

Innovatiivinen vähähiilinen kierrätyskiviainesbetoni



Mika Tulimaa, TkL, Rudus Oy
mika.tulimaa@rudus.fi

Anna Koivu DI, Rudus Oy
anna.koivu@rudus.fi

Hassan Ahmed, TkT, Rudus Oy
hassan.ahmed@rudus.fi

Rudus Oy:n tutkimuksessa *Innovatiivinen vähähiilinen kierrätyskiviainesbetoni* saatiin uutta tietoa betonin raaka-aineiden ja valmistuksen hiilidioksidikuormituksen pienentämiseksi. Samalla kehitettiin käytäntöjä, jotka tukevat näiden ratkaisujen hyödyntämistä rakennusalalla. Kokonaistavoitteena oli lisätä tietotaitoa ja edistää laajemmin vähähiilistä betonirakentamista.

Tutkimuksessa saavutettujen tulosten valossa kierrätyskiviaineksen (kierrätyskiviaineksella tässä tutkimuksessa tarkoitetaan SFS-EN 206 mukaista tyyppin A kierrätyskiviainesta, joka on jalostettu murskatusta betonista) käytölle kiviaineksena betonissa nähdään potentiaalia neitseellisen kiviaineksen korvaajana. Kokonaisuuksena laadun osalta tullaan kierrätyskiviainesten laadunvalvontaa tarkastelemaan ja ohjeistamaan kansallisesti, jotta niiden käyttö olisi turvallisesti mahdollista. On oleellista, etteivät standardit tulisi kestäväen kehityksen esteeksi vaan uusien luontoa säästävien materiaalien käyttö mahdollistetaan. Uusien materiaalien käyttöönotossa kannattaa kuitenkin edetä maltillisesti ja hankkia ensin kokemusta materiaalien toimimisesta betonissa pienillä suhteellisilla käyttömäärillä.

Kierrätyskiviaineksena tutkimuksessa käytettiin purkutyömailta kierratettyä ja Ruduksen kierrätyskiviainespisteissä murskattua

betonia (tyyppi A), jonka osuutta uusiobetonissa ja sen toimivuutta uusiobetonissa tutkittiin laajasti. Betonimurskeen jätestatus (Ei Enää Jätettä – asetus) päättyi 2022, mikä on helpottanut käytäntöjä ja edistänyt betonteollisuudessa ja rakennustyömailla syntyvän purku- ja ylijäämäbetonin jatkokäyttöä. Jätestatuksen poistuttua asetuksen mukaisia kierrätyskiviaineksia voidaan käyttää pitkälti luonnonkiviaineksen tapaan ilman aiemmin jäteluonteeseen liittyviä hyväksymismenettelyjä. Sen sijaan betonin kiviainesten standardit SFS-EN 12620 ja SFS 7003 rajoittavat kierrätyskiviaineksen käyttömahdollisuuksia standardien kiviaineksille asettamien korkeiden laatuvaatimusten takia.

Tämä tutkimus on saanut tukea ympäristöministeriöltä Vähähiilisen rakennetun ympäristön -ohjelmasta, jonka rahoitus tulee EU:n kertaluonteisesta elpymisvälineestä (The Recovery and Resilience Facility (RRF))

1 Ympäristönäkökulmasta Betoroc®-murske on ympäristöystävällinen tuote: säästyy sekä päästöjä että neitseellisiä luonnonmateriaaleja.

2 Ruduksen kehittämä Betoroc®-murske on testattu, laadukas ja CE-merkitty tuote betoni- ja maanrakentamiseen. Se korvaa luonnonkiven sekä teknisesti toimivasti että kustannustehokkaasti.

3 Betoroc®-murske on myös tutkitusti vahvasti hiilinegatiivinen tuote. LCA Consulting Oy on tutkinut Betoroc®in hiilijalanjäljen. Esimerkiksi Betoroc® 0/90 -murskeen hiilijalanjälki on -18,6 kg CO₂-ekv/m³, kun kalliomurskeen on 6,1 kg CO₂-ekv/m³. VTT on verifioinut LCA Consultingin tekemät laskelmat.



Rudus Oy

1



2

3





Rudus Oy

4

Hankkeen tausta ja tavoitteet

Kiviainesmarkkinan muutos tulevaisuudessa on väistämätön myös Suomessa, kun pyritään noudattamaan EU-lainsäädännön ja YK:n kestävän kehityksen tavoitteita. Nämä tavoitteet koskevat erityisesti neitseellisten raaka-ainesten käytön vähentämistä ja hiilineutraaliuuden pyrkimistä. Kierrätyskiviaineksen materiaalivirta on kasvava, joten neitseellisiä luonnonvaroja voidaan potentiaalisesti säästää yhä enemmän. Vaikka sementti on keskeinen ainesosa betonin valmistuksessa, sen osuus betonista on 10–15 paino-%. Suurin materiaalikulutus muodostuu runkoaineista, karkeasta ja hienosta kiviaineksesta, joiden lisäksi tarvitaan vielä puhdasta vettä ja betonin lisäaineita. Vaikka kierrätyskiviainesta jo käytetään betonituotannossa korvaamalla osa karkeasta luonnonkiviaineksista tietyissä betonituotteissa, nykyinen käyttö on rajoitettu tiettyihin määrä-, laatu- ja raekorajoihin. Tämä on toistaiseksi vähentänyt niiden hyödyntämistä verrattuna niiden mahdollisuuksiin.

Hankkeen pääfokus oli kiertotalousraaka-ainesten ja vähähiilisten valmistusprosessien mahdollistama betonin päästövähennys ja kiertotalouden yleinen edistäminen kierrätyskiviainesta sisältävien uusien betonireseptien kehittämiseksi, valmistamiseksi ja käyttöön ja säilyvyysominaisuuksien selvittämiseksi.

Betoninen kierrätyskiviaines eroaa luonnonkiviaineksesta pääasiassa sen sisältämän alkuperäisen betonin sementtikiven takia, jota on kiinnittynyt kiviainesrakeisiin. Sen määrä vaihtelee riippuen betonin lujuudesta ja murskausprosessista riippuen. Sementtikivi

aiheuttaa kiviaineksen pintaan huokoisen rakenteen, mikä alentaa murskatun aineksen tiheyttä ja aiheuttaa suuremman vedenimun verrattuna luonnonkiviaineksen käyttöön. Lisäksi vanha sementtikivi vähentää betonin puristuslujuutta, koska se on heikompaa kuin puhdas luonnonkiviaines ja heikentää uuden sementtikiven tartuntaa kiviainekseen tartuen osaksi aiempaan sementtikiveen luoden matriisiin uuden rajapinnan. Mahdolliset kierrätyskiviaineksessa olevat epäpuhtaudet ja alkuperäisen betonin lujuusluokka ja kosteudenkestävyys voivat myös vaihdella alkuperän mukaan, mikä vaikuttaa betonin lopullisiin ominaisuuksiin.

Rakentaminen käyttää noin 40 prosenttia maailman raaka-aineista, aiheuttaa 21–37 prosenttia globaalista CO₂-päästöistä (riippuen siitä, lasketaanko kaikki kasvihuonekaasut vain energiaan liittyvät päästöt) ja synnyttää 30 % maailman jätteestä. Onkin tarkoituksen mukaista, että mahdollisimman suuri osa kiviaineksesta voidaan korvata kierrätyskiviaineksella ilman, että betonimassan työstettävyys tai kovettuneen betonin ominaisuudet heikkenevät.

Nykytietämyksen mukaan karkeaa kiviaineksesta voidaan korvata jopa 30 % kierrätyskiviaineksella, jos mitään muita muutoksia ei tehdä. Tämän ylittävää osuus on monissa aiemmissa kokeissa johtanut heikompilaatuihin ja vaikeammin työstettävään betoniin. Ongelmia ovat aiheuttaneet mm. käytetyn betonin murskauksessa syntynyt hienoaines ja kierrätysbetonien vaihteleva laatu verrattuna luonnon kiviainekseen.

4 Kierrätysbetonia, murskaamattomana.

5 Betonimurskeen käyttö on lisääntynyt erityisesti maa- ja infrarakentamisessa. Ensimmäisiä laajamittaisia hankkeita oli uuden Espoonväylän ensimmäinen, 1,3 kilometriä pitkä osuus, joka valmistui marraskuussa 2021. Sen rakentamisessa käytettiin Betoroc®-mursketta noin 35 000 tonnia. Samalla säästettiin hiilidioksidipäästöjä saman verran kuin niitä aiheutuisi ajettaessa henkilöautolla kolme miljoonaa kilometriä.

Perinteisissä betoneissa sideaineena käytetyn sementtiklinkkerin valmistus on merkittävä hiilidioksidilähde. Hankkeessa perehdyttiin päinvastaiseen ilmiöön eli karbonatisoitumiseen, jossa hiilidioksidi sitoutuu sementtikiven yhdisteiden kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia. On tunnettua, että betoni murskattuna ja sijoitettuna olosuhteisiin, joissa se on tekemisissä ilman kanssa, karbonatisoituu jopa 60–80 %:sti sitoen itseensä jopa lähes 50 % sen valmistuksen aikana kalkkikivestä vapautuneesta hiilidioksidista (jos sementtikivi on täysin klinkkeripohjainen ja karbonatisoituminen tapahtuu 100 prosenttisesti). Siksi murskeen varastoiminen ja käyttö ovat merkittäviä ilmastonmuutoksen torjuntajoukkoja: betonimurskeesta muodostuu hiilinielu.

Kierrätyskiviaineksen kuvaus

EN-standardit asettavat laatuvaatimukset kierrätyskiviaineksen käytölle betonissa. SFS-EN 12620 määrittelee betonin kiviaineksille tekniset vaatimukset ja kansallinen soveltamisstandardi tuo kansalliset tarkennukset kiviaineksen käyttöön.

Kierrätyskiviaineksen osalta keskeisiä haasteita ovat alkalireaktiivisuus, puhtaus (orgaaniset epäpuhtaudet, sulfaatit, kloridit) sekä vaihtelu mekaanisissa ominaisuuksissa (kovuus, pakkasenkestävyys ja vedenimu).

Nykytilassa lainsäädäntö ei ole este, vaikkakin standardit rajoittavat kierrätyskiviaineksen käyttöä betonissa määrällisesti ja laadunvarmistusvaatimukset tekevät käytöstä vaikeaa. Tähän on vastattava kehittämällä laatuvaatimustarpeisiin soveltuvia ratkaisuja, jolloin ehkäistään



5

sitä, etteivät standardit tulisi kierrätyskiven käytön esteeksi tulevaisuudessa.

Tutkimuksissa käytettiin CE-merkittyä betonimurskettä, Betoroc®. Murske oli peräisin purkutyömailta. Ruduksen kierrätyspisteellä murskattuna betonimurske sai Ei-Enää-Jätettä (EEJ) -statuksen. Kokeita varten murskeesta seulottiin hienoaines pois, jolloin käytännössä tutkimuksiin on saatu karkean kiviaineksen korvaaja, raekooltaan 5–16 mm. Tämä auttoi optimoimaan reseptejä, sillä aiemmin on havaittu, että betonin murskauksessa muodostuva pöly ja muu hienoaines vaikeuttavat toimivia betonimassoja, koska hienoaines nostaa vedentarvetta ja siten vaikuttaa vesi-sementtisuhteeseen ja siten lujuuteen.

Betoroc® pystyy parhaimmillaan sitomaan 30–35 % sementin valmistuksessa kalkkikivestä vapautuneesta hiilidioksidipäästöstä, (teoreettisesti lähes puolet, jos sementti on täysin klinkkeripohjainen), mikä tekee murskeesta hiilidioksidinielun ja todennetusti hiilinegatiivisen tuotteen¹.

Kierrätyskiviaines hiilinieluna

Useilla tekijöillä on vaikutusta kierrätyskiviainesbetonissa käytettävän betonimurskeen itseensä sitoman hiilidioksidin (CO₂) määrään. Karbonatisoituminen riippuu mm. murskeen hienoudesta, betonin koostumuksesta, iästä ja ympäristöolosuhteista, kuten lämpötilasta,

kosteudesta ja ilman hiilidioksidipitoisuudesta, jossa betonirakenne sijaitsee. Lisäksi sementtikiven kemiallinen rakenne vaikuttaa karbonatisoitumispotentiaaliin.

Betonin sementtikivi on pääasiassa kalsiumhydroksidia ja kalsiumsilikaattihydraatteja ja muita kalsiumiin sitoutuneita yhdisteitä. Näistä kalsiumhydroksidi (Ca(OH)₂) on voimakkaasti alkalinen yhdiste, joka reagoi ympäröivästä ilmasta betoniin kulkeutuvan hiilidioksidin (CO₂) kanssa. Hiilidioksidin sitoutuminen noudattaa perusreaktiota $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$, jossa kalsiumhydroksidi sitoo hiilen pysyvästi takaisin kalsiumkarbonaatiksi (CaCO₃).

Betonin pinnalta alkava karbonatisoituminen etenee yleensä nopeasti lähellä pintaa, mutta hidastuu ajan kuluessa, koska muodostuva kalsiumkarbonaatti täyttää betonin huokosia, mikä vaikeuttaa hiilidioksidin kulkeutumista syvemmälle rakenteeseen. Karbonatisoitumisen etenemisen rakenteessa on verrannollinen ajan [t] neliöjuureen, $k\sqrt{t}$. Ajan ohella kaavassa on kerroin [k], jonka arvo riippuu betonin laadusta (lujuus, tiiviys, vesi-sementtisuhte), pinnasta, pinnoituksesta, kosteudesta ja kosteudelle (sateelle) altistumisesta kuten myös ilman suunnasta ja ilmavirrasta (tuuli). Kun betonirakenne murskataan, karbonatisoitumaton betonin ominaispinta-ala jopa 1000-kertaistuu. Tämä mahdollistaa murskatun betonin karbonatisoitumisen kertaluokkia nopeammin verrattuna murskaamattomaan rakenteeseen.

¹ Betoroc®-betonimurskeen hiilikädenjälki infra-rakentamiskohteessa raporttiversion 1.1.2021-07-07

Tutkimuksessa tutkittiin vanhoja ja uusia betonirakenteita sekä kiihdytettyjä hiilen-



6a



6b



6c

6a-c Sisärakenne vuodelta 1965 (vasemmalla), josta poratut koekappaleet (keskellä ja oikealla). Oikeassa kuvassa näkyy betonin karbonatisoitumisraja pH-indikaattorilla ilmaistuna. Sisärakenteen pinnassa oli n. 2,5 cm kerros karbonatisoitunutta betonia.

sidonnan kokeita. Neljäkymmentä vuotta vanhan Konalan kiviainestaskun suunnittelulujuus oli C25/30. Muiden suunnittelulujuutta ei saatu selvitettyä mutta, koska kyseessä on 1960-luvun betoni, on lujuusluokka samaa luokkaa kuin Konalan betonilla. Kaikille kolmelle betonille koestettiin keskiarvolujuus noin 70 N/mm². Eli vuosikymmeniä vanha rakenne on saavuttanut huomattavan lujuuden, vaikka sitä ei todennäköisesti oltu alun perin tavoiteltu. Neljäkymmentä vuotta vanhan rakenteen lujuus on todennäköisesti kehittynyt lentotuhkan ansiosta, ja samalla on betonista muodostunut tiivistä. Karbonatisoituminen on ollut siten erittäin hidasta, mikä oli analyysissä hyvin havaittavissa. Kuusikymmentä vuotta vanhat rakenteet ovat puolestaan todennäköisesti olleet karkeaa puhdasta tai lähes puhdasta portlandsementtiä, mikä on mahdollistanut pitkään jatkuneen lujuudenkehityksen ja siten korkean lujuuden. 1960-luvun sementtivalikoima oli varsin kapea. Selvityksessä löytyi kaksi varsinaista betoniin tarkoitettu sementtiä, Portlandsementti ja Rapidsementti. Se onko tutkimusten 1960-luvun betonien kohdalla betonin valmistaja seostanut betoneja jää arvailujen varaan.

Betonirakenteiden karbonatisoitumistutkimukset

Tutkimuksessa perehdyttiin uusien betonien rakenteiden lisäksi vanhojen, käytössä pitkään olleiden betonirakenteiden hiilinielupotentiaalin selvittämiseen. Analyysit teetettiin Oulun

yliopiston Kuitu- ja partikkelitekniiikan laboratoriossa.

Tutkimuksia varten olemassa olevista rakenteista porattiin näytteitä betoniin sitoutuneen hiilidioksidimäärän selvittämiseksi. Kaksi rakenteista oli noin viisi vuotta vanhoja koerakenteita. Lisäksi otettiin näytteet neljäkymmentä vuotta vanhasta käytössä olevasta kiviainestaskusta Helsingin Konalassa sekä arviolta kuusikymmentä vuotta vanhoista betoniseinistä Lahdessa ja Porvoossa. Uudet rakenteet olivat alttiina ulkoilmalle ja ajoittaiselle sateelle. Kivitaskusta ja Porvoossa betoniseinistä porattu betoni oli suorassa yhteydessä ulkoilmaan, mutta ne eivät käytön aikana pääosin olleet altistuneet suoralle kastumiselle. Lahden betonit olivat sekä sisäpinnasta että ulkopinnasta.

Karbonatisoitumissyvyudet analysoitiin pH-indikaattorilla ja termogravimetrianalyysillä (TGA) analysoitiin betonin karbonatisoitumisasteet eri syvyyksillä betonirakenteissa.

TGA:lla voidaan erottaa lämpötilan funktiona eri kemiallisten yhdisteiden hajoamisreaktiot esimerkiksi kalsiumhydroksidin ja kalsiumkarbonaatin hajoaminen $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Varsinaiset karbonatisoitumissyvyudet ja -määrät jäävät erillisen tutkimusjulkaisussa julkaistavaksi, mutta tässä voidaan todeta, että vanhoissa rakenteissa karbonatisoituminen oli vaihtelevaa. Kuivassa sisätilassa varsin syväälle edennyttä ja ulkona erittäin vähäisestä karbonatisoitumisesta aina pidemmälle edenneeseen karbonatisoitumiseen. Mm. rakenteen

ilmansuunnalla vaikuttaa olleen tässä merkitystä.

Betonin laskennallinen hiilidioksidimäärä

Vapautuvan hiilidioksidin määrä ja siten karbonatisoitumisaste voidaan laskea sementtikeemian kaavoilla, kun tiedetään betonin resepti. Menetelmä ei ole tarkka vaan suuntaa antava. Jotta laskelmat olisivat tarkkoja, pitäisi käytetty sementti ja sen klinkkerin koostumus ja seosaineet ja niiden määrät, tietää tarkasti.

Neljäkymmentä vuotta vanhan betonin osalta laskennan perusteena käytettiin tiedossa olevaa 1980-luvun perusreseptiä. Tuolloin käytössä oli klinkkeripohjaista sementtiä (n. 180–200 kg/m³) ja betoniin sekoitettiin erikseen lentotuhkaa (n. 120 kg/m³). Vettä sekoitettiin n. 180 kg/m³. Analyysissä 1960-luvun betonin sementin oletettiin olevan puhtaasti klinkkeripohjainen. Koska vanhojen betonien alkuperaisista suhteituksista ei ole tarkkaa tietoa, ei tulosten tarkkuudenkaan oleteta olevan tarkkoja, mutta on toki suuntaa antavia. Uusien betonien valmistusreseptit ja sideaineet ovat tiedossa.

Laskennallisesti saatiin tulokseksi, että vanhan betonin pinta oli karbonatisoitunut lähes täysin ja rakenteen sisältä betoni oli karbonatisoitunut vain vähän (>20 mm syvyydellä pinnasta). Uudet betonit olivat karbonatisoituneet vastaavasti pinnaltaan kokonaan, mutta sisäosaltaan eivät lainkaan. Tarkemmat tulokset julkaistaan erillisessä artikkelissa myöhemmin.

Taulukko 1

Kimmo- ja Poisson-luvun tulokset

Betoni	Lujuus, 91 vrk [N/mm ²]	Kimmokerroin [GPa]	Poisson-luku	Sementtimäärä [kg/m ³]	Vesi-sementti-suhde	Ilmamäärä [%]
Vertailubetoni CEM II/B	47,4	35,6	0,213	320	0,6	1,8
CEM II/B 50 % karkea kierrätyskiviaines	41,8	31,5	0,239	320	0,6	1,8
CEM II/B 100 % karkea kierrätyskiviaines	37,4	28	0,205	320	0,6	2,2
CEM III/B	49,2	37	0,224	320	0,58	1,5
CEVO-betoni*	45,5	33,4	0,229	–	–	1,2

*CEVO-betonin suhteustietoja ei ilmoiteta

Kierrätyskiviaineksen rakeisuus oli 8–16 mm. Luonnonkiviaines oli graniitista murskattua ja luonnon muovaamaa kiviainesta.

Edellä mainituille betoninäytteille tehtiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kymilabsissa nopeutettu hiilidioksidivanhennus, ts. rinnakkaistutkimus, jossa näytteet karbonatoitiin laboratoriossa hiilidioksidilla ennen TGA-analyysejä. Tällöin saatiin ulkopinnan betonille ja sisärakenteen betonille täysi karbonatoituminen, ja tätä arvoa voitiin käyttää referenssinä määritettäessä rakenteen varsinaista karbonatoitumisastetta. Pintabetonien osalta ei laboratoriossa tehty karbonatoituminen oleellisesti lisännyt sitoutuneen hiilidioksidin määrää betonissa. Sen sijaan sisärakenteen karbonatoitumisaste kasvoi käsittelyssä selvästi.

Analyysit osoittavat selkeästi betonin merkittävän hiilidioksidin sidontakyvyn ja sen, että se ei ole marginaalinen ilmiö tapahtui se sitten rakenteen elinaikana tai sen jälkeen. Parhaimmillaan tästä saadaan hyöty kierrättämällä vanhojen rakenteiden betoni ja murskaamalla se sopiviin raekokoihin, jolloin hiilidioksidinsitoutuminen on nopeaa ja tehokasta.

Koska analyyseissä käytettiin todellisia rakenteita, on analyyseissä mukana kiviaines ja tämä tuo epätarkkuutta tuloksiin. Betonista on suurin osa kiviainesta ja sen määrä saattaa paikallisesti vaihdella. Niinpä ei pystytä tarkasti määrittämään näytteen eri kemiallisten materiaalien osuuksia näytteessä. Kehittämällä näytteen valmistusta on mahdollista saada lisätarkkuutta analyyseihin.

Kierrätyskiviaineksesta valmistetuille betoneille ja CEVO-betoneille tehdyt tutkimukset

Kierrätyskiviaineksesta valmistettiin betoninäytteet seuraavia koesarjoja varten: puristus-, taivutus- ja vetolujuus, pakkasenkestävyys, suola-pakkasenkestävyys, kimmokerroin ja Poissonin-luku. Myös Ruduksen vähähiilinen CEVO-betoni oli tässä osassa tutkimusta mukana. CEVO-betonin hiilidioksidipäästöt ovat merkittävästi pienemmät verrattuna referenssibetonin päästöihin. CEVO-betonin etuna on sen nopea lujuudenkehitys verrattuna perinteisiin seosainebetoneihin. CEVO-betoni on tarkoitettu rasitusluokkiin X₀ ja X_{C1} eli lähinnä sisätilojen rakenteisiin.

Mekaaniset ominaisuudet

Kimmo- ja Poisson-luvun määrittäminen

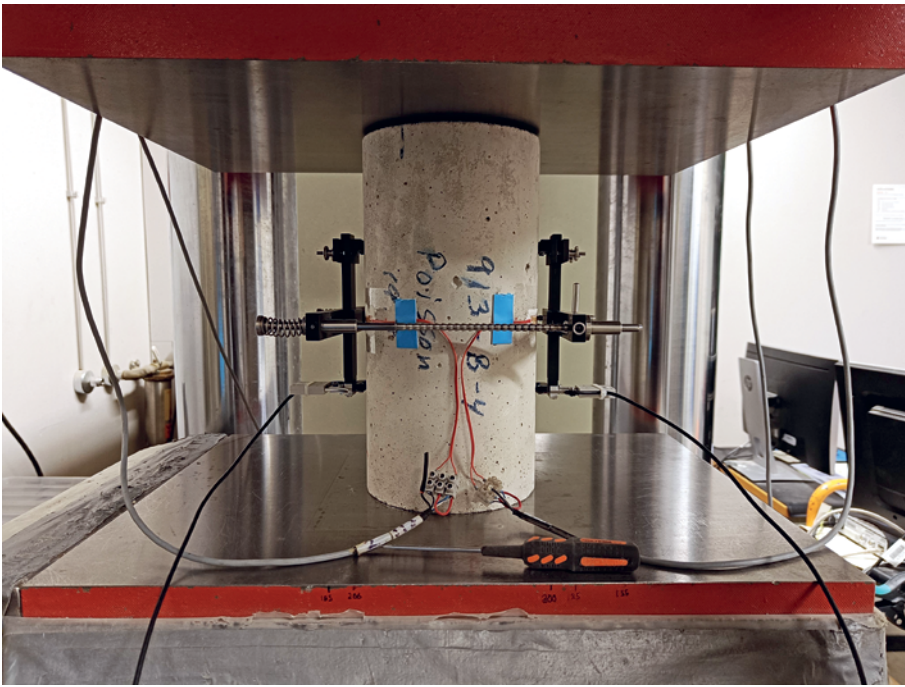
Puristuslujuus, kimmokerroin (Young's modulus E) ja Poissonin luku (Poisson's ratio ν) ovat keskeisiä materiaalin mekaanisia ominaisuuksia kuvaavia suureita, jotka ovat rakennesuunnittelijoille tärkeitä tietoja mm. rakenteiden pitkäaikaismuodonmuutosten arvioinnissa. Määrittäminen tehtiin koekappaleista, jotka olivat 150 × 300 mm lieriönäytteitä. Kimmo- ja Poisson-luvun määrittäminen tehtiin standardin SFS-EN 12390-13 mukaisesti. Kimmo- ja Poissonin-luku määritettiin 91 vuorokauden ikäisille näytteille, joiden kiviaineskoostumus on kuvattu taulukossa 1.

Kimmo- ja Poisson-luvun määrittäminen tehtiin Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksella.

Poisson-luku määritettiin kimmo- ja Poisson-luvun määrittämisen yhteydessä. Kuormituksen aikana mitattiin aksiaalista jännitystä eli kuormitusta pinta-alaa kohden ja aksiaalista venymää eli pituuden muutosta suhteessa alkuperäiseen pituuteen. Muodonmuutoksen mittaamiseen käytettiin venymäantureita, jotka asennettiin näytteen pinnalle pituus- ja poikittaissuunnassa. Mittaukset suoritettiin lineaarisen elastisuuden alueella, 10–40 % näytteen murtokeuhasta.

Kierrätyskiviainesta sisältävän betonin kimmo- ja Poisson-luvun arvo oli pienempi kuin luonnonkiviaineksesta valmistetun. Lisäksi mitatut tulokset olivat matalampia kuin Eurocode 2 (EN 1992-1-1) standardin laskennallinen rakenteiden mitoitus varten kehitetty malli. Matalampi arvo saattaa johtua mm. siitä, että kierrätysmateriaalin vanha sementtikivi on huokoisempaa ja siten kokoonpuristuvampaa kuin uusi ja sen heikompi transiiovyöhyke mahdollistaa molekyyllitasolla rakenteiden liukumista ja uudelleenjärjestymistä, mikä mahdollistaa suuremman muodonmuutoksen. Poisson-luvut kaikilla betoneilla vastasivat betoneille tottua arvoa.

Mikäli kierrätyskiviainekseksi käytetään erittäin vaativissa rakenteellisissa kohteissa, on tärkeää, että arvioidaan erikseen, onko kimmo- ja Poisson-luvun määrittäminen kokeellisesti tarvetta. Muuten saattaa olla hyvä käyttää



7 Kimmokertoimen ja Poissonin-luvun määrittäminen.

8a-b Koebetonien virumatestaus käynnissä. Oikeassa kuvassa kutistumapalkkeja.

7

laskennallista tai taulukkoarvoa pienempää arvoa. Turvallinen arvio laskennallisen arvon pienennyskertoimelle voisi olla 0,8–0,9. Kun kierrätyskiviaineksen käyttömäärä rajataan standardin SFS-EN 206 suosituksiin ei tätä tarvitse huomioida tavanomaisissa rakenteissa.

Virumatestaukset

Virumatestien tarkoituksena oli mitata näytteiden pitkäaikaista muodonmuutosta vakio-kuormituksen alaisena. Viruman tunteminen auttaa ennustamaan rakenteiden käyttäytymistä, ja arvoja hyödynnetään pyrittäessä estämään pitkäaikaisia vaurioita, kuten painumia ja halkeamia.

Betonin muodonmuutos voidaan jakaa eri tyyppeihin eli se koostuu eri osista: 1) Välitön elastinen muodonmuutos, joka syntyy heti kuormituksen asettamisen jälkeen. 2) Primääriäinen viruma, joka kehittyy nopeasti ensimmäisten viikkojen aikana. 3) Sekundäärinen viruma, joka hidastuu ajan myötä, mutta jatkuu vuosia. 4) Tertiäärinen viruma, joka tapahtuu, kun materiaali alkaa rappeutua ja lopulta murtuu. Viimeisin on harvinainen normaaleissa betonirakenteissa ja tavanomaisissa käyttöolosuhteissa. Joka tapauksessa tämä vaatii ajanjaksoa, joka on huomattavasti pidempi kuin oletettu käyttöikä.

Korkea viruma tarkoittaa suurempia muodonmuutoksia pitkäkestoisessa rasituksessa. Ilmiö on tärkeä rakenteellisessa suunnittelussa, erityisesti silloissa, pilareissa ja korkeissa rakennuksissa, sillä pitkäaikainen muodonmuutos vaikuttaa rakenteen stabiliteettiin, kantavuuteen ja säilyvyyteen.

Virumaan vaikuttavat betonin koostumus (sideaine, runkoaineet, lisäaineet, vesi ja sementin suhde), kovettumisolosuhteet (lämpötila, kosteus), ympäristöolosuhteet, kuormitustaso ja kuormituksen kesto. Mitä pidempi on kuormituksen kesto, sitä suurempi on kumulatiivinen viruma.

Testejä varten valmistettiin lieriömäiset ($\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) näytteet, jotka oli kovetettu standardoiduissa olosuhteissa ennen kuormituksen aloittamista.

Näytteet asetettiin pitkäaikaiseen kuormitukseen ja niiden muodonmuutosta seurattiin ajan suhteen. Näytteisiin kohdistettiin pysyvä vakioitu aksiaalinen puristuskuorma, joka oli hieman alle 40 % betonin puristuslujuudesta.

Viruman mittaaminen on pitkäkestoinen koe. Tutkimuksessamme mittaukset kestivät lähes vuoden eli 343 vrk. Mittaukset lopetettiin, kun viruman voitiin todeta tasaantuneen, eikä odotettavissa ollut enää merkittävää muutosta ajan suhteen.

Virumakoe tehtiin seuraaville betoneille: Vertailubetoni, jossa ei ollut lainkaan kierrätyskiviainesta sekä betonit, joissa karkea kiviaines oli korvattu 50 % ja 100 % kierrätyskiviaineksellä. Lisäksi viruma mitattiin myös CEVO-betonille ilman ja kierrätyskiviaineksen kanssa. Lisäksi mitattiin yksi GWP:55 betoni, koska haluttiin koestaa yksi CEM III/B sementillä valmistettu vähähiilinen betoni. GWP:55 betoni viruma ja kutistuma oli selvästi pienempi kuin muilla betoneilla, mutta tulos on viitearvojen sisällä. GWP:55-betonin kutistuma oli pieni, ja tämä vahvistaa aiempaa käsitystä vähähiilisten betonien käyttäytymisestä.

Taulukossa 2 esitetään kokonaisvirumat ja kutistumat. Jännitystaso määritettiin 91 vrk:n lujuustasosta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että virumat kaikilla koebetoneilla olivat aavistuksen verran korkeammat kuin vertailubetonilla. CEVO-betonia ei voi verrata referenssibetonin sen eri koostumuksen takia, mutta CEVO-betonien kesken oltiin hyvin tarkasti samassa suuruusluokassa ja kierrätyskiviaines ei merkittävästi vaikuttanut virumaa lisäävästi.

Pakkasenkestävyys kierrätyskiviainesbetonille

Pakkasenkestävyyden tutkimuksissa selvitetiin betoninäytteiden kestävyttä toistuvaa jäädytymistä ja sulamista vastaan. Laattakoe tehtiin ionivaihdetulla eli makealla vedellä sekä 3 %:lla NaCl-liuoksella. Jälkimmäisiä tuloksia ei tässä käsitellä, koska betonit eivät kestäneet kloridiympäristössä eli tulokset ylittivät XF2:lle ja XF4:lle asetetut kansalliset raja-arvot.

Pakkasenkestävyyskokeet tehtiin laattakokeina (CEN/TR 14177, TS-12390-9). Jäädytys-sulatussykliä määrää teknisen spesifikaation määrittelemä 56 jaksoa.

Analyysit tehtiin kahdessa eri kaupallisessa laboratorioissa. Tuloksissa on eroa laboratorioiden kesken, mutta menetelmän tarkkuus huomioiden, voidaan tulosten todeta olevan yhteneväiset.

Suhteellinen dynaaminen kimmomoduuli oli kaikilla betoneilla 56 jakson jälkeen yli 100, joten sisäisiä vaurioita ei koebetoneihin syntynyt. FT-0-betonin rapautuminen oli lähes olematonta ja käytännössä samoin FT-50 betonin



8a



8b

Taulukko 2

Eri betonien viruma-arvot

Tutkittava betoni	Lujuus N/mm ² 91 vrk	Viruma [mm/m]	Kutistuma [mm/m]	Sementtimäärä/ vesi-sementtisuhde	Ilma [%]
Vertailubetoni (CEM II/B), C30/37	37,7	3,0	0,44	310/0,6	2,5
Kierrätyskiviaines 50 %, C30/37	39,3	3,3	0,50	310/0,59	1,6
Kierrätyskiviaines 100 %, C30/37	37,8	3,9	0,75	310/0,6	3,8
CEVO*	55,4	4,8	0,45	–	0,7
CEVO kierrätyskiviaines 50 %*	55,0	4,5	0,60	–	1,4

*CEVO-betonin suhteitustietoja ei esitetä

Kierrätyskiviaineksen rakeisuus oli 8–16 mm. Luonnonkiviaines oli graniitista murskattua ja luonnon muovaamaa kiviainesta.

Taulukko 3

Betonien pakkasenkestävyys, pakkasenkestävien kierrätysbetonien suhteitus

Betoni	FT-0	FT-50	FT-100
Sementti (CEM II/B (Oiva)) [kg/m ³]	334	334	335
vesi-sementtisuhde	0,54	0,54	0,54
Kiviaines, kaikki [kg/m ³]	1367	1370	1373
Kierrätyskiviaines (karkea 8–16) [kg/m ³]	0	368	736
Ilmamäärä [%]	6,4	6,3	5,8
Suhteellinen dynaaminen kimmomoduuli [%]*	113	104	105
Rapauma, kahden analyysin [kg/m ²]*	0,005	0,023	0,047

*Kahden analyysin keskiarvo

Kierrätyskiviaineksen rakeisuus oli 8–16 mm. Luonnonkiviaines oli graniitista murskattua ja luonnon muovaamaa kiviainesta.

kohdalla. FT-100-betoneissa oli pientä rapautumista (FT-0 vertailu, FT-50 ja FT-100, karkeasta kiviaineesta korvattu 50 ja 100 % kierrätyskiviaineeksella), Näiden tulosten perusteella FT-0-, FT-50- ja FT-100-betoni täyttävät rasitusluokkien XF1 ja XF3 pakkasenkestävyysvaatimukset sadalle vuodelle.

Makealla vedellä tehtyjen pakkasrasituskokeiden tulosten mukaan kierrätyskiviaineesta valmistettu betoni soveltuu kloridittoman ympäristön pakkasrasitukseen. Pinnat eivät näkyvästi rapautuneet eikä betoneihin muodostunut myöskään sisäisiä vaurioita. Sen sijaan kloridiympäristössä niihin syntyi ulkoisia rapautumisvaurioita kierrätyskiviaineen yhteyteen niihin kohtiin, joissa oli vanhaa sementtikiveä. Näihin paikkoihin alkoi kehittyä jäätyminen vaikutuksesta selviä kuoppia.

Tehtyjen testien perusteella ei kloridiympäristössä siis voida pitää soveltuvana murskatusta betonista tehdyille näytteille.

Tulosten hyödyntäminen

Betonin merkittävä vahvuus kestävän rakentamisen näkökulmasta on pitkä käyttöikä, mikä tekee siitä hyvin soveltuvan kiertotalouden periaatteita tukevaan rakentamiseen. Merkittävä haaste kiertotalouden vakiinnuttamisessa on kuitenkin se, ettei sen käytöstä ole ollut pitkäaikaisia kokemuksia. Kiertotalouden ratkaisut voivat alentaa rakennuksen elinkaaripäästöjä ja Betoroc®-murskeella on kaiken mahdollisuus saavuttaa merkittäviä kustannushyötyjä perinteiseen kiviaineeseen verrattuna.

Karbonatisoitumisen synnyttämä hiilinielu on nouseva tutkimusaihe, mutta rakenteiden elinkaaren aikaista hiilen sitomiskykyä on toistaiseksi tutkittu varsin vähän. Vaikka elinkaaren aikana tapahtuva hiilensidonta on huomattavasti vähäisempää kuin betonin murskaamisen jälkeinen karbonatisoituminen, se on silti yksinkertainen ja kustannustehokas keino vähentää päästöjä. Uudisrakennusten osalta betonin murskaaminen ja sitä seuraava

karbonatisoituminen tulevat ajankohtaisiksi vasta mahdollisesti kymmenien mahdollisesti yli sadan vuoden kuluttua. Tästä syystä olisi jatkossakin tärkeää tutkia keinoja, joilla voitaisiin edistää karbonatisoitumista jo rakennuksen käyttöiän aikana.

Kierrätyskiviaineen, lähinnä betonimurskeen, valmistus, käyttö ja sen asettamat vaatimukset betonin kiviaineeksena ovat tällä hetkellä monella toimijalla selvityksessä. Nyt saadut tulokset osoittavat, että reseptit toimivat murskeen kanssa, kun hienoaines on seulottu pois. Murskeen muodolla on niin ikään tärkeä vaikutus: pyöreä kiviaines toimii hyvin eri tavalla kuin murskattu kulmikas. Betoni onkin suhteitettava huolella, jotta saavutetut hyödyt eivät mene hukkaan liiallisella sementin käytöllä. Suhteitus itsessään vastaa hyvin paljon murskatun kiviaineen suhteitusta, mutta suhteituksessa ja valmistuksessa on huomioitava kiviaineen vedenimu.

Hankkeessa saadut tulokset osoittavat, että kierrätyskiviaineen käyttö vähähiilisessä betonirakentamisessa on teknisesti mahdollista ja tarjoaa kestäviä ratkaisuja.

Haasteiksi nähdään se, että vaikka tutkimuksen tulokset ovat lupaavia, materiaalin ja sen laadun välistä pitkäaikaiskestävyyttä eri ympäristöolosuhteissa ei ole vielä täysin selvitetty. Erityisesti on mietittävä, voidaanko kierrätyskiviaineesta valmistettu betoni hyväksyä pakkasenkestävyyttä vaativiin olosuhteisiin (XF1 ja XF3). Pelkästään tämän tutkimuksen perusteella sitä ei voi todeta vaan asia vaatii lisätutkimusta. Kloridiympäristö (XF2 ja XF4) vaikuttaa olevan kierrätyskiviaineesta valmistetulle betonille liian vaativa. Muuten mekaanisissa ominaisuuksissa ei ilmennyt poikkeavaa verrattuna tavanomaiseen betoniin. Joitain ominaisuuksia voi olla vaativissa kohteissa testata erikseen, mutta tavanomaisissa rakenteissa kierrätyskiviaineesta tehty betoni on turvalista käyttöä. Myöskään CEVO-betonin ja vähähiilisen betonin kohdalla ei havaittu ongelmia mekaanisten

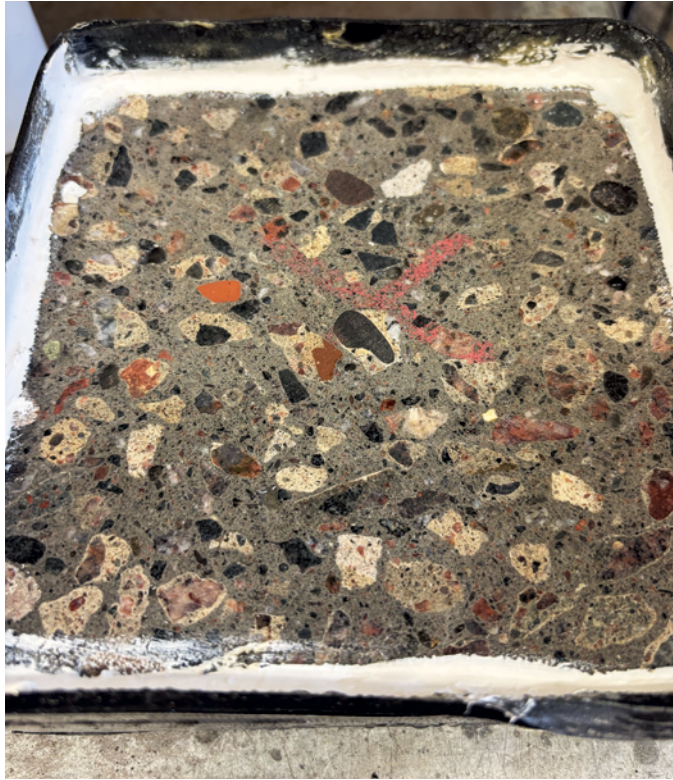
ominaisuuksien suhteen. Kierrätyskiviaineen alkuperä vaikuttaa betonin lopullisiin ominaisuuksiin, mikä edellyttää vastaanotettavan betonin tarkkaa laadunhallintaa ja materiaalin esikäsittelyä.

Kasvava paine vähähiiliseen rakentamiseen ja resurssitehokkuuteen kannustaa rakennusteollisuuden toimijoita ja urakoitsijoita etsimään uusia ratkaisuja. Julkinen sektori ja suuret rakennuttajat voivat toimia edelläkävijöinä ja käyttää kierrätysmateriaaleja osana ympäristötavoitteitaan sekä ottaa kierrätysmateriaalit rohkeasti osaksi omia vähähiilisyys- ja kierrätystavoitteitaan. Myös koulutusta, teknistä tukea ja osaamista on lisättävä, jotta rakennusalan toimijat oppivat käyttämään uutta materiaalia tehokkaasti.

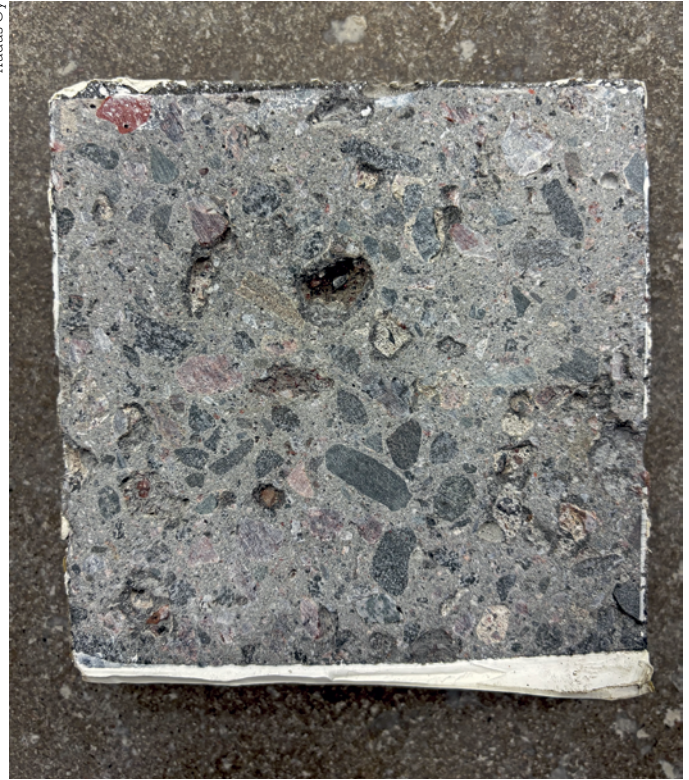
Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kierrätyskiviaineen käyttö vähähiilisessä betonirakentamisessa on lupaava vaihtoehto, joka osaltaan edistää rakennusalan siirtymää kohti kestävämpiä ratkaisuja. Poliittinen ja kasvava lainsäädännöllinen paine luovat hyvät edellytykset teknologian kehitykselle, mutta lisätutkimuksia tarvitaan erityisesti pitkäaikaiskestävyyden, laadunhallinnan ja markkinoiden hyväksynnän osalta.

Tutkimuksessa ei suositella kuinka paljon luonnonkiviainesta voidaan korvata kierrätyskiviaineeksella. Tutkimuksen betonien karkean kiviaineen osuus vaihteli mutta kaikilla korvausmäärillä saatiin valmistettua betoneja, joiden mekaaniset ominaisuudet olivat lähellä luonnonkiviaineesta valmistettuja referenssibetoneja. Vaikka tulokset ovat lupaavia, on varmasti hyvä hankkia ensin kokemusta kierrätyskiviaineesta korvaamalla luonnonkiviainesta pienempiä määriä eli noudattaa standardin SFS-EN 206 Betoni-standardin ohjeistusta 30 %:n korvausmäärästä karkeasta kiviaineesta (tyyppi A).

Hankkeen tutkimusosuus toteutettiin pääosin Ruduksen Konalan laboratoriossa. Tutkimukseen liittyi osia, jotka toteutettiin



9a



9b

betonituote- ja valmisbetonitehtailla sekä ostopalveluna ulkopuolisissa laboratorioissa.

Tutkimuksen yhteydessä valmistui kaksi AMK-lopputyötä ja yksi kandidaatintyö. AMK-lopputyöt käsittelivät kierrätyskiviaineksen vaikutusta betonin pakkaskestävyyteen ja Sadgroven lujuudenkehityskaavan käyttämistä vähähiilisen betonin kypsytyden arvioinnissa. Aalto-yliopiston kandidaatintyönä tehty kirjallisuuskatsaus toi puolestaan valoa kierrätyskiviaineksen käyttöön betonivalmistuksessa maailmalla.

Tutkimuksen tuloksia on julkaistu myös Nordic Concrete Research -lehdessä (NCR 72, 1/2025) artikkelissa "Assessing the Mechanical Properties and Frost Resistance of Recycled Coarse Aggregate Concrete in Finland" (Tulimaa et al.) •

9a–b Kierrätyskiviainesbetonin laattakokeen koe-kappaleita. Vasemmassa kuvassa makeanveden testi (XF1/XF3) ja oikeassa kuvassa suola-pakkaskokeen testi (XF2/XF4). Vasemmanpuoleisessa kuvassa oleva betoni ei ole rapautunut silmämääräisesti ollenkaan. Oikeanpuoleisesta kuvasta näkee, miten kierrätyskiviaines on irronnut betonista rasituksen seurauksena. Tämä johtunee siitä, että kierrätyskiviaineksen pinnalla oleva sementtikivi ei kestä pakkasrasitusta vaan hajoaa ja kiviainesrakeen tartunta betoniin katoaa ja rae irtoaa sen seurauksena betonista.

Innovative low-carbon recycled aggregate concrete

Rudus Oy's project has produced new research knowledge on low-carbon raw materials and methods for concrete construction, while developing practical applications to support their use in the construction industry. The aim is to increase know-how and promote low-carbon concrete construction more widely in Finland and globally.

The study investigated recycled aggregate sourced from crushed concrete collected from demolition sites and processed on Rudus premises. The 2022 End-of-Waste Status classification streamlined practices by enabling recycled aggregates to be used similarly to natural aggregates, eliminating previous waste-related approval procedures. Based on the findings, recycled aggregates demonstrate significant potential as a viable alternative to virgin aggregates, with concrete workability, structural strength development, and ultimate performance optimizable for a wide range of applications.

The aggregate data complements previous research on low-carbon binders and processes, enabling a more holistic approach to identifying low-carbon potential across all construction areas. While standardization's strict quality requirements have somewhat slowed adoption of recycled materials in novel concretes, ensuring these standards do not hinder sustainable development is critical.

The findings indicate that concrete made with recycled aggregates exhibit sufficient properties within their designated exposure classes. The use of recycled aggregates does not significantly compromise elastic properties, and long-term deformation can be effectively managed. However, broader adoption requires extended monitoring tests and durability simulations, particularly concerning freeze-thaw resistance.

The experiments could inform the development of a national aggregate standard in Finland, producing concrete with optimal lifecycle durability while advancing circular economy principles. This is best achieved by utilizing only tested and approved aggregates and generating research data that clarifies both the limitations and opportunities of recycled aggregates.

The project's results demonstrate that recycled aggregates in low-carbon concrete construction offer a promising alternative, contributing significantly to the construction industry's transition toward sustainable solutions. Political demand and increasing legislative requirements create favorable conditions for technological advancement, though further research is needed to expand practical applications.

This research was partially funded by the European Union's Recovery and Resilience Facility (RRF), coordinated by the Ministry of the Environment.