

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikan koulutusohjelma / korjausrakentaminen ja rakennustuotanto

Miia Havukainen

KALKKIKIVISEOSSEMENTEISTÄ VALMISTETTUJEN BETONIEN  
KARBONATISOITUMISEN TUTKIMINEN

Opinnäytetyö 2009

## TIIVISTELMÄ

### KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

#### Rakennustekniikan koulutusohjelma

HAVUKAINEN, MIIA	Kalkkikiviseossementeistä valmistettujen betonien karbonatisoitumisen tutkiminen
Opinnäytetyö	55 sivua + 18 liitesivua
Työn ohjaajat	lehtori Sirpa Laakso laboratorioinsinööri Anna Eskola
Toimeksiantaja	Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorio
Avainsanat	betoni, sementti, kalkkikivi, karbonatisoituminen, ympäristövaikutukset

Betonin karbonatisoituminen tarkoittaa sen huokosveden pH-arvon alenemista. Karbonatisoitumisreaktiossa ilman sisältämä hiilidioksidi tunkeutuu betoniin, jolloin raudotteita suojaava vaikutus häviää. Betonin karbonatisoitumiseen vaikuttavat sekä betonin koostumus että vallitsevat ilmasto-olosuhteet.

Tässä insinöörityössä selvitetään erilaisten sementtien ja olosuhteiden vaikutusta betonin karbonatisoitumiseen. Tarkoituksena on tutkia, voidaanko sementin kalkkikiviseostusta käyttää heikentämättä betonin säilyvyysominaisuuksia. Taustana työlle on tavoite vähentää sementin valmistuksessa syntyviä hiilidioksidipäästöjä sementin seostuksella eli kalkkikiven lisäyksellä.

Tutkimuksessa käytetyt betonikappaleita säilytetään kolmessa erilaisessa olosuhteessa, jolloin nähdään lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidin vaikutus betonin karbonatisoitumiseen. Betonin karbonatisoitumista tutkitaan standardin SFS-EN 13295 mukaisesti. Tutkimuksen kesto olosuhteittain on 1–2 vuotta, mutta tässä työssä karbonatisoitumista tarkastellaan ensimmäisen vuoden aikana. Ensimmäisenä vuonna eri sementtilaatuksen karbonatisoitumisen eteneminen vaihtelee suuresti olosuhteen ja betonireseptin mukaan. Betonin karbonatisoitumisaste on kaikissa olosuhteissa ja massoissa kuitenkin lähes lineaarinen.

Työn tuloksena voidaan sanoa, että suuri kalkkipitoisuus ja vesi-sementtisuhte betonissa nopeuttavat karbonatisoitumista. Lisäksi karbonatisoituminen korreloi betonin lujuuden kanssa. Alhainen vesi-sementtisuhte lujittaa ja tiivistää betonia. Tiivis betoni estää hiilidioksidin tunkeutumista toisin kuin huokoinen betoni. Vesi-sementtisuhteen ollessa pieni, karbonatisoituminen on hidasta ja jää vähäiseksi.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kyminlaakso University of Applied Sciences

Construction Engineering

HAVUKAINEN, MIIA    Research of the carbonation of concrete with limestone cements

Bachelor's Thesis    55 pages + 18 pages of appendices

Supervisors         Sirpa Laakso, Lecturer

Anna Eskola, Construction engineer

Commissioned by    Kymenlaakso University of Applied Sciences, Construction Laboratory

December 2009

Keywords             Concrete, cement, limestone, carbonation, environmental effect

Carbonation of concrete means the decreasing of pH-value in capillary water. In carbonation reaction, carbon dioxide penetrates into the concrete. As a result, the protecting effect of the reinforcement disappears. Composition of concrete and prevailing air conditions will affect the carbonation of concrete.

This thesis studies the impacts of concrete and environment on the carbonation of concrete. The purpose of this study was to find out if the proportion of the limestone in cement can be used without simultaneously reducing durability properties of concrete. The objective of this thesis was to reduce the carbon dioxide emissions caused by the making process by proportioning concrete and increasing in limestone level.

The concrete samples used in this study were held in three different conditions, which demonstrated the effect of temperature, relative humidity and the amount of carbon dioxide on carbonation of concrete. The study of the carbonation of concrete was executed by using the SFS-EN 13295 standard. Depending on the conditions, the duration of the study varied from one to two years. This thesis explores only the carbonation during the first year. Based on this, it can be noticed that the process of the carbonation for different cement qualities is strongly depended on the conditions and the concrete receipt. However, the level of carbonation in all condition is nearly linear.

As a result of this study, it can be said that high limestones concentration and water-cement ratio in concrete accelerates the reaction of carbonation. Furthermore, the carbonation correlates with the compressive strength of concrete. The low water-cement ratio increases the compressive strength and density of concrete. Dense concrete prevents the penetration of carbon dioxide, in contrast to porous concrete. Carbonation is slow and minimal when the water-cement ratio is low.

TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
SISÄLTÖ

1 JOHDANTO .....	5
1.1 Työn tavoitteet ja rajausta .....	5
2 SEMENTTI.....	6
2.1 Sementin valmistus.....	6
2.2. Ympäristövaikutukset.....	7
2.2.1 Rakennusmateriaalin tuotanto .....	7
2.2.2 Ympäristökuormat .....	8
2.2.3 Päästöt ilmakehään .....	8
2.3 Sementtistandardit.....	9
2.3.1 Sementtien merkitseminen.....	10
2.3.2 Lujusluokat ja varhaislujuus .....	10
2.4 Sementtilaadut .....	11
2.4.1 Pikasementti.....	11
2.4.2 Perussementti .....	11
2.4.3 Rapidsementti .....	11
2.4.4 Yleissementti .....	12
2.4.5 SR-sementti .....	12
2.4.6 Valkosementti.....	12
2.4.7 Parmu.....	12
2.4.8 Muut sementit.....	13
2.5 Sementin ominaisuudet .....	13
2.5.1 Sementin reaktiot veden kanssa.....	13
2.5.2 Sitoutuminen.....	13
2.5.3 Lujuudenkehitys .....	14
2.5.4 Hienous.....	14
2.5.5 Kiinto- ja irtotiheys.....	14
2.5.6 Lämmönkehitys .....	14
2.5.7 Tilavuuden pysyvyys ja sulfaatin sekä metallien kestävyys .....	15
2.5.8 Muut ominaisuudet .....	15
2.6 Sementin vaikutus betoniin .....	15
2.7 Muut betoniin vaikuttavat aineet.....	16

2.7.1 Kiviaines .....	16
2.7.2 Seosaineet: lentotuhka, masuunikuonajauhe ja silika.....	16
2.7.3 Vesi .....	17
2.7.4 Lisäaineet: notkistimet, huokostimet, hidastimet ja muut lisäaineet .....	18
3. BETONIN KARBONATISOITUMINEN.....	19
3.1 Karbonatisoitumisnopeus .....	19
3.2 Karbonatisoitumisen edellytykset .....	21
3.3 Halkeamien vaikutus karbonatisoitumiseen.....	24
3.4 Karbonatisoitumisen seuraukset.....	24
3.5 Korroosion seuraukset.....	24
4. TUTKIMUS .....	26
4.1 Tutkimuksen lähtökohdat .....	26
4.2 Tutkimussuunnitelma .....	28
4.3 Aikataulu .....	29
4.4 Koekappaleet.....	29
4.5 Olosuhteet.....	33
4.5.1 Ulko-olosuhde .....	33
4.5.2 Vakio-olosuhde.....	33
4.5.3 Sääkaappi, pika-olosuhde .....	34
4.6 Käytetyt välineet.....	35
4.6.1 Kuormituskehä.....	35
4.6.2 Fenoliftaleiiniliuos.....	36
4.7 Karbonatisoitumisen tutkiminen ja tulosten kirjaaminen.....	36
4.8 Aikaisemmat tutkimukset.....	39
4.8.1 Tutkimukset Suomessa .....	39
4.8.2 Tutkimukset ulkomailla.....	40
5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	41
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	52
LÄHTEET.....	54

## LIITTEET

Liite 1. Aikataulu

Liite 2. Karbonatisoitumisen eteneminen

Liite 3. Valokuvat

## 1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä on tutkittu sementin kalkkikiviseoksen vaikutusta betonin säilyvyysominaisuuksiin, karbonatisoitumiseen. Toimeksiantajana on ollut Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorio, jolta Finnsementti on tilannut betonin karbonatisoitumistutkimuksen uusista sementtilaaduista. Taustana työlle ovat olleet sementin valmistuksessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen pienentäminen sementin seostuksella. Seostus on tehty kalkkikiven lisäyksellä betoniin. Koekappaleita on säilytetty kolmessa erilaisessa olosuhteessa, jolloin nähdään lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja hiilidioksidin vaikutus karbonatisoitumiseen eli betonin neutraloitumiseen. Betonin karbonatisoitumista tutkitaan standardin SFS-EN 13295 mukaisesti. Tutkimuksen kesto olosuhteiden mukaan on 1–2 vuotta.

Työn alkuosassa pyritään tuomaan esille sementtiin liittyvää teorian tietoa keskittyen aihetta oleellisesti koskevaan tietoon. Materiaalina on käytetty alan kirjallisuutta ja artikkeleita muista vastaavista tutkimuksista. Tämän jälkeen käydään läpi tutkimuksen kulku ja sen sisältö. Insinööriyön loppuosassa on tarkasteltu tutkimustuloksia sekä pohdittu saatujen tuloksien luotettavuutta.

### 1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Insinööriyön tavoitteena on ollut selvittää erilaisten sementtien ja olosuhteiden vaikutusta betonin karbonatisoitumiseen. Tarkoituksena on ollut selvittää alustavasti, voidaanko kalkkikiviseostusta käyttää heikentämättä betonin säilyvyysominaisuuksia. Tutkimuksessa on huomioitu betonin joidenkin ominaisuuksien muuttuminen. Työ on tehty toimeksiantajan tiloissa laitteilla, jotka on kalibroitu ennen tutkimuksen alkua. Tässä työssä on tarkasteltu kaikkien koekappaleiden testausta ensimmäisen vuoden aikana.

Työssä on myös pyritty tekemään vertailua eri betonireseptien kesken, joissa muuttujana ovat olleet muun muassa sementtilaatu, vesi-sementtisuhte ja lisäaineet. Finnsementin rakennuslaboratorioon toimittamia koekappaleita on yhteensä 48 kappaletta. Betonireseptejä on neljä, kustakin reseptistä on kaksi koekappaletta kolmessa erilaisessa olosuhteessa. Tutkimus on osa Finnsementin tuotekehitystä.

## 2 SEMENTTI

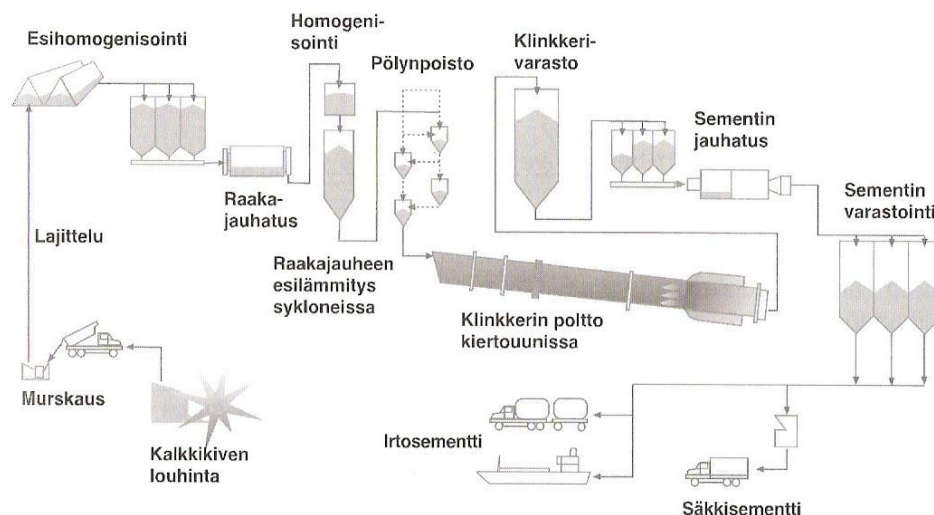
Sementti on hydraulinen sideaine, joka reagoi veden kanssa muodostaen veden alla sekä ilmassa kovan ja kestävänn lopputuotteen. Sementti vaikuttaa merkittävästi betonin ominaisuuksiin. Sementin kemiallinen koostumus vaikuttaa sekä tuoreen betonin työstettävyyteen että kovettuneen betonin säilyvyyteen. Sementin valinnalla voidaan vaikuttaa betonin muihinkin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, lämmönkehitykseen ja kemialliseen kestävyys. (1.)

### 2.1 Sementin valmistus

Sementin pääraaka-aine on kalkkikivi, jonka pääosana on kalsiumkarbonaatti ( $\text{CaCO}_3$ ). Muita sementin valmistuksessa tarvittavia tuotteita saadaan muun teollisuuden tuotteista sekä kalkkikivilouhoksen sivukivestä. Näitä tuotteita ovat piioksidi ( $\text{SiO}_2$ ), rautaoksidi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (1.)

Sementti valmistetaan kuvan 1 kuivamenetelmällä, jossa raaka-aineiksi louhittu kivi murskataan, lajitellaan ja siirretään raaka-ainesiloihin. Erilaisten kivien syöttösuhteet määritellään kiviainesten kemiallisen koostumuksen perusteella. Kiviaines murskataan suurissa pyörivissä rummuissa metallikuulien avulla. Tätä kutsutaan raakajauhatuksiksi. Raakajauhe sekoitetaan tasaiseksi homogenisoimalla se uudelleen, minkä jälkeen ylimääräinen pöly poistetaan. Raaka-aine esilämmitetään sykloneissa ja poltetaan  $1\ 400\text{ °C}$ :ssa, jolloin siitä tulee klinkkeriä. Lopuksi klinkkeri jäähdytetään nopeasti noin  $200\text{ °C}$ :ssa. Syntyneen portlandklinkkerin päämineraalit ovat aliitti  $\text{C}_3\text{S}$ , beiliitti ( $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminaatti ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ja feriitti ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Näiden mineraalien keskinäisiä suhteita säätämällä klinkkerissä voidaan vaikuttaa sementin ominaisuuksiin. (1.)

Klinkkeri varastoidaan ja siitä jauhetaan sementtiä. Jauhituksen yhteydessä sementtiklinkkeriin lisätään seosaineita, joita ovat kalkkikivi sekä masuunikuona. Sementin hienoudella voidaan säädellä sen laatua. Lopulta sementti varastoidaan omiin siloihinsa laadun mukaan, josta sitä kuljetetaan säkkisementteinä sekä irtosementtinä asiakkaille. (1.)



Kuva 1. Periaatekuva sementin valmistamisesta kuivamenetelmällä (2)

## 2.2. Ympäristövaikutukset

Sementin valmistuksessa portlandklinkkerin poltto vaatii suuren lämpötilan, joten sen energian tarve on suuri. Klinkkerin poltossa syntyy myös huomattava määrä hiilidioksidia, joka on peräisin kalkkikiven hajoamisesta kemiallisessa reaktiossa. (1.)

Käyttämällä seosaineita pyritään vähentämään klinkkerin määrää sementissä ja sitä kautta vähentämään sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä. Seosaineiden käytössä on kuitenkin huomioitava betonin teknistä käyttöikää rajoittavat tekijät kuten pakkas- tai suolarasitus, karbonatisoituminen, mekaaninen rasitus ja kemialliset rasitukset. Betonirakenteiden elinkaari riippuu materiaalin sekä rakenteen ominaisuuksista että ympäristökuormituksista. (3.)

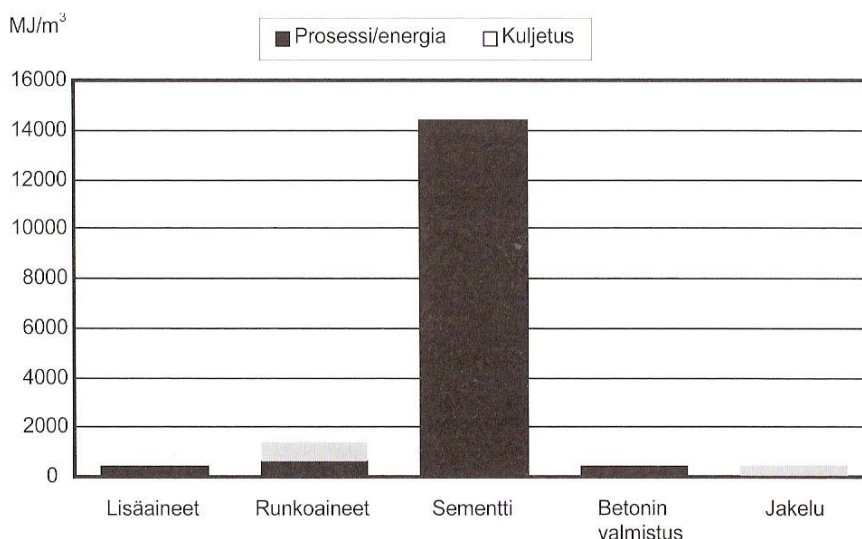
### 2.2.1 Rakennusmateriaalin tuotanto

Rakentamiseen kuluvasta energiasta suurimman osan käyttävät sementin ja teräksen valmistus. Näiden aineiden valmistuksen aikana ympäristöön pääsee haitallisia aineita, kuten hiilidioksidia, rikkioksidia ja  $\text{NO}_x$ -yhdisteitä. (2.)

Rakennusmateriaalit ja tarvikkeet käyttävät suurimman osan, noin 67 % rakentamiseen kuluvasta energiasta. Itse betonin valmistukseen kuluvasta energiasta sementin



valmistus käyttää valtaosan, noin 90 %. Kuvassa 2 esitetään betonin tuottamiseen kuluva energiamäärä. (2.)



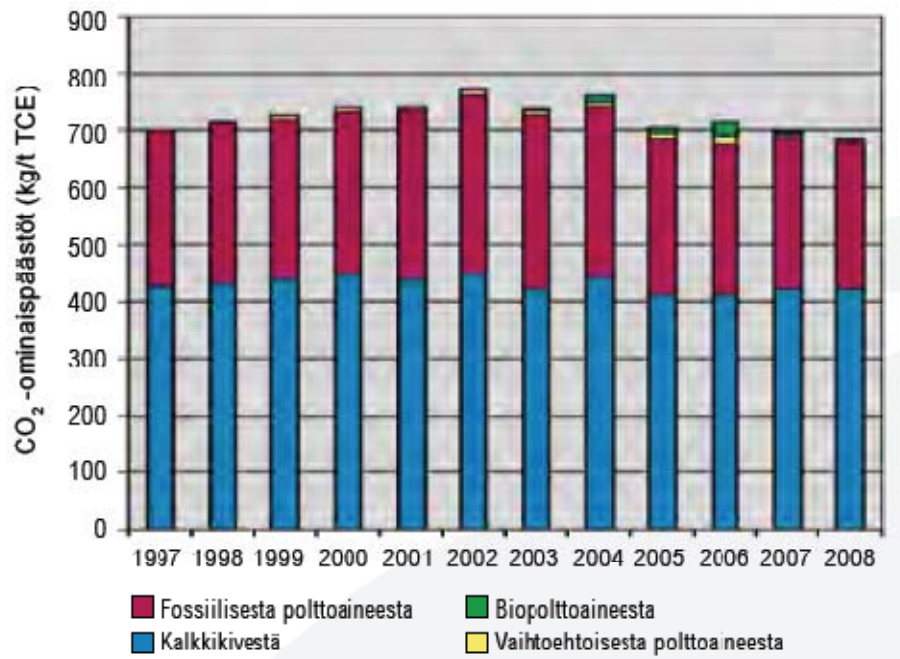
Kuva 2. Betonin tuottamiseen eri vaiheissa kuluva energiamäärä (2.)

### 2.2.2 Ympäristökuormat

Sementin ympäristökuormat syntyvät sen osa-aineiden hankinnan, valmistusprosessien sekä kuljetuksien aiheuttamasta resurssien käytöstä ja päästöistä ilmakehään. Näitä ympäristökuormia ovat muun muassa kalkkikivenlouhinta, klinkkerin poltto ja jauhaus, kiviaineksen hankinta, betonin valmistus sekä tuotteiden kuljetus. Valmistusprosessi vaatii siis fossiilisten polttoaineiden ja mineraalisten luonnonraaka-aineiden käyttöä, maankäyttöä sekä energiankäytöstä ja prosesseista aiheutuvia kaasumaisia ja pölypäästöjä ympäristöön. (3.) Pölyäminen tarkoittaa sementtitehtaan hiukkashäviötä, mutta se on kuitenkin vähäistä (4).

### 2.2.3 Päästöt ilmakehään

Betoniteollisuus energiankäyttäjänä on melko pieni verrattuna muihin teollisuudenaloihin. Betonin valmistuksessa sementtimäärällä on suuri merkitys päästöihin ja energiankulutukseen. Hiilidioksidipäästöjen määrät sementin valmistuksessa selviävät kuvasta 3. Valmistusprosessissa ilmakehään vapautuu hiilidioksidia keskimäärin betonin sementtimäärää vastaava määrä eli 10...15 % betonin painosta. (3.)



Kuva 3. Sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöt (4.)

### 2.3 Sementtistandardit

Betonin valmistukseen käytettävien sementtien tulee olla CE-merkittyjä ja täyttää sementtistandardin SFS-EN197-1 vaatimukset. Sementti on hydraulinen sideaine, jolla tarkoitetaan hienoksi jauhattua epäorgaanista materiaalia, joka veden kanssa sekoitettaessa muodostaa pastan. Pasta sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden kautta ja kovettumisen jälkeen pitää lujuutensa ja pysyvyytensä jopa veden alla. (1.)

Tavallisten sementtien valmistuksessa käytetään portlandklinkkeriä ja seosaineita. Sementit ryhmitellään viiteen päälajiin niiden koostumuksen perusteella.

CEM I	Portlandsementti
CEM II	Portlandseossementti
CEM III	Masuunikuonasementti
CEM IV	Pozzolaaniseimentti
CEM V	Seossementti

Päälajit jaotellaan edelleen eri sementtilajeihin käytetyn seosaineen ja seosmäärien perusteella. Sementtilajeja on yhteensä 27 erilaista. Sementin seosaineita ovat maasuonikuona (S), kalkkikivi (L tai LL), pozzolaanit (P tai Q), lentotuhka (V tai W) ja poltettu liuske (T). Sementtien koostumuksille on määritetty raja-arvot, joita tulee noudattaa. Sementtien koostumusten sallitut ainesmäärät selviävät taulukosta 1. (1.)

Taulukko 1. Suomessa sallittujen sementtien koostumukset (5.)

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset [%]					
	klinkkeri	kuona	silika	lentotuhka	kalkkikivi	muut
CEM I	95...100	-	-	-	-	0...5
CEM II/A-S	80...94	6...20	-	-	-	0...5
CEM II/B-S	65...79	21...35	-	-	-	0...5
CEM II/A-D	90...94	-	6...10	-	-	0...5
CEM II/A-V	80...94	-	-	6...20	-	0...5
CEM II/B-V	65...79	-	-	21...35	-	0...5
CEM II/A-LL	80...94	-	-	-	6...20	0...5
CEM II/A-M	80...94	6...20				0...5
CEM II/B-M	65...79	21...35				0...5
CEM III/A	35...64	36...65	-	-	-	0...5
CEM III/B	20...34	66...80	-	-	-	0...5

### 2.3.1 Sementtien merkitseminen

Rakennussementit tulee yksilöidä vähintään sementtilajin tunnuksella. Yksilöinti sisältää seosainetunnuksen, lujuusluokkaa kuvaavan tunnuksen sekä varhaislujuutta kuvaavan kirjaimen. (1.)

### 2.3.2 Lujuusluokat ja varhaislujuus

Rakennussementit jaetaan kolmeen standardilujuusluokkaan 32,5, 42,5 ja 52,5. Standardilujuudella tarkoitetaan sementin puristuslujuutta 28 vuorokauden iässä. Lisäksi jokaiselle lujuusluokalle on kaksi varhaislujuusluokkaa, jossa N tarkoittaa normaalia varhaislujuutta ja R korkeaa varhaislujuutta. (1.)

## 2.4 Sementtilaadut

Yleisimpiä sementtityyppejä ovat pikasementti, perussementti, Rapidsementti, yleis-sementti, SR-sementti, Valkosementti ja Parmu. Käytettävän sementin valintaan vaikuttavat sekä tuoreen sekä kovettuneen betonimassan vaaditut ominaisuudet.

### 2.4.1 Pikasementti

Pikasementti on erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti (CEM I 52,5 R). Pikasementti on rakennussementti, jolle ominaista ovat korkeat alku- ja loppulujuudet. Nopean lujuudenkehityksensä vuoksi se sopii nopeaa muottikiertoa vaativaan elementtituotantoon. Pikasementti soveltuu myös valmisbetoniin kylmänä aikana sekä erilaisten betonituotteiden, kunnallisteknisten tuotteiden ja harkkojen valmistukseen. (6.)

### 2.4.2 Perussementti

Perussementti on normaalisti kovettuva portlandseossementti (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N). Perussementti soveltuu kaikkeen betonirakentamiseen muun muassa sen edullisuuden takia. Sen erityiskäyttökohteena on stabilointi. (6.)

### 2.4.3 Rapidsementti

Rapidsementti on nopeasti kovettuva portlandseossementti (CEM II/A-LL 42,5 R). Rapidsementti on myös rakennussementti, jonka alku- ja loppulujuudet ovat korkeat. Lisäksi se soveltuu nopeaa muottikiertoa vaativaan elementtituotantoon ja erilaisten betonituotteiden valmistukseen käytettäessä alhaista vesisementtisuhdetta. Rapidsementti sopii nopeutensa ansiosta erittäin hyvin talvibetonointiin. Myös valmisbetoni voidaan tehdä Rapidsementillä. Lisäämällä Rapidsementtiin masuunikuonajauhetta voidaan siitä valmistaa massiivisiin rakenteisiin käytettävää alhaislämpöbetonia. (6.)

#### 2.4.4 Yleissementti

Yleissementti on normaalisti kovettuva portlandseossementti (CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N). Edullisuutensa vuoksi yleissementti soveltuu hyvin valmisbetoniin, betonielementteihin ja sideaineeksi erilaisten betonituotteiden ja harkkojen valmistukseen. Yleissementtiä käytetään myös vaativissa ja sään rasituksille alttiiksi joutuvissa kohteissa. Erityiskäyttökohteena on esimerkiksi stabilointi. (6.)

#### 2.4.5 SR-sementti

SR-sementti on normaalisti kovettuva sulfaatinkestävä portlandsementti (CEM I 42,5 N). SR-sementille ominaista on erinomainen sulfaatinkestävyys. Siksi sitä käytetään esimerkiksi puunjalostusteollisuuden ja kemianteollisuuden rakenteisiin sekä perustuksiin, jotka joutuvat maaperän sulfaatinrasitukselle alttiiksi. SR-sementillä on kohtuullinen lämmöntuotto ja helppo huokoistettavuus, joten se sopii erityisesti myös siltojen betonointiin. SR-sementtiä voidaan mainiosti käyttää myös korkealujuusbetonin valmistamiseen, koska sen vedentarve on pieni ja loppulujuus korkea. (6.)

#### 2.4.6 Valkosementti

Valkosementti on valkoinen portlandsementti (CEM I 52,5 R), jota käytetään valkoisten betonituotteiden ja elementtien valmistukseen. Käyttämällä valkosementtiä tai valkosentin ja harmaan sementin seosta värillisen betonin väristä saadaan kirkkaampi. (6.)

#### 2.4.7 Parmu

Parmu on sementtiä, jota käytetään, kun tehdään itse laastia (MC 12,5). Parmumuuraussementti on tarkoitettu muuraus- ja rappauslaastien valmistukseen. Ominaisuuksille on hyvä työstettävyys, erinomainen tartunta sekä säänkestävyys, minkä vuoksi se sopii myös pohjoisiin olosuhteisiin. (6.)

#### 2.4.8 Muut sementit

Sementtejä on kehitetty eri käyttötarkoituksiin. Reikien ja halkeamien injektointia varten on kehitetty injektointisementtejä. Injektointisementteille ominaista on erityisen suuri hienous, joka parantaa sementtipastan reaktiivisuus- ja tunkeutuvuusominaisuuksia. (2.)

Hyvin korkeisiin lämpötiloihin (1 500...1 600 °C) soveltuu aluminaattisementti. Aluminaattisementtiä ei saa käyttää kantaviin rakenteisiin. Käyttökohteena ovat muun muassa tulenkestävät laastit. (2.)

Suomessa muiden erikoisementtien käyttö on harvinaista, mutta markkinoilla on myös värillisiä sementtejä sekä paisuvia sementtejä. (2.)

#### 2.5 Sementin ominaisuudet

Sementillä on useita ominaisuuksia lujuuden lisäksi, jotka vaikuttavat betonituotteiden valmistukseen. Suurin osa sementin ominaisuuksista riippuu klinkkerin koostumuksesta.

##### 2.5.1 Sementin reaktiot veden kanssa

Sementin tärkein ominaisuus on kyky reagoida veden kanssa ja muodostaa veteen liukenematon materiaali. Tätä kovettunutta sementtiliiman osuutta betonissa kutsutaan sementtikiveksi. Sementin reagoidessa veden kanssa klinkkerimineraalien aluminaattiyhdisteet reagoivat ensin. (1.)

##### 2.5.2 Sitoutuminen

Sementin ja veden sekoituksen jälkeen seos on aluksi notkeaa, mutta jonkin ajan kuluessa pasta alkaa hyytelöityä ja menettää plastisuuttaan. Tätä kutsutaan sementin sitoutumiseksi. Hyytelön kiinteys lisääntyy tämän jälkeen ajan funktiona ja kovettuminen alkaa. (1.)

Sementin sitoutumisaikaan vaikuttaa sen kemiallinen koostumus ja hienous. Sementin sopiva sitoutumisaika varmistetaan kipsinlisäyksellä. Sitoutumisaikaan vaikuttaa myös voimakkaasti lämpötila. Lämpötilan noustessa 10 °C sitoutumisaika lyhenee noin puoleen. Kylmä ilma puolestaan hidastaa sementin sitoutumista, mikä on syytä huomioida talvella. Jos sitoutumisvaiheessa olevaa pastaa tai betonia häiritään, muodostuneet liimasauvat rikkoutuvat ja seurauksena voi olla lujuuskato. (1.)

### 2.5.3 Lujuudenkehitys

Sitoutumisen päätyttyä alkaa kovettuminen eli lujuusreaktiot, jotka jatkuvat niin kauan, kuin hydratoitumiseen osallistumiskykyistä vettä on käytettävissä. Sementin lujuudenkehitykseen vaikuttaa eniten betonin vesi-sementtisuhte. (1.)

### 2.5.4 Hienous

Sementin hienous arvioidaan yleensä sen ominaispinta-alan mukaan ilman läpäisevyyteen perustuvilla menetelmillä. Suomalaisten rakennussementtien hienous on 300...550 m<sup>2</sup>/kg. Sementin reaktiopinta-ala ja vedentarve kasvavat, mitä hienommaksi se on jauhettu. Reaktiopinnan kasvaessa sitoutumisaika lyhenee ja sitä enemmän sementin hydrataatio, lujuudenkasvu sekä lämmöntuotto nopeutuvat. (1.)

### 2.5.5 Kiinto- ja irtotiheys

Sementin kiintotiheys on noin 3 100 kg/m<sup>3</sup> ja irtotiheys 1 000...1 400 kg/m<sup>3</sup>. Sementin ominaispinta-alan kasvaessa sen irtotiheys pienenee. (1.)

### 2.5.6 Lämmönkehitys

Sementin kemiallinen koostumus ja hienous vaikuttavat sen lämmönkehitykseen. Sementin hydrataatioreaktiossa kehittyvä lämpöä samassa suhteessa kuin lujuudenkehitys etenee. Hydrataatiolämmöt vaihtelevat sementeittäin, mutta hitaimmat lämmöntuoton arvot ovat hitaimmilla sementeillä, kuten yleissementeillä. Suurimmat lämmöntuoton arvot ovat nopeimmilla sementeillä, kuten pikasementillä. (1.)

Lämmönkehityksellä on suuri merkitys etenkin massiivisissa betonirakenteissa. Halkeiluriski lisääntyy liiallisesta lämmön noususta. Käyttämällä hitaita sementtejä, kuonaa seosaineena, kylmää betonimassaa tai estämällä suuria lämpötilaeroja, voidaan vähentää halkeiluriskiä. Talvibetonoinnissa on mahdollista käyttää nopeammin kovetuvaa sementtiä, koska rakenteen lujuus ja lämpötila kehittyvät parhaiten ensimmäisten vuorokausien aikana. (1.)

#### 2.5.7 Tilavuuden pysyvyys ja sulfaatin sekä metallien kestävyys

Suomalaiset sementit ovat tilavuudeltaan hyvin pysyviä. Sementtikiven tilavuuden muutoksen aiheuttajat ovat ettringiitti-, vapaakalkki- tai magnesiumlaajeneminen. Ettringiittilaajenemista voidaan ehkäistä rajaamalla sementin sulfaattipitoisuus ( $\text{SO}_3$ ). Suomessa sementtiä pidetään sulfaatinkestävänä, kun sen C3A-pitoisuus on alle 3 %. (1.)

Emäksinen hydratoitunut sementtikivi suojaa raudoitusta ja teräksiä ruostumiselta. Tuoreen ja kostean betonin kanssa alumiini ei kestä kosketusta. Myöskään lyijyn ja sinkin käyttö yhdessä betonin kanssa ei ole suositeltavaa. (1.)

#### 2.5.8 Muut ominaisuudet

Sementti on hyvin hygroskooppinen aine, joka imee ilmasta kosteutta ja hiilidioksidia. Tämä voi aiheuttaa sementtiin paakkuuntumista ja sitoutumishäiriöitä, minkä vuoksi lujuus saattaa heiketä säilytyksen pitkittyessä. (1.)

#### 2.6 Sementin vaikutus betoniin

Sementin tehtävänä on toimia betonin sideaineena. Se vaikuttaa betonin ominaisuuksiin, joista lujuus, tiiveys ja säilyvyys ovat tärkeimmät. Betonin kyky vastustaa ympäristörasituksia on hyvä, mutta ne tulee huomioida. Näitä rasituksia ovat pakkasrasitus, korroosio ja kemiallinen rasitus. Betonin korkea lujuus ei aina takaa hyvää säilyvyyttä, mutta voidaan sanoa, että mitä tiiviimpää betoni on, sitä parempi on sen säilyvyys. (1.)



## 2.7 Muut betoniin vaikuttavat aineet

Sementin lisäksi betonin valmistukseen käytetään kiviainesta, seosaineita ja lisäaineita. Säätämällä kaikkia osa-aineita voidaan vaikuttaa sekä betonimassan että kovettuneen betonin ominaisuuksiin.

### 2.7.1 Kiviaines

Kiviaineksen tilavuusosuus betonin osa-aineista on noin 65...80 %, joten sillä on suuri merkitys betonin ominaisuuksiin. Kiviainekseksi soveltuu mikä tahansa riittävän luja ja tiivis rakeinen materiaali. Materiaali ei saa vaikuttaa sementin reaktioihin eikä huonontaa betonin säilyvyyttä. Betonin kiviaineksena käytetään luonnonkiviaineksia, jotka ovat tavanomaisia kiviaineksia, raskaita, malmipitoisia tai kevyitä vulkaanisia kiviaineksia. Kiviaineksena voidaan käyttää myös keinotekoisia kiviaineksia kuten kevytsoraa, masuunikuonaa, lentotuhkaa, tiili- tai betonimurskaa. (2.)

Kiviaines ei saa sisältää haitallisia määriä aineita, jotka heikentävät tuoreen tai kovettuneen betonin tai raudoituksen ominaisuuksia. Kiviainekset eivät saa olla myöskään rapautuneita. (2.)

### 2.7.2 Seosaineet: lentotuhka, masuunikuonajauhe ja silika

Betonin side- ja runkoaineena voidaan käyttää mineraalisia seosaineita. Mineraalisia seosaineita ovat lentotuhka, masuunikuonajauhe, granuloitu tai ilmajähdytetty masuunikuona, ilmajähdytetty ferrokromikuonajauhe ja silika. (2.)

#### Lentotuhka

Lentotuhka on hienoksi jauhetun kivihiilen poltossa voimalaitoksen savukaasuista erotettava pozzolaani. Lentotuhkan kiintotiheys on 2 100...2 500 kg/m<sup>3</sup>. Tuhkan käytöllä voidaan parantaa betonimassan työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä, jos hiilipitoisuus on pieni. Ongelmana lentotuhkan käytössä on tasalaatuisuuden saavuttaminen, sillä sen hiilipitoisuusmäärät vaihtelevat paljon. Lentotuhkan sisältämä hiili vaikeuttaa betonin huokostamista. (2.)

## Masuunikuonajauhe

Masuunikuonajauhe on hienoksi jauhettua granuloitua masuunikuonaa. Sen kiintotiheys on 2 900...3 100 kg/m<sup>3</sup>. Sen raekoko on suunnilleen sementin luokkaa tai hieman karkeampi. Sementtiin verrattuna masuunikuonajauheen aktiivisuus on 0,80. Kuona on väriltään hieman vaaleampaa kuin sementti, joten sen käyttö betonissa vaalentaa sen sävyä. (2.)

Masuunikuonajauheella on piilevät hydrauliset ominaisuudet. Sen vedentarve on pieni ja se notkistaa betonia. Tämä vähentää huomattavasti betonin hydratoitumislämpöä. Siksi sitä käytetään massiivisissa betonivaluissa. Masuunikuonajauheen käyttö parantaa sulfaatin kestävyyttä sekä kasvattaa myöhäislujuutta, mutta alentaa varhaislujuutta. Kuonan käyttö lisää betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta. (2.)

## Silika

Silika on piiraudan ja piin valmistuksessa syntyvä, savukaasuista erotettava, erittäin hienojakoinen pozzolaani. Sen raekoko on < 1 µm ja kiintotiheys noin 2 200 kg/m<sup>3</sup>. Silika lisää betonin vedentarvetta. Tästä syystä sen kanssa käytetään vedentarvetta vähentäviä lisäaineita. (2.)

Silika lisää betonin lujuutta ja parantaa betonin kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä, tiiviyyttä sekä vedenpitävyyttä. Ominaista silikalle on betonimassan kittimäisyys ja vaikea työstettävyys. Silika myös tummentaa betonin värisävyä. (2.)

### 2.7.3 Vesi

Betonin valmistukseen kelpaa yleensä vesijohtoverkosta otettu vesi sekä juomakelpoinen vesi. Humuspitoiset suovedet ja saastuneet vedet eivät kelpaa betonin valmistukseen. Humuksen lisäksi betoni ei kestä sokeria, sillä pienikin määrä sokeria vedessä tai tuoreessa betonissa voi estää betonin kovettumisen. Käytettävä vesi ei saa sisältää klorideja (Cl) enempää kuin 0,03 painoprosenttia. Myös öljyt ja rasvat voivat vaikeuttaa sementin hydratoitumista. (2.)

#### 2.7.4 Lisäaineet: notkistimet, huokostimet, hidastimet ja muut lisäaineet

Betonin ominaisuuksia voidaan säädellä suhteituksella eli osa-aineiden valinnalla ja seossuhteilla. Betonimassan ominaisuuksia, betonin sitoutumista, kovettumista sekä kovettuneen betonin ominaisuuksia voidaan säädellä käyttämällä lisäaineita. Lisäaineiden vaikutustapa on joko kemiallinen tai fysikaalinen. Niiden määrät betonissa ovat hyvin pieniä verrattuna betonin muihin osa-aineisiin. (2.)

##### Notkistimet

Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka toimivat sementin ja veden välillä. Notkistavien lisäaineiden käyttö parantaa betonin työstettävyyttä, kuten pumppattavuutta ja koossapysyvyyttä sekä mahdollistaa pienempien vesi-sementtimäärien käytön. Notkistimet mahdollistavat myös korkealujuusbetonien valmistuksen. (2.)

Notkistimet jaetaan ryhmiin niiden tehokkuuden perusteella ja niillä saadaan aikaan noin 5...15 % vedenvähennys sekä tehonotkistimilla noin 12...30 % vedenvähennys betonin muokattavuuden huonontumatta. Yleensä notkistavien lisäaineiden osuus betonissa on 1...1,5 % sideaineen kokonaismäärästä. (2.)

##### Huokostimet

Beonin normaali ilmamäärä on 1...2 % eli 10...20 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Huokoistamalla betonia saadaan parannettua sen pakkasenkestävyyttä. Tämä tarkoittaa, että betonin ilmapitoisuus nostetaan 4...8 %:iin huokoistavan lisäaineen avulla. Huokoistimet muodostavat betoniin tasaisesti leviäviä pieniä ilmakuplia. Suojahuokosten tarkoituksena on ottaa vastaan veden jäätymisestä aiheutuva paine niin, ettei betoni rikkoudu. Huokosten ansiosta betonimassan muokattavuus paranee, sen notkeus ja koossapysyvyys lisääntyy sekä osa-aineiden erottuminen vähenee. Haittana huokoistamisella on kovettuneen betonin lujuuden aleneminen. (2.)

## Hidastimet

Hidastimella siirretään sitoutumista myöhemmäksi esimerkiksi pitkien kuljetusmatkojen yhteydessä tai kohteissa, joissa halutaan välttää työsaumoja. Hidastimien käytöstä on erityisesti hyötyä lämpimillä säillä, muokkausajan pidentäjänä. Sideaineen kokonaismäärästä hidastimia käytetään 1...3 %. (2.)

## Muut lisäaineet

Kiihdyttimiä käytetään nopeuttamaan betonin sitoutumista tai kovettumista, jotta muottikierto nopeutuu tai jotta jäätymislujuus saavutetaan riittävän nopeasti. Lisäksi markkinoilla on erilaisia tiivistys-, injektointi ja tartunta-aineita, mutta niiden käyttö on melko vähäistä. (2.)

### 3. BETONIN KARBONATISOITUMINEN

Betoni on materiaalina emäksistä, ja sen huokosveden pH-arvo on 13...14. Betonin karbonatisoitumiseksi sanotaan sen neutraloitumisreaktioita, jotka laskevat betonin huokosveden pH-arvoa. Reaktiot aiheutuvat ilman sisältämän hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) tunkeutumisesta betoniin. Koska reaktiossa kalsiumhydroksidi ja hiilidioksidi reagoivat keskenään, kalkkikivestä vapautunut hiilidioksidi sitoutuu takaisin kalsiumkarbonaatiksi. (7.) Tämä voidaan esittää karbonatisoitumisen reaktioyhtälöllä kaavassa 1 (8).



#### 3.1 Karbonatisoitumisnopeus

Betonin karbonatisoituminen alkaa sen pinnalta ja etenee suhteellisen tasaisena rintamana. Betonin tiiveys hidastaa reaktiota. Kemialliset reaktiot tapahtuvat vyöhykkeessä, johon kulkeutuu hydroksideja rakenteen sisältä ja hiilidioksidia ulkopuolelta. Karbonatisoituneella vyöhykkeellä betonin pH-arvo laskee likimain arvoon 8,5. (7.)

Karbonatisoitumisen etenemisnopeus riippuu pääasiassa kolmesta tekijästä:

1. betonin diffuusiovastuksesta hiilidioksidin tunkeutumista vastaan
2. ympäröivän ilman hiilidioksidipitoisuudesta
3. karbonisoituvan aineen määrästä. (7.)

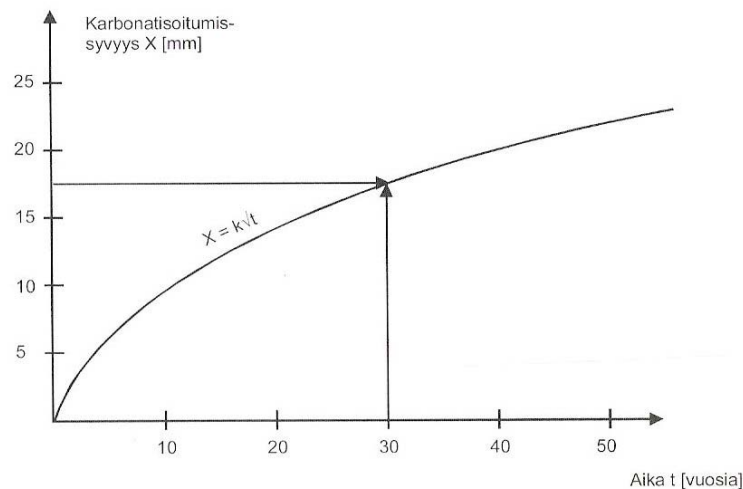
Etenemisnopeus on hidastuva ja siihen vaikuttaa ilman hiilidioksidin tunkeutuminen betoniin. Kaavalla 2 saadaan määritettyä karbonatisoitumissyvyys ja sen eteneminen ajan funktiona esitetään kuvassa 4. (2.)

$$X = k\sqrt{T}$$

missä  $k$  = karbonatisoitumiskerroin ( $\text{mm}/\sqrt{a}$ )

$T$  = aika (a)

$X$  = karbonatisoitumissyvyys (mm) (2)



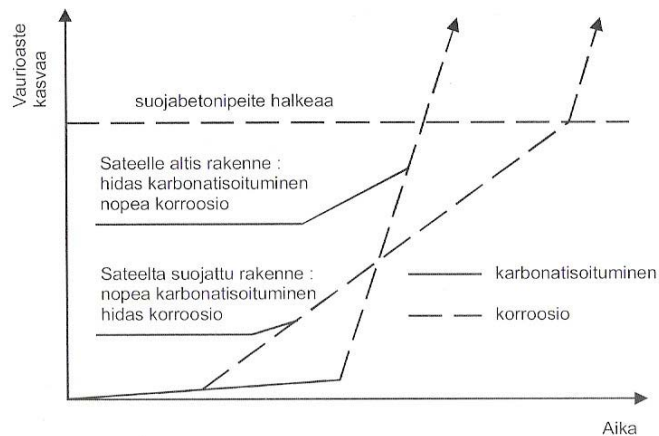
Kuva 4. Karbonatisoitumisrintaman eteneminen ajan funktiona neliöjuurimallin mukaan (7.)

Karbonatisoitumista hidastaa karbonisoituvan aineen, lähinnä kalsiumhydroksidin, määrän kasvu betonissa. Kalsiumhydroksidin ja kalsiumsilikaattihydraatin osuuteen betonissa vaikuttaa sideaineen määrä ja laatu sekä betonin hydratoitumisaste. Sementtimäärän ja hydratoitumisasteen kasvu alentaa karbonatisoitumisnopeutta. (7.)

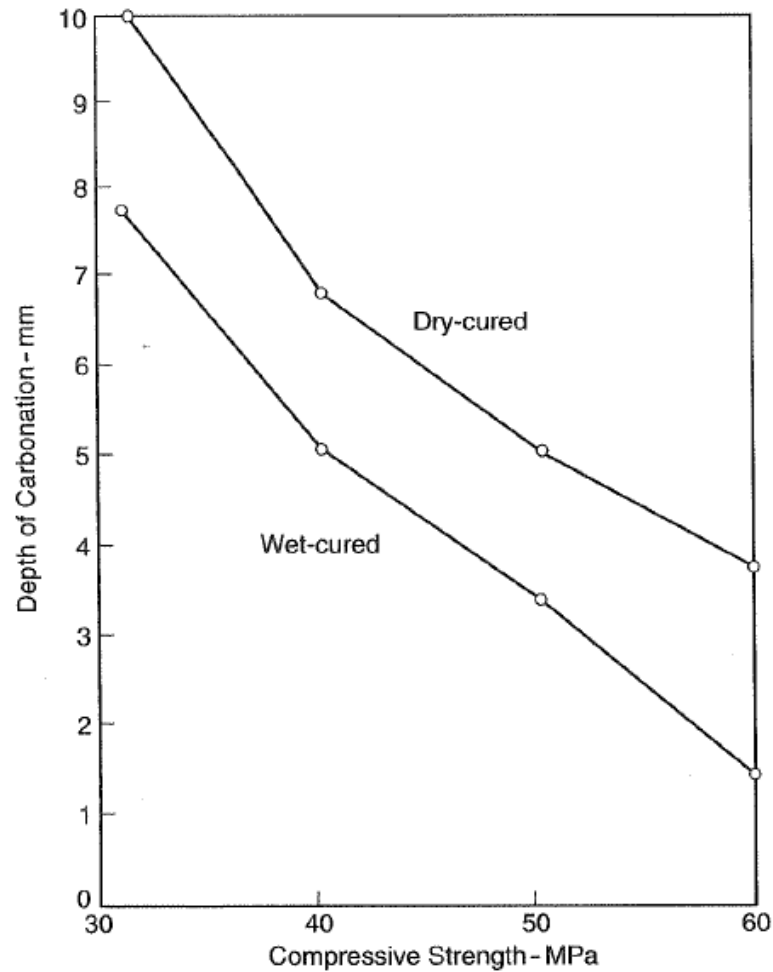
Rakenteellisista tekijöistä karbonatisoitumisnopeuteen vaikuttavat lähinnä rakenteen pinnoitteet ja pintatarvikkeet, sillä ne voivat estää hiilidioksidin diffuusiota betoniin. (7.)

### 3.2 Karbonatisoitumisen edellytykset

Hiilidioksidi voi tunkeutua vain betonin ilmatäytteisiin huokosiin. Karbonatisoituminen on voimakkaampaa, jos rakenne on sateelta suojassa eikä sateelle alttiina. Sateen vaikutus karbonatisoitumiseen ja siitä edelleen korroosioon selviää kuvasta 5. Karbonatisoituminen edellyttää kuitenkin vähäistä kosteutta, mutta voimakkainta sen eteneminen on ilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 50...60 %. (2.) Hyvin kuivissa olosuhteissa, alle 30 % RH, karbonatisoituminen pysähtyy, koska reaktio voi tapahtua ainoastaan vesiliuoksessa. (7.) Myös lujuus vaikuttaa karbonatisoitumiseen hidastavana tekijänä, kuten kuvasta 6 käy ilmi. Kaaviossa on verrattu märän ja kuivan betonin karbonatisoitumista eri lujuisilla betoneilla. (9.)



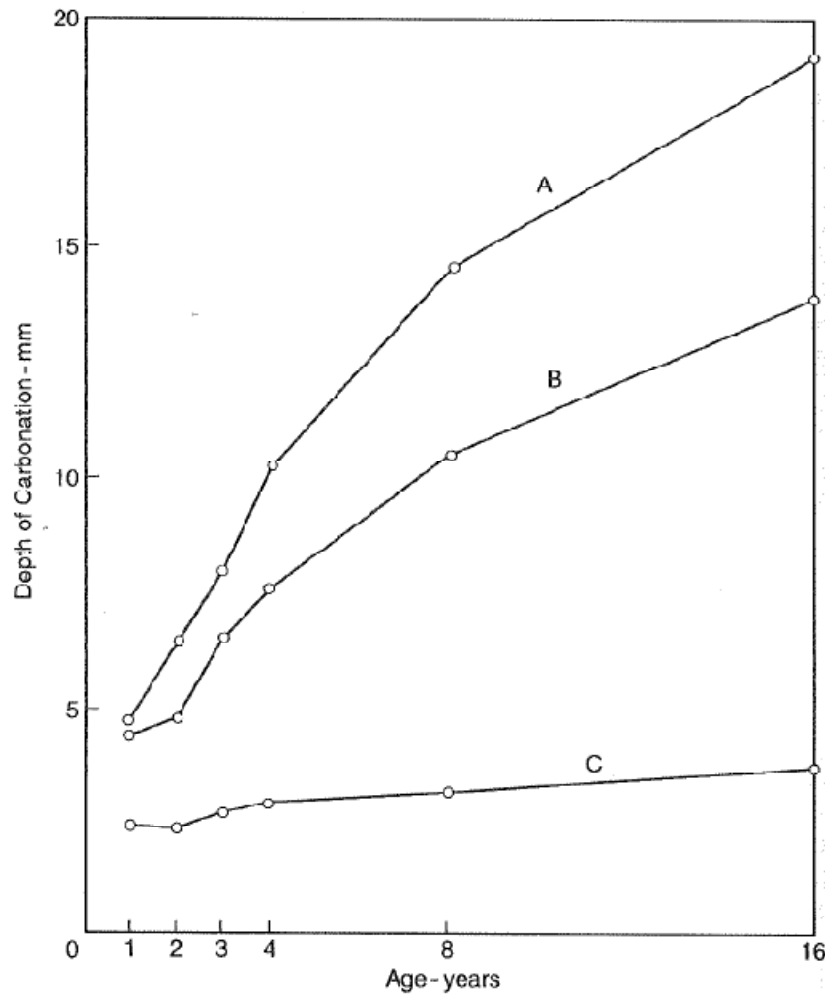
Kuva 5. Korroosion vaiheet kuivissa ja kosteissa olosuhteissa, muuttujana vain saderasitus (7.)



Kuva 6. Lujuuden vaikutus karbonatisoitumisen syvyyteen määrällä ja kuivalla betonilla (9.)

Kuvassa 7 kuvataan karbonatisoitumissyvyyttä eri olosuhteissa. Betonien vesi-sementtisuhteet ovat 0,45, 0,60 ja 0,80, joiden keskiarvoja kuvaajat esittävät. Betoni on säilytetty ensimmäiset seitsemän päivää vedessä. Kaaviossa kirjaimilla tarkoitetaan:

- A: olosuhde, jossa lämpötila on 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus on 65 %.
- B: olosuhde, jossa kappale on ulkona sateelta suojassa.
- C: olosuhde, jossa kappale on tasaisella pinnalla ulkona Saksassa. (9.)



Kuva 7. Ajan suhde karbonatisoitumissyvyyteen (9.)

Lisäksi betonin karbonatisoitumisnopeus riippuu sen ilmanläpäisevyydestä. Ilman hiilidioksidi pääsee tunkeutumaan betoniin sitä hitaammin, mitä tiiviimpää betoni on, joten karbonatisoitumisnopeus riippuu betonin tiiveyden lisäksi sideaineen kalkkipitoisuudesta. Betonin sementtimäärän kasvaessa kalsiumyhdisteiden määrä lisääntyy ja sen hiilidioksidinsitomiskyky kasvaa. (2.)

Masuunikuonan käytön etuna sementissä on sen huomattavasti pienempi kalkkipitoisuus verrattuna portlandsementtiin. Kuonajauhe ei myöskään kovettuessaan muodosta vapaata kalsiumhydroksidia. Lentotuhka ja silika ovat pozzolaanisia sideaineita. Ne reagoivat sementin kovettumisreaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa. Tästä syystä seosaineiden osuutta betonin sideaineesta on rajoitettu, jotta karbonatisoituminen ei seosaineita käytettäessä nopeutuisi liiaksi. (2.)

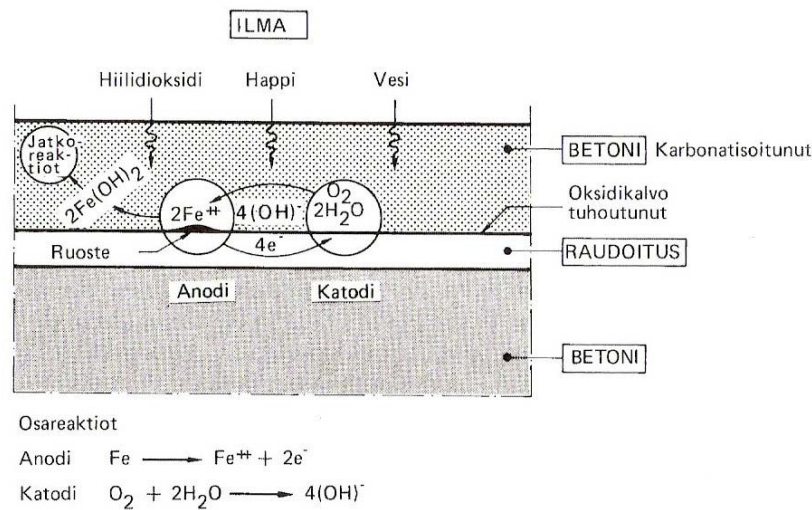


### 3.3 Halkeamien vaikutus karbonatisoitumiseen

Betoni karbonisoituu kiilamaisesti halkeamien kohdalla muuta betonia syvemmälle. Halkeamien koko vaikuttaa oleellisesti kylkien karbonisoitumisnopeuteen. Karbonisoitumista eivät kuitenkaan oleellisesti lisää pienet, leveydeltään alle 0,3 mm olevat halkeamat, niiden täyttyvyyden sekä hapen hitaan kulkemisen vuoksi. Halkeamien leveyttä enemmän karbonisoitumisnopeuteen vaikuttaa betonipeitteen paksuus. (2.)

### 3.4 Karbonisoitumisen seuraukset

Betonin karbonisoiduttua raudoitukseen asti terästen korroosio voi alkaa. Korroosiossa rauta ruostuu. Tämä esitetään kuvassa 8. Teräskorroosioon vaikuttaa voimakkaasti betonin tiiveys ja suojakerroksen paksuus. Sementin koostumusta enemmän betonin kemialliseen kestävyYTEEN vaikuttaa betonin tiiveys. (2.)

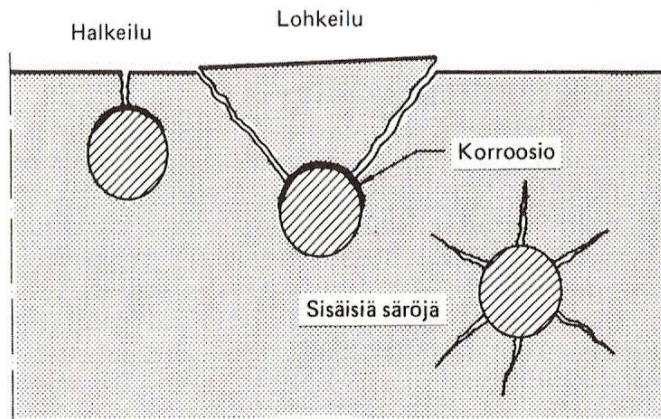


Kuva 8. Raudoituksen korroosio karbonisoituneessa betonissa (2.)

### 3.5 Korroosion seuraukset

Korroosion seurauksena syntyvät korroosiotuotteet vaativat noin nelinkertaisen tilavuuden verrattuna raudoituksen alkuperäiseen tilavuuteen. Tämä aiheuttaa betoniin halkaisevan voiman. Korroosion edetessä betoniin syntyy halkeamia ja sisäisiä säröjä.

Tästä johtuen raudituksen betonipeite voi lohjeta kokonaan pois, kuten kuvassa 9 esitetään. Betonin pinta voi myös värjäytyä korroosiotuotteiden vaikutuksesta. (2.)



Kuva 9. Raudituksen korroosiossa syntyvien paisuvien korroosiotuotteiden vaikutus (2.)

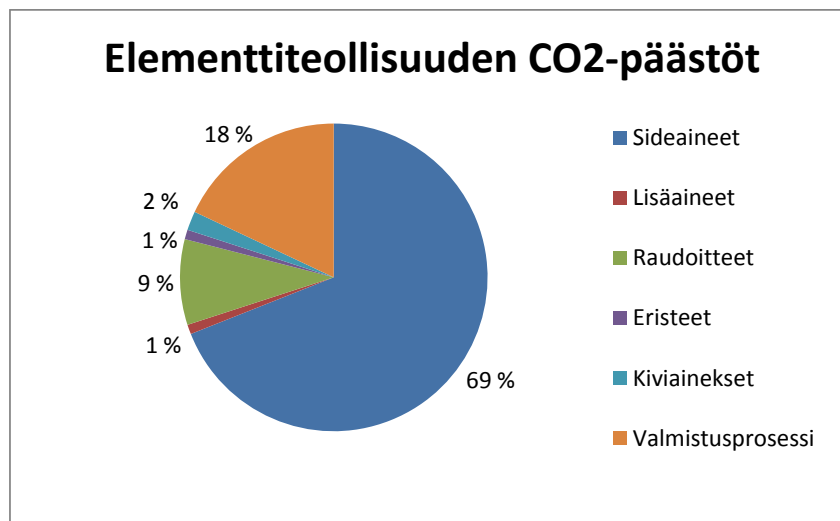
Korroosion seurauksena raudituksen pinnasta liukenee materiaalia. Tämä johtaa raudotteiden poikkileikkausalan pienenemiseen ja heikentää rakenteen kantavuutta. (2.)

## 4. TUTKIMUS

Ympäristökuormitukset tuottavat paineita betonin valmistukselle, etenkin hiilidioksiidi- eli CO<sub>2</sub>-päästöt. Kasviuonekaasut aiheuttavat ilmaston lämpenemistä, mutta vaikutukset ovat kuitenkin hitaita. Lisäksi CO<sub>2</sub>-päästöjä syntyy fossiilisen energian käytöstä. Fossiilisia energialähteitä ovat esimerkiksi hiili, kaasu, bensiini ja diesel. Näitä energialähteitä kuluu runsaasti sementin valmistukseen. (10.)

### 4.1 Tutkimuksen lähtökohdat

Betonirakenteiden CO<sub>2</sub>-päästöjä syntyy eniten betonin valmistusvaiheessa. Elementtiteollisuuden suurimmat päästöt aiheuttavat sideaineet ja valmistusprosessi. Muiden kuten raudotteiden, lisäaineiden, kiviainesten ja eristysten osuus elementtiteollisuuden CO<sub>2</sub>-päästöistä on varsin pieni. CO<sub>2</sub>-päästöt esitetään kuvassa 10. (10.)



Kuva 10. Betonirakenteiden CO<sub>2</sub>-päästöt (10.)

Betoniteollisuudessa on otettava huomioon sementin merkittävät CO<sub>2</sub>-päästöt, sillä niiden osuus koko betonirakenteiden päästöistä on noin 70 %. Muita merkittäviä päästöjä aiheuttaa raudotteiden ja valmistusprosessin ohella kuljetus. (10.)

Betoniteollisuudessa CO<sub>2</sub>-säästämahdollisuudet kohdistuvat betonirakenteiden optimointiin, betonin koostumuksen optimointiin, seos- ja lisäaineiden hyödyntämiseen

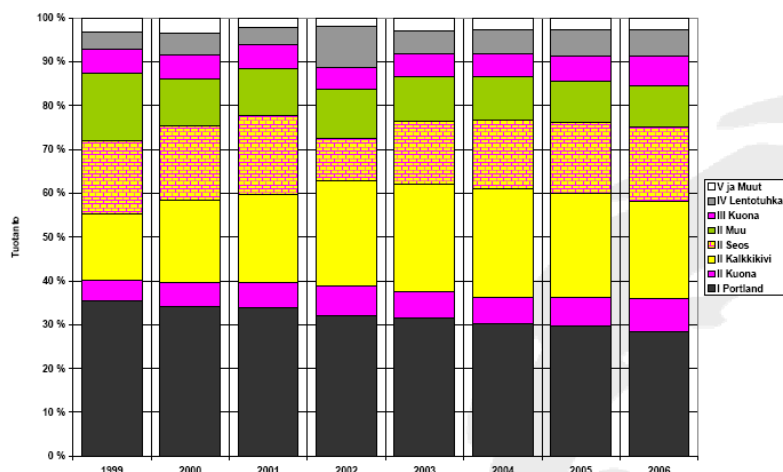
sekä hukkabetonin määrän vähentämiseen. Betonirakenteiden optimoinnilla tarkoitetaan järkeviä betonirakenteita, betonin lujuuden oikeaa hyödyntämistä, pitkäaikaisia betonirakenteita ja jännebetonirakenteita. Betonin koostumuksen optimoinnissa etenkin reseptioptimointia tarvitaan jatkuvasti. Myös koostumuksen vaihtelun ja hajonnan pienentäminen on tärkeää. (10.)

Rakennuksen elinkaaren aikana syntyviä CO<sub>2</sub>-päästöjä voidaan pienentää myös matalaenergia- ja passiivitalojen kautta. Massiiviset rakenteet säästävät käyttövaiheen energian kulutusta noin 5 %. Näin ollen betonin valmistuksesta aiheutuvat päästöt käytännössä kompensoituvat. Rakennuksen käyttövaiheen aiheuttamat CO<sub>2</sub>-päästöt ovat kuitenkin betonirakenteiden päästöjä suuremmat. (10.)

Maailman CO<sub>2</sub>-päästöistä noin 5 % syntyy sementin tuotannosta. Suomessa tämä määrä on noin 1,5 %. Keinoja päästöjen vähentämiseksi sementin valmistuksessa on seosaineiden käytön lisääminen. Tämä tarkoittaa, että sementtivalikoima muuttuu seosaineiden käytön kasvaessa. Energiatehokkuutta on myös pyrittävä parantamaan. (11.)

Sementin tuotekehityksen lähtökohtana on kasvattaa seostuksen osuutta ja pienentää klinkkerin osuutta. Tuotekehityksen ansiosta käytettävien seosten osuudet ovat muuttuneet vuosittain, kuten kuvasta 11 käy ilmi. Sementit seostetaan kuonalla ja kalkkikivellä. Kalkkikivi reagoi sementin kanssa tuottaen kalsiumkarboalumiinaattia (C<sub>4</sub>ACH<sub>11</sub>). Lisäksi hienoksi jauhautunut kalkkikivi kiihdyttää sementin reaktioita sekä tiivistää sementtikiveä. (12.)

## Sementtityypit / Cembureau



Kuva 11. Sementtityyppien kehitys (12.)

Finnsementin CEM II/B-M tyyppinen sementti sisältää seosaineita 21–35 %. Yleissementti on luokassa CEM II/A-M, jossa seosaineita on 6–20 %. Suuresta seosainemäärästä huolimatta tuotteen ominaisuudet ovat vähintään yhtä hyvät kuin yleissementillä. Käytännön tehdaskokeissa on todettu, että sitoutuminen betonilla voi olla jopa nopeampaa kuin yleissementillä. Erona yleissementtiin uudella seossementillä on erilainen betonin työstettävyys. Etenkin laivoissa betoniresepteissä betonin koossapysyvyys on hyvä, mistä on hyötyä betonipintojen viimeistelyssä, pumppauksessa sekä hyvin notkeissa betonilaaduissa. (13.)

Säänkestäviä massoja on tehty perussementillä, joissa notkistimena on ollut VB-Parmix ja huokostimena Ilma-Parmix tai Parmix L. Sementin kalkkiseostuksen vaikutusta betonin säilyvyyteen on tutkittu. Säilyvyys selvityksen lähtökohdaksi on ollut varmistaa tuotteen käyttökelpoisuus betonissa erilaisissa rasitusluokissa. (13.)

### 4.2 Tutkimussuunnitelma

Betonin karbonatisoitumistutkimus on tehty Finnsementin tilauksesta Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa. Tutkimuksessa betonikoekappaleita on sijoitettu kolmeen erilaiseen olosuhteeseen, jotta nähdään lämpötilan, kosteuden ja hiidioksidin vaikutus.

Koekappaleet on valettu Contesta Oy:llä ja toimitettu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorioon, jossa tutkimus on aloitettu kunkin koekappaleen ollessa 28 vuorokauden ikäinen. Ensimmäisten koekappaleiden tutkimus on alkanut 10.6.2008 ja viimeisten loppunut 9.7.2009.

Koekappaleiden tutkiminen on tapahtunut standardin SFS-EN 1395 mukaan. Koekappaleen käsittely on tapahtunut nopeasti, jotta vallitseva ilma ei ennätä vaikuttaa niihin. Kustakin olosuhteesta on otettu yksi koekappale kerrallaan käsittelyyn ja siitä on lohkaistu mahdollisimman pieni ja ehjä pala kuormituskoneen avulla. Tämän jälkeen se on viety takaisin omaan olosuhteeseensa ja lohkottu pala tutkittu. Tarvittavien mittausten jälkeen lohkottu pala on säilytetty tiiviisti pussiin, jotta sitä voidaan tarkastella myöhemmin, mikäli on tarvetta. Lohkotut palat säilytetään tutkimuksen jälkeen vähintään yhden kuukauden ajan.

#### 4.3 Aikataulu

Tutkimus on aloitettu koekappaleiden ollessa 28 vuorokauden iässä. Koekappaleille on laadittu aikataulu, josta käy ilmi kyseisen kappaleen tutkimisajankohta. Tutkimuksen kesto olosuhteiden mukaan on 1–2 vuotta, mutta tässä työssä on tarkasteltu betonin karbonatisoitumista ensimmäisen vuoden aikana. Koekappaleille on suoritettu mitaukset olosuhteittain 1, 2, 3, 6 ja 12 kuukauden välein. Tutkimusaikataulu selviää liitteestä 1.

Pikakokeessa mittauksia on suoritettu 1, 2, 3, 6 ja 12 kuukauden välein ja vakio- ja ulko-olosuhteissa 3, 6 ja 12 kuukauden välein. Testausvälit ovat erilaisia, sillä on oletettu, että pikakokeessa tapahtuva karbonatisoituminen on nopeampaa kuin muissa olosuhteissa.

#### 4.4 Koekappaleet

Finnsementin betonipalkit on valettu Contesta Oy:n Paraisten betonilaboratoriossa. Koesarjassa on valmistettu kahdeksan eri betonimassaa neljällä eri sementtinäytteellä. Sementtinäytteiden kalkkiseostus on 6...35 %. Kustakin sementtinäytteestä on valmis-

tettu kaksi massaa eri vesi-sementtisuhteilla, jotka vastaavat betoninormin hiilidioksidiraitteittujen luokkien vaatimuksia. (14.)

Näytteisiin 2–4 on sekoitettu sopiva määrä Nordkalkin 7/60-kalkkifillieriä, jonka kalsiumkarbonaattipitoisuus on 92 %. Näyte 1 sisältää 6 % sementin valmistuksessa lisättyä kalkkikiveä. Muut näytteet, 5–8, sisältävät sopivan määrän 7/60-kalkkifillieriä näytteen nimeä vastaavan kalkkikiviseostuksen saavuttamiseksi. Sementtinäytteiden ominaisuudet ilmenevät taulukosta 2 ja betonikokeiden tulokset taulukosta 3. (14.)

Taulukko 2. Sementtinäytteiden ominaisuudet (14.)

<b>Näytteen nimi</b>	<b>Rapid PA</b>	<b>Rapid 15</b>	<b>Rapid 25</b>	<b>Rapid 35</b>
<b>Kalkkikivipitoisuus [%]</b>	6	15	25	35
<b>Puristuslujuus [Mpa] 1 d</b>	18,5	15,6	12,8	9,7
<b>Puristuslujuus [Mpa] 2 d</b>	31,3	26,8	22,7	18,0
<b>Puristuslujuus [Mpa] 7 d</b>	41,1	36,8	34,2	29,8
<b>Puristuslujuus [Mpa] 28 d</b>	45,7	44,7	40,0	34,3
<b>Ominaispinta [m<sup>2</sup>/kg]</b>	432	431	440	434
<b>Ominaispaino [g/cm<sup>2</sup>]</b>		3,07	3,04	3,02
<b>Asemaparametri x'</b>	18,48	18,11	17,76	17,19
<b>Kulmakerroin n</b>	1,19	1,09	1,06	1,04
<b>Sitoutumisen alku [min]</b>	175	180	195	205
<b>Sitoutumisen loppu [min]</b>	265	270	285	285
<b>Vedentarve [%]</b>	29,8	30	30	30
<b>CO<sub>2</sub> [%]</b>	2,42	6,41	10,5	14,41
<b>SO<sub>3</sub> [%]</b>	3,42	3,15	2,8	2,33
<b>Lämmöntuotto</b>	370	351	333	288

Taulukko 3. Betonikokeiden tulokset (15.)

	MN 158/1	MN 158/2	MN 158/3	MN 158/4	MN 158/5	MN 158/6	MN 158/7	MN 158/8
<b>Rapid [kg/m<sup>3</sup>]</b>	280				350			
<b>Rapid 15 [kg/m<sup>3</sup>]</b>		280				350		
<b>Rapid 25 [kg/m<sup>3</sup>]</b>			280				350	
<b>Rapid 35 [kg/m<sup>3</sup>]</b>				280				350
<b>Vesimäärä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	207	207	207	207	187	187	187	187
<b>VB-Parmix %</b>					0,41	0,4	0,2	0,31
<b>Ilmamäärä [%]</b>	1,5	1,2	1,3	0,8	1,8	2,7	2,4	2,0
<b>Painuma [cm]</b>	20	20	19	19	14	16	13	17
<b>Lujuus [Mpa] 1d</b>	8,0	6,5	5,1	3,7	18,9	15,5	12,7	9,5
<b>Lujuus [Mpa] 7d</b>	29,4	24,5	19,4	15,1	47,8	41,3	34,5	27,6
<b>Lujuus [Mpa] 28d</b>	33,6	29,4	24,8	18,8	54,8	49,5	41,9	31,2
<b>Tiheys</b>	2 369	2 382	2 378	2 360	2 413	2 398	2 408	2 386

Koekappaleet on toimitettu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorioon muutamassa erässä lavalle tiiviisti pakattuina kuvan 12 mukaisesti. Betonipalkit ovat kooltaan 100 x 100 x 500 mm. Niitä on yhteensä 48 kappaletta. Tutkimuksessa on mukana kahdeksan eri betonireseptiä, joista kustakin on kaksi koekappaletta kolmessa erilaisessa olosuhteessa.

Koekappaleet on merkitty reseptien sekä olosuhteiden mukaan vedenkestävillä tusseilla, kuten kuvasta 13 käy ilmi. Tarvittaessa tunnuksia on vahvistettu.





Kuva 12. Koekappaleet purkamattomina



Kuva 13. Koekappaleet saapuneet ja purettu 7.7.2008

#### 4.5 Olosuhteet

Koekappaleet on sijoitettu kolmeen olosuhteeseen taulukon 4 mukaisesti:

Taulukko 4. Tutkimuksen olosuhteet

Nimi	Paikka	Kosteus	Lämpötila	CO <sub>2</sub> -pitoisuus
<b>Pikakoe</b>	olosuhdekaappi	RH 60 % ± 5 %	20 ± 0,5 °C	1,0 ± 0,05 %
<b>Ulko-olosuhde</b>	sateelta suojattu ulkovarasto	-	-	-
<b>Vakio-olosuhde</b>	säähuone	RH 70 % ± 5 %	20 ± 0,5 °C	-

##### 4.5.1 Ulko-olosuhde

Ulko-olosuhteessa olevat koekappaleet on sijoitettu ulkovarastoon. Ulkovarasto on rakenteeltaan teräsrunkoinen ja siinä on lautaverhous. Lattia on betonia. Koekappaleet on sijoitettu rimojen päälle, muutaman metrin korkeuteen maanpinnasta kuvan 14 mukaisesti. Näin ollen koekappaleet ovat kosketuksissa vallitsevaan olosuhteeseen joka sivultaan. Tässä olosuhteessa koekappaleet ovat alttiina sään vaihteluille.



Kuva 14. Ulko-olosuhteessa olevat koekappaleet

##### 4.5.2 Vakio-olosuhde

Vakio-olosuhdekaappi on Amitra Oy:n Hermelet. Siinä on mahdollista säätää kaapin lämpötilaa sekä kosteutta. Muita ominaisuuksia olosuhdekaapilla ei ole. Kaappi on kasattu paikan päällä. Ennen tutkimuksen aloitusta vakio-olosuhdekaappi on kalibroitu 13.6.2008.

Vakio-olosuhdekaapissa ilman kosteus on RH 70 %  $\pm$ 5 % ja lämpötila 20 °C  $\pm$ 0,5 °C. Koekappaleet ovat olosuhdekaapin lattialla, puurimojen päällä kuvan 15 mukaisesti. Näin ollen ne ovat kosketuksissa vallitsevaan olosuhteeseen joka sivultaan.



Kuva 15. Koekappaleet vakio-olosuhdekaapissa

#### 4.5.3 Sääkaappi, pika-olosuhde

Sääkaappi, Especin tyyppi PR-4KP on valmistettu vuonna 2004. Kaapin ominaisuuksia, joita tässä tutkimuksessa on käytetty, ovat lämpötilan ja kosteuden sekä hiilidioksidipitoisuuden säätely.

Tutkimuksessa käytetty kosteus on RH 60 %  $\pm$ 5 %, lämpötila 20 °C  $\pm$ 0,5 °C ja hiilidioksidipitoisuus 1,0 %  $\pm$ 0,05 %. Koekappaleet on sijoitettu sääkaappiin kuvan 16 mukaisesti.



Kuva 16. Koekappaleet sääkaapissa 27.1.2009, pikakoe

Ennen tutkimuksen aloitusta kaappi on kalibroitu 13.6.2008. Kalibroinnin tuloksena sääkaapin lämpötilan tarkkuudeksi on saatu  $\pm 0,3$  °C ja tasaisuudeksi  $\pm 1,0$  °C, suhteellisen kosteuden tarkkuudeksi  $\pm 2,5$  % ja tasaisuudeksi  $\pm 5,0$  % RH. CO<sub>2</sub>-mittauksen mukaan valmistaja on luvannut tarkkuudeksi 0,5 tilavuusprosenttia, mutta näyttämä on selvästi tarkempi, kuin sille on luvattu.

#### 4.6 Käytetyt välineet

Tutkimuksessa on käytetty työvälineenä muun muassa 50 kN Kuormituskehää, työntömittaa, fenoliftaleiiniliuosta sekä muistiinpanovälineitä.

##### 4.6.1 Kuormituskehä

Kuormituskehän avulla voidaan tutkia rakenteiden ja yksittäisten rakenneosien toimintaa ja kuormankantokykyä. Rakenteelle tulevaa kuormitusta voidaan säätää halutulla nopeudella manuaalisesti. Kuormituksen ollessa riittävän suuri rakenne murtuu. Tässä tutkimuksessa on käytetty 50 kN Kuormituskehää, joka on kalibroitu 7.12.2006.

Tässä tutkimuksessa betonipalkeista on lohkottu mahdollisimman pieniä, mutta ehjiä koekappaleita tutkittavaksi. Jotta lohkotusta palasta tulisi oikeankokoinen, on apuna

käytetty teräskapuloita tukina koekappaleen ylä- ja alapuolella. Koekappaleet on asetettu 50 kN Kuormituskehään, kuten kuvassa 17.



Kuva 17. Betonipalkin lohkaus 50 kN Kuormituskehällä

#### 4.6.2 Fenoliftaleiiniliuos

Fenoliftaleiiniliuos toimii indikaattorina värjäämällä karbonatisoitumattoman betonin pinkiksi. Fenoliftaleiiniliuos on tehty standardin SFS-EN 13295 mukaisesti.

Fenoliftaleiiniliuoksen koostumus:

1. 1 g fenoliftaleiini
  2. 30 ml tislattu vesi
  3. 70 ml etanoli
- (16)

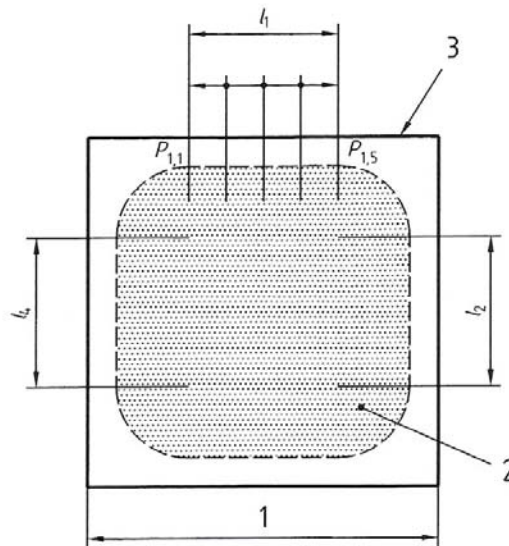
#### 4.7 Karbonatisoitumisen tutkiminen ja tulosten kirjaaminen

Betonin karbonatisoitumissyvyyttä mittaamalla on pyritty selvittämään betonin neutraloitumissyvyys. Karbonatisoitumissyvyys on mitatettu pH-indikaattorin avulla, jolla voidaan erottaa karbonatisoitunut (pH noin 8) ja karbonatisoitumaton (pH13...14) betoni. PH-indikaattorina mittauksissa on käytetty fenoliftaleiiniliuosta.

Karbonatsoituminen on mitattu mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen betonin tuoreelta lohkopinnalta.

Fenoliftaleiini on värjännyt karbonatsoitumattoman betonin pinkiksi, mutta karbonatsoituneessa betonissa värimuutosta ei ole tapahtunut. Työntömitalla on mitattu karbonatsoitumissyvyys koekappaleesta. Karbonatsoitumissyvyys voi vaihdella huomattavasti näytteen eri kohdissa, mutta tarkoituksena on ollut selvittää keskimääräinen karbonatsoitumissyvyys. Betonin ulkoisista halkeamista tai tiivistyspuutteista johtuvat poikkeuksellisen suuret karbonatsoitumissyvytydet on kirjattu ylös, mutta jätetty huomioimatta keskimääräistä syvyyttä arvioitaessa.

Koekappaleesta on otettu riittävän suuri määrä mittauksia, jotta tulos olisi mahdollisimman luotettava. Betonin tuoreen lohkopinnan jokaiselta sivulta on mitattu karbonatsoitumissyvyys viidestä kohtaa kuvan 18 mukaan. Mittauskohdista tulee saada riittävän edustava käsitys tutkittavan rakennetyypin karbonatsoitumissyvyydestä. Kuvissa 19 ja 20 kuvataan toimintatapoja, kun karbonatsoitumisrintama ei ole tasainen.

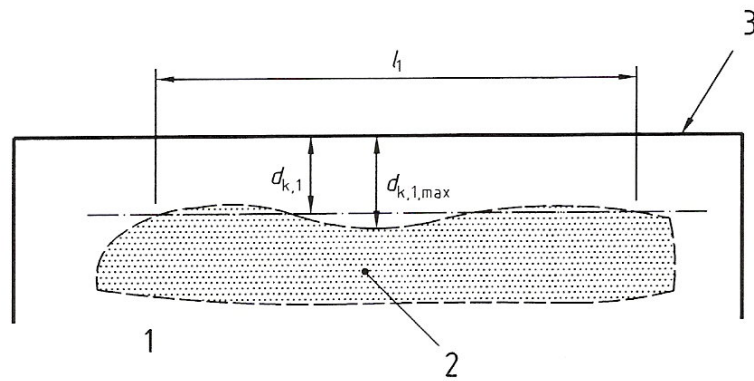


$$d_{k,1} = \frac{\sum (p_{1,1-5})}{5}$$

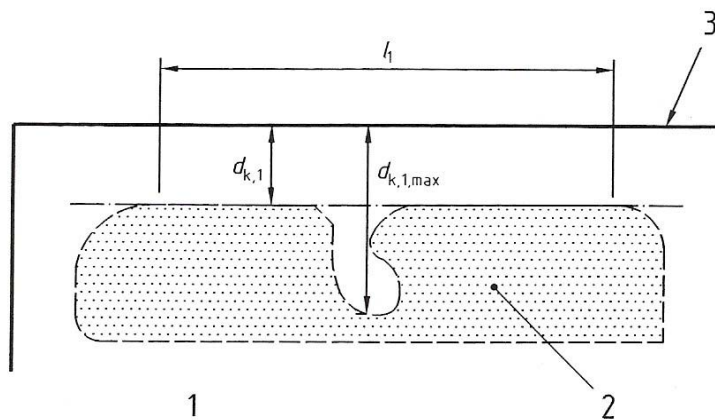
$l \geq 30 \text{ mm}$

Kuva 18. Karbonatsoitumisen mittaus betonin lohkopinnalta (16.)





Kuva 19. Mittaustapa, kun karbonatisoitumisrintama ei ole tasainen (16.)



Kuva 20. Mittaustapa, kun karbonatisoitumisrintamassa on paikallinen syventymä (16.)

Tulosten kirjaamista varten jokaiselle koekappaleelle on laadittu valmiit tulostuspohjat, joista käy ilmi koekappaleen nimi ja tutkimuspäivä. Heti koepalkin lohkomisen jälkeen kappaleeseen on suihkutettu fenoliftaleiiniliuosta, jonka jälkeen jokaisesta koekappaleesta on otettu valokuva tulostuspohjan päällä. Koekappaleista otetut valokuvat ovat liitteessä 2.

Saadut tulokset on kirjattu omille tulostuspohjilleen käsin, minkä jälkeen ne on siirretty Excel-taulukkoon. Excel-taulukko on laadittu jokaiselle koekappaleelle. Taulukosta selviää kaikki mitat kahden desimaalin tarkkuudella, joita karbonatisoitumissyvyyden mittaamisessa on otettu. Näiden taulukoiden pohjalta on laadittu yhteenveto tuloksista.

## 4.8 Aikaisemmat tutkimukset

Betonin säilyvyysominaisuuksia on tutkittu sekä Suomessa että ulkomailla. Osa tutkimuksista on melko vanhoja ja toteutettu osittain erilaisissa olosuhteissa.

### 4.8.1 Tutkimukset Suomessa

Suomessa sementtien karbonatisoitumista tutkittiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa vuonna 2005 Finnsementin tilauksesta. Tutkimuksessa käytetyt olosuhteet vastasivat tämän tutkimuksen olosuhteita, joita olivat ulko-olosuhde, vakio-olosuhde ja pikakoe. Tutkimuksen kesto oli lyhyempi, kuusi kuukautta. Kyseinen aika on kuitenkin melko lyhyt, joten karbonatisoitumisesta ei välttämättä voida tehdä johtopäätöksiä pidemmälle aikavälille. (17.)

Vuonna 2005 karbonatisoitumisen todettiin olevan joko kiihtyvä tai lineaarinen aina kahden kuukauden ikään asti, mutta sen jälkeen se hidastui erittäin voimakkaasti. Vakio- ja ulko-olosuhteissa olleiden betonien karbonatisoituminen noudatti yleistä ajan mukaan hidastuvaa kaavaa. Hiilidioksidin vaikutus näkyi 10...20 % karbonatisoitumisen lisääntymisenä. Myös vesi-sementtisuhteen vaikutus näkyi karbonatisoitumisessa. Suuri vesi-sementtisuhte lisäsi betonin karbonatisoitumista. (17.)

Pikakokeessa karbonatisoitumissyvyys kolmen kuukauden perusteella vaihteli noin 7...24 mm välillä. Karbonatisoitumisnopeus oli aluksi nopeaa ja kahden kuukauden jälkeen hidastui voimakkaasti. (17.)

Vakio-olosuhteessa karbonatisoituminen oli nopeampaa kokeen puoleen väliin asti, minkä jälkeen se hidastui tai jopa loppui kokonaan. Karbonatisoitumissyvyys oli noin 1...7 mm välillä. (17.)

Ulko-olosuhteessa karbonatisoituminen oli suurempaa tutkimuksen puolella välin kuin vakio-olosuhteessa. Karbonatisoitumissyvyys puolestaan oli alhaisempi, noin 1,8...5,8 mm koekappaleen mukaan. (17.)



#### 4.8.2 Tutkimukset ulkomailla

Betonin kestävyysominaisuuksia on tutkittu myös Ranskassa ja Saksassa, kuten Leimenissa, Düsseldorfissa sekä Mergelstettenissä. Tutkimustuloksia tarkasteltaessa yleisellä pohjalla voidaan todeta, että ympäristövaikutukset betonin karbonatisoitumiseen ovat olleet suurempia kuin sementtien koostumuksien.

Vuonna 1984 Ranskassa on tutkittu kalkkikiven vaikutusta sementtiin. Tutkimuksen mukaan karbonatisoituminen kuivassa olosuhteessa on nopeampaa kuin kosteassa. Tutkimuksessa käytetyt ilman suhteelliset kosteudet ovat 50 % RH ja 100 % RH. Tutkimuksesta ei kuitenkaan käy ilmi kalkkikiven vaikutusta karbonatisoitumiseen. (18.)

Mergelstettenissä tehdyssä tutkimuksessa vuonna 1991 on tutkittu betonin jälkihoidon vaikutusta betonin säilyvyyteen. Koekappaleiden jälkihoito on tehty kolmella tavalla:

- A: 6 d veteen upotettuina 20 °C:ssa ja 21 d olosuhteessa 20 °C/65 % RH
- B: 2 d sumuhuoneessa 20 °C/99 RH ja 25 d olosuhteessa 20 °C/65 % RH
- C: 27 d olosuhteessa 20 °C/65 % RH. (19.)

Riippumatta betonireseptistä voidaan todeta, että betonin karbonatisoituminen on selvästi suurempaa ilman jälkihoitoa. Erot ovat selvät myös A:n ja B:n välillä. Käytettäessä kalkkikiveä betonissa se tulee jauhaa hienoksi, jotta seurauksena ei ole lujuuskato. Hienoksi jauhettu kalkkikivi sekoittuu massaan tasaisemmin ja on lujuudeltaan kestävämpää. Betonin suotuisa raekoostumus suosii kuitenkin niukkaa jauhemaisuutta. (19.)

Düsseldorfissa vuonna 1991 toteutetussa tutkimuksessa saadut tulokset ovat samansuuntaisia kuin Mergelstettenissä. Karbonatisoituminen on selvitetty lohkomalla prismoista 3 cm:n levyisiä paloja, joihin on suihkutettu fenoliftaleiinia. Kalkkikiven on todettu aiheuttavan lujuuden menetystä betonikappaleissa. Lujuus korreloi karbonatisoitumisen kanssa. (20.)

Karbonatisoitumisen käyttäytymistä on tutkittu myös Leimenissa vuonna 1992, jossa betonikappaleiden varastoinnissa on todettu olevan suuri merkitys. Koekappaleita on säilytetty 6 päivää veden alla ja sen jälkeen olosuhteessa 20 °C/65 % RH. Karbonati-

soituminen on edennyt funktiomallin mukaisesti. Kolmen vuoden jälkeen karbonatisoituminen lisääntyy enää hyvin vähän. Betonin korkeampi sementtipitoisuus ja alhaisempi vesi-sementtisuhte alentavat oletetusti karbonatisoitumista. Myös tässä tutkimuksessa lujuuden on todettu vähentävän karbonatisoitumista. Lisäksi tulee huomioida laboratorio-olosuhteissa käytetyt poikkeuksellisen epäsuotuisat olosuhteet verrattuna Saksan todellisiin ulko-olosuhteisiin. Massojen ohella karbonatisoitumiseen vaikuttavat myös betonin tiheys sekä betonipeitteen paksuus. (21.)

## 5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

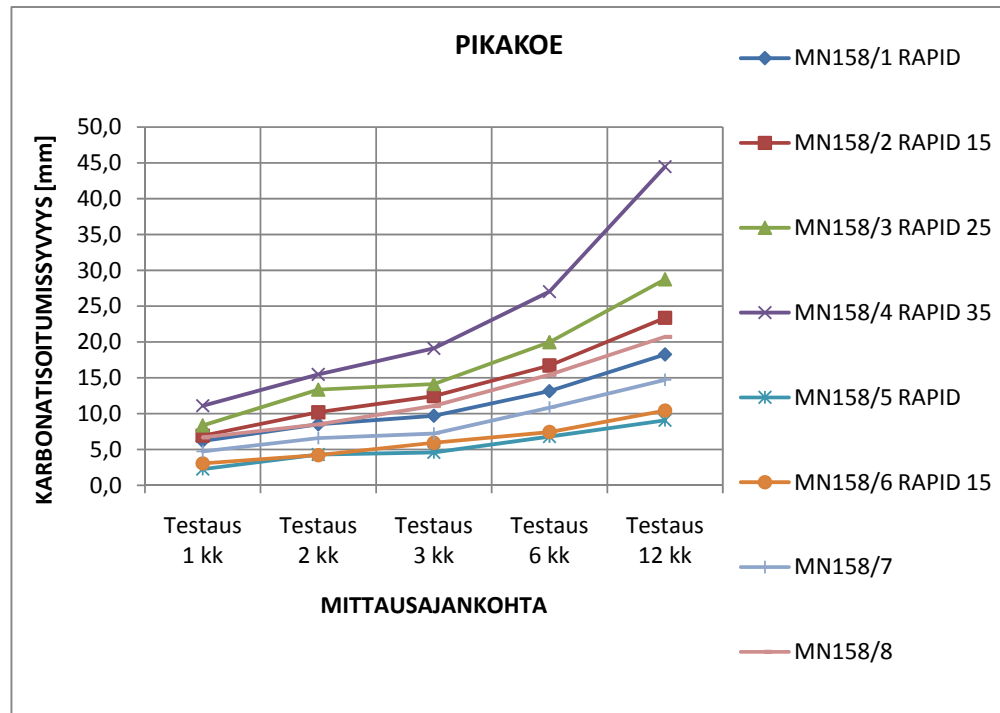
Kunkin olosuhteen tulokset on koottu omiin taulukoihinsa. Pikakokeen tulokset esitetään taulukossa 5. Pikakokeesta voidaan todeta, että karbonatisoituminen on ollut suurinta betonireseptillä MN 158/4 Rapid 35. Tässä karbonatisoituminen on ollut tasaista molemmissa koekappaleissa, mutta viimeisessä, 12 kuukauden, testauksessa koekappale 1 on karbonatisoitunut läpi. Keskimääräinen karbonatisoitumissyvyys on 44,5 mm.

Pikakokeessa vähiten karbonatisoitumista on tapahtunut betoniresepteillä MN 158/5 Rapid ja MN 158/6 Rapid 15. Molempien karbonatisoituminen on ollut samansuuruisia koko tutkimuksen ajan. Reseptin MN 158/5 Rapid karbonatisoitumissyvyuden keskiarvo on 9,1 mm ja reseptin MN 158/6 Radip 15 10,4 mm.

Taulukko 5. Yhteenveto pikakokeen tuloksista

<b>PIKAKOE, karbonatisoitumissyvyys [mm]</b>						
Tunnus	KPL	Testaus 1 kk	Testaus 2 kk	Testaus 3 kk	Testaus 6 kk	Testaus 12 kk
MN158/1 RAPID	1	6,1	8,2	9,5	13,0	18,9
	2	6,3	8,9	9,9	13,3	17,7
	KA	6,2	8,5	9,7	13,2	18,3
MN158/2 RAPID 15	1	7,0	10,5	12,7	16,7	23,0
	2	6,9	9,9	12,2	16,7	23,7
	KA	6,9	10,2	12,5	16,7	23,4
MN158/3 RAPID 25	1	8,3	13,6	13,0	20,0	29,5
	2	8,4	13,1	15,3	20,0	28,0
	KA	8,4	13,3	14,1	20,0	28,7
MN158/4 RAPID 35	1	11,7	15,0	19,7	27,6	<b>50,0</b>
	2	10,5	16,0	18,6	26,4	38,9
	KA	11,1	15,5	19,1	27,0	44,5
MN158/5 RAPID	1	2,5	3,7	4,4	6,3	8,9
	2	2,1	4,9	4,8	7,3	9,2
	KA	2,3	4,3	4,6	6,8	9,1
MN158/6 RAPID 15	1	2,6	4,3	5,9	7,2	10,5
	2	3,5	4,2	5,9	7,7	10,4
	KA	3,1	4,2	5,9	7,4	10,4
MN158/7	1	4,5	6,4	7,3	11,2	14,6
	2	4,9	6,8	7,2	10,5	14,8
	KA	4,7	6,6	7,2	10,8	14,7
MN158/8	1	6,8	9,0	11,2	16,3	21,3
	2	6,6	8,0	11,0	14,6	20,2
	KA	6,7	8,5	11,1	15,4	20,7

Kuvassa 21 on kuvattu karbonatisoitumisen eteneminen koko tutkimuksen ajan. Kaaviosta voidaan todeta, että karbonatisoituminen etenee melko tasaisesti muilla paitsi reseptillä MN 158/4 Rapid 35.



Kuva 21. Pikakokeen karbonatisoitumissyvyys

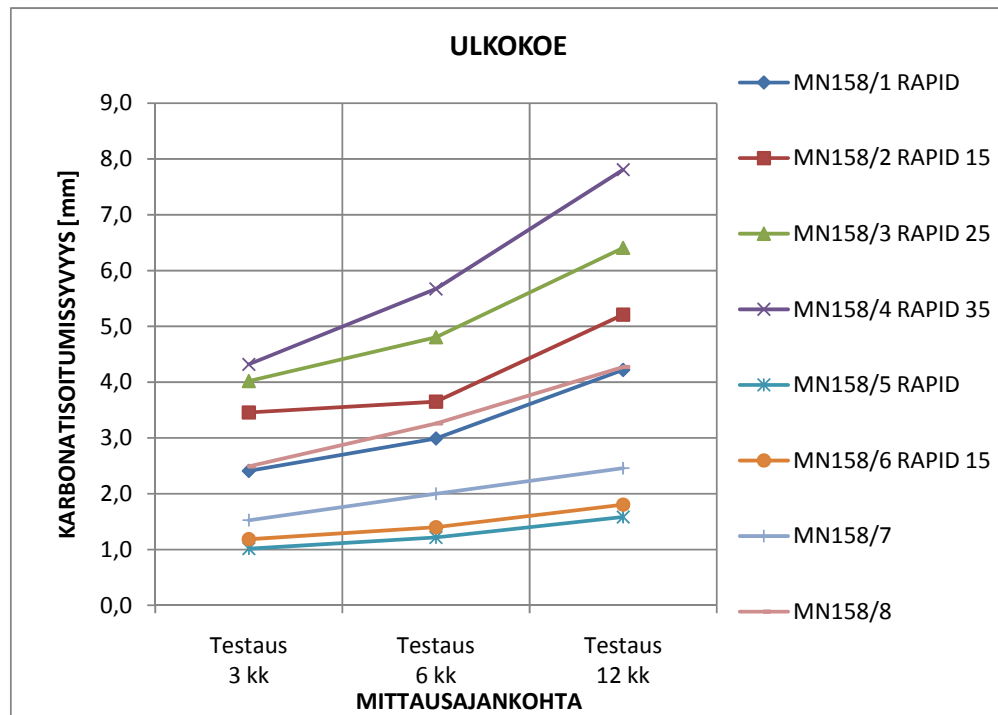
Ulkokokeen osalta tutkimustulokset ovat samansuuntaisia kuin pikakokeen. Karbonatisoitumissyvyys on kuitenkin huomattavasti vähäisempää. Karbonatisoitumisen keskiarvo MN 158/4 Rapid 35:llä on 7,8 mm. Ulkokokeen tulokset ovat taulukossa 6.

Vähäisintä ulkokokeen karbonatisoituminen on ollut betoniresepteillä MN 158/5 Rapid, 1,6 mm ja MN 158/6 Rapid 15, 1,8 mm.

Taulukko 6. Yhteenveto ulkokokeen tuloksista

<b>ULKOKOE, karbonatisoitumissyvyys [mm]</b>				
Tunnus	KPL	Testaus 3 kk	Testaus 6 kk	Testaus 12 kk
MN158/1 RAPID	1	2,5	3,1	4,3
	2	2,3	2,9	4,1
	KA	2,4	3,0	4,2
MN158/2 RAPID 15	1	3,4	3,5	5,0
	2	3,5	3,8	5,5
	KA	3,5	3,7	5,2
MN158/3 RAPID 25	1	4,2	4,7	6,6
	2	3,9	4,9	6,2
	KA	4,0	4,8	6,4
MN158/4 RAPID 35	1	4,3	5,6	8,1
	2	4,4	5,8	7,5
	KA	4,3	5,7	7,8
MN158/5 RAPID	1	0,9	1,0	1,7
	2	1,2	1,4	1,5
	KA	1,0	1,2	1,6
MN158/6 RAPID 15	1	1,2	1,5	1,8
	2	1,2	1,3	1,8
	KA	1,2	1,4	1,8
MN158/7	1	1,6	2,0	2,3
	2	1,5	2,0	2,6
	KA	1,5	2,0	2,5
MN158/8	1	2,8	3,5	4,4
	2	2,2	3,0	4,1
	KA	2,5	3,3	4,3

Ulkokokeen karbonatisoitumisen eteneminen ilmenee kuvasta 22. Karbonatisoitumisen eteneminen on selvästi tasaisempaa eri reseptien välillä kuin pikakokeessa. Reseptien MN158/2 Rapid 15, MN 158/3 Rapid 25, MN 158/4 ja MN 158/5 Rapid karbonatisoituminen lisääntyy kuuden kuukauden kohdalla, kun taas muilla se jatkuu lähes lineaarisesti.



Kuva 22. Ulkokokeen karbonatsoitumissyvyys

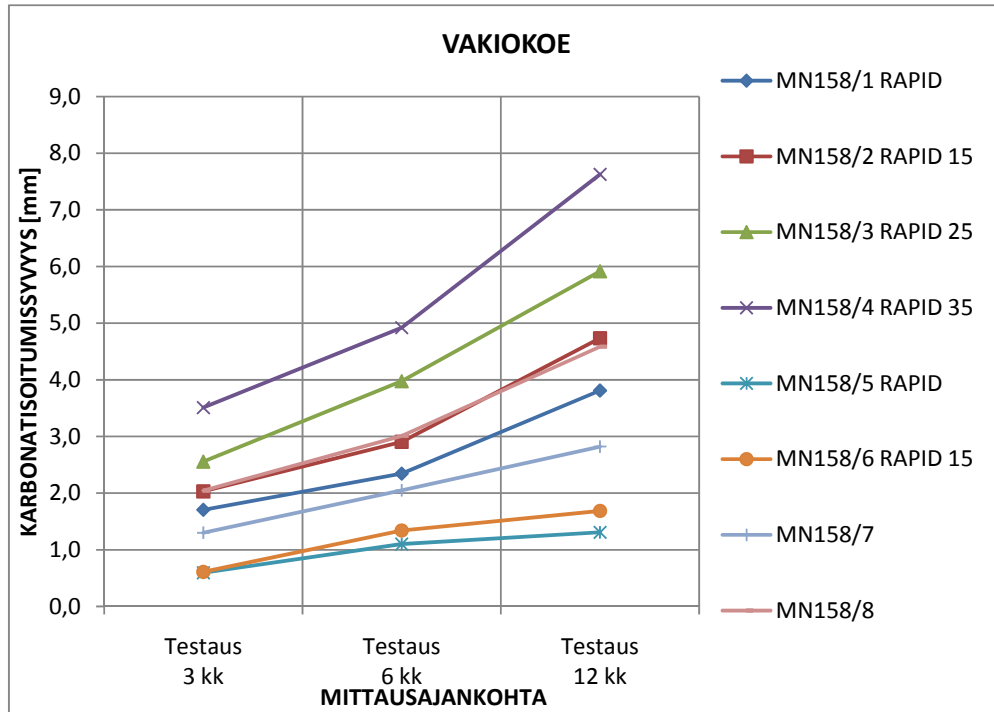
Vakiokokeen osalta tulokset ovat samaa luokkaa kuin ulkokokeessa. Eniten karbonatsoitumista on tapahtunut MN 158/5 Rapid 35:llä. Karbonatsoitumisen keskiarvo on 7,6 mm kahdentoista kuukauden ajalla. Vakiokokeen tulokset esitetään taulukossa 7.

Reseptien MN 158/5 Rapid ja MN 158/6 Rapid 15 karbonatsoituminen on ollut tässäkin olosuhteessa vähäisintä. Karbonatsoitumisen keskiarvot ovat 1,3 mm ja 1,7 mm.

Taulukko 7. Yhteenveto vakiokokeen karbonatisoitumisesta

<b>VAKIOKOE, karbonatisoitumissyvyys [mm]</b>				
Tunnus	KPL	Testaus 3 kk	Testaus 6 kk	Testaus 12 kk
MN158/1 RAPID	1	1,9	2,2	4,1
	2	1,5	2,5	3,5
	KA	1,7	2,3	3,8
MN158/2 RAPID 15	1	1,9	2,8	4,6
	2	2,2	3,0	4,9
	KA	2,0	2,9	4,7
MN158/3 RAPID 25	1	2,5	4,0	5,8
	2	2,6	4,0	6,1
	KA	2,6	4,0	5,9
MN158/4 RAPID 35	1	3,4	4,9	7,3
	2	3,7	5,0	8,0
	KA	3,5	4,9	7,6
MN158/5 RAPID	1	0,6	1,3	1,4
	2	0,6	0,9	1,2
	KA	0,6	1,1	1,3
MN158/6 RAPID 15	1	0,6	1,5	1,7
	2	0,6	1,2	1,6
	KA	0,6	1,3	1,7
MN158/7	1	1,3	2,1	2,9
	2	1,3	2,0	2,7
	KA	1,3	2,1	2,8
MN158/8	1	1,8	2,8	4,7
	2	2,3	3,2	4,5
	KA	2,0	3,0	4,6

Vakiokokeen karbonatisoitumisen eteneminen on kuvattu kuvassa 23. Vakiokokeessa useimpien reseptien karbonatisoituminen lisääntyi hieman kuuden kuukauden jälkeen. Näitä reseptejä ovat MN 158/1 Rapid, MN 158/2 Rapid 15, MN 158/3 Rapid 25, MN 158/4 Rapid 35 ja MN 158/8. Lineaarinen karbonatisoituminen oli massalla MN 158/7. Reseptien MN 158/5 Rapid ja MN 158/6 Rapid 15 karbonatisoituminen puolestaan hidastui kuuden kuukauden jälkeen.



Kuva 23. Vakiokokeen karbonatisoitumissyvyys

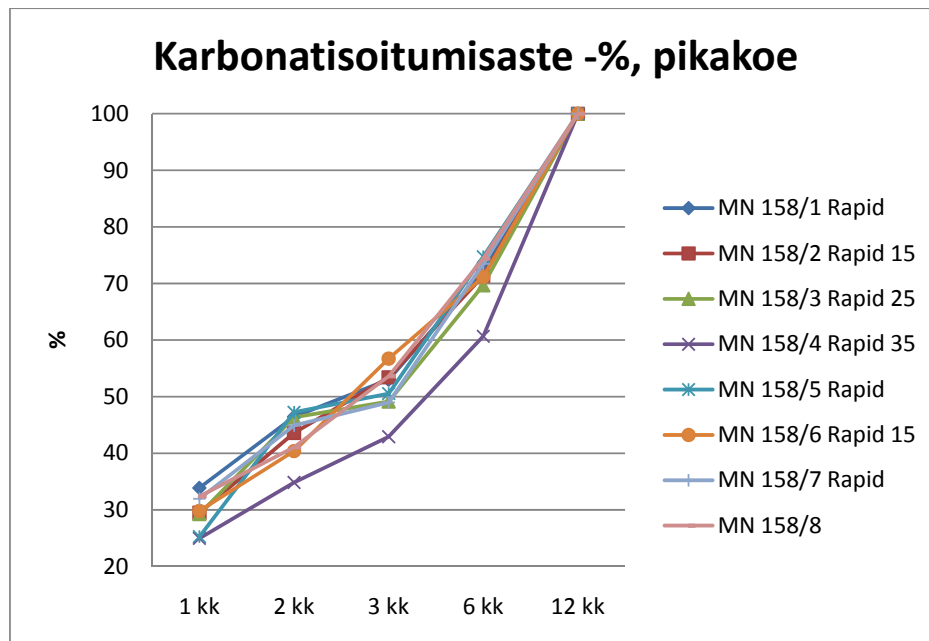
Eri sementtilaaujen karbonatisoitumisen eteneminen vaihtelee suuresti olosuhteittain. Pikakokeessa karbonatisoituminen on suurimmillaan noin nelinkertaista verrattuna ulko- ja vakiokokeeseen. Ulkokokeessa karbonatisoituminen etenee aluksi nopeammin verrattuna vakiokokeeseen. Voidaan olettaa, että tähän on syynä ilman suhteellisen kosteuden laskeminen talvella. Vakiokokeessa karbonatisoituminen on hieman vähäisempää kuin ulkokokeessa. Tähän voi olla syynä ulko-olosuhteen karbonatisoitumisen nopeampi käynnistyminen.

Karbonatisoitumisen suuruus vaihtelee myös resepteittäin. Tarkasteltaessa karbonatisoitumisen kehittymistä prosentuaalisen osuuden avulla kokonaiskarbonatisoitumisesta, voidaan todeta, että karbonatisoitumisaste kaikissa olosuhteissa ja massoissa on lähes lineaarinen. Erot karbonatisoitumisessa eri betonireseptien välillä voidaan havaita tarkastelemalla karbonatisoitumisasteen muutosta tarkasteluhetkien välillä. Karbonatisoitumisen etenemisen tarkastelussa käytettävät arvot ovat liitteessä 3.

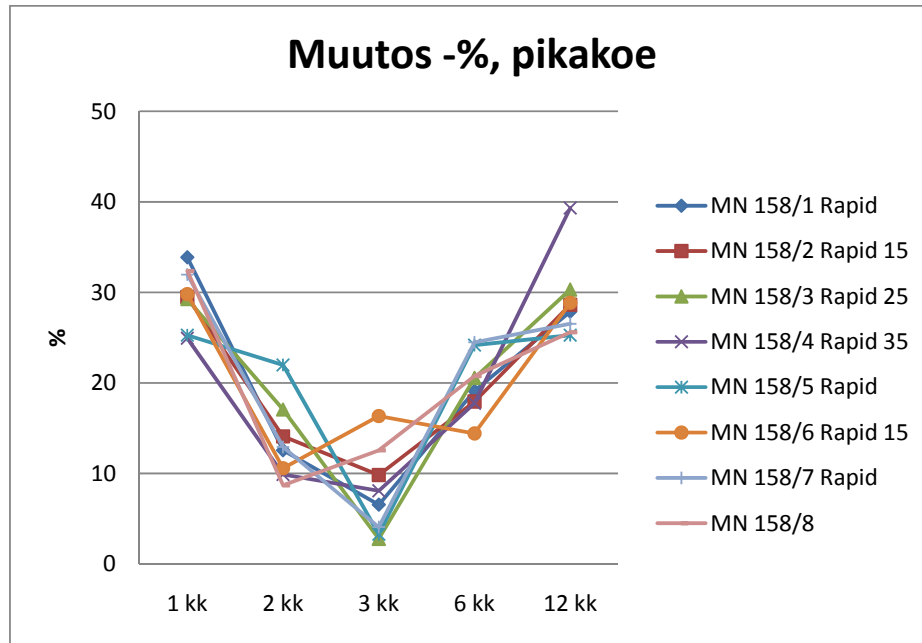
Kuvassa 24 tarkastellaan pikakokeen karbonatisoitumisastetta. Suurimmat erot betonireseptien välillä voidaan havaita 1–3 kuukauden aikana kokeen aloittamisesta. En-



simmäisten kahden kuukauden aikana karbonatisoituminen on kuitenkin nopeimmillaan. Reseptin MN 158/4 Rapid 35 vesi-sementtisuhde ja kalkkikivipitoisuus ovat suuria. Kyseisellä reseptillä karbonatisoituminen oli selvästi muita reseptejä suurempi, mutta sen eteneminen oli tasaisempaa kuin muilla. Tarkasteluhetkien välinen muutos on myös samansuuntainen eri massoilla. Tämä käy ilmi kuvasta 25. Reseptin MN 158/6 Rapid 15:sta on havaittavissa karbonatisoitumisen hetkellinen kiihtyminen kolmannen kuukauden kohdalla. Tämä ei kuitenkaan vaikuta lopullisen karbonatisoitumisen kasvuun.

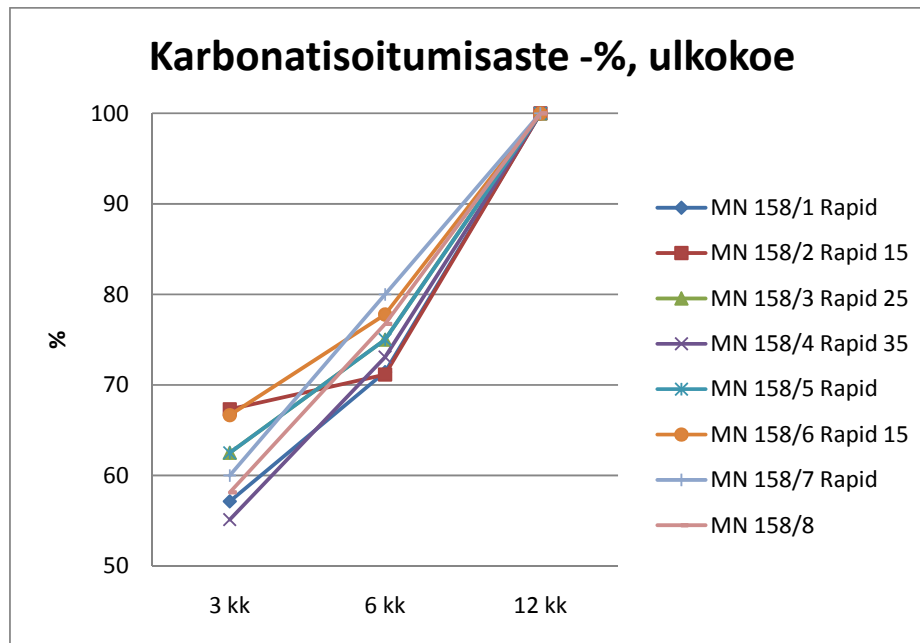


Kuva 24. Pikakokeen karbonatisoitumisaste

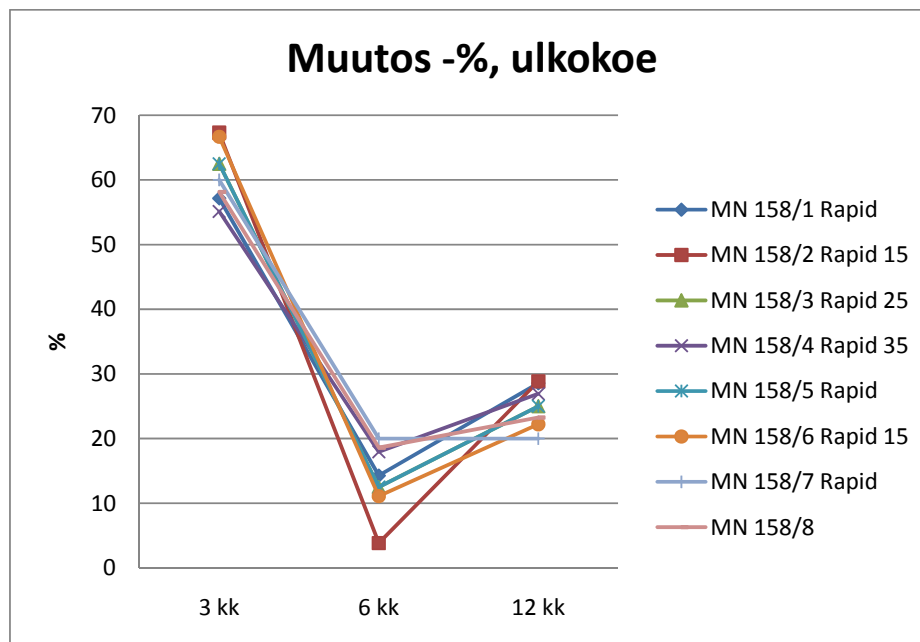


Kuva 25. Pikakokeen karbonatisoitumisasteen muutos

Ulkokokeen karbonatisoitumista tarkasteltaessa saadaan selville, että sen eteneminen eri massojen välillä on tasaisempaa kuin muissa olosuhteissa. Suurimmat erot eri reseptien välillä voidaan havaita kolmen kuukauden kuluttua tutkimuksen aloituksesta, kuten kuvasta 26 selviää. Ulkokokeen karbonatisoituminen on alussa selvästi nopeinta. Suhteessa nopeinta karbonatisoituminen on ollut kolmen kuukauden kohdalla reseptillä MN 158/2 Rapid 15, mutta tämä hidastuu voimakkaasti seuraavaa tarkasteluhetkeä kohti. Karbonatisoitumisen radikaali hidastuminen tapahtuu kaikilla resepteillä 3-6 kuukauden kuluttua tutkimuksen aloituksesta. Muutoksen pieneneminen voidaan havaita kuvasta 27. Tähän on syynä ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden laskeminen.



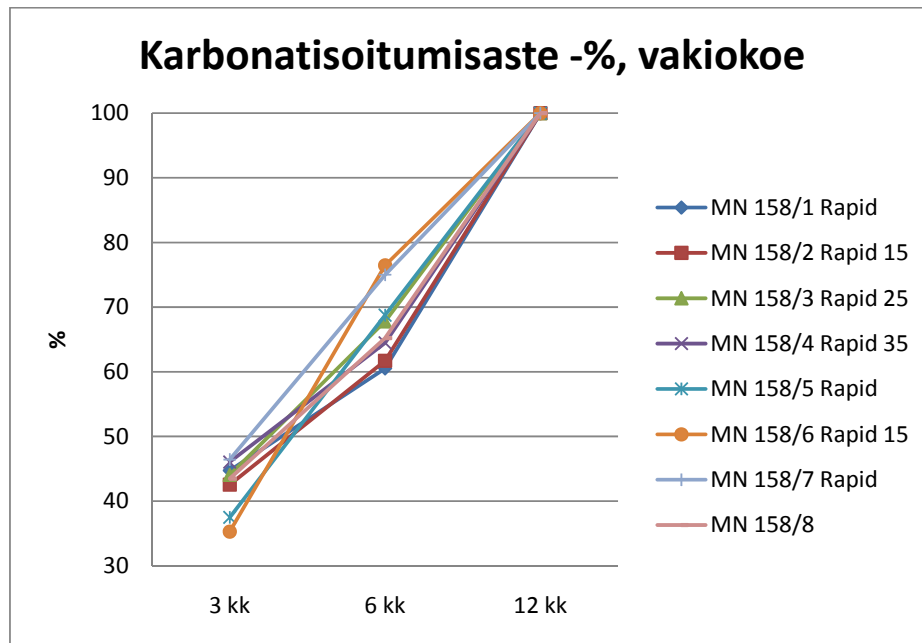
Kuva 26. Ulkokokeen karbonatisoitumisaste



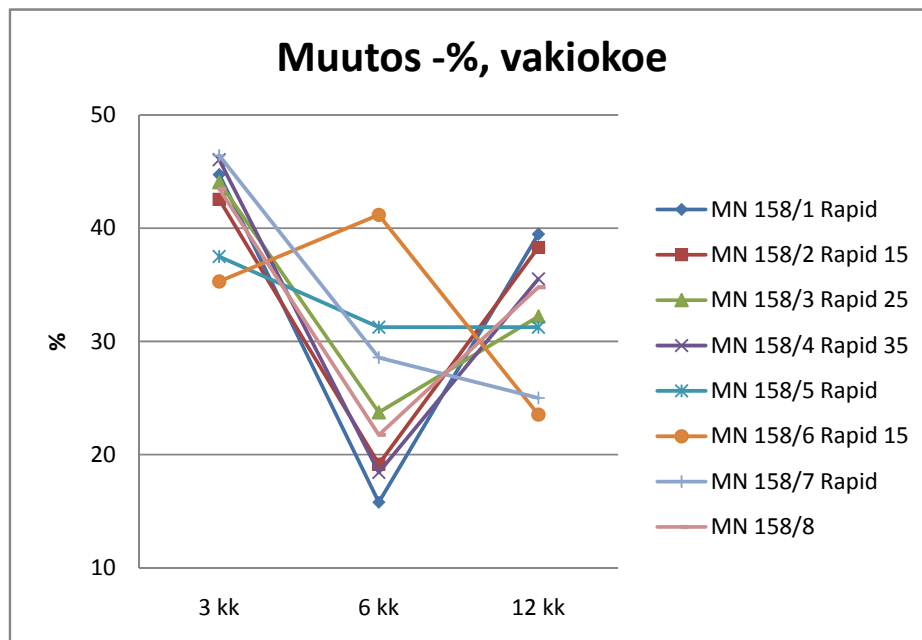
Kuva 27. Ulkokokeen karbonatisoitumisasteen muutos

Vakiokokeessa olosuhteen tasaisuudesta johtuen karbonatisoituminen on lähes lineaarista. Tämä käy ilmi kuvasta 28. Resepteillä, joilla on pieni vesi-sementtisuhde, alkukarbonatisoituminen on hitaampaa. Tämä näkyy kuvassa 29 suhteellisena nousuina re-

septeillä MN 158/5 Rapid, MN 158/6 Rapid 15 ja MN 158/7. Vähäisintä ja tasaisinta karbonatisoituminen on ollut reseptillä MN 158/5 Rapid.



Kuva 28. Vakiokokeen karbonatisoitumisaste



Kuva 29. Vakiokokeen karbonatisoitumisasteen muutos

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkasteltiin kalkkikiviseoksen vaikutusta betonin karbonatisoitumiseen. Koesarjan tulosten pohjalta voidaan sanoa, että suuri kalkkipitoisuus ja vesi-sementtisuhde betonissa nopeuttavat karbonatisoitumista. Kyseisillä betoneilla oli myös heikommat 28 päivän puristuslujuudet.

Betoniresepteillä oli vaikutus betonin karbonatisoitumiseen. Betonin ominaisuuksista lujuudella oli suurin merkitys karbonatisoitumisen suhteen. Suurin lujuus saavutettiin reseptillä MN 158/5 Rapid, 54,8 KN. Pienin lujuus oli reseptillä MN 158/4 Rapid 35, joka oli 18,8 KN. Yleisesti MN 158/5 Rapid -betonin karbonatisoituminen oli vain noin 25 % eniten karbonatisoituneeseen MN 158/4 Rapid 35 verrattuna.

Muita betonin ominaisuuksia, jotka vaikuttivat karbonatisoitumisen etenemiseen, olivat betonin tiiveys ja vesi-sementtisuhde. Alhainen vesi-sementtisuhde vaikuttaa betonin lujuuteen ja tiiveyteen kasvavasti. Tiivis betoni estää hiilidioksidin tunkeutumista toisin kuin huokoinen betoni. Vesi-sementtisuhteen ollessa pieni karbonatisoituminen oli hidasta ja jäi vähäiseksi.

Reseptien MN 158/5 Rapid, MN 158/6 Rapid 15, MN 158/7 Rapid ja MN 158/8 betoniin oli lisätty VB-Parmiksia 0,2-0,41 %, jolloin ilmamäärä oli selkeästi suurempi kuin muilla resepteillä. Kyseisten betonien painuma ja karbonatisoituminen olivat myös pienempiä.

Erilaisilla olosuhteilla oli myös suuri vaikutus saatuihin tuloksiin. Karbonatisoituminen oli selkeästi suurinta pikakokeessa. Syynä tähän oli hiilidioksidin runsaampi määrä muihin olosuhteisiin verrattuna. Vähäisintä karbonatisoituminen oli vakiokokeessa. Ulkokokeen karbonatisoituminen oli lähes yhtä vähäistä kuin vakio-olosuhteen. Ulko-olosuhteessa olleiden koekappaleiden karbonatisoituminen ei välttämättä anna luotettavaa tulosta, sillä sääolosuhteet Suomessa ovat epävakait. Viimevuotinen talvi ei mahdollisesti kuvaa 50 vuoden keskiarvoa. Näin ollen jos olosuhteet vastaisivat keskiarvoa, tulokset voisivat olla erilaiset.

Materiaalin vähäisyyden vuoksi ei voida tehdä tarkempia johtopäätöksiä. Betonin karbonatisoituminen nykyisillä sementtityypeillä olisi hyvä olla tiedossa, jotta tuloksia voitaisiin vertailla niihin. Tätä kautta kalkkikiviseostuksen tarkempi vaikutus betonin karbonatisoitumiseen voitaisiin mahdollisesti selvittää tarkemmin.

Tulevaisuudessa betonin karbonatisoitumisen tutkimisessa voisi ajatella, että ulko-olosuhteessa tutkittaisiin myös sateen vaikutusta. Tällöin koekappaleet joutuisivat alttiiksi säälle myös veden eri olomuodoissa. Ulko-olosuhdetta varten voisi myös kehittää olosuhteen sääkaappiin, jossa lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus vaihtelevat vuorokauden vaihteluiden mukaan. Näin ollen lämpötilat voitaisiin säätää vastaamaan Suomessa käytettyä 50 vuoden keskiarvoa. Myös mahdollinen ilmaston lämpeneminen voitaisiin tällöin huomioida.

## LÄHTEET

1. Sementtiopas. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi> [viitattu 1.10.2009].
2. Suomen Betoniyhdistys ry. 2005. BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2004. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
3. RTT. 1998. Betonirakenteiden ympäristövaikutukset. Jyväskylä. Gummerus Kirjapaino Oy.
4. Ympäristöraportti 2009. Saatavissa: [http://www.finnsementti.fi/asiakasfoorumi/suojattu/uploads/ymparistoraportti\\_2009.pdf](http://www.finnsementti.fi/asiakasfoorumi/suojattu/uploads/ymparistoraportti_2009.pdf) [viitattu 1.10.2009].
5. Suomen standardisoimisliitto SFS. SFS-EN 197-1 Sementtistandardi.
6. Sementit.Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/index2.html> [viitattu 1.10.2009].
7. Suomen Betoniyhdistys ry. 2002. BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002. Gummerus Kirjapaino Oy.
8. Taylor H.F.W. 1997. Cement chemistry 2nd edition. Thomas Telford Publishing Ltd.
9. Neville, A. M. 1981. Properties of Concrete. 3rd edition. London: Pitman Publishing Inc. 779 p.
10. Jouni Punkki. 2009. Luentomoniste, Betonin ympäristöpaineita – erityisesti CO<sub>2</sub>-päästöt. Finnsementti Oy.
11. Jorma Virtanen. 2009. Luentomoniste, Sementti ja ympäristö. Finnsementti Oy.
12. Esa Heikkilä. 2009. Luentomoniste, Sementtien kehitys. Finnsementti Oy.
13. Esa Heikkilä. 2009. Finnsementtien asiakaslehti 1/2009, Finnsementti kehittää ja tuo markkinoille uuden seossementin. Raisio: Newprint Oy.
14. Esa Heikkilä. 2009. Kalkkikiviseostus-projektin säilyvyyskokeissa käytettyjen sementtinäytteen ominaisuudet. Finnsementin raportti.
15. Esa Heikkilä. 2009. Kalkkikiviseostus-projekti, karbonatisoitumiskokeet. Finnsementti Oy. Projekti 635511 Osaraportti.
16. Suomen standardisoimisliitto SFS. 2004. SFS-EN 13295 Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. Testausmenetelmät. Karbonatisoitumiskestävyyden määrittäminen.
17. Matala S. 2006. Sementtilaaduilla Y ja Y2B tehtyjen betonien karbonatisoitumiskokeet. Kotka. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Tutkimusselostus RAK 20051187. 7s.
18. Baron, P.J. 1986. The durability of Limestone Composite Cements in the Context of the French Specifications.

19. Albeck, J & Sutej, B. 1991. Eigenschaften von Betonen aus Portland kalksteinzement. Forschungsinstitut der Zementindustrie, Dusseldorf, Btontechnische Berichte.
20. Siebel, E & Sprung S. 1991. Einfluss des Kalksteins im Portlands kalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Forschungsinstitut der Zementindustrie. Dusseldorf, betontechnische Berichte.
21. Schmidt, M. 1992. Zement mit Zusatzstoffen. Leistungsfähigkeit und Umweltentlastung. Teil 2. Zement-Kalk-Gips, vol 45, Nr 6/1992.



**BETONIN KARBONATISOITUMISTUTKIMUS**

5.8.2008

Standardi EN 13295

Tilaaaja: Finnsementti Oy

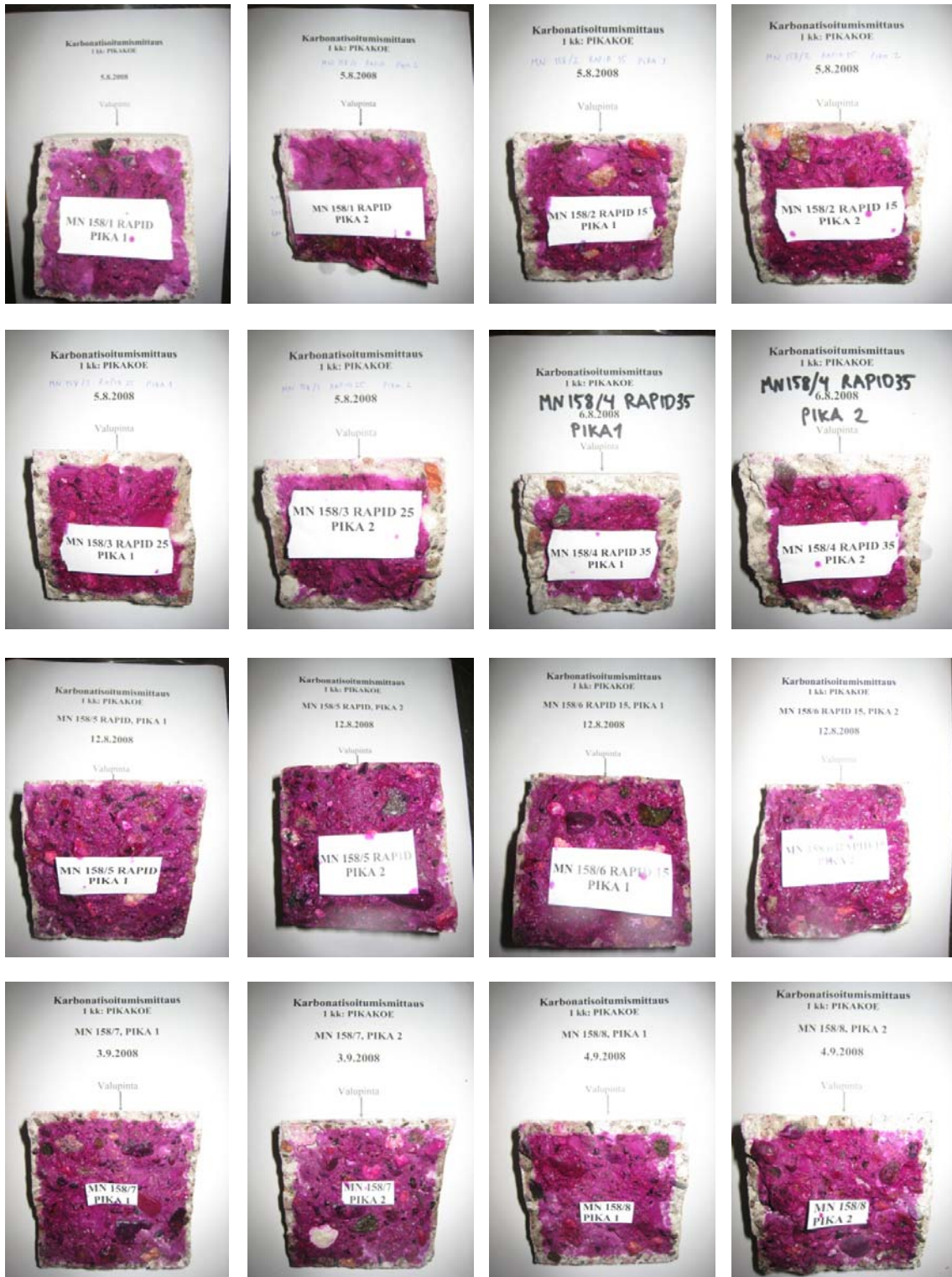
Aikataulu: PIKAKOE								
Tunnus	Valm.pvä	Saapumis pvä	Testi al- kaa, 28d	Testaus 1 kk	Testaus 2 kk	Testaus 3 kk	Testaus 6 kk	Testaus 12 kk
MN158/1 RAPID	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	5.8.2008	2.9.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/2 RAPID 15	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	5.8.2008	2.9.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/3 RAPID 25	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	5.8.2008	2.9.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/4 RAPID 35	11.6.2008	7.7.2008	9.7.2008	6.8.2008	3.9.2008	1.10.2008	24.12.2008	10.6.2009
MN158/5 RAPID	17.6.2008	14.7.2008	15.7.2008	12.8.2008	9.9.2008	7.10.2008	30.12.2008	16.6.2009
MN158/6 RAPID 15	17.6.2008	14.7.2008	15.7.2008	12.8.2008	9.9.2008	7.10.2008	30.12.2008	16.6.2009
MN158/7	9.7.2008	4.8.2008	6.8.2008	3.9.2008	1.10.2008	29.10.2008	21.1.2009	8.7.2009
MN158/8	10.7.2008	4.8.2008	7.8.2008	4.9.2008	2.10.2008	30.10.2008	22.1.2009	9.7.2009

Aikataulu: ULKOKOE						
Tunnus	Valm.pvä	Saapumis pvä	Testi al- kaa, 28d	Testaus 3 kk	Testaus 6 kk	Testaus 12 kk
MN158/1 RAPID	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/2 RAPID 15	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/3 RAPID 25	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/4 RAPID 35	11.6.2008	7.7.2008	9.7.2008	1.10.2008	24.12.2008	10.6.2009
MN158/5 RAPID	17.6.2008	14.7.2008	15.7.2008	7.10.2008	30.12.2008	16.6.2009
MN158/6 RAPID 15	17.6.2008	14.7.2008	15.7.2008	7.10.2008	30.12.2008	16.6.2009
MN158/7	9.7.2008	4.8.2008	6.8.2008	29.10.2008	21.1.2009	8.7.2009
MN158/8	10.7.2008	4.8.2008	7.8.2008	30.10.2008	22.1.2009	9.7.2009

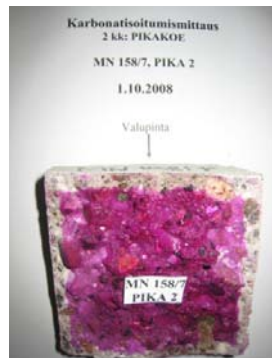
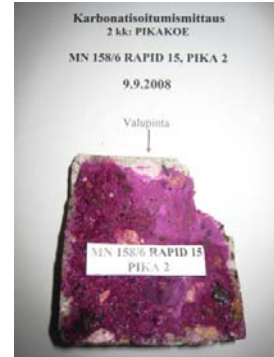
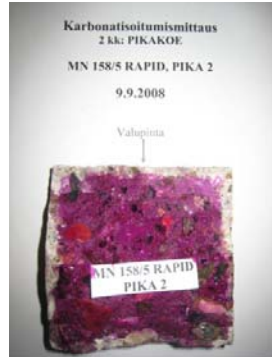
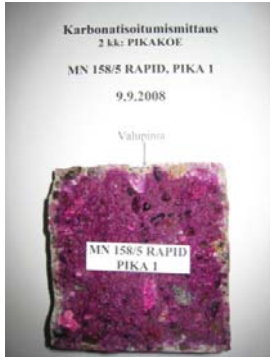
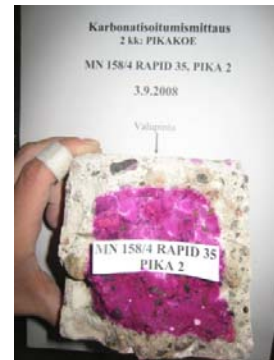
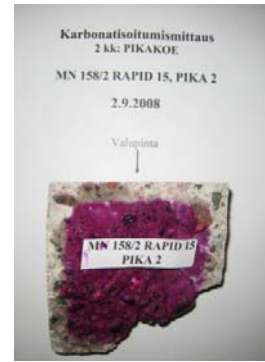
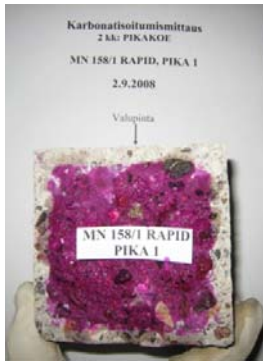
<b>Aikataulu: VAKIOKOE</b>						
Tunnus	Valm.pvä	Saapumis pvä	Testi al- kaa, 28d	Testaus 3 kk	Testaus 6 kk	Testaus 12 kk
MN158/1 RAPID	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/2 RAPID 15	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/3 RAPID 25	10.6.2008	7.7.2008	8.7.2008	30.9.2008	23.12.2008	9.6.2009
MN158/4 RAPID 35	11.6.2008	7.7.2008	9.7.2008	1.10.2008	24.12.2008	10.6.2009
MN158/5 RAPID	17.6.2008	14.7.2008	15.7.2008	7.10.2008	30.12.2008	16.6.2009
MN158/6 RAPID 15	17.6.2008	14.7.2008	15.7.2008	7.10.2008	30.12.2008	16.6.2009
MN158/7	9.7.2008	4.8.2008	6.8.2008	29.10.2008	21.1.2009	8.7.2009
MN158/8	10.7.2008	4.8.2008	7.8.2008	30.10.2008	22.1.2009	9.7.2009

KUVAT KOEKAPPALEISTA

Pikakoe 1 kk

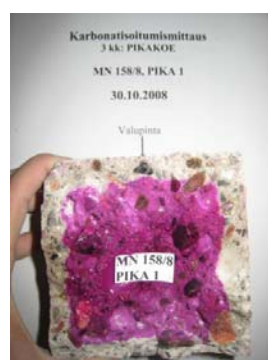
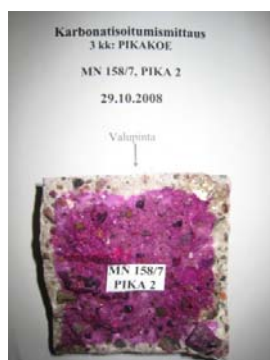
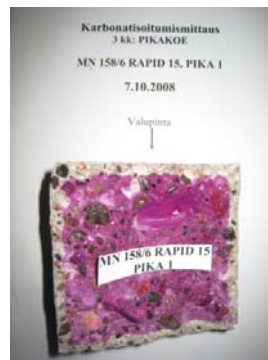
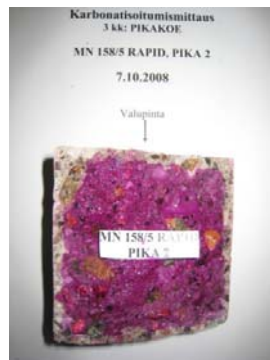
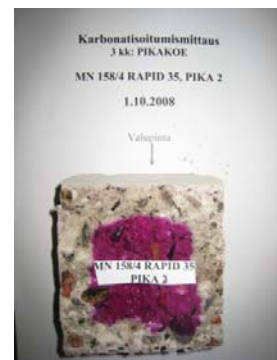
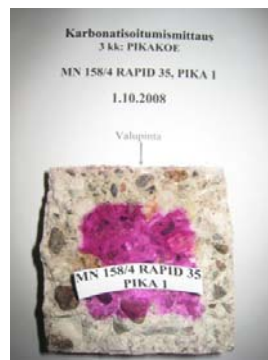


Pikakoe 2 kk

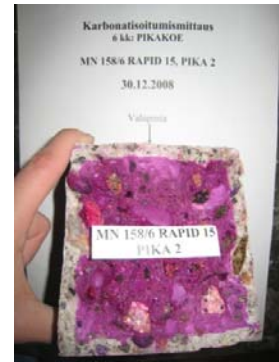
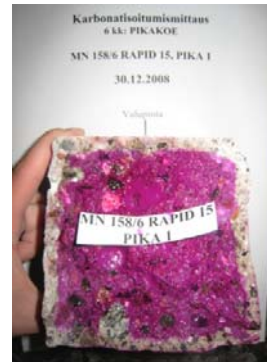
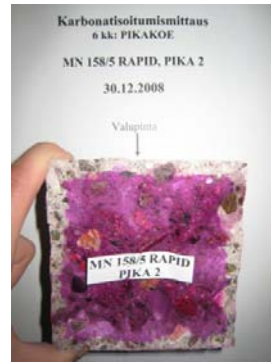
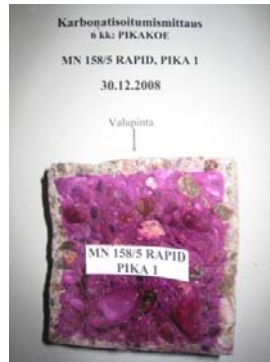
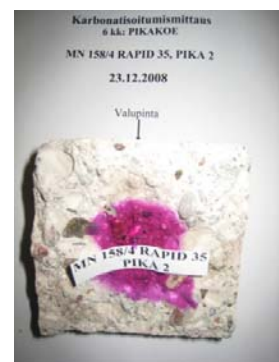
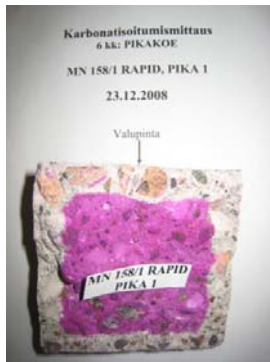




Pikakoe 3 kk

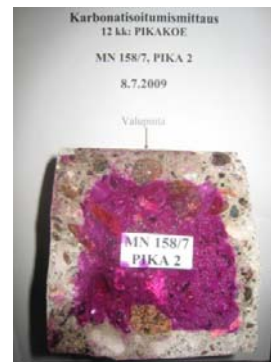
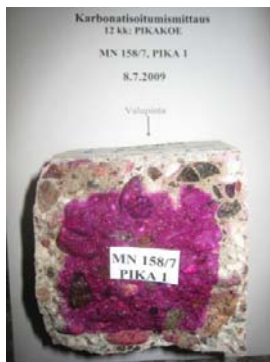
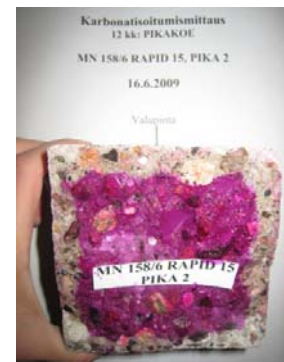
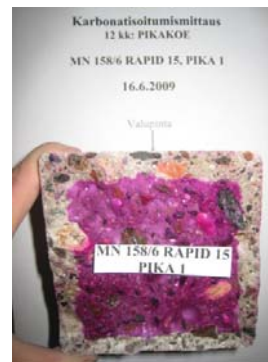
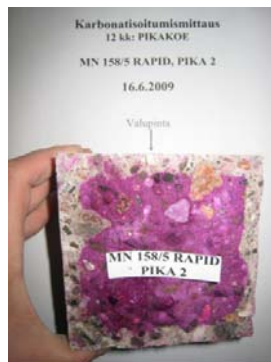
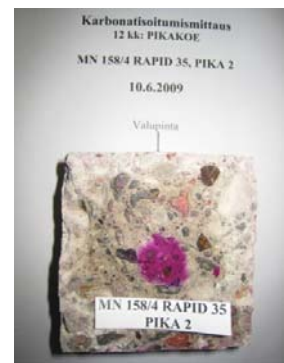
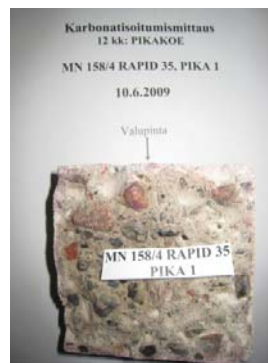
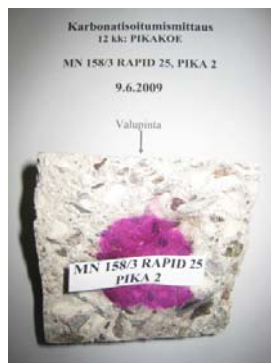
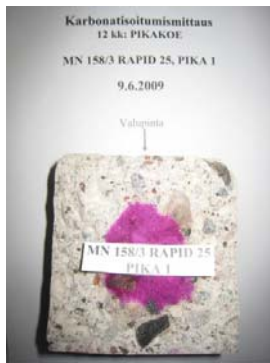
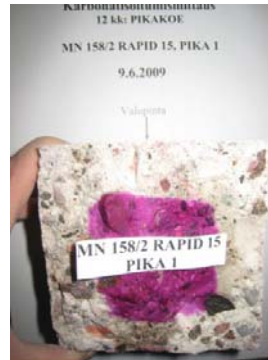
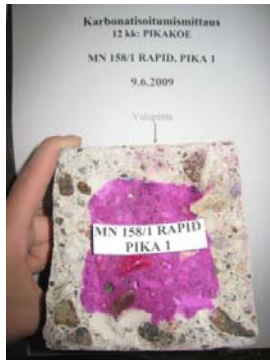


Pikakoe 6 kk



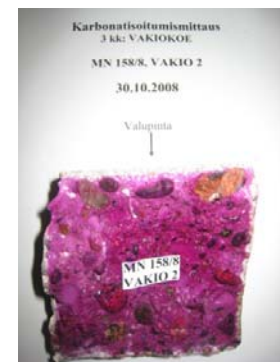
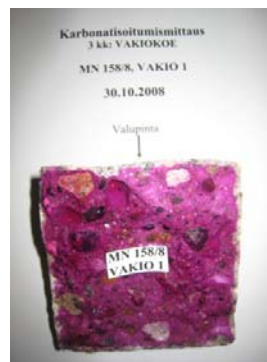
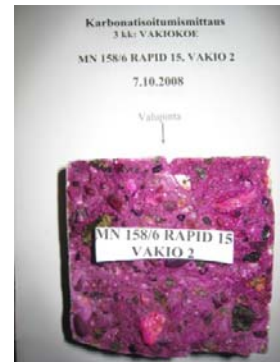
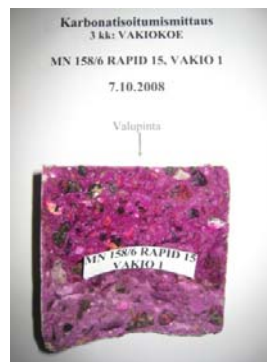
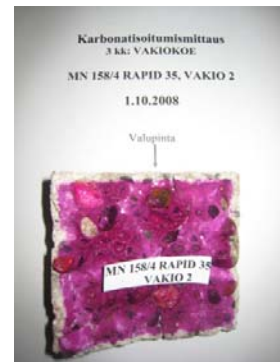
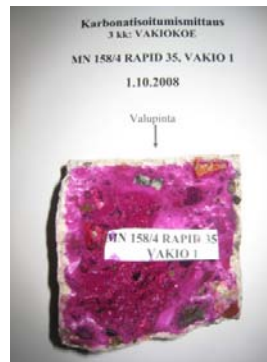
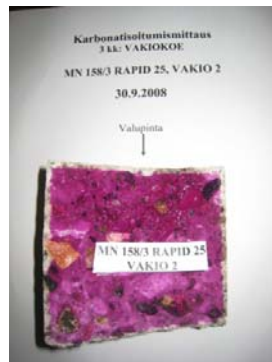
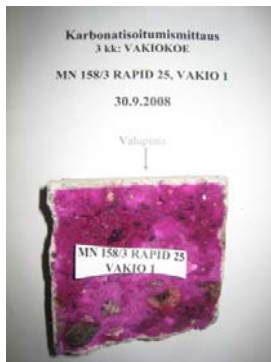
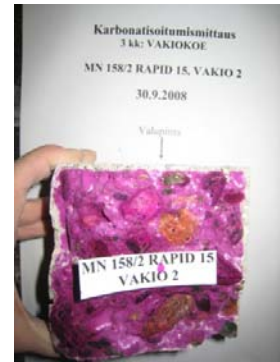
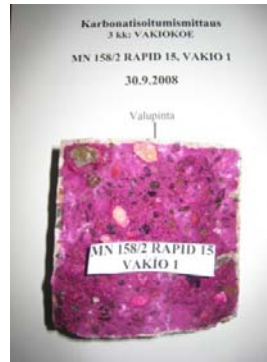
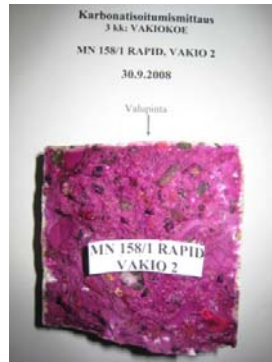


Pikakoe 12 kk

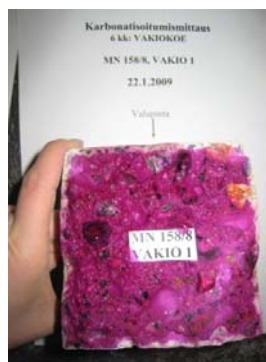
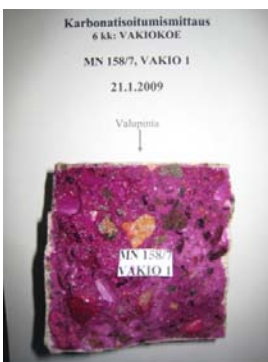
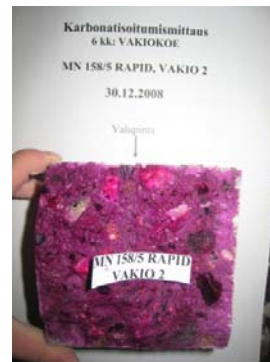
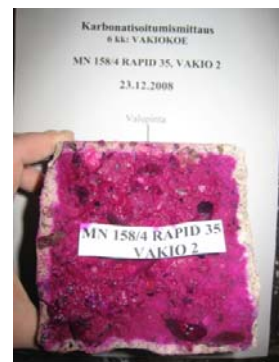
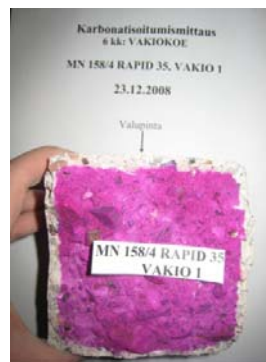
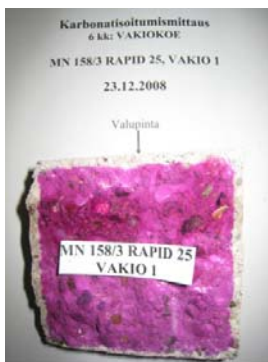
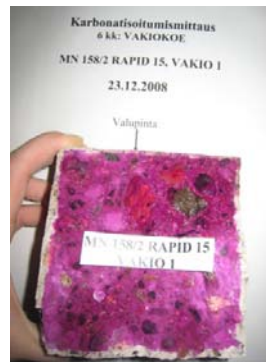
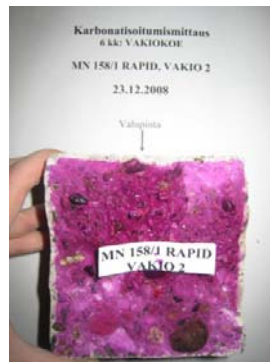
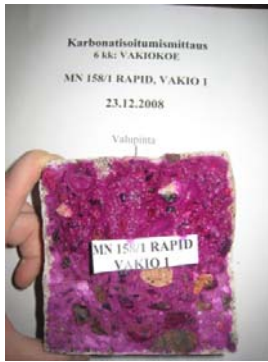




Vakiokoe 3 kk

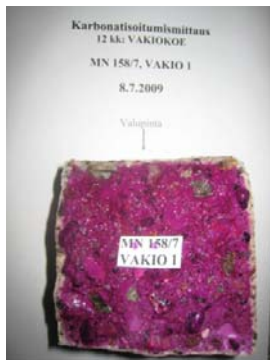
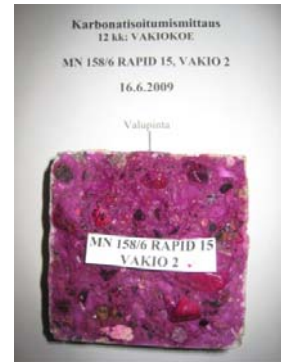
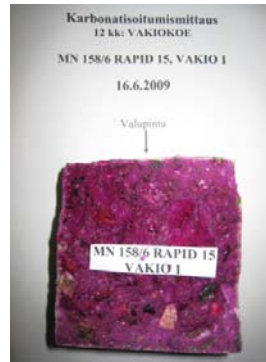
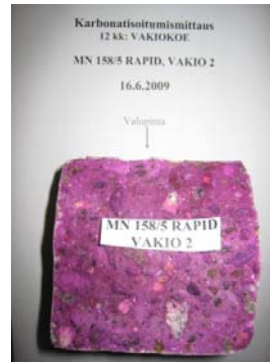
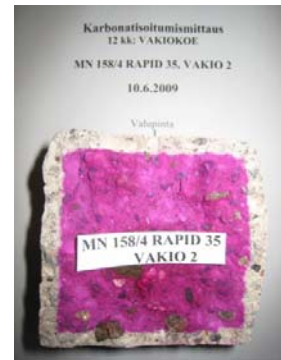
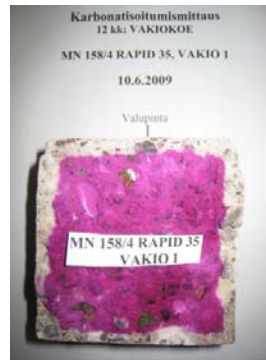
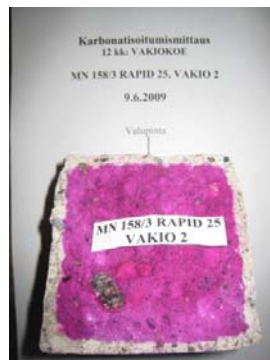
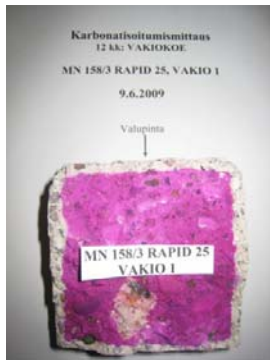
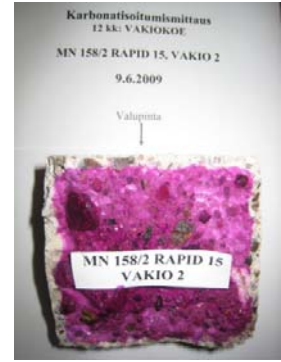
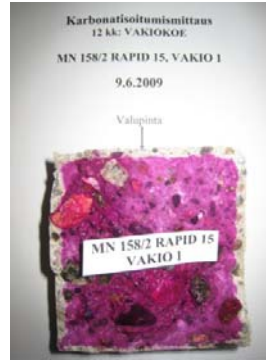
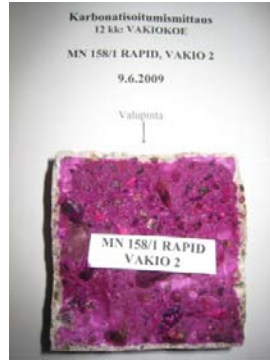
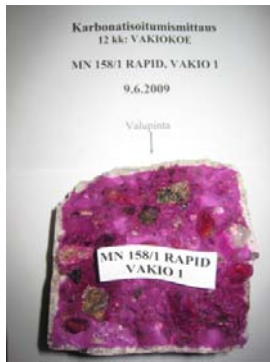


Vakiokoe 6 kk

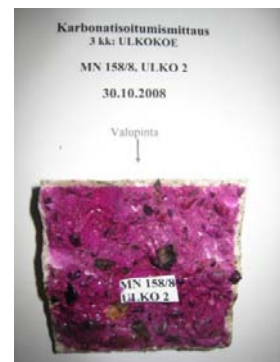
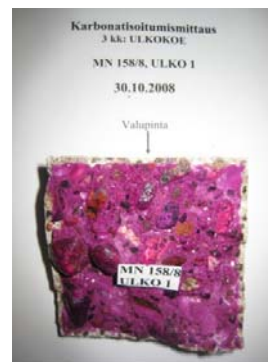
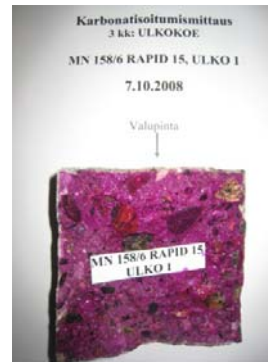
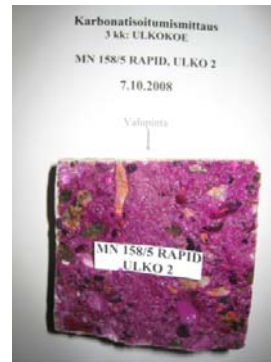
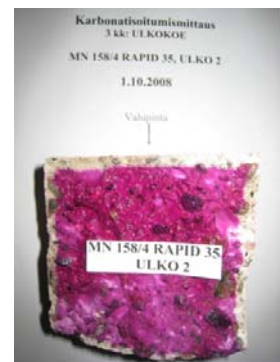
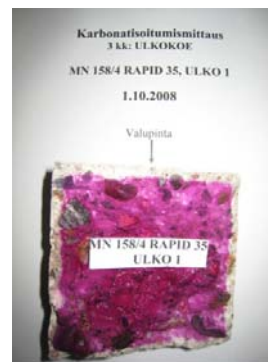
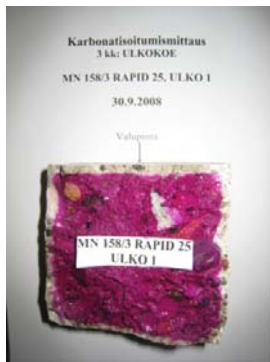
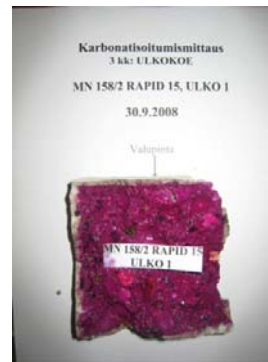




Vakiokoe 12 kk

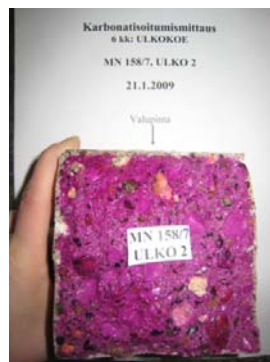
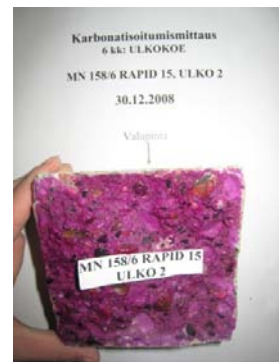
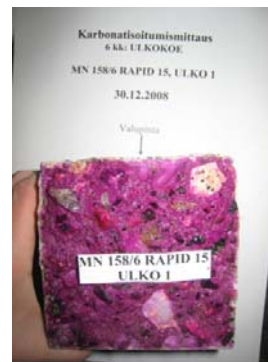
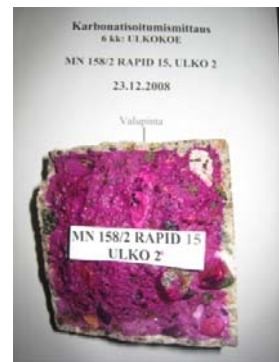
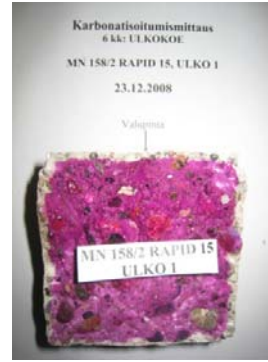
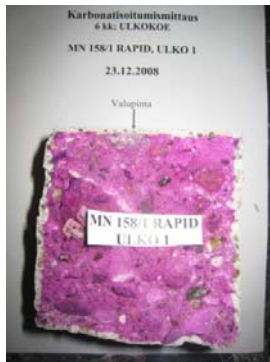


Ulkokoe 3 kk

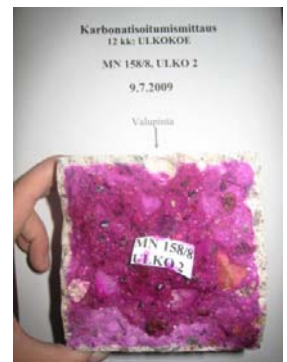
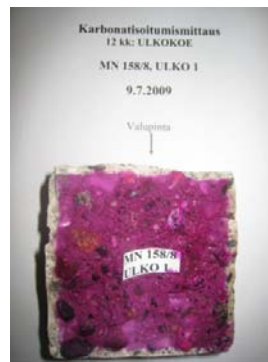
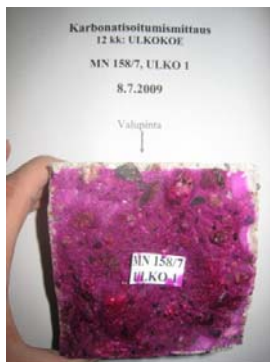
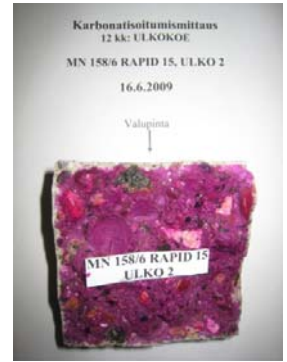
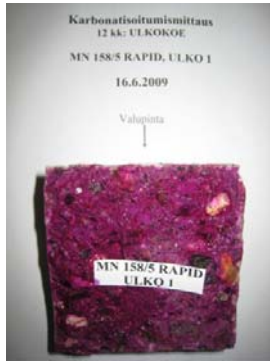
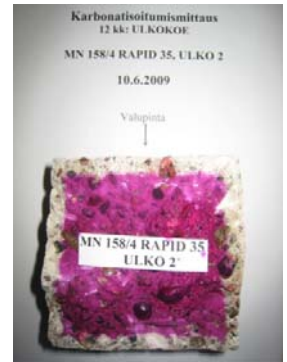
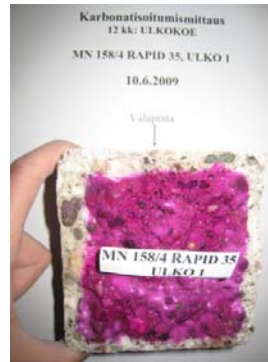
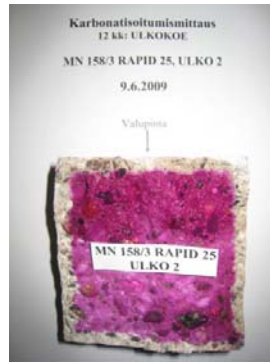
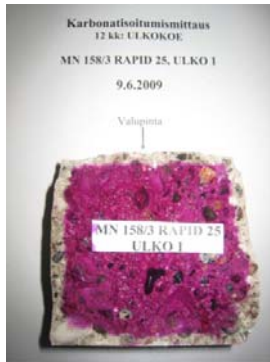
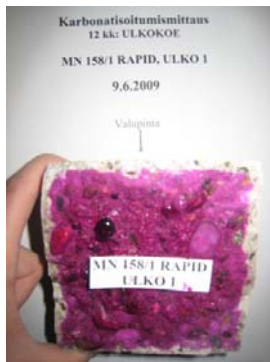




Ulkokoe 6 kk



Ulkokoe 12 kk



**KARBONATISOITUMISEN ETENEMINEN****MN 158/1 Rapid**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	6,2	33,9	33,9
	2 kk	8,5	46,4	12,6
	3 kk	9,7	53,0	6,6
	6 kk	13,2	72,1	19,1
	12 kk	18,3	100,0	27,9
Ulko-olosuhde	3 kk	2,4	57,1	57,1
	6 kk	3,0	71,4	14,3
	12 kk	4,2	100,0	28,6
Vakio-olosuhde	3 kk	1,7	44,7	44,7
	6 kk	2,3	60,5	15,8
	12 kk	3,8	100,0	39,5

**MN 158/2 Rapid 15**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	6,9	29,5	29,5
	2 kk	10,2	43,6	14,1
	3 kk	12,5	53,4	9,8
	6 kk	16,7	71,4	17,9
	12 kk	23,4	100,0	28,6
Ulko-olosuhde	3 kk	3,5	67,3	67,3
	6 kk	3,7	71,2	3,8
	12 kk	5,2	100,0	28,8
Vakio-olosuhde	3 kk	2,0	42,6	42,6
	6 kk	2,9	61,7	19,1
	12 kk	4,7	100,0	38,3

**MN 158/3 Rapid 25**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	8,4	29,3	29,3
	2 kk	13,3	46,3	17,1
	3 kk	14,1	49,1	2,8
	6 kk	20,0	69,7	20,6
	12 kk	28,7	100,0	30,3
Ulko-olosuhde	3 kk	4,0	62,5	62,5
	6 kk	4,8	75,0	12,5
	12 kk	6,4	100,0	25,0
Vakio-olosuhde	3 kk	2,6	44,1	44,1
	6 kk	4,0	67,8	23,7
	12 kk	5,9	100,0	32,2

**MN 158/4 Rapid 35**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	11,1	24,9	24,9
	2 kk	15,5	34,8	9,9
	3 kk	19,1	42,9	8,1
	6 kk	27,0	60,7	17,8
	12 kk	44,5	100,0	39,3
Ulko-olosuhde	3 kk	4,3	55,1	55,1
	6 kk	5,7	73,1	17,9
	12 kk	7,8	100,0	26,9
Vakio-olosuhde	3 kk	3,5	46,1	46,1
	6 kk	4,9	64,5	18,4
	12 kk	7,6	100,0	35,5



**MN 158/5 Rapid**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	2,3	25,3	25,3
	2 kk	4,3	47,3	22,0
	3 kk	4,6	50,5	3,3
	6 kk	6,8	74,7	24,2
	12 kk	9,1	100,0	25,3
Ulko-olosuhde	3 kk	1,0	62,5	62,5
	6 kk	1,2	75,0	12,5
	12 kk	1,6	100,0	25,0
Vakio-olosuhde	3 kk	0,6	37,5	37,5
	6 kk	1,1	68,8	31,3
	12 kk	1,6	100,0	31,3

**MN 158/6 Rapid 15**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	3,1	29,8	29,8
	2 kk	4,2	40,4	10,6
	3 kk	5,9	56,7	16,3
	6 kk	7,4	71,2	14,4
	12 kk	10,4	100,0	28,8
Ulko-olosuhde	3 kk	1,2	66,7	66,7
	6 kk	1,4	77,8	11,1
	12 kk	1,8	100,0	22,2
Vakio-olosuhde	3 kk	0,6	35,3	35,3
	6 kk	1,3	76,5	41,2
	12 kk	1,7	100,0	23,5

**MN 158/7 Rapid**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	4,7	32,0	32,0
	2 kk	6,6	44,9	12,9
	3 kk	7,2	49,0	4,1
	6 kk	10,8	73,5	24,5
	12 kk	14,7	100,0	26,5
Ulko-olosuhde	3 kk	1,5	60,0	60,0
	6 kk	2,0	80,0	20,0
	12 kk	2,5	100,0	20,0
Vakio-olosuhde	3 kk	1,3	46,4	46,4
	6 kk	2,1	75,0	28,6
	12 kk	2,8	100,0	25,0

**MN 158/8**

Olosuhde	Aika	Karbonatisoituminen mm	Karbonatisoitumisaste %	Muutos %-yks
Pikakoe	1 kk	6,7	32,4	32,4
	2 kk	8,5	41,1	8,7
	3 kk	11,1	53,6	12,6
	6 kk	15,4	74,4	20,8
	12 kk	20,7	100,0	25,6
Ulko-olosuhde	3 kk	2,5	58,1	58,1
	6 kk	3,3	76,7	18,6
	12 kk	4,3	100,0	23,3
Vakio-olosuhde	3 kk	2,0	43,5	43,5
	6 kk	3,0	65,2	21,7
	12 kk	4,6	100,0	34,8