



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

MASUUNIKUONAJAUHEEN VAIKUTUS BETONIN LUJUUDENKEHITYKSEEN

TEKIJÄ: Wilma Kinnunen

| | |
|--|----------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma | |
| Työn tekijä(t) Wilma Kinnunen | |
| Työn nimi Masuunikuonajauheen vaikutus betonin lujuudenkehitykseen | |
| Päiväys 2.5.2016 | Sivumäärä/Liitteet 31/1 |
| Ohjaaja(t) Juha Pakarinen, pt. tuntiopettaja ja Teppo Houtsonen, pt. tuntiopettaja | |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Rudus Oy | |
| Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia masuunikuonajauheen vaikutusta betonin lujuuden- ja lämmönkehitykseen erilaisten kokeiden avulla. Tutkimuksesta saatujen tulosten pohjalta Rudus Oy voi kehittää käytössään olevaa BetoPlus-ohjelmaa masuunikuonamassojen osalta. BetoPlus on Ruduksen käytössä oleva lämmön- ja lujuudenkehityksenseurantaohjelma.</p> <p>Kokeita varten valmistettiin koekappaleita käyttämällä kolmea eri sideainetta ja jokaisesta koekappaleesta tehtiin neljä suhteitusta eri kuonamäärillä, joissa masuunikuonaa oli 0 %, 25 %, 50 ja 75 % kokonaissideaineen määrästä. Vertailubetonina toimi siis massa, jossa masuunikuonaa ei käytetty. Kokeita oli kokonaisuudessaan kaksitoista. Suhteituksen pohjana käytettiin vihreän betonin reseptiä. Jokaisesta suhteitusreseptistä valmistettiin koekappaleita puristuslujuuskokeisiin ja massasta valmistettiin myös laattoja lämmönkehityksen seuranta varten. Kokeet suoritettiin Rudus Oy:n Kuopion valmisbetonitehtaalla.</p> <p>Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella masuunikuonajauhetta sisältävät betonit voidaan lujuuksiensa perusteella rinnastaa normaaleihin betoneihin. Tämän opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää BetoPlus-ohjelman kehittämisessä. Tulosten pohjalta masuunikuonamassojen arvoja pystytään tarkentamaan ohjelman ennakkolaskelmiin. Tuloksien avulla ohjelmalla saadaan kuonamassoille tarkemmat lujuudenkehityskäyrät.</p> | |
| Avainsanat Masuunikuonajauhe, lujuudenkehitys, lämmönkehitys, vihreä betoni | |
| | |

| | | | |
|--|------------|------------------|------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | | | |
| Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering | | | |
| Author(s) Wilma Kinnunen | | | |
| Title of Thesis Role of Blast-Furnace Slag in Strength Development of Concrete | | | |
| Date | 2 May 2016 | Pages/Appendices | 31/1 |
| Supervisor(s) Mr Juha Pakarinen, Lecturer and Mr Teppo Houtsonen, Lecturer | | | |
| Client Organisation /Partners Rudus Oy | | | |
| <p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to investigate the effect of blast-furnace slag on strength and heat development of concrete in a variety of experiments. Based on the results of this study Rudus Oy can develop the BetoPlus program. The program is in use at Rudus Oy for the development of heat and strength monitoring of concrete.</p> <p>The experiments consisted of preparing specimens by using three different binder substances. From each binder substance four batchings were made with different amounts of blast-furnace slag, with 0 %, 25 %, 50 and 75 % of the total binder content. These specimens were compared to a concrete mass where blast-furnace slag was not used. The green concrete formula was used as a basis of the batching. From each batching formula bulk specimens were prepared for compression strength tests and concrete slabs for monitoring the development of heat. The experiments were performed at the Rudus Oy concrete factory in Kuopio.</p> <p>Based on the results of this study, the concretes that contain blast-furnace slag can be considered equal to normal concrete based on the results of compression strength tests. The results of this thesis can be utilized in the development of the BetoPlus program. Based on the findings, the values of blast-furnace slag masses can be specified in preliminary calculations and as a result a more specific strength development graph can be obtained with the program.</p> | | | |
| Keywords Blast-furnace slag, strength development, heat development, green concrete | | | |
| | | | |

ESIPUHE

Kiitän Rudus Oy:n henkilökuntaa ja erityisesti laborantti Timo Pohjolaista mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö, sekä työn ohjauksesta.

Kuopiossa 2.5.2016

Wilma Kinnunen

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 1.1 | Tausta ja tavoite | 7 |
| 1.2 | Rudus Oy | 7 |
| 2 | BETONI | 8 |
| 2.1 | Betonin raaka-aineet | 8 |
| 2.1.1 | Kiviaines | 9 |
| 2.1.2 | Sementti | 9 |
| 2.1.3 | Vesi | 10 |
| 2.1.4 | Seosaineet | 10 |
| 2.1.5 | Lisäaineet | 12 |
| 2.2 | Vihreä betoni | 13 |
| 2.3 | BetoPlus | 13 |
| 3 | BETONIN OMINAISUUDET | 15 |
| 3.1 | Puristuslujuus | 15 |
| 3.2 | Lämmönkehitys | 15 |
| 3.3 | Vetolujuus | 15 |
| 3.4 | Viruma | 16 |
| 4 | TUTKIMUSMENETELMÄT | 17 |
| 4.1 | Betonikokeet | 17 |
| 4.2 | Suhteitus | 17 |
| 4.3 | Tuoreen betonimassan testaus | 17 |
| 4.4 | Vesi-sementtisuhteen määrittäminen | 18 |
| 4.5 | Koekappaleiden valmistus | 18 |
| 4.6 | Lämmönkehityksen seuranta | 19 |
| 4.7 | Puristuslujuuden mittaaminen | 21 |
| 5 | TUTKIMUSTEN TULOKSET | 23 |
| 5.1 | Tuoreen betonimassan testaus | 23 |
| 5.2 | Lämmönkehitys | 25 |
| 5.3 | Lujuudenkehitys | 27 |
| 6 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 30 |
| | LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT | 31 |

LIITE 1: KUONAJAUHEKOKKEET 32

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoite

Tämän opinnäytetyön tilaajana on Rudus Oy, joka osaltaan pyrkii vähentämään hiilidioksidipäästöjä käyttämällä betonin sideaineena sementtiä ympäristöystävällisempää masuunikuonaa. Masuunikuonaa syntyy metalliteollisuuden sivutuotteena, ja sitä käytetään osittain sementin korvaajana. Rudus Oy:n tarkoituksena on kehittää vihreää betoniaan ja saada tarkempaa tietoa masuunikuonajauheen vaikutuksesta betonin lujuudenkehitykseen. Vihreällä betonilla tarkoitetaan betonilaatua, jonka hiilidioksidipäästöt ovat noin 20–50 % pienemmät kuin normaaleilla betonilaaduilla.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia masuunikuonamassojen lujuuden- ja lämmönkehitystä erilaisten kokeiden avulla. Olennaisena osana opinnäytetyötä on saada tietoa masuunikuonan lujuudenkehityksestä, jolloin tietoa voidaan hyödyntää BetoPlus-ohjelman kehittämisessä. BetoPlus on Ruduksen käytössä oleva lämmön- ja lujuudenkehityksenseurantaohjelma. Ohjelmaa käytetään betonitöiden ennakkosuunnittelussa ja rakennusvaiheen betonin lujuudenkehityksen seurannassa.

Työ toteutetaan tekemällä koesarjoja eri sideainesuhteilla ja vertaamalla niitä vertailubetoniin. Betonin ominaisuuksia tutkitaan tuoreena ja siitä valmistetaan koekappaleita puristuslujuuksien testausta varten. Jokaisesta massasta valmistetaan myös laattoja lämmönkehityksen seuranta varten.

1.2 Rudus Oy

Rudus Oy valmistaa kivipohjaisia rakennusmateriaaleja niin yksityisille kuluttajille kuin yritysasiakkaille. Yhtiö on perustettu vuonna 1897 Lohjan Kalkkitehdas Osakeyhtiö nimellä. Kiviainestoiminnan se aloitti ostaessaan Oy Rudus Ab:n osake-enemmistön vuonna 1931. Valmisbetonin tuotannon yhtiö aloitti ensimmäisenä Suomessa vuonna 1958. Yhtiön nimi lyhennettiin Oy Lohja Ab:ksi vuonna 1975 ja vuonna 1993 nimi muuttui Lohja Rudus Oy Ab:ksi omistajavaihdoksen jälkeen. Nykyinen nimi Rudus Oy otettiin käyttöön vuoden 2008 alussa. (Rudus.fi.)

Rudus Oy on kuulunut vuodesta 1999 lähtien irlantilaiseen CRH plc -konserniin, ja sen toiminta ylettyy Suomen lisäksi Baltiaan ja Venäjälle. Se työllistää tällä hetkellä noin 1 000 työntekijää eri puolilla Suomea. Rudus Oy:n toimialoihin kuuluvat kiviaineet, valmisbetoni ja kierrätys sekä betonituotteet. Ruduksella on Suomessa noin 90 betonituote- ja valmisbetonitehdasta sekä lähes 120 kiviainesten tuotantoaluetta. Ruduksella on myös eri puolilla Suomea noin 30 kierrätyspistettä, sekä murskaus- ja louhintaurakointia. (Rudus.fi.)

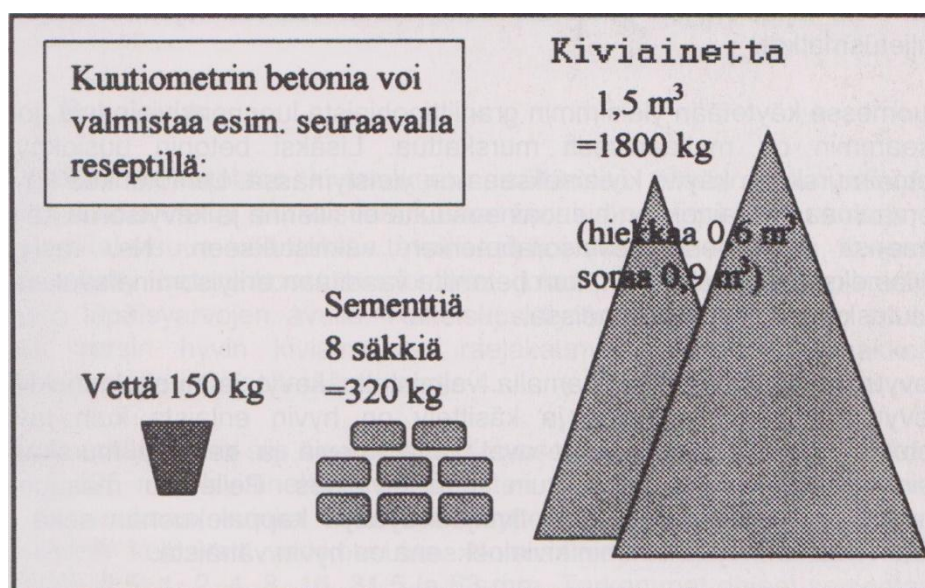
2 BETONI

2.1 Betonin raaka-aineet

Betoni on kivipohjainen materiaali, joka koostuu sementistä, vedestä ja kiviaineksista, sekä sen ominaisuuksia parantavista lisä- ja seosaineista (kuvio 1). Se on materiaalina luja, edullinen, turvallinen ja pitkäikäinen. Betonin hyvien ominaisuuksien takia se onkin eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa. Sitä valmistetaan maailmanlaajuisesti noin 5 miljardia tonnia vuodessa ja Suomessa noin 125 miljoonaa tonnia. Betonia käytetään eniten talonrakentamisessa, mutta paljon myös infrarakentamisessa. Se soveltuu esimerkiksi rakennusten runkomateriaaliksi, perustuksiin, julkisivuihin, siltarakentamiseen sekä patoihin ja tunneleihin. Betonia voidaan käyttää paikalla valettuna tai elementtitehtaalla valmistettavina osina. (Betoni.com.)

Betonilaatuja on monia, ja laadun valintaan vaikuttavat rakenteen käyttötarkoitus sekä ympäristöolosuhteet. Kun betonia valitaan, määrätään sille rasitusluokka rasitustekijöiden mukaan, joita voivat olla esimerkiksi jäätymis- ja sulamisrasitus tai karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio. Betonin valmistus aloitetaan suhteituksella, eli betonin osa-aineet määritetään siten, että betonin halutut ominaisuudet saavutetaan. Betoni valmistetaan betonimyllyssä, joko betonitehtaalla tai pienessä käsimyllyssä paikan päällä. (Suomen Betoniyhdistys 2012, 88; Suomen Betoniyhdistys 2004, 121.)

Betoni on luonnon raaka-aineiden ja pitkäikäisyytensä ansiosta ekotehokas rakennusmateriaali. Massiivisina ja tiiviinä rakenteina betonirakenteet säästävät energiaa, ja tarvitsevat vain vähän huoltoa elinkaarensa aikana. Betonirakenteen elinkaaren loputtua, rakennusten purkamisesta syntyvä murskattu jätebetoni pystytään kierrättämään käyttämällä se uudestaan betonin valmistuksessa uusiokiviaineena. Tuore ylijäämäbetoni voidaan kierrättää erottamalla vesi ja kiintoaines pesemällä. (Betoni.com.)



KUVIO 1. Esimerkki betonin yksinkertaisesta valmistuksesta (Suomen Betoniyhdistys 2004, 31)

2.1.1 Kiviaines

Betoni koostuu pääosin kiviaineista, ja sen tilavuusosuus betonista on noin 65–80 %. Kiviainesten ominaisuuksilla onkin suuri merkitys betonin ominaisuuksiin. Betonin kiviaineksena voidaan käyttää laajasti eri kiviaineita, kunhan ne ovat riittävän lujia ja tiiviitä, eivätkä huononna betonin ominaisuuksia. Betonin valmistamiseen käytettyjen kiviainesten tulee olla standardin SFS-EN 12620 mukaisia, CE-merkittyjä ja tarkastettuja. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 31.)

Yleensä kiviaineksena käytetään luonnon kiviaineita, joko luonnon muokkaamaa tai mekaanisesti murskattua. Kiviaineksena voidaan myös käyttää keinotekoisia kiviaineita, kuten kevytsoraa sekä betoni- ja tiilimurskaa. Murskeen käyttö betonin valmistuksessa on nykyään hyvin yleistä, sillä murskaamattoman luonnonkiviaineksen saanti alkaa olla vaikeaa. Betonin valmistuksessa käytettävä kiviaines ei saa sisältää aineita, jotka voivat vaikuttaa tuoreen tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin heikentävästi. Kiviainekset eivät saa sisältää roskia, öljyä, lunta, jätää tai jäätyneitä kivipaakkuja, eivätkä ne saa olla rapautuneita. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 31–32; Suomen Betoniyhdistys 2012, 99.)

2.1.2 Sementti

Sementillä on suuri vaikutus betonin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, kemialliseen kestävyys- ja lämmönkehitykseen. Se on hydraulinen sideaine, joka reagoi veden kanssa muodostaen lujan ja kestävän lopputuloksen. Reagoiessaan veden kanssa syntyy liimaa, josta muodostuu veteen liukene- maton aine. Kovettuessaan sitä kutsutaan sementtikiveksi. Veden ja sementin reaktion jälkeen seos on aluksi notkeaa, mutta jonkin ajan päästä alkaa sitoutuminen. Sitoutumista seuraa kovettuminen, jolloin sementin lujuudenkehitys alkaa. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 50–51.)

Sementin lujuudenkehitykseen vaikuttaa paljon betonin vesi-sementtisuhte.

Vesi-sementtisuhte w (Suomen Betoniyhdistys 2004, 53) on:

$$w = \frac{V}{S}$$

missä,

v on vesimäärä paino-osin

s on sementtimäärä paino-osin.

Sementin pääraaka-aine on kalkkikivi, jota esiintyy kaikissa maanosissa. Muut sementin raaka-aineet ovat rautaoksidi, piioksidi ja alumiinioksidi. Sementin valmistus alkaa kalkkikiven louhinnalla, murskaamisella ja lajittelulla, jonka jälkeen raaka-aineet jauhetaan hienoksi jauheeksi kuulamylyllä. Raakajauhe laitetaan kiertouuniin, jossa seos sintraantuu sementtiklinkkeriksi 1 400 °C:ssa. Tämän jälkeen seos jauhetaan kuulamylyssä hienoksi sementiksi, ja tarvittavat seosaineet lisätään. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 39–41.)

Betonin valmistuksessa käytettävien sementtien tulee täyttää standardin SFS-EN 197-1 koostumus- ja laatuvaatimukset ja olla CE-merkittyjä. Betoninormeissa ilmenee eri sementtilajien soveltuvuus rasisitusluokittain. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 42.)

2.1.3 Vesi

Betonin valmistukseen kelpaa vesijohtoverkosta tuleva vesi. Vesi ei saa sisältää epäpuhtauksia, kuten humusta, sulfaatteja ja sulfideja tai muita jätteitä, sillä ne voivat vaikuttaa betonin kovettumisen. Myöskään sokeria ei saa olla vedessä yhtään, sillä se voi estää kovettumisen kokonaan. Kierrätysvettä voi käyttää, jos sen puhtaus on testattu. Yleensä siis betonin valmistukseen käytettävän veden tulee näyttää puhtaalta, eikä se saa haista tai maistua pahalta. Veden kelpoisuuden voi testata veden sitoutumiskokeella tai tarkemmalla kemiallisella analyysillä. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 62.)

2.1.4 Seosaineet

Sementin ohella betonin sideaineena voidaan käyttää seosaineita, joita ovat masuunikuona, lentotuhka ja silika. Seosaineilla voidaan vaikuttaa betonin ominaisuuksiin, mutta myös sen kokonaisenergian kulutukseen. Seosaineet ovat teollisuuden sivutuotteita, jolloin hiilidioksidipäästöt pienenevät huomattavasti. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 59.)

2.1.4.1 Masuunikuonajauhe

Masuunikuonajauheella on piilevät hydrauliset ominaisuudet, joten se sopii hyvin betonin sideaineksi. Betonin valmistukseen käytettävää masuunikuonajauhetta saadaan jauhamalla granuloitua masuunikuonaa, jota syntyy metalliteollisuuden sivutuotteena satoja tuhansia tonneja vuodessa. Granulointi tapahtuu sulassa tilassa olevan kuonan nopealla jäädyttämisellä vedessä, jolloin kuona jää lasimaiseen tilaan. Kuonajauheen reaktiivisuuden kannalta sen lasimaisuus ja raekoko ovat olennaisia tekijöitä. Masuunikuona koostuu kalsiumin ja magnesiumin silikaateista sekä alumiinisilikaateista. (Finnsementti.fi.)

Yhdessä sementin kanssa masuunikuonajauheella saadaan betonille monia hyviä ominaisuuksia. Masuunikuonajauheen vedentarve on pienempi kuin sementin, joten se notkistaa betonia. Kuonajauhe alentaa betonin lämmönkehitystä, joten se sopii hyvin erityisesti massiivisiin rakenteisiin. Myös betonin sulfaatin- ja pakkassuolakestävyys paranevat, sekä kuonajauhe vähentää lämpökäsittelystä joutuvaan betonin lujuuskatoa. Kuonajauheen kovettumisreaktiot kestävät pitkään, joten todelliset lujuudet saadaan selville vasta myöhemmin kuin normaalista betonista. Normaalisti masuunikuonajauhetta käytetään 10–70 % sideainemäärästä. Sallitut enimmäismäärät riippuvat rasisitusluokasta ja käytetystä sementistä. Masuunikuonan suurin sallittu seosainelisäys eri rasisitusluokissa saadaan laskettua taulukon 1 kaavoista. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 60; Finnsementti.fi.)

TAULUKKO 1. Betonin valmistuksessa suurimmat sallitut seosainelisäykset (Suomen betoniyhdistys 2012, 104)

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

jossa,

- ks_s on sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa [%]
 k_s on sementin sisältämä kuona [%]
 lt_s on sementin sisältämä lentotuhka [%]
 sil_s on sementin sisältämä silika [%]
 k on sementin sisältämän ja lisätyn kuonan yhteismäärä [%]
 lt on sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä [%]
 sil on sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä [%].

2.1.4.2 Lentotuhka

Lentotuhkaa saadaan kivihiilen polton sivutuotteena voimalaitoksista. Se on kivihiilen poltossa syntyvä pozzolaani, joka erotetaan savukaasuista. Lentotuhkaa voi käyttää betonissa sideaineena tai kiviaineksena. Jos lentotuhka on hyvälaatuista, sillä voidaan parantaa betonimassan koossapysyvyyttä ja työstettävyyttä. Se myös parantaa betonin myöhäislujuuksia, mutta alentaa hieman varhaislujuutta. Lentotuhkan suurin sallittu seosainelisäys eri rasitusluokissa saadaan laskettua taulukon 1 kaavoista. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 59.)

2.1.4.3 Silika

Silikaa saadaan piiraudan valmistuksen yhteydessä syntyvistä savukaasuista, se on hyvin hienojakoista amorfista piioksidia. Silikalla pystytään parantamaan betonin lujuutta, tiiviyyttä, kemiallista kestävyyttä sekä veden pitävyyttä. Silikaa käytettäessä tulisi lisätä veden tarvetta vähentäviä lisäaineita, sillä sen käyttö lisää betonin vedentarvetta. Parhaimman tuloksen silikan käyttö antaa korkealujuusbetoneissa ja sellaisissa massoissa, joiden tulee kestää kemiallista tai pakkasuolarasitusta. Silikan

suurin sallittu seosainelisäys eri rasitusluokissa saadaan laskettua taulukon 1 kaavoista. Yleensä sitä käytetään 4–10 % sementin määrästä. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 60; Finnsementti.fi.)

2.1.5 Lisäaineet

Lisäaineilla voidaan vaikuttaa tuoreen betonimassan ominaisuuksiin, kuten sitoutumiseen ja kovettumiseen sekä kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Lisäaineita on notkistimet, huokostimet, hidastimet, kiihdyttimet, tiivistysaineet, injektointiaineet, pakkasenkestävyyttä parantavat aineet ja muut lisäaineet. Lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 63.)

2.1.5.1 Notkistimet

Notkistavia lisäaineita käytetään nimensä mukaisesti betonin notkeuden lisäämiseen tai veden vähentämiseen. Kun vesi-sementtisuhde saadaan pienemmäksi, betonin lujuus nousee ja sen työstettävyys paranee. Veden määrä voidaan saada jopa 5–30 % pienemmäksi notkistimen avulla ilman että se vaikuttaa betonin työstettävyyteen. Notkistimet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka vaikuttavat veden ja sementin välillä parantaen betonin ominaisuuksia. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 65; Finnsementti.fi.)

2.1.5.2 Huokostimet

Huokostimia käytetään, kun halutaan parantaa betonin pakkasenkestävyyttä. Sen avulla betonin ilmapitoisuus nostetaan 4–8 %:iin, kun normaalisti betonissa on ilmaa noin 1–2 % eli 10–20 dm³/m³. Betoniin muodostuu pieniä ilmakuplia, ns. suojahuokosia, jotka antavat jäätyneelle vedelle tilaa laajeta, niin ettei betoniin synny halkeamia. Suomen oloissa lähes kaikkien ulkona olevien betonirakenteiden tulee olla pakkasenkestäviä. Huokostimilla voidaan myös parantaa betonimassan työstettävyttä sekä koossapysyvyyttä. Käyttöä hankaloittaa se, että huokosten jakautumista massaan ei tiedetä, eikä niiden kokoa. Huokostusta voidaan kuitenkin tutkia mikroskooppisesti pinta- tai ohut-hiekokeilla tai tuorelle betonille tehtävällä AVA-kokeella. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 66–67; Finnsementti.fi.)

2.1.5.3 Hidastimet

Kun betonille halutaan pidempi työstettävyysaika, käytetään hidastinta siirtämään sitoutumista myöhemmäksi. Hidastimia käytetään esimerkiksi silloin, kun kuljetusmatkat ovat pitkät tai kun betonoidaan kuumissa olosuhteissa, jolloin hidastimella saadaan pidennettyä muokkausaikaa. Myös alhainen lämpötila hidastaa sitoutumista, joten kylmällä säällä hidastinta ei yleensä tarvita. Hidastimesta on hyötyä esimerkiksi silloin, kun betonointi etenee hitaasti tai kohde on suuri. Hidastimen käytöllä ei voida kuitenkaan estää notkeuden menetystä betonimassasta. Sideaineen kokonaismäärästä hidastimia käytetään yleensä 1–3 %. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 67.)

2.2 Vihreä betoni

Vihreällä betonilla tarkoitetaan betonilaatua, jonka hiilidioksidipäästöt ovat noin 20–50 % pienemmät kuin normaaleilla betonilaaduilla. Vihreän betonin valmistuksessa pyritään materiaalivalinnoilla, kuljetusmatkoilla sekä valmistustekniikoilla vaikuttamaan betonin ympäristöystävällisyyteen. Suurin ympäristöä kuormittava tekijä betonin valmistuksessa on sementti. Sementin käytöstä syntyviä päästöjä pienennetään korvaamalla sementtiä muilla tuotteilla, kuten teollisuuden sivutuotteena valmistuvalla masuunikuonalla. Rudus Oy:n vihreä betoni valmistetaan Finnsementin vähäpäästöisestä Plussementistä, jonka sementtipitoisuus on 5–15 % pienempi kuin tavallisen sementin. (Rudus Oy.)

Vihreän betonin tyypillisimpiä käyttökohteita ovat sisätiloissa olevat rakenteet sekä tavanomaiset perustukset. Kohteisiin joissa on vaativat rasitusluokat, vihreä betoni ei ole paras mahdollinen vaihtoehto. Vihreällä betonilla on sekä hyviä että huonompia ominaisuuksia. Hyviä ominaisuuksia ovat esimerkiksi massan pitkä työstettävyyssäika ja rakenteen matala hydrataatiolämpö. Huonoiksi ominaisuuksiksi voidaan luokitella hidaskuonon kehitys erityisesti kylmällä säällä, jolloin valun aikana tulee käyttää lämmitystä. Matalissa lujuusluokissa vihreällä betonilla on myös heikko hierrettävyys sekä pitkä jälkihoito- ja muotipurkuaika. (Rudus Oy.)

2.3 BetoPlus

BetoPlus on Ruduksen käytössä oleva lämmön- ja lujuudenkehityksenseurantaohjelma. Ohjelmalla voidaan mallintaa lämmönkehityksen perusteella betonin lujuudenkehitystä. BetoPlus-ohjelmaa käytetään betonitöiden ennakkosuunnittelussa sekä rakennusvaiheen betonin lujuudenkehityksen seurannassa. Ohjelman avulla voidaan arvioida betonirakenteiden lämmön- ja lujuudenkehitystä erilaisissa olosuhteissa, erilaisilla suojaus- ja lisälämmitysmenetelmillä sekä betonivaihtoehtoilla. (Rudus.fi.)

Ennakkosuunnittelussa voidaan laskea rakenteen haluttujen alueiden lämmön- ja lujuudenkehitys sekä maksimilämpötilat. Lähtötietoina laskelmiin tarvitaan rakenteen mitat ja muoto, suunnittelulujuus, ympäröivät rakenteet, eristeet ja suojaus, arvio sääolosuhteista sekä mahdollinen lisälämmitys (kuva 1). Rakenteeseen voidaan myös asentaa dataloggeri, joka lämpötilalankojen avulla tallentaa lämpötilat tasavälein muistiinsa, jonka avulla voidaan ennustaa betonin lujuudenkehitys. Tallennetut lämpötilatiedot voidaan siirtää BetoPlus-ohjelmaan lujuudenlaskentaa varten. (Rudus.fi.)

Laatta1* - BetoPlus

Tiedosto Apua Työtilä: Tapauskohtainen

Ongelman kuvaus Laskentatulokset Raportti

Rakenteen tiedot

- Rakenteen muoto, mitat ja aika
 - Maapohja
 - Alaosan poikkileikkaus - Vakio
 - Oikea poikkileikkaus - Vakio
 - Yläpuoli sivu - Vakio
 - Vasen poikkileikkaus - Vakio
 - Eristys
 - Oikea poikkileikkaus - Vakio
 - Laatta maapohjalla
 - Oikea poikkileikkaus - 0,00(h) ->
 - Yläpuoli sivu - 0,00(h) ->
 - Vasen sivu - 0,00(h) ->
 - Lämmityskaapelit
 - Mittaukset

Yksityiskohtien määrittely

Adiabaattinen

Määrittä rajapinnan ominaisuudet

Kopioi rajapinta muualta

Määritellyt vaatimukset

Jalkihoitoiluokka Jalkihoitoiluokka 1 Tarkastelupisteet...

Rajapinnan tyyppi: Yläpuoli nuori betoni pinnan viimeistely

Sää Sää

Lämpötila (°C) 14,0 Ajasta riippuu Muotoile...

Tuulen voima Tyyni [-1(m/s)] Ajasta riippuu Muotoile...

Sääsuojaus

Käytetty

Lämpötilan kasvu (°C) 5,0

Pinnan viimeistely

Mallinna Alkuasetukset...

Peitto

Tyyppi Styrox 00300(m)

Paalla (h) 1,00

Paalta (h) 168,00

Ajasta riippuva Muotoile...

Säteilylämmitys

Lämpöteho 0,0

Paalla (h) 0,00

Paalta (h) 72,00

Ajasta riippuva Muotoile...

Rakenteen kuva

| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5 | | | | | |
| 2,5 | | | | | |
| 2,0 | | | | | |
| 1,5 | | | | | |
| 1,0 | | | | | |
| 0,5 | | | | | |
| 0,0 | | | | | |
| 0,5 | | | | | |

Rajapinta: Yläpuoli sivu (Kappale: Laatta maapohjalla), Rajapinnan tyyppi: Yläpuoli nu

Huomiot Viestit Virheet



KUVA 1. BetoPlus-ohjelma

3 BETONIN OMINAISUUDET

3.1 Puristuslujuus

Betonin tärkein ominaisuus on puristuslujuus. Vetolujuuteen verrattuna se on noin kymmenkertainen. Betonin puristuslujuuteen voidaan vaikuttaa vesi-sementtisuhteella, sementin ja kiviaineksen laadulla, seos- ja lisäaineilla sekä kovettumislämpötilalla. Lujuutensa perusteella betonit jaetaan puristuslujuusluokkiin, jotka merkitään esimerkiksi joko K30 tai C25/30. Nämä merkinnät tarkoittavat, että betonin lujuus on 30 MPa 150 mm:n kuutiokoekappaleilla määritettynä. Lujuuden mittayksikkönä käytetään megapascalia (MPa). Puristuslujuus mitataan yleensä 28 vuorokauden ikäisenä, kun betoni on normaalioloissa (lämpötila +20 °C) saavuttanut tavoitelujuutensa. Lujuudenkehitys jatkuu kuitenkin vielä pitkään sen jälkeen. Betonimassat, joihin on lisätty esimerkiksi masuunikuonaa, saavuttavat tavoitelujuutensa vasta myöhemmin kuin normaalibetonit. Näiden betonien lujuus mitataan yleensä vasta 91 vuorokauden ikäisenä, koska niiden varhaislujuus on alhaisempi. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 79; Finnsementti.fi.)

3.2 Lämmönkehitys

Betonin lämmönkehityksellä on suuri vaikutus sen lujuuteen. Sementin ja veden hydrataatioreaktiossa kehittyvä lämpö, joka kehittyy samassa suhteessa kuin lujuudenkehitys etenee. Lämmönkehitykseen vaikuttavat sementin kemiallinen koostumus ja hienous. Jo 10 °C:n lämpötilan nousu kiihdyttää kovettumisreaktion kaksinkertaiseksi normaaliolosuhteissa. Jos kovettumisreaktiota halutaan nopeuttaa, voidaan lämpötilaa nostaa jopa 50 °C:seen saakka. Lämpötilan laskeminen taas hidastaa hydrataatioreaktiota eli betonin lujuudenkehitystä. Lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n lujuudenkehitys hidastuu voimakkaasti ja lopulta pysähtyy, kun lämpötila on laskenut -10–15 °C:seen. Jos betoni on päästetty jäätymään kovettumisen aikana, sen lujuus on voinut alentua jopa 50–80 %. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 346–347, 350.)

Etenkin massiivisissa rakenteissa betonin lämpötila nousee korkeaksi valun keskiosassa, joka aiheuttaa suuria lämpötilaeroja rakenteen reunojen ja keskiosan välillä. Lämpötilaerot synnyttävät jännitystä rakenteeseen, jolloin betoni voi halkeilla. Hydrataatioreaktiossa syntyvään lämpöön voi vaikuttaa sementin valinnalla tai käyttämällä mahdollisimman kylmää betonimassaa. Lämpötilaeroja voi myös ehkäistä eristämällä muotit hyvin ja käyttämällä lämmitystä tai jäädytystä. (Finnsementti.fi.)

3.3 Vetolujuus

Vetolujuuden ylittyminen betonirakenteissa ilmenee halkeiluna. Vetolujuuden ylittyminen voi johtua lämpötilaeroista rakenteessa, joko kovettumisen aikana tai valmiissa rakenteessa, sekä sisäisistä jännityksistä tai ulkoisista kuormista. Rakenteita ei yleensä mitoiteta perustuen betonin vetolujuuteen, koska rakenteen vetojännitykset hoidetaan raudoituksella. Halkeilu on betonirakenteissa nor-

maalia, mutta se ei saa heikentää rakenteen toimivuutta ja säilyvyyttä. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 82–84.)

3.4 Viruma

Viruma tarkoittaa muodonmuutosta, joka jatkuu kuormitetussa betonirakenteessa ajan kuluessa. Kuormituksen aiheuttaman paineen seurauksena betonin geelihuokosissa oleva vesi ajautuu pois ja sementtigeeli tiivistyy. Veden imeytyttyä takaisin geelihuokosiin sementtigeelin tiivistymisen johdosta muodonmuutos ei palaudu kokonaan. Virumista tapahtuu jännitystapausten yhteydessä kuten, puristuksen, taivutuksen, leikkauksen, vedon ja väännön. Muodonmuutosten suuruus betonissa riippuu monista tekijöistä, kuten betonin koostumuksesta, lujuudesta, iästä, testausolosuhteista sekä kuormituksesta. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 88.)

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1 Betonikokeet

Opinnäytetyössä oli tarkoituksena valmistaa koekappaleita käyttämällä kolmea eri sideainemäärää ja niistä jokaisesta neljä suhteitusta eri kuonamäärillä. Kokeita oli kokonaisuudessaan siis kaksitoista. Jokaisesta massasta valmistettiin myös laatta lämmönkehityksen seurantaan varten. Kokeet suoritettiin Ruduksen Kuopion valmisbetonitehtaalla 5.2.–15.3.2016.

4.2 Suhteitus

Suhteitus tarkoittaa betonin osa-aineiden yhdistämistä niin, että betonimassan ja kovettuneen betonin halutut ominaisuudet saavutetaan. Suomessa on käytössä kaksi suhteitusmenetelmää. Nykäsen menetelmä, lähinnä talonrakennusalan käyttöön suunniteltu, sekä Vuorisen menetelmä, joka on kehitetty vaikeampiin ympäristöolosuhteisiin. Nykyään suhteitus tapahtuu tietokonesovelluksen avulla ja useimmat suhteitusohjelmat perustuvat Nykäsen menetelmään. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 121–122.)

Suhteituksen pohjana käytettiin vihreän betonin reseptiä. Reseptejä tehtiin neljä jokaiselle sideainemäärälle, joissa masuunikuonaa oli 0 %, 25 %, 50 ja 75 % kokonaissideaineen määrästä. Vertailubetonina toimi siis massa, jossa masuunikuonaa ei käytetty. Kiviaineksen maksimirakeekoksi valittiin 12 mm ja notkeusluokaksi S3.

4.3 Tuoreen betonimassan testaus

Tuoreesta betonimassasta mitattiin heti lämpötila. Betonin lämpötilan tulisi olla noin +20 °C, jotta sitoutuminen tapahtuisi normaalisti. Jo 10 °C:n muutos vaikuttaa sitoutumisaikaan, joko nopeuttaen tai hidastaen sitä. Talviaikaan on kuitenkin haastavaa saada betoni pysymään +20 °C:ssa. Betonimassan työstettävyyttä arvioidaan massan notkeudella, joka mitataan painumakokeella tai leviämänä. Notkeuden testausmenetelmänä käytetty painumakoe on määritelty standardissa SFS-EN 12350-2.

Painuman mittaukseen tarvitaan tasainen alusta, painumakartio, painumasauva sekä mittanauha. Aluksi painumakartio sekä alustana käytetty vaneri kasteltiin, jotta kuivat pinnat eivät antaisi väärää tulosta painumasta. Pinnat eivät saa kuitenkaan olla liian märkiä. Painumakartio asetettiin alustan päälle leveämpi puoli alaspäin ja kartion sisään nosteltiin betonimassaa kolmessa kerroksessa. Jokaisesta kerrosta tiivistettiin painumasauvalla painellen 25 kertaa. Lopuksi kartion pää tasoitettiin ja kartio nostettiin rauhallisesti ylös. Painuma mitattiin massan korkeimmasta kohdasta kartion yläpään, kuten kuvassa 2. Painuma mitattiin neljä kertaa, heti, puolen tunnin, tunnin ja kahden tunnin kuluttua valmistuksesta. Notkeusluokka tarkistetaan taulukosta 2 (ks. s. 23).



KUVA 2. Betonimassan painuman mittaus (Kinnunen 2016-02-15)

4.4 Vesi-sementtisuhteen määrittäminen

Massojen vesi-sementtisuhteet määritettiin jokaisesta massaerästä erikseen. Soranäytteet otettiin suoraan betonimassaan menevästä kiviaineserästä. Ensin mitattiin näytteen märkäpaino, jonka jälkeen näyte kuivattiin ja punnittiin uudelleen. Mitatut märkä- ja kuivapaino sijoitettiin laskentataulukoon, joka laskee massan vesi-sementtisuhteen.

4.5 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleet olivat pituudeltaan 300 mm ja halkaisijaltaan 150 mm lieriöitä ja ne tehtiin kalibroituihin muotteihin. Kappaleet valmistettiin valamalla betonimassaa muotteihin kolmessa kerroksessa (kuva 3). Jokaisen kerroksen välissä massaa tiivistettiin sauvatäryttimellä kolmesta kohtaa. Tiivistämisen tarkoituksena on poistaa massasta ylimääräinen ilma ja saada betoni leviämään mahdollisimman tarkasti muottiin, sekä saada kiviaines lähelle toisiaan. Tiivistyksessä massan pintaan voi muodostua niin sanottua sementtipastaa, jossa ei ole kiviainesta. Viimeisellä kerroksella muotin päälle asetetaan muottikaulus, jotta muotti tulee varmasti täyteen oikeaa betonimassaa, eikä sementtipastaa aiheuta puristuslujuuden mittaukseen virheitä.

Kappaleiden annettiin kovettua pari tuntia muoteissaan, jonka jälkeen niiden päälle hierrettiin kannet. Näin myös toisesta päästä saatiin tasainen puristuslujuuden testausta varten. Kappaleet purettiin muoteistaan seuraavana päivänä tai kahden vuorokauden kuluttua. Tämän jälkeen koekappaleet nostettiin vesikaappiin säilöön, jossa niitä säilytettiin puristuksen testaukseen asti. Vesikaapin lämpötilan tuli olla tasalaatuinen ja norminmukainen eli noin +20 °C.



KUVA 3. Koekappalemuottien täyttöä (Kinnunen 2016-03-18)

4.6 Lämmönkehityksen seuranta

Massojen lämmönkehityksen seurantaan varten tehtiin koelaattoja jokaisesta suhteituksesta. Laatat valettiin muotteihin, joiden sivujen pituudet olivat 150 cm ja 60 cm sekä korkeus 30 cm. Muotit eristettiin alta sekä päältä. Kun massa oli valettu, se tiivistettiin tasaisesti sauvatäryttimellä (kuva 3). Laattojen keskelle noin 10 mm alareunasta asennettiin lämpötilanmittauslangat, joiden avulla dataloggeriin tallentui lämpötilat tasaisin väliajoin (kuva 5 ja 6). BetoPlus-ohjelman avulla selvitettiin missä kohtaa laatta saavuttaa suurimmat lämpötilansa, eli mihin lämpötilanmittauslangat asetetaan.



KUVA 4. Lämmönkehityslaatan tiivistystä (Kinnunen 2016-03-18)



KUVA 5. Koelaatta, jossa lämpötilanmittauslangat ja dataloggeri paikoillaan (Kinnunen 2016-02-15)



KUVA 6. Dataloggeri (Kinnunen 2016-02-17)

4.7 Puristuslujuuden mittaus

Puristuslujuuden mittausta varten tehtiin jokaisesta suhteituksesta neljä koekappaletta. Puristuslujuudet mitattiin 3, 7, 28 ja 91 vuorokauden ikäisinä. Normaalisti betoni saavuttaa tavoitelujuutensa 28 vuorokauden ikäisenä, mutta masuunikuonajauheen vaikutuksesta nämä massat saavuttavat tavoitelujuutensa vasta 91 vuorokauden ikäisenä. Puristuslujuuden mittaus tapahtui kalibroidulla puristimella Kuopion tehtaalla (kuva 7).

Koekappaleet otettiin kuivumaan edellisenä päivänä, sillä märkä kappale antaa vääriä tuloksia puristuslujuudesta. Kappaleet punnittiin tiheyden määrittämistä varten. Ennen koekappaleiden puristusta niiden päät hiottiin ja tasattiin rikkiseoksella. Rikkiseosmenetelmässä koekappaleiden pinnoitettavien päiden tulee olla puhtaat ja kuivat, muuten seos ei tartu pintaan kiinni. Koekappale asetetaan pystysuorassa kulmassa tasaisen levyn päälle, jossa on sulatettua rikkiseosta. Seoksen annetaan kovetua ja ylimääräinen rikkiseos poistetaan kappaleen reunoista. Tämän jälkeen tarkistetaan, että pinnoite on tarttunut koekappaleeseen kiinni ja että pinnoitettu pää on suora. Sama toistetaan kappaleen toiselle päälle. Koekappale voidaan puristaa, kun rikkiseos on jäähtynyt 30 minuuttia. Koekappaleiden pinnoituksella pyritään ehkäisemään pintojen epätasaisuudesta johtuvia virheellisiä tuloksia puristuslujuuden mittauksessa. (SFS-EN 12390-3 2009.)

5 TUTKIMUSTEN TULOKSET

5.1 Tuoreen betonimassan testaus

Aluksi tuoreesta betonimassasta mitattiin ensin lämpötila sekä painuma. Betonin lämpötilan avulla voidaan arvioida sitoutumisaikaa. Kokeet tehtiin talviaikaan, joten betonin lämpötila oli hankalaa pitää +20 °C:ssa. Lämpötila saatiin kuitenkin pidettyä sopivissa arvoissa. Painuman avulla saadaan määritettyä massan notkeusluokka, joka vaikuttaa betonimassan työstettävyyteen. Notkeusluokat määritetään taulukon 2 mukaisesti. Liitteessä 1 on esitetty kaikkien testausten tulokset.

TAULUKKO 2. Betonimassan notkeusluokat (Suomen Betoniyhdistys 2004, 53)

| Notkeusluokat | |
|---------------|--------------|
| Luokka | Painuma [cm] |
| S1 | 1–4 |
| S2 | 5–9 |
| S3 | 10–15 |
| S4 | 16–21 |
| S5 | ≥ 22 |

Masuunikuonajauhe notkistaa betonimassaa, koska sen vedentarve on pienempi kuin esimerkiksi sementin. Kaikki massat olivat työstettävyydeltään hyviä, ja masuunikuonajauheen ansiosta työstettävyys säilyi myös pidempään kuin normaalilla betonimassalla. Taulukossa 3 on esitetty tuoreen betonimassan testauksesta saadut tulokset, sekä toteutunut vesi-sementtisuhte (v/s).

Painuma mitattiin jokaisesta massaerästä neljä kertaa. Betonimassojen painumissa ei ollut merkittäviä eroja. Massojen työstettävyys säilyi vielä kahden tunnin kuluttua hyvänä, jolloin viimeinen painuma mitattiin. Sideaineen tai masuunikuonajauheen määrällä ei ollut merkittävää vaikutusta painumiin. Painumat tiettyinä ajanhetkinä on ilmoitettu taulukossa 4.

TAULUKKO 3. Tuoreen betonimassan tulokset

| Tunnus | Masuunikuona (%) | Painuma (cm) | Toteutunut v/s | Lämpötila (°C) |
|---------------------------|-----------------------|--------------|----------------|----------------|
| Sideaine / m ³ | 300 kg/m ³ | | | |
| K1-0 | 0 | 14 | 0,63 | 20 |
| K2-25 | 25 | 13 | 0,67 | 22 |
| K3-50 | 50 | 13 | 0,62 | 15 |
| K4-75 | 75 | 14 | 0,65 | 13 |
| Sideaine / m ³ | 350 kg/m ³ | | | |
| K6-0 | 0 | 12 | 0,56 | 16 |
| K7-25 | 25 | 16 | 0,59 | 16 |
| K8-50 | 50 | 13 | 0,63 | 14 |
| K9-75 | 75 | 14 | 0,57 | 14 |
| Sideaine / m ³ | 400 kg/m ³ | | | |
| K11-0 | 0 | 12 | 0,52 | 19 |
| K12-25 | 25 | 14 | 0,53 | 19 |
| K13-50 | 50 | 14 | 0,55 | 15 |
| K14-75 | 75 | 16 | 0,54 | 13 |

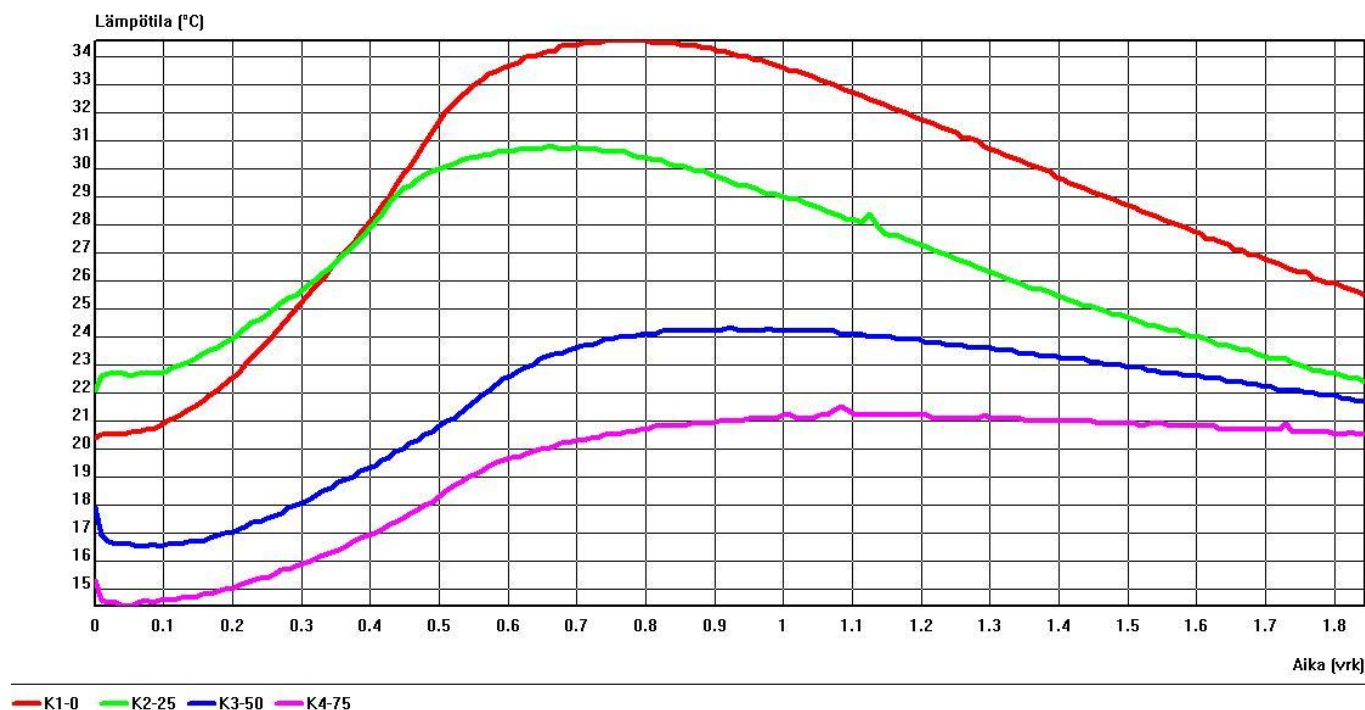
TAULUKKO 4. Painumat tiettyinä ajanhetkinä

| Tunnus | Painuma heti | 30 min kuluttua | 60 min kuluttua | 120 min kuluttua |
|---------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Sideaine / m ³ | 300 kg/m ³ | | | |
| K1-0 | 14 | 11 | 10 | 7 |
| K2-25 | 13 | 12 | 9 | 7 |
| K3-50 | 13 | 11,5 | 9,5 | 7,5 |
| K4-75 | 14 | 10,5 | 8 | 4 |
| Sideaine / m ³ | 350 kg/m ³ | | | |
| K6-0 | 12 | 10 | 9 | 8 |
| K7-25 | 16 | 14,5 | 12 | 10 |
| K8-50 | 13 | 12 | 10 | 8 |
| K9-75 | 14 | 13 | 12 | 7 |
| Sideaine / m ³ | 400 kg/m ³ | | | |
| K11-0 | 12 | 9,5 | 9 | 6 |
| K12-25 | 14 | 12 | 10 | 7 |
| K13-50 | 14 | 13 | 9 | 7 |
| K14-75 | 16 | 14 | 12,5 | 8,5 |

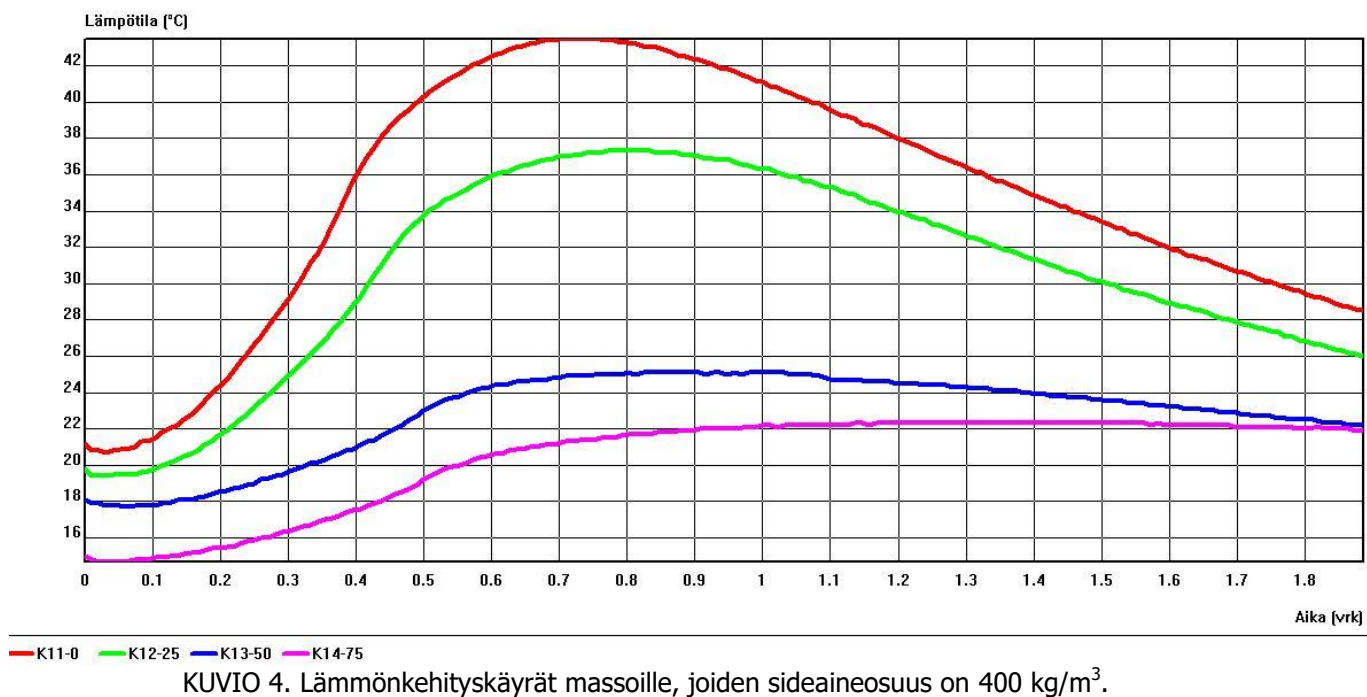
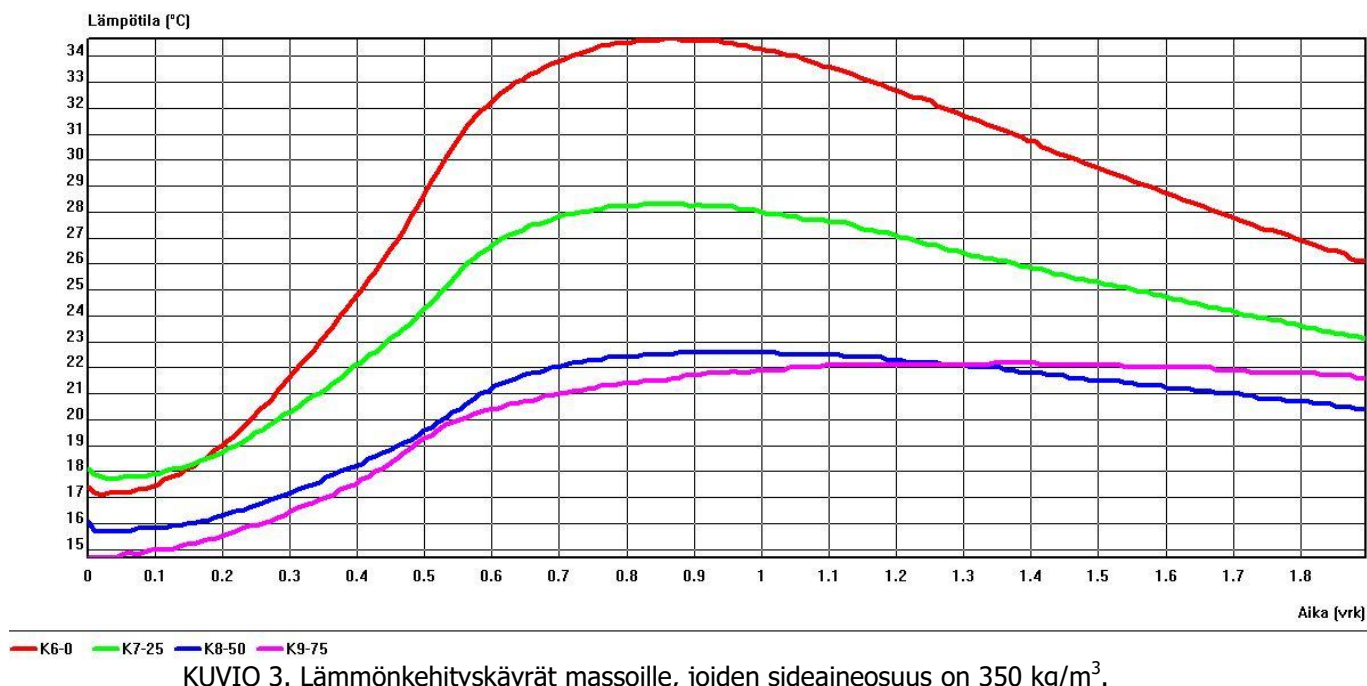
5.2 Lämmönkehitys

Lämmönkehityksen seuranta varten valmistetuista laatoista mitattiin dataloggerin avulla laattojen lämmönkehityskäyrät. Kaikki mittaukset onnistuivat ja käyrät olivat sellaisia kuin niiden oli arvioitu olevan. Eniten kuonaa sisältävissä massoissa lämpötilat olivat alhaisimmat. Tämä johtuu masuunikuonajauheen alhaisesta lämmöntuotosta. Vertailubetonissa, jossa masuunikuonaa ei ollut, lämpötilat nousivat korkeimmiksi. Massojen lähtölämmöissä oli jonkin verran eroja, jotka johtuvat todennäköisesti valmistuspäivien lämpötilaeroista tai mittauslankojen asennusajasta. Kuvioissa 2, 3 ja 4 on esitetty lämmönkehityskäyrät, joista ilmenee eri massojen välillä olevat suuret lämpötilaerot.

Etenkin massiivisissa rakenteissa kuonajauheesta on hyötyä sen alhaisen lämmöntuoton vuoksi. Sementin ja veden reagoidessa syntyy runsaasti lämpöä, jolloin betonin lämpötila nousee. Nopea lämpötilan nousu voi aiheuttaa rakenteen eri kohtiin suuria lämpötilaeroja. Lämpötilaerot aiheuttavat taas rakenteeseen jännityksiä, jonka seurauksena betoni voi halkeilla. Masuunikuonajauhe hidastaa lämmöntuottoa, jolloin betonin halkeiluriski on pienempi. (Finnsementti.fi.)



KUVIO 2. Lämmönkehityskäyrät massoille, joiden sideaineosuus on 300 kg/m^3 .



5.3 Lujuudenkehitys

Puristuslujuus on helppo mitata ja monet betonin ominaisuudet ovat verrannollisia siihen, kuten esimerkiksi vetolujuus, kimmokerroin ja taivutusvetolujuus. Betoninormeissa puristuslujuus perustuu kuutiolujuuteen, joka saadaan sivumitaltaan 150 mm koekuution testauksesta. (Suomen betoniyhdistys 2004, 79). Tässä työssä valmistettujen lieriökoekappaleiden puristuslujuuksien tulokset täytyi muuttaa kuutiolujuuksia vastaaviksi, jotta tulokset olisivat määräysten mukaisia. Taulukossa 5 on muunnoskerroimet.

TAULUKKO 5. Lieriölujuuden muuttaminen vastaamaan 150 mm:n kuutiolujuutta (Suomen betoniyhdistys, 80)

| Lieriöllä määritetty lujuusalue (MPa) | Vastaava kuutiolujuus lujuusalueen alarajalla (MPa) | Alarajan ylittävän lujuuden muunnoskerroin |
|---------------------------------------|---|--|
| 8–20 | 10 | 1,25 |
| 20–25 | 25 | 1,00 |
| 25–28 | 30 | 1,67 |
| 28–32 | 35 | 1,25 |
| 32–35 | 40 | 1,67 |
| 35–50 | 45 | 1,00 |
| 50–57 | 60 | 1,43 |
| 57–65 | 70 | 1,25 |
| 65– | 80 | 1,00 |

Esimerkkilasku lieriölujuuden muuttamisesta:

Lieriön puristuslujuudeksi on mitattu 22 MPa, jolloin vastaava kuutiolujuus saadaan
 $25 \text{ MPa} + (22 \text{ MPa} - 20 \text{ MPa}) \times 1,00 = 27 \text{ MPa}$

Koekappaleiden puristuslujuudet testattiin 3, 7, ja 28 vuorokauden ikäisinä. Tarkoituksena oli testata myös 91 vuorokauden koekappale, koska masuunikuonamassojen hitaan lujuudenkehityksen takia ne saavuttavat tavoitelujuutensa myöhemmin kuin normaalibetonit. Tulokset eivät kuitenkaan ehtineet tähän opinnäytetyöhön. Taulukossa 6 on esitetty koekappaleiden puristuslujuuksien tulokset, tiheydet mittaushetkellä sekä massojen vesi-sementtisuhteet. Tiheys saatiin jakamalla koekappaleen paino sen tilavuudella.

Puristuslujuuksien tuloksista voidaan nähdä, että masuunikuonajauhe alentaa varhaislujuuksia sen hitaan lujuudenkehityksen takia. Mutta jo 28 vuorokauden ikäisenä kuonamassojen puristuslujuudet ovat joko ylittäneet vertailubetonit, tai ovat hyvin lähellä sitä. Masuunikuonan käyttö kasvattaa myöhäislujuuksia, joten voidaan olettaa, että 91 vuorokauden koekappaleiden tulokset ylittävät vertailubetoneiden tulokset reilusti.

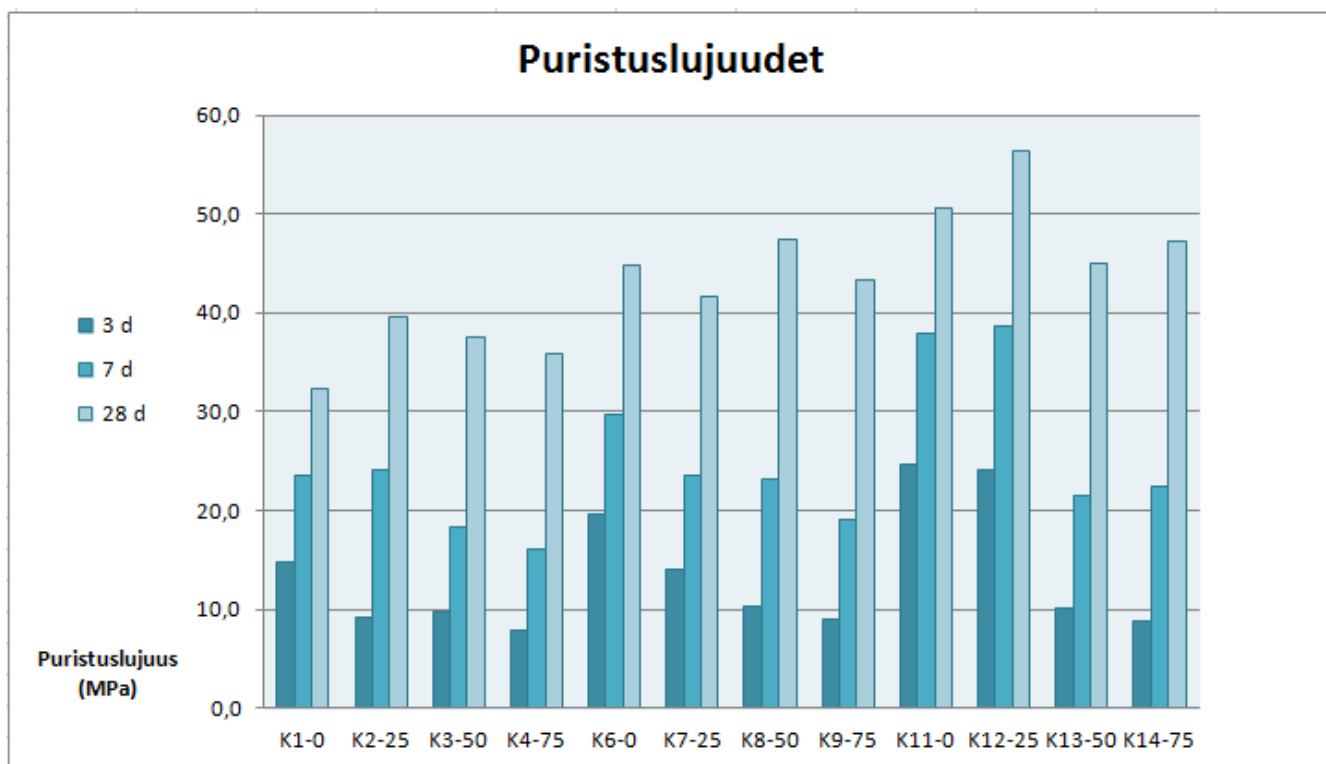
TAULUKKO 6. Koekappaleiden puristuslujuudet ja tiheydet, sekä vesi-sementtisuhte

| Tunnus | 3d | | 7d | | 28d | | v/s |
|--|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|------|
| | Tiheys (kg/dm ³) | Lujuus (MPa) | Tiheys (kg/dm ³) | Lujuus (MPa) | Tiheys (kg/dm ³) | Lujuus (MPa) | |
| Sideaine / m ³ 300 kg/m ³ | | | | | | | |
| K1-0 | 2,36 | 14,7 | 2,37 | 23,5 | 2,36 | 32,3 | 0,63 |
| K2-25 | 2,34 | 9,1 | 2,36 | 24,1 | 2,36 | 39,5 | 0,67 |
| K3-50 | 2,34 | 9,7 | 2,34 | 18,4 | 2,36 | 37,5 | 0,62 |
| K4-75 | 2,34 | 7,9 | 2,35 | 16,1 | 2,35 | 35,8 | 0,65 |
| Sideaine / m ³ 350 kg/m ³ | | | | | | | |
| K6-0 | 2,34 | 19,6 | 2,34 | 29,7 | 2,35 | 44,8 | 0,56 |
| K7-25 | 2,34 | 14,0 | 2,35 | 23,6 | 2,36 | 41,7 | 0,59 |
| K8-50 | 2,37 | 10,2 | 2,37 | 23,1 | 2,37 | 47,5 | 0,63 |
| K9-75 | 2,34 | 9,0 | 2,34 | 19,0 | 2,35 | 43,3 | 0,57 |
| Sideaine / m ³ 400 kg/m ³ | | | | | | | |
| K11-0 | 2,34 | 24,6 | 2,36 | 37,9 | 2,35 | 50,6 | 0,52 |
| K12-25 | 2,33 | 24,0 | 2,35 | 38,6 | 2,35 | 56,4 | 0,53 |
| K13-50 | 2,35 | 10,1 | 2,35 | 21,4 | 2,39 | 45,0 | 0,55 |
| K14-75 | 2,34 | 8,8 | 2,37 | 22,5 | 2,36 | 47,2 | 0,54 |

Yleensä vesi-sementtisuhte kertoo, että mitä pienempi suhde on, sitä suurempi on puristuslujuus. Masuunikuonamassojen vesi-sementtisuhteella ja lujuudella ei ainakaan tässä koesarjassa ole yhteyttä. Etenkin talviaikaan on vaikea saada verrannollisia vesi-sementtisuhteita, koska hiekankosteus vaihtelee niin paljon. Lisäksi hiekkaa lämmitetään talviaikaan vesihöyryllä, joka lisää kosteuden vaihtelua entisestään.

Kuviossa 5 on esitetty puristuslujuuksien tulokset diagrammin muodossa. Vertailubetonit on merkitty tunnuksilla K1-0, K6-0 ja K11-0. Tuloksista voidaan nähdä, että ensimmäisessä koesarjassa masuunikuonaa sisältävät betonit antavat paremmat lujuudet 28 vuorokauden ikäisenä, kuin vertailubetonit. Muissakin koesarjoissa masuunikuonabetonit antavat korkeampia lujuuksia kuin vertailubetonit, mutta tulokset eivät ole yhtä lineaariset kuten ensimmäisessä koesarjassa. Kokeet on suoritettu talviaikaan, jolloin olosuhteet on vaikea pitää samanlaisina betonia valmistettaessa, joten sekin voi vaikuttaa kokeiden tuloksiin.

Koesarjojen perusteella masuunikuonajauhetta sisältävät betonit voidaan lujuuksien perusteella rinnastaa normaaleihin sementtimassoihin. Kuonajauheen käyttö on suositeltavaa etenkin sellaisissa kohteissa, joissa varhaislujuudelle ei ole asetettu vaatimuksia, mutta betonilta toivotaan korkeaa loppulujuutta. Talviaikaan masuunikuonan käyttöä ei kuitenkaan suositella, koska kylmä ilma hidastaa entisestään lujuudenkehitystä.



KUVIO 5. Puristuslujuuksien tulokset

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli tutkia masuunikuonamassojen lujuuden- ja lämmönkehitystä erilaisten kokeiden avulla. Olennaisena osana opinnäytetyötä oli saada tietoa masuunikuonan lujuudenkehityksestä, jolloin tietoa pystytään hyödyntämään BetoPlus-ohjelman kehittämisessä. BetoPlus-palvelu on Rudus Oy:n käytössä oleva lämmön- ja lujuudenkehityksenseurantaohjelma. Ohjelmaa käytetään betonitöiden ennakkosuunnittelussa ja rakennusvaiheen betonin lujuudenkehityksen seurannassa. Ohjelman avulla voidaan arvioida betonirakenteiden lämmön- ja lujuudenkehitystä erilaisissa olosuhteissa, erilaisilla suojaus- ja lisälämmitysmenetelmillä sekä betonivaihtoehdoilla.

Mielestäni tämän opinnäytetyön aihe on ajankohtainen, koska yhä enemmän rakentamisessa kiinnitetään huomiota ympäristövaikutuksiin. Päästöjä halutaan pienentää myös betoniteollisuudessa. Suurin ympäristöä kuormittava tekijä betonin valmistuksessa on sementti, koska sitä valmistetaan ainoastaan betonituotantoa varten. Sementin käytöstä syntyviä päästöjä pyritään pienentämään korvaamalla sementtiä muilla tuotteilla, kuten teollisuuden sivutuotteena valmistuvalla masuunikuonalla. Masuunikuonaa sisältävien betonilaatujen eli vihreän betonin käytöllä saadaan myös alennettua betonin valmistuskustannuksia. Opinnäytetyöstä saaduilla tutkimustuloksilla voidaan kehittää yhä enemmän ympäristöystävällisempiä betonilaatuja ja näin pienentää osaltaan haitallisia päästöjä.

Opinnäytetyön tutkimustulosten mukaan masuunikuonamassojen varhaislujuuksien tulokset olivat paljon pienempiä, kuin normaalibetonien lujuudet, mutta jo 28 vuorokauden iässä lujuudet olivat lähellä vertailubetonia. Masuunikuonamassoilla saatiin kokonaisuudessaan hyviä puristuslujuustuloksia, joita voidaan rinnastaa normaalien betonilaatujen lujuuksiin. Masuunikuonan aiheuttaman alhaisen varhaislujuuden takia sitä ei voida hyödyntää kuitenkaan kaikissa rakenteissa. Talviaikaan sen käyttöä ei suositella kylmän ilman aiheuttaman entistä hitaamman lujuudenkehityksen takia. Kesäi- kaan masuunikuonaa voidaan kuitenkin käyttää kohtuullisissa määrissä.

Opinnäytetyön tuloksia tullaan hyödyntämään BetoPlus-ohjelman kehittämisessä ja etenkin masuunikuonamassojen osalta ohjelmaan voidaan päivittää tarkemmat arvot ennakkolaskelmia varten. Päivityksen ansiosta tutkimuksista saatujen tulosten avulla masuunikuonalle saadaan tarkempi lujuudenkehityskäyrä. Uusien tietojen pohjalta ennakkolaskelmista tulee tarkempia, joten masuunikuonaa pystytään käyttämään yhä laajemmin osana betonirakentamista.

Opinnäytetyönä tehty tutkimus onnistui kokonaisuudessaan hyvin, vaikka aikataulusyistä 91 vuorokauden ikäisten koekappaleiden puristuslujuustulokset eivät ehtineet tähän työhön. Tulokset ovat oleellisia masuunikuonan hitaan lujuudenkehityksen vuoksi. Tilajana toimiva Rudus Oy pystyy kuitenkin hyödyntämään tuloksia tulevaisuudessa kehitystyössään.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Betoni.com. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-05] Saatavissa: <http://www.betoni.com>

Polku: betoni.com. Tietoa betonista. Betoni ja kestävä kehitys. Kierrätys.

Betoni.com. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-05] Saatavissa: <http://www.betoni.com>

Polku: betoni.com. Tietoa betonista. Betoni ja kestävä kehitys. Käyttö talonrakentamisessa.

Finnsementti.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-10] Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi>

Polku: finnsementti.fi. Tietoa betonista. Tietoa betonista pienrakentajalle ja rautakauppiaille. Betonin lujuus.

Finnsementti.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-09] Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi>

Polku: finnsementti.fi. Lisäaineet. Huokostimet.

Finnsementti.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-10] Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi>

Polku: finnsementti.fi. Tietoa betonista. Tietoa betonista suunnittelijalle. Lämmönkehitysominaisuudet.

Finnsementti. Masuunikuonajauhe KJ400. 2015. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-08].

Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/test/kj400_1_31032016_104028.pdf

Finnsementti.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-09] Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi>

Polku: finnsementti.fi. Tuotteet. Lisäaineet. Notkistimet.

Finnsementti. Parmix-Silika. 2015. [viitattu 2016-02-09]. Saatavissa:

http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/parmix-silika_1_19112015_082319.pdf

Rudus.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-02] Saatavissa: <http://www.rudus.fi>

Rudus Oy. Vihreä betoni. 2011. [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-02-02]. Dokumentti yrityksen hallussa.

SFS-EN 12390-3 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2012. Betoninormit 2012 by 50. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2004. Betonitekniikan oppikirja by 201. 5. uudistettu painos, lisäpainos. Helsinki: Suomen betonitieto Oy.

LIITE 1: KUONAJAUHEKOKEET

kuona

| 2016 | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-------------|-----------|----------|-----------|--------------|-------------|-----------|----------|-------------|--------------|-----------|
| KUONAJAUHEKOKEET | | | | | | | | | | | | |
| Valmistuspaikat | 19. helmä | 2. maalisk. | 26. helmä | 9. helmä | 12. helmä | 15. maalisk. | 4. maalisk. | 12. helmä | 5. helmä | 1. maalisk. | 11. maalisk. | 16. helmä |
| TUNNUS | K1-0 | K2-25 | K3-50 | K4-75 | K6-0 | K7-25 | K8-50 | K9-75 | K11-0 | K12-25 | K13-50 | K14-75 |
| SEMENTTI | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius | Lap-Pius |
| KUONA | - | KJ400 | KJ400 | KJ400 | - | KJ400 | KJ400 | KJ400 | - | KJ400 | KJ400 | KJ400 |
| Sidosaine / m ³ | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 | 350 | 350 | 350 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Sementtiä kg/m ³ | 300 | 225 | 150 | 75 | 350 | 262 | 175 | 88 | 400 | 300 | 200 | 100 |
| Kuonaa kg/m ³ | 0 | 75 | 150 | 225 | 0 | 88 | 175 | 262 | 0 | 100 | 200 | 300 |
| osuus (%) | 0 | 25 | 50 | 75 | 0 | 25 | 50 | 75 | 0 | 25 | 50 | 75 |
| HINTA | | | | | | | | | | | | |
| Vesi | 193,4 | 200,3 | 184,8 | 199,1 | 196,9 | 202 | 217,1 | 200,1 | 207,7 | 215,5 | 217 | 217,1 |
| V/C | 0,64 | 0,67 | 0,62 | 0,66 | 0,56 | 0,58 | 0,62 | 0,57 | 0,32 | 0,54 | 0,54 | 0,54 |
| LÄMMÖNTUOTTO | | | | | | | | | | | | |
| h | 18:45 | 17:05 | 21:30 | 26:45 | 21:00 | 20:35 | 21:00 | 29:00 | 17:00 | 19:35 | 20:05 | 27:35 |
| max T | 34,6 | 30,8 | 24,3 | 21,4 | 34,7 | 28,3 | 22,6 | 22,2 | 43,5 | 37,6 | 25,1 | 22,3 |
| BETONIMASSA | | | | | | | | | | | | |
| TIHEYS 3d | 2,36 | 2,34 | 2,34 | 2,34 | 2,34 | 2,34 | 2,37 | 2,34 | 2,34 | 2,33 | 2,35 | 2,34 |
| TIHEYS 7d | 2,37 | 2,36 | 2,34 | 2,35 | 2,34 | 2,35 | 2,37 | 2,34 | 2,36 | 2,35 | 2,35 | 2,37 |
| TIHEYS 28d | 2,36 | 2,36 | 2,36 | 2,35 | 2,35 | 2,36 | 2,37 | 2,35 | 2,35 | 2,35 | 2,39 | 2,36 |
| TIHEYS 91d | | | | | | | | | | | | |
| MASSA T | 20,0 | 22,0 | 15,0 | 13,0 | 16,0 | 16,0 | 14,0 | 14,0 | 19,0 | 19,0 | 15,0 | 13,0 |
| PAINUMA | | | | | | | | | | | | |
| beti | 14 | 13 | 13 | 14 | 11,5 | 16 | 13 | 14 | 12 | 14 | 14 | 16 |
| 30 min | 11 | 12 | 11,5 | 10,5 | 10 | 14,5 | 12 | 13 | 9,5 | 12 | 13 | 14 |
| 60 min | 10 | 9 | 9,5 | 8 | 9 | 12 | 10 | 12 | 9 | 10 | 9 | 12,5 |
| 120 min | 7 | 7 | 7,5 | 4 | 8 | 10 | 8 | 7 | 6 | 7 | 7 | 8,5 |
| LUJUUS | | | | | | | | | | | | |
| 3 d | 14,7 | 9,1 | 9,7 | 7,9 | 19,6 | 14,0 | 10,2 | 9,0 | 24,6 | 24,0 | 10,1 | 8,8 |
| 7 d | 23,5 | 24,1 | 18,4 | 16,1 | 29,7 | 23,6 | 23,1 | 19,0 | 37,9 | 38,6 | 21,4 | 22,5 |
| 28 d | 32,3 | 39,5 | 37,5 | 35,8 | 44,8 | 41,7 | 47,5 | 43,3 | 50,6 | 56,4 | 45,0 | 47,2 |
| 91 d | | | | | | | | | | | | |
| Kestävyydet @MPa | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |