

Heikki Taipalus

Sementin vaikutus lujuushajontaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Insinöörityö

Päivämäärä 28.11.2016

Tekijä(t) Otsikko	Heikki Taipalus Sementin vaikutus lujuushajontaan
Sivumäärä Aika	50 sivua + 2 liitettä 28.11.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	Kehityspäällikkö Vesa Anttila Yliopettaja Kai Laitinen
<p>Tämän insinööriyön aiheena oli selvittää, paljonko sementin laadunvaihtelun osuus on betonin lujuushajonnasta ja kummalla tutkittavalla sementillä hajonta on suurempi. Tutkittavina sementteinä oli Finnsementin Rapid- ja Yleissementti. Testauspaikkana oli Ruduksen Kotalan betonitehdas ja laboratorio. Testausaika oli noin neljä kuukautta.</p> <p>Betonin lujuudet testattiin prisma- ja puristuskokein. Betonista mitattiin myös painumaa, vesi-sementtisuhdetta ja vesimäärää sekä tarkkailtiin valmistuksen laatua.</p> <p>Prismalujuuksien tulosten tarkastelussa sementin valmistajan mittaamat tulokset olivat varsinkin Rapid-sementillä merkittävästi tehtaalla mitattuja tuloksia parempia. Betonin puristus- kokeissa Rapidsementillä lujuustulosten keskihajonta oli suurempi kuin Yleissementin.</p> <p>Vesimäärän mittailussa vertailtiin wokkipannulla ja mikroaaltouunilla kuumentamalla saatuja tuloksia reseptivesimäärään. Mikroaaltouuni antoi suurimman virheen ja keskihajonta oli suurin. Mikroaaltouunilla oli myös huonoin korrelaatio reseptivesimäärään. Mikroaaltouuni antoi kuitenkin parhaan korrelaation lujuuteen ja painumaan, mutta molempien menetelmien osalta korrelaatio jäi heikoksi.</p> <p>Valmistuksen laadun tarkkailussa sementtikomponenteissa ei ollut vaihtelua Rapid- eikä Yleissementillä. Lujuustuloksissa Rapidsementin lujuustulokset kasvoivat hieman.</p> <p>Prismalujuuksien ja betonin puristuskokeiden perusteella Rapidsementillä oli suurempi vaikutus lujuushajontaan kuin Yleissementillä.</p>	
Avainsanat	sementti, lujuushajonta, vesimäärä

Author(s) Title	Heikki Taipalus Cement's Effect on Strength Variance
Number of Pages Date	50 pages + 2 appendices 28.11.2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials and Surface Treatment Technology
Specialisation option	
Instructors	Vesa Anttila, Development Manager Kai Laitinen, Senior Teacher
<p>The subject of this engineering thesis was to examine the proportion of cement quality variation in the strength variance of concrete and to determine which of the two cement qualities studied would have the higher variance in strength variance. The two cements examined were Finnsementti's Rapid- and Yleissementti. The testing place was Rudus Konala concrete factory and laboratory. The testing time was about 4 months.</p> <p>The strengths were tested with prism and compression experiments. Concrete was also measured for water quantity and for water-cement ratio, and the quality of the manufacturing process was also under observation.</p> <p>Reviewing the results of prism strengths, especially those for Rapidsementti's cement, the manufacturer's results were significantly better than those of the factories. Rapidsementti's standard deviation of strength results was larger than that of Yleissementti's.</p> <p>Water quantity was measured by heating the samples with wok and microwave oven, and results were compared with the water content of the formula. Microwave oven gave the largest error and standard deviation. The correlation between the results of the microwave heating test and the water quantity of the formula was the poorest. On the other hand, the microwave heating test results showed the best correlation with strength and indentation results. But the correlation between strength and indentation remained poor in both methods.</p> <p>Monitoring quality of manufacturing, cement components showed no variation in Rapid- nor Yleissementti. Rapidsementti's strength results grew slightly.</p> <p>On the basis of prism strength and compression results, it can be concluded that Rapidsementti had a larger effect on the proportion of strength variance than Yleissementti.</p>	
Keywords	cement, strength variance, water quantity

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sementti	1
2.1	Sementin alkuvaiheet	1
2.2	Sementin valmistus	2
2.3	Sementtiklinkkerin koostumus	4
2.4	Sementin ominaisuudet	5
2.4.1	Sementin reaktiot veden kanssa	6
2.4.2	Sitoutuminen ja valesitoutuminen	8
2.4.3	Lujuudenkehitys	8
2.4.4	Hienous	9
2.4.5	Kiinto- ja irtotiheys	10
2.4.6	Lämmönkehitys	10
2.4.7	Tilavuuden pysyvyys	10
2.4.8	Sulfaatinkestävyys	11
2.4.9	Väri	11
2.4.10	Lämpötila	11
2.4.11	Säilyvyys	11
3	Betonin lujuus	12
3.1	Lujuuteen vaikuttavat tekijät	12
3.2	Vesi-sementtisuhte	13
3.3	Uusien sementtien vaikutus lujuuteen ja betonimassan ominaisuuksiin	14
3.3.1	Lujuudet	15
3.3.2	Uusi yleissementti	16
3.3.3	Uusi rapidsementti	17
4	Tutkimusmenetelmät	18
4.1	Prismakokeet	18
4.2	Betonin lujuuskokeet	19
4.3	Vesimäärän mittaus	20
4.4	Valmistuksen laatu	20
5	Tulokset	21
5.1	Yleissementin prismalujuus	21
5.2	Rapidsementin prismalujuus	24

5.3	Betonin puristuskokeet, Yleissementti	26
5.4	Betonin puristuskokeet, Rapidsementti	31
5.5	Vesimäärän mittaus	36
5.6	Valmistuksen laatu	45
6	Tulosten tarkastelu	46
6.1	Prismalujuus	46
6.2	Betonin puristuskokeet	47
6.3	Vesimäärän mittaus	47
6.4	Valmistuksen laatu	48
7	Johtopäätökset	48
	Lähteet	50
	Liitteet	
	Liite 1. Yleissementin tuote-esite	
	Liite 2. Rapidsementin tuote-esite	

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää, paljonko sementin laadunvaihtelun osuus on lujuushajonnasta, ja tutkia kahden sementin lujuushajontaa.

Insinööriyö tehtiin Rudus Oy:lle, joka halusi selvittää Yleis- ja Rapidsementtien laadunvaihtelua ja parantaa tuotteitaan. Rudus Oy on suomalainen kivipohjaisia rakennusmateriaaleja valmistava yhtiö.

Sementin teoriaosuudessa käydään kirjallisuuslähteitä hyödyntäen läpi sementin valmistus ja ominaisuudet, jotta ymmärretään niiden vaikutus lujuuden tutkimuksessa. VTT Rakennustekniikan tekemä tutkimus uusista sementeistä sementtiteollisuudelle antaa pohjaa lujuuden arvioimiseen. Tutkimusmenetelmissä esitetään prisma- ja puristuskokeiden suoritus sekä tuotannosta otettavista näytteistä tehdyt vesimäärän mittaukset ja valmistuksen laadun tarkastelu. Prisma- ja puristuskokeiden, vesimäärän mittausten tulokset ja valmistuksen laatu sekä näiden tuloksien tarkastelu esitetään omissa luvuissaan, joiden pohjalta tehdään johtopäätökset.

2 Sementti

2.1 Sementin alkuvaiheet

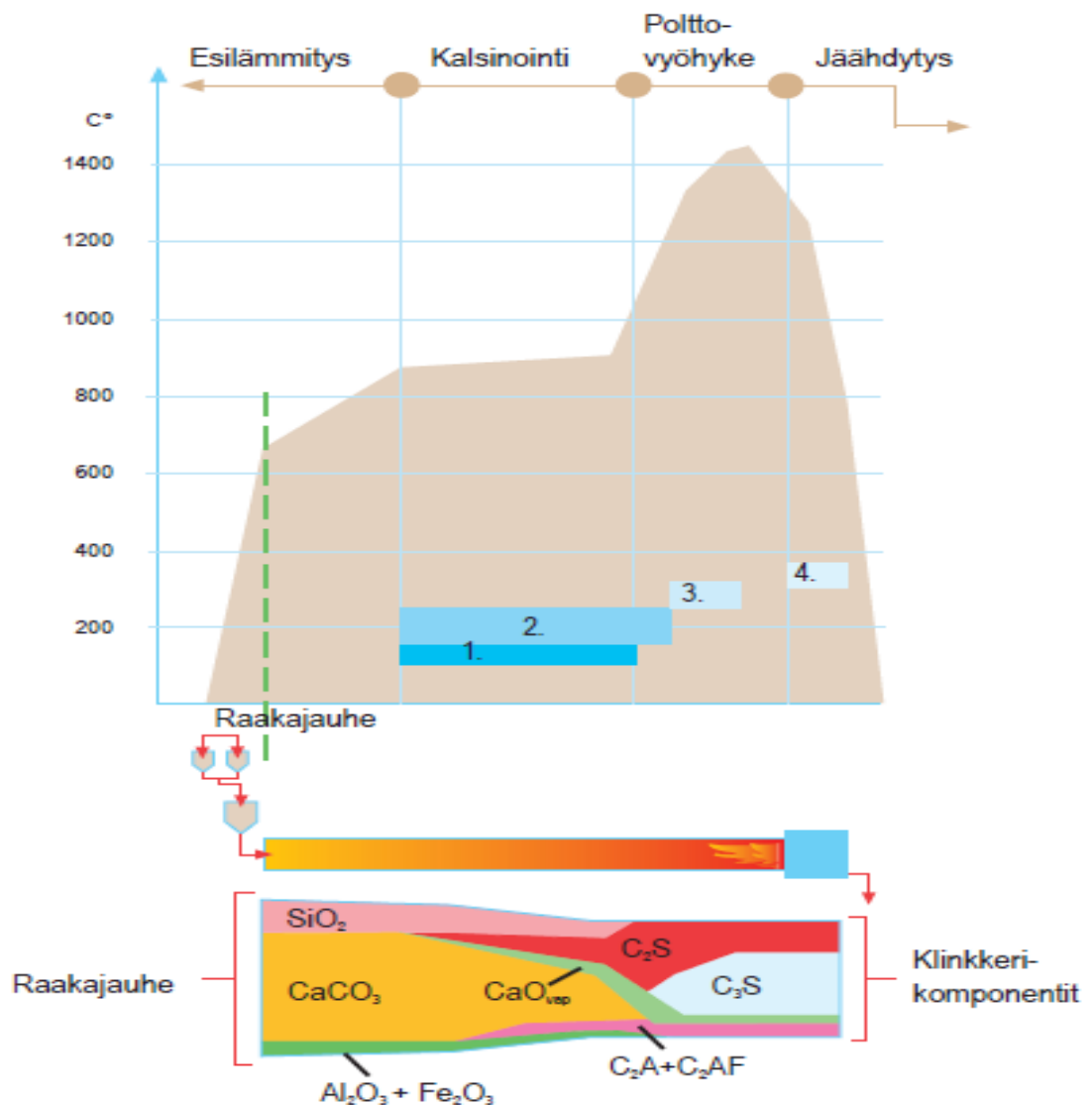
Etruskit ennen ajanlaskun alkua keksivät käyttää jauhettua kalkkia laastin sideaineena. Ajan saatossa roomalaiset alkoivat käyttää poltettua kalkkia, josta he kehittivät roomalaissementin. Ensimmäisenä kaliumkarbonaattipohjaisen portlandsementin patentoi englantilainen Joseph Aspdin vuonna 1824. Nykyisen portlandsementin voidaan katsoa syntyneen, kun englantilainen Isaac Johnson paransi Aspdinin vuonna 1843 menetelmää polttamalla raaka-aineseoksen sintrauslämpötilaan asti. Seuraava kehitysvaihe oli raaka-aineseoksen polttaminen kiertoilmauunissa, mikä paransi sementin laatua ja alensi kustannustasoa. Englantilainen Frederik patentoi menetelmän vuonna 1885. [1, s. 5.]

Suomessa sementtiä on valmistettu Paraisilla vuodesta 1914 alkaen ja Lappeenrannassa vuodesta 1938 alkaen. Ensimmäisen kerran sementin valmistus Suomessa aloitettiin vuonna 1869, mutta valmistus lopetettiin vuonna 1894 huonon menekien takia. [1, s. 5.]

2.2 Sementin valmistus

Sementin pääkomponentteja ovat kalsiumkarbonaatti (CaCO_3), piioksidi (SiO_2), rautaoksidi (Fe_2O_3) ja alumiinioksidi (Al_2O_3). Sementin valmistus aloitetaan murskaamalla louhitut kivilaadut karkeamurskaimella. Lajittelun jälkeen murske hienomurskataan ja siirretään esihomogenisoinnin kautta raaka-ainesiiloihin, josta raaka-aineet siirretään sopivissa suhteissa raakajauhemylyyn. Myllyssä raaka-aineet jauhetaan kuivaksi raakajauheeksi, josta se siirretään tasoittumaan homogenisointisiiloon. Esilämmitysjärjestelmä kuumentaa raakajauheen kiertouunia varten, jossa tapahtuu sementtiklinkkerin poltto. Poltossa kalkki-, pii-, alumiini- ja rautayhdisteet reagoivat kalsiumyhdisteiksi ja sintraantuvat sementtiklinkkeriksi lämpötilan noustua 1400 °C :seen. Kiertoilmauunin loppupäässä sementtiklinkkeri jäädytetään nopeasti 200 °C :seen, karkeaa soraa muistuttavaksi massaksi. Sementtiklinkkeri jauhetaan kuulamylyllä hienoksi jauheeksi, jonka yhteydessä mahdolliset seosaineet ja kipsi lisätään massaan. [1, s. 13.]

Kuvassa 1 esitetään kiertoilmaunissa tapahtuva mineraalien muodostuminen.



Kuva 1. Klinkkerimineraalien muodostuminen. [1, s. 16.]

1. Kalsinointivaiheessa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi noin 900 °C:ssa.
2. Lämpötila jatkaa nousuaan, jolloin kalsiumoksidi reagoi edelleen muiden komponenttien kanssa muodostaen ensin silikaatti- ja aluminaattiyhdisteitä.
3. Polttovyöhykkeen aikana faasireaktiot etenevät ja klinkkerimineraalit muodostuvat 1400 °C:ssa.
4. Jähdytysvaiheessa mineraalit saavuttavat lopullisen muotonsa.

2.3 Sementtiklinkkerin koostumus

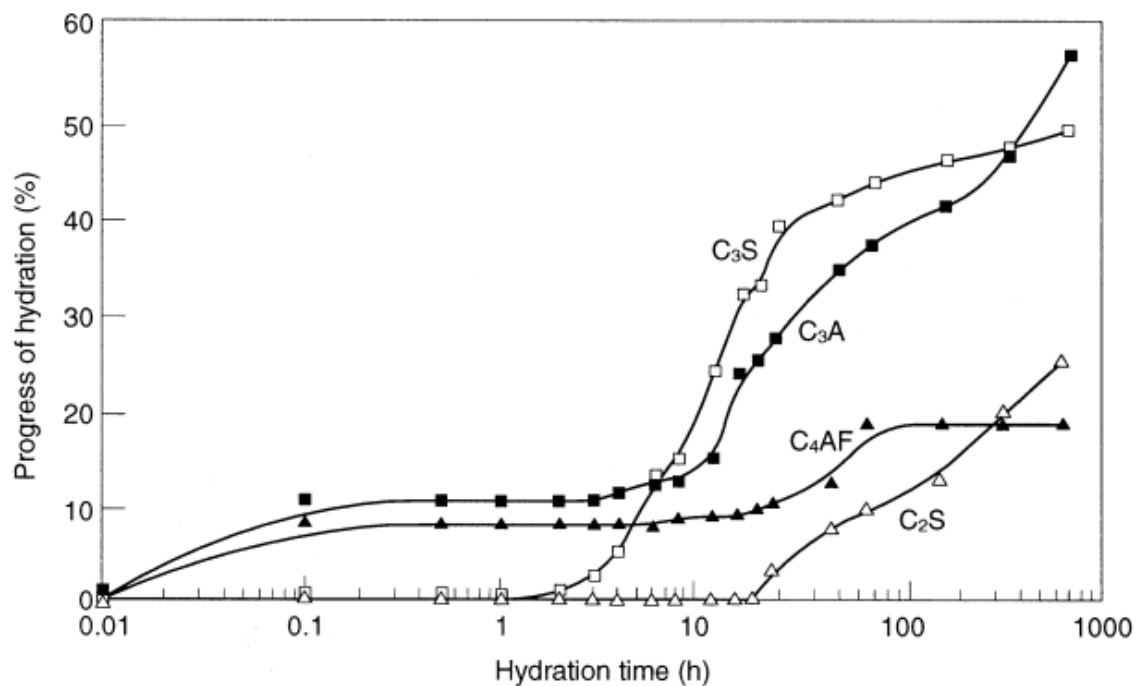
Sementtiklinkkerin päämineraalit ovat aliitti (C_3S), beliitti (C_2S), aluminaatti (C_3A) ja ferriitti (C_4AF). Näiden neljän mineraalin suhteita säätelemällä vaikutetaan sementin ominaisuuksiin. Taulukossa 1 esitetään komponenttien ominaisuudet. [1, s. 15.]

Taulukko 1. Sementin komponentit ja niiden ominaisuudet. [1. s. 15.]

Klinkkeri	Ominaisuudet
Trikalsiumsilikaatti (C_3S) $3 CaO \cdot SiO_2$	Nopea lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (500 kJ/kg), sulfaatinkestävä
Dikalsiumsilikaatti (C_2S) $2 CaO \cdot SiO_2$	Hidas lujuudenkehitys, suuri loppulujuus, alhainen hydrataatiolämpö (250 kJ/kg), sulfaatinkestävä
Trikalsiumaluminaatti (C_3A) $3 CaO \cdot Al_2O_3$	Suuri reagointinopeus ja vedentarve, pieni loppulujuus ja erittäin korkea hydrataatiolämpö (1340 kJ/kg), ei sulfaatinkestävä
Tetrakalsiumaluminaattiferriitti (C_4AF) $4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	Hidas lujuudenkehitys, pieni loppulujuus, korkea hydrataatiolämpö (420 kJ/kg), sulfaatinkestävä
Vapaa kalkki CaO_v	Reagoi nopeasti veden kanssa kalsiumhydroksidiksi, $Ca(OH)_2$. Korkea pitoisuus voi aiheuttaa nopeamman sitoutumisen ja tuotteen paisumisen
Magnesiumoksidi MgO	Reagoi hitaasti veden kanssa magnesiumhydroksidiksi, $Mg(OH)_2$. Korkea pitoisuus voi tällöin ajan mittaan aiheuttaa lopputuotteessa paisumista ja halkeamista
Alkadiyhdisteitä	Alkaliyhdisteet nopeuttavat hydrataatioreaktioita, nostavat hieman alkulujuustasoa ja laskevat vastaavasti loppulujuustasoa
Lisätään jauhatuksessa	
Kipsi $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$	Kipsi hidastaa C_3A :n reaktioita antaen sementille sopivat sitoutumisajan

Seosaineet: kalkkikivi, granuloitu masuunikuona	Seosaineiden suhteilla ja sementin jauhatushienoudella säädelään sementin lujuustasoa ym. ominaisuuksia
Rautasulfaatti $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Pelkistää vesiliukoisen kromaatin

Kuvassa 2 on klinkkerimineraalien hydrataationopeus ajan funktiona.



Kuva 2. Klinkkerimineraalien hydrataationopeus. [2, s. 1053.]

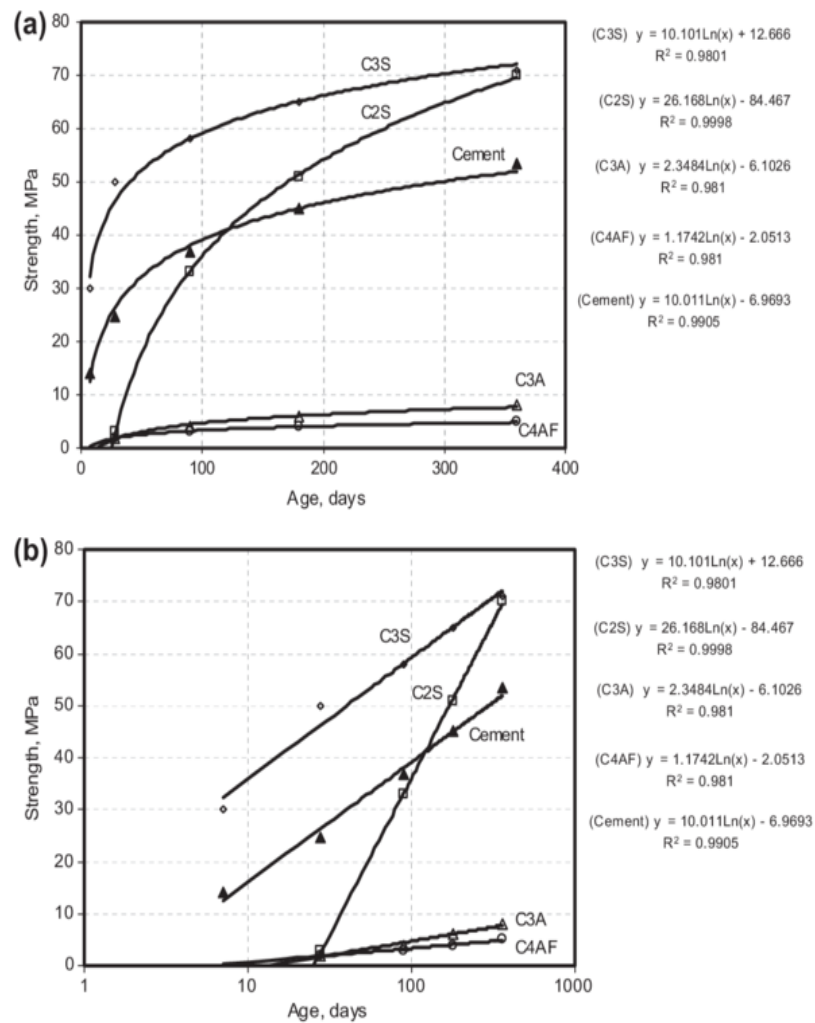
2.4 Sementin ominaisuudet

Sementeillä on useita ominaisuuksia, joilla on vaikutusta betonituotteiden valmistuksessa. Näitä ovat lujuus, kemiallinen koostumus sekä seos- ja lisäaineet, sementin reaktiot veden kanssa, sitoutuminen ja valesitoutuminen, lujuuden kehitys, hienous, kiinto- ja irtotiheys, lämmönkehitys, tilavuuden pysyvyys, kemiallinen kestävyys, väri, lämpötila ja säilyvyys. [1, s. 20–25.]

2.4.1 Sementin reaktiot veden kanssa

Tärkeimpänä sementin ominaisuutena voidaan pitää sen kykyä reagoida veden kanssa liimaksi. Sementin reagoidessa veden kanssa ensiksi reagoivat aluminaattiyhdisteet (C_3A). Mikäli kipsiä ei lisättäisi sementtiin jauhatuksen yhteydessä, tapahtuisi reaktio heti eikä tarvittavaa työstöaikaa jäisi. Aluminaattiyhdisteet eivät juurikaan vaikuta sementin lujuuteen, mutta ne ovat välttämättömiä sementin varhaisreaktioiden ja klinkkerin polton kannalta. Sementin alkulujuudesta vastaa aliitti (C_3S) reagoiden nopeasti veden kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatteja -CSH. Myöhemmästä lujuuskehityksestä vastaa beliitti (C_2S). Kuvassa 3 esitetään klinkkerimateriaalien ja sementin lujuuskehitys. [1. s. 18.]

Kuvassa 3 esitetään klinkkerimineraalien ja sementin lujuuskehitystä normaali ja logaritmisellä skaalalla.



Kuva 3. Klinkkerimineraalien ja sementin lujuuskehitys. a) normaali skaala b) logaritminen skaala. [3.]

2.4.2 Sitoutuminen ja valesitoutuminen

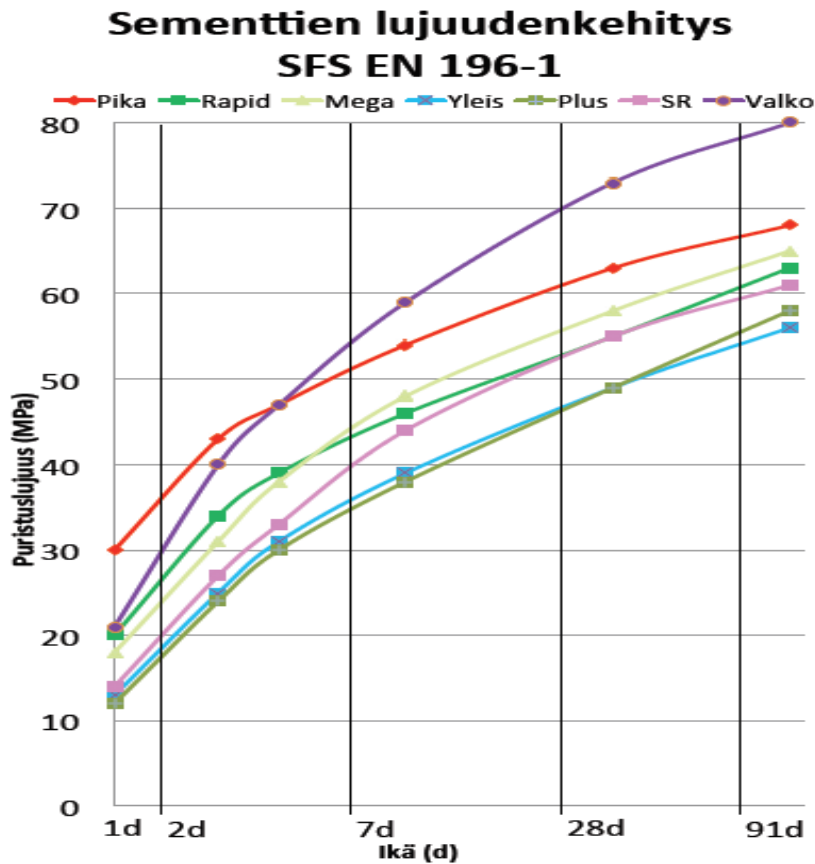
SFS-EN 196-3 -standardi määrittää standardilujuusluokkien sitoutumisajat. Lujuusluokan 52,5 alkusitoutumisajan tulee olla vähintään 45 minuuttia, lujuusluokan 42,5 vähintään 50 minuuttia ja lujuusluokan 32,5 vähintään 75 min. Kipsiä tulee lisätä sementtiä valmistettaessa, jotta saadaan sopiva sitoutumisaika. Lämpötilalla on oleellinen osuus sitoutumisessa. 10 asteen lämpötilan nousu nopeuttaa reaktiota kaksinkertaiseksi eli sitoutumisaika lyhenee puoleen. Sitoutuminen päättyy noin 4–6 tunnin kuluttua, jonka jälkeen alkaa kovettuminen eli varsinaiset lujittumisreaktiot. [1, s. 29.]

Kipsi saattaa joskus menettää kidevettä sementin jauhatuksen korkean lämpötilan vuoksi. Tätä kutsutaan valesitoutumiseksi, koska tällöin kipsi reagoi nopeasti ja betonimassa jäykistyy. Massaa uudestaan sekoittamalla jäykkyys häviää ja sementin reaktiot tapahtuvat normaalisti. [1, s. 30.]

2.4.3 Lujuudenkehitys

Veden ja sementin yhdistyessä alkaa betonin kovettuminen eli lujuudenkehitys. Betonin jälkihoito on erittäin tärkeää, jotta betoni pysyy kosteana koko lujuudenkehityksen reaktion ajan. Niin kauan, kun betonissa on reagoimatonta sementtiä ja vapaata vettä, jatkuu betonin lujuudenkehitys. Betoni alkaa jäykistyä eli sitoutua muutaman tunnin kuluttua valmistuksesta. Lämpimässä betonin lujuudenkehitysreaktiot nopeutuvat ja vastaavasti hidastuvat kylmässä. Lujittumisreaktiot nopeutuvat sementin jauhatuksen hienousasteen kasvaessa. Lujuudenkehityksen reaktiossa syntyy lämpöä. Lämpötilaa ja kovettumisaikaa mittaamalla voidaan seurata lujuuskehitystä. [4.]

Kuvassa 4 on standardin mukainen esimerkki sementtien prismalujuuksien kehityksestä.



Kuva 4. Sementtien lujuuden kehitys. [1, s. 30.]

2.4.4 Hienous

R.L. Blaine kehitti yleisimmän käytetyistä menetelmistä sementin ominaispinta-alan määrittämiseksi. Tämä perustuu ilman läpäisevyyteen ja siitä arvioidaan sementin hienous. Suomalaisen rakennussementtien hienous vaihtelee välillä 300–550 m²/kg. Hydrataatioreaktiot ja sementin lujuuden kehitys nopeutuvat hienousasteen kasvaessa. Myös vedentarpeen määrä lisääntyy hienousasteen kasvaessa halutun notkeusasteen saavuttamiseksi. [1, s. 32.]

2.4.5 Kiinto- ja irtotiheys

Sementin kiintotiheydellä tarkoitetaan kiinteän sementtimassan suhdetta tilavuuteen. Sementin irtotiheydellä taas sementin tiheyttä, kun huokokset ja rakeiden väliset tilat otetaan myös huomioon.

Pakkaamattomassa sementissä on noin 2/3 ilmaa. Vakiotilaan pakattaessa ilmasta poistuu noin 40 %. Riippuen sementtilaadusta ja pakkausasteesta sementin kiintotiheys on noin 3100 kg/m³ ja irtotiheys 1000–1400 kg/m³. [1, s.32.]

2.4.6 Lämmönkehitys

Lämmönkehityksellä on suuri merkitys varsinkin suuria betonirakenteita valmistettaessa. Sementin kemiallinen koostumus ja hienous vaikuttavat eniten lämmönkehitykseen. Betonirakenteen sisäosat lämpenevät ulko-osia nopeammin, jolloin syntyy jännitteitä ja lisäävät halkeamisriskiä. Alhaislämpösementtejä tai mahdollisimman kylmää betonimassaa käytettäessä on mahdollista vähentää halkeamisriskiä. Muita keinoja ovat lämmön poistaminen sisäänrakennetulla jäähdytysvesiputkistolla tai estämällä suurempien lämpötilaerojen syntyminen myöhemmässä vaiheessa ulkoapäin lämmittämällä. Talvibetonoinnissa lämmönkehityksestä on hyötyä nopeasti kovettuvaa sementtiä käytettäessä. Tällöin lämpötila ja lujuus kehittyvät suotuisammin ensimmäisten ja ratkaisevien vuoro-kausien ajan. [5, s. 30.]

2.4.7 Tilavuuden pysyvyys

Rajaamalla sementin sulfaattipitoisuus (SO₃) sementtityypistä riippuen 3,5 tai 4,0 %:iin estetään ettringiittilaajeneminen. Sulfaattipitoinen vesi tai maaperä saattaa aiheuttaa ettringiittilaajenemista, varsinkin jos ei ole käytetty sulfaatin kestävästä sementtiä. Vapaa-kalkkilaajenemista saattaa esiintyä, mikäli vapaa kalkkimäärä on sementtiklinkkerissä suuri. Yksi tilavuuden laajenemista aiheuttava tekijä on magnesiumlaajeneminen. Tätä tapahtuu, mikäli sementtiklinkkerin magnesiumoksidipitoisuus (MgO) on yli 5 %.

[1, s. 32.]

2.4.8 Sulfaatinkestävyys

Sementin aluminaattipitoisuus (C_3A) tulisi olla mahdollisimman pieni, mikäli tavoitellaan sulfaatinkestävää sementtiä. Sulfaatinkestäväksi sementti katsotaan olevan, mikäli se on valmistettu sementtiklinkkeristä, jonka aluminaattipitoisuus (C_3A) on korkeintaan 3 %. Mitä pienempi tämä pitoisuus on, sitä kestävämpi betoni. Ettringiittiä syntyy hydratoituneeseen aluminaatin (C_3A) reagoidessa sulfaattien kanssa. Ettringiitti on tilavuudeltaan moninkertainen lähtötuotteisiin nähden ja sisäisen paineen kasvun johdosta aiheuttaa halkeilua ja rapauttaa betonin nopeasti. [1, s. 32.]

2.4.9 Väri

Sementillä on melko pieni vaikutus betonin värieroihin. Raaka-ainepohjan erilaisuus aiheuttaa poikkeavuutta sementin väriin. Sementtityyppien vaaleus on määritelty standardin ISO 2470 mukaan. Pitkiä valmistussarjoja tehtäessä on kuitenkin suositeltavaa välttää sementtilaadun vaihtamista, koska mahdollisuus väri vaihteluihin on kuitenkin olemassa. [1, s. 33.]

2.4.10 Lämpötila

Sementin lämpötilalla on pieni vaikutus betonimassan lämpötilaan. Sementin jauhatuksen jälkeen sementin lämpötila on yli 100 °C. Esimerkkinä 300 kg/m³ sementtiä sisältävässä betonissa 10 °C korkeampi sementin lämpötila nostaa massan lämpötilaa 1 °C verran. [1, s. 33.]

2.4.11 Säilyvyys

Sementti hygroσκοoppisena aineena imee kosteutta ilmasta ja sen jälkeen myös hiilidioksidia. Säilytyksen pitkittyessä voi aiheutua paakkuuntumista ja sitoutumishäiriöitä, minkä lisäksi lujuus saattaa heiketä. Normaalioloissa 3 kuukauden varastointi voi aiheuttaa jopa 10 % lujuuden pudotuksen. Tarpeetonta varastointia varsinkin kosteissa olosuhteissa on siis syytä välttää. Huomioitavaa on, että ilmatiiviisti suljetussa tilassa sementin säilyvyys on lähes rajaton. [1, s. 25.]

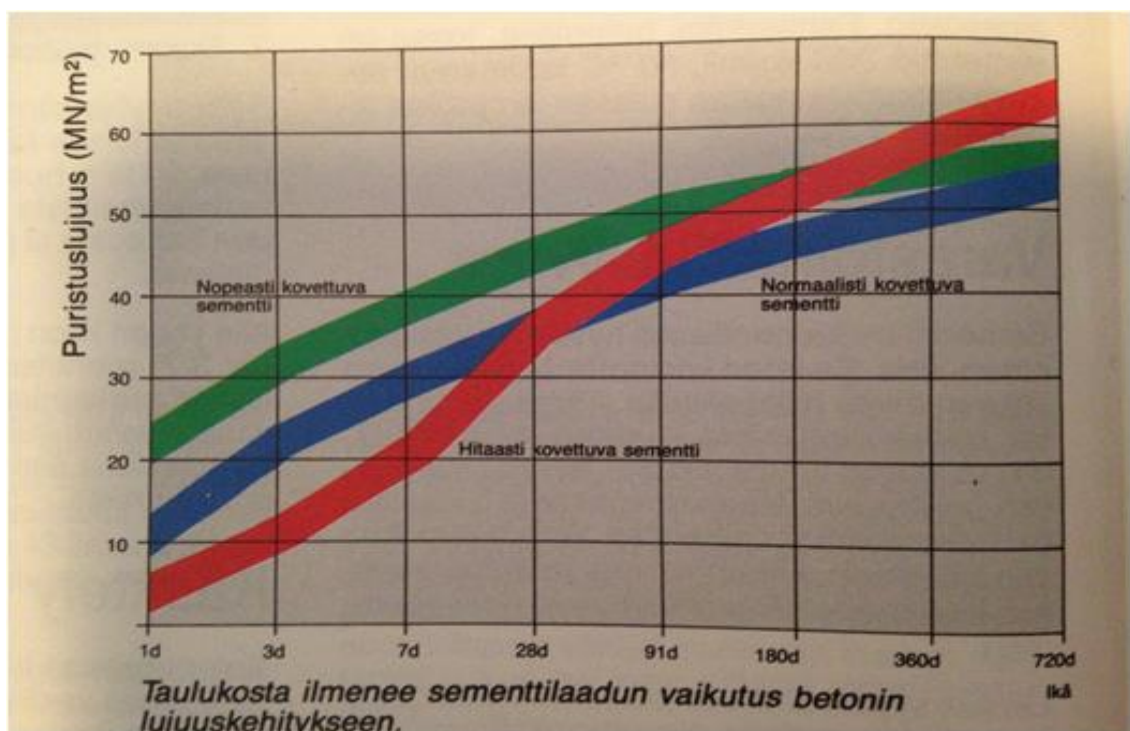
3 Betonin lujuus

Betonin lujuuden yksikkönä käytetään megapascalia (MPa) $1 \text{ MPa} = 1 \text{ MN/m}^2$.

Betonit jaetaan lujuutensa perusteella puristuslujuusluokkiin. Lujuus mitataan 150 mm:n kuutiokoekappaleista. Esimerkiksi puristusluokan C25/30 betonin lujuus on 20–30 MPa. Betoniteollisuuden käyttämät lujuudet ovat C25/30–C50/60, korkealujuusbetoneilla C55/67–C100/115. [4.]

3.1 Lujuuteen vaikuttavat tekijät

Betonin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat sementin koostumus, sementin määrä, vesi-sementtisuhde, runkoaineen lujuus ja rakeisuus, massan kovettumisikä, kovettumislämpötila, seosaineet, lisäaineet, veden puhtaus ja massan tiivistys. Kuvassa 5 esitetään sementtilajin vaikutus betonin lujuuskehitykseen. [1, s. 39]

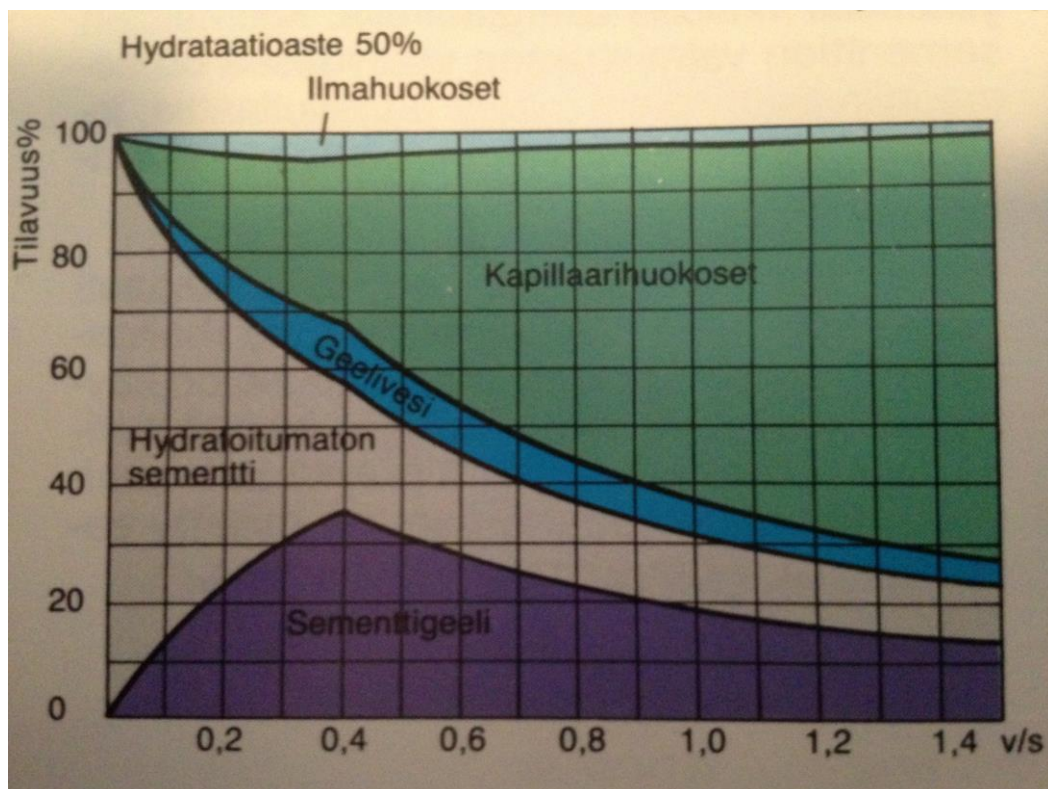


Kuva 5. Sementtilajin vaikutus betonin lujuuskehitykseen [1, s. 26.]

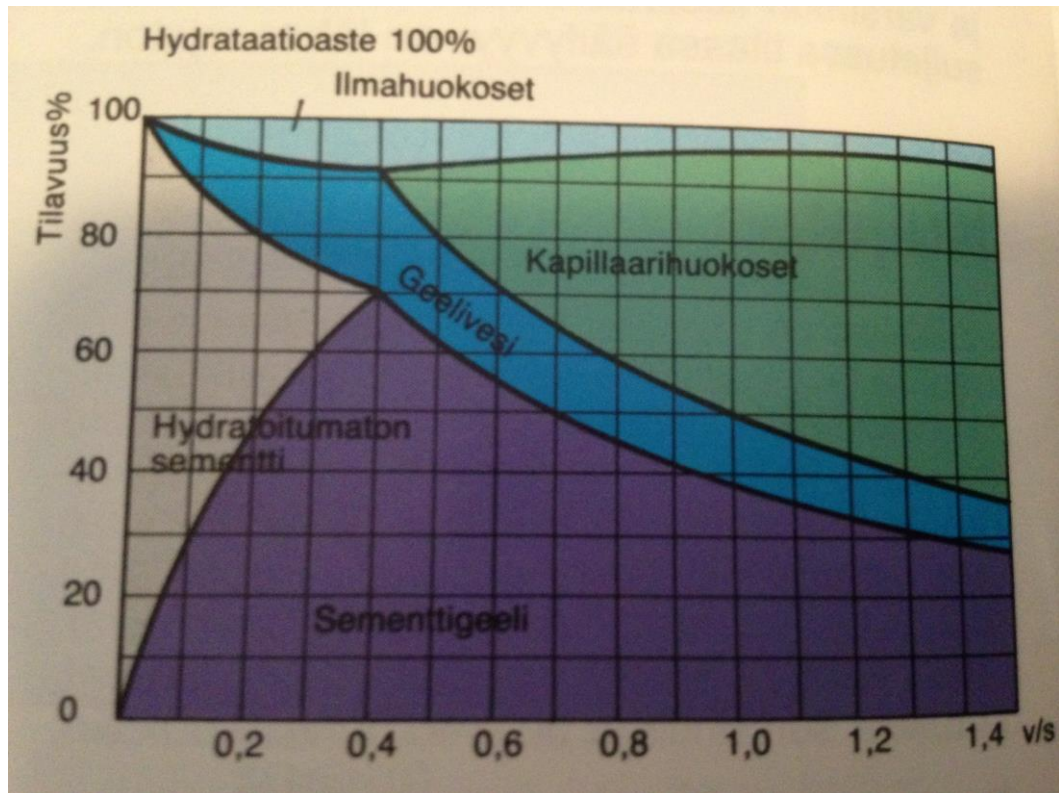
3.2 Vesi-sementtisuhte

Vesi-sementtisuhteella on suurin yksittäinen vaikutus betonin lujuuteen. Suhteella tarkoitetaan betonin sisältämän veden ja sementin painon suhdetta. Mitä enemmän betonissa on vettä yli sementin sitoutumiseen tarvittavan määrän, sitä alhaisempi on lujuus. Veden lisäys parantaa työstettävyyttä, mutta tällöin on myös lisättävä sementin osuutta toivotun lujuuden saavuttamiseksi. [4.]

Kuvissa 6 ja 7 havainnollistetaan sementtikiven rakenteen riippuvuutta vesi-sementtisuhteesta hydrataatioasteella 50 % ja 100 %. Hydrataatio tarkoittaa sementin ainesosien reagoimista veden kanssa.



Kuva 6. Hydrataatioaste 50 %. Hydrataatio on puolessa välissä, jolloin hydratoitumatonta sementtiä ja kapillaarihuukosia on vielä melko paljon ja muodostunutta sementtigeliiä vähän. [1, s. 26.]



Kuva 7. Hydrataatioaste 100 %. Hydrataatio on edennyt loppuun, jolloin sementtikivi sitoo muodostuessaan betonin runkoaineena käytetyn hiekan ja kiven lujaksi kokonaisuudeksi. [1. s. 26.]

3.3 Uusien sementtien vaikutus lujuuteen ja betonimassan ominaisuuksiin

VTT Rakennustekniikka teki uusien sementtien betonitekniisiä ominaisuuksia käsittelevän tutkimuksen Finnsementti Oy:n rahoituksella. Tutkimuksessa oli kolme keskeistä tavoitetta: tehokkaammat sementit, taloudellinen valmistusmenetelmä ja ympäristövaikutusten minimointi. Tämän tutkimuksen tulosten pohjalta vuonna 1994 uudistettiin täysin suomalaisessa sementtiteollisuudessa käytetty sementtivalikoima. [5, s. 3.]

VTT:n julkaisussa määritettiin uusien sementtien vaikutus betonin lujuudenkehitykseen, pakkasenkestävyyteen, kutistumaan, kimmomoduuliin, huokoskokojakaumaan, lämmönkehitykseen, sulfaatinkestävyyteen, kuivumisnopeuteen, karbonatisoitumiseen, viirumaan ja palonkestävyyteen.

3.3.1 Lujuudet

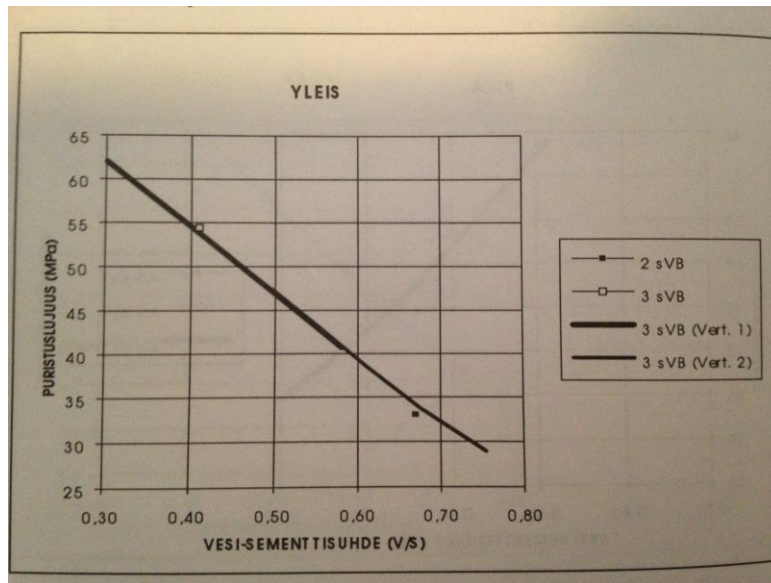
Betoneiden puristuslujuudet esitetään 28 vuorokauden ikäisinä. Vanhojen sementtien tulokset esitetään kuvissa käyrinä ja uusien sementtien tulokset pisteinä. Vanhojen sementtien käyrät perustuvat Arvo Nykäsen (6.) suhteutusohjelmaan. Käyriä on kaksi. ”Vertailubetoni 1” -tunnuksella merkitty käyrä on laskettu samalla runkoainejakaumalla kuin lujempi koebetoni. ”Vertailubetoni 2” -tunnuksella merkitty käyrä on laskettu samalla runkoainejakaumalla kuin alhaisempaa lujuusluokkaa oleva koebetoni. Vertailubetoneiden notkeudeksi oli valittu 3 sVB. Vanhoille sementeille käytetyt normilujuudet olivat taulukon 2 mukaisia [5, s. 8.]

Taulukko 2. Vanhojen sementtien normilujuudet. [5, s. 8.]

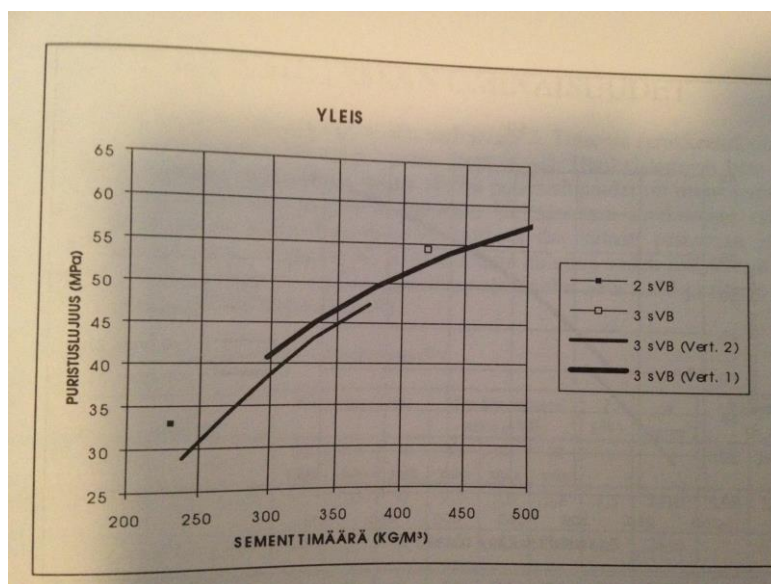
Sementti	Normilujuus (MPa)
Luja (CEM I 42,5 R)	50
Rapid (CEM I 42,5 R)	55
Pika (CEM I 52,5 R)	61
Yleis (CEM II B 42,5)	46
SR (CEM I 42,5 SR)	51

3.3.2 Uusi yleissementti

Kuvista 8 ja 9 selviää, että uudella Yleissementillä saadaan alhaisissa lujuusluokissa sama puristuslujuus kuin vanhalla Yleissementillä selvästi alhaisemmalla sementti- ja vesimäärällä. Korkeammissa lujuusluokissa uutta Yleissementtiä tarvitaan enemmän kuin vanhaa. Tarvittava vesimäärä on hieman alhaisempi kuin vanhalla Yleissementillä. [5, s. 8–9.]



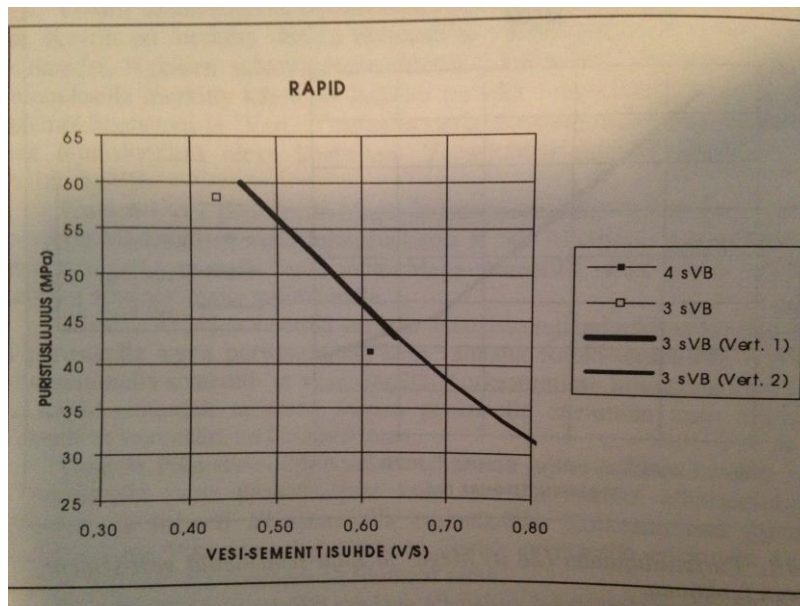
Kuva 8. Puristuslujuudet (28 d) Yleissementeillä vesi-sementtisuhteen funktiona. [5, s. 12.]



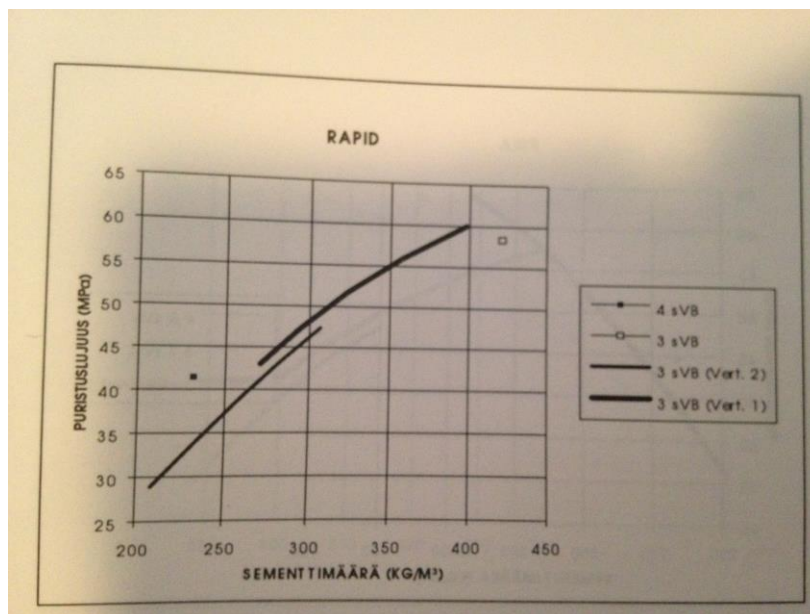
Kuva 9. Puristuslujuudet (28 d) uudella ja vanhalla Yleissementillä sementtimäärän funktiona. [5, s. 13.]

3.3.3 Uusi rapidsementti

Kuvista 10 ja 11 selviää, että uudella Rapidsementillä saadaan alhaisissa lujuusluokissa sama puristuslujuus kuin vanhalla Rapidsementillä selvästi alhaisemmalla sementti- ja vesimäärällä. Korkeammissa lujuusluokissa uutta Rapidsementtiä tarvitaan enemmän kuin vanhaa. Tarvittava vesimäärän pysyy lähes samana. [5, s. 8.]



Kuva 10. Puristuslujuudet (28 d) Rapidsementeillä vesi-sementtisuhteen funktiona. [5, s. 10.]



Kuva 11. Puristuslujuudet (28 d) uudella ja vanhalla Rapidsementillä sementtimäärän funktiona. [5, s. 11.]

4 Tutkimusmenetelmät

Insinööriyössä tutkittiin kokeellisesti kahden eri sementin vaikutusta betonin lujushajontaan. Tutkittavina sementteinä oli Finnsementin Rapid- ja Yleissementti. Tutkimusohjelman mukaisesti kummastakin sementistä pyrittiin ottamaan kaksi näytettä viikossa. Rapidsementtiä toimitettiin Konalan tehtaalle harvemmin kuin Yleissementtiä, joten näytteitä Rapidsementistä saatiin vähemmän. Sementtinäytteitä otettiin yleissementistä 25 kappaletta ja Rapidsementistä 17 kappaletta. Sementtinäytteet otettiin sementin toimittajan sementtiautoista autojen tuodessa sementtikuormaa Ruduksen Konalan tehtaalle. Finnsementin Yleissementin- ja Rapidsementin tuotantotietoja kerättiin työhön vertailuarvoksi.

Liitteinä 1 ja 2 ovat Finnsementin tuote-esitteet Yleis- ja Rapidsementeistä.

4.1 Prismakokeet

Prismakokeet tehtiin standardin SFS-EN 196-1 mukaisesti 40 mm x 40 mm x 160 mm:n kokoisilla laastiprismoilla. Laastin vesi-sementtisuhde on 0,50 ja koekappaleet säilytettiin 20-asteisessä vedessä.

Sementtiprismassa koostumus oli 1 osa sementtiä, 0,5 osaa vettä ja 3 osaa normihiekkaa. Prismoja tehtiin kolme kappaletta kutakin sementtiä kohden ja niistä mitattiin lujudet betonipuristimella 1:n, 7:n ja 28:n päivän ikäisinä.

Sementtiprismat valmistettiin mittaamalla tarkasti oikeat määrät ainesosia laboratorion vaa'alla. Määrät olivat 450 g sementtiä, 1350 g normsand-hiekkaa ja 225 g vettä. Sementtiä ja vettä sekoitettiin keskenään 30 sekuntia laboratorion Hubert-sekoittajalla. Seokseen lisättiin normihiekkaa ja sekoitettiin toiset 30 sekuntia. Sekoitin pysäytettiin 90 sekunniksi ja seinämät puhdistettiin huolellisesti seoksesta lastaa apuna käyttäen. Seos peitettiin 75 sekunniksi, jonka jälkeen sekoitettiin vielä 60 sekuntia. Tämän jälkeen seos kaadettiin puoleen väliin prismamuottia ja tärytettiin 60 kertaa kangella. Muotti täytettiin ja tärytettiin toiset 60 kertaa. Muotin pinta liipattiin ja laitettiin muovi päälle kovettumisen ajaksi. Muotit purettiin 1:n, 7:n ja 28:n vuorokauden kuluttua, jonka jälkeen koekappaleet punnittiin ja niistä mitattiin puristuslujuus.

4.2 Betonin lujuuskokeet

Puristuskokeet tehtiin standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti 150 mm:n kokoisilla koe-kuutioilla. Koekappaleet säilytettiin 20-asteisessa vedessä.

Puristuskokeita varten valmistettiin betonimassa, jonka lujuusluokka oli C25/30, suurin kiviaineksen raekoko 8 mm ja painuma 120 mm.

Painuman mittausta varten tarvittiin tasainen alusta, painumakartio, painumasauva ja mittanauha. Alustana käytetty vaneri ja painumakartio kasteltiin, jotta koko testausalusta olisi märkä eivätkä kuivat pinnat vääristäisi painuman tulosta. Painumakartio asetettiin vanerialustan keskelle ja sen päällä seistiin kartion alapuolella olevien siivekkeiden päällä. Kartio täytettiin kolmessa kerroksessa. Jokaista kerrosta tiivistettiin painumasauvalla painellen 25 kertaa. Lopuksi painumakartion pää tasoitettiin ja se nostettiin hyvin hitaasti ylös. Painuma on massan korkeimman kohdan ja painumakartion korkeuden erotus.

Kokeita varten mitattiin vesi-sementtisuhte ja lämpötila.

Puristuskokeita tehtiin Yleisementillä 25 kappaletta ja Rapidsementillä 17 kappaletta. Puristuskokeissa mitattiin lujuus koekappaleista betonipuristimella 28 vuorokauden iässä. Kokeiden jälkeen laskettiin sementtiprismakokeen ja puristuskokeen lujuudenerotus sekä määritettiin painuman ja vesimäärän vaihtelu.

Vesimäärän erotus saatiin laskemalla ensin todellinen vesimäärä. Todellinen vesimäärä saatiin yhtälöllä

$$\text{todellinen vesimäärä} = \frac{A - I \times 0,008}{0,008},$$

jossa A on annosveden määrä ja I on imeytyneen veden määrä.

Vesimäärän erotus on todellisen vesimäärän ja todellisen vesimäärän keskiarvon erotus.

4.3 Vesimäärän mittaus

Vesimäärän mittauksia tehtiin ottamalla näytteet Ruduksen Konalan betonitehtaan tuotannosta. Mitattuja vesimääriä verrattiin betonimassan tavoitevesimäärään ja käytettyihin kiviaineskosteuksiin. Lopuksi tehtiin arvio vesimäärän vaikutuksesta lujuustasoon.

Vesimäärän mittaus suoritettiin wokkipannulla ja mikroaaltouunissa. Wokkipannumittauksessa pannu peitetään kauttaaltaan ohuella betonimassan kerroksella ja betonimassa kuivataan lämmittämällä wokkipannua bunsenpolttimella. Bunsenpoltin on yleinen laboratorioväline, jolla lämmitetään esimerkiksi koeputkessa olevaa liuosta. Mikroaaltouunissa kuivattaessa märkä betonimassa asetettiin mikroaaltouuniin astiassa ja lämmitettiin täydellä teholla. Lämmitystä jatkettiin niin kauan, että betonimassa on kuiva. Tämä arvioitiin silmämääräisesti. Lopuksi laskettiin märän ja kuivan massan erotus.

0/8h tarkoittaa hienoa kiviainesta, jossa suurin raekoko on 8 mm. 0/8k tarkoittaa karkeaa kiviainesta, jossa suurin raekoko on 8 mm.

Yleissementin resepti:

- Yleissementti 339 kg/m³
- Vettä 251 l/m³
- 0/8h 55 %
- 0/8k 45 %

Rapidsementin resepti:

- Rapidsementti 339 kg/m³
- Vettä 251 l/m³
- 0/8h 55 %
- 0/8k 45 %

4.4 Valmistuksen laatu

Lopuksi seurattiin valmistuksen laatua. Tuotannosta otettiin sementtimassoja sementtien prismalujuuksien ja betonien lujuustason vertailuun. Vertailu tehtiin vertaamalla prismalujuuksia tuotannon betoninäytteiden ljuuksiin, jonka jälkeen havainnoitiin niiden yhteyttä ja muutoksia. Sementtikomponentin luku saatiin suhteutusohjelman sementtikomponentista. Sementtikomponentilla ohjataan ljuuustasoja. Vertailussa betonin yleissementteinä olivat IP- ja SK-laatu ja rapidsementtinä RA-laatu.

IP-laatu on seosaineeton lattiabetoni, joka soveltuu imukäsitteltäväksi työmaalla kulutusrasitettuihin ja pinnoitettaviin lattioihin sekä myös linjapumppaukseen. SK-laatu on säännestävä rakennebetoni, joka kestää rapautumatta toistuvaa pakkasrasitusta betonin sisältämien suojuhuokosten ansiosta. RA-laatu on nopeasti kovettuva betoni, jota käytetään esimerkiksi ulkovaluissa viileissä olosuhteissa. Tällöin betoni ei pääse jäätymään ennen kovettumista.

5 Tulokset

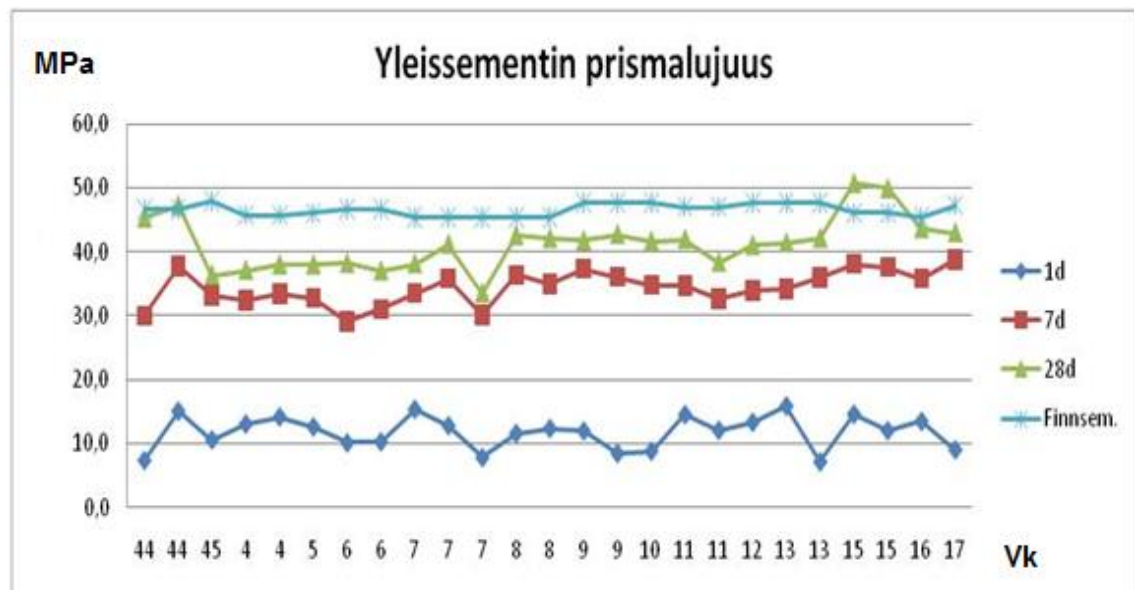
5.1 Yleissementin prismalujuus

Taulukossa 3 on taulukoituna Yleissementin prismalujuudet sekä vertailukohtana Finnsementin laaturaportit. Laaturaportissa on lastaussiiloista otettujen näytteiden puristuslujuus standardin SFS-EN 196-1 mukaisesti tehtynä. Työhön on kerätty puristuslujuus 28 vuorokauden iässä.

Taulukko 3. Yleissementin prismalujuudet. Vertailuarvoina Finnsementin laaturaportteista saadut puristuslujuudet 28 vuorokauden iässä.

	Yleissementin prismalujuudet			Finnsementin laaturaportti
	1d (MPa)	7d (MPa)	28d (MPa)	28d (MPa)
	7,5	30	45,3	46,7
	15,2	37,7	47,2	46,7
	10,7	33,2	36,4	48
	13,1	32,3	37,1	45,7
	14,2	33,3	38	45,7
	12,7	32,7	38	46
	10,2	29	38,2	46,7
	10,4	31	37	46,7
	15,4	33,5	38,1	45,3
	12,9	35,8	41,2	45,3
	7,9	30,1	33,5	45,3
	11,7	36,3	42,6	45,3
	12,4	34,9	42,1	45,3
	12,1	37,3	41,8	47,7
	8,6	36	42,7	47,7
	8,9	34,7	41,7	47,7
	14,6	34,7	42	47
	12,2	32,6	38,3	47
	13,4	34	41	47,7
	16	34,1	41,4	47,7
	7,2	35,8	42,1	47,7
	14,7	38,1	50,7	46
	12,1	37,6	49,9	46
	13,6	35,7	43,6	45,3
	9,1	38,7	43	47,3
Keskiarvo	11,9	34,4	41,3	46,5
Keskihajonta	2,59	2,63	4,07	0,98

Kuvassa 12 on Yleissementin prismalujuus 1:n, 7:n ja 28:n vuorokauden iässä. Vertailuna on Finnsementiltä saadut prismalujuudet.



Kuva 12. Yleissementin prismalujuus. Vertailuarvoina Finnsementin laaturaporteista saadut Yleissementin lujuudet 28 vuorokauden ikäisinä.

Taulukossa 4 esitetään Yleissementin prismalujuuksien keskihajonta sekä hajonnan osuus 28 vuorokauden iässä.

Taulukko 4. Yleissementin prismalujuuksien keskihajonta.

Ikä	Lujuus, (MPa)	Keskihajonta
1 d	11,9	2,59
7 d	34,4	2,63
28 d	41,3	4,07
Finnsementti		
28 d	46,5	0,98
Hajonnan osuus 28 d	Konala 9,8 %	Finnsementti 2,1 %

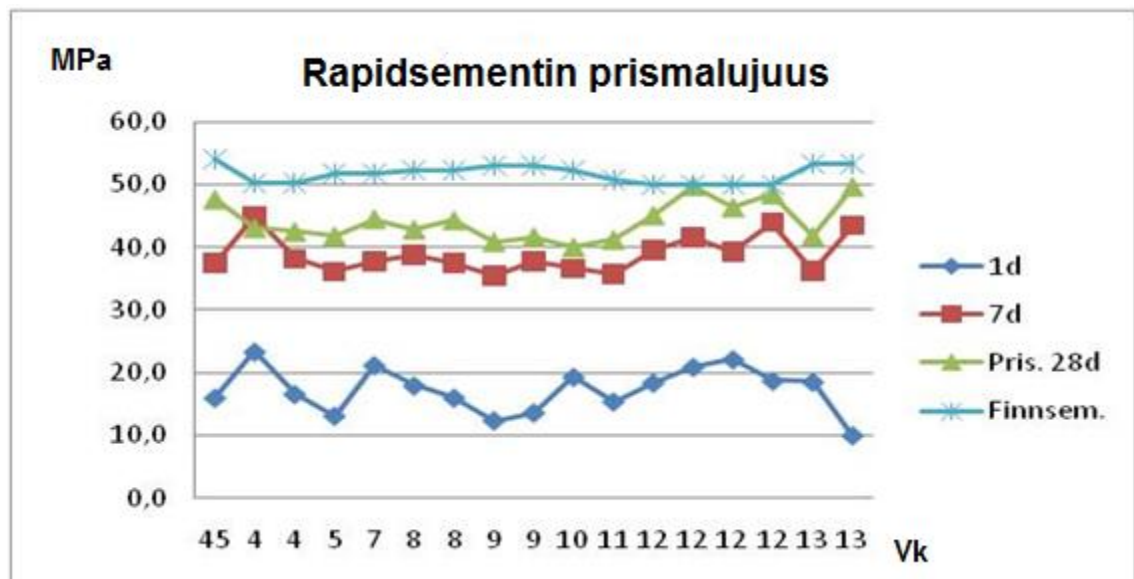
5.2 Rapidsementin prismalujuus

Taulukossa 5 on taulukoituna Rapidsementin prismalujuudet sekä vertailukohtana Finnsementin laaturaportti kyseisiltä viikoilta.

Taulukko 5. Rapidsementin prismalujuudet. Vertailuarvoina Finnsementin laaturaportista saadut puristuslujuudet 28 vuorokauden iässä.

	Rapidsementin prismalujuudet			Finnsementin laaturaportti
	1d Mpa	7d Mpa	28d Mpa	28d Mpa
	16,1	37,5	47,6	54
	23,4	44,9	42,9	50,3
	16,7	38,1	42,4	50,3
	13,2	36,1	41,7	51,7
	21,3	37,7	44,4	51,7
	18	38,7	42,8	52,3
	16,1	37,4	44,2	52,3
	12,5	35,4	40,8	53
	13,7	37,7	41,6	53
	19,4	36,6	39,9	52,3
	15,5	35,6	41,1	50,7
	18,5	39,5	45	50
	21	41,4	49,7	50
	22,2	39,2	46,3	50
	18,8	44	48,4	50
	18,6	36,2	41,6	53,3
	10,1	43,4	49,6	53,3
Keskiarvo	17,4	38,8	44,1	51,7
Keskihajonta	3,35	2,95	3,15	1,4

Kuvassa 13 on Rapidsementin prismalujuus 1:n, 7:n ja 28:n iässä. Vertailuna on Finnsementiltä saadut prismalujuudet.



Kuva 13. Rapidsementin prismalujuus.

Taulukossa 6 esitetään Rapidsementin prismalujuuksien keskihajonta sekä hajonnan osuus 28 vuorokauden iässä.

Taulukko 6. Rapidsementin prismalujuuksien hajonta.

Ikä	Lujuus (MPa)	Keskihajonta
1 d	17,4	3,65
7 d	38,8	2,95
28 d	44,1	3,15
Finnsementti		
28 d	51,7	1,40
Hajonnan osuus 28 d	Konala 7,1 %	Finnsementti 2,7 %

5.3 Betonin puristuskokeet, Yleissementti

Taulukossa 7 on Yleissementin puristuskokeiden tulokset. Puristuskokeessa mitattiin painuma, vesimäärän erotus, veden määrä, vesi-sementtisuhte, lämpötila ja lujuus 28 vuorokauden iässä. Vesimäärän erotus laskettiin vesimäärän ja todellisen vesimäärän keskiarvon erotuksesta

Taulukko 7. Betonin puristuskoe C25/30 #8, painuma 120 mm.

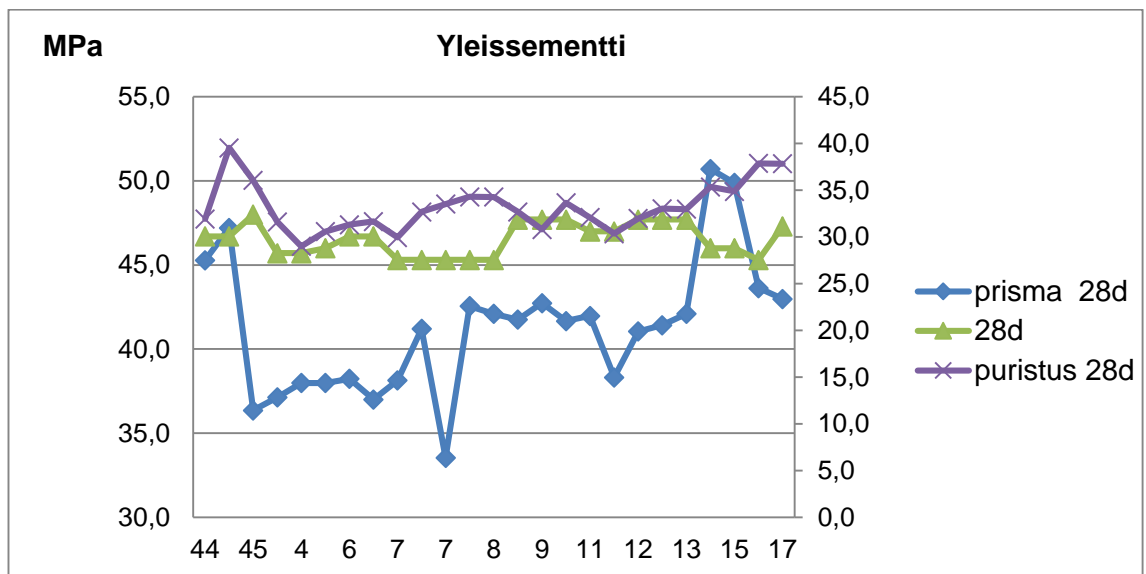
	pai- numa (cm)	vesi (l)	vesimäärän erotus (l)	v/s	lämpötila (°C)	Puristus- voima (kN)	Lujuus 28d (MPa)
	125	230	7	0,679	23,3	328,9	31,9
	127	218	-6	0,642	22,9	407,2	39,5
	120	220	-4	0,648	23,4	371,5	36,1
	125	229	5	0,675	27,9	325,7	31,6
	140	225	1	0,664	24,3	298,7	29
	140	232	8	0,685	28,3	314,9	30,6
	115	228	4	0,671	23,6	322,5	31,3
	115	224	0	0,66	26,5	326,1	31,7
	110	218	-5	0,644	23,7	308,4	29,9
	125	222	-1	0,656	24	336,7	32,7
	140	217	-6	0,641	22,6	345,3	33,5
	115	233	9	0,687	27,8	353,3	34,3
	130	229	5	0,675	23,8	353,1	34,3
	130	222	-1	0,655	20,9	336,7	32,7
	130	221	-3	0,652	20,7	317,3	30,8
	130	224	1	0,662	22,4	346,7	33,7
	130	220	-4	0,649	22,3	330,6	32,1
	130	228	4	0,672	24,7	312,7	30,4
	130	226	2	0,667	21,6	329,5	32
	130	219	-4	0,647	22,5	340,1	33
	130	229	5	0,675	20,9	339,6	33
	130	222	-2	0,655	18,6	364,2	35,4
	120	225	1	0,664	19,3	359,3	34,9
	120	214	-10	0,631	22	390,2	37,9
	140	217	-7	0,64	18,7	389,7	37,8
Keskiasrvo	127	224	0		23		33,2
Keskihajonta	8	5	5		3		2,62

Taulukkoon 8 on laskettu Yleissementin prisma- ja puristuskokeiden keskihajonnat, näiden erotus. Painuman vaihtelun keskiarvo on 127 mm ja keskihajonta 8 mm. Vesimäärän vaihtelun keskiarvo on 224 l/m³ ja keskihajonta 5 l/m³.

Taulukko 8. Yleissementin prisma- ja puristuskokeiden keskihajonnat ja niiden erotus.

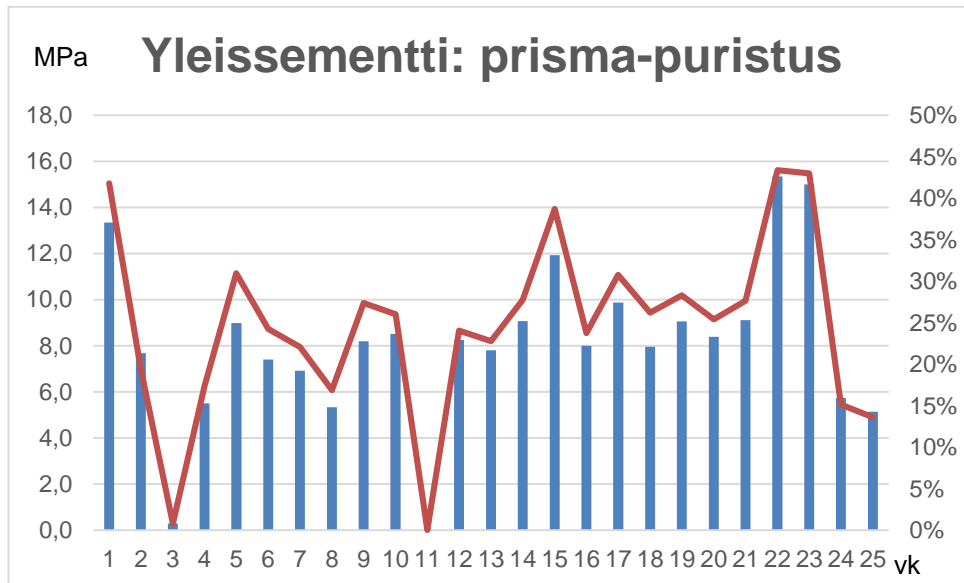
	Lujuus (MPa)	Keskihajonta
Sementtiprismakoe Konala	41,3	4,07
Sementtiprismakoe Finn- sementti	46,5	0,98
Puristuskoe C25/30 #8	33,2	2,62
Erotus sementtiprismakoe Konala – puristuskoe C25/30 #8	8,10	3,57

Kuvassa 14 on 28 vuorokauden yleissementin lujuuksien vertailu.



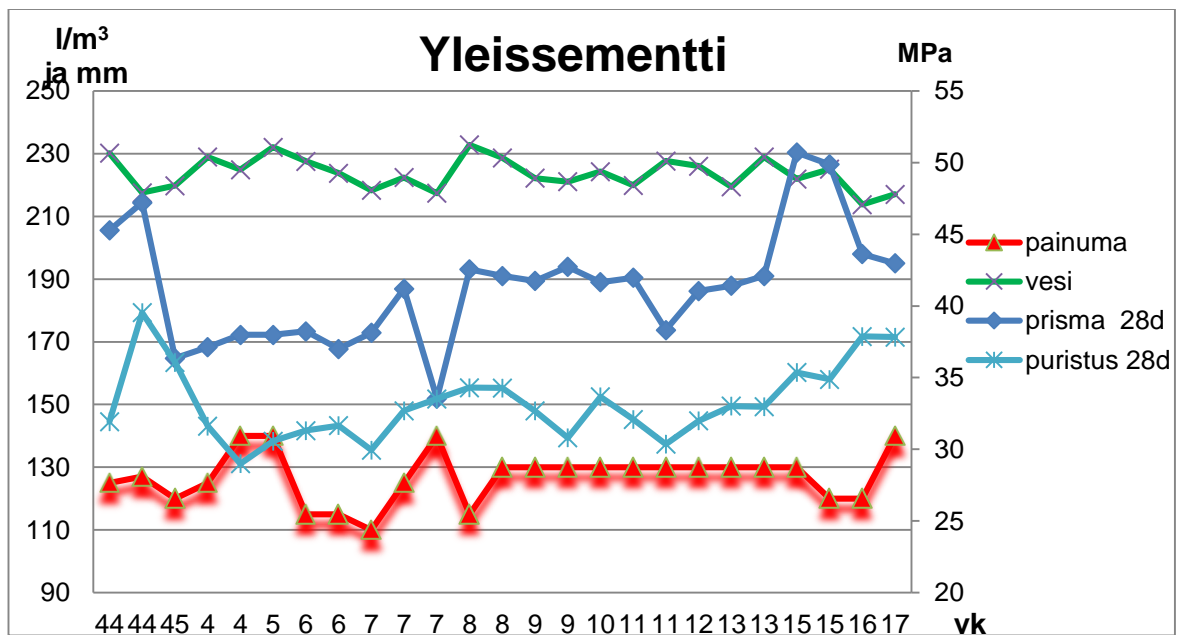
Kuva 14. Yleissementin lujuuksien vertailu.

Kuvassa 15 on Yleissementin prismakokeiden ja puristuskokeiden lujuuksien erotus. Sinisellä palkilla ja lujuuksien prosentuaalinen erotus punaisella viivalla esitettyinä.



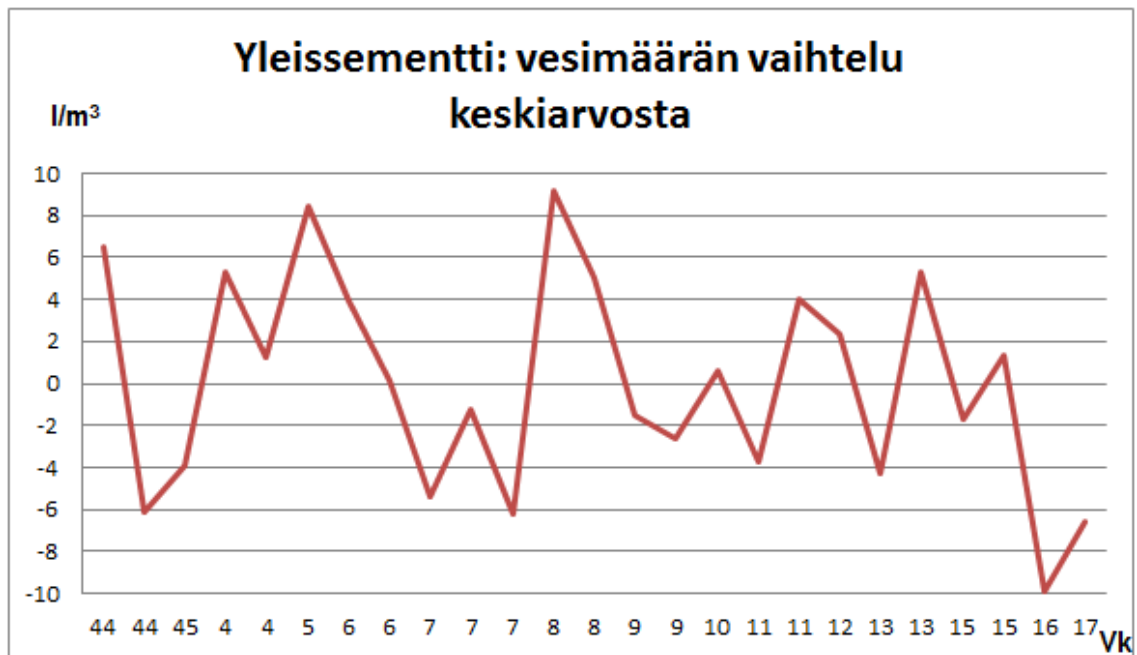
Kuva 15. Prismakokeiden ja puristuskokeiden erotus sekä lujuuksien prosentuaalinen erotus.

Kuvassa 16 on Yleissementin puristuskokeiden painuman ja vesimäärän vertailu prisma- ja puristuskokeiden lujuuksiin.



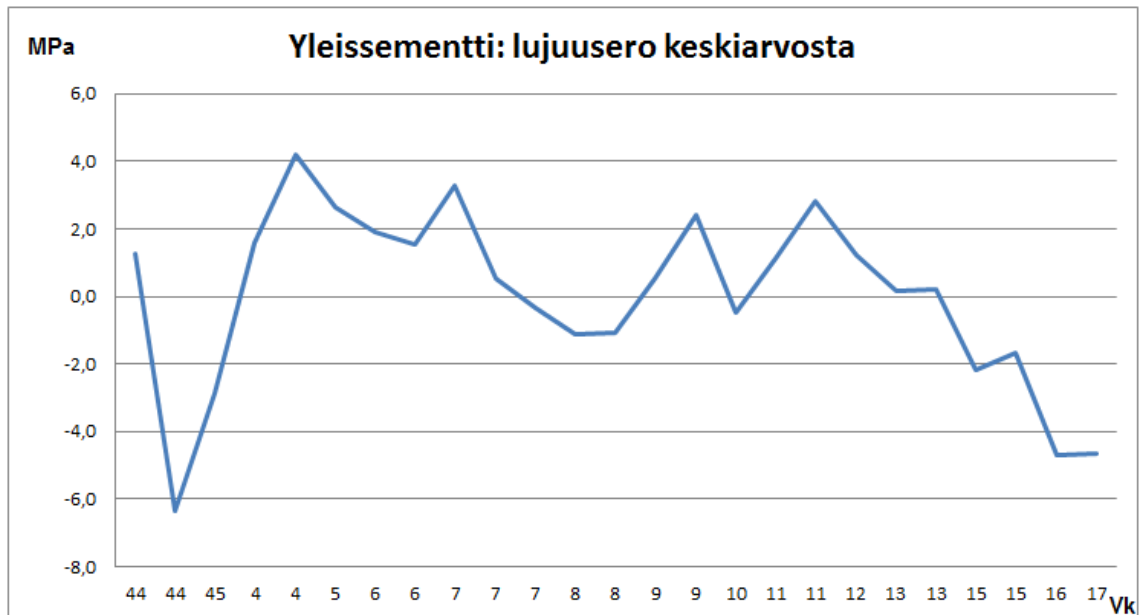
Kuva 16. Painuman ja vedenmäärän vertailu lujuuksiin.

Kuvassa 17 on Yleisementin vesimäärän vaihtelu vesimäärän keskiarvosta. Vesimäärän vaihtelu on toteutuneen vesimäärän ero tavoitemäärään.



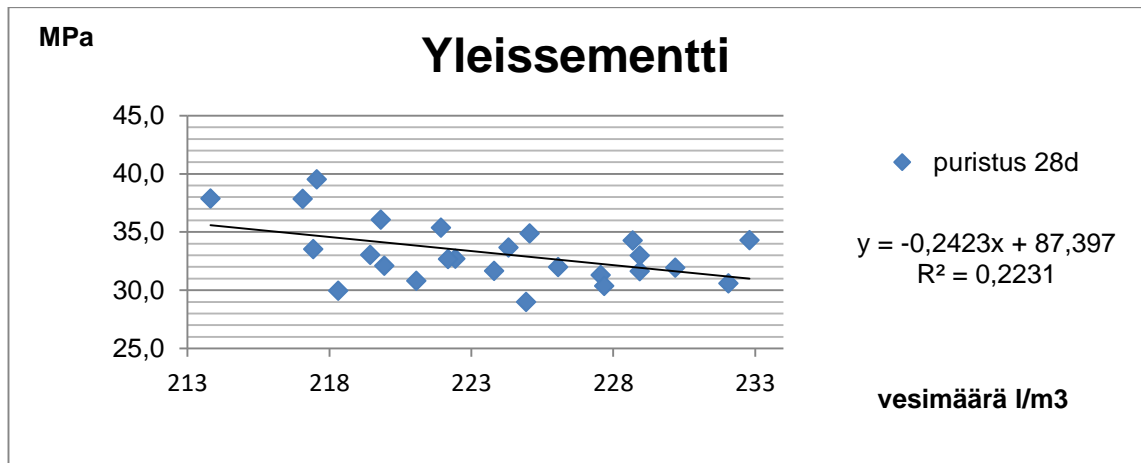
Kuva 17. Vesimäärän vaihtelu keskiarvosta.

Kuvassa 18 on Yleisementin lujuusero prisma- ja puristuslujuuden keskiarvosta.



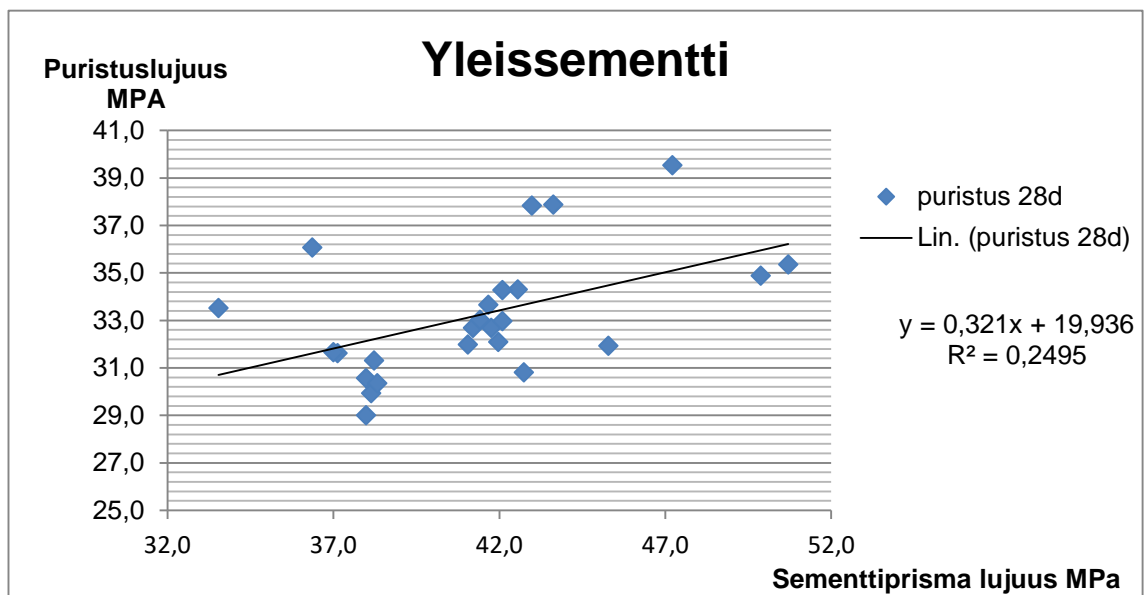
Kuva 18. Yleisementin lujuusero lujuuksien keskiarvosta.

Kuvassa 19 on Yleissementin puristuskokeiden lujuuksien suhde vesimäärään.



Kuva 19. Puristuskokeiden lujuuksien suhde vesimäärään.

Kuvassa 20 on Yleissementin prisma- ja puristuslujuuksien suhde.



Kuva 20. Prisma- ja puristuslujuuksien suhde.

5.4 Betonin puristuskokeet, Rapidsementti

Taulukossa 9 on Rapidsementin puristuskokeiden tulokset. Puristuskokeessa mitattiin painuma, vesimäärän erotus, vesi-sementtisuhte, lämpötila ja lujuus 28 vuorokauden iässä.

Taulukko 9. Puristuskoe C25/30 #8, painuma 120 mm.

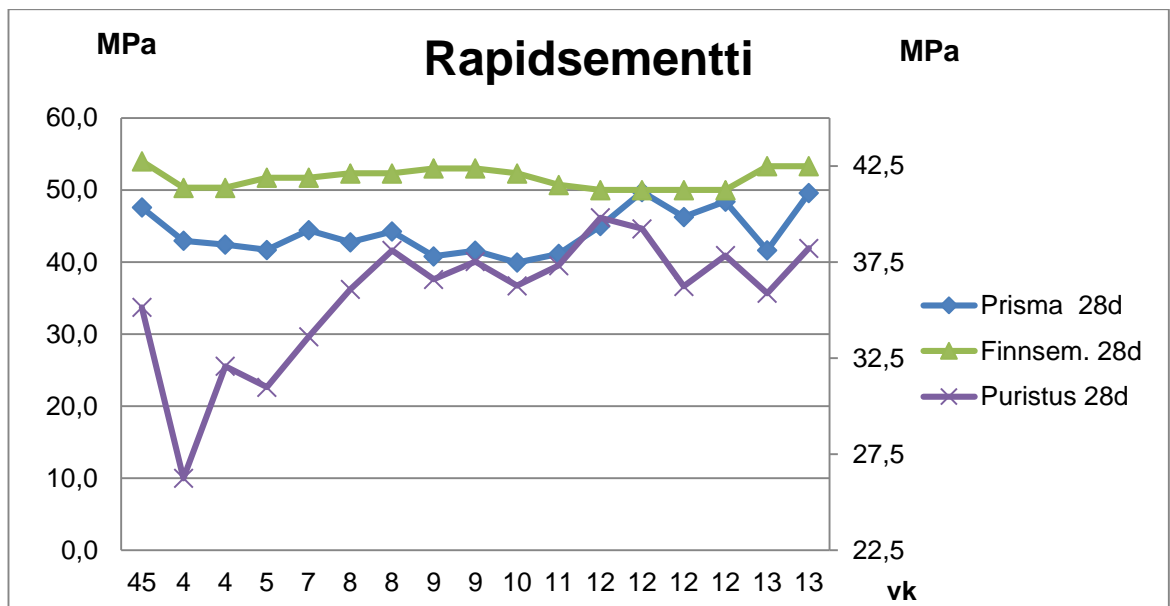
	pai- numa (cm)	vesi (l)	vesimää- rän erotus (l)	v/s	lämpötila (°C)	Puristus- voima (kN)	Lujuus 28d (MPa)
	125	221	-2	0,653	22	362	35,1
	125	235	12	0,694	29,1	270,4	26,2
	135	226	2	0,666	26,5	330,5	32,1
	115	237	14	0,7	23,2	319,2	31
	120	220	-4	0,649	21,1	346,2	33,6
	130	228	4	0,672	25	371,6	36,1
	120	223	-1	0,658	23,6	392,5	38,1
	125	219	-5	0,646	23,9	377	36,6
	130	218	-6	0,643	22	386,6	37,5
	120	226	2	0,667	20,3	373,6	36,3
	130	215	-9	0,634	19	384,4	37,3
	120	228	5	0,673	21	410	39,8
	130	225	1	0,663	23,4	404,1	39,2
	120	224	1	0,661	20,3	373,3	36,2
	135	224	0	0,66	18,1	389,8	37,8
	130	220	-4	0,649	20,4	369,6	35,9
	115	228	5	0,673	21,4	393,7	38,2
Keskiarvo	125,0	224,6	0,9		22,4		35,7
Keskihajonta	6,37	5,82	5,82		2,76		3,38

Taulukkoon 10 on laskettu Rapidsementin prisma- ja puristuskokeiden keskihajonnat, näiden erotus sekä painuman ja vesimäärän vaihtelu. Painuman vaihtelun keskiarvo on 125 mm ja keskihajonta 6,5 mm. Vesimäärän vaihtelun keskiarvo on 225 l/m³ ja keskihajonta 6 l/m³

Taulukko 10. Rapidsementin prisma- ja puristuskokeiden keskihajonnat ja niiden erotus.

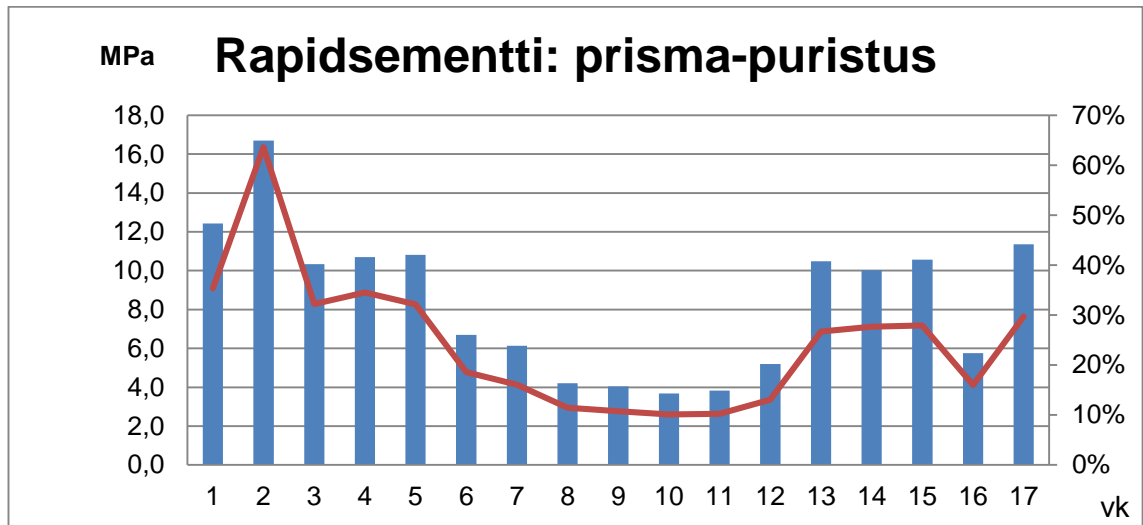
	Lujuus (MPa)	Keskihajonta
Sementtiprismakoe Konala	44,1	3,15
Sementtiprismakoe Finnsementti	51,7	1,40
Puristuskoe C25/30 #8	35,7	3,38
Erotus sementtiprismakoe Konala – Puristuskoe C25/30 #8	8,40	3,76

Kuvassa 21 on 28 vuorokauden Rapidsementin lujuuksien vertailu.



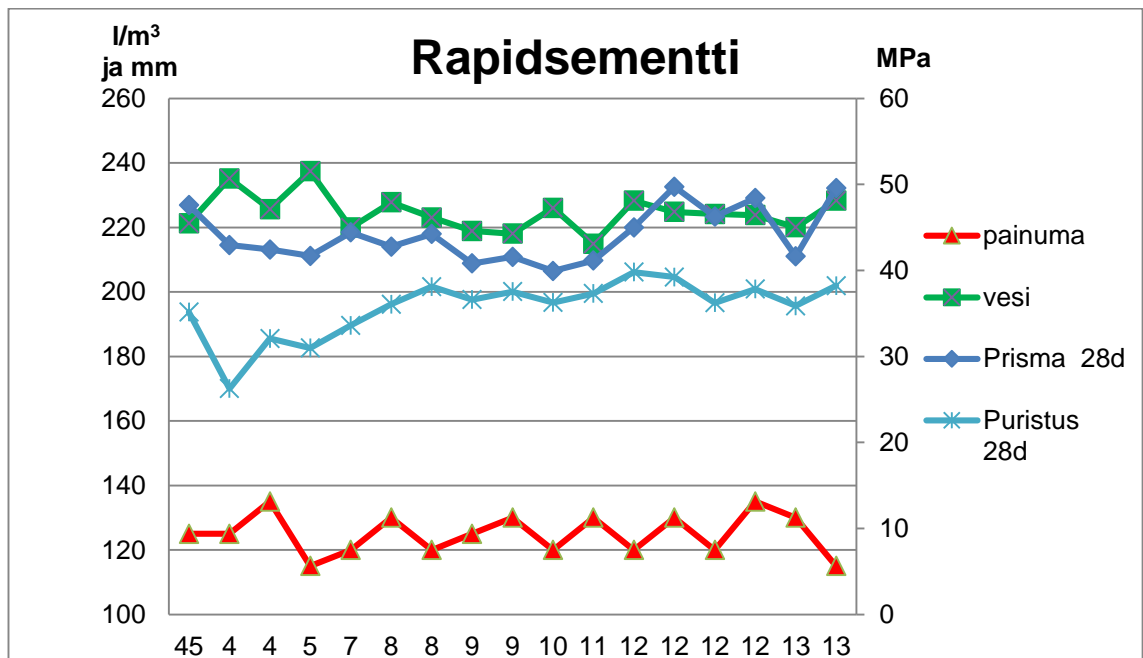
Kuva 21. Prisma- ja puristuskokeiden sekä Finnsementin lujuuksien vertailu 28 vuorokauden iässä.

Kuvassa 22 on Rapidsementin prismakokeiden ja puristuskokeiden lujuuksien erotus sinisellä palkilla sekä lujuuksien prosentuaalinen erotus punaisella viivalla esitettyinä..



Kuva 22. Prisma- ja puristuskokeen lujuuksien erotus erotus sekä prosentuaalinen erotus.

Kuvassa 23 on Rapidsementin laastikokeiden painuman ja vesimäärän vertailu prisma- ja puristuskokeiden lujuuksiin.



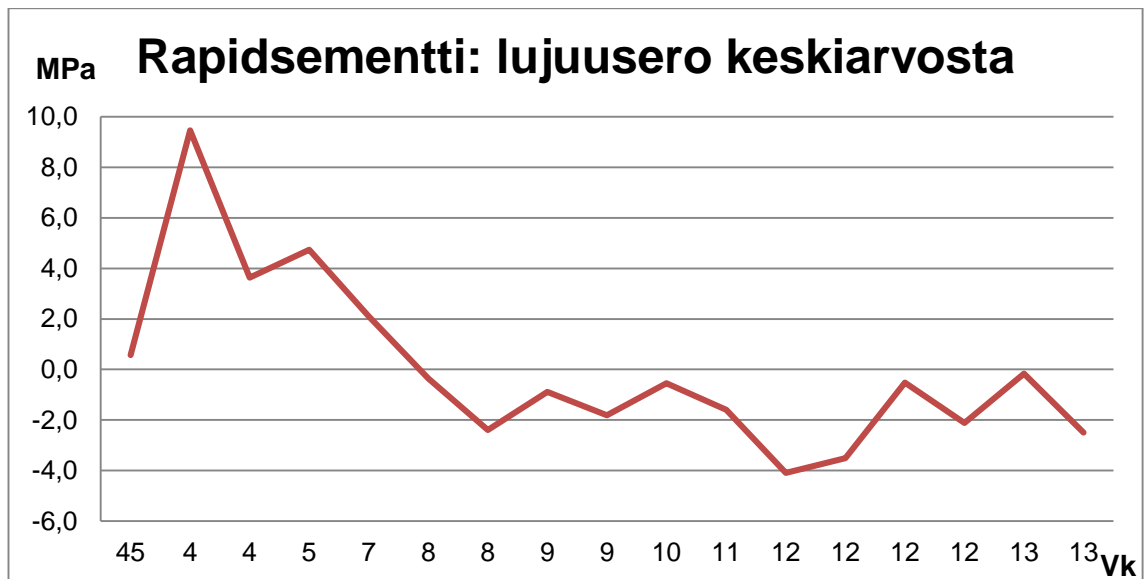
Kuva 23. Painuman ja vedenmäärän vertailu lujuuksiin.

Kuvassa 24 on Rapidsementin vesimäärän vaihtelu vesimäärän keskiarvosta. Vesimäärän vaihtelu on toteutuneen vesimäärän ero tavoitemäärään.



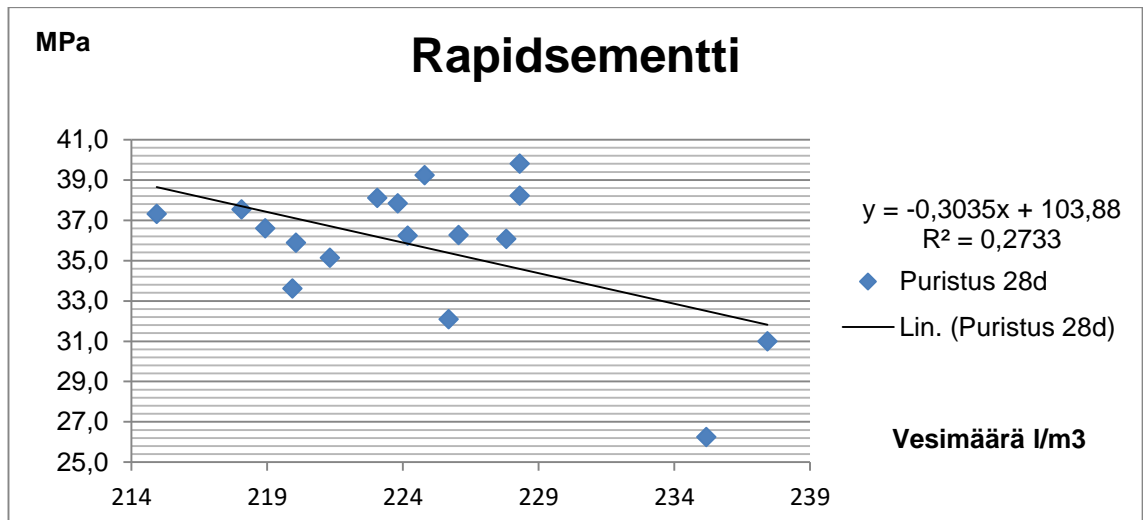
Kuva 24. Vesimäärän vaihtelu keskiarvosta.

Kuvassa 25 Rapidsementin lujuusero prisma- ja puristuslujuuden keskiarvosta.



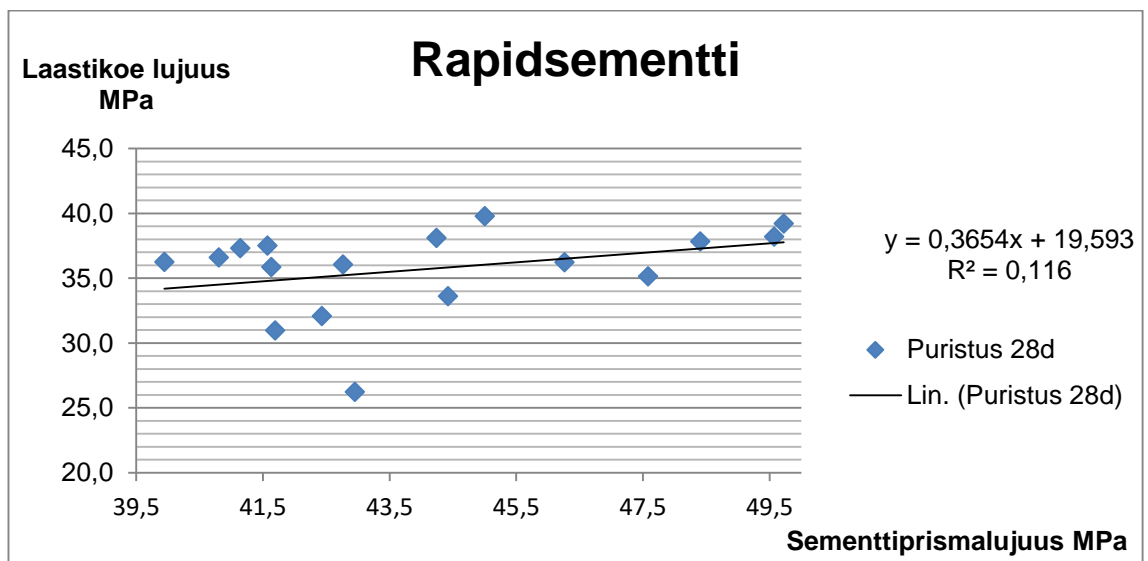
Kuva 25. Rapidsementin lujuusero lujuuksien keskiarvosta.

Kuvassa 26 rapidsementin puristuskokeiden lujuuksien suhde vesimäärään.



Kuva 26. Puristuskokeen lujuuksien suhde vesimäärään.

Kuvassa 27 Rapidsementin prisma- ja puristuslujuuksien suhde.



Kuva 27. Prisma- ja puristuslujuuksien suhde.

5.5 Vesimäärän mittaus

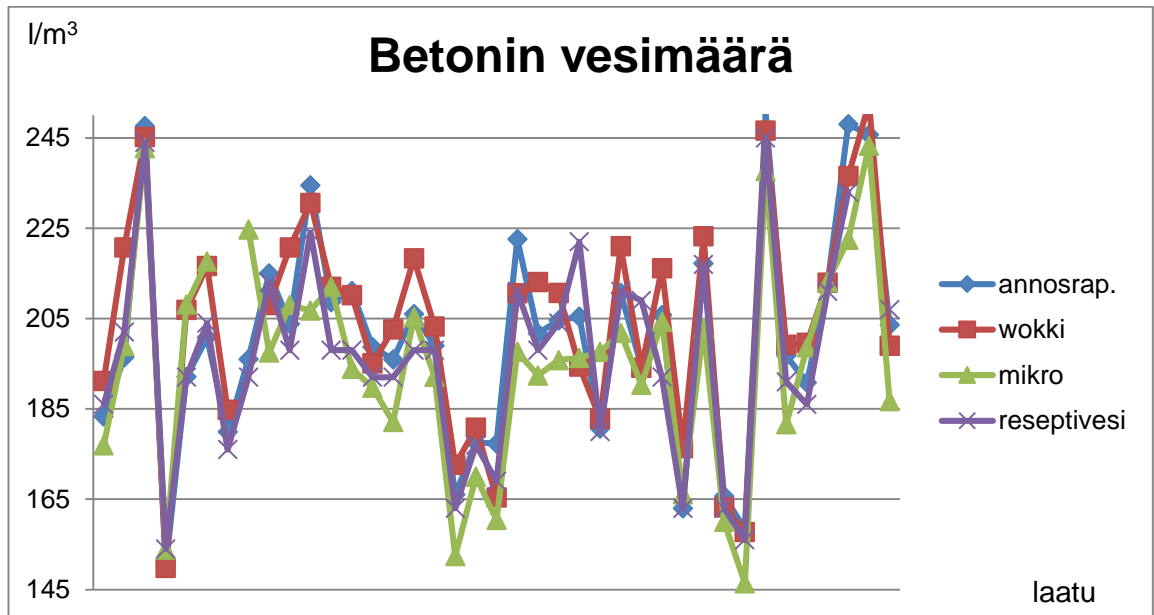
Taulukossa 11 on tuotannosta otetut vedenmäärän mittaukset, puristuslujuus 28 vuorokauden iässä, vedenimu ja painuma. Vedenimu on vesimäärän ja imeytyneen vesimäärän summa eli todellinen veden määrä.

Tehollinen vesimäärä tarkoittaa kokonaisvesimäärästä eli lisätyn veden sekä mahdollisen lisäaineen mukana tulleen veden määrästä vähennetään betonin valmistuksen yhteydessä imeytyvän veden määrä. [7.]

Taulukko 11. Konalan betonitehtaan tuotannosta saadut vesimäärän mittaukset, puristuslujuudet ja painuma.

Resepti		mitattu vesimäärä (l/m ³)				
Sementti (kg)	Resepti (l/m ³)	wokki	mikro	tehollinen	vedenimu (l/m ³)	painuma (cm)
	186	191,2	176,9	177,3	181,7	
	202	220,7	198,9	190,4	194,8	
355	244	245,2	242,7	241,6	246	21
357	154	149,8	153,8	144,1	148,5	12
281	192	206,9	208,1	186,1	190,5	8
	204	216,6	217,6	194,8	199,2	
364	176	184,8		173,9	178,3	20
280	192		224,7	190	194,4	10
327	213	208	197,5	209	213,4	13
	198	220,7	207,96	197,8	202,2	
316	224	230,6	206,8	228,5	232,9	11
310	198	212	212	202,6	207	16
	198	210,2	193,9	205,1	209,5	
	192	195,1	189,7	192,7	197,1	
	192	202,6	182,1	189,9	194,3	
	198	218,3	205,3	200	204,4	
310	198	203,2	192,1	193	197,4	15
359	163	172,6	152,4	160	164,4	15
	177	180,8	170	171,6	176	
352	169	165,4	160,4	171,3	175,7	10
311	211	210,6	197,6	216,6	221	15
311	198	213,1	192,4	195,7	200,1	13
	204	210,7	195,8	198,6	203	
290	222	194,4	196,3	199,4	203,8	15
298	180	182,8	197,6	174,6	179	13
309	211	221	201,8	204,7	209,1	17
	209	194,1	190,3	188,3	192,7	
302	192	216,1	204,3	199,8	204,2	12
358	163	176,3	166,1	157	161,4	16
336	217	223,2	202,9	211,2	215,6	16
340	163	163,2	160	159,7	164,1	15
352	156	157,7	146,4	152,4	156,8	10
353	245	246,6	237,7	244,4	248,8	16
396	191	199,2	181,6	190,8	195,2	15
227	186	199,6	198,6	184,8	189,2	10
309	211	212,9	213,1	206,5	210,9	17
432	233	236,5	222,4	242	246,4	13
334		252,7	243,3	239,7	244,1	20
404	207	199	186,7	197,6	202	11

Kuvassa 28 on annosrapotin, reseptiveden sekä wokkipannulla ja mikroaaltouunilla mitatut vesimäärät.



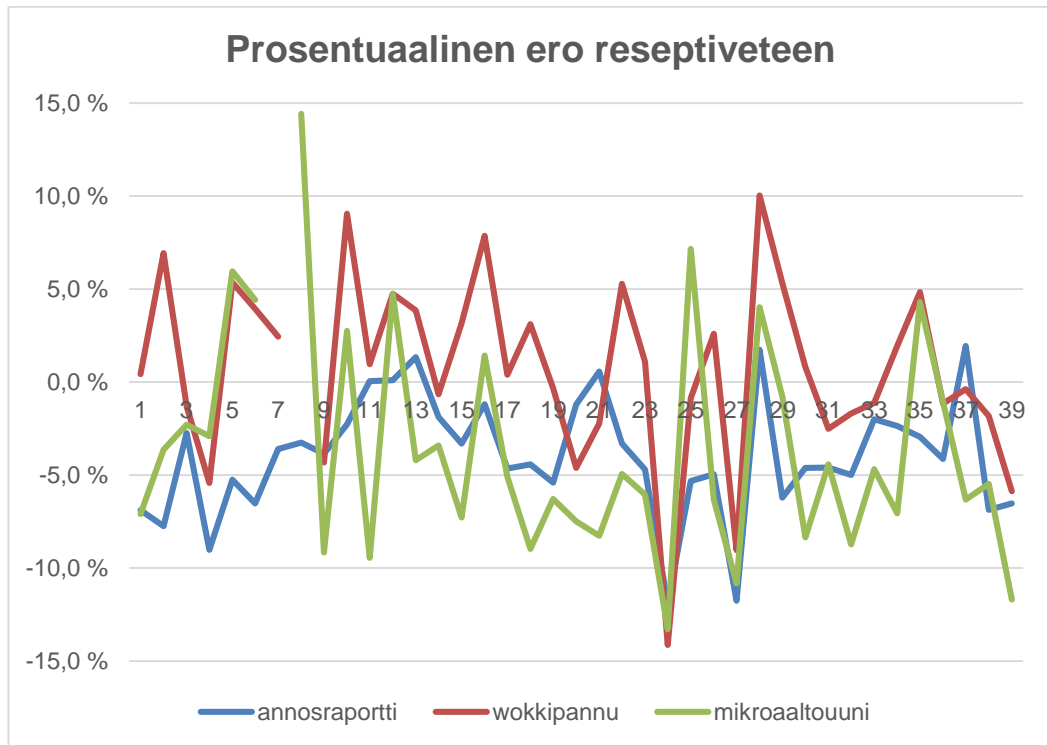
Kuva 28. Betonin vesimäärä.

Taulukossa 12 on annosraportin, wokkipannun ja mikroaaltouunin vesimäärien ero reseptiveteen.

Taulukko 12. Vesimäärän ero reseptiveteen.

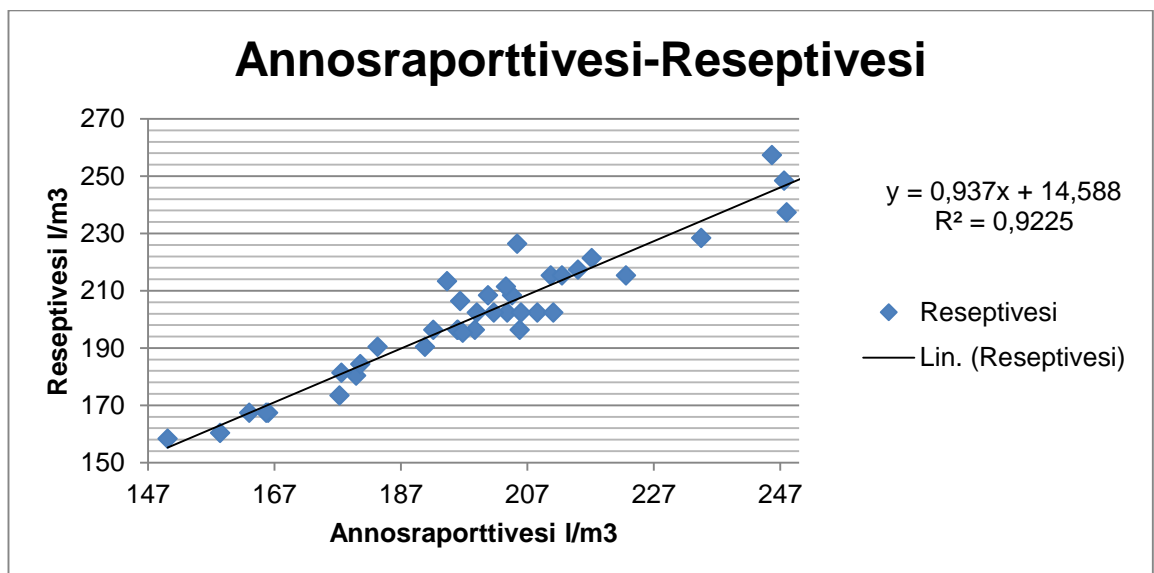
Ero reseptivesimäärään			
Reseptivesi (l/m ³)	annosraportti (l/m ³)	wokki (l/m ³)	mikro (l/m ³)
190	-9	-1	14
206	-12	-14	8
248	-2	3	6
158	-10	9	5
196	-6	-11	-12
208	-9	-8	-9
180	-2	-4	
196	-2		-28
217	-4	9	20
202	0	-18	-6
228	5	-2	22
202	5	-10	-10
202	7	-8	9
196	1	1	7
196	-2	-6	14
202	2	-16	-3
202	-5	-1	10
167	-3	-5	15
181	-5	1	11
173	2	8	13
215	6	5	18
202	-2	-11	10
208	-5	-2	13
226	-23	32	30
184	-5	2	-13
215	-6	-6	14
213	-21	19	23
196	8	-20	-8
167	-6	-9	1
221	-6	-2	19
167	-3	4	7
160	-4	3	14
249	-1	3	12
195	0	-4	14
190	-1	-9	-8
215	-5	3	2
237	9	1	15
257	-13	5	14
211	-9	12	25
keskiarvo	-4	-1	8
keskihajonta	6,8	9,9	12,3

Kuvassa 29 on annosraportin, wokkipannun ja mikroaaltouunin vesimäärän prosentuaalinen ero annosraporttiin.



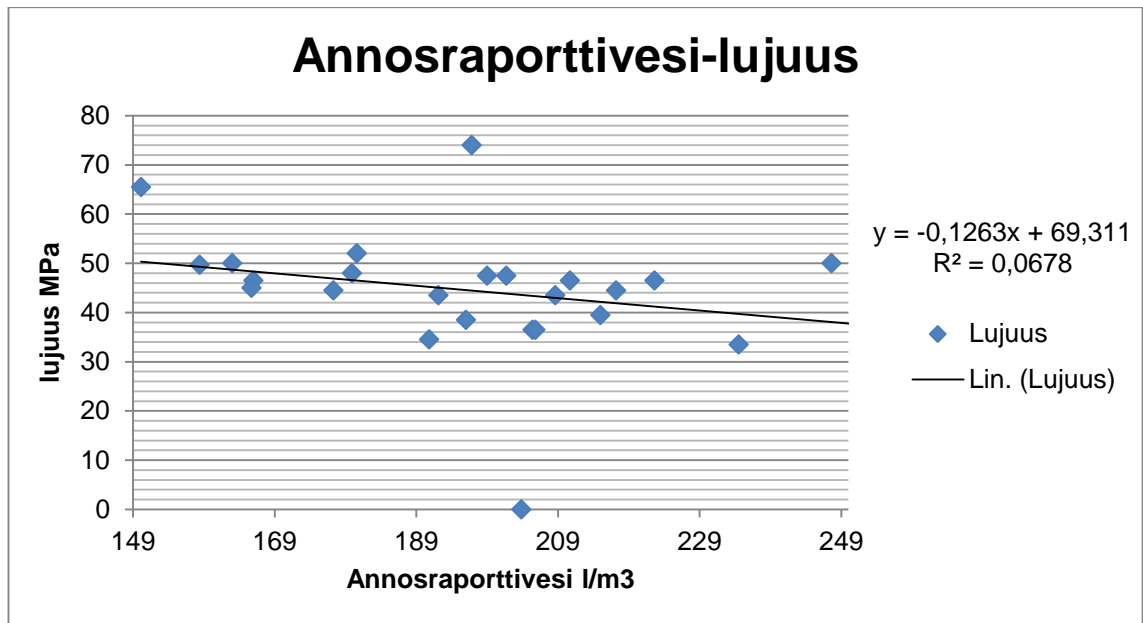
Kuva 29. Vesimäärän ero reseptiveteen.

Kuvassa 30 on annosraporttiveden korrelaatio reseptiveteen.



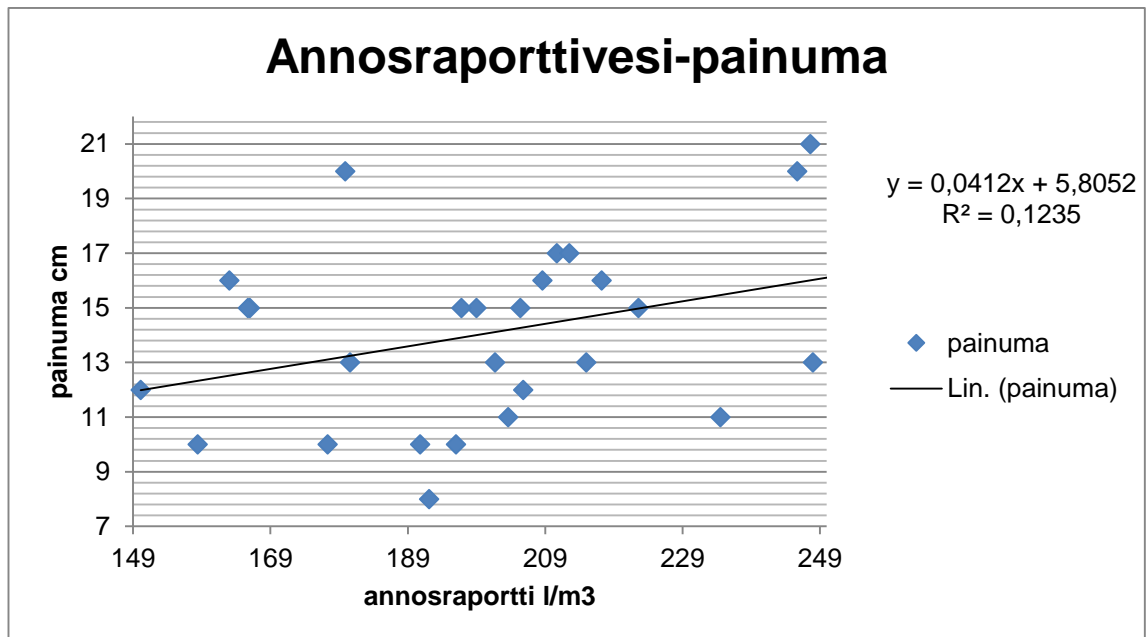
Kuva 30. Annosraporttiveden korrelaatio reseptiveteen.

Kuvassa 31 annosraportinveden korrelaatio lujuuteen.



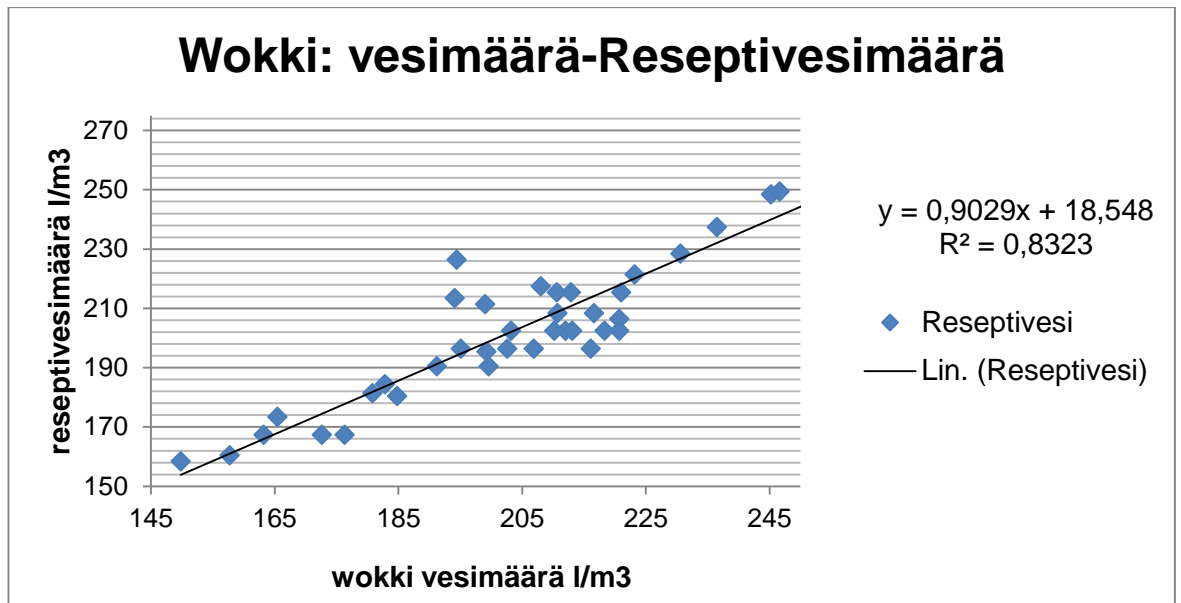
Kuva 31. Annosraportinveden korrelaatio lujuuteen.

Kuvassa 32 on annosraportinveden korrelaatio painumaan



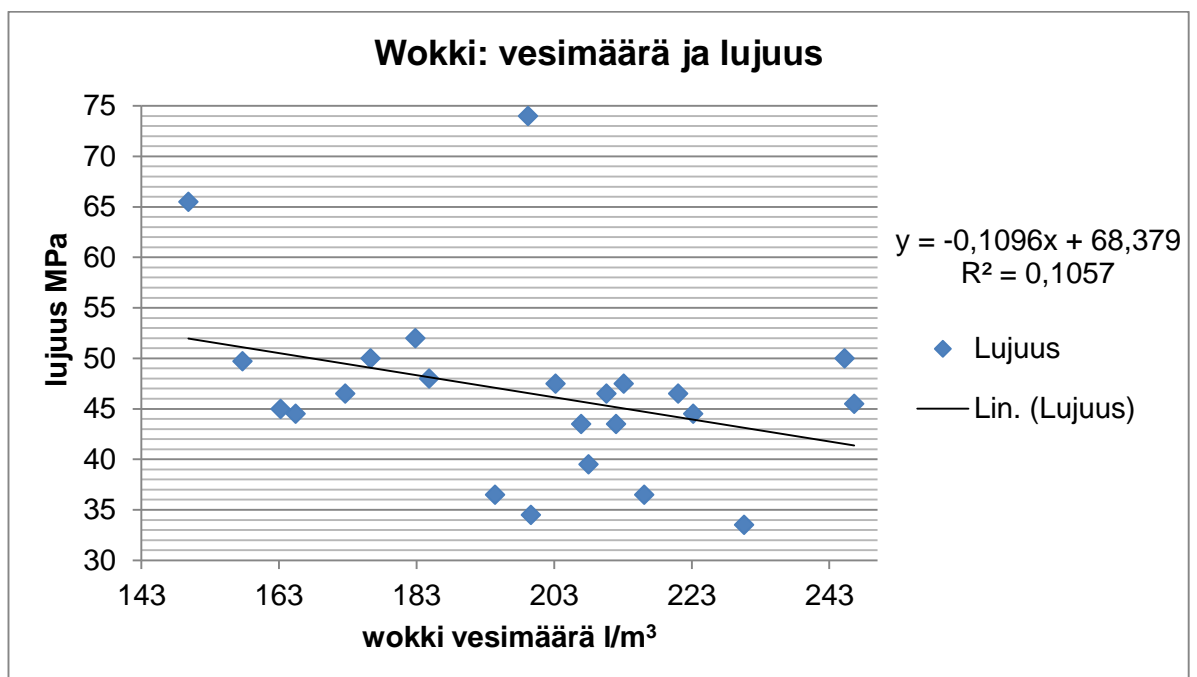
Kuva 32. Annosraportinveden korrelaatio painumaan.

Kuvassa 33 on wokkipannulla mitatun vesimäärän korrelaatio reseptivesimäärään.



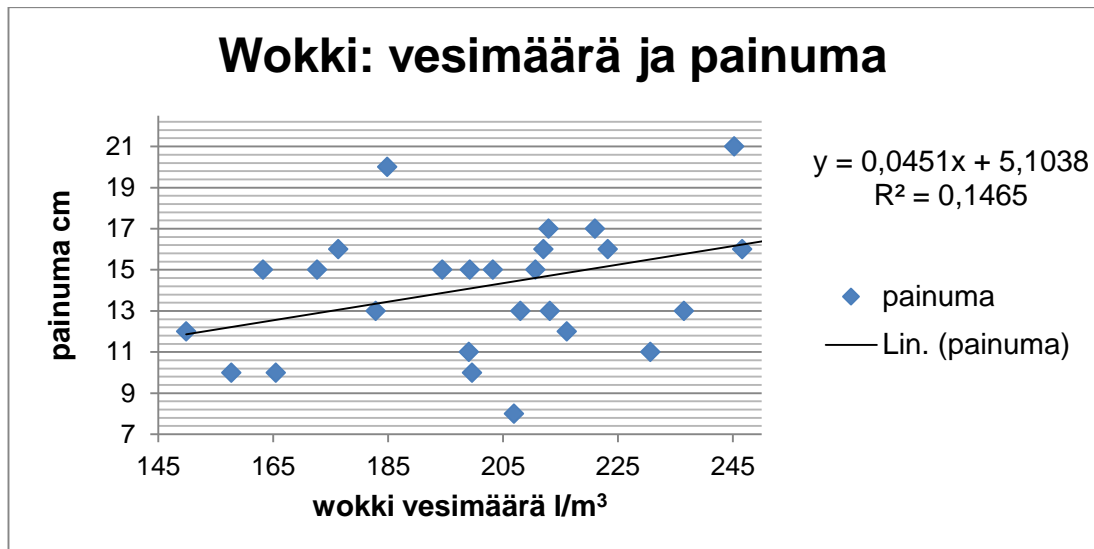
Kuva 33. Wokkipannulla mitatun vesimäärän korrelaatio reseptivesimäärään.

Kuvassa 34 on wokkipannulla mitatun vesimäärän korrelaatio lujuuteen.



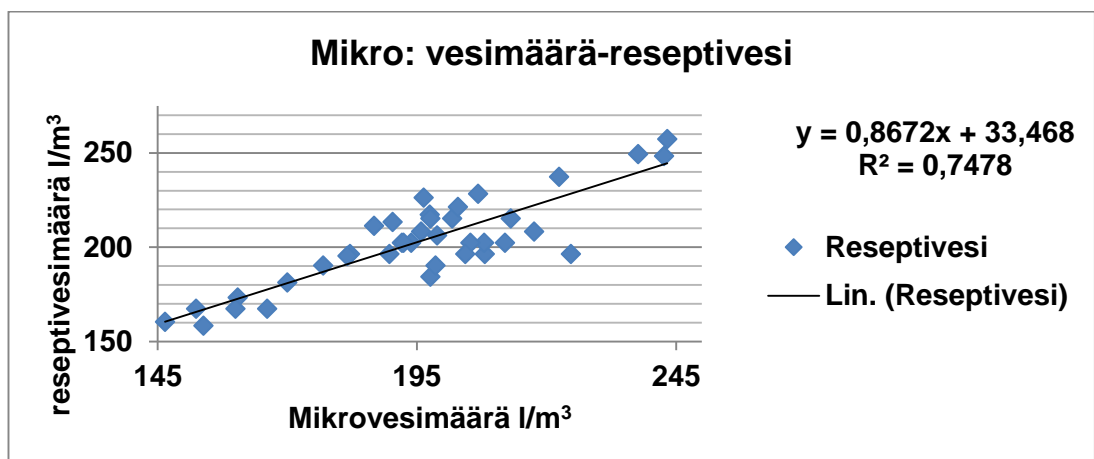
Kuva 34. Wokkipannulla mitatun vesimäärän korrelaatio lujuuteen.

Kuvassa 35 on wokkipannulla mitatun vesimäärän korrelaatio painumaan.



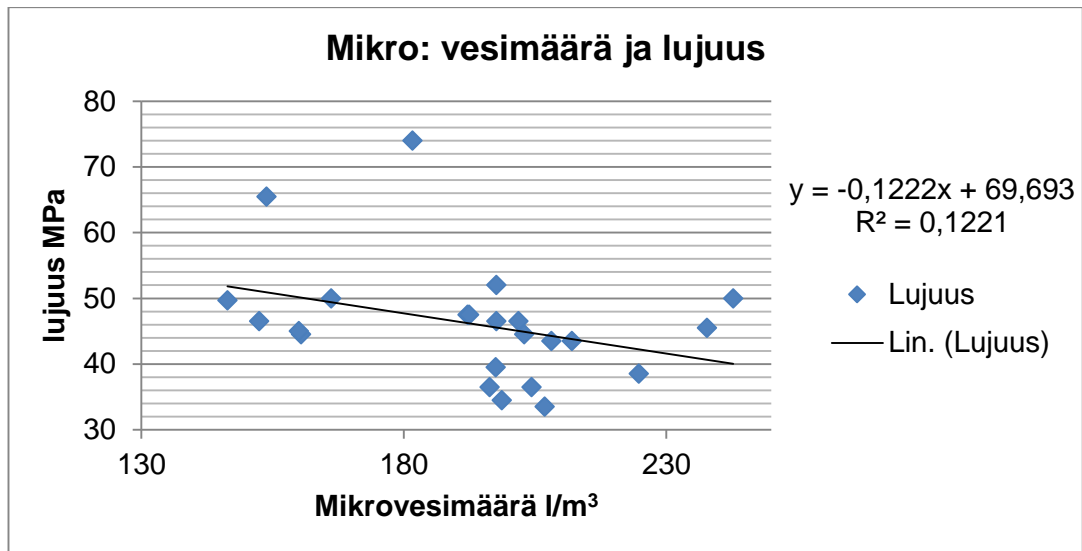
Kuva 35 wokkipannulla mitatun vesimäärän korrelaatio painumaan.

Kuvassa 36 on mikrolla mitatun vesimäärän korrelaatio reseptivesimäärään.



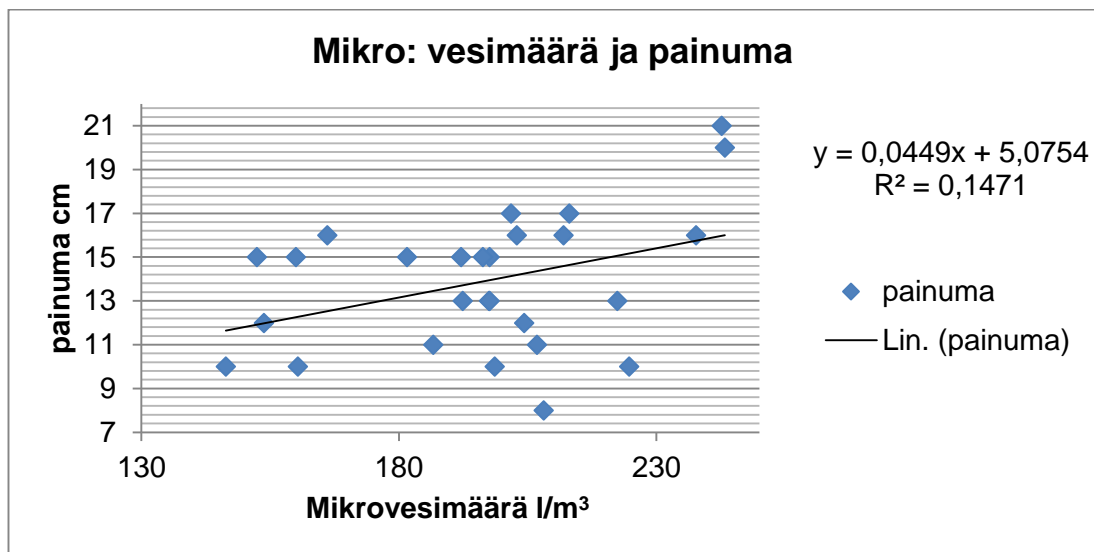
Kuva 36. Mikrolla mitatun vesimäärän korrelaatio reseptivesimäärään.

Kuvassa 37 on mikrolla mitatut vesimäärän korrelaatio lujuuteen.



Kuva 37. Mikrolla mitatun vesimäärän korrelaatio lujuuteen.

Kuvassa 38 on mikrolla mitatun vesimäärän korrelaatio painumaan.

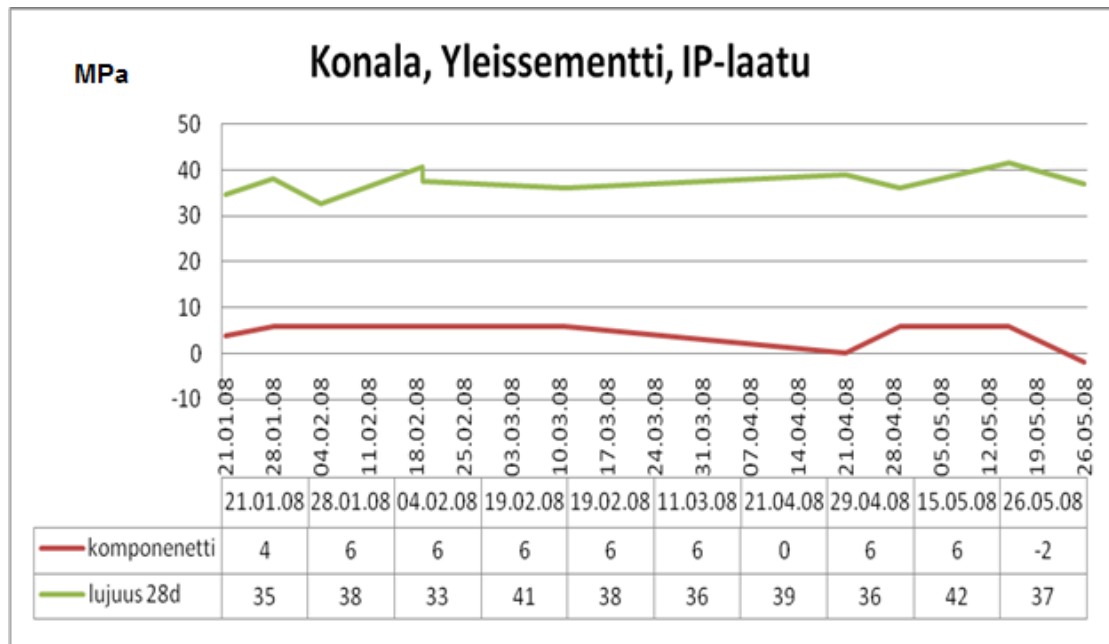


Kuva 38. Mikrolla mitatun vesimäärän korrelaatio painumaan.

5.6 Valmistuksen laatu

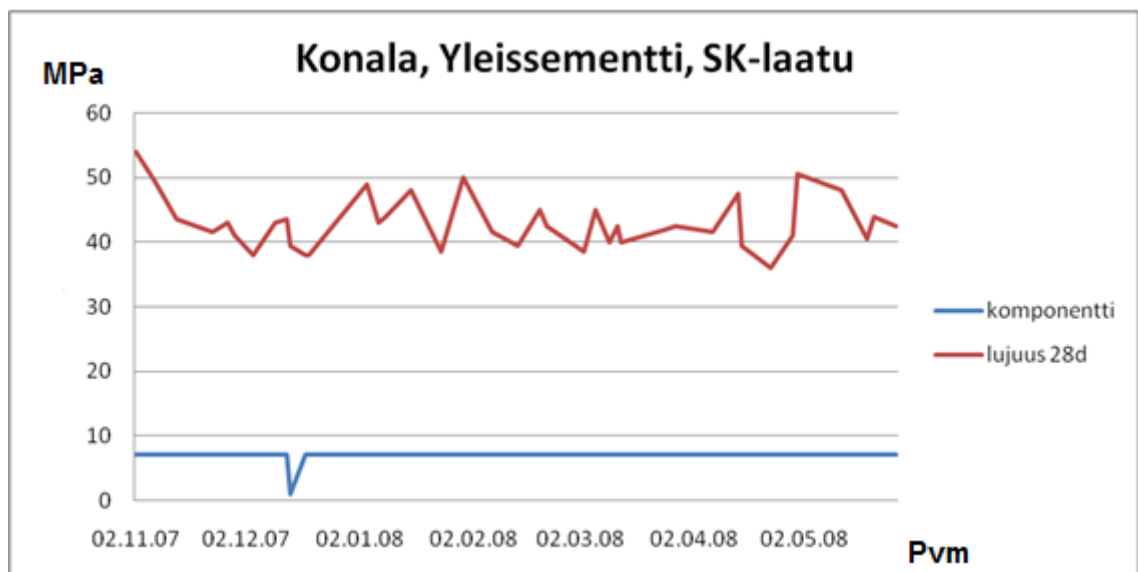
Alla on Konalan tuotannosta otettuja sementtimassoja sementtien prismalujuuksien ja betonien lujustasojen vertailuun keväältä 2008.

Kuvassa 39 on 10:n näytteen Yleissementin IP-laadun ja prismalujuuksien vertailu.



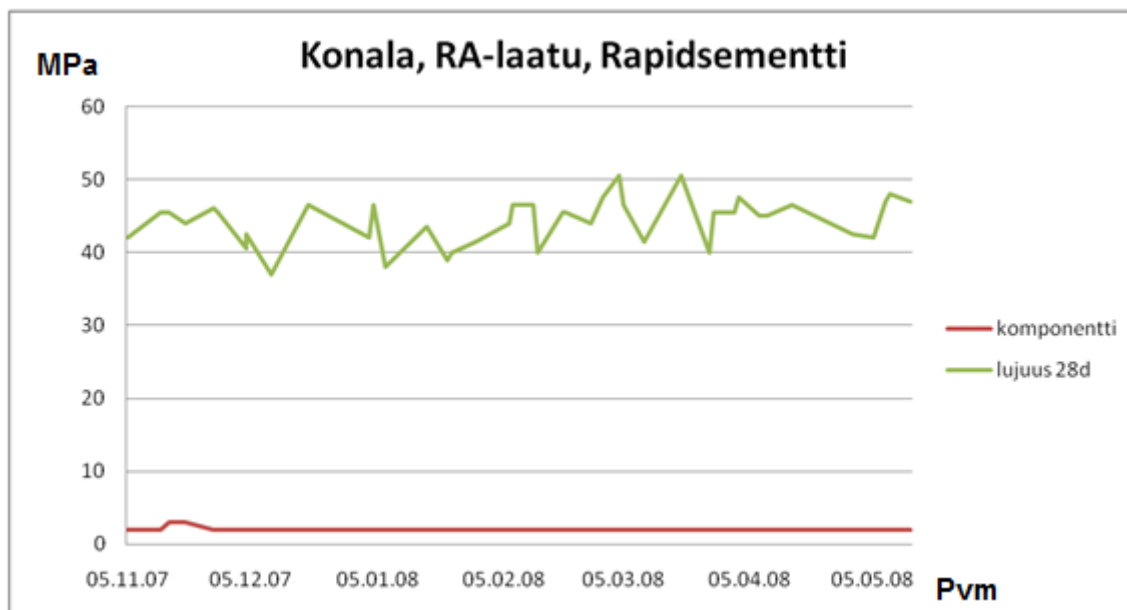
Kuva 39. Yleissementin IP-laadun sementtikomponentin ja prismalujuuksien vertailu.

Kuvassa 40 on Yleissementin SK-laadun ja prismalujuuksien vertailu.



Kuva 40. Yleissementin SK-laadun sementtikomponentin ja prismalujuuksien vertailu .

Kuvassa 41 on Rapidsementin RA-laadun ja prismalujuuksien vertailu.



Kuva 41. Rapidsementin RA-laadun sementtikomponentin ja prismalujuuksien vertailu.

6 Tulosten tarkastelu

6.1 Prismalujuus

Prismalujuuksissa Konalan tehtaalla tehtyjen kokeiden lujuustaso jää selvästi sementin valmistajan mittaamaa tasoa alemmaksi. Varsinkin Rapidsementin keskihajonta on merkittävästi suurempi tehtaalla. Sementin valmistajan viikkotuloksissa näkyi vähemmän keskihajontaa sekä lujuustason vaihtelua kuin tehtaan prismalujuuksissa.

Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että Rapidsementistä otettiin vähemmän näytteitä kuin Yleissementistä. Täysin vertailukelpoisen sementtien vertailusta olisi tehnyt, jos näytteitä olisi otettu sama määrä.

6.2 Betonin puristuskokeet

Rapidsementillä saatiin vain vähän parempi puristuslujuustaso kuin Yleissementillä. Rapidsementin lujuustulosten keskihajonta oli suurempi kuin Yleissementin. Yleissementillä on hieman Rapidsementtiä suurempi painuman keskiarvo ja sen keskihajonta. Vesimäärä sekä vesimäärän keskihajonta on Rapidsementillä hieman suurempi. Yleissementillä vesimäärä vaikuttaa enemmän saatavaan lujuustasoon kuin sementin prismalujuus, mutta vaikutukset ovat melko lähellä toisiaan. Rapidsementillä vesimäärä vaikuttaa melko selvästi enemmän lujuustasoon kuin sementin prismalujuus.

6.3 Vesimäärän mittaus

Verrattuna reseptivesimäärään wokkipannu antoi pienimmän keskimääräisen virheen -1 l/m^3 ja annosraportti toiseksi pienimmän -4 l/m^3 . Wokkipannulla keskihajonta oli kuitenkin suurempi kuin annosraportilla. Mikroaaltouuni antoi suurimman virheen, ja sen keskiarvo oli -8 l/m^3 reseptivesimäärään verrattuna. Mikroaaltouunilla keskihajonta oli suurin.

Paras korrelaatio reseptivesimäärään oli annosraportin tiedoilla ja melko hyvä myös wokkipannulla mitattuna. Mikroaaltouuni näytti jo enemmän virhettä.

Parhaan korrelaation lujuteen antoi mikroaaltouunilla mitattu vesimäärä. Seuraavaksi parhaan antoi wokkipannu ja huonoimman annosraportin vesimäärä. Kaiken kaikkiaan korrelaatio lujuteen oli kuitenkin hyvin huono.

Paras korrelaatio painumaan oli mikroaaltouunilla mitatulla vesimäärällä ja melkein yhtä hyvä wokkipannulla mitatulla vesimäärällä. Näitä hivenen huonompi oli annosraportin vesimäärä. Painumankin suhteen korrelaatio oli kuitenkin melko heikko.

Wokkipannulla vesimäärän erot annosraporttiin tai reseptivesimäärään ovat pienempiä kuin mikroaaltouunilla. Mikroaaltouunilla keskihajonta ja siis minimi- ja maksimiarvon erot ovat suurempia kuin wokkipannulla. Wokkipannulla saadut tulokset seuraavat siis paremmin ja pienemmillä virheillä reseptivesimäärää kuin mikroaaltouuni.

Vesimääriä mitattaessa mikroaaltouuni oli huonoin menetelmä verrattaessa reseptivesimäärään. Toisaalta mikroaaltouunin korrelaatio lujuteen oli parempi kuin wokkipannulla ja annosraportilla, vaikkakin kunkin menetelmän korrelaatio lujuteen oli hyvin huono. Mikroaaltouuni oli hyvä myös painuman korrelaation mittaamiseen, mutta siinäkin kunkin menetelmän korrelaatio jäi heikoksi.

6.4 Valmistuksen laatu

Sementtikomponentti yleisementin IP- ja SK-laaduilla on keväällä tasoa 6–7. Komponentissa ei siis ole vaihtelua kevään aikana. Myös betonin lujuustulokset ovat melko vakiot kevään aikana sekä IP- että SK-laaduilla. Samoin lujuustaso on melko tasainen myös sementtiprismoista mitatuista näytteistä.

Rapidsementin vertailussa on mukana betonilaatu RA, jonka lujuustulokset kevään aikana paranivat ehkä hieman. Sementtikomponentti oli kevään aikana koko ajan 2. Rapidsementistä otettujen sementtinäytteiden lujuustaso kasvoi hieman loppukevällä, joten ehkä pieni korrelaatio on betonin lujuustuloksiin.

7 Johtopäätökset

Prismalujuuksien tulosten tarkastelusta voidaan päätellä, että betonitehtaalla tehdyissä kokeissa ei päästä sementin valmistajan mittaamaan lujuustasoon. Sementtitehtaalla on pitkäaikainen kokemus testauksen optimoinnissa.

Prismalujuuksien perusteella Rapidsementillä on suurempi lujuuksien keskihajonta kuin Yleisementillä. Tämän pohjalta voidaan katsoa Rapidsementillä olevan suurempi laadunvaihtelun osuus lujushajonnasta.

Betonin puristuskokeidenkin perusteella Rapidsementillä on enemmän vaikutusta lujushajontaan kuin Yleisementillä. Molemmilla sementillä vesimäärä vaikuttaa enemmän lujuustasoon kuin prismalujuus..

Luotettavimmin vesimäärä saadaan mitattua wokkipannulla.

Rapidsementillä näytti olevan hieman laadunvaihtelua. Tästä ei kuitenkaan ole selvää merkkiä.

Rapidsementillä oli Yleissementtiä suurempi lujushajonta ja näin ollen se oli epäluotettavampi Yleissementtiin nähden laadunvaihtelua tarkasteltaessa.

Jatkotutkimuksena ja lisäselvityksenä voisi tehdä laajempaa tutkimusta, jossa olisi mukana useampi tehdas. Lujuuteen vaikuttavia tutkimuskohteita olisi valmistuksen tasaläpisyys, notkeustaso ja ilmamäärä. Muita tutkittavia kohteita olisi laborantin työ, kaluston kunto, kiviaineksen laatu ja itse lujisuuden testaus.

Lähteet

- 1 Rakennusaineteollisuusyhdistys r.y., Suomalainen sementti.
- 2 Lea's Chemistry of Cement and Concret, Toim. Peter C. Hewlett, 4. p., Lontoo: Arnold, 1998.
- 3 P.C. Hewlett, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier Butterworth-Heinemann, New York, 2005 (Chapter 6).
- 4 Tietoa betonista. [Http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/](http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/). Luettu 6.10.2016.
- 5 Betonikokeet uusilla suomalaisilla sementeillä, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo 1995.
- 6 Arvo Nykänen. Verkkodokumentti. <http://www.finnsementti.fi/yritys/historia/arvo-nykanen-talven-taitaja-ja-suhteituksen-isa>. Luettu 26.11.2016.
- 7 Suomen betoniyhdistys ry. 2004 BY50 Betoninormit. Jyväskylä. Gummerrus kirja paino.

Yleissementin tuote-esite



Sementti täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset ja on CE-merkitty.

EY-Vaatimustenmukaisuusodistuksen numero on

Paraisien Yleissementti 0416-CPD-0001

Lappeenrannan Yleissementti 0416-CPD-0005

Sementin ja klinkkerin ominaisuuksien tyyppillisiä arvoja:

Sementin ominaisuuksia	Tulokset	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Lujuus 1d	10...16 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 2d	21...27 MPa	>= 10,0 MPa
Lujuus 28d	46...52 MPa	>= 42,5 MPa ja <= 62,5 MPa
Sitoutumisajan alku	140...190 min	>= 60 min
Tilavuuden pysyvyys	0...1, 5 mm	<= 10 mm
Hienous (Blaine)	350... 410 m ² /kg	ei vaatimusta
Hehkutushäviö	-	ei vaatimusta
Luukematon jäännös	-	ei vaatimusta
SO ₃	2,6...3,3 %	<= 3,5 %
Kloridipitoisuus	<= 0,05 %	<= 0,10 %
Cr ₆₊	0...2 ppm	<= 2 ppm

Klinkkerin tyyppillinen kemiallinen koostumus

	%	
CaO	63...65	
SiO ₂	20...21	
Al ₂ O ₃	4,3...5,3	
Fe ₂ O ₃	2,9...3,0	
MgO	2,7...2,8	

Sementin sisältämät ainesosat	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Yhteensä	<= 20 %	<= 20 %
Kalkkikivi	6...10 %	
Masuunikuona	6...14 %	



FINNSEMENTTI

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puhelin 0201 206 200 • Telefax 0201 206 311

www.finnsementti.fi

Rapidsementin tuote-esite

RAPIDSEMENTTI

CEM III/A-LL 42,5 R

SEMENTIT

TAMMIKUU 2008



Sementti täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset ja on CE-merkitty.

EY-Vaatimustenmukaisuusludistuksen numero on

Paraiten Rapidsementti 0416-CPD-0002

Lappeenrannan Rapidsementti 0416-CPD-0006

Sementin ja klinkkerin ominaisuuksien tyypillisiä arvoja:

Sementin ominaisuus	Tulokset	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Lujuus 1d	17...22 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 2d	29...34 MPa	>= 20,0 MPa
Lujuus 28d	52... 59 MPa	>= 42,5 MPa ja <= 62,5 MPa
Sitoutumisajan alku	130...190 min	>= 60 min
Tiavuuden pysyvyys	0...1,5 mm	<= 10 mm
Hienous (Blaine)	430 ...480 m ² /kg	ei vaatimusta
Hehkutushäviö	-	ei vaatimusta
Lukkenematon jäännös	-	ei vaatimusta
SO ₃	3,2...3,9 %	<= 4,0 %
Kloridipitoisuus	<= 0,05 %	<= 0,10 %
Cr ₆₊	0...2 mg/kg	<= 2 mg/kg
Klinkkerin tyypillinen kemiallinen koostumus	%	
CaO	63...65	
SiO ₂	20...21	
Al ₂ O ₃	4,3...5,3	
Fe ₂ O ₃	2,9...3,0	
MgO	2,7...2,8	
Sementin sisältämät seosaineet	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Yhteensä	<= 20 %	<= 20 %
Kalkkikivi	6...9 %	
Masuunikuona	0...5 %	

**FINNSEMENTTI**

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puhelin 0201 206 200 • Telefax 0201 206 311

www.finnsementti.fi