

Atte Kuusisto

HIENONNETUN PURKUBETONIN KÄYTTÄMINEN UUSIOBETONIN KIER- RÄTYSKIVIAINEKSENA

Opinnäytetyö

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Insinööri (AMK)

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Atte Kuusisto
Työn nimi	Hienonnetun purkubetonin käyttäminen uusiobetonin kierrätyskiviaineksena
Toimeksiantaja	Xamk Bioke-Hanke, Teemu Karttaavi
Vuosi	2021
Sivut	35 sivua, liitteitä 2 sivua
Työn ohjaajat	Anna Eskola ja Sirpa Laakso

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia hienonnetun purkubetonin käyttämistä kierrätyskiviaineksena uusiobetonin valmistuksessa. Työn tavoitteena oli saada tietoa hienoainesta sisältävän kierrätyskiviaineksen vaikutuksesta uusiobetonin puristuslujuuteen sekä ominaisuuksiin tuoreena ja kovettuneena. Työn tilaajana toimi Bioke – Haastavien materiaalien tutkimus ja kierrätyksen edistäminen BioSammossa-hanke.

Työ aloitettiin kirjallisuuteen, betonin suhteitukseen ja aikaisempiin tutkimustuloksiin perehtymällä. Teoriaosuudessa käsitellään aikaisempaa tutkimustietoa, betonin osa-aineilta vaadittuja standardeja sekä kirjallisuutta referoiden. Teoria sisältää betonin kiviaineksille asetettuja laatuvaatimuksia, kuten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus.

Työn käytännön osuudessa valmistettiin viisi betonimassaa, joista yksi oli tavanomainen kierrätysmateriaaleja sisältämätön ja neljässä uusiobetonissa tutkittiin erisuuruisia kierrätyskiviainespitoisuuksia. Saaduilla tuloksilla tilaaja saa tietoa hienoainespitoisen kierrätyskiviaineksen käytön vaikutuksesta uusiobetonin puristuslujuuteen.

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan hienoainesta sisältävän kierrätyskiviaineksen käyttäminen ei vaikuttanut betonin puristuslujuuteen merkittävästi. Betonin työstettävyyteen kierrätyskiviaineksella havaittiin olevan jäykistävä vaikutus ja betonia notkistavan lisäaineen tai suuremman vesimäärän käytön merkitys korostuu työstettävyyden säilyttämiseksi.

Asiasanat: betoni, uusiokäyttö, puristuslujuus

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Atte Kuusisto
Thesis title	The use of crushed recycled aggregate in recycled concrete
Commissioned by	Xamk (Bioke-Project), Teemu Karttaavi
Time	2021
Pages	35 pages, 2 pages of appendices
Supervisor	Anna Eskola and Sirpa Laakso

ABSTRACT

The purpose of this bachelor thesis was to study the properties of recycled concrete and the effects of the use of recycled aggregate in it. The aim of this bachelor thesis was to obtain information from the effect of using recycled aggregate to compressive strength and other properties of concrete. The thesis was commissioned by a project called Bioke- Research on challenging materials and promoting recycling in BioSampo.

The thesis process began with a literature review focusing on the proportioning of concrete. The theory section includes previous research data and the standards required for concrete components. The theory part includes quality standards for concrete aggregates such as the testing of mechanical and physical properties of aggregates.

In the practical part of the thesis, five batches of concrete were made. One of them was ordinary concrete and four contained varying amounts of recycled concrete aggregate. With the results obtained, the client of this thesis received information on the use of recycled concrete aggregate with fine aggregate and its impact on the compressive strength of concrete.

The results of this study showed that recycled concrete aggregate containing fine particles did not significantly affect the compressive strength of concrete. Recycled concrete aggregate was found to have a stiffening effect on the workability of concrete. The importance of using plasticizing admixture or a larger amount of water is essential to maintain workability.

Keywords: concrete, material recovery, compressive strength

SISÄLLYS

SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 OPINNÄYTETYÖN TARKOITUS, TAVOITE JA TUTKIMUSKYSYMYS ...	8
3 OPINNÄYTETYÖN LÄHTÖKOHDAT JA BIOKE-HANKE	8
4 AIKAISEMPAA TUTKIMUSTIETOA UUSIO- JA KIERRÄTYSKIVIAINEKSEN KÄYTÖSTÄ	9
5 BETONIN KIVIAINEKSET	12
5.1 Laatuvaatimukset betonin kiviainekselle	13
5.2 Rakeisuuden määrittäminen.....	14
5.3 Vedenimukyky ja tiheys.....	14
5.4 Kiviainesten kosteuspitoisuuden määrittäminen.....	15
5.5 Sulfaatti- ja kloridi pitoisuudet.....	15
6 UUSIOBETONIN VALMISTUS.....	16
6.1 Betonimurskeen valmistus ja käsittely.....	16
6.2 Rakeisuus	17
6.3 Partikkelikoko	18
6.4 Vedenimukyky ja tiheys.....	19
6.5 Kiviainesten kosteuspitoisuuden määrittäminen.....	20
6.6 Suhteitus	21
7 OPINNÄYTETYÖSSÄ TUTKITTAVAT BETONIMASSAT	22
7.1 Perusmassa	22
7.2 Bioke massa 1, 20 % 0/8 mm korvattu.....	23
7.3 Bioke massa 2, 50 % 0/8 mm korvattu	24
7.4 Bioke massa 3, 60 % 0/8 mm korvattu	25
7.5 Bioke massa 4, 50 % 6/16 mm korvattu	26
7.6 Bioke massa 5, 20 % 0/8 mm ja 50 % 6/ 16 mm korvattu	27

8	JOHTOPÄÄTÖKSET	28
9	OPINNÄYTETYÖN HYÖDYNNETTÄVYYS JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	31
	LÄHTEET	32

KUVALUETTELO

LIITTEET

Liite 1. Kooste betonimassoista ja puristuslujuuksista

Liite 2. Betonimassojen osa-aineiden suhteet ja mittaustulokset

SANASTO

Purkubetoni

Tarkoitetaan rakennuksesta tai rakenteesta purettua kierrätykseen tai jätteeksi päätyvää murskattua betonijätettä.

Uusiokiviaines

on murskaamalla tai betonimassaa pesemällä aikaisemmin rakentamisessa käyttämättömästä betonista valmistettua kiviainesta.

Kierrätyskiviaines

Purkubetonista murskaamalla tai seulomalla valmistettua kiviainesta, jolla voidaan korvata luonnon kiviaineksen käyttöä.

Uusiobetoni

Betonia, jossa on käytetty kierrätyskiviainesta tai uusiokiviainesta osana betonin runkoainetta.

1 JOHDANTO

Rakennusalalla kierrättäminen ja rakennusmateriaalien uusiokäyttö on tärkeää, sillä Suomen kasvihuonekaasupäästöistä kolmannes on peräisin rakentamisesta ja rakennuksista. Ne kiihdyttävät ilmastonmuutosta enemmän kuin autolla ajaminen ja sen vuoksi rakennusala on suuressa asemassa ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Ympäristöministeriön valmisteilla olevassa rakentamisen ohjauksessa on otettu tarkasteluun energiatehokkuuden lisäksi myös rakennuksen elinkaaren alku- ja loppupää, eli rakennusmateriaalien valmistus, rakentaminen, rakennusjätteen syntyminen ehkäisy ja kierrätys. (Ympäristöministeriö 2019.)

Korjausrakentamisen osuus talonrakennusurakoista vaihtelee 50 prosentin molemmin puolin. Korjausrakentamisen päästöt aiheutuvat suurelta osin käytettävistä materiaaleista ja purkujätteiden käsittelystä. Parhaimmassa tapauksessa purettuja rakennusosia voidaan käyttää uudelleen tai niitä käytetään uuden tuotteen raaka-aineena. Metallien kierrätyksellä voidaan vähentää malmin louhimisen tarvetta ja raudan valmistusta. Purkubetonista voidaan valmistaa uusiokiviainesta, jolla korvataan luonnon kiviaineksen käyttöä maarakentamisessa ja betonin runkoaineena. Tällaisten jätemateriaalivirtojen käyttäminen luonnonvarojen sijaan on tärkeässä asemassa hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. (Rakennustieto Oyj 2020.)

Betonimursketta voidaan hyödyntää maarakentamisen lisäksi uusiobetonin kiviaineksena. Purkubetonin tai ylijäämäbetonin hyötykäyttökelpoisuus tulee tutkia MARA-asetuksen ja vaarallisen jätteen raja-arvojen mukaan, jotka tutkitaan akkreditoidussa laboratorioissa. Hyötykäyttö- tai kaatopaikkakelpoisuus on järkevää tutkia ennen betonirakenteiden purkamista. Hyötykäyttöön kelpaava betoni murskataan, jotta sitä on mahdollista käyttää uusiokiviaineksena. Murskauksen suorittamiseen vaaditaan ympäristönsuojelulain mukaan ympäristölupa, jos toiminta on ammattimaista. Tilapäinen betonimurskaus voidaan toteuttaa meluilmoituksella. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017.)

Purkubetonia käytetään Suomessa pääsääntöisesti murskeena teiden pohjarakenteissa, mutta osittain se päättyy myös uusiobetonin valmistukseen. Purkubetonin käyttöä murskeena betonin karkeamman kiviaineksen korvaamiseen on tutkittu aikaisemmin ja tässä työssä keskitytään hienonnetun purkubetonin käyttämiseen kierrätyskiviaineksena betonissa korvaamassa rakeisuudeltaan hienompaa 0/8 mm luonnonkiviainesta.

2 OPINNÄYTETYÖN TARKOITUS, TAVOITE JA TUTKIMUSKYSYMYS

Tämän opinnäytetyöni tarkoituksena on selvittää, miten hienonnettua betonia voi käyttää kierrätyskiviaineksena ja millaisia vaatimuksia kierrätyskiviaineksille on asetettu. Tavoitteena on tutkia kierrätyskiviaineksen käytön vaikutusta betonin tiheyteen ja puristuslujuuteen sekä selvittää, voiko betonista hienonnettua kierrätyskiviainesta käyttää korvaamaan luonnonkiviainesta betonin valmistuksessa.

Tässä opinnäytetyössä on 3 tutkimuskysymystä. Tutkimuskysymykset ovat:

1. Voiko hienonnettua purkubetonia käyttää kierrätyskiviaineksena?
2. Miten kierrätyskiviaineksen käyttö vaikuttaa tuoreen betonin ominaisuuksiin?
3. Vaikuttaako hienon kierrätyskiviaineksen käyttäminen kovettuneen betonin puristuslujuuteen?

3 OPINNÄYTETYÖN LÄHTÖKOHDAT JA BIOKE-HANKE

Hankkeen tavoitteena on kartoittaa haastavien teollisuuden sivuvirtojen ja kierrätysyritysten materiaaleja ja edistää materiaalien hyödyntämistä hienontamalla. Hienontamalla materiaalien pinta-ala, reaktiivisuus ja tasalaatuisuus lisääntyvät, jolloin hyötykäyttö helpottuu. Lisäksi hankkeen tuloksena on tehty muun muassa kartoitus Kymenlaakson teollisuuden sivuvirroista ja kierrätysyritysten materiaaleista, arvioitu potentiaalisimmat materiaalit hienontamiseen ja tehty hienontamiskokeita eri materiaaleille ja saatujen tulosten pohjalta kehitetty prosessia soveltumaan erilaisille materiaaleille.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli hienontaa purkutyömaalta saatua purkubetonia vastaamaan rakeisuudeltaan 0/8 mm luonnonkiviainesta ja 6/16 mm sepeliä, tutkia hienonnetun purkubetonin ominaisuuksia ja sen soveltuvuutta käytettäväksi kierrätyskiviaineksena betonin valmistuksessa. Kierrätyskiviaineksella oli tarkoitus korvata luonnonkiviainesta ja sepeliä erisuuruisilla prosenttiosuuksilla ja valaa koekappaleita puristuslujuuden määrittämistä varten. Tuloksia vertailtiin perusmassasta, jossa ei kierrätyskiviainesta käytetty, valetujen koekappaleiden tuloksiin.

Käytännön osuus toteutettiin betonin hienontamisen osalta Bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSammossa. Kierrätyskiviaineksen tutkiminen, betonin valmistus ja koekappaleiden testaus toteutettiin akkreditoidussa Kymilabsin betonintestauslaboratoriossa, joka sijaitsee Kotkan kampuksen tiloissa.

Aikaisempia tutkimuksia aiheesta etsittiin kirjallisuuskatsauksen avulla, jonka tuloksena löytyi diplomi- ja kandidaatintyö, joissa käsiteltiin purkubetonin käyttämistä murskeena betonin valmistuksessa. Standardeista tai rakennustietoväylän ohjeista ei löytynyt suoraan aihetta käsittelevää ohjeistusta. Työssä käytettiin standardeja kiviainesten testausmenetelmistä soveltamalla niitä. Aikaisempia tutkimuksia käytettiin vertailussa opinnäytetyöni käytännön osuudesta saatujen tulosten kanssa.

4 AIKAISEMPAA TUTKIMUSTIETOA UUSIO- JA KIERRÄTYSKIVIAINEKSEN KÄYTÖSTÄ

Murskatun betonin käyttämistä uusio- ja kierrätyskiviaineksena on tutkittu aikaisemminkin, jotta purkubetonia saisi hyödynnettyä tehokkaammin uudelleen. Aiheeni kannalta kiinnostava tutkimus oli Anna- Maria Niemisen diplomityö, Murskatun betonin hyödyntäminen uusiokiviaineksena betonissa (2015), jossa hän tutki murskatun kierrätyskiviaineksen käytön vaikutusta uusiobetonin ominaisuuksiin. Tärkeimpinä johtopäätöksinä Nieminen kertoo uusiokiviaineksen karkeimpien lajitteiden käytön olevan suositeltavinta, sillä niiden vaikutus uusiobetonin ominaisuuksiin olisi vähäisintä. Tutkimuksen mukaan luonnonkiviainesta voidaan korvata lähes 15 %:n osuudella ilman mekaanisten

ominaisuuksien laadun heikkenemistä. Niemisen tutkimuksen mukaan uusiobetonin valmistuksessa hienompia lajitteita käytettäessä on suositeltavaa käyttää notkistinta, jonka avulla betonin työstettävyys paranee vesi-sideainesuhdetta muuttamatta. Uusiobetonin sekoituksessa kaksivaiheisella menetelmällä, jossa käytettävä vesi lisätään kahdessa osassa, saadaan parhaimmat tulokset luonnon kiviainesta korvattaessa 25–40 % uusiokiviaineksella.

Emmi Asp tutkii kandidaatintyössään, Uusiobetonin käyttö rakentamisessa (2020), betonimurskeen käyttämiseen vaadittavia toimenpiteitä ja vertailee uusiobetonin ominaisuuksia luonnonkiviainesbetonin ominaisuuksiin. Tärkeimpinä lopputuloksina Asp toteaa uusiobetonin käytön olevan mahdollista rakentamisessa, mutta lupaprosessi betonimurskeen käyttämiseen voi olla työläs. Jatkotutkimusten myötä lainsäädäntö voisi kehittyä uusiomateriaalien käyttöä kannustavammaksi ja sen myötä lupaprosessi voi yksinkertaistua. Työssä selvisi, että luonnollisen kiviaineksen korvaamisella betonin valmistuksessa saavutetaan ympäristön kannalta positiivisia vaikutuksia. Luonnollista kiviainesta ei tarvitse kuljettaa suuria määriä ja kaatopaikkajätteen määrä vähenee. Selvityksen mukaan kierrätyskiviaineksen, murskatun betonin, pitoisuuden ollessa 25 % tai vähemmän, uusiobetonin ominaisuudet olivat lähes samanlaiset kuin luonnonkiviaineksella valmistetussa betonissa. Lisäksi sementin määrää ei tarvitse lisätä edellä mainitun kierrätyskiviaineksen prosenttiosuuden kohdalla.

Asko Arola tutki diplomityössään, Use of Recycled Concrete Aggregate in Concrete Manufacturing (2022), kierrätyskiviaineksen käyttöä uusiobetonissa ja sen vaikutuksia betonin vedentarpeeseen, koostumukseen ja puristuslujuuteen. Tavoitteena työssä oli selvittää sallittujen kierrätyskiviainespitoisuuksien kasvattamisen mahdollisuutta. Tutkimuksessa käytettiin purkubetonista ja betonituotannon ylijäämästä valmistettuja kierrätyskiviaineksia sekä luonnonkiviainesta. Tuloksissa havaittiin purkubetonista valmistettua kierrätyskiviainesta sisältävän uusiobetonin suoriutuneen paremmin puristuslujuuden osalta, mutta työstettävyydeltään huonompaa kuin betonituotannon ylijäämästä valmistettua uusiokiviainesta sisältävää uusiobetoni. Tavanomaiseen pelkkää luonnonkiviainesta sisältävään betoniin verrattuna molempien 28 vuorokauden puristuslujuus oli heikompi.

Betonimurskeen uusiokäyttö on helpointa, kun se valmistetaan lujuudeltaan ja muilta ominaisuuksiltaan laadukkaasta lähdemateriaalista, joita voivat olla muun muassa purettavat sillat ja muut lujat sekä erikoislujat kantavat rakenteet. Myös elementtituotannossa syntyvästä ylijäämäbetonista, jonka ominaisuudet tiedetään hyvin, voidaan valmistaa murskattua uusiokiviainesta. Rakentamisessa käyttämättömästä betonista valmistettua murskettä kutsutaan uusiokiviainekseksi. Kierrätyskiviaineksen määrän korvattaessa betonin kiviainesta 10–30 % suuruisen osuuden, perusominaisuudet eivät muutu merkittävästi, mutta betonin säilyvyydessä voi tapahtua muutoksia. Betonin suhteitus voidaan tehdä samalla tavalla kuin tavallista betonia valmistettaessa, mutta vesimäärän tarve kasvaa ja resepti voi vaatia suuremman notkistinmäärän käyttöä kierrätyskiviaineksen määrän ylittäessä 50 %:n osuuden. (Suomen betonitieto 2005.)

Rudus Oy tutkii kierrätys- ja uusiokiviainesten käyttämistä valmisbetonin valmistuksessa, ja tutkimusten perusteella on myös tuotteistanut betonin Uuma-betoni nimellä, joka tulee sanasta uusiomateriaali. Pilottikohteena Uuma-betonilla oli YIT:n asuinkerrostalokohde, jossa betonia käytettiin pysäköintialueen ympärillä olevien tukimuurien perustuksissa. Pilottikohteiden avulla saadaan kerättyä tärkeää tietoa kehitetyn tuotteen soveltumisesta, laboratorio-olosuhteiden ulkopuolella, oikeissa rakentamiskohteissa. Nykyisen lainsäädännön ja standardien puitteissa on mahdollista korvata betonin runkoaineesta enintään 30 % ja Ruduksen laatupäällikkö Jere Toivosen mukaan kyseinen määrä ei aiheuta muutoksia tavallisimmissa betonin rasiusluokissa X0-X4, XD1, XF1 ja XA1. Uuma-betonin valmistuksessa kierrätyskiviainesta käytetään korvaamaan karkeampaa kiviainesta ja Ruduksen testien mukaan jopa 70 % karkean kiviaineksen korvaaminen ei tehnyt betonista huonosti työstettävää, vaikka se vaikutti massaansa sitä jäykistävästi. Valmisbetonin lisäksi Rudus on kehittänyt Uuma-maisematuotteita, kuten pihakiviä, joissa luonnonkiviainesta on korvattu 15 %. (Rudus Oy 2021.)

Betonirakenteen jalostaminen kierrätyskiviainekseksi vaatii ensimmäiseksi kartoituksen uudelleen käytettävistä ja kierrätettävistä rakennusosista. Haitta-

aineiden tutkiminen on pakollista jätteen ympäristökelpoisuuden selvittämiseksi. Haitta-ainepitoisuudet määritetään ennen rakenteiden purkamista, jotta purkutyö voidaan suunnitella siten, ettei hyödynnettävät- ja pilaantuneet rakenneosat sekoitu keskenään. Rakennekoekappaleiden puristuslujuuden määrittämisellä selvitetään purettavan rakenteen betonin laatu. Betonin laadun määrittämisellä selviää käyttökelpoisuus kierrätyskiviaineksen valmistuksessa. Purettu rakenneosat voidaan pienentää iskuvasaralla ennen pulverointia, jotta ne mahtuvat kaivinkoneeseen kiinnitettävän lisälaitteen leukojen väliin. Pulveroinnin jälkeen purkubetoni voidaan murskata työmaalla tai kuljettaa murskattavaksi erilliseen laitokseen, jolle on myönnetty ympäristölupa. (Ympäristöministeriö 2022).

5 BETONIN KIVIAINEKSET

Tässä osiossa selvitetään työn aloittamiseksi tarvittun pohjatiedon sekä työvaiheet kierrätysbetonin saattamiseksi tilaan, jossa sitä voi käyttää betonin valmistuksessa. Seuraavissa kappaleissa mainittuja ohjeita ja standardeja sovellettiin myös kierrätyskiviaineksen tutkimisessa.

Betonin hiilidioksidipäästöt muodostuvat sementin valmistuksesta, osa-ainesten kuljettamisesta betoniasemille, valmisbetonin ja betonielementtien kuljettamisesta rakennustyömaille. Betonielementtejä pyritään käyttämään vielä rakennuksesta purkamisen jälkeen uudelleen tai valmistamaan betonista kiviainesta. (Finnsementti 2022.) Tällä pyritään säästämään luonnonvaroja, ympäristöön positiivisesti vaikuttaen. Betonin valmistuksessa käytetään kierrätys- ja uusiokiviainesta korvaamaan luonnonkiviainesta. Kierrätyskiviaineksella tarkoitetaan rakentamisessa käytetystä aineesta, kuten betonista murskaamalla valmistettua kiviainesta. Uusiokiviaineksella viitataan betonituotannosta yli jääneestä betonista valmistettuun kiviainekseen. Uusiokiviaineksen ominaisuudet, kuten betonin lujuusluokka, ovat paremmin tiedossa kuin purkutyömaalta saatavassa betonimurskeessa. Kierrätyskiviaineksessa on usein myös muita rakentamisessa käytettyjä materiaaleja, kuten eristeitä, puuta ja muita vaikeasti eroteltavia aineita, joita ei uusiokiviaineksessa ole.

5.1 Laatuvaatimukset betonin kiviainekselle

Standardin SFS-EN 12620 + A1 mukaan luonnon lajittaman kiviaineksen 0/8 mm tulee täyttää yleiset rakeisuusvaatimukset raekokonsa d/D ja luokkansa mukaisesti kuvan 1 avulla.

Kiviaines	Koko	Läpäisy massaprosentteina					Luokka G^d
		$2 D$	$1,4 D^{a \& b}$	D^c	d^b	$d/2^{a \& b}$	
Karkea	$D/d \leq 2$ tai $D \leq 11,2$ mm	100	98...100	85...99	0...20	0...5	$G_C85/20$
		100	98...100	80...99	0...20	0...5	$G_C80/20$
	$D/d > 2$ ja $D > 11,2$ mm	100	98...100	90...99	0...15	0...5	$G_C90/15$
Hieno	$D \leq 4$ mm ja $d = 0$	100	95...100	85...99	–	–	G_F85
Luonnon lajittama kiviaines 0/8	$D = 8$ mm ja $d = 0$	100	98...100	90...99	–	–	G_NG90
Koostekiviaines	$D \leq 45$ mm ja $d = 0$	100	98...100	90...99	–	–	G_A90
		100	98...100	85...99	–	–	G_A85
^a Milloin lasketut seulakoot eivät ole tarkasti ISO 565:1990/R20 seulasarjan mukaisia, valitaan niitä lähinnä olevat seulakoot. ^b Epäjatkuvan rakeisuuskäyrän betonille tai muuhun erityiskäyttötarkoitukseen voidaan määrittää lisävaatimuksia. ^c Seulan D läpäisyprosentti voi olla yli 99 massaprosenttia, mutta siinä tapauksessa tulee valmistajan kirjata ja antaa tyyppirakeisuus, josta käyvät ilmi seulat D , d , $d/2$ sekä perusseulasarjan ja lisäseulasarjan 1 tai perusseulasarjan ja lisäseulasarjan 2 mukaiset väliseulat. Seulat, joiden suhde yhtä alempaan seulakokoon on pienempi kuin 1,4 voidaan jättää pois. ^d Muissa kiviainestuotestandeissa on luokille annettu erilaiset vaatimukset.							

Kuva 1. Yleiset rakeisuusvaatimukset SFS-EN 12620 + A1

Luonnon lajittaman 0/8 mm kiviaineksen vaihtelevuuden hallitsemiseksi on myös lisävaatimuksia (taulukko 1), joilla tarkennetaan yleisiä rakeisuusvaatimuksia. Lisävaatimuksilla rajoitetaan kiviaineksen toimituserien välisiä poikkeamia toimittajan ilmoittamasta rakeisuudesta. (SFS-EN 12620 + A1).

Taulukko 1. Lisävaatimukset luonnon lajittamalle 0/8 mm kiviainekselle SFS-EN 12620 + A1

Seula [mm]	Läpäisyn sallitut poikkeamat massaprosentteina
8	± 5
2	± 10
1	± 10
0,250	± 10
0,125	± 3
0,063	± 2

5.2 Rakeisuuden määrittäminen

Kierrätyskiviainesten rakeisuus tulee määrittää standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti, jonka mukaan määritetään myös muiden betonissa käytettävien kiviainesten rakeisuus. Näyte kuivataan vakiomassaan tuuletetussa lämpökaapissa, jonka lämpötila tulee säilyä 110 °C – asteessa $\pm 5\text{ °C}$ asteen tarkkuudella koko kuivatusprosessin ajan. Kuivattu näyte kaadetaan seulasarjaan, jonka seulat ovat punnittu tyhjänä. Näyte kaadetaan seulasarjaan ja sekoitetaan koneellisesti kymmenen minuutin ajan. Sekoituksen pysähdyttyä seulat punnitaan näytteen kanssa ja määritetään massa seulakohtaisesti. Tulokset kirjataan muistiin ja niiden pohjalta luodaan rakeisuuskäyrä seulakoon ja läpäisyprosentin avulla. Rakeisuus tulee määrittää käytetyistä materiaaleista, jotta betonin valmistuksessa käytettyjen kiviainesten määrät saadaan suhteutettua betonin reseptiin. (SFS-EN 933-1: 2013.)

5.3 Vedenimukyky ja tiheys

Vedenimukyvyn ja tiheyden määrittäminen on betonin valmistamisen kannalta tärkeää, sillä arvoja tarvitaan suhteituksessa osa-aineiden määrien laskemisessa ja veden lisäämisen tai vähentämisen tarpeen selvittämiseksi, kiviaineksen vedenimukyvyn mukaisesti. Standardi SFS-EN 1097-6 määrittelee vedenimukyvyn ja tiheyden määrittämisen menetelmät kiviaineksen pienimmän ja suurimman raekoon mukaisesti. Pyknometrinen menetelmä kiviainesrakeille, jotka läpäisevät 4 mm testiseulan ja jäävät 0,063 mm seulalle suoritetaan pesemällä näyte 4 mm ja 0,063 mm seuloilla hienompien raekokojen poistamiseksi. Kaikki 4 mm seulalle jääneet rakeet hylätään. Pesun jälkeen kuivatun näytteen massan (M_4) on oltava vähintään 300 g. Ennen näytteen laittamista pyknometriin punnitaan sen massa täytettynä pelkällä vedellä (M_3), jonka lämpötilan erotus saa olla 2 °C -astetta verrattuna kyllästyneen näytteen ja pyknometrin punnituksessa sisältämään veteen. Kuivattu 0,063 / 4 mm testinäyte punnitaan (M_1) ja upotetaan $22 \pm 3\text{ °C}$ -asteista vettä sisältävään pyknometriin. Ylimääräinen ilma poistetaan näytteestä kallistelemalla pyknometriä. Näyte laitetaan pyknometrissä kyllästymään vesihauteeseen $24 \pm 0,5\text{ h}$ ajaksi. Kylästysvaiheen jälkeen pyknometrissä dekantoidaan pääosa vedestä näytepel-

lille ja näytteestä poistetaan uudelleen loukkuun jäänyt ilma. Lopuksi pyknometri ylitäytetään vedellä uudelleen ja se punnitaan (M_2). Testissä mitattujen massojen avulla laskettiin näennäinen tiheys (ρ_a) (kaava 1). (SFS-EN 1097-6: 2014.)

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (1)$$

5.4 Kiviainesten kosteuspitoisuuden määrittäminen

Kiviainesten kosteuspitoisuuden määrittäminen lämpökuivausmenetelmällä ilmaisee kiviaineksen vapaan veden kokonaismäärän kiviaineksen pinnalta ja kiviainesrakeiden vedelle vapaista huokosista. Kosteuspitoisuuden mittaamisella otetaan huomioon tarvittava veden määrä betonin osa-aineiden suhteuksissa. Testinäyte punnitaan näytepellillä ja laitetaan tuuletettuun lämpökaappiin $110 \pm 5^\circ\text{C}$ lämpötilaan. Peräkkäisten, vähintään tunnin välein, punnustusten eron ollessa korkeintaan 0,1 %, voidaan näytteen todeta saavuttaneen vakiomassan. (SFS-EN 1097-5.)

5.5 Sulfaatti- ja kloridi pitoisuudet

Betonista murskatusta kiviaineksesta tulee selvittää myös vesiliukoisten sulfaattien ja kloridi-ionien pitoisuudet standardin SFS-EN 1744-1 mukaisilla menetelmillä. Kloridi-ionien pitoisuuden arvo on ilmoitettava kierrätyskiviaineksen tilaajalle ja tämän lisäksi tilaaja voi asettaa myös vaatimuksen kloridi-ionien pitoisuudelle. Tässä tutkimuksessa ei edellä mainittuja pitoisuuksia määritetty, mutta rakennuskäyttöön tarkoitettua kierrätyskiviaineksesta tulisi pitoisuudet määrittää. Osa-aineiden luokittelutestissä testinäytteen rakeet lajitellaan käsin standardin SFS-EN 933-11 + AC osa-ainesluettelon mukaisesti. Testin tuloksena saadaan jokaisen osa-aineen prosentuaalinen osuus näytteestä. Tässä tutkimuksessa luokittelutestiä ei tehty, sillä hienonnettavat purkubetoniset kappaleet syötettiin leukamurskaimeen käsin ja samalla poistettiin muut purkubetonin seassa olleet materiaalit.

6 UUSIOBETONIN VALMISTUS

Opinnäytetyössä käytettiin leukamurskainta purkubetonin hienontamiseen ja tarkasteltiin luonnonkiviaineksen korvaamisen vaikutuksia betonin työstettävyyteen sekä lujuuteen. Betonimassojen vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi vesi-sementtisuhde, sekoittaminen ja koekappaleiden valmistus pidettiin vakiona. Kierrätyskiviaineksen partikkelimuodon ollessa luonnonkiviainepartikkelia kulmikkaampi, käytettiin uusiobetonin valmistuksessa tehonotkistinta säilyttämään betonin työstettävyyden, joka mitattiin painumakokeen avulla standardin SFS-EN 12350-2:2019 mukaisesti.

6.1 Betonimurskeen valmistus ja käsittely

Purkutyömaalla betonijäte murskattiin Rubble master rm -100 mobiilimurskaimella, jossa on iskupalkkimurskaimen lisäksi seula, kuljetinhihna murskeelle sekä erillinen magneettinen erotinhihna raudoitteiden ja muiden magneettisten aineiden erottamiselle. Murskattu betonijäte noudettiin sangoissa Umacon oy:n materiaalinkäsittelyalueelta Inkeroisista (kuva 2). Murskeesta otettiin näyte rakeisuuden määrittämistä varten ja lopusta materiaalista hienonnettiin, leukamurskaimella (kuva 3), aistinvaraisesti rakeisuudeltaan luonnonkiviainesta 0/8 mm vastaavaa kierrätyskiviainesta. Valmistetun kierrätyskiviaineksen rakeisuus varmistettiin seulomalla näyte ja tekemällä tarvittaessa muutoksia murskauslevyjen väliseen etäisyyteen.

Leukamurskain on tarkoitettu kovien materiaalien hienontamiseen ja valmistetun murskeen kokojakauma on laaja. Aistinvaraisesti murskattu materiaali on soran kaltaista, mutta kulmikas partikkelimuoto muistuttaa sepeliä. (BioSampo 2022.) Murskaimen avattavan luukun puoleinen murskauslevy on kiinteä. Laitteen sisällä oleva murskauslevy on kiinnitetty epäkeskiseen akseliin, joka liikuttaa levyä elliptisesti. Kun murskeen partikkelikoko alittaa poistoraon leveyden, se putoaa käsin tyhjennettävään keräimeen.



Kuva 2. Purkutyömaalla murskattu purkubetoni

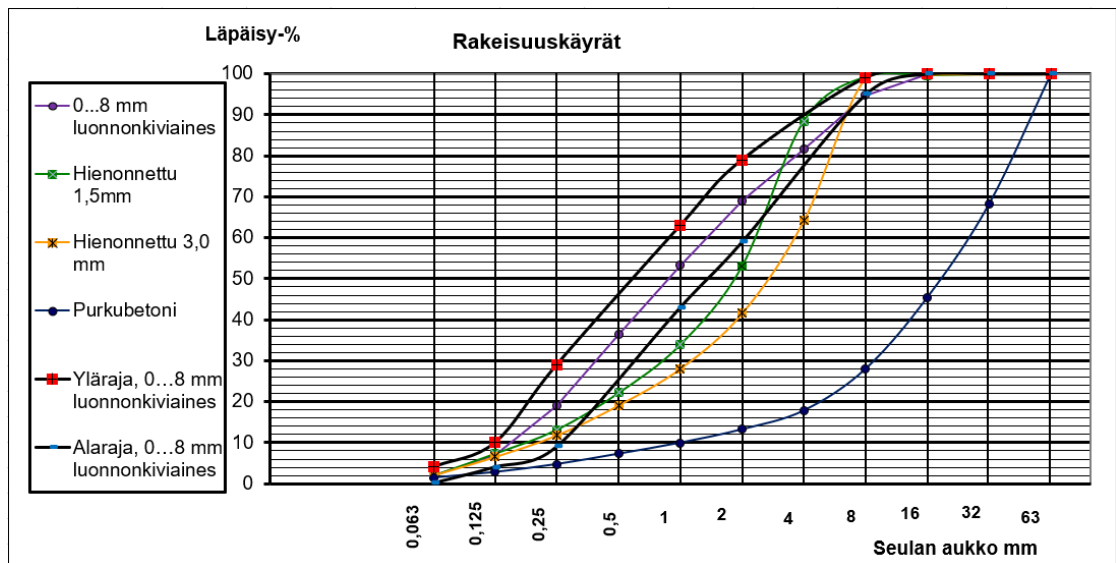


Kuva 3. Leukamurskain

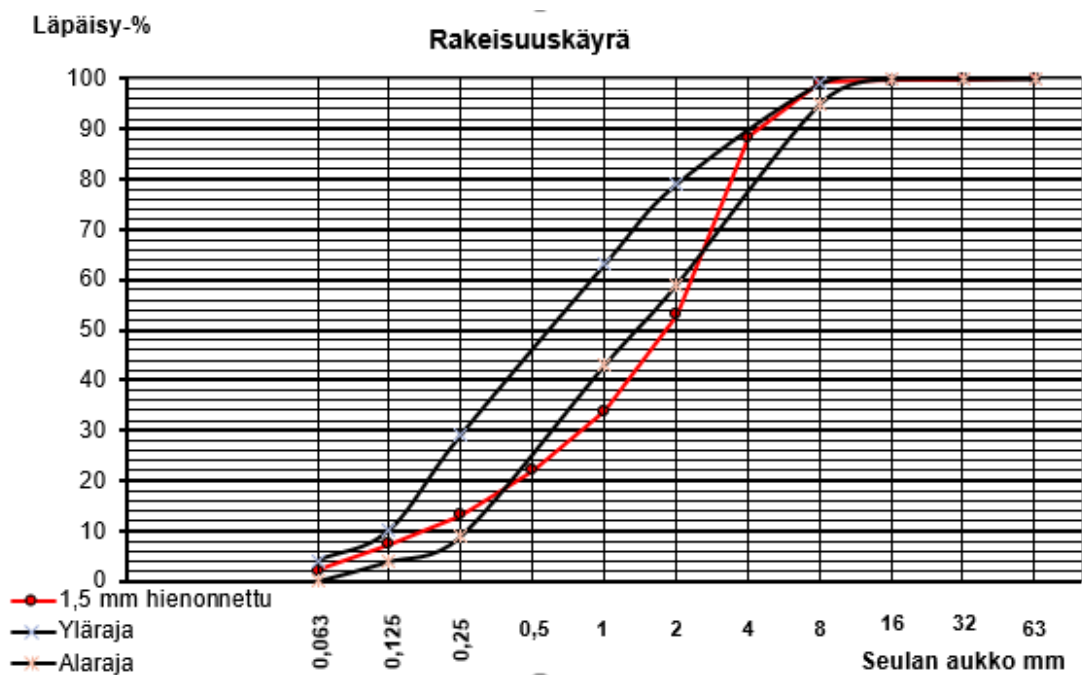
6.2 Rakeisuus

Opinnäytteeni käytännön osuuden seulontojen pohjalta päädyimme käyttämään 0/8 mm kiviaineksen korvaamiseen 1,5 mm leukavälillä hienonnettua kierrätyskiviainesta sen ollessa rakeisuudeltaan lähimpänä korvattavan luonnonkiviaineksen rakeisuutta (kuva 4.) Rakeisuutta verrattiin kiviaineksen toimittajan ilmoittamiin raja-arvoihin, joiden perusteella valmistetun kierrätyskiviaineksen rakeisuus alittaa raja-arvot 0,5 mm, 1 mm ja 2 mm seuloilla. Näytteen massasta prosenttisyksiköinä ilmaistuna 0,5 mm seulalla ero on 3%, 1 mm seulalla läpäisyprosentti on 9 % sallittua pienempi ja 2 mm seulalla ero alittaa sallitun raja-arvon 6 % (kuva 5).

Kuva 4. Luonnonkiviaineksen raja-arvot ja kiviaineksen rakeisuuskäyrät



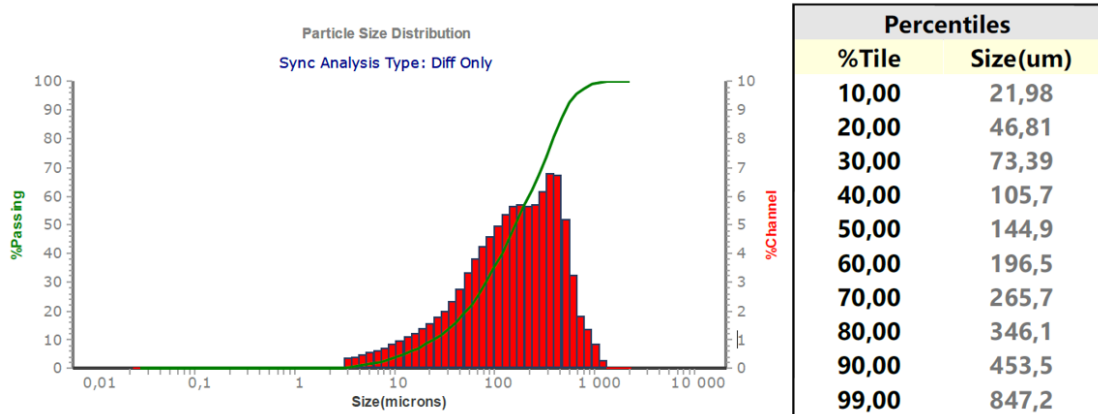
Kuva 5. Kierrätyskiviaineksen rakeisuus ja luonnonkiviaineksen raja-arvot



6.3 Partikkelikoko

Kierrätyskiviaineksen ja 0/8 mm luonnonkiviaineksen hienoaineksesta tehtiin partikkelikokoanalyysi. Analyysin tuloksena saadaan muun muassa kuvaaja

partikkelikokojakaumasta (kuva 4). Partikkelikoko ilmaistaan mikrometreinä ja prosenttiarvo kuvaa, kuinka paljon näytteessä on kyseistä kokoa pienempiä partikkeleita.



Kuva 6. Kierrätyskiviaineksen kokojakauma

Kierrätyskiviaineksen alle 500 μm kokoisessa hienoaineksessa keskijakauma, $D_n(50)$, on 144,9 μm (Kuva 4). Luonnonkiviaineksesta (0/ 8 mm) tutkittiin partikkelikokojakaumaa kahdessa jakeessa, 500–250 μm ja alle 250 μm . Keskijakaumaksi mitattiin alle 250 μm :n analyysissä 166,2 μm , joka on kierrätyskiviaineksen keskijakaumaa suurempi. Kierrätyskiviaineksen näytteeseen sisältyi myös alle 500 μm kokoisia partikkeleita, mikä vaikuttaa keskijakaumaan sitä kasvattavasti verrattuna näytteeseen, jossa olisi vain alle 250 μm :n partikkeleita. Tulosten perusteella voidaan todeta kierrätyskiviaineksen sisältämän hienoaineksen partikkelikoon olevan korvattavaa luonnonkiviainesta pienempää. Hienoja lajitteita sisältävät uusiokiviainekset vaativat notkistimen tai suuremman vesimäärän käyttöä työstettävyyden säilymiseksi, millä voi olla lujuutta laskeva vaikutus betoniin.

6.4 Vedenimukyky ja tiheys

Testinäyte vedenimukyvyn ja tiheyden määrittämiseksi valmistettiin standardin EN 932-1 mukaisesti, kierrätyskiviainesta edustavan näytteen saamiseksi. Standardin SFS-EN 1097-6 mukaan näyte tulisi pestä 4 mm ja 0,063 mm seuloilla, mutta kierrätyskiviaineksen rakeisuus huomioon ottaen oli suorituksen

kannalta järkevämpää käyttää suurempana seulakokona 1 mm seulaa, jotta 0,063 mm seula ei ylikuormittuisi näytteestä (kuva 5).

Valmistettu testinäyte upotettiin pyknometriin 21,7°C (vaatimus $22 \pm 3^\circ\text{C}$) lämpöiseen veteen ja poistettiin loukkuun jäänyt ilma pyknometriä pyörittämällä ja kallistelemalla. Lopuksi pyknometri laitettiin vesihautteeseen, jossa akvaariolämmitin ylläpiti lämpötilaa. Vesihautteen toimivuus testattiin ennen varsinaista käyttöönottoa ja havaittiin lämpötilan pysyvän standardin SFS-EN 1097-6 määrittämän vaatimuksen rajoissa ($22 \pm 3^\circ\text{C}$). Näytettä pidettiin hauteessa 24 h ($\pm 0,5$ h) ajan. Hauteesta nostamisen jälkeen pyknometristä poistettiin uudelleen loukkuun jäänyt ilma, astia ylitäytettiin ja laitettiin kansi astian päälle siten, että kannen alle ei jäänyt ilmaa.



Kuva 7. Testinäytteen pesu

6.5 Kiviainesten kosteuspitoisuuden määrittäminen

Määrittämisessä käytettiin standardin SFS-EN 1097-5, kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa, ohjeita ja laskukaavoja. Laskemisessa käytetyt massojen määritelmät on avattu taulukossa 4. Menettelyssä näytetarjottimet punnittiin tyhjänä ja merkittiin muistiin massa

(M₂) ja tutkittavan näytteen kanssa, jonka jälkeen vähennettiin tarjottimen massa ja merkittiin muistiin näytteen massa (M₁). Testinäyte levitettiin tarjottimelle, punnittiin tarjotin ja tämän jälkeen näytettä kuivattiin tuuletetussa lämpökaapissa 110 ± 5°C lämpötilassa. Kosteuden poistumisen seuraamiseksi näyte nostettiin huoneenlämpöön ja määritettiin testinäytteen massa sen jäähtyttyä. Näyte palautettiin lämpökaappiin vähintään tunniksi ja toistettiin massan määrittäminen. Eron ollessa pienempi kuin 0,1 %, näyte oli valmis ja merkittiin muistiin massa (M₃)

M ₁	Näytteen massa testin alussa
(M ₂)	Näytetarjottimen massa
M ₃	Vakiomassa

Taulukko 4. Massojen määritelmät kosteuspitoisuuden laskemiseen, SFS-EN 1097-5

Kosteuspitoisuus (W) laskettiin kaavan 2 avulla. Laskemiseen tarvitaan taulukossa 4 esitetyt massat. Tulos ilmaistaan prosentteina.

$$W = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100 \quad (2)$$

6.6 Suhteitus

Betonin osa-aineiden suhteitukseen työssä käytettiin betonin koostumuslomaketta ja Nykäsen suhteitusmenetelmää (Betoni yhdistys ry s.a.) Sopiva kiviainesten rakeisuusluku H määritettiin kokeilemalla. Ensimmäiseksi valmistettiin luonnonkiviaineksista perusmassa, jota käytettiin tulosten keskinäisessä vertailussa. Perusmassan reseptiä muutettiin korvaamalla osa luonnonkiviaineksesta kierrätyskiviaineksella ja kierrätyskiviaineksen määrää muutettaessa suhteitus tehtiin uudelleen kierrätyskiviaineksen kiintotiheyttä ja kosteuspitoisuutta käyttäen, jotta massasta tulisi ominaisuuksiltaan painuman ja vesi-sementtisuhteen osalta samankaltaista kuin vertailumassasta. Tuoreen betonin eroavaisuuden ollessa vähäistä verrattuna perusmassaan, saavutettiin halutut ominaisuudet muuttamalla notkistimen määrää suuremmaksi.

7 OPINNÄYTETYÖSSÄ TUTKITTAVAT BETONIMASSAT

Betonimassojen valmistuksessa käytettiin Finnsementin Oiva-sementtiä, joka on normaalisti kovettuvaa portlandseossementtiä. Sementti valikoitui käytettäväksi sen 28 vuorokauden puristuslujuuden ollessa sopiva betonin suunniteltuun lujuuteen C30/37. Lisäksi sementin korkeahkon seosainemäärän, maasuonikuonalla ja kalkkikivellä korvattu 21–35 % klinkkeristä, vuoksi sen valmistamisen aiheuttama hiilidioksidijalanjälki on 40 000 tonnia pienempi kuin nopeasti kovettuvalla rapidsementillä (Finnsementti Oy 2022).

Tuoreesta betonimassasta mitattiin lämpötila, painuma ja märkätiheys. Painuman määrittämisessä käytettiin standardia SFS-EN 12350-2:2019 notkeusluokan selvittämiseksi. Suunniteltu notkeusluokka betonimassoille oli S3, jonka painuman vaihteluväli on 100–150 mm. Betonin sekoittamisessa käytettiin kaksivaiheista sekoittamista, jossa puolet veden määrästä lisätään kiviaineksen joukkoon ja sekoitetaan ennen sementin lisäämistä, jotta vesi imeytyy tasaisemmin kierrätyskiviaineksen huokosiin. Menetelmää käytettiin myös perusmassan valmistamisessa, jotta betonimassojen ominaisuudet olisivat vertailukelpoisia toisiinsa. Koekappaleiden valmistuksessa ja säilytyksessä, muoteista purkamisen jälkeen, noudatettiin standardin SFS-EN 12390-2:2019 määrittelemiä toimintatapoja. Tarkemmin betonin koostumuksesta liitteessä 2.

7.1 Perusmassa

Vertailua varten valmistetussa betonimassassa veden määrässä oli huomioitu kiviaineksen absorboima vesimäärä väärällä arvolla inhimillisen virheen vuoksi, joten massasta tuli liian notkeaa. Painumaksi mitattiin 180 mm, ja suhteitusta tuli korjata. Silmämääräisesti tarkasteltuna korjatulla suhteituksella valmistettu massa näytti helposti työstettävältä, eikä erottumista ollut havaittavissa (kuva 8). Massan notkeudeksi mitattiin 120 mm ja massa hyväksyttiin vertailuun. Puristuslujuuden osalta vertailubetonin 28:n vuorokauden keskiarvo saavutti 37,4 N/mm².



Kuva 8. Perusmassa sekoituksen jälkeen

7.2 Bioke massa 1, 20 % 0/8 mm korvattu

Ensimmäisessä uusiobetonimassassa kiviaineksen kokonaismäärästä korvattiin 10 %-osuuden verran kierrätyskiviaineksella. Silmämääräisesti massan notkeus oli työstettävää ja perusmassaan verrattuna samankaltaista (kuva 9). Painumaksi mitattiin 160 mm, joten notkeudessa siirryttiin luokkaan S4. Massaa päätettiin käyttää vertailussa, sillä aistinvaraisesti tarkasteltuna massaa sekoittaessa eroavaisuutta perusmassan työstettävyyteen ei havaittu.



Kuva 9. Uusiobetoni 20 % 0/8 mm kiviainesta korvattu

7.3 Bioke massa 2, 50 % 0/8 mm korvattu

Aistinvaraisesti taekasteltuna (kuva 10) 0/8 mm kiviainesta korvattaessa 50 %:a uusiobetonista tulee jäykkää. Suurimmat rakeet erottuivat hieman muusta massasta. Käsillä sekoittamalla kuitenkin havaittiin massan olevan työstettävää ja huolimatta vain 60 mm painumasta, massasta valettiin neljä 100 mm:n kuutiota puristuslujuuden määrittämistä varten. 28 vuorokauden puristuslujuuksien keskiarvoksi saatiin $40,3 \text{ N/mm}^2$. Suuremman jäykkyyden selittää kasvanut hienoainespitoisuus ja huokoisen kierrätyskiviaineksen määrä. Kierrätyskiviaineksen hienoaines absorboi vettä, joka vaikuttaa betonin veden tarpeeseen sitä kasvattavasti. Notkistimen määrää kasvattamalla olisi painuma saatu todennäköisesti halutulle tasolle. Seuraavassa tutkimuksen uusiobetonissa (Bioke massa 3) päätimme kokeilla kaksinkertaisen notkistinmäärän vaikutusta painumaan.



Kuva 10. Uusiobetoni 50 % 0/8 mm kiviainesta korvattu

7.4 Bioke massa 3, 60 % 0/8 mm korvattu

Bioke massa 3:ssa (kuva 11) uusi betonin erottuminen oli selkeästi havaittavissa ja painumaksi mitattiin vain 40 mm (0,5 %:a sementin massasta). Massa oli aistinvaraisesti tarkasteltuna haluttua jäykempää ja tämän takia massaan sekoitettiin kaksinkertainen määrä notkistinta (1,0 % sementin massasta) lisäsekoituksen yhteydessä. Lisäsekoituksen kesto oli kaksi minuuttia ja se on voinut vaikuttaa betonin lujuteen. Painumaksi notkistimen lisäyksen jälkeen mitattiin 150 mm ja märkätiheys laski 2346 g/dm^3 :stä 2304 g/dm^3 :iin. Puristuslujuus kehittyi korkeimmaksi uusiobetoneista, joiden kiviaineksesta korvattiin vain 0/8 mm luonnonkiviainesta.



Kuva 11. Uusiobetoni 60 % 0/8 mm kiviainesta korvattu

7.5 Bioke massa 4, 50 % 6/16 mm korvattu

Sepelin korvaaminen murskatulla kierrätyskiviaineksella vaikutti uusiobetoniin voimakkaasti jäykistävästi (kuva 12) ja notkistimen määrän nostaminen oli tarpeen, kuten Bioke massa 3:ssa. Kahden minuutin lisäsekoituksella ja notkistimen määrän nostamisella 0,5 %:sta 1,0%: iin saavutettiin 150 mm painuma. Tämän uusiobetonin tarkoituksena oli luoda vertailuarvoja kierrätyskiviaineen käytölle murskeena ja hienoainesta sisältävänä. Mitattujen puristuslujuuksien perusteella tämän uusiobetonin lujuus kehittyi suurimmaksi.



Kuva 12. Uusiobetoni 50 % 6/16 mm kiviainesta korvattu

7.6 Bioke massa 5, 20 % 0/8 mm ja 50 % 6/ 16 mm korvattu

Uusiobetoni massassa viisi korvattiin hienoa ja karkeaa kiviainesta kierrätyskiviaineksilla yhteisvaikutuksen tarkastelua varten. Sekoitusvaiheessa notkeus vaikutti aistinvaraisesti selkeästi jäykemmältä kuin aikaisemmat betonimassat. Myös suurimpien rakeiden erottuminen oli selkeästi havaittavissa (kuva 13). Notkistinmäärä nostettiin 1,5 %:iin. Lopputuloksena tuoreesta betonista mitattiin painumaksi 150 mm ja se oli karkeasta koostumuksestaan huolimatta työstettävää.



Kuva 13. Uusiobetoni 20 % 0/8 mm ja 50 % 6/16 mm kiviainesta korvattu

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Taulukossa 4 on esitettyä valmistettujen betonimassojen puristuslujuustulokset, joiden perusteella voidaan todeta uusiobetonin soveltuvan rakentamiseen puristuslujuuden osalta, ottamatta kantaa säilyvyyteen. Jokaisesta betonimassasta valettiin neljä koekappaletta, joista yhdestä mitattiin 7 vuorokauden kohdalla puristuslujuus varhaislujuuden kehityksen seuraamiseksi. Kolmesta koekappaleesta mitattiin 28 vuorokauden puristuslujuudet. Tuoreen betonin ominaisuuksista kierrätyskiviaines vaikutti painumaan, jota oli mahdollista hallita notkistimen määrää lisäämällä. Bioke massan 3 painuma oli 40 mm 0,5 % notkistin pitoisuudella ja nostamalla pitoisuus 1,0 %:iin painumaksi mitattiin 150 mm. Bioke massan 5 painumaksi mitattiin 30 mm, mutta 1,5 %:n notkistin pitoisuudella ja kahden minuutin lisäsekoituksella painumaksi mitattiin suunniteltu 150 mm.

Bioke perusmassan 28 vuorokauden puristuslujuuden keskiarvo oli 37,4 N/mm². Koekappaleiden suurimmaksi lujuudeksi mitattiin 37,8 N/mm² ja alhaisimmaksi 37,1 N/mm². Vertailubetonista valmistettujen koekappaleiden lujim-

man ja heikoimman välillä oli pienin ero verrattuna uusiobetonien koekappaleiden lujuuden vaihteluun. Betonimassoissa 1–3 käytettiin 0/8 mm kierrätyskiviainesta, joiden puristuslujuuksien keskiarvot olivat perusmassaan verrattuna samankaltaisia tai suurempia.

Bioke massa 1:n puristuslujuuden keskiarvoksi mitattiin 37,9 N/mm², josta suurin arvo 39,3 N/mm² ja pienin 37,2 N/mm². Bioke perusmassaan verrattuna lujuuden keskiarvo on vain 0,59 N/mm² suurempi mutta koekappaleiden välillä havaittiin suurempia eroja.

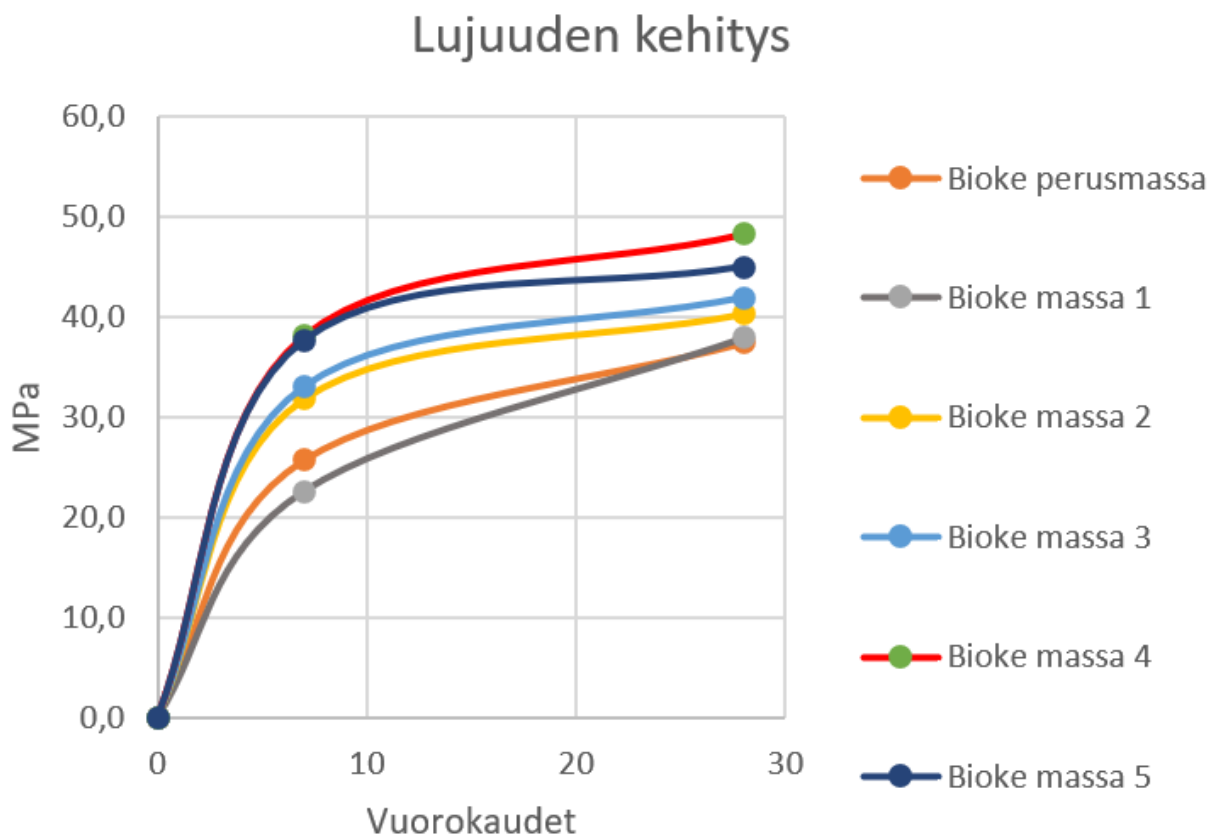
Bioke massan 2 keskiarvoksi mitattiin 40,3 N/mm², josta suurin arvo 41,7 N/mm² ja pienin 39,0 N/mm². Perusmassan lujuuteen verrattuna koekappaleiden lujuus kehittyi nopeammin ja suuremmaksi.

Bioke massa 3:ssa lujuuden keskiarvo oli 41,9 N/mm², josta suurin arvo 43,3 N/mm² ja pienin 40,0 N/mm². Betonimassaan sekoitettiin lisää notkistinta. Kahden minuutin lisäsekoitus on voinut vaikuttaa lujuuteen sitä nostavasti.

Bioke massa 4:n kiviaineksesta korvattiin 50 %:a 6/16 mm kierrätyskiviaineksella ja valmistetun betonin lujuuden keskiarvoksi mitattiin 48,3 N/mm². Suurimmaksi puristuslujuudeksi betonimassan koekappaleista mitattiin 49,0 N/mm² ja pienimmäksi 47,3 N/mm². Betonimassan heikoimman koekappaleen lujuus ylittää vertailumassan lujimman koekappaleen 9,5 N/mm²:llä.

Bioke massa 5:ssä korvattiin 50 % 6/16 mm sepelin rakeisuutta vastaavalla kierrätyskiviaineksella ja 20 % 0/8 mm kierrätyskiviainesta. Uusiobetonin lujuuden keskiarvoksi mitattiin 45,0 N/mm², josta ylin arvo oli 45,6 N/mm² ja alin 44,5 N/mm². Perusmassaan verrattuna bioke massa 5 saavutti suuremman lujuuden. Bioke massa 4:n lujuus kehittyi suuremmaksi kuin bioke massan 5, jossa korvattiin myös 0/8 mm:n luonnonkiviainesta. Kierrätyskiviaineksen korkeat pitoisuudet vaikuttavat saatujen tulosten mukaan uusiobetoniin lujuutta laskevasti. Erityisesti hienoainesta sisältävä kierrätyskiviaines vaikutti valmistettujen uusiobetonien ominaisuuksiin.

Lujuuden kehityksessä (kuva 14) uusiobetonimassojen 2–5 ylittivät suunnitellun lujuuden C30/37. Painuma-arvot olivat uusiobetoneissa suuruusluokaltaan hieman vertailubetonia suurempia, pois lukien uusiobetoni 2, jossa painuma jäi selvästi muita betonimassoja alhaisemmaksi. Korkeimmiksi kehittyneet lujuudet saavutettiin uusiobetoneilla 4 ja 5. Tarkemmat tiedot betonimassoista löytyvät liitteestä 1.



Kuva 14. Lujuuden kehitys

Luonnon- ja kierrätyskiviaineksien tutkimisessa käytettiin standardien mukaisia testausmenetelmiä, joista ei poikettu. Tutkimuksen luotettavuuteen vaikuttaa myös betonimassojen sekoituksen vakioiminen, pois lukien lisäsekoitukset notkistimen lisäämiseksi valmistetun massan ollessa haluttua jäykempää.

Kierrätyskiviainesta valmistettiin kolmessa erässä ja on todennäköistä, että leukamurskaimen murskausväli on vaihdellut näiden välillä. Vaikutus valmistetun kierrätyskiviaineksen partikkelikokoon ei ole merkittävää, sillä murskaimen leukaväli säädettiin leukamurskaimen mitta-asteikon avulla millimetrin tarkkuudella. Puristuslujuuskoekappaleiden valaminen ja tiivistäminen toteutettiin yhdenmukaisesti noudattaen standardia SFS-EN 12390-2:2019.

9 OPINNÄYTETYÖN HYÖDYNNETTÄVYYS JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Tämän tutkimuksen tuloksista tilaaja sai tietoa hienonnetun purkubetonin käytämisestä uusiobetonin raaka-aineena. Saatujen puristuslujuustulosten ja uusiobetonimassoista mitattujen muiden ominaisuuksien perusteella tilaaja voi tehdä johtopäätöksiä jatkotutkimustarpeesta.

Tämän työn pohjalta on mahdollista tutkia muita tutkimuksesta pois rajattuja betonin ominaisuuksia, kuten pakkasenkestävyyttä ja karbonatisoitumista, joiden avulla voidaan arvioida soveltuvuutta Pohjoismaiden olosuhteisiin ja soveltuvuutta käytettäväksi raudoitteiden kanssa. Puristuslujuuksien tulokset ovat lupaavia ja tutkimuksen tulosten pohjalta kierrätyskiviaineksen hienojakoisen aineen käyttämistä betonin sideaineena tai fillerinä voisi tutkia lisää. Tutkimusten edetessä vähähiilisestä betonista voi olla mahdollista kehittää hiilineutraali valmisbetoni vuoteen 2035 mennessä, mihin Suomi on asettanut oman hiilineutraaliustavoitteensa.

LÄHTEET

Arola, A. 2022. Use of Recycled Concrete Aggregate in Concrete Manufacturing. Diplomityö. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/116302/master_Arola_Asko_2022.pdf;jsessionid=3DD45D4DA4B9F4235622254FB197A12C?sequence=1 [Viitattu 13.3.2023].

Asp, E. 2020. Uusiobetonin käyttö rakentamisessa. Kandidaatintyö. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/119173/AspEmmi.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [Viitattu 13.3.2023].

Betoniyhdistys ry. s.a. Betonin perusyhtälö. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-koostumuksen-maarittaminen/betonin-perusyhtalo.html> [Viitattu] Bio- ja kiertotalouden tutkimuskeskus BioSampo. 2022. Koe- ja analyysilaitteistot. PDF- dokumentti. Saatavissa: https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2022/04/biosampo_laitekantaesite_21042022.pdf [Viitattu 20.3.2023].

Finnsementti Oy. 2022. Ympäristöraportti 2022. PDF- dokumentti. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Ymparistoraportti-Finnsementti-2022-1.pdf> [Viitattu 17.1.2023].

Rakennustieto Oyj. 2020. Kohti vähähiilistä rakentamista. E-kirja. Saatavissa: https://kortistot-rakennustieto-fi.ezproxy.xamk.fi/kortit/RT%20Kirja_KVR?external_system=Juha&navref=Search&page=2 [Viitattu 15.3.2023].

Rudus Oy. 2021. Uusi innovaatio: kierrätyskiviainesta valmisbetoniin. WWW- dokumentti. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2021/09/14/uusi-innovaatio-kierratyskiviainesta-myos-valmisbetoniin> [Viitattu 16.1.2023].

SFS-EN 933-1. 2013. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä.

SFS-EN 1097-5. 2010. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 5: Kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa.

SFS-EN 1097-6. 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintoutumisen ja vedenimukykyyn määrittäminen.

SFS-EN 12620 + A1. 2008. Betonikiviainekset.

SFS-EN 1744-1 + A1. 2013. Kiviainesten kemiallisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Kemiallinen analyysi.

SFS-EN 206:2014 + A2. 2021. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus.

Suomen betonitieto. 2005. Betonin, betonilietteen ja veden kierrätys betoniteollisuudessa. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Betonin-betonilietteen-ja-veden-kierratys-betoniteollisuudessa.pdf> [Viitattu 15.12.2022].

Suomen betoniyhdistys ry. s.a. Betonin notkeus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/tuoreen-betonimassan-ominaisuudet/notkeus.html> [Viitattu 20.1.2023].

Suomen valtioneuvosto. 2022. Purkumateriaalien kelpoisuus eri käyttökohteisiin turvallisuuden ja terveellisuuden näkökulmasta. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163832/VN_Teas_2022_15.pdf [Viitattu 7.3.2023].

Valtioneuvoksen asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 843/2017. Annettu Helsingissä 7.12.2017.

Ympäristöministeriö 1.9.2022.466/2022. Valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/20220466> [Viitattu 16.3.2023].

Ympäristöministeriö. 2019. Kiertotalous julkisissa purkuhankkeissa: Hankinta-
opas. PDF- dokumentti. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161882/YM_2019_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Viitattu 14.2.2022].

Kooste betonimassoista ja puristuslujuuksista

Massan nimi	Vesi- sementtis uhde	Massan lämpötila [°C]	Painu- ma [mm]	Kovettuneen betonin tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus		Keskiarvo 28d [N/mm ²]	Hajonta 28d [N/mm ²]
					Ikä [d]	[N/mm ²]		
Bioke perusmassa	0,51	18,2	120	2340	7	25,7	37,4	0,4
					28	37,1		
					28	37,8		
					28	37,4		
Bioke massa 1 0...8 mm korvattu 20 %	0,52	19,8	160	2300	7	22,6	37,9	1,2
					28	39,3		
					28	37,3		
					28	37,2		
Bioke massa 2 0...8 mm korvattu 50 %	0,52	19,6	60	2300	7	31,8	40,3	1,4
					28	41,7		
					28	39,0		
					28	40,2		
Bioke massa 3 0...8 mm korvattu 60 %	0,51	19,8	150	2300	7	33,0	41,9	1,7
					28	43,3		
					28	42,4		
					28	40,0		
Bioke massa 4 6...16 mm korvattu 50 %	0,51	18,9	150	2340	7	38,1	48,3	0,9
					28	47,3		
					28	48,6		
					28	49,0		
Bioke massa 5 6...16 mm korvattu 50 % + 0...8 mm korvattu 20 %	0,51	23,3	150	2300	7	37,6	45,0	0,6
					28	45,6		
					28	44,8		
					28	44,5		
(Harjoitusmassa)	0,53	16,5	180	2330	7	27,1	35,3	1,3
					28	34,6		
					28	34,4		
					28	36,8		

Betonimassojen osa-aineiden suhteet ja mittaustulokset

Harjoitusmassa (Poistettu tutkimuksesta)		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,32	16,5	180	Ei määritetty	1	28.1.22	7	2338,5	2330	27,1
1,5mm kka	0,00				2	28.1.22	28	2316,9	2330	34,6
0-8mm	18,89				3	28.1.22	28	2317,8	2330	34,4
6-16mm	18,89				4	28.1.22	28	2320	2330	36,8
vesi	3,33									
notkistin	0,50									

Bioke perusmassa		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,32	19,1	120	2358,0	1	18.2.22	7	2305,9	2350	25,7
1,5mm kka	0,00				2	18.2.22	28	2325,3	2350	37,1
0-8mm	18,96				3	18.2.22	28	2381,5	2360	37,8
6-16mm	18,90				4	18.2.22	28	2362,8	2360	37,4
vesi	3,24									
notkistin	0,50									

Bioke 1,5 mm KKA 20 %		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,60	19,8	160	2354,0	1	18.2.22	7	2325,3	2300	22,6
1,5mm kka	2,60				2	18.2.22	28	2320,2	2320	39,3
0-8mm	14,80				3	18.2.22	28	2326,5	2300	37,3
6-16mm	18,40				4	18.2.22	28	2335,8	2310	37,2
vesi	3,45									
notkistin	0,50									

Bioke 1,5 mm KKA 50 %		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,57	19,6	60	2338,0	1	25.2.22	7	2283	2290	31,8
1,5mm kka	6,54				2	25.2.22	28	2315,2	2320	41,7
0-8mm	9,26				3	25.2.22	28	2304,3	2310	39,0
6-16mm	18,45				4	25.2.22	28	2327,5	2300	40,2
vesi	3,42									
notkistin	0,50									

Bioke 1,5 mm KKA 60 %		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,51	19,8	150	2304,4	1	25.2.22	7	2324,8	2300	33,0
1,5mm kka	7,90				2	25.2.22	28	2316,4	2310	43,3
0-8mm	7,46				3	25.2.22	28	2318,3	2300	42,4
6-16mm	18,59				4	25.2.22	28	2339,4	2300	40,0
vesi	3,35									
notkistin	1,00									

Bioke 13 mm KKA 50 %		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,63	18,9	150	2352	1	12.4.22	7	2352,9	2330	38,1
0-8mm	18,54				2	12.4.22	28	2351	2330	47,3
13mm kka	9,00				3	12.4.22	28	2365,2	2340	48,6
6-16mm	9,24				4	12.4.22	28	2365,2	2340	49,0
vesi	3,37									
notkistin	1,00									

Bioke 13 mm KKA 50 % + 3 mm KKA 20%		Lämpötila	Painuma	Märkätiheys	Koekappale	Valupäivä	Ikä [d]	Massa [g]	Tiheys [kg/m ³]	Puristuslujuus [Mpa]
sem	6,51	23,3	150	2331,3	1	13.6.22	7	2323,6	2290	37,6
0-8mm	14,81				2	13.6.22	28	2341,7	2310	45,6
3 mm KKA	3,14				3	13.6.22	28	2299,5	2310	44,8
13mm kka	8,99				4	13.6.22	28	2307,5	2310	44,5
6-16mm	9,23									
vesi	3,33									
notkistin	1,50									