Kivet Kiertoon – uusiokäytöllä betonin hiilijalanjälkeä pienemmäksi

1.1.2024 – 30.6.2026

Johdanto

Kivet Kiertoon – uusiokäytöllä betonin hiilijalanjälkeä pienemmäksi -hanke (1.1.2024–30.6.2026) on toteutettu Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy:n (Xamk) johdolla Kymenlaakson alueella. Hanke on rahoitettu Kymenlaakson liiton kautta Euroopan unionin Oikeudenmukaisen siirtymän rahastosta (Just Transition Fund, JTF), ja sen kokonaisbudjetti on ollut 860 887 euroa. Hankkeen toteutukseen on osallistunut useita yrityskumppaneita betonin arvoketjusta, mukaan lukien valmisbetoniteollisuus, teollisuuden sivuvirtoja tuottavat yritykset sekä kiertotaloustoimijat.

Hankkeen lähtökohtana on ollut rakennus- ja betoniteollisuuden kasvava tarve vähentää toimintansa hiilijalanjälkeä sekä lisätä materiaalien kiertoa. Betonintuotannossa merkittävimpiä ympäristövaikutuksia on aiheutunut sementin valmistuksesta sekä neitseellisten kiviainesten käytöstä, vaikka betonin tilavuudesta valtaosa on muodostunut kiviaineksesta. Samanaikaisesti teollisuudessa on syntynyt merkittäviä määriä sivuvirtoja ja jätteitä, joiden hyödyntäminen rakennusmateriaaleissa on ollut vielä osittain vajaata muun muassa teknisten, taloudellisten ja lainsäädännöllisten haasteiden vuoksi.

Hankkeen tavoitteena on ollut edistää kierrätysmateriaalien, sivuvirtojen ja jätteiden hyötykäyttöä betonin valmistuksessa siten, että betonituotannon hiilijalanjälkeä on voitu pienentää ilman, että materiaalin tekniset ominaisuudet ovat heikentyneet. Samalla tavoitteena on ollut aktivoida perinteisesti konservatiivista betoniteollisuutta hyödyntämään tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaa (TKI) oman toimintansa kehittämisessä sekä uusien tuotteiden ja prosessien käyttöönotossa.

Hanke on toteuttanut Kymenlaakson alueellisen siirtymäsuunnitelman tavoitteita, joissa on painotettu elinkeinorakenteen monipuolistamista, osaamistason nostamista sekä yritysten kilpailukyvyn vahvistamista. Lisäksi hanke on tukenut bio- ja kiertotalouden kehitystä edistämällä materiaalien pysymistä kierrossa ja luomalla edellytyksiä uusien arvoketjujen syntymiselle.

Tutkimus ja kehitystyö on toteutettu pääosin Xamkin KymiLabs-tutkimusyksikössä, jossa on hyödynnetty betonitutkimuksen ja materiaalianalytiikan laitekantaa. Laboratoriomittakaavassa tehtyjen kokeiden avulla on kehitetty ja optimoitu materiaalikoostumuksia, joiden toimivuutta on arvioitu betonin työstettävyyden, lujuuden ja kestävyyden näkökulmista. Lupaavimmat ratkaisut on validoitu teollisessa

mittakaavassa betoniasemalla, mikä on mahdollistanut tulosten skaalautuvuuden ja käytännön toteutettavuuden arvioinnin.

Hankkeen keskeiset toimenpiteet ovat jäsentyneet useisiin työpaketteihin, jotka ovat kattaneet kierrätyskiviaineksen valmistuksen ja laadunhallinnan, kierrätysmateriaalien käytön betonissa, sementittömien sideaineiden kehittämisen, betonituotannon sivuvirtojen hyödyntämisen sekä materiaalipassien luomisen. Näiden lisäksi hankkeessa on toteutettu teollisen mittakaavan pilotointeja sekä kansainvälistä benchmarkingia parhaiden käytäntöjen tunnistamiseksi ja siirtämiseksi suomalaisiin olosuhteisiin.

Hankkeen keskeisenä tavoitteena on ollut tuottaa konkreettisia työkaluja ja ohjeistuksia yritysten käyttöön, kuten esimerkkireseptejä kierrätyskiviaineksen hyödyntämisestä, menetelmiä sementittömien sideaineiden soveltamiseen sekä materiaalien laadunvarmistukseen liittyviä käytäntöjä. Näiden avulla on pyritty madaltamaan kynnystä kiertotalousratkaisujen käyttöönottoon betoniteollisuudessa.

Lisäksi hanke on vahvistanut Kymenlaakson alueellista TKI-ympäristöä ja lisännyt yritysten ja tutkimusorganisaatioiden välistä yhteistyötä. Hankkeen aikana syntynyt osaaminen ja infrastruktuuri ovat luoneet pohjaa uusille tutkimus- ja kehityshankkeille sekä kansallisille ja kansainvälisille yhteistyöverkostoille. Pitkällä aikavälillä hankkeen on odotettu edistävän uusien liiketoimintamallien ja yritysten syntymistä kiertotalouden ympärille sekä tukevan rakennusalan siirtymää kohti vähähiilisempiä ratkaisuja.

Tulokset

Tässä raportissa esiteltävät Kivet Kiertoon -hankkeen tutkimustulokset on jaettu viiteen pääotsikkoon ja niiden alaotsikoihin hankkeen eri tutkimuslinjojen mukaisesti:

1. Kierrätyskiviaines: valmistus, varastointi ja laadunvarmistus 4
1.1. Lainsäädäntö ja laadunvarmistus..... 4
1.2. Kierrätyskiviainesten valmistus, varastointi ja ominaisuudet..... 6
2. Kierrätyskiviaineksen käyttö betonissa 11
2.1. Kierrätyskiviaineksen käyttö betonin runkoaineena 12
2.2. Hienon kierrätyskiviaineksen mekaaninen aktivointi ja käyttö sementtiä korvaavana seosaineena 15
3. Betoniteollisuuden sivuvirtamateriaalit 19
4. Kierrätys- ja sivuvirtamateriaalien hyödyntäminen betonissa 22
4.1. Eristelasivillan käyttö sementtiä korvaavana seosaineena 22
4.2. Tuuliturbiinin lapojen käyttö sementtiä korvaavana seosaineena 26
5. Sementittömät sideaineet 30

Tutkimuksessa valmistettiin betonimassoja laboratoriomittakaavassa 50 litran LAPA N50 -sekoittimella (LAPA Mixer, Lammi, Finland). Valmistettujen massojen tilavuus oli 30 litraa. Kaikkien massojen sekoittamiseen käytettiin samaa prosessia sekoitusaikoineen ja osa-aineiden lisäysjärjestyksineen. Kaikkien valmistettujen testimassojen pohjana käytettiin hankkeen aikana kehitettyä vertailubetonin reseptiä, jonka koostumus on kuvattu sivulla 11 taulukossa 3. Kokeissa valmistettiin lähtökohtaisesti kuusi kuution muotoista 150x150x150 mm:n koekappaletta standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti [1]. Kaikissa betonimassoissa vesi-sementtisuhteeksi asetettiin 0,50.

Tässä raportissa vertailubetonista, joka on tavallista betonia ilman lisättyjä kierrätyskiviaineksia tai sivuvirtamateriaaleja, käytetään nimityksiä *kontrolli*, *referenssi* ja *vertailu*. Tutkimustuloksia verrataan tähän tavanomaiseen betoniin kierrätys- ja sivuvirtamateriaalien käytön vaikutusten arvioimiseksi.

1. Kierrätyskiviaines: valmistus, varastointi ja laadunvarmistus

1.1. Lainsäädäntö ja laadunvarmistus

Kivet Kiertoon-hankkeessa tarkasteltiin kierrätyskiviaineksen, erityisesti betonimurskeen, valmistusta, laatua ja hyödyntämisedellytyksiä betonin valmistuksessa neitseellisen kiviaineksen korvaajana. Lähtökohtana oli tarkastella Ei enää jätettä -menettelyä (valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista (466/2022)), jonka mukaisesti betonimurske voi lakata olemasta jätettä, mikäli se täyttää sääntelyssä asetetut vaatimukset.

Keskeiseksi havainnoksi muodostui se, että murskaimen teknisellä tyypillä ei ole ratkaisevaa merkitystä EEJ-statuksen kannalta, vaan ratkaisevaa on murskaustoiminnan sijainti ja siihen liittyvä ympäristölupa. Nykytilanteessa betonijätteen murskaus, jonka tavoitteena on EEJ-statuksen saavuttaminen, voidaan toteuttaa käytännössä vain kiinteällä, ympäristöluvan alaisella murskauspaikalla, joka on tyypillisesti maa-ainesten käsittelyyn tarkoitettu alue kuten soramonttu. Purkutyömaalla tapahtuva murskaus ei täytä näitä edellytyksiä, vaikka raaka-aine sinänsä olisi soveltuvaa. EEJ-luokittelu sidotaan siis tiettyyn toimijaan ja tämän prosessiin, ei yksittäiseen materiaalierään yleisesti. Tämä korostuu erityisesti purkubetonin kohdalla, jossa materiaalin vaihtelu on suurta ja tuotantoprosessit hajautuneita.

EEJ-luokituksessa keskeinen lähtökohta on, että betonimurskeen tulee olla laadultaan riittävän tasalaatuista, puhdasta ja teknisesti toimivaa, jotta sen käyttö ei aiheuta haittaa ympäristölle eikä rakenteelle. Betonimurskeen laatu määräytyy pitkälti käytetyn raaka-aineen perusteella. Lähtömateriaalin tulee olla soveltuvaa betonijätettä, joka ei sisällä haitallisia vierasaineita tai merkittäviä määriä muita materiaaleja. Ennen murskausta materiaali esikäsitellään siten, että siitä poistetaan epäpuhtaudet ja mahdolliset ei-toivotut komponentit.

Ympäristökelpoisuus muodostaa betonimurskeen laatuvaatimusten keskeisimmän osa-alueen. Betonimurskeen tulee täyttää asetuksessa määritellyt haitta-aineiden pitoisuus- ja liukoisuusrajat. Näillä rajoilla pyritään estämään haitallisten aineiden kulkeutuminen ympäristöön, erityisesti pinta- ja pohjavesiin.

Betonimurskeen tekniset ominaisuudet vaikuttavat sen soveltuvuuteen erilaisiin käyttökohteisiin. Murskeen rakeisuus, kantavuus ja mekaaninen kestävyys määrittävät sen toiminnan rakenteessa. Oikein tuotettu betonimurske vastaa ominaisuuksiltaan luonnonkiviaineksia ja voi joissakin tapauksissa saavuttaa niitä parempia

kantavuusominaisuuksia. Teknisen laadun varmistaminen perustuu standardoituihin testimenetelmiin, joilla materiaalin ominaisuuksia arvioidaan ennen sen käyttöönottoa.

Kiviaineskäytön kannalta testattavia betonimurskeen teknisiä ominaisuuksia ovat geometriset, fysikaaliset, mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet sekä haitta-ainepitoisuudet. Geometrisiä ominaisuuksia ovat murskeen rakeisuus ja hienoainespitoisuus. Fysikaalisiin ominaisuuksiin kuuluvat materiaalin tiheys ja vedenimeytyminen. Mekaanisia ominaisuuksia arvioidaan ensisijaisesti kulutuskestävyyden perusteella. Kloridi- ja sulfaattipitoisuus sekä humuspitoisuus ovat esimerkkejä määritettävistä kemiallisista ominaisuuksista. Haitta-aineiden osalta analysoidaan erityisesti raskasmetallien pitoisuudet ja liukoisuudet.

Hankkeen kierrätyskiviaineksen valmistukseen ja laadunvarmistukseen liittyvässä tutkimuksessa keskityttiin betonimurskeen dokumentointiin materiaalipassin muodossa. Tavoitteena oli koota yhteen ne testaus- ja arviointimenetelmät, joilla betoniteollisuudessa käytettävien kierrätyskiviaineksien tasalaatuisuus ja tekninen soveltuvuus voidaan osoittaa. Hankkeen tutkimuksissa kehitettyjen ja testattujen materiaalien pohjalta muodostettiin kokonaisuus, jossa materiaalista esitetään keskeiset tiedot, kuten ominaisuudet, testitulokset, käyttökohteet ja rajoitteet.

Hankkeessa toteutettiin laboratoriokokeita, joissa betonijätettä murskattiin ja seulottiin sekä analysoitiin syntyneen murskeen ominaisuuksia. Näiden kokeiden avulla voitiin todentaa laboratoriomittauksin ja käytännön testein, miten eri lähtömateriaalit ja käsittelytavat vaikuttavat lopputuotteen laatuun ja soveltuvuuteen.

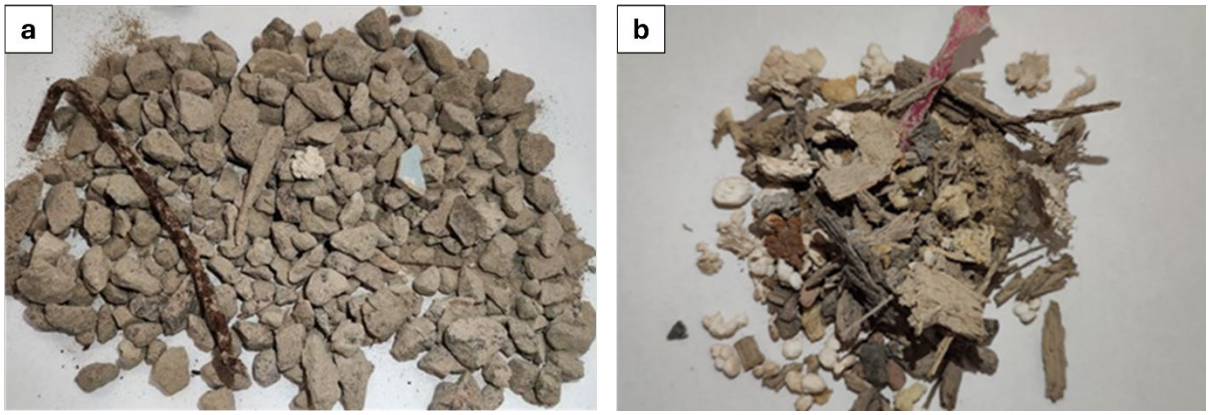
Betonijätteen murskaus-, seulonta- ja testauskokeet muodostivat keskeisen aineiston materiaalipassin kehitystyölle. Materiaalipassin kehittämisessä keskeisenä ajatuksena oli luoda työkalu, joka tukee sekä EEJ-menettelyä että mahdollisia CE-merkintäprosesseja ja helpottaa kierrätysmateriaalien markkinoille saattamista.

Kokonaisuutena Kivet Kiertoon -hankkeessa toteutetun selvitys- ja tutkimustyön tuloksena muodostui selkeä käsitys siitä, että kierrätyskiviaineksen tuotteistaminen ei ole pelkästään tekninen kysymys, vaan siihen kytkeytyy tiiviisti ajattelutavat, sääntely, lupa-asiat ja prosessien dokumentointi. Hankkeessa tuotettu tieto perustuu laajaan lähdepohjaan, joka sisältää ympäristöministeriön linjauksia, viranomaiskeskusteluja, lainsäädäntöä, standardeja sekä käytännön testituloksia. Tämä kokonaisuus luo perustan jatkokehitykselle, jossa tavoitteena on tehdä betonimurskeen hyödyntämisestä nykyistä selkeämpää, ennakoitavampaa ja laajemmin hyödynnettävää osana kestävää rakentamista. Tuleva UTU-menettely (uusiomateriaalien tuotteistaminen) mahdollistaa vuodesta 2027 alkaen kevennetyn tavan hakea EEJ-statusta, mikä voi pitkällä aikavälillä helpottaa uusiomateriaalien tuotteistamista.

1.2. Kierrätyskiviainesten valmistus, varastointi ja ominaisuudet

Tässä kappaleessa esitellään Kivet Kiertoon -hankkeessa toteutetut kierrätyskiviainesten ominaisuuksien testaustulokset. Tavoitteena oli selvittää, kuinka kierrätyskiviaineksen alkuperä vaikuttaa sen ominaisuuksiin sekä tuottaa tietoa CE- ja EEJ-merkintäprosessien tueksi. Kierrätyskiviaineksia testattiin rakeisuuden, raemuodon, humuspitoisuuden, osa-aineiden sekä kulutuskestävyyden näkökulmista. Testattuja kierrätyskiviaineksia käytettiin myöhemmin laboratoriokokeissa korvaamaan betonin neitseellisiä kiviaineksia.

Tutkimuksen kohteena oli kahdesta eri lähteestä peräisin olevaa kierrätyskiviainesta. Ensimmäinen tutkittu materiaali (Kuva 1) oli ulkona kasassa säilytettyä useasta eri purkukohteesta teollisessa mittakaavassa tuotettu kooste purkujätettä, joka sisälsi betonimurskeen lisäksi muun muassa terästä, keramiikkaa ja eristemateriaaleja. Toinen tutkittu kierrätyskiviaines oli hankkeessa laboratorio-olosuhteissa tuotettua betonimursketta, jota valmistettiin murskaamalla leukamurskaimella (BB 300, Retsch GmbH, Haan, Saksa) lieriömäisiä puristuskoekappaleita, joiden lujuusluokka oli tiedossa. Kolmen eri lujuusluokan betonilieriöitä käytettiin murskeen valmistuksessa: C25/30, C30/37 sekä C35/45. Tällä prosessilla valmistettu murske oli puhtaampaa kuin kuvassa 1 nähtävä murske ja edusti tutkimuksissa optimaalista kierrätyskiviainesta, jonka alkuperä ja tausta ovat tiedossa, ja jota on säilytetty olosuhteissa, joissa ympäristö ja epäpuhtaudet eivät ole päässeet vaikuttamaan siihen.



Kuva 1. Tutkimuksissa käytettyä purkubetonijätettä. Satunnainen otos purkujätettä (a) ja purkujätteen sisältämiä, kiviaineksista ja sementistä poikkeavia osa-aineita (b).

Kuvan 1a mukaisesta purkubetonista valmistetusta murskeesta käytetään tästä eteenpäin nimitystä *purkubetoni* tai kuvaajissa lyhyemmin *purku*. Puhtaista lieriökoekappaleista valmistettuja kierrätyskiviaineksia kuvataan lujuusluokkaa kuvaavalla merkinnällä, esimerkiksi C25/30 tai lyhyemmin 25/30.

Silmämääräisesti tarkasteltuna purkubetonimurske sisälsi huomattavia määriä muutakin rakennusjätettä kuin vain betonimursketta. Murskeelle suoritettiin standardin SFS-EN 933-11 + AC [2] mukainen karkean uusiokiviaineksen osa-aineiden luokittelutesti, jonka tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Purkubetonin osa-aineiden luokittelutestin tulokset.

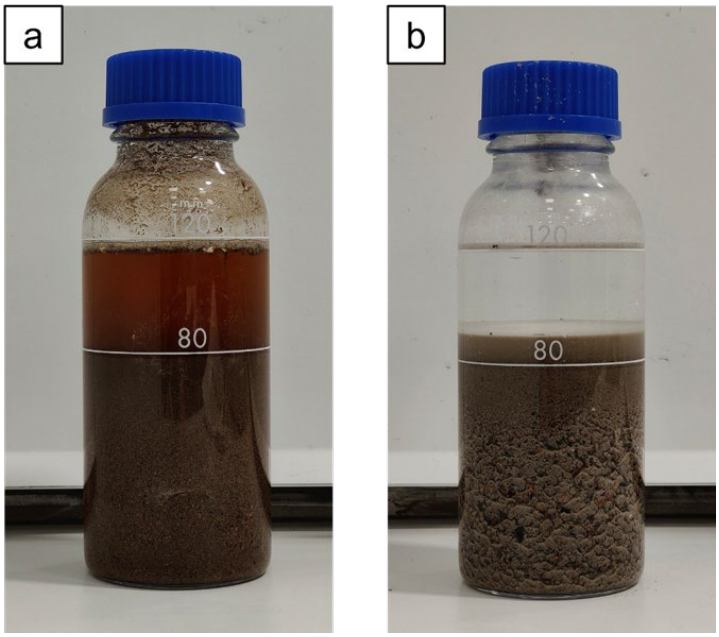
Osa-aine	**Tunnus**	**m (g)**	**%**
Muut	X	19	0.9
Betoni	Rc	1059	53
Kivi	Ru	778	39
Tiili	Rb	57	2.8
Bitumi	Ra	99	4.9
Lasi	Rg	0	0
SUMMA		2012	100

Osa-aine	**Tunnus**	**cm^3/kg**
Kelluvat	FL	6.0

Tulokset osoittavat, että murske sisälsi muutamia prosentteja tiiltä, bitumia ja muita osa-aineita. EEJ-asetuksen kriteerien enimmäismäärät kategorioille tiili (10 p-%), muut (1 p-%), ja lasi+muut (1 p-%) alittuivat. Sen sijaan murske sisälsi 6,0 cm^3/kg kelluvia osa-aineita, mikä ylittää EEJ-asetuksen enimmäismääräksi asetetun 5,0 cm^3/kg. Lieriökoekappaleista valmistetuille murskeille ei ollut tarpeellista suorittaa osa-aineiden luokittelutestiä, sillä ne sisälsivät vain puhtaan betonin osa-aineita: kiveä ja sementtipastaa.

Tutkittavien kierrätyskiviainesten laatua arvioitiin myös niiden sisältämän humuksen eli kasviperäisen orgaanisen aineksen hajoamistuotteiden määrityksellä standardin SFS-EN 1744-1 + A1 [3] mukaisesti. Testissä testinäytteen alle 4 mm:n kokoinen aines sekoitetaan 3 % natriumhydroksidiliuoksen (NaOH) kanssa. Orgaaninen aines reagoi liuoksen kanssa muuttaen liuoksen värin sitä tummemmaksi, mitä korkeampi on kiviainesnäytteen humuspitoisuus.

Kuva 2 esittää humustestin tulokset kahdelle tutkitulle kierrätysmurskeelle. Purkujäte (Kuva 2a) värjäsi NaOH-liuoksen tummanoranssiksi, kun taas C25/30-murskeen (Kuva 2b) tapauksessa värjäytymistä ei tapahtunut. Tuloksista voidaan päätellä, että purkujäte sisälsi huomattavia määriä humusta, millä voi olla heikentäviä vaikutuksia betonin lujuudenkehitykseen ja loppulujuuteen. Osa-aineiden luokittelutestin perusteella humustestin tulokset eivät ole yllättäviä, etenkin kun huomioi purkujätteen säilytyksen ulkoilmassa vaihteleville olosuhteille alttiina.



Kuva 2. Humustestin tulokset. a) Purkubetoni, b) C25/30-murske.

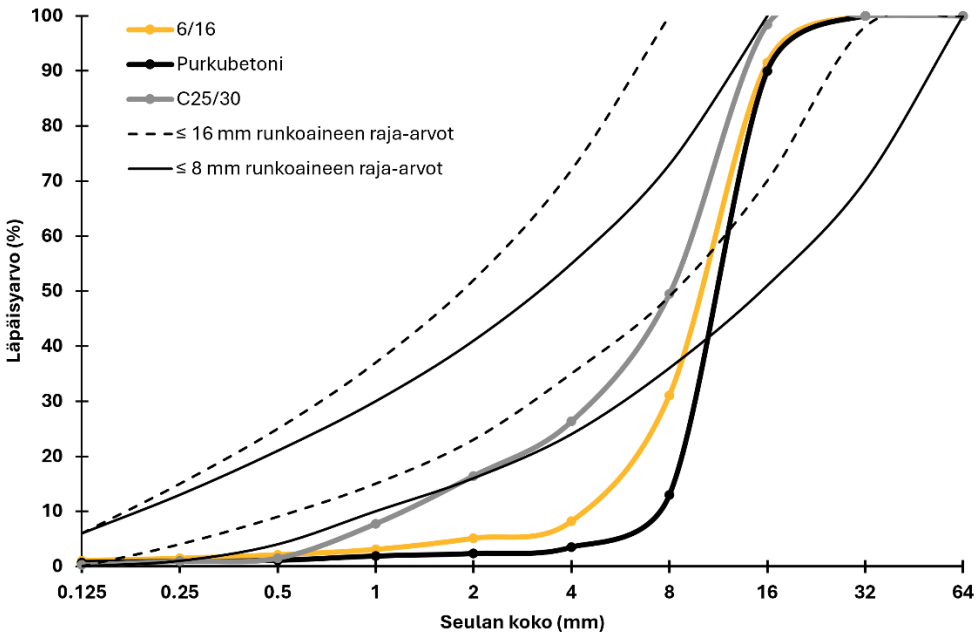
Kierrätyskiviainesten geometrisiä ominaisuuksia tutkittiin litteysluvun ja rakeisuuden määrityksillä. C25/30-murskeen raemuoto määritettiin karkean fraktion litteyslukuna (Taulukko 2). Testinäytteen litteysluvuksi määritettiin 15, eli lajite oli luokkaa FI_{15}. Mitä korkeampi litteysluku on, sitä enemmän kiviaines sisältää litteitä rakeita. FI_{15} on alin betonikiviainekset-standardissa [4] nimetty litteyslukuluokka, joten valmistettu murske sopii raemuotonsa puolesta erinomaisesti kantaviin rakenteisiin.

Taulukko 2. C25/30-murskeen litteysluvun määrityksen tulokset.

Raekokolajite d_i/D_i (mm)	**Lajitteen d_i/D_i massa R_i (g)**	**Välpän rakokoko (mm)**	**Välpän läpäissyt massa m_i (g)**	**Litteysluku FI_i**	**Litteysluku FI***
31,5/40	0.0	20	0		
25/31,5	33.3	16	13.2	40	
20/25	36.5	12.5	27	74	
16/20	78.0	10	9.4	12	
12,5/16	718.6	8	129.8	18	15
10/12,5	1063.1	6.3	179.9	17	
8/10	363.0	5	34.2	9	
6,3/8	333.3	4	35	11	
5/6,3	255.3	3.15	13.2	5	
4/5	238.7	2.5	16.5	7	
M1 = $\sum R_i$ =	**3119.8**	M2 = $\sum m_i$ =	**458.2**		

* Litteysluku FI = M2/M1*100

Kierrätyskiviainesten rakeisuudet määritettiin seulomalla vakioseulasarjalla, ja rakeisuuskäyriä verrattiin betonikokeissa käytettyihin neitseellisiin kiviaineksiin. Kuvassa 3 on esitetty purkubetonista ja C25/30-koekappaleista valmistettujen murskeiden sekä neitseellisen 6/16-kiviaineksen rakeisuuskäyrät. Kuvassa 3 katkoviivat rajaavat välin, johon yhdistetyn runkoaineen, eli koko betonissa käytetyn kiviaineksen rakeisuuskäyrän olisi suositeltavaa sijoittua maksimiraekoon ollessa 16 mm (Suomen betoniyhdistys). Vastaavasti ohuet yhtenäiset viivat rajaavat suositellun välin 8 mm:n maksimiraekoolle. Selkeyden vuoksi kuvassa ei ole esitetty yhdistettyjen runkoaineiden käyriä testibetoneille, mutta ne sijoittuivat kaikilla betoneilla 16 mm:n maksimiraekoon raja-arvojen sisälle. Kuvasta 3 nähdään, että purkubetoni vastasi rakeisuudeltaan paremmin neitseellistä 6/16-kiviainesta kuin C25/30. On huomattava, että sekä purkubetonista että C25/30:stä seulottiin pois alle 0,5 mm:n suuruinen aines ennen rakeisuuden määritystä. Tämä esiseulonta tehtiin, että murskeet vastaisivat paremmin karkeaa neitseellistä 6/16-kiviainesta ja olisivat näin soveltuvampia käytettäviksi tämän kiviaineksen korvaajana myöhemmissä betonikokeissa.



Kuva 3. Purkubetonista ja C25/30-koekappaleista valmistettujen murskeiden sekä neitseellisen 6/16-kiviaineksen rakeisuuskäyrät.

Kierrätyskiviaineksen varastoinnilla havaittiin olevan vaikutusta materiaalin rakeisuuteen. Kun purkubetonista valmistettua mursketta varastoitiin laatikkosäilytyksessä sisätiloissa, havaittiin kiviaineksen lajittumista, millä oli huomattavaa vaikutusta betonimassan työstettävyyteen, kun tätä kiviainesta käytettiin betonissa neitseellisen kiviaineksen korvaajana. Mitä hienojakoisempaa kierrätyskiviaines on, sitä korkeampi on sen vedenimukyky, mikä hankaloittaa vesi-

sementtisuhteen hallintaa. Mikäli kierrätyskiviainesta säilytetään ja käytetään yhtenä lajitteena, jota ei ole jaettu karkeisiin ja hienoihin lajitteisiin, on suositeltavaa huolehtia riittävästä mekaanisesta sekoituksesta ennen käyttöä betonissa materiaalin tasalaatuisuuden varmistamiseksi.

Kierrätyskiviainesten mekaanista kestävyyttä havainnollistavissa iskun- ja kulutuskestävyystesteissä käytettiin C30/37-mursketta. Murske seulottiin raekooltaan 11–14 mm:n karkeaan lajitteeseen. Karkean murskeen iskunkestävyys määritettiin Los Angeles -myllyllä (CONTROLS S.p.A., Liscate, Italia). Los Angeles-luvuksi saatiin 14, joten se täyttää Los Angeles -luokan LA_{15} vaatimuksen. Mitä pienempi kiviaineksen Los Angeles -arvo on, sitä vaativammissa käyttökohteissa se on käytettävissä. LA_{15}-luokka on matalin Los Angeles-luokka, joten testattu C30/37-kierrätyskiviaines on iskunkestävyydeltään erinomaista.

Micro Deval -myllyllä (CONTROLS S.p.A., Liscate, Italia) tutkittiin saman C30/37-murskeen kulutuskestävyyttä. Testissä määritetty kierrätyskiviaineksen M_{DE}-luku oli 50, joka ei täytä heikointakaan betonikiviainesstandardissa [4] ilmoitettua luokkaa M_{35}. Laboratoriossa valmistetun kierrätyskiviaineksen kulutuskestävyys ei siis ollut kovinkaan korkea, mikä voi selittyä osittain sillä, että murskaus- ja testausvaiheissa testikappaleet ja niistä valmistettu murske eivät olleet saavuttaneet vielä lopullista lujuuttaan.

2. Kierrätyskiviaineksen käyttö betonissa

Edellisessä kappaleessa esiteltyjen kierrätyskiviainesten käyttöä betonissa niin neitseellisen kiviaineksen kuin sementin korvaajana tutkittiin laboratoriomittakaavassa. Hankkeen tuloksena kehitettiin kolme esimerkkireseptiä kierrätyskiviaineksen käytölle pakkasenkestävyyttä tavoittelevissa betoneissa lujuusluokassa C30/37. Kierrätyskiviainesten raekooltaan erilaisia jakeita käytettiin betonissa siten, että karkeimpia jakeita käytettiin korvaamaan betonin karkeaa kiviainesta ja hienoimpia jakeita käytettiin sementin korvaajana.

Esimerkkireseptit:

Resepti 1: 45 % betonissa käytetystä kiviaineksesta korvataan kierrätyskiviaineksella

Resepti 2: 20 % betonissa käytetystä sementistä korvataan kierrätyskiviaineksen alitteella (alle 2 mm raekoko)

Resepti 3: 20 % betonissa käytetystä sementistä korvataan betonin pesulietteellä

Kaikkien esimerkkireseptien pohjana on käytetty samaa hankkeessa kehitettyä reseptipohjaa, joka on esitetty taulukossa 3. Sideaineena käytettiin sekoitusta Finnsementin Oiva- ja Rapid-sementeistä. Reseptien optimoinnin tavoitteena oli kehittää betonia, jonka notkeus on 200 mm, eli painumaluokassa S4 (160–210 mm). Resepteillä tavoiteltiin 5 %:n ilmamäärää, joka optimaaliseen huokosjakoon yhdistettynä mahdollistaa betonin riittävän pakkasenkestävyyden haastavissa käyttökohteissa. Kierrätyskiviaineksen alite ja betonin pesuliete kuivattiin lämpökaapissa ja hienonnettiin mekaanisesti kuulamyllyssä ennen uudelleenkäyttöä betonissa. Reseptissä 1 45 % vertailubetonin kokonaiskiviaineksesta korvattiin kierrätyskiviaineksella. Käytännössä taulukon 3 kuvaamasta reseptipohjasta karkein kiviaines (6/16), jonka osuus kokonaiskiviaineksesta oli 45 %, korvattiin kokonaan kierrätyskiviaineksella. Vertailubetonit valmistettiin taulukon 3 reseptillä.

Taulukko 3. Reseptipohja kierrätyskiviaineksen käytölle betonissa.

		%	massa / kuutio betonia (kg)
Kiviainekset	6/16	45	1825
	0/8	50	
	0/1 (filleri)	5	
Sementti	Oiva	70	350
	Rapid (Parainen)	30	
Vesi			175
Lisäaineet	Notkistin	1,5	5,25
% $m_{sementti}$	Huokostin	0,04	0,14

2.1. Kierrätyskiviaineksen käyttö betonin runkoaineena

Tutkimuksessa pyrittiin korvaamaan mahdollisimman suuri osa betonin neitseellisistä kiviaineksista kierrätyskiviaineksilla. Tavoitteena oli kehittää kierrätyskiviaineksia hyödyntävä betoniresepti, jonka ominaisuudet, ennen kaikkea työstettävyys, puristuslujuus sekä pakkasen kestävyys, eivät kärsisi tavanomaiseen betoniin verrattuna.

Tutkimuksessa käytettiin kierrätyskiviaineksena purkubetonista ja C25/30-koekappaleista valmistettuja murskeita. Murskeista poistettiin seulomalla alle 0,5 mm:n kokoiset rakeet erittäin vedenimukykyisen hienoaineksen poistamiseksi, jotta vesi-sementtisuhde olisi paremmin hallittavissa.

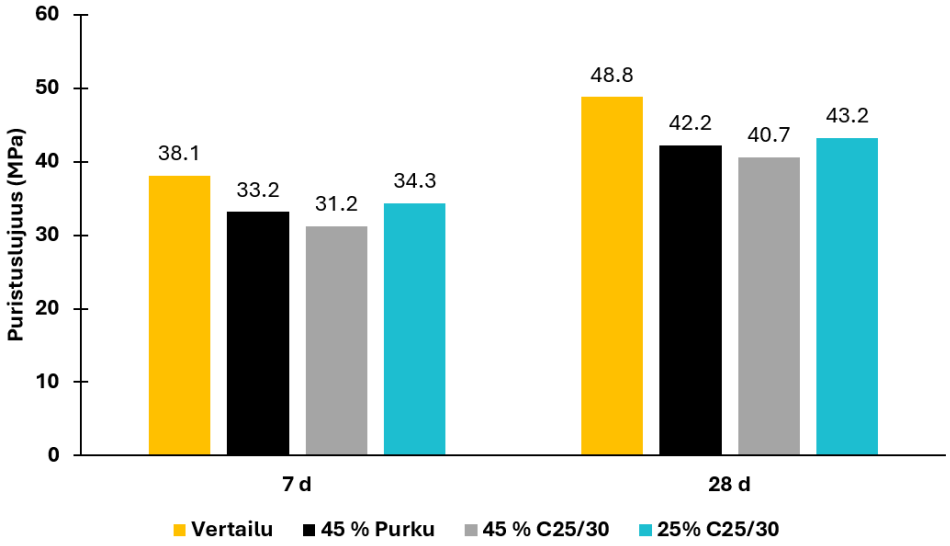
Yli 0,5 mm:n kokoisen koostekiviaineksen käyttöön päädyttiin, sillä vaikka Suomessa standardi ei anna suositusta alle 4 mm:n jakeiden käytölle betonikiviaineksena [5], useissa Euroopan maissa myös hienompien kierrätyskiviainesten käyttö on sallittua rakentamisessa. Esimerkiksi Tanskassa kansallinen standardi on vuodesta 2021 alkaen sallinut betonin kiviaineksen täydellisen korvaamisen kierrätyskiviaineksilla tarkempien reunaehtojen täyttyessä. Sekä hieno että karkea kiviaines voidaan siis korvata kokonaan kierrätyskiviaineksilla. Lisäksi kierrätyskiviaineksen käyttö on sallittua kaikissa betonin rasitusluokissa.[6][7]

Vertailumassan lisäksi valmistettiin kolme kierrätyskiviainesta sisältävää betonimassaa: 45 % purkubetonimursketta, 45 % C25/30-mursketta ja 25 % C25-30-mursketta. Vertailubetonin kiviaineksista korvattiin karkeaa 6/16-kiviainesta.

Kaikkien valmistettujen testimassojen työstettävyys oli vähintään tavoitellussa painumaluokassa S4 (160–210 mm). Kierrätyskiviainesten käytöllä ei havaittu kielteistä vaikutusta betonimassan työstettävyyteen, kun niiden veden absorptiokyky huomioitiin veden annostuksessa, eli annosveden määrää nostettiin kierrätyskiviaineksen veden absorptiota vastaava määrä. Alustavat hankkeessa toteutetut laboratoriokokeet osoittivat, että mikäli annosveden määrää ei nostettu, kierrätyskiviainekseen sekoituksen aikana imeytynyt vesi aiheutti testibetonien tehollisen vesi-sementtisuhteen pienentymistä. Tämän seurauksena betonin työstettävyys heikkeni hankaloittaen tulosten vertailua. Havaintojen perusteella annosteltavan veden määrän ja vesi-sementtisuhteen hallinta on kriittinen osa kierrätyskiviaineksen käyttöä betonissa.

Kuvassa 4 on esitetty testibetonien puristuslujuustulokset 7 ja 28 vuorokauden testausiässä. Tulosten perusteella kierrätyskiviaineksia hyödyntävien betonien puristuslujuus on lähes vertailubetonin tasolla. Pienempi määrä C25/30-mursketta (25 %) tuottaa parempia puristuslujuuksia kuin suurempi (45 %), mutta ero ei ole merkittävä. Puristuslujuustulosten perusteella purkubetonimurskeen korkea humuspitoisuus ei vaikuta merkittävästi kovettuneen betonin puristuslujuuteen tai

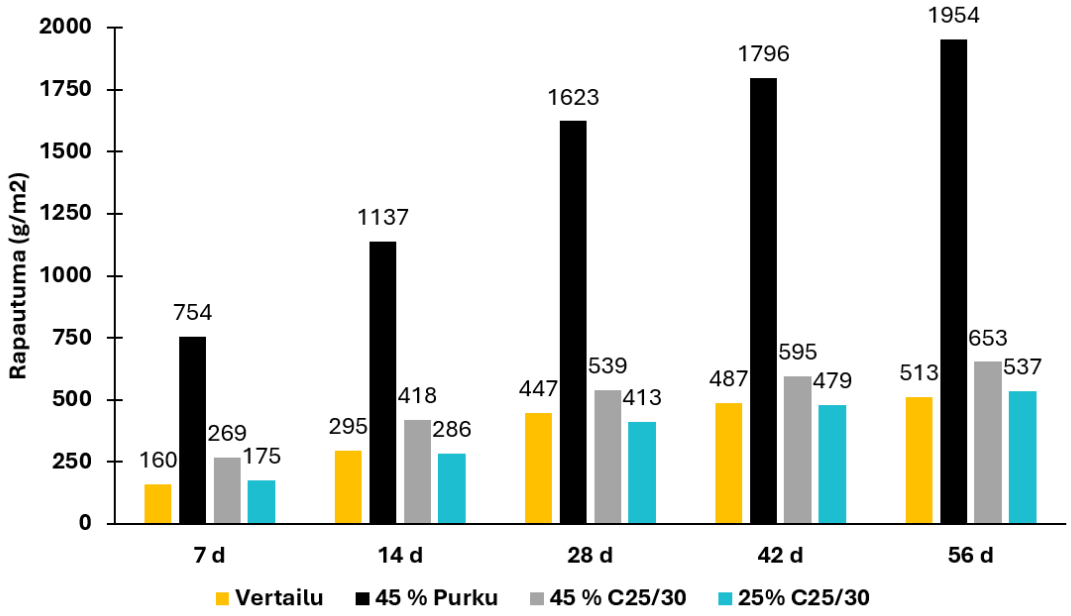
lujuudenkehitykseen, sillä niin 7 kuin 28 vuorokauden iässä purkubetonia sisältävän betonin puristuslujuus oli korkeampi kuin puhtaampaa C25/30-mursketta sisältävän betonin puristuslujuus samalla 45 prosentin korvausasteella. Ero purkubetonin hyväksi voi selittyä karkeammalla rakeisuudella (Kuva 3) sekä ikääntyneemmällä, kauemmin lujittuneella, murskeen lähtöaineella.



Kuva 4. Kierrätyskiviainesta sisältävien testibetonien puristuslujuus 7 ja 28 vuorokauden iässä.

Kuvassa 5 on testibetonien pakkas-suolarasituskokeen tulokset. Kaikki testibetonit saavuttivat yli 75 prosenttia lopullisesta kokonaisrapautumasta 28 vuorokauden kohdalla, minkä jälkeen rapautuminen hidastui. Vertailubetonin rapautuminen oli vähäisintä. Purkubetonia sisältä betoni rapautui huomattavan paljon: 56 vuorokauden rapautuma (1954 g/m^2) oli lähes nelinkertainen vertailubetoniin nähden. C25/30-betonien rapautuma sen sijaan oli varsin lähellä vertailubetonin rapautumaa ja vain 27 % (45 % C25/30) ja 5 % (25 % C25/30) korkeampi 56 syklin jälkeen.

Tuloksista voidaan päätellä, että purkubetonin sisältämällä humuksella ja mahdollisilla muilla epäpuhtauksilla on merkittävä ja haitallinen vaikutus betonin pakkas-suolakestävyyteen. Lisäksi purkubetonin ilmamäärä (4,0 %) jäi hieman tavoitteesta, kun taas muilla testibetoneilla saavutettiin yli 5 %:n ilmamäärä, millä voi olla vaikutusta tuloksiin.



Kuva 5. Kierrätyskiviainesta sisältävien testibetonien kumulatiivinen rapautuma pakkas-suolarasituskokeessa (laattakoe).

Kehitetyn kierrätyskiviainesta runkoaineena hyödyntävän betonireseptin toimivuutta testattiin teollisessa mittakaavassa valmisbetoniasemalla. 45 % neitseellisestä karkeasta kiviaineksesta korvattiin purkubetonilla käyttäen samaa reseptiä kuin laboratoriokokeissa. Tulokset olivat pääosin linjassaan laboratoriokokeiden kanssa. Tuoreen massan työstettävyyteen vaikuttavat seikat, kuten notkistimen annostelu, kierrätyskiviaineksen absorptio ja kosteuspitoisuuden määritys sekä vesi-sementtisuhteen hallinta osoittautuivat merkittäviksi teemoiksi skaalattaessa laboratoriokokeiden tuloksia teolliseen mittakaavaan.

Kivet Kiertoon -hankkeen kierrätyskiviaineksen käytön tutkimustulokset osoittavat, että kierrätyskiviaineksen laadulla on vaikutusta betonin lujuus- ja kestävyysominaisuuksiin. Kierrätyskiviaineksen mahdollisesti sisältämät epäpuhtaudet, kuten eloperäinen humus, heikentävät etenkin betonin jäädytys-sulatuskestävyyttä niin karkean kiviaineksen (Kuva 5) kuin sementin (Kuva 8) korvaajana käytettynä. Kierrätyskiviaineksen varastointiin on näin ollen syytä kiinnittää erityistä huomioita laadun varmistamiseksi. Hankkeen tulosten perusteella kiviaineksen puhtauden vaikutus betonin puristuslujuuteen on vähäisempi.

Merkittävimmän käytännön haasteen kierrätyskiviaineksen uudelleenkäytölle kiviaineksena asettaa sen huomattavan korkea veden imukyky eli absorptio neitseelliseen kiviainekseen verrattuna. Korkea absorptio vaikeuttaa betonin tarkan vesi-sementtisuhteen määritystä. Korkeaa vedenimukykyä voidaan kompensoida joko

nostamalla annosveden määrää tai kastelemalla kierrätyskiviaines ennen sekoitusta. [8][9]

2.2. Hienon kierrätyskiviaineksen mekaaninen aktivointi ja käyttö sementtiä korvaavana seosaineena

Betonikiviainekset-standardin (SFS-EN 12620 +A1) mukaan hienoa kiviainesta ovat kiviainekset, joiden ylempi seulakoko on korkeintaan 4 mm (D ≤ 4 mm) [4]. Betonin osa-aineita käsittelevä standardi (SFS-EN 206:2014 + A2:2021) ei aseta suositusta hienojen kierrätyskiviainesten käytöstä [5]. Alitteella tarkoitetaan materiaalia, joka ei ominaisuuksiltaan täytä vaatimuksia uusiokäytölle. Näin ollen 4 millimetrin seulan läpäisevät kierrätyskiviainekset luokitellaan alitteeksi.

Kivet Kiertoon -hankkeen tutkimuksessa vertailtiin kierrätyskiviaineksen valmistuksessa muodostuvia alitteita ja purkujätteen mekaanisessa käsittelyssä syntynyttä alitemateriaalia. Puhtaasta kierrätyskiviaineksesta saatavaa alitetta, eli alle 4 mm:n jaetta, valmistettiin murskaamalla laboratorio-olosuhteissa puristuskoekappaleita, joiden lujuusluokka ja todellinen lujuus oli tiedossa. Testeissä käytetyt puhtaat betonimurskeet olivat lujuusluokiltaan 25/30, 30/37 ja 35/45. Tutkimuksessa käytetty purkumateriaali oli samaa materiaalia, jota käytettiin korvaamaan karkeaa kiviainesta ja joka sisälsi betonimursketta, muovia, betoniteräksiä, puuta, eristemateriaaleja ja tiiltä. Tutkimuksessa käytettyjen murskeiden ominaisuuksien testituloksia on käsitelty kappaleessa 1.2.

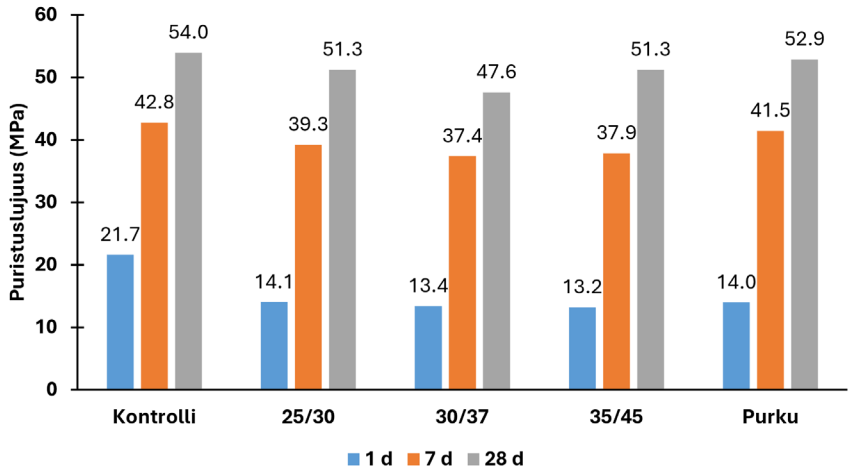
Betonikoekappaleet ja mekaanisen jätteenkäsittelyn alitemateriaali murskattiin BB 300 -leukamurskaimella (Retsch GmbH, Haan, Saksa) 1 mm:n asetuksella. Murskauksen jälkeen materiaalista seulottiin talteen alle 500 µm:n jakeet. Alitemateriaalit seulottiin murskauksen jälkeen, jotta voidaan varmistua siitä, että kuulamyllyllä saadaan työstettyä mahdollisimman homogeenistä materiaalia. Seulonnan jälkeen materiaalin saanto, eli <500 µm:n materiaalin osuus, oli 80–90 p-%.

Alite kuivattiin lämpökaapissa ja loppukäsiteltiin kuulamyllyn avulla. Materiaaleja hienonnettiin tunnin ajan TM 300 -kuulamyllyssä (Retsch GmbH, Haan, Saksa). Kuulamyllyn kierrosluku oli 70 kierrosta minuutissa.

Hienonnettuja alitemateriaaleja käytettiin betonin valmistuksessa sementtiä korvaavana sideaineena. Testibetoneissa 20 % sementistä korvattiin alitemateriaaleilla. Betonikokeissa valmistettiin vertailumassoja (kuvaajissa Kontrolli), jotka toimivat referenssinä alitemassoista saaduille tuloksille.

Betonikokeissa tavoitteena oli saada aikaan pakkasenkestävä, riittävän korkean alkulujuuden saavuttava betoni. Betonin suunniteltiin olevan lujuusluokkaa 30/37. Massan notkeusluokaksi valittiin S4, eli painuman tulisi olla 160–210 mm. Kaikissa betonimassoissa vesi-sementtisuhde oli 0,50.

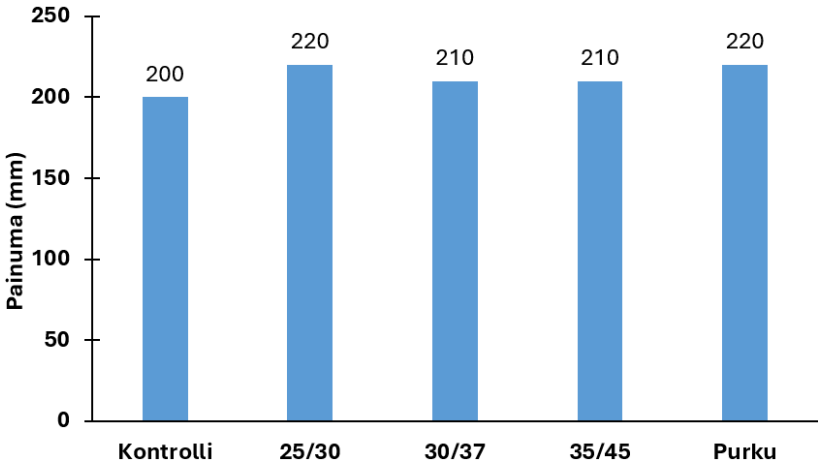
Kuva 6 esittää valmistetuista betonimassoista valettujen testikuutioiden puristuslujuudet 1, 7 ja 28 vuorokauden testausiässä. Betonin lujuus ei laskenut samassa suhteessa sementin korvaamisen kanssa. Kuvasta 6 voi todeta, että vaikka sementtiä vähennettiin 20 %, 28 vuorokauden puristuslujuus aleni enimmillään 12 % puhtaita alitemateriaaleja käytettäessä. Betonissa 28 vuorokauden puristuslujuus aleni alitemassoissa keskimäärin noin 7 %, vaikka sementtiä vähennettiin viidenneksellä. Tämä viittaa siihen, että alitemateriaali omaa hydraulisia ominaisuuksia. Kuulamyllyn aiheuttama materiaaliominaisuuksien paraneminen johtuu hydratoitumattoman sementin saamisesta käytettävään muotoon [10].



Kuva 6. 20 m-% kierrätyskiviainesten alitetta sisältävien testibetonien puristuslujuus 1, 7, ja 28 vuorokauden iässä.

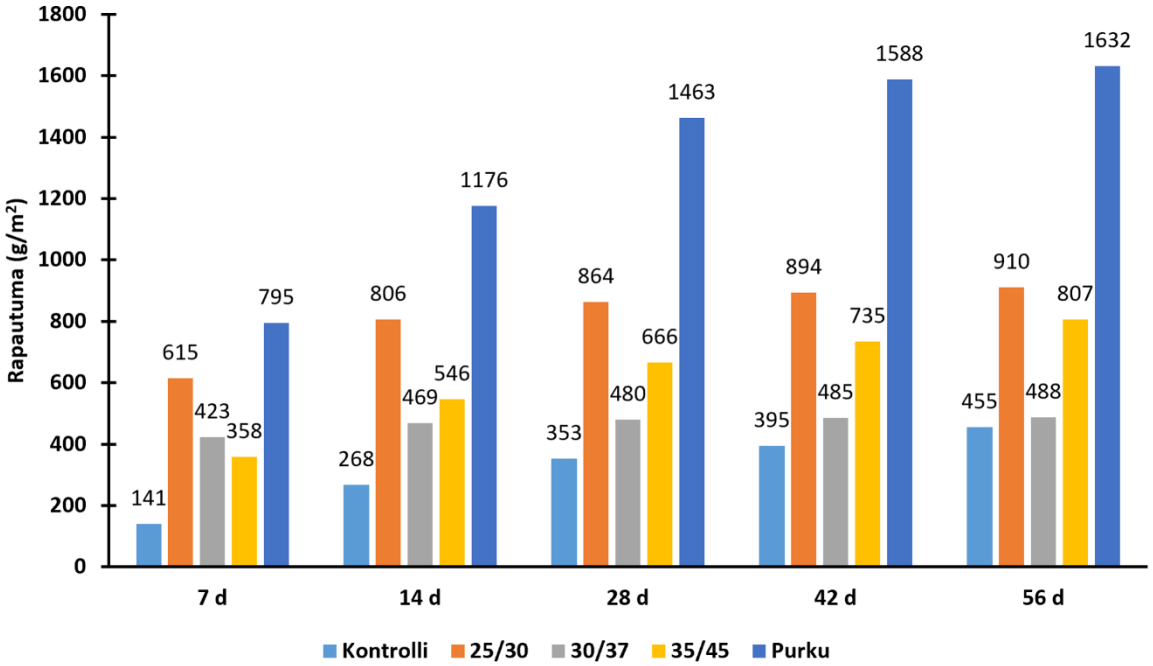
Kuvasta 7 voi todeta kaikkien betonimassojen saavuttaneen tavoitellun notkeusluokan S4. Alitemateriaaleilla valmistettujen massojen painuma oli 210–220 mm, kun kontrollimassojen keskipainuma oli 200 mm.

Tutkimustulosten perusteella puhtaista kierrätysbetoneista valmistetut alitemateriaalit paransivat betonimassojen työstettävyyttä verrattuna kontrollimassoihin. Työstettävyyden paraneminen johtuu alitemateriaalien partikkelikoosta ja ominaispinta-alasta. Kuulamyllyllä käsiteltyjen alitemateriaalien d50-arvot olivat suurempia kuin portlandsementillä. Tämä pienentää vaihtoehtoisen sideaineen ominaispinta-alaa ja siten vedentarvetta. Humustestin (Kuva 2) perusteella purkualitteessa oli niin paljon orgaanista materiaalia, että materiaali oli kelvotonta. Nämä orgaaniset materiaalit todennäköisesti sitovat vettä heikentäen sementtipastan työstettävyyttä.



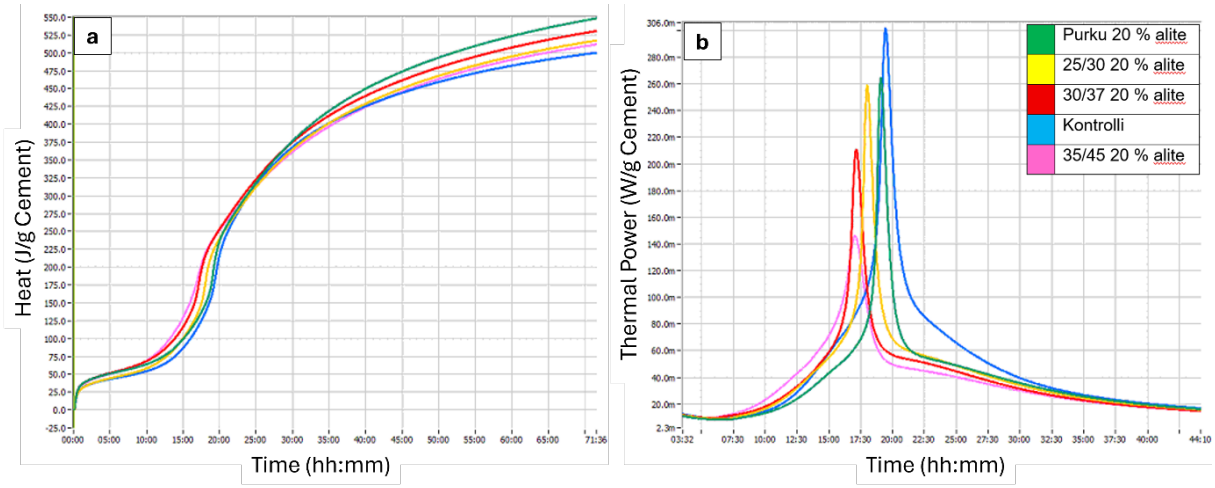
Kuva 7. 20 m-% kierrätyskiviainesten alitetta sisältävien tuoreiden betonimassojen painuma.

Kuvasta 8 voi todeta, että alitemateriaalin laadulla on suuri vaikutus betonin pakkasenkestävyyteen. Testissä vain 30/37 ja kontrolli saavuttivat XF 2 -luokan 50 ja 100 vuoden suunnittelukäyttöiän vaatimat raja-arvot. 50 vuoden suunnittelukäyttöiälle $m_{56} \leq 650$ g/m^2. Sadan vuoden suunnittelukäyttöiälle arvo on $m_{56} \leq 500$ g/m^2.



Kuva 8. 20 m-% kierrätyskiviainesten alitetta sisältävien testibetonien kumulatiivinen rapautuma pakkas-suolarasituskokeessa (laattakoe).

Kalorimetrianalyysit osoittivat, että kuulamyllyllä käsiteltyjen alitemateriaalien hydrataatioenergia sementtigrammaa kohden oli korkeampi kuin kontrollilla (Kuva 9a). Kuvasta 9b taas voi havaita, että betonikokeissa hydrataatioreaktion silikaattivaiheen huippu saavutettiin alitemateriaaleja käyttämällä aikaisemmin kuin kontrollimassalla. Alitemateriaaleista purkualite saavutti silikaattivaiheen viimeisenä, mutta kuitenkin ennen kontrollimassaa. Silikaattivaiheen huipun aikaistuminen viittaa siihen, että mekaaninen aktivointi lisää materiaalin rekatiivisuutta ja nopeuttaa täten varhaislujuuden kehitystä.



Kuva 9. 20 m-% kierrätyskiviainesten alitetta sisältävien laastimassojen hydrataatioenergia a) J/g sementtiä ja b) W/g sementtiä.

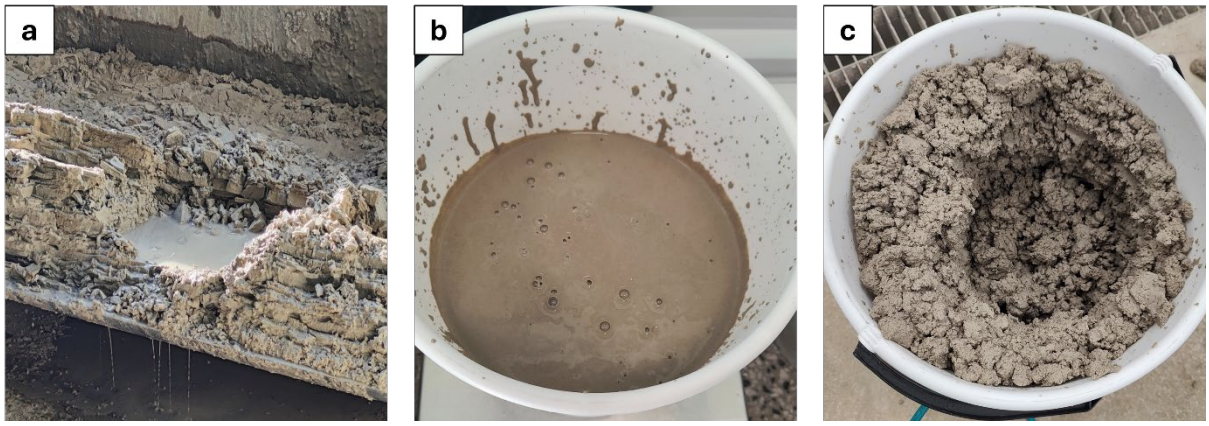
Tutkimustulokset olivat linjassa aiempien tutkimusten kanssa, joissa mekaanisesti aktivoidun kierrätysbetonin hienoaineksen on osoitettu omaavan hydraulista ja pozzolaanista aktiivisuutta. Erityisesti havainto lujuuden suhteellisen pienestä alenemasta sementin korvaamisen yhteydessä tukee aiempaa tutkimusta, jossa on esitetty alitemateriaalien soveltuvan sideainekäyttöön.

Tutkimuksessa saadut tulokset vahvistavat käsitystä siitä, että alitemateriaalien käyttökelpoisuus riippuu voimakkaasti materiaalin alkuperästä, puhtaudesta ja käsittelystä. Puhtaista betonimurskeista valmistetut alitteet osoittautuivat huomattavasti potentiaalisemmiksi sementinkorvaajiksi kuin purkujätteen mekaanisen käsittelyn ohessa syntynyt alitemateriaali.

3. Betoniteollisuuden sivuvirtamateriaalit

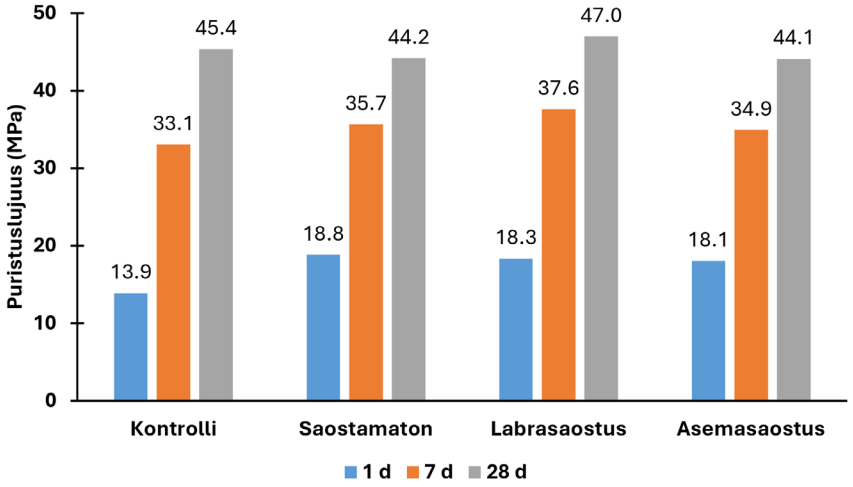
Valmisbetonin tuotannon merkittävimmät sivuvirrat muodostuvat betoniasemalle palautuvasta ylimääräbetonista sekä betoniautojen pesussa muodostuvasta lietteestä. Valmisbetoniasemilla on käytössään menetelmiä, joilla suurin osa lietteen vedestä sekä karkea kiviaines saadaan erotettua sementtipitoisesta lietteestä. Kivet Kiertoon -hankkeen tutkimuksissa keskityttiin erityisesti kehittämään betonin sementtipitoisen pesulietteen uudelleenkäyttöä sementin korvaajana.

Tutkimuksen kohteena oleva liete käsiteltiin samalla tavalla kuin alitemateriaalit, joiden prosessointi on kuvattu edellisessä kappaleessa 2.2. Kuivatusprosessi oli huomattavasti pidempi kuin alitemateriaaleilla, koska lietteestä vettä oli jopa 60 p-%. Laastikokeissa korvattiin 20 m-% käytetystä sementistä kuivatulla ja jauhetulla pesulietteellä. Lietettä saostettiin kaupallisella saostinaineella. Lietteestä testattiin saostamatonta, betoniasemalla saostettua ja laboratoriossa valmistajan suosittelemalla annostuksella saostettua lietettä. Lietteen homogenisointi helpottaa saostamista laboratorio-olosuhteissa.

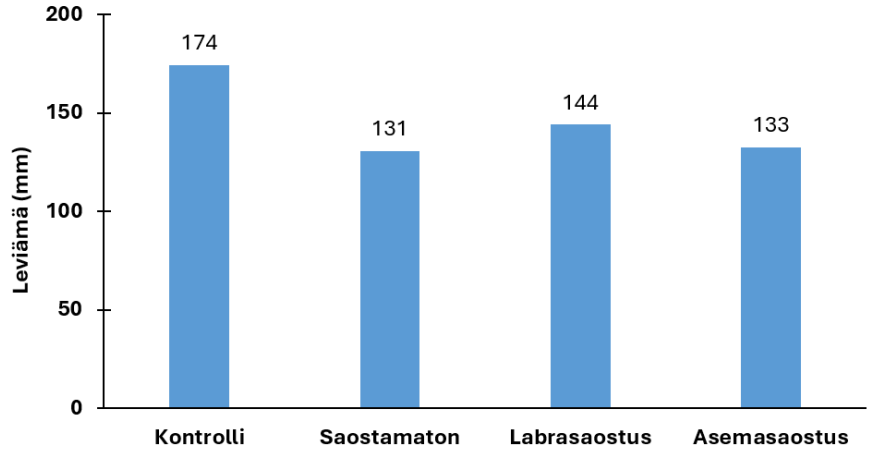


Kuva 10. Betonin pesulietettä. Betoninaseman altaasta nostettua lietettä (a), laboratoriossa homogenisoitua lietettä (b) ja laboratoriossa saostettua lietettä (c).

Kuvan 11 perusteella voidaan todeta, että betonipesulietteen käytöllä ei ollut negatiivista vaikutusta prismakoekappaleiden puristuslujuuteen. Myöskään lietteen saostusaineella ei ollut merkittävää vaikutusta lujuuteen. Sen sijaan liete vaikutti huomattavasti massan työstettävyyteen (Kuva 12), ja keskimäärin massojen leviämä laski noin 38 mm kontrollilaastiin verrattuna.



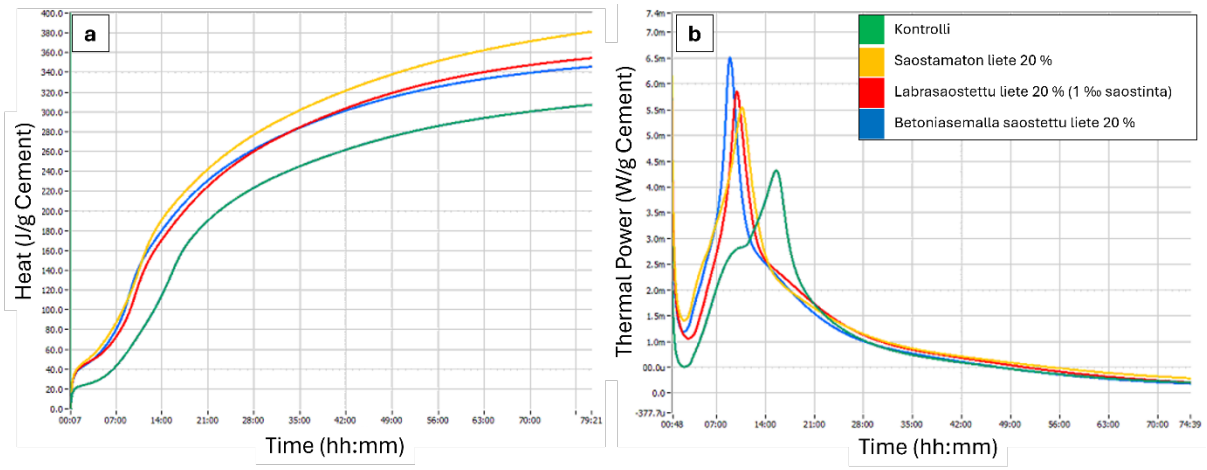
Kuva 11. 20 m-% pesulietettä sisältävien laastikoekappaleiden puristuslujuus 1, 7 ja 28 vuorokauden iässä.



Kuva 12. 20 m-% pesulietettä sisältävien tuoreiden laastimassojen leviämä.

Kun tarkastellaan kontrollimassasta vapautuneen energian määrää sementtigrammaa kohden, voidaan kuvasta 13a todeta lietteen hydrataatiossa vapautuvan energiaa.

Lietteen käsittely kuulamyllyllä tuotti materiaalille todella reaktiivisen silikaattivaiheen verrattaessa kontrollimassaan. Kuvasta 13b voi todeta lietteen aiheuttaman silikaattivaiheen olevan voimakkaimmillaan noin yhdeksän tunnin kuluttua massan valmistamisesta.



Kuva 13. 20 m-% pesulietettä sisältävien laastimassojen hydrataatioenergia a) J/g sementtiä ja b) W/g sementtiä.

4. Kierrätys- ja sivuvirtamateriaalien hyödyntäminen betonissa

4.1. Eristelasivillan käyttö sementtiä korvaavana seosaineena

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko eristemateriaalina käytettävää lasivillaa hyödyntää betonissa sementtiä osittain korvaavana materiaalina sekä miten materiaali vaikuttaa betonimassan ominaisuuksiin. Erityistä huomiota kiinnitettiin materiaalin käsittelyyn sekä sen vaikutuksiin betonimassan työstettävyyteen, ilmamäärään, lujuuden kehittymiseen ja pakkaskestävyyteen.

Ennen betonimassojen valmistusta lasivilla esikäsiteltiin kuulamyllyjauhatuksella, jotta materiaalista saatiin mahdollisimman hienojakoista ja tasalaatuista. Kuvassa 14 on esitetty lasivilla ennen kuulamyllyjauhatusta ja sen jälkeen. Jauhatus muutti materiaalin rakennetta merkittävästi, sillä kuitumainen ja tilaa vievä materiaali muuttui hienojakoiseksi jauheeksi, joka soveltui partikkelikooltaan sementin korvaajaksi.



Kuva 14. Lasivilla käsittelemättömänä (vasen) ja kuulamyllyllä jauhettuna (oikea).

Tutkimuksessa tarkasteltiin hienonnusajan vaikutusta muodostuvan lasivillajauheen partikkelikokoon. Tulosten perusteella jauhatusajan pidentäminen pienensi lasivillan partikkelikokoa merkittävästi. Tämän vuoksi kokeissa päädyttiin käyttämään kuuden tunnin jauhatusaikaa, jolla saavutettiin partikkelikoon d50-arvo 2,4 µm.

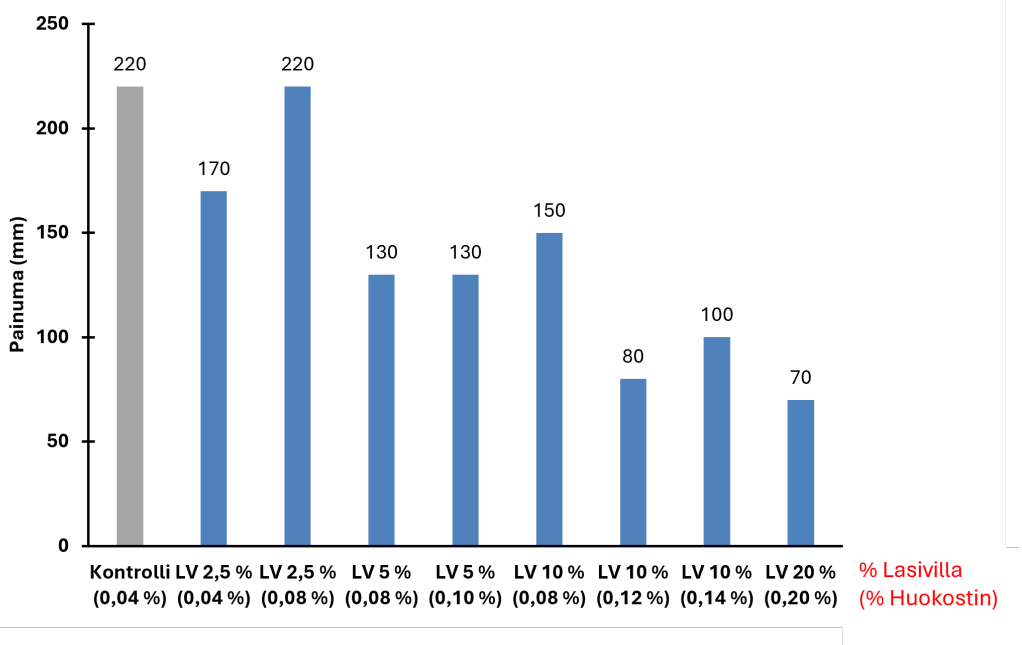
Tutkimuksessa valmistettiin betonimassoja, joissa osa sementistä korvattiin jauhetulla lasivillalla. Sementin massasta korvattiin 2,5 %, 5 %, 10 % ja 20 % lasivillalla.

Betonimassojen valmistuksen aikana havaittiin, että jauhettu lasivilla sekoittui hyvin betonimassaan eikä heikentänyt merkittävästi massan työstettävyyttä. Betonimassat säilyivät tasalaatuisina ja hyvin työstettävinä koko valmistusprosessin ajan.

Betonimassojen ilmamäärämittauksissa havaittiin, että lasivillan lisääminen pienensi betonin ilmamäärää huomattavasti verrattuna kontrollimassaan. Mitä suurempi lasivillan korvausaste oli, sitä enemmän huokostinta tarvittiin tavoitellun ilmamäärän saavuttamiseksi. Tämän vuoksi tutkimuksissa valmistettiin lasivillaa sisältäviä betonimassoja korkeammilla huokostimen annostuksella, jotta massat olivat ilmamäärältään vertailukelpoisia vertailumassan kanssa.

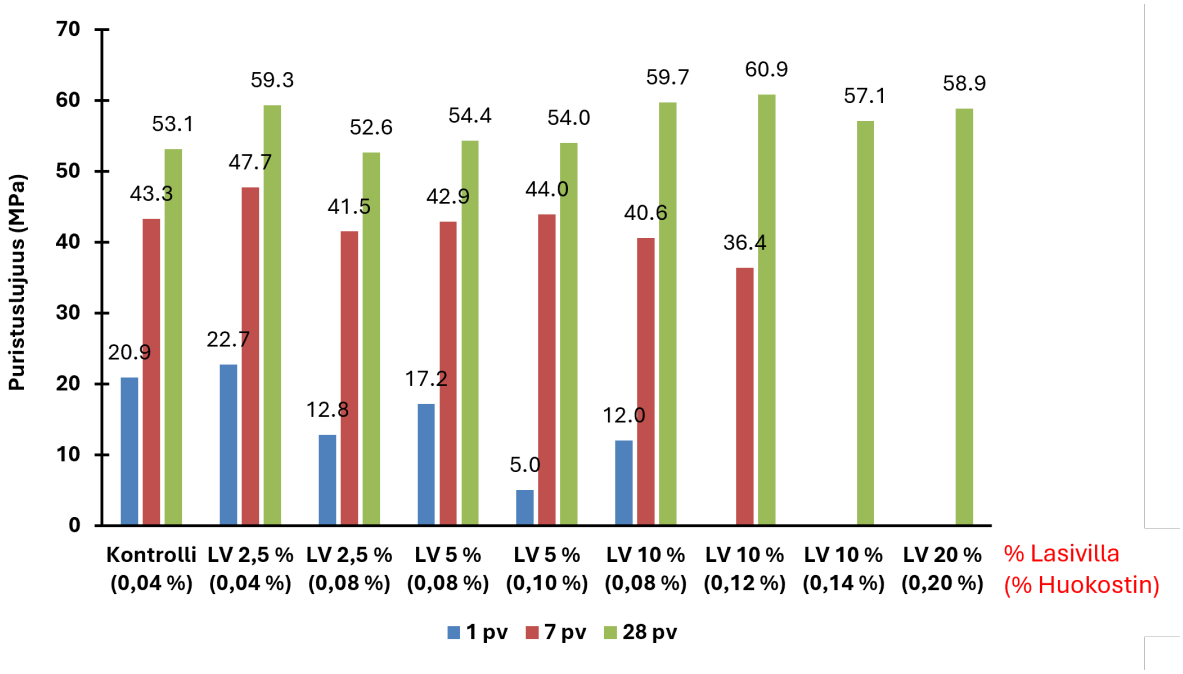
Jauhetun lasivillan vaikutuksia arvioitiin tuoreen ja kovettuneen betonin ominaisuuksien perusteella. Tarkastelussa keskityttiin erityisesti betonimassan työstettävyyteen, ilmamäärään ja puristuslujuuden kehittymiseen.

Kuvassa 15 on esitetty lasivillaa sisältävien betonimassojen painumatulokset. Tulosten perusteella lasivillan lisääminen heikensi betonimassan työstettävyyttä, ja vaikutus voimistui lasivillan määrän kasvaessa. Erityisesti suuremmilla korvausasteilla betonimassa muuttui selvästi jäykemmäksi. Tämä johtuu todennäköisesti lasivillan suuresta ominaispinta-alasta, joka lisää betonimassan sisäistä kitkaa ja aiheuttaa veden sitoutumista.



Kuva 15. Lasivillaa sisältävien tuoreiden betonimassojen painuma. LV = lasivilla. Suluissa käytetty huokostimen määrä (% sementin massasta).

Kuvassa 16 on esitetty lasivillaa sisältävien betonikoekappaleiden puristuslujuustulokset 1, 7 ja 28 vuorokauden iässä. Puristuslujuustulosten perusteella lasivillan vaikutus betonin lujuuden kehittymiseen riippui sekä käytetystä korvausasteesta että huokostimen annostuksesta. Varhaislujuuksissa havaittiin suurta vaihtelua eri betonimassojen välillä, ja erityisesti suuremmat lasivillamäärät hidastivat betonin lujuuden kehittymistä. Yli 10 %:n lasivillalisäyksillä betonin kovettuminen hidastui merkittävästi, minkä vuoksi 20 % lasivillaa sisältävät koekappaleet voitiin poistaa muoteista vasta kolmen vuorokauden kuluttua. 28 vuorokauden tulokset olivat kuitenkin lupaavia, sillä lähes kaikki lasivillaa sisältävät betonimassat saavuttivat kontrollimassaa korkeampia puristuslujuuksia.

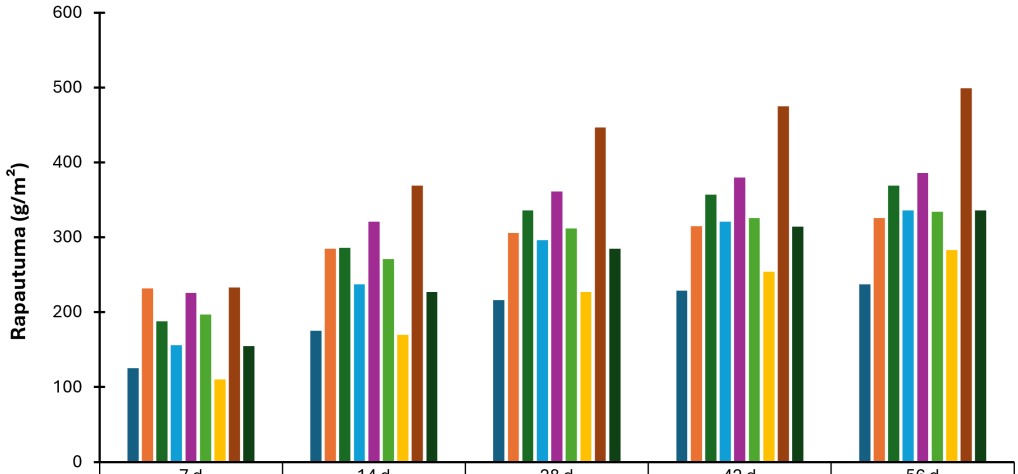


Kuva 16. Lasivillaa sisältävien testibetonien puristuslujuus 1, 7 ja 28 vuorokauden iässä. LV = lasivilla. Suluissa käytetty huokostimen määrä (% sementin massasta).

Lasivillaa sisältävien testibetonien pakkas-suolakestävyyttä arvioitiin laattakokeella, jossa seurattiin koekappaleiden kumulatiivista rapautumista 7, 14, 28, 42 ja 56 syklin aikana. Kuvassa 17 on esitetty lasivillaa sisältävien betonimassojen laattakoetulokset. Tulosten perusteella sekä lasivillan määrä että betonin ilmamäärä vaikuttivat merkittävästi rapautumisen kehittymiseen. Yleisesti havaittiin, että rapautuminen lisääntyi lasivillan määrän kasvaessa erityisesti silloin, kun betonin ilmamäärä jäi alhaiseksi.

Tulokset osoittivat kuitenkin, että riittävä huokostimen annostus paransi pakkas-suolakestävyyttä merkittävästi. Ilmamäärän kasvattaminen pienensi rapautumaa kaikilla tutkituilla lasivillapitoisuuksilla. Parhaat tulokset saavutettiin 5 % lasivillaa

sisältävällä betonimassalla, jonka ilmamäärä oli 4,6 %. Tällöin rapautuminen pysyi koko tutkimusjakson ajan lähellä kontrollimassojen tasoa.



	7 d	14 d	28 d	42 d	56 d
Kontrolli 1 (ilma 5,4 %)	125	175	216	229	237
Kontrolli 2 (ilma 4,8 %)	232	285	306	315	326
Lasivilla 2,5 % (ilma 3,5 %)	188	286	336	357	369
Lasivilla 2,5 % (ilma 4,8 %)	156	237	296	321	336
Lasivilla 5 % (ilma 3,8)	226	321	361	380	386
Lasivilla 5 % (ilma 4,9 %)	197	271	312	326	334
Lasivilla 5 % (ilma 4,6 %)	110	170	227	254	283
Lasivilla 10 % (ilma 3,5 %)	233	369	447	475	499
Lasivilla 10 % (ilma 4,7 %)	155	227	285	314	336

Kuva 17. Lasivillaa sisältävien testibetonien kumulatiivinen rapautuma pakkas-suolarasituskokeessa (laattakoe).

Tutkimuksen tulosten perusteella lasivillan käyttö voi parantaa betonin pitkäaikaislujuutta, vaikka suuremmat lisäysmäärät hidastavatkin betonin varhaislujuuden kehittymistä. Huokostimen annostuksen optimointi on tärkeää, jotta sekä betonin työstettävyys että kestävyysominaisuudet voidaan säilyttää hyvällä tasolla.

Tulosten perusteella 5–10 %:n lasivillalisäys vaikuttaa olevan käytännön kannalta toimivin käyttöalue. Erityisesti 5 % lasivillaa sisältävä betonimassa saavutti hyvän tasapainon työstettävyyden, puristuslujuuden ja pakkas-suolakestävyyden välillä. Vastaavasti 10 %:n lasivillalisäyksellä saavutettiin tutkimuksen suurimmat 28 vuorokauden puristuslujuudet, mutta samalla betonin varhaislujuus ja työstettävyys heikkenivät.

4.2. Tuuliturbiinin lapojen käyttö sementtiä korvaavana seosaineena

Tutkimuksessa selvitettiin käytöstä poistettujen tuuliturbiinin lapojen soveltuvuutta betonin valmistuksessa sementtiä korvaavaksi sideaineeksi. Tavoitteena oli arvioida, voidaanko tuuliturbiinin lapoja hyödyntää sementin osittaisena korvaajana sekä selvittää sen vaikutukset tuoreen betonin ominaisuuksiin sekä kovettuneen betonin puristuslujuuteen ja pakkaskestävyyteen.

Tuuliturbiinin lavat koostuvat pääasiassa lasikuituvahvisteisista komposiittimateriaaleista, jotka sisältävät lasikuitujen lisäksi hartseja, muoveja ja muita polymeeripohjaisia komponentteja. Näiden materiaalien kierrätys on haastavaa, minkä vuoksi niiden hyödyntämiselle uusissa käyttökohteissa on kasvava tarve.

Betonimassat valmistettiin samalla 30 litran reseptipohjalla (Taulukko 3), jota käytettiin myös muiden materiaalien tutkimuksessa. Hienonnetulla tuuliturbiinin lapamateriaalilla korvattiin 2,5 %, 5 % ja 10 % betonissa käytetystä sementistä. Tulosten perusteella arvioitiin tuuliturbiinin lavan soveltuvuutta betoniteollisuuden käyttöön sekä sen mahdollisuuksia toimia osana vähähiilisempää betonituotantoa.

Ennen betonimassojen valmistusta tuuliturbiinin lapaa esikäsiteltiin, jotta materiaalista saatiin mahdollisimman hienojakoista ja sementin korvaajaksi soveltuvaa. Esikäsittelyssä kokeiltiin kahta eri menetelmää. Ensimmäisessä menetelmässä tuuliturbiinin lapoja sahattiin pienempiin osiin, minkä jälkeen materiaali käsiteltiin silppurilla. Tavoitteena oli pienentää materiaalin kokoa mahdollisimman paljon ennen varsinaista hienonnusvaihetta.

Silppurikäsittelyn jälkeen materiaali jauhettiin leikkuumyllyllä (SM 300, Retsch GmbH, Haan, Saksa). Leikkuumyllyn pyörimisnopeudeksi asetettiin 3000 min^{-1}, ja materiaalin partikkelikokoa pienennettiin vaiheittain käyttämällä 6,0, 4,0, 2,0, 1,0, 0,8, 0,6 ja 0,25 mm:n seuloja.

Partikkelikokomittauksissa havaittiin, että edellä kuvatulla käsittelyllä hienonnettu materiaalin partikkelikoossa esiintyi merkittävää vaihtelua. Kahden rinnakkaisen mittauksen partikkelikoot olivat 7,52 µm ja 24,98 µm, mikä viittaa siihen, että materiaalin partikkelikokojakauma ei ollut täysin tasainen.

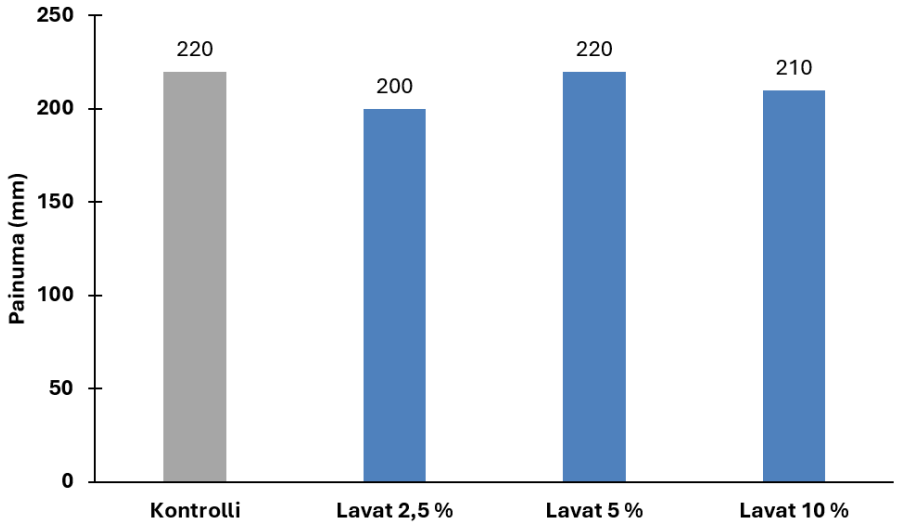
Toisessa menetelmässä silppurivaihe jätettiin pois, ja sahattu materiaali syötettiin suoraan leikkuumyllyyn käyttäen 0,25 mm:n seulaa. Tällä menetelmällä materiaalin partikkelikooksi rinnakkaisissa mittauksissa saatiin 37 µm ja 46,61 µm, mikä osoittaa, että hienojakoista materiaalia ei saatu tuotettua yhtä tehokkaasti kuin vaiheittaisella esikäsittelymenetelmällä.

Partikkelikokomittauksissa havaittu epätasainen partikkelikokojakauma voi johtua tuuliturbiinin lavan heterogeenisestä rakenteesta. Tuuliturbiinin lapa koostuu useista eri materiaaleista, kuten lasikuidusta ja hartsista, joilla on erilaiset mekaaniset

ominaisuudet ja jauhautuvuus. Tämän seurauksena osa materiaalista hienontui pienemmiksi partikkeleiksi, kun taas osa jäi selvästi karkeammaksi.

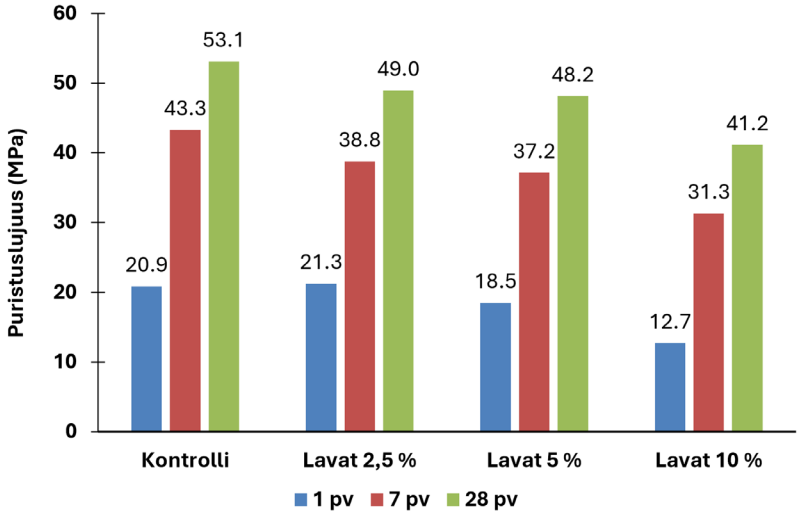
Eri esikäsittelymenetelmiä hyödynnettiin eri betonimassojen valmistuksessa. Ensimmäisellä esikäsittelymenetelmällä, jossa tuuliturbiinin lapaa käsiteltiin ensin silppurilla ja sen jälkeen leikkuumyllyllä, valmistettiin 5 % ja 10 % tuuliturbiinin lapaa sisältävät betonimassat. Toisessa esikäsittelymenetelmässä silppurivaihe jätettiin pois ja tuuliturbiinin lapa syötettiin suoraan leikkuumyllyyn. Tällä menetelmällä valmistettiin 2,5 % tuuliturbiinin lapaa sisältävä betonimassa. Eri prosessointimenetelmistä johtuvat erot hienonnetun lapamateriaalin partikkelikoossa on huomioitava tuloksia tarkasteltaessa.

Painumatulokset (Kuva 18) osoittavat, että jauhemaisen tuuliturbiinin lapamateriaalin käyttäminen sementin korvaajana ei heikentänyt betonimassan työstettävyyttä merkittävästi. Kaikki betonimassat säilyivät hyvin työstettävinä tutkituilla korvausasteilla.



Kuva 18. Jauhettuja tuuliturbiinin lapoja sisältävien tuoreiden betonimassojen painuma.

Kuvassa 19 on esitetty tuuliturbiinin lapaa sisältävien betonimassojen puristuslujuustulokset. Tulokset osoittavat, että tuuliturbiinin lavan käyttö sementin korvaajana heikensi betonin puristuslujuutta korvausasteen kasvaessa. Lujuuden heikkeneminen oli havaittavissa jo yhden vuorokauden iässä korvausasteilla 5 ja 10 %, ja sama trendi jatkui myös 7 ja 28 vuorokauden mittauksissa. Erityisesti 10 %:n korvausasteella lujuuden heikkeneminen oli selvästi havaittavissa jokaisessa testausiässä.



Kuva 19. Jauhettuja tuuliturbiinin lapoja sisältävien testibetonien puristuslujuus 1, 7 ja 28 vuorokauden iässä.

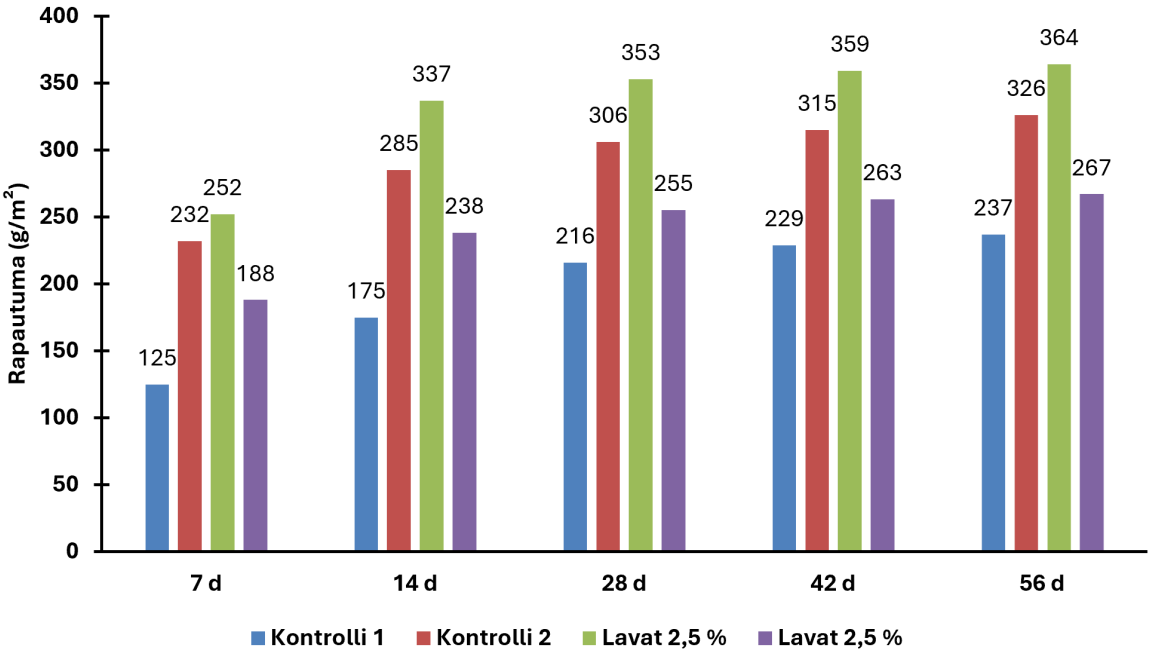
Kuvassa 20 on esitetty tuuliturbiinin lapaa sisältävien betonimassojen laattakoetulokset. Laattakokeet toteutettiin ainoastaan 2,5 % tuuliturbiinin lapaa sisältäville betonimassoille, jotta voitiin selvittää, miten jo pieni määrä tuuliturbiinin lapaa vaikuttaa betonin pitkäaikaiskestävyyteen. Tulokset osoittavat, että jo 2,5 % tuuliturbiinin lavan lisääminen heikensi betonin pakkas-suolakestävyyttä verrattuna kontrollimassaan. Rapautuminen oli suurempaa koko tutkimusjakson ajan, mikä viittaa siihen, että tuuliturbiinin lavan sisältämät hartsit, muovit ja muut komposiittikomponentit heikentävät betonin pitkäaikaiskestävyyttä.

Tuloksissa havaittiin vaihtelua rinnakkaiskappaleiden välillä, mikä voi johtua tuuliturbiinin lavan heterogeenisestä rakenteesta ja materiaalin epätasaisesta jakautumisesta betonimassaan. Vaihtelu ei kuitenkaan ole suurempaa kuin rinnakkaisilla kontrollimassoilla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tuuliturbiinin lapojen hyödyntämistä betonissa rajoittavat erityisesti materiaalin heterogeeninen rakenne sekä osa sen sisältämistä komponenteista, kuten hartsit. Tutkimuksessa havaittiin, että esikäsittely on keskeisessä roolissa materiaalin hyödyntämisessä. Vaiheittainen käsittely silppurilla ja leikkuumyllyllä mahdollisti hienojakoisemman materiaalin valmistamisen, vähensi leikkuumyllyn kuormitusta ja tuotti pienemmän partikkelikoon kuin suora hienonnus leikkuumyllyllä. Samalla havaittiin, että partikkelikoko voi vaikuttaa betonin lopullisiin ominaisuuksiin.

Tuuliturbiinin lapa ei vaikuttanut merkittävästi betonin työstettävyyteen, mutta korvausasteen kasvattaminen heikensi betonin puristuslujuutta ja pakkas-suolakestävyyttä. Vaikutukset korostuivat erityisesti suuremmilla korvausasteilla.

Kokonaisuutena tarkasteltuna tuuliturbiinin lapojen hyödyntäminen betonissa edellyttää huolellista esikäsittelyä sekä korvausasteen optimointia.



Kuva 20. Jauhettuja tuuliturbiinin lapoja sisältävien testibetonien kumulatiivinen rapautuma pakkas-suolarasituskokeessa (laattakoe).

Tutkimus osoitti, että tuuliturbiinin lapojen hyödyntäminen betonissa on mahdollista osana kiertotaloutta, mutta materiaalin laajamittainen hyödyntäminen edellyttää edelleen lisätutkimuksia erityisesti esikäsittelyn, partikkelikoon optimoinnin, pitkäaikaiskestävyyden sekä ympäristövaikutusten osalta.

5. Sementittömät sideaineet

Kivet Kiertoon -hankkeessa tutkittiin myös täysin sementtivapaita sideaineita. Sementin valmistuksessa syntyy suurin osa betonin valmistukseen ja rakentamiseen liittyvistä hiilidioksidipäästöistä, ja jopa 8 % maailman hiilidioksidipäästöistä arvioidaan olevan peräisin sementin valmistuksesta [11]. Vähentämällä rakentamisessa käytetyn sementin määrää voidaan merkittävästi pienentää alan ja käytettyjen rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä.

Sementtiä korvaavien seosaineiden rinnalle on kehittynyt uusi sideaineiden kategoria, täysin sementtivapaat sideaineet. Tällaisia materiaaleja kutsutaan geopolymeereiksi. Geopolymeerien kovettuminen perustuu alumiini- ja piipitoisten materiaalien sekä aktivaattoriliuoksena toimivan emäksen (tai joissain tapauksissa hapon) väliseen epäorgaaniseen polymeroitumisreaktioon. Erinäiset teollisuuden sivuvirrat ovat käyttökelpoisia geopolymeerien lähtöaineita, mikäli niissä on riittävän korkea pii- ja alumiinipitoisuus. Masuunikuona, lentotuhka ja metakaoliini ovat yleisiä geopolymeereissä käytettyjä sivuvirtamateriaaleja. [12]

Viherlipeäsakka on metsäteollisuuden sivuvirtamateriaali, jonka jatkojalostaminen ja hyödyntäminen on vielä vähäistä. Sen emäksisyys ja alkuainekoostumus kuitenkin tukisivat sen käyttämistä geopolymeerien raaka-aineena.

Viherlipeäsakan erottamiseksi viherlipeästä on yleisesti käytössä kaksi menetelmää. Ensimmäisessä viherlipeäsakka suodatetaan kalsiumkarbonaattia sisältävän sakkasuotimen läpi, mikä nostaa erotetun viherlipeäsakan kalsiumpitoisuutta ja massaa. Toisessa menetelmässä viherlipeäsakka erotetaan selkeyttämällä esimerkiksi linkoamalla ilman sakkasuodatinta. [13] Tässä tutkimuksessa käytetty viherlipeäsakka erotettiin linkousmenetelmällä.

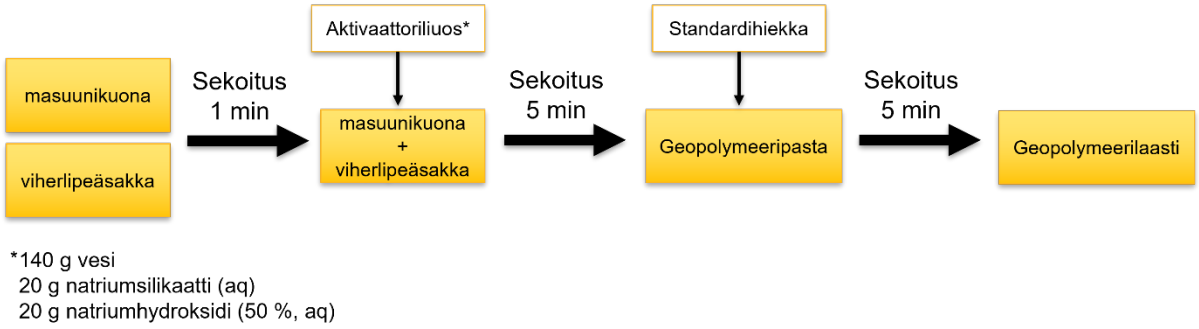
Kivet Kiertoon -hankkeen sementittömien sideaineiden tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka alueellisesti merkittävää sivuvirtamateriaalia, metsäteollisuuden viherlipeäsakkaa, voidaan optimaalisesti hyödyntää sementittömien sideaineiden osana. Tutkimuksessa valmistettujen sementittömien sideaineiden pääraaka-aineesta, masuunikuonasta, korvattiin 5–20 % viherlipeäsakalla. Valmistettujen geopolymeerilaastien ominaisuuksia tutkittiin tuoreen massan työstettävyyden sekä kovettuneiden koekappaleiden puristuslujuuksien näkökulmista.

Viherlipeäsakka vaati esikäsittelyä ennen käyttöä sementtivapaan sideaineen osana. Märän, lietemäisen viherlipeäsakan kosteuspitoisuus on noin 50 %. Märkää viherlipeäsakkaa kuivattiin lämpökaapissa 150 °C:ssa 24 tunnin ajan, jonka jälkeen kuivattua viherlipeäsakkaa hienonnettiin kuulamyllyllä (TM 300, Retsch GmbH, Haan, Saksa) kahden tunnin ajan. Jauhetun viherlipeäsakan partikkelikoko määritettiin

partikkelikokoanalysaattorilla (Flowsync, Microtrac, Montgomeryville, PA, Yhdysvallat). Partikkelikoon d50-arvoksi (mediaani) kahden tunnin hienontamisella saatiin 14,11 µm, mikä on lähellä käytetyn masuunikuonan (KJ400, Finnsementti, Parainen, Suomi) partikkelikokoa (12,65 µm) mahdollistaen hyvän sekoittuvuuden ja reaktiivisuuden.

Masuunikuonapohjaisissa sideaineissa masuunikuonasta korvattiin 5, 10, 15 ja 20 m-% viherlipeäsakalla. Laastimassojen resepteissä käytettiin yksi osa sideainetta (masuunikuona + viherlipeäsakka) ja kolme osaa standardihiekkaa (raekoko 0,08–2,00 mm). Alkaliliuos-sideainesuhteeksi asetettiin 0,51.

Geopolymeerilaastien sekoittamiseen käytettiin EL1 -laboratoriosekoitinta (Eirich,Hardheim, Saksa), ja laastit valmistettiin seuraavan kaavion mukaisesti (Kuva 21). Masuunikuonaa ja jauhemaista viherlipeäsakkaa sekoitettiin ensin minuutin ajan sideaineen homogenisoimiseksi. Seuraavaksi lisättiin emäksinen aktivaattoriliuos (140 g vettä, 20 g natriumsilikaattia (aq) ja 20 g natriumhydroksidia (50 % aq). Natriumsilikaatti ja natriumhydroksidi (NaOH) ovat yleisiä geopolymeerien valmistuksessa käytettäviä aktivaattorikemikaaleja. Aktivaattoriliuoksen ja jauhemaisen sideaineen seosta, geopolymeeripastaa, sekoitettiin viisi minuuttia, jonka jälkeen lisättiin standardihiekka ja sekoitettiin vielä viisi minuuttia.

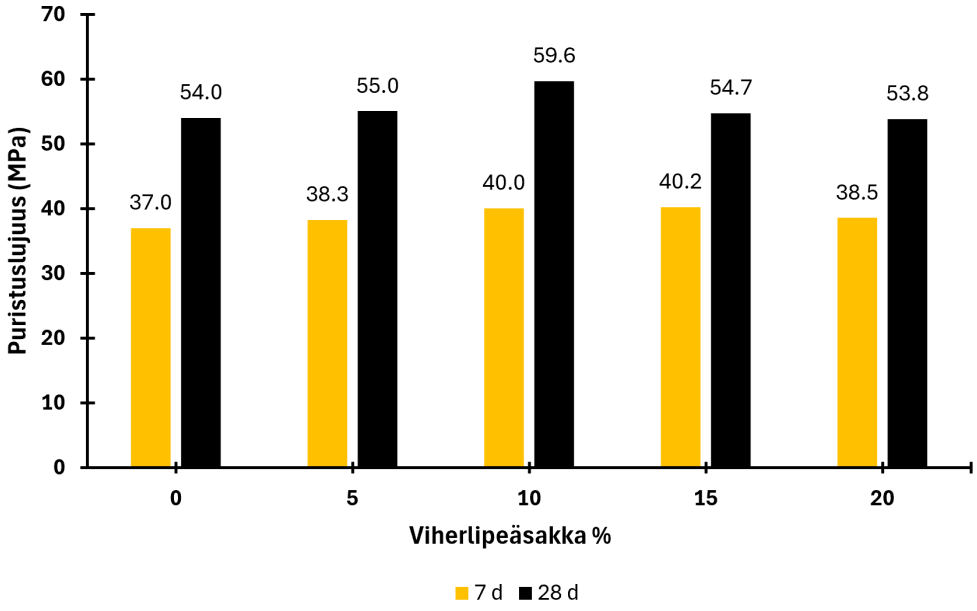


Kuva 21. Geopolymeerilaastien sekoitusmenetelmä.

Tuoreiden laastien työstettävyyttä tutkittiin määrittämällä niiden notkeus iskupöydällä. Isotermisellä kalorimetrillä (I-Cal 2000 HPC, Calmetrix, Needham, Yhdysvallat) tutkittiin laastien kovettumisen hydrataatioreaktioita reaktioissa vapautuvan lämpöenergian kautta. Kalorimetrimittaukset kestivät 72 tuntia 20 °C:n lämpötilassa.

Tuoreet geopolymeerilaastit valettiin 40x40x160 mm:n muotteihin ja tiivistettiin tärytyspöydällä. Testikappaleet purettiin vuorokauden jälkeen valamisesta ja säilytettiin suljettavissa muovipusseissa testausikään saakka. Testikappaleiden puristuslujuudet määritettiin 7 ja 28 vuorokauden iässä.

Tutkimuksen puristuslujuustulokset on esitetty kuvassa 22. Vertailulaastin, jonka sideaine koostui pelkästään masuunikuonasta, puristuslujuus 7 vuorokauden iässä oli 37,0 MPa ja 28 vuorokauden iässä 54,0 MPa. Paras puristuslujuus 28 vuorokauden iässä saavutettiin, kun 10 m-% masuunikuonasta korvattiin viherlipeäsakalla (59,6 MPa). Myös 5 ja 15 prosentin korvausmäärillä puristuslujuus oli vertailulaastia korkeampi, tosin ero oli vain 0,7–1,0 MPa. Kaikilla testilaasteilla saavutettiin vertailukelpoinen puristuslujuus vertailulaastin nähden niin 7 kuin 28 vuorokauden iässä. Viherlipeäsakan puristuslujuutta parantava vaikutus pohjautuu todennäköisesti sen alkalisuuteen, joka on merkittävä lujuudenkehitykseen vaikuttava tekijä geopolymeereissä. Toisaalta korkea osuus viherlipeäsakkaa (20 m-%) vaikuttaa kielteisesti puristuslujuuteen matalampaan nähden, mikä viittaa siihen, että sakan reaktiivisuus on masuunikuonaa vähäisempää. Matalampi reagoivan masuunikuonan määrä vaikuttaa heikentävästi puristuslujuuteen.

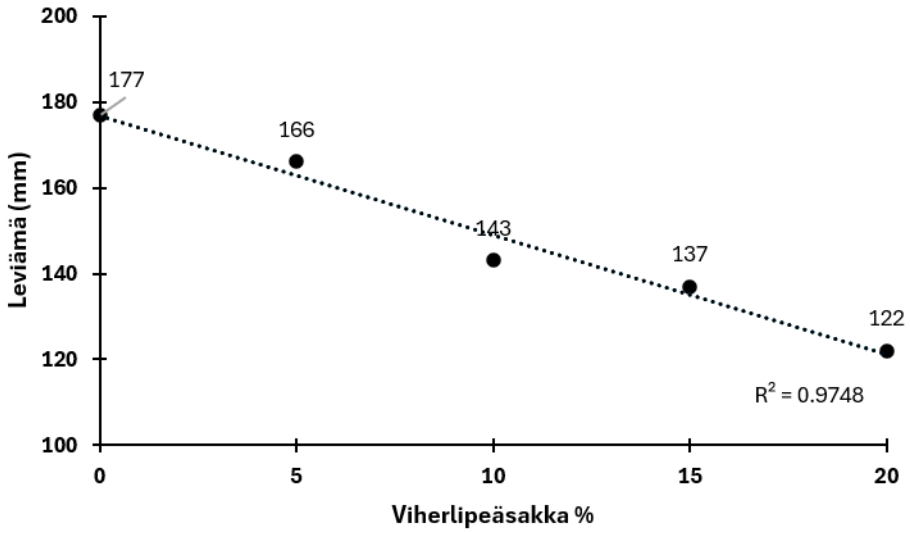


Kuva 22. Geopolymeerilaastien puristuslujuus 7 ja 28 vuorokauden iässä. Vertailulaastin (0 %) masuunikuonasta korvattiin 5, 10, 15 ja 20 m-% viherlipeäsakalla.

Viherlipeäsakan käyttö masuunikuonan korvaajana heikensi työstettävyyttä kaikissa testimassoissa, ja leviämän arvo laski varsin lineaarisesti viherlipeäsakan massaprosentin funktiona (Kuva 23). Kun 20 m-% masuunikuonasta korvattiin viherlipeäsakalla, leviämä laski noin 31 %, kun taas 10 m-%:n osuudella lasku oli noin 19 %. Työstettävyyden näkökulmasta 5 m-% viherlipeäsakkaa riitti takaamaan käyttökelpoisen notkeuden ja vertailulaastia paremman lujuuden. On kuitenkin huomionarvoista, että vaikka kaikkien testilaastien puristuslujuudet olivat vähintään

samaa tasoa vertailulaastin kanssa, viherlipeäsakan käytön aiheuttama heikentynyt työstettävyys asettaa haasteita niiden tekniselle soveltuvuudelle pelkkään masuunikuonaan perustuvan sementittömän sideaineen korvaajana.

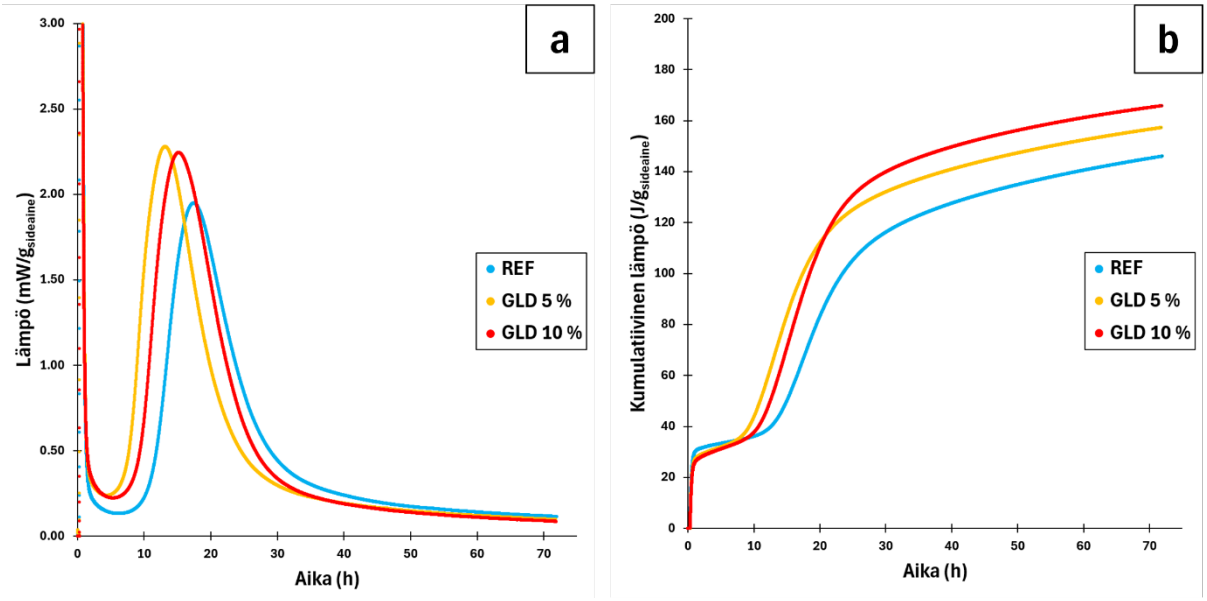
Kirjallisuudesta löytyy viitteitä, että viherlipeäsakan lämpökäsittely voi pienentää sakan haitallista vaikutusta laastin työstettävyyteen [14]. Teollisen hyödyntämisen näkökulmasta sivuvirtamateriaalien prosessoinnin minimointi olisi tavoiteltavaa prosessointikulujen ja -ajan vähentämiseksi, joten kuivauslämpötilaa korkeampi lämpökäsittely voi laskea materiaalin käytön teollista potentiaalia energiaintensiivisyytensä vuoksi.



Kuva 23. Tuoreiden geopolymeerilaastien leviämä. Vertailulaastin (0 %) masuunikuonasta korvattiin 5, 10, 15 ja 20 m-% viherlipeäsakalla.

Kuvassa 24 on esitetty geopolymeerilaastien kovettumisreaktioissa (hydrataatio) vapautuva lämpöenergia ajan funktiona. Kuvassa käytetty lyhenne viherlipeäsakalle, GLD, tulee englannin kielestä (green liquor dregs). Tulokset on normalisoitu sideainegrammaa kohden. Kuvassa 24a on reaktioissa vapautuva lämpöenergia milliwatteina, kun taas Kuvassa 24b on reaktiossa vapautunut kumulatiivinen lämpöenergia jouleina. Lämpöenergia watteina kuvaa vapautuvan energian määrää (so. reaktionopeutta) kullakin ajanhetkellä. Käyrän huippu edustaa kiivainta reaktiovaihetta. Geopolymeerien reaktioiden, samoin kuin betonin hydrataationkin, kiivaimmat reaktiot tapahtuvat heti sekoittamisen jälkeen. Isoterminen kalorimetri soveltuu parhaiten myöhempien reaktioiden kuvaamiseen. Vertailulaastin lisäksi kuvassa on esitetty viherlipeäsakkaa sisältävät laastit 5 ja 10 m-%:n korvausosuudella, sillä näissä kahdessa saavutettiin parhaat työstettävyys- ja puristuslujuustulokset vertailulaastiin verrattuna.

Kuvan 24 testilaastien reaktioprofiilit ovat tavanomaisia masuunikuonapohjaisille geopolymeereille [15]. Tuloksista voidaan päätellä, että masuunikuonan korvaaminen viherlipeäsakalla geopolymeerilaasteissa aikaistaa reaktiohuippua joillakin tunneilla. Vertailulaastin (REF) reaktiohuippu saavutetaan 17,5 tunnin kohdalla. 10 % viherlipeäsakkaa aikaistaa reaktiohuippua aikaan 15 h ja 5 % viherlipeäsakkaa ajankohtaan 13 h. Samoin kuin puristuslujuuden parantamisen kohdalla, viherlipeäsakan reaktioita kiihdyttävä ja aikaistava vaikutus geopolymeereissä perustuu sen emäksisyyteen. Tutkimuksessa ei testattu testikappaleiden puristuslujuutta yhden vuorokauden iässä, mutta kalorimetrian tulosten perusteella voidaan olettaa, että puristuslujuus tässä iässä olisi korkeampi viherlipeäsakkaa sisältävissä kappaleissa. Esimerkiksi kuvasta 24b nähdään, että reaktio on edennyt huomattavasti vertailulaastia pidemmälle 20 tunnin kohdalla molemmissa viherlipeäsakkaa sisältävissä geopolymeerilaasteissa.



Kuva 24. Geopolymeerilaastien kovettumisreaktioissa vapautuva lämpöenergia ajan funktiona. REF = vertailu, GLD 5 % = 5 m-% viherlipeäsakkaa, GLD 10 % = 10 m-% viherlipeäsakkaa.

Kivet Kiertoon -hankkeessa kehitettyjen viherlipeäsakkaa sisältävien sementittömien sideaineiden, geopolymeerien, hyödyntämiseksi teollisessa mittakaavassa on huomioitava muutamia seikkoja. Viherlipeäsakan koostumus vaihtelee merkittävästi riippuen käytetystä erotusmenetelmästä ja siitä, minkä puulajin jalostuksen sivuvirtana viherlipeäsakkaa on muodostunut. Vaihteleva koostumus on tyypillistä sivuvirtamateriaaleille. Emäksisten aktivaattoriliuosten säilytys, varastointi ja syöttö voivat vaatia erillisjärjestelyjä, myös työturvallisuuden näkökulmasta. Lisäksi viherlipeäsakan prosessointi, kuten hienontaminen ja lämpökäsittely, vaatinee arvoketjuun uuden toimijan. Rakennusmateriaaleihin liittyvä lainsäädäntö ja CE-

merkinnän vaatimukset ovat merkittäviä tekijöitä, jotka ohjaavat uusien sivuvirtamateriaalien mahdollista jatkojalostusta valmiiksi tuotteiksi.

Lähteet

[1] SFS-EN 12390-2:2019. Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten, (2019).

[2] SFS-EN 933-11 + AC. Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 11: Karkean uusiokiviaineksen osa-aineiden luokittelutesti, (2009).

[3] SFS-EN 1744-1 + A1. Kiviainesten kemiallisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Kemiallinen analyysi, (2013).

[4] SFS-EN 12620 + A1. Betonikiviainekset, (2008).

[5] SFS-EN 206:2014 + A2:2021. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus, (2021).

[6] Roskilde Municipality Contact, Recycling of concrete, From pilot project to a permanent change in practices, A guide for owners of construction projects, (2021).

[7] DS/EN 206 DK NA:2023 Concrete - Specification, performance, production and conformity - Rules for application of EN 206 in Denmark, (2023).

[8] M. Quattrone, B. Cazacliu, S.C. Angulo, E. Hamard, A. Cothenet, Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production?, Constr. Build. Mater. 123 (2016) 690–703. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.019.

[9] C. Liang, H. Chen, R. Li, W. Chi, S. Wang, S. Hou, Y. Gao, P. Zhang, Effect of additional water content and adding methods on the performance of recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. 423 (2024). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135868.

[10] M. Rajczakowska, A. Kothari, T. Buasiri, A. Cwirzen, Recycled and mechanically activated concrete fines as a complete substitute for Portland cement – Feasibility and life cycle assessment, Case Studies in Construction Materials 22 (2025) e04798. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04798.

[11] R.M. Andrew, Global CO2 emissions from cement production, 1928-2018, Earth Syst. Sci. Data 11 (2019) 1675–1710. https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019.

[12] M. Nawaz, A. Heitor, M. Sivakumar, Geopolymers in construction - recent developments, Constr. Build. Mater. 260 (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472.

[13] M. Golmaei, T. Kinnarinen, E. Jernström, A. Häkkinen, Study on the filtration characteristics of green liquor dregs, Chemical Engineering Journal 317 (2017) 471–480. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.104.

[14] J. Rasmus, E. Adesanya, K. Kilpimaa, Utilization of pretreated green liquor dregs as an activator for blast furnace slag: Effect on hydration, phase assemblage, and rheology, J. Environ. Manage. 370 (2024). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123021.

[15] C. Shi, R.L. Day, A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements, Cem. Concr. Res. 25 (1995) 1333–1346.