

Tuomas Nykyri

Kutistumaa vähentävien lisäaineiden vaikutus betonin kutistumaan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Insinöörityö

24.4.2014

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Tuomas Nykyri Kutistumaa vähentävien lisäaineiden vaikutus betonin kutistumaan 36 sivua + 4 liitettä 24.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Materiaali- ja korroosiotekniikka
Ohjaajat	Yliopettaja Kai Laitinen Myyntijohtaja Mikko Vasama Laatuinsinööri Jere Toivonen
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin kutistumaa vähentävän lisäaineen (SRA) vaikutusta kahden erityyppiseen sementtiin. Vertailusementteinä käytettiin sementti 1:tä ja sementti 2:ta.</p> <p>Toimeksiantaja otti uuden sementin käyttöön vuoden 2014 alussa ja uudesta sementistä (sementti 2) haluttiin selvittää kutistuman suuruus ja verrata sitä jo pitkään käytössä olevan sementin (sementti 1) kutistumaan. Kutistumaa vähentävää lisäainetta vertailtiin kahdella eri pitoisuudella kumpaankin sementtilajiin, joten testattavia betonimassoja oli yhteensä kuusi. Testit tehtiin peruslattiabetonille, koska lattioissa kutistumisesta aiheutuvat ongelmat ovat yleisiä.</p> <p>Näytteet valettiin Ruskon Betoni Oy:n Kivenlahden betoniasemalla ja standardien mukaiset laadunvarmistustestit tehtiin betoniaseman laboratoriossa. Betoniasemalla tehdyillä testeillä tutkittiin, kuinka SRA-aine vaikuttaa betonin muihin ominaisuuksiin. Kutistumamittaukset tehtiin Contesta Oy:n tiloissa Suomen Betoniyhdistyksen ohjeiden mukaisella palkkikokeella, jossa mitataan palkin pituussuunnassa tapahtuvaa kutistumaa. Tutkimuksissa keskityttiin pitkäaikaisen kuivumiskutistuman mittaamiseen. Kutistumaa mitattiin 56 vuorokauden ajan ja tulokset ilmoitettiin mm/m.</p> <p>Tuloksista nähtiin selkeästi SRA-aineen kutistumaa vähentävä vaikutus. SRA-aineen maksimiannostuksella sementti 2 -betonimassan kutistumaa saatiin vähennettyä jopa 47 % ja sementti 1 -betonimassan kutistuma väheni 25 % vertailupalkkeihin nähden. Sementti 2 kutistui huomattavasti sementti 1:tä enemmän, mutta SRA-aineella päästiin lähes samoihin kutistuma arvoihin kummallakin sementtityypillä.</p> <p>Tutkimus on hyödyllinen toimeksiantajayritykselle, koska tiedossa on suuri kohde (30 000 m³ betonia), johon on suunniteltu käytettävän kutistumaa vähentävää lisäainetta. Tutkimustulosten perusteella yritys pystyy näyttämään, että kyseisellä kutistumaa vähentävällä lisäaineella päästää huomattavasti pienempiin kutistuma arvoihin. Tutkimustuloksia pystytään hyödyntämään myös tulevaisuudessa samankaltaisten rakennushankkeiden kohdalla.</p>	
Avainsanat	Betoni, kutistuma, kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA)

Author(s) Title Number of Pages Date	Tuomas Nykyri Effects of Shrinkage Reducing Admixtures in Shrinkage Compensating Concrete 36 pages + 4 appendices 24 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials Technology and Surface Engineering
Specialisation option	Material Science and Corrosion Technology
Instructor(s)	Kai Laitinen, Principal Lecturer Mikko Vasama, Sales Manager Jere Toivonen, Quality Engineer
<p>The purpose of this thesis was to investigate the effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) on two types of cements. Cement 1 and cement 2 were used as the reference cements.</p> <p>The company started using a new cement in early 2014 and wanted to find out the magnitude of the new cement's (cement 2) shrinkage and to compare it with the shrinkage of cement (cement 1) which already had been used for several years. The shrinkage reducing admixture was compared with two different concentrations on both cement types hence there were six concrete masses altogether.</p> <p>The samples were molded in Ruskon Betoni Ltd in the concrete factory in Kivenlahti and quality control tests according to the standards were taken in the laboratory of the factory. With the tests taken in the concrete factory the effects of SRA on other properties of concrete were investigated. Shrinkage measurements were taken in the premises of Contesta Ltd by using the test instructed by Concrete Association of Finland. Horizontal shrinkage of the bar was measured in the test. In this research the main focus was to measure long-term drying shrinkage. The shrinkage was measured during 56 days and results were reported mm/m.</p> <p>The results showed obvious shrinkage reducing effects of the SRA. With the maximum dosage of SRA the shrinkage of cement 2 concrete masses could be reduced even 47 % and with cement 1 masses the shrinkage was 25 % compared to the reference masses. Cement 2 shrank significantly more than the cement 1 but with SRA almost the same results could be reached with both cement types.</p> <p>This research is useful for the company because they have an extensive construction project ahead of them (30 000 m³ concrete) and they are planning on using SRA. Based on the results the company can show that with this specific SRA significantly smaller shrinkage results can be reached. The results can be also used with similar construction projects in the future.</p>	
Keywords	Concrete, Shrinkage, Shrinkage Reducing Admixtures (SRA)

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Betonin kutistuma	2
2.1	Betonin kutistuma ja halkeilu	2
2.2	Kutistumatyypit	3
2.2.1	Plastinen kutistuma	3
2.2.2	Plastinen painuma	5
2.2.3	Autogeeninen kutistuma	5
2.2.4	Lämpömuodonmuutos	5
2.2.5	Karbonatisoitumiskutistuma	6
2.2.6	Kuivumiskutistuma	7
2.3	Viruma	9
2.4	Kutistuman hallintakeinot	10
2.4.1	Kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA)	11
2.4.2	Kuidut	12
2.4.3	Kutistumissaumat	13
2.4.4	Raudoitus	13
2.4.5	Jälkihoito	14
2.5	Kutistuman laskenta	14
2.5.1	Suomalaiset ohjeet	14
2.5.2	Eurokoodi	16
3	Kutistumatutkimukset	19
3.1	Koemateriaalit	19
3.2	Menetelmät	20
3.2.1	Tuoreen betonin testaus	20
3.2.2	Puristuslujuus	21
3.2.3	Kutistuman mittaus	23
4	Tulokset	26
4.1	Tuoreen betonin testaus	26
4.2	Puristuslujuus	26
4.3	Kutistuman mittaus	27
5	Tulosten tarkastelu	28

5.1	Laadunvarmistus	28
5.2	Kutistuman arviointi	29
5.3	Laskukaavojen toimivuuden arviointi	32
6	Johtopäätökset	34
	Lähteet	35
	Liitteet	
	Liite 1. Olosuhdehuoneen suhteellinen kosteus ja lämpötila	
	Liite 2. Lieriölujuuden muuttaminen kuutiolujuudeksi	
	Liite 3. Kutistumamittaustulokset	
	Liite 4. Kutistumalaskut	

Lyhenteet ja käsitteet

SRA	(Shrinkage reducing admixtures) kutistumaa vähentävät lisäaineet betonissa
v/s	Vesi—sementtisuhde eli betonimassan sisältämän vesimäärän ja sementin painon suhde
RH	Suhteellinen kosteus
Kutistuma	Betonin kuivumisesta ja kemiallisista muutoksista aiheutuva tilavuuden pieneneminen, joka on riippuvainen ajasta ja kuivumisolosuhteista, ei lämpötilasta eikä ulkoisen voiman jännityksestä. Kutistuma ilmoitetaan mm/m tai %.
Hydrataatio	Sementin ja veden välinen reaktio, jolloin muodostuu sementtikivi, joka sitoo runkoaineen rakeet toisiinsa.

1 Johdanto

Kutistuminen on betonille normaalia ja siitä aiheutuva halkeilu on ongelmallista betonirakenteissa, sillä se aiheuttaa esteettisiä haittoja sekä lyhentää rakenteiden käyttöikä. Halkeilua pystytään vähentämään, kun se otetaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa ja tiedostetaan, millä tavoin kutistumista voidaan vähentää. Nykyään käytössä on muun muassa betonin kutistumista vähentäviä lisäaineita, joilla pystytään vähentämään betonin luonnollista kutistumaa jopa 50 %. [1; 2.]

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia kutistumista pienentävän lisäaineen (SRA) vaikutusta betonin kutistumaan. Työssä tutkitaan SRA-lisäainetta kahdella eri pitoisuudella sekä sen vaikutusta kahteen erityyppiseen sementtiin. Lisäaineen vaikutusta testataan perinteiseen lattiabetonimassaan, koska lattioissa kutistumisesta aiheutuneet ongelmat ovat yleisiä. Tutkimuksissa keskitytään kuivumiskutistuman tarkkailuun.

Koepalkit valetaan Ruskon Betoni Oy:n Kivenlahden asemalla ja standardien mukaiset mittaukset tehdään aseman laboratoriossa. Kutistumamittaukset suoritetaan Contesta Oy:n tiloissa Suomen Betoniyhdistyksen ohjeen by 22 -mukaisella palkkikokeella, jossa mitataan palkin pituuden muutosta sen kuivuessa.

Toimeksiantajana työssä on Ruskon Betoni Oy. Yritys otti vuoden 2014 alussa uuden sementin käyttöön ja haluaa nyt tietää, kuinka paljon uusi sementti kutistuu ja minkälaisia vaikutuksia kutistumaa vähentävillä lisäaineilla on kutistumaan sekä betonin muihin ominaisuuksiin. Uutta sementtiä verrataan jo käytössä olevaan sementtiin. Saaduista tuloksista päätellään, kannattaako uudenlainen lisäaine ottaa käyttöön tuotannossa.

Ruskon Betoni Oy on valmisbetonin valmistamiseen ja siihen liittyviin palveluihin keskittynyt kotimainen perheyriyys. Konserniin kuuluvat emoyrityksen lisäksi tytäryhtiöt Napapiirin Betoni Oy sekä JA-KO Betoni Oy, sisaryrityksenä toimii KiBe Oy. [3.]

Ruskon Betoni Oy aloitti toimintansa Oulussa syksyllä 1983 ja vuosien saatossa yritys on kasvanut tasaista vauhtia. Tätä nykyä yritys toimii 24 paikkakunnalla eripuolella Suomea ja työllistää noin 100 henkilöä. [3.]

2 Betonin kutistuma

2.1 Betonin kutistuma ja halkeilu

Kutistuminen on betonille luonnollinen ominaisuus. Syynä tähän ovat yleensä betonin kuivuminen sekä sementin hydrataatio. Hydrataatiolla tarkoitetaan veden ja sementin aiheuttamaa kemiallista reaktiota, joka muodostaa sementtikiveä ja sitoo runkoaineen rakeet yhteen. Hydrataatioreaktiossa syntyvän sementtikiven tilavuus pienenee, koska reaktiotuotteiden tilavuus on pienempi kuin sementin ja veden alkuperäinen tilavuus, ja tämän vuoksi normaalibetoni kutistuu aina. Betonin kutistuman suuruus ja syntymisen ajankohta johtuvat eri tekijöistä ja onkin huomioitava, että kutistumatyyppejä on useampia, joista kuivumiskutistuma on tunnetuin. [4, s.1, 3; 5, s. 147; 6, s. 7.]

Betonin kovettumiskutistumaan vaikuttavat betonin koostumus ja ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Kutistuminen on sitä nopeampaa mitä kuivemmassa ympäristössä betoni on. Koostumuksella on suuri merkitys kutistumaan, koska kutistuminen tapahtuu sementtiliimassa. Eli mitä enemmän massassa on sementtiliimaa sitä suurempaa on kutistuminen. Sen sijaan suurempi kiviainesmäärä pienentää kutistumaa, koska sementtiliiman määrä vähenee. [5, s. 149.]

Kutistumisesta syntyvät tilavuuden muutokset aiheuttavat betoniin pakkojännityksiä, mikäli rakenteessa on esimerkiksi raudoituksia tai muita kiinnityksiä. Rakenteen pintojen ja sisäosien välisistä kutistumaeroista aiheutuu vetojännityksiä vapaassakin betonikappaleessa, ja kun betonin vetolujuus ylittyy, syntyy siihen halkeamia. [7, s. 348, 351.]

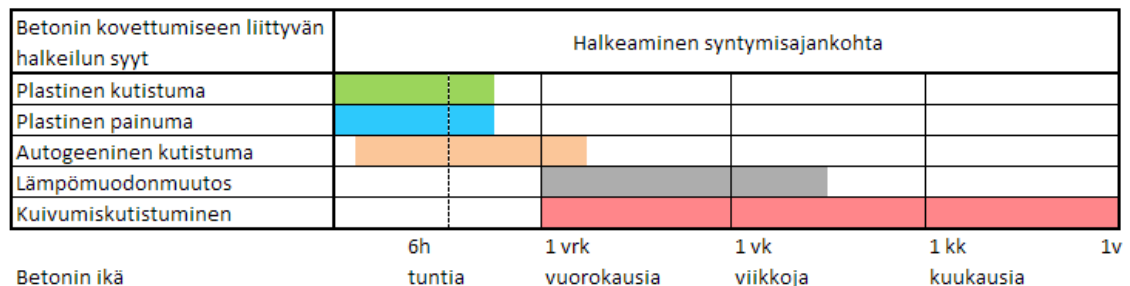
Kutistumisesta aiheutuneet halkeamat vaikuttavat betonirakenteen säilyvyyteen, koska haitalliset aineet pääsevät tunkeutumaan betoniin ja edistämään raudoituksen korroosiota. Halkeamat aiheuttavat rakenteeseen kosmeettisia haittoja ja pilaavat suunnitellun ulkonäön. Epätasainen kutistuminen käyristää rakenteita ja on erityisen hankala ilmiö palkeissa ja laatoissa, sillä esimerkiksi lattialaattojen kulmat nousevat ylös. [8, s. 8.]

Koska halkeilun riski ja suuruus ovat riippuvaisia kutistumatasojen suuruudesta ja betonin vetolujuuden kehittymisnopeudesta, tulisi aina jo suunnitteluvaiheessa huomioida betonille sallittava kutistumataso rakenteen mittojen ja raudoituksen mukaisesti. Beto-

nin kutistumista ja halkeilua ei pystytä kokonaan poistamaan, mutta hyvällä suunnittelulla niitä voidaan vähentää merkittävästi. Betonin kutistumaa voidaan rajoittaa valitsemalla sopiva betonin koostumus, työsuoritus ja hyvä jälkihoito. Kutistuman aiheuttama halkeilua voidaan vähentää myös erikoisratkaisuilla, kuten kuiduilla, kutistumaa vähentävillä lisäaineilla sekä ylirauδοituksella. [1; 4, s. 1; 9, s. 92.]

2.2 Kutistumatyyppit

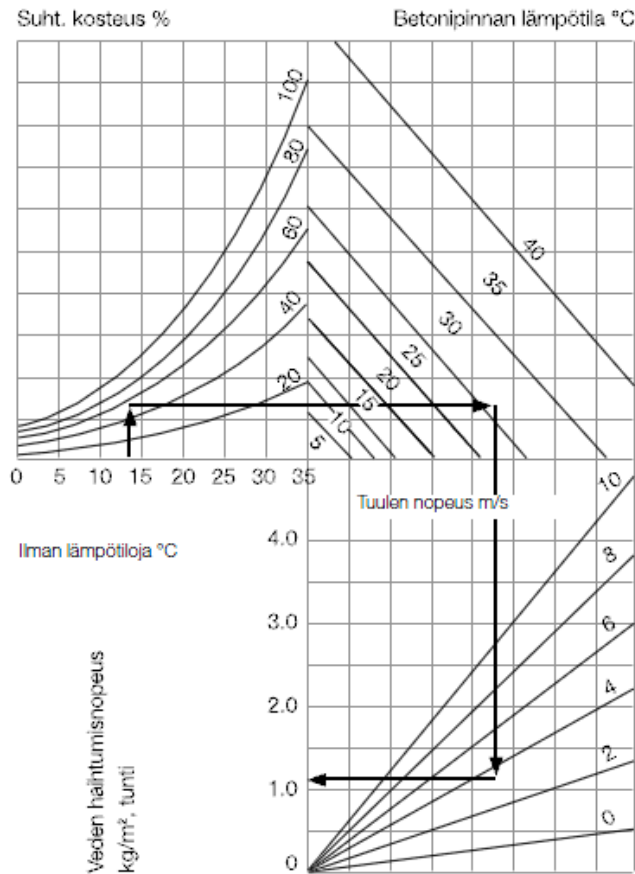
Kutistumatyyppiä on useita ja siksi tulee aina ajatella kokonaisuutta pyrittäessä estämään betonin kutistuma ja siitä aiheutuva halkeilu. Kutistumisella on selvästi kaksi eri vaihetta: varhaisvaiheen (<24 h) ja myöhäisvaiheen kutistuma (>24 h). Näiden kahden sisällä ne voidaan jakaa vielä useampaan tyyppiin kuten: plastiseen kutistumaan, plastiseen painumaan, autogeeniseen kutistumaan, lämpömuodonmuutokseen, karbonatisoitumiskutistumiseen sekä kuivumiskutistumiseen. Kuvassa 1 nähdään, kuinka kutistumatyyppit ajoittuvat betonin valmistumisen jälkeen. [4, s. 1; 8, s. 9.]



Kuva 1. Kutistumatyyppien syntymisen ajoittuminen betonin valmistuksen jälkeen [4, s.1].

2.2.1 Plastinen kutistuma

Plastisella kutistumisella tarkoitetaan betonimassan kutistumista vaakatasossa, joka aiheutuu, kun vesi haihtuu betonipinnasta muutaman tunnin sisällä valusta. Syyinä plastiseen kutistumaan on betonipinnan liian nopea kuivuminen ennen massan sitoutumista. Suurimmat riskit aiheutuvat, kun sää on kuuma ja tuuli voimakas (haihtuminen on runsasta ja nopeaa), sää on kylmä ja tuuli voimakas (haihtuminen jatkuu pitkään ennen sitoutumista), betoni on voimakkaasti notkistettua ja sillä on matala vesisementtisuhde (pintaan ei nouse vettä). Kuvasta 2 voidaan arvioida haihtuvan pintakosteuden määrä, kun tunnetaan ympäristöolosuhteet. [4, s. 2; 9, s. 73.]



Kuva 2. Nomogrammi, josta voidaan arvioida veden haihtumisnopeus, kun tunnetaan ympäristöolosuhteet [12, s.28].

Betonipinnan kuivuessa ja veden haihtuessa pinnalla olevien pienten sementtihiukkasten välille muodostuu kaarevia vesipintoja. Veden pintajännityksestä sekä veden ja sementtihiukkasten välisistä vetovoimista muodostuu pintaan kalvojännitystila. Tämä aiheuttaa vetovoiman, jonka seurauksena betonimassa kutistuu. Tällöin kapillaarihiukkasiin muodostuu alipaine, joka pyrkii imemään syvemmältä vettä pintaan. [9, s. 73.]

Sementtihiukkaset pyrkivät täyttämään haihtuvan veden tyhjäksi jättämän tilan. Liikkeestä aiheutuu kasvavia kitkavoimia, jotka estävät hiukkasten liikkeen. Tämä synnyttää pintaan vetojännityksiä, jotka voivat aiheuttaa halkeamia. [9, s. 73.]

Useasti halkeamat hierretään piiloon, mutta ajan kuluessa ja kuivumiskutistuman (kohda 2.2.6) kasvaessa halkeilu kasvaa pinnan alta näkyviin. Plastista kutistumaa voidaan vähentää joko jälkihoitoaineilla, suojaamalla pinnat muovilla tai suihkuttamalla kevyttä vesisumua pinnoille, jolloin pinnat eivät pääse kuivumaan. [4, s. 2.]

2.2.2 Plastinen painuma

Vaikka betoni on hyvin tärytetty, erottuu siitä aina vettä pintaan. Tämän johtuu siitä, että kiviaines ja sementti ovat vettä painavampaa ja painovoiman vaikutuksesta ne vajoavat alaspäin. Tämä aiheuttaa esimerkiksi terästen kohdalla halkeilua. [9, s. 72.]

Plastinen painuma lisääntyy, kun sementin sitoutumisaika pitenee ja veden erottuminen lisääntyy. Mitä pidempään betoni on plastisessa tilassa, sitä enemmän veden erottumiselle jää aikaa tapahtua ja tämä korostuu varsinkin kylmissä olosuhteissa. Plastiseen painumaan voidaan vaikuttaa muun muassa massavalinnalla ja käyttämällä jälkitärytystä. [4, s. 2; 9, s. 72.]

2.2.3 Autogeeninen kutistuma

Autogeeninen kutistuma tunnetaan myös nimellä kemiallinen kutistuma ja se on seurausta sementin hydratoitumisen aiheuttamista fysikaalisista ja kemiallisista muutoksista. Sementti käyttää kemiallisesti reagoidessaan veden ja muodostaa hydraatteja. Ilmiö on tuttu korkealujuusluokan betoneissa, joissa vesi—sementtisuhde laskee tasolle 0,40—0,45 (riippuen käytetystä sementistä). Hydrataation jatkuessa matalammilla vesi—sementtisuhteilla sementti imee veden pienemmistä huokosista laskien betonin sisäistä suhteellista kosteutta ja betoni kutistuu. [8, s. 10.]

Autogeeninen kutistuma on suurempaa tiiviin mikrorakenteen omaavilla betoneilla. Tämän aiheutuu, jos sementillä on suuri C_3A - tai C_4AF -klinkkerimineraalipitoisuus tai betonissa käytetään seosaineita, kuten silikaa. Silika muodostaa hienomman huokosrakenteen, mikä lisää veden tarvetta, jolloin kutistuminen kasvaa.[10, s. 38, 43.]

Autogeeniseen kutistumaan ei pystytä vaikuttamaan valu-, tiivistys- tai jälkihoitotavoilla. Vaikutus tulee tehdä suhteituksen valinnalla tai käyttämällä esimerkiksi kutistumista vähentäviä lisäaineita. [8, s. 10; 11, s. 7.]

2.2.4 Lämpömuodonmuutos

Betonissa tapahtuvia tilavuudenmuutoksia kutsutaan lämpömuodonmuutoksiksi ja ne tapahtuvat betonin lämpötilan muuttuessa. Lämpömuodonmuutokset voivat johtua joko varhaisvaiheessa tapahtuvasta sementin hydrataation tuottamasta suuresta lämpö-

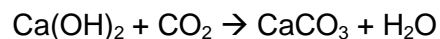
määrästä betoniin tai ympäristön lämpötilan muutoksista. Lämpömuodonmuutosten ollessa suuria joko laajenemalla tai kutistumalla voi betoniin muodostua halkeamia. Halkeamat voivat syntyä myös muodonmuutosten ollessa estettyjä, jolloin muodonmuutokset eivät pääse vapaasti tapahtumaan. [8, s. 11.]

Hydrataatiosta johtuvan lämmöntuotannon loppuessa rakenne alkaa jäähtyä nopeammin ulkopinnoilta ja muodostuu kutistumaa. Betonin tilavuus pienenee ensin rakenteen pinnoilta. Varsinkin massiivissa rakenteissa lämpötilaerot tulevat ongelmaksi, koska ydin jäähtyy hyvin hitaasti verrattuna ulkopintoihin. [4, s. 2; 8, s. 11.]

Halkeilun riskiä voidaan vähentää usein jo pelkästään laskemalla betonin lämpötilaa betoniasemalla. On myös mahdollista käyttää alhaislämpötilasementtiä tai sementtiä ja kuonaa yhdessä. Tarvittaessa rakenteen pinnat voidaan suojata eristeillä, jolloin lämpötilat laskevat tasaisesti ytimessä sekä pinnoilla. [4, s. 2.]

2.2.5 Karbonatisoitumiskutistuma

Betonin karbonatisoitumiseksi sanotaan kemiallista reaktiota, jossa ilman hiilidioksidi CO_2 reagoi betonin kalsiumhydroksidin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia CaCO_3 . Yksinkertaistettuna kemiallinen reaktio voidaan esittää muodossa:



Tästä seuraa pH:n lasku sekä vähäistä kutistumaa. Betonin pH:n lasku mahdollistaa teräksen korroosion, joka on betoniteräkselle hyvin turmiollista. Ruosteella on terästä suurempi tilavuus ja se aiheuttaa betonirakenteeseen paineen, josta seuraa betonin halkeilua ja lohkeilua. [5, s. 162; 8, s. 12.]

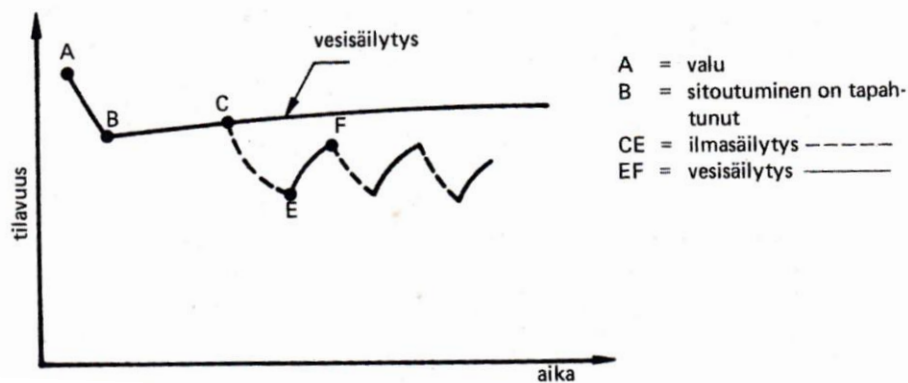
Betonin tiiveys ja kosteustila vaikuttavat betonin karbonatisoitumissyvyyteen. Betonirakenteen suunniteltuna käyttöikänsä karbonatisoituminen etenee yleensä muutamia senttimetrejä ja se kohdistuu vain rakenteen pintakerrokseen. Pintakerroksessa kutistuma voi kasvaa karbonisoitumisen vaikutuksesta jopa 50 % kuivumiskutistumasta. (kohta 2.2.6.). [8, s. 12.]

Tärkeimmät tekijät, joilla voidaan vaikuttaa betonin raudoitteiden suojauskykyyn, ovat betonin tiiveyden varmistaminen, alhainen vesi-sementtisuhte sekä huolellinen jälkihoi-

to. Lisäksi täytyy huomioida, että raudoitteita suojaavan betonikerroksen on oltava riittävän paksu. [5, s. 162.]

2.2.6 Kuivumiskutistuma

Kosteuden menettäminen kovettumisen jälkeen on väistämätöntä, ellei betoni ole vesisäilytyksessä tai ympäristön suhteellinen kosteus ole 100 %. Kovettunut betoni kutistuu kuivuessaan ja taas kostuessaan se laajenee, lukuun ottamatta ensimmäisen kuivumisen aikana tapahtunutta kutistumaa. Muodonmuutokset ovat palautuvia, kuten kuvasta 3 nähdään. [9, s. 90; 13, s. 1.]

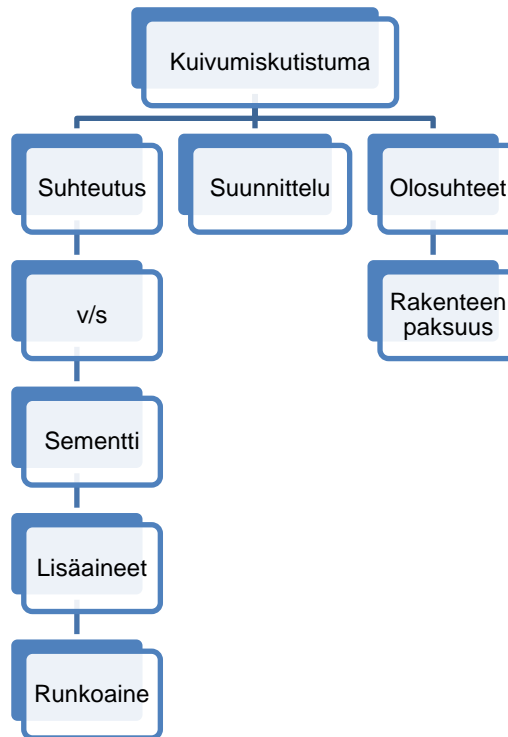


Kuva 3. Betonin tilavuuden muutokset kosteusliikkeiden vaikutuksesta [9, s. 91].

Kuivumiskutistuma aiheutuu, kun betoni menettää vettä kuivuessaan ja sen tilavuus pienenee. Kuivuminen aiheuttaa betonissa olevaan veteen jännityksiä, jotka imevät pieniin kapillaarihuokosiin (<50 nm) adsorboituneen veden pois. Kuivumisen jatkuessa vesi poistuu yhä pienemmistä huokosista ja veden pintajännitys vetää kapillaareja kaasaan kasvavalla voimalla pakottaen betonin kutistumaan. Kuivumiskutistuminen on siis suuresti riippuvainen haihtuvan veden määrästä sekä kuivumisnopeudesta. [9, s. 90; 8, s. 9.]

Kuivumiskutistuma aiheuttaa betonirakenteisiin halkeamia. Halkeamia syntyy, kun kutistuminen on estettyä tai toisissaan kiinni olevat rakenneosat kutistuvat eri nopeudella tai niiden loppukutistumat ovat erisuuruisia. Muodonmuutosten ja halkeiluriskin takia kuivumiskutistuminen on huomioitava suunniteltaessa ja rakennettaessa betonirakenteita. Kuivumiskutistuman rajoittaminen perustuu betonin kutistuvan ainesosan (se-

menttipastan) rajoittamiseen. Kuvassa 4 on esitetty betonin kuivumiskutistumaan vaikuttavia tekijöitä. [4, s. 4; 9, s. 95; 13, s. 1.]



Kuva 4. Betonin kuivumiskutistumaan vaikuttavat tekijät [14, s. 32].

Vesimäärän tai vesi—sementtisuhteen kasvattaminen betonissa lisää sementtipastan määrää ja runkoaineen tilavuusosuus laskee. Mitä enemmän betonimassa on siis vettä ja sementtipastaa, sitä suurempaa on kutistuminen. [8, s. 37; 9, s. 90.]

Hienoainesmäärän, kuten sementin ja fillerin, lisääminen kasvattaa kutistumaa. Suuri hiekan osuus lisää veden tarvetta ja siten sementin osuutta tavoitelujuuden saavuttamiseksi. Tällöin kutistuvan sementtipastan osuus kasvaa ja kutistuma lisääntyy. Samalla tyyllillä myös kevytsoran käyttö kasvattaa sementintarvetta, jolloin kutistuminen on suurempaa. Seosaineet normaalitavoin käytettynä lisäävät hieman kutistumaa, mutta esimerkiksi masuunikuona voi kasvattaa kutistumaa 10—20 %, koska se tiivistää betonin huokosrakennetta ja lisää veden tarvetta. [4, s. 4; 5, s. 120; 8, s. 41; 15.]

Sementin mineraalit, kuten C_3A ja C_4AF , lisäävät kutistumaa, koska ne tiivistävät huokosrakennetta ja lisäävät vedentarvetta. Mineraalien aiheuttamaa kutistumaa pystytään hallitsemaan kipsipitoisuudella. Riittämätön kipsipitoisuus voi kasvattaa kutistumaa jopa 50 %. Myös sementin alkalipitoisuus vaikuttaa kutistumaan suuruuteen, koska

sementin hydrataatiotuotteet ympäröivät veteen lienneet alkali-ionit, joten ne toimivat betonia hajottavan paineen syntymäalueina kuitenkin muuttamatta huokosissa olevan veden pintajännitystä. [10, s. 38, 43; 14, s. 36—37.]

Lisäaineet eivät oikein käytettyinä vaikuta juurikaan kutistuman suuruuteen. Notkistimien käyttö tiivistää kovettuneen sementtikiven mikrorakennetta ja liiallinen käyttö saattaa johtaa betonin kutistuman kasvuun. Huokostaminen ei itsessään vaikuta betonin kutistumaan, mutta se vähentää runkoaineen määrää ja ilmapitoisuuden kasvu lisää kutistumaa. [8, s. 39, 42.]

Runkoaineen laadulla ja määrällä on suuri merkitys kuivumiskutistuman suuruuteen. Runkoaine toimii betonin kutistumaa estävänä komponenttina. Vain huokoiset runkoaineet kutistuvat merkittävästi. Normaalien suomalaisten luonnon runkoaineiden kutistuma on merkityksetön. Runkoaineen määrän kasvaessa kutistumaa estävä vaikutus voimistuu sekä kutistuvan pastan määrä vähenee. [8, s. 34.]

Ympäristön kuivuus kasvattaa kutistumaa, koska tällöin rakenteissa tapahtuva haihtuminen on nopeampaa. Rakenteen paksuus vaikuttaa myös kutistumaan, sillä pienillä kappaleilla veden haihtuminen on huomattavasti suuria kappaleita nopeampaa ja kuten aiemmin mainittiin, kuivumiskutistuma on riippuvainen haihtuvan veden määrästä. [9, s. 91—92.]

Kuivumiskutistuma on 0,5—1,3 promillen luokkaa ja sitä voidaan mitata laboratoriossa muun muassa palkkikokeella, joka on tarkemmin esitelty kohdassa 3.2.3. Suunnittelua helpottamaan on kehitetty laskentakaavoja, joista voidaan arvioida teoreettinen kutistuma. Laskentakaavoista muutama on esitetty kohdassa 2.5. [4, s. 1, 4.]

2.3 Viruma

Betonin kutistuminen ja viruminen ovat ajasta riippuvia ominaisuuksia, joista kutistumaa pidetään jännityksistä riippumattomana ja virumaa jännityksistä riippuvana ilmiönä. Virumalla tarkoitetaan kuormituksen aiheuttamaa, ajan kuluessa tapahtuvaa muodonmuutosta. [7, s. 40; 9, s. 88.]

Viruminen aiheutuu, kun geelihiukosissa oleva vesi poistuu kuormituksen aiheuttaman paineen vuoksi ja samalla sementtigeeli tiivistyy. Sementtigeelin tiivistyminen selittää, miksi muodonmuutos ei kokonaan palaudu, vaikka vesi imeytyisi takaisin geelihiukoksiin. Viruman suuruuteen vaikuttavat muun muassa jännityksen suuruus, ilmasto-olosuhteet, rakenteen paksuus, betonin koostumus, betonin ikä kuormituksen alkaessa sekä kuormituksen kesto. Suurin osa viruman suuruuteen vaikuttavista tekijöistä on samoja kuin kuivumiskutistumalla. [5, s. 149; 9, s. 88, 14, s. 16.]

Viruman vaikutus kokonaismuodonmuutokseen on huomattava ja se on otettava suunnittelussa huomioon normien mukaisesti. Viruma ja kutistuma vaikuttavat usein rakenteessa samanaikaisesti ja niiden aiheuttama kokonaismuodonmuutos $\varepsilon_c(t)$ on laskettavissa ajan hetkellä (t):

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ce}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t, \Delta T),$$

missä

$\varepsilon_{ce}(t_0)$ on betonin välitön muodon muutos ajan hetkellä t_0 alkaneesta jännityksestä,

$\varepsilon_{cc}(t)$ on virumamuodonmuutos ajan hetkellä $t \geq t_0$,

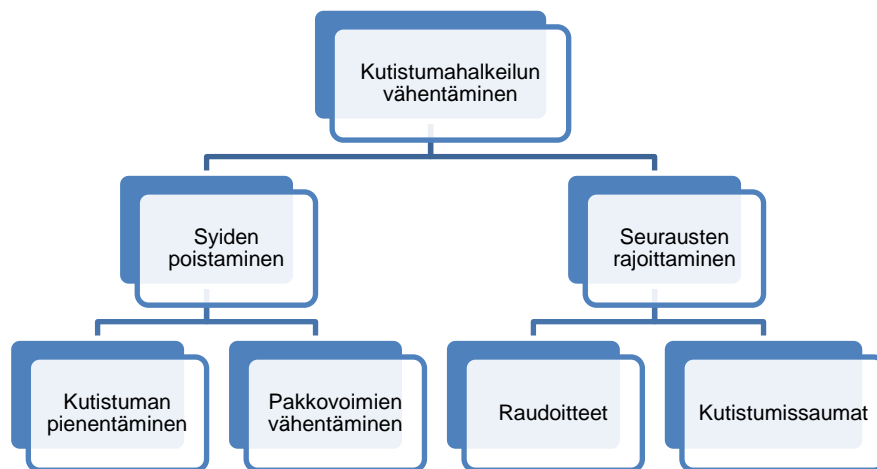
$\varepsilon_{cs}(t)$ on kutistumamuodonmuutos ajan hetkellä t ,

$\varepsilon_{cT}(t, \Delta T)$ on lämpötilan muutoksen ΔT aiheuttama muodonmuutos ajan hetkellä t . [7, s. 40; 9, s. 88; 14, s. 16.]

2.4 Kutistuman hallintakeinot

Normaalisti betonirakenteen ongelmien syynä on etukäteissuunnittelun puuttuminen. Usein huomio kiinnitetään työnsuoritukseen ja aikatauluun, eikä kutistuma- ja halkeiluriskiä huomioida betonivalinnoissa. Kutistuman aiheuttamista ongelmista on mahdollista päästä eroon tai ainakin ratkaisevasti näitä vähentää (kuva 5), kun tunnetaan ongelmien syyt ja varaudutaan syiden poistamiseen jo suunnitteluvaiheessa. Kutistumaa voidaan hallita erikoismenetelmillä, kuten SRA-aineilla ja kuidulla sekä perinteisillä menetelmillä kuten raudoituksella, kutistumissaumoilla ja jälkihoidolla. Tässä insinööri-

työssä on keskitytty syiden poistamiseen SRA-aineilla, mutta muitakin vaihtoehtoja on esitelty vertailun vuoksi lyhyesti. [4, s. 3; 16, s. 6.]



Kuva 5. Kutistumahalkeilun vähentäminen [16, s.37].

Pääosa halkeilureklamaatioista voitaisiin siis estää oikealla etukäteissuunnittelulla. Suunnittelijan ja urakoitsijan tulisi olla yhteydessä betonitoimittajaan betonivalinnoissa, jotta voidaan valita oikea betonilaatu yhteistyössä. Kun riskit ovat etukäteen tiedossa, voidaan tarpeen mukaan raudoitukseen, työntoteutukseen tai olosuhteidenhallintaan vielä tehdä muutoksia. [4, s. 7.]

Suomessa olosuhteet vaihtelevat suuresti vuodenaikojen mukaan ja betonirakenne, jonka valu onnistuu hyvin syksyn kosteissa säissä, voi epäonnistua täysin kevään kuivissa olosuhteissa. Aina ratkaisua, joka toimisi joka tilanteessa, ei välttämättä ole ja joskus hyvin hankalissa olosuhteissa järkevin tapa varmistaa onnistunut betonirakenne on siirtää valua muutamalla päivällä parempiin olosuhteisiin. [4, s. 3—4.]

2.4.1 Kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA)

Kutistumaa vähentävät lisäaineet (Shrinkage reducing admixtures, SRA) eivät poista kutistumaa, mutta vähentävät kuivumiskutistuman määrää 25—50 %. SRA-aineet ovat yleensä glykoli- tai propyleeniglykolipohjaisia eettereitä. Lisäaine toimii ensisijaisesti alentamalla kapillaarihuokosissa olevan veden pintajännitystä ja siten vähentämällä kuivumiskutistuman aiheuttamia voimia (toimintamekanismi esitetty kohdassa 2.2.6.). Viimeaikaiset tutkimukset osoittavat, että SRA-aineilla pystytään vähentämään myös

autogeenistä kutistumaa sekä varhaisvaiheessa tapahtuvaa plastista kutistumaa. [2; 8, s. 21; 13, s. 4; 14, s. 49.]

SRA-aineiden käyttö on erittäin hyödyllistä, jos rakenteen kutistuma on pidettävä pienenä ja halkeilua rajoitettava. Lisäaineen käytöllä voidaan pienentää betonin halkeamapotentiaalia, hidastaa mahdollisten halkeamien syntyä ja pienentää halkeamaleveyksiä sekä niiden välimatkoja. Lisäksi SRA-lisäaineet parantavat betonin tiiveyttä ja siten vähentävät raudotteiden korroosiota sekä betonin lohkeilua, minkä johdosta rakenteiden käyttöikä kasvaa ja korjaustarve vähenee. [14, s. 52.]

Suomessa SRA-aineet ovat melko uusi lisäaineryhmä. Ennen 2000-lukua SRA-aineita ei juurikaan käytetty suomessa. Käyttö on edelleen rajoittunut lähinnä vain erikoiskoh-teisiin tuotteiden tuntemattomuuden sekä hinnan vuoksi. [14, s. 49.]

SRA-aineet ovat nestemäisiä ja niillä pystytään korvaamaan veden osuutta betonimas-sassa, jolloin säilytetään haluttu vesi—sementtisuhde. Lisäainetta annostellaan 0,5—3 % sementin painosta ja se tulee sekoittaa betonimassan sekaan kuten tavallisetkin lisäaineet. Jos lisäainetta käytetään huokostettuun betoniin voi huokostimen annostus-ta joutua lisäämään haluttuun ilmamäärään pääsemiseksi.[2; 8, s. 22; 11, s. 488.]

2.4.2 Kuidut

Käytettäviä kuitutyppejä on monia, kuten teräs- sekä muovikuituja, ja niillä on toisis-taan poikkeavia ominaisuuksia ja mitoitusohjeita. Niiden päätarkoituksena on tehdä betoni lujuusominaisuuksiltaan sitkeämmäksi aineeksi, jolloin halkeamavälit ja -leveydet pienenevät. Kuiduilla voidaan estää plastisen ja kuivumiskutistuman syntyä. [4, s. 5; 17, s. 61.]

Muovikuitujen materiaali on yleensä polypropyleenia. Muovikuidut sekoitetaan betoni-massaan, jolloin ne muodostavat kolmiulotteisen rakenteen, joka estää betonin plasti-sesta kutistumisesta aiheutuvien halkeamien muodostumista ja jakaa niitä parantaen muun muassa tiiveyttä. [17, s. 65.]

Teräskuituja tulee massaan vähemmän eikä niiden tehokkuus ole sama plastisessa kutistumassa, mutta kuivumiskutistuman suhteen toimivuus on hyvä. Kuidut nostavat

betonimassan hintaa ja jäykistävät betonia, ja usein massoissa käytetään kuitujen kanssa notkistinta. [4, s. 5.]

2.4.3 Kutistumissaumat

Perinteinen keino kutistumisesta syntyvien muodonmuutosten ja halkeilujen hallintaan on jakaa maanvarainen lattia kutistumissaumoin sopiviin ruutuihin, jolloin kutistumisesta syntyvät muodonmuutokset kohdistuvat saumoihin ja hallitsematonta halkeilua ei synny. Yleisesti käytetty kutistumissaumojen väli on 6—12 metriä ja pyrkimyksenä on neliön- tai suorakaiteenmuotoinen ruudukko. [16, s. 38—39.]

Kuten edellä mainittiin, kutistumissauma sallii kulmanmuutoksen ja sauman avautumisen. Sauma voidaan valmistaa sahaamalla kovettuneeseen betoniin ura, jonka syvyys on 30 % laatan paksuudesta. Saumojen oikea-aikainen sahaus on tärkeää, sillä liian aikaisesta sahaamisesta sauman reunat voivat vahingoittua ja liian myöhään sahattu sauma aiheuttaa riskin halkeamien muodostumiselle. Sopivana ajankohtana sauman sahaamiselle voidaan pitää noin 8—24 h betonilaatan valun jälkeen. Saumat tulee varustaa liukuvin vaarnateräksin, jotka sijoitetaan laatan keskelle. [17, s. 71.]

2.4.4 Raudoitus

Raudoituksella saadaan rajoitettua betonin kutistumaa ja mahdollista käyrystymistä. Raudoitettu betoni kutistuu vähemmän kuin raudoittamaton, ja raudoituksen kutistumaa pienentävä vaikutus voidaan ottaa huomioon myös Suomen Betoniyhdistyksen ohjeissa by 50 kutistumalaskuissa, jotka on esitetty kohdassa 2.5.1. Raudoituksen avulla saadaan vähennettyä myös halkeilua sekä rajoitettua halkeamaleveyttä. [14, s. 34; 18, s. 25.]

Haitallista käyrystymistä voidaan rajoittaa raudoitteilla, jotka sijoitetaan laatan yläpintaan. Laatan alapintaan sijoitetut raudoitteet taas lisäävät käyrystymistä. Raudoitusta käytetään lähinnä pitämään kutistumahalkeamien leveydet halutun mukaisina, koska yksinään käytettynä se on melko kallis kutistuman hallintakeino. [14, s. 35; 16, s. 39.]

2.4.5 Jälkihoito

Jälkihoito tulisi aloittaa välittömästi betonin levityksen ja viimeistelyn jälkeen. Hyvällä jälkihoidolla pystytään estämään kutistuman synty, ennen kuin betonin vetolujuus on kehittynyt tarpeeksi korkeaksi vastaanottamaan vetojännityksiä. Huonon tai liian myöhään aloitetun jälkihoidon seurauksena on varhaisvaiheen kutistuman ja halkeiluriskin lisääntyminen. [4, s. 1; 8, s. 22.]

Pitkäaikaiskutistuman suuruuteen jälkihoidolla ei juuri ole vaikutusta, mutta se siirtää sitä myöhemmäksi. Kuten edellä mainittiin, betoni ehtii kehittää lujuuttaan kestääkseen syntyvät jännitykset sekä toimiakseen suunnitellulla tavalla. Kutistumaa hidastamalla ja myöhästyttämällä annetaan aikaa kutistuman aiheuttamien jännitysten relaksoitumiseen ja näin saadaan rakenteiden halkeilua vähennettyä merkittävästi. [8, s. 42—43.]

Yleisimmät jälkihoitotavat ovat betonirakenteiden peittäminen muovikalvolla haihtumisen estämiseksi sekä kuivien betonipintojen kastelu, jolla pyritään korvaamaan haihtuva vesi uudella vedellä. Vesi voidaan lisätä sumuttamalla tai peittämällä märillä kankaila. [8, s. 22.]

2.5 Kutistuman laskenta

Kirjallisuudessa on esitetty useita laskentakaavoja, jotka käsittelevät pitkäaikaista kuivumiskutistumaa. Seuraavat kohdat käyvät läpi kaksi yleisesti käytettyä betonin kuivumiskutistuman laskentamenetelmää. Laskentakaavoilla saatuja tuloksia vertaillaan insinööriyössä tehtäviin koebetoneiden kutistumamittauksiin ja arvioidaan kaavojen toimivuutta.

2.5.1 Suomalaiset ohjeet

Suomen Betoniyhdistyksen ohjeessa by 50 on esitetty ohjeet, joiden avulla voidaan laskea betonin loppukutistuma. Ellei tarkempia menetelmiä käytetä, voidaan tavanomaista kiviaineista sisältävän betonin, jonka ylänimellisraja on vähintään 12 mm, loppukutistuma laskea kaavasta:

$$\varepsilon_{CS} = k_{Sh} \varepsilon_{CS0},$$

missä

ε_{cs0} on betonin loppukutistuman perusarvo, jolle rakenteen eri ympäristöolosuhteissa otaksutaan taulukon 1 mukaiset arvot,

k_{sh} on rakenteen muunnetusta paksuudesta h_e riippuva kerroin, joka saadaan taulukosta 2. Muunnettu paksuus lasketaan siten, että poikkileikkauksen pinta-ala jaetaan sen piiriin puolikkaalla.

Taulukko 1. Loppukutistuman perusarvo ε_{cs0} [18, s. 25].

Rakenteen ympäristöolosuhteet	Suhteellinen kosteus [%]	Loppukutistuman perusarvo ε_{cs0} [‰]
Vesi	100	0
Hyvin kostea ilma	90	0,2
Ulkoilma	70	0,4
Kuivailma	40	0,6

Taulukko 2. Kerroin k_{sh} [18, s. 25].

h_e [mm]	k_{sh}
≤ 50	1,20
100	1,00
200	0,80
300	0,65
≥ 500	0,50

Raudoituksen kutistumaa pienentävä vaikutus voidaan ottaa huomioon kertomalla ε_{cs} arvolla $(1-10\rho)$ pääasiassa puristetuissa rakenteissa ja $(1 - 0,6\frac{\rho'}{\rho})$ pääasiassa taivuteissa rakenteissa.

Aikavälit $t_i \dots t_n$ (vuorokautta) tapahtuva kutistuma voidaan laskea kaavasta:

$$(k_{sn} - k_{si})\varepsilon_{cs}$$

missä kertoimet k_s valitaan taulukosta 3.

Taulukko 3. Kertoimet k_s [18, s. 26].

Aika	k_s
1 d	0,10
3 d	0,15
28 d	0,40
0,5 a	0,70
1 a	0,85
≥ 5 a	1,00

Jos tavanomaisen betonin koostumus tunnetaan, loppukutistuma voidaan arvioida kaavalla:

$$\varepsilon_{cs} = k_{cem} k_{sh} \left(\frac{P}{170} - 0,7 \right) \varepsilon_{cs0},$$

missä

$k_{cem} = 1,2$, jos käytetään masuunisementtiä (kuonaa 70 %), väliarvot 0...70 % voidaan interpoloida lineaarisesti.

$k_{cem} = 1,0$ CEM I ja CEM II sementteille

P on betonin pastamäärä (l), joka voidaan laskea kaavasta

$P = \text{sementtimäärä (kg)}/3,17 \text{ kg/l} + \text{masuunikuonan määrä (kg)}/2,9 \text{ kg/l} + \text{lentotuhkanmäärä (kg)}/2,3 \text{ kg/l} + \text{vesi (l)} + \text{lisäaineet (l)} + \text{ilma (l)}$. [18, s. 25—26.]

2.5.2 Eurokoodi

Eurokoodin mukaan kuivumiskutistuma loppuarvo ε_{cd} lasketaan kaavalla:

$$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0},$$

missä

k_h on kerroin, joka riippuu muunnetusta paksuudesta h_0 taulukon 4 mukaisesti

h_0 on poikkileikkauksen muunnettu paksuus (mm) = $2A_c/u$,

missä

A_c on betonin poikkileikkausala

u on kuivumiselle alttiin poikkileikkauksen osan piiri

Taulukko 4. Kertoimen k_h arvoja [19, s. 33].

h_0	k_h
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Kuivumiskutistuman perusarvo $\varepsilon_{c,0}$ lasketaan kaavasta:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}})] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55[1 - (\frac{RH}{RH_0})^3],$$

missä

f_{cm} on keskimääräinen puristuslujuus (MPa)

$f_{cm0} = 10$ MPa

RH on ympäristön suhteellinen kosteus (%)

$RH_0 = 100$ %

α_{ds1} ja α_{ds2} ovat kertoimia, jotka riippuvat sementin tyypistä (Taulukko 5).

Taulukko 5. Sementtityypistä riippuvat kertoimet α_{ds1} ja α_{ds2} [19, s. 198].

Sementin tyyppi	α_{ds1}	α_{ds2}
S	3	0,13
N	4	0,12
R	6	0,11

Kuivumiskutistuman kehittyminen ajan mukana saadaan kaavasta:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_0^3}}$$

missä

t on betonin ikä tarkasteluhetkellä vuorokausina,

t_s on betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistumisen alkamishetkellä. Tavallisesti tämä hetki on jälkihoidon päätyminen. [19, s. 33—34, 198.]

3 Kutistumatutkimukset

3.1 Koemateriaalit

Koekappaleet valettiin Ruskon Betoni Oy:n Kivenlahden valmisbetonitehtaalla. Testit tehtiin peruslattiabetonille, jonka lujuusluokka on C30/37, maksimiraekoko on hieno #16, notkeusluokka (painuma) S3 ja vesi—sementtisuhte on 0,55—0,60. Massat notkistettiin tehonotkistimella, jonka määrä pidettiin kokoajan vakiona. Tehonotkistin pidentää betonimassan työstämisaikaa vaikuttamatta kuitenkaan sitoutumisaikaan. Näytteet otettiin 2 m³:n eristä. [24.]

Testeissä sementteinä käytettiin sementti 1:tä sekä sementti 2:ta ja kutistumaa vähentävänä lisäaineena käytettiin SRA 1:tä. Betoniresepti pysyi kokoajan samana, ainoastaan sementtiä muutettiin ja SRA-aineen määrää vaihdeltiin. Taulukosta 6 nähdään testattavat betonimassat.

Taulukko 6. Vertailtavat betonimassat

Vertailtavat näytemassat
Sementti 1-vertailubetoni
Sementti 2 -vertailubetoni
Sementti 1 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)
Sementti 1 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)
Sementti 2 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)
Sementti 2 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)

Sementti 1:llä on CE-merkintä ja se täyttää standardin SFS-EN 197-1: 2011 vaatimukset. Parhaimmillaan sementti 1:n ominaisuudet ovat valmisbetonissa. Sementti 1 on ollut yrityksellä pitkään käytössä ja se toimii vertailukohteena sementti 2:lle kutistumamittauksissa. [20.]

Sementti 2 täyttää SFS-EN 197-1: 2011 asettamat vaatimukset. Sementti 2 tuli yrityksen käyttöön vuoden 2014 alkupuolella. Uudesta sementistä haluttiin selvittää sen kutistuma ja vertailla saatuja tuloksia jo käytössä olevaan yllämainittuun sementti 1:een. [21.]

SRA 1 on kutistumista vähentävä lisäaine, joka vähentää betonin luonnollista kutistumaa jopa 50 %. Lisäaine on vesiliukoista ja sitä voidaan käyttää kaikenlaisissa betoneissa ja laasteissa. SRA 1 toimii ensisijaisesti alentamalla betonin kapillaarihuokosisa olevan veden pintajännitystä. [2.]

SRA 1:n annostus on 0,5—3 % sementin painosta ja normaaliannostus on noin 0,75 % sementin painosta. Lisäaine lisättiin suoraan betonimyllyyn sekoitusveden jälkeen ja sekoitusta jatkettiin vielä noin 60 sekunnin ajan. [2.]

Tässä insinööriyössä vertailtiin lisäaineen vaikutusta kahteen yllämainittuun sementtiin kahdella eripitoisuudella. Testeissä käytettiin normaalia annostusta eli 0,75 % sementin painosta ja maksimi annostusta, joka on 3 % sementin painosta. Betonireseptien vesimäärä pidettiin samana, koska lisäainemäärät olivat alhaisia.

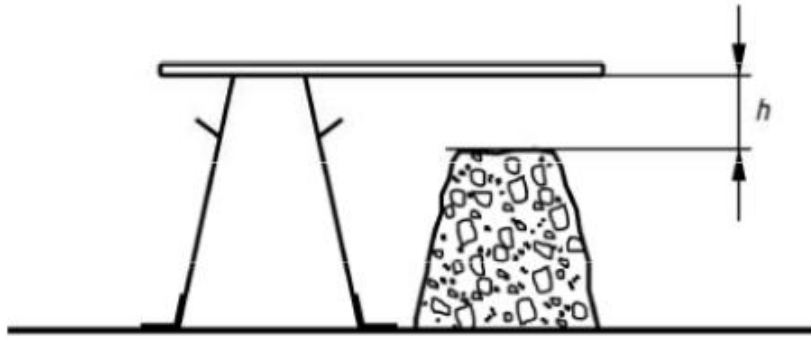
3.2 Menetelmät

Kaikki koebetonit valettiin samana päivänä, jotta olosuhteet olisivat mahdollisimman samat kaikilla kappaleilla. Koekappaleet valettiin Kivenlahden betoniaseman henkilökunnan sekä Ruskon Betoni Oy:n laatuinsinöörin Jere Toivosen avustuksella.

Tuoreelle sekä kovettuneelle betonille tehtävät testit toteutettiin Kivenlahden aseman betonilaboratoriossa standardien mukaisesti oikean laadun varmistamiseksi. Contesta Oy:n tiloissa tehtiin kutistumamittaukset palkkikokeella Suomen Betoniyhdistyksen ohjeiden by 22 mukaisesti mittaamalla palkkien pituussuunnassa tapahtuvaa kutistumista 7—56 vuorokauden ajalta.

3.2.1 Tuoreen betonin testaus

Tuoreesta betonista mitattiin betonimassan lämpötila lämpömittarilla sekä painuma standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti. Kuvassa 6 nähdään, kuinka painuma mitattiin tuoreesta betonista.



Kuva 6. Painuman mittaaminen [22, s. 20].

Painumalla siis ilmoitetaan, kuinka paljon betoni on painunut mitta-astian korkeimpaan kohtaan nähden ja se kuvaa massan työstettävyyttä. Taulukosta 7 nähdään, kuinka painumaluokat jakautuvat.

Taulukko 7. Painumaluokat [18, s. 106].

Painumaluokat	
Luokka	Painuma (mm)
S1	10—40
S2	50—90
S3	100—150
S4	150—210
S5	≥ 220

3.2.2 Puristuslujuus

Puristuslujuusmittaukset tehtiin standardien SFS-EN 12390-1; 2; 3; 4 mukaisesti. Puristuslujuudet mitattiin seitsemän (alkulujuus) ja 28 (loppulujuus) vuorokauden kohdalla, joten koekappaleita valettiin yhteensä 12 kappaletta.

Koekappaleet valettiin lieriömuotteihin, jonka korkeus on 300 mm ja halkaisija 150 mm. Muotit purettiin seuraavana päivänä ja putsattiin (kuva 7). Kovettuneet koekappaleet merkittiin selkeästi ja siirrettiin vesisäilytykseen (20 ± 2 °C) odottamaan puristuslujuusmittausta. [22, s. 125, 136.]



Kuva 7. Muottien purku

Puristuspäivänä koekappaleet otettiin pois vesisäilytyksestä ja epätasainen pinta hiottiin tasaiseksi. Kappaleiden annettiin kuivua, minkä jälkeen ne punnittiin ja puristettiin kuvassa 8 olevalla laitteella. Tulokset merkittiin ylös ja saadut lieriölujuudet muunnettiin kuutiolujuuksiksi.



Kuva 8. Puristuslujuuden mittaaminen lieriöpalkista

3.2.3 Kutistuman mittaus

Kutistumamittaukset tehtiin Betoni Yhdistyksen ohjeiden by 22 mukaisesti Contesta Oy:n henkilökunnan avustuksella. Palkkien mitat ovat (100 x 100 x 500) mm ja koe-kappaleiden päätypinnoissa on ruostumattomat mittatapit. Jokaisesta massasta valettiin kaksi kutistumapalkkia eli yhteensä 12 kappaletta, kuvassa 9 näkyviin muotteihin. Heti valun jälkeen pinnat tasoitettiin ja muotit peitettiin muovilla. [23, s. 29.]



Kuva 9. Kutistumapalkkimuotteja

Seuraavana päivänä muotit kuljetettiin Contestan tiloihin, missä muotit purettiin ja koe-palkit merkittiin selvästi. Muottien purun jälkeen palkit siirrettiin kuvan 10 mukaiseen vesisäilytykseen (20 ± 2 °C).



Kuva 10. Kutistumapalkkien vesisäilytys

Seitsemän vuorokauden ikäisinä palkit otettiin pois vesisäilytyksestä ja mitattiin kutistuman nollakohta sekä palkkien paino. Kutistumamittaus suoritettiin kuvan 11 mukaisella laitteella.



Kuva 11. Kutistumamittaus palkkikokeella

Jokaisen mittauskerran alussa laite kalibroitiin standardipalkilla, minkä jälkeen mitattiin kutistumapalkit (paino ja kutistuma). Laite asetettiin mittatappien kohdalle ja palkin alapuolella olevasta mittarista luettiin tulos, joka merkittiin ylös.

Seitsemän vuorokauden ikäisenä palkit siirrettiin ilmasäilytykseen olosuhdehuoneeseen, jonka lämpötila on 20 ± 2 °C, jonka suhteellinen kosteus on 40 ± 5 % (kuva 12). Huoneen tarkka RH % ja lämpötila nähdään liitteessä 1. Palkkeja mitattiin 7, 28 ja 56 vuorokauden ikäisenä. Seitsemän ja 56 vuorokauden mittaustulosten erotusten keskiarvo laskettuna mm/m ilmaisee kutistuman. [23, s. 29.]

Kutistumatuloksia verrattiin keskenään ja niistä nähtiin, toimiiko kutistumaa vähentävä lisäaine toimittajan ilmoittamalla tavalla, ja onko sementtityypillä vaikutusta kutistuman suuruuteen. Kutistumamittauksista saatuja tuloksia verrattiin laskukaavojen antamiin teoreettisiin tuloksiin.



Kuva 12. Palkkien säilytys olosuhdehuoneessa

4 Tulokset

4.1 Tuoreen betonin testaus

Taulukossa 8 on esitetty tuoreesta betonista testatut painumat, lämpötilat sekä lasketut tarkat vesi—sementtisuhteet ja massojen sekoitusajat. SRA-massoissa on pidempi sekoitusaika, koska lisäaineen lisäyksen jälkeen sekoitusta jatkettiin vielä noin 60 sekunnin ajan.

Vesi—sementtisuhteeseen on laskettu lisäaine SRA 1 mukaan. Myös massassa käytetyn tehonotkistimen prosentuaalinen osuus sementin määrästä on laskettu taulukossa 8, koska sillä on vaikutusta betonimassan työstettävyyteen.

Taulukko 8. Tuoreen betonin testaus

Betonimassa	Sekoitusaika s	Lämpötila		v/s	Notkistin	Painuma mm
		Ulkoilma °C	Massa °C		%	
Sementti 1 -vertailubetoni	88	-9,7	18,1	0,56	0,26	60
Sementti 2 -vertailubetoni	70	-9,7	20,7	0,56	0,31	110
Sementti 1 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)	151	-8,8	20,1	0,58	0,26	120
Sementti 1 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)	136	-8,8	19,3	0,56	0,26	80
Sementti 2 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)	147	-8,8	17,1	0,57	0,30	130
Sementti 2 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)	183	-8,9	20,5	0,55	0,31	90

4.2 Puristuslujuus

Puristuslujuudet mitattiin seitsemän ja 28 vuorokauden kohdalla ja taulukossa 9 olevat arvot ilmoittavat betonimassojen kuutiolujuuden. Mitatut lieriölujuudet muutettiin kuutiolujuuksiksi liitteen 2 mukaisesti. Massojen lujuusluokka on C30/37, mikä tarkoittaa, että 28 vuorokauden ikäisenä betonin puristuslujuuden täytyy ylittää 37 megapascalia, jotta tulos on hyväksyttävä. Taulukosta 9 ilmenee myös kuutiotiheys, joka laskettiin painon avulla, kun tiedettiin palkin tarkat mitat.

Taulukko 9. Kovettuneen betonin lujuus ja tiheys

Betonimassa	Kuutiolujuus			Kuutiolujuus		
	7 d	Paino	Tiheys	28 d	Paino	Tiheys
	MPa	g	kg/m ³	MPa	g	kg/m ³
Sementti 1 -vertailubetoni	33,8	12484	2355	47,3	12394	2338
Sementti 2 -vertailubetoni	39,1	12367	2333	48,7	12367	2333
Sementti 1 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)	29,7	12329	2326	43,2	12430	2345
Sementti 1 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)	35,3	12470	2352	49,3	12448	2348
Sementti 2 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)	31,5	12400	2339	45,0	12361	2332
Sementti 2 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)	42,5	12449	2348	51,1	12495	2357

4.3 Kutistuman mittaus

Kutistumaa mitattiin 7, 28 ja 56 vuorokauden kohdalla. Taulukossa 10 on esitetty palkkien kutistumat mm/m sekä painon muutos prosentuaalisesti. Taulukossa 10 esitetyt tulokset ovat kahden kutistumapalkin keskiarvoja, joiden tarkat tulokset löytyvät liitteestä 3.

Taulukko 10. Kutistuman (mm/m) ja painon muutos (%)

Betonimassa	7		28		56	
	Kutistuma	Painon muutos	Kutistuma	Painon muutos	Kutistuma	Painon muutos
	mm/m		mm/m		mm/m	
Sementti 1 -vertailubetoni	0	0,0 %	-0,550	-2,3 %	-0,582	-2,7 %
Sementti 2 -vertailubetoni	0	0,0 %	-0,678	-2,6 %	-0,807	-2,9 %
Sementti 1 + SRA 1 (3 %)	0	0,0 %	-0,402	-2,3 %	-0,435	-2,8 %
Sementti 1 + SRA 1 (0,75 %)	0	0,0 %	-0,502	-2,3 %	-0,536	-2,7 %
Sementti 2 + SRA 1 (3 %)	0	0,0 %	-0,386	-2,7 %	-0,431	-3,2 %
Sementti 2 + SRA 1 (0,75 %)	0	0,0 %	-0,454	-2,5 %	-0,536	-3,0 %

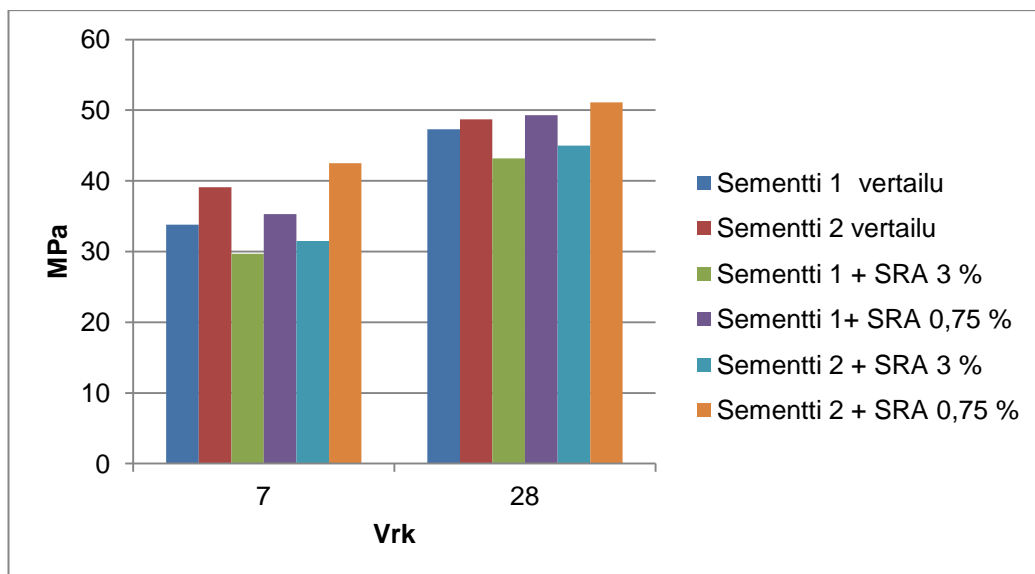
5 Tulosten tarkastelu

5.1 Laadunvarmistus

Massojen painuman tavoitteeksi asetettiin S3, ja kun taulukon 8 tuloksia verrataan taulukon 7 arvoihin, nähdään, että osa massoista jäi hiukan jäykiksi. Taulukon 8 tuloksista nähdään selvästi, että SRA-aine notkisti betonimassoja. Vesi—sementtisuhte pysyi lähes samana SRA-aineen lisäyksestä huolimatta, jolloin kaikki palkit olivat vertailukelpoisia. Koska kyseessä on automatisoitu betoniasema, on betonimassaerissä väkisin-kin pientä eroa.

Kuvasta 13 nähdään betonimassojen puristuslujuuden kehitys. Sementti 2:lla lujuuden kehitys oli Sementti 1:tä nopeampaa, kuitenkin loppulujuudet olivat lähes samaa luokkaa. Sementti 2 on puhtaampaa sementtiä, joten se reagoi nopeammin kuin sementti 1.

Kuvasta 13 havaitaan, että normaaliannostuksella (0,75 %) SRA-aine kasvattaa massojen puristuslujuutta, koska aine tiivistää betonin rakennetta. Maksimiannostus (3 %) kuitenkin kasvatti lievästi vesi—sementtisuhdetta, mikä alensi hiukan puristuslujuutta. Kuitenkin lujuusluokkaan C30/37 kaikkien massojen puristuslujuudet olivat hyviä. Lasketuissa tiheyksissä ei ollut suuria eroja, kuten taulukosta 9 nähdään. Kuitenkin normaaliannostuksella betoni tiivistyi, mikä on tuloksista havaittavissa painon nousuna.

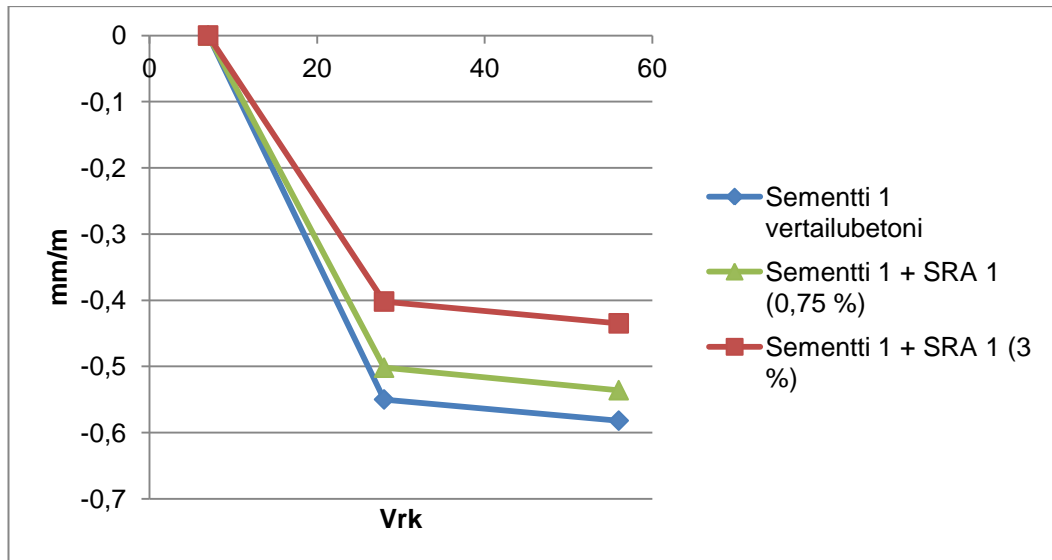


Kuva 13. Betonimassojen lujuuden kehitys

5.2 Kutistuman arviointi

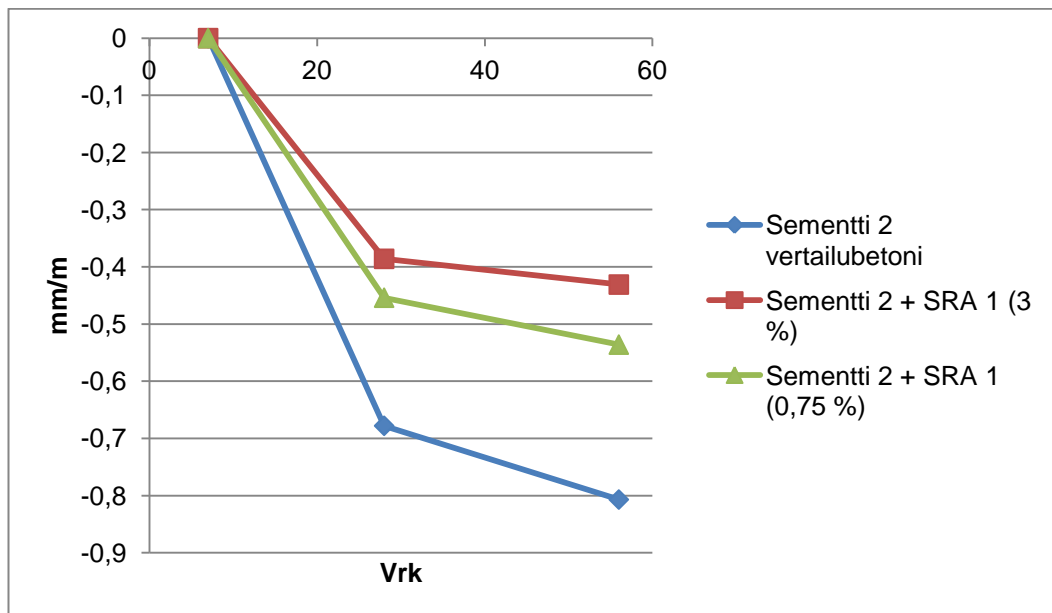
Kuvista 14 ja 15 nähdään, että kutistuminen on ollut alkuvaiheessa (7—28 vrk) huomattavasti suurempaa kuin mittauksen loppuvaiheessa (28—56 vrk). Kuvista 14 ja 15 voidaan päätellä, että SRA-aineen vaikutus on ollut suurimmillaan kovettumisen alkuvaiheessa.

Kuvassa 14 nähdään selkeästi SRA-lisäaineen vaikutus eri pitoisuuksilla Sementti 1:een massan kutistumaan. SRA-aineen maksimiannostuksella (3 %) saatiin kutistumaa pienennettyä noin 25 % ja normaaliannostuksella (0,75 %) kutistuma pieneni noin 8 % verrattuna referenssipalkkiin.



Kuva 14. Sementti 1:n kutistuma ajan funktiona

Kuvassa 15 nähdään SRA 1:n vaikutus Sementti 2 –betonimassoihin. SRA-aineen maksimiannostuksella (3 %) pystyttiin kutistumaa vähentämään jopa 47 % ja normaaliannostuksella (0,75 %) kutistuma väheni noin 34 % referenssipalkkiin nähden.



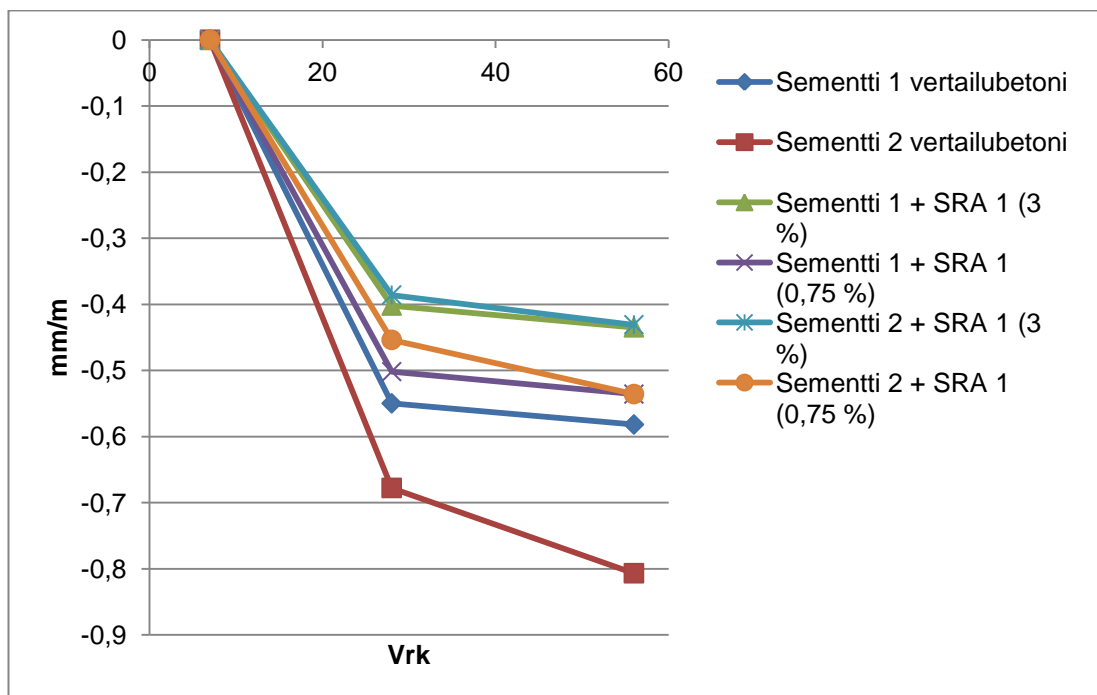
Kuva 15. Sementti 2:n kutistuma ajan funktiona

Kuvassa 16 on vertailtu sementti 1:n ja Sementti 2:n kutistumaeroja. Sementti 2 -vertailubetonilla kutistuma oli huomattavasti suurempaa kuin sementti 1 -vertailubetonilla. Kuitenkin SRA-lisäaineen avulla päästiin melkein samoihin kutistuma-

arvoihin kummallakin sementillä. Kuvasta 16 on selkeästi nähtävissä, että SRA-aineen annostelun kasvattaminen pienentää kutistumaa.

SRA-lisäaineella oli huomattavasti suurempi vaikutus Sementti 2 -betonimassoihin kuin Sementti 1 -massoihin. Suurempi alkalipitoisuus kasvattaa kutistumaa, koska sementin hydrataatiotuotteet ympäröivät veteen liuenneet alkali-ionit, jolloin ne synnyttävät betonia hajottavan paineen, kuitenkin vähentämättä huokosissa olevan veden pintajännitystä. SRA-aineiden vaikutus perustuu veden pintajännityksen pienemiseen, jolloin kutistumaa synnyttävät voimat vähenevät ja siksi SRA-aineella on suurempi vaikutus Sementti 2:een

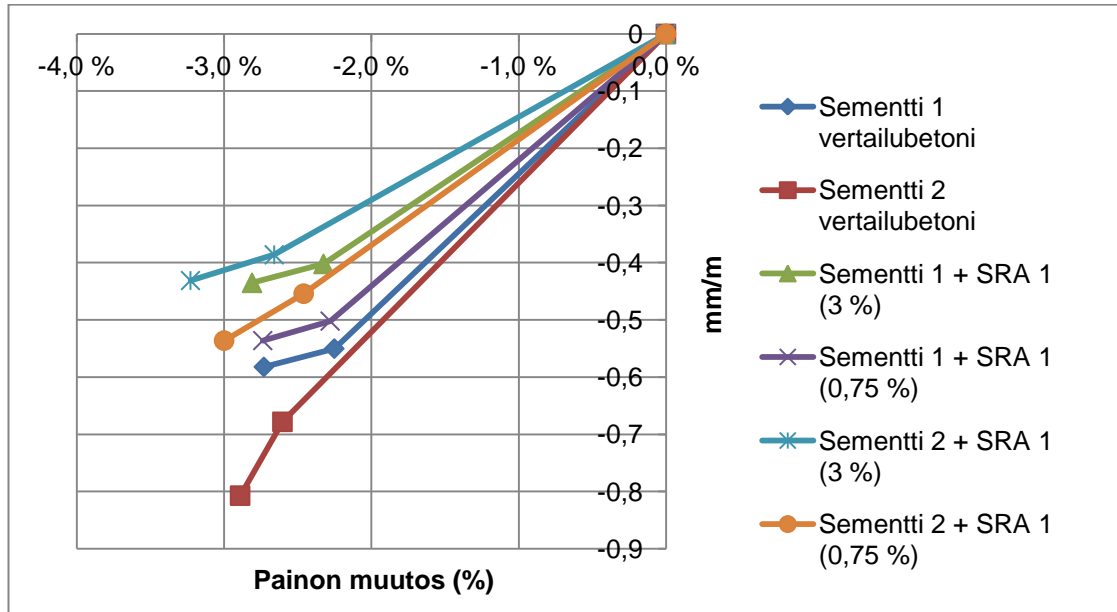
Toinen selitys Sementti 2 -betonimassojen suuremmalle kutistumalle on, että sementti 2 on puhtaampaa kuin sementti 1, jolloin reaktionopeus ja lujoudenkehitys alussa ovat selvästi nopeampia ja kutistumavoimat suurempia kuin sementti 1:llä. SRA-aine vaikuttaa kutistumavoimiin, kuten edellä on mainittu, joten aineen vaikutus on suurempaa nopeasti reagoivissa sementtilajeissa.



Kuva 16. Sementti 1:n ja sementti 2:n kutistuman vertailua ajan funktiona

Kuvassa 17 on vertailtu painon muutoksen vaikutusta kutistuman suuruuteen. Painon muutoksissa ei ole suuria eroja, koska kaikkia kappaleita säilytettiin samassa olosuhteissa. Kuitenkin kuvasta 17 voidaan päätellä, että painon muutos on ollut sitä

suurempaa, mitä enemmän betonimassassa on ollut SRA-ainetta. Tämä johtuu siitä, että SRA-aineet pienentävät kapillaarihuokosissa olevan veden pintajännitystä ja pintajännityksen alentuessa vesi pääsee pakenemaan yhä pienemmistä kapillaarihuokosista, jolloin haihtuminen nopeutuu.



Kuva 17. Kutistuma painon muutoksen funktiona

5.3 Laskukaavojen toimivuuden arviointi

Työssä vertailtiin kahta kutistuman arviointiin tarkoitettua laskukaavaa, Suomen Betoniyhdistyksen ohjetta ja Eurokoodia, joiden avulla pystytään selvittämään betonimassojen teoreettinen kutistuma. Suurena puutteena kummassakin laskukaavassa oli, että niissä ei huomioitu SRA-aineen vaikutusta, joten laskuissa on vertailtu ainoastaan vertailubetoneita. Taulukosta 11 on esitetty teoreettiset kuivumiskutistuman arvot (mm/m = ‰) ja vertailtu niitä palkkikokeesta saatuihin 56 vuorokauden mittaustuloksiin. Tarkemmat laskut löytyvät liitteestä 4.

Taulukko 11. Laskukaavojen vertailua

	Mitattu arvo	Lasketut arvot	
	56 d	by 50	Eurokoodi
Betonimassa	‰	‰	‰
Sementti 1 -vertailubetoni	0,582	0,652	0,456
Sementti 2 -vertailubetoni	0,807	0,653	0,449

Kummassakin kaavassa on hyvät ja huonot puolensa. Kutistumaa arvioitaessa on otettava monta eri tekijää huomioon, joten aivan täydellistä laskukaavaa on lähes mahdoton tehdä.

Laskukaavoista saaduilla tuloksilla on huomattavasti eroa, eivätkä ne vastanneet täysin todellisuutta. Laskukaavoista saadaan kuitenkin suuntaa antavaa tietoa kutistuman suuruudesta, mitä voidaan hyödyntää betonirakenteita suunniteltaessa. Jos teoreettinen kutistuma kasvaa liian suureksi, voidaan miettiä esimerkiksi SRA-aineen käyttöön-ottoa, jolla saataisiin kutistumaa pienemmäksi.

6 Johtopäätökset

Laadunvarmistusmittauksissa havaittiin, että SRA-aine notkistaa betonimassaa ja normaaliannostelulla se parantaa betonin puristuslujuutta, koska SRA-aine tiivistää betonia. Kuitenkin maksimiannostelu vaikutti hieman vesi—sementtisuhteeseen, jolloin puristuslujuustulokset olivat hiukan heikommat, mutta kuitenkin riittävän hyvät lujuusluokkaan C30/37. Valmistuksessa olisi siis hyvä huomioida SRA-aineen vaikutus vesi-sementtisuhteeseen.

Sementti 2:n alkureaktionopeus ja lujuudenkehitys ovat nopeampia kuin sementti 1:llä. Tällöin myös kutistuman aiheuttavat voimat ovat suurempia, jolloin kutistuminenkin on suurempaa. Sementti 2 kutistui noin 28 % sementti 1:tä enemmän, mutta SRA-aineella päästiin lähes samoihin kutistuma-arvoihin kummallakin sementtityypillä.

Tutkimuksissa havaittiin, että suuremmalla SRA-ainepitoisuudella saadaan selvästi parempia tuloksia. SRA-aineen vaikutus oli huomattavasti selkeämpää sementti 2:lla. Sementti 2 -betonimassan kutistuma pieneni SRA-aineen maksimipitoisuudella jopa 47 % ja normaaliannostuksella 34 %. Sementti 1:llä SRA-aineen vaikutus oli hiukan pienempää, koska maksimipitoisuudella kutistuma väheni 25 % ja minimipitoisuudella 8 %. Tuloksista voidaan päätellä, että SRA-aineen vaikutus on selvästi suurinta kovettumisen alkuvaiheessa (7-28 vrk.).

SRA-aine nopeuttaa veden poistumista huokosista, koska se alentaa veden pintajännitystä ja vesi pääsee poistumaan yhtä pienemmistä kapillaarihuokosista. Tuloksista voidaan myös päätellä, että mitä enemmän vettä huokosista on poistunut, sitä pienempää on ollut kutistuminen.

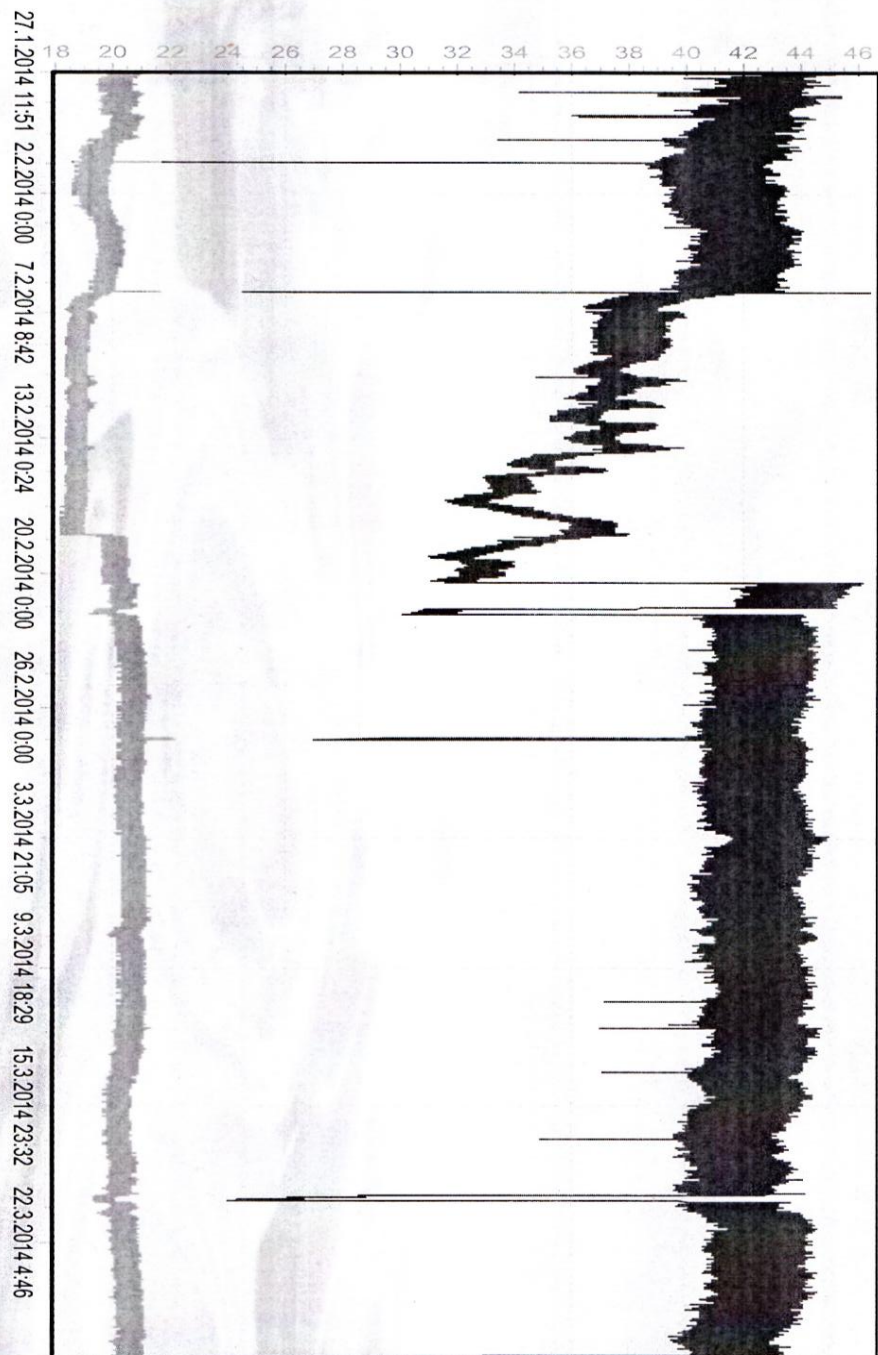
Laskentakaavoilla saadut teoreettiset tulokset erosivat todellisista tuloksista ja laskentakaavojen huonona puolena on se, ettei niissä huomioida SRA-aineen kutistumaa vähentävää vaikutusta. Laskukaavojen perusteella kuitenkin voidaan arvioida kutistuman suuruutta ja kutistuman hallintakeinojen valintaa.

Lähteet

- 1 Finnsementti. Verkkodokumentti
<<http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-suunnittelijalle/betonin-kutistuminen>> Luettu 11.2.2014
- 2 SRA 1 tekninen tuotelehti.
- 3 Ruskon Betoni Oy. Verkkodokumentti
<www.ruskonbetoni.fi> Luettu 11.2.2014
- 4 Anttila, Vesa. 2010. Betonin kutistuma ja sen huomioiminen. Asiakastiedote 1/2010. Rudus Oy
- 5 Unto Siikanen. 2009. Rakennusaineoppi. Rakennustieto Oy. Viro: Kolofon Baltic Oü.
- 6 Hämäläinen, Jari, Manninen Petri. 2011. Betonin lämmittäminen talvivaluissa. Pistesarja Oy
- 7 Leskelä, Matti V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008 by 210. Suomen Betoniyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 8 Leivo, Markku, Holt Erika. 2001. Betonin kutistuma. VTT. Espoo: Otamedia Oy
- 9 Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201. 2005. Suomen Betoniyhdistys ry. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 5. painos
- 10 Holt, Erika. 2001. Early age autogenous shrinkage of concrete. VTT. Vantaa: Tummaavuoren Kirjapaino Oy.
- 11 Lamond, Joseph F., Pielert James H. 2006. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. ASTM International. Printed in Bridgeport, NJ.
- 12 Betonin valintaopas. 2006. Rudus Oy
- 13 BASF. Verkkodokumentti.
< http://www.basf-admixtures.com/SiteCollectionDocuments/Support/CTUs/RMX-CTU-0259%20CTU%20-%20Shrinkage%20of%20Concrete%20LG_NoCrops%20052809.pdf> Luettu 22.2.2014.

- 14 Hietala, Jasmina. 2011. Betonilattioiden kutistuman hallinta. Espoo. Aalto-yliopisto. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. Diplomityö.
- 15 Finnsementti. Verkkodokumentti. < <http://www.finnsementti.fi/tietoa-betonista/tietoa-betonista-suunnittelijalle/seosaineet-sementissa> > Luettu 6.3.2014.
- 16 Petrow, Seppo. 2010. Maanvaraiset betonilattiat. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Verkkodokumentti. < www.betoni.com/Download/22460/BET1001%2036-41.pdf > Luettu 6.3.2014.
- 17 Betonilattiat 2002 by 45/BLY7. 2002. Suomen Betoniyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 18 Betoninormit 2012 by 50. 2011. Suomen Betoniyhdistys r.y. Lahti: ESA Print Oy.
- 19 SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- 20 Sementti 1 tekninen tuotelehti.
- 21 Sementti 2 tekninen tuotelehti.
- 22 SFS-käsikirja 156: Betonin testaus. 2010. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. 3.painos
- 23 Betoninormien edellyttämiä käyttöselosteita koskevat ohjeet: by 22. Suomen Betoniyhdistys r.y. Yleisjäljennös Oy
- 24 Tehonotkistin tekninen tuotelehti.

Olosuhdehuoneen suhteellinen kosteus ja lämpötila



Musta alue kuvaa huoneen RH:ta (%) ja harmaa alue huoneen lämpötilaa (°C).

Lieriölujuuden muuttaminen kuutiolujuudeksi

Taulukko 12. Mitatut lieriönpuristuslujuudet ja niistä lasketut kuutiolujuudet

Betonimassa	Lieriölujuus	Kuutiolujuus	Lieriölujuus	Kuutiolujuus
	7 d	7 d	28 d	28 d
	MPa	MPa	MPa	MPa
Sementti 1 -vertailubetoni	27,29	33,8	37,25	47,3
Sementti 2 -vertailubetoni	31,31	39,1	38,68	48,7
Sementti 1 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)	24,71	29,7	33,87	43,2
Sementti 1 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)	28,18	35,3	39,29	49,3
Sementti 2 + SRA 1 maksimiannostelu (3 %)	25,93	31,5	34,97	45,0
Sementti 2 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75 %)	33,49	42,5	41,14	51,1

Taulukko 13. Lieriölujuuden muuttaminen vastaamaan 150 mm:n kuutiolujuutta [9, s.80]

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

Esimerkki:

Sementti 1 -vertailubetonin 7 vuorokauden lieriön puristuslujuus 27,29 MPa.

Vastaava kuutiolujuus on siten:

$$30 \text{ MPa} + (27,29 - 25) \text{ MPa} * 1,67 = \mathbf{33,8 \text{ MPa}}$$

Kutistumamittaustulokset

Valmistuspäivä: 30.1.2014

Pakki nro. 1

Betoniassa	Valmistuseän nro.	7			28			56		
		Kutistuma (mm)	Paino (g)	Erotus (mm)	Kutistuma (mm)	Paino (g)	Erotus (mm)	Kutistuma (mm)	Erotus (mm)	Paino (g)
Sementti 1 vertailubetoni	20971	4,515	12195	-0,252	4,263	11918	-0,252	4,241	-0,274	11858
Sementti 2 vertailubetoni	20973	4,864	12013	-0,428	4,436	11787	-0,428	4,361	-0,503	11787
Sementti 1 + SRA 1 maksimiannostelu (3%)	21004	4,526	11922	-0,204	4,322	11645	-0,204	4,306	-0,220	11588
Sementti 1 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75%)	20997	4,201	11927	-0,247	3,954	11656	-0,247	3,931	-0,270	11601
Sementti 2 + SRA 1 maksimiannostelu (3%)	21000	4,458	11941	-0,187	4,271	11619	-0,187	4,244	-0,214	11551
Sementti 2 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75%)	21010	3,979	11991	-0,228	3,751	11692	-0,228	3,711	-0,268	11627

Pakki nro. 2

Betoniassa	Valmistuseän nro.	7			28			56		
		Kutistuma (mm)	Paino (g)	Erotus (mm)	Kutistuma (mm)	Paino (g)	Erotus (mm)	Kutistuma (mm)	Erotus (mm)	Paino (g)
Sementti 1 vertailubetoni	20971	4,712	12066	-0,298	4,414	11797	-0,298	4,404	-0,308	11741
Sementti 2 vertailubetoni	20973	3,472	11912	-0,25	3,222	11603	-0,25	3,168	-0,304	11534
Sementti 1 + SRA 1 maksimiannostelu (3%)	21004	4,609	12003	-0,197	4,412	11724	-0,197	4,394	-0,215	11665
Sementti 1 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75%)	20997	5,515	11901	-0,255	5,26	11629	-0,255	5,249	-0,266	11575
Sementti 2 + SRA 1 maksimiannostelu (3%)	21000	4,738	11985	-0,199	4,539	11671	-0,199	4,521	-0,217	11603
Sementti 2 + SRA 1 normaaliannostelu (0,75%)	21010	3,491	12089	-0,225	3,266	11796	-0,225	3,223	-0,268	11731
Päivämäärät:		6.2.2014			27.2.2014			27.3.2014		

Kutistumalaskut

Suomen Betoniyhdistyksen ohje

Sementti 1 -vertailubetoni

Lasketaan h_e arvo, jotta taulukosta 2 saadaan k_{sh} arvo:

$$h_e = \frac{A}{u} = \frac{2 * (100 \text{ mm} * 500 \text{ mm})}{(100 \text{ mm} * 2 + 500 \text{ mm} * 2)} = 83,33 \text{ mm}$$

Lasketaan sementtipastan määrä:

P=Sementti + vesi + lisäaineet

$$P = \frac{345,8 \text{ kg}}{3,17 \text{ kg/l}} + 194,55 \text{ l} + 0,905 \text{ l} = 303,85 \text{ l}$$

Lasketaan kuivumiskutistuma:

$$\varepsilon_{cs} = k_{cem} k_{sh} \left(\frac{P}{170} - 0,7 \right) \varepsilon_{cs0}$$

$$\varepsilon_{cs} = 1,0 * 1,0 * \left(\frac{303,85}{170} - 0,7 \right) * 0,6 \text{ ‰} = \mathbf{0,652 \text{ ‰}}$$

Sementti 2 -vertailubetoni

Lasketaan h_e arvo, jotta taulukosta 2 saadaan k_{sh} arvo:

$$h_e = \frac{2A}{u} = \frac{2 * (100 \text{ mm} * 500 \text{ mm})}{(100 \text{ mm} * 2 + 500 \text{ mm} * 2)} = 83,33 \text{ mm}$$

Lasketaan sementtipastan määrä:

P=Sementti + vesi + lisäaineet

$$P = \frac{345,4 \text{ kg}}{3,17 \text{ kg/l}} + 194,15 \text{ l} + 1,075 \text{ l} = 304,18 \text{ l}$$

Lasketaan kuivumiskutistuma:

$$\varepsilon_{cs} = k_{cem} k_{sh} \left(\frac{P}{170} - 0,7 \right) \varepsilon_{cs0}$$

$$\varepsilon_{cs} = 1,0 * 1,0 * \left(\frac{304,18}{170} - 0,7 \right) * 0,6 \text{ ‰} = \mathbf{0,653 \text{ ‰}}$$

Eurokoodi 2

Sementti 1 -vertailubetoni:

Ratkaistaan kuivumiskutistuman perusarvo ε_{0} :

Ratkaistaan ensin β_{RH} arvo, RH arvo katsottu liitteestä 1:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 * \left[1 - \left(\frac{42 \%}{100 \%} \right)^3 \right] = 1,435$$

α_{ds1} ja α_{ds2} arvot katsottu taulukosta 5 puristuslujuus f_{cm} taulukosta 9:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cd,0} &= 0,85 \left[(220 + 110 * 4) * \exp \left(-0,12 * \frac{47,3 \text{ MPa}}{10 \text{ Mpa}} \right) \right] * 10^{-6} * 1,435 = 0,00045636 \\ &= 0,456 \text{ ‰} \end{aligned}$$

Ratkaistaan kuivumiskutistuman loppuarvo ε_{cd} :

Ratkaistaan ensin h_0 , jonka jälkeen valitaan taulukosta 4 kerroin k_h :

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 * 100 \text{ mm} * 500 \text{ mm}}{(100 \text{ mm} * 2 + 500 \text{ mm} * 2)} = 83,3 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 1,0 * 0,456 \text{ ‰} = \mathbf{0,456 \text{ ‰}}$$

Sementti 2 -vertailubetoni:

Ratkaistaan kuivumiskutistuman perusarvo $\varepsilon_{,0}$:

Ratkaistaan ensin β_{RH} arvo, RH arvo katsottu liitteestä 1:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1,55 * \left[1 - \left(\frac{42 \%}{100 \%} \right)^3 \right] = 1,435$$

α_{ds1} ja α_{ds2} arvot katsottu taulukosta 5 puristuslujuus f_{cm} taulukosta 9:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 * 4) * \exp \left(-0,12 * \frac{48,7 \text{ MPa}}{10 \text{ Mpa}} \right) \right] * 10^{-6} * 1,435 = 0,00044876$$
$$\approx 0,449 \text{ ‰}$$

Ratkaistaan kuivumiskutistuman loppuarvo ε_{cd} :

Ratkaistaan ensin h_0 , jonka jälkeen valitaan taulukosta 4 kerroin k_h :

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 * 100 \text{ mm} * 500 \text{ mm}}{(100 \text{ mm} * 2 + 500 \text{ mm} * 2)} = 83,3 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} = 1,0 * 0,449 \text{ ‰} = \mathbf{0,449 \text{ ‰}}$$