

Jussi Ulvinen

Betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehitys elementtituotannossa

Opinnäytetyö

Kevät 2017

SeAMK Tekniikka

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Tuotantotekniikka

Tekijä: Jussi Ulvinen

Työn nimi: Betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehitys elementtituotannossa

Ohjaaja: Jorma Tuomisto

Vuosi: 2017

Sivumäärä: 54

Liitteiden lukumäärä: 2

Opinnäytetyön aihe on betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehitys elementtituotannossa. Työn tarkoitus on antaa tarkempaa tietoa betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehityksestä sekä selventää eroja ja syitä laskennallisen ja todellisen lujuudenkehityksen välillä.

Betonielementtituotannossa varhaislujuuden kehitykselle ja muotin purkulujuuden saavuttamiselle varattu aika on erittäin lyhyt. Työssä perehdytään tarkemmin betonin varhaislujuudenkehitykseen tehdasolosuhteissa. Betonielementeille tehtiin puristuslujuusmittauksia kimmovasaran avulla ja näitä tuloksia vertailtiin saman lujuusluokan omaavien koekuutioiden puristuslujuustesteihin sekä laskennallisiin tuloksiin.

Tähän opinnäytetyöhön on käytetty alan kirjallisuutta ja alalla toimivien yritysten kotisivuja sekä artikkeleita. Käytännön kokeet sekä mittaukset on tehty Lammin Asennustaito Oy:n sekä Koskisen Betoni Oy:n tiloissa sekä kalustolla.

Avainsanat: betoni, elementtirakentaminen, varhaislujuus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Construction Engineering

Specialisation: Building Construction

Author: Jussi Ulvinen

Title of thesis: Early strength and temperature development of concrete in element production

Supervisor: Jorma Tuomisto

Year:2017

Number of pages:54

Number of appendices:2

The subject of the thesis was the development of early strength and temperature of concrete in precast element production. The purpose of the thesis was to provide more detailed information especially on the strength and temperature development of concrete at the early stage. One of the main issues was to find out reasons for the differences between the calculations and the actual strength development of concrete.

The time reserved for strength development of concrete in precast element production is very short. The thesis focused especially on concrete element production and it included tests, measurings and results of strength and temperature development both in concrete elements and specimens.

Data for the study was gathered from construction related literature, articles and web-pages. All tests and measurings were carried out at two companies Lammin Asennustaito Oy and Koskisen Betoni Oy which specialise in concrete element production.

Keywords: Concrete, element production, early strength

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ.....	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo.....	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO.....	8
2 BETONI.....	9
2.1 Yleistä betonista.....	9
2.2 Betonin ainesosat.....	10
2.2.1 Sementti.....	10
2.2.2 Kiviaines.....	11
2.2.3 Vesi.....	11
2.3 Seosaineet.....	12
2.4 Betonissa käytettävät lisäaineet.....	12
2.4.1 Notkistin.....	12
2.4.2 Huokostin.....	13
2.4.3 Hidastimet.....	14
2.4.4 Kiihdyttimet.....	14
2.5 Betonin valmistus.....	15
2.6 Betonin lujuudenkehitys.....	15
2.7 Betonin lujuusluokat.....	16
2.8 Betonin rasisluokat.....	16
2.9 Lämpötilan vaikutus lujuuden kehitykseen.....	18
3 BETONIN LUJUUDEN JA LÄMPÖTILAN KEHITYKSEN TUTKIMINEN LASKENNALLISESTI.....	22
4 BETONIN LUJUUDEN- JA LÄMPÖTILAKEHITYKSEN TUTKIMINEN LABORATORIO-OLOSUHTEISSA.....	24
4.1 Tuoreen betonin ilmamäärän testaus.....	24
4.2 Koekappaleiden valmistus.....	25

4.3 Muotit	26
4.4 Valaminen	27
4.5 Koekappaleiden säilytys	27
4.6 Lujuuden testaus puristustestauskoneella	28
4.6.1 Koekappaleiden valmistelu ja sijoitus.....	28
4.6.2 Koekappaleen kuormitus	29
4.7 Lujuuden testaus kimmovasaralla.....	29
4.7.1 Tarvittava laitteisto	29
4.7.2 Lujuuden mittaaminen kimmovasaralla.....	30
4.8 Lämpötilakehityksen testaus	30
5 TESTATTAVA BETONI.....	32
5.1 Betonin resepti	32
5.2 Betonin valmistus.....	32
5.3 Betonin jälkihoito.....	33
6 TUTKIMUS.....	35
6.1 Tutkimuslaitteiston esittely	35
6.2 Tutkimuksen aloitus ja eteneminen.....	37
6.2.1 K-40 lujuusluokka	37
6.2.2 K-40 lujuusluokka, huokostettu	38
6.3 Lämpötilakehityksen tutkiminen	41
7 YHTEENVETO.....	42
7.1 Tulokset	42
7.1.1 K- 40 tavallinen betoni	42
7.1.2 K- 40 huokostettu betoni.....	44
7.2 Lämpötilakehitys	45
7.3 Erojen analysointi.....	47
LÄHTEET	49
LIITTEET	51

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Toimitusvalmis betonirakenne, sokkelielementti.	9
Kuva 2. Veden ruiskuttaminen ilmamäärämittariin, jäljellä olevan ilman poistamiseksi.	25
Kuva 3. Automatisoitu Lapamixer tasoseikoittaja.	33
Kuva 4. Eristesokkelielementti valettuna ja peitettynä.	34
Kuva 5. Ilmamäärämittari.	35
Kuva 6. Kimmovasara.	36
Kuva 7. Betonin puristuslujuuden testauskone.	36
Kuva 8. Koekuutioiden muotit öljytyinä, valmiina valamista varten.	38
Kuva 9. Olosuhdekoekappaleet valettuina, vertailtavan väliseinäelementin vieressä.	39
Kuva 10. Koekuutiot muoteista purettuina 16 h kuivumisen jälkeen.	40
Kuva 11. Huokostetusta betonista valmistetun olosuhdekoekuution puristuskoe.	40
Kuvio 1. Periaatekuva betonin valmistusjärjestelmästä.	15
Kuvio 2. Kypsyysikätaulukko normaalia Yleis- tai SR- sementtiä käyttäen. (by 201,2004, 353).....	20
Kuvio 3. Kypsyysikätaulukko nopeasti kovettuvaa Rapid- tai Mega- sementtiä käyttäen. (by 201, 2004, 354)	20
Kuvio 4. Kypsyysikätaulukko erittäin nopeasti kovettuvaa Pikasementtiä käyttäen (by 201, 2004, 354).....	21
Kuvio 5. Koekuutio 150 mm x 150 mm x 150 mm.....	26

Kuvio 6. Periaatekuva väliseinäelementistä, jossa merkitty lämpömittareiden antureiden (4 kpl) sijainti.	31
Kuvio 7. Puristuslujuuden ja kimmoavasara-arvon vertailu, K-40.	43
Kuvio 8. Puristuslujuuden ja kimmoavasaran näyttämien vertailu, K-40 huokostettu.	45
Kuvio 9. Betonin lämpötilojen kehittyminen.....	47
Taulukko 1. Kypsyysien laskenta, mittauspisteen 1 lämpötilojen perusteella.	22
Taulukko 2. Suhteellisten lujuuksien tulokset.....	23
Taulukko 3. Puristuslujuustestin tulokset, K-40.....	42
Taulukko 4. Kimmoavasaran näyttämät lujuusarvot vertailtavasta väliseinäelementistä, K-40.	43
Taulukko 5. Puristuskokeiden tulokset, K-40 huokostettu.....	44
Taulukko 6. Kimmoavasaran näyttämät vertailtavasta väliseinäelementistä, K-40 huokostettu.	44
Taulukko 7. Lämpötilat mittauspisteissä.	46

Käytetyt termit ja lyhenteet

Betoni	Betoni on keinotekoista kivrakennetta, joka koostuu pääasiassa kiviaineksesta, sementistä sekä vedestä. Betoni jaetaan lujuusluokkiin puristuslujuutensa perusteella.
Betonielementti	Valmiita ja mittatarkkoja betonirakenteita, kuten anturat, seinät, pilarit ja palkit.
Lujuudenkehitys	Betonin osa-aineet alkavat reagoida keskenään, jolloin betoni alkaa sitoutua sekä kehittää lujuutta. Lujuudenkehitys jatkuu niin kauan kuin betonissa on vapaata vettä käytettävissä.
Lämpötilan kehitys	Betonin osa-aineiden reagoidessa keskenään alkaa betonimassa kehittää lämpöä.
Varhaislujuus	Betonin lujuudenkehityksen alkuvaiheessa saavuttama lujuudenkehitysaste. Muottikierrosta johtuen betonielementtituotannossa varataan varhaislujuuden kehitykselle aikaa noin 16 tuntia.

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana oli selvittää betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehitystä. Idea tähän opinnäytetyöhön saatiin Lammin Asennustaito Oy:ltä ja heidän tarpeestaan saada tarkempaa tietoa oman betoninsa varhaislujuuden ja lämpötilan kehityksestä. Heitä kiinnosti myös tietää, onko saman lujuusluokan omaavan tavallisen K-40 ja huokostetun K-40 betonin laskennallisessa lujuudenkehityksessä eroja puristuskokeiden tuomaan tulokseen verrattuna. Lammin Asennustaito Oy:tä kiinnosti myös saada tietää, onko varhaislujuuden kehityksessä suuria eroja koekuution ja valmiin elementin välillä.

Betonin lujuudenkehityksestä on saatavilla taulukoita ja laskentakaavoja. Jokaisella betonielementtitehtaalla on kuitenkin hieman omanlaisensa resepti betonin valmistukseen. Lammin Asennustaito Oy halusi saada tarkempaa tietoa juuri heidän käyttämänsä betonin varhaislujuuden ja lämpötilan kehityksestä elementtituotannossa.

Opinnäytetyön alkuosassa käsitellään betonia yleensä sekä lämpötilan vaikutusta lujuudenkehitykseen. Se toimii johdatuksena aiheen tarkempaan käsittelyyn, lujuuden- ja lämpötilakehityksen laskentaan, kokeisiin ja koetuloksien analysointiin sekä loppupäätelmiin.

Tämän opinnäytetyön tilaajana oli Lammin Asennustaito Oy. Lammin Asennustaito Oy:n elementtitehdas on perustettu vuonna 1994. Yritys sijaitsee Kanta-Hämeessä Hämeenlinnan Lammilla, noin 35 km etäisyydellä sekä Hämeenlinnasta että Lahdesta. Yrityksen päätuotteina ovat erilaiset laadukkaat betonituotteet, kuten esimerkiksi anturat, sokkelit, pilarit, palkit ja seinä- ja väliseinäelementit. Lammin Asennustaito Oy valmistaa myös betoni-, liimapuu- tai teräsrunkoisia teollisuus-, kone-, varasto- ja tuotantohalleja asiakkaan toiveen mukaan, joko osasennuksena tai avaimet käteen -periaatteella. Yritys työllistää tällä hetkellä noin 30 henkilöä. Lammin Asennustaito Oy:llä on Inspecta Sertifiointi Oy:n myöntämä tuotesertifikaatti sekä CE- ja FI-merkintäoikeus betonituotteillaan.

2 BETONI

Betoni on yksi maailman eniten käytetyistä rakennusmateriaaleista, puun sekä kiven lisäksi. Betoni on keinotekoisia kivirakennetta, jonka muokattavuusominaisuudet ovat kuitenkin aivan omaa luokkaansa. Betonia valmistetaan maailmassa noin 13 miljardia kuutiometriä vuosittain (Betoni.com [Viitattu 17.12.2016]). Suuri osa nykyrakentamisesta perustuu pitkälti betonin käyttöön. Betonia käytetään rakennuksissa aina perustuksista yläpohjan laattoihin. Betonista voidaan valaa esimerkiksi anturoita sekä seiniä rakennuspaikalla paikallavalutekniikkaa käyttäen. Siinä betoni tuodaan tuoreena paikanpäälle ja valetaan paikalleen asetettuun muottiin. Vaihtoehtoisesti voidaan turvautua valmiisiin betonielementteihin (kuva 1), jotka toimitetaan elementtitehtaalta mittatarkkoina rakennesuunnittelijan tekemien suunnitelmien mukaisina valmiina rakennustuotteina.



Kuva 1. Toimitusvalmis betonirakenne, sokkeli-elementti.

2.1 Yleistä betonista

Betoni koostuu pääasiassa kiviaineksesta, sementistä sekä vedestä. Betonin massa on noin 2400 kg/m^3 . Betonilla on suuri puristuslujuus, mutta kuitenkin beto-

nin vetolujuus puristuslujuuteen verrattuna on erittäin heikko. Vetolujuus on vain noin 10 % puristuslujuudesta (Betoni.com [Viitattu 15.1.2017]).

Betonista tehtävät rakenteet perustuvat betonin suureen puristuslujuuteen. Betonin vetolujuutta voidaan kasvattaa lisäämällä valmistettavaan rakenteeseen terästä, jolloin saatavaa rakennetta kutsutaan teräsbetonirakenteeksi. Pääkäyttökohteina betonilla ovat rakenteet, jotka ottavat vastaan puristuslujuudeltaan suuria kuormia, kuten esimerkiksi anturat, pilarit sekä kantavat seinät. (Betoni.com [Viitattu 15.1.2017].)

Betoni on säilyttänyt asemansa käytetyimpänä rakennusmateriaalina sen edullisuuden, turvallisuuden, kulutuksen- ja kosteudenkestävyyden sekä muokattavuuden ansioista.

2.2 Betonin ainesosat

Betoni koostuu kolmesta pääraaka-aineesta, joita ovat sementti, vesi ja kiviaines. Betonin kovettuminen alkaa, kun sementtirakeet reagoivat veden kanssa muodostaen osa-aineet yhteen sitovan lujan mineraalin. Betonin lujuus todetaan yleensä 28 vuorokauden iässä, vaikka lujuudenkehitys jatkuukin vielä paljon pidempään. (Betoni.com [Viitattu 15.12].)

2.2.1 Sementti

Betonin tärkein osa-aine on sideaine eli sementti. Sementin raaka-aineita ovat luonnonmineraalit, lähinnä kalkkikivi, jota on maapallolla runsaasti saatavilla.

Sementin raaka-aineet jauhetaan ja kuumennetaan uunissa noin 1450 °C lämpötilaan, jolloin mineraalit sulavat ja reagoivat keskenään. Samalla kalkkikiven sisältämä hiilidioksidi vapautuu. Sementtiuunissa tapahtuvissa kemiallisissa reaktioissa syntyy pääasiassa kalsiumsilikaateista muodostuvia ns. klinkkerimineraaleja, joista sementti jauhetaan. Sementin tuttu vaaleanharmaa väri johtuu sementin rautayhdisteistä. Valkosementti puolestaan valmistetaan melkein raudattomasta erikois-

klinkkeristä, jolloin rautayhdisteiden puuttuessa sementti on väriltään valkoista. (Betoni.com [Viitattu 15.12.2016].)

Betoninormien mukaan betonin valmistukseen käytettävien sementtien tulee olla CE- merkittyjä ja täyttää sementtistandardin SFS-EN 197 – 1 vaatimukset (By 65, 2016, 28).

2.2.2 Kiviaines

Betonin tilavuudesta suurin osa, noin 70 %, koostuu niin kutsutusta runko-aineesta eli kiviaineksesta. Runko-aineen karkein osa koostuu joko murskeesta tai luonnonsorasta ja hienempi osa vastaavasti luonnonhiekasta. Elementtituotannossa käytetyn kiviaineksen raekoko on yleensä välillä 0,02-16,0 mm. (Betoni.com [Viitattu 15.12.2016].)

Kiviaineksessa ei saa olla mukana eloperäistä, humuspitoista ainesta, vaan sen täytyy olla puhdasta sekä lujaa.

Valmistettavan betonin lujuus määritellään siinä käytetyn kiviaineksen sekä sementin tuottamasta yhteisvaikutuksesta. Kiviaineksen lujuus on normaalisti välillä 100–400 MPa ja kiviaineksen tiheys on keskimäärin 2,67 kg/dm³. (Rakentaja.fi [Viitattu 15.12.2016].)

2.2.3 Vesi

Betonissa käytettäväksi vedeksi soveltuu tavallinen juomavesi. Veden on oltava puhdasta, sillä humuspitoinen vesi häiritsee sementin kovettumisreaktiota. Vesi ei myöskään voi sisältää pieniäkään määriä sokereita, koska sokerit voivat estää betonin kovettumisreaktiot kokonaan.

Betonin lujuuteen vaikuttaa suurimmaksi osin vesi-sementtisuhde. Vesi-sementtisuhteella tarkoitetaan betonin sisältämän veden ja sementin painon suhdetta toisiinsa. Veden lisääminen betoniin parantaa työstettävyyttä huomattavasti,

mutta vastaavasti mitä suuremman määrän vettä betoni sisältää, sitä enemmän betonin lopullinen lujuus laskee. (finnsementti.fi [Viitattu15.12.2016].)

2.3 Seosaineet

Betonin tiettyjä ominaisuuksia, kuten myöhäislujuutta, sulffaattikestävyyttä, kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä sekä tiivyttyä voidaan parantaa käyttämällä mineraalisia seosaineita, joko side- tai runkoaineena. Seosaineita ovat esimerkiksi lentotuhka, masuunikuonajauhe, ilmajähdytetty ferrokromikuona sekä silika. Ohjeita seosaineiden käytöstä sekä ominaisuuksista löytyy Betoninormeista by 65. (By 201, 2004, 59-60.)

2.4 Betonissa käytettävät lisäaineet

Betonin eri ominaisuuksia, kuten työstettävyyttä, kovettumista, pakkasenkestävyyttä ja notkeutta voidaan säädellä erilaisilla lisäaineilla. Lisäaineet lisätään betoniin nestemäisessä muodossa veden seassa liuoksena, jossa itse lisäainetta on vain pieni määrä.

Lisäaineita käytetään yleisimmin vaativiin olosuhteisiin valmistettaviin betonirakenteisiin, kuten esimerkiksi ulkoseinäelementteihin, jotka altistuvat säärasitukselle kuten esimerkiksi pakkaselle.

Lisäaineet vaikuttavat betonissa joko fysikaalisesti tai kemiallisesti ja niiden määrät betonissa ovat vähäisiä verrattuna muihin betonin osa-aineisiin. Lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä tai vaihtoehtoisesti niillä on ennen käyttämistä oltava virallisessa koestuslaitoksessa tehtyihin kokeisiin perustuva selvitys ominaisuuksista, vaikutustavasta ja käyttökelpoisuudesta. (By 201, 2004, 63-64.)

2.4.1 Notkistin

Betonielementit valmistetaan nykyään suurimmaksi osin itsetiivistyvistä betonista. Tämä edellyttää notkistimen käyttämistä betonin valmistuksessa, sillä tällöin beto-

nimassasta saadaan notkeampaa lisäämättä ylimääräistä vettä ja täten heikentämättä lopullista lujuutta. (Betoni.com [Viitattu 10.1.2017].)

Betonin notkistamiseen käytetään nykyään polykarboksylaatteja, jotka ovat vesiliukoisia polymeerejä. Lisäaineen tehtävä on dispergoida eli erottaa sementtipartikkelit toisistaan ja parantaa siten betonin juoksevuutta ilman lisäveden annostelua. (Betoni.com [Viitattu 10.1.2017].)

Polykarboksylaattien eli notkistimen annostusmäärät ovat yleensä välillä 0–1 kg/betoni-m³. Notkistin, kuten muutkin käytettävät lisäaineet annostellaan betoniin vesiliuksena, jolloin valtaosa liuksesta on vettä ja vain pieni osa itse lisäainetta. (Betoni.com [Viitattu 10.1.2017].)

Betonin notkistamiseen käytettiin ennen melamiini- ja naftaleenisulfonaattipohjaisia lisäaineita. Näistä on kuitenkin havaittu aiheutuvan joissain tapauksissa pieniä, mutta kuitenkin havaittavia ammoniakki- ja/tai formaldehydipäästöjä sisäilmaan. Tästä syystä näiden myrkyllisiä päästöjä aiheuttavien aineiden käytöstä on päätetty luopua jo vuosia sitten. (Betoni.com [Viitattu 10.1.2017].)

2.4.2 Huokostin

Betonin valmistuksessa käytetään lisähuokostinta, mikäli sen säänkestävyyttä, kuten pakkasesta aiheutuvaa räsitystä, halutaan parantaa. Huokostimen pääasiallinen tehtävä betonissa on saada aikaan mikroskooppisia ilmakuplia eli suojarahukosia, joiden avulla voidaan lisätä betonin pakkasenkestävyyttä. (Betoni.com [Viitattu 10.1.2017].)

Betonin jäätyessä sen sisältämä vesi laajenee, jolloin laajeneminen tapahtuu suojarahukosiin ja tällöin betoni ei pääse vaurioitumaan (Betoni.com [Viitattu 10.1.2017]).

2.4.3 Hidastimet

Hidastimien avulla voidaan pidentää betonin sitoutumisen alkamisajankohtaa. Tällöin betonia voidaan työstää pidempään myös kuumissa olosuhteissa. Hidastimet mahdollistavat myös betonin pidempiaikaisemman kuljetuksen työmaille.

Normaaleja käyttökohteita ovat esimerkiksi liukuvalut, massiiviset valut ja kohteet, joissa betonin ja ympäristön lämpötila aiheuttaa nopeaa työstettävyyden menetyksiä, esimerkiksi helteellä tehtävät betonoinnit tai talvella tehtävä kuumabetonointi.

Hidastimet lisätään nestemäisessä muodossa betonimassan sekaan sekoituksen alkuvaiheessa. Määrä vaihtelee 0,2-0,6 % sementin painosta. (Semtu.fi [Viitattu 16.1.2017].) Hidastimet aiheuttavat betonimassan notkistumista, jolloin tarvittavan veden määrää voidaan vähentää. Hidastimilla ei ole vaikutusta betonin loppulujuuteen. (By 201, 2004, 67.)

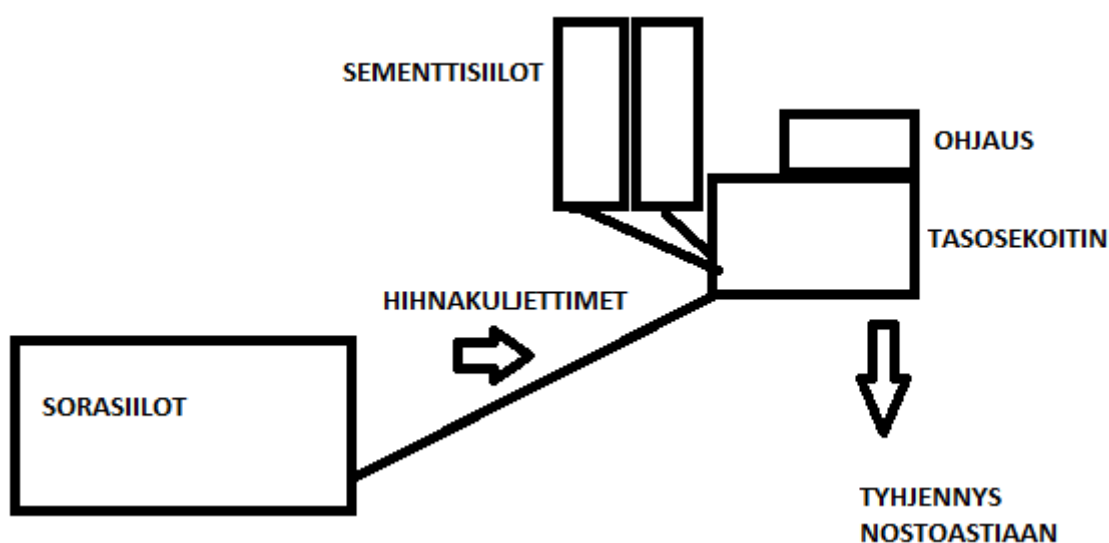
2.4.4 Kiihdyttimet

Kiihdyttimiä käytetään kolmeen eri tarkoitukseen, kuten nopeuttamaan betonin sitoutumista ja kovettumista sekä varhaislujuuden kehittymistä. Tämä mahdollistaa myös nopeamman muottikierron sekä betonoinnin kylmemmällä säällä. Kiihdyttimet jaetaan kolmeen eri luokkaan, joita ovat kovettumista nopeuttavat ja sitoutumista nopeuttavat kiihdyttimet sekä ruiskubetonikiihdyttimet. (semtu.fi.[Viitattu 20.1.2017].)

Kiihdyttimet lisätään nestemäisessä muodossa betonimassan sekaan sekoituksen alkuvaiheessa. Suositeltava määrä on noin 1.5–2.0 % lisättävän sementin painosta. Käyttökohteina ovat esimerkiksi tavallinen raudoitettu betoni, betonielementit, betoniharkot- ja putket. (Semtu.fi.[Viitattu 21.1.2017].) Koska kiihdyttimien avulla voidaan nopeuttaa muottikiertoa, käytetään niitä usein esimerkiksi betonielementti-tehtailla.

2.5 Betonin valmistus

Betoni valmistetaan sekoittamalla osa-aineet eli sementti, vesi ja kiviaines sekä mahdolliset seosaineet ja lisäaineet keskenään betonimyllyssä. Haluttu betonimassa saadaan aikaan suhteittamalla osa-aineita sekä lisäaineiden avulla. Betoni voidaan valmistaa, joko pienillä myllyillä tai kuten betonielementtitehtaissa suurella automatisoidulla sekoittajalla, joka mittaa ja kuljettaa osa-aineet ja lisäaineet mittatarkasti suoraan betonisekoittajaan (kuvio 1). Tällöin varmistetaan, että saatava betoni on juuri halutunlaista ja omaa sille määritellyt ominaisuudet.



Kuvio 1. Periaatekuva betonin valmistusjärjestelmästä elementtitehtaalla.

2.6 Betonin lujuudenkehitys

Betonin lujuudenkehityksen katsotaan alkavan heti, kun sementti ja vesi yhdistetään. Lujuudenkehitysreaktio jatkuu niin pitkään kuin betonissa on reagoimatonta sementtiä ja vettä käytettävissä. Betonin jälkihoito on erittäin merkittävässä osassa, jotta lujuudenkehitysreaktiot jatkuisivat mahdollisimman pitkään.

Betonimassa on aluksi notkeaa ja muovailtavaa, mutta betonimassa alkaa parin tunnin kuluttua sitoutua, jolloin sen jäykistyminen alkaa ja muovailtavuus heikentyy. Betonin lujuudenkehitysreaktiot ovat erittäin riippuvaisia ympäröivästä lämpötilasta eli reaktiot nopeutuvat lämpimässä ja hidastuvat kylmässä huomattavasti.

Myös sementin hienoudella on merkitystä lujuudenkehitysreaktioiden nopeuteen, sillä mitä hienommaksi sementti on jauhettu, sitä nopeammat reaktiot ovat. (Finnsementti.fi [Viitattu 22.1.2017].)

Betonin lujuudenkehitysreaktio aiheuttaa betonimassan lämpötilan nousua. Lämpötila betonirakenteessa nousee sitä enemmän, mitä massiivisempi rakenne on. Betonirakenteen lujuudenkehitystä voidaan tarkkailla mittaamalla rakenteen lämpötilaa sekä kovettumisaikaa, joiden perusteella voidaan laskea betonin sen hetkinen lujuus. (Finnsementti.fi [Viitattu 22.1.2017].)

Betonin lujuutta testataan yleensä 28 vuorokauden kovettumisen jälkeen, vaikka se ei tällöin ole saavuttanut vielä kokonaan täyttä lujuuttansa. Betonille määritetään puristuskokeiden antamien tuloksien perusteella lujuusluokka.

2.7 Betonin lujuusluokat

Betoni jaetaan puristuslujuuden perusteella lujuusluokkiin, jotka ilmaistaan esimerkiksi merkinnällä K45 tai C35/45. Molemmat merkintätavat ovat sallittuja, mutta merkintätapa C35/45 antaa myös lieriölujuuden arvon.

Lujuuden yksikkönä käytetään megapascalialia (MPa) $1 \text{ MPa} = 1 \text{ MN/m}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$.

Betoniteollisuudessa käytettävät betonin lujuusarvot ovat yleensä välillä K30-K60 tai toisella merkintätavalla välillä C25/30-C50/60. Tästä lujuudesta suuremmat betonit ovat korkealujuusbetoneita, joita käytetään esimerkiksi pankkiholveissa ja muissa suurta lujuutta vaativissa rakenteissa. (Finnsementti.fi. [Viitattu 25.2.2017].)

2.8 Betonin rasitusluokat

Betonirakenteille on määritelty rasitusluokat ympäristöolosuhteiden mukaan. Rasitusluokkia on yhteensä 18 ja ne voidaan jakaa 5 eri kokonaisuuteen. (Finnsementti.fi [Viitattu 2.2.2017].)

1. El korroosion tai syöpmisrasituksen riskiä, X0-luokka

Ympäristö ei rajoita rakenteen käyttöikä. Tällaisissa rakenteissa ei ole raudoitusta tai raudoitettu rakenne on kuivissa olosuhteissa eikä pakkasrasitusta ole.

2. Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio, XC-luokat

Betoni suojaa raudoitusta korroosiolta sekä fysikaalisesti että kemiallisesti. Kemiallinen suoja perustuu betonin korkeaan emäksisyyteen (pH noin 13..14), jolloin teräksen pinnalle muodostuu tiivis oksidikalvo. Betonin emäksisyys laskee, kun se reagoi ilman hiilidioksidin kanssa. Tätä kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Raudoituksen kemiallinen suoja häviää, kun betonin pH laskee alle 9 ja tällöin teräksen korroosio voi alkaa. Karbonatisoitumisnopeus riippuu ympäristöolosuhteista, betonin koostumuksesta ja betonipeitteen paksuudesta.

3. Kloridien aiheuttama korroosio, XD- ja XS-luokat

Kloridit voivat käynnistää teräskorroosion huolimatta betonin emäksisistä ympäristöstä. Teräskorroosion aiheuttama terästen poikkipinnan pieneneminen ja korroosiotuotteiden aikaansaama betonipeitteen lohkeamien lyhentävät oleellisesti rakenteen elinikää. Raudoituksen riittävä betonipeite, mahdollisimman tiivis betoni sekä pienet halkeamaleveydet ovat paras suoja kloridien aiheuttamaa korroosiota vastaan.

4. Jäätymis-sulamisrasitus, XF-luokat

Pakkasrapautumisen betonissa aiheuttaa pääasiassa kapillaarihuokosissa jäätyvä vesi. Betonikohdistuva pakkasrasitus voimistuu, kun mukana on suoloja. Suolojen vaikutuksesta kosteutta imeytyy betoniin entistä alhaisemmissa lämpötiloissa ja suolat kasvattavat jäätymispainetta. Betonin pakkasenkestävyyttä voi parhaiten parantaa betonin huokostamisella.

5. Kemiallinen rasitus, XA-luokat

Betonin kemiallinen vaurio johtuu Suomessa yleensä siitä, että betoniin kulkeutuu ympäristöstä aineita, jotka joko happamina liuottavat sementin hydrataatiotuotteita ja heikentävät niiden ominaisuuksia tai

paisuttavat sementtikiveä ja sitä kautta vaurioittaa rakennetta. Kemiallisen korroosion edellytyksenä on se, että haitallisten aineiden lisäksi betonissa on vettä jossain muodossa. Tyypillisimpiä betonille vahingollisia aineita ovat mm. sulfaatit, hapot ja aggressiivinen hiilidioksidi. (Finnsementti.fi [Viitattu 2.2.2017].)

2.9 Lämpötilan vaikutus lujuuden kehitykseen

Betonin lujuudenkehitys riippuu erittäin ratkaisevasti ympäröivästä lämpötilasta. Betonin tavoiteltu lujuus saavutetaan 28 vrk:ssa +20 °C lämpötilassa, silloin kun betonin koostumus ja työsuoritus ovat virheettömät. (By 201, 2004, 341.)

Betonin lujuudenkehitykseen eniten vaikuttava tekijä sementin määrän lisäksi on betonimassan lämpötila. Lämpötilan laskiessa alle 0 °C lujuudenkehitys hidastuu voimakkaasti ja pysähtyy kokonaan lämpötilan laskiessa -10...-15 °C lämpötilaan. (By 201, 2004, 347.)

Betonin sitoutumisaika sekä hydraatioreaktioiden nopeus ovat voimakkaasti riippuvaisia betonin lämpötilasta. Sitoutumisaika lyhenee ja hydraatioreaktio nopeutuu lämpötilan noustessa. Lämpötilan noustessa 10 °C kiihtyy kovettumisreaktio noin kaksinkertaiseksi, kun lämpötila on lähellä huoneen lämpötilaa eli 20 °C. Hydraatioreaktioita ei voida kiihdyttää eikä sitoutumisaikaa lyhentää rajattomasti lämpötilaa nostamalla. Suosituksena pidetään, ettei yli 50 °C lämpötiloja käytetä. (By 201, 2004, 350.)

Lujuuden kehitystä voidaan arvioida ja tarkastella tietokoneohjelmien, kypsyyssmittarien, ainetta rikkomattomien menetelmien, olosuhdekoekappaleiden sekä rakennekoekappaleiden avulla. Betonin lujuutta voidaan arvioida suhteellisen tarkasti kovettumislämpötilaan ja -aikaan perustuvien kypsyyssastelaskelmien ja -käyrien avulla, kun sen koostumus on määritetty. (By 201, 2004, 350.)

Ennen betonin lujuudenkehitystä arvioitiin klassisella menetelmällä ns. Nykäsen kypsyyssastelaskelmalla.

Tämä menetelmä ei kuitenkaan anna oikeita tuloksia varsinkaan korkeissa lämpötiloissa. Tähän menetelmään kuuluvat vanhat kypsyyssastekäyrät, jotka ovat vanhentuneet, sillä nykyään käytettävät suomalaiset sementit ovat huomattavasti

vanhoja sementtejä nopeampia lujuudenkehityksen alussa, joten vanhat kypsyysastekäyrät antavat liian pieniä alkulujuuksia. (By 201, 2004, 350.)

Nykyään käytettävällä, huomattavasti tarkemmalla niin sanotulla Sadgroven menetelmällä lasketaan lämpötilan ja ajan perusteella summa, joka kuvaa suoraan betonin kypsyysikää. Kypsyysiän perusteella nähdään, kuinka paljon betonin lujuus on kehittynyt, suhteessa +20 °C vakiolämpötilassa säilytettyyn betoniin verrattuna. Tässä menetelmässä käytettävistä kypsyysikään perustuvista käyristä saadaan selville betonin suhteellinen lujuus. Nykäsen menetelmän avulla saadaan lineaarinen käyrä, kun taas Sadgroven menetelmän avulla saadaan huomattavasti tarkempi ja luotettavampi potenssikäyrästä. (By 201, 2004, 350.)

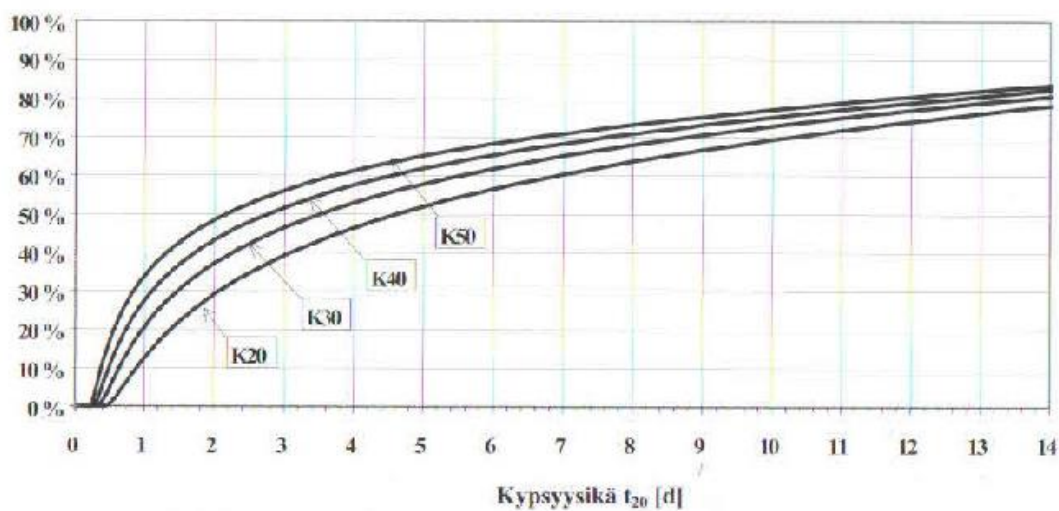
Sadgroven menetelmässä betonin kypsyysikä t_{20} lasketaan kaavalla:

$$t_{20} = ((T+16 \text{ °C}) / 36 \text{ °C})^2 \times t \quad (1)$$

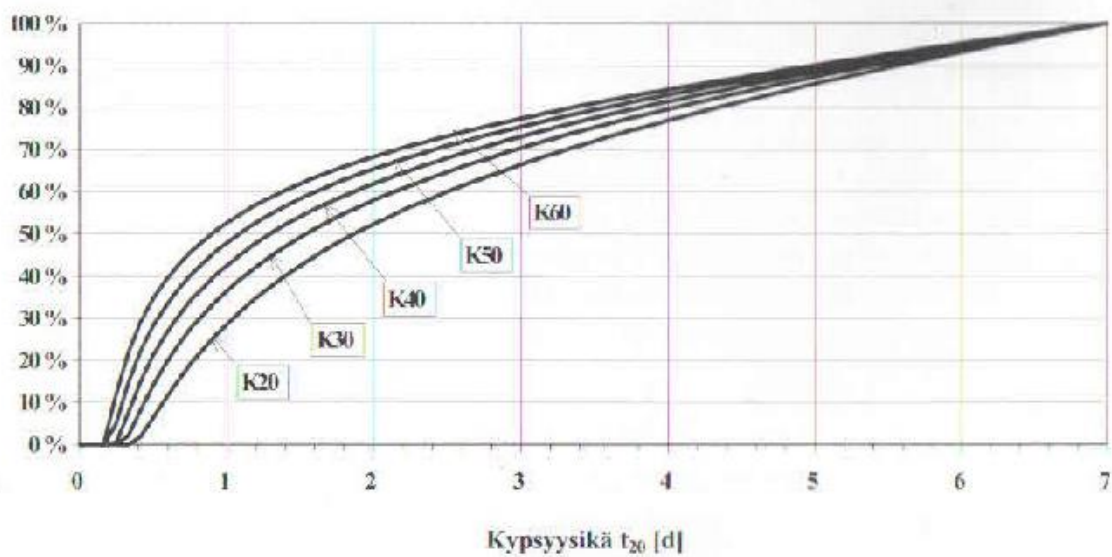
missä T on betonin lämpötila aikana t [°C]
 t on kovettumisaika [d]

Jos betonin lämpötila T on vakio koko kovettumisaian, saadaan t_{20} suoraan kaavasta. Yleensä t_{20} joudutaan määrittämään summana ajanjaksoista, joissa lämpötila on ollut likimain vakio. (By 201, 2004, 350.)

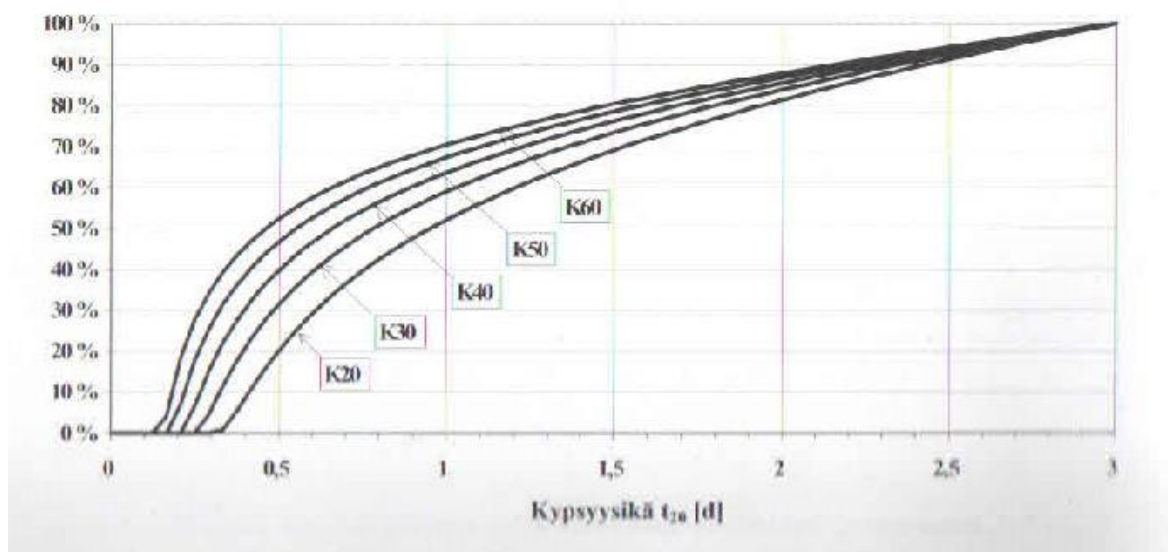
Käyrästä (kuvio 2), (kuvio 3), (kuvio 4) on tehty tyypillisesti käytettäville perusbetoneille. Mikäli betonin valmistuksessa käytetään erikoissuhteituksia, kuten esimerkiksi pieniä sementtimääriä, suuria seosainemääriä tai lisäaineita, täytyy niiden vaikutus lujuudenkehitykseen selvittää ja arvioida erikseen. (By 201, 2004, 350.)



Kuvio 2. Kypsyysikätaulukko normaalia Yleis- tai SR- sementtiä käyttäen. (By 201,2004, 353.)



Kuvio 3. Kypsyysikätaulukko nopeasti kovettuvaa Rapid- tai Mega- sementtiä käyttäen. (By 201, 2004, 354.)



Kuvio 4. Kypsyysikätaulukko erittäin nopeasti kovettuvaa pikasementtiä käyttäen. (By 201, 2004, 354.)

Taulukoissa on esitetty käyrästöt betonin suhteellisesta lujuudenkehityksestä kypsyysikänsä funktiona eri sementtilaatuja käytettäessä. Taulukoista selviää betonin kypsyysikä t_{20} vuorokausina (d) sekä saavutettu prosenttiosuus tavoitellusta nimellisuudesta. (By 201, 2004, 353.)

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kypsyysikätaulukkoa 2 sekä käyrää K-40, sillä Lammin Asennustaito Oy käyttää betonin valmistuksessa nopeasti kovettuvaa Rapid-sementtiä ja tutkittava lujuusluokka on K-40.

Käyrästöistä ei selviä lisäaineiden, kuten esimerkiksi huokostimen ja notkistimen vaikutusta lujuudenkehitykseen, joten tämä on selvitettävä ja arvioitava erikseen. Tässä opinnäytetyössä vertaillaan laskennallisia sekä puristuslujuuskokeiden avulla saatuja tuloksia toisiinsa, jolloin lisäaineiden vaikutusta betonin lujuudenkehitykseen voidaan arvioida vertailemalla saatuja lopputuloksia keskenään.

3 BETONIN LUJUUDEN JA LÄMPÖTILAN KEHITYKSEN TUTKIMINEN LASKENNALLISESTI

Lujuudenkehityksen laskenta alkaa laskemalla betonille kypsyysikä. Kypsyysikä laskentaan tarvitaan tiedot betonin lämpötilakehityksestä mittausaikana. Taulukossa 1 on laskettu kypsyysikä t_{20} , K-40 huokostetulle betonille mittauspisteen 1 lämpötilojen perusteella.

Taulukko 1. Kypsyysikä laskenta, mittauspisteen 1 lämpötilojen perusteella.

Aika valusta (h)	1. Mittauspiste	Aika valusta vuorokausina t (d)	Aikaväli t (d)	Keskilämpötila aikavälillä	Kypsyyslisä t_{20} aikavälillä	Kypsyysikä t_{20} (d)
0h	20°C	0				
1h	19,6°C	0,04	0,04	$(20+19,6)/2=19,8$	$((19,8+16°C)/36)^2=0,039$	0
2h	19,8°C	0,08	0,04	$(19,6+19,8)/2=19,7$	0,039	0,039
3h	20,1°C	0,12	0,04	$(19,8+20,1)/2=19,95$	0,0398	0,0788
4h	20,6°C	0,16	0,04	20,35	0,04	0,1188
5h	21,4°C	0,2	0,04	21	0,042	0,1608
6h	22,7°C	0,24	0,04	22,05	0,044	0,2048
7h	24,7°C	0,28	0,04	23,7	0,048	0,2528
8h	26,3°C	0,32	0,04	25,5	0,0531	0,3059
9h	28,3°C	0,36	0,04	27,3	0,0578	0,3637
10h	30,1°C	0,4	0,04	29,2	0,063	0,4267
11h	31,8°C	0,44	0,04	30,95	0,068	0,4947
12h	33,0°C	0,48	0,04	32,4	0,072	0,5667
13h	33,3°C	0,52	0,04	33,15	0,0745	0,6412
14h	33,4°C	0,56	0,04	33,35	0,0751	0,7163
15h	33,4°C	0,6	0,04	33,4	0,0753	0,7916
16h	33,4°C	0,64	0,04	33,4	0,0753	0,8669

Mittauspiste 1. $t_{20} = 0,8869$ (d)

Suhteellisen lujuuden kypsyysastekäyrästä nähdään, että betoni on saavuttanut 16 h aikana noin 43 % nimellislujuudestaan. K-40 huokostetun betonin suhteellinen lujuus mittauspisteen 1 lämpötilojen perusteella on tällöin 17,2 MN/m²

Mittauspiste 2. $t_{20} = 0,8537$ (d), nimellislujuudesta saavutettu 40 %. K-40 huokostetun betonin suhteellinen lujuus mittauspisteen 2 lämpötilojen perusteella on tällöin 16,0 MN/m².

Mittauspiste 3. $t_{20} = 0,8583$ (d), nimellislujuudesta saavutettu noin 41 %. K-40 tavallisen betonin suhteellinen lujuus mittauspisteen 3 lämpötilojen perusteella on tällöin 16,4 MN/m².

Mittauspiste 4. $t_{20} = 0,8615$ (d), nimellislujuudesta saavutettu noin 41,5 %. K-40 tavallisen betonin suhteellinen lujuus mittauspisteen 4 lämpötilojen perusteella on tällöin 16,6 MN/m².

Taulukko 2. Suhteellisten lujuuksien tulokset.

Mittauspiste	t_{20} (d)	Nimellislujuudesta saavutettu (%)	Suhteellinen lujuus (MN/m ²)
1	0,8869	43,0 %	17,2 MN/m²
2	0,8537	40,0 %	16,0 MN/m²
3	0,8583	41,0 %	16,4 MN/m²
4	0,8615	41,5 %	16,6 MN/m²

Kypsyysikälaskelmien avulla saatiin betonilaaduille laskettua suhteellinen lujuus MN/m². Kokonaisvaltaisemman tuloksen saamiseksi betonin saavutetusta suhteellisesta lujuudesta laskettiin sekä K-40 tavalliselle, että K-40 huokostetulle betonille suhteellisen lujuuden keskiarvo.

K- 40 tavallisen betonin suhteellisen lujuuden keskiarvo = 16,5 MN/m².

K- 40 huokostetun betonin suhteellisen lujuuden keskiarvo = 16,6 MN/m².

4 BETONIN LUJUUDEN- JA LÄMPÖTILAKEHITYKSEN TUTKIMINEN LABORATORIO-OLOSUHTEISSA

4.1 Tuoreen betonin ilmamäärän testaus

Säänkestävää betonia eli huokostettua betonia valmistettaessa mitataan ilmamäärä päivittäin aina ensimmäisestä valmistettavasta erästä. Betonista otetaan näyte, josta mitataan ilmamäärä siihen soveltuvalla ilmamäärämittarilla. Ilmamäärämittari ilmoittaa betonin sisältämän ilmamäärän. Ilmamäärän sallittu arvo huokostetulla betonilla, jonka suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta, on välillä 4,5 % - 8,0 % ja 100 vuoden suunnitellulla käyttöiällä 5,0 % - 7,5 % (Tepponen P. Semtu.fi [Viitattu 1.3.2017]). Ilmamäärämittari täytyy kalibroida vähintään kaksi kertaa vuodessa ja jokaisesta kalibroinnista on oltava kalibrointitodistus. Kalibrointi suoritetaan hyväksytyssä koetuslaitoksessa, Lammin Asennustaito Oy:n tapauksessa yleensä Contesta Oy:ssa

Betonin ilmamäärämittaus aloitetaan täyttämällä ilmamäärämittari tuoreella betonilla ja tiivistämällä se sulloinsauvaa tai tärypöytää käyttäen. Betonipinta tasataan laitteen astian reunojen tasalle, jonka jälkeen laitteen yläosa voidaan asettaa paikalleen ja lukita salvoilla. Tämän jälkeen avataan laitteen kummallakin sivulla olevat pallohanat ja astiaan ruiskutetaan vettä toisesta hanasta niin kauan, että astiassa jäljellä oleva ilma poistuu täysin toisen hanan kautta (kuva 2). Ilman poistumisen jälkeen kummatkin hanat voidaan sulkea. Ilmamäärämittariin pumpataan tämän jälkeen ilmaa joko käsipumpulla tai koneellisesti, kunnes on saavutettu niin sanottu alkupaine. (SFS 156, 2002, 41-50.) Tämän jälkeen painetaan paineentestauspainiketta niin kauan, että paine tasaantuu ja painemittarin osoitin asettuu paikalleen. Painemittari ilmoittaa ilmamäärän suoraan prosentteina, joka kirjataan ylös ja tarkastetaan, että lukema on sallituissa rajoissa.

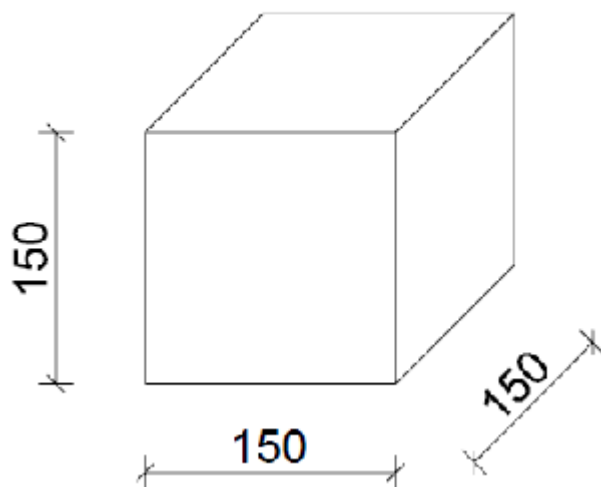


Kuva 2. Veden ruiskuttaminen ilmamäärämittariin, jäljellä olevan ilman poistamiseksi.

4.2 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleina tulee käyttää tasasivuisia kuutioita särmältään 150 mm x 150 mm x 150 mm (kuvio 5) tai vaihtoehtoisesti lieriöitä, joiden korkeus on kaksi kertaa halkaisijan verran eli 150 mm x 300 mm.

Jokaiselle koekappalemuodolle, kuutiolle, lieriölle ja prismalle, koekappaleen perusmitan d tulee olla vähintään kolme ja puoli kertaa niin suuri kuin betonin kiviaineksen nimellisraekoko (SFS 156, 2002, 66).



Kuvio 5. Koekuutio 150 mm x 150 mm x 150 mm.

Koekappaleiden suositeltava määrä on vähintään 6 kpl, jokaista testattavaa lujuusluokkaa kohti. Tällöin saadaan luotettava tulos koekappaleen puristuslujuudesta.

4.3 Muotit

Koekappaleiden muottien tulee olla vesitiiviitä ja vettä imemättömiä. Muottien saumat voidaan kuitenkin vedenpitävyyden aikaansaamiseksi käsitellä vahalla, öljyllä tai rasvalla. (SFS 156, 2002, 69.)

Koekappaleiden muotit voidaan tehdä mistä tahansa materiaalista, joka soveltuu betonikoekappaleiden valmistukseen. Poikkeuksena kuitenkin ovat kalibroidut muotit, joiden tulee olla valmistettu teräksestä tai valuraudasta, joiden katsotaan olevan vertailumateriaaleja. Mikäli koekappaleiden muotit valmistetaan muista materiaaleista kuin teräksestä tai valuraudasta, täytyy niiden käyttöön perustuvaa testaustietoa olla saatavilla. Testaustiedon täytyy todentaa erilaisen muottimateriaalin pitkäaikaisvastaavuus teräkseen tai valurautaan verrattuna. (SFS 156, 2002, 69.)

4.4 Valaminen

Ennen koekappalemuottien täyttämistä, peitetään muotin sisäpinta ohuella kalvolla ei-reaktiivista irrotusainetta kuten esimerkiksi muottiöljyllä. Irrotusaineen tehtävänä on estää betonin kiinnittyminen muottiin. Koekappaleet tiivistetään valun yhteydessä vähintään kahdessa kerroksessa, mutta kerroksien paksuus ei kuitenkaan saa olla yli 100 mm paksumpi. Betoni tulee tiivistää välittömästi muottiin laittamisen jälkeen siten, että saadaan aikaan täydellinen tiivistyminen. Tiivistyksessä tulee kuitenkin varoa betonin liiallista erottumista sekä sementtikalvon muodostumista. (SFS 156, 2002, 77.)

Tiivistäminen tulee tehdä jollakin seuraavista välineistä, sauvatärytin, tärypöytä, sulloinsauva tai sullointanko. Standardissa SFS-EN 12390-2 on esitetty tiivistämiseen käytettäville välineille seuraavat ehdot. (SFS 156, 2002, 77.)

- Sauvatärytin, jonka vähimmäisvärähtelytaajuus on 120 Hz (7200 kierrosta minuutissa) ja jonka halkaisija ei saa olla yli $\frac{1}{4}$ koekappaleen pienimmästä mitasta.
- Tärypöytä, jonka vähimmäisvärähtelytaajuus on 40 Hz (2400 kierrosta minuutissa)
- Sulloinsauva, joka on poikkileikkaukseltaan pyöreä, teräksestä valmistettu, päistään pyörästetty ja jonka halkaisija on noin 16 mm ja pituus noin 600 mm
- Sullointanko, joka on poikkileikkaukseltaan neliömäinen, suora, teräksestä valmistettu ja jonka poikkileikkaus on noin 25 mm x 25 mm ja pituus noin 380 mm. (SFS 156, 2002, 76.)

4.5 Koekappaleiden säilytys

Koekappaleiden tulee antaa olla muoteissaan vähintään 16 tunnin ajan, kuitenkin korkeintaan kolme päivää. Koekappaleiden tulee olla muoteissaan suojattuna iskuilta, tärinältä ja kuivumiselta 20 +/- 5 °C lämpötilassa. Koekappaleita säilytetään vedessä, jonka lämpötila tulee olla 20 +/- 2 °C, tai vaihtoehtoisesti kosteushuo-

neessa 20 +/- 2 °C lämpötilassa ja ≥ 95 % suhteellisessa kosteudessa (SFS 156, 2002, 78.)

Tässä opinnäytetyössä testataan betonin varhaislujuuden kehitystä, jolloin koekappaleet ovat niin sanottuja olosuhdekoekappaleita. Olosuhdekoekappaleet säilytetään samoissa olosuhteissa kuin tutkittava elementti tai betonirakenne, jolloin puristustuloksien avulla saadaan tietää elementin tai betonirakenteen senhetkinen lujuus. Vertailun vuoksi kuitenkin osa koekappaleista päätettiin säilyttää 5 °C lämpötilassa, jolloin saatiin vertailtua varhaislujuuden kehityksen riippuvuutta ympäröivästä lämpötilasta.

4.6 Lujuuden testaus puristustestauskoneella

Koekappaleiden testaukselle on olemassa tarkat standardit, joita tulee noudattaa. Koekappaleiden puristuslujuudentestauksen saa tehdä ainoastaan hyväksytyillä ja standardin EN 12390-4 mukaisella puristustestauslaitteella. Koekappaleet kuormitetaan laitteen avulla murtoon ja kappaleen suurin kestävä voima kirjataan muistiin ja lasketaan betonille puristuslujuus. (SFS 156, 2002, 82.)

Koekappaleen tulee täyttää sille standardin EN 12390-1 asettamat vaatimukset. Mikäli koekappale ei näitä standardin määrittämiä asetuksia täytä, tulee koekappale hylätä, tasoittaa tai testata Suomen standardisoimisliiton SFS- käsikirjassa liitteessä B määritellyn tavan mukaisesti. (SFS 156, 2002, 83.)

4.6.1 Koekappaleiden valmistelu ja sijoitus

Koekappaleiden valmistelu puristustestausta varten aloitetaan pyyhkimällä kappaleen pinnoista ylimääräinen kosteus ennen testauskoneeseen asettamista. Koekappale keskitetään testauskoneeseen, siten että kuutioilla kuormitus kohdistuu valusuuntaa vastaan kohtisuoraan. Muiden välikappaleiden kuin lisälevyjien ja väliattojen käyttö on kiellettyä. Standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti koekappale tulee keskittää testauskoneen alakuormituslevylle +/- 1 % tarkkuudella kuutiomai-

sen koekappaleen nimitystä mitasta tai lieriömäistä koekappaletta käytettäessä, sen nimitystä halkaisijasta. (SFS 156, 2002, 83.)

4.6.2 Koekappaleen kuormitus

Koekappaleen kuormitus aloitetaan valitsemalla tasainen kuormituksen kasvunopeus väliltä 0,2...1,0 MPa/s ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$). Kuorma kohdistetaan koekappaleeseen ilman iskua ja tasaisesti kuormitusta lisäten valitulla vakionopeudella +/- 10 %, kunnes kuormaa ei enää voida lisätä ja kappale murtuu. Kirjataan muistiin suurin saavutettu kuorma ja lasketaan betonin lujuus. (SFS 156, 2002, 83.)

4.7 Lujuuden testaus kimmovasaralla

Valmiiden betonirakenteiden sekä betonielementtien lujuutta voidaan testata ainetarikkomattomilla menetelmillä, kuten esimerkiksi kimmovasaralla. Vaihtoehtoisesti rakenteesta voidaan ottaa porausnäyte, jolloin saadaan tarkka tieto rakenteessa olevan betonin lujuudesta. Kimmovasaralla voidaan kuitenkin saada kohtuullisen tarkkaa tietoa betonin lujuudesta nopeasti sekä rikkomatta rakennetta.

Kimmovasaralla tehtävää testausmenetelmää ei ole tarkoitettu betonin puristuslujuuden määrittämiseen standardin EN 12390-3 vaihtoehdoksi, mutta sopivalla korrelaatiolla sillä voidaan saada kohtuullisen luotettava arvio betonin lujuudesta rakenteessa. Tästä testistä ei ole kuitenkaan olemassa mitään tarkkuutta koskevia tietoja. (SFS 156, 2002, 174.)

4.7.1 Tarvittava laitteisto

Standardin SFS-EN 12504-2 mukainen kimmovasara muodostuu jousikuormitusta teräsvasarasta ja teräsmännästä. Vapautuessaan teräsvasara osuu betonipintaa vasten olevaan teräsmäntään, jolloin teräsvasaran teräsmännästä kimpoama etäisyys voidaan tarkastaa mittalaitteen runkoon kiinnitetystä lineaariasteikosta. Kaupallisesti on saatavilla monia erityyppisiä sekä kokoisia kimmovasaroita,

jotka soveltuvat erilaisten betonin lujuusluokkien ja tyyppien testaukseen. Edellä mainitun standardin mukaisesti kuitenkin kunkin tyyppistä ja kokoista vasaraa tulisi käyttää vain sille määrätyn betonin lujuusluokan ja tyyppin testaukseen. (SFS 156, 2002, 174.)

Standardin SFS-EN 12504-2 mukaan testattavien betonirakenteiden ja betonielementtien tulee olla vähintään 100 mm paksuja ja rakenteeseen kiinnitettyjä. Pienempiäkin kappaleita voidaan kuitenkin testata, mikäli ne ovat tukevasti tuettuja eivätkä pääse liikkumaan testiä tehdessä. Mittauksia tehdessä erityisesti kennorakenteisia, hilseileviä, karkearakenteisia ja huokoisia alueita tulee välttää, sillä näistä rakenteista ei saada välttämättä luotettavia mittaustuloksia. Testausalueen suuruuden tulee olla noin 300 mm x 300 mm, mutta ei kuitenkaan 25 mm lähempänä rakenteen reunaa. (SFS 156, 2002, 174.)

4.7.2 Lujuuden mittaaminen kimmovasaralla

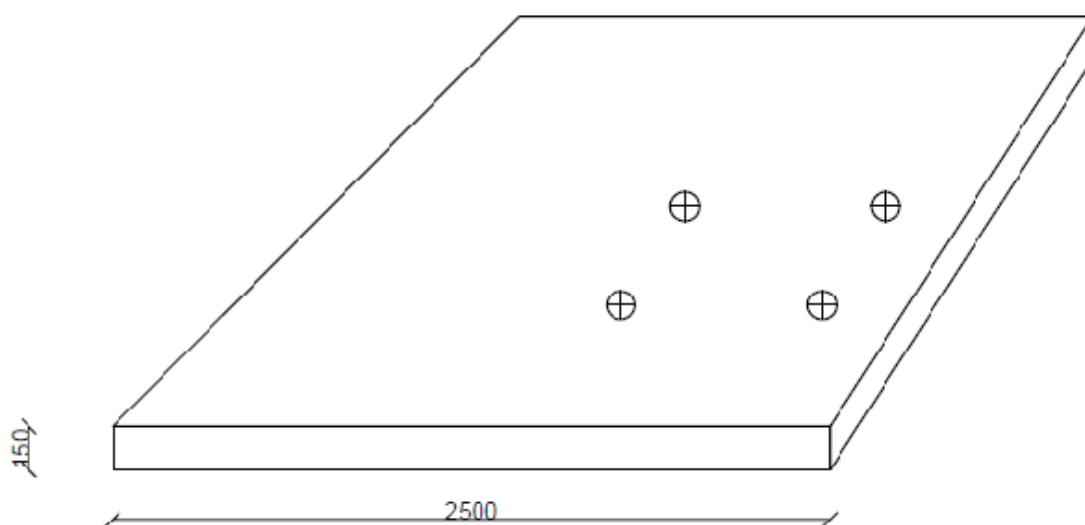
Standardin SFS-EN 12304-2 mukaisesti vasaraa tulee pitää tukevasti sellaisessa asennossa, että mäntä pääsee iskemään kohtisuoraan testattavan betonirakenteen pintaan. Mittauksesta saatu kimmovasaran näyttämä merkitään muistiin jokaisen iskun jälkeen. Mittauksessa tulee käyttää vähintään yhdeksää lukemaa, jotta saadaan luotettava arvio testattavan rakenteen puristuslujuudesta. Vasaran sijainti ja suuntautuminen tulee merkitä muistiin jokaisen lukemasarjan osalta. Mittausta tehdessä tulee myös varmistaa, ettei yksikään iskukohta ole lähempänä kuin 25 mm toisesta iskukohdasta ja ettei yksikään iskukohta ole 25 mm lähempänä rakenteen reunaa. Testitulokset tulee määrittää lukemien mediaanina sekä tarpeen mukaan tarkistettuina ottaen huomioon vasaran suuntaus. Tuloksien perusteella laskettu mediaani tulee ilmaista kokonaislukuna. (SFS 156, 2002, 175.)

4.8 Lämpötilakehityksen testaus

Betonin lämpötilan kehitystä voidaan testata käyttämällä perinteisiä lämpömittareita, joilla mittaaminen tapahtuu esimerkiksi betoniin asetetuista putkista. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös elektronisia mittareita, joilla mittaaminen tapahtuu

betoniin asetettujen antureiden avulla. Mittaamisessa on tärkeää huomioida lämpötilan ohella myös mittausajankohta. Mittauspisteet on valittava siten, että saadaan luotettava kokonaisvaltainen kuva betonin lämpötiloista eri puolilta betonirakennetta tai betonielementtiä (kuvio 6). (By 201, 2004, 350.)

Tähän opinnäytetyöhön valittiin käytettäväksi perinteinen digitaalinen lämpömittari, jonka avustuksella saadaan tietää betonin lämpötilan kehitys noin vuorokauden kuivumisen aikana. Tällöin lujuudenkehityksen laskenta antaa tarkemman ja luotettavamman tuloksen betonin senhetkisestä lujuudesta.



Kuvio 6. Periaatekuva väliseinäelementistä, jossa merkitty lämpömittareiden antureiden (4 kpl) sijainti.

5 TESTATTAVA BETONI

5.1 Betonin resepti

Testattavien betonien reseptit ovat tietokoneohjelman määrittämiä ja erittäin mittatarkkoja. Reseptit on mitoitettu yhdelle täydelle tehtävälle erälle kyseistä betonimassaa. Massaan lisättävien betonin osa-aineiden tarkemmat määrät löytyvät betonien resepteistä. Lammin Asennustaito Oy käyttää vain hyväksytyjä standardin SFS-EN 934-2 mukaisia CE-merkittyjä lisäaineita. Runkoaineena toimiva kiviaines, joka koostuu sepelistä, karkeasta ja hienosta kiviaineksesta sekä filleristä, on standardin SFS-EN 12620, mukaista sekä CE-merkittyä. Käytettävä sementti on standardin SFS-EN 197-1 mukaista sekä CE-merkittyä. Käytettävä vesi on puhdasta vesijohtovettä. K-40 tavallisen betonin resepti (liite 2) ja K-40 huokostetun betonin resepti (liite 1).

5.2 Betonin valmistus

Testattavat betonit valmistettiin automaattisella tietokoneohjatulla Lapamixertasekoittajalla (kuva 3). Tietokoneohjauksen sekä automatisoinnin avulla betonin eri ainesosien sekä lisäaineiden suhteitus on tarkkaa ja täsmälleen betonin reseptin mukaista. Automatisoinnin ansiosta myöskään betonin sekoitusajasta ei tarvitse erikseen huolehtia, vaan tietokone määrittää oikean sekoitusajan pituuden, (alkusekoitus sekä loppusekoitus), kyseiselle betonimassalle. Kuitenkin Inspecta sertifiointi Oy edellyttää vähintään 60 s sekoitusajan, ellei muuta tutkimusta ole tehty (By 201, 2004, 299). Kiviaines säilytetään lämmitetyssä sorasiilossa, jolloin kiviaineksen kosteus ja lämpötila on optimaalinen ja tasalaatuinen. Lisättävän veden lämpötila on myös säädeltävissä, jolloin betonimassan lämpötilaa voidaan nostaa, mikäli siihen on esimerkiksi ulkona vallitsevan kylmän ilman vuoksi tarvetta. Betonimassan tavoitelämpötila oli tässä opinnäytetyössä noin 20 °C.

Betonimassan ollessa valmista käyttöön, se siirretään elementtimuoteille pyöräkooneella sekä siltanosturin avulla, pohjasta avattavalla nostoastialla eli ”jassikalla”.



Kuva 3. Automatisoitu Lapamixer-tasoseikoittaja.

5.3 Betonin jälkihoito

Betonielementit valetaan teräksisille kääntöpöydille. Kääntöpöytien alla on vesikiertoinen lämmitysputkisto, joiden avulla voidaan varmistaa betonin riittävä varhaislujuuden kehittyminen sekä muotipurkulujuuden saavuttaminen. Valamisen sekä betonin tiivistämisen ja tarvittavan pintakäsittelyn, puuhierto, teräshierto tai telaus jälkeen peitetään elementti sekä polyuretaanilevyillä että kevyellä kertapeitteellä. Tällä tavalla voidaan hidastaa betonin kosteuden haihtumista liian nopeasti elementin pinnoilta ja voidaan varmistua betonin kovettumisreaktioiden jatkumisesta riittävän pitkään jolloin betonipeite saavuttaa riittävän lujuuden ja tiiviiden (kuva

4). Jälkihoidon avulla voidaan estää liian nopeasta pinnan kuivumisesta aiheutuvat betonin pinnan vauriot, kuten esimerkiksi kutistumishalkeilu.



Kuva 4. Eristesokkelielementti valettuna ja peitettynä.

6 TUTKIMUS

6.1 Tutkimuslaitteiston esittely

Ilmamäärämittari (kuva 5), merkki Form+test. Viimeisin kalibrointi on suoritettu 11.1.2017.



Kuva 5. Ilmamäärämittari.

Ilmamäärämittari kalibroidaan vähintään kaksi kertaa vuodessa sekä jokaisen korjauksen yhteydessä. Ilmamäärämittarin kalibroinnit sekä huoltotoimenpiteet suorittaa Contesta Oy.



Kuva 6. Kimmovasara.

Kimmovasara (kuva 6), merkki Proceq, lineaariasteikolla varustettuna.



Kuva 7. Betonin puristuslujuuden testauskone.

Betonin puristuslujuuden testauskone (kuva 7), merkki tecnotest. Puristuslujuuden testauslaite kalibroidaan kerran vuodessa. Viimeisin kalibrointi on suoritettu 9.2.2017, kalibroinnin on suorittanut VTT.

6.2 Tutkimuksen aloitus ja eteneminen

Lyhytaikainen lujuudenkehityksen tutkiminen toteutettiin molemmilla tutkittavilla betonilaaduilla samalla tavalla. Koekuutioiden puristuskokeet tehtiin Koskisen Betoni Oy:n tiloissa hyväksytyllä kalibroidulla betonin puristustestauslaitteella ja osaan henkilökunnan suorittamana standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti.

6.2.1 K-40 lujuusluokka

K-40 lujuusluokan omaavan betonin tarkemman lyhytaikaisen lujuudenkehityksen tutkiminen aloitettiin ottamalla näytteitä koekuutioita varten yhdestä valmistettavasta erästä K-40 lujuusluokan betonia. Vertailtavaksi elementiksi valittiin 150 mm paksu väliseinäelementti, jolloin koekuution ja vertailtavan elementin betonin paksuus oli yhtä suuri.

Koekuutiot valettiin standardin SFS-EN 12390-1 mukaisiin muottiöljyllä käsiteltyihin kalibroituihin muotteihin samaan aikaan kuin vertailtava elementti (kuva 8). Tällöin varmistuttiin, että vertailukohteilla oli sama lujuudenkehitysaika. Koekappaleet valettiin standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti ja peitettiin välittömästi teräshiertämisen jälkeen. Koekuutioista 6 kpl säilytettiin samoissa olosuhteissa kuin vertailtava väliseinäelementti ja koekuutioista 3 kpl säilytettiin noin 5 °C lämpötilassa, jolloin saatiin vertailtua ympäröivän lämpötilan vaikutusta lujuudenkehitykseen.



Kuva 8. Koekuutioiden muotit öljytyinä, valmiina valamista varten.

Koekappaleet purettiin muoteista samanaikaisesti kuin vertailtava elementti, jonka jälkeen välittömästi suoritettiin koekappaleille puristuskokeet. Väliseinäelementistä valittiin testattava alue, kooltaan 300 mm x 300 mm, josta lujuus testattiin kimmovasaran avulla, yhdeksästä eri pisteestä standardin SFS-EN 12304-2 mukaisesti. Vertailtavan väliseinäelementin lujuutta testattaessa, elementti oli kääntöpöydällä, jolloin voitiin varmistua, että elementti ei pääse liikahuttamaan testauksen aikana, jolloin saadut arvot ovat paikkansapitävämpiä.

Puristuskokeiden tuloksia sekä kimmovasaran avulla saatuja tuloksia vertailtiin keskenään sekä lujuudenkehityslaskennan antamiin tuloksiin.

6.2.2 K-40 lujuusluokka, huokostettu

K-40 lujuusluokan huokostetun betonin tarkemman lyhytaikaisen lujuudenkehityksen tutkiminen aloitettiin ottamalla näyte betonin ilmamäärämittausta varten. Betonin sisältämän ilmamäärän mittaus suoritettiin standardin SFS-EN 12350-7 mukaisesti. Ilmamäärämittauksessa selvisi betonin sisältävän 5,7 % ilmaa. Ilmamäärämittauksen jälkeen samasta valmistetusta erästä otettiin näytteitä koekuutioita var-

ten. Vertailtavaksi elementiksi valittiin 150 mm paksu väliseinäelementti, joka valettiin huokostetulla betonilla.

Koekuutiot valettiin samaan aikaan kuin vertailtava väliseinäelementti ja näin varmistettiin juuri samanmittainen kovettumisaika. Koekappaleista 6 kpl säilytettiin täsmälleen samoissa olosuhteissa vertailtavan väliseinäelementin kanssa (kuva 9) ja 3 kpl koekuutioista säilytettiin vertailun vuoksi noin 5 °C lämpötilassa.



Kuva 9. Olosuhdekoekappaleet valettuina, vertailtavan väliseinäelementin vieressä.

Koekappaleet purettiin muoteista samanaikaisesti kuin vertailtava elementti, jonka jälkeen välittömästi suoritettiin koekappaleille puristuskokeet (kuva 10),(kuva 11). Väliseinäelementistä valittiin kooltaan 300 mm x 300 mm alue, josta lujuus testattiin kimmoasaran avulla yhdeksästä eri pisteestä standardin SFS-EN 12304-2 mukaisesti. Puristuskokeiden tuloksia sekä kimmoasaran avulla saatuja tuloksia vertailtiin keskenään sekä lujuudenkehityslaskennan antamiin tuloksiin.



Kuva 10. Koekuutiot muoteista purettuina 16 h kuivumisen jälkeen.



Kuva 11. Huokostetusta betonista valmistetun olosuhdekoekuutien puristuskoelaitteen sisällä.

6.3 Lämpötilakehityksen tutkiminen

Lämpötilakehityksen tutkimus aloitettiin valitsemalla tutkittavaksi elementiksi 150 mm paksu väliseinäelementti, josta puolet valettiin K-40 lujuusluokan tavallisella betonilla ja puolet K-40 lujuusluokan huokostetulla betonilla. Lämpömittarien anturit sijoitettiin putkiin, jotka sijaitsivat eri puolilla elementtiä, jolloin saatiin kokonaisvaltainen ja luotettavampi tulos betonin lämpötilakäyttäytymisestä tehdasolosuhteissa. Lämpömittarien anturit sijoitettiin keskeisesti noin 75 mm syvyydelle elementin pinnasta, jonka jälkeen putkien päät suljettiin tiiviisti teipillä.

Lämpömittarien alkulämpötila oli 20 °C, joka kirjattiin muistiin. Lämpömittarit mittaivat elementin lämpötilaa yhteensä 16 h ja tiedot dokumentoitiin yön yli kameran automaattisella tunnin välein tapahtuvalla laukaisulla. Tiedot kirjattiin taulukkoon kameran kuvien perusteella. Tällä tavalla saatiin luotettavampi tulos betonin kypsyyksilaskelmista. Elementin loppulämpötila juuri ennen muottien purkamista oli noin 32 °C. Saatuja tuloksia käytettiin apuna laskettaessa betonin kypsyyksiä, jonka perusteella määritettiin laskennallinen prosenttiosuus betonin nimellislujuudesta.

7 YHTEENVETO

7.1 Tulokset

Puristuskokeiden sekä kimmovasaran avulla saadut arvot betonin lujuudesta 16 h kuivumisen jälkeen kirjattiin ylös ja tuloksista muodostettiin taulukot sekä kuvaajat, joiden perusteella laskettiin puristuslujuudelle keskiarvo ja kimmovasaran arvoille mediaani. Lämpötilakehityksen mittauksesta saaduista tuloksista muodostettiin taulukko, jonka perusteella laskettiin betonille kypsyyksiä sekä prosenttiosuus saavutetusta nimellislujuudesta.

7.1.1 K- 40 tavallinen betoni

Taulukko 3. Puristuslujuustestin tulokset, K-40.

K- 40 Tavallinen

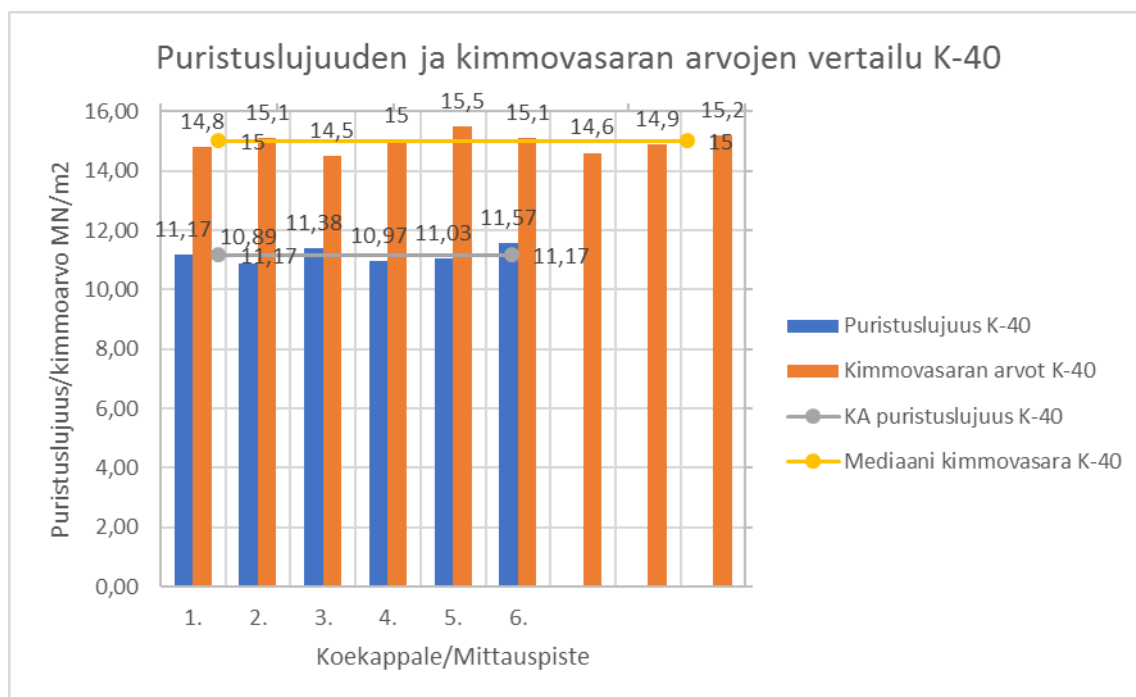
Olosuhdekoekuutio	Betonin lämpötila (°C)	Lujuudenkehitysaika (h)	Puristuslujuus (MN/m ²)	Keskiarvo (MN/m ²)
1.	15.4 °C	16 h	K- 11.2	
2.	15.4 °C	16 h	K- 10.9	
3.	15.4 °C	16 h	K- 11.4	
4.	15.4 °C	16 h	K- 10.9	
5.	15.4 °C	16 h	K- 11.0	
6.	15.4 °C	16 h	K- 11.6	K- 11.2
Koekuutio välivarastossa 5°C	Betonin lämpötila (°C)	Lujuudenkehitysaika (h)	Puristuslujuus (MN/m ²)	Keskiarvo (MN/m ²)
1.	15.4 °C	16 h	K- 5.8	
2.	15.4 °C	16 h	K- 5.9	
3.	15.4 °C	16 h	K- 5.9	K- 5.9

Puristuskokeiden perusteella muodostetusta taulukosta käy ilmi, että betonin lyhytaikainen lujuudenkehitys on erittäin voimakkaasti riippuvainen ympäröivästä lämpötilasta. Koekappaleet, joita säilytettiin noin 5 °C lämpötilassa, ehtivät kehittää lujuutta vain noin puolet siitä, mitä olosuhdekappaleet.

Taulukko 4. Kimmomasaran näyttämät lujuusarvot vertailtavasta väliseinäelementistä, K-40.

K- 40 Tavallinen	Betonin lämpötila °C	Elementti paksuus 150mm	Kimmoasaran antama arvo	Mediaani
Mittauspiste		Lujuudenkehitysaika (h)	Lujuusluokka (MN/m ²)	MN/m ²
1.	15.4 °C	16 h	K-14.8	
2.	15.4 °C	16 h	K-15.1	
3.	15.4 °C	16 h	K-14.5	
4.	15.4 °C	16 h	K-15.0	
5.	15.4 °C	16 h	K-15.5	
6.	15.4 °C	16 h	K-15.1	
7.	15.4 °C	16 h	K-14.6	
8.	15.4 °C	16 h	K-14.9	
9.	15.4 °C	16 h	K- 15.2	K- 15.0

Kimmoasaran antamista arvoista muodostettiin taulukko ja laskettiin arvoille mediaani, josta käy ilmi että betonielementin lujuus on kehittynyt 16 h aikana lujuusluokkaan K-15 (MN/m²).



Kuvio 7. Puristuslujuuden ja kimmoasara-arvon vertailu, K-40.

Mikäli vertaillaan keskenään koekappaleiden puristustuloksia sekä kimmovasaran avulla saatuja arvoja elementistä, voidaan havaita selkeitä eroja mittaustuloksien välillä, mikä johtuu betonin omasta lämmönkehityksestä sekä kimmovasaran epä-tarkkuudesta.

7.1.2 K- 40 huokostettu betoni

Taulukko 5. Puristuskokeiden tulokset, K-40 huokostettu.

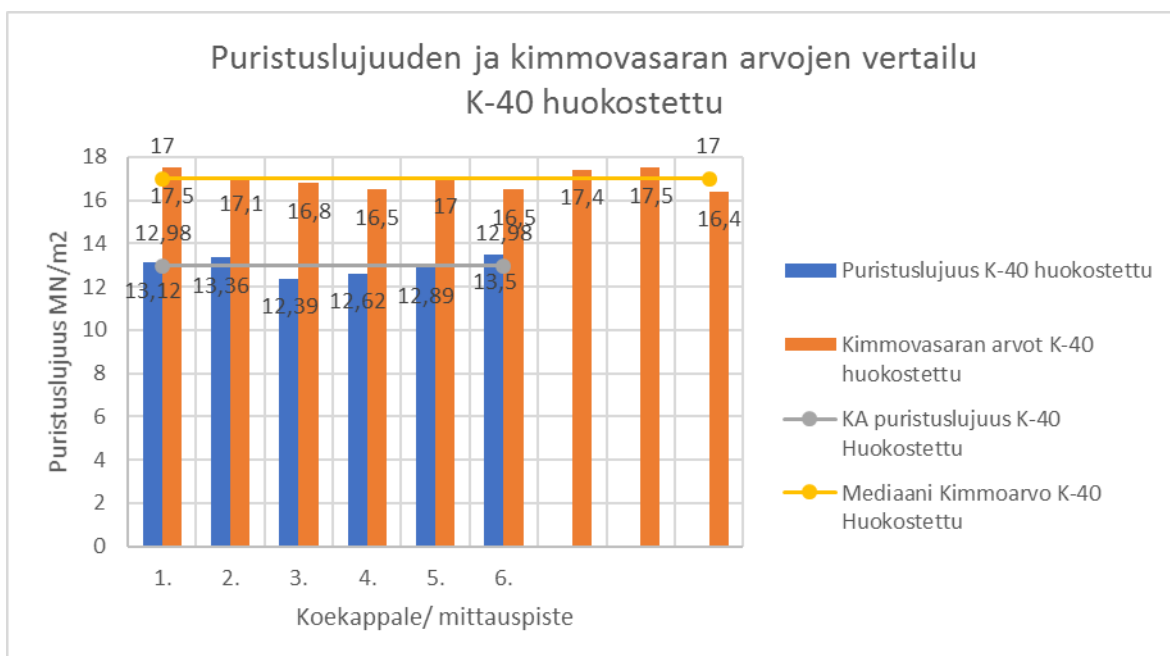
K- 40 Huokostettu				
Olosuhdekoekuutio	Betonin lämpötila (°C)	Lujuudenkehitysaika (h)	Puristuslujuus (MN/m ²)	Keskiarvo (MN/m ²)
1.	17.2°C	16h	k- 13.1	
2.	17.2°C	16h	k- 13.4	
3.	17.2°C	16h	k-12.4	
4.	17.2°C	16h	k- 12.6	
5.	17.2°C	16h	k- 12.9	
6.	17.2°C	16h	k- 13.50	k-13.0
Koekuutio välivarastossa 5°C	Betonin lämpötila (°C)	Lujuudenkehitysaika (h)	Puristuslujuus (MN/m ²)	Keskiarvo (MN/m ²)
1.	17.2°C	16h	k- 5.9	
2.	17.2°C	16h	k- 5.7	
3.	17.2°C	16h	k- 6.0	k- 5.8

Puristuskokeiden tuloksista muodostetun taulukon perusteella käy ilmi, että betonin lujuudenkehitys on erittäin voimakkaasti riippuvainen ympäröivästä lämpötilasta. Koekuutiot, joita säilytettiin noin 5 °C lämpötilassa, kehittivät lujuutta vain noin puolet verrattuna olosuhdekoekappaleisiin. Huomattavia eroja ympäröivän lämpötilan vaikutuksesta lyhytaikaiseen lujuudenkehitykseen ei ole havaittavissa vertailtaessa tavallista K-40 lujuusluokan ja huokostettua K-40 lujuusluokan betonia keskenään.

Taulukko 6. Kimmovasaran näyttämät vertailtavasta väliseinäelementistä, K-40 huokostettu.

K- 40 Huokostettu	Betonin lämpötila °C	Elementti paksuus 15	Kimmovasaran antama arvo	Mediaani
Mittauspiste		Lujuudenkehitysaika	Lujuusluokka (MN/m ²)	MN/m ²
1.	17.2 °C	16 h	K-17.5	
2.	17.2 °C	16 h	K-17.1	
3.	17.2 °C	16 h	K-16.8	
4.	17.2 °C	16 h	K-16.5	
5.	17.2 °C	16 h	K-17.0	
6.	17.2 °C	16 h	K-16.5	
7.	17.2 °C	16 h	K-17.4	
8.	17.2 °C	16 h	K-17.5	
9.	17.2 °C	16 h	K- 16.4	K- 17.0

Kimmo-vasaran antamista arvoista muodostettiin taulukko sekä laskettiin arvoille mediaani, josta käy ilmi, että betonielementin lujuus on kehittynyt 16 h aikana lujuusluokkaan K-17 (MN/m²). Tämä on yrityksen pitkän kokemuksen tuoma varmuus riittävästä muotipurkulujuudesta elementeille. Muotistanostolujuus on elementtiteollisuudessa noin 50 % nimellislujuudesta eli tässä tapauksessa K-20 MN/m². Lammin Asennustaito Oy käyttää tehtaassaan elementin kääntöpöytiä, jolloin elementtiin ei kohdistu niin suurta rasitusta nostettaessa kuin raakanostossa kohdistuisi. Lujuudenkehitys jatkuu muottien purkamisen jälkeen varastossa.



Kuvio 8. Puristuslujuuden ja kimmo-vasaran näyttämien vertailu, K-40 huokostettu.

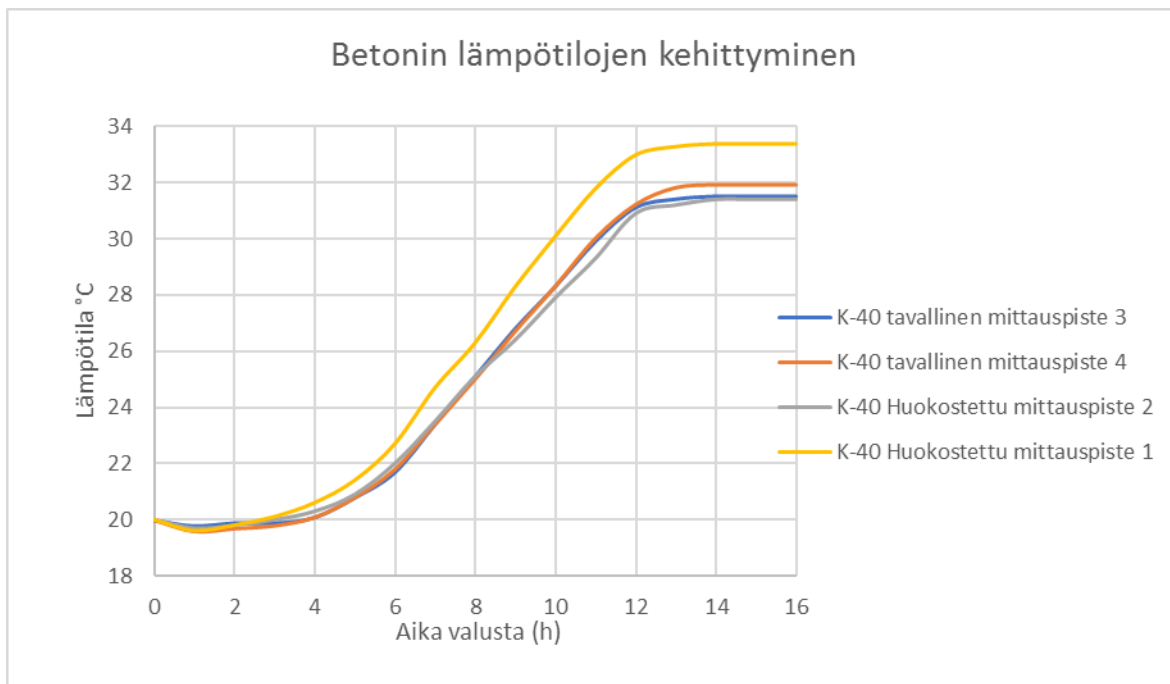
7.2 Lämpötilakehitys

Lämpötilakehityksen seurannan tulokset kirjattiin mittauspisteittäin taulukkoon. Mittauspisteistä saatujen lämpötilojen perusteella laskettiin betonille kypsyyssikä ja määriteltiin betonin lujuus.

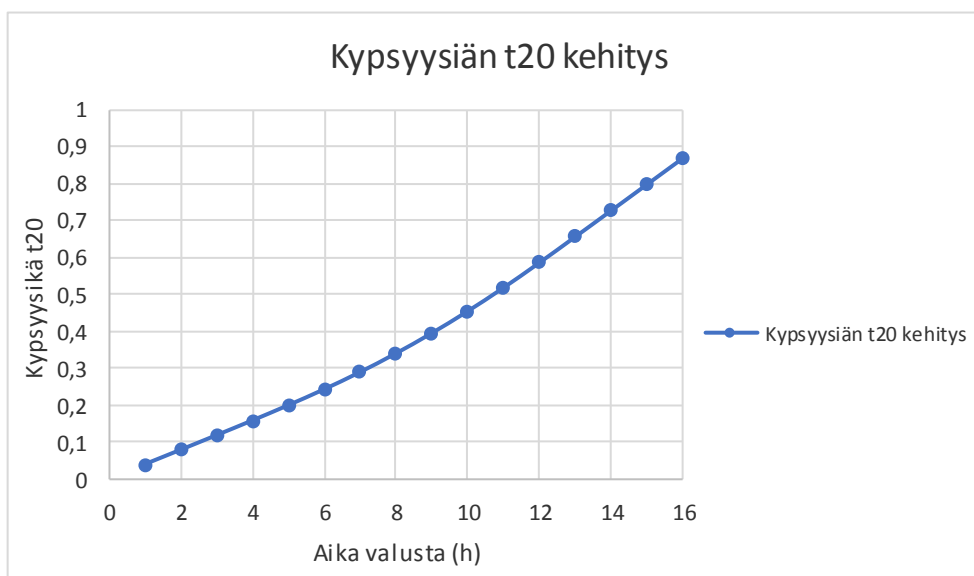
Taulukko 7. Lämpötilat mittauspisteissä.

Aika	K-40 Huokostettu	K-40 Huokostettu	K-40 Tavallinen	K-40 Tavallinen
valusta (h)	1. Mittauspiste	2. Mittauspiste	3. Mittauspiste	4. Mittauspiste
0h	20°C	20°C	20°C	20°C
1h	19,6°C	19,7°C	19,8°C	19,6°C
2h	19,8°C	19,8°C	19,9°C	19,7°C
3h	20,1°C	20°C	19,9°C	19,8°C
4h	20,6°C	20,3°C	20,1°C	20,1°C
5h	21,4°C	20,9°C	20,8°C	20,8°C
6h	22,7°C	22°C	21,7°C	21,8°C
7h	24,7°C	23,5°C	23,4°C	23,4°C
8h	26,3°C	25,1°C	25,1°C	25°C
9h	28,3°C	26,4°C	26,8°C	26,7°C
10h	30,1°C	27,9°C	28,3°C	28,3°C
11h	31,8°C	29,3°C	29,9°C	30,0°C
12h	33,0°C	30,9°C	31,1°C	31,2°C
13h	33,3°C	31,2°C	31,4°C	31,8°C
14h	33,4°C	31,4°C	31,5°C	31,9°C
15h	33,4°C	31,4°C	31,5°C	31,9°C
16h	33,4°C	31,4°C	31,5°C	31,9°C

Mittaustulosten perusteella muodostettiin kuvaaja (kuvio 9), jonka avulla nähdään, että K-40 lujuusluokan tavallisen sekä K-40 lujuusluokan huokostetun betonin lämpötilan kehitys ei juuri eroa toisistaan. Kypsyysikälaskelmien tuloksien perusteella laskettiin kaikkien neljän mittauspisteen kypsyysiän kehityksestä keskiarvo ja muodostettiin kuvaaja kypsyysiän kehittymisestä (kuvio 10), josta käy ilmi, että lämpötilojen vakiintuessa paikoilleen jatkuu lujuudenkehitys edelleen samansuuntaisena.



Kuvio 9. Betonin lämpötilojen kehittyminen.



Kuvio 10. Kypsyysiän t₂₀ kehitys.

7.3 Erojen analysointi

Testien jälkeen tuloksia tarkastellessa selvisi, että eroja laskennallisiin arvoihin on jonkin verran. Eroja varhaislujuuden kehityksessä on varsinkin koekappaleiden

sekä elementin välillä. Nämä erot johtuvat suurella todennäköisyydellä betonin massasta. Betonin lämpötilan kehitykseen vaikuttaa voimakkaasti rakenteen massa, mitä suurempi massa betonia on, sitä enemmän lämpötila nousee, sillä sementin ja veden reaktio on tällöin voimakkaampi, jolloin lämpötila nousee korkeammaksi ja lujuudenkehitys nopeutuu.

Laskennassa K-40 lujuusluokan tavalliselle betonille saatiin varhaislujuuden kehitysasteeksi 16,2 MN/m². Elementin todellinen varhaislujuuden kehitysaste oli kimmovasaralla saatujen arvojen mediaanina 15,0 MN/m² ja koekappaleille tehtyjen puristuskokeiden tuloksien keskiarvona 11,2 MN/m².

Laskennassa K-40 lujuusluokan huokostetulle betonille saatiin varhaislujuuden kehitysasteeksi 16,6 MN/m². Elementin todellinen varhaislujuuden kehitysaste oli kimmovasaralla saatujen arvojen mediaanina 17,0 MN/m² ja koekappaleille tehtyjen puristuskokeiden tuloksien keskiarvona 13,0 MN/m².

Laskennalliset erot todellisiin mittaustuloksiin johtuvat siitä, ettei Sadgroven kypsyyssastelaskelma ota huomioon lisäaineiden vaikutusta sekä suhteellisen lujuuden määrittämisessä käytettyjen käyrästöjen epätarkkuudesta. Yksi suuri tekijä eroihin oli myös betonin eri lämpötila valettaessa mittauksissa käytettyjä elementtejä.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että Lammin Asennustaito Oy:n käyttämät K- 40 lujuusluokan betonit saavuttavat riittävän lyhytaikaisen lujuudenkehitysasteen sekä muotistanostolujuuden 16 h kovettumisen aikana.

LÄHTEET

Betoni. Ei päiväystä. Betonin valmistus. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.12.2016]. Saatavana:<http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>

Betoni.com. Ei päiväystä. Betoni rakennusmateriaalina. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.12.2016]. Saatavana: <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>

Betoni.com. Ei päivitystä. Betonin lujuus. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.1.2017]. Saatavana: <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/>

Betoni.com. Ei päiväystä. Lisäaineet. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.1.2017]. Saatavana: <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/lisaaineet/>

By 201. 2004. Betonitekniikan oppikirja. 6. p. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.
By 65. 2016. Betoninormit. 1. p. Vaasa: Suomen Betoniyhdistys ry.

Finnsementti.fi. Ei päiväystä. Betonin lujuus riippuu vesi- sementtisuhteesta. [Verkkosivu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavana: <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaille/betonin-lujuus-riippuu-vesi-sementtisuhteesta>

Finnsementti.fi. Ei päiväystä. Betonin kovettuminen eli lujuudenkehitys. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.1.2017]. Saatavana: <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaille/betonin-kovettuminen-eli-lujuudenkehitys>

Finnsementti.fi. Ei päiväystä. Betonin lujuus. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.1.2017]. Saatavana: <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaille/betonin-lujuus>

Finnsementti.fi. Ei päiväystä. Betonin rasitusluokat lyhyesti. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.2.2017]. Saatavana: <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-suunnittelijalle/betonin-rasitusluokat-lyhyesti>

Rakentaja.fi. 13.3.2012. Mitä betoni on. [Verkkolehtiartikkeli]. [Viitattu 15.12.2016]. Saatavana: https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita_beton_i_on.htm%2015.12.2016

SFS 156. 2002. SFS- käsikirja 1. p. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto ry.

Semtu.fi. Ei päiväystä. Lentan-77. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.1.2017]. Saatavana: <https://www.semtu.fi/files/4814/5018/4460/Lentan-77-esite.pdf>

Semtu.fi. Ei päiväystä. Kiihdyttimet. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.1.2017]. Saatavana: <https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/kiihdyttimet/>

Semtu.fi. Ei päiväystä. Daraset-300. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 21.1.2017]. Saatavana: <https://www.semtu.fi/files/1514/0723/9831/Daraset-300-esite.pdf>

Tepponen, P. Semtu.fi. 6.2014. Betonin huokostus. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 1.3.2017]. Saatavana: <https://www.semtu.fi/files/1514/0420/1037/Huokostimet-info-2014.pdf>

LIITTEET

Liite 1. K-40 Huokostetun betonin resepti. (Yrityksen liikesalaisuus).

Liite 2. K-40 Betonin resepti. (Yrityksen liikesalaisuus).

