

Lauri Hakkarainen

# BIOLENTOTUHKAN KÄYTTÖ BETONITEOLLISUUDESSA

Opinnäytetyö  
Rakennustekniikka

2019



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

<b>Tekijä/Tekijät</b>	<b>Tutkinto</b>	<b>Aika</b>
Lauri Hakkarainen	Rakennusinsinööri (AMK)	Joulukuu 2019
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		42 sivua 10 liitesivua
Biolentotuhkan käyttö betoniteollisuudessa		
<b>Toimeksiantaja</b>		
XAMK, Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu		
<b>Ohjaajat</b>		
Eveliina Kuokkanen, Anne Gango		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Tämä opinnäytetyö kuuluu osaksi HITU-hanketta ja on tehty yhteistyössä Rudus Oy:n kanssa. Työn tarkoituksena on tutkia bioperäisen lentotuhkan käyttömahdollisuuksia betonin seosaineena. Hanke pyrkii tukemaan kiertotaloutta tutkimalla bioenergiailaitoksilta syntyvälle jätetuhkalle uusia hyötykäyttökohteita.</p> <p>Tutkimukseen kuuluu teoreettinen ja kokeellinen tarkastelu. Teoreettinen tarkastelu käsittelee lentotuhka- ja betonistandardeja ja niiden vaikutusta biolentotuhkan hyötykäyttöön. Kokeellinen osio tarkastelee biolentotuhkan käyttäytymistä ja vaikutusta betonin märkämassaan ja koekappaleisiin. Kokeellisessa osiossa tarkastellaan ja vertaillaan betonimassojen lujuuden kehitystä. Betonimassoihin kuuluvat massa ilman tuhkaa ja massat, joiden sementistä on korvattu 20 prosenttia ja 40 prosenttia bio- tai kivihiiliperäisellä lentotuhkalla. Biolentotuhkista on lisäksi hienonnetut versiot.</p> <p>Opinnäytetyö on jatkoa HITU-projektissa aikaisemmin tehdylle tutkimukselle, ja biolentotuhkat on valittu parhaimmaksi osoittautuneiden perusteella. Tutkimuksia voi tämän työn tulosten perusteella vielä jatkaa.</p> <p>Jatkotutkimuksissa voidaan tutkia biolentotuhkien vedentarvetta, sillä tämä koitui suurimmaksi ongelmaksi betonikokeissa. Kokeissa parhaimmiksi osoittautuneiden tuhkalajikkeiden biolentotuhkamäärät voidaan yrittää optimoida betonimassalle sopivaksi ja näin tutkia tuhkien todellinen soveltuvuus seosaineena.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
Biolentotuhka, betoni, standardi, koe		

Author (authors)	Degree	Time
Lauri Hakkarainen	Bachelor of Engineering	December 2019
<b>Thesis title</b>		
Bio fly ash usage in concrete manufacturing		42 pages 10 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
XAMK, South-Eastern Finland University of Applied Sciences		
<b>Supervisor</b>		
Eveliina Kuokkanen, Anne Gango		
<b>Abstract</b>		
<p>The thesis is made to be a part of HITU-project and is co-operated with Rudus Oy. The main purpose is to study affordances of bio-originated fly ash as a part of concrete mass. The project aims to keep up circular economy by examining new usage for the ash made in bioenergy facilities.</p>		
<p>The study contains theoretical and experimental inspection. The theoretical inspection investigates the fly ash and concrete standards of Finland and Europe, and their effect on the usage of fly ash. The experimental part of the thesis investigates the behavior and effects of the bio fly ash in wet and hardened concrete. The main goal is to see the effects on the hardening of the concrete. For the experiments there are concrete mass without ash, and masses where a part of the cement is replaced with 20% and 40% with bio or black coal fly ash. Bio ashes have also micronized and non-micronized variants.</p>		
<p>The thesis is continuation to the experiments of the HITU project. Bio fly ashes are chosen according to the best results. Experiments may continue after this thesis.</p>		
<p>The follow-up research could be made for the water absorption of bio fly ashes, since this was the biggest problem while making concrete. The best bio fly ash results could be optimized for the concrete mass and thus, the real suitability for concrete making could be examined.</p>		
<b>Keywords</b>		
Bio fly ash, concrete, standard, experiment		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	LENTOTUHKA .....	5
3	TUHKAN HYÖDYNTÄMISTÄ KOSKEVAT VAATIMUKSET .....	9
3.1	MARA-asetus .....	10
3.2	Ympäristönsuojelulaki ja -asetus .....	13
3.3	CE-merkintä, REACH ja CLP .....	14
4	STANDARDIEN JA ASETUSTEN RAJOITUKSET TUHKILLE .....	15
4.1	Lentotuhkan enimmäismäärä .....	15
4.2	Lentotuhkan koostumus ja raja-arvot .....	16
4.3	Standardin SFS-EN 450 rajat .....	17
4.4	Lentotuhkan hienous ja vedentarve .....	19
5	KOKEELLINEN OSUUS .....	20
5.1	Tuoreen betonimassan testaus .....	21
5.2	Kovettuneen betonin testaukset .....	24
5.3	Riskitekijät .....	24
5.4	Kiviainesten rakeisuustutkimukset .....	25
5.5	Betonimassa .....	28
5.6	Märkämassan tarkastelut .....	29
5.7	Betonin puristuslujuuskappaleet .....	31
5.8	Koekappaleiden halkeamat ja halkaisu .....	34
6	YHTEENVETO .....	35
7	LÄHTEET .....	37

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululle yhteistyössä Rudus Oy:n kanssa. Pää tavoitteena on tutkia biolentotuhkan käyttömahdollisuuksia betonin seosaineena ympäristöystävällisempänä vaihtoehtona kivihiiliperäiselle lentotuhkalle. Myös maarakentamisen käyttömahdollisuudet tutkitaan. Bioperäiseen lentotuhkaan on viime vuosina alettu kiinnittämään enemmän huomiota. Biopolttoaineiden jätteiden määrät ovat nousussa uusien biojalostamoiden synnyn sekä kestävä kehityksen ansiosta. Edellä mainitusta, kiertotaloudesta sekä tiukentuvien ympäristövaatimusten takia biojätteelle on alettava kehittämään uusia käyttökohteita kaatopaikkasijoituksen sijaan. Betoniteolisuudessa biotuhkaa ei kuitenkaan käytetä kivihiilen kanssa seospolton lisäksi juuri missään. Tarkasteluissa tutkitaan standardien asettamia rajoja lentotuhkille sekä biotuhkan vaikutusta betonisiin koekappaleisiin.

Kokeellisen osuuden työ sisältää yhdentoista betonimassan valmistuksen. Kaikki betonimassat eroavat toisistaan joko tuhkamäärän tai tuhkalaadun mukaisesti. Jokaiselle massalle tehdään märkämassatutkimukset, jotka sisältävät lämpötilan, painuman, leviämisen, märkätiheyden sekä ilmamäärän mittaamisen. Massoista tehdään myös koekappaleet, jotka puristetaan, halkaistaan sekä tutkitaan silmämääräisesti. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia, onko biolentotuhkalla mahdollisuutta betonin seosaineena. Tutkimuskysymyksiä on tutkia miten standardit ja lait vaikuttavat biolentotuhkan käyttöön betonin seosaineena ja miten biolentotuhka vaikuttaa betonin puristuslujuuteen.

## 2 LENTOTUHKA

Tähän mennessä betonituotannossa on käytetty kivihiiliperäistä lentotuhkaa seosaineena. Tämä tuhka on kivihiilen poltossa syntyvä hienojakoinen pozzolaani, joka kerätään savukaasuista esimerkiksi sähkösuodattimella. Pozzolaanilla tarkoitetaan, että aine reagoi huoneenlämmössä sementin hydrataatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattigeeliä, eli toisin sanottuna sementtikiven kaltaisia sidoksia. Kivihiiliperäinen tuhka voi toimia myös seosaineen lisäksi hienona kiviaineksena eli fillerinä. Tämän rakeisuus on 1-150 µm. /1, s. 56./

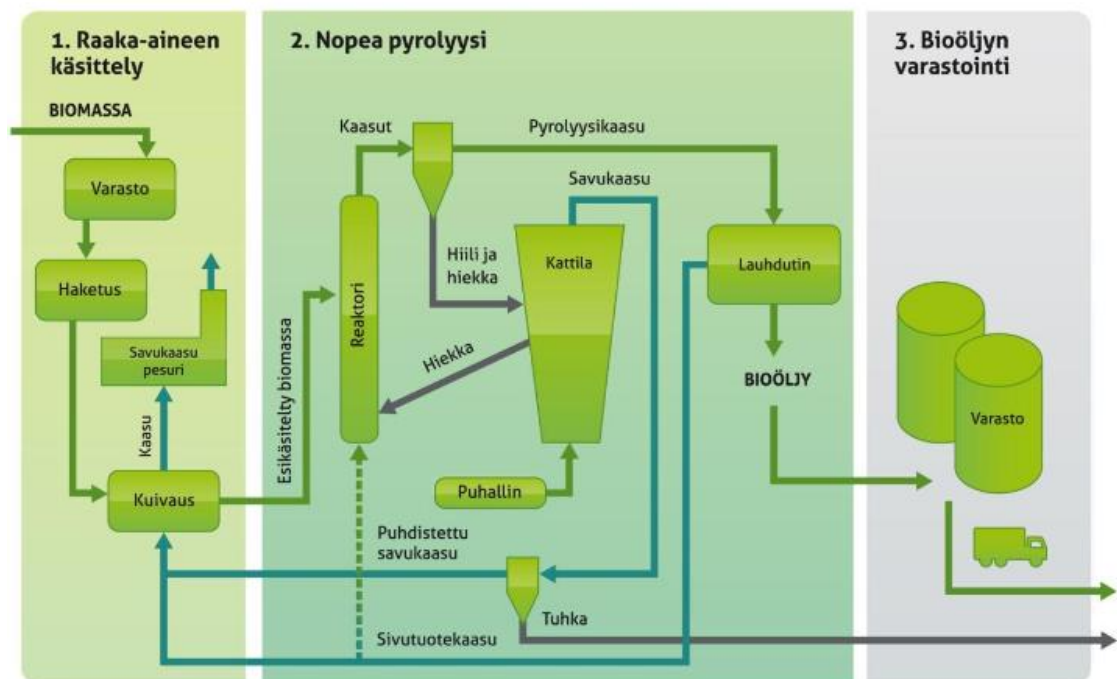
Lentotuhka on pohjimmiltaan sivutuote energiantuotannossa. Sen suurin hyöty perustuu sen hintaan, joka on huomattavasti sementtiä pienempi ja koska sen käyttö perustuu useimmiten sementin korvaajana, sen avulla voidaan saada aikaan suuria säästöjä niin hinnan kuin myös ympäristön kannalta. Tuhat kilogrammaa portlandinsementtiä tuottaa ilmakehään noin 700-800 kilogrammaa hiilidioksidia. Jos tästä määrästä korvataan osa lentotuhkalla, myös hiilidioksidipäästöt pienenevät. /2, s. 6./ Sementtiin verrattuna kivihiiliperäisellä tuhalla on hitaampi reaktioaika eikä se lämpene hydratoituessa yhtä hyvin. Lujuudenkehitys on hitaampaa kuin normaalisti, mutta lopullinen puristuslujuus on tavallista korkeampi. Näistä syistä lentotuhkaa ei suositella käytettäväksi kylmissä olosuhteissa. /3./

Biolentotuhkaa käytettäessä on otettava huomioon, ettei se ole pozzolaani tai kiviaines kuten kivihiili. Maarakentamisessa sillä kuitenkin on paikkansa. Turve- sekä puuperäiset tuhkat soveltuvat tie- ja kenttärakenteisiin sekä joissain tapauksissa maisemointitöihin. Biotuhkaa syntyi energialaitosten sivutuotteena Suomessa noin 650 000 tonnia vuonna 2017. /4./ Tämä määrä jaetaan pohja- sekä lentotuhkiin /8, s. 8-9/. Määrä on kasvamassa uusiutuvan energian käytön ansiosta ja tiukentuvat ympäristövaatimukset vaativat kehittämään tuhille uusia käyttökohteita /25/.

Kivihiilituhkan ja biotuhkan synty on hieman erilainen. Kivihiili jauhetaan karkeasta massasta pölyksi, joka puhalletaan ilman avulla kattilaan. Lämpöenergialla kuumennetaan kattilassa olevaa vettä, jonka energia muutetaan generaattorin ja lämmönsiirtimien avulla sähkö- ja kaukolämpöenergiaksi. Erilaisilla suodattimilla, kuten yleisimmin käytetyllä sähkösuodattimella, saadaan kerättyä savukaasuista ympäristölle haitalliset pienhiukkaset. Suodattimien keräyslevyt tai keräyselektrodit nappaavat savukaasussa leijailevat lentotuhkat, ja ajoittain nämä tyhjennetään tuhkan keräyssuppiloon tai -laatikkoon ja siirretään tästä säilöntään. Muita suodatuskeinoja ovat muun muassa kuitusuodattimet, märkäerottimet, sykloni ja multisykloni sekä karkeammat suodattimet; sedimentaatiokammio ja lamellierotin. Lentotuhka on suodattimista tullessaan kuivaa, paitsi märkäsuodattimessa, jonka toimintamalli perustuu tuhkan tarttumiseen nestepisaroihin. Suodattimia myös yhdistellään esimerkiksi siten, että

karkeampi suodatin suodattaa enimmäkseen tuhkat pois, jonka jälkeen hienempi aines jää seuraavaan suodattimeen. /5./

Biojalostamoiden raaka-aineet tulevat hakettuna ja kuivattuna reaktoriin. Yleisimpiä massoja ovat puun osat, liete sekä turve. Biojalostamon toimintamalli (kuva1) riippuu tarkoituksen mukaisen tuotteen tuotantotavasta. Mahdollisia tuotteita ovat esimerkiksi sellu, ligniini, öljyjalosteet sekä biopolttoaineet. /6./



Kuva 1. Biojalostamon toimintamalli. Green Fuel Nordic Oy:n toimintamalli bioöljyn jalostamiseen /7, s. 8/.

Lentotuhkan laatu vaihtelee sen tuotantotavan mukaan. Päätekijöinä ovat polttoseoksen koostumus, polttoprosessi sekä tuhkanerotusmenetelmä. Lisäksi tuhkat jaotellaan pohja- ja lentotuhkiin. Pohja- ja lentotuhkan määrät vaihtelevat polttotekniikan mukaan. Käytetyimpiä tekniikkoja ovat arina- sekä leijupoltto. Arinapoltto tarkoittaa polttotapaa, jossa kattilan pohjalla on polttolaite, jonka päällä poltetaan polttoainemassaa joko paikallaan tai hitaasti liikkuvana /18/. Leijupoltto tarkoittaa polttotapaa, jossa tulipesän alaosaan syötetään ilmaa niin, että tulipesässä oleva hiekka, tuhka ja polttoaine leijuvat /19/. Alla olevassa *Tuhkarakentamisen käsikirja*:sta otetussa kuvassa 2 on esitetty mainittujen polttotekniikoiden vaikutukset tuhkanmäärään. /8, s. 8-9./

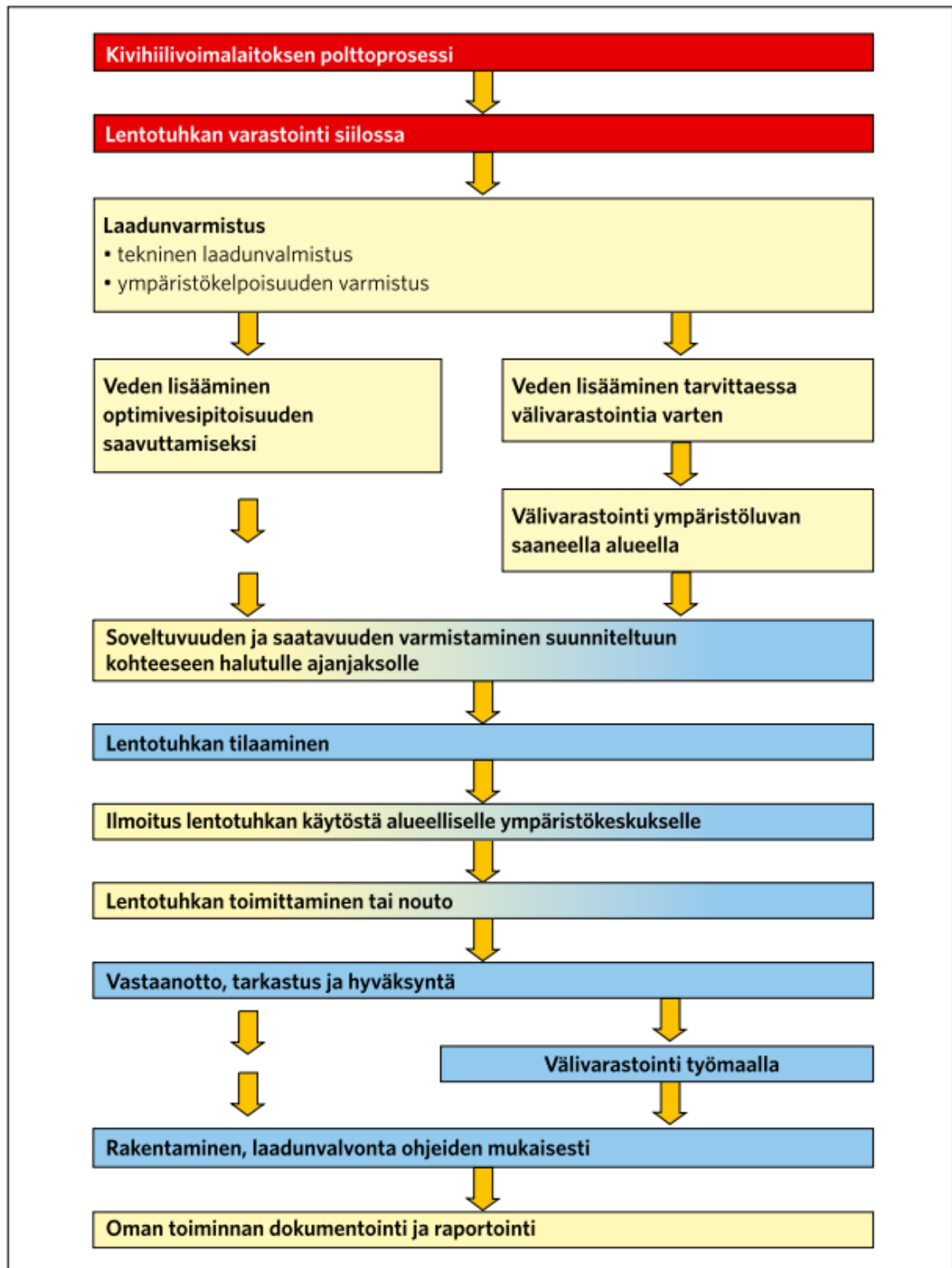
	<b>Leijukerros poltto</b>	<b>Arinapoltto</b>
<b>Lentotuhkan osuus</b>	80–100 %	5–40 %
<b>Pohjatuhkan osuus</b>	0–20 %	60–95 %
<b>Eriyistä</b>	-rikinpoistoprosessi -mahdollista polttaa hyvin erilaisia polttoaineita -pohjatuhkassa leijukerros materiaalia eli luonnonhiekkaa -syötetään mahdollisesti kalkkia	-hehketushäviö usein keskimääräistä suurempi

Kuva 2. Polttoprosessityypin vaikutus tuhkien muodostumiseen /8, s. 8-9/.

Kuten kuvasta 2 voi päätellä, leijukerrosossa tapahtuva jatkuva massan sekoittuminen tehostaa lämmönsiirtoa ja lentotuhkan osuus lisääntyy huomattavasti. Massan kuitenkin tulee olla niin pientä, että leijutus onnistuu.

Rudus Oy:n lentotuhkarakentamisen toimintaketju (kuva 3) kuvaa hyvin lentotuhkan elinkaarta voimalaitokselta seosaineeksi. Samaa ketjua käytettäisiin myös biotuhkalle.





Kuva 3. Lentotuhkarakentamisen toimintaketju /9, s. 5/.

Kuvassa 3 sininen väri kuvastaa tilaajan toimenpiteitä, keltainen toimittajan toimenpiteitä ja punainen voimalaitoksen toimenpiteitä. Osa toimenpiteistä on jaettu tilaajan ja toimittajan tehtäviksi.

### 3 TUHKAN HYÖDYNTÄMISTÄ KOSKEVAT VAATIMUKSET

Tuhkan hyötykäyttöön on säädetty useita lakeja sekä asetuksia. Suomen

jätelain mukaisesti tuhkat luokitellaan jätteeksi (646/2011 5§). Jätteen määritelmä on "aine tai esine, jonka haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä taikka on velvollinen poistamaan käytöstä". Lain tarkoituksena on säädellä jätteen käyttöä sen mahdollisesti sisältämien haitallisten aineiden pitoisuuksien ja liukoisuuksien vuoksi. Kivihiiliperäinen tuhka saattaa sisältää usein vaarallisia yhdisteitä kuten arseenia, elohopeaa, lyijyä tai liukenevia suoloja. Tuhkan teknisiä ominaisuuksia laissa ei rajoiteta, mutta tuhkan kuuluu kuitenkin olla käyttökohteeseensa sopivaa. /10, s. 11./

Biolentotuhkalle ei ole olemassa omaa standardikokoelmaa. Tämä osio tutkii siis kivihiiliperäisen tuhkan ominaisuuksille määritellyjä yleisiä standardeja, ja niitä tekijöitä jotka rajoittavat biotuhkan käyttöä seosaineena. Euroopan unionin rakennustuotedirektiivi taas säätelee valmistettavan betonin ominaisuuksia. Tämä tarkoittaa sitä, että betonin on täytettävä olennaiset vaatimukset joita ovat: mekaaninen lujuus, stabiliteetti, paloturvallisuus, hygienia, terveellisyys, ympäristö, käyttöturvallisuus, meluntorjunta, energiansäästö ja lämmöneristys. /11, s. 139-140./

### **3.1 MARA-asetus**

MARA-asetus (843/2017), eli *Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä* tuli voimaan 1.1.2018 /24/.Tämän asetuksen tarkoitus on edistää jätteiden hyödyntämistä ja kiertotaloutta. Asetuksessa on määritelty jätteet joiden hyödyntämisessä ei tarvita ympäristölupaa vaan ilmoituksen Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle (ELY). Sovelluksen kohteena ovat yleisesti maarakentamiskohteet jotka toteutettaisiin vaikka soveltuvaa jättemateriaalia ei olisi tarjolla. Tämän sovelluksen piiriin eivät kuulu maarakentamiskohteet joiden ensisijainen tarkoitus on jätteen sijoittaminen, 1- ja 2-luokan pohjavesialueet, asumiseen tai lasten leikkipaikaksi tarkoitetut alueet, luonnonsuojelutarkoitukseen osoitetut alueet, ravintokasvien viljelyyn tarkoitetut alueet eikä sisämaan tulvavaara-alueet. Ilmoitusmenettelyä voidaan käyttää tuhkille, joiden arvot alittavat MARA-asetuksen liitteen 2 asettamat haitta-ainepitoisuudet sekä liukoisuuksien raja-arvot. Ilmoitusmenettelyssä ilmoitetaan hyödyntämis- tai välivarastointipaikan haltija tai tekijä, tiedot hyödyntämispaikan sijainnista, välivarastoinnista ja sen sijainnista, maarakentamiskohteesta sekä hyödynnettävästä jätteestä.

MARA-asetus määrittelee jätteen hyödyntämiselle ja väliaikaiselle varastoinnille vaatimukset momentissa 4:

*Sen lisäksi, mitä ympäristönsuojelulaissa ja jätelaissa (646/2011) säädetään, jätteen hyödyntäminen maarakentamisessa ilman ympäristölupaa edellyttää, että:*

- 1) maarakentamiskohteen sisältämän jätteen kerrospaksuus ei ylitä liitteessä 2 säädettyä enimmäiskerrospaksuutta;*
- 2) jätteen haitallisten aineiden liukoisuus ja pitoisuus eivät ylitä liitteessä 2 säädettyjä raja-arvoja ja jäte täyttää liitteessä 2 säädetyt muut vaatimukset;*
- 3) jätteen laadunhallinnassa noudatetaan, mitä liitteessä 3 säädetään, ja haitallisten aineiden liukoisuus ja pitoisuus määritetään liitteen 3 mukaisesti;*
- 4) jätettä sisältävä rakenne peitetään tai päällystetään lukuun ottamatta tuhkamursketietä taikka väylää tai kenttää, jonka pintakerroksessa käytetään asfalttimurskettä tai -rouhetta;*
- 5) jätettä sisältävän rakennekerroksen etäisyys pohjaveden enimmäiskorkeudesta on vähintään yksi metri ja maarakentamiskohteen etäisyys vesilain (587/2011) 1 luvun 3 §:n 1 momentin 3 kohdassa tarkoitetusta vesistöstä, talousvesikäyttöön tarkoitetusta kaivosta tai lähteestä on vähintään 30 metriä;*
- 6) sekoittaessa liitteessä 1 tarkoitettuja jätteitä keskenään teknisten ominaisuuksien parantamiseksi myös lopullinen seos täyttää liitteessä 2 säädetyt raja-arvot;*

*Jätteen väliaikaisessa varastoinnissa on noudatettava parasta käyttökelpoista tekniikkaa. Väliaikaisen varastoinnin saa aloittaa aikaisintaan neljä viikkoa tai, jos jäte varastoidaan suojattuna, 12 kuukautta ennen hyödyntämistä.*

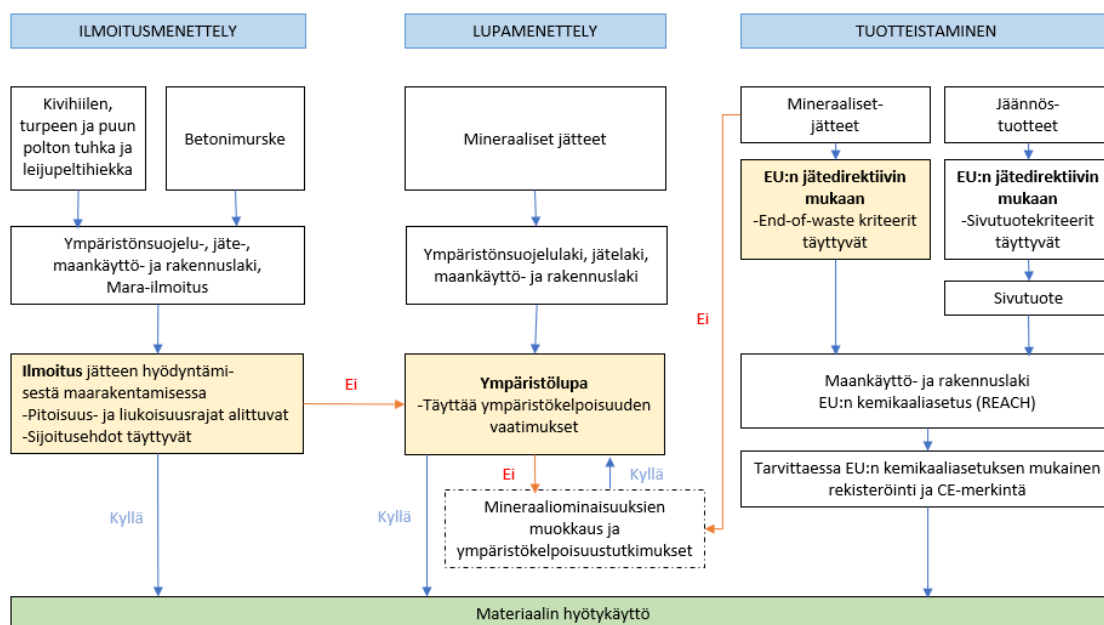
VNa 843/2017 liitteen 1 mukaisesti Kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkat, pohjatuhkat ja leijupeltihiekka ovat jätettä. Biotuhkalle asetetut liitteen 2 mukaiset haitallisten aineiden raja-arvot ja muut laatuvaatimukset löytyy kohdasta 4.2 Puupohjaisen biotuhkan koostumus ja rajoitukset /24/. Liitteen 2 mukaiset jätteen enimmäiskerrospaksuudet ovat seuraavanlaiset:

Taulukko 1. MARA-asetus (843/2017) liite 2, jätteiden enimmäiskerrospaksuus /24/.

Väylä	Kenttä	Valli	Teollisuus- ja varasto-rakennuksen pohjarakenne	Tuhka-murske-tie
Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5m	Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5m	Jätteen kerrospaksuus ≤ 5,0m	Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5m	Jätteen kerrospaksuus ≤ 0,2m

VNa 843/2017 mukaisesti jätteen haitta-ainemääritykset on teetettävä akkreditoitussa laboratoriossa, jonka akkreditoitu pätevyysalue kattaa käytettävät analyysimenetelmät. Tuhkille suoritetaan PAH-yhdisteiden tutkimukset. Liitteessä 3 on kuvailtu tutkimusten menetelmät:

*Haitallisten aineiden liukoisuuksien määrittämisessä on käytettävä joko standardin CEN/TS 14405 mukaista läpivirtaustestiä tai standardin SFS-EN 12457-3 mukaista kaksivaiheista ravistelutestiä tai vastaavaa menetelmää. Liukoisuustestien uuttoliuokset on määriteltävä standardien SFS-EN 12506, SFS-EN 13370 ja SFS-EN 16192 mukaisin menetelmin. Liukoinen orgaaninen hiili (DOC) on määriteltävä teknisen spesifikaation CEN/TS 14429 tai CEN/TS 14997 mukaisesti.*



Kuva 4. Mineraalisten jätteiden ja jäännöstuotteiden hyötykäyttöä koskeva kansallinen ja EU-lainsäädäntö ja ympäristökelpoisuuden arviointi /12 s. 46/.

### 3.2 Ympäristönsuojelulaki ja -asetus

Ympäristönsuojelulaki (527/2014) /26./ sekä ympäristönsuojeluasetus (713/2014) /27./ toimivat saman asian puolesta. Kummankin päätarkoituksena on ehkäistä ympäristön pilaantumista, torjua ympäristövahinkoja, estää jätteiden syntyä sekä edistää luonnonvarojen käytön kestävyyttä. Laki edellyttää, että ympäristölle vaaraa aiheuttava toiminta vaatii ympäristölupaa. Tuhkien lento- tai pohjatuhkan käyttö maarakentamisessa kuitenkin tapahtuu MARA-asetuksen mukaan, eikä hyödyntämiseen tarvitse ympäristölupaa. Toiminta vaatii kuitenkin ilmoituksen ympäristönsuojeluun (713/2014 27§).

Biotuhkan hyötykäyttö ei siis tarvitse ympäristölupaa ammattimaiseen tai laitosmaiseen käsittelyyn. Ympäristönsuojelulaissa todetaan momentissa 32 pykälien 1 ja 2 mukaan poikkeusehdot eräiden jätteiden käsittelytoimintojen luvanvaraisuudelle, joihin ilmoitusmenettely kelpaa:

- 1) maa- ja metsätaloudessa syntyvän ympäristölle ja terveydelle haitattomista luonnonaineksista koostuvan jätteen käyttö maa- ja metsätaloudessa;
- 2) haitattomaksi käsitellyn jätevesilietteen, sakokaivolietteen, umpisäiliölietteen tai kuivakäymäläjätteen taikka haitattoman tuhkan tai kuonan hyödyntäminen ja käyttö lannoitevalmistelain (539/2006) mukaisesti; /28./

Ympäristökelpoisuus siis täyttyy, jos kyseessä on MARA-asetuksen liitteen 2 mukaisten haitta-ainepitoisuuksien sekä liukoisuuksien alittava tuhkamassa. On huomioitava, että seospoltossa syntyvä tuhkamassa ei ole puhdasta biotuhkaa.

### 3.3 CE-merkintä, REACH ja CLP

Betonin seosaineena käytettävän tuhkan tulee olla CE-merkittyä.

Rakennustuoteasetuksen [(EU) N:o 305/2011] artiklan 14 mukaisesti markkinoille pantavan rakennustuotteen tulee olla CE-merkinnällä varustettu tai suorintaillmoituksen ja muiden sovellettavien asetusten mukainen /29/. CE-merkintä on vakuutus siitä, että tuotteen ominaisuudet ovat eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaiset. Lisäksi tuhkan tulee olla REACH-asetuksen (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) mukaisesti rekisteröityä, eikä se saa olla CLP-asetuksen mukaisesti vaaralliseksi luokiteltua (858/2018 4§). /30./

REACH-asetus on Euroopan unionin laatima, ja sillä pyritään suojelemaan ihmisten terveyttä ja ympäristöä (EC 1907/2006). Asetus astuu voimaan kun aine tai esine, tässä tapauksessa tuhka, lakkaa olemasta jätettä ja astuu tuotesääntelyyn. Rajoitukset koskevat haitallisten kemikaalien käyttöä ja velvoittaa valmistajia, maahantuojia sekä jatkokäyttäjiä tunnistamaan aineista aiheutuvat riskit ja haitat. /13./

CLP (Classification, Labeling and Packaging of substances and mixtures) on Euroopan parlamentin ja neuvoston laatima kemikaalien luokitusta, pakkaamista ja merkintöjä koskeva asetusta (1272/2008). Asetuksen merkintävelvoite koskee seuraavia:

- myytävät tai vastikkeetta luovutettavat vaaralliseksi luokitellut aineet tai seokset
- vaaralliseksi luokittelemattomat seokset, joiden merkinnästä on säädetty CLP-asetuksen liitteessä II
- tietyt räjähtävät esineet, joiden merkinnästä on säädetty liitteen I osassa 2 /14./

## 4 STANDARDIEN JA ASETUSTEN RAJOITUKSET TUHKILLE

Tämän osion tarkoituksena on tutkia biotuhkan hyötykäyttöä rajoittavia tekijöitä maarakentamisessa sekä betonissa käytettävän kivihiilituhkan korvaajana. Rajoitukset haitta-aineille löytyvät maarakentamiselle MARA-asetuksesta /24./ sekä betonissa käytettävälle lentotuhkalle standardista EN-450 /21, 22/. Rajoitusten vertailuun käytetyt tuhkat ovat samoja kuin kokeellisessa osiossa käytetyt. Tuhkien metallikoostumukset ovat määritelty kuningasvesihajotuksella ja tulokset ovat näytteiden yhteinen keskiarvo.

### 4.1 Lentotuhkan enimmäismäärä

Lentotuhkan enimmäismäärä riippuu valmistettavan betonin seosainemäärästä sekä rasitusluokasta. Enimmäismäärän laskemiseen tarvitaan sementin sisältämien seosaineiden todelliset määrät jotta näitä voidaan käyttää laskelmien perustana. Kuvassa 5 on määritelty laskukaavat lentotuhkan enimmäismäärälle kohteen rasitusluokasta riippuen. Toinen mahdollisuus on käyttää yleisiä lentotuhkanlisäysrajoja, jotka ovat 45% portlandinsementin määrästä. Eräille pakkas- tai kloridirasituksessa oleville rakenteille maksimimäärä on 30% portlandinsementtimäärästä. Nämä määrät eivät ole luotuja biolentotuhkalle.

Rasitus- luokka	Suurin sallittu seosainelisäys [%]		
	Masuunikuona	Lentotuhka	Silika
X0 XC1	$\frac{(100 - k_{s_s} - 0,053k_s) - 1,00 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,053}$	$\frac{(100 - k_{s_s} - 1,00 \text{ lt}_s) - 0,053k - 9,0 \text{ sil}}{1,00}$	$\frac{(100 - k_{s_s} - 9,0 \text{ sil}_s) - 0,053k - 1,00 \text{ lt}}{9,0}$
XC2, XC3 XS1 XD1, XA1	$\frac{(100 - k_{s_s} - 0,25k_s) - 2,22 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,25}$	$\frac{(100 - k_{s_s} - 2,22 \text{ lt}_s) - 0,25k - 9,0 \text{ sil}}{2,22}$	$\frac{(100 - k_{s_s} - 9,0 \text{ sil}_s) - 0,25k - 2,22 \text{ lt}}{9,0}$
XC4 XS2, XS3 XD2, XD3 XF1, XF3	$\frac{(100 - k_{s_s} - 0,25k_s) - 2,22 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,25}$	$\frac{(100 - k_{s_s} - 3,33 \text{ lt}_s) - 0,25k - 9,0 \text{ sil}}{3,33}$	$\frac{(100 - k_{s_s} - 9,0 \text{ sil}_s) - 0,25k - 2,22 \text{ lt}}{9,0}$
XF2, XF4	Vaatimukset InfraRYL 2006 kohdan 42020.1.2 mukaan		

Kuva 5. Betonin valmistuksessa käytettävien seosaineiden suurimmat sallitut määrät rasitusluokkien mukaan /1, s. 58/.

jossa,

$k_{s_s}$  on sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa [%]

$k_s$  on sementin sisältämä masuunikuonajauhe [%]

It <sub>s</sub>	on sementin sisältämä lentotuhka [%]
sil <sub>s</sub>	on sementin sisältämä silika [%]
k	on sementin sisältämän ja lisätyn masuunikuonajauheen yhteismäärä [%]
It	on sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä [%]
sil	on sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä [%]

## 4.2 Lentotuhkan koostumus ja raja-arvot

Puupohjaisen biotuhkan koostumus vaihtelee usean tekijän mukaan. Näitä tekijöitä ovat puulaji, puun osa sekä polttotekniikka. Tekijöistä huolimatta puutuhkat koostuvat suurimmaksi osaksi kalsiumista, kaliumista sekä magnesiumyhdisteistä. Esimerkiksi Wisconsin-Madisonin yliopiston tutkimustulosten perusteella 600°C:ssa käsitelty mäntytuuhka sisältää painoprosentiltaan 29,05% kalsiumia, 16,24% kaliumia sekä 7,03% magnesiumia, sekä pienempiä määriä muita alkuaineita. /15, s. 9./

Table 4. Elemental analysis of ash at 600°C (wt% of ash)

Element	Pine	Aspen	Poplar	R. Oak	W. Oak	W. Oak Bark	D. F. Bark
Calcium	29.05	21.17	25.67	36.58	31.35	36.14	34.26
Potassium	16.24	11.25	7.93	6.08	10.25	0.97	2.78
Magnesium	7.03	3.55	9.09	5.20	7.57	0.34	0.37
Sulfur	1.07	0.70	1.02	1.80	1.21	0.40	0.52
Phosphorus	0.84	1.18	0.95	1.56	0.56	0.08	0.51
Manganese	4.04	0.14	0.45	1.49	0.14	0.16	0.37
Zinc	0.36	0.34	0.04	0.22	0.08	0.05	0.07
Iron	0.58	0.26	0.32	n.d.	0.09	0.01	0.26
Aluminum	0.47	0.14	0.35	0.68	<0.03	<0.03	0.59
Sodium	0.06	0.06	2.30	0.08	<0.06	<0.06	<0.06
Silicon	n.d.	0.11	n.d.	n.d.	0.13	0.12	0.24
Boron	0.06	0.05	0.05	0.08	0.04	0.007	0.07
Copper	0.04	0.03	0.03	0.07	0.02	<0.002	0.02

n.d.—not determined.

Kuva 6. Wood ash composition /15, s. 111/.

Bioperäinen lentotuhka sisältää vähemmän betonille hyödyllisiä yhdisteitä. Vertailemalla VTT:n kivihiilitutkimustuloksia (Kuva 7.) Wisconsin Madisonin bioperäisiin (Kuva 6), voidaan huomata kivihiilen sisältävän runsaasti enemmän pii-, rauta- ja alumiiniyhdisteitä, jotka vaikuttavat tuhkan reaktiivisuuteen. Bioperäinen tuuhka sisältää suuret määrät kalsiumyhdisteitä, jotka liiallisina määrinä reagoiessaan edistävät betonin halkeilua ja paisumista. /16./



Alkuaine	Alkuaineen pitoisuus eri materiaaleissa					
	Lentotuhka	Pohjatuhka	RPT	Öljytuhka	Hiili	Maa-aines
Alumiini (p-%)	0,1 - 20,85	3,1 - 18,5	0,64 - 9,7	0,001 - 8,73	0,43 - 3,04	1,0 - 30
Antimoni (µg/g)	0,8 - 131	< 10	15,5	3 - 1 072	0,2 - 14	0,6 - 10
Arseeni (µg/g)	2,3 - 6 300	0,02 - 168	0,8 - 53	2,5 - 10 000	0,5 - 106	1 - 93
Barium (µg/g)	1 - 13 800	109 - 9360	< 25 - 2 280	148 - 1 000	150 - 250	70 - 3 000
Boori (µg/g)	10 - 5 000	1,5 - 513	42 - 530	0,5 - 600	1,2 - 356	2 - 150
Kadmium (µg/g)	0,1 - 130	< 10	0,06 - 25	< 11	0 - 6,5	0,01 - 0,7
Kalsium (p-%)	0,11 - 22,3	0,22 - 24,1	0 - 34,5	0,01 - 33	0,5 - 2,67	0,7 - 50
Kloori (µg/g)	13 - 1 720	< 100 - 2 630	< 150 - 8 970	200 - 10 000	0 - 5 600	20 - 900
Kromi (µg/g)	3,6 - 900	< 0,2 - 5 820	1,6 - 180	10 - 4 390	0 - 610	1 - 1 000
Kupari (µg/g)	14 - 2 200	3,7 - 932	6 - 340	10 - 130 000	1,8 - 185	2 - 300
Fluori (µg/g)	0,4 - 610	2,5 - 104	266 - 1 017	1 - 5	10 - 295	10 - 4 000
Lyijy (µg/g)	3 - 2 120	0,4 - 1 082	0,25 - 290	10 - 100 000	4 - 218	2 - 200
Magnesium (p-%)	0,04 - 7,72	0,2 - 4,8	1,99	0,06 - 45	0,1 - 0,25	0,06 - 0,6
Mangaani (µg/g)	25 - 3 000	56 - 1 940	37 - 312	113 - 1170	6 - 181	20 - 3 000
Elohopea (µg/g)	0,005 - 12	0,005 - 4,2	0,005 - 6	< 1	0,01 - 1,6	0,01 - 0,3
Molybdeeni(µg/g)	1,2 - 236	0,84 - 443	< 4,0 - 52,6	< 20 - 779	0 - 73	0,2 - 5
Nikkeli (µg/g)	1,8 - 4 300	< 10 - 2 940	< 5 - 145	100 - 180 000	0,4 - 104	5 - 500
Kali (p-%)	0,17 - 6,72	0,26 - 3,3	0,001 - 1,70	0,04 - 3,65	0,02 - 0,43	0,04 - 3,5
Rauta (p-%)	1,0 - 27,56	0,4 - 20,1	0,13 - 13,8	0,01 - 52,1	0,32 - 4,32	0,7 - 55,0
Pii (p-%)	1,0 - 31,78	5,1 - 31,2	0,27 - 17,7	0,05 - 17,0	0,58 - 6,09	23 - 35
Hopea (µg/g)	0,04 - 36	< 9,9	< 8,3	< 9,9	0,04 - 0,08	0,01 - 5
Natrium (p-%)	0,01 - 7,1	0,08 - 4,13	0,02 - 5,53	0,1 - 46,5	0 - 0,2	0,075 - 1,0
Seleeni (µg/g)	0,2 - 134	0,08 - 14	< 2 - 162	7,6 - 500	0,4 - 8	0,1 - 4
Strontium (µg/g)	30 - 7 600	170 - 6 440	71 - 2 990	51,7 - 920	100 - 150	7 - 1 000
Rikki (p-%)	0,04 - 6,44	< 0,4 - 7,4	0,08 - 22,8	1,27 - 17,3	0,38 - 5,32	0,003 - 1,0
Sinkki (µg/g)	14 - 3 500	3,8 - 1 796	7,7 - 612	40 - 100 000	0 - 5 600	10 - 300
Typpi (µg/g)	250 - 3 300				12 000	200 - 4 000
Vanadiini (µg/g)	12 - 1 180	12 - 537	< 50 - 261	10 - 460 000	0 - 1 281	0,7 - 500

Kuva 7. Alkuainepitoisuuksien vaihteluvälit kivihiihvoimaloiden lento- ja pohjatuhkissa, rikinpoistotuotteissa (RPT), kivihielessä ja maa-aineksissa (Rai et al. 1987) /17, s. 10/.

### 4.3 Standardin SFS-EN 450 rajat

Standardin SFS-EN 450 osat 1 ja 2 määrittelevät betonin tyypin II seosaineena käytettävälle silikaattipitoiselle kivihiihituhkalle kemialliset ja fysikaaliset vaatimukset. Biopohjaisille tuhille ei ole omaa lentotuhkastandardia. Vaikkei standardin EN 450 soveltamisalaan kuulu bioperäiset tuhkat, tutkitaan silti mitkä mahdollisuudet biotuhkalla on seosaineeksi. Tyypin II seosaineella tarkoitetaan hienojakoista, epäorgaanista, pozzolaanista sekä piilevästi hydraulista materiaalia, joilla voidaan parantaa betonin ominaisuuksia tai tämän erityisominaisuuksien saavuttamiseksi. /21./

Energialaitoksilla massaa polttaessa syntyy hehkutushäviötä.

Hehkutushäviöllä tarkoitetaan prosenttiosuutta, jonka aine menettää

painossaan sitä poltettaessa. Jäljelle jäävä hehkutusjäännös on mineraalista ainesta joka ei pala. Taulukossa 2 on kivihiielperäiselle tuhkalta asetetut raja-arvot.

*Taulukko 2. Hehkutushäviö (SFS-EN 450-1)*

Luokka	Raja-arvo (painoprosentti)
A	< 5,0%
B	< 5,0 - 7,0%
C	< 7,0 - 9,0%

1) Hehkutushäviö määritellään EN 196-2 periaatteiden mukaisesti, mutta hehkutusaikana on 1 tunti.

Standardi EN 450 /21./ määrittelee kivihiielen kanssa käytettävät mahdolliset oheispolttoaineet, johon kuuluvat standardin EN 14588:2010 mukaiset kiinteät biopolttoaineet poislukien kohdissa 4.52, 4.132 ja 4.174 määritelty jätepuu. Oheispolttoaineen hiilen kuivamassan kuuluu olla 60 %, ellei kyseessä ole puhdas luonnon puuaines, jolloin hiilen kuivamassa voi olla 50 %, ja niiden käyttökelpoisuus on osoitettava *taulukon 3* mukaisesti. Puhtaisiin luonnon puuaineksiin kuuluvat puista ja pensaista peräisin olevat puuaineet, joita muodostuu kun käsitellään puun sahauspätkiä, sahanpurua, höylänlastuja, hiontapölyä, haketta tai pellettejä. Oheispolttoaineesta syntyvän lentotuhkan osuus saa olla korkeintaan 30 % kuivapainosta, ja sen voi laskea seuraavan yhtälön avulla:

$$M = 100(K_1 \times A_1 + K_2 \times A_2 \dots K_n \times A_n) / (K_c \times A_c + (K_1 \times A_1 + K_2 \times A_2 \dots K_n \times A_n)) \quad (\text{Kaava 1})$$

,jossa

M on oheispolttoaineen tuhkan osuus kokonaislentotuhkasta painoprosentteina  
 A<sub>i</sub> on oheispolttoaineen nro i tuhkapitoisuus painoprosentteina  
 n on käytettyjen oheispolttoaineiden lukumäärä  
 A<sub>c</sub> on hiilen tuhkapitoisuus painoprosentteina  
 K<sub>i</sub> ja K<sub>c</sub> ovat poltetun oheispolttoaineen (poltettujen oheispolttoaineiden) ja hiilen vastaavat osuudet

ja missä,

$(K_c + K_1 + K_2 + \dots + K_n) = 1$  ja  $K_c \geq 0,60$  (tai 0,50, jos puhdas luonnon puuaines).

Taulukossa 3 on lentotuhkalle määritellyt raja-arvot, jotka koskevat sekä oheispolttoseosta tai puhdasta silikaattipitoista kivihiiliperäistä tuhkaa.

Pelkästään jauhetun hiilen poltossa syntyvän lentotuhkan katsotaan täyttävän useimmat standardin raja-arvot.

Taulukko 3. Lentotuhkastandardin kemialliset raja-arvot (SFS-EN 450-2) /22/.

Aine	Raja-arvo (painoprosentti)
Kloridi (Cl <sup>-</sup> )	< 0,10%
Sulfaattipitoisuus (SO <sub>3</sub> )	< 3,0%
Kalsiumoksidit (CaO)	Vapaa < 1,5% Reaktiivinen < 10%
Piioksidi (SiO <sub>2</sub> )	Reaktiivinen < 25%
Pii-, alumiini- ja rautaoksidi SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 70%
Kokonaisalkalipitoisuus	< 5%
Magnesiumoksidi (MgO)	< 4%
Fosfaatti (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	< 5%

- 1) Vapaan kalsiumoksidin ylittäessä 1,5 painoprosenttia on käytettävä standardin EN 450-1 kohdan 5.3.3 testausta tilavuuden pysyvyyden vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseksi
- 2) Kokonaisalkalipitoisuus lasketaan Na<sub>2</sub>O-ekvivalentteina.
- 3) Yhteispoltossa syntyvän lentotuhkan fosfaattipitoisuus saa olla korkeintaan 100 mg/kg

#### 4.4 Lentotuhkan hienous ja vedentarve

Lentotuhkan hienous määritellään joko märkäseulonnalla standardin EN 451-2 mukaisesti tai ilmasuihkuseulonnalla standardin EN 933-10 kahden hienousluokan mukaisesti (Taulukko 4). Kumpaankin menetelmään käytetään 0,045 mm seulaa, jolla ilmaistaan seulalle jäävän lentotuhkan paino-osuus (%). Märkäseulonta on tavoista varmempi, joten sillä myös ratkaistaan ilmaseulonnassa tulevat mahdolliset kiistatapaukset. /22./

Taulukko 4. Hienousluokat (EN 933-1) /23/.

Hienousluokka	Max. painoprosentti	Vaihteluraja
N	40%	±10
S	12%	Ei sallittu.

Lentotuhkan lisääminen betonimassaan vähentää yleisesti vedentarvetta. Hienousluokkaan S kuuluvan lentotuhkan vedentarve määritellään seuraavalla kaavalla:

$$W = M/225 \times 100 \text{ (Kaava 2)}$$

jossa W on vedentarve ja M testilaastissa käytetty vesimäärä (g). Tulos annetaan yhden prosenttiyksikön tarkkuudella. Vesimäärä saa olla korkeintaan 95% sementin vaaditusta vedentarpeesta. Tämä vaatimus ei koske hienousluokan N lentotuhkaa.

## 5 KOKEELLINEN OSUUS

Aikaisemman tutkimuksen tulosten perusteella valittiin kaksi parhainta biolentotuhkalajiketta. Opinnäytetyön kokeellisen osion tarkoituksena on tutkia biolentotuhkan käyttäytymistä betonissa korvaamalla sillä sementin määrästä 20% ja 40% tuhkien tiheyserot huomioiden. Kokeita varten valmistettiin yksitoista erilaista betonimassaa, jotka erosivat toisistaan tuhkalaaduittain sekä -määrittäin. Osa koekappaleista sisälsi myös kivihiililentotuhkaa ja osa ei sisältänyt mitään. Jokaiselle biolentotuhkalle oli hienonnettu sekä hienontamaton versio. Hienonnuksen tarkoituksena oli pienentää tuhkan partikkelikokoa.

Kokeissa käytettyjen D1 ja G2 tuhkien polttomateriaalit ovat erilaiset. D1 tuhkassa käytettiin suurimmaksi osaksi puun kuorta, sekä osittain lietettä. G2 tuhkassa käytettiin puun, lietteen ja turpeen sekoitusta. Kaikki kokeet tehtiin betonistandardien mukaisesti.

Kokeiden tarkoitus oli tutkia biolentotuhkan vaikutuksia betonimassassa. Vaikutuksia tutkittiin tehden testejä tuoreelle betonimassalle ja kovettuneelle betonille. Testien lisäksi tehtiin myös silmämääräistä tutkimusta mahdollisten

värierojen tai -muutosten osalta.

### 5.1 Tuoreen betonimassan testaus

Märkämassalle tehdyt kokeet sisälsivät betonimassan lämpötilan mittauksen, leviämän, painuman, ilmamäärän sekä märkätiheyden määrittämisen.

Kokeissa seurattiin tuoreelle betonille määritetyn standardisarjan SFS-EN 12350 /31./ mukaista toimintatapaa.

Leviämä määriteltiin asettamalla asetamalla kostutettu kartio keskelle alustaansa ja täyttämällä se kahdessa osassa betonimassalla. Kummatkin osat betonimassaa tiivistettiin puisella sauvalla sullomalla kymmenen kertaa. Kartion pinta pyyhittiin ylimääräisestä betonimassasta siten, että tämä oli tasainen. Suppilo nostettiin rauhallisesti kohtisuoraa ylöspäin noin kolmen sekunnin aikana. Alustaa nostettiin 15 kertaa ylärajoittimeen kiinni ja tiputettiin. Betonimassan leviämä mitattiin alustan keskellä olevan vaaka ja pystyviivan kohdalta (kuva 8).



Kuva 8. Märkämassan leviämän mittaus.

Painuma määriteltiin asettamalla kostutettu kartio alustalleen ja täyttämällä se

kolmessa osassa. Jokainen osa tiivistettiin metallitangolla sullomalla betonimassaa 25 kertaa (kuva 9) jonka jälkeen ylimääräinen betoni pyyhittiin pinnalta pois siten, että pinta oli tasainen. Kartio nostettiin rauhallisesti kohtisuoraan ylös päin noin kolmen sekunnin aikana. Kartion huipun ja betonimassan huipun ero mitattiin.



Kuva 9. Painumamittaus menossa.

Ilmamäärä määriteltiin täyttämällä koekattila kolmessa osassa. Jokainen osa tärytettiin erikseen betonivibralla. Kun ilmamäärämittarin astia oli täynnä betonia, kansi laitettiin paikoilleen. Ylimääräinen ilma poistettiin astiasta ruiskuttamalla vettä toiseen ilmanpoistoaukoista. Kun toisesta aukosta tuleva vesi ei enää poistanut ilmaa kattilasta nämä suljettiin varovaisesti siten, ettei kattilaan enää mennyt ilmaa sisälle. Kattilaan pumpattiin painetta sisälle ja lopulta vivusta painamalla nähtiin betonimassan ilmamäärä prosentteina (kuva 10).



Kuva 10. Ilmamäärämittari näyttämässä ilmamääräprosenttia.

Märkätiheys määriteltiin punnitsemalla pelkän betonimassan paino (kuva 11). Tämä paino jaettiin astian tilavuudella ja yksikkö muunnettiin muotoon  $\text{kg/m}^3$ .



Kuva 11. Märkätiheyden mittaamista.

Jäljelle jääneellä betonimärkämässalla täytettiin koekappalemuotit. Muotin sisäpinta oli muottiöljyTTY muottien irrottamisen helpottamiseksi. Täyttö tehtiin kahdessa osassa täryttäen kummatkin betonivibralla. Säilytyspaikkana toimi betonilaboratorion sisätilat.

## **5.2 Kovettuneen betonin testaukset**

Kovettuneen betonin testaukset tarkastelivat puristuslujuutta. Koekappaleiden tarkasteluihin käytettiin standardin SFS-EN 12390-2 /32./ mukaista toimintatapaa. Koekappaleiden puristukset suoritettiin 28 päivän tai 91 päivän ikäisille koekappaleille. Koekappaleiden muotista purkamisen jälkeen kuutiot vietiin tarkastuksiin. Kuutioiden jokaisen puristuspuolen särmän etäisyydet mitattiin toisiinsa kolmesta osasta ja korkeus neljältä sivulta. Näiden mittojen avulla saatiin myöhemmin laskettua tarkka puristuslujuus. Tarkastuksiin kuului myös tasomaisuudentarkastus, joka mitattiin 0,09 mm mitalla koekappaleen puristuspinnoilta. Suorakulmaisuus mitattiin 0,5 mm mitalla korkeuspuolelta. Jos tasomaisuus ei täytynyt, kuutio vietiin hiottavaksi. Tämän jälkeen kappaleet vietiin puristettaviksi. Puristetuista kappaleista valittiin ehjimmät kappaleet, jotka vietiin halkaistaviksi.

## **5.3 Riskitekijät**

Tulosten todenperäisyyteen liittyy riskitekijöitä, vaikka kokeissa ne yritettiinkin minimoida. Mahdollisista riskeistä suurimpana on biotuhkan vedenimu. Osa massoista epäonnistui liian vähäisen vedenmäärän takia joka johtui siitä, että biotuhka lisäsi massan vedentarvetta. Koska kaikkia tuhkamääriä ei ollut suuria määriä, eli yhdestä tuhkalaadusta ei saanut monta eri testimassaa, niin vettä joutui lisäämään kesken sekoituksen. Vesi-sementtisuhteet olivat joillain massoilla hyvinkin korkeita ja tämä saattoi vaikuttaa lujuudenkehitykseen. Liika vesimäärä erottaa sementtipartikkelit kauemmaksi toisistaan, joka taas vaikuttaa sementtikiven huokoisuuteen. /20, s. 1./

Ennen koekappaleiden valmistusta suoritettiin märkämässakokeet. Märkämässakokeisiin kului noin 15-20 minuuttia, jonka aikana koekappaleisiin käytettävä betonimassa oli astiassaan. Tämän aikana betonimassat saattoivat jo sitoutua hetken. Liian jäykät massat uusittiin.



Betoniseoksen vedenmäärä vaihteli tuhkalaaduittain. Notkeusluokat pyrittiin pitämään S3:n tavoitteessa, mutta tämä ei joka kerta onnistunut.

Betoniseoksen valmistukseen tarvittavan veden lämpötila oli aina kädenlämpöistä, mutta tätä ei kuitenkaan mitattu mittarilla. Tämä saattoi vaikuttaa betonimassan lämpötilaan hieman.

#### 5.4 Kiviainesten rakeisuustutkimukset

Kokeellisessa osuudessa käytetyt kiviainekset tutkittiin ennen betonimassan tekoa. Tutkimukset sisälsivät kosteus- ja rakeisuustutkimukset.

Kosteustutkimukseen käytettiin standardia SFS-EN 1097-5 /33./ ja rakeisuustutkimukseen SFS-EN 933-1 /23./, ilman kiviaineksen pesua.

Kiviaineksia säilytettiin ulkona katoksen alla säiliöissään, ja niiden kosteus saattoi vaihdella ulkoilman kosteuden mukaisesti. Tästä syystä todellinen vedentarpeen määrä ei ole välttämättä täysin tarkka, riippuen kiviainesten kokeenaikaisesta veden absorptiosta.

Kiviainekset kuivattiin uunissa, jolloin näistä saatiin kaikki kosteus pois. Tämän jälkeen niiden annettiin jäähtyä kädenlämpöiseksi. Tämän aikana sisäilmassa olevaa kosteutta imeytyi kiviin. Kiviainesten lopullisiksi kosteusprosentteiksi saatiin kädenlämpöisen massan perusteella:

*Taulukko 5. Koekiviainesten kosteusprosentit.*

Kiviaines:	Kosteusprosentti:
0/8	1,7%
6/16	0,25%

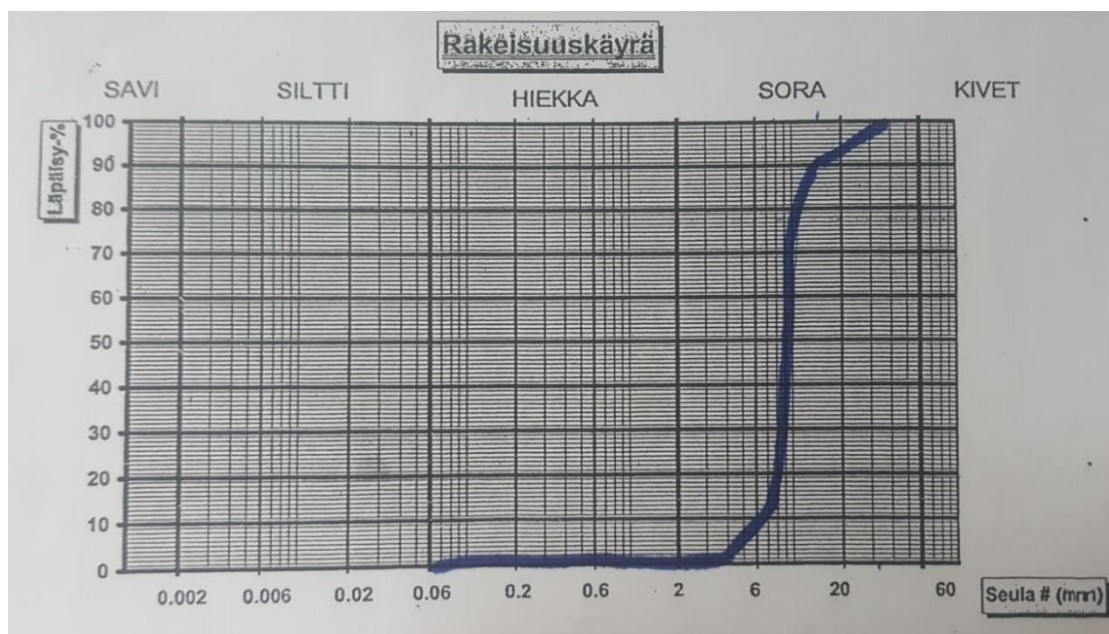
Kuten prosentit osoittavat, pienempi kiviaines kerää suurempaa enemmän kosteutta. Kuivatut kiviainekset laitettiin seulaasarjaan. Seulasarja tärytettiin ja tulokset löytyvät taulukosta 7 ja 8.

Taulukko 6. Kivilajike rakeisuustutkimus: SSr 6/16 mm

Seula (g)	Seula ja md (g)	Seula #mm	Seulalle jäi (g)	Seulalle jäi (%)	Läpäisy (%)
-	-	64	-	0	100
-	-	32	-	0	100
1290,4	1604,4	16	314	10	90
1171,3	3633,5	8	2462,2	77	13
978,6	1359,7	4	381,1	12	1
952,9	962,2	2	9,3	0,3	0,7
876,9	878	1	1,1	0,03	0,67
792,9	794,3	0,5	1,4	0,04	0,63
598,5	601,9	0,25	3,4	0,1	0,53
585,2	590,8	0,125	5,6	0,2	0,33
582,8	590,9	0,063	8,1	0,25	0,08
771,3	783,7	Pohja	12,4	0,4	0

Summa	3198,6g
Vert. md1	3201,2g
Virhe (Pitää olla itseisarvoltaan < 1%)	0,0008%

Taulukossa 6 on määriteltynä betonikokeissa käytetyn 6/16 mm kiviaineksen rakeisuus. Tulosten perusteella piirrettiin rakeisuus käyrä joka on nähtävissä kuvassa 12. Tärytystestin jälkeinen paino laski 2,6 grammaa (Summa) verrattuna lähtöpainoon (Vert. md1). Tulos on sallittu, sillä kiviaineshukan kuuluu olla alle 1-prosentin.



Kuva 12. Raekoko 6/16 mm kivilajikkeen rakeisuuskäyrän kuvaaja.

Rakeisuuskäyrän (kuva 12) ja taulukon 6 mukaisesti kivilajike 6/16 mm on 77-prosenttisesti keskisoraa /35, s. 16/. Käyrässä nähtävä hiekan puolella oleva käyrä johtuu siitä, ettei kiviaines ole pestyä.

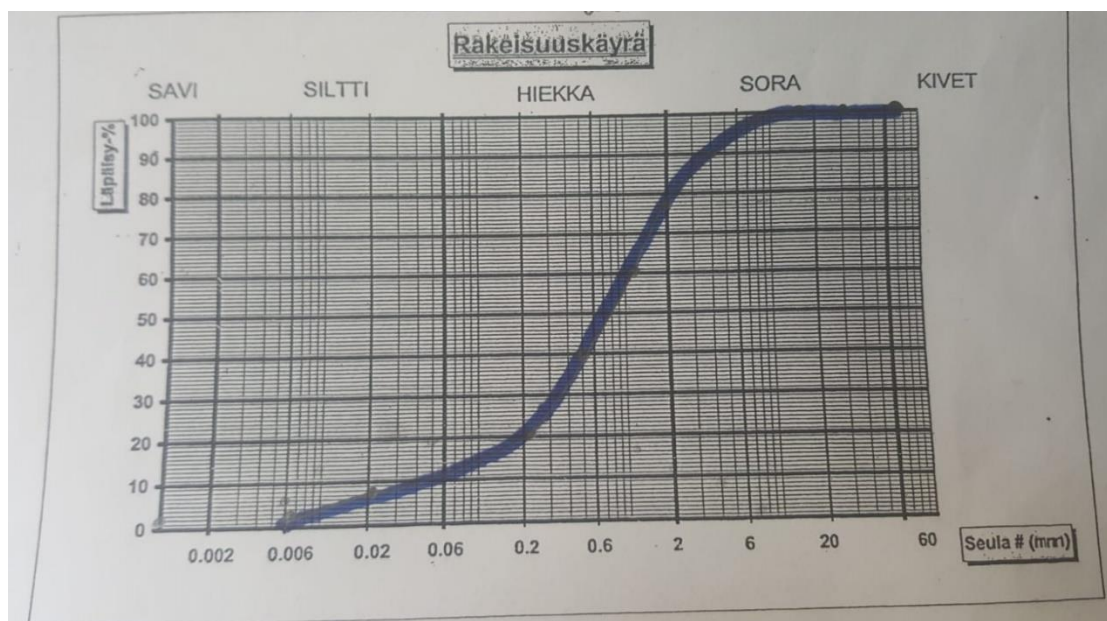
Taulukko 7. Kivilajike rakeisuustutkimus: SSr 0/8 mm

Seula (g)	Seula ja md (g)	Seula #mm	Seulalle jäi (g)	Seulalle jäi (%)	Läpäisy (%)
-	-	64	-	0	100
-	-	32	-	0	100
-	-	16	-	0	100
1171,3	1202,7	8	31,4	2	98
978,7	1115,1	4	136,4	8,5	89,5
950,6	1140,9	2	190,3	11,9	77,6
873,4	1144,2	1	270,8	16,9	60,7
792,1	1109,3	0,5	317,2	19,9	40,8
598,3	923,8	0,25	325,5	20,3	20,5
585,2	800,3	0,125	215,1	13,4	7,1
583,2	665,4	0,063	82,2	5,1	2
771,2	802,7	Pohja	31,5	2	0

Summa	1600,4g
Vert. md1	1602,1g

Virhe (Pitää olla itseisarvoltaan < 1%)	0,001%
---	--------

Taulukossa 7 on määriteltynä betonikokeissa käytetyn 0/8 mm kiviaineksen rakeisuus. Tärytystestin jälkeen paino laski 1,7 grammaa. Tulos on sallittu, sillä kiviaineshukan kuuluu olla alle 1-prosentin.



Kuva 13. Raekoko 0/8 mm kivilajikkeen rakeisuuskäyrän kuvaaja.

Rakeisuuskäyrän (kuva 13) ja taulukon 7 mukaisesti kivilajike 0/8 mm on hiekkaa. Suurin osuus kivilajikkeesta on 20,3-prosenttisesti keskihiekkaa /35, s. 16/.

## 5.5 Betonimassa

Kokeiden betonimassat koostuivat osiossa 5.5 mainituista kiviaineksista, Saitti-Parmix notkistimesta, Rapid CEM II/A-L 42,5 R - pikasementistä, vedestä sekä eri määristä bioperäistä lentotuhkaa, kivihiiliperäistä lentotuhkaa tai ilman yhtään tuhkaa. Kokeiden massamäärät vaihtelivat tuhkan määrän mukaisesti, mutta kaikissa on pyrittiin samaan vesi-sementti suhteeseen. Lentotuhkan painomäärään vaikutti tuhkan tiheys (taulukko 9). Tuhkat lisättiin massan sekaan korvaamalla 20 prosenttia sekä 40 prosenttia sementinmäärästä, massasta riippuen. Suhteituksen antoi Rudus Oy.

Tuhkalajikkeet nimettiin koodeittain koodeittain. Taulukossa 8 on listattuna sekä käsittelemättömän biotuhkan tilavuusjakauma sekä

kappalemääräjakauma.

*Taulukko 8. Koetuhkien kappalemääräjakauma.*

Käsittelemätön tuhka:	Hienonnettu tuhka:	Kappalemääräjakauma (hienontamaton):	Tilavuus jakauma (hienonnettu):
D1	D1J1	0,4	82,2
G2	G2J1	0,494	128
Kivihilli	-	-	-

*Taulukko 9. Tuhkien tiheydet.*

Tuhka	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )
D1	1258,4
D1J1	1287,2
G2	811,6
G2J1	906,3
Kivihilli	946,0

Märkämassaa tarkasteltiin sekä silmämääräisesti että kokein. Kokeisiin kuului lämpötilanmittaus, märkätiheyden-, painuman-, leviämän- sekä ilmamäärän määrittäminen. Jos massasta tuli liian jäykkää, se tehtiin uusiksi. Betonin tavoiteominaisuudet on koottu taulukkoon 10.

*Taulukko 10. Tavoiteominaisuudet betonille.*

Nimellislujuus	37
Maksimiraekoko	16mm
Notkeusluokka	S3
Ilmamäärä	20
Pakkasenkestävä	Ei

Massan sekoitusaika oli 5 minuuttia ja 30 sekuntia. Tämä kuitenkin saattoi vaihdella lisäveden takia. Sekoitusajat kuitenkin pidettiin tasan minuutin etäisyydellä toisistaan.

## 5.6 Märkämassan tarkastelut

Silmämääräisesti märkämassat eivät eronneet normaalista betonimassasta

ollenkaan. Ensimmäiset massat tehtiin ilman lisävettä, mikä vaikutti selvästi betonin notkeuteen. 20-prosenttiset tuhkamassat olivat työstettäviä, mutta 40-prosenttiset massat taas hyvin kuivia. Kuivaa massaa ei voi käsitellä hyvin. Tätä yritettiin korvata ensimmäiseksi notkistimen määrää säätämällä. Kokeessa käytetyn maksiminotkistinmäärän (2-prosenttia veden määrästä) ei auttanut tekemään betonista tarpeeksi notkeaa. Tämän jälkeen osassa massoista on käytetty lisävettä apuna. Kuvassa 14 olevan D1-tuhkabetonimassan vasemmassa kuvassa sementistä on korvattu 20-prosenttia lentotuhkalla ja oikealla 40-prosenttia lentotuhkalla. 40-prosenttinen massa epäonnistui. Kuten kuvasta voi päätellä, biolentotuhkan määrä on ratkaiseva tekijä betonimassojen vedentarpeeseen. Märkämassojen tulokset löytyvät liitteestä 1.



Kuva 14. D1-tuhkan 20-prosenttinen ja 40-prosenttinen biolentotuhkamassa.

Märkämassojen vesi/sementtisuhteessa otettiin huomioon vain käytetyn sementin, veden ja lisäveden määrät. Sementin määrän tuhkakorvaukset ja lisävesi olivat suhdetta nostattavia tekijöitä. Biolentotuhkan vedentarve on suurta kaikkien G2-tuhkamassojen kohdalla. Lisäveden lisääminen lisäsi myös sekoitusaikaa joidenkin massojen kohdalla.

Koska massat tarvitsivat erilaisia määriä lisävettä, oli myös oikea notkeusluokka vaikea saada toteutetuksi. Tästä syystä painumat ja leviämät

ovat jokaisella massalla omanlaisensa. Märkätiheydet olivat hyvin samankaltaisia.

Ensimmäiset 40-prosenttiset biotuhkamassat epäonnistuivat liian vähäisen vesimäärän takia. Epäonnistuneet massat kuitenkin tehtiin uusiksi.

Märkämassat olivat hyvin samanlaisia toisiinsa verrattuna. Ainut poikkeama oli G2 – 40% -betonimassa joka kovettui noin 10 minuutissa sellaiseksi, ettei betonilasta uponnut massaan enää.

### **5.7 Betonin puristuslujuuskappaleet**

Valmiit koekappaleet purettiin muoteistansa. Ennen puristuslujuuden mittauksia jokaisen kappaleen paino, tasomaisuus ja suorakulmaisuus tarkastettiin. Tasomaisuuteen käytettiin 0,09 mm mittaa ja suorakulmaisuuteen 0,5 mm mittaa. Nämä mitat ovat suurimmat sallitut poikkeamat standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti. /34./

Puristuslujuuden mittaustulokset ovat usean saman massan koekappaleen antaman lujuuden keskiarvo. Mittaustulokset ilmoitetaan megapascalina (MPa) ja ovat laskettuja puristuskokeiden ja kuution geometristen mittojen perusteella. Taulukon 12 tulosten perusteella voi sanoa, ettei 40% korvaukset sementistä ole kannattavia. Tiheydet olivat hyvin tasaisia jokaisella massalla. Tavoitelujuus oli K37.

Kaikkien biolentotuhkamassojen 28-vuorokauden puristuslujuustulokset olivat perusmassan puristuslujuutta alhaisemmat paitsi G2J1 – 20% -massa, joka ylitti sen 2,4 MPa. Huonoimman tuloksen antoi G2J1 – 40%, joka alitti myös tavoitelujuuden keskiarvollisesti. Betonimassojen puristustulokset olivat tasaisia ja vaihtelut olivat noin 4 MPa välillä. Poikkeuksena G2 – 40% -massan tulos, jonka neljästä koekappaleesta kaksi antoivat noin 30MPa ja kaksi muuta 45 MPa tulokset. Kivihiilen lujuuden keskiarvot olivat kaikista massoista suurimmat.

*Taulukko 12. 28 päivän ikäisten betonikoekappaleiden puristustulokset. Tulokset laskettu standardin SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti /34/.*

Betonimassa	Minimiarvo [MPa]	Maksimiarvo [MPa]	Kaikkien kuutioiden keskiarvo [MPa]	Tiheyden keskiarvo [kg/m <sup>3</sup> ]
Perusmassa	48,3	51,4	<b>49,5</b>	2330
D1 - 20%	43,5	46,9	<b>45,2</b>	2310
D1 - 40%	41,8	43,4	<b>42,6</b>	2290
D1J1 - 20%	45,6	48,7	<b>47,5</b>	2330
D1J1 - 40%	43,4	44,8	<b>44,0</b>	2300
G2 - 20%	45,5	47,1	<b>46,2</b>	2280
G2 - 40%	29,8	45,5	<b>37,7</b>	2290
G2J1 - 20%	50,7	53,1	<b>51,9</b>	2320
G2J1 - 40%	35,6	37,3	<b>36,2</b>	2260
Kivihilli - 20%	54,0	58,5	<b>56,1</b>	2310
Kivihilli - 40%	50,2	52,0	<b>50,9</b>	2260





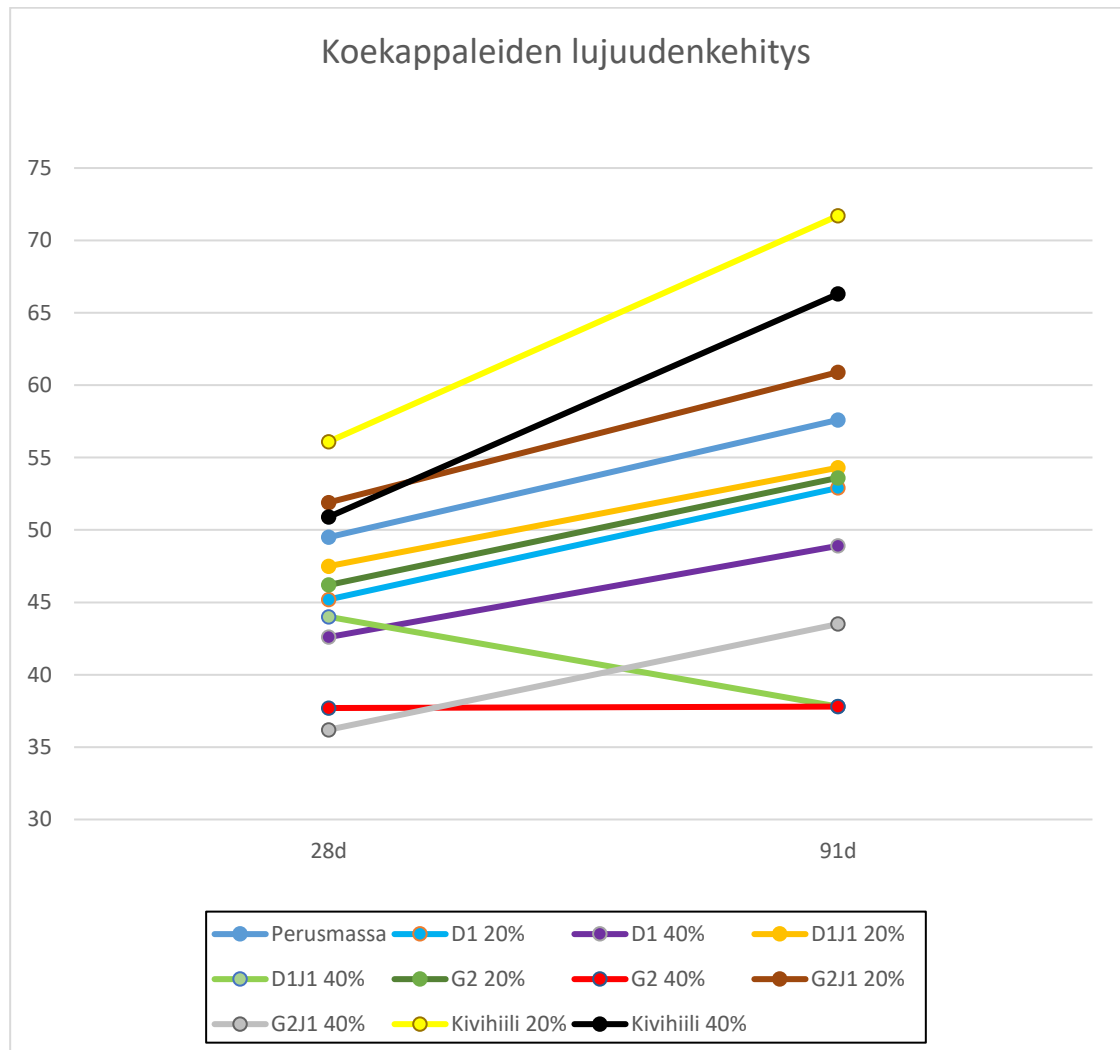
Taulukko 13. 91 päivän puristustulokset.

Tuhka	Ikä [päivä]	Keskiarvo [MPa]
Perusmassa	91	57,6
D1 – 20%	91	52,9
D1 – 40%	91	48,9
D1J1 – 20%	93	54,3
D1J1 – 40%	92	37,8
G2 – 20%	91	53,6
G2 – 40%	91	37,8
G2J1 – 20%	92	60,9
G2J1 – 40%	91	43,5
Kivihilli – 20%	91	71,7
Kivihilli – 40%	92	66,3



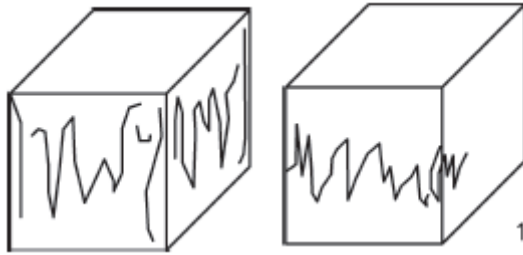
91 vuorokauden puristuslujuustulosten keskiarvoista näkee kuinka biolentotuhkamassat ovat jääneet jälkeen lujuudenkehityksessä. Tuloksista näkee että 40% tuhkamassa on paljon heikompaa kuin 20%. Kivihilli osoittautuu lujemmaksi kuin biotuhka. Tuhkien joukossa on kuitenkin kaksi tuhkalajiketta jotka erottuvat muista. D1J1 – 40% -massan puristuslujuuden keskiarvo heikkeni 6,2 MPa. Tämä massa puristettiin 92-päivän ikäisenä. Puristettuja kappaleita oli kolme ja jokainen antoi lähes saman tuloksen. Massan työstettävyydessä ei ollut eroavaisuuksia muihin 40% massoihin,

vaikka vesimäärä oli paljon pienempi niihin verrattuna. D1J1 – 40% tuhka tarvitsi kaikista 40% massoista vähiten lisävetä, vain 530 ml. Kyseessä voi olla huonot koekappaleet tai lujuudenkehitykseen vaikuttava betonin rapautuminen. Biolentotuhka saattoi kutistua kuivuessaan liikaa pienentäen betonin puristuslujuutta. Toinen erottuvista massoista on G2 – 40%. Sen puristuslujuus ei kehittynyt tai laskenut 28-päivän testeistä.



## 5.8 Koekappaleiden halkeamat ja halkaisu

Koekappaleet murtuivat kaikki tasaisesti kuvan 13 ensimmäisen esimerkkikappaleen lailla. G2J1-tuhkasta tehdyistä koekappaleista yksi kuutio murtui kuvan 15 toisen esimerkkikappaleen lailla. Halkaisukuvissa näkyvät poikittaiset halkeamat ovat tulleet puristetun kappaleen sahauksen tuloksena.



Kuva 15. Betonikuution murtuminen SFS-EN 12390-3:2019 mukaisesti.

Pinnan väreissä ei ollut eroavaisuuksia, vaikka kuvissa kuutiot saattavat olla vielä hieman kosteita. Biotuhkakappaleiden pinnoissa oli hieman enemmän huokosia kuin perusmassan tai kivihiilimassan. Halkaistuissa kappaleissa ei löytynyt eroavaisuuksia huokosten tai värin osalta. Liitteessä 1 näkee koekappaleiden murtuman ja sisäpinnan.

## 6 YHTEENVETO

Betonin suhteitusresepti tuli Rudus Oy:ltä. Lähes kaikki massat pääsivät ja pysyivät yli K37-tavoitelujuuden. Tämä ei kuitenkaan vaikuta kokeiden tarkasteluun.

Mitä enemmän biolentotuhkaa massaan laittaa, sitä enemmän lisävettä tarvitsee myös. Vedentarve on tuhkakohtainen. Suhteitusreseptin vesimäärä, joka riitti alun perin perusmassaan ja myöhemmin kivihiilimassoihin, oli liian vähäinen biolentotuhkalle. Tämä johti siihen, että 40-prosenttisista biotuhkamassoista tuli työstämiskelvottomia. Lisäveden määrä näkyi heti vesi-sementtisuhteessa, joka myös saattaa vaikuttaa betonin ominaisuuksiin.

Betonimassan notkeuteen vaikutti ainoastaan vesi. Notkistimen määrä nostettiin 2% veden määrästä, ilman vaikutusta. Kivihiilimassassa notkistimen vaikutuksen huomasi heti.

Biolentotuhka alensi kappaleen puristuslujuutta ja kivihiilituhka nosti.

Biotuhkan lujuudenkehitys oli alhaisempaa kuin perusmassalla.

Biolentotuhkien eroavaisuudet olivat tasaisia G2 – 40% -massaa

lukuunottamatta. 40% tuhkamassat heikentävät lujuudenkehitystä. D1J1 –

40% tuhkamassa saattoi rapautua, sillä koekappaleen lujuudet alenivat.

Väri vaihteluja ei ollut havaittavissa. Huokosia oli kaikissa kappaleissa saman verran. Halkaistut kappaleet olivat sisäpuolelta samanlaisia.

Biolentotuhkaa ei saa käyttää vielä yksinään seosaineena. Standardissa SFS-EN 450 on määritelty kuitenkin mahdolliseksi seospoltto, kunhan oheispolttoaineen lentotuhkan osuus on korkeintaan 30%.

Massoista lupaavimmaksi osoittautui G2J1 – 20%. Sen lujuudenkehitys pysyi perusmassaa korkeampana. Kivihiilen lujuuden tasolle se ei kuitenkaan ylettänyt. G2-tuhkat koostuivat puu-, turve- ja lietemassasta.

## 7 LÄHTEET

1. SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2018. Betonitekniikan oppikirja by 201. Helsinki: BY-Koulutus Oy.
2. SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2008. Lentotuhkan käyttö betonissa by 52. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.
3. The balance small business. Uses, Benefits, and Drawbacks of Fly Ash in Construction. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.thebalancesmb.com/fly-ash-applications-844761> [6.8.2019]
4. Kiviniemi S. 2017. Biotuhka turhan arvokasta hukattavaksi. Puunjalostusinsinöörit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.puunjalostusinsinoorit.fi/ajankohtaista/blogi/biotuhka-turhan-arvokasta-hukattavaksi/> [viitattu 7.3.2019]
5. VTT. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2300.pdf> [viitattu 12.11.2019]
6. Maa- ja metsätalousministeriö. Biojalostamo. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/biojalostamot> [viitattu 12.11.2019]
7. Kevätniemen biojalostamo- ja bioterminaalihankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelma. Prosessikuvaus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B09E106F1-746E-4536-935B-F26B3823A0C7%7D/58007> [viitattu 19.9.2019]
8. Tuhkarakentamisen käsikirja 2012. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf) [Viitattu 11.3.2019]
9. Rudus Oy. 2008. Lentotuhkaohje. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/Download/24033/Lentotuhka-ohje.pdf> [Viitattu: 11.3.2019]

10. VTT. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2411.pdf> [Viitattu 23.5.2019]
11. Tampereen teknillinen korkeakoulu, kirjoittajat & Rakennustieto Oy. Teollinen betonirakentaminen. Painos. 1996.
12. Inkeröinen J. ja Alasaarela E. 2010. Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/41387/YMra\\_13\\_2010.pdf?sequence=1](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10138/41387/YMra_13_2010.pdf?sequence=1) [19.9.2019]
13. European chemicals agency. REACH-asetus tutuksi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach> [viitattu 7.8.2019]
14. Tukes. CLP-asetus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tukes.fi/kemikaalit/clp-luokitus-merkinnat-ja-pakkaaminen/cpl-asetus> [viitattu 7.8.2019]
15. Department of Mechanical Engineering. Wisconsin-Madison yliopisto. 1993. Wood ash composition as function of furnace temperature. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1993/misra93a.pdf> [Viitattu 8.3.2019]
16. The Science of Concrete. Northwestern. Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) gel. WWW-dokumentti. Saatavissa: [http://www.iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5\\_4\\_2.html](http://www.iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_4_2.html) [Viitattu 13.9.2019]
17. Mäkelä E., Wahlström M. ja Mroueh U-M. 1995. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan hyötykäyttö maarakentamisessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1995/J809.pdf> [viitattu 5.10.2019]

18. Jätelaitosyhdistys. Arinapoltto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=31> [Viitattu 11.3.2019]
19. Jätelaitosyhdistys. Leijupelttipoltto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=31> [Viitattu 11.3.2019]
20. Vesi-sementtisuhde 100 vuotta. J. Punkki ja T. Ojala. 2018. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/03/BET1801\\_78-83.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/03/BET1801_78-83.pdf) [Viitattu 10.12.2019]
21. SFS-EN 450-1. Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 1: Määritelmät, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus.
22. SFS-EN 450-2. Betoniin käytettävä lentotuhka. Osa 2: Vaatimustenmukaisuuden arviointi.
23. SFS-EN 933-1. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä.
24. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017.
25. Findikaattori. Uusiutuvat energianlähteet. 2019. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://findikaattori.fi/fi/89> [viitattu 15.12.2019]
26. Ympäristönsuojelulaki 527/2014.
27. Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014.
28. Lannoitevalmistelaki 539/2006.
29. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011. Rakennustuotteiden kaupan pitämistä koskevien ehtojen yhdenmukaistamisesta ja neuvoston direktiivin 89/106/ETY kumoamisesta.

30. Valtioneuvoston asetus kiinteän betoniaseman ja betonituotetehtaan ympäristönsuojeluvaatimuksista 858/2018.

31. SFS-EN 12350-1. Testing fresh concrete. Part 1: Sampling and common apparatus.

32. SFS-EN 12390-2. Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests.

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

34. SFS-EN 12390-3. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.

35. Tielaitos. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. 1993. WWW-dokumentti. Saatavissa:

[https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf2/yleiset\\_perusteet.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf) [viitattu 15.12.2019]



## LIITTEET

## Liite 1. Betonikokeiden märkämässatulokset.

Betonimassa 1 (ei tuhkaa). 60L	
Vesi/sementtisuhde	0,398
Lämpötila (°C)	24,8
Painuma (mm)	220
Leviämä (mm)	510 & 560
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2360
Ilmamäärä (%)	1,7
Lisävesi (ml)	-
Sekoitusaika (min)	5,5

Betonimassa 2 (D1)	Sementistä korvattu 20% tuhalla. 70L
Vesi/sementtisuhde	0,499
Lämpötila (°C)	28,8
Painuma (mm)	550
Leviämä (mm)	355 & 340
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2350
Ilmamäärä (%)	2,25
Lisävesi (ml)	-
Sekoitusaika (min)	6,5

Betonimassa 3 (D1)	Sementistä korvattu 40% tuhalla. 70L
Vesi/sementtisuhde	0,745
Lämpötila (°C)	24,7
Painuma (mm)	45
Leviämä (mm)	340 & 340
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2315
Ilmamäärä (%)	2,3
Lisävesi (ml)	1030
Sekoitusaika (min)	7,5

Betonimassa 4 (D1J1 - hienonnettu)	Sementistä korvattu 20% tuhalla. 70L
Vesi/sementtisuhde	0,499
Lämpötila (°C)	24,1
Painuma (mm)	100
Leviämä (mm)	400 & 390
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2395
Ilmamäärä (%)	2
Lisävesi (ml)	-
Sekoitusaika (min)	5,5

Betonimassa 5 (D1J1 - hienonnettu)	Sementistä korvattu 40% tuhalla. 75L
Vesi/sementtisuhte	0,704
Lämpötila (°C)	26,2
Painuma (mm)	70
Leviämä (mm)	375 & 390
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2360
Ilmamäärä (%)	2,3
Lisävesi (ml)	530
Sekoitusaika (min)	6,5

Betonimassa 6 (G2)	Sementistä korvattu 20% tuhalla. 80L
Vesi/sementtisuhte	0,619
Lämpötila (°C)	25,2
Painuma (mm)	55
Leviämä (mm)	370 & 360
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2320
Ilmamäärä (%)	2,5
Lisävesi (ml)	2300
Sekoitusaika (min)	7,5

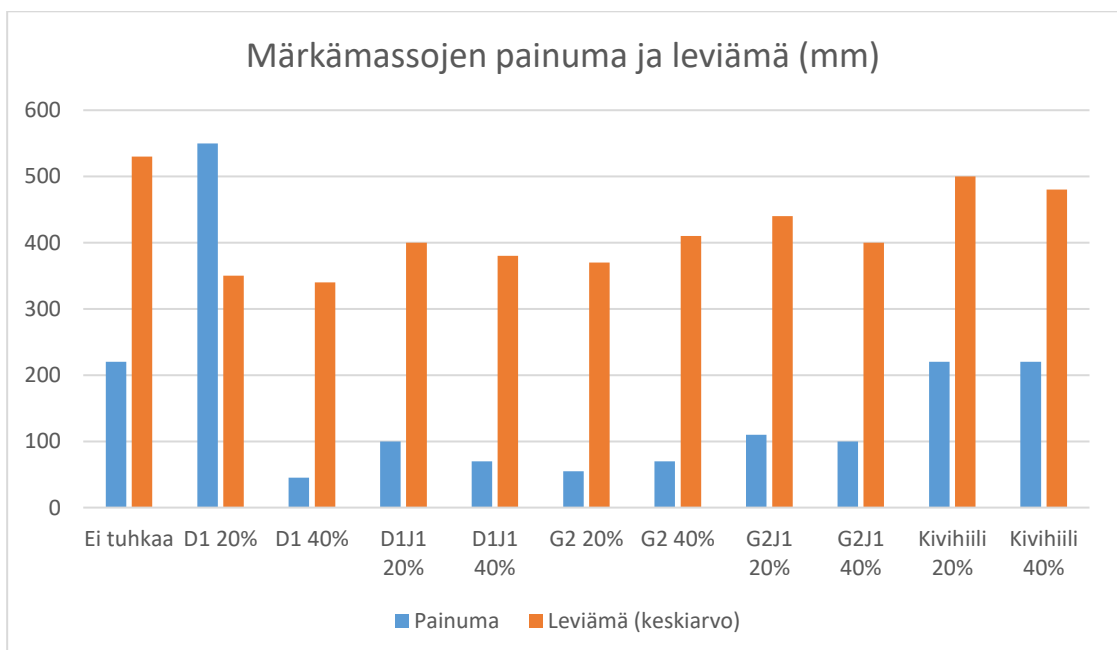
Betonimassa 7 (G2)	Sementistä korvattu 40% tuhalla. 80L
Vesi/sementtisuhte	1,03
Lämpötila (°C)	29,3
Painuma (mm)	70
Leviämä (mm)	400 & 410
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2210
Ilmamäärä (%)	2
Lisävesi (ml)	5200
Sekoitusaika (min)	6,5

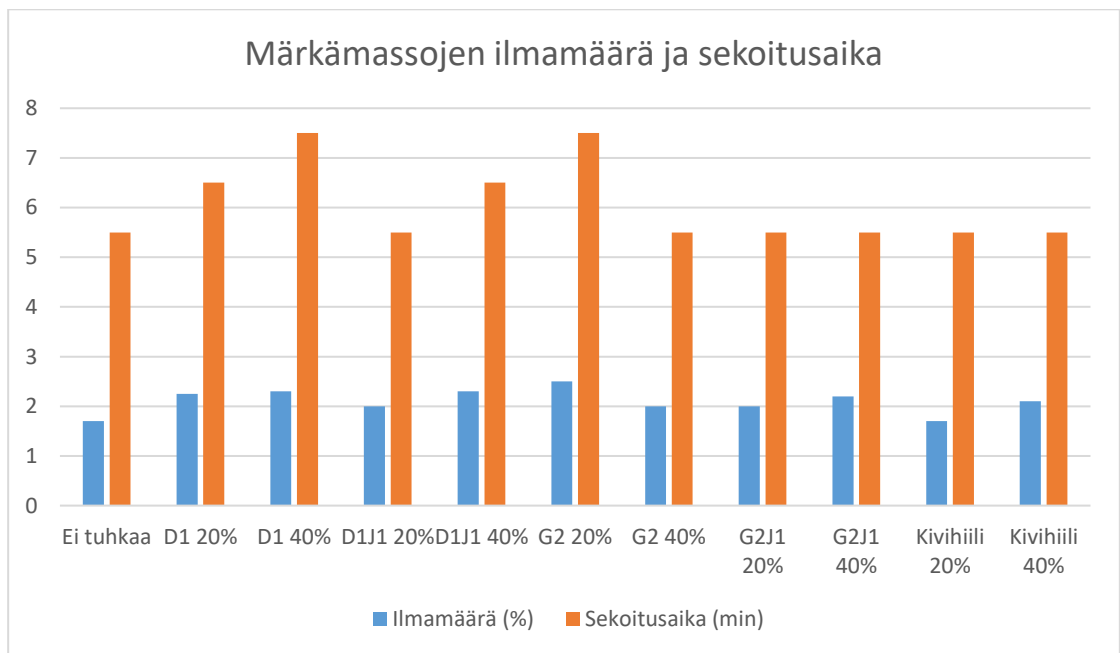
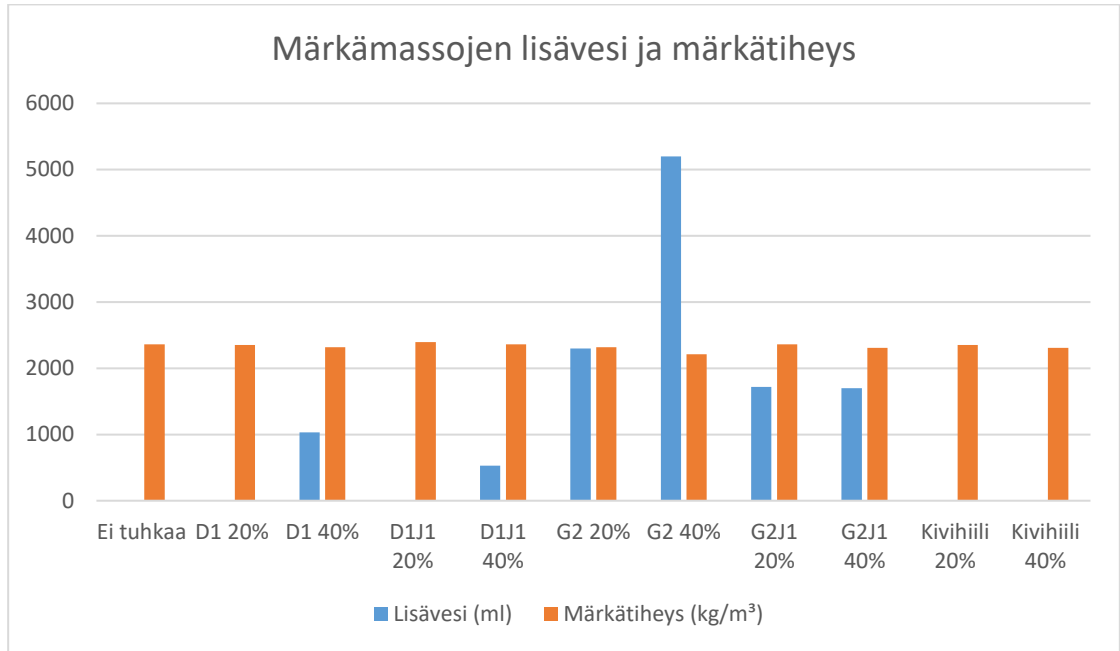
Betonimassa 8 (G2J1 - hienonnettu)	Sementistä korvattu 20% tuhalla. 70L
Vesi/sementtisuhte	0,602
Lämpötila (°C)	25,5
Painuma (mm)	110
Leviämä (mm)	440 & 430
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2355
Ilmamäärä (%)	2
Lisävesi (ml)	1720
Sekoitusaika (min)	5,5

Betonimassa 9 (G2J1 - hienonnettu)	Sementistä korvattu 40% tuhalla. 50L
Vesi/sementtisuhde	0,798
Lämpötila (°C)	25,2
Painuma (mm)	95
Leviämä (mm)	400 & 405
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2305
Ilmamäärä (%)	2,2
Lisävesi (ml)	1700
Sekoitusaika (min)	5,5

Betonimassa 10 (kivihiili)	Sementistä korvattu 20% tuhalla. 70L
Vesi/sementtisuhde	0,499
Lämpötila (°C)	22
Painuma (mm)	220
Leviämä (mm)	490 & 500
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2345
Ilmamäärä (%)	1,7
Lisävesi (ml)	-
Sekoitusaika (min)	5,5

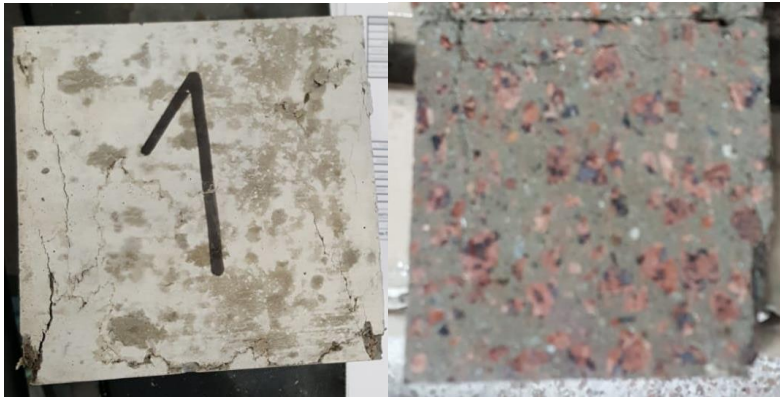
Betonimassa 11 (kivihiili)	Sementistä korvattu 40% tuhalla. 70L
Vesi/sementtisuhde	0,662
Lämpötila (°C)	20,9
Painuma (mm)	215
Leviämä (mm)	490 & 460
Märkätiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2305
Ilmamäärä (%)	2,1
Lisävesi (ml)	-
Sekoitusaika (min)	5,5



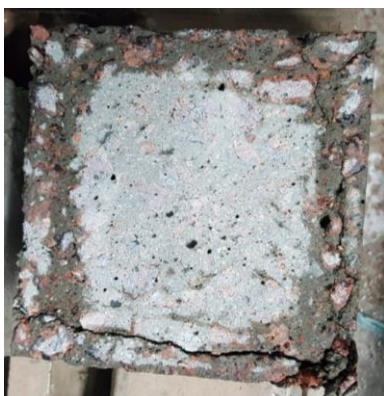
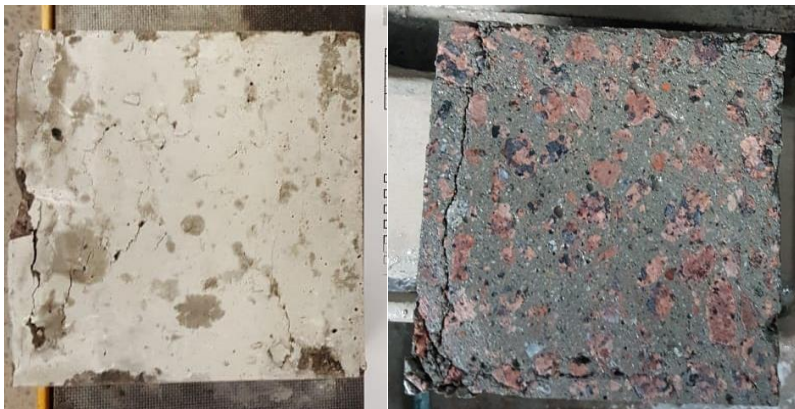


## Liite 2. Koekappaleiden murtuma ja halkaisu.

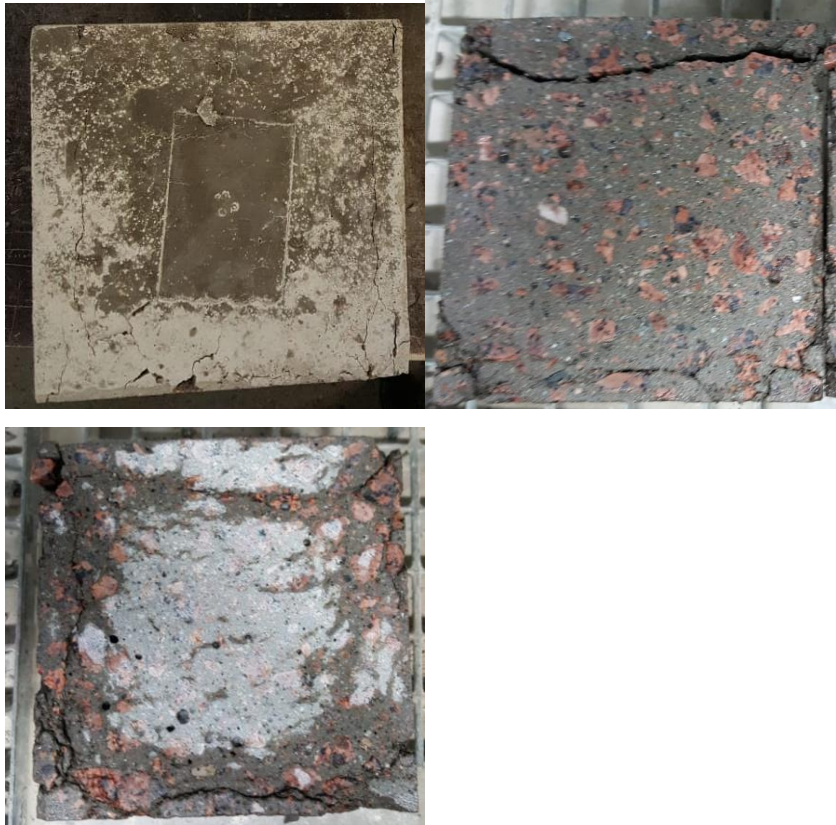
## Perusmassa (ei tuhkaa)



## D1 – 20%



D1 – 40%



D1J1 – 20%



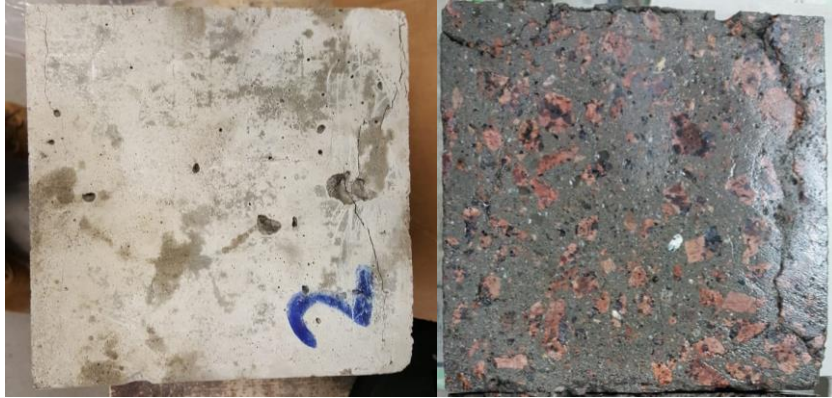
D1J1 – 40%



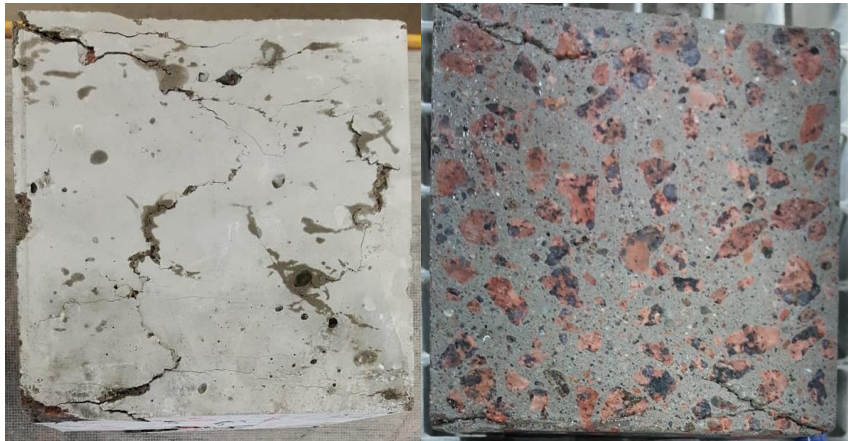
G2 – 20%



G2 – 40%



G2J1 – 20%





G2J1 – 40%



Kivihili – 20%



Kivihilli – 40%

