



Johannes Heikkinen

TEOLLISUUDEN SIVUTUOTTEIDEN KÄYTTÖ BETONISSA SEMENTIN KORVAAJANA

TEOLLISUUDEN SIVUTUOTTEIDEN KÄYTTÖ BETO- NISSA SEMENTIN KORVAAJANA

Johannes Heikkinen
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Rakennetekniikka

Tekijä: Johannes Heikkinen

Opinnäytetyön nimi: Teollisuuden sivutuotteiden käyttö betonissa sementin korvaajana

Työn ohjaaja: Pekka Nykyri

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2013

Sivumäärä: 35

Betonin sideaineena käytettävän Portland-sementin valmistus aiheuttaa huomattavia hiilidioksidipäästöjä. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli testata, kuinka teollisuuden sivuaineiden käyttö betonissa Portland-sementin korvaajana vaikuttaa betonin puristuslujuuteen. Pyrkimyksenä oli myös löytää resepti, jota voitaisiin hyödyntää rakennusteollisuudessa.

Työssä kokeiltiin kahdeksaa erilaista sementtireseptiä, jotka sisälsivät 40 - 80 % granuloitua masuunikuonajauhetta sekä vaihtelevia määriä muita seos- ja lisäaineita. Lisäksi joitakin reseptejä testattiin uudelleen käyttämällä eri hienouteen jauhattua granuloitua masuunikuonajauhetta. Pääasiallisina sideaineina käytettyjen granuloidun masuunikuonajauheen ja lentotuhkan aktivoimiseen käytettiin Portland-sementtiä, emäksisiä aineita sekä suoloja. Tämän opinnäytetyön puitteissa koekappaleilta testattiin ainoastaan puristuslujuus.

Tutkimuksessa todettiin, että teollisuuden sivutuotteilla voidaan korvata betonissa käytettävä Portland-sementti suurelta osin tai jopa kokonaan, jos kohteen vaatima puristuslujuus on rajoitettu. Lisäksi granuloidun masuunikuonajauheen hienoudella todettiin olevan suuri merkitys lopputulokseen.

Asiasanat: Betoni, sementti, geopolymeeri, granuloitu masuunikuonajauhe, teräskuona, lentotuhka, metakaoliini, aktivointi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme of Civil Engineering, Structural Engineering

Author: Johannes Heikkinen

Title of thesis: Use of industry byproducts as a replacement for cement in concrete

Supervisor: Pekka Nykyri

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2013

Number of pages: 35

The production of Portland cement used as a binder in concrete causes significant carbon dioxide emissions. The purpose of this thesis was to test how the use of industrial by-products as a replacement for Portland cement affects the compressive strength of concrete. The aim was also to find a recipe that can be utilized in the construction industry.

In this thesis eight different cement recipes, containing 40 - 80 % ground granulated blast-furnace slag and varying quantities of other binders and admixtures, were tested. In addition, some of the recipes were tested a second time, using granulated blast-furnace slag ground to a different degree of fineness. Portland cement, alkalis and salts were used to activate the granulated blast-furnace slag and fly ash used as the main binders. Within the scope of this thesis, only the compressive strength of the samples was tested.

According to the results, the Portland cement used in concrete can be replaced largely or entirely with industrial by-products if the compressive strength required is limited. Additionally, the fineness of the ground granulated blast-furnace slag was found to have a major effect on the results.

Keywords: Concrete, cement, geopolymer, ground granulated blast-furnace slag, steel slag, fly ash, metakaolin, activation

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Oulun seudun ammattikorkeakoulun rakennustekniikan osastolle insinöörityönä. Työn tilaaja oli Juha Roininen Oulun Yliopiston Prosessimetallurgian laboratoriolta. Työn ohjaajana toimi Pekka Nykyri Oulun Seudun Ammattikorkeakoululta.

Haluan kiittää Oulun seudun ammattikorkeakoulua ja Oulun Yliopistoa tähän opinnäytetyöhön liittyvistä ohjeista ja mahdollisuudesta tehdä työ. Lisäksi haluan kiittää Heikki Isohookanaa korvaamattomasta avusta työhön liittyvien kokeiden toteutuksessa.

Oulussa 14.03.2013

Johannes Heikkinen

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLTÖ	5
1 JOHDANTO.....	7
2 BETONI	8
2.1 Betonin koostumus	8
2.2 Betonin osa-aineet.....	9
2.2.1 Kiviaines ja vesi.....	9
2.2.2 Sideaines	10
3 SIDEAINEET	11
3.1 Sementtityypit	11
3.2 Suomessa valmistettavat rakennussementit	12
3.3 Pozzolaanisetsosaineet	13
3.3.1 Lentotuhka	13
3.3.2 Silika	13
3.3.3 Metakaoliini	14
3.4 Terästeollisuuden sivutuotteet	14
3.4.1 Granuloitu masuunikuonajauhe	14
3.4.2 Teräskuona	15
4 SIDEAINEEN AKTIVOINTI	17
5 KOKEET	19
5.1 Massavariantit.....	19
5.2 Koekappaleiden valmistus	20
5.2.1 Massan valmistus.....	20
5.2.2 Massan notkeuden määrittäminen.....	20
5.2.3 Massan valaminen	21
5.2.4 Muottien purkaminen.....	22
5.3 Puristuslujuuden testaus.....	23
6 TESTAUSTULOKSET	25
6.1 Tiheys.....	26
6.2 Puristuslujuus	27
7 YHTEENVETO	29

LÄHTEET	30
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Betonin sideaineena käytettävän Portland-sementin valmistuksesta aiheutuu huomattavat hiilidioksidipäästöt, ja sen ekologisia vaihtoehtoja on enenevässä määrin alettu tutkia. Nykyään sementin valmistuksessa käytetään granuloitua masuunikuonaa, mutta vain pieniä määriä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Portland-sementin korvaamista teollisuuden sivutuotteilla, lähinnä granuloidulla masuunikuonalla, joko suurelta osin tai jopa kokonaan. Tavoitteena oli etsiä rajoja masuunikuonan hyödyntämiselle betonituotteissa ja löytää kestävä kehityksen mukainen betoniresepti.

Granuloitu masuunikuona ei sellaisenaan sovellu sementin korvaajaksi, vaan sen piilevät hydrauliset ominaisuudet täytyy aktivoida hajottamalla sen lasimainen rakenne. Perinteisesti tämä on tehty käyttämällä erittäin emäksisiä aineita tai jauhamalla granuloitu masuunikuonajauhe hienommaksi. Tässä opinnäytetyössä granuloitua masuunikuonaa on pyritty aktivoimaan Portland-sementillä, emäksisillä aineilla ja erilaisilla suoloilla. Myös käytetyn granuloidun masuunikuonajauheen hienouden suhdetta betonin lujuuteen on tutkittu.

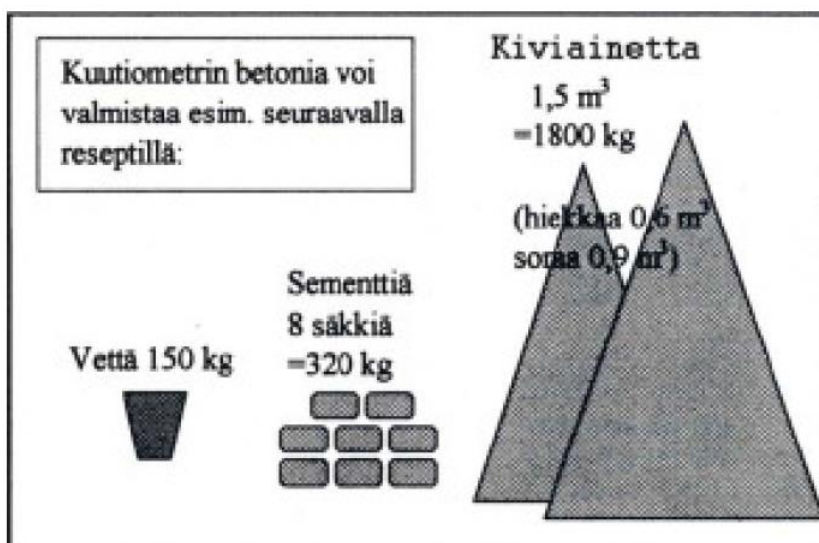
2 BETONI

Betonin kaltaisia materiaaleja on käytetty rakentamiseen jo tuhansia vuosia. Tuolloin betonin valmistusprosessi oli kuitenkin hyvin erilainen. Vanhin löydetty betonirakenne on noin 7600 vuotta vanha veden, soran ja kalkin seoksesta tehty majan lattia. Nykyisin betonin tekemiseen käytetään Portland-sementtiä ja sen seoksia. Joseph Aspdin sai ensimmäisen patentin Portland-sementin valmistamiseen vuonna 1824. (1, s. 131; 2, s. 5.)

Tällä hetkellä betoni on maailman yleisin rakennusmateriaali ja sitä käytetään maailmassa vuosittain yli neljä miljardia kuutiometriä. Betonin suosio perustuu sen edullisuuteen, kosteudenkestoon, lujuuteen ja jäykkyyteen, turvallisuuteen ja muokattavuuteen. (3; 4.)

2.1 Betonin koostumus

Betonin tärkeimmät osa-aineet ovat kiviaines, sideaines ja vesi (kuva 1). Osa-aineiden keskinäisillä suhteilla ja laadulla sekä tarvittaessa lisä- ja seosaineilla voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. (5; 6, s. 31.)



KUVA 1. Esimerkki betonin valmistusreseptistä (6, s. 31)

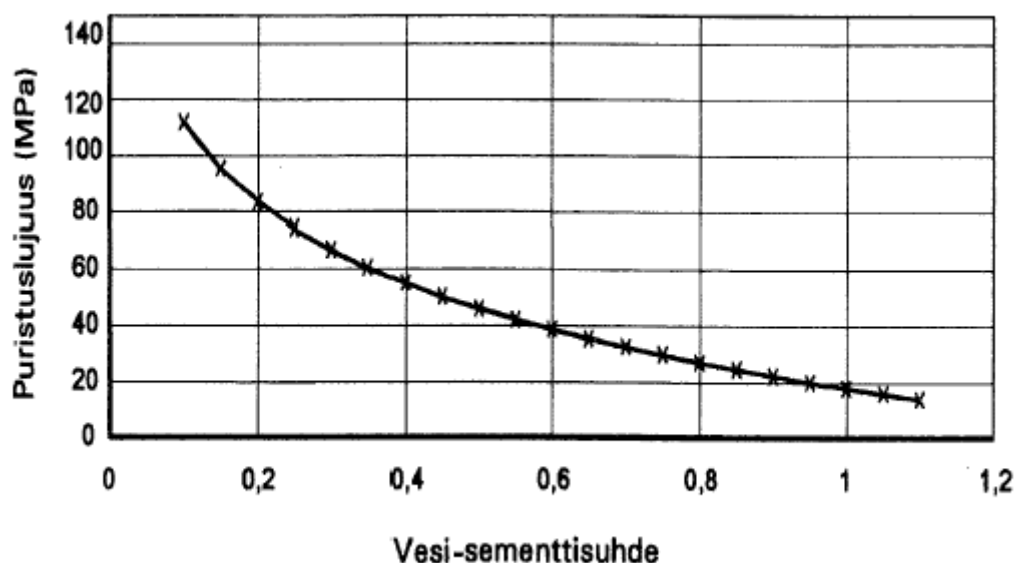
2.2 Betonin osa-aineet

2.2.1 Kiviaines ja vesi

Betonin valmistukseen käytettävä kiviaines koostuu erikokoisista kivirakeista (0,02 – 16 mm). Sen karkeimman osan muodostaa murske tai luonnonsora ja hienoimman osan luonnonhiekkä. Kiviaineksen laatu vaikuttaa tuoreen betonin massan ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Betonin tilavuudesta kiviainesta on 60 - 85 %. (5; 7.)

Betonissa käytettävän veden tulee olla puhdasta. Käytännössä juomakelpoinen vesi kelpaa myös betonissa käytettäväksi. Humuspitoinen suovesi tai järvivesi haittaa betonin kovettumista, ja sokeria sisältävä vesi voi kokonaan estää betonin kovettumisreaktion. Veden kelpoisuus voidaan määrittää kemiallisella analyysillä. (1, s. 143 - 144; 7.)

Veden massaa suhteessa sideaineen massaan kutsutaan nimellä vesi-sementtisuhde. Vesi-sementtisuhdetta muuttamalla voidaan vaikuttaa betonin valuominaisuuksiin sekä lujuuteen (kuva 2). (8.)



KUVA 2. Vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin puristuslujuuteen (6, s. 54)

2.2.2 Sideaines

Sideaines käynnistää sekoittuessaan veden kanssa betonin kovettavan hydratoitumisreaktion. Yleisimmin betonin sideaineena käytetään pelkkää Portlandsementtiä. Lisäksi sideaine voi sisältää seos- ja lisäaineita. (6, s. 39; 9.)

Seosaineet ovat teollisuuden sivutuotteita, joita käytetään betonissa kustannus- tai ympäristösyistä. Yleisimpiä seosaineita ovat murskattu betoni, granuloitu masuunikuona, lentotuhka ja silika. (5.)

Lisäaineet ovat kemikaaleja, joilla pyritään vaikuttamaan betonin ominaisuuksiin kuten notkeuteen tai kovettumisaikaan. Lisäaineen määrä suhteessa muihin sideaineeseen on pieni. (10.)

3 SIDEAINEET

3.1 Sementtityypit

Käytössä olevia sementtityyppejä on useita ja rakennuskohteessa käytettävä sementti voidaan valita haluttujen ominaisuuksien mukaan. Tavallisten sementtien koostumus- ja laatuvaatimukset määrittelee Suomessa standardi SFS-EN 197-1. Vaatimukset on esitetty taulukossa 1. Sementtien päälajeista CEM IV (pozzolaanisementti) ja CEM V (seossementti) eivät ole käytössä Suomessa. (2, s. 21 - 29.)

TAULUKKO 1. Suomessa sallittujen sementtien koostumusvaatimukset (2, s. 23)

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset (%)					
	Klinkkeri	Kuona	Silika	Lentotuhka	Kalkkikivi	Muut
CEM I	95-100	-	-	-	-	0-5
CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	0-5
CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	0-5
CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	0-5
CEM II/A-V	80-94	-	-	6-20	-	0-5
CEM II/B-V	65-79	-	-	21-35	-	0-5
CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	6-20	0-5
CEM II/A-M	80-94	6-20				0-5
CEM II/B-M	65-79	21-35				0-5
CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	0-5
CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	0-5

Sementit tulee yksilöidä vähintään sementtilajin tunnuksella (joka sisältää seosainetunnuksen), lujuusluokkaa kuvaavalla luvulla sekä varhaislujuutta kuvaavalla kirjaimella. Standardin käyttämiä lyhenteitä seosaineista ovat: ma-suunikuona (S), kalkkikivi (L tai LL), silika (D), pozzolaanit (P tai Q), lentotuhka (V tai W) ja poltettu liuske (T). Varhaislujuusluokissa N tarkoittaa normaalia varhaislujuutta ja R tarkoittaa korkeaa varhaislujuutta. (2, s. 21 - 22.)

3.2 Suomessa valmistettavat rakennussementit

Plussementti on normaalisti kovettuva portlandseossementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N. Se soveltuu hyvin valmisbetoniin, mutta sitä voidaan käyttää myös betonituote- ja elementtisovelluksissa sekä stabiloinnissa. Plussementti sisältää 15 - 25 % masuunikuonaa. (11.)

Yleissementti on normaalisti kovettuva portlandseossementti CEM II A-M (S-LL) 42,5 N. Se soveltuu kaikkeen rakentamiseen. Yleissementti sisältää 3 - 14 % masuunikuonaa. (1, s. 142; 11.)

Rapidsementti on nopeasti kovettuva portlandseossementti CEM II/A-LL 42,5 R. Rapidsementin kovettumisnopeus riippuu sen hienoudesta. Sitä käytetään talvibetonointiin, elementtituotantoon sekä valmisbetoniin. Rapidsementti sisältää 0 - 5 % masuunikuonaa. (11.)

Pikasementti on erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti CEM I 52,5 R. Sitä käytetään nopean lujuudenkehityksensä takia nopeaa muottikiertoa vaativissa kohteissa sekä erikoislujien betonien valmistukseen. (11.)

Megasementti on nopeasti kovettuva portlandsementti CEM I 42,5 R. Sitä käytetään sekä valmisbetonissa että elementtirakentamisessa. (11.)

SR-sementti on normaalisti kovettuva sulfaatinkestävä portlandsementti CEM I 42,5 N SR3. Se soveltuu sulfaattirasituksen alaisina oleviin kohteisiin ja alhaisen lämmöntuottonsa ansiosta esimerkiksi siltojen betonointiin. (1, s. 142; 11.)

Valkosementti on valkoinen, normaalisti kovettuva portlandsementti CEM I 52,5 R- SR5. Sitä käytetään valkoisten ja värillisten betonituotteiden valmistuksessa sekä kuivatuotteiden valmistuksessa. Valkosementti kutistuu kuivuesaan. (1, s. 142; 11.)

3.3 Pozzolaaniset seosaineet

3.3.1 Lentotuhka

Lentotuhka voidaan jakaa kahteen luokkaan: kivihiilen poltossa syntyvään ja metsäteollisuuden energiantuotannossa syntyvään. Tämän opinnäytetyön ko-keissa on käytetty metsäteollisuuden lentotuhkaa.

Kivihiilen lentotuhka erotetaan voimalaitoksessa hienoksi jauhetun kivihiilen poltossa syntyvistä savukaasuista, ja sitä syntyy Suomessa vuosittain yli 500 000 tonnia. Kivihiilen lentotuhkan käyttöaste on 60 - 80 %. Sen kiintotiheys on 2100 - 2500 kg/m³. (6, s. 59; 12.)

Metsäteollisuuden energiantuotannossa lentotuhkaa syntyy, kun voimalaitokset käyttävät puupohjaisia polttoaineita tai turpeen ja puun seosta. Suomessa täl-laista tuhkaa syntyy noin 400 000 tonnia vuosittain ja suurin osa siitä päätyy kaatopaikoille ja teollisuuden läjitysalueille. Viime vuosina biopolton lentotuhkan hyödyntämiseen on kuitenkin alettu kiinnittää enemmän huomiota, ja sen hyö-tykäyttö on lisääntynyt. Kasavarastoituna biopolton lentotuhkan kiintotiheys on 2300 - 3200 kg/m³. (12; 13, s. 6.)

Lentotuhkalla voidaan parantaa betonimassan työstettävyyttä ja koossa-pysyvyyttä, mutta sen sisältämä hiili vaikeuttaa betonin huokostamista. Sen hii-lipitoisuusmäärät vaihtelevat paljon, mikä tekee tasalaatuisuuden saavuttami-sesta vaikeaa. (6, s. 59.)

3.3.2 Silika

Silika erotetaan piiraudan ja piin valmistuksessa syntyvistä savukaasuista. Se on erittäin hienojakoista: sen raekoko on <1µm ja kiintotiheys luokkaa 2 200 kg/m³. (6, s.60)

Silika lisää betonin lujuutta ja parantaa sen kemiallista kestävyyttä, koossa-pysyvyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä. Silikan käyttö betonissa lisää sen ve-

dentarvetta, ja tämän vuoksi sen kanssa käytetään vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. (6, s. 60.)

3.3.3 Metakaoliini

Metakaoliini valmistetaan kalsinoimalla kaoliniittisavea, jolloin sen kiderakenne muuttuu ja siitä muodostuu amorfinen alumiinisilikaatti. Metakaoliini jalostetaan huolellisesti epäpuhtauksien poistamiseksi ja raekoon kontrolloimiseksi. Sen raekoko on yleensä luokkaa $<2\mu\text{m}$. Väriltään metakaoliini on valkoista, eikä tummenna betonia kuten esimerkiksi silika. (15.)

Metakaoliini parantaa betonin työstettävyyttä ja lujuutta ja vähentää sen kutistuvuutta sekä kutistumisesta aiheutuvien halkeamien leveyttä. Lisäksi betonin korroosionkestävyys paranee. (15.)

Aquaminerals Finland Oy on perustanut koetehtaan metakaoliinin tuotantoa varten ja varsinaisen tuotannon arvioidaan käynnistyvän kesällä 2013. Tehdas sijaitsee Paltamossa. (16.)

3.4 Terästeollisuuden sivutuotteet

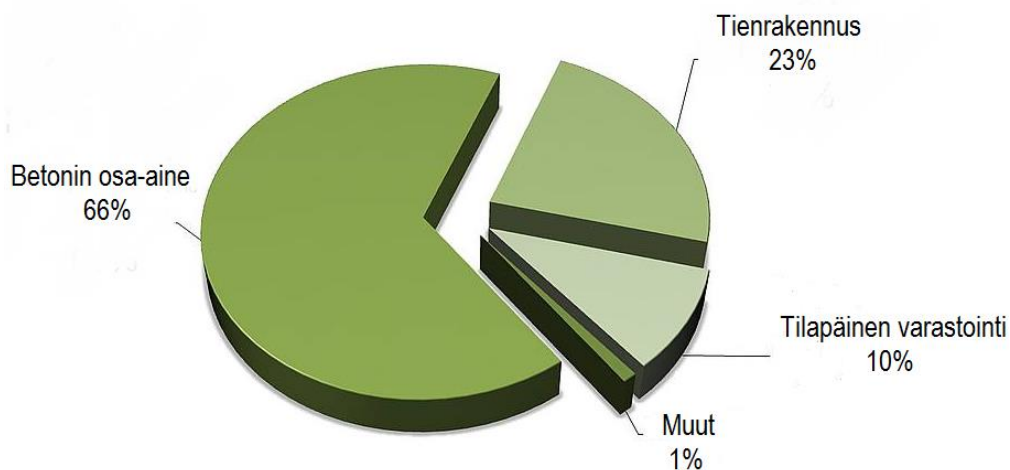
3.4.1 Granuloitu masuunikuonajauhe

Granuloitu masuunikuonajauhe valmistetaan jauhamalla granuloitua masuunikuonaa. Granuloimalla eli jäähdyttämällä sula kuona nopeasti sille saadaan melkein täysin amorfinen rakenne ja sen reaktiokyky paranee. Sen kemiallinen rakenne riippuu rautamalmista, jonka jalostamisen sivutuotteena kuona on saatu. Granuloidun masuunikuonajauheen kiintotiheys on $2\,900\text{ kg/m}^3$. Kuvassa 3 on esitetty tutkimustietoa masuunikuonan tuotannosta 13 Euroopan maassa. (6, s. 60; 17, s. 644; 18; 19.)



KUVA 3. Masuunikuonan tuotanto 2010: 23,5 tonnia (19)

Kuvassa 4 on esitetty tutkimustietoa masuunikuonan käytöstä samoissa maissa.



KUVA 4. Masuunikuonan käyttö 2010: 25,6 tonnia (19)

Masuunikuonan hydratoituminen on Portland-sementtiklinkkeriin verrattuna hidasta, mistä johtuen sen alkulujuus on heikompi ja vastaavasti myöhempi lujuudenkehitys nopeampaa. Hitaan reaktion ansiosta sille myös kehittyy hyvin tiivis mikrorakenne ja sen kemiallinen kestävyys lisääntyy. Myös sen lämmöntuotto on huomattavasti Portland-sementtiä vähäisempää. (17, s. 644.)

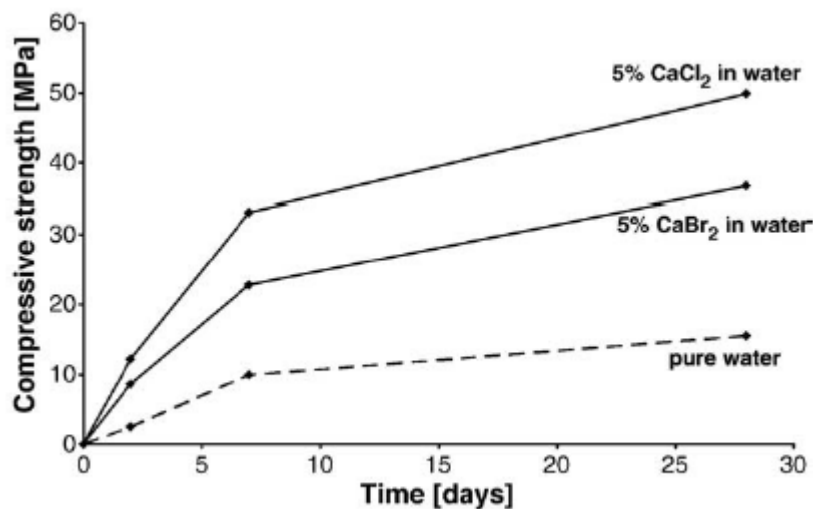
3.4.2 Teräskuona

Teräskuona muodostuu sivutuotteena, kun masuunista saatava raakarauta muutetaan konvertteriprosessilla teräkseksi. Sitä syntyy Suomessa vuosittain 285 000 - 376 000 tonnia ja sitä käytetään maa- ja vesirakennuksissa, lannoitteena, betonissa ja rakennusmateriaaleissa. Teräskuonan kiintotiheys on 3200 - 3500 kg/m³. (20, s. 1 - 2; 21, s. 23; 22, s. 3.)

Betonin runkoaineena teräskuona parantaa betonin puristuslujuutta, vetolujuutta ja taivutuslujuutta verrattuna luonnollisiin runkoaineisiin. Teräskuonan käyttöä runkoaineena kuitenkin hankaloittavat sen sisältämät kalsiumoksidi (CaO) ja magnesiumoksidi (MgO), jotka vapaana ollessaan aiheuttavat runkoaineen laajenemista ajan myötä. Tämän opinnäytetyön kokeissa käytettiin teräskuonaa jauhattuna seosaineena. (23, s. 6; 24, s. 34; 25, s. 254.)

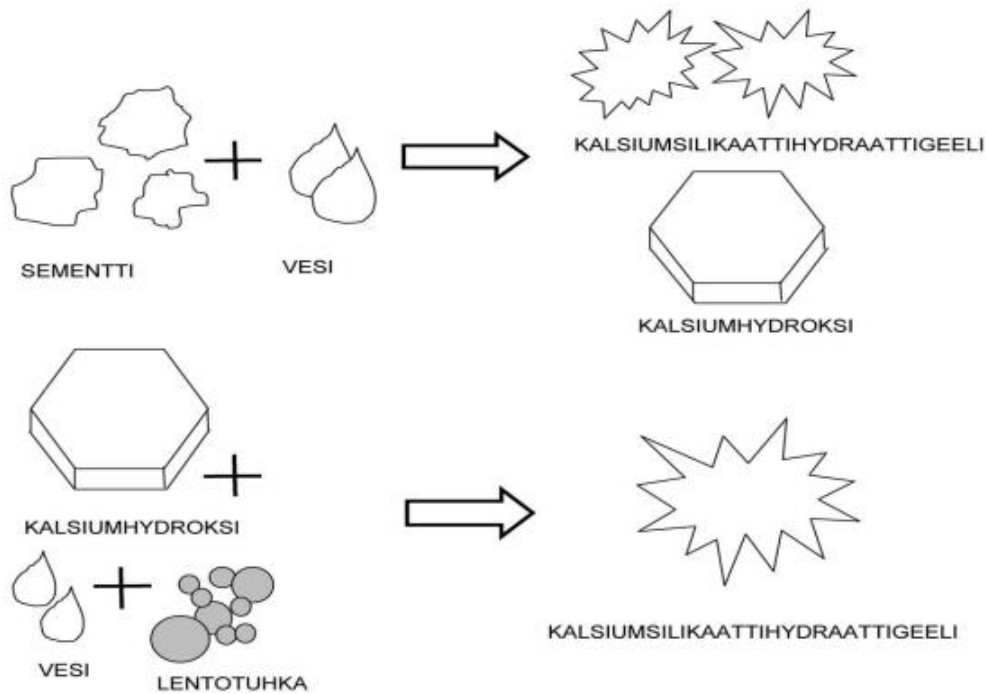
4 SIDEAINEEN AKTIVOINTI

Granuloitu masuunikuonajauhe on piilevästi hydraulinen eli toimiakseen sementinkaltaisena materiaalina se tarvitsee jonkinlaisen aktivaattorin. Ilman aktivaattoria se silti reagoi veden kanssa, mutta hydraatioreaktio on hyvin hidas (kuva 5). (26, s. 1; 27, s. 249.)



KUVA 5. Kalsiumkloridin ja kalsiumbromidin lisäyksen vaikutus lujuudenkehitykseen laastissa, joka sisälsi masuunikuonaa, kalsiumhydroksidia ja kalsiumkarbonaattia (19)

Lentotuhkalla ei itsenäisenä ole sementtimäisiä ominaisuuksia, mutta yhdistettynä hyvin emäksiseen aineeseen se muodostaa sementtimäisen tuotteen (kuva 6). Sen käyttöä rajoittaa sen huono reaktiokyky, jonka takia betonin asettuminen ja lujuudenkehitys tapahtuvat usein hitaasti. Reaktiokykyä voidaan parantaa muunmuassa lisäämällä sideaineeseen granuloitua masuunikuonajauhetta. (26, s. 1; 28, s. 607, s. 614.)



Kuva 6. Lentotuhkan reaktiot portlandsementtiä sisältävässä betonissa (15.)

Portland-sementtiä sisältämättömästä ja kemiallisesti aktivoitavasta betonista käytetään nimitystä geopolymeeri. Tässä opinnäytetyössä sideaineena käytettyjä teollisuuden sivutuotteita on pyritty aktivoimaan Portlandsementillä, emäksisillä aineilla, suoloilla ja metakaoliinilla. (29.)

5 KOKEET

Opinnäytetyötä varten valmistettiin yhteensä 14 erilaista betonimassaa, joista valettiin 40x40x160 mm³ koekappaleet (kuva 7). Kutakin betonimassaa kohden valmistettiin kolme koekappaletta, jotta betonin lujuus voitaisiin testata kahden, seitsemän sekä 28 vuorokauden kuluttua valamisesta.



KUVA 7. Vastavalettuja prismamuotteja

5.1 Massavariantit

Opinnäytetyötä varten tehtiin useita erilaisia betonimassoja, joissa runkoaineksen ja veden määrä pidettiin samana, mutta sideaineksen osa-aineiden suhteita muuteltiin. Kokeissa käytettiin granuloituna masuunikuonajauheena sekä Finnsementin toimittamaa valmiiksi jauhettua tuotetta että eri asteisiin jauhettua Rautaruukin granuloitua masuunikuonaa.

Pyrkimyksenä oli löytää sementtiliimaresepti, jossa Portland-sementin määrä on mahdollisimman pieni, mutta jonka lujuus on kuitenkin kelvollinen rakennusteollisuuden käyttöön. Ensimmäinen valmistettu verrokkimassa jäi jostain syystä erittäin heikoksi, minkä takia verrokkeja jouduttiin valmistamaan toinen. Massojen reseptejä ei oltu päätetty etukäteen, vaan ne kehiteltiin opinnäytetyön edetessä saatujen tulosten perusteella.

5.2 Koekappaleiden valmistus

5.2.1 Massan valmistus

Massan valmistus aloitettiin punnitsemalla betonimassan tarvitsema runkoaines, sideaines ja vesi. Opinnäytetyön kokeissa runkoaineena käytettiin huonekuivaa 0 - 2 mm:n kiviainesta ja runkoaineen tilavuuden suhde sideaineen tilavuuteen oli kaikilla massoilla 3:1. Vetenä käytettiin Oulun kaupungin vesijohtovettä.

Ensin mahdolliset lisäaineet liuotettiin pieneen määrään vettä, jotta ne sekoituisivat paremmin massaan. Sitten betonin kuivat osa-aineet sekoitettiin keskenään betonimyllyssä (kuva 8), minkä jälkeen myllyyn lisättiin vesi sekä veteen liuotetut lisäaineet. Vettä lisättiin vähitellen, kunnes massa saavutti halutun notkeuden.



KUVA 8. Betonimylly

5.2.2 Massan notkeuden määrittäminen

Massan notkeus määritettiin standardin EN 1015-3 tuoreen laastin notkeuden määrittämisen mukaisesti. Siinä iskupöydälle (kuva 9) asetettu kartio täytetään massalla kahdessa vaiheessa, ensin puoleen väliin ja sitten täyteen.



KUVA 9. Iskupöytä

Kummankin täyttökerran jälkeen massa tiivistettiin kartion sisään lyömällä siihen 10 iskua lieriön muotoisella survimella. Täytön jälkeen massan pinta tasoitettiin, kartio poistettiin ja massaa iskettiin iskupöydällä yhteensä 15 kertaa iskujen välin ollessa noin sekunti. Tämän jälkeen mitattiin leviämä ristimittauksella ja otettiin kahdesta tuloksesta keskiarvo. Tässä opinnäytetyössä notkeustestauksen tuloksia käytettiin vain määrittämään, vastaako massan notkeus opinnäytetyön ohjauksessa annettuja ohjearvoja.

5.2.3 Massan valaminen

Kun massa oli saavuttanut halutun notkeuden, se valettiin tärytuspöytään kiinnitettyyn prismamuottiin (kuva 10).



KUVA 10. Tärytyspöytä, johon on ruuvattu kiinni prismamuotti

Ensin muottiin lisättiin betonimassaa kunkin koekappaleen kohdalle niin, että se tulisi vastaamaan arviolta puolta koekappaleen tärytysjakson jälkeisestä tilavuudesta. Tämän jälkeen tärytyspöytä ohjelmoitiin lyömään prismamuottia pöytää vasten 60 kertaa. Ohjelman loputtua betonimassaa lisättiin edelleen, kunnes muotissa oli betonia arviolta hieman yli kunkin koekappaleen kokonaistilavuuden, minkä jälkeen tärytyspöytä ohjelmoitiin lyömään uudet 60 iskua.

Tärytyksen jälkeen prismamuotti poistettiin tärytyspöydästä ja betonimassan pinta tasattiin muotin yläreunan tasalle. Tämän jälkeen muotit siirrettiin vedellä kostutetun, erityisesti tähän käyttötarkoitukseen valmistetun muoviasian alle, jotta betonin pinta ei kuivuisi liian nopeasti.

5.2.4 Muottien purkaminen

Koekappaleiden annettiin olla muoviasian alla kaksi vuorokautta, minkä jälkeen ne varovaisesti purettiin muoteistaan ruuvipuristinta ja kumivasaraa hyväksikäyttäen. Kukin koekappale merkittiin sekaannusten välttämiseksi. Tämän jälkeen koekappaleet punnittiin erikseen vedessä ja ilmassa ja määritettiin niiden tiheys kaavalla 1.

$$\rho = \frac{m_i}{(m_i - m_v)} * \rho_n$$

KAAVA 1

m_i = kappaleen massa ilmassa punnittuna (kg)

m_v = kappaleen massa vedessä punnittuna (kg)

ρ_n = nesteen tiheys (kg/m^3)

ρ = kappaleen tiheys (kg/m^3)

Tiheyden määrittämisen jälkeen koekappaleet laitettiin vesialtaaseen, jossa ne peittyivät noin 20-asteisen veden alle (kuva 11). Käytetyt muotit puhdistettiin ja öljyttiin seuraavaa käyttöä varten. Koekappaleet olivat veden alla aina puristuslujuuden mittaamiseen saakka.



KUVA 11. Kappalemerkittyjä prismoja veden alla

5.3 Puristuslujuuden testaus

Tässä opinnäytetyössä koekappaleilta mitattiin vain puristuslujuus. Kutakin massaa kohden saatiin kolme koekappaletta, jotka numeroitin muotin purkuvaiheessa yhdestä kolmeen. Ensimmäinen kappaleista testattiin kolmen, toinen seitsemän ja kolmas 28 päivän kuluttua massan valamisesta. Puristuslujuuden testaamiseen käytettiin 400 kN:n kapasiteetin omaavaa Dartec-yleisaineen-koetuslaitetta (kuva 12), jonka ajonopeutena käytettiin nopeutta 0,3 kN/s. Puristuspuunnan pinta-ala oli 40 x 40 mm.



KUVA 12. Puristuslujuuden testaamiseen käytetty Dartec-yleisaineenkoetuslaite.

6 TESTAUSTULOKSET

Puristuslujuuden testaustuloksissa (taulukko 2) oli suuria eroja eri massojen koekappaleiden välillä. Lujuudenkehitys oli kaikilla massoilla verrokkia lukuunottamatta melko hidasta. Viimeinen massa ei ollut vielä kolmen päivän kohdalla tarpeeksi lujaa testattavaksi. Testaustulokset ja massojen reseptit löytyvät myös liitteestä 1.

TAULUKKO 2. Puristuslujuuden testaustulokset

Massa	Puristuslujuus (MPa)			Tiheys (kg/m ³)
	3 –vrk	7-vrk	28-vrk	
I	0,92	2,46	10	2110
II	5,51	7,12	32	2200
III	1,43	7,95	17	2230
IV	2,12	5,21	6,5	2100
V	6,95	10,16	14,5	2230
VI	1,25	8,78	21,5	2230
VII	14,75	32	46,5	2220
VIII	12,9	18	24	2250
IX	23,12	36	44	2230
X	5,07	19	36	2280
XI	1,5	4	12,5	2110
XII	7,5	18	34,5	2230
XIII	14	19	24,5	3270

Massojen reseptit tunnuksittain on selitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Valmistetut massat

Massa	Sideaine (%)						Lisäaineet (% sideaineen kokonais-tilavuudesta)		Lisäaineet (konsentraatio ⁶)
	CEM II/A-LL	Masuunikuona	Biopolton lentotuhka ⁷	Teräskuona	Ca(OH) ₂	Meta-kaoliini	NaSiO ₃	CaCl ₂	NaOH
I	15	80 ⁵			5			5	
II	15	80 ¹			5			5	
III	15	80 ¹			5		5		
IV	Verrokki: Kiviaines 1095 kg/m ³ , CEM II/A-LL 250 kg/m ³ , vesi 190kg/m ³								
V		50 ¹	50						M6
VI		50 ¹	50					10	
VII	15	80 ²			5			5	
VIII		50 ²	50						M6
IX	Verrokki: Kiviaines / CEM II/A-LL suhteessa 3.0								
X	20	40 ²	40						
XI	15	80 ⁴			5			5	
XII	15	40 ²	40		5			5	
XIII		50 ²	35			15			M6
XIV		60 ³		20	5	15		5	

¹ Finnsementin granuloitu masuunikuonajauhe,

pinta-ala 1,5806 m²/g

² Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, hienompi kuulajauhettu,

pinta-ala 1,1530 m²/g

³ Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, karkeampi kuulajauhettu

⁴ Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, hienompi tankojauhettu,

pinta-ala 0,3027 m²/g

⁵ Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, karkeampi tankojauhettu,

pinta-ala 0,2316 m²/g

⁶ Lisäaine liuotettu veteen konsentraationa

⁷ Biopolton lentotuhkan pinta-ala 3,4455 m²/g

6.1 Tiheys

Massojen tiheys määritettiin heti muottien purkamisen jälkeen luvun 5.2.4 mukaisesti. Tuloksissa kullekin massalle esitetyt tiheydet ovat massasta valmistettujen koekappaleiden tiheyksien keskiarvoja. Tiheydet olivat samaa suuruusluokkaa lukuun ottamatta kahta viimeistä massaa, joiden tiheys oli huomattavasti suurempi. Nämä massat olivat ainoita, joissa oli käytetty metakaoliinia.

Metakaoliinia sisältävien massojen tiheydet olivat $3\,270\text{ kg/m}^3$ ja $3\,240\text{ kg/m}^3$. Verrokkimassan tiheys oli $2\,230\text{ kg/m}^3$ ja muut massat olivat lähellä tätä. Metakaoliinin suurempi tiheys voi johtua siitä, että sen hyvin hienot hiukkaset täyttävät seokseen jäävät huokokset paremmin.

6.2 Puristuslujuus

Puristuslujuuden osalta massoista saatiin yllättävänkin hyviä tuloksia ja vastavasti osa massoista oli rakennuskäyttöön kelpaamattomia. Käytetyn granuloidun masuunikuonan hienousasteella oli erittäin suuri vaikutus puristuslujuuteen. Heikoimmat tulokset saatiin käytettäessä tankomyllyllä jauhettua kuonaa (massat 1 ja 11). Parhaat tulokset saatiin kuulamylllyssä jauhetuilla kuonilla, Finnsementin toimittamalla kuonalla tehtyjen massojen jäädessä näiden välille. Finnsementin granuloitu masuunikuona oli käytetyistä hienoin, mutta sen iästä ei ollut tarkkaa tietoa, eikä sen reaktiivisuus välttämättä ollut enää parhaimmillaan.

Ero eri kuonalaatujen välillä näkyy parhaiten vertailtaessa kahta ensimmäistä massaa, jotka ovat käytettyä masuunikuonaa lukuunottamatta samat, mutta joiden puristuslujuuksien ero 28 vuorokauden kohdalla on kuitenkin jopa 22 MPa. Myös massat 5 ja 8 ovat kuonalaatua lukuunottamatta samat, ja vastaava puristuslujuusero on noin 10 MPa.

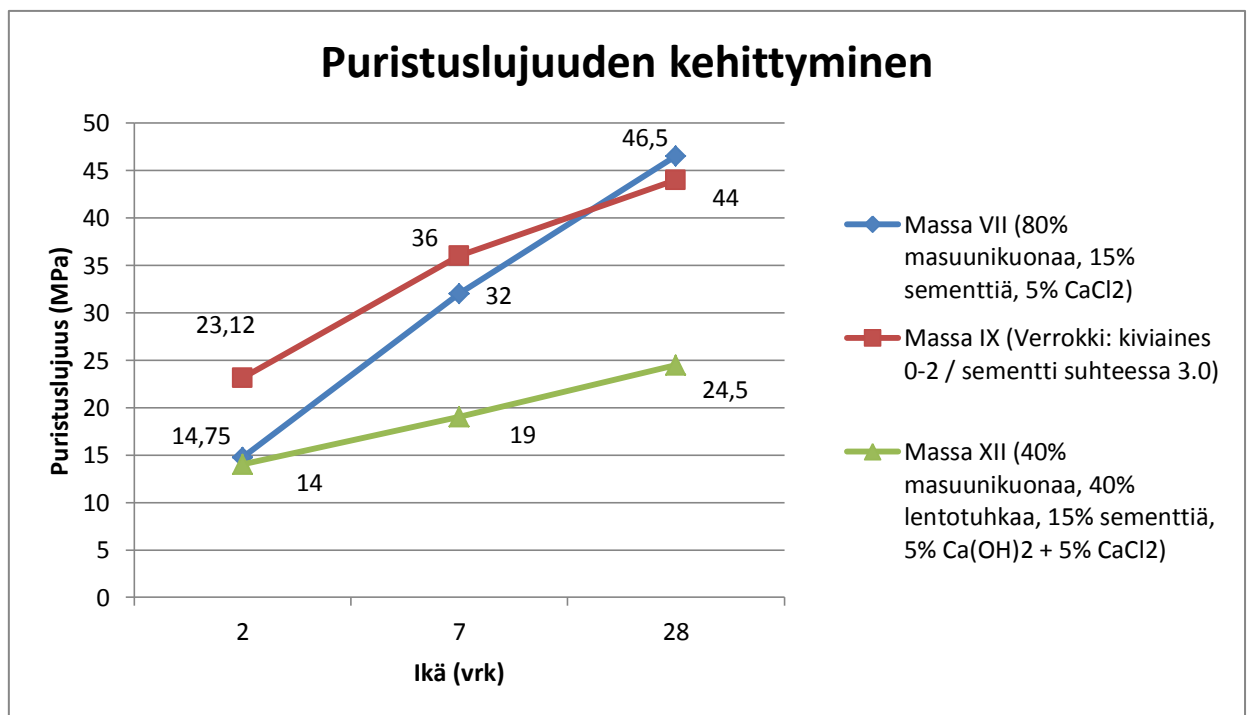
Massa 3, jossa käytettiin vesilasia (NaSiO_3) ja kalsiumhydroksidia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), jäi melko heikoksi. Verrattaessa muutoin samanlaiseen massaan, jossa oli vesilasin sijasta kalsiumkloridia (CaCl_2), eroa oli jopa 15 MPa.

Kolme parasta massaa, massat 7, 10 ja 12, saivat puristuslujuustuloksikseen kaikki yli 34 MPa, joka on jo varsin kelvollinen lujuus myös rakennusteollisuuden käyttöön. Yhteistä näille massoille oli se, että ne kaikki sisälsivät vielä 15 - 20 % CEM II/A-LL-sementtiä. Näistä kahdessa oli käytetty lisäaktivaattorina kalsiumhydroksidia ja kalsiumkloridia. Parhaan tuloksen saavuttanut massa sisälsi 80 % hienoimmaksi jauhettua granuloitua masuunikuonajauhetta, 15 % CEM II/A-LL-sementtiä, 5 % kalsiumhydroksidia sekä lisäksi 5 % sideaineen

tilavuudesta kalsiumkloridia. Suolan käyttöä betonissa kuitenkin vieroksutaan sen mahdollisia betoniteräksiä syövyttävän vaikutuksen takia.

Massoissa, jotka sisälsivät metakaoliinia, teräskuonaa tai joissa käytettyyn veteen oli sekoitettu konsentraatioon M6 lipeää (NaOH) (massat 8, 13 ja 14), oli saavutettu puristuslujuus 28 vuorokauden kohdalla molemmilla parhaimmillaan 24 - 24,5 MPa. Näitä reseptejä hiomalla voi luultavasti olla mahdollista kehittää rakennusteollisuuden käyttöön toimiva betonituote. On huomioitava, että yhdessä näistä massoissa ei ollut käytetty tavallista Portland-sementtiä. Massa 6, jossa oli käytetty samassa suhteessa masuunikuonaa ja lentotuhkaa ilman Portland-sementtiä, ja joka oli aktivoitu kalsiumkloridilla, oli myös puristuslujuudeltaan hyvä. Lipeän käyttöä kuitenkin hankaloittaa sen erittäin vahva emäksisyys, minkä takia sitä on käsiteltävä varoen. Tämä voisi muodostua ongelmaksi suuremman mittakaavan betoninvalmistuksessa.

Kuvassa 13 on esitetty joidenkin massojen puristuslujuuden kehittymistä.



KUVA 13. Puristuslujuuden kehittyminen 28 vuorokauden aikana

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, voiko teollisuuden sivutuotteita käyttää puristuslujuutensa puolesta sideaineena betonissa Portland-sementin korvaajana. Portland-sementin valmistuksesta aiheutuu mittavat hiilidioksidipäästöt ja pyrkimyksenä oli löytää betoniresepti, joka käyttää mahdollisimman vähän Portland-sementtiä, mutta joka silti soveltuu käytettäväksi rakentamisessa.

Testatuista betoniresepteistä kolme oli sellaisenaan tarpeeksi lujia vähän lujuutta vaativaan betonirakentamiseen. Niissä oli käytetty 15 - 20 % tilavuudesta CEM II/A-II-sementtiä. Pienellä hiomisella myös joistakin kokonaan Portland-sementtiä sisältämättömistä resepteistä voisi saada kehitettyä rakennusteollisuuden käyttöön kelpaavan reseptin. Lujuutta voisi mahdollisesti kasvattaa esimerkiksi runkoaineksen raekokoa suurentamalla tai veden määrää vähentämällä. Lisäksi käytettyjen sideainesten hienoudella tuntui olevan vahva korrelaatio niiden reaktiokyvyn kanssa. Tuloksista päätellen on myös mahdollista, että massojen lujuudenkehitys oli vielä 28 vuorokauden kohdalla kesken.

Kaikki testatut reseptit kovettuivat huomattavasti verrokkimassaa hitaammin, mikä voisi aiheuttaa ongelmia käytännön rakentamisessa. Lisäksi osassa resepteistä käytettiin ongelmallisia lisäaineita, kuten betoniteräksissä korroosiota aiheuttavia suoloja ja voimakkaasti emäksistä lipeää.

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin vain massojen puristuslujuuteen. Tulevia tutkimuskohteita voisivat olla esimerkiksi pakkaskestävyyden ja ympäristövaikutusten tutkiminen myös pidemmällä aikavälillä. Myös massatuotannon kustannuksia verrattuna nykyään käytettyyn betoniin olisi hyvä tutkia. Teorian kannalta tärkeää olisi sideaineen kovettumisreaktiossa tärkeiden huokoisuuden ja emäksisyyden tutkiminen.

LÄHTEET

1. Siikanen, Unto 2009. Rakennusaineoppi. Helsinki: Rakennustieto Oy.
2. Suomalainen sementti-opas. 2012. Finnsementti Oy. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/files/pdf/Sementti-opas.pdf>. Hakupäivä 08.02.2013.
3. MBR. 2013. Saatavissa: <http://www.mbr.fi/>. Hakupäivä 08.02.2013.
4. Betonin ominaisuudet ja käyttö. 2013. Saatavissa: <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonin-ominaisuudet-ja-kaytto>. Hakupäivä 08.02.2013.
5. Mitä betoni on? 2013. Saatavissa: http://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita_betoni_on.htm. Hakupäivä 08.02.2013.
6. By 201 Betonitekniiikan oppikirja 2004. 2005. Suomen Betoniyhdistys ry. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
7. Mitä betonin valmistuksessa tapahtuu. 2013. Saatavissa: <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/mita-betonin-valmistuksessa-tehdaan>. Hakupäivä 08.02.2013.
8. Betonin lujuus riippuu vesi-sementtisuhteesta. 2013. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-lujuus-riippuu-vesi-sementtisuhteesta>. Hakupäivä 08.02.2013.
9. Erikoisbetonit. 2013. Saatavissa: <http://www.rudus.fi/tuotteet/betonit/erikoisbetonit>. Hakupäivä 08.02.2013.
10. Betonin lisäaineet. 2013. Saatavissa: <http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/>. Hakupäivä 08.02.2013.

11. Sementit. 2013. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/sementit>. Hakupäivä 08.02.2013.
12. Kiinteät jätteet. 2013. Saatavissa <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/ymparistovaikutukset/kiinteat-jatteet>. Hakupäivä 08.02.2013.
13. Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu-, ja kenttärakenteissa. 2005. Finncao Oy. Saatavissa: <http://www.finncao.fi/pdf/mitoitusohje14032005.pdf>. Hakupäivä 08.02.2013.
14. Lentotuhkan käyttö betonissa 2007. 2007. By 52. Saatavissa: http://www.betoniyhdistys.fi/index.php?__EVIA_WYSIWYG_FILE=634&name=file. Hakupäivä 08.02.2013.
15. Ding, Jian-Tong – Li, Zongjin. 2002. Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete. Teoksessa American Concrete Institute. ACI Materials Journal / July-August 2002. S. 393-398. Saatavissa: http://www.bigfreshcontrol.com/documents/act_documents/MK_vs_SF_Properties_of_concrete.pdf. Hakupäivä 08.02.2013.
16. Aquaminerals. 2013. Saatavissa: <http://www.aquaminerals.fi/>. Hakupäivä 08.02.2013.
17. Bellman, F. – Stark, J. 2009. Activation of blast furnace slag by a new method. Teoksessa Elsevier. 2009. Cement and Concrete Research 39.
18. Masuunikuona KJ400. 2013. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/seosaineet-ja-silikajauheet/masuunikuonajauhe-kj400>. Hakupäivä. 08.02.2013.
19. Euroslag. Statistics 2010. Saatavissa: http://www.euroslag.com/fileadmin/_media/images/statistics/Statistics_2010_download.pdf. Hakupäivä: 08.02.2013

20. Käyttöturvallisuustiedote. 2011. Ruukki. Saatavissa:
http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Mineraalituotteet/Ruukki_Teraskuona_KTT.pdf. Hakupäivä: 08.02.2013.
21. Kaartinen, Tommi – Eskola, Paula – Vestola, Elina – Merta, Elina – Mroueh, Ulla-Maija. 2009. Uudet jätteenkäsittelykeskusten vesienhallintatekniikat. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2502.pdf>. Hakupäivä: 08.02.2013.
22. Emery, John. 1984. Steel Slag Utilization in Asphalt Mixes. Saatavissa: http://www.nationalslag.org/archive/legacy/nsa_186-1_steel_slag_utilization_in_asphalt_mixes.pdf. Hakupäivä: 08.02.2013.
23. Alizadeh, R – Chini, M. – Ghods. P. – Hoseini, M. – Montazer, Sh. – Shekarchi, M. 2003. Utilization of Electric Arc Furnace Slag as Aggregates in Concrete – Environmental Issue. Saatavissa: http://www.advancedmaterials council.org/prepare/uploaded_docs/material_id_406_pub/18.pdf. Hakupäivä: 08.02.2013.
24. Saikia, Nabajyoti – de Brito, Jorge. 2013. Recycled Aggregate in Concrete. Springer-Verlag: Lontoo.
25. Arribas, I. – San-José, J. T. – Vegas, I. – Hurtado, J. A. – Chica, J. A. 2011. Application of steel slag concrete in the foundation slab and basement wall. Teoksessa Euroslag. 2011. Ferrous Slag – Resource Development for an Environmentally Sustainable World. Duisburg: The European Slag Association.
26. Mineral Products Association. 2012. The use of ground granulated blastfurnace slag and fly ash in mortar. Saatavissa: <http://www.mortar.org.uk/documents/miadata16-mono.pdf>. Hakupäivä: 08.02.2013.
27. Song, S. – Sohn, D. – Jennings, H. M. – Mason, T. O. Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag. Teoksessa Springer Journals. 2000. Journal of Materials Science.

28. Kumar, Sanjay – Kumar, Rakesh – Mehrotra, S. P. 2009. Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. Teoksessa Springer Journals. 2010. Journal of Materials Science.

29. Lloyd, N. A. – Rangan, B. V. 2010. Geopolymer concrete: A review of development and opportunities. Saatavissa: <http://cipremier.com/100035037>.
Hakupäivä: 08.02.2013.

TUTKIMUSTULOKSET

LIITE 1

TAULUKKO 2. Puristuslujuuden testaustulokset

Massa	Puristuslujuus (MPa)			Tiheys (kg/m ³)
	3 –vrk	7-vrk	28-vrk	
I	0,92	2,46	10	2110
II	5,51	7,12	32	2200
III	1,43	7,95	17	2230
IV	2,12	5,21	6,5	2100
V	6,95	10,16	14,5	2230
VI	1,25	8,78	21,5	2230
VII	14,75	32	46,5	2220
VIII	12,9	18	24	2250
IX	23,12	36	44	2230
X	5,07	19	36	2280
XI	1,5	4	12,5	2110
XII	7,5	18	34,5	2230
XIII	14	19	24,5	3270

TAULUKKO 3. Valmistetut massat

Massa	Sideaine (%)						Lisäaineet (% sideaineen kokonais-tilavuudesta)		Lisäaineet (konsentraatio ⁶)
	CEM II/A-LL	Masuuni-kuona	Biopolton-lentotuhka ⁷	Teräs-kuona	Ca(OH) ₂	Meta-kaoliini	NaSiO ₃	CaCl ₂	NaOH
I	15	80 ⁵			5			5	
II	15	80 ¹			5			5	
III	15	80 ¹			5		5		
IV	Verrokki: Kiviaines 1095 kg/m ³ , CEM II/A-LL 250 kg/m ³ , vesi 190kg/m ³								
V		50 ¹	50						M6
VI		50 ¹	50					10	
VII	15	80 ²			5			5	
VIII		50 ²	50						M6
IX	Verrokki: Kiviaines / CEM II/A-LL suhteessa 3.0								
X	20	40 ²	40						
XI	15	80 ⁴			5			5	
XII	15	40 ²	40		5			5	
XIII		50 ²	35			15			M6
XIV		60 ³		20	5	15		5	

¹ Finnsementin granuloitu masuunikuonajauhe, pinta-ala 1,5806 m²/g

² Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, hienompi kuulajauhettu, pinta-ala 1,1530 m²/g

³ Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, karkeampi kuulajauhettu

⁴ Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, hienompi tankojauhettu, pinta-ala 0,3027 m²/g

⁵ Rautaruukin granuloitu masuunikuonajauhe, karkeampi tankojauhettu, pinta-ala 0,2316 m²/g

⁶ Lisäaine liuotettu veteen konsentraationa

⁷ Biopolton lentotuhkan pinta-ala 3,4455 m²/g