

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikan koulutusohjelma / Korjausrakentaminen ja rakennusrestaurointi

Teemu Kirjonen

VESI-SEMENTTISUHTEEN JA SEMENTTIMÄÄRÄN VAIKUTUS BETONIN
LUJUUTEEN KAHDELLA ERI SEMENTILLÄ

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikan koulutusohjelma

KIRJONEN TEEMU	Vesi-sementtisuhteen ja sementtimäärän vaikutus betonin lujuuteen kahdella eri sementillä
Insinööri	40 sivua + 1 liitesivu
Työn ohjaajat	lehtori Sirpa Laakso laboratorioinsinööri Anna Eskola
Toimeksiantaja	Finnsementti Oy
Toukokuu 2011	
Avainsanat	vesi-sementtisuhte, sementtimäärä, betonin lujuus

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia vesi-sementtisuhteen ja sementtimäärän vaikutusta betonin lujuuteen kahdella eri sementtilaadulla.

Tutkimuksessa valmistetaan yhteensä 120 betonikoekappaletta 20 erilaisella betonireseptillä, joiden vesi-sementtisuhteet, sementtimäärät sekä sementtilaadut vaihtelevat. Koekappaleiden puristuslujuudet mitataan 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä betonipuristimella. Työssä käytettävät sementtilaadut ovat Finnsementti Oy:n Plussementti sekä Pikasementti.

Puristuslujuuksien avulla pyritään arvioimaan vesi-sementtisuhteen, sementtimäärän sekä sementtilaadun vaikutuksia betonin lujuuteen.

Työn tuloksena voidaan sanoa, että vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin lujuuteen on kiistaton. Vesi-sementtisuhteen pieneneminen kasvattaa betonin lujuutta sementtilaadusta tai sementtimäärästä riippumatta. Sementtimäärän ja sitä kautta sementtipastamäärän kasvaminen puolestaan pienentää betonin lujuutta. Pikasementillä tehtyjen betoneiden lujuus verrattuna Plussementillä tehtyjen betoneiden lujuuteen kasvoi riippumatta vesi-sementtisuhteesta tai sementtimäärästä.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kymenlaakso University of Applied Sciences

Construction Engineering

KIRJONEN TEEMU

The Effect of Water-Cement ratio and Amount of Cement on Concrete Strength with Two Different Cements

Bachelor's Thesis

40 pages + 1 appendix

Supervisors

Sirpa Laakso, Senior Lecturer

Anna Eskola, Laboratory Engineer

Commissioned by

Finnsementti Oy

May 2011

Keywords

concrete strength, water-cement ratio, amount of cement

This thesis studies the effect of water-cement ratio and amount of cement on concrete strength with two different cements.

In this study total of 120 concrete cubes will be made from 20 different concrete recipes. The rate of water-cement ratio, amount of cement and the brand of cement changes in all recipes. Compressive strength of the cubes are tested after 1, 7 and 28 days from making the cubes. The cements that are used in this study are ordinary Portland cement and rapid-hardening Portland cement.

Thought the results from the compressive strength testes, the effect of water-cement ratio and amount of cement on concrete strength was evaluated.

As a result of this study it can be said that water-cement ratio is the most important factor to affect concrete strength. The decreasing of water-cement ratio increases the strength of concrete in all amounts of cements. The decreasing of cement and therefore the amount of cement paste causes increasing in concrete strength. The development of strength is also highly dependent of the brand of cement.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1. JOHDANTO	5
2. BETONIN LUJUUS	6
2.1 VESI-SEMENTTISUHTEEN VAIKUTUS BETONIN LUJUUTEEN	6
2.1.1 Sementtikivi	7
2.1.2 Huokosrakenteen vaikutus betonin lujuuteen	8
2.1.3 Vesi-sementtisuhteen vaikutus sementtipartikkeleiden liitoksiin	14
2.2 KIVIAINES-SEMENTTISUHTEEN VAIKUTUS BETONIN LUJUUTEEN	14
2.2.1 Sementtipastamäärän vaikutus betonin lujuuteen	16
2.3 SEMENTTILAADUN VAIKUTUS BETONIN LUJUUTEEN	17
2.3.1 Sementin hienouden vaikutus	18
2.3.2 Sementin kemiallisen koostumuksen vaikutus	19
2.4 BETONIMASSA	20
2.4.1 Betonimassan sitoutuminen	21
3. LABORATORIOTUTKIMUKSET	22
3.1 TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT	22
3.2 KÄYTETTÄVÄT OSA-AINEET	23
3.2.1 Kiviaineet	23
3.2.2 Sementit	24
3.2.3 Notkistin	25
3.3 BETONIMASSOJEN SUHTEITUS	25
3.3.1 Suhteituksen periaatteet	25
3.3.2 Suhteituksen perusyhtälö	26
3.3.3 Opinnäytetyön betoneiden reseptit	27
3.4 BETONIMASSOJEN VALMISTUS	27
3.5 TUOREEN BETONIN TESTAUS	28
3.6 KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS	29
3.7 KOEKAPPALEIDEN PURISTUSLUJUUDEN MITTAAMINEN	29
4. TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	30
4.1 PURISTUSLUJUUDET	30
4.2 PURISTUSLUJUUKSIEN SUHDE VESI-SEMENTTISUHTEESEEN	32
4.3 PURISTUSLUJUUKSIEN SUHDE SEMENTTIMÄÄRÄN JA SEMENTTILAATUUN	35
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	38
LÄHTEET	40
LIITTEET	

Liite 1. Opinnäytetyössä käytettävät betonireseptit

1. JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä on tutkittu vesi-sementtisuhteen ja sementtimäärän vaikutusta betonin lujuuteen kahdella eri sementillä. Opinnäytetyön tilaajana on Finnsementti Oy, joka on suomalainen, sementtiä valmistava yritys. Tutkimukset on suoritettu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa.

Vesi-sementtisuhteen ja sementtimäärän vaikutusta betonin lujuuteen on tutkittu valmistamalla Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion betonimyllyllä 20 eri betonilaadulla 120 koekappaleita. Koekappalebetoneissa on käytetty samoja kiviaineksia ja samaa kiviaineskäyrää, mutta koekappaleiden sementtimäärät, sementtilaatu sekä vesi-sementtisuhteet vaihtelevat. Tämän jälkeen vesi-sementtisuhteen ja sementtimäärän vaikutusta on tutkittu mittaamalla valmistettujen koekappaleiden puristuslujuuksia Kymenlaakson ammattikorkeakoulun betonipuristimella. Betonin puristuslujuuksia on mitattu 1, 7 sekä 28 vuorokauden ikäisistä koekappaleista. Finnsementti Oy on toimittanut koekappaleiden valmistamiseen tarvittavat kiviainekset, sementit sekä mahdolliset lisäaineet. Koekappaleiden valmistamiseen tarvittavat välineet kuten tasosekoitin, koekappalemuotit ja tärytin ovat Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriosta.

Työn alkuosassa käsitellään teoriaa vesi-sementtisuhteesta sekä sen ja sementtimäärän vaikutusta betonin lujuuteen. Teoriaosuudessa käsitellään myös eri sementtien vaikutusta betonin lujuuteen. Materiaaleina on käytetty alan kirjallisuutta sekä artikkeleita. Tämän jälkeen käydään läpi käytännön tutkimukset, kuten opinnäytetyöbetonien suhteitus, koekappaleiden teko, puristuslujuuden mittaaminen sekä tulokset ja niiden analysointi ja niistä tehtävät johtopäätökset.

2. BETONIN LUJUUS

Betonin tärkein ominaisuus on sen puristuslujuus. Betonin puristuslujuus on hyvä. Sen sijaan betonin vetolujuus on vain n.1/10 puristuslujuudesta. Tämän takia betonirakenteen vetolujuutta parannetaan sijoittamalla rakenteen sisään raudoitustankoja. Raudoitustangot sijoitetaan siten, että ne sijaitsevat poikkileikkauksen vedetyissä osissa. Betonin ja tankojen välinen tartunta huolehtii sitten vetojännitysten siirtymisestä betonista tangoille. Näin toimii esimerkiksi teräsbetonipalkki. (1.)

Puristuslujuus on siitä hyvä betonin ominaisuuksien tulkitsija, että se on helppo testata ja useat betonin ominaisuudet riippuvat siitä. Esimerkiksi vetolujuus, taivutusvetolujuus sekä kimmokerroin ovat verrannollisia siihen. Betonin lujuus vaikuttaa myös betonirakenteiden säilyvyysominaisuuksiin. (1.)

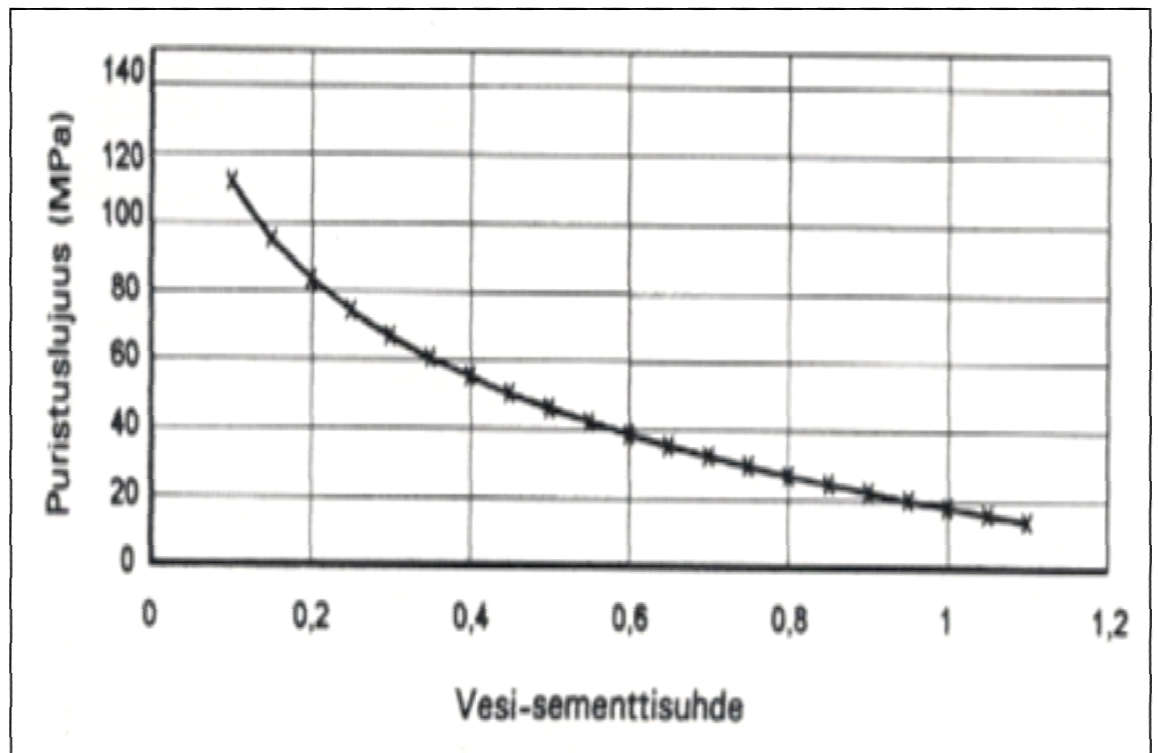
2.1 Vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin lujuuteen

Vesi-sementtisuhteella tarkoitetaan betonissa olevan tehollisen vesimäärän ja betonissa olevan sementin välistä suhdetta. Tehollinen vesimäärä tarkoittaa, että kokonaisvesimäärästä eli lisätyn veden sekä mahdollisen lisäaineen mukana tulleen veden määrästä vähennetään kiviaineeseen imeytyneen tai betonin valmistuksen yhteydessä imeytyvän veden määrä. (2.) Vesisementtisuhteella voidaan tarkoittaa myös kokonaisvesimäärän eli lisätyn veden, kiviaineen ja lisäaineen mukana tulleen veden suhdetta sementtimäärään.

Vesi-sementtisuhte vaikuttaa betonin lujuuteen siten, että mitä suurempi vesi-sementtisuhte on, sitä huonompi on betonin lujuus. Vesi-(ilma)-sementtisuhteen ja betonin lujuuden välisen riippuvuuden tärkein edellytys on, että betoni on riittävästi tiivistetty. Jos vesimäärä on liian pieni ja betonimassa on täten liian jäykkää, eikä betonia pystytä käytettävien keinoin riittävästi tiivistämään, tämä johtaa betonin lujuuden heikkenemiseen. (3.)

Vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin lujuuteen johtuu betonin sementtikiven huokosrakenteesta, jossa vesi-sementtisuhteen kasvaessa haitallisten kapillaarihuokosten määrä kasvaa. Nämä kapillaarihuokokset sisältävät pelkkää ilmaa, jonka takia ne heikentävät betonin lujuutta. (1.)

Kuvassa 1 esitetään betonin puristuslujuus vesi-sementtisuhteen eri arvoilla.



Kuva 1. Betonin puristuslujuudet vesi-sementtisuhteen eri arvoilla (1.)

2.1.1 Sementtikivi

Hydratoituneen sementtigeelin rakenne on suoraan verrannollinen betonirakenteen lujuuteen (4). Huonolaatuisesta sementtikivestä ei voida tehdä hyvää betonia.

Sementtikivellä tarkoitetaan sementin ja veden muodostaman sementtiliiman (sementtipastan) kovettumistulosta. Sementtikiven tehtävä on liimata toisiinsa betonin kiivainekset muodostaen lujan kokonaisuuden. Sementtikivi myös ankkuroi tartunnallaan teräsbetonirakenteissa käytettävän teräksen betoniin siten, että teräksen ja betonin yhteisvaikutus tulee mahdolliseksi. (1.)

Geelikiteiden määrä kasvaa ajan kuluessa, jolloin ne myös kasvavat pituutta ja kiteistä muodostuu yhä tiiviimpi rakenne, jota kutsutaan sementtigeliksi. Geelikiteiden väliin jää myös vesitäytteistä tilaa, jota kutsutaan geelihuokosiksi. Vesi-sementtisuhteen mukaan sementtikivessä on myös jonkin verran kapillaarihuokosia. (1.)

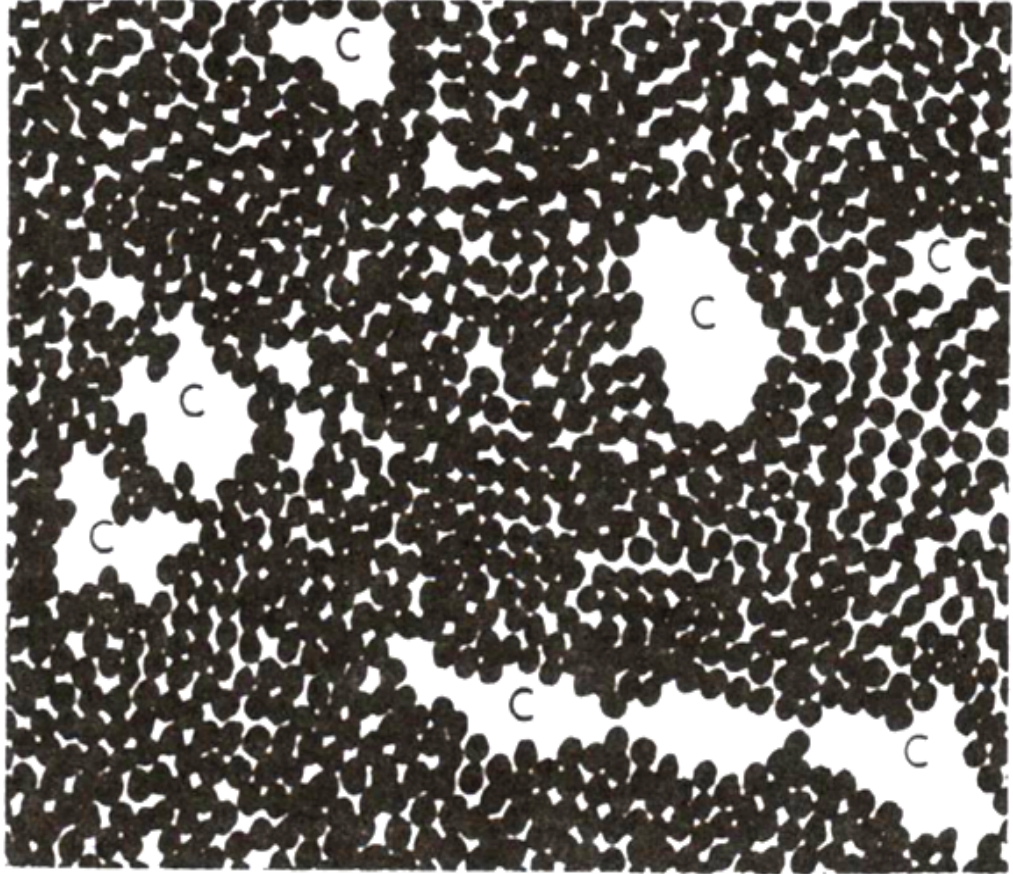
Sementtipartikkeleiden sisään jää yleensä hydratoitumatonta sementtiä. Tämä hydratoitumaton sementti selittää sen, että hyvinkin vanha betoni, joka halkaistaan, voi kovettua uudelleen ja saavuttaa lähes alkuperäisen lujuuden. Erityisesti uudelleenkovettumista voi tapahtua, jos betonin vesi-sementtisuhte on alle 0,4, sillä tällöin betonissa ei ole riittävästi vettä koko hydrataatioreaktiota varten. Teoriassa täydelliseen hydratoitumiseen riittää 0,25:n suuruinen vesi-sementtisuhte, mutta koska geelihuokosiin sitoutuu n.15 % sementin painosta vettä, vaaditaan täydelliseen hydratoitumiseen 40–45 % sementin painon verran vettä. (1.)

Sementtikiven lujuus perustuu kahteen erilaiseen liitostyyppiin. Ensimmäinen on niin sanottua fyysistä liitosta geelihuokosten erottamien aineiden kesken. Toinen liitostyyppi on niin sanottua kemiallista liitosta geelikiteiden välillä. Kemialliset liitokset ovat voimakkaampia kuin fyysiset liitokset, mutta ne kattavat vain pienen osan liitoksista. Kemiallisten ja fyysisten liitoksien vaikutuksia ei ole tarpeeksi testattu, mutta voidaan sanoa, että ne molemmat näyttelevät suurta osaa sementtikiven lujuuden muodostumisessa. (4.)

2.1.2 Huokosrakenteen vaikutus betonin lujuuteen

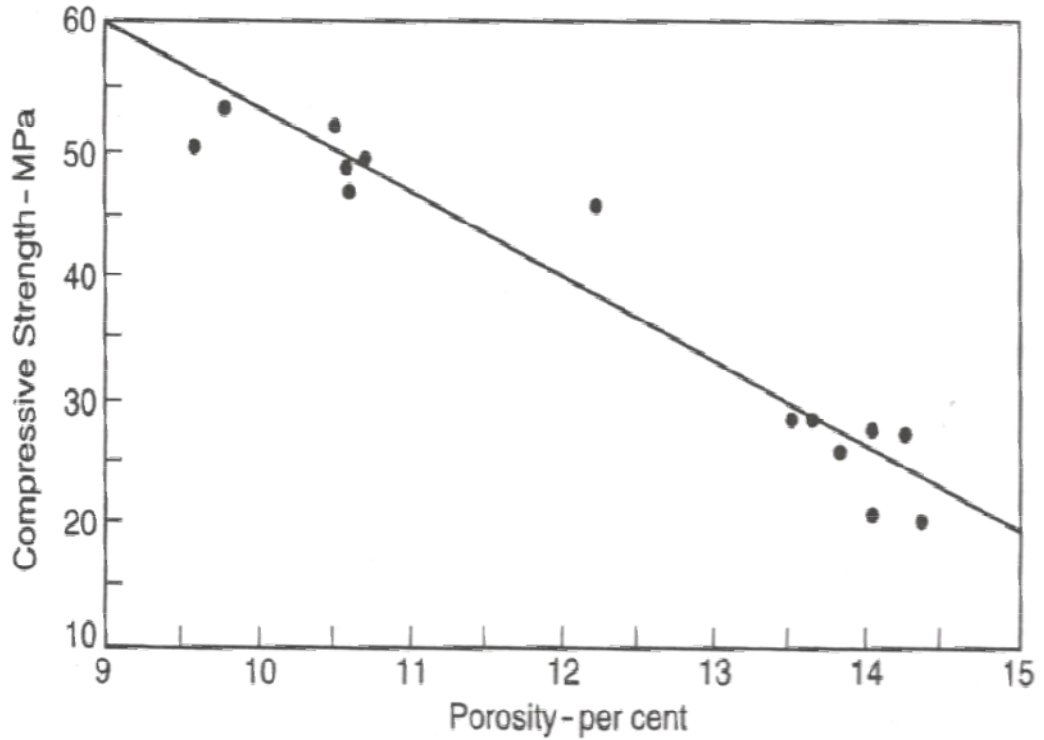
Sementtikivessä on useanlaisia huokosia: geelihuokosia, kapillaarihuokosia sekä huonosti tiivistettyyn betoniin voi jäädä vielä lisäksi tiivistyshuokosia (1). Kuva 2 esittää betonin huokosrakennetta. Kuvassa mustat alueet kuvaavat geelikiteitä, pienemmät

valkoiset alueet kuvaavat geelihuokosia ja suuremmat valkoiset alueet, joissa on kirjain C, kuvaavat kapillaarihuokosia.



Kuva 2. Sementtikiven huokosrakenne (4.)

Huokoisuuden määrä vaikuttaa suuresti betonin lujuuteen, toisaalta kaikenlaiset huokokset eivät ole betonin lujuudelle haitallisia. Esimerkiksi alle 20 nm:n kokoisten huokosten vaikutus betoniin lujuuteen on katsottu olevan merkityksetön. (4.) Käytännössä kapillaarihuokokset, huonosta tiivistyksestä johtuvat tiivistyshuokokset sekä pakkasenkestävyyttä edistävät suojahuokokset voivat olla yli 20 nm:n kokoisia. Kuvassa 3 kuvataan yli 20 nm:n kokoisten huokosten vaikutusta betonin lujuuteen

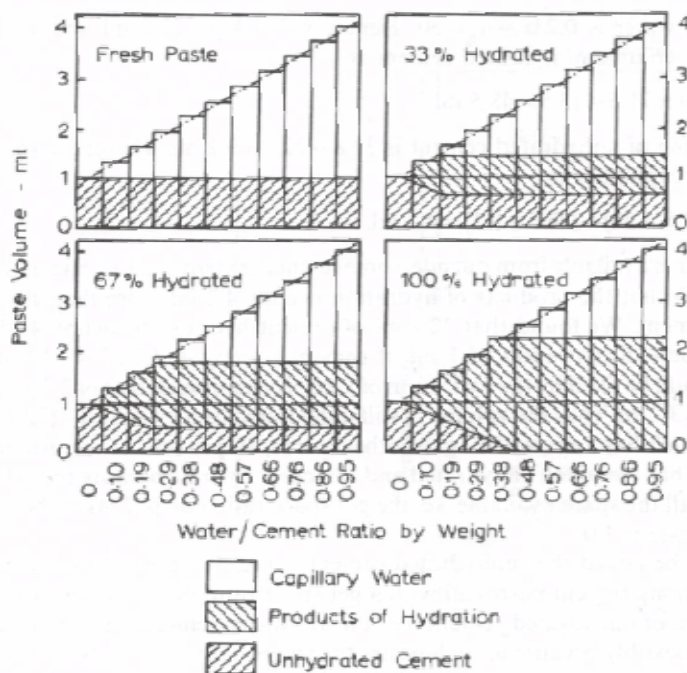


Kuva 3. Huokoisuuden vaikutus betonin lujuteen (4.)

2.1.2.1 Kapillaarihuokokset

Kapillaarihuokoisuus on merkittävin betonin mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä (5). Betonin hyvä työstettävyys vaatii yleensä vesi-sementtisuhteen, joka on suurempi kuin 0,4. Tällöin ketjuuntuneiden sementtipartikkeleiden väliin jää suurempia vesitäytteisiä tiloja, joita geelikiteet eivät voi täyttää. Näitä tiloja kutsutaan kapillaarihuokosiksi. Kapillaarihuokosten määrä riippuu suuresti vesi-sementtisuhteesta. Kapillaarihuokosten määrä vähenee myös sementin hydraatioasteen kasvaessa. Kuva 4 esittää betonimassan rakennetta hydraatioasteen mukaan. Kuvassa valkoiset alueet kuvaavat kapillaarihuokosten täyttämää tilaa. (4.)

30 Portland cement



Kuva 4. Sementtigelin rakenne eri hydraatioasteiden aikana (4.)

Kapillaarihuokokset ovat kooltaan noin yksi mikrometriä. Mitä suurempi betonin vesi-sementtisuhte on, sitä enemmän kapillaarihuokosia betonissa on. Jos vesi-sementtisuhte on alle 0,4, ei täysin hydratoituneessa betonissa ole lainkaan kapillaarihuokosia. Jos taas vesi-sementtisuhte on alle 0,6, ei täysin hydratoituneen betonin kapillaarihuokosverkosto ole jatkuva, joten veden kapillaarinen liike ei ole mahdollinen. (1.)

Kapillaarihuokosten muodostama yhtäläinen verkosto on vaarallinen, sillä tällöin betoniin pääsee imeytymään vettä. Kapillaarihuokosverkon muodostuminen vähentyy betonin iän ja sitä kautta hydratoitumisasteen myötä. Kapillaariverkoston muodostaminen voidaan estää riittävän pienellä vesi-sementtisuhteella sekä riittävällä sitoutumisajalla. (4.)

Kuva 5 esittää ikää, jota vaaditaan, että kapillaariverkosto ei ole enää yhtenäinen.

<i>Water/cement ratio by weight</i>	<i>Time required</i>
0.40	3 days
0.45	7 days
0.50	14 days
0.60	6 months
0.70	1 year
over 0.70	impossible

Kuva 5. Kapillaariverkoston segmentoituminen (4.)

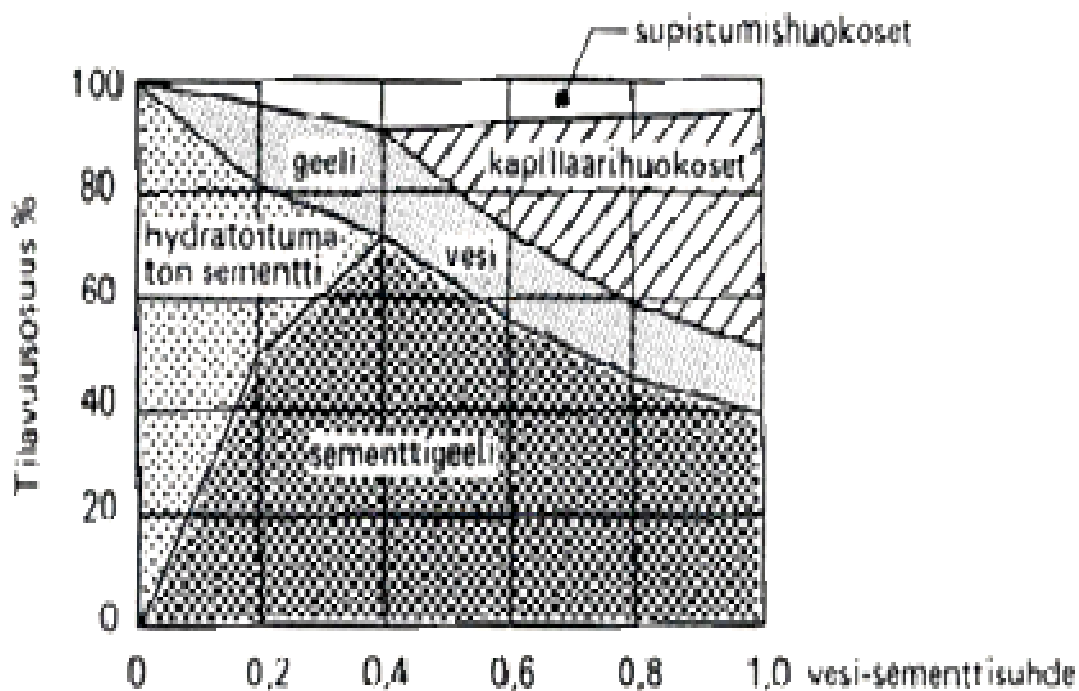
2.1.2.2 Geelihuokokset

Geelihuokokset ovat geelipartikkeleiden välissä olevia tiloja. Geelihuokokset ovat pieniä, kooltaan noin 2–3 nm (4). Ne ovat niin pieniä, että niissä oleva vesi ei meidän talviolosuhteissamme yleensä jäädy. Geelihuokosten kokoa kuvaa hyvin se, että ne ovat vain hieman suurempia kuin vesimolekyylit. Geelihuokokset ovat yleensä veden täyttämiä. Geelihuokosia on noin 25–30 % sementtigelin kokonaistilavuudesta. (1.) Toisin kuin kapillaarihuokosten määrä, geelihuokosten määrä ei riipu vesisementtisuhteesta tai sementtigelin hydraatioasteesta. Geelihuokosten määrä riippuu sementtilaadusta. Sementtigelin hydraation edetessä geelihuokokset syrjäyttävät kapillaarihuokosia ja estävät kapillaarihuokosten verkostoitumista. (4.)

2.1.2.3 Tiivistyshuokokset

Tiivistyshuokosia esiintyy etenkin valun jälkeen muottia vasten olevissa pinnoissa, kun ilma ja vesi tärytyksen aikana kerääntyvät muotti- ja betonipinnan rajakohtaan. Tiivistyshuokosia voidaan vähentää täryttämällä betonimassa huolellisesti (1).

Kuvassa 6 esitetään sementtikiven eri osien tilavuusosuudet vesi-sementtisuhteen eri arvoilla.



Kuva 6. Sementtikiven tilavuusosuudet vesi-sementtisuhteen eri arvoilla (1.)

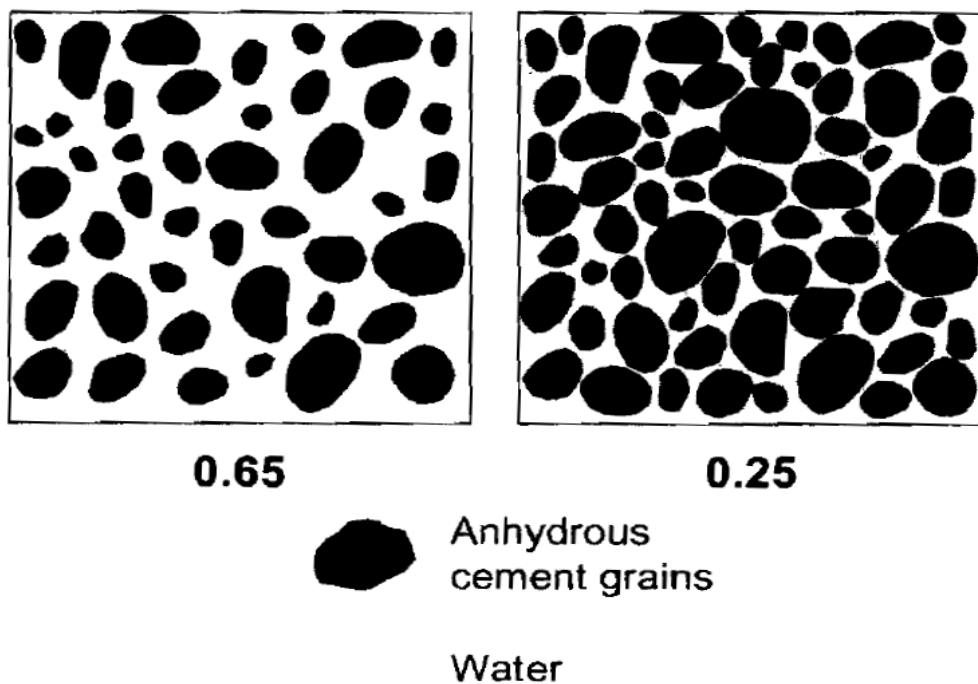
Kovettuneen betonin tärkeimmät ominaisuudet rakenteita suunniteltaessa ovat betonin lujuus ja sen säilyvyys erilaisia rasituksia vastaan. Säilyvyyden merkitys on tärkeä tekijä, sillä betonirakenteita tehdään yhä vaativampiin olosuhteisiin eikä betonikaan ole ikuinen materiaali. Meidän ulko-olosuhteitamme ajatellen ovat pakkaskestävyys ja pakkas- ja suolarasituksien kestävyys rakenteiden säilyvyyden kannalta tärkeimmät ominaisuudet. Myös kestävyys kemiallisia rasituksia vastaan on tärkeää betoneissa, joita käytetään esimerkiksi teollisuudessa. Betonin hyvät ominaisuudet voidaan menettää pienilläkin laiminlyönneillä, vaikka betoni sinänsä on varsin säilyvä materiaali verrattuna esimerkiksi puuhun. (1.)

Muita suunnittelussa huomioon otettavia betonirakenteiden tärkeitä ominaisuuksia ovat betonin muodonmuutosominaisuudet kuten viruminen, kuivumiskutistuminen ja halkeilu (1).

2.1.3 Vesi-sementtisuhteen vaikutus sementtipartikkeleiden liitoksiin

Suuremmassa vesi-sementtisuhteessa sementtipartikkeleiden välisten liitosten muodostuminen on vaikeampaa kuin pienen vesi-sementtisuhteen massassa. Tämä johtuu siitä, että suuremman vesi-sementtisuhteen sementtigelissä on ylimääräistä vettä, joka tulee sementtirakeiden väliin. Tämä kasvattaa kahden sementtirakeen välimatkaa ja pienentää lujuutta (6.)

Kuva 7 esittää kahden eri sementtisuhteen geelin rakennetta.



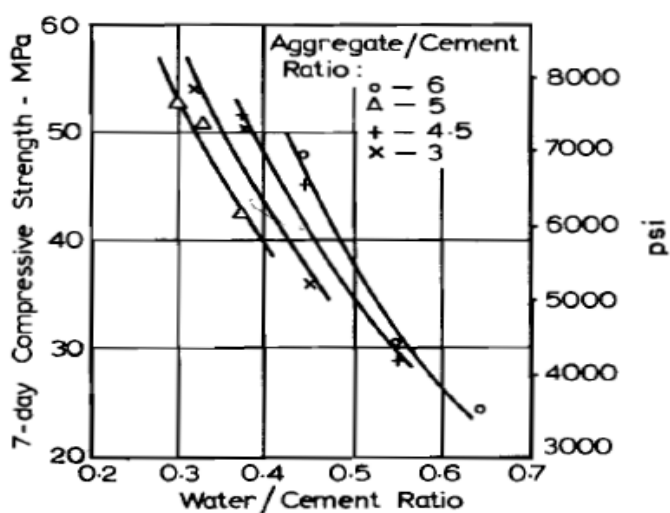
Kuva 7. Vesi-sementtisuhteen vaikutus massan rakenteeseen (6.)

2.2 Kiviaines-sementtisuhteen vaikutus betonin lujuuteen

Yleisesti uskotaan, että sementtimäärän lisääminen kasvattaa betonin lujuutta. Asia ei kuitenkaan ole niin yksinkertainen, vaan sementtimäärän lisääminen vaikuttaa vesi-

sementtisuhteeseen, joka sementtimäärän kasvaessa pienenee. Alussa onkin jo todettu, että vesi-sementtisuhteen pienentyessä betonin lujuus kasvaa.

Sementtimäärää lisättäessä tarvitsee jotakin betonin kolmesta osa-aineesta ottaa pois. Kiviaineen ja sementin suhde ei vaikuta betonin lujuuteen yhtä paljon kuin vesi-sementtisuhte, mutta on havaittu, että suuret kiviainesmäärät tuottavat samalla vesi-sementtisuhteella suuremman lujuuden. On myös havaittu, että todella suurissa kiviainesmäärissä vesi-sementtisuhteen pienentyminen todella alhaiseksi ei enää kasvata betonin lujuutta. Tämä johtuu mahdollisesti siitä, että kiviaines estää sementtigeelin luonnollisen kutistumisen tai puutteellisesta sidoksesta kiviaineen sekä sementin välillä vähäisen sementtipastamäärän takia. (4.) Kuva 8 esittää kiviaines-sementtisuhteen vaikutusta betonin lujuuteen.



Kuva 8. Kiviaines-sementtisuhteen vaikutus betonin lujuuteen (4.)

Kiviaines-sementtisuhteen vaikutus on epäselvä, mutta senkin vaikutus johtaa juurensa vesi-sementtisuhteeseen, sillä jos kiviaineeseen on imeytynyt vettä, siihen sitoutunut suurempi määrä kosteutta saa aikaiseksi suuremman vesi-sementtisuhteen, mikä heikentää betonin lujuutta. Kuiva kiviaines taas imee vettä, jolloin suuremmalla kuivalla kiviainesmäärällä vesi-sementtisuhte laskee. Kuva 9 esittää kiviainesmäärän vaikutusta betonin lujuuteen samalla vesi-sementtisuhteella. (4.)

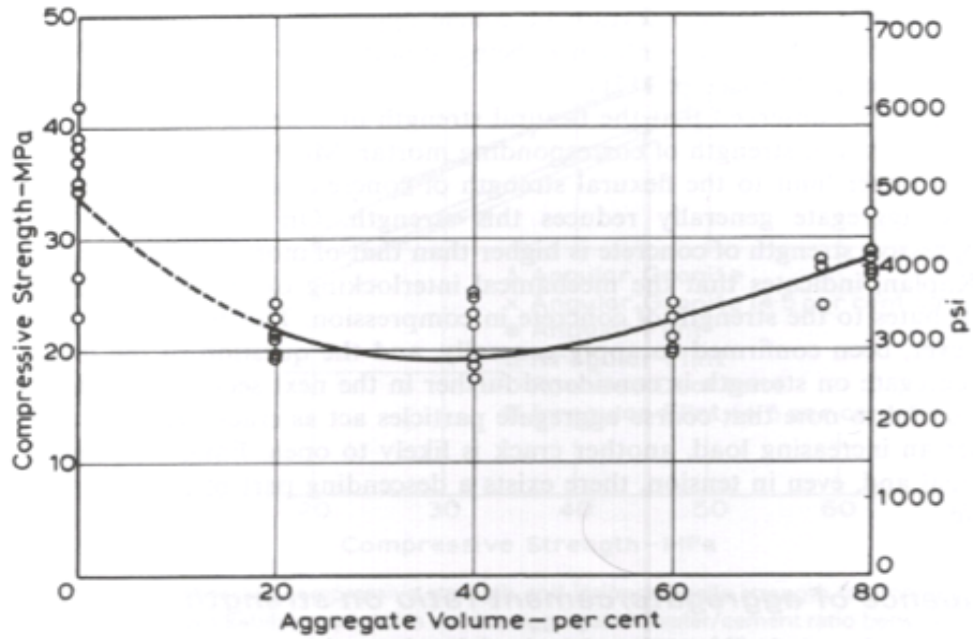


Fig. 6.21 Relation^{6.40} between the compressive strength of cylinders (100 mm diameter, 300 mm in length) and volume of aggregate at a constant water/cement ratio of 0.50

Kuva 9. Kiviainesmäärän vaikutus betonin puristuslujuuteen (4.)

2.2.1 Sementtipastamäärän vaikutus betonin lujuteen

Sementtipastamäärän väheneminen lisää vesi-sementtisuhteesta riippumatta betonin lujutta. Pienimmillä vesi-sementtimäärillä tämä vaikutus korostuu entisestään. (7.) Kuva 10 esittää pastamäärän vaikutusta betonin lujuteen eri vesi-sementtisuhteilla eri ajankohtina.

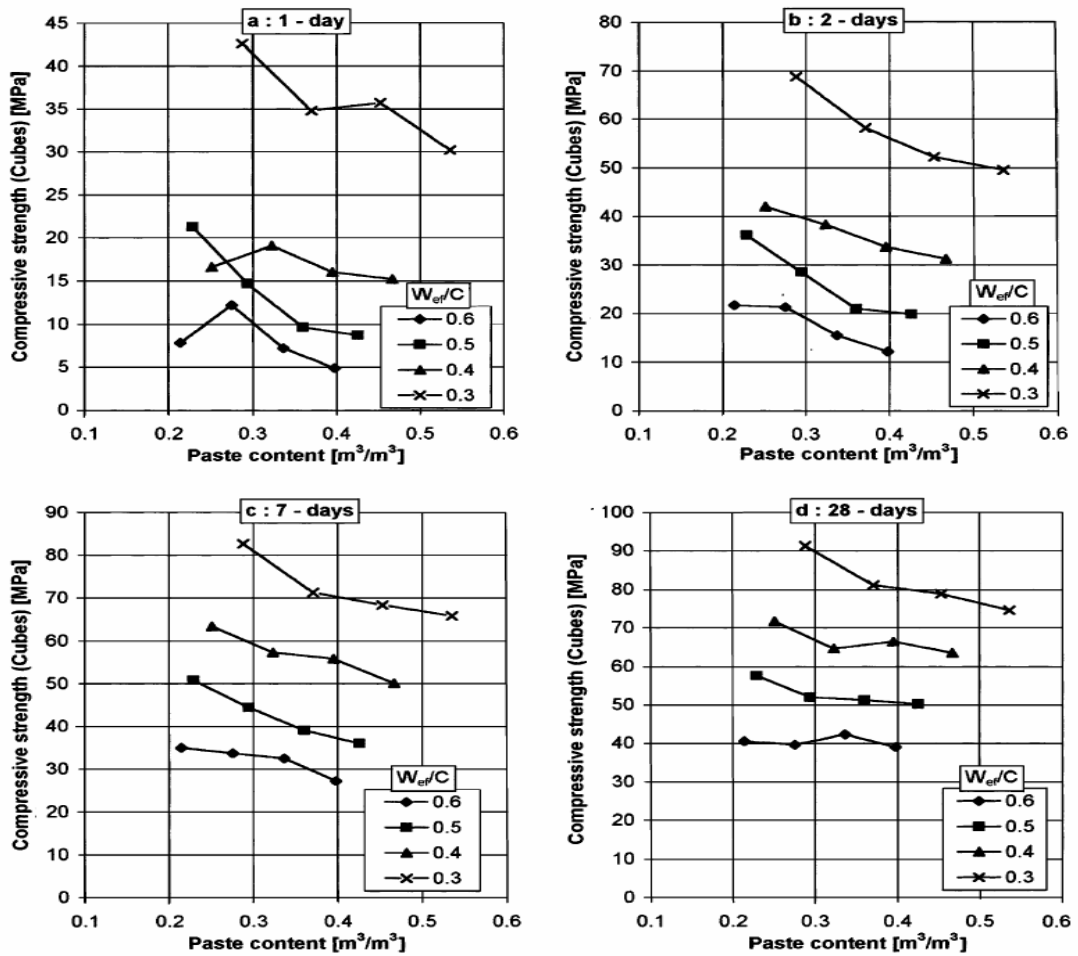
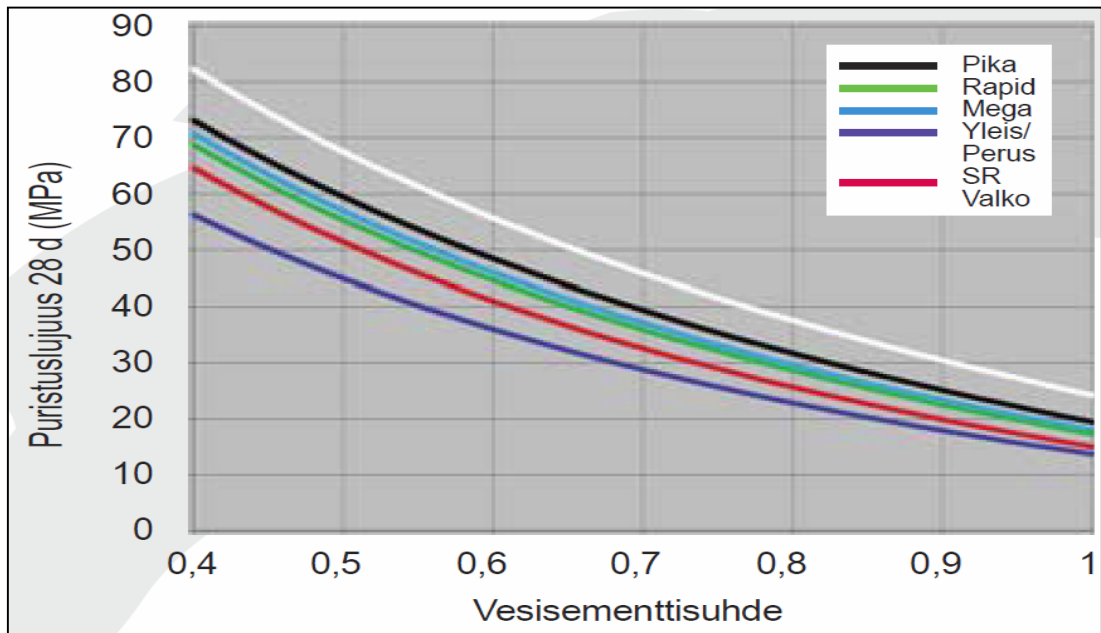


Fig. 3. Relationship between compressive strength (cubes) and paste content by volume.

kuva 10. Betonin puristuslujuuden suhde sementtipastan määrään (7.)

2.3 Sementtilaadun vaikutus betonin lujuteen

Eri sementtilaatujen vaikutukset betonin kovettumiseen johtuvat sementtilaatujen hienoueroista sekä sementtilaatujen kemiallisten koostumusten eroista. Sementin lujouden vaihtelut näkyvät selvimmin varhaislujuuksissa. Pitkäaikaiset lujouden kehityksen vaihtelut sementtien välillä ovat huomattavasti pienempiä. (3.) Kuvassa 11 esitetään opinnäytetyössä käytettävien Finnsementti Oy:n eri sementtilaatujen lujuseroja. Kuvassa oleva Perussementti vastaa opinnäytetyössä käytettävää Plussementtiä.

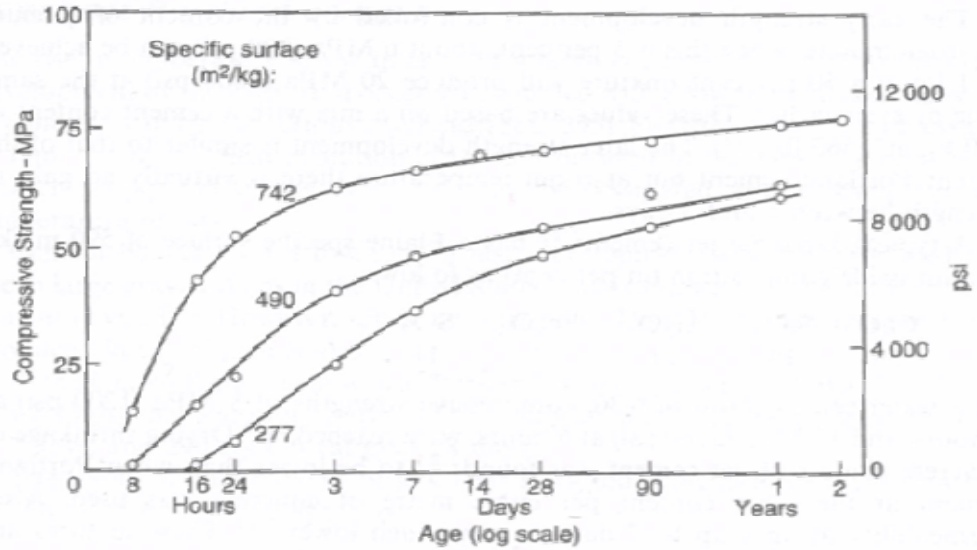


Kuva 11. Finnsementti Oy:n sementtien lujuuserot (8.)

2.3.1 Sementin hienouden vaikutus

Sementin hienouden kasvattaminen kasvattaa sementin lujuutta. Tämä johtuu siitä, että sementin hydrataatio alkaa sementtipartikkeleiden pinnalta, ja mitä suuremman alueen sementtipartikkelit peittävät, sitä enemmän sementin ominaispinta-alaa on käytettävissä hydrataatioon. Nopeaan lujuudenkehitykseen vaaditaan hienompaa sementtiä. (4.) Sementin ominaispinta-alan kasvu nopeuttaa myös betonimassan sitoutumista (3).

Sementin hienouden kasvattaminen lisää betonimassan veden tarvetta, mutta toisaalta hienompi sementti kasvattaa hieman massan työstettävyyttä (4). Kuva 12 esittää betonin lujuuden kehityksen riippuvuutta sementin hienoudesta.



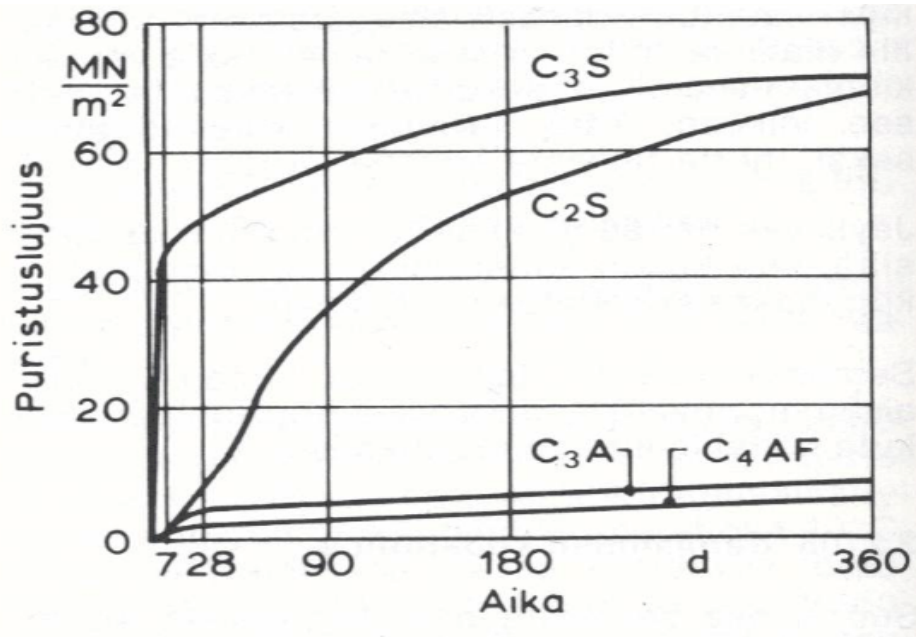
Kuva 12. Sementin hienouden vaikutus betonin lujuuden kehitykseen (4.)

2.3.2 Sementin kemiallisen koostumuksen vaikutus

Sementtien ominaisuuksia säätelee suurimmaksi osaksi muutama kemiallinen pääteki- jä. Sementin lujuusvaihtelut johtuvat suureksi osaksi klinkkerin mineraalikoostumuk- sesta, joka puolestaan johtuu klinkkerin kemiallisesta koostumuksesta. Klinkkerin pol- tolla sekä siinä käytettävillä raaka-aineilla on siksi suuri merkitys klinkkerin koostu- mukseen.(3.)

Nopeasti kovettuvissa Portlandsementeissä on suuret trikalsiumsilikaatti(C_3S)-sekä dikalsiumsilikaatti(C_2S)-pitoisuudet, kun taas alhaislämpöportlandsementeillä vastaa- vat pitoisuudet ovat pieniä.(3.)

Kuvassa 13 esitetään sementtiklinkkerin mineralogisten koostumusten puristuslujuu- den kehitys.



Kuva 13. Sementtiklinkkerimineraalien lujuuden kehitys (3.)

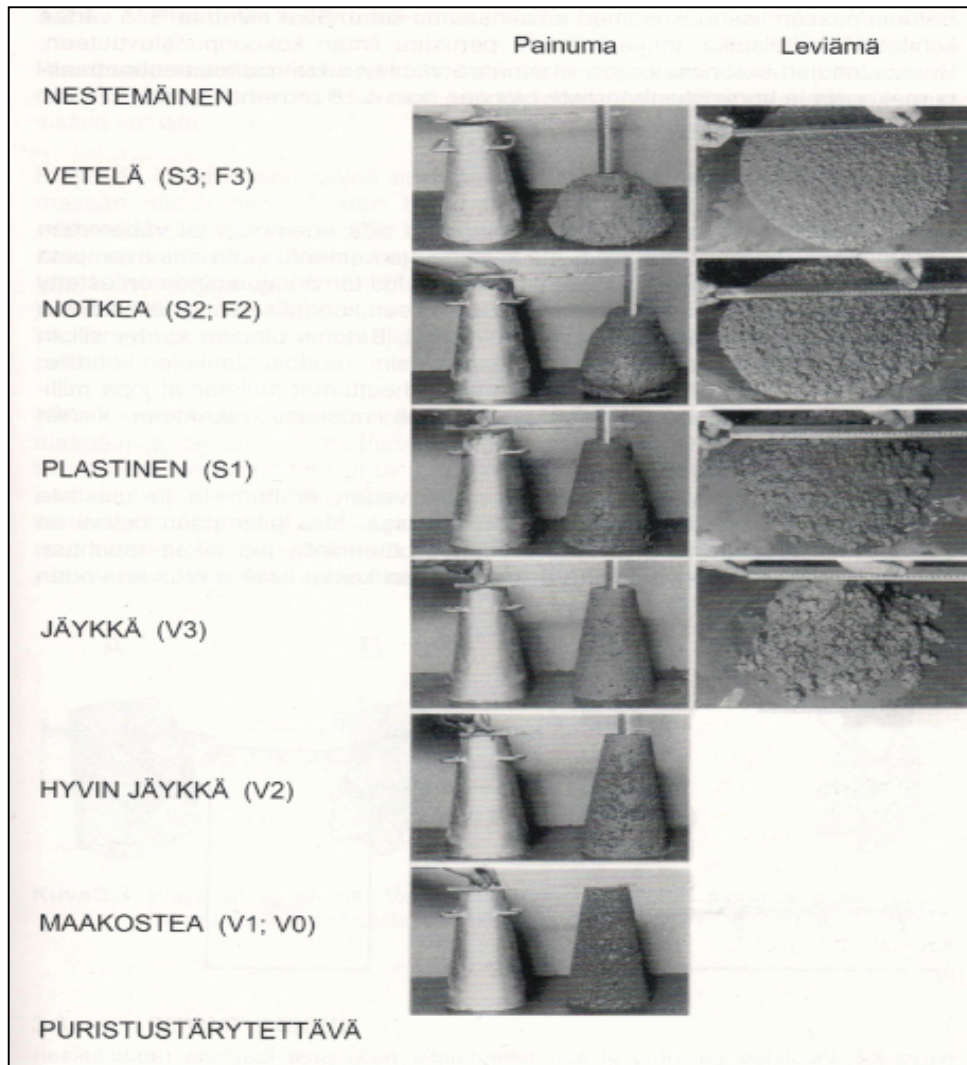
Klinkkerin koostumuksen lisäksi sementin lujuudenkehitykseen vaikuttavat sementin teossa käytettävät seosaineet sekä niiden määrät. Suomessa käytetään kalkkikiveä sekä granuloitua masuunikuonajauhetta. (8,9,10)

2.4 Betonimassa

Betonimassalla tarkoitetaan betonia, joka on vielä plastisessa tilassa aina sitoutumiseen asti, joka tapahtuu noin 2...4 tuntia sekoituksesta + 20°C lämpötilassa. Sitoutumisen jälkeen betoni alkaa kovettua. Betonimassalla tulee olla sellaiset ominaisuudet, että oikeanlaisia menetelmiä käyttäen se tiivistettynä ja tärytettynä täyttää koveutettuun asetetut vaatimukset. (1.)

Betonimassan tärkein ominaisuus on massan työstettävyys, jota yleensä mitataan massan notkeudella. Notkeus mitataan yleensä painumakokeella tai leviämällä, laboratoriossa käytetään joskus lisäksi VB-kojetta. Muualla käytetään työstettävyuden mittaamiseen myös betonimassan tiivistymiskykyä, mutta Suomessa tämä menetelmä ei ole käytössä. Massan notkeus on yleensä nestemäinen tai vetelä. Notkea betonimassa tekee betonointityöstä helpompaa, mutta tällöin plastiset ja pitkäaikaiset muodonmuutokset kasvavat. (1.)

Massaa notkistetaan yleensä lisäämällä siihen vettä, jolloin vesi-sementtisuhte kasvaa. Notkistamiseen on käytettävissä myös erilaisia notkistavia lisäaineita. Notkistavat lisäaineet toimivat sementin ja veden välillä ja parantavat betonin työstettävyyttä ja niitä käytettäessä pystytään vesi-sementtisuhte pitämään mahdollisimman alhaisena. Kuva 14 kuvaa betonin notkeusluokkia. (1.)



Kuva 14. Betonin notkeusluokat (1.)

2.4.1 Betonimassan sitoutuminen

Betonimassa pysyy aluksi notkeana, mutta jonkin ajan kuluttua sementin ja veden muodostama sementtipasta alkaa hyytelöityä ja menettää plastisuuttaan. Massa alkaa

tällöin kiinteytyä ja alkaa ns. kovettuminen. Selvää rajaa ei voida vetää sitoutumiselle ja kovettumiselle, vaan sitoutuminen on kovettumisen alkutapahtuma. (1.)

Sementin ja veden reagoitua keskenään, syntyy seos jossa sementtikiteet jonkin verran ketjuuntuvat. Kiteiden alkaessa kasvaa yhteen menettää betoni notkeuttaan, jolloin betonista tulee vaikeammin työstettävää. (1.)

Sitoutumisaikaan vaikuttaa käytettävä sementtilaatu. Massan sitoutumisaika riippuu sementin kemiallisesta koostumuksesta ja sen hienoudesta. Lämpötila vaikuttaa sitoutumisaikaan siten, että $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutos lämpötilassa puolittaa tai kaksinkertaistaa sitoutumisajan. Kylmissä olosuhteissa massan sitoutuminen voi kestää siis useita tunteja, kun taas kuumabetoni voi sitoutua alle puolessa tunnissa. (1.)

Sitoutumisvaiheessa olevaa massaa ei saa häiritä, sillä silloin muodostuneet liimasauvat (hydraatitotuotteet) rikkoutuvat ja seurauksena voi olla lujuuskato. (1.)

3. LABORATORIOTUTKIMUKSET

3.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimuksen lähtökohtana oli tutkia vesi-sementtisuhteen sekä sementtimäärän vaikutusta betonin lujuuteen kahdella eri sementtilaadulla. Tutkimuksessa käytettiin yhteensä 20 eri betonireseptiä, jonka pohjalta arvioitiin vesi-sementtisuhteen sekä sementtimäärän vaikutuksia lujuuteen. Reseptien vesi-sementtisuhteet vaihtelivat 0,4 -0,7:n välillä sekä sementtimäärinä käytettiin 300, 400 sekä 500 kg/m³.

Lähtökohtana oli, että jokaisessa massassa käytettiin samanlaisia kiviaineksia sekä kiviaineen yhdistämiskäyrää, jotta kiviaineksen vaihteluista aiheutuvat muutokset betonin lujuuksissa voitiin rajata pois.

Kuvassa 15 esitetään tilaajalta saadut reseptien lähtötiedot.

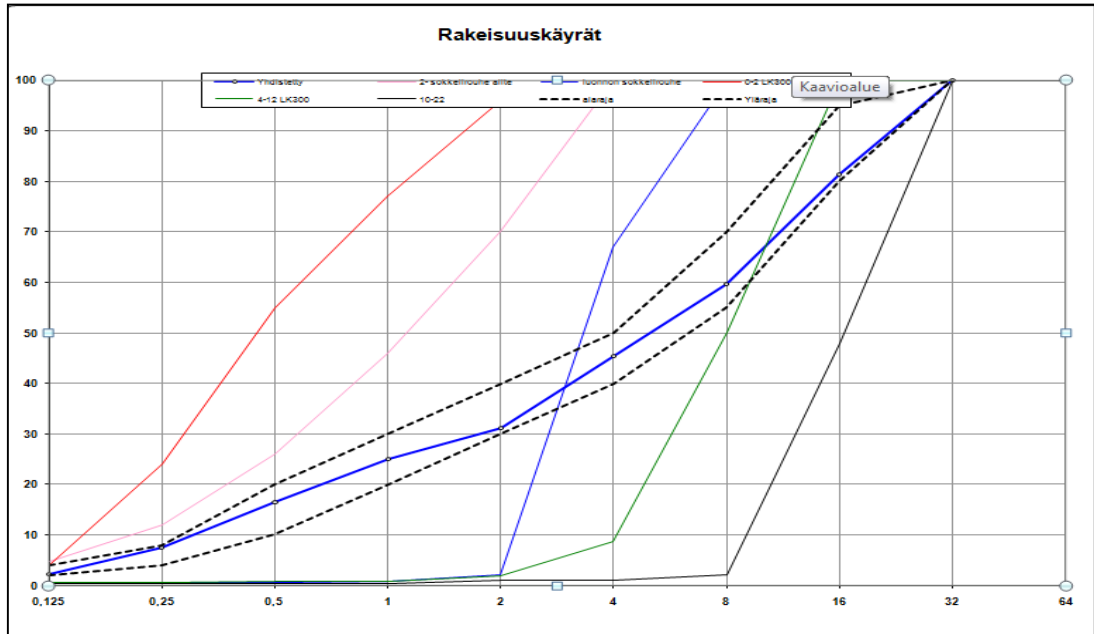
sementtimäärä v/s	Plusementti		Pikasementti		
	300 kg/m ³	400 kg/m ³	300 kg/m ³	400 kg/m ³	500 kg/m ³
0,7	1	5	9	13	17
0,6	2	6	10	14	18
0,5	3	7	11	15	19
0,4	4	8	12	16	20

Kuva 15. Opinnäytetyöreseptien lähtötiedot

3.2. Käytettävät osa-aineet

3.2.1. Kiviaineet

Tutkimuksessa käytettiin 8 erilaista kiviainesta. Kiviaineen raekoot olivat 0–0,4 mm; 0,4–1,0 mm; <2,0 mm; 2,0–5,0 mm; >5 mm; 4–12 mm sekä 10–22 mm. Kiviaineet olivat täysin kuivia, ja niiden absorptio vaihteli 0,1–0,3 prosentin välillä. Kiviaineet yhdistettiin siten, että niiden yhdistetty rakeisuuskäyrä (kuva 16) noudatti Nykäsen menetelmässä (1) olevaa ohjekäyrää. Kiviaineen prosenttiosuudet esitetään kuvassa 17.



Kuva 16. Kiviaineksen yhdistetty rakeisuuskäyrä

n:o	lajite	%	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	H
1	2- sokkelirouhe alite	14,0	4,7	12,0	26,0	46,0	70,0	100	100	100	100	100	659
2	33R 0-0,4	6,0	14,0	45,0	90,0	100,0	100,0	100	100	100	100	100	849
3	sokkelirouhe ylite	8,0	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	23	100	100	100	100	425
4	luonnon sokkelirouhe	11,0	0,5	0,5	0,6	0,7	2,0	67	100	100	100	100	471
5	0-2 LK300	11,0	4,0	24,0	55,0	77,0	96,0	100	100	100	100	100	756
6	0,4-1.0	4,0	0,3	3,0	26,0	96,0	100,0	100	100	100	100	100	725
7	4-12 LK300	10,0	0,5	0,6	0,7	0,8	1,8	9	50	100	100	100	363
8	10-22	36,0	0,3	0,3	0,3	0,4	1,0	1	2	48	100	100	253
	Yhdistetty	100,0	2,2	7,4	16,4	25,1	31,2	45,4	59,7	81,3	100,0	100,0	469

Kuva 17. Kiviainesprosentit

3.2.2 Sementit

Tutkimuksessa käytettiin kahta eri sementtilaatua, Plussementtiä sekä Pikasementtiä.

Plussementti on CEM II B-M (S-LL) 42,5 N-tyyppinen normaalisti kovettava portlandseossementti. Pikasementti on CEM I 52,5 R-tyyppinen erittäin nopeasti kovettava portlandsementti. (9,10.)

Kuvassa 18 esitetään opinnäytetyössä käytettyjen sementtilaatujen puristuskokeiden tulokset. Tulokset ovat saatu käyttämällä vesi-sementtisuhdetta 0,5.

	Plussementti	Pikasementti
Lujuus MN /m²	3.1.2011	3.1.2011
1d	11,5	29,3
2d	23,6	40,8
7d	39,0	49,2
28d	48,4	58,1
Hienous m²/kg	457	598

Kuva 18. Opinnäytetyössä käytettyjen sementtilaatujen puristustulokset

3.2.3 Notkistin

Massojen valmistuksessa käytettiin Elementti-Parmix-nimistä notkistinta. Elementti-Parmix on runsaasti nesteyttävä lisäaine, jolla betonin työstettävyyttä voitiin parantaa tarvittaessa. (11.)

3.3 Betonimassojen suhteitus

3.3.1 Suhteituksen periaatteet

Betonimassan suhteituksella tarkoitetaan betonin osa-aineiden määrien yhtensovittamista siten, että betonille saadaan halutut ominaisuudet, kuten hyvät lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet, vaaditut säilyvyysominaisuudet ja soveltuvuus rakennusaikaisiin olosuhteisiin. (1.)

3.3.2 Suhteituksen perusyhtälö

Osa-aineiden määrän laskeminen perustuu ns. betonin perusyhtälöön. Perusyhtälön lähtökohdaksi on, että osa-aineiden ja ilmamäärän summa on valetun ja tiivistetyn betonin tilavuus. Betonin perusyhtälön laskukaava on

$$V_k + V_s + V_v + V_i = V_b,$$

jossa V_k on kiviaineksen kiintotilavuus

V_s on sementin kiintotilavuus

V_v on vesimäärä

V_i on ilmamäärä

V_b on betonin tilavuus.

(1)

Yhtälön tarkasteleminen tiheyden määritelmän avulla

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ jolloin } V = \frac{m}{\rho}$$

(2)

Yhtälö soveltuu paremmin betonitekniikkaan, jos paino-osia merkitään massan sijasta kirjaimella Q. Tällöin perusyhtälöksi saadaan

$$\frac{Q_s}{\rho_s} + \frac{Q_k}{\rho_k} + \frac{Q_v}{\rho_v} + Q_i = 1000 \text{ dm}^3$$

(3)

Suhteituksessa perusyhtälöstä ratkaistaan tuntemattomat osat, joita ovat kiviaineksen määrä Q_k , sementin määrä Q_s , sekä veden määrä Q_v . Saaduista määristä saadaan yksi kuutiometri betonia. (1.)

3.3.3 Opinnäytetyön betoneiden reseptit

Tilaaajalta saatujen lähtötietojen (3.1) perusteella voitiin betonin perusyhtälön kautta suhteittaa opinnäytetyöbetonit. Perustiedoissa oli määritelty sementtimäärä sekä vesisementtisuhte, jolloin perusyhtälöllä ratkaistiin kiviaineksen määrä.

Kuvassa 19 esitetään betonin perusyhtälöllä suhteitetut opinnäytetyössä käytetyt reseptit. Reseptissä ovat ensiksi käytetyt kiviaineet sekä niiden määrät, sen jälkeen sementtimäärä sekä vesimäärä. Vesimäärä on lisätty vesimäärä, johon ei ole lisätty lisäaineen mukana tullutta vettä eikä siitä ole vähennetty vedenimua.

Massa	Kiviaines(kg/m ³)								Kiviaines yht (kg/m ³)	Sementti (kg/m ³)	Vesi (kg/m ³)
	(0-2) R	(0-0,4)	(>5) R	(2-5) R	(0-2)	(0,4-1,0)	(4-12)	(10-22)			
1	263	113	150	206	206	75	188	675	1876	300	210
2	274	118	157	216	216	78	196	705	1959	300	180
3	286	123	163	225	225	82	204	735	2043	300	150
4	298	128	170	234	234	85	213	765	2126	300	120
5	223	96	127	175	175	64	159	573	1593	400	280
6	239	102	136	187	187	68	170	614	1704	400	240
7	254	109	145	200	200	73	182	654	1815	400	200
8	270	116	154	212	212	77	193	694	1927	400	160
9	263	113	150	206	206	75	188	675	1876	300	210
10	274	118	157	216	216	78	196	705	1959	300	180
11	286	123	163	225	225	82	204	735	2043	300	150
12	298	128	170	234	234	85	213	765	2126	300	120
13	223	96	127	175	175	64	159	573	1593	400	280
14	239	102	136	187	187	68	170	614	1704	400	240
15	254	109	145	200	200	73	182	654	1815	400	200
16	270	116	154	212	212	77	193	694	1927	400	160
17	183	79	105	144	144	52	131	472	1310	500	350
18	203	87	116	159	159	58	145	522	1449	500	300
19	222	95	127	175	175	64	159	572	1588	500	250
20	242	104	138	190	190	69	173	622	1727	500	200

Kuva 19. Opinnäytetyön betonireseptit (Liite 1)

3.4 Betonimassojen valmistus

Betonimassat valmistettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa. Betonimassojen valmistuksessa noudatettiin standardia EN 480:1-1997, jonka

mukaan tasosekoittimen maksimitilavuudesta tulee käyttää vähintään 50 %. Rakennuslaboratorion tasosekoittimen maksimitilavuus on 50 litraa, joten valmistettava vähimmäismäärä olisi 25 litraa. Kuuden 150x150 mm:n koekappaleen vaatima betonimäärä on 20,25 litraa, jonka takia jokaista betonimassaa päädyttiin valmistamaan 30 litraa, jotta jokaista massaa tulisi varmasti riittävä määrä.

Betonimassojen valmistus aloitettiin punnitsemalla jokainen kiviaines erikseen. Kiviaineet laitettiin tasosekoittimeen aloittaen suurimman raekoon kiviaineksista. Tämän jälkeen punnittiin tarvittava määrä sementtiä ja viimeiseksi punnittiin vesi sekä mahdollinen notkistin. Notkistinta varattiin aina 3 % sementin painosta ja sitä käytettiin vain, jotta betonimassa saataisiin koekappalemuotteihin, ei esimerkiksi vähentämään vedentarvetta. Notkistinta laitettiin maksimissaan vain varattu 3 %, useimmissa tapauksissa vähemmän. (Taulukot 1-5)

Betonimassan sekoituksessa noudatettiin standardia EN 480:1–1997, jonka mukaan ensiksi betonimyllyyn laitettiin kiviainekset ja puolet tarvittavasta vesimäärästä. Tämän jälkeen kiviainesta ja vettä sekoitettiin kaksi minuuttia, jonka jälkeen tasosekoitin pysäytettiin ja kansi suljettiin kahdeksi minuutiksi. Tämän jälkeen lisättiin sementti ja tasosekoitin käynnistettiin sekä lisättiin loput jäljellä olevasta vedestä. Betonimassaa sekoitettiin tämän jälkeen vielä kaksi minuuttia. Jos betonimassa ei ollut riittävän notkeaa, lisättiin vielä tarvittava määrä notkistinta, ja notkistimen laiton jälkeen sekoitusta jatkettiin minuutin verran.

3.5 Tuoreen betonin testaus

Tuoretta betonia arvioitiin silmämääräisesti sekä testattiin mittaamalla betonista sen lämpötila ja notkeus. Betonin lämpötilaa mitattiin lämpötilamittarilla kahden minuutin ajan siitä, kun betoni oli tiputettu astiaan. Notkeus mitattiin mittaamalla betonimassan painuma. Painumamittauksessa noudatettiin SFS-EN 12350-2-standardia. Sen mukaan käytettävä muotti tuli täyttää kolmessa noin samankokoisessa kerroksessa. Jokainen kerros tiivistettiin 25 sulloinsauvan iskulla. Kolmannen kerroksen jälkeen betonin pinta tasattiin muotin yläpinnan tasalle. Tämän jälkeen muotti nostettiin hitaasti tasaisella nopeudella ylös ja muotti siirrettiin betonimassan viereen. Painuma mitattiin siten, että

betonimassan ylimmän kohdan sekä vieressä olevan muotin yläreunan erotus on painuman arvo.

3.6 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleiden valmistus tehtiin standardin SFS-EN 12390-2 mukaisesti. Koekappaleita valmistettiin yhteensä 6 kpl jokaista betonimassaa kohden. Koekappaleita tehtiin 1 vrk, 7 vrk sekä 28 vrk:n puristuksia varten ja jokaisesta vielä ns. varakappaleet joilla pyrittiin vähentämään esimerkiksi huonosta tärytyksestä johtuvia lujuuskatoja.

Betonimassaa tärytettiin sopivasti siten, että massan seasta ei enää noussut suuria ilmakuplia. Tärytyksessä kuitenkin pyrittiin välttämään liiallista tärytystä, joka voisi johtaa kaikkein notkeimmissa massoissa suurimpien raekoon kiviainesten valumisen muotin pohjalle. Koekappaleiden pinnat tasattiin tämän jälkeen poikittaisin vedoin siten, että niiden yläpinta oli samalla tasolla kuin muottien yläpinta.

Koekappaleet annettiin olla noin 1 vuorokauden ajan muoteissa, jonka jälkeen ne otettiin pois muoteista ja ne merkittiin laittamalla niihin betonimassan järjestysnumero, valmistuspäivämäärä sekä koekappaleen ikä puristaessa. Koekappaleet asetettiin tämän jälkeen vesisäilytykseen, jossa niitä säilytettiin aina puristukseen asti. Vesisäilytysastian veden lämpötilaa säädeltiin, jotta pystyttiin varmistamaan kaikille koekappaleille samat olosuhteet. Astian lämpötila oli noin 21 °C.

3.7 Koekappaleiden puristuslujuuden mittaaminen

Koekappaleiden puristuksessa noudatettiin SFS-EN 12390-3-standardia. Koekappaleina käytettiin 150 mm:n kuutioita. Koekappaleet puristettiin 1, 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä. 1 ja 7 vuorokauden iät eivät ole standardien edellyttämiä, mutta ne otettiin, jotta voitiin seurata koekappaleiden alkulujuuksien kehittymistä.

Koekappaleet nostettiin aluksi vesisäilytyksestä, jonka jälkeen niiden annettiin kuivua noin tunnin ajan. Tämän jälkeen ne punnittiin, jotta voitiin selvittää koekappaleen paino ja tätä kautta kyseisen betonimassan tiheys.

Koekappaleiden puristuspinnoiksi valittiin muottia vasten olevat pinnat, jotta voitiin välttyä pintojen tasaamiselta. Puristuspinnat mitattiin kolmesta kohtaa, minkä lisäksi koekappaleen korkeus mitattiin jokaiselta neljältä sivulta, jotta voitiin varmistaa, että kaikki pinnat täyttävät standardin asettamat vaatimukset, joiden mukaan yksikään mitoista ei saa alittaa tai ylittää nimettyä mitta enempää kuin 0,5 %.

Koekappaleet puristettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion Form Test-merkkisellä puristimella. Puristimen puristuspinnat pyyhittiin puhtaaksi ja kaikki irtonainen kiviaines poistettiin pinnoilta. Koekappale keskitettiin alakuormituslevyn keskelle käyttämällä apuna levyssä olevia viivoja.

Tämän jälkeen valittiin näytöltä oikea koekappale ja aloitettiin puristaminen. Puristuksen päätyttyä otettiin ylös puristuslujuus Newtonina neliömillimetriä kohden sekä suurin kuorma murtohetkellä kilonewtoneina.

4. TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

4.1 Puristuslujuudet

Taulukoissa esitetään kaikkien valmistettujen massojen järjestysnumero(nro), valmistuspäivämäärä, sementtimäärä kilogrammaa kuutiometriä kohden, massan vesi-sementtisuhde, puristuslujuudet 1,7 ja 28 vuorokauden ikäisinä, painuma sekä mahdollinen massan valmistuksessa käytetty notkistin määrä. Vesi-sementtisuhde on tässä tapauksessa kokonaisvesimäärä eli betonimassan valmistuksessa lisätyn veden sekä mahdollisen lisäaineen mukana tulleen veden yhteenlasketun määrän suhde sementtimäärään.

Taulukoissa 1–2 esitetään massat, joiden sementtilaatuna käytettiin Plussementtiä. Massa 4 oli notkistettunakin mahdotonta saada koekappalemuottiin riittävästi tiivistetynä, eikä tästä johtuen massan puristuslujuutta pystytty mittaamaan.

Taulukko 1. 300 kg/m³, Plussementti

Nro	Valm.pvm	Sem.määrä kg/m ³	v/s-suhde	Puristuslujuudet (N/mm ²)			Painuma	Notkistin
				1d	7d	28d		
1	10.1.	300	0,7	6,5	24,5	31,0	19mm	
2	11.1.	300	0,6	9,5	33,5	40,5	4mm	
3	11.1.	300	0,51	18,5	41,0	47,0	2mm	90g(1%)
4								270g(3%)

Taulukko 2, 400 kg/m³, Plussementti

Nro	Valm.pvm	Sem.määrä kg/m ³	v/s-suhde	Puristuslujuudet (N/mm ²)			Painuma	Notkistin
				1d	7d	28d		
5	12.1.	400	0,7	6,5	22,0	31,5	>25mm	
6	12.1.	400	0,6	9,5	30,0	37,0	24mm	
7	12.1.	400	0,5	15,0	37,5	48,0	9mm	
8	13.1.	400	0,42	31,0	55,0	62,5	12mm	240g(2%)

Taulukoissa 3–5 esitetään massat, joiden sementtilaatuna käytettiin Pikasementtiä. Massa 12 oli notkistettunakin mahdollonta saada koekappalemuottiin riittävästi tiivistettynä, joten massan puristuslujuutta ei pystytty mittaamaan. Massan 11 painumaa ei pystytty mittaamaan, sillä massa oli niin jäykkää, että se ei kolmesta yrityskerrasta huolimatta pysynyt riittävästi koossa painumamittauksessa.

Taulukko 3, 300 kg/m³, Pikasementti

Nro	Valm.pvm	Sem.määrä kg/m ³	v/s-suhde	Puristuslujuudet (N/mm ²)			Painuma	Notkistin
				1d	7d	28d		
9	13.1.	300	0,7	13,0	31,0	36,0	15mm	
10	13.1.	300	0,6	23,0	40,0	44,5	6mm	18,4g(0,2%)
11	17.1.	300	0,53	44,0	60,0	66,5	ei mitattu	270g(3%)
12								

Taulukko 4, 400 kg/m³, Pikasementti

Nro	Valm.pvm	Sem.määrä kg/m ³	v/s-suhde	Puristuslujuudet (N/mm ²)			Painuma	Notkistin
				1d	7d	28d		
13	17.1.	400	0,7	15,5	29,0	36,0	>30mm	
14	17.1.	400	0,6	21,5	36,5	44,5	21mm	
15	18.1.	400	0,51	39,5	46,0	53,5	14mm	125g(1%)
16	18.1.	400	0,43	50,0	59,5	72,5	24mm	360g(3%)

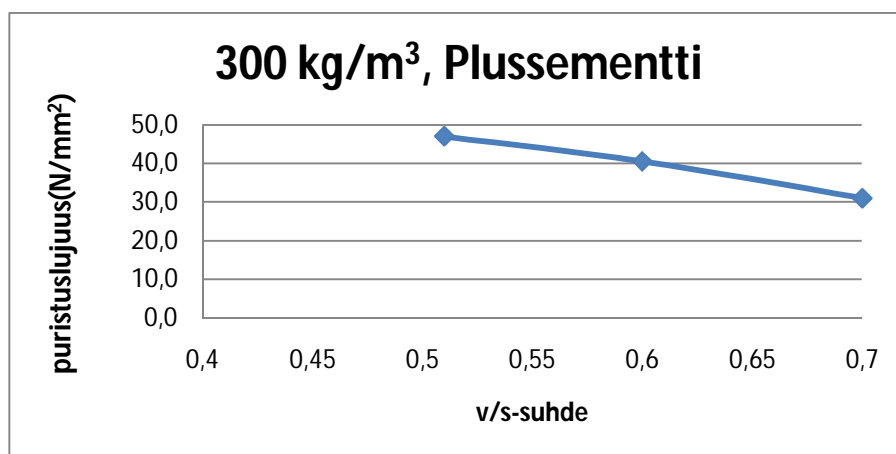
Taulukko 5, 500 kg/m³, Pikasementti

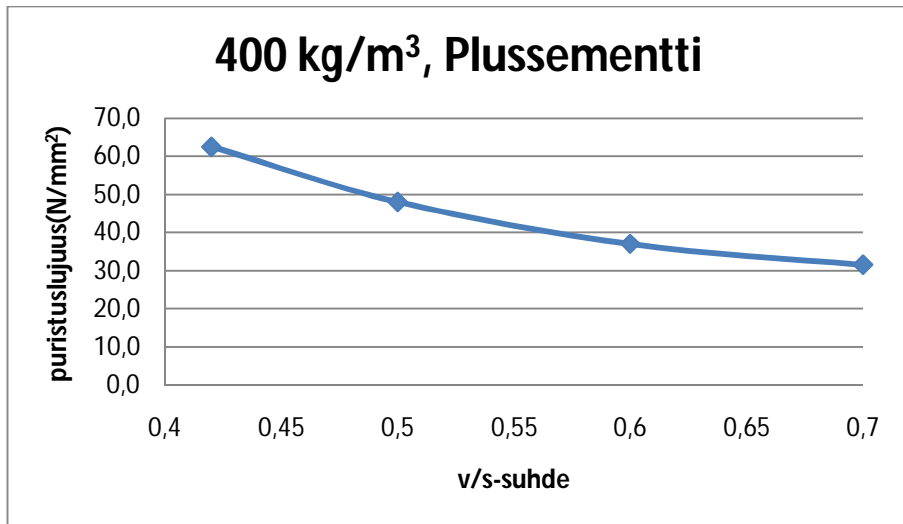
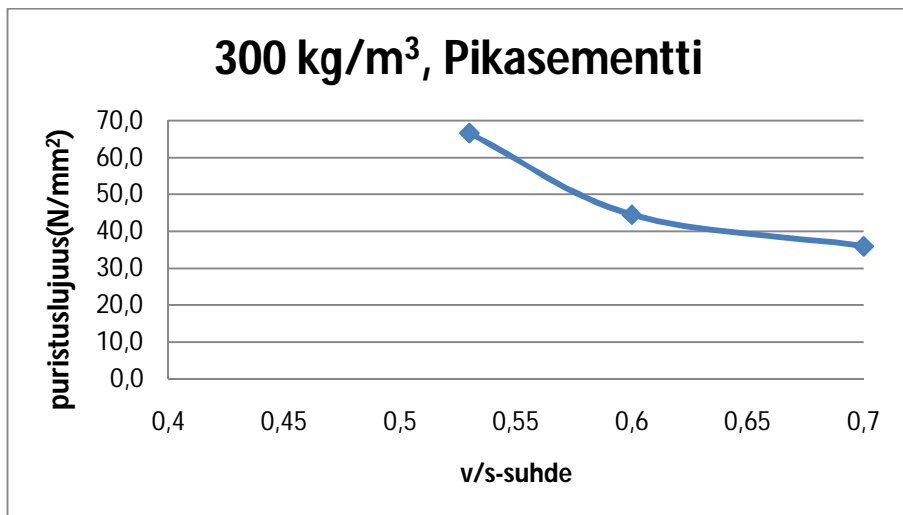
Nro	Valm.pvm	Sem.määrä kg/m ³	v/s-suhde	Puristuslujuudet (N/mm ²)			Painuma	Notkistin
				1d	7d	28d		
17	18.1.	500	0,7	15,0	27,0	33,5	>25mm	
18	19.1.	500	0,6	29,0	38,0	45,0	23mm	
19	19.1.	500	0,51	35,5	44,5	53,0	23mm	97g(0,64%)
20	19.1.	500	0,42	44,5	53,5	63,0	19mm	250g(2,67%)

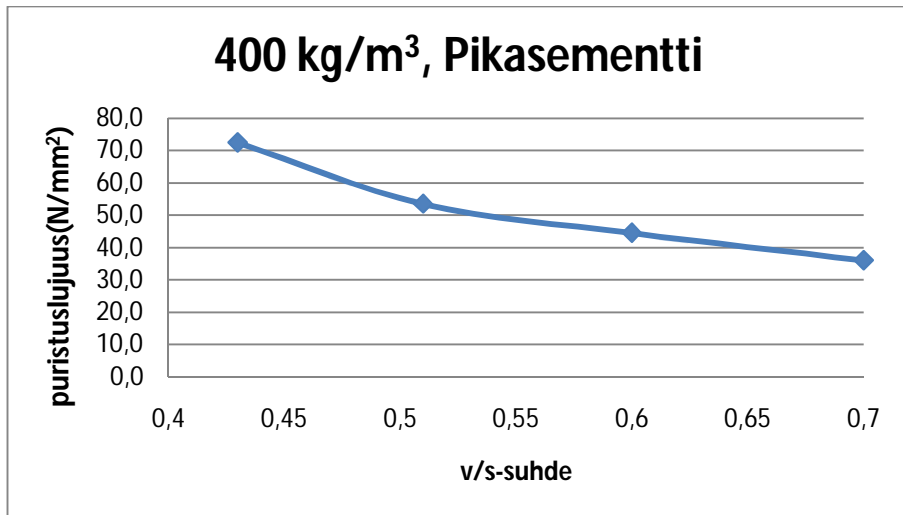
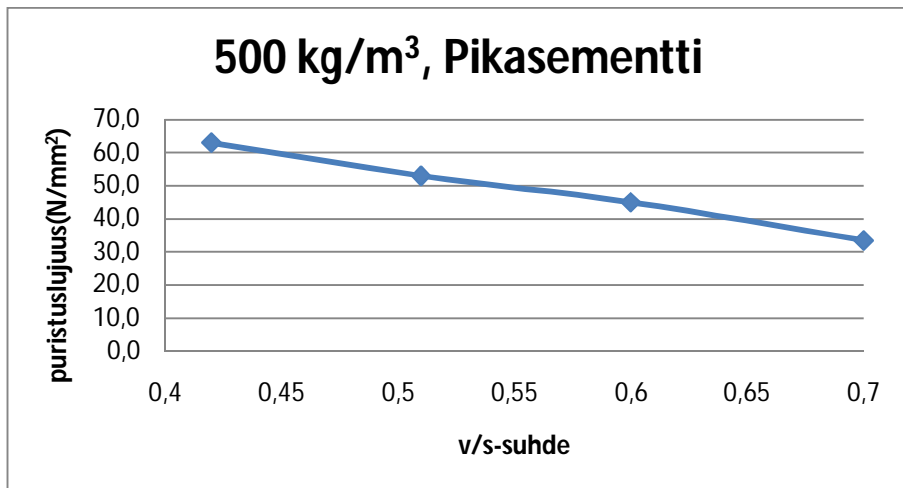
Suurimman puristuslujuuden antoi massa 16, jonka lujuus oli 72,5 N/mm². Kyseisessä massassa käytettiin Pikasementtiä ja sen vesi-sementtisuhte oli 0,43 ja käytetty sementtimäärä kuutiota kohden mitattuna oli 400 kg/m³. Pienimmän lujuuden antoi massa 1, jonka lujuus oli 31 N/mm². Kyseisessä massassa käytettiin Plussementtiä, ja sen vesi-sementtisuhte oli 0,7 ja käytetty sementtimäärä kuutiota kohden mitattuna oli 300 kg/m³.

4.2 Puristuslujuuksien suhde vesi-sementtisuhteeseen

Kaavioissa 1–5 esitetään edellä mainittujen massojen puristuslujuuksien suhde vesi-sementtisuhteeseen 28 vuorokauden iässä.

Kaavio 1. 300kg/m³, Plussementti

Kaavio 2. 400 kg/m³, PlussementtiKaavio 3. 300 kg/m³, Pikasementti

Kaavio 4. 400 kg/m³, PikasementtiKaavio 5, 500 kg/m³, Pikasementti

Edellä olevista kaavioista 1–5 nähdään, että vesi-sementtisuhteen vaikutus opinnäytetyöbetoneiden lujuuteen noudattaa jo tiedettyä teoriaa, jonka mukaan pienemmällä vesi-sementtisuhteella saadaan aikaiseksi suurempia lujuuksia. (2.1)

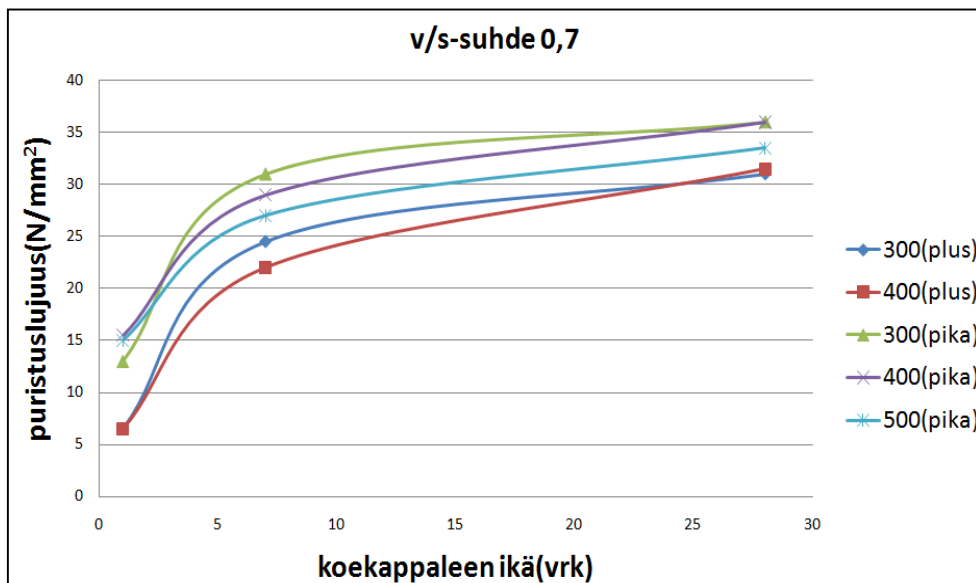
Kaavioissa 2–4 nähdään, että vesi-sementtisuhteen pieneneminen alle 0,6:n aiheuttaa lujuuteen suuremman muutoksen, jolloin kuvio on paraabelin muotoinen, kun taas kaavioiden 1 ja 5 kuviot ovat enemmän suorina, eikä lujuuden kasvu voimistu huomattavasti missään vaiheessa.

Suurin betonin lujuuden muutos tapahtuu kaaviossa 3(300 kg/m³, Pikasementti), jossa vesi-sementtisuhteen vähentyminen 0,6:sta 0,53:een aiheuttaa lujuuden kasvamisen 44,5 N/mm²:stä 66,5 N/mm²:iin, jolloin lujuus kasvaa peräti 22 N/mm².

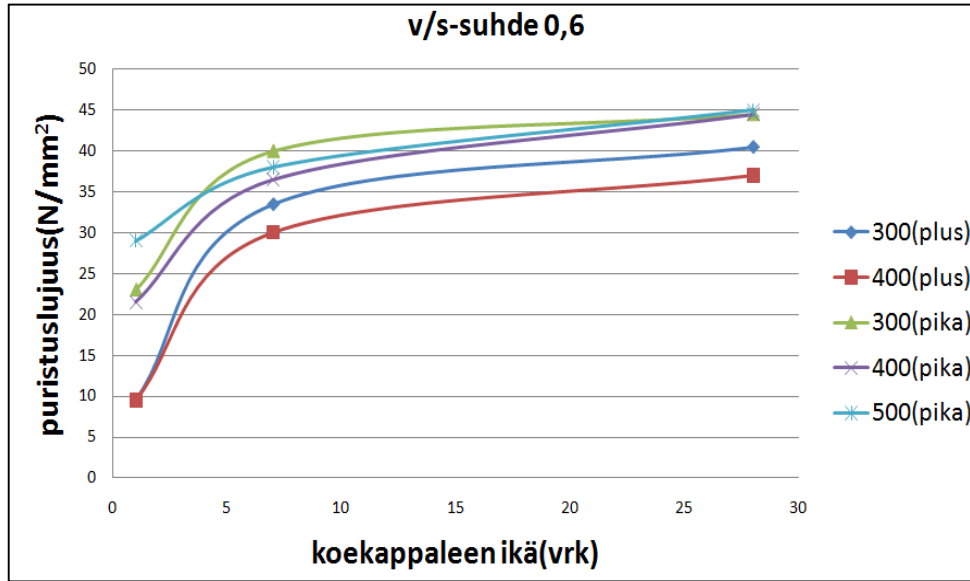
Pienin betonin lujuuden muutos tapahtuu kaaviossa 5(500 kg/m³, pikasementti), jossa vesi-sementtisuhteen vähentyminen 0,6:sta 0,51:een aiheuttaa lujuuden kasvamisen 45 N/mm²:stä 53 N/mm²:in, jolloin lujuus kasvaa vain 8 N/mm²:ä.

4.3 Puristuslujuuksien suhde sementtimäärän ja sementtilaatuun

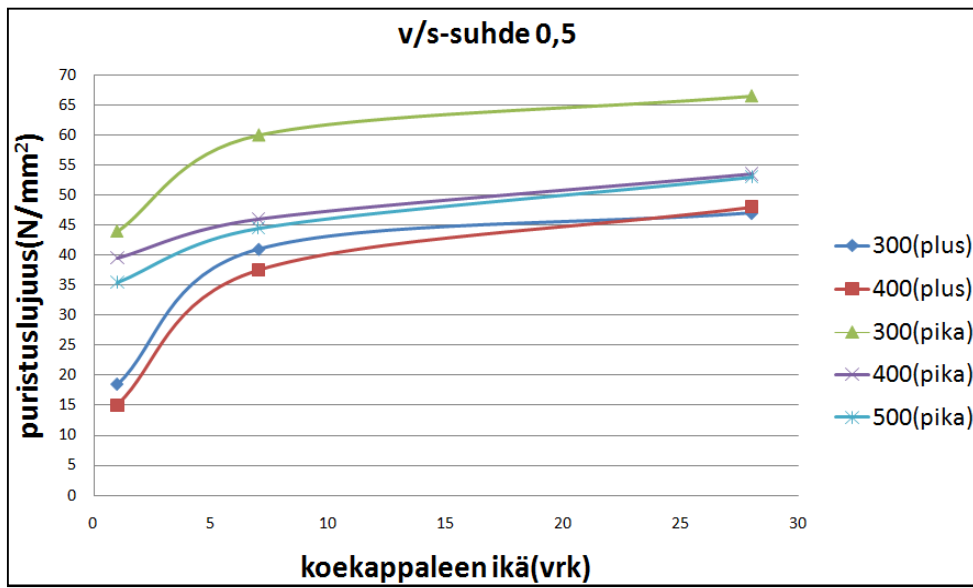
Kaavioissa 6–9 esitetään samalla vesi-sementtisuhteella olevien massojen lujuuksien kehitys ajan funktiona.



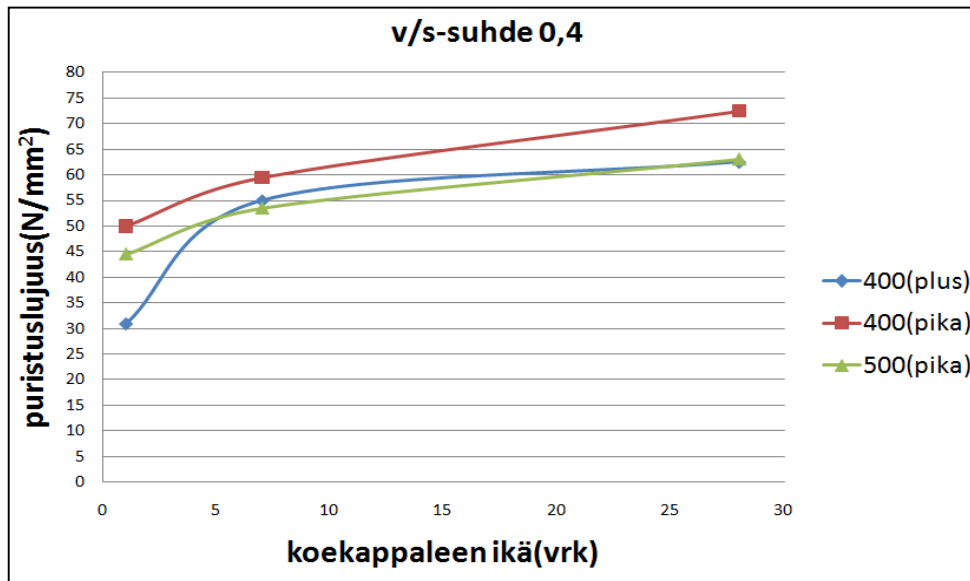
Kaavio 6. Vesi-sementtisuhte 0,7



Kaavio 7. Vesi-sementtisuhde 0,6



Kaavio 8. Vesi-sementtisuhde 0,5



Kaavio 9. Vesi-sementtisuhde 0,4

Kaaviosta 6–9 nähdään, että pienemmällä sementtimäärällä saadaan aikaiseksi suurempia lujuuksia. Tarkemmin sanottuna veden ja sementin muodostaman sementtipastamäärän väheneminen kasvattaa betonin lujuutta. Opinnäytetyöbetoneiden lujuudet noudattavat aikaisemmissa tutkimuksissa havaittua teoriaa. (2.2.1)

Opinnäytetyöbetoneiden lujuudet vaihtelivat myös sementtilaadun mukaan. Kaikilla massoilla, vesi-sementtisuhteesta riippumatta, puristuslujuudet olivat korkeammat Pikasementteillä. Erityisesti yhden vuorokauden lujuudet ovat selvästi suuremmat Pikasementti-massoilla kuin Plussementti-massoilla. Sementtilaadun vaihtumisen vaikutukset noudattavat myös teoriaa.(2.3)

Suurimmat lujuudet saatiin 400 kilogrammalla kuutiota kohden, kun käytettiin Pikasementtiä. Mutta tuloksista voidaan myös tehdä sellaisia johtopäätöksiä, että 300 kilogrammalla kuutiota kohden, kun käytetään Pikasementtiä, saataisiin aikaiseksi vielä suurempia lujuuksia, jos kyseinen massa pystyttäisiin tiivistämään kunnolla.

Erityisesti pienempien vesi-sementtisuhteiden (kaaviot 8 ja 9) betoneiden lujuudet kasvavat selvimmän sementtimäärää vähentämällä. Yksi syy tähän voisi olla kyseisissä massoissa käytetty notkistimen määrä, joka on kaikkein suurin massoilla 11 ja 16. Nämä massat ovat myös suhteellisesti katsottuna kaikkein lujimmat. Notkistimen vai-

kutusta lujuuteen ei ole tutkittu riittävästi, mutta sillä on havaittu olevan samankaltaisia vaikutuksia kuin tässä opinnäytetyössä. (4, 6.)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin vesi-sementtisuhteen ja sementtimäärän vaikutusta betonin lujuuteen kahdella eri sementtilaadulla. Tuloksista nähdään, että pienemmällä vesi-sementtisuhteella sekä vähäisemmällä sementti(sementtipasta)määrällä saadaan aikaiseksi suurempia betonin puristuslujuuksia. Sementtilaaduista Pikasementti sai aikaiseksi suurempia puristuslujuuksia kuin Plussementti.

Vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin lujuuteen on kiistaton. Vesi-sementtisuhteen pienentäminen kasvatti betonin lujuutta selvästi riippumatta sementtimäärästä tai sementtilaadusta. Vesi-sementtisuhteen vähentäminen alhaisimmista (0,5) lukemista aina kaikkein alhaisimpaan (0,4) toi lujuuksiin suhteellisesti vielä suurempiakin kasvuja. Myös kaikkein suurimmissakin suhteissa (0,7-0,6) vesi-sementtisuhteen alentaminen kasvatti lujuuksia huomattavasti.

Sementtimäärän kasvattaminen ei, yleisestä harhaluulosta huolimatta, kasvattanut betonin lujuuksia, vaan suurimmat lujuudet saatiin aikaiseksi massoilla 300 ja 400 kg/m³. Pikasementillä tehtyjen massojen lujuudet kasvoivat sementtimäärän vähentyessä pienemmillä vesi-sementtisuhteilla suhteessa enemmän kuin muiden betonien puristuslujuudet. Voidaan myös arvioida, että kaikkein suurin puristuslujuus olisi saatu aikaiseksi kaikkein pienimmällä sementtimäärällä, jos betonimassa olisi ollut mahdollista tiivistää koekappalemuottiin kunnollisesti.

Puristuslujuudet olivat poikkeuksetta suurempia Pikasementillä tehdyillä betoneilla verrattuna betoneihin, joissa käytettiin Plussementtiä. Pikasementin korkeammat lujuudet johtuvat Pikasementin suuremmasta hienoudesta sekä seosaineiden vaihteluiden eroista Plussementtiin verrattuna. Eri sementtilaaduilla tehtyjen betonien lujuuksien eroavaisuudet olivat samankaltaisia kuin eri sementtien puristuslujuuksien erot.

Koska vesi-sementtisuhteen pienentäminen heikentää betonimassan työstettävyyttä, kaikkein pienimpien vesi-sementtisuhteen betonimassojen, joissa oli vielä vähiten sementtiä, työstettävyys oli niin vaikeata, että niitä ei saatu edes tiivistettyä koekappalemuotteihin. Sementtimäärän kasvattaminen lisäsi sementtipastamäärän kokonaismäärää, jolloin betonin työstettävyys parani, ja betonin maksimaalinen lujuus pystyttiin saavuttamaan riittäväällä tiivistämisellä.

Tässä opinnäytetyössä tehtyjen tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että betonin puristuslujuuteen vaikuttavat vesi-sementtisuhte, sementtipastamäärä sekä sementtilaatu. Näistä eniten vaikuttavat vesi-sementtisuhte sekä sementtilaatu. Vesi-sementtisuhdetta pienentämällä voidaan vähentää käytettävän sementin sekä veden määrää, jolloin kustannukset saadaan pienimmiksi, sillä betonissa suurin maksuerä koostuu nimenomaan sementin hinnasta.

Tulevaisuudessa voitaisiin tehdä samankaltaisia tutkimuksia, mutta suuremmilla betonimäärillä. Tutkimukset voitaisiin suorittaa esimerkiksi valmisbetoni- tai betonielementtitehtaassa. Tällöin saataisiin myös tutkittua, kuinka alhaisella sementtimäärällä pystyttäisiin valmistamaan esimerkiksi lattiabetoni, jolta vaaditaan hyvän työstettävyyden lisäksi riittävästä lujuutta.

LÄHTEET

1. Suomen Betoniyhdistys ry. 2005. BY 201 Betonitekniikan oppikirja. Jyväskylä. Gummerus Kirjapaino Oy.
2. Suomen Betoniyhdistys ry. 2004. BY50 Betoninormit. Jyväskylä. Gummerus kirjapaino
3. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 1979. Betonitekniikka. Jyväskylä. K. J Gummerus Kirjapaino Oy.
4. Neville, A.M. 1995. Properties of concrete. 4th edition. Harlow: Pearson 844p.
5. Suomen Betoniyhdistys ry. 2008. BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
6. Aictin and Neville. How the water/cement-ratio affects on the strength of concrete. Concrete International. Volume 23. Issue 8. 2003.
7. Koliás and Geoargiou. The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. Saatavissa: www.sciencedirect.com [viitattu.1.4.2011].
8. Finnsementti Oy. Suomalainen sementtiopas. Saatavissa: www.finnsementti.fi/Sementti-opas.pdf [viitattu 8.5.2011].
9. Finnsementti Oy. Plussementti, tuote-esite. saatavissa: http://www.finnsementti.fi/tuotesittelyt_devel/sementti_pdf/ex.php?id=87 [viitattu 8.5.2011].
10. Finnsementti Oy. Pikassementti, tuote-esite. saatavissa: http://www.finnsementti.fi/tuotesittelyt_devel/sementti_pdf/ex.php?id=27 [viitattu 8.5.2011].
11. Finnsementti Oy. Elementti-Parmix, tuote-esite. saatavissa http://www.finnsementti.fi/tuotesittelyt_devel/tuote_esite_pdf.php?id=34 [viitattu 8.5.2011].

Massa	Kivaines(kg/m ³)											Sementti(kg/m ³)	Vesi(kg/m ³)
	(0-2) R	(0-0,4)	(>5) R	[2-5] R	(0-2)	(0,4-1,0)	(4-12)	[10-22	Kivaines yht(kg/m ³)				
1	263	113	150	206	205	75	188	675	1876	300	210		
2	274	113	157	216	215	78	196	705	1959	300	180		
3	286	123	163	225	225	82	204	735	2043	300	150		
4	298	123	170	234	234	85	213	765	2126	300	120		
5	223	96	127	175	175	64	159	573	1533	400	280		
6	239	102	136	187	187	68	170	614	1704	400	240		
7	254	109	145	200	200	73	182	654	1815	400	200		
8	270	115	154	212	212	77	193	694	1927	400	150		
9	263	113	150	206	205	75	188	675	1876	300	210		
10	274	113	157	216	215	78	196	705	1959	300	180		
11	286	123	163	225	225	82	204	735	2043	300	150		
12	298	123	170	234	234	85	213	765	2126	300	120		
13	223	96	127	175	175	64	159	573	1533	400	280		
14	239	102	136	187	187	68	170	614	1704	400	240		
15	254	109	145	200	200	73	182	654	1815	400	200		
16	270	115	154	212	212	77	193	694	1927	400	150		
17	183	79	105	144	144	52	131	472	1310	500	350		
18	203	87	116	159	159	58	145	522	1449	500	300		
19	222	95	127	175	175	64	159	572	1588	500	250		
20	242	104	138	190	190	69	173	622	1727	500	200		