

Rudus Oy – VN/7067/2023

Innovatiivinen vähähiilinen kierrätyskiviainesbetoni

Hankkeen loppuraportti 1.4.2025

Hankkeen kesto: 3.5.2023-28.2.2025



SISÄLLYS

1. Tiivistelmä.....	2
Summary.....	2
2. Hankkeen tausta ja tavoitteet	3
3. Hankkeen osapuolet ja menetelmät.....	5
Toteuttajaorganisaatio	5
Yhteyshenkilö.....	5
4. Hankkeen tulokset	6
Kierrätyskiviaineksen kuvaus	6
Kierrätyskiviaines hiilinieluna	9
Vanhojen betoninäytteiden karbonatisoitumistutkimukset	9
Kiihdytetyn karbonatisaation tutkimukset	12
Korvaavat kiertotalouden materiaalit.....	13
Kierrätyskiviaineksesta valmistetuille betoninäytteille tehdyt tutkimukset.....	13
LuJUUtutkimukset ja rasitusluokat.....	13
Kimmokertoimen ja Poissonin luvun määrittäminen	14
Virumatestaukset.....	16
pakkaskestävyyden tutkimukset.....	17
M1-luokitustestit	18
Cevo-betonin käyttö eri tilanteissa.....	20
Kierrätyskiviaineksen käyttö betoninvalmistuksessa maailmalla	22
5. Hankkeen vaikuttavuus.....	23
6. Viestinnän toteutuminen ja tulokset	23
7. Tulosten kestävyys ja hyödyntäminen.....	24
Arvio tulosten kestävydestä, konkreettisuudesta ja riskeistä.....	25
8. Talousraportti	25
9. Suositukset tulevia hankkeita ja ohjelmia varten	25



10. Yhteenveto hankkeen päätuloksista.....	28
Summary of the main results.....	29

Hankkeemme Innovatiivinen vähähiilinen kierrätyskiviainesbetoni on saanut tukea ympäristöministeriöltä Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelmasta, jonka rahoitus tulee EU:n kertaluonteisesta elpymisvälineestä (RRF).

1. TIIVISTELMÄ

Rudus Oy:n hankkeessa on tuotettu uutta tutkimustietoa betonirakentamisen raaka-aineiden ja menetelmien vähähiilistämiseksi. Samalla on kehitetty käytännön sovelluksia, jotka tukevat näiden ratkaisujen hyödyntämistä rakennusallalla. Tavoitteena on lisätä tietotaitoa ja edistää laajemmin vähähiilistä betonirakentamista maassamme ja globaalisti.

Kierrätyskiviaineksena käytettiin työmailta kerättyä ja murskattua betonia, jonka määrää ja toimivuutta betonirakenteissa tutkittiin monipuolisesti. Betonimurskeen jätteen luokittelun päättymisen tuli voimaan syyskuussa 2022, mikä on suoraviivaistanut käytäntöjä ja edistänyt betonteollisuudessa ja rakennustyömaille syntyvän purku- ja ylijäämäbetonin jatkokäyttöä. Jätestatuksen poistuttua vastaavia uusiokiviaineita voidaan käyttää pitkälti luonnonkiviaineksen tapaan ilman aiemmin jäteluonteeseen liittyviä hyväksymismenettelyjä.

Saatujen tulosten valossa kierrätyskiviainekselle nähdään todellista potentiaalia betonirakenteissa neitseellisen kiviaineksen korvaajana. Betonin työstöominaisuudet, rakenteiden lujuuden kehitys ja lopullinen suorituskyky voidaan optimoida moneen sovelluskohteeseen hyvinkin riittäviksi. Nykyinen testiprotokolla ei ole kuitenkaan vielä standardoitu, ja joidenkin testien osalta sitä tullaan vielä tarkastelemaan tässäkin hankkeessa saatujen kokemusten valossa. Tutkimustietomme toimii tukena kansallisen kiviainesstandardin työstöön osallistuvalla työryhmällä. On oleellista, etteivät jatkossa standardit tule kestävä kehityksen esteeksi.

Nyt tuotettu kiviainestieto täydentää aiempia tutkimuksia vähähiilisten sideaineiden ja prosessien osalta mahdollistaen kokonaisvaltaisemman tarkastelun. Tämä yhdistetty tieto auttaa tunnistamaan vähähiilisen potentiaalin kaikilla osa-alueilla entistä paremmin.

SUMMARY

Rudus Oy's project has produced new research knowledge on low-carbon raw materials and methods for concrete construction. At the same time, practical applications have been developed to support the use of these solutions in the construction industry. The aim is to increase know-how and promote low-carbon concrete construction more widely in our country and globally.

The recycled aggregate used was concrete collected and crushed from working landscapes. Its quantity and performance in concrete structures was investigated in a wide range of ways. The end of the classification of crushed concrete as waste came into force in September 2022 (End-of-Waste Status). This has streamlined practices and promoted the further use of demolition and surplus concrete from the concrete industry and construction sites. With the abolition of residue certification, similar recycled aggregates can be used in much

INNOVATIIVINEN VÄHÄHIILINEN KIERRÄTYSKIVIAINESBETONI

RUDUS OY



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment



Euroopan unionin
rahoittama
NextGenerationEU

the same way as natural aggregates, without the approval procedures previously associated with waste character.

Based on the findings of this study, recycled aggregates demonstrate significant potential as a viable alternative to virgin aggregates in concrete structures. The workability of concrete, the development of structural strength, and the ultimate performance can be optimized to a high degree for a wide range of applications. Nevertheless, the current testing protocol lacks standardization and will require refinement for certain tests, informed by the insights gained from this project. Our research data will provide valuable support to the working group tasked with developing a national aggregate standard. Ensuring that these standards do not hinder future sustainable development is of critical importance.

The aggregate data now produced will complement previous research on low-carbon binders and processes, enabling a more holistic approach. This combined knowledge will help to better identify the low carbon potential in all areas.

2. 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-aineiden vähentämistä ja hiilineutraaliuteen pyrkimistä. Kierrätyskiviaineksen materiaalivirta on kasvava, joten neitseellisiä luonnonvaroja voidaan potentiaalisesti säästää yhä enemmän. Vaikka sementti on keskeinen ainesosa betonin valmistuksessa, sen osuus lopputuotteessa on vain noin 17 %. Suurin materiaalikulutus muodostuu runkoaineista, karkeasta ja hienosta kiviaineksesta, joiden lisäksi tarvitaan pieni määrä vettä ja lisäaineita. Vaikka kierrätyskiviainesta jo käytetään betonituotannossa korvaamalla osa karkeista luonnonkiviaineksista valmisbetonissa, nykyinen käyttö on rajoitettu tiettyihin määrä-, laatu- ja raekokorajoihin. Tämä on toistaiseksi vähentänyt niiden hyödyntämistä verrattuna niiden mahdollisuuksiin.

Yrityksemme Rudus Oy on kivipohjaisten rakennusmateriaalien sekä kierrätystuotteiden ja -palvelujen toimittaja Suomessa ja Virossa. Noudatamme emoyhtiömme CRH:n kestävän kehityksen tavoitteita. Rakentamisen ratkaisussamme huomioimme tuotteiden koko elinkaaren: vähähiilinen, innovatiivinen reseptiikka, nopeaksi optimoitu kovettumisaika, pitkäikäinen lopputulos sekä purkuvaiheessa jälleen murskattavissa ja uudestaan käytettäväksi sopiva materiaali. Yrityksemme innovatiiviset kiertotalouden ratkaisut ovat vastaus asiakkaidemme kasvavaan päästöttömyyden tarpeeseen.

Hankkeen pääfokus on kiertotalousraaka-aineiden ja vähähiilisten valmistusprosessien mahdollistama betonin päästövähennys. Tavoitteena on monipuolinen tutkimus erityisesti käytöstä poistettua, murskattua betonia eli kierrätyskiviainesta sisältävien uusien betonireseptien kehittämiseksi, valmistamiseksi ja käyttäytymisen selvittämiseksi.

Betoninen kierrätyskiviaines eroaa luonnonkiviaineksesta pääasiassa sen sisältämän alkuperäisen betonin sementtikiven takia. Tämä sementtikivi jättää huokoisen rakenteen, mikä alentaa tiheyttä ja aiheuttaa korkeamman vedenimukyvyn verrattuna luonnonkiviaineksen käyttöön. Lisäksi vanha sementti vähentää betonin puristuslujuutta, koska se on heikompaa kuin puhdas luonnonkiviaines. Mahdolliset epäpuhtaudet ja alkuperäisen betonin lujusluokka ja kosteudenkestävyys voivat myös vaihdella jätelähteen mukaan, mikä vaikuttaa lopulliseen betonin suorituskykyyn.



Tällä hetkellä rakentaminen käyttää puolet maailman raaka-aineista, aiheuttaa 40 prosenttia globaalista CO₂-päästöistä ja synnyttää 30 % maailman jätteestä. Haettavan uuden osaamisen pohjalta pyrimme pureutumaan erityisesti siihen, että mahdollisimman suuri osa kiviaineksesta voidaan korvata kierrätyskiviaineksella ilman, että betonimassan työstettävyyteen tai lopputuloksen lujuuden ja kestävyyskehittämiseen liittyvät ominaisuudet heikkenevät. Hankkeessa on toteutettu laajat koesarjat liittyen mm. kiertotalouden betonin sekoitettavuuteen, kovettumiseen ja lujuuden kehittämiseen. Lopullisena tavoitteena on varmistaa, että laboratoriomittakaavan kokeet skaalautuvat teolliseen mittakaavaan.

Nykytietämyksen mukaan kiviaineksesta voidaan korvata noin 20-40 % kierrätyskiviaineksella, jos mitään muita muutoksia ei tehdä. Tämän ylittävä osuus on monissa aiemmissa kokeissa johtanut heikompilaatuiseen ja vaikeammin työstettävään betoniin. Ongelmia ovat aiheuttaneet mm. käytetyn betonin murskauksessa syntynyt hienoaines ja kierrätysbetonien vaihteleva laatu verrattuna luonnon kiviainekseen.

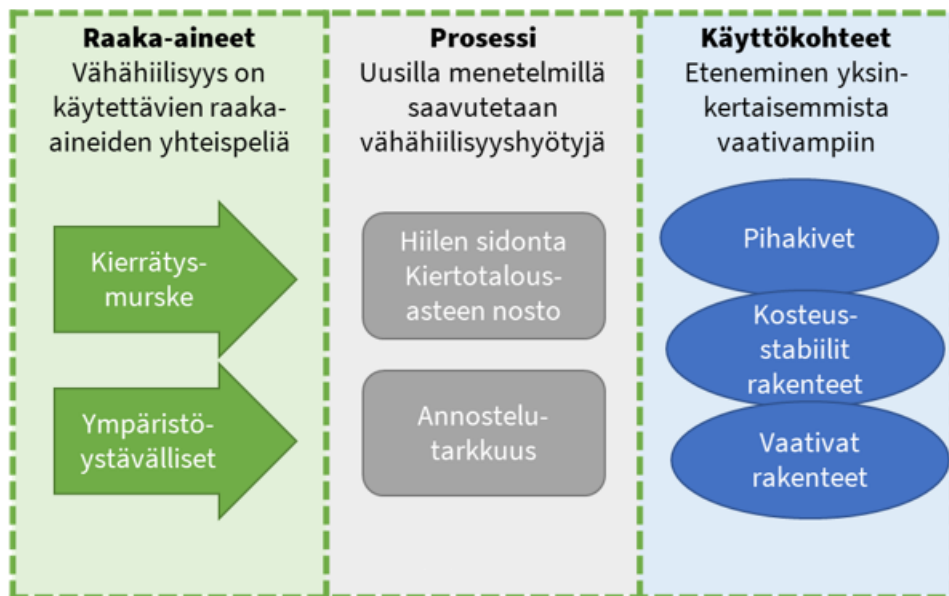
Perinteisissä betoneissa sideaineena käytetyn sementtiklinkkerin valmistus on merkittävä hiilidioksidilähde. Hankkeessa on pureuduttu klinkkerin valmistukselle käänteiseen reaktioon, karbonatisoitumiseen, jossa hiilidioksidi sitoutuu takaisin betoniin. Tavoitteena on ollut tuoda lisää ymmärrystä tähän tapahtumaan ja saada reaktio valjastettua mahdollisimman tehokkaaseen käyttöön. On ollut tunnettua, että käytöstä poistettu betoni murskattuna ja sijoitettuna paikkaan, jossa se on tekemisissä ilman kanssa, karbonatisoituu jopa 60-80 %:sti sitoen itseensä 25 % sen valmistuksen aikana vapautuneesta hiilidioksidista. Siksi murskeen varastointi ja käyttö ovat merkittäviä ilmastomuutoksen torjuntajärjestelyjä: betonimurskeesta tulee hiilinielu.

Toteutettu hanke on linjassa kuvan 1 ympäristöstrategiamme kanssa. Pyrimme päästöjen pienentämiseen koko betonirakentamisen arvoketjussa tavoitteena vähentää niitä 30 % vuoteen 2030 mennessä. Tämän saavuttaaksemme tarvitsemme monipuolista todennettua tutkimustietoa kivipohjaisten rakennusmateriaalien kierrättämisestä.



Kuva 1 Hanke tukee päästöttömän rakentamisen strategiaamme.

Kuva 2 esittää hankkeen integroitua näkökulmaa. Lähtökohtana ovat toimineet kaksi täydentävää tapaa valmistaa vähähiilistä betonia: kierrätysraaka-aineen käyttö ja vähähiiliset vaihtoehtoiset raaka-aineet, joita käytämme ympäristöystävällisessä CEVO-betonissa. Pelkät vähähiiliset raaka-aineet eivät kuitenkaan vielä ratkaise koko rakentamisen päästövähennystä, vaan tarvitaan hyvät prosessit, joilla laboratoriolöydöt voidaan skaalata teolliseen mittakaavaan ja siirtää rakennustyömailla.



Kuva 2 Vähähiilisyys syntyy raaka-ainevalinnoista, prosessivaiheista ja rakenteiden lopullisesti käytöstä.

Projektin keskeiset uutuusarvot liittyvät seuraaviin:

- Kierrätyskiviaineksen mahdollisuudet betoniresepteissä pyrkimyksenä maksimoida kiertotalousraaka-aineen osuus tuotteissa
- Muiden hiilijalanjälkeä pienentävien raaka-aineiden tutkimus- ja selvitystyö
- Luotettava tutkimustieto hiilidioksidin sidonnasta murskattuun betoniin, murskattua betonia sisältävään betonirakenteeseen ja käytössä jo pitkään olleisiin betonirakenteisiin.

3. HANKKEEN OSAPUOLET JA MENETELMÄT

TOTEUTTAJAORGANISAATIO

Rudus Oy

1628390-6

Karvaamokuja 2a

00380 Helsinki

YHTEYSHENKILÖ

Mika Tulimaa

Laatu- ja kehitysjohtaja

050 581 5016

mika.tulimaa@rudus.fi

Hankkeessa toteutettiin systemaattisia laboratorio- ja pilottimittakaavan koesarjoja, joilla tuotettiin uutta tietoa vähähiilisen betonirakentamisen mahdollisuuksista. Pääfokuksena oli sementtiä korvaavien sideaineiden lisäksi neitseellistä karkeaa runkoainetta korvaava kierrätyskiviaines.

Lujuus-, kestävyys-, vedenimeytymis-, M1- ja pakkasrasitustestit tehtiin nykyisen betonikiviainesstandardin SFS-EN 12620 pohjalta. Tarkoituksena oli lisätä ymmärrystä lainsäädännölliseltä kannalta: tuottaa tutkimusdataa ja analyyskejä kansallisen kiviainesstandardin työryhmän päätöksenteon tueksi ja hankkia tietoa uusiokiviaineksen käytöstä ja sen ohjauksesta maailmalla muualla.

Saadut testitulokset toimivat pohjana uusien tutkimuskysymysten määrittelylle jo hankkeen aikana. Näin varmistettiin tutkimuksen jatkuvuus ja kehitystyön eteneminen kohti käytännön sovelluksia. Kokeita suoritettiin omassa laboratoriossamme Suomessa, konsernimme puitteissa Amsterdamissa, kotimaisessa Mitta Oy:ssä sekä yhteistyössä Oulun yliopiston, Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulun (XAMK) ja Aalto-yliopiston kanssa. Useammat yhteistyötahot mahdollistivat laajemman asiantuntemuksen hyödyntämisen ja tulosten luotettavuuden varmistamisen.

Tutkimustuloksista aiotaan julkaista tieteellisiä artikkeleita alan julkaisuissa. Artikkelit "Assessing the Mechanical Properties and Frost Resistance of Recycled Coarse Aggregate Concrete in Finland" odottaa hyväksyntää julkaistavaksi Nordic Concrete Research -lehdessä. Toinen "Assessing the Mechanical Properties of Finnish Low Carbon Cements" on valmistumassa tulevina viikkoina lähetettäväksi vertaisarvointiin. Näiden lisäksi on vielä suunnitteilla kolmaskin artikkeli.

Hankkeen kuluessa osallistuimme kahden AMK-lopputyön ja yhden kandidaatintyön ohjaamiseen. AMK-lopputyöt käsittelivät kierrätyskiviaineksen vaikutusta betonin pakkaskestävyyteen ja Sadgroven kaavan käyttämistä vähähiilisen betonin kypsyyden arvioinnissa. Aalto-yliopiston kandidaatintyönä tehty kirjallisuuskatsaus toi puolestaan valoa kierrätyskiviaineksen käyttöön betoninvalmistuksessa maailmalla.

4. HANKKEEN TULOKSET

Hanke jaettiin kahteen kokonaisuuteen: 1) Murskattua betonia eli kierrätyskiviainesta sisältävät reseptit ja näihin liittyvät koesarjat sekä 2) kehittämämme erittäin vähähiilisen CEVO-betonin koesarjat vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi ja säilyvyysominaisuuksien kartoittamiseksi.

Hankkeen keskeiset tulokset liittyivät kierrätyskiviainekseen hiilinieluna, kierrätyskiviaines- ja CEVO-betonin laajempien käyttötilanteiden kokeisiin sekä jatkoaskelten määrittämiseen.

KIERRÄTYSKIVIAINEKSEN KUVAUS

EN-standardit asettavat tiukat laadunvarmistuskriteerit kierrätyskiviaineksen käytölle betonissa. Esimerkiksi EN 12620 määrittelee betonin kiviaineksille tekniset vaatimukset, mukaan lukien rakeisuus, hienoainemäärä ja lujite- ja haitta-ainepitoisuudet. Litteysluku ja muotoindeksi löytyvät standardeista SFS-EN 933-3 ja 933-4, mekaanisia ominaisuuksia standardeista SFS-EN 1097-1, 1097-2 ja 1097-6.

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



Eri Euroopan mailla on toisistaan poikkeavat käytännöt kierrätyskivimurskeen hyödynnettävyyden tutkimuksissa. Näihin lukeutuivat esimerkiksi betonimurskan vastaanotto, säilytys ja sille tehtävät testit. Nykytilassa lainsäädäntö ei ole este, vaikkakin standardit rajoittavat kierrätyskiviaineksen käyttöä betonissa määrällisesti ja laadunvarmistusvaatimukset tekevät käytöstä vaikeaa. Tähän on varauduttava etukäteen kehittämällä laatukriteereihin soveltuvia ratkaisuja, jolloin ehkäistään sitä, etteivät standardit tulisi kierrätyskiven käytön esteeksi tulevaisuudessa.

Hankkeessamme tehdyissä kokeissa ei onnistuttu kehittämään soveltuvaa koestusmenetelmää, joka voisi yksiselitteisesti arvioida kierrätysmateriaalin laadun. Suomessa on kuitenkin käynnissä parhaillaan toimikuntatyö (Betonin laadunvarmistaminen alatyöryhmä: Kierrätyskiviaineksen käyttö betonin valmistuksessa), jossa mietitään laatuohjeistusta kierrätyskiviaineksen käytölle uusiobetonissa. Nyt valmistuneen tutkimuksemme tuloksia on tarkoitus käyttää hyödyksi toimikuntatyöskentelyssä.

Käsillä olevassa tutkimuksessa käytimme itse kehittämäämme CE-merkittyä betonimursketta, Betoroc®. Murske on peräisin purkutyömailta, joista betoni on viety murskausasemalle, jossa se on saavuttanut ei enää jätettä (EEJ) -statuksen. Sen jälkeen mursketta on säilytetty kasoissa sään armoilla.

Kokeita varten murskeesta suodatettiin kaikkein hienoin aines pois, jolloin käytännössä tutkimuksiin on saatu karkean kiviaineksen korvaaja, raekooltaan 5-16 mm. Tämä on auttanut optimoimaan reseptejä, sillä aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että betonin murskauksessa muodostuva pöly sotkee reseptejä vaikuttamalla käytettävään vesi-sementtisuhteeseen, mikä puolestaan on valmistuvan betonin laatuun olennaisesti vaikuttava tekijä.

CE-merkitty betonimurskeemme on jo valmiiksi laadukas kierrätystuote. Sillä voidaan korvata parhaita luonnon sora- ja kalliomurskeita rakenteiden kantavissa ja jakavissa kerroksissa. Sitä voidaan myös käyttää erilaisissa täyttötöissä ja VNa 466/2022 mukaisissa käyttökohteissa, kuten talon-, maan- ja viherrakentamisessa.

Betoroc® pystyy sitomaan jopa puolet sementin valmistuksessa kalkkikivestä vapautuneesta hiilidioksidipäästä, mikä tekee murskeesta hiilidioksidinielun ja todennetusti hiilinegatiivisen tuotteen¹. CE-merkintä on tehty Rakennustuoteasetuksen 305/2011 sekä standardien SFS-EN 13242 ja SFS 5884:2022 mukaisesti.

Tällä hetkellä tilanne Suomessa on se, että rakentamisessa käytettävien kiviainesten tulisi täyttää kaikki eurooppalaisen standardin EN 12620 vaatimukset. Standardi koskee kaikissa betoneissa (ml. teissä ja päällysteissä sekä elementtituotteissa) käytettäviä kierrätys- ja uusiokiviaineita, luonnon ja keinokiviaineita ja näiden seoksia, joiden uunikuivattu kiintotiheys on suurempi kuin 2000 kg/m³. Lisäksi standardi kattaa uusiokiviainekset, joiden tiheydet ovat 1500 – 2000 kg/m³. Standardi mahdollistaa tuotteiden vaatimustenmukaisuuden arvioinnin, minkä lisäksi edellytetään, että tehtaan sisäisessä laadunvalvonnassa on käytössä laatujärjestelmä. Standardi ei kuitenkaan koske fillerikiviaineita, joita käytetään osa-aineena sementissä tai muuna kuin reagoimattomana fillerikiviaineksena betonissa.

Standardien mukaisten uusiokiviainesten testausmenetelmien valmistelu on edennyt pitkälle. Sekundaarisista esiintymistä peräisin olevien tuntemattomien materiaalien osalta standardisointi on aloitettu myöhemmin, ja näiden materiaalien alkuperän ja ominaisuuksien määrittäminen on vielä kesken. Sillä aikaa markkinoille tuotavien, tuntemattomasta materiaalista koostuvien kiviainesten on täytettävä kuitenkin standardin EN 12620

¹ Betoroc-betonimurskeen hiilikädenjälki infrarakentamiskohteessa_raporttiversio 1.1_2021-07-07



ja SFS 7003 sekä kansainvälisten (Reach-asetus) ja kansallisten määräysten vaarallisia aineita koskevat vaatimukset kiviainesten suunnitellun käyttötarkoituksen mukaisesti. Standardin sisältämän maininnan mukaisesti lisäominaisuuksia ja -vaatimuksia voidaan spesifioida tapauskohtaisesti perustuen kiviaineksesta saatuun kokemukseen ja mahdolliseen kansalliseen standardiin, jota aloittaneen valmistella lähiaikoina.

Kiviainesstandardin valmistelua varten on hyödyllistä kerätä luotettavaa tutkimustietoa tavoitteena tuottaa elinkaarikestävyydeltään mahdollisimman hyvää betonia kiertotalouden periaatteiden mukaisesti. Betonissa käytettävien kiviainesten mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat suoraan valmiin betonin lujuuteen, kestävyys- ja työmaalla tapahtuvaan käsiteltävyyteen. Los Angeles -menetelmä voisi potentiaalisesti sopia kiviaineksen lujuuden arviointiin. Sillä testataan kiviaineksen iskunkestävyyttä, ja Los Angeles -luvulla tarkoitetaan sitä prosenttiosuutta näytteestä, joka kokeen jälkeisessä seulonnessa läpäisee 1,6 mm seulan. Litteys- ja muotoindeksin avulla voidaan puolestaan arvioida kierrätyskiviaineksen vaikutus betonin työstettävyyteen ja tiivistymiseen.

Kaiken kaikkiaan kiviainestestaukseen kuuluu seuraavan taulukon mukaiset testit. Näiden testien lisäksi tässä vaiheessa on ollut tärkeä toteuttaa kierrätyskiviaineksilla valmistettujen betonien puristuslujuus-, vedenimeytymis- ja pakkasenkestävyystestit sekä optimoida standardivaatimukset täyttäviä seos- ja lisäaineita.

Taulukko 1 Kiviainestestaukseen kuuluvia testityyppejä ja näitä määritteleviä standardeja.

Testityyppi	Testausmenetelmät	Määritteleviä standardeja
Alkalikiviainestestaus	Alkalikiviainesreaktiivisuuden testaus AKR-riskin hallintakeinot	EN 12620 ja EN 206
Mekaanisten ominaisuuksien arviointi	Raekokojakauma Kiviaineksen murskaus- ja iskunkestävyys, puristuslujuus ja kovuus Tiheys ja vesipitoisuus	SFS-EN 933-1 SFS-EN 1097-1, 1097-2 ja 1097-6
Litteysluku ja muotoindeksi	Rakeiden litteiden ja pitkien rakeiden suhde	SFS-EN 933-3 ja 933-4
Puhdistus ja hienoaineksen hallinta	Puhdistusmenetelmät Orgaanisten epäpuhtauksien, sulfaatin ja kloridien testaus Suurin sallittu hienoaineksen määrä	EN 12620 SFS-EN 933 EN 1744-1

Hankkeessa kehitettiin myös betonimassojen sekoitusprosessia. Betonimyllyt poikkeavat toisistaan, ja kullakin myllyllä on optimoitava sekoittamisprosessiin ja lopputulokseen vaikuttavat tekijät. Havaintojemme mukaan tärkeimmät näistä liittyvät sekoittimen ja lapojen geometriaan, aineiden lisäämiseen ja niiden kosteuspitaisuuteen, sekoitusaikaan ja sekoitusnopeuden profiiliin. Hankkeen aikana investoimme uuteen betonimyllyyn, joka aiempaan verrattuna vastaa enemmän todellista tuotantoa. Tehokkaampi mylly tuottaa tasalaatuisempaa betonia ja parantaa lisäaineiden toimivuutta halutulla tavalla. Mylly myös mahdollisti suuremman erän valmistamisen kerralla, mikä lisäsi kokeiden määrää yhdellä ajokerralla.

KIERRÄTYSKIVIAINES HIILINIELUNA

Eri tekijöillä on vaikutusta kierrätyskiviainesbetonissa käytettävän betonimurskan itseensä sitoman hiilidioksidin (CO₂) määrään. Prosessi riippuu mm. betonin koostumuksesta, iästä ja ympäristöolosuhteista, kuten lämpötilasta, kosteudesta ja ilman hiilidioksidipitoisuudesta, jossa betonirakenne sijaitsee.

Betonin sisältämä kalsium on pääasiassa kalsiumhydroksidina ja kalsiumsilikaattihydraatteina. Näistä kalsiumhydroksidi (Ca(OH)₂) on alkalinen yhdiste, joka on herkkä ilmassa olevalle hiilidioksidille (CO₂). Hiilidioksidin sitoutuminen noudattaa reaktioyhtälöä $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, jossa kalsiumhydroksidi sitoo hiilen pysyvästi takaisin kalsiumkarbonaatiksi (CaCO₃).

Aluksi betonin pinnalta alkava karbonatisoituminen etenee yleensä nopeammin, mutta hidastuu ajan kuluessa, koska muodostuva kalsiumkarbonaatti täyttää betonin huokosia, mikä vaikeuttaa hiilidioksidin kulkeutumista syvemmälle rakenteeseen. Myös betonin sisäinen kosteus vaikuttaa prosessiin. Betonirakenteen karbonatisoitumissyvyys riippuu aiempien tutkimusten valossa myös kyseisen rakenteen sijainnista, kuten ilmansuunnasta, ja tuuli- ja kosteusolosuhteista, joille betoni altistuu.

Kun purettu betonirakenne murskataan, karbonatisoitumaton betonipinta-ala jopa 1000-kertaistuu. Tämän käyttäminen uudessa betonissa mahdollistaa, että siihen sitoutuu muutamassa vuodessa merkittävä osuus sementin valmistuksen aikana kalsinoinnin seurauksena vapautuvista CO₂-päästöistä. Murskauksen jälkeen purkubetoni todistetusti siis sitoo itseensä hiiltä, mutta asiasta on toistaiseksi puuttunut systemaattinen tutkimus, kehittäminen ja optimointi.

Toteutimme kahdentyypisiä karbonatisoitumistutkimuksia lisäymmärryksen saamiseksi: vanhojen betoninäytteiden testejä ja kiihdytettyjä hiilensidonnan kokeita.

VANHOJEN BETONINÄYTTEIDEN KARBONATISOITUMISTUTKIMUKSET

Tutkimuksen ensimmäisessä osassa keskityttiin vanhojen, käytössä jo olleiden betonirakenteiden hiilinielupotentiaalin selvittämiseen, jossa teimme yhteistyötä Oulun yliopiston Kuitu- ja partikkeliteknikan laboratorion kanssa.

Tutkimuksia varten olemassa olevista rakenteista porattiin näytteitä (kuvat 3 ja 4) betoniin sitoutuneen hiilidioksidimäärän selvittämiseksi. Kaksi kohteista oli noin viisi vuotta vanhoja koerakenteita. Lisäksi otettiin näyte noin 50 vuotta vanhasta käytössä olevasta kiviainestaskusta Helsingin Konalassa. Uudet rakenteet olivat alttiina ulkoilmalle ja sateelle. Kivitasku oli myös ulkoilmassa, mutta se oli jatkuvasti kuiva.



Poratut näytteet pakattiin ilmatiiviisti, jotta karbonatisoituminen ei näytteenoton jälkeen enää etenisi. Tutkimusvaiheessa näytteet jaettiin kerroksittain syvyyden mukaan (kuva 5).



Kuva 3 Näytteenotto vuodelta 1965 olevasta ulkorakenteesta karbonatisoitumistutkimuksiin.



Kuva 4 Sisärakenne noin vuodelta 1965 (vasemmalla), josta porattu koekappale (oikealla).

INNOVATIIVINEN VÄHÄHIILINEN KIERRÄTYSKIVIAINESBETONI

RUDUS OY



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment

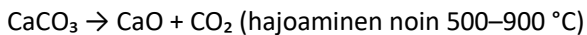


Euroopan unionin
rahoittama
NextGenerationEU



Kuva 5 Porakappaleista sahatut näytteet hiilensidonnan määrittämiseen.

TGA menetelmänä perustuu karbonatisoituneessa betonissa muodostuneen kalsiumkarbonaatin (CaCO_3) hajoamiseen, jolloin se vapauttaa uudestaan hiilidioksidikaasun ja näytteen massa pienenee:



TGA-analyysissä seurattiin massan muutoksia lämpötilan funktiona, minkä avulla kyettiin selvittämään karbonatisoituneen alueen laajuus. Karbonatisoituminen ja raja karbonatisoituneen ja karbonatisoitumattoman betonin välillä todettiin pH-indikaattorilla, jolloin karbonatisoitumaton ja karbonatisoitunut betoni voidaan erottaa eri väreistä:

Karbonatisoitumaton betoni (korkea pH, ~9,5–10,5): Värjäytyy voimakkaan purppuranpunaiseksi, koska betonissa on vielä runsaasti kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2), joka pitää pH:n korkeana.

Karbonatisoitunut betoni (alhainen pH, alle ~9): Jää värittömäksi, koska karbonatisoitumisreaktiossa kalsiumhydroksidi on reagoinut ilman hiilidioksidin (CO_2) kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO_3), joka alentaa pH:ta.

Näytteistä vapautui TGA-analyysissä kokonaisuutena 3-6 % CO_2 :ta näytteen kokonaispainosta laskien. Kokeessa uusien betonien ulkopinnan betonissa havaittiin selvästi enemmän hiilidioksidia kuin vanhan rakenteen pintanäytteessä. Uusille betoneille karbonatisoitumisen määrä oli kaksinkertainen.

Kun uusien betonien sementtiin sekoitetun ja lisätyn kalkkikivifillerin määrä lasketaan pois analyysiarvosta, ei vanhan pintabetonin ja uusien betonien pintojen suhteellisessa karbonatisoitumismäärässä ole suurta eroa, vaan se on luokkaa 3 %.

LASKENNALLINEN MÄÄRÄ HIILIDIOKSIDIA BETONISSA

Karbonatisoitumisaste ja hiilidioksidin määrä voidaan laskea suurin piirtein sementtikemian kaavoilla, kun tiedetään betonin resepti.

Vanhan betonin osalta jouduttiin betoniresepti arvaamaan, ja sille käytettiin "perinteistä" reseptiä ilman seosaineita. Koska vanhan betonin alkuperäisestä suhteituksesta ei ole tarkkaa tietoa, ei tulosten tarkkuus ole korkea, mutta on toki suuntaa antava ja erittäin lupaava.

Sen sijaan uusien betonien valmistusresepti oli tiedossa. Uusien betonien tuloksiin pääsimme vähentämällä sekoitetun kalkkikiven ja sementtiin lisätyn kalkkikiven osuuden, joka on arviona n. 5 % sementin kokonaismäärästä.

Laskennassa saatiin tulokseksi, että vanhan betonin pinta oli karbonatisoitunut 86 prosenttisesti eli laskennallinen tarkkuus huomioiden käytännössä kokonaan. Sisäosa puolestaan oli karbonatisoitunut noin 20 - prosenttisesti. Uudet betonit olivat karbonatisoituneet vastaavasti noin 90 prosenttisesti pinnasta eli laskentatarkkuus huomioiden kokonaan, mutta sisältä eivät lainkaan.

Laboratoriossa tehdyllä karbonatisoitumiskokeella voitiin osoittaa, että vanhassa rakenteessa ei ole tapahtunut sellaisia kemiallisia reaktioita, jotka olisivat muuttaneet kemiallista rakennetta siten, että uutta betonia vastaavaa potentiaalia karbonatisoitumiselle ei enää olisi. Toinen tärkeä havainto oli, että vaikka betoni on alttiina ulkoilman vaikutuksille, karbonatisoituminen on erittäin hidasta, jos betoni on säilynyt kuivana.

Analyysit osoittavat selkeästi betonin hiilidioksidin sidontakyvyn ja sen, että se ei ole marginaalinen ilmiö vaan erittäin merkittävä. Parhaimmillaan tästä saadaan hyöty kierrättämällä vanhojen rakenteiden betoni ja murskaamalla se sopiviin raekokoihin, jolloin hiilidioksidinsitoutuminen on nopeaa ja tehokasta.

Koska analyyseissä käytettiin todellista rakennetta, on betoninäytteissä mukana kiviaines ja tämä on tuonut epätarkkuutta tuloksiin (betonista on suurin osa kiviainesta ja sen määrä saattaa paikallisesti vaihdella. Näin ei voida tarkasti määrittää näytteen eri kemiallisten materiaalien osuuksia näytteessä). Kehittämällä näytteen valmistusta on mahdollista saada lisätarkkuutta analyysihin.

KIIHDYTETYN KARBONATISAATION TUTKIMUKSET

Edellä mainituille betoninäytteille tehtiin myös Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kymilabsissa nopeutettu hiilidioksidivanhennus, ts. rinnakkaistutkimus, jossa näytteet karbonisoitiin laboratoriossa hiilidioksidilla ennen TGA-analyysejä. Tällöin saatiin ulkopinnan betonille ja sisärakenteen betonille (uudet betonit ja vanha betoni) lähes sama karbonatisoitumisen määrä. Pintabetonien osalta ei laboratoriossa tehty karbonisoiminen oleellisesti lisännyt sitoutuneen hiilidioksidin määrää betonissa. Sen sijaan sisärakenteen karbonatisoitumisaste kasvoi selvästi lähelle ulkopinnan arvoja lukuun ottamatta yhtä rakennetta, jossa ero oli merkittävä, mutta tämä tulkittiin analyysivirheeksi.

Mittaukset eivät tuoneet sellaista tietoa, mikä muuttaisi nykykäsitystä karbonatisoitumisen etenemisen suhteen. Kokeiden perusteella voidaan kuitenkin todeta, että mitä enemmän seostetusta betonista on kyse, sen



nopeammin karbonatisoitumisen voidaan todeta etenevän. Tämä on tutkimusalue, jota kannattaa jatkaa, jotta karbonatisoituminen rakenteissa voidaan hallita paremmin.

KORVAAVAT KIERTOTALOUDEN MATERIAALIT

Vaihtoehtoisista sideaineista raudanvalmistusprosessin sivujäte masuunikuona on yksi eniten tutkittu ja jo kaupallisessa käytössä. Hankkeessa ohjasimme AMK-lopputyötä ”Sadgroven kaavan käyttäminen vähähiilisen betonin kypsytyksen arvioimiseen”, jossa keskityttiin masuunikuonaa sisältävään betoniin Sadgroven kaava on betonivalun kypsytyksen arviointiin käytetty funktio, joka sitoo kovettumisaika (t, vrk) ja lämpötilan (T, °C) kyseisellä aikavälillä seuraavasti: $t_{20} = ((T+16 \text{ °C})/36 \text{ °C})^2 \cdot t$. Funktion avulla selvitetään valun lämmitys- ja suojaustarvetta.

Uutta tietoa tuotimme biohiilen ja energiantuotannon tuhkan mahdollisuuksista sideaineina. Toteutettiin koesarjat eri biohiili- ja tuhkalaatujen käytöstä sementin tai fillerin korvaajana betonissa. Lähtöolettamuksena oli, että biohiili ja vastaavat kiertotalousaineet voivat mahdollistaa sideaineen päästövähennyksen ja luonnonkiviaineksen käytön tarpeen vähentämisen.

Biohiili oli valmistettu kontrolloiduissa pyrolyysiolosuhteissa ja jauhettu hienojakoiseksi. Testisarjoissa biohiiltä sekoitettiin eri suhteilla betonimassaan ja valettiin koekappaleita, joiden mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia tutkittiin. Näytteistä mitattiin puristuslujuus ja huokosrakenne.

Tavoitteena oli arvioida, kuinka biohiili ja tuhka vaikuttavat betonin pitkäaikaiskestävyyteen sekä vähähiilisyyteen, ja mitkä käyttömäärät olisivat optimaalisia rakennuskäytössä.

Kiinnostavaa oli verrata karkeaa biohiiltä (0-8 mm) hienoon biohiileen (0-1 mm); karkealla ei ollut vaikutusta työskäytävyyteen. Biohiilen korkea absorptio (n. 10 %) huomioiden ovat saadut lujuustulokset loogisia ja samaa tasoa normaalin betonin kanssa. Biohiili kuitenkin vähentää tiheyttä, ja siten hiilen varaama tila vähentää tilavuusosuuden mukaisesti lujuutta. Tämän mukaisesti myöskään tekemissämme kokeissa ei lujuuden kasvua biohiilen – eikä myöskään tuhkan – käytöstä havaittu.

KIERRÄTYSKIVIAINEKSESTA VALMISTETUILLE BETONINÄYTTEILLE TEHDYT TUTKIMUKSET

Kierrätyskiviaineksesta valmistettiin betoninäytteet seuraavia tutkimuksia varten: puristus-, taivutus- ja vetolujuus, pakkasenkestävyys, suola-pakkasenkestävyys, kimmokerroin ja Poissonin luku. Mittausten tehtiin seuraavien standardien mukaan: puristuslujuus SFS-EN 12390-3, taivutuslujuus SFS-EN 12390-5, vetolujuus CEN/TS 12390-6, pakkasenkestävyys ja suola-pakkasenkestävyys, kimmokerroin ja Poissonin luku SFS-EN 12390-13.

Tässä kappaleessa on kuvattu tiiviisti tutkimusten suorittaminen ja keskeiset tulokset.

LUJUUSTUTKIMUKSET JA RASITUSLUOKAT

Kaikille tutkituille betoneille määritettiin lujuus, jotta voitiin eri tutkimusosioissa verrata tuloksia toisiinsa tällä perusteella. Tämä koski myös referenssibetoneita. Resepteissä pyrittiin pitämään vesi-sementtisuhde vakiona eri koesarjoissa, jolloin myös lujuudet pysyivät samoina.



Erityisiä lujuustutkimuksia ei tehty muuta kuin kimmokertoimen määrittämisessä ja virumakokeissa.

Havaittiin mielenkiintoinen yksityiskohta rakenteellisista betoneista. Jokaisen rakenteen puristuslujuus mitattiin ja kaikille kolmelle betonille saatiin keskiarvolujuus noin 70 N/mm². Eli myös viisikymmentä vuotta vanha rakenne on saavuttanut huomattavan lujuuden, vaikka sitä ei todennäköisesti oltu alun perin tavoiteltukaan. Lisälujuus tuo myös vastustusta rakenteen vanhenemista vastaan, mm. karbonatisoitumista vastaan, mikä oli analyyseissä hyvin havaittavissa.

Rasitusluokat valittiin sen mukaan, mikä osatutkimuksen aihe oli - tärkeimmät tutkimukset kohdistuivat pakkasenkestävyyteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Tällöin erillinen tarve määrittellä rasitusluokka oli käytännössä pakkasenkestävyyksien suhteen, jolloin kokeellisesti määritettiin betonin soveltuvuutta XF-luokkiin.

KIMMOKERTOIMEN JA POISSONIN LUVUN MÄÄRITYS

Puristuslujuus, Kimmokerroin (Young's modulus, EEE) ja Poissonin luku (Poisson's ratio, ν) ovat keskeisiä materiaalin mekaanisia ominaisuuksia kuvaavia suureita, jotka ovat rakenteiden mitoittajille tärkeitä tietoja mm. rakenteiden kantavuuden arvioissa. Kimmokerroin kertoo materiaalin jäykkyydestä ja vastustuskyvystä muodonmuutokselle jännityksen alaisena. Sen suuruuteen vaikuttavat mm. kappaleen koostumus, rakeisuus ja sideaine. Mitä suurempi kimmokerroin on, sitä jäykempi materiaali on kyseessä.

Poissonin luku kuvaa materiaalin joustavuutta ja käyttäytymistä kuormituksen alaisena. Se määrittää, kuinka paljon mekaanisen rasituksen alainen materiaali laajenee sivusuunnassa suhteessa pituudenmuutokseen. Poissonin luku lasketaan näiden kahden suhteena.

Määrittäykset tehtiin samojen speksien mukaan valmistetuista koekappaleista, jotka olivat 150 x 300 mm lieriönäytteitä (kuva 6). Samoista resepteistä valmistettiin myös 100 mm x 100 mm kuutiot puristuslujuusmäärittäykseen, jotka toteutettiin 28 vuorokauden iässä. Kimmokerroin ja Poissonin luku määritettiin puolestaan 91 vuorokauden ikäisille näytteille, jotka on kuvattu seuraavassa taulukossa.

Taulukko 2 Kimmokertoimen ja Poissonin luvun määrittäykseen valmistetut näytteet.

Näytteen kuvaus	Tarkennettu tieto
Vertailunäyte	Neitseellinen karkea kiviaines + Oiva-sementti ¹
Testinäyte 1	CEVO-betoni
Testinäyte 2	CEVO-betoni, jossa 50 % karkeasta kiviaineksesta korvattu kierrätyskiviaineksella + Oiva-sementti ¹
Testinäyte 3	CEVO-betoni, jossa 100 % karkeasta kiviaineksesta korvattu kierrätyskiviaineksella + Oiva-sementti ¹
Vähäpäästöinen vertailunäyte	Neitseellinen karkea kiviaines + KolmosBertta-sementti ¹

1 = Valmistaja Finnsementti

Kimmokertoimen määrittäykset tehtiin standardin 12390-13 Metodin A mukaisesti.

Kimmokertoimen määrittäminen tehtiin Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksella puristuskokeeseen perustuvalla menetelmällä, jossa näytteeseen kohdistettiin aksiaalinen kuormitus ja samalla mitattiin aksiaalinen venymä.

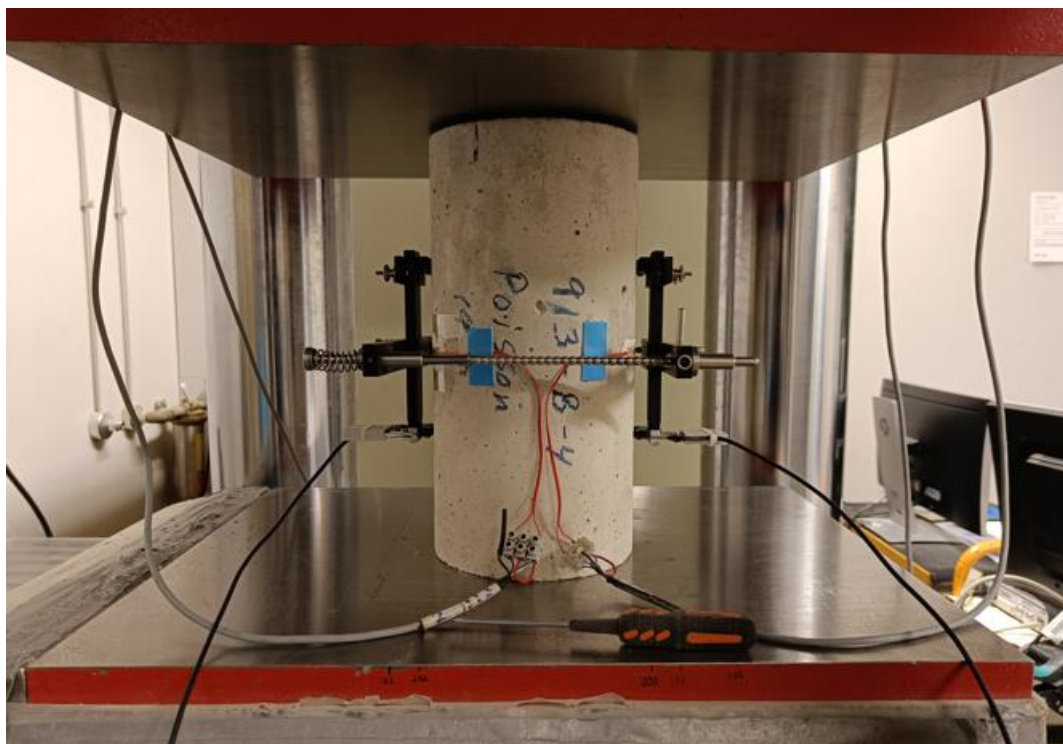


$$E = \frac{\text{akseliaalinen jännitys}}{\text{akseliaalinen venymä}}$$

Poissonin luvulla ei ole standardia, mutta se voidaan määrittää kimmokertoimen määrittämisessä yhteydessä seuraavassa kuvatulla tavalla. Kokeessa näyte asetettiin hydrauliseen puristimeen, jossa sitä kuormitettiin hallitusti aksiaalisella jännityksellä. Kuormituksen aikana mitattiin aksiaalista jännitystä eli kuormitusta pinta-alaa kohden ja aksiaalista venymää eli pituuden muutosta suhteessa alkuperäiseen pituuteen. Deformaation mittaamiseen käytettiin venymäantureita, jotka asennettiin näytteen pinnalle pituus- ja poikittaissuunnassa.

$$\nu = - \frac{\text{poikittaisvenymä}}{\text{akseliaalinen venymä}}$$

Mittaukset suoritettiin lineaarisen elastisuuden alueella, 10–40 % näytteen murtokuormasta.



Kuva 6 Poissonin luvun määrittäminen. Kuva: Aalto-yliopisto.

Kierrätyskiviainesta sisältävän betonin kimmokertoimen 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 johtunee mm. siitä, että kierrätysmateriaali sisältää huokoisempia osia ja vanhoja sideainejäämiä.

Mikäli kierrätyskiviaineksia käytetään rakenteellisesti vaativissa kohteissa, on näin ollen tärkeää, että kimmokerroin määritetään tässä tapauksessa kohdetta varten erikseen. Muuten on oletuksena käytettävä pienempää arvoa. Voitaisiin ajatella, että turvallinen arvio laskennallisen arvon pienennyskerroin olisi 0,8–0,9. Tämä on kuitenkin asia, joka standardointiasiantuntijoiden on lopullisesti päätettävä.

VIRUMATESTAUKSET

Virumatestien tarkoituksena oli mitata näytteiden pitkäaikaista muodonmuutosta 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) Primäärinen 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.

Suurempi viruma tarkoittaa enemmän ajan myötä deformoituvaa betonia, jos siihen kohdistuu pitkäkestoista raskuutta. Ilmiö on tärkeä rakenteellisessa suunnittelussa, erityisesti silloissa, pilareissa ja korkeissa rakennuksissa, sillä pitkäaikainen muodonmuutos vaikuttaa rakenteen stabiliteettiin ja kanto-ominaisuuksiin. Suurilla jännevälillä esimerkiksi silloissa viruma voi johtaa painumiseen ja halkeiluun.

Virumaan vaikuttavat betonin koostumus (sideaine, runkoaineet, lisäaineet, veden 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.



Kuva 7 Virumatestaus käynnissä.

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

Testit kestivät lähes vuoden verran, jolloin viruman voitiin todeta tasaantuneen, eikä odotettavissa ole merkittävää muutosta ajan suhteen tämän jälkeen.

Viruma kierrätysbetoneilla oli samaa luokkaa vertailubetonin kanssa, eikä yksikään koebetoneista poikennut tästä. Kaikkien betonien lujuus ja siten myös eri betonien jännitystila kokeen aikana olivat samansuuruisia, joten betonien suhteellinen jännitystila oli suurin piirtein sama, 35 - 38 % puristuslujuudesta. Näin voimme pitää tuloksia vertailukelpoisina keskenään. Kaikissa näytteissä käytettiin samaa sementtiä (CEM II/B).

Virumakoe tehtiin seuraaville betoneille: Vertailubetoni, jossa ei ollut lainkaan kierrätyskiviainesta sekä betonit, joissa karkea kiviaines oli korvattu 50 % ja 100 % kierrätyskiviaineksella. Lisäksi viruma mitattiin myös CEVO-betonille ilman ja kierrätyskiviaineksen kanssa.

Tuloksina saatiin kokonaisvirumat (suluissa keskiarvo puristuslujuus [N/mm²/91 vrk])

Vertailubetoni (37,7) 3,0 mm/m

Kierrätyskiviaines 50 % (39,3) 3,3 mm/m

Kierrätyskiviaines 100 % (37,8) 3,9 mm/m

CEVO (55,4) 4,8 mm/m

CEVO kierrätyskiviaines 50 % (55,0) 4,5 mm/m

Yhteenvedona voidaan todeta, että virumat kaikilla koebetoneilla olivat aavistuksen verran korkeammat kuin vertailubetonilla. CEVO-betonilla oli selvästi korkeammat viruman arvot, mikä viittaa siihen, että jännitetyissä rakenteissa CEVO-betonin virumaan kannattaa kiinnittää erityistä huomiota.

PAKKASKESTÄVYYDEN TUTKIMUKSET

Pakkaskestävyyden tutkimuksissa selvitettiin betoninäytteiden kestävyyttä toistuvaa jäätymistä ja sulamista vastaan. Suolapakkasrasitustesteissä tutkittiin puolestaan betonin kestävyyttä pakkaselle suolaisessa ympäristössä. Suola ja pakkas voivat yhdessä heikentää betonin rakennetta erityisesti talvella, kun suolaa käytetään jäätyksen estämiseen teillä ja muilla pinnoilla.

Suolaliuoksena oli 3 % natriumkloridin (NaCl) vesiliuos, johon upotetut betoninäytteet altistettiin toistuville jäädytys-sulatusjaksoille. Sykli toistettiin 56 kertaa, jotta saatiin arvio betonin kestävyydestä pitkällä aikavälillä (kuva 8)





Kuva 8 Suolapakkaskoejärjestely

Syklien jälkeen mitattiin betoninäytteiden mekaanisia ominaisuuksia. Lisäksi tarkasteltiin visuaalisesti mahdollisia halkeamia, rapautumista tai muita vaurioita, joita ilmeni jäädytyksen ja sulatuksen aikana. Näin voitiin arvioida, kuinka paljon ominaisuudet olivat heikentyneet verrattuna referenssinäytteisiin.

Pakkasrasituskokeiden tulosten mukaan kierrätyskiviaineesta valmistettu betoni soveltuu makean veden pakkasrasitukseen: pinnat säilyttivät visuaaliset ominaisuutensa ja lujuudet pysyivät riittävinä. Sen sijaan kloridiympäristössä niihin syntyi ulkoisia rapautumisvaurioita kierrätyskiviaineksen yhteyteen niihin kohtiin, joissa oli vanhaa sementtikiveä. Näihin paikkoihin alkoi kehittyä kloridien vaikutuksesta selviä kuoppia.

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

Hankkeen yhteydessä toteutettiin myös lopputyö kierrätyskiviainesbetonin pakkaskestävyydestä.

M1-LUOKITUSTESTIT

M1-luokitus on sisäilmaluokitus, joka arvioi rakennusmateriaalien päästöjä sisäilmaan. Betoninäytteiden M1-testeissä mitataan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC), formaldehydin ja ammoniakkin päästöt standardoiduissa olosuhteissa.

Testejä varten valmistimme kuvan 9 mukaiset näytteet CEVO- ja masuunikuonabetoneista. Näytteet vanhennettiin ennen päästömittauksia, jotta niiden haihtuvat yhdisteet ja muut päästöt ehtivät saavuttaa

tasapainotilan, joka vastaa paremmin todellista käyttötilannetta. Sekä CEVO- että masuunikuonabetonit on tarkoitettu sisätiläkäyttöön.

Kierrätyskiviainebetonille vastaavia tutkimuksia ei tehty, sillä voidaan olettaa, ettei vanhoista kierrätysaineksista enää tule tutkittavia päästöjä.



Kuva 9 M1-näytteet vanhentumassa.

Betoninäytteiden M1-päästöluokitustestin protokolla on haasteellinen monesta syystä. Testi ei täysin vastaa luonnollisia olosuhteita, sillä rakennuksissa on luonnollista ilmanvaihtoa ja kuivumista, mutta testikammiossa betoninäytteet ovat hyvin rajatussa tilassa, jossa haihtuvat aineet pääsevät kertymään tiiviisti ympäröivään ilmaan. Tämä voi aiheuttaa pitoisuuksien hetkellisen nousun, jota ei tapahtuisi normaalioloissa, joissa VOC:t poistuvat rakennuksen ilmanvaihdon kautta

Testit on lisäksi tehtävä jo 28 vuorokauden iässä, jolloin betoni on vielä suhteellisen kosteaa. Betoni on hygroskooppinen materiaali ja sen hydraatio jatkuu vielä ensimmäisten viikkojen aikana. Kosteuden haihtuminen vaikuttaa suoraan emissioihin.

Testissä näytteet suljetaan muovipussiin kolmeksi päiväksi ennen mittausta, mikä voi muuttaa haihtuvien yhdisteiden (VOC) määrää keinotekoisesti. Rakennustyömailla betoni ei ole suljettuna muovipussiin, vaan se altistuu ympäröivälle ilmalle, jolloin haihtuvat yhdisteet ja kosteus poistuvat luonnollisemmin. Näin ollen M1-testissä mitattavat päästöt voivat olla hetkellisesti korkeampia kuin todellisissa olosuhteissa, joissa materiaali kuivuu pidemmällä aikavälillä.

Testissä mitattavat päästöt voivat osin johtua sementin hydrataatiotuotteista ja lisäaineiden hajoamisesta, mutta nämä yhdisteet haihtuvat yleensä pidemmän ajan kuluessa. Todellisessa käytössä betonin VOC- ja ammoniakkipäästöt tasaantuvat ajan myötä, eikä asuinympäristössä todennäköisesti saavuteta testissä mitattuja arvoja.

Jatkossa M1-kokeita on hyödyllistä jatkaa. Hankkeen puitteissa kokeet jäivät kolmen suunnitellun koestuskierroksen sijasta kahteen, koska soveltuvan betonikokeen valmistelukäytäntö vaati arvioitua enemmän kehittelyä. Soveltuvaa koejärjestelyä ja sen aikataulutusta ehdittiin kuitenkin jo pohjustaa tulevaa varten.

Testimenetelmiä kehitettäessä on jatkossa hyödyllistä huomioida betonin päästöjen pitkän aikavälin käyttäytyminen todellisissa rakentamisolosuhteissa.

CEVO-BETONIN KÄYTTÖ ERI TILANTEISSA

CEVO-betonille teimme monipuolisesti kokeita mm. lujuuksiin (varhaislujuuden kehitykseen ja loppulujuuteen normaalissa lujuudenarvosteluiässä), vedenimeytymiseen ja säänkestävyyteen liittyen (kuvasarja 10-13). Tavoitteena on ollut saada vähähiiliselle, nopeasti kovettuvalle betonille mahdollisimman toistettavat tulokset eri tekijöiden vaikutuksesta. Kun olemme varmistuneet vaatimustenmukaisuudesta ja käyttökohteista, voimme mahdollistaa CEVO-betonille laajan ja monipuolisen käytön.

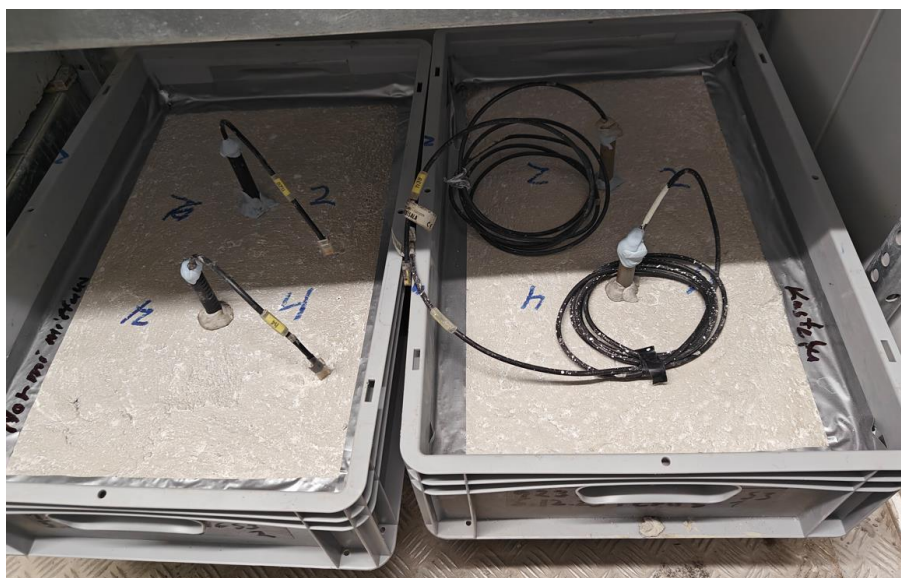
Tavoitteena on ollut saada vahvistettua eri lujuusluokkien mukaiset reseptit sekä täyden koon valmistukseen soveltuvat betonit. Tulosten pohjalta on suoraviivaista suunnitella jatkoaskeleet ja tutkimusaiheet esimerkiksi liittyen sideaineen seossuhteisiin.



Kuva 10 Koekappaleita muoteissa puristuslujuuden mittausta varten.



Kuva 11 Koekappaleita betonin kemiallisen kuivumisen selvittämiseksi.



Kuva 12 Vähähiilisen betonin suhteellisen kosteuden mittausta.

INNOVATIIVINEN VÄHÄHIILINEN KIERRÄTYSKIVIAINESBETONI

RUDUS OY



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment



Euroopan unionin
rahoittama
NextGenerationEU



Kuva 13 Palkit vähähiilisen betonin kutistumismittaukseen.

KIERRÄTYSKIVIAINEKSEN KÄYTTÖ BETONINVALMISTUKSESSA MAAILMALLA

Hankkeen yhteydessä toteutetussa kandidaatintyössä tarkasteltiin kierrätyskiviaineksen käyttöä uuden betonin valmistuksessa globaalissa mittakaavassa. Työssä koostettiin tietoa siitä, miten kierrätyskiviainesta hyödynnetään eri maissa ja millaisia käytäntöjä ja tapoja käyttöön liittyy, mukaan lukien käytön ohjaukseen liittyvä lainsäädäntö ja verotus. Työssä käsiteltiin myös keskeisimpiä kierrätyskiviaineksen hyödyntämiseen liittyviä haasteita.

Työn keskeisimmäksi tuloksena esitetään kierrätyskiviaineksen käyttö betoninvalmistuksessa mahdollisuutena ja suositeltavana. Kierrätyskiviaineksen käytön ohjauksessa havaittiin esiintyvän huomattavia alueellisia eroja. Joissakin maissa uusiobetonin käyttöä jopa edellytetään tietyissä projekteissa, kun taas suurimmassa osassa maista kierrätyskiviaineksen hyödyntäminen on vielä hyvin alkeellista. Monien maiden kohdalla kierrätyskiviainesta koskevien rajoitusten löyhentäminen olisi perusteltua. Uusiokiviaineksen laajamittaisempi käyttö olisi täysin mahdollista, mutta käytön kasvua varjostaa tietynlainen haluttomuus sekä epätietoisuus aiheesta.

Sidosryhmien kiinnostus nähtiin vahvaksi, mutta käytännön sitoutuminen riippuu teknologian taloudellisesta kannattavuudesta, sääntelyn sujuvuudesta ja markkinoiden valmiudesta. Jatkotutkimukset ja pilottihankkeet voivat edistää laajempaa hyväksyntää ja vähentää käyttöönottoon liittyviä riskejä.

5. HANKKEEN VAIKUTTAVUUS

Hanke on tuonut lisätietoa aiheeseen, joka on merkittävä sekä ympäristön, rakentamisen että kiertotalouden näkökulmasta. Rakennusjätteestä saatava uusiomateriaali tukee jätehierarkian mukaisia tavoitteita. Kierrätyskiviaineksen käyttö edistää kestävä kehityksen tavoitteita maailmanlaajuisesti, erityisesti alueilla, joissa rakennusjätettä syntyy runsaasti.

Kierrätyskiviaineksen valjastaminen hyötykäyttöön vähentää luonnon neitseellisten kiviainesten louhintatarvetta. Betonimurskeen hyödyntäminen edellyttää kuitenkin toimivaa logistiikkaa purkutyömailta murskauslaitokseen ja edelleen betontehtaalalle.

Hankkeessa saamamme rohkaisevat testitulokset mekaaniseen kestävyyyteen auttavat varmistamaan kierrätyskiviaineksen soveltuvuuden eri betonisovelluksiin erityisesti lujuutensa puolesta. M1-testien protokollan kehittäminen auttaa todennäköisesti saamaan materiaalit läpi testeistä, jolloin varmistuu samalla turvalliset sisäilmaominaisuudet.

Tehty tutkimus ja saadut tulokset auttavat kierrätyskiviainesstandardin kehittämisessä ja mahdollistavat näin kierrätyskiviaineksen laajemman käytön rakennusmarkkinoilla. CE-merkittynä tuotteena kierrätyskiviaines voi saada laajempaa hyväksyntää rakentamisessa ja vauhdittaa markkinoiden muutosta.

Hanke tukee rakennusalan siirtymää kohti vähähiilisiä ratkaisuja ja toivottavasti samalla edistää lainsäädännön kehitystä kiertotaloutta suositavaksi. Lisäksi tulokset tarjoavat pohjaa uusille liiketoimintamalleille, joissa kierrätyskiviainekset integroidaan osaksi laajempia rakennusratkaisuja.

Hankkeella on myös globaalia merkitystä ja skaalautuvuutta. Syntynyt tieto tullaan jakamaan kansainvälisesti, mikä edistää osaltaan neitseellistä alkuperää olevien raaka-aineiden korvaamista entistä enemmän kierrätetyillä materiaalilla. Tulosten kautta rohkaisemme muita toimijoita investoimaan kiertotalouteen perustuvaan materiaalien hyödyntämiseen. Kierrätyskiviaines ei ole vain vaihtoehto, vaan potentiaalisesti jopa ensisijainen ratkaisu kestäväan rakentamiseen tulevaisuudessa.

6. VIESTINNÄN TOTEUTUMINEN JA TULOKSET

Hankkeesta on tiedotettu hankekortilla verkkosivustolla www.kirailmasto.fi sekä Ruduksen some-kanavissa.

Saadun tutkimustiedon ensisijaisena jakoalustana toimivat alan julkaisut. Suuremman yleisön tavoitamme artikkelein alan ammattilaislehdissä. Tutkimustuloksista aiotaan julkaista tieteellisiä artikkeleita alan julkaisuissa. Artikkelin ”Assessing the Mechanical Properties and Frost Resistance of Recycled Coarse Aggregate Concrete in Finland” odottaa hyväksyntää julkaistavaksi Nordic Concrete Research -lehdessä. Toinen ”Assessing the Mechanical Properties of Finnish Low Carbon Cements” on valmistumassa tulevina viikkoina lähetettäväksi vertaisarviointiin.

Lisäksi yksi artikkeli tulee tämän vuoden kuluessa Betonilehteen; tähän on tulossa tietoa mm. karbonisoitumisesta ja tartunta- ja vetolujuuksista.

Hankkeen sisältö on kiinnostava ja akuutti, joten konferenssiosallistumisia aiheen tiimoilta on myös suunniteltu. Alan keskeisiin tieteellisiin konferensseihin lukeutuu International Conference of Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete (ICCM), johon olemme myös aiemmin osallistuneet.

INNOVATIIVINEN VÄHÄHIILINEN KIERRÄTYSKIVIAINESBETONI

RUDUS OY



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment



Euroopan unionin
rahoittama
NextGenerationEU

Osallistuimme vuoden 2024 aikana myös kansallisen kierrätyskiviainesstandardin työstöön.

7. TULOSTEN KESTÄVYYS JA 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 edistäminen kaikissa tilanteissa ole toistaiseksi taloudellisesti kannattavaa rakennuttajille. Vaikka ratkaisut voivat alentaa rakennuksen elinkaarikustannuksia, niiden alkuvaiheen kustannukset ovat usein edelleen jääneet rakentajan kannettaviksi. Kuitenkin Betoroc-murskeella on kaiken kaikkiaan mahdollisuus saavuttaa jopa kolmanneksen kustannushyöty perinteiseen kiviainekseen verrattuna.

Tällä hankkeella saadut tulokset ovat lupaavia, mutta lisätutkimuksia tarvitaan. Hankkeen jälkeen jatkamme työtä ympäristöystävällisten materiaalien toimivuuden osoittamiseksi korkeampien vaatimusten kohteissa. Näin voidaan päästä siihen, että vähähiiliset betoniratkaisut siirtyvät suunnittelupöydiltä ja marginaalituotteista skaalattavasti käytäntöön.

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 satojen vuosien kuluttua. Tästä syystä olisi jatkossakin tärkeää tutkia keinoja, joilla voitaisiin edistää karbonatisoitumista jo rakennuksen käyttöikänsä aikana.

Kierrätyskiviaineksen, lähinnä betonimurskeen, valmistus, käyttö ja sille asetettavat vaatimukset betonin ja betonin kaltaisten materiaalien (mm. geopolymeerit) kiviaineksenä ovat tällä hetkellä monella toimijalla selvityksessä. Nyt saadut tulokset osoittavat, että reseptit toimivat luonnonkiviainesta heterogeenisemmän murskeen kanssa, kun hienoaines on suodatettu pois. Murskeen muodolla on niin ikään tärkeä vaikutus: pyöreä kiviaines toimii hyvin eri tavalla kuin litteä tai kulmikas, joten betonin suhteitus on tehtävä huolella.

Murskatun kiviaineksen käyttö laajemmin edellyttää myös jatkossa järkevän ja toteutettavissa olevan kokonaistestiohjelman rakentamista. Tällä hetkellä vaatimukset ovat toimijoille osittain epäselvät, sillä koko standardin mukainen koeohjelma on mahdollinen vain hyvin isoille erille eikä siten käyttökelpoinen pieniä murske-eriä eri toimijoilta vastaanotettaessa. Jos puolestaan pienet murske-erät yhdistäisi keskenään, vaadittaisiin isoja varastoja. Käsillä olevan hankkeemme puitteissa olemme osaltamme olleet edistämässä kansallisen standardin luomista, mikä toivottavasti vauhdittaa kierrätyskiviaineksen hyödyntämistä käytännössä.

Hankkeessa saadut tulokset osoittavat, että valetuista kappaleista on saatu riittävän lujia omaan rasitusluokkaansa, mikä on tärkeä edellytys käytännön sovelluksille. Kierrätyskiviaineksen käyttö ei myöskään heikennä betonin elastisia ominaisuuksia merkittävästi, samoin betonin pitkäaikainen muodonmuutos on tulosten perusteella hallittavissa.

Tulosten laajempi soveltaminen edellyttää kuitenkin pidempiaikaisia seuranta- ja kestävyys simulointeja. Erityisesti pakkas-suolasäilyvyyden, huokoisuuden ja pitkäaikaislujuuden osalta tarvitaan vielä lisänäyttöä, jotta



kierrätyskiviaineksen käyttö voidaan laajentaa esimerkiksi siltoihin, korkeisiin rakennuksiin tai muihin kriittisiin rakenteisiin.

ARVIO TULOSTEN KESTÄVYYDESTÄ, KONKREETTISUUDESTA JA RISKEISTÄ

Hankkeessa saadut tulokset osoittavat, että kierrätyskiviaineksen käyttö vähähiilisessä betonirakentamisessa on teknisesti mahdollista ja tarjoaa kestäviä ratkaisuja. Riittävä lujuus rasitusluokkiin nähden sekä kimmokertoimen, Poissonin luvun ja virumamittausten lupaavat tulokset viittaavat siihen, että materiaali voi soveltua laajempaan käyttöön.

Haasteiksi nähdään se, että vaikka alkuvaiheen testit ovat lupaavia, materiaalin pitkäaikaiskestävyyttä eri ympäristöolosuhteissa ei ole vielä täysin varmistettu. Erityisesti pakkas-suolasäilyvyys ja alkali-kiviainesreaktioiden riski vaativat lisää testejä. Kierrätyskiviaineksen alkuperä vaikuttaa betonin lopullisiin ominaisuuksiin, mikä edellyttää tarkkaa laadunhallintaa ja materiaalin esikäsittelyä.

Teknologian laajempi käyttöönotto vaatii eri sidosryhmien sitoutumista, mukaan lukien rakennusyritykset, materiaalitoimittajat, viranomaiset ja tilaajat.

Kasvava paine vähähiiliseen rakentamiseen ja resurssitehokkuuteen kannustaa rakennusteollisuuden toimijoita ja urakoitsijoita etsimään uusia ratkaisuja. Teknologian skaalautuvuus ja käytännön sovellukset kiinnostavat erityisesti suuria rakennusalan toimijoita. Rakennusmateriaalivalmistajien kiinnostus kasvaa, jos kierrätyskiviainespohjainen betoni voidaan tuottaa kilpailukykyiseen hintaan ja se täyttää standardit. Julkinen sektori ja suuret rakennuttajat voivat toimia edelläkävijöinä ja käyttää kierrätysmateriaaleja osana ympäristötavoitteitaan.

Sitoutumiseen liittyy tiettyjä riskejä. Jos teknologiaa ei saada nopeasti rakennusmääräysten ja standardien piiriin, sidosryhmien kiinnostus voi hiipua. Taloudellisen kannattavuuden epävarmuus voi hidastaa yritysten sitoutumista, sillä uusien teknologioiden käyttöönotto vaatii investointeja ja riskinottoa. Myös koulutusta, teknistä tukea ja osaamista on lisättävä, jotta rakennusalan toimijat oppivat käyttämään uutta materiaalia tehokkaasti.

8. TALOUSRAPORTTI

Hanke toteutui alkuperäisen budjetin mukaisesti pieniä kustannusluokkien välisiä muutoksia lukuun ottamatta. Toteutuneet kustannukset on eritelty maksatusraportissa.

9. SUOSITUKSET TULEVIA HANKKEITA JA OHJELMIA VARTEN

Murskeen käyttöä suunniteltaessa on hyvä ymmärtää tietyt reunaehdot jätteiden hyödyntämisestä uusien tuotteiden raaka-aineena. Betonimurske on saanut EEJ-asetuksen eli jätteen luokittelun päättymisen. Yhtenä ehtona tälle on, että murske on valmistettu kiinteällä murskausasemalla. Tällä hetkellä betonimursketta, jolla on EEJ-status, ei voi tuottaa esimerkiksi purkutyömaalla. Tässä pitää etsiä ekologisesti ja taloudellisesti käyttökelpoisimmat ratkaisut.



Vaikka kokeelliset tulokset ovat lupaavia, kierrätyskiviaineksen laajamittainen käyttö tuo mukanaan joitakin haasteita. Seuraavassa taulukossa on kuvattu hankkeessa havaitsemiamme nykyhaasteita ja niiden pohjalta ehdotettuja jatkotutkimuksia.

Tunnistettu haaste	Kuvaus	Jatkotutkimusehdotuksia
Laatu ja homogeenisuus	Kierrätyskiviaineksen laatu voi vaihdella alkuperäisen betonin koostumuksen, murskauksen ja lajitteluprosessin mukaan. Tämä voi vaikuttaa betonin lujuuteen ja muodonmuutuskäyttäytymiseen, mikä vaatii tarkempaa laadunhallintaa	Standardoidut menetelmät kierrätyskiviaineksen laadun ja homogeenisuuden arvioimiseksi Kierrätysmateriaalin esikäsittelymenetelmien tutkimus
Pitkäaikaiskestävyys	Vähähiilisen betonin pitkäaikaiskestävyys ei ole vielä täysin varmennettu kaikissa rasitusolosuhteissa, kuten ankarissa sääolosuhteissa tai kemiallisesti aggressiivisessa ympäristössä.	Kenttätestit ja laboratorioanalyysit simuloimaan betonirakenteiden altistumista sääolosuhteille ja erilaisille ympäristöille Pilottihankkeet eri rakennustyypeissä (infrastruktuuri, asuinrakentaminen, teollisuusrakenteet) Lisäaineiden testit, joissa lisäaineet uusia kehitettyjä tai aiemmin laaja-alaisesti testaamattomia vähähiilisten betoniseosten säänkestävyyttä parantamaan
Hyväksyttävyyys ja lainsäädäntö	Vaikka poliittinen tuki on kasvavaa, viranomais määräykset osittain vielä rajoittavat käyttöä, ellei kierrätyskiviaineksen kestävyyttä pystytä todistamaan pitkäaikaistutkimuksilla ja standardeihin perustuvilla laskelmilla.	Yhteistyöprojektit lainsäätäjien ja teollisuuden kanssa luomaan joustavia sääntöjä kierrätysmateriaalien hyödyntämiselle betonituotannossa
Markkinoiden vastaanotto	Rakennusala on perinteisesti konservatiivinen uusien materiaalien käyttöönotossa, joten betonimursketta sisältävän vähähiilisen betonin hyväksyntä voi vaatia lisätutkimuksia ja referenssikohteita.	Dokumentointi kierrätysmateriaalien käytön turvallisuudesta ja luotettavuudesta rakennusprojekteissa Riskienhallintamallien ja suositusten kehittäminen



Näistä saatujen tulosten merkitystä on esitetty seuraavassa taulukossa.

Tutkimusaihe	Tulosten merkitys
Pitkäaikaiskestävyys	Käytön luotettavuuden ja käyttöiän todentaminen Seossuhteiden optimointi kestävyuden parantamiseksi Ylisuurten varmuusmarginaalien välttäminen, mm. rakenteiden ylimitoitus
Skaalautuvuuden ja käytännön soveltuvuuden varmistaminen	Laaja-alainen käyttöönotto erityyppisissä rakennushankkeissa Eri kohteisiin sopivien vähähiilisten materiaalien optimointi. Laajempi hyväksyntä markkinoilla
Sääntely ja standardointi	Luotettava data kierrätysmateriaalien suorituskyvystä Nopeutettu ja keventynyt hyväksymisprosessi
Taloudellinen kannattavuus ja liiketoimintamallit	Kierrätysmateriaalien houkuttelevuus myös kokonaisvaltaisesti aiheutuvien kustannusten kannalta Uusien kiertotalouden klustereiden ja arvoketjujen syntyminen

Jotta seuraavat hankkeet voivat edistää kierrätyskiviaineksen käyttöönottoa vähähiilisessä rakentamisessa entistä tehokkaammin, on suositeltavaa rakentaa monialaista yhteistyötä, joissa rakennusalan toimijat, tutkimuslaitokset, viranomaiset ja rahoittajat ovat mukana alusta asti.

Kehitettyjä materiaali- ja prosessiratkaisuja on suositeltavaa pilotoida todellisissa rakennushankkeissa, jolloin voidaan osoittaa kierrätysmateriaalin käytännön toimivuus ja taloudellinen kannattavuus. Yhteistyö sääntelyviranomaisten ja standardointityöryhmän kanssa helpottaa hyväksyntäprosessia myöhemmin.

On tärkeä luoda selkeä liiketoimintamalli, sillä toiminnan kannattavuus ja kilpailukykyisyys ovat kriittisiä laajamittaiselle käytölle.

Niin ikään tiedon levittämiseen on syytä panostaa. Rakennusalan ammattilaisille suunnatut koulutukset ja laaja tiedottaminen vahvistavat uusien teknologioiden hyväksyntää.

Kumppanuudet ovat jatkossakin Ruduksen tutkimus- ja kehitystyössä keskeisessä roolissa, kun haluamme laajentaa kierrätyskiviaineksen käyttöä vähähiilisessä betonirakentamisessa kaupallisesti kannattavaksi ja kilpailukykyiseksi. Kierrätysmateriaaleihin liittyvä liiketoiminta vaatii sekä teknologista kehitystä, lainsäädännön huomioimista että markkinoiden vakuuttamista, jossa itse voimme tukea kumppaneitamme ja päin vastoin. Ilman vahvaa kumppanuusverkostoa kierrätyskiviaineksen käyttö vähähiilisessä betonissa jää helposti laboratorioden ja pilottihankkeiden tasolle.

Keskeisiä tulevaisuuden kumppaneita ovat rakennusmateriaalivalmistajat, rakennusurakoitsijat ja kiinteistökehittäjät, purku- ja kierrätysalan toimijat, tutkimuslaitokset, sääntelyviranomaiset ja sertifiointilaitokset.

Näistä mainittakoon esimerkiksi betoniasemat ja elementtitehtaot, jotka voivat integroida kierrätyskiviaineksen tuotteisiinsa. Heiltä saamme tärkeää tietoa materiaalin teknisistä vaatimuksista ja käytännön sovelluksista.



Lisäksi heidän osallistamisensa alkuvaiheessa varmistaa, että uusi materiaali vastaa markkinoiden tarpeisiin ja on helposti skaalattavissa.

Rakennusurakoitsijat ja kiinteistökehittäjät ovat puolestaan potentiaalisia loppukäyttäjiä vähähiiliselle betonille; heidän sitoutumisensa pilotointihankkeisiin lisää käyttöönoton uskottavuutta.

Tiivis yhteistyö purku- ja kierrätysalan toimijoiden kanssa on tärkeä tekijä taloudellisen kannattavuuden varmistamisessa, sillä materiaalin alkuperä, lajittelu ja prosessointi vaikuttavat vahvasti laatuun. Parhaimmillaan voimme luoda kierrätysyritysten kanssa suljetun kierron, jossa materiaalit palautuvat tehokkaasti takaisin rakentamiseen.

Sääntelyviranomaisten ja sertifiointilaitosten kanssa tavoitteemme on käydä jatkuvaa vuoropuhelua. Yhteistyö tutkimuslaitosten kanssa edistää innovaatioita ja auttaa varmistamaan teknologian jatkuvan kehityksen.

On tärkeää, että tunnistamme arvoketjun ja löydämme yhteisen edun. Jokaisella kumppanilla on eri intressit ja haasteet, joten liiketoimintamallin pitää tarjota jokaiselle lisäarvoa.

Jatkossa on tärkeää yhteishankkeilla testata ja kehittää materiaalia todellisessa rakennusympäristössä. Tietyissä tapauksissa voidaan kehittää yhteisiä investointeja kierrätyskiviaineksen prosessointiin tai logistiikkaketjujen optimointiin. Tämä edistää kustannusrakenteen optimointia. Pitkäaikaiset kumppanuudet voivat mahdollistaa suuremman volyymin ja skaalautuvuuden kautta hinnan kilpailukykyisyyden.

Jatkohankkeissa on vastaavalla tavalla siirryttävä laboratorioympäristöstä pilotointiin ja todellisille työmaille. On vältettävä liian suppeaa tutkimuskohdetta.

Mahdollinen seuraava vaihe voisi olla pilottihankkeiden toteuttaminen julkisessa rakentamisessa, jossa betonimurskepohjaista vähähiilistä betonia testataan laajemmassa mittakaavassa. Samalla tarvitaan lisää standardisointia ja yhtenäisiä käytäntöjä, jotta materiaalin käyttö voidaan skaalata teolliseen tuotantoon.

10. YHTEENVETO HANKKEEN PÄÄTULOKSISTA

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

Hankkeessa saadut tulokset osoittavat, että valetuilla kappaleilla on riittävä lujuus omassa rasitusluokassaan, mikä on olennaista käytännön sovelluksille. Kierrätyskiviaineksen käyttö ei heikennä betonin elastisia ominaisuuksia merkittävästi, ja betonin pitkäaikaismuodonmuutos on tulostemme mukaan hallittavissa. Kuitenkin laajempaa soveltamista varten on tarpeen tehdä pidempiaikaisia seurantakokeita ja kestävyysmallintoja, erityisesti pakkaskestävyyden, huokoisuuden sekä pitkäaikaislujuuden osalta, jotta kierrätyskiviaineksen käyttöä voidaan laajentaa esimerkiksi siltoihin, korkeisiin rakennuksiin tai muihin kriittisiin rakenteisiin.

Mahdollisesti Suomessa aloitettava kansallisen kiviainesstandardin työstö hyötyy myös tässä tutkimuksessa tehdyistä kokeista. Tavoiteltavaa on tuottaa elinkaarikestävyydeltään mahdollisimman hyvää betonia pyrkien



samalla edistämään kiertotalouden periaatteita kestävästi. Tämä tavoite toteutuu parhaiten, kun käytetään vain testattuja ja hyväksyttyjä kiviaineksia sekä tuotetaan tutkimustietoa kierrätyskiviaineksen rajoitteista ja mahdollisuuksista.

SUMMARY OF THE MAIN RESULTS

The project's results demonstrate that the use of recycled aggregates in low-carbon concrete construction offers a promising alternative, contributing significantly to the construction industry's transition toward more sustainable solutions. Political support and increasing legislative acceptance create favorable conditions for technological advancement, though further research is needed, particularly regarding long-term durability, quality control, and market acceptance.

The findings indicate that cast concrete components made with recycled aggregates exhibit sufficient strength within their designated exposure classes, a critical factor for practical applications. The use of recycled aggregates does not significantly compromise the elastic properties of concrete, and our results suggest that long-term deformation can be effectively managed. However, broader adoption requires extended monitoring tests and durability simulations, especially concerning freeze-thaw resistance, porosity, and long-term strength. Such studies are essential to expand the use of recycled aggregates into critical structures like bridges, high-rise buildings, or other demanding applications.

The experiments conducted in this study could also inform the potential development of a national aggregate standard in Finland. The goal is to produce concrete with optimal lifecycle durability while advancing the principles of a circular economy in a sustainable manner. This objective is best achieved by utilizing only tested and approved aggregates and generating research data that clarifies both the limitations and opportunities of recycled aggregates.

