



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Juha Karu

Betonin kutistuman alentaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

29.4.2020

Tekijä Otsikko	Juha Karu Betonin kutistuman alentaminen
Sivumäärä Aika	48 sivua + 2 liitettä 29.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	materiaali- ja pinnoitetekniikka
Ohjaajat	lehtori Juha Kotamies laatu- ja kehitysjohtaja Vesa Anttila laatuinsinööri Tuomas Mannonen
<p>Betonin tilavuus pienenee ja betoni kutistuu aina jonkin verran, kun se kuivuu. Kutistuminen johtuu autogeenisestä, eli kemiallisesta kutistumisesta, kun sementti reagoi veden kanssa. Toisin sanoen kutistumatonta betonia ei ole olemassakaan. Toinen pääsyy kutistumaan on veden haihtuminen betonista, jolloin se alkaa kuivumaan</p> <p>Kutistumatyyppinä on useita ja ne kaikki tulisi ottaa huomioon suunnitellessa betonirakenteita. Huolellisella pitkän aikavälin suunnittelulla voidaan estää tai minimoida betonin kutistumisesta aiheutuvia halkeamia ja muita haitallisia vaurioita betonirakenteissa.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli testata, miten eri kutistumaa vähentävät lisäaineet ja opinnäytetyön kannalta olennaisimmat lisäaineet, eli paisuttimet, joita kutsutaan myös kutistumaa kompensoiviksi betoneiksi vaikuttavat kutistumaan. Lisäksi oli tarkoitus testata kyseisten lisäaineiden yhteisvaikutusta betonin kutistumaan alentavasti.</p> <p>Kyseistä asiaa on tutkittu Suomessa ja Euroopassa melko vähän ja niistä saatuja tutkimustuloksia on melko niukasti. Myös edellä mainittujen lisäaineiden käyttö on ollut vähäistä. Japanissa ja Yhdysvalloissa kutistumaa kompensoivia lisäaineita on käytetty jo vuosikymmeniä ja SRA-aineita 1980-luvulta asti.</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin Ruskon Betonille, koska yhtiö halusi enemmän selvyyttä kyseisten lisäaineiden sekä niiden yhdistämisen vaikutuksista betonin kutistumaan. Tämän lisäksi Ruskon Betoni piti aihetta tärkeänä, koska kyseinen asia on ollut esillä jonkin verran viime aikoina.</p> <p>Työstä tuli loppujen lopuksi kirjallisuuskatsaus, johtuen koronaviruksesta. Mihinkään laboratorioon, mukaan lukien Metropolian materiaalitekniikan laboratorio, ei ollut pääsyä. Metropolian laboratoriossa oli tarkoitus valmistaa hieppala huokoisuuden tutkimista varten. Myöskään betonitehtaalle ei ollut mahdollista päästä. Onneksi työhön saatiin lopulta paisuttimista hieman konkreettista tietoa, sillä kyseistä lisäainetta on tutkittu Suomessa kovin vähän.</p>	
avainsanat	betoni, kutistuma, halkeilu, SRA, paisutin, sementti, vesi

Author Title	Juha Karu Reducing the Shrinkage of Concrete
Number of Pages Date	48 pages + 2 appendices 29 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Bio and Chemical Engineering
Professional Major	Material and Surface Engineering
Instructors	Juha Kotamies Principal Lecturer Vesa Anttila Quality and Development Director Tuomas Mannonen Quality Engineer
<p>The volume of concrete decreases and the concrete always shrinks somewhat as it dries. This phenomenon is due to autogenic, i.e. chemical shrinkage as the cement reacts with water. In other words, non-shrinking concrete does not even exist. Another main reason for shrinkage is the evaporation of water from the concrete at which point it begins to dry.</p> <p>There are several types of shrinkage and all of them should be considered when designing concrete structures. Careful long-term planning can prevent or minimize cracks and other harmful damage to concrete structures due to the shrinkage of the concrete.</p> <p>The purpose of this thesis was to test how the different additives that reduce shrinkage and the most important additives for the thesis, i.e. expanders, which are also called shrinkage compensating concretes, contribute to the shrinkage. In addition, the aim was to test the combined effects of these additives on the shrinkage of concrete.</p> <p>There has been relatively little research on this issue in Finland and Europe, and there are relatively few research results. The use of the above additives has also been low. In Japan and the United States, shrinkage compensating additives have been used for decades and shrinkage-reducing admixtures since 1980s.</p> <p>The thesis was done for Ruskon Betoni because the company required a further clarification of effects of these additives, as well as their combination, on the shrinkage of concrete. In addition to this, Ruskon Betoni considered the topic important, as the issue has recently been on the agenda.</p> <p>The thesis eventually became a literature review, due to the coronavirus. There was no access to any laboratory, including Metropolias Material Technology Laboratory. It was also not possible to visit the concrete plant. However, this thesis provides some concrete information about the expanders because very little research has been done on this additive in Finland.</p>	
Keywords	Concrete, Shrinkage, Cracking, SRA, Expander, Cement

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Betonin kutistuma ja halkeilu	1
2.1	Yleistä	1
2.2	Halkeilu	2
2.3	Betonin sitoutuminen ja kutistumatyypit varhaisvaiheessa	3
2.3.1	Sitoutuminen	3
2.3.2	Plastinen painuma	4
2.3.3	Plastinen kutistuma	5
2.3.4	Autogeeninen ja kemiallinen kutistuma	8
2.3.5	Lämpömuodonmuutokset	9
2.4	Kutistumatyypit kovettumisen jälkeen	10
2.4.1	Kuivumiskutistuma	10
2.4.2	Karbonatisoitumiskutistuma	11
2.4.3	Viruma	12
3	Kuivumiskutistuman rajoittaminen	13
3.1	Sisäiset tekijät	13
3.1.1	Vesi-sementtisuhte	14
3.1.2	Sementti	16
3.1.3	Kiviaines	16
3.1.4	Notkistavat lisäaineet	17
3.1.5	Paisuttava lisäaine	18
3.1.6	Kutistumaa vähentävät lisäaineet	19
3.1.7	Paisuttimen ja kutistumaa vähentävien lisäaineiden yhteisvaikutus	19
3.1.8	Kuidut	20
3.2	Ulkoiset tekijät	20
3.2.1	Olosuhteet	21
3.2.2	Koko ja muoto	21
3.2.3	Varhaisjälkihoito	21
3.2.4	Varsinainen jälkihoito	22

3.3	Kuivumiskutistuman arviointi	23
4	Koejärjestelyt	26
4.1	Kutistuman mittaaminen	26
4.2	Puristuslujuus	27
4.3	Tiheys	31
4.4	Hiepalan tutkiminen	32
4.5	Tutkittavat betonimassat	33
4.6	Painuma	33
4.7	Ilmamäärä	34
4.8	Betonimassat	35
4.9	Pystysaumamassa	37
5	Tulokset	38
5.1	Kutistumaa kompensoiva lisäaine	38
5.2	SRA-aineet	41
5.3	SRA-aineen ja paisuttimen yhteisvaikutus	43
6	Johtopäätökset kokeista	44
	Lähteet	46
	Liitteet	
	Liite 1. Betonin rasitusluokat	49
	Liite 2. Betonin lujuus- ja painumaluokat	

Lyhenteet ja käsitteet

Absoptio	Tässä insinööriyössä absorptiolla tarkoitetaan veden imeytymistä betoniin.
C-S-H	Kalsiumsilikaattien hydrataatioreaktioissa syntyvä geeli
Ettringiitti	Mineraali joka aiheuttaa paisuttavan vaikutuksen betoniin
Hydrataatio	Veden ja sementin välinen kemiallinen reaktio
Klinkkeri	Sementin valmistuksessa käytettävien ainesosien korkeassa lämpötilassa syntyvä mineraali
Pasta	Betoniin käytetty vesi ja sementti sekä muita mahdollisia lisäaineita
RH	Suhteellinen kosteus (Relative Humidity)
SRA	Kutistumaa vähentävä lisäaine (Shrinkage-Reducing Admixture)
SCC	Kutistumaa kompensoiva lisäaine (Shrinking Compensating Concrete)
SSC	Itsetiivistyvä betoni (Self Sealing Concrete)

1 Johdanto

Betonin liiallinen kutistuma on haitallinen ilmiö, koska se johtaa usein betonin halkeiluun ja vaurioitumiseen. Kyseinen ilmiö johtuu yleensä betonin tilavuuden pientymisestä, kun siitä haihtuu vettä. Kutistumatyyppejä on useita, ja ne kaikki on syytä ottaa huomioon, kun suunnitellaan betonirakenteita.

Tässä insinööriyössä oli tarkoituksena valmistaa pienellä vesi-sementtisuhteella betoni-massoja, joihin on lisätty kutistumaa vähentäviä lisäaineita, eli SRA-aineita, sekä paisuttimia, jotka aiheuttavat sisäistä laajentumista betonissa, kompensoiden syntyneitä vetojännityksiä. Tästä syystä betonia jossa käytetään paisuttimia, kutsutaan myös kutistumakompensoiduksi betoniksi. Tarkoituksena oli myös testata kyseisten lisäaineiden vaikutusta kutistumaan, kun niitä yhdistetään.

Työ oli tarkoitus tehdä Sementun laboratoriossa Sipoossa ja Ruskon Betonin betonitehtaalla Kivenlahdessa. Mitään käytännön testejä ei kuitenkaan koronaviruksesta johtuen päästy tekemään. Työhön onnistuttiin saamaan kuitenkin tuloksia betonista johon oli lisätty kutistumaa kompensoivaa lisäainetta. Tämä tehtiin Ruskon Betonin tehtaalla ja kutistumat mittasivat Eurofins.

Tässä insinööriyössä kutistumaa vähentäviä lisäaineita kutsutaan SRA nimityksellä ja paisuttimia kutsutaan kutistumaa kompensoivaksi lisäaineeksi. Nämä nimitykset saattavat vaihdella kirjallisuuslähteistä riippuen. Kummankin lisäaineen tarkoitus on kuitenkin vähentää kutistumaa.

2 Betonin kutistuma ja halkeilu

2.1 Yleistä

Betonin kutistuma on betonissa tapahtuvaa tilavuuden pientymistä, joka johtuu yleensä veden haihtumisen seurauksena ilmenevästä kuivumisesta, sekä sementin ja

veden välisistä kemiallisista reaktioista. Kyseisessä hydrataatioreaktiossa syntyy sementtikiveä, jonka tilavuus on pienempi, kuin reaktion alkutuotteet ja tämä aiheuttaa kutistuman betonin varhaisvaiheessa. [1.]

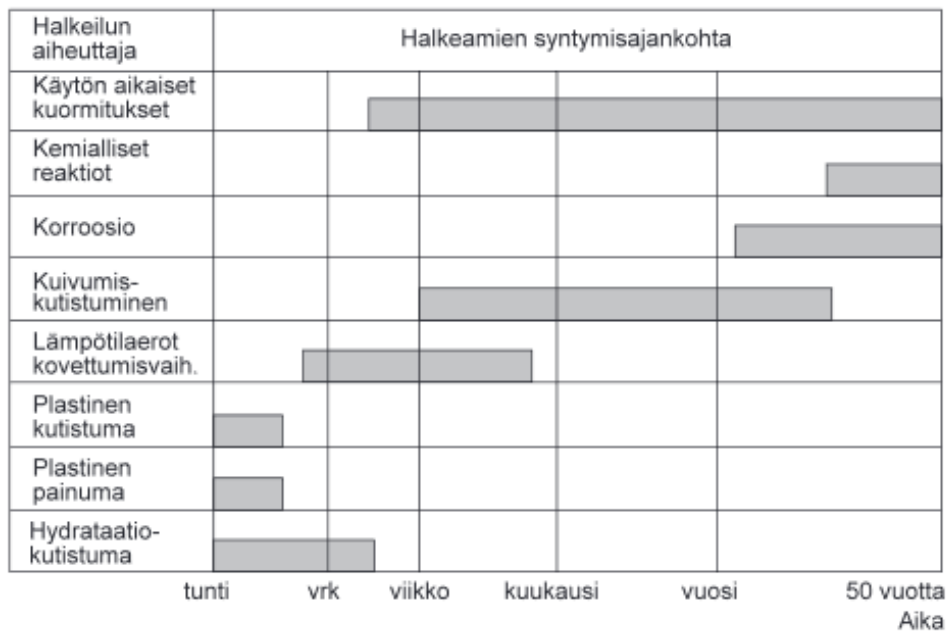
Veden ja sementin välisiin hydrataatioreaktioihin käytetään yleensä aina enemmän vettä kuin tarvitaan. Tämä johtuu siitä, että betonin valmistuksessa siitä saadaan työstettävää. Edellä mainittu tilanne johtaa kuitenkin siihen, että ylimääräisen veden poistuksessa betoniin syntyy muodonmuutoksia ja tämä onkin pääsyy kutistumiseen. [2, s. 428–429.]

Itsessään kutistuma ei aiheuta ongelmia, mutta betonin kutistuman ollessa estetty, esimerkiksi raudotteiden takia, siihen syntyy vetojännityksiä. Estettyä kutistumaa voidaan ajatella niin, että betoni ensin kutistuu ja sen jälkeen se palautetaan alkuperäiseen mittaansa. Halkeamien synty edellyttääkin aina estettyä mittojen muutosta. [2, s. 428–429.]

Kutistuman suuruus betonissa on monen tekijän summa, ja erilaiset kutistumatyypit tulisi aina ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa rakenteen kestävyuden ja halkeilun estämiseksi. Kutistuminen on kuitenkin normaali ilmiö betonissa ja kuivumiskutistuman suuruus on yleensä luokkaa 0,6–0,7 promillea, kun mittaus suoritetaan palkkikoneella. Erilaisilla toimenpiteillä, kuten betonin suhteistuksella, lisäaineilla, erikoisratkaisuilla ja hyvällä jälkihoidolla, on mahdollista rajoittaa kutistumaa ja halkeamien syntyä betonin kuivussa. [1.]

2.2 Halkeilu

Betonin halkeilu johtuu yleisesti sen mittojen muuttumisesta, kun vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden. Tilavuuden muutos betonissa kuuluu sen materiaaliominaisuuksiin, ja muutos voi johtua monista eri syistä. Muutoksia voi aiheuttaa esimerkiksi veden haihtuminen valuvaiheessa ja betonin kovettuessa, vaihtelut lämpötilassa, sekä erilaisista kemiallisista reaktioista. Luonnollisesti myös käytön aikaiset kuormitukset aiheuttavat halkeilua sekä korroosio, mutta niitä ei varsinaisesti käsitellä tässä opinnäytetyössä. Kuvassa 1 näkyy mahdollisia halkeamiin johtavia syitä eri kuormitus- ja kutistumistyypeistä eri ajankohtina. [2, s. 428–429.]



Kuva 1. Betonin mahdollisia halkeamien aiheuttajia ja niiden ajankohdat [2].

Betoni voi halkeilla sekä plastisessa että kovettuneessa tilassa ilman ulkoista kuormitusta ja tämä johtuu betonissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksista. Kyseessä on silloin ei-rakenteellinen halkeaminen. Yksi tekijä ei riitä aiheuttamaan halkeilua vaan siihen liittyy vähintään kahden kutistumatyyppin samanaikainen vaikuttaminen. Tästä syystä syitä voi olla hankala selvittää. Yhtenä esimerkkinä voi olla lämpöliikkeestä aiheutuva varhaisvaiheen kutistuma ja pidemmällä aikavälillä tapahtuva kuivumiskutistuma. [3, s. 3,7.]

2.3 Betonin sitoutuminen ja kutistumatyypit varhaisvaiheessa

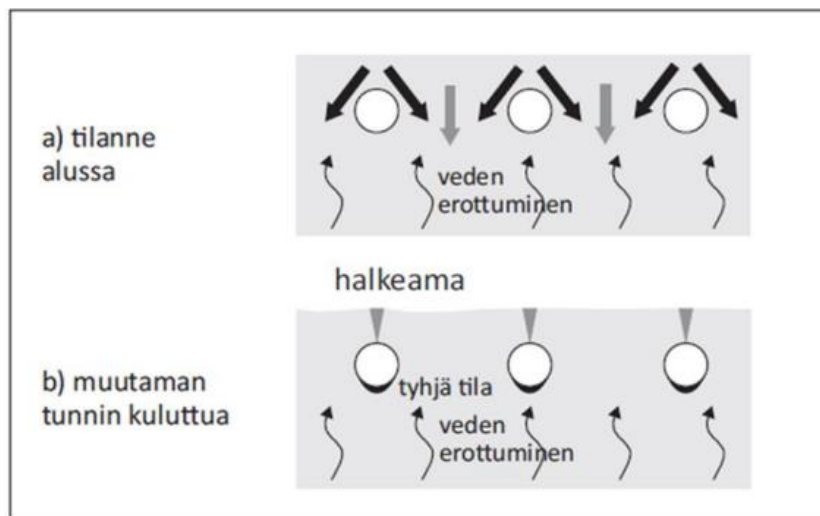
2.3.1 Sitoutuminen

Kemialliset reaktiot (hydrataatioreaktiot) sementin ja veden kanssa alkavat heti, kun betonimassaa ryhdytään sekoittamaan. Betonimassa on aluksi plastisessa tilassa, kunnes se alkaa jähmettyä hydrataatiotuotteiden kiinnittyessä toisiinsa. Sitoutumiseksi kutsutaan muutosta, kun massa ei ole enää muokattavaa ja alkaa lujuudenkehitys. Kovettuminen alkaa muutaman tunnin kuluttua sekoituksesta yleisimmillä betonilaaduilla, läm-

mön ollessa +20 °C. Alhaisissa lämpötiloissa sitoutumisen alkaminen voi siirtyä huomattavasti myöhemmäksi ja olosuhteiden ollessa lämpimät, sitoutuminen alkaa paljon nopeammin. Sementtityyppi sekä vesi-sementtisuhde vaikuttavat lämpötilan ohella sitoutumiseen. Toimenpiteet ja ratkaisut, jotka tehdään betonille sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa, kun sen ikä on < 1 d, ovat ensisijaisia ominaisuuksien ja esimerkiksi halkeilun kannalta betonirakenteessa. [3, s. 12; 4, s. 80.]

2.3.2 Plastinen painuma

Betonin pystysuuntaista kutistumaa sanotaan plastiseksi painumaksi ja se tapahtuu ennen sitoutumista. Syynä plastiselle painumalle on tilavuuden väheneminen tiivistetystä betonista, joko veden haihtumisen, tai erottumisen seurauksena. Erottuminen on seurausta siitä, että vesi kevyempänä liikkuu ylöspäin ja kiviaines ja sementti siirtyvät painavimpina alaspäin. Kuvassa 2 on esitetty plastisen painuman syntymekanismi.



Kuva 2. Plastisen painuman syntymekanismi [5].

Vedenerottuminen lisääntyy, jos sitoutumisaika pitkittyy sementissä ja tämä myös lisää plastista painumaa, koska betoni on kauemmin plastisessa tilassa. Kyseinen ilmiö voimistuu kylmissä oloissa, eli olisi hyvä estää jäähtyminen ja kohottaa lämpötilaa. Myös suuret vesimäärät betonissa lisäävät erottuvan veden määrää. Huonoissa tapauksissa

painuman suhteellinen arvo voi olla yhden prosentin luokkaa ja se voi synnyttää useiden millimetrin halkeamia rakenteen pinnalle. Syvemmälle mentäessä halkeamat sulkeutuvat ja tämä tapahtuu melko nopeasti. Betonilaadut joiden sementtimäärä on pieni eikä betonimassaan ole käytetty notkistimia, veden erottuminen on suurempaa. [3, s. 15; 4, s. 76.]

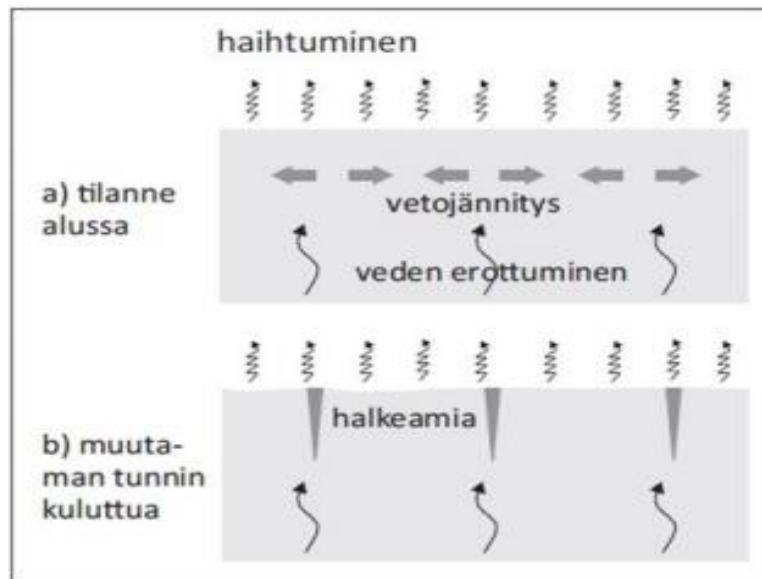
2.3.3 Plastinen kutistuma

Plastista kutistumista esiintyy tuoreen betonimassan pinnalla, kun siitä katoaa vettä liian nopeasti, haihtumisen seurauksena, ennen kovettumista. Toisin sanoen betonipinta kuivuu liian nopeasti ja tämä aiheuttaa tilavuuden pienenemisen. Toisin kuin plastisessa painumassa kutistuma tapahtuu vaakatasossa. [4, s. 77; 6.]

Betoni kutistuu, kun veden pintajännitys ja vesi, sekä sementtihiukkaset muodostavat keskenään vetovoimia, joiden seurauksena syntyy niin sanottu kalvojännitystila. Tämä kalvojännitystila aiheuttaa pintaan vetojännityksiä. Samaa aikaan vesi pyrkii syvemmältä betonin pinnalle alipaineen takia, joka syntyy kapilaarihuokosissa. [4, s. 77; 6.]

Vesi jättää haihtuessaan tyhjän tilan ja sementtihiukkaset sekä kiviainesrakeet yrittävät alaspäin mennessä paikata kyseisen tyhjän tilan. Niin kauan kuin sementtihiukkaset ja kiviainesrakeet pystyvät täyttämään tuon tyhjän tilan, betonin tilavuus pysyy samana, eikä haitallisia halkeamia synny. Tämä johtuu siitä, että haihtuvan veden määrä on yhtä suurta, kuin betonin tilavuuden aleneminen. Plastisen kutistuman syntymekanismi on esitetty kuvassa 3. [4, s. 77.]

Ohuet rakenteet, joissa on paljon avointa pinta-alaa, sekä vähän haihtuvaa vettä, ovat melko alttiita plastiselle kutistumalle. Julkisivuelementit, maanvaraiset- ja kantavat laatat, sekä ohuet jälkivalut ovat tällaisia rakennelmia joissa tapahtuu usein plastista kutistumaa ja siitä johtuvaa halkeilua. [4, s. 77.]

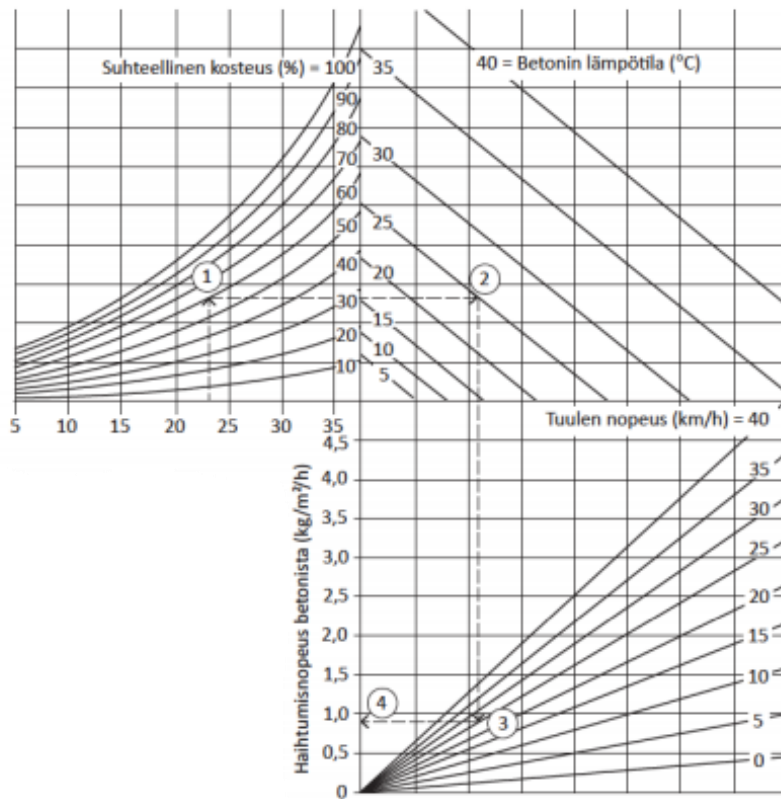


Kuva 3. Plastisen kutistuman syntymekanismi [4].

Haihtumisen nopeus betonin pinnalta johtuu enimmäkseen ympäristötekijöistä kuten lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta ja tuulen nopeudesta. Siihen vaikuttaa myös auringon säteily ja betonin lämpötila. Kuvassa 4 näkyvästä kuvaajasta voidaan päätellä betonin pinnalta haihtuvan veden määrää. [3, s. 16–17; 7.]

Halkeiluriski kasvaa haihtumisnopeuden ollessa suurempi kuin $1,0 \text{ kg/m}^2$. Tässä vaiheessa olisi syytä ryhtyä toimenpiteisiin rakenteen suojaamiseksi esimerkiksi auringon säteilyltä ja ilmavirtauksilta. Kun avoimet betonipinnat peitetään mahdollisimman aikaisin valusta, plastista kutistumaa pystytään estämään melko tehokkaasti. Se kuinka laajalta alueelta betonipinta valun jälkeen peitetään, määräytyy erityisesti sen hetkisen lämpötilan perusteella. [3, s. 17–18.]

On siis erittäin tärkeää ottaa huomioon vallitsevat olosuhteet ja suunnitella toimenpiteet etukäteen. Betonimassan koostumuksella on vain vähän vaikutusta betonin plastiseen kutistumaan. [3, s. 18.]



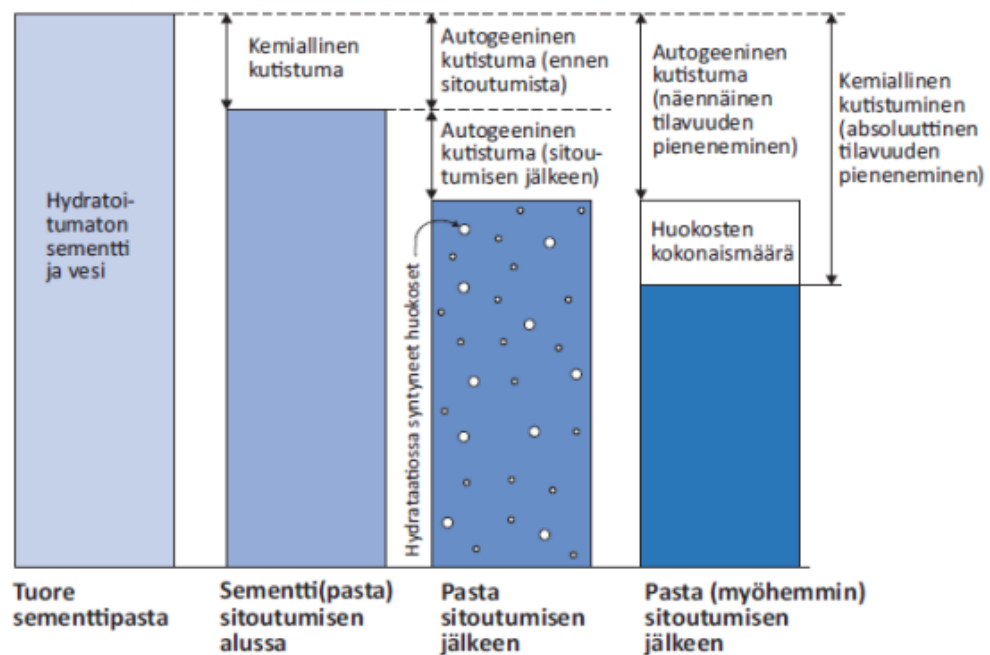
Kuva 4. Kuvaaja, josta havaitaan veden haihtuminen eri tekijöiden seurauksena [7].

Kosteutta poistuu rakenteesta yleensä aina ympäristöön eri tavoin ja se aiheuttaa rakenteen jäähtymistä. Ilmavirtaukset edistävät vahvasti kyseistä ilmiötä ja suojaamaton rakenne jäähtyy, aiheuttaen betonin kutistumisen ja mahdollisen halkeilun. Jäähtyminen varhaisvaiheessa (< 24 h) on betonille erityisen vaarallista, johtuen betonin pituuden lämpötilakertoimesta, joka on monikertainen, verrattuna kovettuneen betonin kertoimeen. [3, s. 16.]

Paras keino estää plastista kutistumaa on siis yksinkertaisesti estää veden nopea haihtuminen betonista.

2.3.4 Autogeeninen ja kemiallinen kutistuma

Kuten on jo edellä mainittu, sementin ja veden kemiallista reaktioita kutsutaan hydrataatioksi. Kyseisessä kemiallisessa reaktiossa sementin ja veden alkuperäinen tilavuus on suurempi kuin hydratoituneen sementin. Tätä tilavuuden muutosta kutsutaan autogeeniseksi kutistumaksi, ja kutistuminen jatkuu niin kauan kuin kemialliset reaktiot jatkuvat sementtipastan ja veden välillä. Autogeenista kutistumaa voidaan myös kutsua kemialliseksi kutistumaksi. Kuvassa 5 on esitetty kemiallisesta ja autogeenisestä kutistumisesta johtuvat tilavuuden muutokset tuoreessa ja kovettuneessa sementtipastassa. [1; 4, s. 79.]



Kuva 5. Kemiallisesta ja autogeenisestä kutistumisesta johtuva tilavuuden muutos [4].

Silloin kun betonimassa on vielä muokattavaa eli hydrataation alussa, on autogeeninen kutistuma sama asia, kuin kemiallinen kutistuma. Melko nopeasti valun jälkeen massa alkaa jäykistyä. Jäykistyminen johtuu betonimassassa olevista hydrataatiotuotteista, jotka ovat niin sanottuja klinkkerimineraaleja. Klinkkerit ovat polttouunissa syntyneitä tuotteita, ja niitä käytetään jauhattuna sementin valmistuksessa. Näiden mineraalien välille syntyy sidoksia, jotka jähmettävät betonia. Autogeeninen kutistuma vähenee, koska

samaan aikaan betoniin syntyy tyhjiä huokosia. Kemiallinen kutistuma kuitenkin jatkuu. [3, s. 19; 8, s. 16.]

Yleensä alhainen vesi-sementtisuhde edesauttaa autogeenisen kutistuman kasvua ja kyseisen v/s suhteen ollessa alle 0,45 kasvaa halkeamien riski huomattavasti. Autogeenista kutistumaa voidaan kohtuullisen vesi-sementtisuhteen ohella pienentää muun muassa kastelulla, suurella kiviaineksen määrällä ja kutistumista kompensoivilla aineilla. Autogeenista kutistumaa tapahtuu kuitenkin aina jonkun verran ja betoni kutistuu, johtuen sementin hydratoitumisesta. Edellä mainittu kutistuma on myös vaikea erottaa kuivumiskutistumasta, ja usein autogeeninen kutistuma jääkin kuivumiskutistuman varjoon, ellei tiedetä, että vesi-sementtisuhde on hyvin alhainen, luokkaa 0,30. [3, s. 20; 4, s. 80; 9.]

2.3.5 Lämpömuodonmuutokset

Veden ja sementin välinen hydrataatio synnyttää lämpöä betonin kovettuessa. Kyseinen lämpö poistuu betonirakenteen pinnan kautta, ja tämä aiheuttaa lämpötilaeron pinnan ja sisemmän osan kanssa. Betonirakenne jäähtyy, kun hydrataatiolämpöhuippu on saavutettu kovettumisen seurauksena. Tästä johtuen betonin tilavuus pienenee.

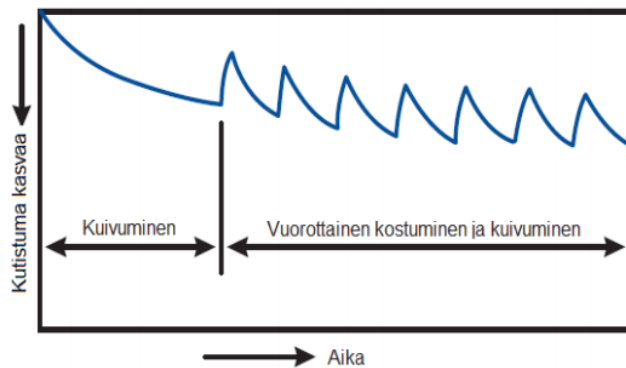
Pituuden lämpötilakerroin on tavallista kiviainesta sisältävällä betonilla $10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Kun betoni on < 48 h:n ikäistä, sen pituuden lämpötilakerroin on edellä mainittua paljon suurempi, arviolta 1–7-kertainen. Tästä syystä ensimmäisten vuorokausien aikana tapahtuva jäähtyminen voi aiheuttaa isoja vaurioita, betonin suuren lämpöliikkeen ja pienen lujuuden takia. [3, s. 13; 4, s. 105.]

Suuret lämpötilaerot ilmenevät selvemmin kookkaissa betonirakenteissa, jossa lämpötila alkaa huomattavasti kasvamaan, yleensä 8–10 tunnin kuluttua betonin valmistuksesta, lujuuden kehityksen alkaessa. Lämpötilaero voi nousta betonipinnan ja keskiosan välillä niin suureksi, että se aiheuttaa lämpöjännityksen, joka ylittää betonin sen hetkisen vetolujuuden, joka on alhainen. Halkeiluriski korostuu myös talvisaikaan estetyissä betonirakenteissa, esimerkiksi varhaisen muottipurun yhteydessä. Kriittisin vaihe onkin suojausten poisto ja muottien purku, jolloin rakenteen jäähtyminen voi tapahtua äkillisesti, sekä haihtuminen alkaa. [2; 3, s. 13.]

2.4 Kutistumatyypit kovettumisen jälkeen

2.4.1 Kuivumiskutistuma

Betonin kuivumiskutistuma on tilavuuden muutosta, kun siitä poistuu vettä. Kuivumiskutistuma voidaan määritellä ajasta riippuvaksi muodonmuutokseksi, ja se on suorassa suhteessa rakenteesta poistuvaan kosteuteen ilman, että siihen vaikuttavat ulkoiset voimat. Kuvassa 6 näkyy, kuinka betoni alun palautumattoman kuivumiskutistumisen jälkeen kutistuu ja paisuu myöhemmällä iällä, kun se vuorotellen kastuu ja kuivuu. [10, s. 11; 4, s. 96–97.]



Kuva 6. Myöhemmällä iällä betoni kutistuu kuivuessaan ja paisuu kastuessaan [11].

Hydratoituneessa sementtipastassa on (2,5–50nm) kapillaarihuokosia, joissa veden haihtuminen ja liike tapahtuu, muodostaen kaarevia vesipintoja. Veden pintajännitys aiheuttaa kapillaarihuokosiin alipaineen, joka johtaa betonin kutistumaan. Kuivumisen jatkuminen johtaa myös absorpoituneen veden katoamiseen. Tilavuuden muutokset sementtipastassa ja kasvavat vetovoimat hydratoitumistuotteiden (C-S-H) välillä johtavat edelleen kutistumisen jatkumiseen. [12.]

Kuivumisen seurauksena betoniin syntyy vetojännityksiä. Kutistuman ollessa estetty, ja kun vetojännitykset ylittävät vetolujuuden, syntyy halkeamia. Tyypillinen lopullinen kutistuma betonissa on luokkaa $600 \cdot 10^{-6}$ (0,6 mm/m). Koska betonin vetojännityskapasiteetti

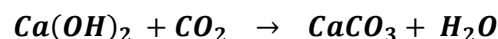
voi olla $150 \cdot 10^{-6}$ tai vähemmän, voi estettyyn betoniin syntyä halkeamia sen kutistuksessa. [9; 10, s. 11.]

Ympäristöolosuhteet sekä rakennelman geometriset muodot vaikuttavat siihen, miten nopeasti kosteus poistuu rakennelmasta. Kosteus poistuu ensiksi pintaosista ja joidenkin suurten ja massiivisten rakennelmien kohdalla, kosteus ei välttämättä koskaan ehdi poistua rakennelman sisäosista. Tästä johtuen massiivisen rakennelman sisäosat eivät kutistu. Kosteus jakaantuu rakenteessa epätasaisesti, ja se aiheuttaa pinnalle vetojännityksiä, sekä sisempiin osiin syntyy puristusjännityksiä. [4, s. 97.]

Joissakin tapauksissa kosteuden poistumista ja siitä johtuvaa kuivumista tapahtuu rakenteessa vain yhdeltä sivulta. Tällöin kosteus jakaantuu epätasaisesti ja hyvänä esimerkkinä toimii betonilaatan käyristyminen ja nurkkien nousu. Kyseinen ilmiön seurauksena laatta voi halkeilla, kun sitä kuormitetaan. [4, s. 97.]

2.4.2 Karbonatisoitumiskutistuma

Karbonatisoitumiskutistuma aiheuttaa myös kuivumiskutistumaa ja sen suuruus voi olla jopa 50 % kuivumiskutistumasta betonin pinnalla. Kuitenkin sen syntymismekanismi on erilainen. Siinä ilman hiilidioksidin (CO_2) reagoiessa betonissa olevan kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa, syntyy reaktiotuotteita, jotka ovat pienempiä kuin lähtötuotteet. Tämä reaktioyhtälö näkyy seuraavassa. Tätä kyseistä betonin pinnalla tapahtuvaa tilavuuden muutosta sanotaan karbonatisoitumiskutistumaksi. [3, s. 24]



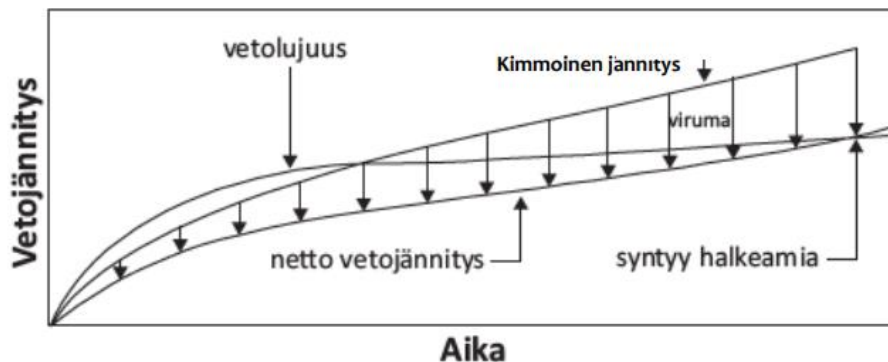
Betonin pinnalta karbonatisoituminen jatkaa etenemistä syvemmälle betoniin. Nopeus, jolla kyseinen reaktio etenee, johtuu betonin läpäisevyysvastuksesta hiilidioksidia vastaan, betonin kalsiumhydroksidin määrästä, sekä ympäristön sisältämästä hiilidioksidimäärästä. Hiilidioksidin pääsy vaikeutuu syvemmälle mentäessä ja voi jopa seisahtua kokonaan tiiviissä betonissa. Karbonatisoitumista ja siitä johtuvaa kutistumaa tapahtuu yleisesti vain muutaman millimetrin syvyydeltä ja pahimmassakin tapauksessa enimmillään muutaman senttimetrin syvyydeltä. [3, s. 24.]

Karbonatisoituminen vaatii aina kosteutta, joten kuivissa olosuhteissa sitä ei esiinny. Myöskään silloin, kun kosteutta on liikaa, hiilidioksidi ei pääse rakenteeseen, koska betonissa oleva huokosverkko on täytynyt vedellä. Kutistuma on suurinta, ja kyseinen ilmiö on voimakkainta, kun ilman suhteellinen kosteus on 50 %. [3, s. 24–25.]

2.4.3 Viruma

Viruma määritellään ajasta riippuvaiseksi kasvavaksi jännitykseksi kovettuneessa betonissa, joka on alttiina jatkuvalle kuormitukselle. Virumassa vesi virtaa pois geelihuokosista ja se johtaa tiivistymiseen sementtigelissä. Tämä kertoo myös sen, miksi virumasta johtuva muodonmuutos ei palaudu kokonaan, huolimatta siitä, että vesi palautuu takaisin huokoseen. [4, s. 95; 13.]

Viruma on siis muodonmuutos, ja se nähdään rakenteissa vähitellen kasvavana taipumana. Kaikkien jännitystapausten yhteydessä esiintyy virumaa (veto, puristus, taivutus, vääntö, leikkaus). Virumaa esiintyy myös betonin kutistuessa, mikä näkyy kuvassa 7. [4, s. 95; 11.]



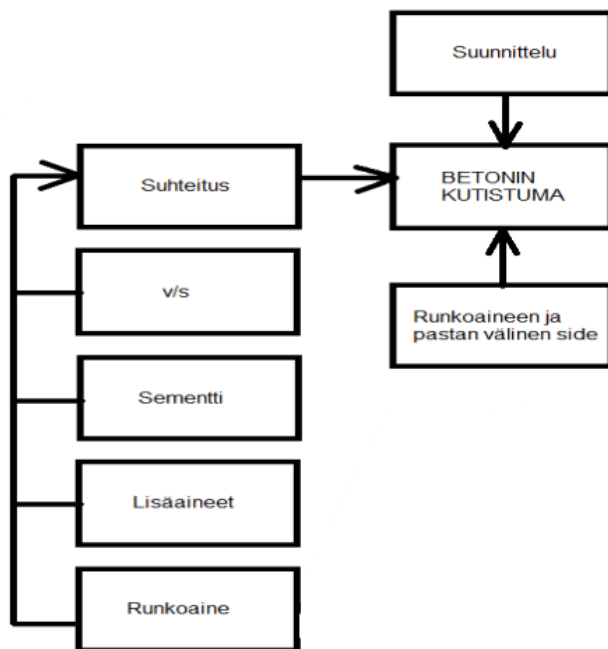
Kuva 7. Vetoviruman vaikutus jännityksiin betonin kutistuessa [11].

Nopeuttamalla betonin kovettumista, nostamalla lujuutta, tai siirtämällä kuormitusaikaa, voidaan vähentää virumaa. [4, s. 96.]

3 Kuivumiskutistuman rajoittaminen

3.1 Sisäiset tekijät

Kuivumiskutistuman sisäisiin tekijöihin vaikuttavat monet asiat, ja ne liittyvät betonin valmistuksessa käytettäviin aineisiin ja lisäaineisiin. Kuvassa 8 on esitetty tärkeimpiä näistä tekijöitä. [14.]

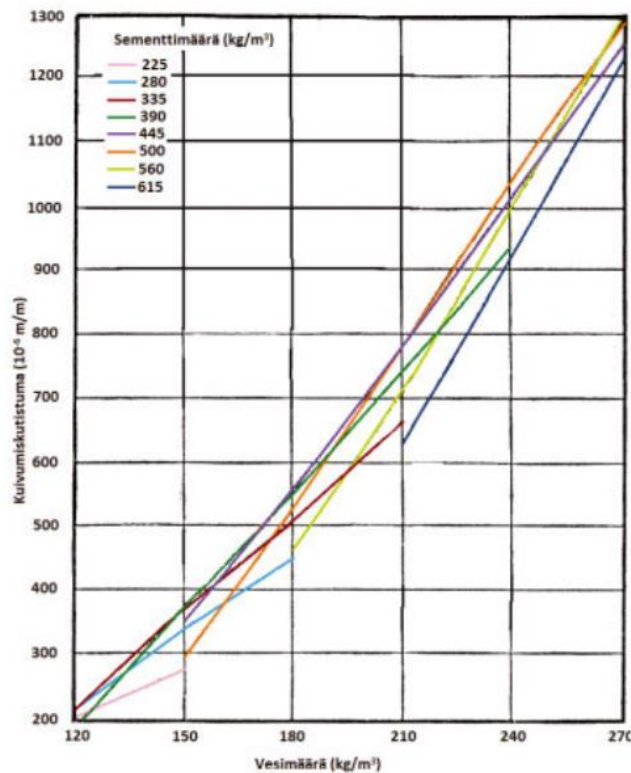


Kuva 8. Kuivumiskutistumaan vaikuttavia tekijöitä [14].

Kuivumiskutistuman hallitsemiseksi on olemassa myös muita menetelmiä, ja tämän insinööriyön kannalta olennaisimpia ovat paisuttimet eli kutistumaa kompensoivat lisäaineet ja kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA).

3.1.1 Vesi-sementtisuhte

Vesimäärän alentaminen on tärkein tekijä betonin kutistuman vähentämiseen. Huolimatta siitä, kuinka paljon betonissa on käytetty sementtiä, kasvaa kutistuma lähes lineaarisesti käytetyn veden määrään nähden. Kuvassa 9 on esitetty vesimäärän vaikutus kuivumiskutistumaan. [14.]



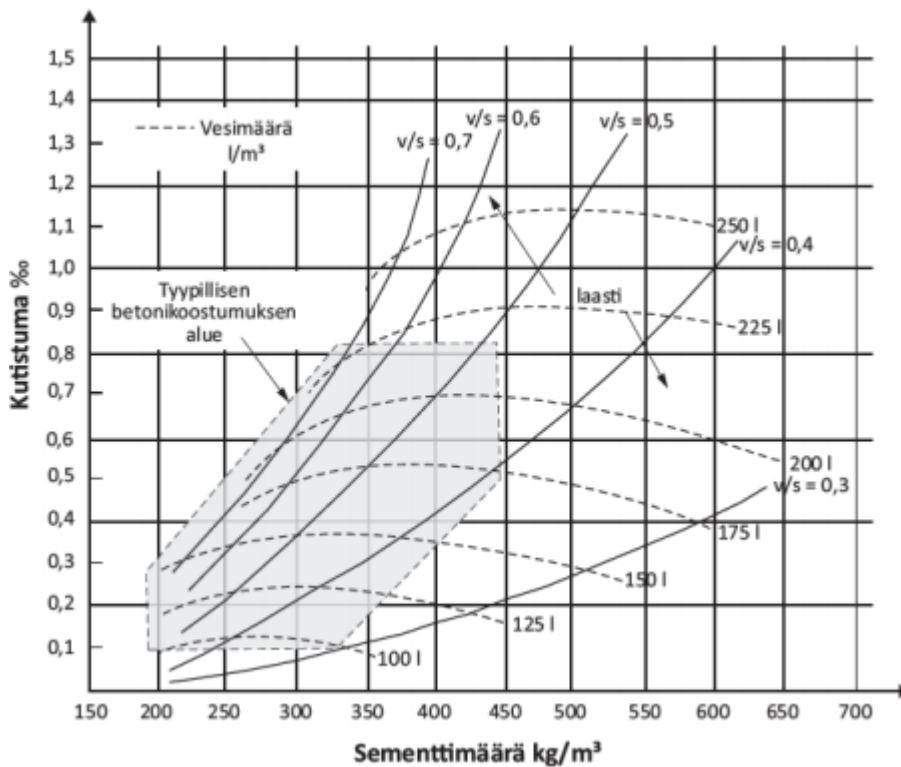
Kuva 9. Kutistuma kasvaa lähes lineaarisesti vesimäärän kasvaessa [14].

Koska samalla vesi-sementtisuhteella voidaan saada erilainen kutistuma betonille, niin sitä ei voida käyttää suoraan kuivumiskutistuman arviointiin. Kuitenkin mitä enemmän betonissa on käytetty vettä, sitä enemmän siinä on myös silloin sementtiä, ja näin ollen myös kuivumiskutistuma on suurempaa. [11; 15.]

Tässä insinööriyössä käytetty vesimäärä on 211 kg ja sementin määrä 426.7 kg. Vesi-sementtisuhte on laskettu seuraavasti.

$$\frac{211 \text{ kg}}{426.7 \text{ kg}} = 0.494.. \approx 0.49$$

Kuvassa 10 on esitetty diagrammi jonka avulla voidaan arvioida kuivumiskutistumaa. [11; 14.]



Kuva 10. Betonin kutistuma sementtimäärän, vesi-sementtisuhteen ja vesimäärän funktiona [11].

Kutistuma suurenee vesi-sementtisuhteen ollessa vakio, kun sementtimäärää lisätään. Riippumatta vesi-sementtisuhteesta ja sementtimäärästä, kutistuma pysyy lähes muuttumattomana, kun vesimäärä on sama. Tuoreessa betonissa myös lämpötila vaikuttaa suoraan veden tarpeeseen siten, että mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän tarvitaan vettä. [3, s. 35; 10, s. 15.]

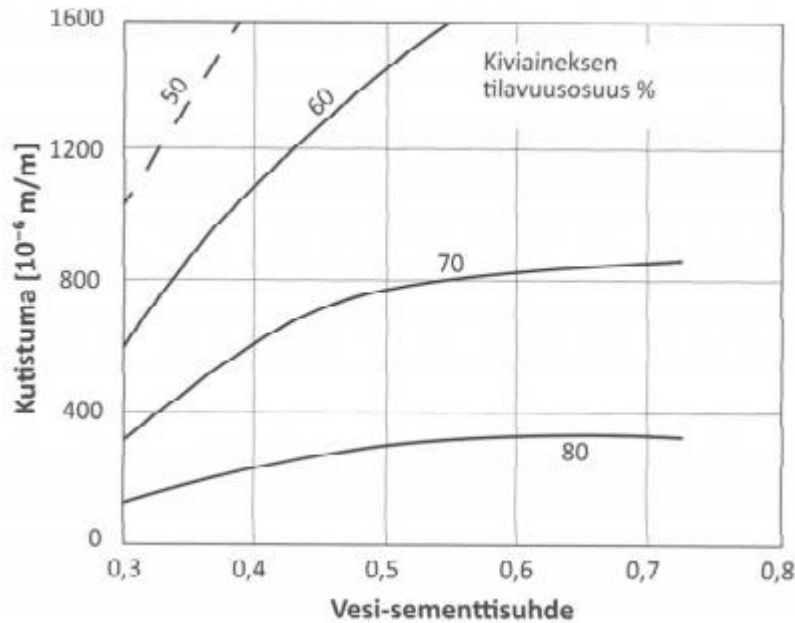
3.1.2 Sementti

Pääasiassa sementti koostuu trikalsiumsilikaatista (C_3S), dikalsiumsilikaatista (C_2S), trikalsiumalumiinaatista (C_3A) sekä tetrakalsiumalumiinaattiferriitista (C_4AF). Sementin C_3A - ja alkalipitoisuuksien määrä vaikuttavat kutistumaan siten, että niiden kasvu lisää kutistumaa. Sementin C_3A -pitoisuuden olisikin hyvä olla alle 7 %. Myös kipsin määrä vaikuttaa kutistumaan siten, että kipsin määrän väheneminen kasvattaa kutistumaa. [8, s. 39; 15, s. 3.]

Vedentarve vaihtelee eri sementtityypeillä ja näin ollen ne vaikuttavat myös betonin kutistumaan. Sementtimäärä, jonka betoni sisältää, vaikuttaa betoniin vesi-sementtisuhteen ja pastamäärän kautta. Kutistumaa voidaan siis rajoittaa vähentämällä pastan määrää, koska kutistuminen on sementtipastan ominaispiirre. [14; 16]

3.1.3 Kiviaines

Kiviaineksella on vaikutusta betonin kuivumiskutistumaan. Muun muassa kiviaineksen määrä, laatu, raekoko, lujuus ja kimmokerroin vaikuttavat kutistumaan. Veden ja sementin muodostama pasta pienenee betonissa, mutta kiviaines pysyy lähes kutistumattomana, koska sen veden absorptio on niin vähäistä ja sillä on suuri puristuslujuus sekä kimmokerroin. Tästä syystä olisi hyvä pitää kiviaineksen tilavuus suurena. Kuvassa 11 näkyy miten kiviaines vaikuttaa kuivumiskutistumaan. [3, s. 32.]



Kuva 11. Kiviaineen määrän ja vesi-sementtisuhteen vaikutus kutistumaan [3].

Hyviä kiviaineksia kutistuman kannalta ovat muun muassa gabro, kalkkikivi ja graniitti. Ne ovat luonnonkiviä eikä niissä juurikaan tapahdu kutistumista. Se paljonko kiviaines loppujen lopuksi vähentää kutistumaa riippuu siitä, miten sementtiaines ja kiviaines-rakenteet tarttuvat toisiinsa. Rapautunut luonnonkivi tarttuu huonosti sementtikiveen kasvattaen kutistumaa. [3, s. 32–33.]

3.1.4 Notkistavat lisäaineet

Notkistavia lisäaineita käytetään parantamaan betonin työstettävyyttä ja vähentämään betonin vesimäärää, jolloin vesi-sementtisuhte pienenee ja samalla kuivumiskutistuma vähenee. On kuitenkin muistettava, että jos vesi-sementtisuhte on liian pieni, syntyy autogeenista kutistumaa. Toisin sanoen notkistavien lisäaineiden vaikutukset betonin kutistumaan riippuu pitkälti niiden käyttötavasta ja vedenvähennyksestä, joka notkistimilla saavutetaan. [3, s. 35.]

3.1.5 Paisuttava lisäaine

Betonia, joka on valmistettu paisuttavista lisäaineista, kutsutaan usein kutistumakompensoiduksi betoniksi (SCC). Lisäämällä betoniin esimerkiksi kalsiumsulfoaluminaattia, kalsiumaluminaattiperustaisia tai kalkkiin pohjautuvia aineita kehittyä edellä mainittujen aineiden hydrataatiotuotteista ettringiittiä, joka aiheuttaa paisuttavan vaikutuksen. Tämä tapahtuu betonin sitouduttua ja kovettumisen varhaisvaiheessa. [3, s. 37; 17, s. 2.]

Paisumisen seurauksena vahvistetussa betonissa raudoitteet ottavat vastaan vetojännitykset ja betoniin kohdistuu puristusjännityksiä. Näin ollen syntyvät puristusjännitykset aiheuttavat sisäistä laajentumista betonissa, kompensoiden syntyneitä vetojännityksiä, jotka muuten voisivat aiheuttaa halkeamia. Taulukossa 1 on esitetty paisuttavien aineiden yhdistelmiä, jotka muodostavat ettringiittiä, lukuun ottamatta tyyppiä G, joka muodostaa kalsiumhydroksidikiteitä. [17, s. 3]

Taulukko 1. Etringiittiä muodostavia aineita, kun niitä sekoitetaan portland sementtiin ja veteen [14].

Paisuva komponenttityyppi K	$C_4A_3S + CaCO_4 + \text{portlandsementti} + \text{vesi}$
Paisuva komponenttityyppi M	CA-sementti + $CaCO_4 + \text{portlandsementti} + \text{vesi}$
Paisuva komponenttityyppi S	C_3A -sementti + $CaCO_4 + \text{portlandsementti} + \text{vesi}$
Paisuva Komponenttityyppi G	$CaO_2 + Al_2O_3 + \text{portlandsementti} + \text{vesi}$

Yhdysvalloissa on käytetty jo 1960-luvun puolivälistä asti kutistumakompensoitua betonia moniin sovelluksiin ja siellä on käytössä myös sementtejä, joilla on sama vaikutus, kuin kyseisillä lisäaineilla. Suomessa paisuttimien käyttö on ollut vähäistä. Lopputulos, joka saavutetaan, kun käytetään paisuttavia lisäaineita tai paisuvia sementtejä, riippuu pitkälti kyseisten aineiden annostelusta ja lämpötilasta. Paisumista voi tapahtua betonissa liikaa tai kutistumaa ei saada tarpeeksi kompensoitua. [3, s. 37; 17, s. 2.]

3.1.6 Kutistumaa vähentävät lisäaineet

SRA-aineet eli kutistumaa vähentävät lisäaineet ovat propeen- ja glykolipohjaisia eette-reitä, ja ne on kehitetty vähentämään erityisesti kuivumiskutistumaa, mutta ne vaikutta-vat myös autogeeniseen ja plastiseen kutistumaan. Niiden vaikutus perustuu veden pin-tajännityksen alentamiseen, joten ne pystyvät vähentämään veden kapillaarihuokosiin kohdistamaa painetta, ja näin ollen vähentämään kutistumaa. [8, s. 115; 18]

Kuivumiskutistumaa voidaan SRA-aineilla pienentää jopa 50 %. Annostus on yleensä 0,5–3 % sementin painosta. Kuitenkin haluttaessa kutistuman vähentämisen olevan sel-keä käytetään annosmääränä 1,5–2 % sementin määrästä. Kyseisellä annosmäärällä säilytetään kuitenkin pääpiirteittäin betonin muut ominaisuudet. [3, s. 36; 19.]

Haihtuvan veden kokonaismäärä ei muutu SRA-aineita käytettäessä, mutta haihtumisen nopeus muuttuu hitaammaksi, ja tämä taas vähentää jännityksiä, jotka syntyvät betonin kovettuessa. Suomessa kutistumista vähentäviä lisäaineista ei ole vielä paljon käytetty. Japanissa ja Yhdysvalloissa kutistumaa vähentäviä lisäaineita on käytetty jo 1980-lu-vulta lähtien. [3, s. 36.]

3.1.7 Paisuttimen ja kutistumaa vähentävien lisäaineiden yhteisvaikutus

Kuten jo edellä on jo mainittu, kutistumaa kompensoivien lisäaineiden (paisuttimet) ja kutistumaa vähentävien lisäaineiden (SRA) käytöstä on todettu olevan hyötyä kuivumis-kutistuman rajoittamisessa.

Viime aikoina on myös onnistuneesti pystytty rajoittamaan kuivumiskutistumaa, yhdistä-mällä (SRA) lisäainetta ja kalsiumoksidi (CaO) pohjaista paisuttavaa lisäainetta. Onnis-tuneita testejä on tehty laboratorioissa ja kyseisillä lisäaineilla tehtyjä betonilattioita on jo käytössä. [20.]

Eräessä tutkimuksessa on pystytty todentamaan, että propyleeniglykolipohjaisen SRA:n käyttö johtaa kalkin hydrataatiotuotteiden hienompaan mikrorakenteeseen, ja mikror-a-kenteen kehittyminen viivästyy SRA-sementtipohjaisissa materiaaleissa. Laasteissa ja

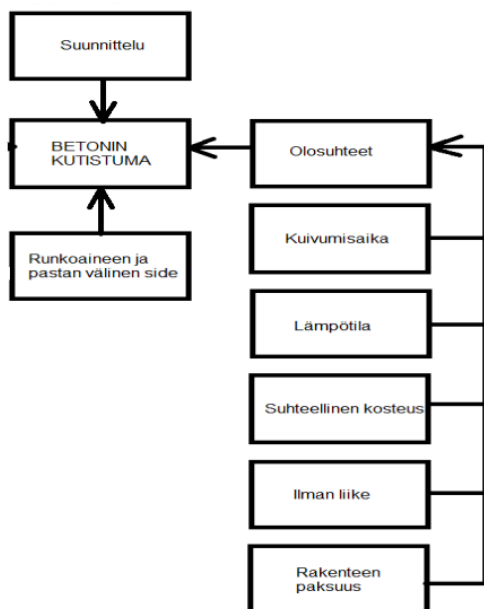
itsestään kasvavissa betoneissa (SCC) edellä mainitut ilmiöt ovat mahdollistaneet suuremman ja aikaisemman paisumisen, mikä edesauttaa vähentämään kuivumiskutistumaa. [20.]

3.1.8 Kuidut

Betonissa voidaan käyttää lisäksi kuituja kuivumiskutistuman ja plastisen kutistuman ehkäisemiseksi. Pieniä muovikuituja käyttämällä voidaan välttää plastisen kutistuman syntymää. Niiden toiminta perustuu siihen, että niiden käyttö jakaa vetojännityksiä, mikä estää plastisen vaiheen halkeilua. Betonimassaan voidaan lisätä myös vähäinen määrä teräskuituja. Niillä voidaan melko tehokkaasti estää kuivumiskutistumaa, mutta vaikutus plastiseen kutistumaan jää vähäisemmäksi. [1.]

3.2 Ulkoiset tekijät

Kuivumiskutistuman kannalta tärkeimmät ulkoiset tekijät ovat olosuhteet jotka vallitsevat, rakenteen muoto ja koko, sekä jälkihoito. Kuvassa 12 on esitetty kaavio näistä tekijöistä. [13.]



Kuva 12. Kuivumiskutistumaan vaikuttavia ulkoisia tekijöitä [14].

Myös betonin kunnollisesta tiivistyksestä on huolehdittava betonin ominaisuuksien optimoimiseksi. Sauvatärytin on yleisin väline tiivistystä tehtäessä ja kyseisen laitteen koon tulee myös olla oikea. Valunopeuden mukaan määritetään tarvittava täryttimien lukumäärä. [3, s. 31.]

3.2.1 Olosuhteet

Jo aikaisemmin on kerrottu (ks. kuva 5), että tuulen nopeus, ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat ratkaisevia tekijöitä betonin pinnalta tapahtuvaan haihtuvan veden määrään ja nopeuteen. Betoni pyrkii myös pidemmällä aikavälillä saavuttamaan tasapainokosteuden, joka vastaa ympäristöolosuhteita. Lisäksi betonimassan lämpötilan tulisi olla 15–20 °C, jotta voitaisiin minimoida kutistuman aiheuttamia vahinkoja. On tärkeää että olosuhteet otetaan huomioon myös pitkällä aikavälillä. [3, s. 30–31.]

3.2.2 Koko ja muoto

Betonirakenteen massivisuudella on iso merkitys sen kutistumisen suhteen. Mitä massiivisempi rakennelma, sitä hitaammin se kuivuu samalla aikavälillä, verrattuna ohuempaan rakennelmaan. On olemassa suure nimeltä *muunnettu paksuus*, jonka avulla voidaan arvioida rakenteen kutistumaa. Siinä poikkileikkauksen pinta-ala jaetaan poikkileikkauksen piirin puolikkaalla. Myös rakenteen epäsymmetrisyys vaikuttaa epätasaiseen kuivumiseen, tai jos betonirakenne kuivuu vain yhdeltä sivulta, kuivuu rakenne silloin epätasaisesti, mikä voi johtaa rakenteen käyristymiseen. [3, s. 30–31.]

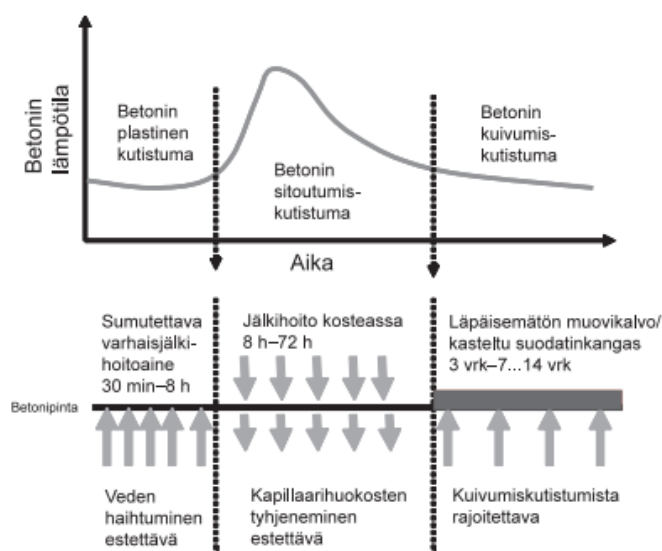
3.2.3 Varhaisjälkihoito

Betonirakenteen onnistumisen kannalta erittäin oleellinen tekijä on riittävän hyvä ja pitkään kestävä jälkihoito. Se voidaan jakaa varhaiseen jälkihoitoon ja varsinaiseen jälkihoitoon. Varhaisjälkihoito aloitetaan ennen betonin sitoutumista ja sillä estetään vettä haihtumasta liikaa ja liian nopeasti. Näin estetään plastisen kutistuman ja siitä mahdollisesti johtuvien halkeamien synty. [2, s. 432.]

Jälkihoitomenetelmänä voidaan käyttää betonin pinnalle tarkoitettua sumutettavaa jälkihoitoainetta tai sitten ilmatila voidaan kostuttaa sumutuskostuttimella. Koska betonin pinta on vielä tuore, siihen ei saa käyttää suoraan vettä tai suojainta, jotta pinta ei vahingoitu. Kyseistä hoitoa jatketaan siihen asti, kunnes sitoutuminen käynnistyy ja pinta on tarpeeksi kova kestääkseen hierron ja muut toimenpiteet. [2, s. 432.]

3.2.4 Varsinainen jälkihoito

Heti kun betonin hierto on saatu päätökseen, aloitetaan varsinainen jälkihoito. Menetelmällä estetään kosteuden poistuminen kovettuneesta betonipinnasta ja sitä jatketaan niin kauan, kunnes ei ole enää vaaraa kuivumiskutistumasta. Kuvassa 13 on esitetty kutistumatyyppejä varhaisvaiheessa ja kovettumisen alussa, sekä jälkihoidon eteneminen. [2, s. 433–434.]



Kuva 13. Betonin kutistumatyyppejä ja jälkihoidon periaate [2].

Kun viimeinen hiertokierros on saatu valmiiksi, pinnalle sumutetaan jälkihoitoainetta, joka voi olla samaa, kuin varhaisjälkihoitoaine. Tämän jälkeen jatketaan jälkihoitoa suodatinkankaan tai muovikalvon avulla, joka levitetään betonin pinnalle. Suojaus pitää tehdä vielä saman päivän aikana, koska sen siirtäminen esimerkiksi seuraavaan aamuun on usein jo liian myöhäistä. Tällöin betonipintaan on saattanut jo muodostua vaurioita. [2, s. 434.]

Kuivattavissa valuolosuhteissa, viimeisen hiertokierroksen jälkeen, pitäisi käyttää para-fiinipohjaista jälkihoitoainetta. Vaihtoehtona on, että valuolosuhteet muutetaan sellaisiksi, että haihtumista ei pääse tapahtumaan. Kun pinta on kovettunut, voidaan suorittaa lopullinen jälkihoito, joka käsittää kaikki toimenpiteet, joiden avulla saadaan estettyä kosteuden poistuminen. Jälkihoidon tulee kestää vähintään viikon ja koko hoidon aikana betonipinnan tulee olla ainakin +5 °C. [2, s. 434.]

3.3 Kuivumiskutistuman arviointi

Jotta voitaisiin ottaa huomioon halkeiluriski, kuivumiskutistuma tulee ottaa huomioon suunnittelussa ja betonivalinnassa. Kyseiseen kutistuman arviointiin on olemassa monia eri laskentamenetelmiä, ja ne antavat erilaisen tuloksen, riippuen mitä menetelmää käyttää. Tässä opinnäytetyössä esimerkkinä kutistuman arvioinnin laskemiseen on esitetty eurokoodi, sillä oletuksena on, että sen mukaisesti betonirakenteet tällä hetkellä suunnitellaan. [3, s. 38; 21, s. 3.]

Standardissa SFS-EN 1992-1-1 on annettu eurokoodi kokonaiskutistuman laskemiseksi ja se on esitetty kaavassa 1. [22, s. 33.]

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (1)$$

jossa

ε_{cs} on kokonaiskutistuma

ε_{cd} on kuivumiskutistuma

ε_{ca} on sisäinen kutistuma

Loppuarvo kuivumiskutistumalle $\varepsilon_{cd,\infty}$ saadaan taulukon 2 keskiarvojen odotusarvoista, keskihajonnan ollessa luokkaa 30 %. [22, s. 33.]

Taulukko 2. Nimellisen kuivumiskutistuman arvoja ε_0 (‰) betonille jonka betoni on CEM-tyyp-
piä N [23, s. 33].

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Suhteellinen kosteus (%)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,62	0,58	0,49	0,30	0,17	0,00
40/50	0,48	0,46	0,38	0,24	0,13	0,00
60/75	0,38	0,36	0,30	0,19	0,10	0,00
80/95	0,30	0,28	0,24	0,15	0,08	0,00
90/105	0,27	0,25	0,21	0,13	0,07	0,00

Kuivumiskutistuman kehittyminen ajan mukana saadaan kaavasta 2 ja 3

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) * k_h * \varepsilon_0 \quad (2)$$

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

jossa

k_h on kerroin muunnetusta paksuudesta h_0 (ks. taulukko 3)

t on betonin ikä d tarkastushetkellä

t_s on betonin ikä d kuivumiskutistuman alkamishetkellä

h_0 on poikkileikkauksen muunnettu paksuus (mm) = $2 \frac{A_c}{U}$

A_c on poikkileikkausala betonissa

u on kuivumiselle alttiin poikkileikkauksen osan piiri

Sisäinen kutistuma voidaan laskea kaavasta 4

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (4)$$

jossa kaavat 5 ja 6

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) * 10^{-6} \quad (5)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(0,2t^{0,5})} \quad (6)$$

Taulukossa 3 esitetty kertoimia, jotka johtuvat muunnetusta paksuudesta.

Taulukko 3. Muunnetusta paksuudesta johtuvia kertoimia [23, s. 33].

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

Määritettäessä kuivumiskutistumaa, voidaan käyttää kahta perusyhtälöä, jotka näkyvät kaavassa 7 ja 8. [23, s. 199.]

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 * a_{ds1}) * e^{\{-\alpha_{ds2} * \frac{f_{cm}}{f_{cm,0}}\}} \right] * 10^{-6} * \beta_{RH} \quad (7)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left\{ \frac{RH}{RH_0} \right\}^3 \right] \quad (8)$$

jossa

f_{cm} on keskimääräinen puristuslujuus (Mpa)

$f_{cm0} = 10$ Mpa

α_{ds1} on kerroin, joka riippuu sementtityypistä

= 3, kun sementtityyppi on S

= 4, kun sementtityyppi on N

= 5, kun sementtityyppi on R

α_{sa2} on kerroin, joka riippuu sementtityypistä

= 0,13 kun sementtityyppi on S

= 0,12 kun sementtityyppi on N

= 0,11 kun sementtityyppi on R

RH on ympäristön suhteellinen kosteus (%)

$RH_0 = 100 \%$

Ympäristöministeriön laatiman uuden asetuksen tullessa voimaan 1.9.2014 kumottiin vanha rakentamismääräyskokoelma koskien betonirakenteita (RakMK B4), jossa on myös annettu hieman yksinkertaisempi esimerkki kuivumiskutistuman laskemiseksi. Kyseistä esimerkkiä ei kuitenkaan tässä insinööriyössä esitetä, koska sitä ei tulisi enää käyttää. [22, s. 3.]

4 Koejärjestelyt

4.1 Kutistuman mittaaminen

Koekappaleet ja kutistumapalkit olisi alun perin valmistettu Semtun laboratoriossa Siipossa ja materiaalit olisivat tulleet Ruskon Betonin Kivenlahden betoniasemalta. Jokaisesta betonimassasta olisi valmistettu kaksi kappaletta kutistumapalkkeja, sekä tehty koekappaleet laadun varmistamiseksi.

Ruskon Betonin henkilökunta pystyi kuitenkin olosuhteista huolimatta valmistamaan kuusi koekappaleita kutistumapalkkeja betonista, johon oli lisätty paisuttavaa lisäainetta. Eurofins Labtium mittasi kutistumat ja massan muutokset. Opinnäytetyöntekijä ei kuitenkaan päässyt testejä tekemään, vaan saadut tulokset toimitettiin opinnäytetyöntekijälle.

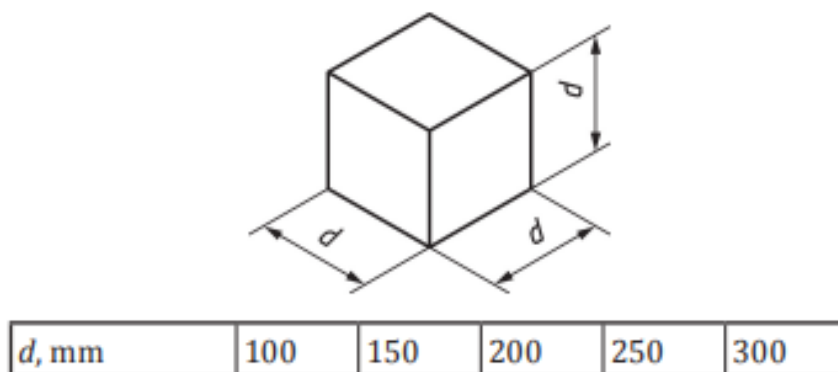
Koekappaleista mitattiin laadun varmistamiseksi puristuslujuus standardin SFS-EN 12390–3 mukaan, sekä tiheys standardin SFS-EN 12390–7 mukaan. Mittausolosuhteet eli suhteellinen kosteus (RH) ja lämpötila mitataan ja dokumentoidaan aina.

Kovettuneen betonin kutistuman mittaamiseen ei ole yhteistä standardia. Yleisesti mittaamiseen on käytetty 100x100x500 mm³:n kokoista palkkia. Mittaus suoritetaan palkkikoneella palkin päistä, mittapituuden ollessa 500 mm. [3, s. 40]

Koepalkkeja tulisi säilyttää seitsemän vuorokautta vedessä. Tämän jälkeen ne tulisi siirtää olosuhdehuoneeseen, jossa suhteellisen kosteuden tulisi olla 40±5 %, lämpötilassa +20 ±2 °C. Mittaus voidaan suorittaa esimerkiksi 7, 28 ja 56 vuorokauden kuluttua valusta. Joissakin tapauksissa viimeinen kutistuman mittaus tehdään 91 vuorokauden kuluttua valusta. [3, s. 40.]

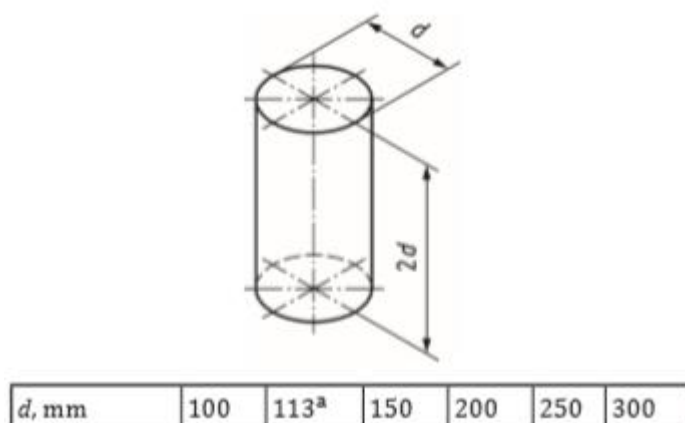
4.2 Puristuslujuus

Betonin puristuslujuus määritetään standardin SFS-EN 12390–3 mukaan ja koekappaleet valitaan standardin SFS-EN 12390–1 mukaan. Kokeen tarkoituksena on määrittää suurin mahdollinen voima, jonka kappale kestää murtumatta. Koekappaleen tulisi olla joko kuution, lieriön tai prisman muotoinen. Esimerkkikappale kuutiosta, lieriöstä ja prismasta on esitetty kuvissa 14, 15 ja 16. [23, 24.]



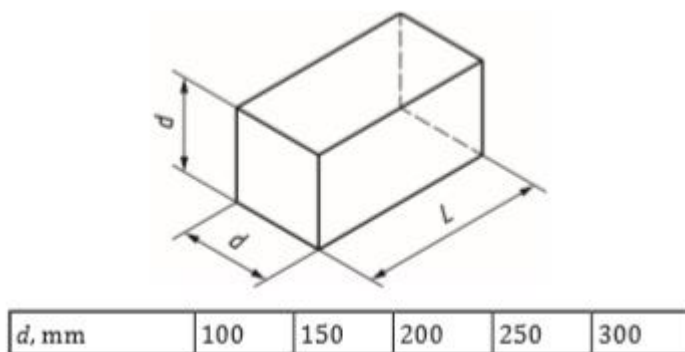
Kuva 14. Esimerkkikappale kuutiosta nimellismittoineen [24, s. 5].

Jokaisen koekappaleen nimellismittan d tulisi olla suuruudeltaan ainakin kolme ja puoli kertaa suurempi kuin kiviaineksen isoin raekoko betonissa. Mitat täytyy määrittää $\pm 10\%$:n tarkkuudella standardissa annetuista nimellismitoista. [24.]



Kuva 15. Lieriökappale nimellismittoineen [24, s.5].

Mitat määritetään $\pm 10\%$:n tarkkuudella nimellismitoista.



Kuva 16. Testikappaleen nimellimitat prisman muotoisesta kappaleesta [24, s. 6].

Mitat määritetään $\pm 10\%$:n tarkkuudella nimellimitoista.

Koe suoritetaan puristuslujuuslaitteella, jossa kuormituksen kasvu tulisi pitää tasaisena. Kuormitusväli valitaan alueella $0,6 \pm 0,2$ MPa/s (N/mm^2). Kuormituksen kasvunopeuden tulisi olla $\pm 10\%$:n tarkkuudella. Puristuslujuus voidaan laskea kaavan 9 mukaan. Tulos ilmoitetaan MPa (N/mm^2). [23, s. 6.]

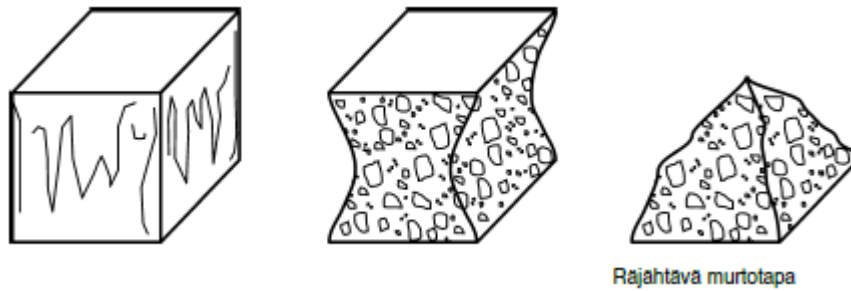
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (9)$$

jossa

F on kokeesta tuloksena saatava maksimikuorma N

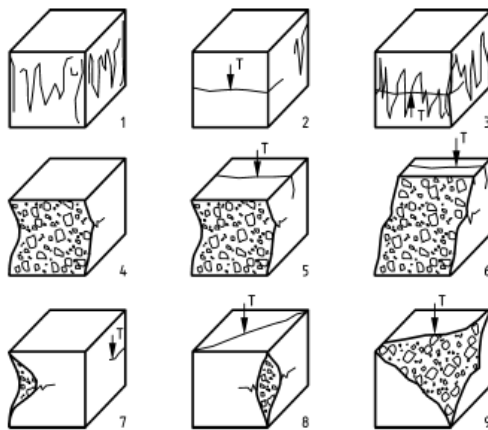
A_c on koekappaleen poikkileikkaus pinta-ala

Koekappaleiden laatua voidaan arvioida myös niiden murtumistapojen perusteella. Ku-
vissa 17, 18, 19 ja 20 on esitetty hyväksytyjä ja hylättyjä murtumistapoja testikappa-
leista, joille on suoritettu puristuslujuustesti.



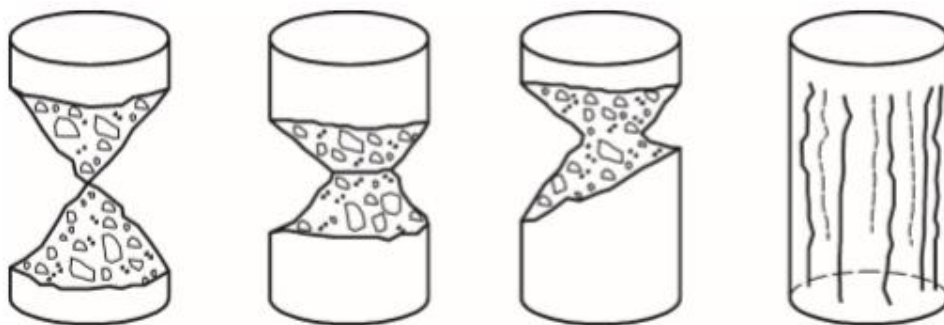
Kuva 17. Hyväksytyjä murtumistapoja kuution muotoisesta koekappaleesta [23, s. 8].

Koekappaleiden kaikki neljä esillä olevaa pintaa ovat halkeilleet suurin piirtein samalla tavalla.



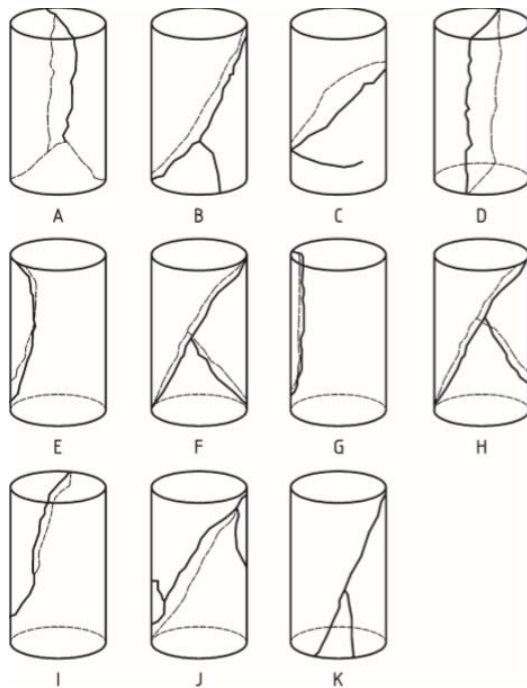
Kuva 18. Koekappaleiden hylättyjä murtumistapoja [23, s. 8].

Kuvassa 18 näkyvä T kirjain tarkoittaa vetojännityksen aiheuttamia halkeamia. [23, s. 9.]



Kuva 19. Hyväksytyjä murtumistapoja lieriön muotoisista koekappaleista [23, s. 9].

Koekappaleet ovat murtuneet melko samalla tavalla joka puolelta.



Kuva 20. Ei hyväksytyjä tuloksia lieriön muotoisista testikappaleita [23, s. 9].

Ennen kuin koekappaleille voidaan suorittaa puristuslujuustesti, täytyy niiden kuormituksen alaiset pinnat puhdistaa ja ylimääräinen kosteus tulee poistaa pinnoilta. [23, s. 6.]

4.3 Tiheys

Kovettuneesta betonin koekappaleesta määritetään myös tiheys kg/m^3 standardin SFS-EN 12390-7 mukaan, ja se voidaan laskea kaavalla 12. [25, s. 8.]

$$D = \frac{m}{V} \quad (12)$$

jossa

m on koekappaleen massa kg

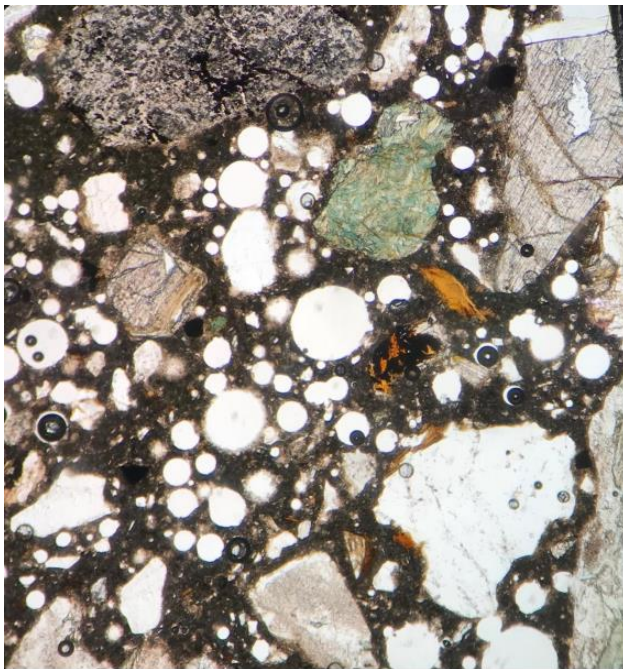
V on koekappaleen tilavuus m^3

4.4 Hiepalan tutkiminen

Tässä insinööriyössä oli myös tarkoitus tutkia kovettuneesta betonista tehtyä hiepalaa, betonin huokoisuuden selvittämiseksi. Hiepala olisi valmistettu ja sitä olisi tutkittu Metropolian Myyrmäen kampuksen materiaalitekniikan laboratoriossa mikroskoopilla.

Betoni sisältää melkein aina jonkin verran huokoisuutta. Jos käy niin, että betoni pääsee jäätymään tavalla, että sen koko huokosverkosto täyttyy vedellä, betoni voi säröillä ja vaurioitua. Jotta näin ei pääsisi käymään, betoniin voidaan lisätä lisähuokostinainetta, jonka avulla betoniin muodostuu suojahuokosia (kuva 21), kun sitä aletaan sekoittamaan. Toisena vaihtoehtona on pitää vesi-sementtisuhde alhaisena, mikä tekee betonimassasta tiiviimpää. [26.]

Ohje ohuthiepalan valmistukseen on otettu Antti Autereen vuonna 2018 tehdystä opinäytetyöstä, ja tässä opinäytetyössä julkaistu kuva 21 on myös samasta opinäytetyöstä.



Kuva 21. Pyöreitä suojahuokosia sisältävä betonipala [27 s. 15].

Ohuthienäyte voidaan valmistaa esimerkiksi lieriön muotisesta testikappaleesta. Testipala halkaistaan pituussunnassa timanttisahalla. Tämän jälkeen kappaleeseen piirretään hiepalan reunat esimerkiksi preparaattilasiasia käyttäen ja piirretty alue leikataan sahalla koekappaleesta irti. Ohuthiepalan pinta kiillotetaan kiiltäväksi ja tasaiseksi käyttämällä tahkohiomakonetta, jonka jälkeen se laitetaan kuivumaan 37 °C:seen vuorokaudeksi. Tämän jälkeen kuivatun aihion pintaan liimataan preparaattilasi ja annetaan kuivua vuorokausi. Kun liima on kovettunut, leikataan lasi ahiosta niin, että sen päälle jää suurin piirtein 3 mm paksuudeltaan oleva betonipala, ja tätä leikattua palaa hiotaan vielä kuppilaikalla niin, että sitä tulee läpikuultava. Lopuksi näytettä ohennetaan vielä käsin vesihionta alustalla. [27 s. 48–49.]

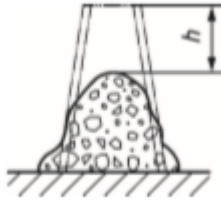
4.5 Tutkittavat betonimassat

Tutkittavista betonimassoista (betoniresepti I), eli tuoreesta betonista määritettiin sen kelpoisuuden varmistamiseksi painuma, ilmamäärä ja lämpötila. Painuma ja ilmamäärä määritettiin eurooppalaisten standardien mukaan ja lämpötila mitattiin lämpömittarilla.

4.6 Painuma

Betonin työstettävyyttä ilmoitetaan notkeusluokkana tai arvona, jota notkeudelta odotetaan (mm). Notkeusluokka, joka halutaan betonille, valitaan betoniasia tilattaessa ja se perustuu tapaan, jolla betonimassa valetaan. Joissakin tapauksissa, työkohteen ollessa tärkeä, notkeus valitaan työselostuksen mukaan. [28.]

Painuma (notkeus) tuoreesta betonista määritetään standardin SFS-EN 12350–2 mukaan, mikä näkyy kuvassa 16. Sillä määritetään, paljonko betonimassa painuu alaspäin verrattuna mitta-astian korkeimpaan kohtaan. Painuma tulisi ilmoittaa 10 mm tarkkuudella. [29, s. 6.]



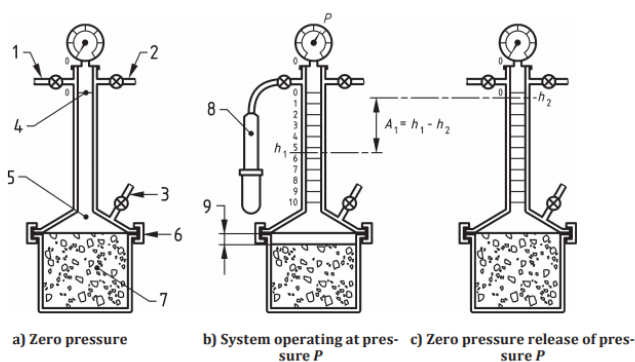
Kuva 22. Tuoreen betonin painuman määrittäminen [29, s. 6].

Työmaalla voidaan määrittää betonimassan notkeus, mutta yleisesti painuma määritetään betoniasemalla. Notkeus pyritään saamaan betoniasemalla tavoitearvoa hieman korkeammaksi, jotta se työmaalle saapuessa olisi tasoa, jota on tavoiteltu. [28.]

4.7 Ilmamäärä

Ilmamäärä määritetään betoniasemalla ja joskus myös työmaalla. Kovettuneelle betonille suoritetaan pakkaskokeita betoniasemalla ja näiden kokeiden perusteella ilmamäärälle asetetaan vähimmäisarvo. Ilmamäärä saa ylittää tämän raja-arvon 4 %, tai alltua 0,5 %. [28.]

Ilmamäärä mitataan standardin SFS-EN 12350–7 mukaan. Standardissa on esitetty vesipylväs menetelmä, jonka toiminta perustuu paineeseen. Kuvassa 23 on esitetty kyseisen laitteen toimintamekanismi.



Kuva 23. Vesipylväs menetelmän toimintaperiaate [30, s. 6].

Vesipylväsmenetelmässä ilmatiivis säiliö täytetään betonilla ja betonin yläpuolelle johdetaan tunnettu määrä vettä. Tämän jälkeen veteen kohdistetaan ennalta määritelty määrä ilmanpainetta. Paineen tasaannuttua laite näyttää betonin ilmamäärään prosentteina. [30, s. 4.]

4.8 Betonimassat

Betonimassa (resepti 1), joka tässä insinööriyössä tehtiin, näkyy taulukossa 4. Se on tehty matalalla vesi-sementtisuhteella (0,49). Massa tehtiin Ruskon Betonin Kivenlahden betoniasemalla pystysaumavalumassana.

Taulukko 4. Resepti 1.

Betoni	Lujuusluokka	Raekoko	Notkeus	Rasitusluokka
Pystysauma-valumassa	C30/37	8 mm	S4	XC3, XF1 100v

Betonin lujuusluokat, notkeusluokat (painuma), sekä rasitusluokat on esitetty liitteissä 1 ja 2.

Taulukossa 5 on esitetty betoniresepti yhteen lisätty kutistumaa kompensoiva (paisutin) lisäaine, notkistin, sekä valujat sekoituksesta.

Taulukko 5. Betonireseptillä yksi tehtyyn betonimassaan lisättävät lisäaineet ja valujat.

Paisutin	Notkistin	Valu sekoituksesta	Valu sekoituksesta	Betonimassa
Semtu Expand	Basf	0 minuuttia	40 minuuttia	Resepti 1

Taulukossa 6 näkyy betoniresepti 2, joka olisi myös tehty tätä insinööriyötä varten ja siinä kyseiseen betonimassaan olisi lisätty kutistumaa vähentäviä (SRA) lisäaineita ja notkistinta. Kyseistä massaa ei kuitenkaan tehty olosuhteista johtuen.

Taulukko 6. Resepti 2.

Betoni	Lujuusluokka	Raekoko	Notkeus	Rasitusluokka
Hieno lattiabetoni	C30/37	16 mm	S4	X0, XC2 100v

Taulukossa 7 on esitetty betoniresepti kahteen lisättävät SRA-aineet kutistuman pienentämiseksi.

Taulukko 7. Betoniresepti kahteen lisättävät lisäaineet

SRA 1	SRA 2	Notkistimet	Betonimassa
Semtu	Basf	Semtu & Basf	Resepti 2

Tässä insinööriyössä olisi ollut tarkoituksena myös yhdistää kutistumaa kompensoivaa lisäainetta ja SRA-ainetta ja selvittää niiden yhteisvaikutusta kutistumaan. Taulukossa 8 on esitetty kyseinen yhdistelmä, jos se olisi tehty käytännössä.

Taulukko 8. Paisutin + SRA + betoniresepti 2

Paisutin	SRA	Notkistin	Betonimassa
Semtu Expand	Semtu	Semtu	Resepti 2

Kuten on jo edellä mainittu, niin ainoastaan paisuttavalla lisäaineella päästiin tekemään konkreettisia testejä tätä insinööriyötä varten.

4.9 Pystysaumamassa

Pystysaumabetoni pyritään valamaan muottiin niin alhaalta kuin pystytään ja se tehdään pudottamalla massa suoraan alaspäin. Korkeus, josta massa pudotetaan muottiin, saa korkeintaan olla 1,5 metriä. Kun käytetään kyseistä massaa, tulee varoa, ettei se valu raudoitusta tai muottiseinää pitkin. [31, s. 15.]

Betonoitavan kohdan tai sauman tulee olla kostutettu, ehjä, ja puhdas. Karkeaan alustaan saadaan paras tartunta. Saumaleveyden pitää olla ainakin 15 mm, jotta sauma täyttyy kokonaan. Massa pumpataan valettavaan kohteeseen ja pumpun tuottamaa massamäärää säädettäessä tulee ottaa huomioon vallitsevat olosuhteet ja sauman paksuus. Lämpötila ei saa alittaa +5 °C. Kun valu on suoritettu, saumoja tulee kastella 2–3 vuorokautta valun jälkeen. [32.]

5 Tulokset

Ruskon Betonilta saatiin joitakin tuloksia tähän insinööriyöhön. Tulokset saatiin betonista, johon oli lisätty kutistumaa kompensoivaa ainetta, eli paisutinta. Kutistumat oli mitattu Eurofinsin laboratoriossa, joka on riippumaton laboratorio- ja asiantuntijapalvelujen tarjoaja.

Koska tässä insinööriyössä en päässyt tekemään käytännön töitä ollenkaan, enkä saanut tuloksia betonista, johon olisi lisätty kutistumaa vähentäviä SRA-aineita, niin olen kirjannut joitakin jo tehtyjen töiden tuloksia ylös vertailun vuoksi.

Insinööriyössä oli myös tarkoitus tehdä betonimassa, jossa yhdistetään SRA-ainetta ja paisutinta. Tätäkään ei päästy tekemään, joten etsin tähän työhön vertailun vuoksi tutkimustuloksia kirjallisuudesta. Kyseisiä tutkimustuloksia on kuitenkin hyvin vähän saatavilla, koska esimerkiksi Euroopassa kyseisten aineiden käyttö ja tutkimus on ollut hyvin vähäistä.

5.1 Kutistumaa kompensoiva lisäaine

Koekappaleista mitattiin kutistuma ja massan muutos 7,14,21 ja 28 vuorokauden kuluttua valusta, ja mittauskeskiarvo otettiin kolmesta koekappaleesta. Taulukossa 9 näkyvät tulokset kun valu on tehty heti ja taulukossa 10 valu on tehty 40 minuutin kuluttua massan valmistuksesta.

Taulukko 9. Valu 0 minuutin päästä sekoituksesta

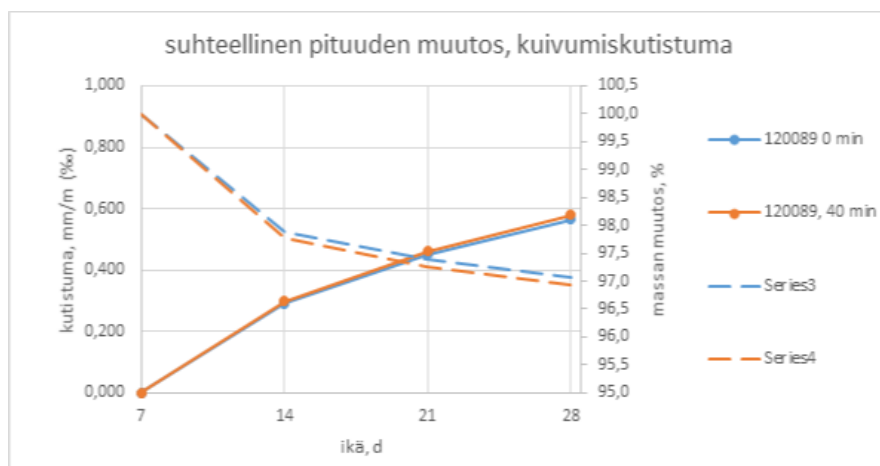
Näyte: 120089, 0 min (3 koekappaleen keskiarvo)		
ikä	suhteellinen pituuden muutos, 3 keskiarvo	massan muutos, 3 keskiarvo
d	mm/m (‰)	g
7	0,000	0,0
14	0,291	232,6
21	0,450	284,3
28	0,565	319,4

Taulukko 10. Valu 40 minuutin päästä sekoituksesta

Näyte: 120089, 40 min (3 koekappaleen keskiarvo)		
ikä	suhteellinen pituuden muutos, 3 keskiarvo	massan muutos, 3 keskiarvo
d	mm/m (‰)	g
7	0,000	0,0
14	0,299	242,0
21	0,460	296,1
28	0,579	332,4

Taulukossa 11 on esitetty suhteellinen pituuden ja massan muutos ajan funktiona.

Taulukko 11. Pituuden ja massan muutos ajan funktiona



Taulukosta voi päätellä, että valujalla 0 minuuttia tai 40 minuuttia ei ole merkitystä kuivumiskutistumaan.

Taulukossa 12 on esitetty käytetty betoniresepti kokonaisuudessaan, sekä betonille tehdyt laadunvarmistus testit.

Taulukko 12.

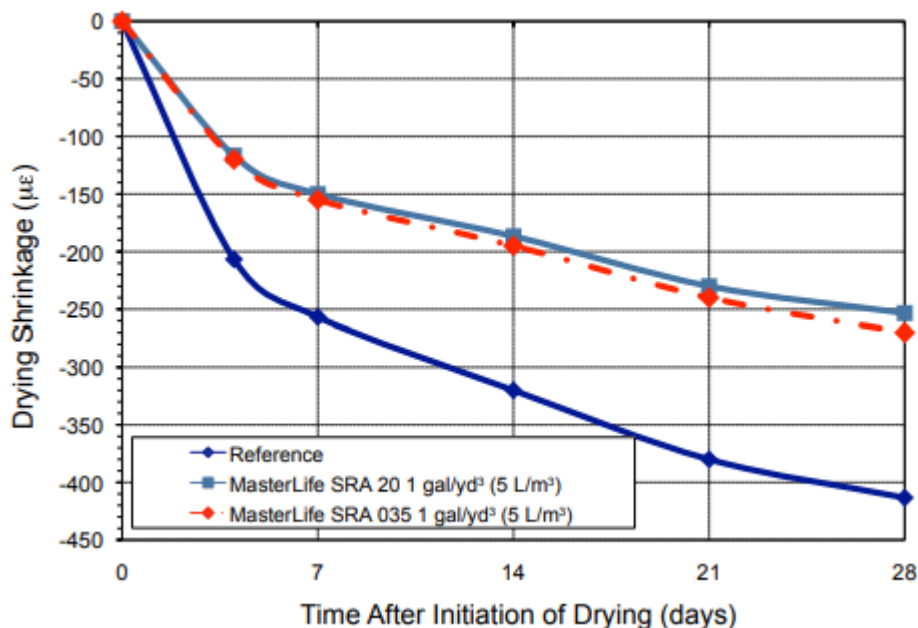
Betoniresepti:	
Betoni	C30/37
Raekoko	8
Painuma	S4
Rasitusluokka	XC3, XF1
CEM I 42.5R	299,2
CEM II/B-M	127,5
ilma	6,50 %
vesi	211
v/s	0,49
O/S	97 %
filleri	3 %
paisutin	1 kg
Betonin laatu:	
tiheys 1/7 d	2162
lujuus 1/7	30
tiheys 2/7 d	2156
lujuus 2/7	33
tiheys 1/28 d	2142
lujuus 1/28 d	36,9
tiheys 2/28 d	2151
lujuus 2/28 d	39,6
painuma	195
lämpötila	16

Taulukosta 12 pystytään tekemään johtopäätökset, että käytetty betoni täyttää laatukriteerit.

5.2 SRA-aineet

Kutistumaa vähentävien lisäaineiden (SRA) vaikutus perustuu siis siihen, että ne pinta-aktiivisina aineina vähentävät painetta kapillaarihuokosissa, mikä taas pienentää halkeamien kannalta haitallisia vetojännityksiä. [18.]

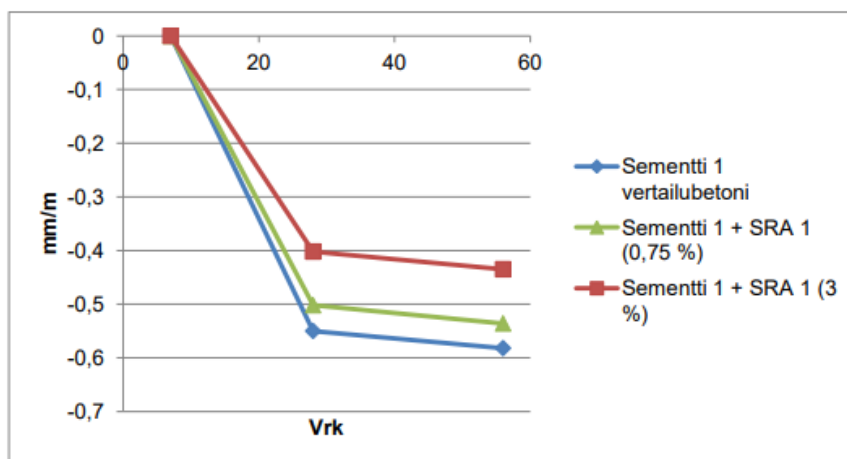
Kuvassa 23 verrataan kahta Basfin kutistumaa vähentävää lisäainetta referenssiin 28 vuorokauden kohdalla valusta.



Kuva 24. SRA-aineiden vaikutus kutistumaan [18].

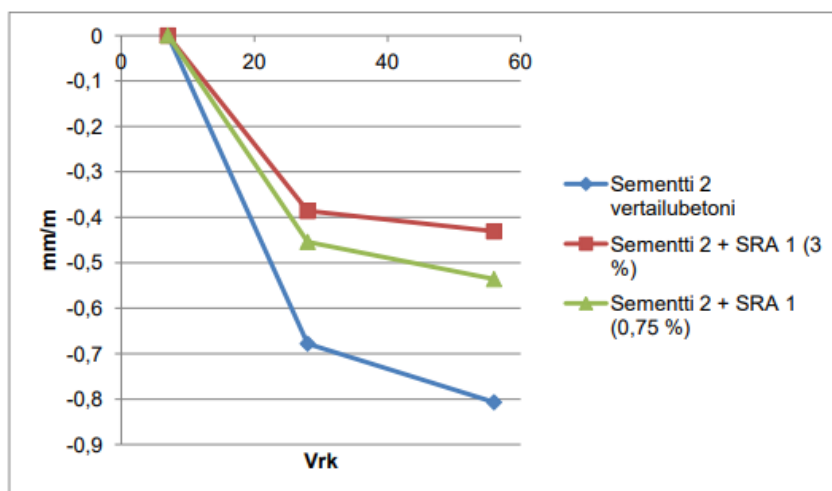
Kuten kuvasta voi hyvin huomata, SRA-aineilla on selkeä vaikutus kuivumiskutistumaan. Kuvasta voi laskea, että MasterLife SRA 20-lisäaineella kutistuma on vähentynyt noin 40 % ja MaserLife SRA 035-lisäaineella kutistuma on vähentynyt noin 35 %.

Kuvassa 24 ja 25 näkyy Tuomas Nykyrin tutkimus SRA-lisäaineilla. Kuvat on otettu opinäytetyöstä, joka on tehty Ruskon Betonille vuonna 2014 ja ne kuvaavat SRA-aineen vaikutusta kutistumaan ajan funktiona. Tutkimus on tehty kahdella eri sementtilajilla ja kahdella eri SRA-annostuksella ja niitä on verrattu vertailupalkkiin. [33, s. 29–30.]



Kuva 25. Sementillä yksi tehdyt tutkimukset [33, s. 30].

Kuvasta 24 on helppo päätellä, että SRA-aineella on paljon vaikutusta betonin kutistumaan. Käytettäessä suurinta sallittua annosta, joka on 3 %, kutistumaa on saatu vähennettyä suurin piirtein 25 %. Tavallisella annostuksella, joka on 0,75 %, kutistuma on vähentynyt suurin piirtein 8 %. [33, s. 30.]



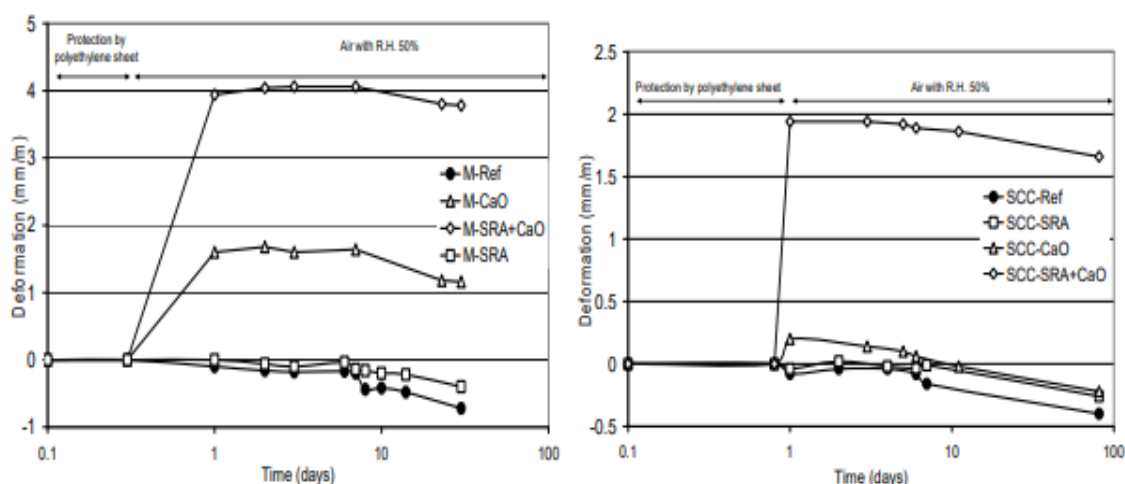
Kuva 26. Sementillä kaksi tehtyjä tutkimuksia [33, s. 30].

Kuvasta 25 voidaan nähdä, että SRA-aineella on vieläkin suurempi vaikutus ja kutistuma on vähentynyt 3 %:n annostuksella noin 47 % ja 0,75 %:n annostuksella likimain 34 %. Suuremmat kutistumat selittyvät kuitenkin sillä, että kyseessä on eri sementtityyppi. [33, s. 30.]

Eri sementtityypeistä johtuvia kutistumia ei kuitenkaan tässä insinööriyössä pohdita enempää, koska se ei ole ollut tämän työn tarkoitus.

5.3 SRA-aineen ja paisuttimen yhteisvaikutus

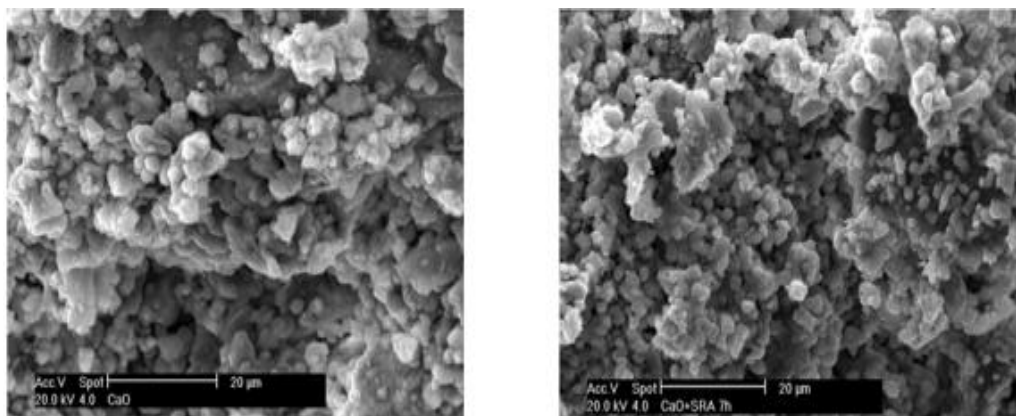
SRA-aineiden ja kutistumaa kompensoivien lisäaineiden yhteiskäytöstä ja testauksesta on varsin vähä kokemusta Euroopassa. Niiden sekoittamisella betonimassaan tiedetään kuitenkin olevan vaikutusta kutistuman alentamiseen. Kuvassa 26 on esitetty erään italialaisen tutkimuksen tuloksia. Tutkimukset on tehty prisman muotoisilla testikappaleilla joiden mitat ovat (100x100x500 mm). [20.]



Kuva 27. SRA-aineen, paisuttimen, sekä niiden yhteisvaikutus laastiin ja SCC-betoniin [20].

Kuten kuvasta nähdään SRA-lisäaineen lisäys laastiin tai itsestivistyvään betoniin (SCC), joihin on lisätty kalkkipohjaista paisutinta (CaO), paisuttava vaikutus on huomattavasti suurempi, kuin pelkällä kalkilla paisutetut testikappaleet. Tutkimus osoittaa, että SRA-aineen ja CaO-pohjaisen paisuttimen yhteiskäytöllä on synergisiä vaikutuksia betonin kutistumaan. [20.]

SRA-aineen ja CaO-pohjaisen paisuttimen yhteiskäyttö, johtaa siis hienompaan kalkin hydrataatiotuotteisiin ja viivästyneeseen kiinteän mikrorakenteen kehittymiseen sementtipastassa, joka puolestaan johtaa suurempaan paisumiseen. Kuvassa 27 on esitetty CaO-sementtipastan mikrorakenteen muutos. [20.]



Kuva 28. Sementtipastan mikrorakenne SEM-mikroskoopin kuvista [20].

Kuvassa vasemmalla näkyy pasta ilman SRA-ainetta ja oikealla muutos seitsemän tunnin kuluttua hydrataatiosta, kun siihen on lisätty SRA-ainetta. Kyseinen pasta sisältää 10 % CaO:ta sementin painosta ja 2 % SRA-ainetta sementin ja CaO:n painosta. [20.]

6 Johtopäätökset kokeista

Selvästikin alhaisella vesi-sementtisuhteella, kutistumaa vähentävillä ja kompensoivilla lisäaineilla, sekä niiden yhteisvaikutuksella on alentava vaikutus kuivumiskutistumaan.

Kutistumaa kompensoivalla lisäaineella tehty testi osoittaa, että 28 vuorokauden kuluttua valusta kutistuma on hieman alle 6 %, mikä on ihan normaali ja hyväksyttävä tulos. Testi osoittaa myös sen, että heti sekoituksen jälkeen tehty valu, ja 40 minuutin päästä sekoituksesta tehty valu, antavat saman tuloksen betonin kutistumalle.

SRA-aineilla tehtyjä tutkimustuloksia tarkasteltaessa voidaan nähdä niiden selkeä vaikutus kuivumiskutistuman alentamiseen. Kirjallisuudesta löytyvistä tuloksista voidaan poikkeuksetta nähdä, että kuivumiskutistuma saattaa vähentyä jopa 50 %, kun käytetään suurinta sallittua annosta, mikä ei vielä vaikuta kuitenkaan betonin muihin ominaisuuksiin.

Myös SRA-aineen ja kutistumaa kompensoivan lisäaineen (SCC) yhteiskäytöllä oli suotuisa vaikutus kuivumiskutistumaan, suuremman paisunnan ansiosta. Kyseisillä lisäaineilla tehtyjä testejä ja julkaistuja tutkimustuloksia löytyi kuitenkin niin vähän, että kyseisten kutistumaa vähentävien aineiden lisätutkimus olisi suotavaa.

Vesi-sementtisuhteella on suurin vaikutus kuivumiskutistumaan. Kyseisen suhteen käyttö ei kuitenkaan ole niin yksinkertaista. Jos betonilta vaaditaan korkeaa betoniluokkaa (pitkä käyttöikä ja vaativa rasitusluokka) vesi-sementtisuhteen tulee olla alhainen, luokkaa 0,4–0,55. On kuitenkin hyvä muistaa että liian alhaisella vesi-sementtisuhteella suhteella (alle n. 0,45) autogeeninen kutistuma kasvaa ja taas jos v/s suhde ei ole tarpeeksi alhainen, kuivumiskutistuma kasvaa.

Lähteet

- 1 Anttila, Vesa. 2010. Betonin kutistuma ja sen huomioiminen. Verkkoaineisto. <<https://docplayer.fi/63511291-Betonin-kutistuma-ja-sen-huomioiminen.html>>. Asiakastiedote. Lohja Rudus Oy. Luettu 18.2.2020.
- 2 Komonen, Juha. 2010. Betonirakenteiden kutistuminen ja halkeamien ehkäisy. Rakentajain kalenteri. Rakennustieto Oy.
- 3 by67 Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta. 2016. Suomen Betoniyhdistys ry. Oy Fram Ab. Vaasa.
- 4 by201 Betonitekniikan Oppikirja. 2018. Suomen Betoniyhdistys ry. Grano Oy. Vaasa.
- 5 Johansson, Kim. 2020. Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet. Verkkoaineisto. betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/nuoren-ja-kovettuneen-betonin-ominaisuudet-2020.pdf>. Helsinki. 9.1.2020. Luettu 20.2.2020.
- 6 K, Ravinda; Obe, Dhir; Lye, Chao. 2019. Sustainable Construction Materials. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/plastic-shrinkage>>. Luettu 20.2.2020.
- 7 Plastic Shrinkage Cracking. 2005. Verkkodokumentti. <https://www.ccaa.com.au//imis_prod/documents/Library%20Documents/CCAA%20Datasheets/DS2005PlasticShrinkageTBR.pdf>. Luettu 20.2.2020.
- 8 Kosmatka, Stewen; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William. 2002. Design and Control of Concrete Mixtures. 14th ed. Illinois. Portland Cement association.
- 9 Holland, Terry. 1999. Using shrinkage-reducing admixtures. Concrete Construction article. The Aberdeen Group.
- 10 Control of Cracking of Concrete Structures. 2001. American Concrete Institute. ACI224R-01.
- 11 Petrow, Seppo. 2018. Betonilattioiden kutistuman hallinta. Betonilattiapäivä, messukeskus. 21.3.2018. Suomen betonilattiyhdistys Ry.
- 12 Shrinkage of Concrete. 2014. Concrete Technology in Focus. Verkkoaineisto. <https://insights.basf.com/files/pdf/Shrinkage_Of_Concrete_CTIF.pdf>. Luettu 22.2.2020.

- 13 Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures. 1997. American Concrete Institute. ACI 209R-92
- 14 Betonin kutistuman hallinta. 2011. Verkkoaineisto. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/06/Betonilattioiden_kutistuman_hallinta_betonipaivat_aalto_hietala.pdf>. Betonipäivät. 23.11.2011. Luettu 23.2.2020.
- 15 Hietala, Jasmiina. 2011. Betonilattioiden kutistuman- ja halkeilun hallinta. Verkkoaineisto. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1103_56-58.pdf>. Luettu 23.2.2020.
- 16 Drying Shrinkage of Cement and Concrete. 2002. Verkkoaineisto. <https://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library%20Documents/CCAA%20Datasheets/DS2002DryingShrinkage.pdf>. Luettu 24.2.2002.
- 17 Guide for the Use of Shrinkage Compensating Concrete. 2011. American Concrete Institute. ACI 223R-10.
- 18 MasterLife SRA 035. 2018. Shrinkage-Reducing Admixture. Verkkoaineisto. <<https://assets.master-builders-solutions.basf.com/en-us/basf-masterlife-sra-035-tds.pdf>>. BASF Corporation. Luettu 24.2.2020.
- 19 MasterLife SRA 815. 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.master-builders-solutions.basf.fi/fi-fi/products/masterlife/masterlife-sra-815>>. Luettu 24.2.2020.
- 20 Tittarelli, Francesca; Giosue, Chiara; Monosi, Saveria. 2017. Combined Use of Shrinkage Reducing Admixture and CaO in Cement Based Materials. Verkkoaineisto. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/2/022093/pdf>>. IOP. Italia. Luettu 25.2.2020.
- 21 by 65 Betoninormit. 2016. Suomen Betoniyhdistys Ry. Oy, Fram Ab Vaasa.
- 22 SFS-EN 1922–1–1. 2015. EUROKOODI 2: BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. OSA 1–1: YLEISET SÄÄNNÖT JA RAKENNUKSIA KOSKEVAT SÄÄNNÖT. 2.painos. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 23 SFS-EN 12390–3. 2019. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. Edition 2. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 24 SFS-EN 12390–1. 2013. Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset. 2. painos. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

- 25 SFS-EN 12390–7. 2019. Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete. Edition 2. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 26 Betonin vaurioituminen. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-vaurioituminen/>>. Luettu 1.4.2020.
- 27 Autere, Antti. 2018. Betonin ohuthietutkimuksen ja vetolujuuskoeistuksen tulosten vertailukelpoisuus betonin kuntotukimuksissa. Pro gradu. Oulun Yliopisto. Jultika-tietokanta.
- 28 Anttila, Vesa. Betonin valinta. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK090403.pdf>>. Rudus Oy. Verkkoaineisto. Luettu 31.3.2020.
- 29 SFS-EN 12350–2. 2019. Testing fresh concrete. Part 2: Slump test. Edition 2. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 30 SFS-EN 12350–7. 2019. Testing fresh concrete. Part 7: Air content. Pressure methods. Edition 2. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 31 Ukkola, Tommi. 2014. Elementtien ja paikallavalettvien rakenteiden kustannusvertailu. Opinnäytetyö. Oulun Ammattikorkeakoulu. Thesus-tietokanta.
- 32 Pystysaumabetoni. Verkkoaineisto. <<https://www.fescon.fi/tuotteet/kuivabetonit-ja-sementtilaastit/9/pystysaumabetoni-psb-k40>>. Luettu 1.4.2020.
- 33 Nykyri, Tuomas. 2014. Kutistumaa vähentävien lisäaineiden vaikutus betonin kutistumaan. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Thesus-tietokanta.
- 34 SFS-EN 206. 2016. Concrete. Specification, performance, production and conformity. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Betonin rasitusluokat

Rakenne voi kuulua samanaikaisesti moneen rasitusluokkaan. Esimerkiksi Julkisivut kuuluvat jäätymis-sulamisrasituksen perusteella luokkaan XF1, mutta ne kuuluvat myös karbonatisoitumisesta aiheutuvan korroosion kannalta luokkiin X3 tai X4 [21.]

Jos betoni ei altistu korroosiolle tai ympäristön syöpymisriskille rasitus luokitellaan taulukon 1 mukaan.

Taulukko 1 Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä [21].

Luokka	Kuvaus	Ympäristö
XO	Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni	Betoni sisätiloissa. Kuivat lämmitetyt sisätilat.

Jos raudoitusta tai muita metalliosia sisältävä betoni on alttiina kosteudelle tai ilmalle se luokitellaan taulukon 1 mukaan.

Taulukko 2 Karbonatisoitumisesta aiheutuva korroosio [21].

Luokka	Olosuhteet	Ympäristö
XC1	Kuiva tai jatkuvasti märkä	Sisätilat, joissa alhainen kosteuspitoisuus tai jatkuvasti veden alla olevat rakenteet kuten kylpyhuoneet tai siltojen vedenalaiset osat
XC2	Kostea, harvoin kuiva	Pitkiä aikoja veden kanssa kosketuksissa, kuten sillan perustukset
XC3	Kohtalaisen kostea	Betoni sisätiloissa, joissa kohtalainen tai korkea kosteus. Ulkona osittain tai kokonaan sateelta suojattu. Esimerkiksi uimahallit.
XC4	Vaihteleva kastuminen ja kuivuminen	Betonipinta joka on kosketuksissa veden kanssa, mutta ei luokkaan XC2 kuuluva. Esimerkiksi julkisivut.

Silloin kun betoni on kosketuksissa veden kanssa, joka sisältää muita kuin merivedestä peräisin olevia klorideja ja betoni on raudoitettu, luokitellaan se taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3 Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio [21].

Luokka	Olosuhteet	Ympäristö
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonia rasittavat ilmvirran mukana tulevat suolat. Esimerkiksi tien varsien melusteet.
XD2	Kostea, harvoin kuiva	Betonia rasittavat klorideja sisältävät teollisuusvedet, kuten uima-altaat.
XD3	Vaihteleva kastuminen ja kuivuminen	Roiskeet jotka sisältävät suoloja tai suolaukselle alttiit osat. Esimerkiksi pysäköintitasot.

Merivedelle, tai ilman kuljettamalle merivedelle alttiit raudoitetut, tai muuta metallia sisältävä betoni luokitellaan taulukon 4 mukaan.

Taulukko 4 Meriveden kloridien aiheuttama korroosio [21].

Luokka	Olosuhteet	Ympäristö
XD1	Kosketuksissa ilman kuljet- taman suolan, mutta ei suoraa kosketusta merive- teen	Avomeren rannalla sijait- sevat rakenteet
XD2	Jatkuvasti meriveden alla	Siltojen ja mereen raken- nettujen rakenteiden meri- veden alaiset osat
XD3	Meriveden vesirajassa ja alueella jonne roiskeet yl- tävät	Merirakenteiden ja siltojen meriveden vaihtelu- ja rois- keille alttiit osat

Betonin ollessa märkä ja jos siihen kosteuden lisäksi kohdistuu paljon jäätymis-sulamis-
rasituksia, luokitellaan se taulukon 5 mukaan.

Taulukko 5 Jäätymis-sulamisrasituksen jäänsulatusaineilla tai ilman [21].

Luokka	Kuvaus	Ympäristö
XF1	Melko suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Pystysuorat betonipinnat jotka ovat alttiita sateelle ja jäätymiselle kuten julkisivut.
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen sekä jäänsulatusaineet	Jäätymiselle ja sateelle alttiit pystysuorat betonipinnat ja ilman mukana tuomalle jäänsulatusaineelle. Esimerkiksi suolattavat tiet.
XF3	Vedellä kyllästyminen on suurta ilman jäänsulatusainetta	Vaakasuorat pinnat jotka altistuvat jäätymiselle ja sateelle kuten parvekkeet.
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen tai merivesi ja jäänsulatusaineet	Vaakasuorat betonipinnat jotka ovat alttiita jäätymiselle ja suoralle jäänsulatusaineroiskeelle

Silloin kun betoniin kohdistuu pohjavedestä ja luonnon maaperästä kemiallisia räsituksia ne luokitellaan taulukon 1.6 mukaisesti.

Taulukko 6 Kemiallinen räsitus [21].

Luokka	Ympäristö
XA1	Heikko kemiallinen räsitus
XA2	Kohtalainen kemiallinen räsitus
XA3	Voimakas kemiallinen räsitus

Betonin lujuusluokat ja painumaluokat

Betonin lujuus- ja notkeusluokat on esitetty taulukoissa 7 ja 8 standardin SFS-EN 206 mukaan. [34.]

Taulukko 7 Betonin lujuusluokat [34].

Lujuusluokat	Minimivoima kuutiolle N/mm²
C8/10	10
C12/15	15
C16/20	20
C20/25	25
C25/30	30
C30/37	37
C35/45	45
C40/50	50
C45/55	55
C50/60	60
C55/67	67
C60/75	75
C70/85	85
C80/95	95
C90/105	105
C100/115	115

Betonin notkeusluokat on esitetty taulukossa 8 standardin SFS-EN 206 mukaan

Taulukko 8 Betonin notkeusluokat [34].

Luokka	Painuma (mm)
S1	10...40
S2	50...90
S3	100...150
S4	160...210
S5	≥ 220