulun yliopisto.

1.1 HANKKEEN KOHDERYHMÄ, TARVE JA TAVOITTEET

RAPUA-hankkeen kohderyhmiä ovat epäorgaanisten sivuvirtojen tuottajat ja prosessoijat sekä kierrätykseen erikoistuneet pk-yritykset, jotka keskittyvät edistämään hiilineutraalin Suomen saavuttamista ja kiertotalouteen siirtymistä. Tavoitteena on, että hanke edistää alueen yritysten tuotekehitysinvestointien kasvua, uusien teknologioiden ja palveluiden syntymistä, mutta ennen kaikkea tavoitteena on, että pitkällä tähtäimellä hanke edistää uuden kansallisen ja kansainvälisen liiketoiminnan syntymistä.

Hanke hyödyttää välillisesti erityisesti ympäristöä vähentämällä ja poistamalla ympäristöhaittoja, kun vähähiilisyys ja hiilineutraalisuus lisääntyvät sekä kiertotalous tehostuu. Lisäksi kansalaiset hyötyvät hankkeesta, kun ympäristön tila paranee ja luonnon monimuotoisuus säilyy. Viranomaisille ja poliittisille päättäjille hanke tuottaa uutta tietoa päätöksenteon tueksi.

Hiilineutraali Suomi 2035 mennessä vaatii kaikilta toimialoilta toimenpiteitä tavoitteen saavuttamiseksi. Esimerkiksi liikenteen päästöjen vähentämiseksi suositellaan yhdyskuntarakenteen tiivistämistä. Kaupunkirakenteen tiivistäminen voi johtaa vanhojen betonielementtirakennusten korvaamiseen uusilla, isommilla rakennuksilla. Kaupunkeihin, mukaan lukien Oulu, on rakennettu 1960–80 luvulla betonirakennuksia, jotka tarvitsevat nyt niin peruskorjausta kuin myös energiatehokkuuden parantamista. Näissä hankkeissa voidaan joutua purkamaan betonirakenteita. Betonirakenteiden valmistamiseen käytetään energia- ja päästöintensiivistä sementtiä. Tästä syystä purettujen betonirakennusten ja -rakenteiden hyödyntäminen uusien tuotteiden valmistuksessa on keino vähentää rakennustuotteiden valmistuksen päästöjä ja täyttää jätedirektiivin rakennus- ja purkujätteen 70 %:n kierrätystavoite.

1.2 HANKKEEN TAVOITTEET

Hankkeen tavoitteena on pitää betonirakenteisiin sitoutuneet luonnonvarat materiaalikierrossa. Tällä hetkellä purkubetoni päättyy kaatopaikalle tai matala-arvoisiin käyttökohteisiin, mm. kiviainekseksi maarakennukseen. Tässä hankkeessa tavoitteena oli löytää uusia ja korkea-arvoisempia käyttökohteita purkubetonille.

2 TOIMENPITEET

RAPUA-hankkeen toimenpiteet oli jaettu työpaketteihin TP0-TP4:

TP0 Hankkeen koordinointi ja talousasiat

Laajuus: 4 htkk Vastuullinen partneri: Oulun yliopisto yhdessä muiden osatoteuttajien kanssa.



Tehtävä: Hankkeen hyvä talouden hoito ja oikea-aikainen raportointi, yhteistyön ja tiedon integrointi, ohjausryhmän kokousten järjestäminen (3 kpl/vuosi).

TP1 Lajittelu

Laajuus: 1 htkk (OAMK) Tehtävästä vastasi OAMK

Tehtävä: Tavoitteena oli selvittää, miten osa alkupään lajittelusta tehdään jo työmaalla niin, että varmistetaan kiertobetonin oikeellisuus raaka-aineeksi.

UUTUUSARVO-ekobetoni, johon lisätään tietty %-osuus uutta sementtiä ja runkoainetta, jolloin ekobetoni soveltuisi täytenä kantavaan rakenteeseen tai runkoaineena erilaisiin rakenteisiin.

TP2 Murskaus- seulpta- kenttälajittelu

Laajuus: 1 htkk (OAMK), 2 htkk (OSAO) Tehtävästä vastasi OAMK ja siihen osallistui OSAO.

Tehtävä: Tehtiin kiertobetonin murskausta ja seulptaa laboratoriomittakaavassa OAMK:n ja OSAO:n laboratorioissa. Laajemmat murskaukset, pulveroinnit ja seulptat oli suoritettu teollisen mittakaavan laitteilla mm. Kempeleen Siirtokuljetus Oy:n ja Kiertokaari Oy:n lajittelualueella, josta hankkeen toimintoihin poimittiin esikäsittelystä betonimursketta. Hankkeessa laadittiin alustavat ohjeet betonin murskauksen ja seulptan tavoitekoikiin. Lisäksi tehtiin kartoitus, mihin kierrätysbetonin erikoikiia ja keita voitaisiin hyödyntää.

TP3 Suhteittaminen – Betonireseptin kehittäminen

Laajuus: 4 htkk (OY), 2 htkk (OAMK), 4 htkk (OSAO) Tehtävästä vastasi Oulun yliopisto ja siihen osallistuivat OAMK ja OSAO. Tämän työpakettin toimenpiteisiin liittyen kiertobetonimateriaalin esikäsittelyä tehtiin osittain TP2 yhteydessä.

Murskatusta ja seulptusta kiertobetonimateriaalista jauhettiin OSAO:n laboratoriossa edelleen hienojakoisempaa materiaalia sementin korvaajaksi. Kiertobetonin esikäsittelyyn toimintaohjeistus laadittiin OY:n laboratoriotokoiden perusteella. OAMK:n betonilaboratoriossa, jossa on betonin valmistusvälineet ja muut kiertobetonin hyödyntämiseen liittyvät laitteet, valmistettiin puristuslujuuden testikuutioita eri sementin korvaussuhteilla. Oulun yliopiston tiloissa esikäsittelystä kiertobetonijauheesta valmistettiin laastinäytteitä (4x4x16cm³), joista mitattiin edelleen näytteiden ominaisuuksia. Yliopiston laitteilla tutkittiin mm. näytteiden reologiaa, asettumisaikaa, mikrorakenteen ominaisuuksia ja näytteiden kestävyyttä. Yliopistolla valmistettiin sekä laasti- että betonikoekappaleita testattavaksi.

Kiertobetonin olosuhdetestaus jää aikataulun takia mahdollisiin jatkohankkeisiin ja ne on syytä järjestää ulkoilmatiloihin, jolloin saadaan aidosti selvitettyä kiertobetonin ominaisuuksia.

Kiertobetonin esikäsittelyssä ja betonireseptien kehitystyössä oli mukana apukäsinä OSAO:n prosessialan opiskelijaryhmä. OSAO on osallistunut koekappaleiden testaukseen.

TP4 Kaupallistamispotentiaalin ja ympäristövaikutusten arvioiminen

Laajuus: 6 htkk (VTT), 2 htkk (OAMK), 2 htkk (OY) Tehtävästä vastasi VTT ja siihen osallistuivat OAMK ja Oulun Yliopisto.

Työpakettin ensimmäinen osa on ollut kansainvälinen ja kansallinen kartoitus kiertobetonin kaupallistetuista, lupaavista käyttökoikeista ja hyödyntämiseen liittyvistä haasteista. Tietolähteinä on käytetty teknisiä julkaisuja, tieteellisiä julkaisuja, EU-projektien tuloksia, asiantuntijahaastatteluja ja projektiin osallistuvien organisaatioiden tekemiä tutkimuksia. Kartoituksella kerättiin listaa purkubetonin mahdollisista käyttökoikeista. Yhteistyössä projektiin osallistuvien tutkijoiden kanssa valittiin lupaavimmat käyttökoikeet tarkemmin tarkasteltaviksi mm. hyödyntämiseen liittyvien haasteiden osalta. Tiedetään,



että kiertobetonia voidaan hyödyntää hulevesien imeyttämiseen, hulevesien viivästyttämiseen ja johtamisratkaisuissa, meluseinissä, ja -seinävalleissa, konesusuojina ja sirpalesuojina.

Työpaketin toinen osa on ollut kiertobetonin elinkaariarviointia kattava sekä elinkaarikustannukset (LCC) että ympäristövaikutukset (LCA). Tarkastelussa on huomioitu EU Level(s) viitekehysten mukaiset elinkaaren vaiheet A1-A3 Materiaali, A4-A5 Kuljetukset ja työmaa, B1-B5 Käyttö ja C1-C4 Elin-kaaren loppu soveltuvin osin. Taloudellisuuden arviointi on tehty rakennuskustannuslaskennan menetelmien ja ympäristövaikutukset standardin EN 15978 avulla. Työpaketin tarkoituksena on ollut tuottaa tietoa purkubetonin lupaavimmista käyttökohteista, ohjeita purkubetonin hyödyntämiseen sekä ar-
vion purkubetonin elinkaari-vaikutuksista.

OSAOn vastuulla hankkeessa on ollut purku- ja kiertobetonin käytettävyyden taustatietojen selvittäminen sekä koetoimintaan liittyvien näytteiden esikäsittely. Toimenpiteet toteutettiin työpaketeissa:

- **TP2 Murskaus - seulonta - kenttälajittelu:** OSAOn roolina tässä oli näytteiden murskaukset, seulonnat sekä jatkokäsittelyt kuten jauhatukset. OSAO osallistui selvittämistyöhön, jota tehtiin OSAOn laitteistoilla murskaamalla purkubetonia, erottamalla seulomalla reaktiivista betonijauhetta ja jauhamalla sitä kuulamylyllä OAMK:n ja yliopiston testejä varten. Näytteiden esikäsittelyjen toimenpiteet tehtiin OSAOlla laboratoriomittakaavassa. Suoritettujen testien perusteella saatiin selvitettyä, kuinka pitkälle murskausta tarvitaan ja pystyttiin ohjeistamaan seulonnan tarvetta betonireseptiä suunniteltaessa. Näin pystyttiin laatimaan alustavat ohjeet murskatun betonin käyttöön. OSAOlla tehtiin kirjallisuusselvitystä siitä, miten kierrätysbetonin erikokoisia jakeita voitaisiin hyödyntää. Kirjallisuuden perusteella murskeen agglomeraatteja voidaan käyttää soran korvaavana aineksena. Pölymäisen, seulomalla erotetun jakeen käytöstä sementin korvaamiseen ei löytynyt standardoituja menetelmiä.
- **TP3 Suhteittaminen - Betonireseptin kehittäminen:** OSAOn roolina tässä oli näytteiden esikäsittely ja koetoimintaan osallistuminen. Hankkeen tavoitteena on ollut löytää kiertobetonille nykyisiä käyttökohteita arvokkaampia käyttökohteita. Betonireseptin kehittäminen: OSAO toteutti koetoimintaa uusien käyttökohteiden kehittämiseen, testaukseen ja pilotoinnin suunnitteluun liittyen. RAPUA-hankkeen tavoitteena on ollut löytää kiertobetonille nykyistä arvokkaampia käyttökohteita. OSAOn rooliin kuului selvittää yliopiston ja OAMK:in apuna hankkeessa kehitettävien uusien käyttökohteiden vaatimuksia. OSAO osallistui koekappaleiden valmistukseen muun muassa OAMK:n tiloissa. Tällöin valmistettiin betonimateriaali ja siitä testikuutiot onnistuneesti lujuuksitestauksia varten. Mittaukset testikuutioista suoritti ulkopuolinen palvelun tuottaja OAMK:n toimeksiannosta.
- OSAOn valmistamaksi koekappaleeksi valikoitui tuote, jota voidaan jatkossa hankkeen jälkeen valmistaa OSAOlla opiskelijoiden harjoitustöinä. Koekappale oli puiston penkki, jonka jalat on valmistettu muottivalulla. Betonijalkojen valmistusvaiheita kehitettiin, testattiin ja pilotoitiin.



3 HANKKEEN TOTEUTUS JA TULOKSET (OSAO)

3.1 TP2 MURSKAUS- SEULONTA- KENTTÄLAJITTELU

OSAO osallistui kierrätysbetonin murskaukseen ja seulontaan laboratoriomittakaavassa käyttäen sekä OAMK:n että OSAOn omia laboratoriotiloja sekä -laitteistoja. Laajemmat murskaukset, pulveroinnit ja seulonnat oli suoritettu teollisen mittakaavan laitteilla mm. Kempeleen Siirtokuljetus Oy:n ja Kiertokaari Oy:n lajittelualueella, joista hankkeen toimintoihin poimittiin esikäsiteltyä betonimursketta.

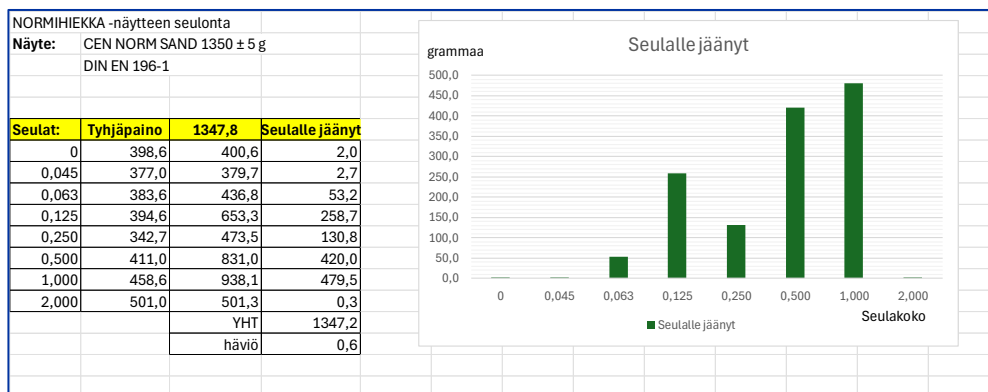


Kuva 1. Rakennuspurkubetonin murskausta

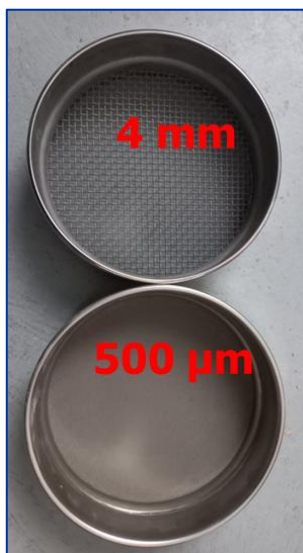
Lisäksi OAMK suoritti myös purkutyömaalla näytteiden ottoa rakennuksen lattiasta, tukipilareista ja rakennuksen perustuksesta. Tavoitteena oli saada tietoa erityyppisissä kohteissa käytettävistä betonilajeista. Tyypillisesti kantavissa rakenteissa betoni sisältää enemmän kiviainesta ja lujuus saadaan täten suuremmaksi.

OSAolla esikäsiteltyä näytemateriaalia testattiin yliopiston edustajien toimesta, jolloin saatiin tietoa mm. seulotun hienoaineksen jauhamistarpeesta. Testituloksiin perustuen murskattua ja seulottua hienoainesta jatkokäsiteltiin jauhamalla sitä edelleen kuulamylyllä. Käytössä oli OSAolla kuulamyly, jonka vetoisuus oli 5 kg. Jauhatukset onnistuivat ensimmäisillä kerroilla, mutta joulukuussa 2024 laite rikkoontui ja jauhatus jouduttiin ostamaan Oulun yliopiston Minipilot-testilaboratoriosta. OSAolla tutkittiin seulomalla myös Oulun yliopistolla käytetyn standardihiekkanäytteen raekokojakauma, jonka tulos on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Normihiekkanäytteen seulonnan tulos



Kuva 2. OSAOn ja Oulun yliopiston Minipilot-laboratorion kuulamyllyt, joita käytettiin betonijauheen jauhatukseen.



Kuva 3. OSAOn murskaus- ja seulontalaitteistoja



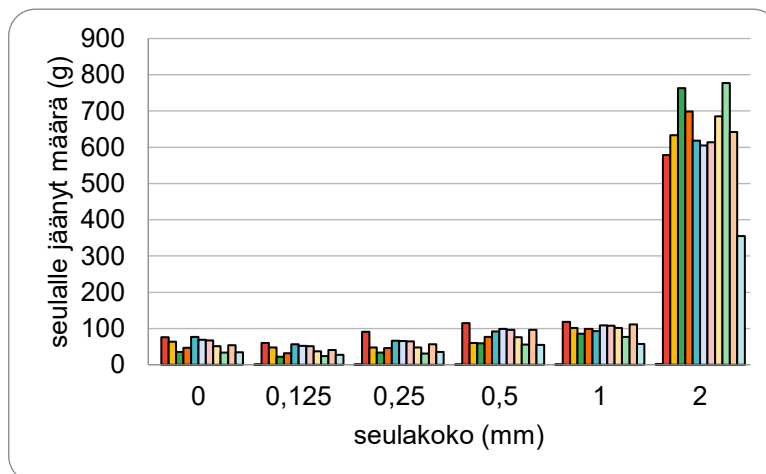
Kuva 4. Vastaanotettua betonimursketta ja mursketta leukamurskaimen jälkeen.

Murskaus tehtiin leukamurskaimen asetusarvoilla 5 ja 4, jolloin raekokojakauma oli taulukon 2 mukainen. Tulosten perusteella alle 500 μm partikkelien osuus koko 10,5 kg betonimurskemäärästä oli 15,6 %. Skaalaamalla tämä täyteen mittakaavaan tonnista purkubetonia murskattuna partikkelikokoon alle 4 mm saadaan pölymäistä betonijauhetta (<500 μm) noin 156 kg.

TAULUKKO 2. Kiertokaaren betoninäyte

seulat	summat	%-osuus
koko (mm)	seulalle jäänyt (g)	(%)
0	609,3	5,8
0,125	450,9	4,3
0,25	585,2	5,5
0,5	879,8	8,3
1	1060,2	10,0
2	6970,5	66,0
yhteensä	10555,9	100,0

<500 μm => 1645,4 g
<500 μm => 15,6 %



näyttemäärä 10555,9 g

seulonnassa kerrallaan noin 1000 g, jota seulottiin 10 min ajan.

10 seulontaa, joissa 1000 g ja 1 seulonta, jossa 500 g materiaalia.

Kuva 5. Betonierien eri seulontojen kokojakaumat.

Oulun yliopisto teki kokeita laastinäytteillä, joihin sementin sekaan oli laitettu eri määrä purkubetonijauhetta. Tulokset osoittivat, ettei ole suurtakaan merkitystä sillä, seulotaanko alle 500 µm jae vielä jakeiksi 250 µm, 125µm ja alle 125 µm. Tämän perusteella voitiin siis käyttää yhtä seulontanäytettä, joka saatiin 500 µm seulan alitteena.

Jatkomurskaukset ja seulonnat tehtiin tämän tuloksen perusteella purkubetonista siten, että leuka-murskaimella betoni murskattiin alle 4 mm partikkelikokoon. Tästä seulomalla erotettiin alle 500 µm jae, jota lähdettiin jatkokäsittämään jauhamalla sitä vielä kuulamyllyllä. Seulonnoissa 16.12.2024 saatiin alle 500 µm jauhetta 2060,9 grammaa eli 22,9 %, kun kokonaismurskemäärä oli 8981,6 grammaa.

Purkubetonin murskaamista jatkettiin uusilla betoninäytteillä, joista murskauksen ja seulonnan tuloksena saatiin n. 16 kg:n murskaamisen jälkeen 2412,8 grammaa alle 500 µm jauhemaista materiaalia. Tämä vastasi koko murskauserästä 15,9 % osuutta. Tästä voitiin päätellä, ettei betonimurske ole aina samanlaista vaan purkubetonipölyn jakeen suuruus voi vaihdella käsitellyn betonierän mukaan.

Kierrätysbetonin erikokoisten jakeiden hyödyntämistä ja vaikutusta betonirakentamisen hiilijalanjälkeen on kartoitettu yhdessä muiden hanketoimijoiden kanssa. Lisäksi on selvitetty purku- ja kierto-betonin käytettävyyden taustatietoja. OSAOn rooliin kuului hankkeessa kehitettävien uusien käyttökohteiden vaatimusten selvittäminen sekä valmistuksen kehittäminen, testaus ja pilotoinnin suunnittelu.

Betonin uusien käyttökohteiden vaatimusten selvittämisellä tarkoitettiin ominaisuuksia ja vaatimuksia, jotta sitä voitaisiin käyttää uusissa ja innovatiivisissa sovelluksissa. Näihin kuuluivat materiaalin tutkimus ja kehitys, jossa yhteistyössä hanketoimijoiden kanssa selvitettiin, miten kierrätysmateriaali vaikuttaa betonin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, kestävyys ja ympäristöystävällisyyteen. Samalla arvioitiin lujuusmittausten kautta millaisissa uusissa rakenteissa ja ympäristöissä betonia voitaisiin käyttää.

Standardeja haettiin vertailun vuoksi Saksan betonikierrätyksestä, mutta purkubetonipölyn kierrättämiseen ei vielä ole olemassa EU:ssa standardeiksi asti laadittuja ohjeita. OSAOlla tehtiin käytännön testausta ja pilotointia uudella betoniseoksella valettavuuden osalta. Lisäksi valmistetut puiston penkit altistetaan säätestaukselle vuoden ajan hankkeen päättymisen jälkeen, jotta voidaan varmistaa kierrätysbetonia sisältävän uuden betonin toimivuus ja kestävyys todellisissa käyttötilanteissa.

Tämä on tärkeää, jotta voidaan kehittää kestävämpiä, tehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä betoniratkaisuja, jotka vastaavat nykypäivän rakentamisen haasteisiin ja vaatimuksiin.

3.2 TP3 SUHTEITTAMINEN - BETONIRESEPTIN KEHITTÄMINEN

3.2.1 Betonireseptin testaus 1

OSAOn opiskelijaryhmä osallistui opettajansa Tapio Patrikaisen johdolla RAPUA-hankkeen betonikoekappaleiden valmistukseen Oulun ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa kesäkuussa 2024.





Kuva 6. OAMK:n betonilaboratorio



Kuva 7. OSAOn opiskelijaryhmä



Kuva 8. Opastuksesta vastasi Joonas Rukajärvi (OAMK)



Kuva 9. Testikuutioiden valmistus alkoi ottamalla kolmea erikokoista kiviainesta suhteissa 3:2:3 (0-1, 0-8 ja 0-16 mm)

Ryhmä aloitti betonisten testikuutioiden valmistamisen seulomalla kiviaineslajit kahdella seulasarjalla ja kahta seulasarjatärytintä hyödyntäen.

Työvaiheet olivat:

- määritettiin seulasarjojen seulojen tyhjäpainot
- punnittiin kiviaineksia seulasarjalle. Yhteen seulontaan voitiin ottaa maksimissaan 1000 g kiviainesta
- seulasarjan tärytysvaiheen kesto aika oli 10 minuuttia.
- punnittiin jokainen seula sille jääneen aineksen kanssa
- seulalle jääneen kiviaineksen massa laskettiin vähentämällä edellisen kohdan punnitus-tuloksesta seulan tyhjäpaino
- tuloksen perusteella saatiin laskettua kumulatiivinen läpäisy kullekin kiviainekselle

Suhteitus tarkoittaa betonin osa-aineiden yhteensovittamista niin, että sekä tuore betonimassa että kovettunut betoni saavuttavat vaaditut ominaisuudet. Betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuudet ovat:

- hyvät lujuus ja muodonmuutosominaisuudet
- vaadittujen säilyvyysominaisuuksien ja rasitusluokkien täyttyminen
- soveltuminen rakennusaikaisiin olosuhteisiin

- o laatuvaatimukset, rakenneosan ominaisuudet, työmenetelmät, kalusto, ilmasto ja paikalliset olosuhteet
- o taloudellinen valmistus, raaka-aineiden saatavuus ja kuljetusmatkojen realistisuus

Betonin taloudellinen valmistaminen edellyttää mainittujen ominaisuuksien täyttymistä kustannuksia optimoimalla. Betoniin voidaan käyttää myös lisä- ja seosainevalikoima, jolloin mahdollisuudet sää-
dellä betonin ominaisuuksia vaatimusten mukaisiksi paranevat.

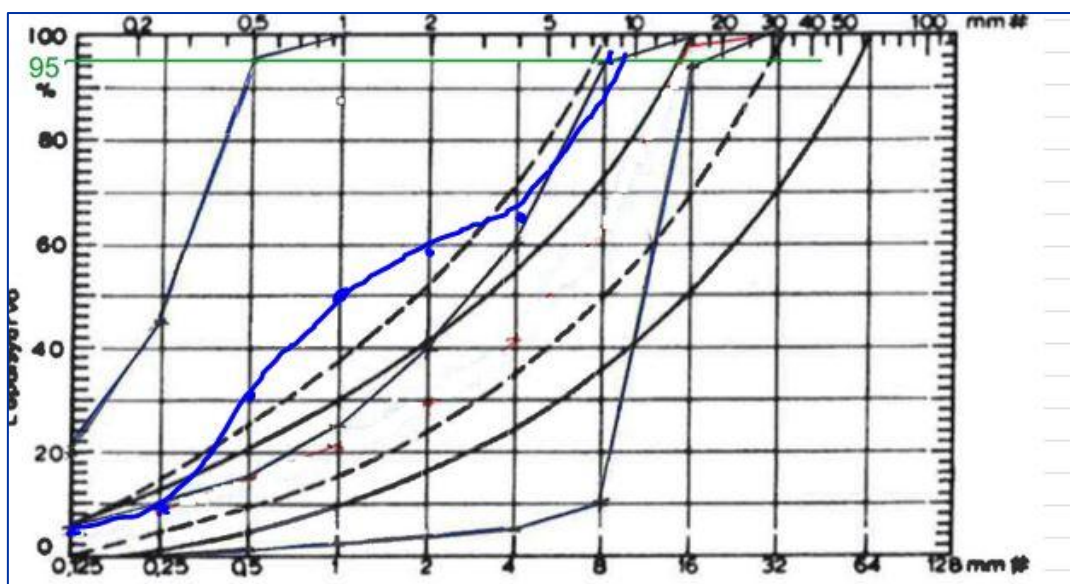
TAULUKKO 3. OAMKn betonilaboratoriossa suoritettujen seulontojen tulokset hiekan ja soran yhdistelmä kiviainekselle.

1. Betonitestikuutio hiekasta ja sorasta (0-1mm, 0-8 mm ja 0-16 mm)											
Punnitukset kahdeksasta ensimmäisestä seulonnasta											
Seulasarja A						Seulasarja B					
	1	2	3	4	5		6	7	8		
	Tyhjä	hieno	karkea	hieno	hieno	hieno	tyhjä	karkea	karkea	Karkea	
1 pohja	399	420	493	416	416	424	527	538	532,3	533,8	
2 125	395	486	469	466	474	485	238	238,9	238,2	238,3	
3 250	343	514	450	488	513	514	274	274,7	275	274,5	
4 500	412	677	549	674	700	700	282	282,2	282,1	282,4	
5 1000	459	792	616	828	794	790	330	333	331	332	
6 2000	502	620	671	639	613	599	369	381	370	382	
7 4000	606	606	631	606	606	505	500	715	591	720	
8 8000	504	506	744	505	505	607	511	1234	1332	1183	
9 16000	621	621	621	621	620	620	676	716	764	767	
kansi	239	239	239	239	239	239	239	239	239	239	
yht.	4480	5481	5483	5482	5480	5483	3946	4951,8	4954,6	4952 yht.	
		1001	1003	1002	1000	1003		1005,8	1008,6	1006	8029,4 g
Ensimmäisen seulontasarjan seuloille jääneet ainekset											
	1	2	3	4	5	6	7	8 yht.	pros. %	kumulat %	
0	21	94	17	17	25	11	5,3	6,8	197,1	2,45	
125	91	74	71	79	90	0,9	0,2	0,3	406,4	5,06	7,51
250	171	107	145	170	171	0,7	1	0,5	766,2	9,54	17,05
500	265	137	262	288	288	0,2	0,1	0,4	1240,7	15,45	32,51
1000	333	157	369	335	331	3	1	2	1531	19,07	51,57
2000	118	169	137	111	97	12	1	13	658	8,19	59,77
4000	0	25	0	0	-101	215	91	220	450	5,60	65,37
8000	2	240	1	1	103	723	821	672	2563	31,92	97,29
16000	0	0	0	-1	-1	40	88	91	217	2,70	100,00
								yht.	100		
seuloilla	1001	1003	1002	1000	1003	1005,8	1008,6	1006	8029,4	grammaa	



Kuva 10. Hiekka ja sorajakeet seulottuina jakeisiin <125, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16 000 ja 32 000 μm

Saatu kumulatiivinen jakauma osuu hyvin suhteutuksen käyrästä eli eri kiviainesjakeita tulisi seostaa betoniin suhteissa 3:2:3 (ts. 3 osaa 0-1 mm, 2 osaa 0-8 mm ja 3 osaa 0-16mm)



Kuva 11. Kiviaineksen jakauma koekuutiossa 1.

Valettavissa näytekappaleissa kiviainesta korvattiin myös murskatulla betonilla. Betonimurskeesta valmistettuun testikuutioon seostettiin betonimurskeen eri seuloittuja jakeita samoissa suhteissa lisäämällä joitain kokojakeita ja vähentämällä osasta jakeita. Tällä tavoin saatiin aikaan samanlaiset aggregaattijakaumat kuin kiviaineksella koekuutiossa 1.

TAULUKKO 4A. Betonimurskan seulontatulokset ja käsittely vastaamaan alkuperäistä kiviainesta

2. Betonitestikuutio murskatusta betonista											
Punnitukset kahdeksasta betonimurskeen seulonasta											
Seulasarja A						Seulasarja B					
	tyhjä	1	2	3	4	tyhjä	1	2	3	4	
0	399	404	405	402	401	527	531,7	531,6	530,8	531,7	
125	395	398	398	397	397	238	239	238,9	238,7	238,8	
250	344	346	345	345	344	274	276,5	276,6	275,8	276,2	
500	412	418	416	415	421	282	283,8	284,7	288,9	288,1	
1000	460	499	487	510	634	330	353,2	361,7	447,5	405,9	
2000	503	578	592	610	777	369	453,9	439,1	568,9	471,9	
4000	504	906	1026	1006	861	500	972,7	934,1	833,3	910,3	
8000	606	1072	956	935	788	511	926,2	970,8	853,3	914,5	
16000	621	624	620	621	620	676	676	676	676	676	
kansi	239	239	239	239	239						
	4483	5484	5484	5480	5482	3707	4713	4713,5	4713,2	4713,4	yht
		1001	1001	997	999		1006	1006,5	1006,2	1006,4	8023,1 gr
Toisen seulontasarjan seuloille jääneet ainekset											
	1	2	3	4	5	6	7	8	yht.	pros. %	kumul %
0	5	6	3	2	4,7	4,6	3,8	4,7	33,8	0,42	0,42
125	3	3	2	2	1	0,9	0,7	0,8	13,4	0,17	0,59
250	2	1	1	0	2,5	2,6	1,8	2,2	13,1	0,16	0,75
500	6	4	3	9	1,8	2,7	6,9	6,1	39,5	0,49	1,24
1000	39	27	50	174	23,2	31,7	117,5	75,9	538,3	6,71	7,95
2000	75	89	107	274	84,9	70,1	199,9	102,9	1002,8	12,50	20,45
4000	402	522	502	357	472,7	434,1	333,3	410,3	3433,4	42,79	63,25
8000	466	350	329	182	415,2	459,8	342,3	403,5	2947,8	36,74	99,99
16000	3	-1	0	-1	0	0	0	0	1	0,01	100,00
seuloilla	1001	1001	997	999	1006	1006,5	1006,2	1006,4	yht. 8023,1	100	grammaa

TAULUKKO 4B. Betonimurskan seulontatulokset ja käsittely vastaamaan alkuperäistä kiviainesta

2. kuutioon lisättiin tai poistettiin jakeita				Hiekalla/soralla Hyväksitödetty sekoitus					
	yht.	lisäys/poisto	tavoitearvo		yht.	pros. %	kumulat %		
0	33,8	+163,3	197,1	→	197,1	2,45	2,45		
125	13,4	+393	406,4	→	406,4	5,06	7,51		
250	13,1	+753,1	766,2	→	766,2	9,54	17,05		
500	39,5	+1201,2	1240,7	→	1240,7	15,45	32,51		
1000	538,3	+992,7	1531	→	1531	19,07	51,57		
2000	1002,8	-344,8	658	→	658	8,19	59,77		
4000	3433,4	-2983,4	450	→	450	5,60	65,37		
8000	2947,8	-384,8	2563	→	2563	31,92	97,29		
16000	1	+216	217	→	217	2,70	100,00		
					8029,4	100			
vettä kului 480 g enemmän kuin ensimmäisissä koepaloissa									
eli yhteensä 1040 g + 480 g = 1520 grammaa									

Murskatun betonin karkeammat jakeet eivät olleet pelkkää kiviainesta vaan kiviaineksen ja kovettuneen betonin aggregaatteja.



Kuva 12. Betonijakeita murskauksen jälkeen.

Oulun yliopistolta koekappaleiden valmistukseen osallistui tutkija Juho Rasmus. Hän suhteutti tarvittavan sementin ja kiviaineksen määrät. Koekuutiossa 1 käytettiin <125 µm seulottua betonimurskepölyä 25 % eli 400 grammaa korvaamaan sementtiä. Rapid -sementtiä näytekuutioon tarvittuun betonierään punnittiin 1040 grammaa

TAULUKKO 5. Materiaalien suhteitus

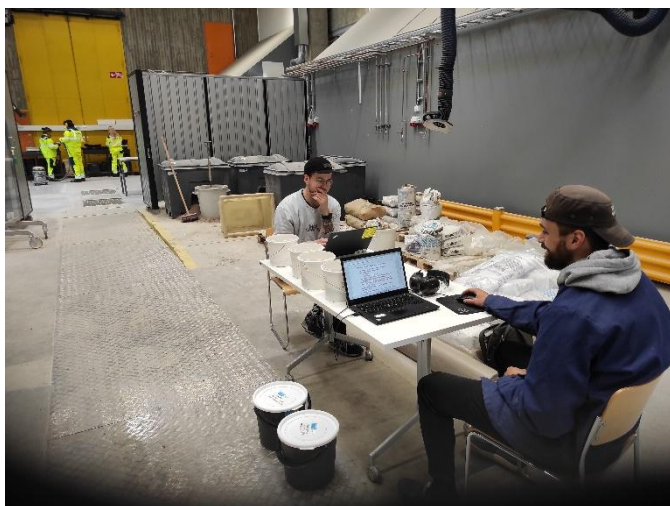
Testikuutioon punnittavat ainekset		Yleinen betoninvalmistuksen seossuhde			
		osa			
Kokonaismassa	9,6 kg	sementti	1		
Hiekka+kiviaines	8 kg	hiekkaa	2		
Sementti (75%)	1,2 kg	kiviainesta	3	kiviaines yht	5
Kierrätetty (25%)	0,4 kg	vettä	0,5		
Vesi	1,04 kg		6,5		
Vesi:sementtiaines	0,65				
Kiviaines:sementtist	5				



Kuva 13. Koekuution 1 valmistaminen



Kuva 14. Valmiit koekuutiot



Kuva 15. Eri oppilaitosten Oulun yliopiston, Oulun ammattikorkeakoulun ja OSAOn yhteistyötä hankkeen testeissä.



Kuutiot asetettiin muovikalvon alle kovettumaan vuorokaudeksi, jonka jälkeen ne laitettiin vesihauteeseen kovettumaan. "Näytteiden ikä" puristuslujuuden mittauksessa oli joko 43 vrk tai 70 vrk.

TAULUKKO 6. Testikuutioiden puristuslujuustestitulokset Mitta Oy:ltä

TESTAUSTULOKSET									
Kaikkien näytteiden säilytysolosuhde: vesiupotus ja tiheysmääritys: vedellä kyllästetty / mitatut mitat.									
Asiakkaan toimittamaa tietoa					Testaus- päivä	Massa [kg]	Tiheys [kg/m³]	Voima [kN]	Kuutio- lujuus [MPa]
Näytetunnus	Koekappale	Lujuus- ja rakenne- luokka	Valmistus- päivä	Ikä [vrk]					
A	Kuutio, 150 mm	-	13.06.2024	70	22.08.2024	7.7	2300	633	28.1
B	Kuutio, 150 mm	-	13.06.2024	70	22.08.2024	7.1	2090	664	29.5
C	Kuutio, 150 mm	-	10.07.2024	43	22.08.2024	7.6	2270	753	33.5
D	Kuutio, 150 mm	-	10.07.2024	43	22.08.2024	6.9	2070	370	16.4

Taulukossa

- näytekappale A, sementistä on korvattu 25 % betonin hienoaineella < 125 um
- näytekappale B, kiviaines on korvattu betonimurskalla, jossa raekokojakauma vastaa A näytteen kiviaineksen jakaumaa
- näytekappale C, ns verrokinäyte, jossa on laskennallinen sementin määrä ilman korvaavuutta
- näytekappale D, sementistä on korvattu 25 % hienoaineella ja 50 % kiviaineesta on korvattu kiviaineksen raekokojakaumaa vastaavalla betonimurskalla

Taulukon tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava näytteiden eri ikääntymisaika. Verrokinäyte C on saavuttanut vastaavan lujuuden kuin tarkasteltava näyte A, huomattavasti lyhyemmässä ikääntymisajassa. Lisäksi ikääntymisaika on huomioitava verrattaessa taulukossa esitettyjä puristuslujuuksia myöhemmin tässä raportissa esitettyihin puristuslujuuden arvoihin.

Resepti, joka vaikutti lupaavimmalta, pohjautui lentotuhkalle tarkoitettuun standardiin EN450-1, jossa 25 % sementistä korvataan kierrätysbetonin hienoaineksella.

Puristuslujuuden testauksen menetelmän kuvaus

Betonikoekappaleiden puristuslujuuden testaus suoritettiin Mitta Oy:llä standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti. Puristuslujuuden tulokset on ilmoitettu standardin SFS 7022:2024 mukaisesti: 150 x 300 mm (halkaisija x korkeus) lieriön tulos ilmoitetaan lieriölujuutena (MPa) ja särmältäään 150 mm kuution lujuus ilmoitetaan kuutiolujuutena (MPa).

Särmältäään 100 mm kuution lujuus on muutettu vastaamaan 150 mm kuution lujuutta standardin SFS 7022:2024 mukaisesti. Tiheyden määrittäminen suoritettiin standardin SFS-EN 12390-7:2019 mukaisesti, siten että tilavuuden määrittämisessä käytettiin todellisia mittoja ja massa määritettiin toimitustilassa tai vedellä kyllästetyille kappaleille. Testaustulokset pätevät ainoastaan testatuille koekappaleille.



3.2.2 Betonireseptin testaus 2

Määritellyn betonireseptin suhteitusta ja valmistusta testattiin edelleen OSAOlla koekappaleiden eli penkkien jalkojen valmistuksen yhteydessä. Betonin käyttökohteista katsotaan vielä erilaisia vaihtoehtoja. Betoniteollisuuden kestävä kehityksen vaatimuksia ja tulevaisuutta pohditaan opiskelijoiden kanssa yhdessä ja betonipurkukohteiden kiertotalouden edistämiseen etsitään ratkaisuja. Hankkeen tuloksena saatu tieto hienon kiertobetonin soveltuvuudesta betonin valmistukseen tuodaan eräänä ratkaisuna kiertotaloushaasteeseen betonialalle.

OSAolla opiskelijaryhmä murskasi betonia leukamyllyllä aiempien määritysten mukaisesti siten, että murskatusta materiaalista saatiin seulottua alle < 500 µm:n betonipölyä noin 2,5 kg. Tämä määrä vastaa noin 25 %:a valukappaleiden sisältämästä sementistä. Seulonnan jälkeen betonipöly jauhettiin vielä myllyllä.

Opiskelijoiden tuli seuraavaksi suorittaa seulonta-analyysi käytettäville hiekka- ja sepelikiviaineksille.

TAULUKKO 7. Seulontatulokset OSAOlla käytetyille kiviaineksille

Suhteitus kivilajeista 24.1.2025								
seulonta-aika:				10 min				
hiekkä 0,1-0,7 mm				hiekkä 0-2 mm				
Seulat:	Tyhjäpaino	1000,6	Seulalle jäänyt	%	Tyhjäpaino	1000,7	Seulalle jäänyt	%
0	346,1	485	138,9	0,0	346,1	355,0	8,9	0,0
0,063	318,5				318,5	371,7	53,2	0,9
0,125	330,5	961,300	630,8	13,9	330,5	638,4	307,9	6,2
0,250	348,5	556,400	207,9	76,9	348,5	557,7	209,2	37,0
0,500	364,8	388,100	23,3	97,7	364,8	616,8	252,0	57,9
1,000	450,6	450,700	0,1	100,0	450,6	592,3	141,7	83,1
2,000	501,5			100,0	501,5	528,8	27,3	97,3
4,000	510,6				510,6	510,6	0,0	100,0
>8,000	543,8				543,8	543,8	0,0	100,0
16,000								
1001,0					1000,2			

hiekkä 0-8 mm				sora 8-16 mm			
Tyhjäpaino	1000,65	Seulalle jäänyt	%	Tyhjäpaino	1000,6	Seulalle jäänyt	%
346,1	349,0	2,9	0,0	346,1	353,9	7,8	0,0
318,5	326,3	7,8	0,3	318,5	321,9	3,4	0,8
330,5	359,1	28,6	1,1	330,5	334,0	3,5	1,1
348,5	483,8	135,3	3,9	348,5	349,3	0,8	1,5
364,8	732,2	367,4	17,5	364,8	366,1	1,3	1,5
450,6	713,0	262,4	54,2	450,6	451,6	1,0	1,7
501,5	645,2	143,7	80,5	501,5	505,2	3,7	1,8
510,6	559,1	48,5	94,8	510,6	618,7	108,1	2,1
543,8	546,9	3,1	99,7	543,8	1414,5	870,7	13,0
100,0							
999,7				1000,3			

Valukappaleisiin valittiin kivilajeiksi hiekka 0,1 – 0,6 mm, hiekka 0 – 8 mm sekä sepele 8 - 16 mm. Seulontatulosten perusteella, nomogrammeja hyödyntäen opiskelijat suhteittivat betoniin tarvittavat erilaiset kiviainelajien määrät, kun valmistettavalle betonille oli asetettu määrätty lujuusluokka. Suhteituksen lopputuloksena opiskelijat saivat koekappaleiden valmistusta varten tietoon tarvittavat määrät annostelumäärät hiekalle, sepelikiviainekselle sekä sementille. Tarvittavan sementin määrästä 25 % korvattiin jauhetulla betonipölyllä. Tämän jälkeen opiskelijat sekoittivat ainekset veden kanssa betonimassaksi betonimyllyssä ja valoivat valmiin betonimassan penkinjalkojen muotteihin sekä puristuslujuusmittauksia varten kahteen 150 mm:n standardimuottiin.



Kuva 16. Betoniseoksen suhteituslaskelmat ja valu puistonpenkkimuotteihin sekä muovisiin lujuusmittausmuotteihin.



Kuva 17. Suhteituksen ja testivalujen tiedoilla valmistettu puiston penkki.

Kuvioidun betonimuotin haasteet ilmenivät valumuottien poistamisen yhteydessä. Kuvio pyrkii murtumaan reunojen ja varsinkin kirjainten kohdalta. Puumateriaali muotissa tulisi korvata jollakin toisella. Projektiryhmä vieraili mm. Ecoup Oy:llä, jossa saatiin lisätietoa esimerkiksi kappaleiden muotituksesta. EcoUp yritys toimii osin myös betonijakeiden hyödyntämisen parissa.



Kuva 18. Hankkeen asiantuntijat vierailulla EcoUp Oy:llä Tarvasjoella.

Joustava muovikomposiittimateriaali soveltuisi paremmin kuviovalua varten, kun valmistetaan koekappaleiden osia. Tämän tyyppistä ratkaisua ehdotettiin myös alkaliaktivoitujen materiaalien hyödyntämisestä tekevän Keko geopolymeerit Oy:stä. EcoUp vierailun lisäksi OSAO:ltä vierailtiin betonialan yrityksissä keskustelemassa betonin suhteituksesta, valamisesta, murskauksesta sekä kierrätysbetonin määristä (vierailukohteita olivat Parma Oy, Paupek Oy, EcoUp Oy, Kiertokaari Oy ja Betker Oy).

Kimmo-vasaratestien ja puristuslujuuksien vertailu testin 2 tuloksissa

Mitta Oy:llä testattujen koekappaleiden puristuslujuuden arvoja verrattiin kimmovasaralla määritettyihin puristuslujuuksiin. Testien perusteella voidaan havaita, että kimmovasaratestien tulokset ovat hyvin epävarmoja. Kuvaajassa on esitetty kimmovasaran arvon vastaavuus puristuslujuutena. Keskiarvoisesti kimmovasaran arvot olivat valukappaleissa välillä 11,0 – 16,1. Muuntokuvaajan perusteella puristuslujuuden vaihteluväli olisi vastaavasti -2,63 – 3,15. Mitta Oy:llä suoritettujen puristuslujuustestien mukaisesti kappaleiden puristuslujuudet ovat olleet keskiarvoisesti 20,65 MPa. Voidaan päätellä, että kimmovasara ei vaikuttanut riittävän tarkalta mittausten menetelmältä betonikoekappaleiden lujuuden määrittämiseksi ainakaan, mikäli valukappale on säilytetty standardin mukaisesti vesihauteessa. Kimmovasaran iskualue on kuitenkin pienellä pinta-alalla kappaleen pinnassa ja vesihauteessa varastoidun näytteen pinta on vielä 28 vrk:n kovettumisaikan jälkeenkin melko pehmeä.

TAULUKKO 8. Kimmovasaramittauksen vertailu puristuslujuusmittauksiin.

Kimmovasaratestit koekappaleista 13032025 OSAOlla

	KPL1		KPL2	
	sivusta	päättä	sivusta	päättä
1	20	12	14	12
2	17	9	16	12
3	15	10	14	16
4	12	10	18	14
5	15	13	12	13
6	17	12	22	12
7	18	12	16	12
8	15	10	16	11
Keskiarvo	16,1	11,0	16,0	12,8
MUUNNETTUNA	3,15	-2,63	3,00	-0,71

Puristuslujuus Mitta Oy

Keskiarvo

Voima	349	319	
Kuutiolujuus Mpa	21,6	19,7	20,65

KERROIN MUUNTAMISEEN SIVUSUUNNAN TESTISTÄ

6,661

kimmov (N puristusluju) Mpa

20	100	8,3
25	180	15
30	260	21,3
35	350	29
40	440	36,8
45	540	44,5

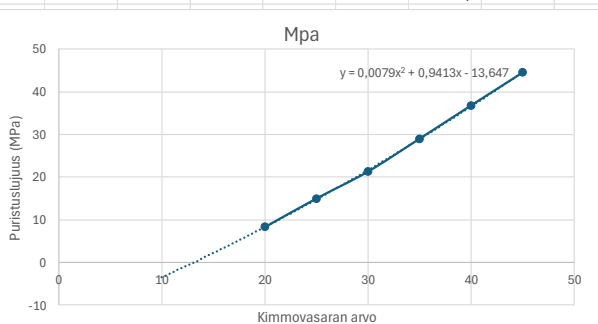
Puristuslujuus (Mpa)

Mpa

y = 0,0079x² + 0,9413x - 13,647

Asiakkaan toimittamaa tietoa

Näytetunnus	Koekappale	Lujuus- ja rakenne-luokka	Valmistus-päivä	Ikä [vrk]	Testaus-päivä	Massa [kg]	Tiheys [kg/m³]	Voima [kN]	Kuutiolujuus [MPa]
1	Kuutio, 150 mm	-	13.02.2025	28	13.03.2025	6.1	2520	349	21.6
2	Kuutio, 150 mm	-	13.02.2025	28	13.03.2025	6.1	2540	319	19.7



Samassa yhteydessä kimmovasaraa testattiin huomattavasti pidemmän aikaa kuivuneisiin valukappaleisiin, joissa oletettu puristuslujuus on samaa suuruusluokkaa kuin taulukossa 9 on esitetty. Mittaustulosten perusteella päädyttiin huomattavasti lähempänä toisiaan oleviin puristuslujuuden tuloksiin (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Kimmovasaramittauksen tulokset ikääntyneempään valukappaleeseen.

Penkinjalkojen testaus kimmovasaralla				
	Jalka1		Jalka2	
	sivusta	päättä	sivusta	päättä
1	27	27	34	26
2	28	28	28	25
3	26	24	32	26
4	36	23	35	34
5	42	26	26	27
6	34	22	26	26
7	32	36	28	28
8	28	23	28	28
Keskiarvo	31,6	26,1	29,6	27,5
MUUNNETTUNA	23,17	15,63	20,37	17,47 Mpa

3.2.3 Betonireseptin testaus 3

OAMK:lta lainassa olevilla standardimuoteilla testasimme testikappaleiden sarjan, jossa testikappaleet valmistettiin seuraavasti

- 100 % sementti
- 95 % sementti, 5 % jauhettu kiertobetonipöly
- 90 % sementti, 10 % jauhettu kiertobetonipöly
- 85 % sementti, 15 % jauhettu kiertobetonipöly
- 80 % sementti, 20 % jauhettu kiertobetonipöly
- 75 % sementti, 25 % jauhettu kiertobetonipöly

Kutakin näytettä valmistettiin 2 kpl mahdollistaen rinnakkaismääritykset. Lisäksi päätimme kokeilla vielä kimmovasaran luotettavuutta siten, että valmistimme jokaisesta tutkivasta betoniseoksesta kolmannenkin testattavan valukappaleen. Samassa yhteydessä testasimme myös betonisten penkin jalokojen valumuotteihin muutosta, jonka tavoitteena oli saada valukappaleiden kuviot jäämään selkeämin esiin.

Opiskelijaryhmä seuloi kivimateriaalin sekä murskasi, seuloi ja jauhoi betonimateriaalin. Kivimateriaalina betoniseoksessa käytettiin hiekkaa 0,1 – 0,6 mm, hiekkaa 0 – 8 mm ja sepeliä 8 – 16 mm.

TAULUKKO 10. Betoniseoksissa käytettyjen kiviainesten seulontatulokset

seulatulokset sepeli 8-16mm					
Materiaalimäärä seulontaan			392,6 g		
seulan koko	tyhjä	seulottu	erotus	jäänyt%	läpäisy%
16			0	0,0	100,0
8	544,1	602,6	377,7	97,1	2,9
4	517,5	528,9	11,4	2,9	0,0
2	482,9	482,9	0	0,0	0,0
1	459,4	459,4	0	0,0	0,0
0,5	411,8	411,8	0	0,0	0,0
0,25	339,2	339,2	0	0,0	0,0
0,125	330,7	330,7	0	0,0	0,0
0	346,2	346,2	0	0,0	0,0
			389,1	100,0	

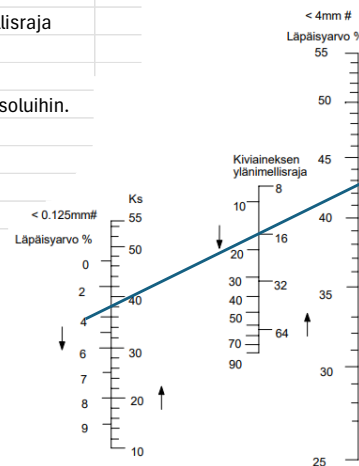
seulatulokset hiekka 0-8mm					
Materiaalimäärä seulontaan			473,2 g		
seulan koko	tyhjä	seulottu	erotus	jäänyt%	läpäisy%
16	568,6	568,6	0	0,0	100,0
8	544,1	545,2	1,1	0,2	99,8
4	517,5	534	16,5	3,3	96,5
2	482,9	512,6	29,7	5,9	90,6
1	459,4	619,7	160,3	32,0	58,6
0,5	411,8	566	154,2	30,7	27,9
0,25	339,2	422,5	83,3	16,6	11,2
0,125	330,7	352,2	21,5	4,3	7,0
0	346,2	381,1	34,9	7,0	0,0
			501,5	100,0	

seulatulokset hiekka 0,1-0,6mm					
Materiaalimäärä seulontaan			466,5 g		
seulan koko	tyhjä	seulottu	erotus	jäänyt%	läpäisy%
16			0	0,0	100,0
8			0	0,0	100,0
4			0	0,0	100,0
2			0	0,0	100,0
1			0	0,0	100,0
0,5			7,15	1,4	98,6
0,25			162,05	32,4	66,2
0,125			207,55	41,5	24,7
0			123,5	24,7	0,0
			500,25	100,0	

TAULUKKO 11. Määritellään betonille tavoitteellinen koostumus, yhdistetyn kiviaineksen kokojakauma ja betoniin seostettavat materiaalisuhteet.

Betonin suhteitus eli koostumuksen määrittäminen

valmistetaan betonia C27/32	27	32	= nimellislujuus
tavoitelujuus = suhteituslujuus		38,4	yleisesti tavoitelujuus on 1,2 * nimellislujuus
Kiviaineksen suurin raekoko	16	mm	= kiviaineksen ylänimellisraja
Betonin suhteituslujuus	38,4	Mpa	= Ks
Määritetään oheisesta kuvasta yhdistetyn runkoaineksen ohjearvot. Merkitse arvot soluihin.			
Piirretään suora, joka leikkaa kaikki kolme asteikkoa. Suoran tulee kulkea yllä oleviin soluihin poimitujen kiviaineksen ylänimellisrajan Ks eli suhteituslujuuden arvojen kautta.			
Kuvaajan perusteella määritetyt vaaditut läpäisy%			
< 4mm seulan läpäisy%	42	%	
< 0,125 mm seulan läpäisy%	3,6	%	



Määritetään kuinka suuri osuus betoniin tulee laittaa kutakin käytössä olevaa kivilajia, jotta täytetään valmiin betonin lujuusvaatimukset.

Seula-analyysin perusteella koostettu kiviainesten läpäisy% taulukko.

		seulakoko ja vastaava läpäisy%									
käytetyt kiviainekset		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64
hiekkä	0,1-0,6	24,7	66,2	98,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100
hiekkä	0-8	7,0	11,2	27,9	58,6	90,6	96,5	99,8	100,0	100	100
murske	8-16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	100,0	100	100

Kunkin kiviaineksen %osuuden määrittäminen valmiissa betonissa

Muuttele yritys-erehdys-päättely periaatteella keltaisella pohjalla olevien solujen arvoja. Muutamasi arvo vastaa kunkin kiviaineksen %osuutta betonissa. Huomioi, että kiviainesten %osuuksien summan tulee olla 100.

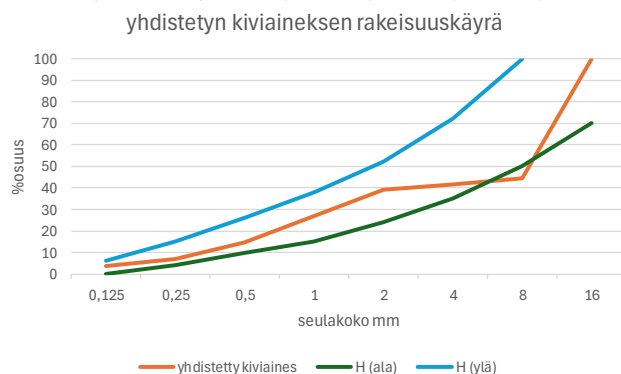
Kiviainesten %osuudet ovat silloin oikein kun alle 0,125mm ja alle 4mm raekokojen %osuudet vastaavat aiemmin kuvaajasta määritettyjä vaadittuja arvoja eli vihreät solut <0,125 ovat samat ja vastaavasti <4 ovat samat.

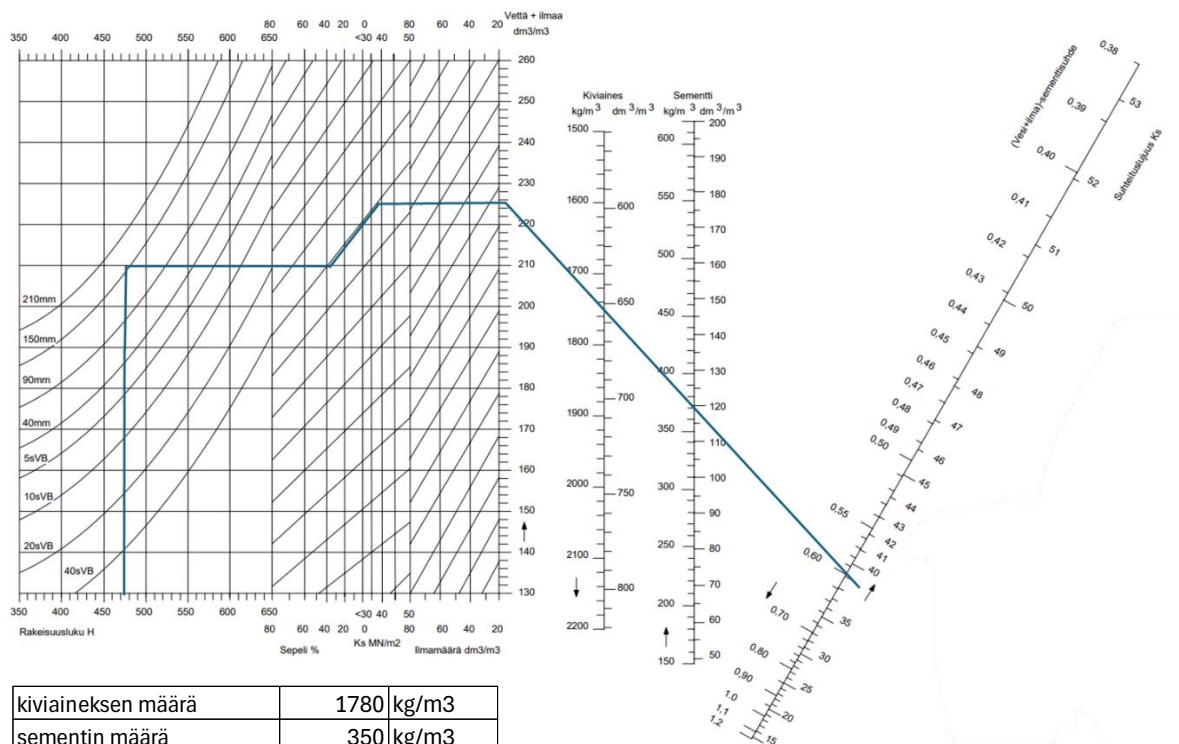
Lisäksi yhdistetyn kiviaineksen rakeisuuskäyrän tulee sijoittua viereisessä kuvaajassa H (ylä) ja H (ala) kuvaajien väliin.

kiviainesten %osuudet betonissa			
0,1-0,6	0-8	8-16	summa
4	39	57	100
vaadittu	3,6	vaadittu	42
<0,125	3,7	<4	41,6

kiviaines	%osuus	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	H
0,1-0,6	4	0,987506	2,647076	3,942829	4	4	4	4	4	4	4	
0-8	39	2,714058	4,386042	10,86401	22,85563	35,32164	37,631306	38,91446	39	39	39	
8-16	57	7,09E-15	7,09E-15	7,09E-15	7,09E-15	7,09E-15	7,088E-15	1,670008	57	57	57	
yhdistetty kiviaines		3,701564	7,033118	14,80684	26,85563	39,32164	41,631306	44,58446	100	100	100	477,9346
tulee olla 100	100											

läpäisy 95% tulee olla lähellä seulakokoa 16mm





Laskettiin tarvittavat kiviaineksen, sementin ja jauhetun kiertobetonipölyn määrät, kun valmistetaan 9 litraa betonia. Huomioidaan laskelmissa kierrätysbetonin korvausosuus sementistä.

1l = 0,001m³	0,009 m³	0,009	
kiviaineksen määrä	16,02	kg	
sementin määrä	3,15	kg	
vesi + ilmamäärä	1,818	dm³	HUOM 1dm³ = 1l, vähennetään oletettu ilmamäärä
Huomioidaan kiviaineksen annostelussa kunkin kiviaineksen suhteellinen määrä sekä korvataan osa sementistä jauhetulla kierrätysbetonilla. Lasketaan eri kiviainesten annostusmäärät sekä sementin ja kierrätysbetonin annostusmäärät			
Kierrätysbetonin osuus sementistä	25	%	
ainesosa			
0,1-0,6	0,6	kg	
0-8	6,2	kg	
8-16	9,1	kg	vihreällä pohjalla on valmiin betonin koostumus
sementti	2,4	kg	
betoni	0,8	kg	
vesi	1,6	l	

Valetut testikappaleet kuivattiin huoneenlämmössä 1 vrk ajan, jonka jälkeen ne irrotettiin muoteistaan ja säilytettiin vesihauteessa siten, että puristuslujuusmittaukset suoritettiin 28 vrk kohdalla.

Taulukossa 12 on esitetty puristuslujuuksien arvot Mitta Oy:n mittaamina.



Euroopan unionin
osarahoittama



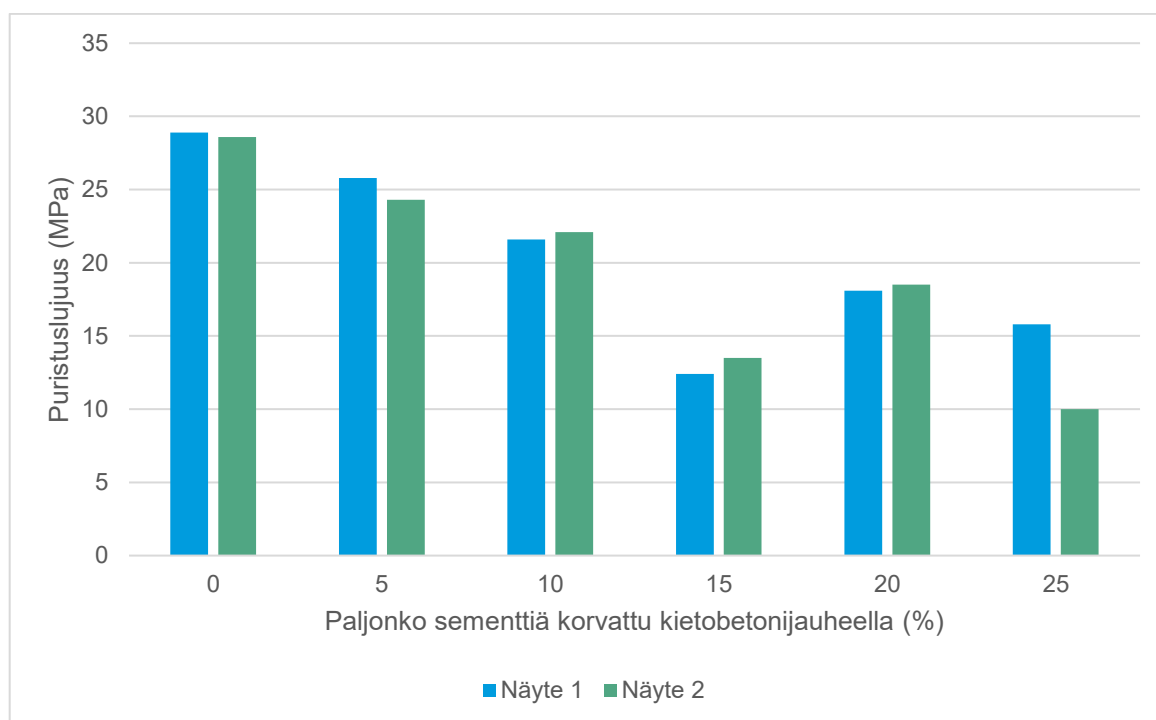
TAULUKKO 12. Testikappaleiden puristuslujuuden tulokset Mitta Oy:n raportoina

Asiakkaan toimittamaa tietoa					Testaus- päivä	Massa [kg]	Tiheys [kg/m³]	Voima [kN]	Kuutio- lujuus [MPa]	Huomiot
Näytetunnus	Koekappale	Lujuus- ja rakenne- luokka	Valmistus- päivä	Ika [vrk]						
0-1	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.9	2390	650	28.9	
0-2	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.7	2380	618	28.6	
5-1	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	8.0	2390	581	25.8	
5-2	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.9	2370	547	24.3	
10-1	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.7	2380	465	21.6	
10-2	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.6	2350	478	22.1	
15-1	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.8	2350	280	12.4	
15-2	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.7	2340	298	13.5	Poikkeamat (katso kuvaukset alemmalla): 2
20-1	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.7	2370	390	18.1	
20-2	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.6	2360	398	18.5	
25-1	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.8	2350	350	15.8	Poikkeamat (katso kuvaukset alemmalla): 2
25-2	Kuutio, 150 mm	-	14.05.2025	28	11.06.2025	7.5	2370	213	10.0	

Poikkeamakuvaudet

2: Koekappale ei täyttänyt standardin SFS-EN 12390-1 mita- ja muotovaatimuksia. Koekappaleen pinta-ala laskettu mitattujen mittojen mukaan, standardin SFS-EN 12390-3:2019 liitteen B mukaisesti.

ja vastaavasti excel-kaaviona

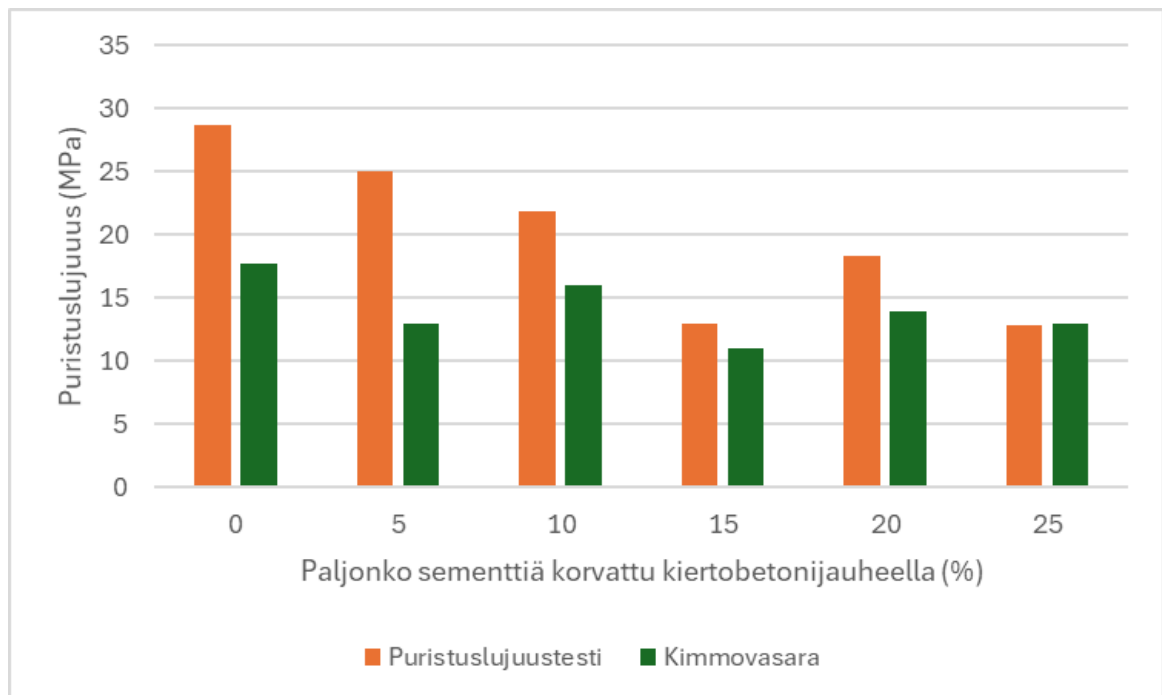


Mittaustulosten perusteella valukappaleen puristuslujuus vähenee kiertobetonijauheen määrän kasvaessa. Korvaussuhteen 20 % osalta on näytteen käsittelyssä tapahtunut todennäköisesti virhe materiaalien punnituksessa tai näytenumerot ovat sekoittuneet keskenään.

Kimmo- ja puristuslujuuksien vertailu testin 3 tuloksissa

Puristuslujuustestikappaleiden lisäksi valmistimme testikappaleet kimmo- ja puristuslujuuksien mittausta varten. Kimmo- ja puristuslujuustestikappaleet säilytettiin koko 28 vrk ajan huoneenlämpötilassa ilman vesihautetta.

TAULUKKO 13. Puristuslujuustestien ja kimmovasaramittausten tulosten vertailu



Tulosten perusteella kimmovasaramittauksen tuloksia ei voida pitää erityisen luotettavina arvioitaessa kappaleen puristuslujuutta. Edelleen on kuitenkin mahdollista, että testikappaleiden kuivumisaika ei ollut riittävä kimmovasaran mittausperiaatteelle huomioiden kimmovasaran kohtalaisen pienen altistusalueen.

3.3 YHTENNVETO KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA JA KÄYTETYN MATERIAALIN TESTAUKSISTA

Betonikappaleista murskauksen, seulonnan ja jauhatuksen jälkeen erotetun hienoaineksen lisääminen betoniin sementin korvikkeena alentaa kappaleiden puristuslujuutta. Puristuslujuus koekappaleissa, joissa oli käytetty betonipölyä sementtiä korvaavana aineena, oli noin 10-20 MPa, joka on alle tavoite-
lujuuden 30 MPa. Lujuus mitattiin 28 vrk:n kovettumisajan jälkeen vesihauteessa kovettuneista koekuutioista. Hienoaineksen lisääminen soveltuisikin betonikappaleisiin lisääneena/fillerinä lisäten valmistetun betonin kiertotaloutta. Prosessivaiheiden lisääminen tuotantoketjuun vaikuttaa kuitenkin valmistuskustannuksiin negatiivisesti.

Koekappaleiden suhteitus voidaan tehdä käyttämällä apuneuvoksi laadittua excel -laskentataulukkoa. Käyttämällä reseptinä suhteitettua seosta, josta 25 % sementin määrästä korvataan jauhetulla purkubetonin hienoaineksella (RFP), saadaan betoniseos, jota voidaan käyttää ei kriittisissä kohteissa. OSAOlla ko. betoniseosta testattiin puiston penkkien jalkojen valamiseen.

Valukappaleiden koestukset kimmovasaratestillä osoittivat suurta hajontaa ja epätarkkuutta etenkin vesihauteessa säilytetyissä standardinäytteissä. Suoritetujen testien perusteella kimmovasaratestin tulosten luotettavuutta voidaan parantaa pidentämällä kappaleiden ikää ja säilyttämällä testikappaleet ilman vesihaudetta.

4 Kirjallisuusselvitys purkubetonin käytettävyydestä

Sisältö:

1. Taustaa
2. Purkubetonijakeet
3. Hienoaineksen käyttö
4. Karbonoinnin vaikutus
5. Yhteenveto

Lyhenteiden selityksiä

ADR	Edistynyt kuiva talteenotto
AG	Asfalttimurske
BG	Betonimurske
Cc	Kalsiumkarbonaatti
CCA	Murskattu betonimurske
CDW	Rakennus- ja purkujäte
CRCF	Karbonoitu kierrätetty betonijauhe
FG tai FC	Hienomurske
GGBS	Raakatuhka
HCW	Hydratoitunut sementtijäte
HMG	Hydraulisesti sidottu murske
MG	Sekamurske
MWG	Muurausmurske
OAMK	Oulun ammattikorkeakoulu
OPC	Tavallinen portlandsementti
RCA	Karkea kiviaines
RCF	Kierrätetyt betonijauheet
RCP	Kierrätetyt betonipartikkelit
RFP	Kierrätetty hieno jauhe
SCM	Betonimateriaali
TA	Tanniinihappo



4.1 TAUSTAA

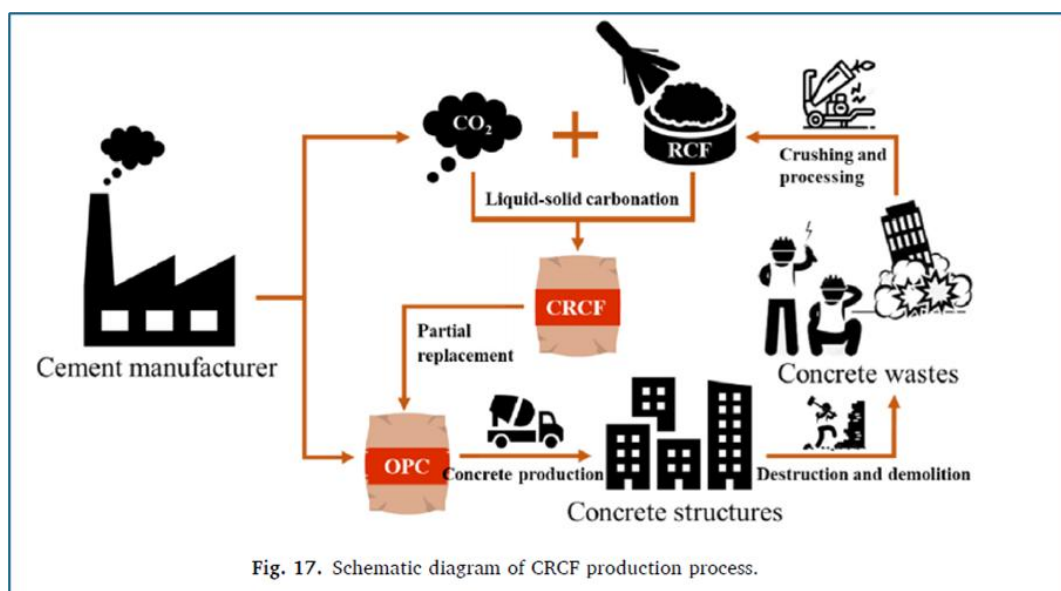
Rakennus- ja purkujätteen kierrätys ja hyötykäyttö (RAPUA) hanke on Oulun ekosysteemisopimukseen ja siinä erityisesti Strategiseen kohdealaan 3. Kestävä kiertotalous ja puhtaat ratkaisut liittyvä hanke, jossa keskitytään betonijakeen kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön. Hankkeessa tehdään kokonaisvaltainen selvitys jakeen kiertokulusta purkutyömaalta uudeksi tuotteeksi siihen liittyvät toimenpiteet raportoiden. Hanke toteutetaan yhteistyössä Oulun yliopiston, OAMK:n, VTT:n, ja Koulutuskuntayhtymä OSAOn kanssa. Päähakijana on Oulun yliopisto.

Hanke hyödyttää välillisesti erityisesti ympäristöä vähentämällä ja poistamalla ympäristöhaittoja, kun vähähiilisyys ja hiilineutraalisuus lisääntyy sekä kiertotalous tehostuu. Lisäksi kansalaiset hyötyvät hankkeesta, kun ympäristön tila paranee ja luonnon monimuotoisuus säilyy.

Kaupunkirakenteen tiivistäminen voi johtaa vanhojen betonielementtirakennusten korvaamiseen uusilla, isommilla rakennuksilla. Kaupunkeihin, mukaan lukien Oulu, on rakennettu 1960–80 luvuilla betonirakennuksia, jotka tarvitsevat nyt niin peruskorjausta kuin myös energiatehokkuuden parantamista. Näissä hankkeissa voidaan joutua purkamaan betonirakenteita. Betonirakenteiden valmistamiseen käytetään energia- ja päästöintensiivistä sementtiä. Tästä syystä purettujen betonirakennusten ja -rakenteiden hyödyntäminen uusien tuotteiden valmistuksessa on keino vähentää rakennustuotteiden valmistuksen päästöjä sekä täyttää jätedirektiivin rakennus- ja purkujätteen kierrätystavoite 70 %:a.

Hankkeen tavoitteena on pitää betonirakenteisiin sitoutuneet luonnonvarat materiaalikierrossa. Tällä hetkellä purkubetoni päätyy kaatopaikalle tai matala-arvoisiin käyttökohteisiin, mm. maarakennukseen. Tämän hankkeen tavoitteena on löytää kiertobetonille nykyisiä käyttökohteita arvokkaampia käyttökohteita. Hankkeessa tehtiin kartoitus, että mihin kierrätysbetonin erikokoisia jakeita voitaisiin hyödyntää. Tietoa kartoitetaan mm. kirjallisen materiaalin pohjalta.

Tässä katsauksessa on kartoitettu tietoa tieteellisistä artikkeleista, joissa on tutkittu purkubetonin käsittelyä ja muokkausta siten, että saadaan kierrätettävää materiaalia joko sementti- tai betonieollisuuteen. Kuvassa 1 on esitetty perusidea kierrätettävän betonin hienoaineksen käyttämiseen.



Kuva 4.1. Kaaviokuva karbonoidun kierrätetyn betonijauheen (CRCF) tuotantoprosessista.[16]

4.2 PURKUBETONIJAKEET

Maailma kohtaa kriittisiä ympäristöhaasteita luonnonvarojen liikkakäytön ja laajamittaisten CO₂-päästöjen vuoksi. Samaan aikaan nopeutuneen kaupungistumisen ja uudelleenkehittämisen seurauksena syntyy valtavia määriä betonijätettä. Betonijätettä ja karbonoitua betonijätettä voidaan siten käyttää sekä vaihtoehtoisina materiaaleina kiviaineksille ja sementille, että hiilinieluna CO₂-päästöjen vähentämiseksi.

Tutkimuksissa on tarkasteltu kriittisesti muun massa erilaisia karbonointimenetelmiä ja niiden muokattuja tekniikoita kierrätettyjen karkeiden kiviaineiden (RCA), kierrätettyjen betonijauheiden (RCF) ja kierrätettyjen betonipartikkeleiden (RCP) käsittelyyn. [10]

Betonijätteen käyttö murskattuna betonimurskeena (CCA) rakenteellisessa betonissa antaa sille uuden tarkoituksen ja pidentää standardibetonin teknistä käyttöikää, edistäen betonin kiertotaloutta.

On tutkittu CCA:n käyttöä kiviaineksen korvaajana teollisessa viitebetonireseptissä hienoaineksina ja kokonaisena kiviaineksen korvaajana.

CCA-betonin kokeellisia tutkimuksia on suoritettu testaamalla puristuslujuutta ja työstettävyyttä. Tulokset osoittivat, että CCA-betonilla on heikompi puristuslujuus ja työstettävyys kuin standardibetonilla johtuen CCA:n kiinni tarttuneesta laastista ja litteysindeksistä. Nämä ominaisuudet erottavat CCA:n standardibetonin kiviaineksista. Nämä ominaisuudet vaikuttavat myös CCA:n kiviaineksen pakkaustiheyteen ja veden imeytymisominaisuuksiin, jotka ovat ratkaisevia betonin työstettävyydelle ja puristuslujuudelle. [4]

Rakennus- ja purkujätteen (CDW) kierrätys rajoittuu yleensä karkeamman fraktion käyttöön uuden betonin kiviaineksena. Hienoaineksen talteenotto vaatii puhdistusta, jossa poistetaan hydratoitunut sementtijäte (HCW). [6] Rakennusten ja teiden purkamisesta syntyy romua tai kivimurskaa. Tämä materiaali voidaan käsitellä ja murskata kierrätetyksi kiviainekseksi. Tavanomainen tuotantoprosessi koostuu murskauksesta (leukamurskaimella, iskupalkki-murskaimella (pyörivä murskain) tai kartiomurskaimella) ja materiaalien erottelusta seulojen ja magneettien avulla. Lisäksi uudet tekniikat laajentavat kierrätettyjen kiviaineksien käyttömahdollisuuksia. Esimerkkejä ovat seulontatekniikat, pesutekniikat, optinen lajittelu, asfaltin lämpökäsittely ja uudet teknologiat, jotka tarjoavat mahdollisuuksia palauttaa alkuperäiset lähdemateriaalit ja tuoda uusia sovelluksia ulottuville.

Kierrätettyjen kiviaineksien tyypit

Yleisesti erotetaan seuraavat kierrätettyjen kiviaineksien tyypit:

- Betonimurske (BG)
- Sekamurske (MG)
- Muurausmurske (MWG)
- Hydraulisesti sidottu murske (HMG)
- Asfalttimurske (AG)
- Hienomurske (FG)

Betonimurske (BG) Betonimurske syntyy rakennusbetonin murskauksesta. Se koostuu vähintään 80 % betonista ja vähintään 90 % kivimateriaaleista, joiden laatu on verrattavissa betoniin. Betonimursketta käytetään raskaan liikenteen alueilla ja teollisuusalueilla.

Kiviainekset betoniin, betonituotteisiin ja laastiin

Betoni-, seka- ja hienoaineksia voidaan käyttää betonin valmistuksessa. Ne korvaavat soraa tai hiekkaa ensisijaisista lähteistä tai kaukana olevista lähteistä. Kierrätettyjen kiviaineksien teknistä suorituskykyä betonissa on tutkittu ja testattu laajasti. Sillä välin on kertynyt paljon käytännön kokemusta ja julkaistu joukko standardeja. Tärkeimmät ovat:

- EN 206: betoniseokset (ja Alankomaissa myös NEN 8005)
- EN 12620: kiviainekset betoniin (ja Alankomaissa myös NEN 5905)
- CUR-suositus 80, betoni seka-aineksilla
- CUR-suositus 106, betoni hienoaineksilla
- CUR-suositus 112, betoni betonimurskeella

CUR-suositukset ovat erityisiä Alankomaiden tilanteelle ja niitä voidaan pitää esistandardeina.

EN 206:n mukaan jopa 50 % karkeiden kierrätettyjen kiviaineksien käyttö betonissa on mahdollista, riippuen betonin ympäristöluokasta.[3]

4.3 HIENOAINESEN KÄYTTÖ

Purettu tai jätebetoni voidaan murskata hiukkasiksi, joiden koko on sopiva käytettäväksi karkeana tai hienona kiviaineksena uudessa betonissa. Tämä kierrätysprosessi tuottaa myös 5 % - 20 % pieniä hiukkasia, joiden koko on alle 0,15 mm, ja jotka voidaan kierrättää kierrätettyinä betonijauheina (RCF). Matala-arvoisten sovellusten ja kaatopaikkakäytön lisäksi RCF:lle on löydetty vain vähän sopivia sovelluksia. [12]

Purkujätteistä peräisin oleva betonijäte murskataan ja seulotaan yleisesti uudelleenkäyttöä varten, jolloin saadaan hienojakoisia fraktioita. Niiden alhainen reaktiivisuus aiheuttaa kuitenkin haasteita uudelleenkäytölle uusissa sementtipohjaisissa seoksissa. Tutkimus, jossa on selvitetty hydrotermisen ja mekaanisen aktivoinnin menetelmää kierrätetyn betonijauheen (RCF) kemiallisen reaktiivisuuden lisäämiseksi, osoitti mahdolliseksi niiden käytön lisäsementtimateriaalina.

Mekaanisen aktivoinnin jälkeen kaikissa autoklaavatuissa näytteissä tapahtui amorfisoitumista tobermoriittirakenteiden rikkoutumisen vuoksi. Vaikka jonkin verran agglomeraatiota havaittiin, jauhamisprosessi aiheutti amorfisoitumista, mikä paransi reaktiivisuutta. [2]

Tutkimuksessa valettiin kuutioita korvaamalla osa tavallisesta portlandsementistä (OPC) (10, 20 ja 30 %) purkujätteestä saadulla jauheella.

Viitemiksauksen (M25) kuutiot valettiin myös IS: 8112-1989 mukaisesti käyttäen OPC:tä (43-luokka): hienoaainesta: karkeaa ainesta suhteessa 1:1,67:3,33. Vesi-sementtisuhde oli 0,50. Kaikki kuutiot testattiin 7 ja 28 päivän kuluttua, kun ne olivat kovettuneet määrätyn ajan vesijohtovedessä. Eri seosten työstettävyyttä mitattiin painuma-arvolla.

Veden tarve saman työstettävyyden saavuttamiseksi kasvaa purkujätteen käytön prosenttiosuuden kasvaessa.



Kierrätetyn betonin lujuus heikkenee hieman, kun sementistä korvataan enintään 10 % purkujätteestä saadulla jauheella. Kuitenkin purkujätteen osuuden kasvaessa edelleen, lujuus heikkenee.

Kierrätettyä betonia, jossa sementistä on korvattu enintään 20 % purkujätteestä saadulla jauheella, voidaan käyttää vaihtoehtona M-25-luokan betonille, sillä kierrätetyn betonin lujuus on hieman pienempi kuin viitebetonin. [1]

Sementtipastan muokkauksia tutkittiin korvaamalla 30 % viitesementistä, CEM II/A-LL, raakatuhkalla (GGBS). Tutkittavat seokset olivat CCA mekaanisella esikäsitellyllä tai ilman, sekä 50 % että 100 % korvauksilla. GGBS-seoksista CCA100 saavuttaa viitebetonin puristuslujuuden, kun taas CCA50 saavuttaa viitebetonin lujuuden vain yhdistettynä mekaaniseen esikäsitelyyn. Varhaisen lujuuden osalta tutkitaan parannettua sekoitusmenetelmää esikastellulla GGBS:llä CCA100-seoksessa. Tuloksena oleva keskimääräinen puristuslujuus seitsemän päivän kohdalla täyttää 93 % vastaavan viitebetonin lujuudesta.

Betonin CCA100 osalta GGBS:n lisääminen johtaa tilastollisesti merkittäviin parannuksiin puristuslujuudessa ja lähes 30 %:n vähennykseen hiilidioksidipäästöissä, mikä viittaa vihreään betoniin. [4]

Viimeaikaiset tutkimukset kierrätetyn betonin hyödyntämisestä ovat osoittaneet, että yleensä hylätyt hienoimmat fraktiot (FC) voidaan sisällyttää sementtipohjaisiin komposiitteihin ilman, että niiden rakenteellinen suorituskyky heikkenee. On osoitettu, että nämä hienoainekset voivat lisätä sementtimatriisin vastustuskykyä vetojännityksille ja vähentää kutistumista, ja että näitä vaikutuksia voidaan tehostaa mineraalilisäaineiden avulla. Tällaiset havainnot johtivat siihen ajatukseen, että kierrätetyn betonin hienoaineksen sisällyttäminen betoniseokseen voisi mahdollisesti vähentää kiviaineksen aiheuttamaa kutistumishalkeilua.

Kierrätetyn betonin hienoimpien fraktioiden lisääminen voidaan hyödyntää betonin tuotannossa ja vähentää kutistumishalkeilua kiviaineksen välillä, tehden betonista vahvempaa ja kestävämpää, mutta myös ympäristöystävällisempää. Tällaisesta positiivisesta vaikutuksesta vihjasivat aiemmat tutkimukset, jotka osoittivat, että kierrätetyn betonin hienoaineksia sisältävät sementtipastat kestävät paremmin vetojännityksiä ja kutistuvat vähemmän.[5]

On tutkittu myös mahdollisuutta käyttää rakennus- ja purkujätteestä CDW:stä erotettua hydratoitunutta sementtijätettä HCW:tä vaihtoehtoisena komponenttina uuden klinkkerin tuotannossa. Puhdas HCW-näyte valmistettiin ja sitä käytettiin osittain luonnonmateriaalien korvaajana uusien klinkkerien raaka-aineseoksissa. 30 % korvausasteella voitiin tuottaa uusi Portland-klinker, joka sisälsi lähes 50 % C3S:ää ja vähensi CO₂-päästöjä noin kolmanneksella.

Tutkimuksen perusteella tehtiin seuraavat johtopäätökset:

- rakennus- ja purkujätteestä saatu hydratoitu sementti ei ole jätettä vaan resurssi. Sen koostumus tekee siitä houkuttelevan materiaalin käytettäväksi raaka-aineena sementin tuotantoketjussa korvaamaan osittain luonnonlouhittua materiaalia;
- jätteen kemiallisesta koostumuksesta ja erityisesti CaO/SiO₂-suhteesta riippuen HCW:n määrä, jota voidaan käyttää raakapulverina Portland-klinkerin tuotannossa, on rajallinen;
- jos käytetään suurempi määrä HCW:tä, voidaan tuottaa ei-Portland-klinker, jolla on arvokkaita ominaisuuksia lisäsementtimateriaalina;



- molemmissa tapauksissa (pieni tai suuri määrä HCW:tä) havaitaan merkittävä CO₂-päästöjen väheneminen klinkkerin/sementin tuotantoon liittyen;
- CO₂-päästöjen vähentämisen lisäksi toinen ympäristöetu kierrätetyn hydratoidun sementin käytössä on se, että luonnonvarojen kulutus vähenee.[6]

Tutkittiin kierrätetyn betonijauheen (RFP) potentiaalia lisäsementtimateriaalina. Tulokset osoittivat, että RFP (alle 30 %) lyhensi asettumisaikaa ja paransi sementin juoksevuutta. Varhainen puristuslujuus kasvoi 17,62 % sementtilaastissa, jossa oli 10 % RFP:tä. Kun RFP-pitoisuus oli 10 %, sekoitetun lietteen juoksevuus (175,5 mm) kasvoi 8,0 % verrattuna puhtaaseen sementtiin (162,5 mm). Kun sekoitetun sementin RFP-pitoisuus kasvoi, hydrataation induktiojakso piteni, ja hydrataation eksotermisen huippunopeuden ja kertyneen lämmön vapautumisen havaittiin laskevan selvästi. Tutkimuksen päätulokset olivat seuraavat:

- 1.RFP-hiukkasten suuri ominaispinta-ala ja veden imeytyminen aiheuttavat sementtipastan juoksevuuden ensin kasvavan ja sitten vähenevän. Sementin osalta sopiva määrä RFP:tä (enintään 30 %) lyhentää asettumisaikaa ja parantaa juoksevuutta. Tulevaisuudessa tämä tutkimus keskittyy RFP:n kosketuskulmaan ja reologisiin ominaisuuksiin tutkiakseen perusteellisesti RFP:n vaikutusta betonin työstettävyyteen.
- 2.Sopiva RFP-pitoisuus voi parantaa laastin varhaista lujuutta; 3 päivän iässä puristuslujuus kasvaa 17,62 % laastissa, jossa on 10 % RFP:tä. Sekoituslaastin myöhäinen lujuus on alhaisempi kuin puhtaan sementtilaastin, ja tämä sääntö on selvempi RFP:n lisääntyessä. RFP:n vaikutusta laastin mekaanisiin ominaisuuksiin on käsitelty hyvin. Kuitenkin näiden tekijöiden vaikutusta betonin kestäväyyteen ei ole vielä tutkittu; kloridi- ja sulfaattihiökkäysten, kutistumisen ja virumisen näkökulmat ovat myös tämän tutkimuksen tulevien tutkimusten kohteena.
- 3.Kun sekoitetun sementin RFP-pitoisuus kasvaa, hydrataation induktiojakso pitenee, ja hydrataation eksotermisen huippunopeuden ja kertyneen lämmön vapautumisen havaittiin laskevan selvästi. [9]

Tutkimus viittaa siihen, että kierrätettyjä betonijauheita voidaan sisällyttää sementtipohjaisiin komposiitteihin suurina määrinä ja jopa parantaa niiden ominaisuuksia, erityisesti kun ne sekoitetaan lentotuhkan tai masuunikuonan kanssa. Portlandsementin korvaaminen tutkituissa pastoissa kierrätetyllä betonilla johti puristuslujuuden heikkenemiseen, mutta myös kutistumisen vähenemiseen ja taivutusvetolujuuden kasvuun jopa 26 %.

Portland-sementin 50 paino-%:n korvaaminen pääasiassa inerteillä, hienoksi jauhetun kierrätetyn betonin hiukkasilla johti lujuuden ja jäykkyuden heikkenemiseen. Näiden mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen johtui vähemmän tiivistä ja huokoisemmasta rakenteesta, vaikka kierrätetyn betonin läsnäolo edisti portland-sementin hydrataatiota mahdollistamalla veden paremman pääsyn klinkkerirakeisiin.

Kierrätetty betoni toimii mikrotäyteaineena, joka vahvisti haurasta sementtimatriisia, lisäten sen vetolujuutta taivutuksessa 90 päivän kovettumisen jälkeen ja vähentäen sen kutistumista.

Todettiin, että alkaliteetin lisääminen korvaamalla osa portland-sementistä sammutetulla kalkilla ei tukenut hydrataatiotuotteiden muodostumista eikä parantanut pastojen rakenteellista suorituskykyä.



Verrattuna puhtaaseen portland-sementtipastaan, 50 paino-% kierrätettyä betonijauhetta ja 5 paino-% lentotuhkaa sisältävä pasta osoitti 44 % pienemmän kutistumisen, 53 % pienemmän puristuslujuuden ja 26 % suuremman vetolujuuden taivutuksessa. [11]

Ilman mitään käsittelyä RCF:t voivat merkittävästi heikentää tuotetun betonin lujuutta ja kestävyyttä niiden alhaisen pozzolaanisen aktiivisuuden ja korkean huokoisuuden vuoksi. Tämän seurauksena ehdotetulla kasvipohjaisella yhdisteellä, tanniinihappo (TA)-käsittelyllä voidaan saavuttaa useita etuja. Kokeelliset tulokset osoittavat, että ehdotetulla käsittelyllä on saavutettu jopa 26 %:n lisäys laastin puristuslujuudessa. Vielä tärkeämpää on, että laastin varhaisen vaiheen halkeiluriski vähenee ja raudoituksen korroosioikä paranee huomattavasti.[12]

4.4 KARBONOINNIN VAIKUTUS

Rakennussektorin on vähennettävä päästöjään pienentääkseen ympäristöjalanjälkeään. Perinteiset lähestymistavat, kuten klinkkerin korvaamisen lisääminen saatavilla olevilla SCM:illä, ovat usein rajoitettuja teknologisten ja materiaalisten esteiden, kuten kalkkikiven alhaisen reaktiivisuuden tai korkealaatuisen lentotuhkan rajallisen saatavuuden vuoksi. Siksi useita muita tapoja vähentää sementti- ja betonteollisuuden ympäristöjalanjälkeä kehitetään eri vaiheissa.[18]

Kierrätetyn betonin hienoaineksen karbonointi voi merkittävästi vähentää betonin CO₂-jalanjälkeä. Tämän lähestymistavan edut johtuvat hienoaineksen runsaudesta, karbonoinnin helppoudesta ja niiden mahdollisesta reaktiivisuudesta karbonoinnin aikana.

Karbonoimalla hyvin hydratointia, kuivattua ja jauhettua sementtipastaa vesiliuoksessa havaittiin, että portlandiitti reagoi aluksi liuenneen CO₂:n kanssa ja sen ehtyessä muut hydraatit dekalsoituvat vähitellen. Pääasialliset karbonointituotteet ovat kalsiitti ja alumiini-pii-geeli, joka on rikas emäksistä. Geelillä on amorfinen rakenne, joka on samanlainen kuin piigeelillä.

Tutkimuksissa on osoitettu, että karbonoitua sementtipastaa voidaan menestyksekkäästi käyttää li-säsementtimateriaalina komposiittisementeissä. Karbonoidun sementtipastan pozzolaaninen aktiivisuus johtaa faasikokoonpanoon, joka on samanlainen kuin lentotuhkaa ja kalkkikiveä sisältävissä komposiittisementeissä. Korkean reaktiivisuuden vuoksi karbonoidulla sementtipastalla on kuitenkin positiivinen vaikutus puristuslujuuden kehitykseen jo ennen ensimmäistä hydrataatiopäivää. Karbonointipasta koostuu pääasiassa kahdesta karbonointituotteesta: kalsiumkarbonaattista ja amorfisesta geelistä. Kalsiumkarbonaatti saostuu pääasiassa kalsiittina veden saatavuuden vuoksi märkäprosessin aikana.[13]

Karbonointi voisi paitsi helpottaa betonijätteen kierrätystä myös auttaa vähentämään CO₂-päästöjä ja saavuttamaan hiilineutraaliuden pysyvästi sitomalla CO₂:ta. Karbonointi vahvistaa tehokkaasti RCA:ita tiivistämällä mikrostruktuureja ja parantamalla fysikaalisia ominaisuuksia kalsiumkarbonaatin (Cc) saostumisen kautta, joka täyttää huokokset. Samalla karbonointireaktio kehittää kierrätettyjen kiviainesten pintareaktiivisuutta piigeelin ja Cc:n muodostumisen vuoksi, mikä on erityisen hyödyllistä RCF:ille niiden suuren pinta-alan vuoksi. Karbonoitujen RCF:ien kokonaispintareaktiivisuus voi parantaa RCF:ien tarttuvuutta uuden sementtipastan kanssa ja siten myös edistää uusien laastien ja betonien suorituskyvyn parantumista. Karbonoinnin menetelmät

- Yleisesti ottaen kuivakarbonoinnissa, jossa käytetään autoklaavia (paineastiaa), CO₂-osapaineen lisääminen oli kriittistä. Vaikka karbonoinnin tehokkuutta voitiin lisätä karbonointipaineella,



1 barin paine raportoitiin riittävän tehokkaaksi, ja paineen nostaminen 5 baariin toi vain rajoitettuja hyötyjä.

- Karbonointi voidaan myös suorittaa ympäristökammioissa, jotka säätelevät suhteellista kosteutta ja CO₂-pitoisuuksia. Optimaaliset olosuhteet saavutetaan säätelemällä suhteellista kosteutta 50–80 %:n välillä ja CO₂-pitoisuutta yli 20 %:ssa, mikä on vähitellen muodostumassa yleiseksi näkemykseksi.
- Esikäsittely suoritettiin yleensä ennen kuivakarbonointia, koska ylimääräinen vesi heikentää karbonoinnin tehokkuutta (lähinnä estämällä CO₂:n diffuusiota). Kuitenkin RCAs/RCFs/RCPs:n kosteuspitoisuus luonnollisesti ilmakehässä tilassa oli alle 1 %, millä havaittiin olevan merkityksetön vaikutus karbonointiin. Näin ollen tätä esikäsittelymenetelmää ei välttämättä tarvitse ottaa huomioon teollisessa tuotannossa.
- Märkäkarbonoinnin käyttö on lisääntynyt merkittävästi ja sillä on havaittu tapahtuvan merkittävästi tehokkaampi karbonoituminen. Tämä johtui pääasiassa erillisen liuoksen käytöstä, joka nopeasti kyllästyi ja homogenisoi huokosverkon, poistaen veden ja ilman, jotka estivät CO₂:n kulkureitin. Siten se helpotti vesipitoisten karbonaattilajien diffuusiota. Lisäksi RCP:iden täydellinen dispergoituminen erilliseen liuokseen lisäsi reaktio pinta-alaa, mikä johti täydellisempään liukenemiseen, huuhtoutumiseen ja karbonointiin. CO₂-kaasun pitoisuuksien lisääminen tai karbonaattilajien alkuperäisen pitoisuuden nostaminen (alkalin annostelun kautta) voisi huomattavasti parantaa karbonointinopeutta, erityisesti betonin kovettumisen varhaisessa vaiheessa.
- Neste/kiintoaine suhteen pienentämisen on raportoitu edistävän lopullista karbonoitumisastetta ja eristetyn CO₂:n määrää.[10]

Kierrätetyn betonijätteen granulointia tutkittiin ja tutkimuksessa sitä käytettiin kevyinä kiviaineksina. Terästeollisuuden jäännöistä, senkkakuonaa, käytettiin sideaineena eri suhteissa (0, 10, 20 ja 30 %). Materiaalit sekoitettiin ja granuloiitiin, ja sitten granulaaatit kovetettiin kolmessa eri olosuhteessa: ympäristöolosuhteissa, kosteuskaapissa ja karbonointikaapissa. Granulaateilla oli yleisesti tyydyttävä tiheys ja veden imeytyminen suuremmalla kauhakuonapitoisuudella. Karbonointi lisäsi granulaattien lujuutta pienellä senkkakuonapitoisuudella ja vähensi granulaattien veden imeytymistä. Karbonoitujen granulaattien parantuneet fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet johtuvat kalsiumkarbonaatin muodostumisesta karbonointiprosessin aikana. Tässä tutkimuksessa tuotetut granulaaatit osoittavat hyvää potentiaalia käytettäväksi kevyinä kiviaineksina rakennusteollisuudessa.[14]

Karbonoitumismekanismien tutkimuksessa kierrätetty betonijauhe (RCF), yksi betonijätteen kierrätysprosessin päätuotteista, karbonoitiin vedessä, jotta ymmärrettäisiin karbonointimekanismi. RCF:n karbonointimekanismia tutkittiin, jotta kehitettäisiin lisäarvoa tuottavia tuotteita. Todettiin, että CO₂:n liukeneminen ja kalsiitin saostuminen rajoittivat karbonointiprosessia alkuvaiheessa. Tämän jälkeen kinetiikkaa hallitsi RCF:n liukeneminen. Karbonoidulla RCF:llä oli merkittävästi korkea pozzolaaninen reaktiivisuus ja hieno hiukkaskoko, mikä mahdollisti sen käytön SCM:inä.[15]

On tutkittu myös karbonoidun kierrätetyn betonijauheen (CRCF) käyttöä vähähiilisenä vaihtoehtona tavalliselle portlandsementille (OPC), tässä tutkimuksessa tutkittiin CRCF:n vaikutusta OPC-pastan varhaisen hydrataation kinetiikkaan. Tulokset osoittavat, että CRCF ei ole ainoastaan erittäin aktiivinen pozzolaaninen materiaali, vaan myös tehokas kiihdytin, joka vaikuttaa OPC-pastan varhaisen hydrataation kinetiikkaan, mikä johtaa lisääntyneeseen varhaiseen puristuslujuuteen ja verrattavissa olevaan 28 päivän puristuslujuuteen, jopa 20 % korvaussuhteella. CRCF:ssä oleva amorfinen pii ja



pii-alumiinigeelit sekä kalsiitti edistävät ionien liukenemista ja tarjoavat lisää aktiivisia nukleaatiopaikkoja hydraattien muodostumiselle.

Tulokset osoittavat, että CRCF:llä on lupaava sovellusskenaario muuttaa betonijäte korkean arvon teollisuustuotteiksi CO₂-aktiivoinnin avulla.

CRCF tarjoaa sovellusnäkyviä betonijätteen muuttamiseksi hiiltä sitoviksi ja korkean arvon tuotteiksi. Kuitenkin OPC:n korvaaminen CRCF:llä voi johtaa huokosliuoksen alkaliteetin vähenemiseen myöhemmässä vaiheessa, mikä saattaa heikentää kestävyyttä, kun sitä käytetään raudoitetuissa betonirakenteissa.[16]

Kierrätetyn betonijauheen (RCF) nopeutettu karbonointi on yksi tehokkaista tavoista parantaa niiden huonoa laatua kestävää uudelleenkäyttöä varten rakennusteollisuudessa. Yleensä ilmakehään päästettävä jätekaasu, joka sisältää hukkalämpöä, voidaan käyttää uudelleen parantamaan RCF:n karbonointiprosessin kaasukiinteä reaktiota.

Tutkimuksissa on mitattu korkeiden lämpötilojen (20–140 °C) CO₂:n (20 % pitoisuus) vaikutusta RCF:n karbonointisuorituskykyyn, jolloin osoitettiin, että karbonointitehokkuus parani merkittävästi lämpötilan nostamisella optimaalisesti 100 °C:een ja saavutettiin 21,65 % CO₂:n sitoutuminen. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että CRCF:n korkeampi karbonointiaste parantaa sen suorituskykyä sementin korvikkeena.

Karbonointilämpötila vaikutti suuresti CRCF:ssä saostuneen kalsiumkarbonaatin (CaCO₃) polymorfiin ja morfologiaan. Vateriitti oli pääasiallinen CaCO₃-polymorfi 60 °C:n karbonointilämpötilassa ja muuttui täysin kalsiitiksi 140 °C:n karbonointilämpötilassa. Lisäksi korkeammissa karbonointilämpötiloissa havaittiin suurempia kalsiittihiukkasia.

CRCF:tä sisältävä sementtipasta 100 °C:ssa omaa lyhyemmän asettumisajan, korkeamman hydraattilämmön ja verrattavissa olevan 28 päivän lujuuden, puhtaaseen sementtipastaan verrattuna.

Kaiken kaikkiaan RCF:n korkealämpötilainen karbonointi voidaan suorittaa lyhyessä ajassa (30 min), mikä osoittaa potentiaalín hyödyntää jätekaasua, joka sisältää hukkalämpöä teollisessa mittakavassa. Lisäksi CRCF:ää voidaan käyttää lisäsementtimateriaalina sementtibetonissa. [17]

Hydratoidun sementtipastan karbonointi johtaa kalsiumkarbonaatin ja pii-alumiinigeelin muodostumiseen. Geeli on todettu erittäin reaktiiviseksi puzzolaaniseksi materiaaliksi. Sen koostumus on samanlainen kuin siliceous lentotuhkan lasivaihe, ja siksi sen vaikutus muodostuvaan hydraattien kokoonpanoon on verrattavissa. Kuitenkin geelin korkean ominaispinta-alan ja rakenteen vuoksi puzzolaanin reaktio on erittäin nopea, saavuttaen 50 % reaktiotason yhden päivän reaktion jälkeen. Muodostunut kalsiumkarbonaatti toimii hienona täyteaineena.

Nopeasti reagoiva karbonoitu sementtipasta paransi merkittävästi sementtimatriisin puristuslujuutta. Lujuuden parantuminen liittyy tuloksena olevan sementtipastan mikrostruktuurin muutokseen. Erityisesti cCP:n läsnä ollessa varhaisessa vaiheessa muodostuva hieno mikrostruktuuri johtaa puristuslujuuden merkittävään kasvuun. Samankaltaisia muutoksia havaittiin C-FA-L-näytteessä, mutta vasta 28 päivän hydrataation jälkeen.[18]



4.5 YHTEENVETO AIHEESEEN LIITTYVÄSTÄ KIRJALLISUUDESTA

Tämä kierrätysbetonin kirjallisuuskatsaus käsittelee rakennus- ja purkujätteen kierrätystä ja hyötykäyttöä betoniteollisuudessa. Tutkimus keskittyy erityisesti betonijakeiden käsittelyyn, kuten murskaukseen ja karbonointiin, sekä niiden käyttöön uusissa betonituotteissa.

RAPUA-hanke, joka liittyy Oulun ekosysteemisopimukseen, keskittyy betonijakeen kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön. Hankkeen tavoitteena on ollut vähentää ympäristöhaittoja, lisätä vähähiilisyyttä ja hiilineutraalisuutta sekä tehostaa kiertotaloutta. Kaupunkirakenteen tiivistäminen ja vanhojen betonielementtirakennusten korvaaminen uusilla rakennuksilla lisää betonijätteen määrää, mikä tekee kierrätyksestä entistä tärkeämpää.

Purkubetonijakeista muodostuvaa betonijätettä voidaan käyttää vaihtoehtoisina materiaaleina kiviaineksille ja sementille sekä hiilineluna CO₂-päästöjen vähentämiseksi. Erilaisia karbonointimenetelmiä ja niiden muokattuja tekniikoita on tutkittu kierrätettyjen karkeiden kiviainesten (RCA), kierrätettyjen betonijauheiden (RCF) ja kierrätettyjen betonipartikkeleiden (RCP) käsittelyyn. Murskattu betoni- murske (CCA) voi pidentää standardibetonin teknistä käyttöikää ja edistää betonin kiertotaloutta. CCA:n käyttöä kiviaineksen korvaajana on tutkittu, mutta sen puristuslujuus ja työstettävyydet ovat heikompia kuin standardibetonilla.

Purettu tai jätebetoni voidaan murskata hiukkasiksi, joita voidaan käyttää karkeana tai hienona kiviaineksena uudessa betonissa. Murskausprosessi tuottaa myös pieniä hiukkasia, joita voidaan kierrättää kierrätettyinä betonijauheina (RCF). RCF:n kemiallisen reaktiivisuuden lisäämiseksi on tutkittu hydrotermisen ja mekaanisen aktivoinnin menetelmiä. Tutkimukset osoittavat, että kierrätettyä betonia, jossa sementistä on korvattu enintään 20 % purkujätteestä saadulla jauheella, voidaan käyttää vaihtoehtona M-25-luokan betonille.

Purkubetonijauheen karbonointi voi merkittävästi vähentää betonin CO₂-jalanjälkeä. Karbonoimalla hyvin hydratoitua, kuivattua ja jauhettua sementtipastaa vesiliuoksessa voidaan saavuttaa korkea reaktiivisuus ja positiivinen vaikutus puristuslujuuden kehitykseen. Karbonointi vahvistaa RCA:ita tiivistämällä mikrostruktuureja ja parantamalla fysikaalisia ominaisuuksia kalsiumkarbonaatin saostumisen kautta. Karbonoidut RCF:t voivat parantaa uuden sementtipastan tarttuvuutta ja edistää uusien laastien ja betonien suorituskykyä.

Karbonoinnin menetelmiä voivat olla kuivakarbonointi ja märkäkarbonointi. Kuivakarbonoinnissa CO₂-osapaineen lisääminen on kriittistä, ja puolestaan märkäkarbonoinnissa erillisen liuoksen käyttö parantaa karbonointitehokkuutta. Märkäkarbonointi lisää reaktiopinta-alaa ja mahdollistaa täydellemmän liukenemisen ja karbonoitumisen. Karbonointilämpötila vaikuttaa merkittävästi saostuneen kalsiumkarbonaatin polymorfiin ja morfologiaan.

Kierrätysbetonin käytöllä voidaan siis vähentää ympäristöhaittoja ja CO₂-päästöjä, parantaa betonin teknisiä ominaisuuksia ja edistää kiertotaloutta. Erityisesti hienoaineksen käyttö ja sen karbonoinnin vaikutukset ovat keskeisiä tutkimusaiheita. Tutkimuksen ja tämän Rapua-hankkeen tavoitteena on löytää arvokkaampia käyttökohteita kierrätysbetonille ja vähentää luonnonvarojen kulutusta.

LÄHTEET:

1. Vikas Srivastava, Mohd Monish, V. C. Agarwal, P. K. Mehta, Demolition Waste as Cement Replacement in Concrete, *J. Environ. Nanotechnol.*, Volume 2, No.3 pp. 17-20
2. Leila Nobrega Sousa a,*, J.C.O. Zepper b, Katrin Schollbach a, H.J.H. Brouwers, Improving the reactivity of industrial recycled concrete fines: Exploring mechanical and hydrothermal activation, *Construction and Building Materials* 442 (2024) 137594
3. Technical Factsheets Construction & Demolition Waste Recycled Aggregates (example The Netherlands), FIR, <https://www.fir-recycling.com/cdw-recycling/>
4. Madumita Sadagopan, Recycling of concrete in new structural concrete, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Borås, *Skritter från Högskolan i Borås, nr. 117, Borås 2021*
5. Nežerka, P. Havlásek, J. Trejbal, Mitigating inclusion-induced shrinkage cracking in cementitious composites by incorporating recycled concrete fines, *Construction and Building Materials, Volume 248, 10 July 2020, 118673*
6. D. Gastaldi, F. Canonico, L. Capelli, L. Buzzi, E. Boccaleri, S. Irico, An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste, *Cement & Concrete Composites* 61 (2015) 29–35
7. Philippe Lawrence, Martin Cyr*, Erick Ringot, Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1939–1947
8. Philippe Lawrence, Martin Cyr*, Erick Ringot, Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1092– 1105
9. Zhong Li a,b, Yadong Bian b,1, Jihui Zhao a,c,*, Yiren Wang d, Zhenxia Yuan, Recycled concrete fine powder (RFP) as cement partial replacement: Influences on the physical properties, hydration characteristics, and microstructure of blended cement, *Journal of Building Engineering* 62 (2022) 105326
10. Chi Sun Poon *, Peiliang Shen , Yi Jiang , Zihan Ma , Dongxing Xuan, Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review, *Cement and Concrete Research* 173 (2023) 107284
11. Z. Prošek a, V. Nežerka a,†, R. Hlu° z'ek a, J. Trejbal a, P. Tesárek a, G. Karra'a, Role of lime, fly ash, and slag in cement pastes containing recycled concrete fines, *Construction and Building Materials* 201 (2019) 702–714
12. Liang Wang a,b,c, Jialai Wang b,*, Hao Wang a, Yi Fang b, Wenfeng Shen a, Peiyuan Chen a, Ying Xu, Eco-friendly treatment of recycled concrete fines as supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials* 322 (2022) 126491
13. Maciej Zajaca,*, Jørgen Skibstedb, Jan Skoceka, Pawel Durdzinskia, Frank Bullerjahn, Mohsen Ben Haha, Phase assemblage and microstructure of cement paste subjected to enforced, wet carbonation, *Cement and Concrete Research* 130 (2020) 105990
14. Kalle Kursula a, Abhijit Mistri a,b, Mirja Illikainen a, Priyadharshini Perumal, Utilization of fine concrete waste as a lightweight aggregate via granulation: Technical and environmental assessment, *Journal of Cleaner Production* 434 (2024) 139938
15. Peiliang Shen a, Yangyang Zhang b, Yi Jiang a, Baojian Zhan c, Jianxin Lu a, Shipeng Zhang a, Dongxing Xuan a, Chi Sun Poon, Phase assemblance evolution during wet carbonation of recycled concrete fines, *Cement and Concrete Research* 154 (2022) 106733
16. Ligang Peng a,b, Yi Jiang b, Jiaying Ban b, Yuanyuan Shen b, Zihan Ma b, Yuxi Zhao a, Peiliang Shen b,*, Chi-Sun Poon, Mechanism underlying early hydration kinetics of carbonated recycled concrete fines-ordinary portland cement (CRCF-OPC) paste, *Cement and Concrete Composites* 144 (2023) 105275



17. Yuqing Wu a, Hamideh Mehdizadeh a, Kim Hung Mo b, Tung-Chai Ling, High-temperature CO₂ for accelerating the carbonation of recycled concrete fines, *Journal of Building Engineering* 52 (2022) 104526
18. Maciej Zajac*, Jan Skocek, Pawel Durdzinski, Frank Bullerjahn, Jørgen Skibsted, Mohsen Ben Haha, Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance, *Cement and Concrete Research* 134 (2020) 1060901

5 YHTEENVETO

Hanke toteutettiin tiiviissä yhteistyössä osatoteuttajien VTT, OY, OAMK ja OSAO välillä. OSAOn roolina hankkeessa oli purku- ja kiertobetonin käytettävyyden taustatietojen selvittäminen ja koetoiminta. Työpaketissa TP2 Murskaus - seulonta - kenttäajittelu: OSAOn roolina oli taustatietojen selvittäminen ja materiaalien esikäsittely ja työpaketissa TP3 Suhteittaminen - Betonireseptin kehittämisen: OSAOn roolina oli koetoiminta. Tähän yhteenvedoon on kerätty joitakin havaintoja eri osatoteuttajien työn tuloksista.

Tämän hankkeen tavoitteena oli löytää kiertobetonille nykyisiä käyttökohteita arvokkaampia käyttökohteita. OSAOn rooliin kuului hankkeessa kehitettävien uusien käyttökohteiden vaatimusten selvittäminen sekä valmistuksen kehittäminen, testaus ja pilotoinnin suunnittelu. OSAOlla toimitettiin materiaalin esikäsittelyssä, jotta purkubetonia saatiin sopivasti murskattuna, seulottuna ja jauhettuna OAMK:n ja Oulun yliopiston tutkimuksiin.

OAMKn toimesta tehtiin läjityspaikoilla havaintoja, että betonin alkuperä ja ikä on lähes mahdotonta määrittää, ellei kartoitusta suoriteta varsinaisella materiaalin purkupaikalla. Murskauksesta selvitetiin, että tarvittava murskaus voitiin suorittaa OSAOlla käytössä olevalla leukamurskaimella kahdella asetusarvolla, jolloin betonimurskeessa päästiin alle 4 mm raekokoon. Tämän raekoon alle ei kannattanut edetä, koska tavoitteena olleeseen purkubetonin hienoainekseen tulee tällöin enemmän kiviainesmursketta jauhautuneena hienojakoisen purkubetonijauheen sekaan. Hankkeen aikana havaittiin, ettei pölymäisen seulomalla erotetun jakeen käytöstä sementin korvikkeena löydy standardoituja menetelmiä.

Seulonnan vaikutusta tutkittiin yhdessä Oulun yliopiston kanssa. Tutkimusten perusteella, jossa hienoaines seulottiin jakeisiin < 125 µm, 125 - 250 µm, 250 - 500 µm ja korvaamalla niillä kullakin 25 % betonin sementtimäärästä, ei havaittu olevan merkittävää eroa partikkelijakaumassa. Tämän perusteella seulonta voitaisiin suorittaa 500 µm:n seulalla, jolloin seulonnan kustannukset pienenevät olennaisesti, koska jatkoseulontaa ei tarvita. Testikappaleiden valmistuksessa päädyttiin käyttämään hienoaineksena alle 500 µm:n betonipölyä. Oulun yliopistolla tehtyjen testien perusteella havaittiin, että reaktiivisuuden kannalta olisi eduksi jauhaa alle 500 µm:n pölyä kuulumyllyllä vielä 1 – 2 tunnin ajan. Tätä selvitettiin jauhatuskokeilla myös OSAOn laboratoriossa. Jauhatusvaiheen aikana OSAOlla rikkoontui loppuvuodesta käytössä ollut kuulumylly, jonka takia jauhatus näytejauheen saamiseksi OAMKlle jouduttiin suorittamaan Oulun yliopiston Minipilot-laboratoriossa.

Oulun yliopistolla tutkittiin, miten sementin korvaaminen betonipölyllä vaikuttaa näytteen reaktiivisuuteen, työstettävyyteen, vedenimukykyyn sekä lujuuskehitykseen. Lisäksi yliopiston osuudessa on tarkasteltu alkuperäisille näytteille, että valmistetuille seos-sementtinäytteille tehtyjä mineralogisia analyysejä.



Työpaketissa 3 OSAO toimi materiaalin esikäsittelijänä sekä OAMK:n tiloissa, että OSAOn laboratorioissa. OSAOn opiskelijat osallistuivat apukäsinä testikuutioiden valmistamiseen OAMK:n betonilaboratoriossa seuloen, sekoittaen ja valaen suhteitetun betoniseoksen muotteihin. OAMK suoritti kovettuneiden testikappaleiden puristuslujuusmittaukset. Tulosten perusteella testikappaleiden, joissa sementtiä on korvattu betonin hienoaineksella, puristuslujuus jää merkittävästi alhaisemmaksi kuin vertailubetonilla, jossa sementtiä ei korvattu purkubetonijauheella.

Hankkeessa eri toimijoiden yhteistyössä suoritettujen testien, mittausten ja analyysien perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä betonin murskauksessa syntyneellä hienoaineksella ei ole sellaisia ominaisuuksia, että se toimisi reaktiivisena osana seossementissä korvaten annosteltavaa sementtiä. Tämän perusteella betonia, jossa sementtiä on 25 % korvattu jauhetulla purkubetonipölyllä, ei suositella käytettäväksi kantavissa betonivalukohteissa vaan soveltuvammat kohteet voivat olla esimerkiksi maisemoinnissa betoniseinämät, mahdollisesti betoniset esineet, joihin ei kohdistu suuria puristus tai vääntövoimia. Lisäksi hienoaineksen lisääminen soveltuisikin betonikappaleisiin lisäaineena/fillerinä lisäten valmistetun betonin kiertotaloutta.

OSAolla valmistetuiksi koekappaleiksi valikoitui puiston penkin betoniset jalat. OSAOn puutekniikan osastolla valmistettiin vaneriset muotit, joilla betonimassan valut voitiin suorittaa. Suoritettujen koekappaleiden valujen yhteydessä ja yritysedustajien kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta havaittiin kuitenkin, että joustavan muottimateriaalin käyttö soveltuisi valikoituun käyttökohteeseen paremmin.

OSAolla valmisteltiin suhteitukseen excel-laskentataulukko, jolla voitiin suhteittaa sopivat betoni-seokset. Opiskelijaryhmä oli myös koekappaleiden valmistuksessa apukäsinä, kun valmistettiin puiston penkit edellä mainituilla muoteilla. Valamisen vaihteellisuutta testattiin valukuvion onnistumiseksi. Samoin suoritettiin testit, joilla kokeiltiin kimmovasaramittauksen soveltuvuutta lujuuden mittaamiseksi puristuslujuusmittauksen sijasta. Kimmovasaramittaukset osoittautuivat kuitenkin hyvin epätarkoiksi ja toistettavuudeltaan epävarmoiksi, joten puristuslujuuden määrittämisen todettiin olevan tässä vaiheessa luotettavampi menetelmä valmistettujen betoniseoksien lujuuden mittaamiseen.

Hankkeen yhtenä toimenpiteenä keskityttiin betonijauheen hyödyntämisen mahdollisuuksiin päästö-laskennan ja kustannusten näkökulmasta. Kaupallistamispotentiaalia on arvioitu haastatellen alan toimijoita ja keskustellen säännöllisissä hanketoimijoiden kokouksissa. VTT:n toimesta on koottu hinta- ja materiaalitietoja tarvittavista laitteista, joilla mahdollistettaisiin betonimurskeen teollisempi käsittely huomioiden hankkeen aikana saavutetut raja-arvot ja teollisten laitteistojen mahdollisuudet. VTT:n toimesta suoritettu LCA-laskenta osoitti, että kierrätysbetonista tuotettujen hienojakeiden hiilijalanjälki on kilpailukykyinen verrattuna neitseellisiin vaihtoehtoihin, mutta päästöihin vaikuttavat erityisesti jauhatusprosessin energiankulutus ja kuljetusmatkat mahdollisen purkupaikan, läjitysalueen ja betoniaseman välillä. Selvityksessä käytettyjen lähtötietojen pohjalta taloudellisen kannattavuuden saavuttaminen osoittautui haasteelliseksi.

OSAolla tehtiin kirjallisuusselvitystä purku- ja kiertobetonin käytettävyydestä. Kirjallisuuden perusteella pääasiallinen käyttö on ollut soran ja hiekan korvaaminen purkubetonirakeilla uusissa betoni-seoksissa. Purkubetonin (CCA) käyttöä kiviaineksen korvaajana on tutkittu, mutta sen puristuslujuus ja työstettävyydet ovat heikompia kuin standardibetonilla. Kierrätetyn betonijauheen (RCF) kemiallisen reaktiivisuuden lisäämiseksi on tutkittu hydrotermisen ja mekaanisen aktivoinnin menetelmiä. Tutkimukset osoittavat, että kierrätettyä betonia, jossa sementistä on korvattu enintään 20 % purkujät-teestä saadulla jauheella, voidaan käyttää vaihtoehtona M-25-luokan betonille. Hienoaineksen karbonointi voisi parantaa uuden sementtipastan tarttuvuutta ja edistää uusien laastien ja betonien suorituskkyä.

