



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tero Saarenmäki

ITSEKORJAUTUVA BETONI JA SEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET

Tekniikka
2020

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tero Saarenmäki
Opinnäytetyön nimi	Itsekorjautuva betoni ja sen käyttömahdollisuudet
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	95
Ohjaaja	Jari Lehtiö Arto Toorikka

Opinnäytetyössäni Itsekorjautuva betoni ja sen käyttömahdollisuudet tutustutaan kahteen erilaiseen itsekorjautuvaan betoniin, niiden ominaisuuksiin, käyttömahdollisuuksiin, sekä rajoituksiin. Opinnäytetyössäni pyritään kokoamaan hajallaan olevaa tietoa itsekorjautuvista betoneista, sekä kääntämään tietoa suomenkieliseksi. Opinnäytetyön aineistona olen käyttänyt betonialan kirjallisuutta, sekä monia eri itsekorjautuvaan betoniin liittyviä tutkimusraportteja. Tämän lisäksi olen käyttänyt muuta aiheesta löytyvää vähäistä tietoa.

Opinnäytetyön alussa esitetään tavanomaisen betonin ominaisuuksia, rasiustekijöitä ja niistä aiheutuvia vaurioita. Lisäksi tarkastellaan halkeamien eri korjaustapoja. Tämän jälkeen käydään läpi mitä on betonin itsestään korjautuminen ja miten se toimii. Betonin itsestään korjautumisen jälkeen siirrytään betonin itsekorjautumiseen ja verrataan, miten itsekorjautuminen eroaa itsestään korjautumisesta. Betonin itsekorjautumisen aiheesta tämä työ keskittyy tarkastelemaan bakteeripohjaista betonin itsekorjautumista, eli biobetonia ja SAP-kuituihin perustuvaa betonin itsestään korjautumista. Näistä menetelmistä käydään läpi niiden ominaisuudet, valmistus, sekä mahdollisia käyttökohteita.

Opinnäytetyön lopussa tarkastellaan betonin itsekorjautumisen eri menetelmien tämän hetkisiä, sekä mahdollisia ongelmia. Lopuksi myös pohditaan itsekorjautuvan betonin tulevaisuuden näkymiä ja itsekorjautuvan betonin kehitys- ja lisätutkimustarpeita.

ABSTRACT

Author	Tero Saarenmäki
Title	Self-Healing Concrete and Its Uses
Year	2020
Language	Finnish
Pages	95
Name of Supervisor	Jari Lehtiö Arto Toorikka

In this thesis, two different kinds of self-healing concrete and their properties, uses and their limitations of use are looked into. The thesis aims to compile and translate the scattered knowledge about self-healing concretes. For the thesis many literary sources and many different research papers about self-healing concrete we used as material. In addition to these, some other sources were used.

First ordinary concrete was researched, its properties, strains and the damages caused by said strains. Different methods of repairing cracks in concrete were also looked into. After this autonomous healing in concrete; how it works and how it differs from self-healing in concrete were examined. In self-healing this thesis focuses on examining the bacterial based self-healing concrete, also known as bio concrete and the autonomous healing enhanced by SAP-fibers. When looking into these methods their properties, manufacturing processes and their possible uses were studied.

Finally, the current and possible future problems of self-healing in concrete were studied. Outlook of the future of self-healing concrete and its development and research needs were also considered.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	11
1.1	Työn tausta.....	11
1.2	Tavoitteet	12
1.3	Toimeksiantaja.....	12
2	BETONI	13
2.1	Sementti	13
2.2	Runkoaine	13
2.3	Vesi	14
2.4	Mineraaliset seosaineet	15
2.5	Lisäaineet	17
2.6	Lujuus	18
2.7	Pakkasenkestävyys.....	18
2.8	Betonin rasitusluokat	19
2.8.1	X0-luokka: Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä.....	20
2.8.2	XC-luokka: Karbonatisoitumisen aiheuttama teräskorroosio	20
2.8.3	XD- ja XS-luokka: Kloridien aiheuttama teräskorroosio.....	22
2.8.4	XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus.....	23
2.8.5	XA-luokka: Kemiallinen rasitus	24
3	BETONIRAKENTEIDEN RASITUKSET JA VAURIOT	28
3.1	Betonin karbonatisoituminen	28
3.2	Raudoitteiden korroosio.....	29
3.3	Kloridit.....	30
3.4	Betonin rapautuminen	31
3.4.1	Pakkasrapautuminen	31
3.4.2	Ettringiittireaktio	33
3.4.3	Alkali-kiviainesreaktio	34
3.5	Betonin halkeilu	36
4	BETONIRAKENTEIDEN HALKEAMIEN KORJAAMINEN.....	38

4.1	Korjaamisen tavoite	38
4.2	Korjaustavat	39
4.2.1	Injektointi	39
4.2.2	Imeyttäminen.....	40
4.2.3	Pinnoitus.....	40
4.2.4	Halkeaman avaaminen ja laastipaikkaaminen	41
4.2.5	Halkeaman muuttaminen liikuntasaumaksi	41
5	ITSEKORJAUTUVAT BETONIT	42
5.1	Betonin itsestään korjautuminen.....	42
5.2	Itsekorjautuva betoni.....	44
6	BIOBETONI.....	45
6.1	Toimintaperiaate	45
6.2	Biominalisaatio	45
6.3	Kalsiumkarbonaatin saostuminen	46
6.3.1	Urean hydrolyysi.....	47
6.3.2	Metabolinen muunnos.....	48
6.3.3	Denitrifikaatio	49
6.4	Biobetonin valmistus	50
6.5	Bakteerin valinta	50
6.6	Itiömäiset bakteerit.....	51
6.7	Bakteerin ravinteiden valinta	52
6.7.1	Kalsiumsuolat.....	55
6.7.2	Urea.....	57
6.7.3	Hiivauute.....	58
6.7.4	Sokerit	59
6.7.5	Natrium	59
6.7.6	Proteiinit.....	59
6.7.7	Puskuriliuokset.....	60
6.8	Muut vaikuttavat tekijät	60
6.8.1	Lämpötila	60
6.8.2	Ympäristön pH-arvo.....	61
6.8.3	Kosteus.....	62

6.9	Bakteerien lisäys betoniin	63
6.9.1	Suora lisäys	63
6.9.2	Suojattu lisäys	64
6.9.3	Vaskulaarinen putkisto.....	67
6.10	Täysimittaiset testikohteet	70
6.10.1	Testikohde Belgiassa.....	71
6.10.2	Testikohde Iso-Britanniassa.....	72
6.10.3	Testikohteet Hollannissa	74
6.11	Käyttökohteet.....	75
6.12	Kehitystarpeet	76
6.12.1	Bakteerien tuotanto	76
6.12.2	Suojauksen ja betoniin lisäyksen optimointi.....	77
7	SAP-KUITUBETONI	79
7.1	Toimintaperiaate	79
7.2	Super-absorbentit polymeerit.....	79
7.2.1	Paisuminen	80
7.2.2	Halkeamien korjaus.....	81
7.3	Käyttökohteet.....	82
7.4	Kehitystarpeet	83
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	86
8.1	Johtopäätökset.....	86
8.2	Vertailu	87
8.3	Luotettavuuden arviointi.....	88
8.4	Pohdinta	89
	LÄHTEET.....	91

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Korroosion aiheuttamia vauriotyyppejä teräsbetonirakenteessa.....	29
Kuva 2. Pakkasrasituksen aiheuttamaa betonipinnan rapautumista. /9/.....	33
Kuva 3. Ettringiittikiteytymiä betonin huokosissa. /12/.....	34
Kuva 4. Alkali-kiviainesreaktion kulku. /12/.....	35
Kuva 5. Esimerkki alkali-kiviainesreaktion aiheuttamasta halkeilusta. /12/.....	35
Kuva 6. Betonin halkeamien erilaiset luonnolliset täyttymistavat. /18/.....	42
Kuva 7. Valomikroskooppikuva (40-kertainen suurennos) betonin itsekorjautumisesta. /17/.....	45
Kuva 8. Bakteerin rakenne ja mineraalien muodostus. /5/.....	46
Kuva 9. Bakteeri-itiön rakenne. /23/.....	51
Kuva 10. Endoitiön muodostuminen ja kehitysvaiheet. /24/.....	52
Kuva 11. Kalsiumlaktaatin vaikutus (per massaprosentti) betonin puristuslujuuteen. /22/.....	56
Kuva 12. Kalsiumlaktaatin vaikutus sementin kovettumisaikaan (per massaprosentti). /22/.....	57
Kuva 13. Hiivauutteen vaikutus betonin varhaiseen lujuuden muodostukseen. /16/	58
Kuva 14. Optimaalisten olosuhteiden ja pH-arvon vaikutus alkafiilisten bakteerien kasvulle. /22/.....	61
Kuva 15. Bakteerien ja ravinteiden lisäystavat betoniin. /5.....	63
Kuva 16. Kevytsorapellettejä irtonaisena, sekä betoniin sekoitettuna. /13/.....	65
Kuva 17. Vertailu perliitti- ja savipohjaisten pellettien tehokkuudesta Zhangin ym. suorittamassa testissä. /32/.....	66
Kuva 18. Yksinkertaistettu malli vaskulaarisen putkiston toiminnasta. /33/.....	68
Kuva 19. Periaatekuva huokoisen betonin täyttämistä putkistojärjestelmistä. /34/	70
Kuva 20. Bakteerien, sekä ravinteiden lisäys betonimassaan tarkistusluukun kautta. /35/.....	71
Kuva 21. Kattolaatan asennus tarkistuskammion päälle. /35/.....	72
Kuva 22. Periaatekuva kokeessa käytetystä tukimuurista. /36/.....	73

Kuva 23. Osittain itsekorjautuvasta betonista valmistettu vesisäiliö Rotterdamissa. /38/	75
Kuva 24. Green Basilisk-yrityksen itsekorjautumisen mahdollistava lisäaine. /29/	78
Kuva 25. Kuiva ja paisunut SAP-kuula. /44/	79
Kuva 26. Betonirakenteeseen muodostuneen halkeaman täyttyminen SAP-kuitujen avulla. /43/	82
Kuva 27. Päällystetty (oikealla) ja päällystämätön (vasemmalla) SAP-partikkeli. /47/	83
Kuva 28. Päällystetyn ja ei-päällystetyn SAP:n paisumisnopeudet. /47/	84
Kuva 29. Testattujen pH-herkkien SAP:ien paisumisen kuvaaja. /48/	85
Taulukko 1. Betonin valmistuksessa lisättävien seosaineiden enimmäismäärät prosentteina rakennussementin määrästä. /1/	16
Taulukko 2. XC-rasitusluokat, niiden määritelmät, sekä yleisimmät rakenteet. .	21
Taulukko 3. XD- ja XS-rasitusluokat, niiden määritelmät sekä yleisimmät rakenteet.	22
Taulukko 4. XF-rasitusluokat, niiden määritelmät sekä yleisimmät rakenteet....	24
Taulukko 5. XA-rasitusluokat, niiden määritelmät sekä yleisimmät rakenteet...	25
Taulukko 6. Luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttaman kemiallisen rasituksen rasitusluokkien raja-arvot.....	26
Taulukko 7. Yleiskatsaus osasta mikro-organismeista ja ravinteista, joita käytetty kalsiumkarbonaatin muodostamiseen betoniseoksissa. /5/	53
Taulukko 8. Koepaneelit, sekä niiden itsekorjautumismenetelmät. /36/	74
Taulukko 9. Itsekorjautuvien betonien vertailu.	87

TERMISTÖ, KÄSITTEET JA LYHENTEET

AA	Akrylaatti
AKR	Alkali-kiviainesreaktio on betonin kiviaineksessa tapahtuva sementin korkeasta alkalisuudesta aiheutuva kiviainesta rapauttava reaktio.
Alkalofiilinen	Organismi, jonka optimaalinen kasvu on pH-arvojen 9–12 välillä.
AM	Akryyliamidi
Anioni	Negatiivisesti varautunut ioni.
Biomassa	Elävien organismien määrä tietyssä populaatiossa tai ympäristössä tietyssä hetkenä
CERUP	Cyclic enriched ureolytic powder.
Elatusaine	Nestemäinen tai hyytelymäinen kasvualusta, jota käytetään pieneliöiden tai solujen kasvatukseen laboratorio-olosuhteissa.
Endoitiö	Bakteerisolun sisälle muodostuva itiö.
Hartree-energia	Energian yksikkö Hartree atomisessa järjestelmässä.
Homeostaasi	Tietyn systeemin, esimerkiksi elimistön sisällä vallitseva tasapaino.
Hydrolyysi	Aineiden kemiallinen hajoaminen tai hajottaminen, siten että vesimolekyyli osallistuu reaktioon.
Immobilisaatio	Aineen muuttuminen tai muuttaminen liikkumattomaan muotoon.

Kopolymeeri	Polymeeri, joka muodostuu kahdesta tai useammasta keskenään erilaisesta monomeeristä.
Monomeeri	Pieni molekyyli, joka voi sitoutua kemiallisesti toisiinsa monomeereihin muodostaen polymeerejä.
MUC	Mixed ureolytic culture. Ei-steriileissä olosuhteissa kasvatettu urealyttinen bakteerikanta.
Nukleaatio	Aineen olomuodon muutoksen ensimmäinen askel.
Reologia	Fluidien viskositeetteja tutkiva tieteenala.
Prekursori	Jonkin yhdisteen esiaste, esim. biokemiallisen reaktioketjun aine, joka ketjussa edeltää seuraavaa, yleensä fysiologisesti aktiivista ainetta.
Proteaasi	Proteiineja hajottava entsyymi
Puhdasviljelmä	Yhtä ainoaa organismia sisältävä viljelmä.
Puskuriliuos	Liuos, jonka pH ei sanottavasti muutu lisättäessä pieniä määriä happoa tai emästä.
PVA	Polyvinyylialkoholi. Vesiliukoinen synteettinen polymeeri.
Psykrofiili	Mikrobi, jonka optimikasvulämpötila on alle 15 °C
SAP	Superabsorbent polymer. Superabsorboiva polymeeri.
Ureaasi	Entsyymi, joka katalysoi urean hajoamista hiilidioksidiksi ja ammoniakiksi.
Viskositeetti	Suure, joka kuvastaa nesteen kykyä vastustaa virtaamista.

1 JOHDANTO

Betoni on kestävyytensä ja monipuolisuutensa vuoksi yksi maailman eniten käytetty rakennusmateriaali. Se on halpaa, helppoa valmistaa ja mikä tärkeintä kestävä. Yksi betonin käyttöikä ja kestävyyttä heikentävistä huonoista puolista on betonin taipumus halkeilla. Betoniin voi muodostua halkeamia jo kuivumisvaiheessa tai olosuhteiden rasituksen vuoksi. Halkeamat mahdollistavat, veden, kloridien ym. betonille haitallisten aineiden pääsyn betonin sisään, jossa ne vaurioittavat betonia. Vaurioitunut betoni täytyy joko korjata tai rakenne uusaa, tällöin tarvitaan lisää betonia. Tämä vaurioituneiden betonirakenteiden korjaaminen on maailman laajuisesti suuri kuluerä. /1, 2/

”Betoniteollisuus on tällä hetkellä yksi maailman suurimmista kasvihuonekaasujen tuottajista ja vastaa globaalisti noin 5–8 % kaikista kasvihuonepäästöistä. Näistä päästöistä 50–70 % on peräisin klinkkerin, sementin pääainesosan, valmistamisesta vapautuvasta CO₂:sta /3/.” Suomen sementtiteollisuus tuotti vuonna 2013 noin 1,28 % Suomen kaikista kasvihuonepäästöistä /4/. Hiilijalanjäljen pienentämiseksi on kokeiltu ja kokeillaan edelleen monenlaisia keinoja. Yksi keinoista on pidentää betonin käyttöikä, jolloin pitkällä aikavälillä uuden betonin valmistamisen tarve vähenee. /5/

Betonin käyttöiän pidentämiseen pyritään mm. itsekorjautuvan betonin avulla. Itsekorjautuvaa betonia on tutkittu ja kehitetty viimeiset 10 vuotta ja sen kehittämiseen ja tutkimiseen ovat Suomesta osallistuneet VTT ja Fescon, osana Euroopan maiden välistä Healcon-projektia /6/. Itsekorjautuvien betonien avulla pyritään korjaamaan betonin halkeamia heti niiden muodostuessa, sekä ylläpitämään betonin tiiveyttä. Tällöin betonille haitalliset aineet eivät pääse tunkeutumaan betoniin niin helposti, eivätkä täten pääse heikentämään betonin käyttöikä. /5/

1.1 Työn tausta

Opinnäytetyön aiheena on tutkia itsekorjautuvia betoneja, niiden ominaisuuksia, toimintaperiaatetta, sekä käyttömahdollisuuksia. Aihe on mielenkiintoinen, sekä hyödyllinen, sillä itsekorjautuva betoni on Suomessa vielä suhteellisen tuntematon

materiaali. Aiheesta ei löydy paljoa tietoa suomeksi, sillä itsekorjautuvat betonit ovat rakennusmateriaalina suhteellisen uusia, eivätkä ne ole vielä kaupallisessa käytössä. /7/

Opinnäytetyön alussa tullaan käymään läpi betonin perusteita, betonin vaurioitumismekanismia, sekä vaurioiden korjaustapoja. Itsekorjautuvan betonin osalta opinnäytetyössä keskitytään bakteeripohjaiseen itsekorjautumiseen eli ns. biobetoniin, sekä superabsorboiviin polymeereihin perustuvaan betonin itsestään korjautumiseen. Tällä hetkellä näillä vaihtoehdoilla on suurimmat todennäköisyydet onnistua saavuttamaan useita kertoja toimiva itsestään korjautuminen, kertakäyttöisen itsekorjautumisen sijaan. /7/

1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on laatia tutkielma, joka kerää yhteen ja kääntää suomeksi betonin itsekorjautumisen erilaisista menetelmistä löytyvää tietoa. Työn tavoitteena on myös antaa suunnittelijoille ja rakennuttajille tietoa itsekorjautuvien betonien ominaisuuksista, käyttömahdollisuuksista, käyttöä rajoittavista tekijöistä, sekä itsekorjautuvan betonin mahdollisista ongelmista. /7/

1.3 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantaja Vahanen Rakennusfysiikka Oy on osa Vahanen-yhtiötä, joka koostuu kolmestatoista eri yhtiöstä. Vahanen Rakennusfysiikka on suomalainen rakennus- ja kiinteistöalan konsulttiyritys, joka tarjoaa asiakkailleen rakennusfysiikkaan ja rakennusten kuntotarkistuksiin liittyviä palveluita. Vahanen-yhtiöt perustettiin vuonna 1955 ja siihen kuuluu nykyään noin 500 asiantuntijaa. /8/

2 BETONI

Betoni on keinotekoisesti valmistettua kiveä. Betoni valmistetaan liittämällä irrallinen runkoaine veden ja jonkin sideaineen (yleensä sementti) avulla kiinteäksi ja kovaksi massaksi. Muihin perusrakennusmateriaaleihin verrattuna betonilla on tiettyjä ylivoimaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi rakenteen kestävyys (betonin lujuus, poikkileikkausten koko, raudoitteet) voidaan valita lähes vapaasti rakenteen eri kohtien rasitusten mukaan. /1/

Betoni koostuu sementistä, runkoaineesta, vedestä, sekä mahdollisista lisä- ja seosaineista. Betonin valmistustapa antaa laajat mahdollisuudet säädellä betonin ominaisuuksia, kuten lujuutta, muodonmuutoksia, säänkestävyyttä, tiiviyyttä tai läpäisevyyttä. /1/

Betonimassan, sekä kovettuneen betonin ominaisuudet riippuvat pääosin käytetyistä ainesosista. Käytettyjen ainesosien ominaisuuksia sekä keskinäistä suhdetta muuntelemalla saadaan muokattua betonin lopullisia ominaisuuksia. Lisäksi myös ainesosien laatu vaikuttaa valmistettuun betoniin. /1/

2.1 Sementti

Tavallinen sementti, eli portlandsementti on hienoksi jauhetun Portland klinkkerin ja kipsin seos. Klinkkerin raaka-aineita ovat: kalkkikivi eli kalsiumkarbonaatti (CaCO_3), piioksidi (SiO_2), rautaoksidi (FeO_2) ja alumiinioksidi (AlO_3). /1/

Sementin tärkein ominaisuus on sen kyky reagoida veden kanssa liimaksi, josta muodostuu veteen liukenematon materiaali. Betonissa tätä kovettunutta sementti-liiman osuutta kutsutaan sementtikiveksi. Sementtikivi sitoo betonin runkoaineet toisiinsa ja täyttää rakeiden välille jäävää tyhjää tilaa. /1/

2.2 Runkoaine

Pääosa betonin massasta, jopa 65–80 % on runkoainetta. Runkoaineella on suuri merkitys betonin lujuuden määräytymisessä. Tavallisin runkoaine betonin valmistamisessa on luonnon kiviaines, luonnon muokkaamana tai murskaamalla

valmistettuna. Hyvä betonisora sisältää noin 30 % tyhjää tilaa. Tällaisen soran tilavuuspaino on noin $1\,850\text{ kg/m}^3$. Tämän kaltaista raekooltaan optimaalista luonnonsoraa löytyy harvoin, joten yleensä betonissa käytetty sora valmistetaan yhdistelemällä erirakeisia kiviaineksia, kuten soraa, hiekka, sekä filleriä. Rakeisuus vaikuttaa merkittävästi betonin ominaisuuksiin. Mikäli betonissa käytetyn runkoaineen rakeisuus on sopiva, tulee betonimassasta hyvin tiivistyvä ja koossapysyvä. Tällöin betonia valmistessa voidaan käyttää paljon runkoainetta ja vain vähän sementtiliimaa. /1/

Betonimassassa käytetty runkoaine ei saa sisältää betonin ominaisuuksia heikentäviä aineita haitallisissa määrissä. Näitä haitallisia aineita ovat esimerkiksi humus, liete sekä alkaliset kiviainekset. Alkaliset kiviainekset betonissa voivat johtaa alkali-kiviainesreaktioon (AKR), jonka seurauksena betonirakenne alkaa rapautumaan. Humuksen sisältämät humushapot ovat haitallisia sementin kovettumisreaktiolle ja huonoimmassa tapauksessa saattavat estää kovettumisen kokonaan. Liette voi esiintyä betonissa käytetyn runkoaineen suurirakeisten kivien pinnalla. Lietteen haitallisuus betonimassalle on täysin riippuvainen sen määrästä, sekä esiintymistavasta. Runkoaineen pinnalla esiintyessä se huonontaa sementtikiven ja runkoaineen tartuntaa toisiinsa. Jos se taas on irrallisena, eikä sitä esiinny liikaa, voi se jopa parantaa betonin ominaisuuksia. /1, 9/

2.3 Vesi

Betonin sekoittamiseen käytettävän veden tulee olla puhdasta, eikä se saa sisältää paljoa epäpuhtauksia tai haitallisia aineita. Näitä ovat mm. humus, sulfaatit ja kloridit. Liian suurina pitoisuuksina esiintyessään epäpuhtaudet ja haitalliset aineet vaikuttavat haitallisesti sementin sitoutumiseen tai huonontavat betonin lujuutta tai säilyvyyttä. ”Yleisenä periaatteena voidaan pitää, että juotavaksi kelpaava vesi soveltuu myös betoniin” /1/.

Merivettä voidaan joissain tapauksissa pakon edessä käyttää betonin valmistamiseen, lukuun ottamatta esijännitetyjä rakenteita. Esijännitetyissä rakenteissa merivettä ei voida käyttää ollenkaan korroosiovaaran vuoksi. /1/

Lievästi humuspitoisia vesiä voidaan myös joskus käyttää, mutta suovesiä tai jätevesiä ei tulisi käyttää betonin valmistamisessa. Mikäli on epäilyä veden soveltuvuudesta betonin valmistamiseen, tulee se tutkia kemiallisesti. Vesi on kelpollista betonin valmistamisessa käytettäväksi, edellyttäen että siinä on:

- pH vähintään 5
- sulfaatteja alle 0,5 %
- klorideja alle 0,6 %
- magnesium suoloja alle 0,7 %
- suoloja yhteensä alle 3,7 %. /1/

2.4 Mineraaliset seosaineet

Betonin valmistamisen sideainekustannuksia voidaan pienentää käyttämällä betonin valmistuksessa seosaineita (Taulukko 1). Kustannusten pienennyksen lisäksi seosaineita voidaan käyttää, kun halutaan muokata tai parantaa betonin ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi sulfaatinkestävyys, alhainen hydraatiolämpö ja vesitiiveys. Suomessa yleisimmin käytettyjä seosaineita ovat lentotuhka, masuunikuona sekä silika. /1/

Taulukko 1. Betonin valmistuksessa lisättävien seosaineiden enimmäismäärät prosentteina rakennussementin määrästä. /1/

Seosaineet	Rakennussementti			
	Portland-sementti CEM I	Portland-sementti CEM II A	Portland-seossementti CEM II B	Masuuni-sementti CEM III
Lentotuhka ¹⁾	60 %	35 %	10 %	-
Masuunikuonajauhe	350 %	200 %	50 %	-
Silika	10 %	10 %	5 %	-
Lentotuhka ja masuunikuonajauhe	yhteensä enintään 60 %	yhteensä enintään 35 %	yhteensä enintään 10 %	-
Lentotuhka L ja silika S	L enintään (60-3 S) % ja S enintään 10 %	L enintään (35-3 S) % ja S enintään 10 %	Ei seosaineiden käyttöä	
Masuunikuonajauhe M ja silika S	M enintään (350-16 S) % ja S enintään 10 %	M enintään (200-16 S) % ja S enintään 10 %	Ei seosaineiden käyttöä	

¹⁾ Valmistettaessa pakkasenkestävää betonia huokostinta käyttäen saadaan lentotuhkaa lisätä vain käytettäessä sementtityyppejä CEM I ja CEM II A. Lentotuhkan tulee tällöin olla A-luokan tuuhkaa ja sen sallittu enimmäismäärä on 25 % sementin määrästä, kuitenkin siten, että lentotuhkan kokonaismäärä (= lisättävä + sementin sisältämä lentotuhka) ei saa ylittää 20 % sideaineen (= sementti + lisättävä lentotuhka) määrästä.

Lentotuhka on kivihiilen poltosta muodostuvan palokaasun osa-aine. Lentotuhkaa voidaan betonissa käyttää joko hienoaineena tai sillä voidaan korvata osa sementistä. Lentotuhkaa käytettäessä betonin vedentarve ja sen hydrataatiolämpö pienenevät. Hydrataatiolämmön pienenemisen vuoksi lentotuhkaa ei suositella käytettäväksi talvibetonoinnissa tai lattiavaluissa, koska sitoutuminen ja lujittuminen hidastuvat oleellisesti. /10/

Masuunikuona on raudan valmistuksen yhteydessä muodostuva yhdiste, jolla voidaan betonia valmistaessa korvata osa portlandsementistä. Masuunikuonajauhetta voidaan käyttää notkistamaan betonia ja se parantaa betonin sulfaatinkestävyyttä. Lisäksi masuunikuonan käyttö betonin valmistuksessa vähentää huomattavasti hydrataatiolämpöä, tämän vuoksi sitä käytetään usein massiivirakenteita valettaessa.

Masuunikuonan käyttö yleensä alentaa betonin varhaislujuutta, mutta kasvattaa sen myöhäsiän lujuutta. /10/

Silikaa muodostuu piitä, sekä ferropiitä valmistettaessa. Silika on erittäin hienojakoinen aine ja sitä voidaan käyttää parantamaan betonin lujuutta, kemiallista kestävyyttä, tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä. Silikan käyttö kuitenkin nostaa betonin veden tarvetta, joten sitä käytettäessä on aina käytettävä notkistavia lisäaineita. Suomen betoniteollisuudessa sitä on tavallisesti käytetty korkealujuusbetoneja valmistettaessa. /10/

2.5 Lisäaineet

Lisäaineet ovat betonimassaan sekoitettuja kemikaaleja, joilla pyritään parantamaan betonin tiettyjä ominaisuuksia, rakennetta ja valmistuksen taloudellisuutta. Peruseriaatteena on kuitenkin, että betoni olisi hyvänlaatuista betonia ilman lisäaineita-kin. Lisäaineet ryhmitellään seuraavalla tavalla:

- N = notkistimet (notkeuttavat betonimassan)
- Nt, N = tehonotkistin tai nesteytin, tehokkuus tavanomaisia notkistimia suurempi
- L = huokostimet (lisäävät betonimassan ilmahuokosmäärää)
- K = kiihdyttimet (nopeuttavat betonimassan kovettumista ja yleensä lyhentävät sitoutumisaikaa)
- H = hidastimet (hidastavat betonimassan sitoutumista ja kovettumista)
- T = tiivistysaineet (pienentävät nesteiden läpäisevyyttä betonissa)
- I = injektioaineet (ovat pääasiassa betonimassaa notkistavia mutta myös lievästi hidastavia)
- V = väriaineet (pigmenttejä käytetään betonin värjäämiseen). /1/

Lisäaineiden ryhmittely tehdään aineiden päävaikutuksen tai käyttötarkoituksen perusteella. Osalla lisäaineista on kuitenkin useita tehovaikutuksia, esimerkiksi notkistimet usein hidastavat betonin sitoutumisen alkamista. /1/

”Lisäaineiden vaikutus perustuu sekä fysikaalisiin, että kemiallisiin ominaisuuksiin. Niiden käytön tulisi aina perustua riittäviin ennakkokokeisiin. Kun sekoitetaan kahta lisäainetta keskenään, ne voivat hävittää toistensa vaikutukset.” /1/

2.6 Lujuus

Betonin tärkein ominaisuus on sen hyvä puristuslujuus. Tämän lujuuden yksikkönä käytetään yleensä megapascalia (MPa) ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$). Betonin lujuus arvostellaan yleensä 28 vuorokauden iässä. Lujuus määritetään puristuskokeessa sivultaan 150 mm koekuutiosta. Betoni jaetaan lujuutensa perusteella puristuslujuusluokkiin. Betonin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- sementin laatu
- sementin määrä
- vesi-sementtisuhte
- runkoaineen laatu ja rakeisuus
- massan kovettumisikä
- kovettumislämpötila
- seosaineet
- lisäaineet
- veden laatu
- massan tiivistys. /1/

Betonin vetolujuus on huomattavasti puristuslujuutta pienempi, eli noin 1/10 puristuslujuudesta. Betonirakenteissa vetolujuuden kestävyyttä pyritään parantamaan raudoituksia käyttämällä. /1/

2.7 Pakkaskestävyys

Yksi tärkeimmistä betonin pakkaskestävyyttä säätelevistä tekijöistä on betonin huokoisuus. Betonin huokosrakennetta säätelemällä pystytään vaikuttamaan sen pakkaskestävyyteen. Betonin huokosrakenteessa on geeli- ja kapillaarihuokosia.

Geelihuokosia on sementtigelin tilavuudesta noin neljännes. Ne ovat kooltaan vain muutamia nanometrejä ja normaaliolosuhteissa aina veden täyttämiä. Vesitäytteestä

huolimatta ne ovat pakkasenkeston kannalta ongelmattomia, sillä normaaleissa ulko-olosuhteissa vesi ei pienen huokoskoon vuoksi jäädy. /11/

Kapillaarihuokokset ovat ongelmallisia pakkaskestävyyden kannalta. Kapillaarihuokosissa oleva tai niihin imeytynyt vesi jäätyy heti 0 °C:n alapuolella, mikäli vedessä ei ole epäpuhtauksia, eikä alijäähtymistä tapahdu. Sementtikivessä olevien kapillaarihuokosten osuus koko tilavuudesta on riippuvainen betonin vesi-sementtisuhteesta sekä sementin hydrataatioasteesta. Joten pyrittäessä betonin hyvään pakkasenkettiin tulee se valmistaa käyttäen mahdollisimman pientä vesi-sementtisuhdetta. Tällöin betonin kapillaarihuokoisuus jää mahdollisimman alhaiseksi. Lisäksi hyvällä jälkihoidolla saadaan betonin hydrataatioaste mahdollisimman korkeaksi. /11/

Betonin pakkaskestävyyteen vaikuttamiseen tehokkain tapa on betonin huokostaminen. Käyttämällä huokostavia lisäaineita saadaan betoniin muodostumaan noin 0,01...0,5 mm kokoisia huokosia, jotka eivät täyty vedellä kapillaarisesta imusta. Kun kapillaarihuokosissa oleva vesi jäätyy, pääsee muodostunut paine purkautumaan näihin ilmahuokostiloihin (hydraulisen paineen teoria) tai muodostuneet jääkiteet voivat kasvaa painetta aiheuttamatta näissä ilmahuokosissa (jääkiteen kasvun teoria). Tällöin pakkasvaurioita ei pääse muodostumaan, mikäli ilmahuokosia on tarpeeksi paljon ja tarpeeksi lähellä toisiaan. /11/

2.8 Betonin rasitusluokat

Betonin rasitusluokilla pyritään kuvaamaan, minkälaiseen ympäristöön suunniteltu betonirakenne tullaan rakentamaan. Betonirakenteille valitun rasitusluokan tulisi vastata mahdollisimman hyvin sen ympäristön todellisia rasituksia, sekä olosuhteita. Betonirakenteen rasitusluokkia valitessa tulee välttää ylimitoitusta. Turha rasitusluokkien ylimitoittaminen kasvattaa rakentamisen kustannuksia. Kustannusten nousun lisäksi tarpeettoman korkean rasitusluokan valinta voi aiheuttaa betonin muiden ominaisuuksien heikentymistä ja tätä kautta heikentää rakenteen laatua. ”Esimerkkinä edellisestä on liian ankara kloridirasitus (XD tai XS), jonka seurauksena betonipiteet kasvavat ja betonipintojen halkeiluriski kasvaa” /11/.

2.8.1 X0-luokka: Ei korroosion tai syöpmisrasituksen riskiä

”Luokkaan kuuluvat betonit, joissa ympäristöolosuhteet eivät mitenkään rajoita rakenteen käyttöikä. Tällaisia rakenteita ovat tyypillisesti raudoittamattomat tai raudoitetut, hyvin kuivissa olosuhteissa, ei-pakkasrasitukselle alttiina olevat rakenteet.” /11/ Luokkaan kuuluvia rakenteita ovat esimerkiksi kuiviin sisätiloihin tulevat rakenteet.

2.8.2 XC-luokka: Karbonatisoitumisen aiheuttama teräskorroosio

Luokkaan kuuluvat betonit, jotka joutuvat ympäristöolosuhteidensa vuoksi alttiiksi betonin karbonatisoitumiselle ja sen myötä myös betonin terästen korroosiolle. Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 2) on koottu XC-rasitusluokkien määritelmät, sekä yleisimmät rakenteet, jotka kuuluvat kyseisiin luokkiin. /11/

Taulukko 2. XC-rasitusluokat, niiden määritelmät, sekä yleisimmät rakenteet.

Rasitusluokka, määritelmä	Tyypilliset rakenteet
XC1: Kuiva tai jatkuvasti märkä	<p>Rakenteet, joissa mahdollisesta nopeasta karbonisoitumisesta huolimatta terästen ruostuminen on hyvin hidasta, kuten kohtuullisen kuivat sisätilat. Lisäksi rakenteet, joissa karbonatisoituminen on kosteusolosuhteista johtuen hyvin hidasta, esimerkiksi vedenalaiset rakenteet.</p> <p>Tyypillisiä rakenteita ovat sisätilat, joissa on alhainen kosteuspitoisuus tai jatkuvasti vedenpinnan alla olevat rakenteet. Kerroksellisen seinärakenteen sisäkuori.</p> <p>Koska kyseisessä rasitusluokassa ei betonille ole vauriomekanismeja, myöskään varsinaista käyttöikäsuunnittelua ei voida tehdä. Rakenteen käyttöäksi voidaan valita 50, 100 tai 200 vuotta.</p>
XC2: Kosteaa, harvoin kuiva	<p>Pitkiä aikoja veden kanssa kosketuksissa olevat rakenteet. Rakenteet poikkeavat XC1:n kosteista rakenteista siinä, että XC2:ssa rakenteet voivat aika-ajoin myös kuivua. Karbonatisoituminen on hidasta näissä olosuhteissa.</p> <p>Tyypillisiä rakenteita ovat useimmat perustukset, siltojen perustukset ja siirtymälaatat.</p>
XC3: Kohtalaisen kostea	<p>Rakenteet, jotka ovat kosteassa ympäristössä, mutta eivät kuitenkaan kyllästy vedellä- Olosuhteet ovat karbonisoitumisen kannalta pahimmat mahdolliset. Luokka poikkeaa XC4:stä siinä, että rakenteen mahdollinen jäätyminen ja sulaminen eivät alhaisesta vedelläkyllästy misasteesta johtuen aiheuta betoniin pakkasrasitusta.</p> <p>Tyypillisiä rakenteita ovat sateelta suojatut julkisivut, muut pystysuorat ulkona olevat, sateelta suojattujen rakenteiden tai vaakasuorien rakenteiden alapinnat. Uimahallit, jatkuvasti käytössä olevat saunat, suurkeittiöt monet teollisuusrakennukset. Siltojen sateelta suojatut päällysrakenteen osat kuten kansilaatan alapinnat ja palkit, sateelta suojatut pilarit, tukimuurit ja maa- ja välituet.</p>
XC4: Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen	<p>Rakenteet, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, mutta eivät kuulu ympäristöluokkaan XC2. Karbonisoitumisen kannalta teräkset ovat paremmassa suojassa betonin sisällä, kuin edellä esitetyssä luokassa XC3. Ero XC3 ja XC4 luokkien välillä syntyy siitä, että Suomessa kyseiset rakenteet joutuvat väistämättä myös pakkasrasitukselle alttiiksi. Pakkasrasitus tulee huomioida huokoistamalla betoni.</p> <p>Tyypillisiä rakenteita ovat parvekelaatat, sateelle alttiit julkisivut, sokkelit. Siltojen sateelle alttiit osat, kuten reunapalkit, maatukien sivupinnat, tukimuri, pilarit.</p>

2.8.3 XD- ja XS-luokka: Kloridien aiheuttama teräskorroosio

Betonirakenteet, jotka joutuvat klorideista aiheutuneelle korroosiolle alttiiksi kuuluvat luokkiin XD ja XS riippuen, mikä on rakennetta uhkaavien kloridien lähde. Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 3) on koottuna XD- ja XS-luokkien määritelmät sekä yleisimmät rakenteet näistä luokista. /11/

Taulukko 3. XD- ja XS-rasitusluokat, niiden määritelmät sekä yleisimmät rakenteet.

Rasitusluokka, määritelmä	Tyypilliset rakenteet
XD1: Kohtalaisen kostea ympäristö, kloridi muualta kuin merivedestä	Rakenteet, joissa betonia rasittavat ilmavirran mukana tulevat kloridipitoiset aineet Tyypillisiä rakenteita ovat meluseinät tien vieressä tai uimahallien sisätilat.
XD2: Kostea, harvoin kuiva, kloridi muualta kuin merivedestä	Rakenteet, jotka ovat suorassa kosketuksessa klorideja sisältävän nesteen kanssa. Tyypiesimerkki on rakenne, jota rasittaa klorideja sisältävät teollisuusvedet tai uima-altaat. Tyypillisiä rakenteita ovat myös pysäköintitilat, lämmitetyt autotallit (pysäköintilaitokset).
XD3: Kostea ja kuiva vaihteleva kloridi muualta kuin merivedestä	Suolaroiskeille alttiit rakenteet, jotka ovat osan aikaa märkänä, mutta pääsevät aina välillä kuivumaan. Tällainen kuivan ja kostean olotilan vaihtelu on suolojen kerääntymisen kannalta pahin mahdollinen tilanne. Tyypillisiä rakenteita ovat siltojen tiesuoloille alttiit osat kuten reunapalkit, siirtymälaatat, betonikaiteet, suolasumulle alttiit siltapilarit, sekä väli- ja maatuet.
XS1: Betonia rasittavat tuulen mukana merestä tulevat kloridit, ei suoraa kosketusta veteen	Rakenteet avomeren rannalla. Maasto-olosuhteista riippuen maksimietäisyys merestä voi olla 200m. Mikäli rakenteen ja merialueen välillä on esteitä, voi tätä etäisyyttä lähempänäkin oleva rakenne olla kuulumatta ko. rasitusluokkaan. Tyypillisiä rakenteita ovat avomeren äärellä sijaitsevat satamarakennukset ja muut rakenteet.
XS2: Meriveden alla	Rakenteet ovat kloridipitoisen veden kanssa jatkuvassa kosketuksissa.

	Tyypillisiä rakenteita ovat siltojen ja laitureiden merivedenalaiset osat.
XS3: Vesirajassa ja roiskevyöhykkeellä	Merirakenteiden ja siltojen meriveden vaihtelu- ja roiske-vaikutuksille alttiit osat kuten välituet.

2.8.4 XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus

Luokkaan kuuluvat betonirakenteet, jotka joutuvat ympäristöolosuhteidensa vuoksi alttiiksi jäätymis- ja sulamisrasituksilla. Tämän lisäksi XF-luokan betonirakenteet voivat joutua alttiiksi myös erilaisille jäänsulatuskemikaaleille. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4) on esitetty tiivistetysti XF-rasitusluokat, sekä niiden tyypillisiä rakenteita. /11/

Taulukko 4. XF-rasitusluokat, niiden määritelmät sekä yleisimmät rakenteet.

Rasitusluokka, määritelmä	Tyypilliset rakenteet
XF1: Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusainetta	Jäätymiselle alttiit rakenteet, jotka kastuttuaan myös kuivuvat kohtuullisen nopeasti. Tällaisia ovat tyypillisesti sateelle alttiit pystysuorat betonipinnat. Tyypillisiä rakenteita ovat julkisivut, sokkelit. Suolaamattomien teiden siltojen osat kuten kansilaatta, palkit maa- ja välituet.
XF2: Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Rakenteet, joiden kastuminen ja kuivuminen on samanlaista kuin rasitusluokassa XF1, mutta ne ovat lisäksi alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamille jäänsulatusaineille. Tyypillisiä rakenteita ovat meluseinät ja sokkelit tien vieressä sekä suolattavien teiden siltojen osat kuten päällysrakenteen palkit ja kansilaatat, maa- ja välituet.
XF3: Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Rakenteet, joiden vedellä kyllästyminen saattaa jäätyessään olla korkea. Tällaisia ovat tyypillisesti sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat. Ulkona olevat vaakasuorien rakenteiden alapinnat saattavat myös kuulua tähän luokkaan. Tyypillisiä rakenteita ovat parvekkeet, siltapilarit ja muut rakenteet sisävesien vesirajassa, patorakenteet, makean veden altaat. Samoin suolaamattomien teiden siltojen osat kuten reunapalkit, siirtymälaatat, pilarimaiset välituet, rengaskehäsiltojen perustuslaatat ja vesistösiltojen suojaamattomat vedenvaihtelualueen rakenteet.
XF4: Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Kosteusolosuhteiltaan XF3.a vastaavat rakenteet, mutta lisäksi betonia rasittavat suorat jäänsulatusaineroiskeet. Tyypillisiä rakenteita ovat jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat ja jäänsulatusaineille alttiit teiden siltojen kannet.

2.8.5 XA-luokka: Kemiallinen rasitus

Betonirakenteille vaaralliset yhdisteet vaurioittavat betonia liuottamalla sementin hydrataatiotuotteita, heikentävät hydrataatiotuotteiden ominaisuuksia ionivaihdon

avulla tai paisuttavat hydrataatiotuotteita ja täten vaurioittavat rakennetta. Tavallimmat betonille haitalliset aineet on luokiteltu pitoisuutensa perusteella eri luokkiin (Taulukko 5). /11/

- Sulfaatti reagoi sementin sisältämän trikalsiumaluminaatin (C_3A) ja sen hydrataatiotuotteiden kanssa muodostaen ettringiittiä, joka paisuttaa betonia suuren tilavuutensa vuoksi. Kovettunut betoni ei kestä tätä paisumista, vaan vaurioituu. Ettringiitti täyttää huokostetun betonin suojahuokosia heikentäen tällöin betonin pakkasen kestävyyttä. Varmin tapa välttyä vaurioilta on käyttää sulfaatinkestävää sideainetta. /11/
- Hapot liuottavat sekä sementtiä, että sementin hydrataatiotuotteita. Kiviaineksena mahdollisesti käytetty kalkkikivi liukenee happoihin. ”Luokitus tehdään liuoksen happamuusasteen eli pH:n mukaan. Vesiliuos on sitä happamampaa ja samalla aggressiivisempaa, mitä alhaisempi pH sillä on.” /11/
- Aggressiivisen CO_2 :n vahingollisuus johtuu hiilidioksidin vesiliuoksen kyvystä liuottaa sementin kalsiumyhdisteitä. Samalla tavalla toimii varsinkin jätevesissä esiintyvä ammonium-ioni (NH_4^+). Magnesium-ioni (Mg^{2+}) muuttaa ionivaihdon avulla kalsiumyhdisteitä magnesiumyhdisteiksi, joilta puuttuvat alkuperäiset sideaineominaisuudet. Tällöin magnesium myös saostuu betonin huokosiin $Mg(OH)_2$ yhdisteenä. /11/

Taulukko 5. XA-rasitusluokat, niiden määritelmät sekä yleisimmät rakenteet.

Rasitusluokka, määritelmä	Tyypilliset rakenteet
XA1: Kemiallisesti heikosti aggressiivinen ympäristö	Taulukon 6 mukaisesti. Osa maatalousrakenteista
XA2: Kemiallisesti kohtalaisesti aggressiivinen ympäristö	Taulukon 6 mukaisesti. Puukuivaamot, savupiippujen yläosat
XA3: Kemiallisesti voimakkaasti aggressiivinen ympäristö	Taulukon 6 mukaisesti. Maatalousrakenteet, jotka ovat alttiina urealle, maidolle tai lannoitteille.

Taulukko 6. Luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttaman kemiallisen rasisituksen rasisitusluokkien raja-arvot.

Kemiallinen ominaisuus	Koemenetelmä	XA1	XA2	XA3
Pohjavesi				
SO ₄ ²⁻ mg/l	SFS-EN 196-2	≥ 200 ja ≤ 600	> 600 ja ≤ 3000	> 3000 ja ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥ 4,0
CO ₂ mg/l aggressiivinen	SFS-EN 13577	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymiseen asti
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg ²⁺ mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 ja ≤ 1000	> 1000 ja ≤ 3000	> 3000 kyllästymiseen asti
Maaperä				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^(a) kokonaismäärä	SFS-EN 196-2 ^(b)	≥ 2000 ja ≤ 3000 ^(c)	> 3000 ^(c) ja ≤ 12000	< 12000 ja ≤ 24000
Happamuus Gullyn mukaisesti ml/kg	prEN 16502	> 200	Ei esiinny käytännössä	
^{a)} Savimaat, joiden läpäisevyys on pienempi kuin 10 ⁻⁵ m/s, voidaan luokitella alempaan luokkaan. ^{b)} Testausmenetelmä periaate on uutta SO ₄ ²⁻ suolahapolla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vesiuuttoa, jos betonin käyttöpaikalla on siitä kokemusta. ^{c)} Raja-arvo 3000 mg/kg lasketaan arvoon 2000 mg/kg, jos betonin toistuva kuivuminen ja kastuminen tai kapillaarinen kastuminen voivat aiheuttaa betoniin sulfaatti-ionien kasaantumisriskin.				

Suomessa esiintyvät happamat sulfaattimaat ovat potentiaalisesti aggressiivisia betonirakenteille. /11/ ”Happamilla sulfaattimailla tarkoitetaan maaperässä luonnollisesti esiintyviä rikkiä sisältäviä sedimenttejä (sulfidisedimenttejä), joista vapautuu happamuuden seurauksena happamuutta sekä metalleja maaperään ja vesistöihin /11/.” Happamia sulfaattimaita esiintyy Suomessa pääosin rannikkoalueilla. Jos rakennuspaikkana on mahdollisesti happamia sulfaatteja sisältävä maa-alue, tulee maaperä tutkia tarkemmin. Happamat sulfaattipitoiset maat ovat erityisen

riskialttiita rakenteille, joissa betonirakenne on suorassa kontaktissa maaperän kanssa, esimerkiksi paalut. /11/

”Betonin rasitusluokka valitaan taulukon 6 perusteella. Sulfaattipitoisuuden ollessa kohtuullinen (rasitusluokka XA1), vaatimuksena on vesi-betoni-suhde. Voimakkaammin sulfaattipitoisessa ympäristössä sideaineena tulee käyttää joko SFS-EN 197-1 mukaista sulfaatin kestävästä sementistä (CEM I-SR3) tai sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä /11/.”

3 BETONIRAKENTEIDEN RASITUKSET JA VAURIOT

Joutuessaan säälle tai muille rasituksille alttiiksi, tapahtuu betonirakenteissa muutoksia, jotka heikentävät näiden rakenteiden ominaisuuksia. Rasitustekijöiden ankaruus on riippuvainen mm. rakennuksen sijainnista, ympäristöstä ja rakennuksen yksityiskohdista. Aluksi rakenteiden vaurioiden aiheuttamat haitat voivat olla rakenteen kestävyuden kannalta merkityksettömiä, mutta vaurioiden pahentuessa ne alkavat heikentämään rakennetta ja lyhentämään sen käyttöikää. Suomessa merkittävimmät betonirakenteisiin vaikuttavat turmeltumisolmiöt ovat betonin pakkasra-pautuminen, betonin raudoitteiden korroosio betonin karbonatisoitumisen seurauksena sekä raudoitteiden korroosio pienten peitepaksuuksien seurauksena. /9/

3.1 Betonin karbonatisoituminen

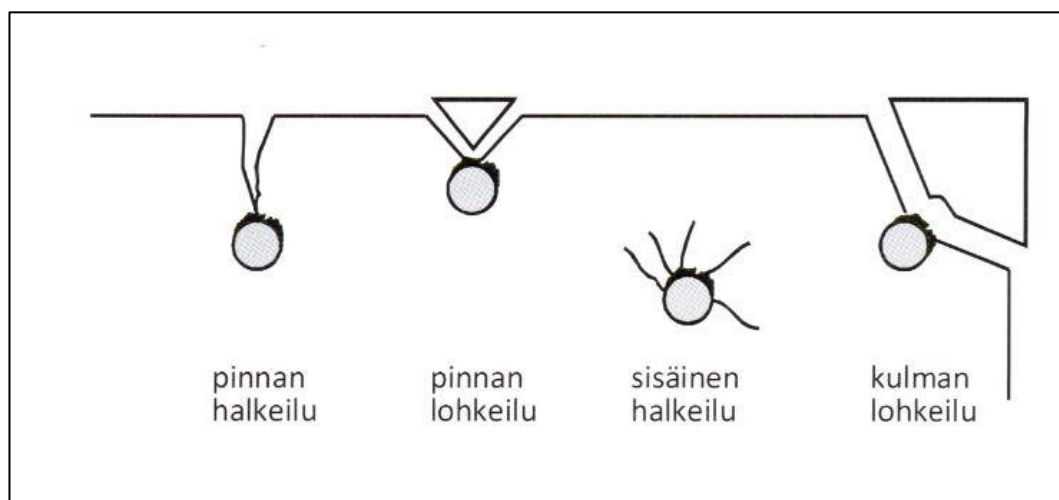
Karbonatisoitumiseksi sanotaan betonin neutraloitumisreaktiota. Betonin karbonatisoitumisessa ilman hiilidioksidi tunkeutuu betoniin ja reagoi betonin kalsiumhydroksidin, sekä kalsiumsilikaattihydraattigeelin kanssa. Karbonatisoitumisen seurauksena betonirakenteiden pintakerrokset neutraloituvat. Reaktio etenee vähitellen rintamana betonin pinnasta alkaen syvemmälle. Neutraloituneen betonivyöhykkeen edettyä betonirakenteen raudoituksen läheisyyteen, alkaa terästen aktiivinen korroosio, mikäli muut korroosion edellytykset täyttyvät (hapen ja veden läsnäolo). Karbonatisoitumisen edetessä syvemmälle rakenteessa vaikeutuu hiilidioksidin pääsy karbonatisoitumisvyöhykkeelle. Tämän vuoksi karbonatisoitumisnopeus pienenee koko ajan ja voi jopa pysähtyä kokonaan tiiviissä betonissa. /9, 11/

Karbonatisoitumisen nopeus halkeamattomassa betonissa riippuu ennen kaikkea betonin tiiveydestä, kosteudesta, sekä kalsiumhydroksidipitoisuudesta. Betonin tiiveys määrittää sen, kuinka helposti ilman hiilidioksidi, sekä rikkiyhdisteet pääsevät tunkeutumaan betoniin. Betonin huokosrakenne ja kosteuspitoisuus vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti hiilidioksidi tunkeutuu betoniin. Kosteuspitoisuus vaikuttaa karbonatisoitumiseen siten, että huokosverkoston täyttyessä vedellä hiilidioksidin tunkeutuminen betoniin vähenee. Hyvin kuivissa olosuhteissa (RH alle 30 %) karbonatisoituminen pysähtyy kokonaan, koska reaktio voi tapahtua ainoastaan vesiliuoksessa. Kalsiumhydroksidipitoisuus määrittää kuinka paljon betoniin voi

hiilidioksidia sitoutua. Myös betonissa olevat ja siihen mahdollisesti muodostuvat halkeamat lisäävät hiilidioksidin tunkeutumista betoniin paikallisesti. Karbonatisoitumisen hidastaminen ja ehkäisy ovat välttämättömiä betonirakenteiden käyttöään pidentämiseen. /9, 11/

3.2 Raudotteiden korrosio

Betonirakenteen raudoituksessa tapahtuva korrosio on sähkökemiallinen ilmiö. Korroosiossa raudan yhdisteet pyrkivät muuttumaan takaisin alkuperäisiksi luonnossa esiintyviksi yhdisteiksi. Korroosion vuoksi raudoitteen pinnasta liukenee materiaalia, jolloin raudotteiden poikkipinta-ala pienenee ja sen seurauksena rakenteen kantavuus heikkenee. Betonirakenteissa korroosion vaikutukset näkyvät yleensä raudoitusta peittävän betonikerroksen halkeamina ja lohkeamina. Pinnan halkeilun ja lohkeilun lisäksi korrosio voi aiheuttaa teräsbetonirakenteissa myös sisäistä halkeilua (Kuva 1). /9, 11/



Kuva 1. Korroosion aiheuttamia vauriotyyppejä teräsbetonirakenteessa.

Betonissa olevat raudoituksen suuntaiset halkeamat ovat teräskorroosion kannalta raudoitusta vastaan kohtisuoria halkeamia vaarallisempia. Tällöin korrosio pääsee tapahtumaan laajemmalla alueella ja sen seurauksena betonipeitteen lohkeamisen riski on suurempi kuin vain paikallisesti tapahtuvassa korroosiossa. /11/

Betonin teräskorroosiota ehkäisevä vaikutus perustuu sekä sen antamaan fysikaaliseen, että kemialliseen suojavaikutukseen. Betoni hidastaa korroosion aiheuttavien

aineiden tunkeutumisen teräksen lähelle. Tämän fysikaalisen suojauksen tehokkuus on riippuvainen teräksiä suojaavan betonipeitteen paksuudesta ja tiheydestä, sekä sen mahdollisesta halkeilusta. /11/

”Kemiallinen suojavaikutus perustuu betonin luontaiseen emäksisyyteen ja teräksen kykyyn muodostaa pinnalleen tiivis oksidikalvo emäksisessä ympäristössä /4?”. Tämä oksidikalvo estää sähkökemiallisen korroosion eli ns. passiiviraudituksen. Sementin hydrataatiossa muodostunut kalsiumhydroksidi antaa betonille sen emäksisyyden. Betonissa olevat alkalit nostavat myös betonin sisältämän huokosveden pH-arvoa. Tavallisen portlandsementistä valmistetun betonin pH-arvo on yleensä 13–14. Betonin kemiallinen suojavaikutus katoaa betonin pH-arvon pudotessa arvoa 9 pienemmäksi, tällöin betonirakenteen rauditus menettää passiivisuutensa. Tämä passiivisuuden menetys ja sen myötä korroosion alku johtuu pääasiassa kahden eri tekijän vaikutuksesta: Betonin karbonatisoituminen tai kloridien läsnäolo rauditusta ympäröivässä betonissa. Raudituksen passiivisuuden kadottua korrosio voi alkaa, mikäli sen edellytykset ovat olemassa. Teräskorroosion tapahtuminen edellyttää myös hapen ja veden läsnäoloa. /11, 12/

Betonin emäksisyyden pienentyminen aiheutuu betonin sementtikivessä tapahtuvasta karbonatisoitumisesta. Tämä karbonatisoitumisesta aiheutunut teräskorroosio on yksi suurimmista betonirakenteiden säilyvyysongelmista. Nykyään betonirakenteissa, jotka ovat jatkuvasti korroosiolle alttiina, käytetään tavallisten rauditusteusten sijasta ruostumattomia teräksiä. /11/

3.3 Kloridit

Betonirakenteissa olevat teräkset ovat betonin emäksisyyden vuoksi pitkään suojaassa korroosiolta. Vasta betonin karbonatisoiduttua on terästen korrosio mahdollinen, kunhan muut korroosion edellytykset ovat olemassa. Edellä mainittuun ilmiöön poikkeuksen muodostavat kloridit. Kloridien läsnä ollessa teräskorroosion on mahdollista alkaa terästä suojaavasta emäksisestä ympäristöstä huolimatta. Klorideja voi päätyä betonirakenteisiin merivedestä (XS-luokat) tai muista lähteistä (XD-luokat), kuten esimerkiksi klorideja sisältävät jäänsulatusaineet. Myös vanhat

elementtibetonirakenteet saattavat sisältää klorideja, sillä elementtivalmistuksen alkuaikoina klorideja on käytetty kiihdyttimenä./11/

Kloridien tunkeutuminen betonirakenteisiin on usein teräsbetonirakenteiden käyttöä merkittävästi rajoittava tekijä. Kloridien aiheuttama betoniterästen korroosio aiheuttaa terästen poikkipinta-alan menetyksen lisäksi myös betonipeitteen lohkeilua terästen ympärillä. Tämä lohkeilu johtuu korroosiotuotteiden suuresta tilavuudesta alkuperäisten terästen tilavuuteen verrattuna. /11/

Betonipeitteen paksuutta kasvattamalla voidaan rajoittaa kloridien aiheuttamaa korroosiota betonirakenteissa. Muita keinoja korroosion rajoitukselle ovat esimerkiksi betonin tiiviyyden parantaminen, sekä soveltamalla tiukempia halkeamaleveysvaatimuksia kuin XC-luokissa. B600KX-raudoitusta (ruostumaton) ei XS- ja XD-luokissa tule käyttää, sillä raudoitus voi teräsjännityksen alaisena ruostua pistemäisesti. /11/

3.4 Betonin rapautuminen

Betoni voi rapautua kolmen erilaisen turmeltumisilmiön seurauksena. Näitä ilmiötä ovat pakkasrapautuminen, ettringiittireaktio, sekä alkali-kiviainesreaktio. Näiden eri rapautumisilmiöiden aiheuttamat näkyvät vauriot ovat hyvin samankaltaisia, mikä vaikeuttaa rapautumisen syyn silmämääräistä tunnistamista. Rapautumisilmiöitä yhdistää kuitenkin niiden kaikkien vaatima korkea kosteusrasitus. /9/

Betonijulkisivuissa ja muissa ulkorakenteissa näistä kolmesta Suomessa yleisin on pakkasrapautuminen. Alkali-kiviainesreaktio on näistä harvinaisin, eikä sitä esiinny Suomessa usein. Tämä johtuu siitä, että suomalaiset kivilajit ovat yleensä hyvin kestäviä. /9/

3.4.1 Pakkasrapautuminen

Pakkasrasituksessa betonirakenteiden vaurioituminen ilmenee lujuuden menetyksenä, läpäisevyyden lisääntymisenä sekä myös näkyvinä halkeamina ja lohkeiluna. Tämä pakkasrasituksesta johtuva halkeilu on yleensä betonin pinnan suuntaista. Betonin pakkasrapautumista aiheuttaa pääasiassa betonin kapillaarihuokosissa jäätyvä

vesi. Betonissa oleva vapaa vesi laajenee jäätyessään noin 9 tilavuusprosenttia. Kaikki betonin huokosverkostossa oleva vesi ei jäädy samanaikaisesti lämpötilan laskiessa jäätympisteeseen alapuolelle. Sen sijaan huokosveden jäätympiste alenee, kun huokossäde pienenee. Pakkas-suolarapautumisessa myös kemialliset tekijät voivat aiheuttamassa betonin rapautumista. /9, 11/

”Suolat lisäävät betonirakenteisiin kohdistuvia pakkasrasituksia. Tämä johtuu betonin vedenkyllästymisasteen kasvusta ja suolojen kyvystä alentaa betonin kriittistä kyllästysastetta. Vedellä kyllästysasteen kasvu johtuu siitä, että suolojen läsnä ollessa kosteuden imeytymistä betoniin voi tapahtua alhaisissa lämpötiloissa rakenteen pinnalta ja ilmasta lähes jatkuvasti. Kriittinen kyllästysaste alenee, koska suolat kasvattavat jäätympispainetta ja lisäksi heikentävät betonin kykyä vastustaa näitä paineita /11/.”

Suolat pitävät myös betonin sulana ja tällöin betonin mekaaniset ominaisuudet, jotka olisivat parhaimmillaan jäätyneessä tilassa, heikkenevät ja betonin kyky vastustaa säröjen muodostumista ja rapautumista heikkenee. /11/

Betonin pakkasenkestävyyden kannalta on tärkeää, että betonissa on ilmahuokosia, jotka eivät täyty vedellä kapillaarivoimien vaikutuksesta, ja joihin laajeneva vesi voi tunkeutua. Jotta huokokset voivat suojata betonia, täytyy niitä olla tasaisesti jakautuneena sementtikivessä. Jotta saavutetaan pakkasenkestävyyden kannalta riittävän tiheä suojahuokostus, täytyy betonin valmistamisessa käyttää lisähuokostuaineita. /9/

Riittävä ilmamäärä betonimassassa ei kuitenkaan takaa betonin pakkasenkestävyyttä. Tämä johtuu siitä, että huokosten välinen etäisyys ei välttämättä ole riittävän pieni. Suojahuokosten välimatkan puolikasta kutsutaan etäisyystekijäksi tai huokosjaoksi. Riittävän pakkasenkestävyyden saavuttamisen kannalta turvallisena etäisyystekijän arvona pidetään yleisesti 0,2–0,25 mm:ä. Toinen pakkasenkestävyyteen erityisesti vaikuttava tekijä on betonin tiiviys. Betonin alhainen vesisementtisuhte pienentää betonin vedenimukykyä, vedenimunopeutta, sekä betonissa olevan jäätyvän vedenmäärää. /9/

Betonirakenteiden pakkasvaurioituminen ilmenee betonin säröilynä. Nämä säröt heikentävät betonin lujuutta ja myös nopeuttavat veden imeytymistä betoniin. Pitkälle edennyt pakkasrapautuminen betonissa näkyy mm. rakenteen pinnan

halkeamina (Kuva 2), elementtien kaareutumisenä sekä lopulta betonin lohkeiluna. Pakkasrapautumisen havaitseminen alkuvaiheessa on tärkeää, jotta rasi-
tusta alenta-
viin korjauksiin voidaan ryhtyä ajoissa. /9/



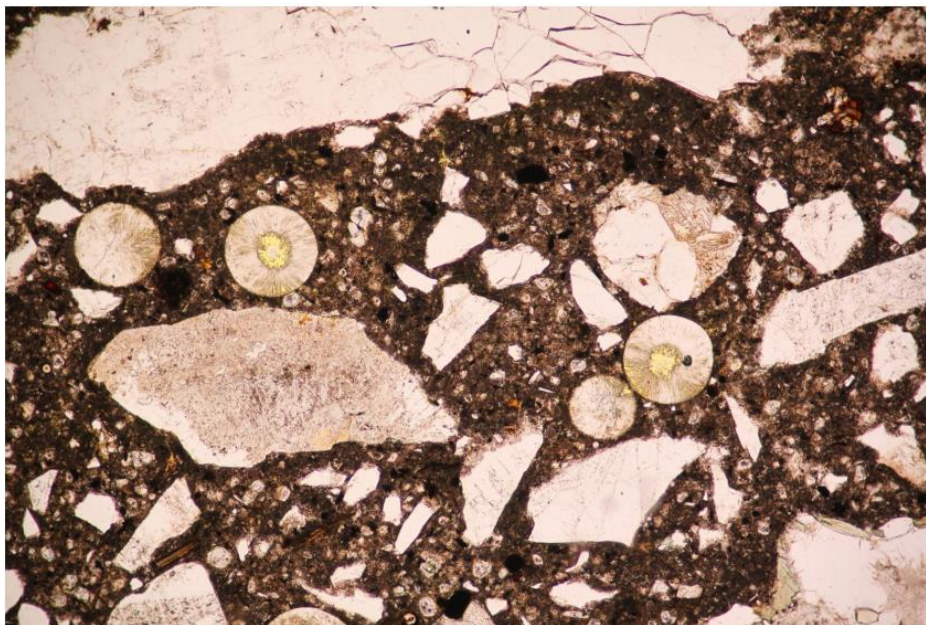
Kuva 2. Pakkasrasituksen aiheuttamaa betonipinnan rapautumista. /9/

3.4.2 Ettringiittireaktio

Ettringiitti on mineraali, jota esiintyy luonnostaan kaikissa betoneissa, sillä se on tärkeä Portlandsementin hydrataatiotuote. Ettringiitti vaikuttaa lyhyellä aikavälillä betonin lujuuden kehittymiseen ja pitkällä aikavälillä betonin stabiiliuteen. Ettringiittireaktiossa on kaksi muotoa: hydrataatiossa syntyvä ettringiitti ja myöhäisvaiheen ettringiitti. Myöhäisvaiheen ettringiitti on kovettuneessa sementtikivessä tapahtuva sulfaattimineraalien kemiallinen reaktio, johon liittyy reaktiotuotteiden suuri tilavuudenkasvu. Yleensä myöhäisen ettringiittireaktion syynä on betonin liian voimakas lämpökäsittely betonin kovettumisen aikana. Tämä aiheuttaa häiriöitä sementin kovettumisreaktiossa. Ettringiittireaktion mahdollisuus on suurin elementeissä, jotka lämpökäsitellään voimakkaasti ja jotka joutuvat ankariin kosteusrasitukseen. /9, 12/

Reaktiossa muodostuva ettringiittimineraali kiteytyy betonissa olevien ilmatäytteisten suojahuokosten seinämille, pienentäen huokosten tilavuutta ja huonontaen

betonin pakkasenkestävyyttä. Ettringiittireaktio voi johtaa betonin rapautumiseen pakkasrapautumisen kautta tai huokosten täyttymisen seurauksena (Kuva 3) syntyneen paineen aiheuttamien säröjen avulla. /9, 12/



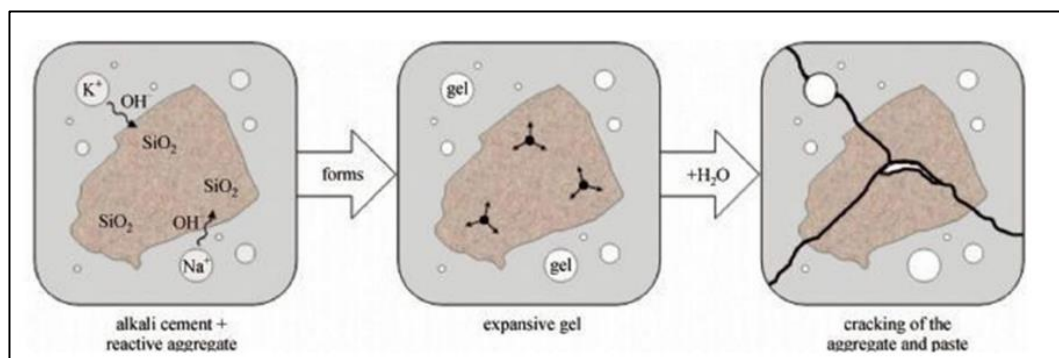
Kuva 3. Ettringiittikiteytymiä betonin huokosissa. /12/

3.4.3 Alkali-kiviainesreaktio

Alkali-kiviainesreaktio on kemiallinen reaktio, jonka seurauksena muodostuu geeliä, joka imee itseensä runsaasti vettä ympäristöstään. Tämä veden imeminen aiheuttaa geelin voimakkaan tilavuuden kasvun. Geelin tilavuuden kasvu johtaa betonin vetolujuuden ylittymiseen, jonka seurauksena syntyy halkeilua (Kuva 4). Alkali-kiviainesreaktio on mahdollista betonirakenteessa, mikäli seuraavat edellytykset ovat olemassa:

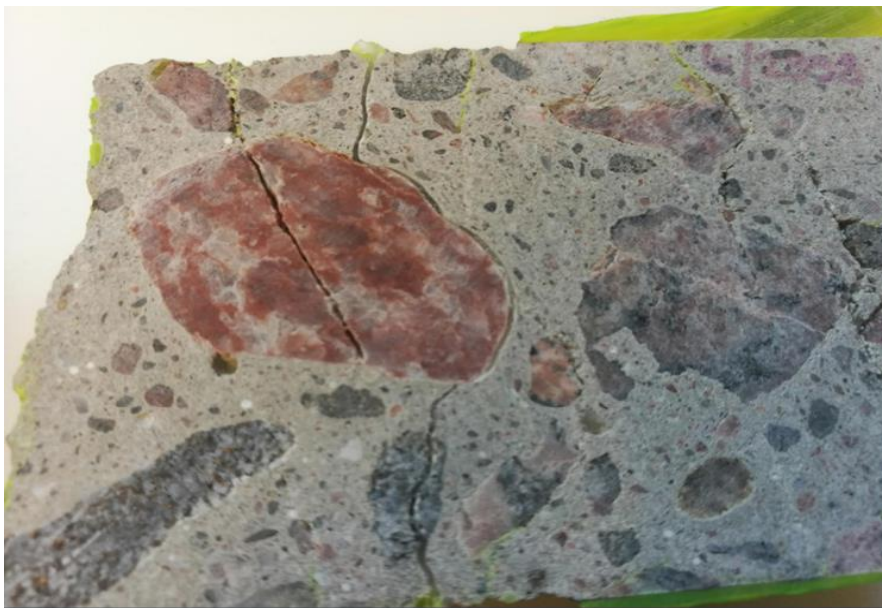
- Sementti sisältää runsaasti alkaleja (Na, K)
- Kiviaineksessa on heikosti alkalisuutta kestäviä mineraaleja
- Betonin kosteuspitoisuus on riittävän korkea. /9/

Mikäli jokin ehdoista puuttuu, reaktio ei käynnisty. Reaktio pysähtyy, mikäli reaktion aikana yksikin tekijöistä reaktion aikana muuttuu alle tai yli kynnyksarvon. /12/



Kuva 4. Alkali-kiviainesreaktion kulku. /12/

Alkali-kiviainesreaktiosta kärsivässä betonirakenteessa on tyypillistä pinnan kosteudesta johtuva laikukkuus, epäsäännöllinen verkkohalkeilu ja paisuminen, sekä halkeamista ulos tunkeutuva geelimäinen reaktiotuote. Merkittävin ero alkali-kiviainesreaktion ja pakkasvaurion välillä on siinä, että pakkasvaurio on lähinnä betonin pintaosien vaurio, mutta alkali-kiviainesreaktiossa halkeilu voi esiintyä missä päin hyvänsä betonirakennetta (Kuva 5). /9, 12/



Kuva 5. Esimerkki alkali-kiviainesreaktion aiheuttamasta halkeilusta. /12/

Keski-Euroopassa sekä Skandinavian maissa alkali-kiviainesreaktiota esiintyy yleisimmin massiivisissa betonirakenteissa esimerkiksi silloissa ja padoissa. Suomalaisissa betonijulkisivu- ja parvekerakenteissa kuitenkin raportoitu vain vähän ARK:sta aiheutuneita vaurioita. Yksi selitys tälle voi olla vaurion samankaltaisuus

ja yhtä aikaa ilmeneminen betonin pakkasrapautumisen kanssa sekä näiden vaurio-
mekanismien samankaltaiset korjaustavat. /9/

3.5 Betonin halkeilu

Betonin monien hyvien ominaisuuksien lisäksi betonille on ominaista halkeilu. Betonirakenteissa esiintyvä halkeilu voi heikentää sekä rakenteen kantavuutta, että sen säilyvyyttä. Pääosa korjausta tarvitsevasta halkeilusta tapahtuu yleensä betonin pintakerroksissa noin 20 mm pinnasta. Betonirakenne halkeaa, kun rakenteen todellinen vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Betonirakenteissa esiintyvä halkeilu voidaan jakaa kolmeen erilaiseen tyyppiin:

- Rakenteellinen halkeilu, johon syynä voivat olla mm. puutteellinen kantavuus, ylikuormitus tai eri syistä aiheutuvat pakkovoimat. Halkeilu voi johtua myös rakenteen normaalista staattisesta toiminnasta.
- Vaurioitumisesta johtuva halkeilu, johon syynä ovat yleensä joko raudoitteen korrosio tai betonin rapautuminen.
- Pinnan verkkohalkeilu, joka johtuu yleensä betonin kutistumisesta (plastisen vaiheen kutistuminen tai kuivumiskutistuminen). /2/

Näin ollen halkeamia voi aiheuttaa esimerkiksi plastisen ja kovettumisvaiheen kutistumat, kovettuneen betonin kuivumiskutistuma ja kutistumaerot, rakenteen ulkoiset kuormitukset, lämpötilan muutokset, pakkasrapautuminen tai raudoitteiden korroosion aiheuttama sisäinen paine. /9/

Halkeamien koko vaihtelee muutaman mikrometrin kokoisista mikrohalkeamista kymmenien millien kokoisiin halkeamiin. Halkeamien haitallisuus ja sen korjaustarve riippuvat useista eri tekijöistä, joita ovat mm:

- halkeamien sijainti, leveys, syvyys ja liikkuvuus
- pinnan kosteus- ja kloridirasituksen voimakkuus
- rakenteen tiiviysvaatimukset (esim. vedenpitävyys)
- raudoituksen tyyppi (normaali/ruostumaton)
- betonin pakkasen kestävyys
- pintakäsittelyn tyyppi (avoin/tiivis)

- pinnalle asetettavat ulkonäkövaatimukset. /2/

Halkeaman aiheuttama haitta voi olla vain esteettistä tai se voi olla kestävyyttä ja säilyvyyttä heikentävää. Riittävän isojen halkeamien kautta pääsevät haitalliset aineet kuten hiilidioksidi (ja liikennöidyissä tai merivedelle alttiissa rakenteissa kloridit) tunkeutumaan betoniin aina raudoitteiden syvyyteen asti aiheuttaen paikallista korroosiota. Pienetkin halkeamat ovat betonin käyttöiän kannalta haitallisia, sillä ne edesauttavat betonin karbonatisoitumista, sekä huonontavat betonin tiiveyttä. /9/

Haittavaikutusten kannalta olisi aina tärkeää tietää miten halkeama jatkuu rakenteen sisällä ja kuinka syvälle se ulottuu. Halkeamia tutkittaessa tulisi myös ottaa huomioon halkeamien liikkuminen erilaisten pakkovoimien seurauksena, sekä niiden mahdollinen uudelleen tiivistyminen. /9/

”Kantavien rakenteiden rakenteellisen halkeilun korjaustarpeen arviointi edellyttää rakennuskohteen vaativuuden mukaisen pätevyyden omaavan rakennesuunnittelijan tekemää selvitystä halkeamien vaikutuksesta rakenteen kantavuuteen” /2/.

4 BETONIRAKENTEIDEN HALKEAMIEN KORJAAMINEN

Vaikka betonin valmistus on halpaa, muodostaa betonin halkeilusta johtuvien vaurioiden korjaaminen maailmanlaajuisesti ison menoerän. On arvioitu, että halkeamien ja niistä aiheutuneiden vaurioiden korjaus maksaa maailmanlaajuisesti 147 \$ (n. 132 €) per betoni kuutiometri. /5/

USA:n 600 000 sillasta noin joka neljäs on uudistamisen tai korjaamisen tarpeessa. 10 % silloista on todettu rakenteellisesti puutteellisiksi ja 10 % käyttöaikansa ylittäneitä. Alankomaissa kolmasosa yhdyskuntatekniikan vuosittaisesta budjetista kuuluu rakenteiden tarkistamiseen, huoltamiseen ja korjaamiseen. Isossa-Britanniassa vastaava luku on melkein 45 %. On myös arvioitu, että koko Euroopassa 50 % vuosittaisesta rakentamiseen käytetystä rahasta kuluu olemassa olevien rakenteiden kunnostamiseen ja huoltamiseen. /13, 14/

Suomen rakennuskannan arvo noin 500 miljardia euroa. Tästä summasta pientalojen arvo on 130 mrd. ja asuinkerrostalojen 145 mrd. Asuinrakennusten korjauksiin olisi tällä hetkellä (vv. 2016–2025) sijoitettava keskimäärin 9,4 mrd. euroa. Tämä luku tulee kasvamaan 11 mrd. euroon seuraavana kymmenvuotiskautena. Siltojen ym. tieverkoston taitorakenteiden korjausvelka oli vuonna 2018 250 miljoonaa euroa ja sen odotetaan nousevan 300 miljoonaan vuoteen 2013 mennessä. /15, 16/

Näitä lukuja katsoessa voidaan todeta, että betonin halkeamien ehkäisy, käyttöiän pidentäminen, sekä erilaisten korjausmenetelmien kehitys on tärkeää. Näin voidaan pienentää betonirakenteista aiheutuvia korjauskustannuksia. Lisäksi lisäämällä betonirakenteiden käyttöikä, saadaan pienennettyä uuden sementin valmistamisen tarvetta ja sen myötä vähennettyä sementtiteollisuudesta aiheutuvien kasvihuonekaasujen päästöjen määrää. /5/

4.1 Korjaamisen tavoite

Betonirakenteiden halkeamien korjauksen tavoitteena on joko sulkea halkeamat, tai korjata halkeamat voimia välittäviksi. Voimia välittäväksi halkeama voidaan korjata ainoastaan injektoimalla, yleensä joko epoksilla tai sementillä. Pyrittäessä vain

sulkemaan halkeama, voidaan se tehdä myös imeyttämällä, pinnoittamalla tai muuttamalla halkeama liikuntasaumaksi (ura ja elastinen kittaus). /2/

4.2 Korjaustavat

Betonin halkeamien korjaus jaetaan kahteen kategoriaan, aktiiviseen ja passiiviseen korjaamiseen. Passiivisessa korjauksessa halkeamia korjataan sitä mukaa, kun niitä ilmestyy rakenteisiin. Passiivisen korjauksen avulla voidaan korjata vain betonirakenteen pintakerrosten halkeamia. Korjaukseen voidaan käyttää erilaisia korjausmenetelmiä, joita ovat:

- injektointi,
- imeyttäminen,
- pinnoittaminen,
- halkeaman avaaminen ja laastipaikkaaminen sekä
- halkeaman muuttaminen liikuntasaumaksi. /2, 9/

Näitä passiivisen korjauksen menetelmiä rajoittaa myös korjauksessa käytettyjen aineiden ominaisuudet, sekä niiden mahdolliset rajoitukset. Näitä ovat esimerkiksi huono säänkestävyys ja liian suuresti betonista poikkeava lämpötilalaajeneminen. /5/

Betonin aktiivisella korjauksella tarkoitetaan käytännössä betonin itsekorjautumista. Betonin itsekorjautuminen jaetaan myös kahteen eri kategoriaan: betonin itsestään korjautumiseen ja betonin itsekorjautumiseen. Näistä menetelmistä kerrotaan tarkemmin luvussa 5. Itsekorjautuvat betonit. /5/

4.2.1 Injektointi

Injektointi on halkeamien korjausmenetelmä, jossa betonin halkeamiin pumpataan nestemäistä kovettuvaa ainetta, niin että pumpattu aine täyttää halkeamassa olevan tyhjätilan ja kovettuu osaksi rakennetta. Injektoinnin avulla voidaan korjata yli 0,2 mm leveät halkeamat. Tätä pienempien halkeamien korjaamiseen käytetään yleensä muita menetelmiä, kuten imeyttäminen tai pinnoitus. /2/

Yleensä injektointiin käytetään kovettuvia muoveja, kuten polyuretaani ja epoksi. Suuria halkeamia injektoitaessa voidaan myös käyttää hienoja sementtilaasteja, kuten sementti, hienosementti ja mikrosementti. Ennen injektoinnin aloittamista halkeaman pinta suljetaan esimerkiksi muovipohjaisella nopeasti kovettuvalla kitillä. Tämän käsittelyn avulla estetään injektointiaineen ulostunkeutuminen halkeamasta. Injektointi suoritetaan ns. injektointinippojen kautta, nämä injektointinipat porataan halkeamaan ennen halkeaman sulkemista tai sulkemisen jälkeen. /2/

Injektointia ei tule käyttää korjausmenetelmänä, mikäli betonin halkeilu johtuu rakenteen vaurioitumisesta esimerkiksi pakkasrapautumisen tai raudotteiden korroosion seurauksena. /2/

4.2.2 Imeyttäminen

Imeyttämisen avulla voidaan korjata betonirakenteiden yläpinnassa olevia, lähinnä plastisesta halkeilusta johtuvia kapeita halkeamia. Imeyttäminen toteutetaan pääsääntöisesti matalaviskoosinen kovettuva muovi tunkeutumaan kapillaarisesti ja painovoiman avulla halkeamiin. Imeytyksen avulla voidaan tehokkaasti estää veden ja siihen liuenneiden yhdisteiden (kloridit) imeytyminen halkeamiin. /2/

Injektointi ei sovi käytettäväksi korjausmenetelmäksi, mikäli betonin halkeilu johtuu rakenteen vaurioitumisesta esimerkiksi pakkasrapautumisen tai raudotteiden korroosion seurauksena. /2/

4.2.3 Pinnoitus

Pinnoituksen avulla voidaan korjata betonirakenteiden pysty- ja alapinnoissa esiintyvää verkkohalkeilua, sekä muita kapeita alle 0,2 mm leveitä halkeamia. Halkeamien ollessa liikkuvia tulee pinnoituksessa käyttää halkeamia silloittavaa pinnoitetta. Pinnoitus ei sovellu käytettäväksi korjausmenetelmäksi, jos betonin halkeilu johtuu rakenteen vaurioitumisesta. /2/

4.2.4 Halkeaman avaaminen ja laastipaikkaaminen

Halkeaman avaamista ja laastipaikkaamista voidaan käyttää korjattaessa liikkumattomia halkeamia, joilla ei ole rakenteellista merkitystä ja jotka ovat syntyneet kertaluontoisista syistä. Näitä kertaluontoisia syitä ovat esimerkiksi törmäys ja kuivumiskutistuminen. /2/

Korjaus aloitetaan avartamalla halkeamaa vähintään 15 mm levyiseksi ja syvyydeltään vähintään 1,5-kertaa leveyttä suuremmaksi. Halkeaman avartamisen jälkeen, täytetään syntynyt ura sopivalla korjauslaastilla. Tämä korjausmenetelmä edellyttää usein rakenteen pinnoittamisen ulkonäkösyistä. /2/

4.2.5 Halkeaman muuttaminen liikuntasaumaksi

Betonirakenteisiin muodostuneet liikkuvat halkeamat toimivat eräänlaisina rakenteen liikuntasaumoina. Mikäli tällainen halkeama lukitaan esimerkiksi injektoidulla, katoaa halkeaman liikemahdollisuus. Tällöin vaarana on, että rakenteeseen voi muodostua suuria pakkovoimia ja niiden seurauksena uusia halkeamia muualle rakenteessa. Nämä liikkuvan halkeaman lukitsemisen ongelmat voidaan välttää, mikäli halkeama voidaan muuttaa joustavaksi saumaksi. /2/

Halkeamaa muutettaessa liikuntasaumaksi tehdään halkeaman kohdalle esimerkiksi laikalla leikkaamalla ura, johon tehdään elastinen kittisauma. Tämän leikatun uran leveyden tulee olla sellainen, että halkeaman liike voi tapahtua vaurioittamatta saumamassaa. Leikatun uran syvyyden tulee olla vähintään sauman leveyden suuruinen. /2/

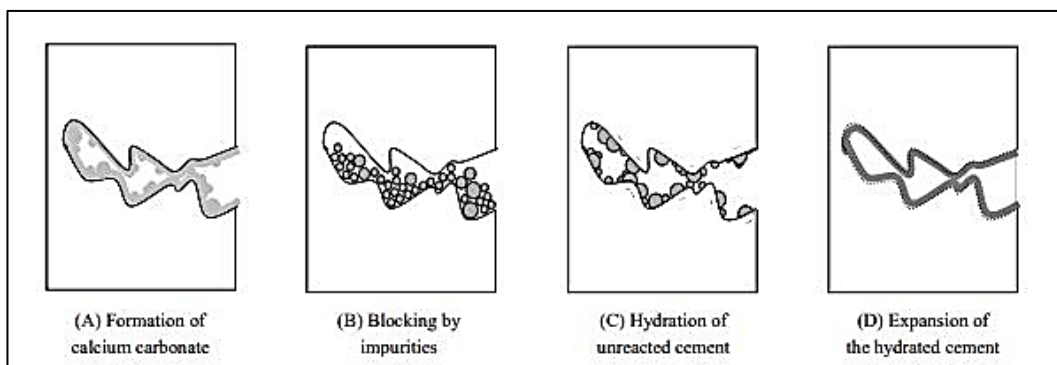
Saumaussmassan tarttuminen uran pohjaan estetään käyttämällä esimerkiksi teippiä, jotta halkeaman avautuminen uran pohjaan ei halkaise saumamassaa. Uran täyttämiseen käytetylle saumamassalle sallitaan enintään 30 % venymä. /2/

5 ITSEKORJAUTUVAT BETONIT

Tulevaisuuden vaihtoehtona betonirakenteiden halkeamien korjaamiseen tutkitaan itsekorjautuvien betonien käyttöä. Itsekorjautuvien betonien avulla pyritään tehostamaan betonin itsestään korjautumisen vaikutuksia ja vähentämään betonin halkeilusta johtuvaa käyttöiän lyhenemistä. /5, 17/

5.1 Betonin itsestään korjautuminen

Jo vuosien ajan on tiedetty, että betoni kykenee jossain määrin itsestään korjautumaan. Tämä itsestään korjautuminen johtuu betoniin muodostuneen halkeaman täyttymisestä, jolloin vesi ja muut betonille haitalliset aineet eivät pääse enää betonissa syvemmälle. Halkeamien täyttymiseen on neljä eri tapaa (Kuva 6). /18/



Kuva 6. Betonin halkeamien erilaiset luonnolliset täyttymistavat. /18/

Ensimmäinen tapa perustuu betonin valmistuksessa reagoimatta jääneen sementin hydratoitumiseen. Betoniin jäänyt reagoimaton sementti hydratoituu, kun betonin sisään pääsee tunkeutumaan vettä siihen muodostuneista halkeamista. Tämä jälkihydrataatio muodostaa uutta betonia, mikä puolestaan tiivistää muodostuneen halkeaman (Kuva 6). /5, 17, 18/

Toinen vaihtoehto halkeamien täyttymiselle betonin itsestään korjautumisessa on kalsiumkarbonaatin muodostuminen. Kun betonin muodostuneeseen halkeamaan pääsee vettä, muodostuu kalsiumoksideista kalsiumhydroksidia. Tämä muodostunut kalsiumhydroksidi voi puolestaan reagoida ilman hiilidioksidin kanssa. Tässä karbonatisoitumis-reaktiossa muodostuu kalsiumkarbonaattia, joka pystyy

täyttämään halkeaman (Kuva 6). Betonin kanssa yhteensopivuutensa vuoksi kalsiumkarbonaatti on erittäin hyvä materiaali betonin halkeamien ja ylimääräisten huokoisuuksien täyttämiseen. /5, 17/

Alla on kalsiumkarbonaatin muodostumisen reaktioyhtälöt. /5/



Kolmas vaihtoehto on, että halkeaman reunoilla oleva hydratoitunut sementtipohjainen massa paisuu tukkien raon. Tämä tapahtuu betonissa olevan kalsiumsilikaattihydroksidigeelin turvotessa (Kuva 6). /5/

Neljäs ja viimeinen tapa halkeamien täyttymiselle on, että halkeama yksinkertaisesti täyttyy siihen tunkeutuneen veden mukana tulleilla epäpuhtauksilla (Kuva 6). Veden mukana tulleet epäpuhtaudet kasautuvat halkeamaan, täyttäen sitä. Tällöin halkeamaan pääsevät veden määrä pienenee, halkeaman tukkeutuessa. Parhaassa tapauksessa halkeama voi tukkeutua lähes täysin. /5/

Betonin itsestään korjautuminen on kuitenkin hyvin rajallinen ja pystyy korjaamaan ainoastaan betoniin muodostuneita pieniä halkeamia, jotka ovat maksimissaan 0,2 mm leveitä. Halkeamat eivät yleensä kuitenkaan täysin korjaudu. Itsestään korjautumisen potentiaali on kuitenkin riippuvainen sekoitetun betonin ainesosista ja sekoitussuhteista. Betonit, jossa on paljon sementtiä ja vain vähän vettä (pieni vesisementtisuhte) pystyvät itsestään korjautumaan muita betoneja paremmin, sillä niissä jää paljon sementtiä hydratoitumatta valmistuksen aikana. /9/

Betonin käyttöään turvaaminen luottamalla pelkkään betonin itsestään korjautumiseen on kuitenkin hyvin epävarmaa. Toimivan itsestään korjautumisen turvaaminen betonissa vaatisi, että betonin valmistamisessa käytettäisiin aina paljon sementtiä ja seosaineita ja vain vähän vettä. Tämä kuitenkin nostaisi betonin valmistuskustannuksia ja lisäksi nostaisi entisestään betoniteollisuuden sementin tarvetta, nostaa betoniteollisuuden päästöjen määrää entisestään. Lisäksi vesisementtisuhteen pienentämisellä on huonoja vaikutuksia betonin työstettävyyteen ja betonin

kuivumiskutistumiseen. Näiden syiden vuoksi betonin itsestään korjautumisen tueksi tarvitaan muita keinoja. /5, 17/

5.2 Itsekorjautuva betoni

Itsekorjautuvalla betonilla tarkoitetaan betonia, jonka itsestään korjautumisominaisuutta on tehostettu sekoittamalla betonin valmistuksen aikana massaan esimerkiksi paisumakykyisiä polymeerikuituja tai kalsiumkarbonaatin muodostamiseen kykeneviä mikrobeja. Näiden betonimassaan sekoitettujen lisäaineiden tarkoitus on tukea betonin omaa itsestään korjautumista ja sulkea betonirakenteeseen muodostuvia halkeamia ennen kuin ne heikentävät betonin kestävyyttä tai lyhentävät sen käyttöikä. /5/

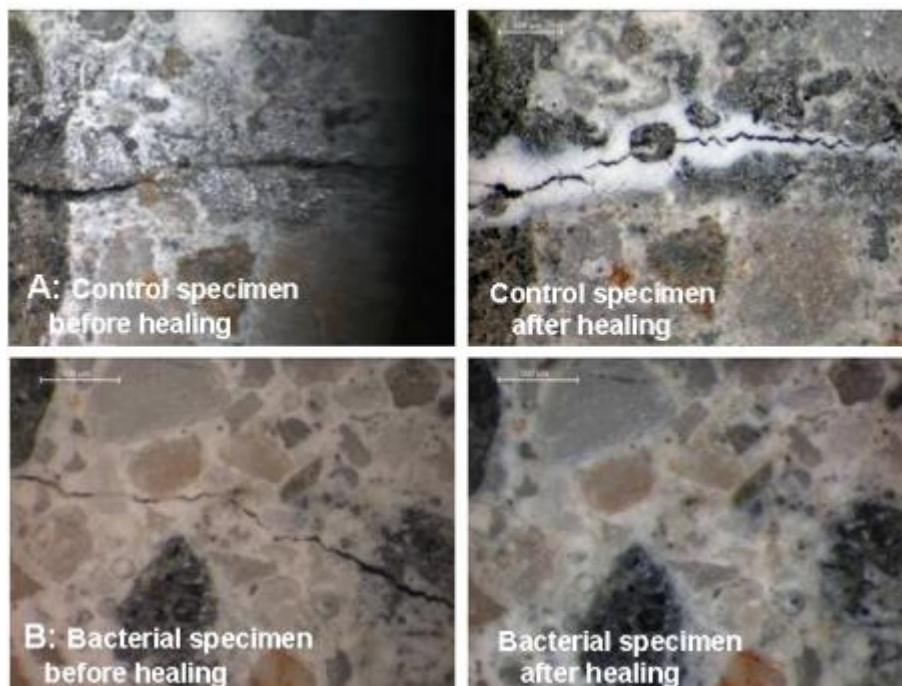
Itsekorjautuva betoni ei ole täysin uusi idea. Betonin itsekorjautumista on yritetty jo vuodesta 1994 lähtien, jolloin testattiin onttoja kuituja, joiden avulla betonin korjautumista avustavat kemikaalit saataisiin sekoittumaan betonimassaan, kun niitä tarvittaisiin. Muodostunut halkeama murtaisi kuitukuoren ja vapauttaisi kemikaalit betoniin, käynnistäen korjautumisen. Varsinainen kiinnostus betonin itsekorjautumiseen kuitenkin alkoi vasta 2000-luvun puolella, ja kiinnostus sitä kohtaan on vain kasvanut ajan kuluessa. /19/

Nykyään betonin itsekorjautumisvaihtoehtoja tutkitaan paljon ja mahdollisia itsekorjautuvan betonin vaihtoehtoja on monia, kuten biobetoni, erilaiset polyuretaanikapseloinnit, muut täyteainekapseloinnit, sekä SAP-kuidut. Tässä opinnäytetyössä kuitenkin keskitytään bakteeripohjaisiin, sekä SAP-kuituihin perustuvia itsekorjautumisen vaihtoehtoja aiheen rajauksen vuoksi. /7, 18/

6 BIOBETONI

6.1 Toimintaperiaate

Biobetonin toiminta perustuu betonimassaan sekoitettuihin bakteereihin. Nämä betoniin sekoitetut bakteerit aktivoituvat, kun betoniin muodostuu halkeama ja halkeaman kautta betonin sisään pääse vettä ja hiilidioksidia. Aktivoituttuaan nämä bakteerit alkavat muodostaa kalsiumkarbonaattia biomineralisaation avulla ja täyttävät muodostuneen halkeaman, sulkien sen ja estävät näin veden ja muiden epäpuhtauksien pääsyn syvemmälle betonirakenteeseen (Kuva 7). Tämän itsekorjautumisen päätehtävä on palauttaa betonin tiiveys ja tätä kautta estää betonille haitallisten aineiden tunkeutuminen syvemmälle betonissa. Tämä puolestaan pidentää betonirakenteen käyttöikää. /5, 17/



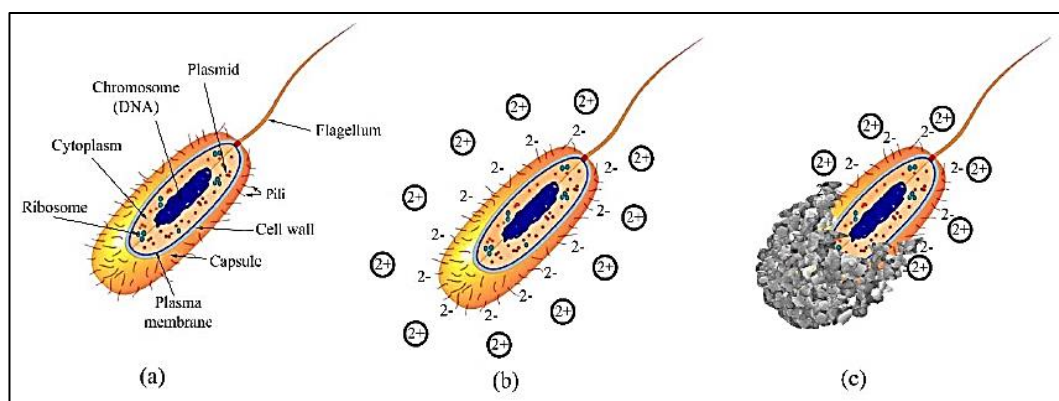
Kuva 7. Valomikroskooppikuva (40-kertainen suurennos) betonin itsekorjautumisesta. /17/

6.2 Biomineralisaatio

Toiselta nimeltään mikrobiologisesti tapahtuva kalsiumkarbonaatin saostuminen (Microbiologically induced calcium carbonate precipitation, MICP).

Biominalisaatiolla tarkoitetaan luonnollista prosessia, jossa elävät organismit muodostavat mineraaliyhdisteitä. Biologisesti aiheutunut mineralisaatio tapahtuu yleensä mikrobien aineenvaihdunnan tuloksena. Tässä prosessissa muodostuu biomineraaleja, kun mikrobin aineenvaihdunnan muodostamat yhdisteet reagoivat mikrobin elinympäristön kanssa. Mineraalin saostuminen tapahtuu, kun positiivisesti varautuneet ionit kiinnittyvät mikrobin negatiivisesti varautuneeseen soluseinämään (Kuva 8). Tämä biologisesti aiheutunut mineralisaatio tapahtuu yleensä anaerobisissa olosuhteissa tai hapettoman ja hapellisen ympäristön rajapinnassa. Tämän mineralisaation teho on täysin riippuvainen ympäristössä olevan liuenneen ei-organisen hiilen määrästä, nukleaatialueesta (bakteerin soluseinä), pH:sta, lämpötilasta, sekä Hartree-energiasta (E_h). /5/

Biominalisaation avulla muodostuvista monista mineraaleista yksi tärkeimmistä itsekorjautuvan betonin kannalta on kalsiumkarbonaatti (CaCO_3). Betonin korjauksessa kalsiumkarbonaatti on hyvä aine johtuen sen yhteensopivuudesta betonin kanssa. Lisäksi kalsiumkarbonaatti on hyvin pysyvä yhdiste ja se on liukenematon korkeassa pH:ssa. /19/



Kuva 8. Bakteerin rakenne ja mineraalien muodostus. /5/

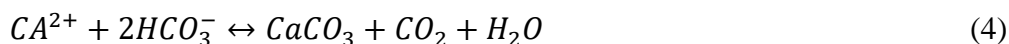
6.3 Kalsiumkarbonaatin saostuminen

Kalsiumkarbonaattia voi saostua mikrobien aineenvaihdunnan avulla monin eri tavoin. Näitä eri tapoja ovat mm. urealyysi, fotosynteesi, denitrifikaatio, ammonifikaatio ja sulfaattipelkistyminen. Itsekorjautuvan betonin kannalta kaikki näistä menetelmistä eivät ole hyödyllisiä, kuten fotosynteesiin perustuva kalsiumkarbonaatin

muodostus, sillä se onnistuisi vain betonirakenteen pinnalla. Seuraavassa esitetään muutama kalsiumkarbonaatin muodostamisen keino, jotka joko toimivat hyvin tai vähintäänkin vaikuttavat lupaavilta betonissa käytettyinä. /20/

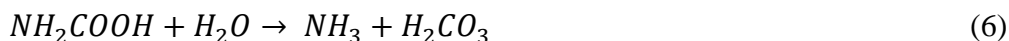
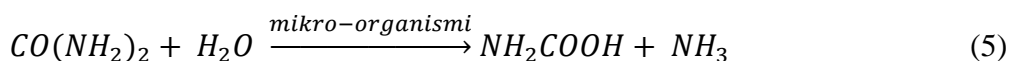
6.3.1 Urean hydrolyysi

Monilla eri bakteereilla, kuten *Bacillus sphaerecus* ja *Bacillus peusturii* on kyky biomineralisaatioon kalsiumlähteen läsnä ollessa. Nämä ureaasi positiiviset mikro-organismit pystyvät muodostamaan kalsiumkarbonaattia urean hydrolyysin avulla. Keskeiset reaktiot kalsiumkarbonaatin saostumiselle ovat alla. /5/



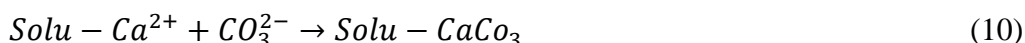
Mikrobien aineenvaihdunta johtaa karbonaattipitoisuuden ja pH:n nousemiseen. Tämä pH:n nouseminen tehostaa hiilidioksidin muuttumista karbonaatiksi, joka muodostuu pääosin kalsiittina. /5/

Ureaasiaktiivisuudesta bakteerien läsnä ollessa muodostuu yksi mooli karbamiinihappoa (NH_2COOH) ja yksi mooli ammoniakkia (NH_3) urean hydrolyysissä (yhtälö 5), kuten nähdään yhtälöstä (6) karbamiinihapon hydrolyysi tuottaa yhtä aikaa yhden moolin hiilihappoa (H_2CO_3) ja yhden ekstra moolin ammoniumioneja /5/



Yhtälöistä (7) ja (8) nähdään, että hydroksidi-ionin, joka muodostuu veden ja ammoniakkin reaktiosta ja hiilihapon reaktiossa muodostuu karbonaattia (CO_3^{2-}), Yhtälössä (9) positiivisesti varautuneet kalsiumionit sitoutuvat negatiivisesti varautuneeseen bakteerin soluseinään. /5/



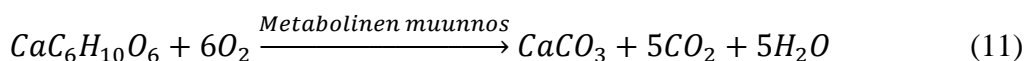


Yhtälön (10) toteuttamiseen tarvittava kalsiumioni voi tulla joko sementtirakenteessa olevista lähteistä, tai se voidaan saada lisätyistä kemikaaleista, kuten kalsiumkloridi, kalsiumnitraatti tai kalsiumlaktaatti. Kalsiumkloridin käyttö voi kuitenkin aiheuttaa betonirakenteen raudoitteisiin korroosiota, joten sen käyttö ei ole suositeltavaa. Tämän vuoksi parempia vaihtoehtoja ovat kalsiumnitraatti sekä kalsiumlaktaatti. /5/

Vaikka tämä menetelmä kalsiumkarbonaatin muodostamiseen betonissa on todistettu toimivaksi, on siinä kuitenkin muutamia käytännön ongelmia. Ammoniumionien (NH_4^+) muodostumisessa urealytyttisessä toiminnassa aiheutuu typpioksidipäästöjä ilmakehään. Tämän lisäksi ammoniumionien liiallinen määrä betonirakenteessa aiheuttaa suolavaurioiden riskiä, kun rakenteeseen muodostuu typpihappoa. /5/

6.3.2 Metabolinen muunnos

Toinen vaihtoehto kalsiumkarbonaatin muodostamiseen bakteerien avulla on hyödyntää bakteereja, jotka muodostavat sitä aineenvaihduntansa tuotoksena. Tässä menetelmässä orgaanisten happojen hapetus muodostaa hiilidioksidia, mikä johtaa kalsiumkarbonaatin muodostumiseen alkalisessa ympäristössä. Yhtälössä (11) nähdään kalsiumlaktaatin ($CaC_6H_{10}O_6$) metabolinen muunnos kalsiumkarbonaatiksi, hapen läsnä ollessa. /5/



Yhtälössä muodostuneen veden (H_2O) ja hiilidioksidin (CO_2) reagointi betonirakenteessa olevien kalsiumoksidien (CaO) kanssa lisää puolestaan betonin itsestään korjautumista. /5/

Tämä menetelmä on urean hydrolyysiä parempi keino tuottaa kalsiumkarbonaattia, sillä se ei vaadi ammoniumioneja toimiakseen. Ammoniumionien poisjääminen

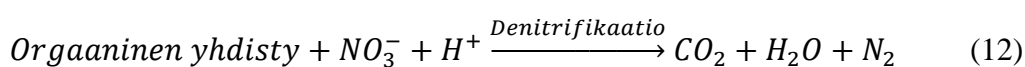
betonirakenteesta poistaa typpihapon muodostumisen riskin. Lisäksi bakteerien hapen kulutus pienentää raudoitteiden korroosion riskiä. Kaiken kaikkiaan tämä menetelmä on toimiva keino tuottaa kalsiumkarbonaattia, sillä se on hyvin yhteensopiva betoniseoksen kanssa, suojaa raudoitteita ja tuottaa paljon kalsiumkarbonaattia.

Menetelmän huono puoli on, että se vaatii suuripitoisen kalsiumlähteen, jotta reaktion muodostama kalsiumkarbonaatti muodostaisi kalsiittia (kalkkikiveä). Tämä suuri kalsiummäärä voi johtaa suolojen kertymiseen betonirakenteessa. Tämän vuoksi kalsiumlähteen pitoisuuden optimointi on tärkeää. Tällöin saadaan optimoitua menetelmän tuottaman kalsiumkarbonaatin määrä ja minimoitua valmistuskustannuksia sekä suolojen muodostumisen riskiä. /5/

6.3.3 Denitrifikaatio

Vielä yksi keino mineraalien muodostamiselle on hajottava nitraattipelkistys. Tässä denitrifikaationa tunnetussa prosessissa nitraatti (NO_3^-) pelkistyy nitriitiksi (NO_2^-), typpioksidiksi (N_2O), sekä typpikaasuksi (N_2). Denitrifikaatioon kykenevät bakteerit pelkistävät nitriittiä, tästä muodostuneista orgaanisista yhdisteistä muodostuu mineraaleja hapettumisella. Tämän menetelmän tärkein etu muihin menetelmiin verrattuna on, että se voi tapahtua hapettomissa oloissa. Se ei myöskään tuota myrkyllisiä yhdisteitä (ammoniakki) kuten urean hydrolyysi. Lisäksi urean hydrolyysiin verrattuna denitrifikaation avulla voidaan saavuttaa jopa kaksinkertainen määrä karbonaattia elektronin luovuttajayhdisteen moolia kohti. /5, 21/

Orgaanisten yhdisteiden denitrifikaation seurauksena muodostuu hiilidioksidia, vettä ja typpeä (yhtälö 12). Yhtälöstä (13) nähdään, että denitrifikaatiossa pH nousee, johtuen reaktion kuluttamista hydroneista (H^+). Lopuksi muodostunut karbonaatti reagoi kalsiumlähteen kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (yhtälö 14). /5/





Kalsiumkarbonaatin valmistaminen betonissa denitrifikaation avulla on kuitenkin vielä aika uusi menetelmä ja tämän vuoksi sen optimointi ja käytännöllisyyden varmistaminen vaatii vielä lisätutkimuksia. /5/

6.4 Biobetonin valmistus

Kuten edellä esitettiin, joillakin bakteereilla on kyky aiheuttaa kalsiumkarbonaatin saostumista. Jotta tämä kyky voisi saavuttaa täyden potentiaalinsa, täytyy seuraavia seikkoja huomioida bakteereihin perustuvan itsekorjautuvan betonin valmistamisessa: bakteerin valinta, bakteerin ravinteiden valinta ja bakteerin lisäys betonirakenteeseen. Joten kunnolla toimiva bakteeripohjainen itsekorjautuminen vaatii kolme asiaa:

- oikeanlainen bakteeri,
- valitulle bakteerille sopivat ravinteet,
- oikeanlainen sekoitus tai levitys betoniin. /5/

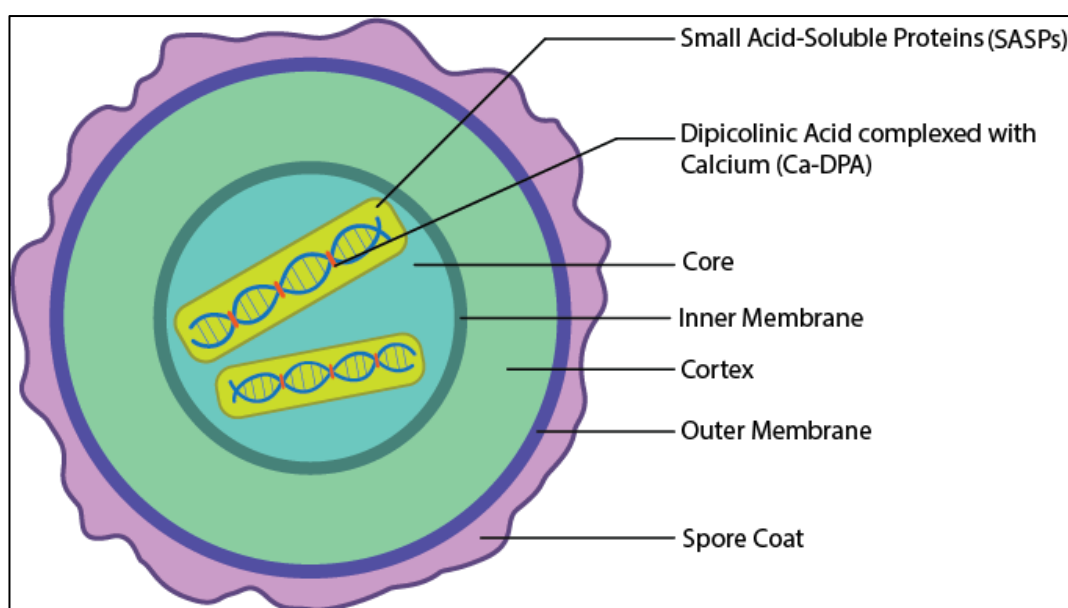
Biobetonin sekoitus ei juurikaan eroa tavallisen betonin sekoittamisesta. Tavallisen betonin ainesosat sekoitetaan keskenään ja riippuen bakteerien lisäystavasta korvataan joko osa runkoaineesta bakteereja ja ravinteita sisältävillä pelleteillä, tai osa käytetystä vedestä korvataan bakteereja ja ravinteita sisältävällä liuoksella. /5, 17/

6.5 Bakteerin valinta

Ensimmäinen ja tärkein vaatimus betonissa käytettävälle bakteerille on, että sen tulee pystyä selviytymään elinkelpoisena pitkään betonissa. Toinen vaatimus on, että bakteerin tulisi selvitä betonin alkuprosessista: sekoituksesta, hydrataatiosta, sekä betonin kuivumisesta. /17/

Betonin sekoituksen mekaaniset voimat voivat vaurioittaa tai tuhota betonimassaan lisättyjä bakteereja. Tämän lisäksi betoni ei ole luonnostaan sopiva elinpaikka bakteereille, sillä sen korkeasta pH:sta johtuva alkalisuus on liikaa monille eri bakteerikannoille. Valun jälkeisessä kuivumisvaiheessa betonin sisäinen lämpötila voi

nousta hyvinkin korkeaksi, jopa 70 °C:een, joten bakteerin täytyy myös selvitä siitä. Lämpöäkin tuhoisampi asia eläville bakteereille betonissa on sementin hydrataatio, joka aiheuttaa puristusrasituksia bakteerien soluille murskatun ne /22/. Tämä puristuksen vaarallisuus johtuu bakteerien suuresta koosta (1 µm) betoniin jääviin huokosiin verrattuna, jotka voivat olla jopa vain nanometrien kokoisia (1000-kertaa pienempiä) /19/. Kuivumisen jälkeen betonirakenteessa ei ole paljoa vapaata vettä jäljellä, joten monien bakteerilajien on vaikeaa tai mahdotonta muodostaa uusia soluseiniä ja tämän myötä uusia bakteereja. /5, 18, 19/

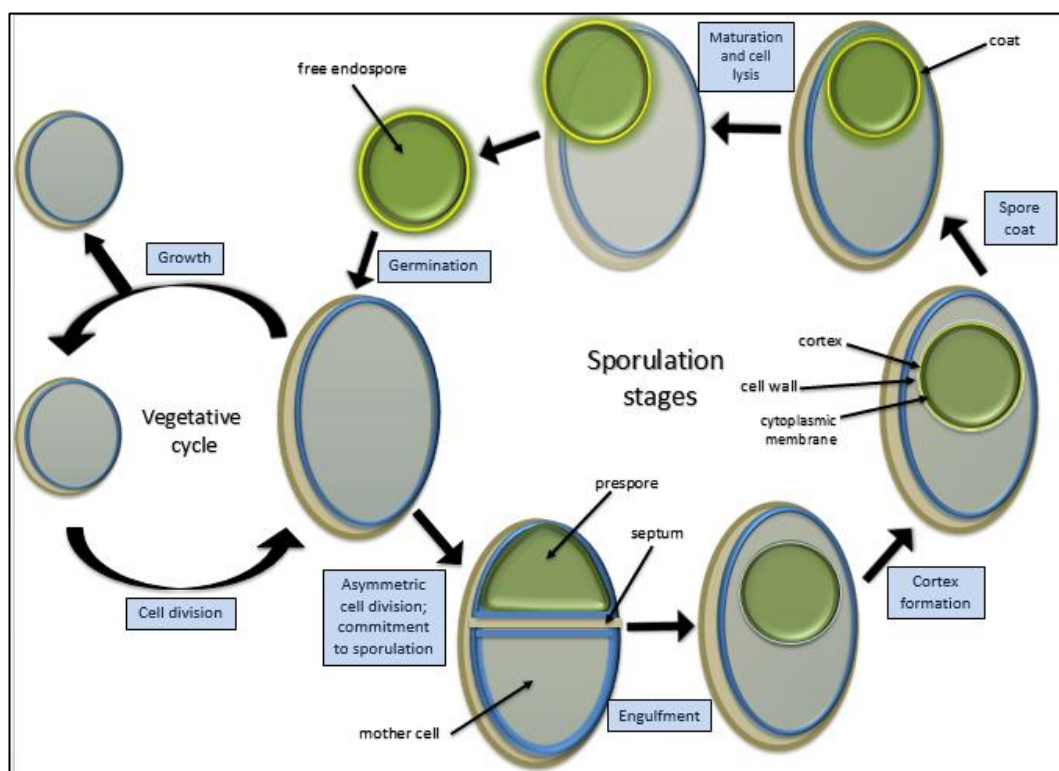


Kuva 9. Bakteeri-itiön rakenne. /23/

6.6 Itiömäiset bakteerit

Betonin asettamien haasteiden vuoksi valinta kääntyy itiöitä muodostaviin bakteerilajeihin. Nämä itiöitä muodostavat bakteerit kykenevät lepomuodossaan itiöinä selviämään tavallisia eläviä bakteereja paremmin betonin epäedullisissa olosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että näillä endoitiöillä on monia uniikkeja rakenteellisia piirteitä, joiden ansiosta ne ovat erittäin kestäviä soluja (Kuva 9). Niiden itiökuori (spore coat) on proteiinimainen kerros, joka suojaa itiötä entsyymeiltä, mekaanisilta vaurioilta ja kemiallisilta liuottimilta. Sen alla oleva itiökorteksi (spore cortex) sisältää peptidoglykaania, joka antaa kestävyyttä orgaanisille liuottimille ja kuumuudelle. Lisäksi se ylläpitää itiön lepotilaa (Kuva 10). Pienet happoliukoiset proteiinit

(SASP) suojaavat itiön keskuksen (spore core) DNA:ta UV-vahingoilta. Itiön keskus sisältää myös korkeita pitoisuuksia dipikoliinihappoa (dipicolinic acid, DPA). Dipikoliinihappo sitoo Ca^{2+} -ioneja, mikä alentaa keskuksen vesipitoisuutta ja sen uskotaan auttavan itiön lepotilan ylläpitämisessä sekä antavan itiölle lisää kestävyttä kuumuutta vastaan. /16/



Kuva 10. Endoitiön muodostuminen ja kehitysvaiheet. /24/

Näistä selviämistä edistävistä ominaisuuksistaan huolimatta edes itiömäiset bakteerit eivät täysin selviä betonin sekoituksen ja hydrataation aiheuttamista rasituksista. Lajikkeesta riippuen bakteeriset itiöt elävät suoraan sekoitettuna muutamista päivistä muutamiin viikkoihin, joskus jopa kuukausia. Tästä syystä bakteerit täytyy kapseloida tai immobilisoida ennen betoniin sekoittamista. /5, 22/

6.7 Bakteerin ravinteiden valinta

Betonin valmistamisen alkuprosessista selvittyään bakteerit tarvitsevat kuitenkin vielä ravinteita, voidakseen aktivoitua muodostaa paremmin uusia aktiivisia soluja. Nämä uudet aktiiviset solut puolestaan mahdollistavat kalsiumkarbonaatin

saostumisen. Kalsiumkarbonaatin biomineralisaatio on kuitenkin hidasta. Prosessin onnistumisen varmuutta, sekä sen nopeutta voidaan tehostaa lisäämällä oikeanlaisia ravinteita bakteereille. Bakteerien tarvitsema oikea ravinne riippuu valitusta bakteerista, sekä sen kalsiumkarbonaatin muodostamistavasta. /5, 22/

Ravintetta valittaessa täytyy myös ottaa huomioon, että bakteereille sopimisen lisäksi valitun ravinteen täytyy olla sopiva betonissa käytettäväksi. Jotkin bakteereille sopivista ravinteista voivat betoniin suoraan sekoitettuna aiheuttaa esimerkiksi lujuuden muodostumisen hidastumista tai jopa pienentää lopullista lujuutta. Yleisenä sääntönä voidaan pitää, että hidastimina toimivia yhdisteitä tulisi välttää, kuten myös klorideja ja sulfaatteja. /5, 22/

Koska pääosa itsekorjautuvan betonin tutkimuksesta perustuu kalsiumkarbonaatin muodostamiseen, ovat bakteereille valitut pääravinteet yleensä kalsiumpohjaisia yhdisteitä. Myös muunlaisia ravinteita voidaan käyttää lisäravinteina tehostamaan bakteerien toimintaa (Taulukko 7). /22/

Taulukko 7. Yleiskatsaus osasta mikro-organismeista ja ravinteista, joita käytetty kalsiumkarbonaatin muodostamiseen betoniseoksissa. /5/

Kalsiumkarbonaatin muodostus menetelmä	Mikro-organismi	Ravinteet	Betoniin lisäys menetelmä
Metabolinen muunnos	<i>Bacillus pseudofirmus</i>	Kalsiumlaktaatti, kalsiumglutamaatti, hiivauute ja peptoni	Suora lisäys
	<i>Bacillus pseudofirmus</i> <i>Bacillus cohnii</i>	Kalsiumlaktaatti, kalsiumasetaatti, hiivauute ja peptoni	Suora lisäys
	<i>Bacillus cohnii</i>	Kalsiumlaktaatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
	<i>Bacillus alkalinitrilicus</i>	Kalsiumlaktaatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
Urean hydrolyysi	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumnitraatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
	<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumkloridi	Suora lisäys

<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumnitraatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea ja kalsiumkloridi	Suora lisäys
<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumnitraatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumkloridi, kalsiumnitraatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumnitraatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumkloridi ja kalsiumasetaatti	-
<i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumnitraatti ja hiivauute	Suojattu lisäys
<i>Sporosarcina pasteurii</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Urea ja kalsiumkloridi	Suora lisäys
<i>Bacillus sphaericus</i> <i>Sporosarcina pasteurii</i>	Urea ja kalsiumasetaatti	Suora lisäys
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Urea ja kalsiumkloridi	Suojattu lisäys
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Urea, kalsiumnitraatti ja kalsiumkloridi	-
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Urea ja kalsiumnitraatti	-
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Urea ja kalsiumkloridi	Suojattu lisäys
<i>Sporosarcina pasteurii</i> <i>Bacillus cereus</i>	Urea, ravinneliemi ja kalsiumkloridi	Suora lisäys
<i>Bacillus amyloliquedaciens</i>	Urea, kalsiumasetaatti, hiivauute ja glukoosi	-
<i>Sporosarcina soli</i> <i>Bacillus massiliensis</i> <i>Arthrobacter crystallopoietes</i> <i>Lysinibacillus fusiformis</i>	Urea ja kalsiumkloridi	Suora lisäys

Denitrifikaatio	<i>Diaphorobacter nitro-reducens</i> <i>Bacillus sphaericus</i>	Urea, kalsiumformiaatti, kalsiumnitraatti ja hiiva-uute	Suojattu lisäys
------------------------	--	---	-----------------

6.7.1 Kalsiumsuolat

Urean hydrolyysiä käytettäessä, eniten tutkittu kalsiumionien lähde on kalsiumkloridi. Jos kalsiumkloridia käytetään kalsiumkarbonaatin prekursorina, on tärkeää pyrkiä pitämään kloridimäärä betonissa sallittujen rajojen alapuolella. Yleensä kloridi-ionien sallittu määrä betonissa on 0,4 % betonin massasta. Tällöin varmistetaan, ettei kloridi-ionien määrä betonin tukirauhoitusten läheisyydessä nouse liian suureksi ja mahdollista korroosion alkamista. Vaikka osa näistä kloridi-ioneista sitoutuu betonin hydrataation aikana erilaisiksi yhdisteiksi, niin osa ioneista jää kuitenkin vapaaksi. Lisäksi, jos betoni pääsee karbonatisoitumaan niin nämä kloridi-ioneja sitoneet yhdisteet hajoavat ja vapauttavat kloridin betonin huokosiin. Tämä raja tulee ottaa huomioon myös silloin, kun betoniin lisätty kalsiumkloridi on kapseloituna. /22/

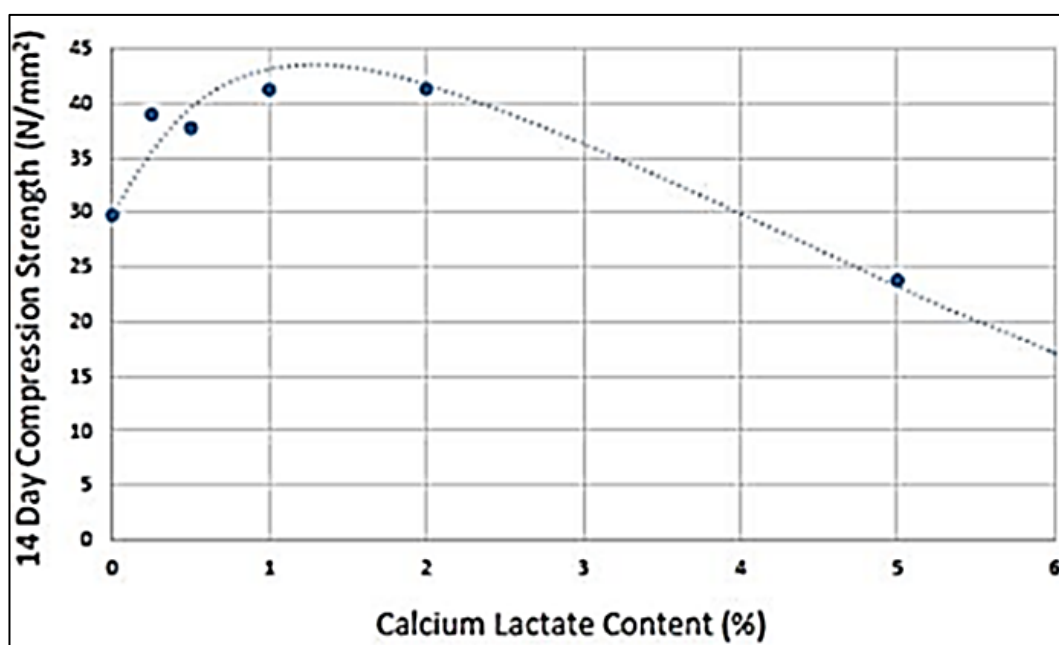
Viime aikoina tutkimus on kuitenkin kääntynyt kalsiumnitraatin käyttämiseen itsekorjautuvan betonin kehittämisessä. Kalsiumnitraatti on betonin kanssa yhteen sopeva aine ja sitä käytetään myös esimerkiksi kiihdyttimenä betoniseoksissa. Kalsiumnitraattia käytettäessä vältetään kloridi-ionien riskiltä tuoreessa betonissa. Sen on huomattu myös toimivan anodisena suojana, suojaten betonin tukirauhoituksia kloridiperäiseltä korroosiolta. /22/

Tutkimuksissa on huomattu, että kalsiumnitraattia on lisättäessä betoniin urean hydrolyysiä varten, kalsiumkarbonaatti nopeuttaa sementin hydrataatiota sekä lisää hydrataatioastetta. Tämä hydrataation tehostuminen saattaa kuitenkin aiheuttaa tilanteen, jossa betonirakenteeseen ei jää tarpeeksi kalsiumioneja, jotta kalsiumkarbonaattia pääsisi muodostumaan. Kun kalsiumnitraattia käytetään tavallisessa betonissa kiihdyttimenä, sitä käytetään yleensä puhtaassa muodossaan ja määränä 6 % sementin massasta. Itsekorjautuvan betonin testeissä Wang ym. käyttivät

kalsiumnitraatin hapettunutta muotoa, (30 % massasta vettä) jonka määrä oli 8 % sementistä. Tämä vastaa 5,6 % prosenttia puhdasta kalsiumnitraattia sementissä.

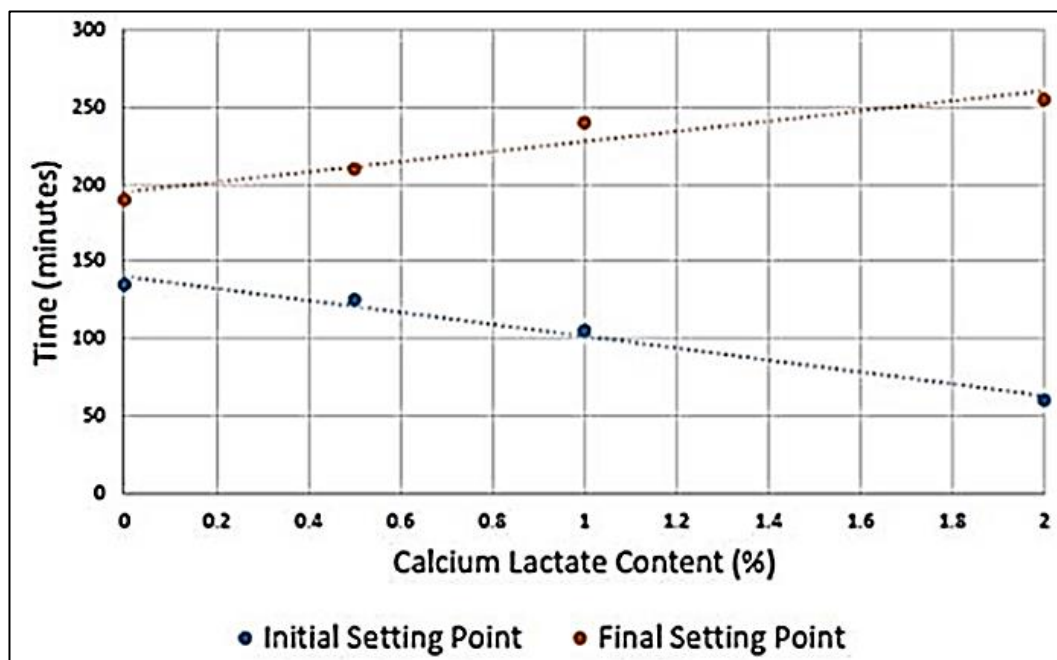
/22/

Metabolisen muunnoksen menetelmässä voidaan käyttää monia eri orgaanisia kalsiumlähteitä. Näistä suosituimpia kuitenkin ovat kalsiumasetaatti ja kalsiumlaktaatti. Jonkerssin ym. tekemät testit ovat osoittaneet, että kalsiumlaktaatti on ainoa näistä orgaanisista prekursoreista, joka voidaan suoraan lisätä betonimassaan ilman betonin lujuuden menetyksiä. Kalsiumlaktaatin suora sekoitus betonimassaan voi itseasiassa lisätä betonin puristuslujuutta. Tämä lujuuden lisäys kuitenkin saavutetaan vain, jos pysytään kalsiumlaktaatin optimimäärissä, 1 % tai 2 % sementin määrästä (Kuva 11). /22/



Kuva 11. Kalsiumlaktaatin vaikutus (per massaprosentti) betonin puristuslujuuteen. /22/

Mahdollinen syy tälle lujuuden nousulle on, että negatiivisesti varautuneet laktaatti-ionit saattavat imeytyä sementtihiukkasten pinnoille plastisoiden ne ja mahdollistaen suuremman sementtialan hydratoitumisen. Lisäksi Cuniffen suorittamat testit osoittavat, että kalsiumlaktaatti voi nopeuttaa alkulujuuden muodostusta, mutta hidastaa lopullisen lujuuden muodostumista (Kuva 12). /22/



Kuva 12. Kalsiumlaktaatin vaikutus sementin kovettumisaikaan (per massaprosentti). /22/

Tutkimusten perusteella kalsiumlaktaatti on paras kalsiumin lähde itsekorjautuvaa betonia valmistettaessa. Se on kuitenkin kallista ja hankalaa valmistaa, tämä nostaa myös itsekorjautuvan betonin valmistamisen hintaa. Jos kalsiumprekursori kuitenkin lisätään betoniin kapseloituna, muuttuvat sen vaikutukset betoniin valu- ja kuivumisvaiheessa minimaalisiksi. Poikkeuksena tähän ovat tapaukset, joissa tapahtuu mittavia kapselointien pettämisiä sekoituksen yhteydessä. Kapselointia käytettäessä kalsiumasetaatti on erittäin hyvä vaihtoehto kalsiumlaktaatille, sillä kalsiumasetaatti on halvempaa valmistaa ja sitä on paremmin saatavilla. /22, 25/

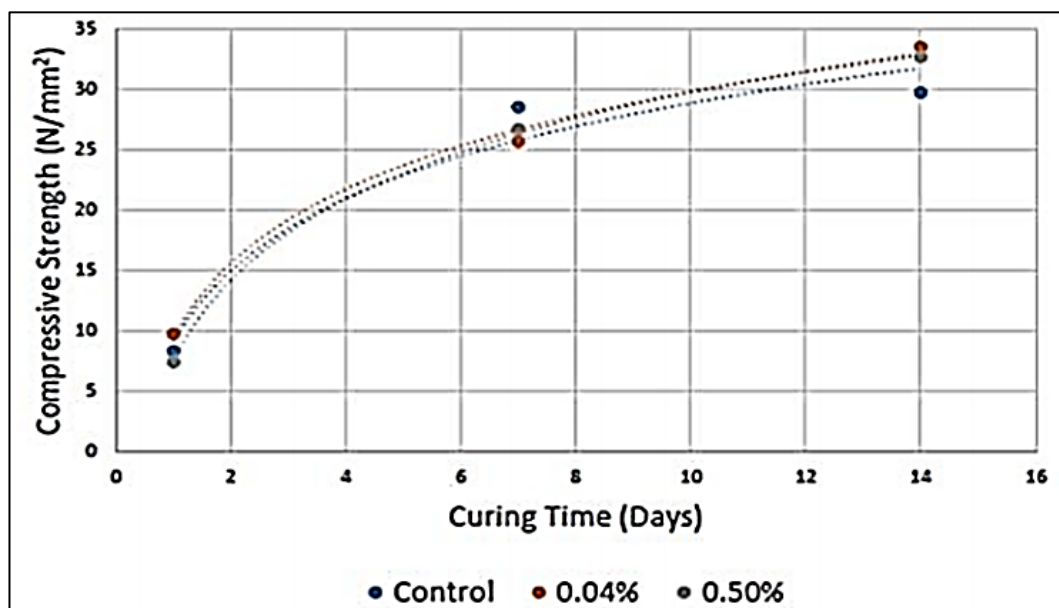
6.7.2 Urea

Urean hydrolyysissä urea on ravinnesekoitusten tärkein osa. Urean muuttuessa ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi, toimii bakteri entsyymien välittäjänä reaktiossa. Ammoniumionien kertyminen betoniin ja siitä ilmaan aiheutuvat typpipäästöt ovat urean hydrolyysin huonot puolet. On myös arveltu, että mikäli betonin seassa on myös nitrifikaatioon kykeneviä bakteereja, saattaisivat ne muuntaa ammoniakkia nitriittihapoksi, aiheuttaen aggressiivisesti vauriota betonirakenteelle. Tätä ei ole kuitenkaan havaittu tapahtuvan itsekorjautuvissa betoneissa. /22/

Wang ym. ovat arvelleet urean hidastavan sementin hydrataatiota. Bundur ym. ovat kuitenkin kokeillaan osoittaneet, että urealla on vain hyvin vähän vaikutusta hydrataatioon urean määrän ollessa 0,5 % sementin massasta. /22/

6.7.3 Hiivauute

Hiivauute on yleisesti käytetty hiilen lähde urean hydrolyysissä ja typen lähde käytettäessä metabolista muunnosta. Se myös sisältää muita tarpeellisia mineraaleja. Tutkimukset ovat osoittaneet, että hiivauutteen lisäys betonisekoitukseen hidastaa kovettumista ja lujuudenkehitystä. Esimerkiksi Bundurin ym. tutkimusten perusteella hiivauutteella on merkittävä vaikutus sementin hydrataatiolle. Lisäksi Jonkerssin ym. tutkimukset ovat osoittaneet, että hiivauutteen lisäys betoniin (1 % sementin massasta) heikentää betonin lujutta. Cuniffe ym. ovat kuitenkin omassa tutkimuksessaan osoittaneet, että hiivauutteella ei ole vaikutusta betonin lujuteen, kun hiivan määrä on 0,5 % sementin massasta (Kuva 13). /22/



Kuva 13. Hiivauutteen vaikutus betonin varhaiseen lujuuden muodostukseen. /16/

6.7.4 Sokerit

Myös sokereita voidaan käyttää bakteerien ravinteena itsekorjautuvaa betonia valmistettaessa. Sokeri toimii kuitenkin betoniin suoraan sekoitettaessa hidastimena, sillä se estää kalsiumsilikaattihydraattien muodostumisen sementin hydrataation aikana kiinnittymällä kalsiumhydroksideihin ja kalsiumsilikaatteihin. Sokerin hidastava vaikutus kasvaa sokerimäärän kasvaessa betonimassassa. On arveltu, että sokerin määrän ollessa 0,1 % sementin määrästä betonin kovettuminen hidastuu pysyvästi. Tästä huolimatta on teorioitu, että sokerimäärän ylittäessä 0,15 % alkaisi sen hidastava vaikutus pienentyä. Sokerimäärän ylittäessä 0,3 % se saisi aikaan nukleaatiovaikutuksia ja alkaisi toimia kiihdyttimenä. /22/

6.7.5 Natrium

Tutkimukset ovat osoittaneet, että bakteeri-itiöiden kasvu on suotuisaa natriumin läsnä ollessa. Tämän suotuisan vaikutuksen vuoksi natriumyhdisteiden käyttöä on harkittu monesti ravinneyhdisteessä. Oikeanlaisen natriumlähteen löytäminen bakteereille on kuitenkin osoittautunut hankalaksi. Natriumkloridia tulisi välttää sen betonille haitallisten vaikutusten vuoksi. Natriumkloridin lisäksi myös natriumsitraatin on todettu olevan käyttökelpoton natriumin lähde itsekorjautuvassa betonissa, sillä se hidastaa merkittävästi sementissä tapahtuvaa hydrataatiota ja betonin lujuuden muodostusta. Natriumsitraatin haittavaikutukset betoniin kuitenkin katoavat ajan kuluessa. /22, 25/

6.7.6 Proteiinit

Peptoni, tryptoni, tryptonipeptoni, tryptikaasi ja tryptikaasipeptoni ovat osittain sulaneita proteiineja, joita käytetään elatusaineissa aminohappojen, peptidien, proteiinien ja typen lähteenä. Niitä tuotetaan joko entsyymien avulla tai hajottamalla kemiallisesti monimutkaisempia proteiineja. Tutkimuksissa on huomattu betonin lujuuden pienenevän, kun siihen lisättyjen proteiinien määrä ylittää 1 % sementin massasta. /22/

6.7.7 Puskuriliuokset

Trishydroksimetyyliamonometaani ($C_4H_{11}NO_3$) lyhyeltä nimeltään tris on orgaaninen yhdiste, jota käytetään laajasti erilaisissa puskuriliuoksissa. Betonissa käytettäessä tris voi lisätä sementin hydrataation nopeutta. Tämän arvellaan johtuvan trisin vaikutuksesta trikalsiumsilikaatin (C_3S) liukenemiseen ja/tai sen toimimisesta nukleaatioalustana hydrataatiotuotteille. /22/

6.8 Muut vaikuttavat tekijät

Valittujen bakteerien omien ominaisuuksien ja valittujen ravinteiden lisäksi myös bakteerien lopullisella sijoitusympäristöllä on merkitystä bakteerien selviämiseen, kasvamiselle, sekä kalsiumkarbonaatin tuotannon tehokkuudelle. Tämä kaikki riippuu valittujen bakteerien kyvystä selviytyä kuumissa (termofiilinen) ja kylmissä (psykrofiilinen) olosuhteissa, sekä suola- ja makeavetisissä ympäristöissä. /22/

Näistä ominaisuuksista moniakaan ei ole vielä tutkimuksissa otettu täysin huomioon itsekorjautuvaa betonia kehittäessä. Suurin osa laboratorioissa tehdyistä kokeista on keskittynyt bakteri-itiöiden itämiseen ja kalsiumkarbonaatin muodostamiseen. Kyseiset tutkimukset on pyritty toteuttamaan bakteereille optimaalisissa olosuhteissa. /22/

6.8.1 Lämpötila

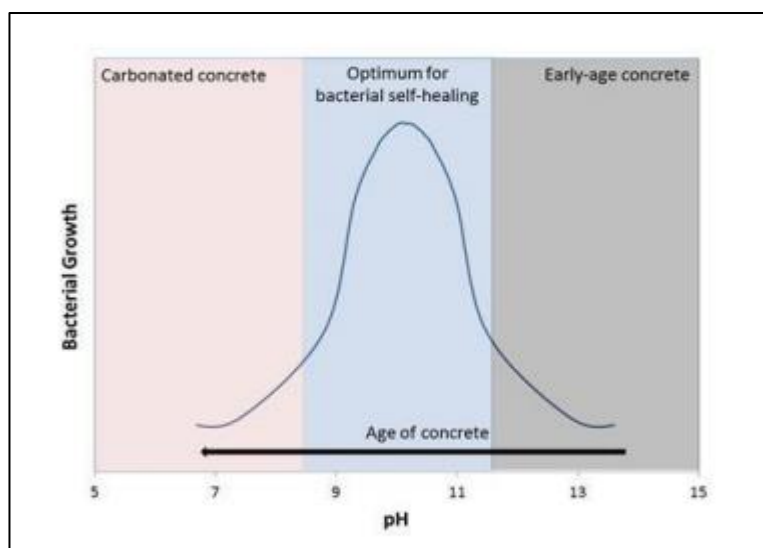
Alkalofiilisten bakteerien kasvamiselle ja kalsiumkarbonaatin muodostamiselle ympäristön optimaalinen lämpötila on yleensä 25 °C – 45 °C . Jotkin alkalofiiliset bakteerikannat ovat kuitenkin osoittaneet psykrofiilisiä piirteitä ja ovat kyenneet kasvamaan ja elämään lämpötiloissa, jotka vaihtelevat välillä -5 °C – 39 °C . Itsekorjautuvan betonin kehityksen kannalta olisi suuri edistysaskel, jos löytyisi bakteeri, joka kykenisi muodostamaan kalsiumkarbonaattia alle 0 °C lämpötiloissa. /22/

Joidenkin *Bacillus sphaericus*, *Bacillus megaterium* ja *Bacillus firmus* kantojen on havaittu kykenevän muodostamaan kalsiumkarbonaattia B4-kasvualustassa jopa 4 °C lämpötiloissa. Vaikka kalsiumkarbonaatin muodostaminen alhaisissa

lämpötiloissa oli hitaampaa, kuin korkeammissa, todistaa se itsekorjautumisen olevan mahdollista myös alhaisissa lämpötiloissa bacillus-sukua käytettäessä. /26/

6.8.2 Ympäristön pH-arvo

Betonin korkean alkalisuuden vuoksi on tultu siihen johtopäätökseen, että bakteerien, joita käytetään itsekorjautuvan betonin valmistamiseen, täytyy olla alkalofiilisiä. Alkalofiilisten bakteerien itiöt kykenevät itämään ja monistumaan betonissa olevissa pH olosuhteissa, betonin haljetessa ja aktivoitessa ne. Alkalofiiliseksi bakteereiksi kutsutaan bakteereja, joiden elinympäristön optimaalinen pH-arvo on 9 yläpuolella ja useimmiten 10–12 (Kuva 14). Ne eivät kuitenkaan kykene kasvaamaan tai kasvavat hitaasti lähellä neutraalia 6,5 pH-arvoa. Alkalisen ympäristönsä lisäksi nämä bakteerit tarvitsevat natriumioneja kasvaakseen, muodostaakseen itiöitä ja itiöiden itämiseen. Siirryttäessä optimaalisten pH-arvojen ulkopuolelle, on huomattu, että alkalofiilisten bakteerien homeostaasi pettää joko vähitellen tai yllättäen. Tästä huolimatta monet bakteerikannat kykenevät selviämään jonkin aikaa normaalien elinolosuhteidensa ulkopuolella. Esimerkkinä tällaisesta on tuoreen betonin korkea pH (jopa yli 13). /22, 27/



Kuva 14. Optimaalisten olosuhteiden ja pH-arvon vaikutus alkafiilisten bakteerien kasvulle. /22/

Betonirakenteen käyttöön aikana sen pH-arvo vaihtelee karbonatisoitumisen vuoksi. Koska pääosa korjausta tarvitsevasta halkeilusta sijaitsee betonin

pintakerroksissa noin 20 mm pinnasta on tärkeää, että sen pH-arvo säilyy riittävän korkeana. Tämä pintakerrosten karbonatisoitumiseen ja pH-arvon putoamiseen alle 8,5 kuluva aika on itsekorjautuvan betonin toiminnan kannalta kriittinen. Jos betoni karbonisoituu liian nopeasti, voidaan itsekorjautumisen olettaa toimivan joko huonosti tai ei ollenkaan. Sama oletus voidaan tehdä myös silloin, jos betonissa ei pääse tapahtumaan ollenkaan karbonatisoitumista. /22/

On myös arveltu, että joissain tapauksissa voisi olla tarpeellista lisätä itsekorjautuvaan betoniin myös toista bakteerikantaa puskuriliuoksen kanssa ylläpitämään betonin sopivaa emäksisyyttä. Toisena vaihtoehtona on käyttää bakteereja, jotka kykenevät muuntamaan elinympäristönsä pH itselleen sopivammaksi. Tästä esimerkkinä *Bacillus pseudofirmus*, jonka kasvualue pH:n suhteen on 8–10. Sen on osoitettu muuttavan kasvualustansa pH arvosta viisi arvoon kahdeksaksi, tuottamalla alkaanista proteaasia. Tutkijat uskovat, että itsekorjautuvan betonin toiminnan varmuuden kannalta tämä bakteerien kyky muuntaa elinympäristönsä pH-arvoa on avainasemassa. /22, 27/

6.8.3 Kosteus

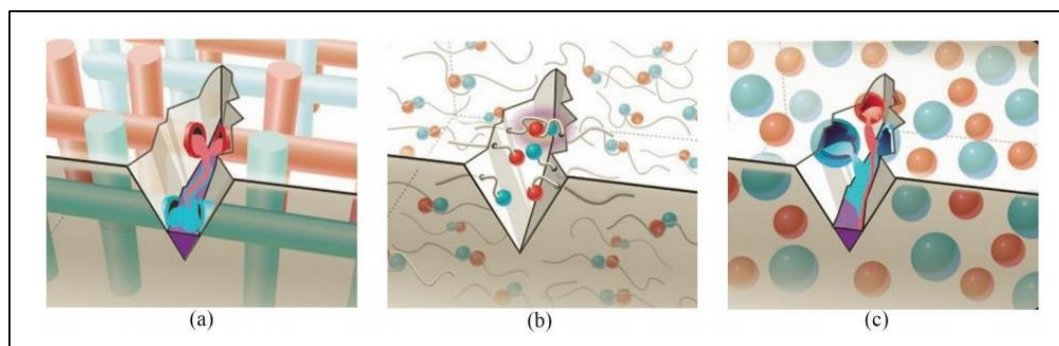
Vesi on tärkeässä roolissa itsekorjautuvassa betonissa. Se osallistuu bakteeristen itiöiden heräämiseen lepotilastaan ja betoniin sekoitettujen mineraalien täytyy olla veteen liuenneina, jotta bakteerit kykenevät hyödyntämään niitä. Näin ollen kalsiumkarbonaattia ei voi muodostua, mikäli halkeamassa ei esiinny vapaata vettä. Tämän todistivat Wang ym. kokeillaan. Tutkimuksissa osoittautui, että koekappaleissa, jotka säilytettiin 60 % suhteellisessa kosteudessa, ei esiintynyt lainkaan itsekorjautumista. Myös tilanteissa, joissa betoni on täysin kyllästynyt, esimerkiksi maan alla tai veden alla, itsekorjautumisen teho on heikko tai olematon. Tämä johtuu siitä, että kyllästynyt betoni on suojassa karbonatisoitumiselta, eikä tällöin sisällä tarpeeksi kalsiumkarbonaatin muodostamiseen tarvittavaa hiilidioksidia. /22, 28/

On mahdollista, että bakteeripohjaiselle itsekorjautumiselle on olemassa optimaalinen suhteellisen ilmankosteuden arvo. Se saattaa vastata olosuhteita, jossa karbonatisaatiota todennäköisimmin tapahtuu, mutta ei tapahdu liian nopeasti. /22/

6.9 Bakterien lisäys betoniin

Jotta tavallinen betoni saadaan muutettua itsekorjautuvaksi betoniksi sekoitusvaiheessa, täytyy valitut bakteerit, sekä ravinteet lisätä onnistuneesti betonimassaan. Tällä hetkellä itsekorjautumisen vaatimat ainesosat voidaan sekoittaa betoniin käyttämällä kolmea erilaista lisäystapaa (Kuva 15):

- vaskulaarinen putkisto
- suora lisäys
- suojattu lisäys (kapselointi). /5/



Kuva 15. Bakterien ja ravinteiden lisäystavat betoniin. /5

6.9.1 Suora lisäys

Suorassa lisäyksessä bakteerit, sekä niiden tarvitsemat ravinteet liuotetaan veteen ja vesi sekoitetaan betoniin, kuten tavallisestikin. Suora lisäys on halvin ja helpoin tapa lisätä bakteerit betoniin. Tarvitaan vain valmiit lepotilassa olevat bakteeri-itiöt, sekä niiden ravinteet. Suorassa lisäyksessä on kuitenkin monia ongelmia, jotka tekevät tämän menetelmän käyttämisestä uuden betonin valmistamisessa hankalan ja usein jopa hyödyttömän. Olemassa oleviin betonirakenteisiin voidaan suoraa lisäystä hyödyntää käyttämällä nestemäisiä bakteeri-ravinnesekoitteita, jotka voidaan imeyttää rakenteen pintaan. Tätä menetelmää ei ole vielä paljon tutkittu, mutta esimerkiksi Green Basilisk-yritys on luonut tähän käyttötarkoitukseen soveltuvan kaksikomponenttisen suihkutettavan sekoitteen /5, 29/.

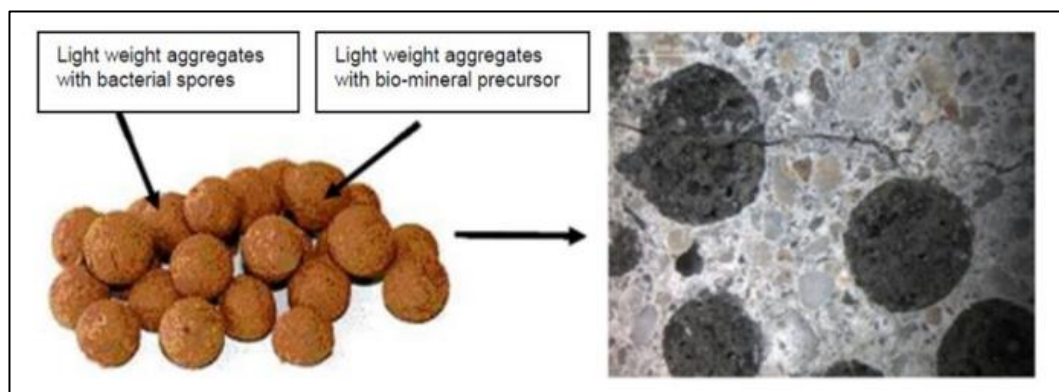
Kuten jo aiemmin esitettiin, tuoreen betonin olosuhteet ovat erittäin epäedulliset jopa kestävillekin bakteereille (mm. suuri pH ja sementin hydrataation aiheuttama

murskautuminen). Tästä esimerkkinä on Jonkerssin ym. suorittama testi, jossa he lisäsivät Bacillus-sukuun kuuluvan *Bacillus cohnii* bakteerin itiöitä suoraan betoniin. Lisäämisen jälkeen he seurasivat elinkelpoisten itiöiden määrää valetuissa testikappaleissa. Kelvollisten itiöiden määrät laskettiin valamisen jälkeen 9, 22, 42 ja 153 päivän kohdalla. Elinkelpoisten bakteerisolujen määrä pysyi testikappaleissa vakiona 9. päivään saakka. Tämän jälkeen elinkelpoisten solujen määrä putosi radikaalisti, 22. päivään mennessä 80 % alaspäin ja 42. päivään mennessä 90 %. Tutkimuksen perusteella bakteerit voisivat suoraan lisättynä selvitä elinkelpoisina 4 kuukauden (135) ajan maksimissaan. Näin ollen selviytyäkseen pitkiä aikoja betonissa ja kyetäkseen suorittamaan betonin korjaamista, tarvitsevat bakteerit jonkinlaista suojausta betoniin sekoitettaessa. /5/

6.9.2 Suojattu lisäys

Bakteerien ja ravinteiden suoran sekoittamisen sijasta ne voidaan suojata ennen betonimassaan lisäämistä. Bakteerien suojaamiseen voidaan käyttää kapselointia tai bakteerien immobilisointia suojaavaan materiaaliin, kuten esimerkiksi piimaahan tai hydrogeeliin. /5, 19, 24/

Kapseloinnissa bakteerit, sekä niiden tarvitsemat ravinteet lisätään kevytsoran kaltaisiin paisutettuihin savipelletteihin (Kuva 16) tai muuhun huokoisesta materiaalista valmistettuun pellettiin. Nämä pelletit suojaavat bakteereja mekaanisilta voimilta betonin sekoituksen ja kovettumisen ajan. Pellettejä voidaan valmistaa monessa eri koossa, riippuen minkä kokoista runkoainetta niillä halutaan korvata. Bakteerit aktivoituvat pellettien sisällä, kun betoniin muodostuu halkeama, joka halkaisee myös pelletin. Jonkerssin testien perusteella bakteerien kapselointi on hyvä tapa suojata bakteereja betonin sisällä. Testissä ei havaittu merkittäviä itiöiden määrän menetyksiä 6 kuukauden betonissa olon jälkeen. /9, 13/



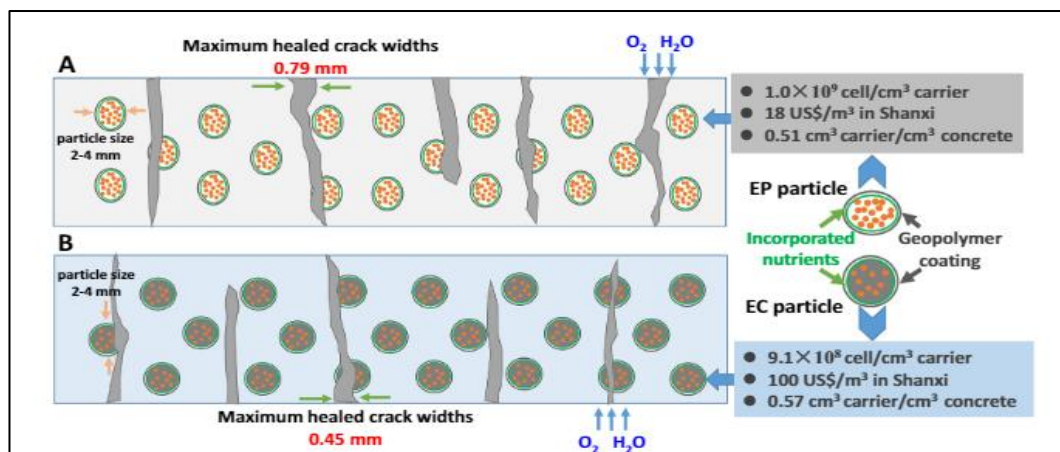
Kuva 16. Kevytsorapellettejä irtonaisena, sekä betoniin sekoitettuna. /13/

Hyvistä tuloksista huolimatta kapselointi ei ole täydellinen suojakeino bakteereille. Kapselointi on joillain materiaaleilla työlästä (savipelletit), johtuen prosessin hitautesta ja vähistä tuotantomääristä. Kapselointi myös lisää yhden työvaiheen itsekorjautuvan betonin valmistamiseen, mikä puolestaan nostaa itsekorjautuvan betonin tuotantokustannuksia. Kapseloinnissa käytettävien pellettien tulee olla kuitenkin tarkasti optimoituja. Liian ohutkuoriset pelletit hajoavat heti sekoitusvaiheessa antamatta suojaa bakteereille. Jos kuori on liian paksu, se ei välttämättä rikkoudu halkeaman muodostuessa betoniin. Tällöin bakteerit eivät vapaudu, eikä itsekorjautumista pääse tapahtumaan. Betoniin lisätyt kapselit eivät myöskään saa vaikuttaa tuoreen betonin työstettävyyteen. Lisäksi pellettejä tulee olla riittävästi betonimassassa, jotta muodostunut halkeama osuisi todennäköisesti myös pellettiin. Pellettien liian suuri määrä betonimassassa kuitenkin huonontaa betonin puristuslujuutta. Näin ollen kapseloinnin teho riippuu sekä kapseleiden rakenteesta (koko ja kuoren paksuus), että niiden riittävästä leviämisestä joka puolelle betonimassaa. /5, 30/

Savipelletteihin immobilisoinnin lisäksi on myös muita materiaalivaihtoehtoja bakteerien suojaamiseksi. Tähän mennessä testattuja vaihtoehtoja ovat; hydrogeeli, silikageeli, zeoliitti, paisutettu savi, rakeinen aktiivihiili ja metakaoliini. Tutkimukset ovat osoittaneet, että hydrogeeli toimii suojan lisäksi myös ylimääräisenä veden lähteenä bakteereille tehostaen kalsiumkarbonaatin muodostumista. Hydrogeelin avulla suojatuilla bakteereilla on pystytty korjaamaan 0,2–0,5 mm halkeamia. Hyvistä ominaisuuksistaan huolimatta hydrogeeli ei ole realistinen vaihtoehto todellisissa betonirakenteissa käytettäväksi. Hydrogeeli suojauksen hinta on liian suuri,

jotta sitä voitaisiin edes harkita rakennusteollisuudessa käytettäväksi. Jos esimerkiksi käytetään täysin steriilejä bakteeriviljelmiä ja suojataan ne hydrogeelin avulla, voi itsekorjautuvan betonin kuutiointa nousta pihimmillaan jopa noin 5 700 €. Korkea hinta aiheutuu sekä hydrogeelisuojauksen kalleudesta, että steriilien puhdasviljelmien korkeista tuotantokustannuksista. /5, 19, 31/

Zhangin ym. suorittamassa testissä kokeiltiin myös *Bacillus cohnii*-bakteerilajin immobilisointia paisutettuun perliittiin. Perliitti on vulkaanista kiviainesta, joka muuttuu erittäin huokoiseksi materiaaliseksi, kun sitä lämmitetään yli 870 °C lämmössä. Huokoisuutensa ja halvan hintansa vuoksi perliitti on houkutteleva vaihtoehto bakteerien suojaamiseen. Testin perusteella perliitti toimii erinomaisesti bakteerien suojana ja on varteenotettava vaihtoehto bakteerien suojausta mietittäessä. Testissä perliittiin suojatut bakteerit korjasivat suurempia rakoja 0,79 mm, kuin esimerkiksi savipelletteihin kapseloidut bakteerit 0,45 mm (Kuva 17). Tämän oletetaan johtuvan perliitin suuresta huokoisuudesta, jonka vuoksi perliitistä tehtyyn pellettiin mahtuu enemmän bakteereja, kuin moniin muihin suojauksiin. Perliitti on siis monia muita suojausmateriaaleja halvempaa ja suuren huokoisuutensa ansiosta se pystyy sisältämään enemmän bakteereja, kuin esimerkiksi paisutetut savipelletit. Kiinan Shanxin provinssin hinnoilla verrattuna perliittisuojaus tuo betoniin vain 18 \$/m³ lisähintaa, kun taas kevytsorapelletit voivat nostaa hintaa jopa 100 \$/m³. /32/

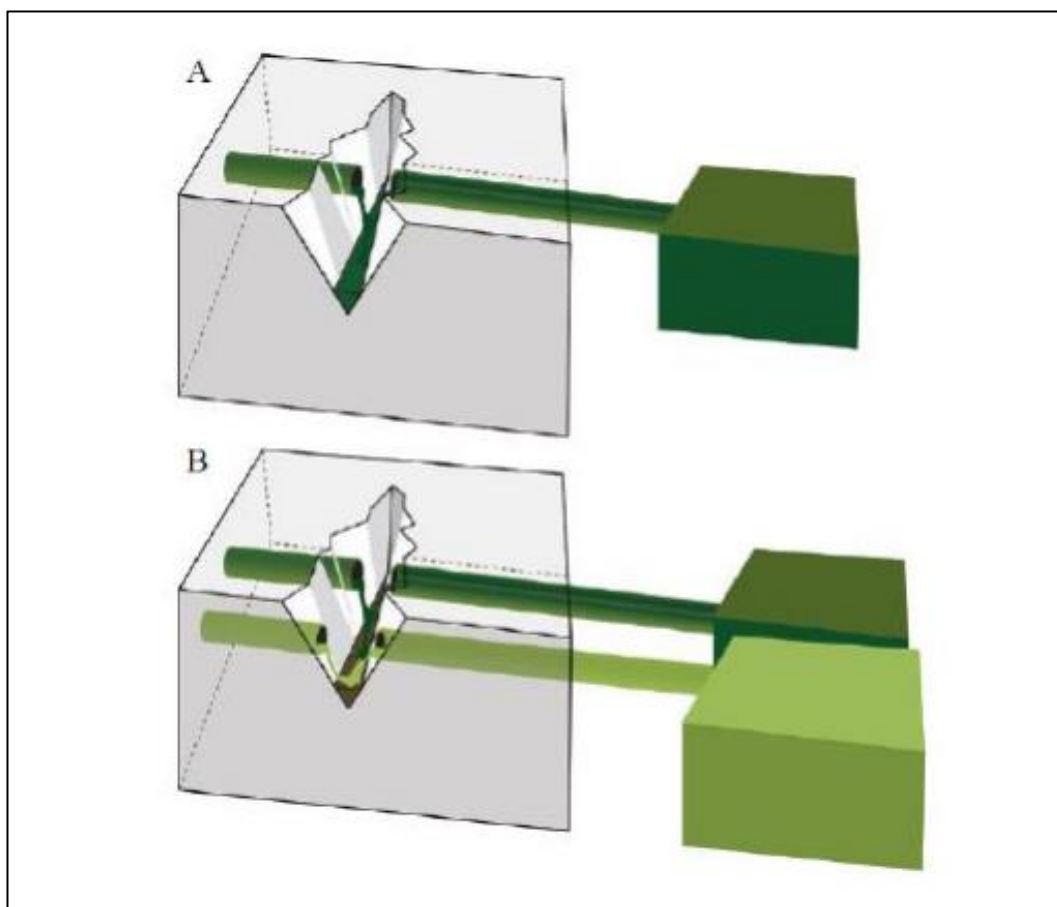


Kuva 17. Vertailu perliitti- ja savipohjaisten pellettien tehokkuudesta Zhangin ym. suorittamassa testissä. /32/

6.9.3 Vaskulaarinen putkisto

Bakteeripohjaisen itsekorjautumisen yksi potentiaalinen ongelma on bakteerien tarvitsemien ravinteiden ja prekursorien loppuminen. Ravinteita ja muita bakteerien tarvitsemia aineita voidaan sekoittaa betoniin vain rajallinen määrä ja niiden loputtua ei itsekorjautuminen ole enää mahdollista. Tarvitaan siis ravinteiden lisäysmenetelmä. Tällaisessa tapauksessa yhtenä vaihtoehtona on vaskulaarinen putkisto. /5, 22/

Vaskulaarisessa menetelmässä, betonirakennelmaan valetaan halkaisijaltaan muutamamillin (4–8 mm) onttojen putkien verkosto, joka täytetään itsekorjautumisen mahdollistavalla liuossekoituksella. Yksinkertaisimmillaan tämä vaskulaarinen järjestelmä voisi olla yksi tai useampi putki betonipalkissa. Monimutkaisemmat rakenteet vaativat monimutkaisempaa putkiverkostoa betoniin, mikä myös vaikeuttaa sen toteuttamista. Putkiston monimutkaisuuteen vaikuttaa myös käytetty itsekorjautumisen aineksen tyyppi. 1-komponenttiset parantavat ainekset vaativat yhden putkiston, mutta 2-komponenttiset ainekset vaatisivat kaksi erillistä putkistoa betonirakenteeseen (Kuva 18). /5, 22, 33/



Kuva 18. Yksinkertaistettu malli vaskulaarisen putkiston toiminnasta. /33/

Betonin haljetessa putki halkeaa myös, valuttaen liuoksen halkeamaan ja aloittaen itsekorjautumisen. Liuos päättyy halkeamin kapillaaristen ja gravitaationaalisten voimien avulla. Putkiverkosto voidaan myös tarvittaessa paineistaa, mikäli se on liitetty rakenteen ulkopuolisiin täyttötankkeihin. Tällöin myös putkiston sisäinen paine auttaa liuoksen siirtymistä putkistosta betoniin. Ajan kuluessa, mikäli liuos alkaa loppumaan, putkisto täytetään uudelleen. Täyttäminen tapahtuu joko systeemiin rakennetun täyttötankin avulla, tai systeemin ulkopuolisesta lähteestä manuaalisesti. /5, 22, 33/

Kuten muillakin bakteerien lisäyskeinoilla betoniin, myös vaskulaarisella putkistolla on omat ongelmansa. Ensimmäinen ongelma on betonin halkeilu. Jotta itsekorjautuminen pääsisi alkamaan, täytyy betonin haljetessa myös putkiston haljeta. Jos betoniin muodostunut halkeama on putkiston suuntainen, niin putkisto ei halkeaa, eikä itsekorjautuminen pysty alkamaan. Muodostunut halkeama ei saa

myöskään olla liian suuri, muuten putkistosta valuva liuos valuu heti ulos betonista, eikä itsekorjautuminen tällöinkään pääse kunnolla alkamaan. /33/

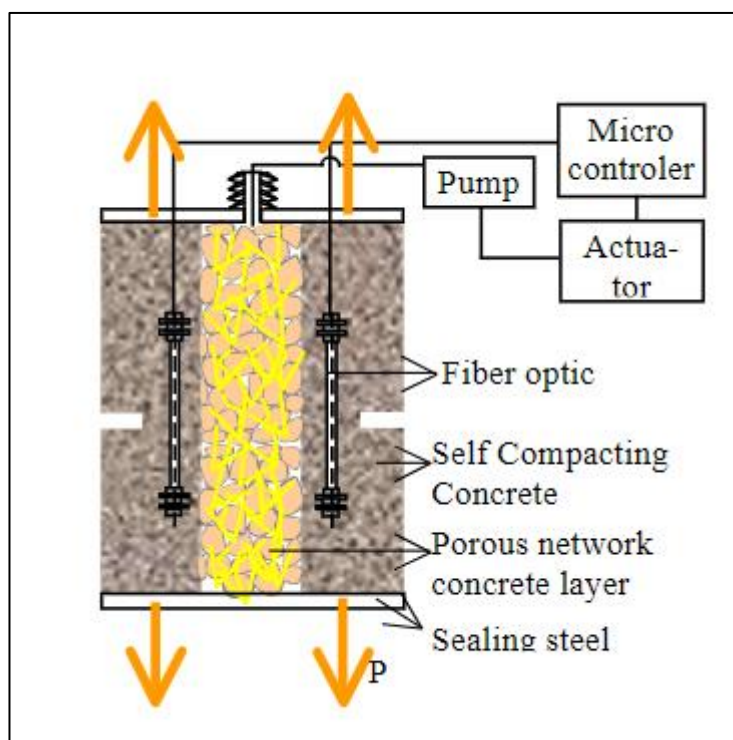
Toinen ongelma on putkien asettelu. Yksinkertaisissa rakenteissa, kuten palkeissa, putket on helppo asentaa paikkoihin, missä halkeilua voidaan olettaa tapahtuvan. Monimutkaisemmissa rakenteissa tämä prediktiivinen asettelu muuttuu hankalaksi. Jos mahdollisia halkeama paikkoja ei voida ennustaa, pitäisi putkia saada asennettua tasaisesti joka puolelle valettavaa kappaletta. Putkien liiallinen asentaminen voi kuitenkin heikentää betonirakennetta ja hankaloittaa sen valamista. Betonirakenteseen asennettu putkisto voi huonolla tuurilla rikkoutua jo valuvaiheessa betonin kuivumisesta aiheutuvista sisäisistä voimista. /5, 33/

Kolmas ongelma on materiaalien valinta. Putkiin pumpattavan liuoksen viskositeetti tulisi olla vakio koko betonin elinkaaren ajan, jotta se valuisi luotettavasti rakoihin. Tähänastisissa tutkimuksissa ei ole vielä löytynyt täysin optimaalista materiaalia putkistoon käytettäväksi. Putkistossa käytettävä materiaali ei saisi reagoida betonin tai itsekorjautumisessa käytettävän liuoksen kanssa. Materiaalin tulisi myös olla riittävän haurasta, että se murtuu halkeaman muodostuessa, mutta ei niin heikkoa, että se heikentäisi betonirakennetta liikaa. Materiaalin tulisi myös sopia betonin kanssa käytettäväksi. /5,33/

Monissa tutkimuksissa on käytetty testeissä lasiputkistoa. Lasi ei kuitenkaan sovi betonin kanssa käytettäväksi, sillä alkalisilla aineilla (kuten betonilla) on haitallinen vaikutus silikapohjaisiin aineisiin. Lisäksi tästä aiheutuvalla alkali-silika-reaktiolla on haitallisia vaikutuksia betoniin. /33/

Yksi vaihtoehto putkiston luomiselle betoniin on tehdä betoniin ontto putkisto valun jälkeen poistettavien polyuretaanimuottien avulla. Tämäkään vaihtoehto ei kuitenkaan ole optimaalinen, sillä tyhjätilat betonin sisällä heikentävät sen kestävyttä. Vaihtoehtona tälle ontolle putkistolle on tehdä vastaavanlainen ontto putkisto käyttäen PVA-kalvoja. Putkisto täytetään erittäin huokoisella betonilla (Kuva 19). Kun tavallinen kova betoni valetaan, PVA-kalvo liukenee ja tämän jälkeen itsekorjautumisen mahdollista liuos pystyy kulkemaan huokoista betonia pitkin muodostuneisiin rakoihin. Putkiston yhteyteen asennettaisiin sensoreita ja sensoreiden

havaitessa halkeamia rakenteessa putkistoon pumpattaisiin itsekorjautumisen mahdollistavat aineet. /33, 34/



Kuva 19. Periaatekuva huokoisen betonin täyttämistä putkistojärjestelmistä. /34/

6.10 Täysimittaiset testikohteet

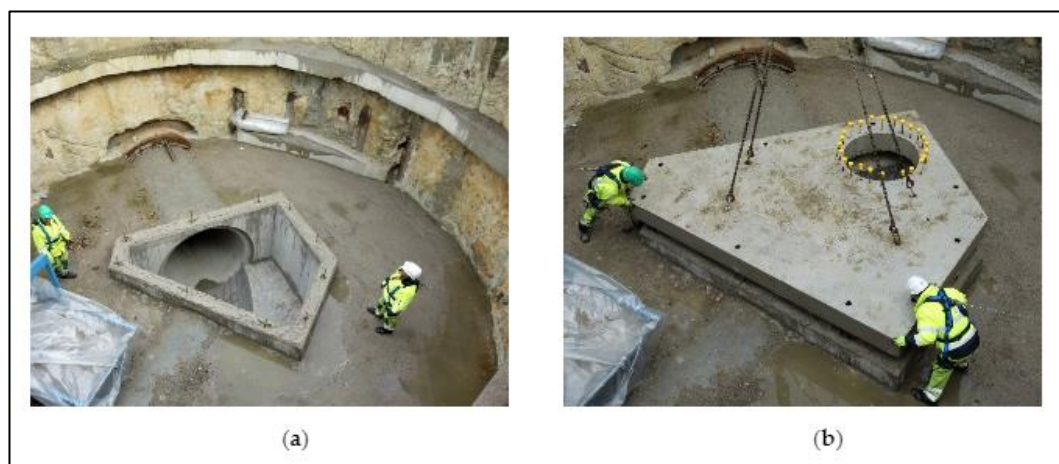
Tähän mennessä pääosa bakteeripohjaisen itsekorjautuvan betonin käytöstä on keskittynyt pienen skaalan laboriotestauksiin. Viime aikoina on kuitenkin alettu siirtyä myös suuren skaalan testeihin (laboratio-olosuhteissa), sekä jossain paikoissa jopa todellisiin täysimittaisiin testikohteisiin. Täysimittaisiin testeihin siirtymistä hankaloittavat niin itsekorjautumisen mahdollistavan sekoitteen tuotannon suurentaminen, kuin sopivien testikohteiden löytäminenkin. Todellisia testejäkin on kuitenkin tehty ja mikäli niistä saadut tulokset ovat hyviä, voi itsekorjautuvan betonin käyttö yleistyä. Täysimittaisia testejä on tehty mm. Belgiassa, Iso-Britanniassa ja Hollannissa. Ecuadorissa itsekorjautuvaa betonia käytettiin kastelunkanavan vesitiiveyden parantamiseen. /31, 35–39/

6.10.1 Testikohde Belgiassa

Belgian Antwerpenin kaupungissa valettiin moottoritien sadevesiviemäristön tarkistuskammion kattolaatta (Kuva 21). Testikohde valittiin, koska laatan pohjaa, joka on varmimmin halkeava alue, pystyttiin tarkkailemaan tarkistuskammiosta. Muodostuneet halkeamat ja niiden parantuminen päästiin dokumentoimaan. Testissä käytettiin urealyyttisiä bakteereja (MUC) perliittiin suojattuina. Testissä käytetty betoni sekoitettiin läheisellä betoniasemalla ja bakteerit, sekä niiden tarvitsemat ravinteet lisättiin betoniin manuaalisesti betonisekoittimen tarkistusluukusta käsin (Kuva 20). Kattolaatan valun yhteydessä valettiin myös laboratoriotestejä varten muutama vertailu kappale. /35/



Kuva 20. Bakteerien, sekä ravinteiden lisäys betonimassaan tarkistusluukun kautta. /35/



Kuva 21. Kattolaatan asennus tarkistuskammion päälle. /35/

Valettu laatta tarkistettiin vuoden kuluttua valamisesta. Laatasta ei löytynyt ollenkaan näkyviä halkeamia. Tämä saattoi kuitenkin johtua siitä, että laatalle muodostuneet kuormat olivat jääneet laskettuun pienemmiksi. Projektin aikana kuitenkin huomattiin, että itsekorjautumisaineiden manuaalinen lisääminen betonin valmistamisen aikana ei ole optimaalista, sillä se pidentää turhaan sekoitusaikaa ja siten lisää betonimassaan jäävän ilman määrää. /35/

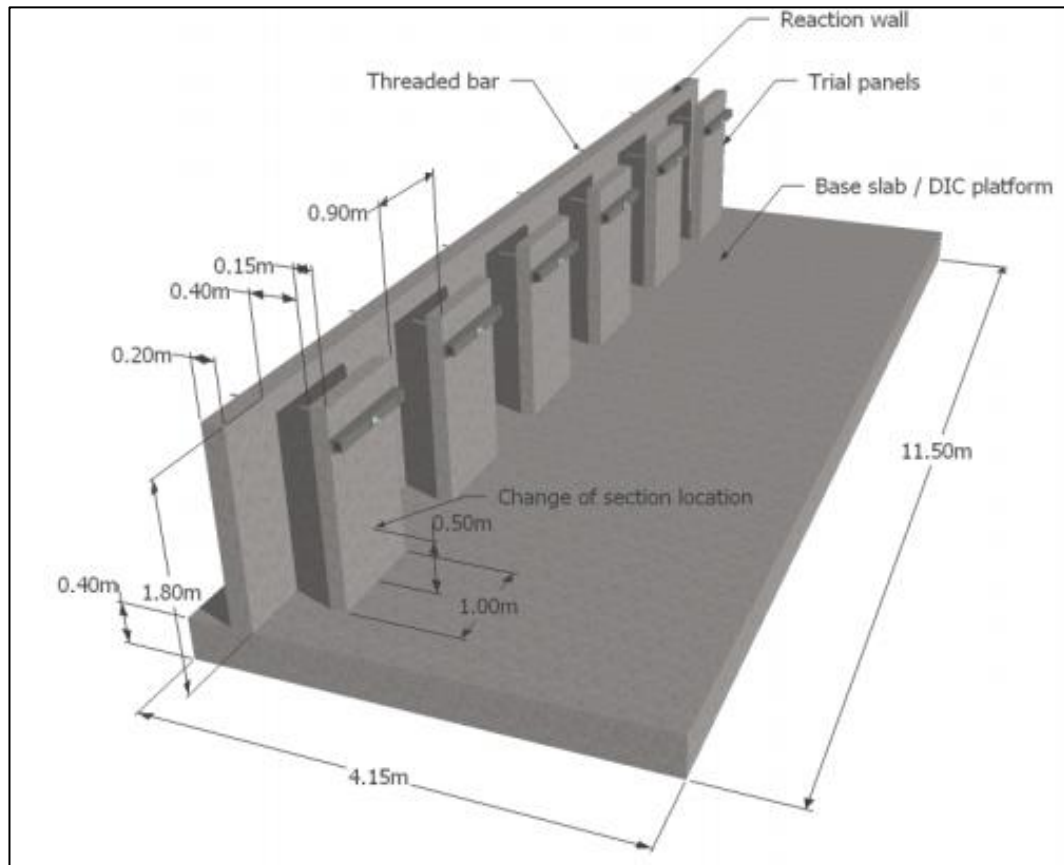
Laboratoriotestejä varten valetuista vertailukappaleista havaittiin kuitenkin seuraavia asioita:

- Jotta bakteerien kalsiumkarbonaatin (CaCO_3) tuotanto voi alkaa, ne tarvitsevat nestemäistä vettä.
- Itsekorjautuminen tapahtuu parhaiten, jos betoni altistuu kuiva-märkä sykleille. Täysin kosteissa ja kyllästyneissä olosuhteissa itsekorjautuminen ei ole yhtä tehokasta kuin kuiva-märkäolosuhteissa. /35/

6.10.2 Testikohde Iso-Britanniassa

Iso-Britannian ensimmäisen itsekorjautuvan betonin testin suorittivat Cardiffin, Bathin ja Cambridgen yliopistojen yhteisprojektina. Testissä rakennettiin A465-moottotien varrelle kahteen erilliseen paikkaan osia maatumuuria, joka koostui viidestä eri betonipaneelistä (Kuva 22). Jokaisessa eri paneelissa käytettiin erilaista itsekorjautumisen keinoa (Taulukko 8). Paneelit suunniteltiin halkeamaan noin 500

mm korkeudella pohjalaatasta. Paneelit B, D ja E valettiin pumppuautolla tuodulla betonilla ja paneelien A ja C betoni sekoitettiin paikan päällä betonimyllyllä. Kokeen aikana paneelit saivat altistua sääoloille ja sen lisäksi niitä myös koekuormitettiin. /36, 37/



Kuva 22. Periaatekuva kokeessa käytetystä tukimuurista. /36/

Taulukko 8. Koepaneelit, sekä niiden itsekorjautumismenetelmät. /36/

Paneeli	Käytetty itsekorjautumisen menetelmä
A	Natriumsilikaattia sisältävät mikrokapselit
B	Muistipolymeerejä ja vaskulaarinen putkisto
C	Perliittiin suojatut bakteerit, sekä mineraalit ja vaskulaarinen putkisto
D	Vertailupaneeli (C40/50)
E	Vertailupaneeli, jossa vaskulaarinen putkisto

Kokeen tarkoituksena oli skaalata laboratoriotesteissä käytettyjä itsekorjautumisen menetelmiä todellisiin, käyttökelpoisiin mittasuhteisiin. Samalla testattiin itsekorjautuvien betonien soveltuvuutta maatumuurien rakentamiseen. Koe oli onnistunut ja sen avulla opittiin lisää erilaisista itsekorjautumisen tekniikoista, sekä niiden käytöstä. Kokeen perusteella tultiin siihen tulokseen, että eri itsekorjautumisen tekniikat soveltuvat erilaisiin käyttökohteisiin. Tästä syystä itsekorjautumisen tekniikkaa valitessa olisi tärkeää tunnistaa rakenteen vaurioitumistavat, jotta voidaan valita kuhunkin tapaukseen parhaiten soveltuva tekniikka. /36, 37/

6.10.3 Testikohteet Hollannissa

Hollannissa Rotterdamin satamassa rakennettiin palonsammutusvesisäiliö (Kuva 23). Säiliön seinistä kaksi valettiin käyttäen itsekorjautuvaa betonia ja kaksi seinää vertailun vuoksi tavallisella betonilla. Vesisäiliön pituus on 47 m, leveys 5,5 m ja korkeus 5 m /38, 40/



Kuva 23. Osittain itsekorjautuvasta betonista valmistettu vesisäiliö Rotterdamissa. /38/

Hollantilainen vesilaitos Waterschapsbedrijf Limburg (WBL) rakennutti Hollannin ensimmäiset osittain itsekorjautuvasta betonista valmistetut jätevedenkäsittelyaltaat. Altaiden avulla testataan itsekorjautuvan betonin soveltuvuutta jätevedenkäsittelylaitoksissa käytettäväksi. WBL rakennutti 15 uutta allasta, joista 3 valettiin itsekorjautuvasta betonista. Altaat olivat mitoiltaan 7,0 x 2,5 x 0,15 m kokoisia. Mikäli itsekorjautuva betoni soveltuisi jäteveden huollossa käytettäväksi, niin se helpottaisi altaiden ja säiliöiden korjausta ja huoltoa. Säiliöt ovat olleet käytössä vuoden 2016 elokuusta alkaen ja tähän mennessä säiliöissä ei ole havaittu halkeilua. Itsekorjautuvan betonin käyttämisestä altaissa ei ole vielä havaittu huonoja puolia. /31, 40/

6.11 Käyttökohteet

Teoriassa biobetonit soveltuvat parhaiten käytettäväksi paikoissa tai kohteissa, joiden voidaan olettaa vaurioituvan käyttöikänsä aikana, ja joiden vauriot ovat hankalia ja/tai kalliita korjata. Näitä käyttökohteita ovat esimerkiksi siltojen tukirakenteet ja maanalaiset rakenteet. Biobetonit voivat soveltua myös käytettäväksi kohteissa, joiden täytyy pysyä vedenpitävinä käyttöikänsä ajan. Esimerkkejä näistä kohteista ovat kanaalit, tunnelit ja erilaiset vesisäiliöt. Bakteripohjaista itsekorjautumista voisi hyödyntää myös korjauslaasteissa. Korjauslaasteissa käytettynä itsekorjautumisen mahdollistavat ainekset voisivat korjata rakenteen pintahalkeamia, lisäten näin ollen rakenteen vedenpitävyyttä. Tämän lisäksi itsekorjautuminen voisi

pidentää myös korjauslaastin käyttöikä, vähentäen uudelleen korjausten tarvetta. /19, 35/

Käytännössä biobetonit toimivat parhaiten ympäristöissä, missä ne pääsevät altistumaan vedelle ja ilman hiilidioksidille. Itsekorjautuvat betonit pystyvät toimimaan myös vähemmän optimaalisissa olosuhteissa, mutta niiden tehokkuus voi pudota huomattavasti. Tämä riippuu betonissa käytetyistä bakteereista. /35/

Tulevaisuudessa biobetonia voidaan myös hyödyntää merenalaisissa ympäristöissä. Laboratoriotestien tulokset ovat olleet lupaavia aiheesta. Meriolosuhteissa toimiva itsekorjautuva betoni avaa myös uusia käyttökohteita itsekorjautuvalle betonille. /41/

6.12 Kehitystarpeet

Biobetoni ei ole vielä kaupallisessa käytössä. Tällä hetkellä lähimpänä kaupallista käyttöä on hollantilainen Green Basilisk yritys, joka myy uuteen betoniin sekoitettavaa itsekorjautumisen mahdollistavaa kuivaseosta. Tämän lisäksi Green Basilisk myy myös olemassa olevien betonirakenteiden korjaamiseen tarkoitettuja bakteeripohjaisia tuoteratkaisuja. /38/

Jotta biobetonia voitaisiin käyttää laajamittaisesti rakentamisessa, täytyy sitä kehittää eteenpäin sen ominaisuuksia. Tärkeimpiä kehityskohtia biobetonissa ovat bakteerien tuotanto, sekä niiden suojaus. Nämä kaksi päävaihetta lisäävät eniten biobetonin valmistamisen kustannuksia. Niiden tehostaminen ja optimointi voisivat tuoda biobetonin hinnan kilpailukykyiselle tasolle. /19/

”Lisätutkimusta ja kehitystä biobetonissa kaipaa myös betonissa käytettyjen bakteerien kyky tuottaa uusia itiöitä. Teoriassa bakteerit voivat elinkaarensa aikana muodostaa uusia itiöitä, mahdollistaen näin jatkuvan itsekorjautumisen. Käytännössä tätä bakteerien itiöiden muodostamiskykyä ja sen rajoituksia ei olla tutkittu.” /22/

6.12.1 Bakteerien tuotanto

Valtaosassa itsekorjautuvan betonin testeissä on käytetty puhdasviljelmillä tuotettuja bakteereja. Puhdasviljelmien käyttö varmistaa, että betonin valmistamiseen

käytetyssä biomassassa on ainoastaan haluttua bakteerikantaa. Puhdasviljelmien tuottaminen on kuitenkin haastavaa, hidasta ja erittäin kallista. Nämä puhdasviljelmien aiheuttamat suuret kustannukset voitaisiin mahdollisesti saada jonkin verran alemmaksi suurentamalla tuotantomääriä. Tämä tuotannon lisääminen vaatisi kuitenkin isoja sijoituksia toteutuakseen. /19/

Puhdasviljelmien käyttämisen sijaan biobetonin tarvitsemat bakteerit voidaan tuottaa käyttämällä ei-puhtaita bakteeriviljelmiä. Ei-puhtaiden bakteeriviljelmien etuna puhtaisiin verrattuna on niiden huomattavasti pienemmät tuotantokustannukset, sekä suuremmat biomassatuotannot viljelmää kohti. Ei-puhtaita viljelmiä käytettäessä päästään yleensä vähintään kymmenen kertaa pienempiin kustannuksiin, kuin puhdasviljelmissä. Tämä tekee ei-puhtaista viljelmistä houkuttelevan vaihtoehdon biobetonin tuotantoa ajatellen. Ei-puhtaiden viljelmien avulla on onnistuneesti kasvatettu urealyyttisiä bakteereja ja luotu mm. CERUP- ja MUC-bakteerisekoitukset. CERUP ja MUC ovat valmiita bakteeri-ravinnesekoitteita, jotka voidaan suoraan lisätä betoniin. /19/

Tulevaisuuden haasteita bakteerien tuotannossa tulevat olemaan tuotannon suurentaminen, sekä tuotantoprosessien optimointi. Näiden lisäksi tuotanto pitäisi pyrkiä teollistamaan, jotta tuotannon hinta saataisiin alennettua entisestään. Biobetonin huomattavasti suurempi hinta tavalliseen betoniin verrattuna on tällä hetkellä sen kilpailukykyä heikentävä tekijä. /19/

6.12.2 Suojauksen ja betoniin lisäyksen optimointi

Bakteerien tuotannon optimoinnin lisäksi myös bakteerien suojaaminen täytyy optimoida. Tällä hetkellä kapselointi (bakteerit + ravinteet) käyttäen paisutettuja savi-pellettejä voi lisätä betonin kuutiohintaa jopa 100 \$ (92,2 €). Biobetonin käytön yleistämisen kannalta tämä on liian kallista. Monet muut suojausmenetelmistä ovat tätäkin kalliimpia. Jotta biobetonin hinta saataisiin alemmas, täytyy joko käyttää halvempia suojauskeinoja tai löytää kalsiumkarbonaattia muodostava bakteerilaji, joka kestää betoniin sekoituksen ilman lisäsuojauksia. Tämän hetken suojausvaihtoehtoista halvin on perliitti. Perliitin käyttö bakteerien suojauksessa nostaa kokeessa

luotujen arvioiden perusteella betonin kuutiohintaa ainoastaan noin 18 €. Arvio perustuu perliitin hintaan ja saatavuuteen Kiinan markkinoilla. /32/

Suojauksen lisäksi myös bakteerien sekoittamista betoniin täytyy kehittää. Betoni-tehtailla itsekorjautumisen aineiden sekoittaminen manuaalisesti betonin sekaan ei ole optimaalista, eikä suositeltavaa /35/. Sekoituksessa optimaalisinta olisi, että itsekorjautumisen mahdollistavat ainesosat pystyttäisiin sekoittamaan joko runkoaineeseen tai sementtiin. Tähän on pyrkinyt esimerkiksi Green Basilisk-yritys, joka on luonut itsekorjautumisen mahdollistavan valmissekoitteen, joka vain lisätään betoniin valmistamisen aikana (Kuva 24). Vaskulaarisen putkiston kehittämiseksi tulisi löytää sopiva aine putkistossa käytettäväksi. /19, 29/



Kuva 24. Green Basilisk-yrityksen itsekorjautumisen mahdollistava lisäaine. /29/

7 SAP-KUITUBETONI

7.1 Toimintaperiaate

SAP-kuitubetonin toiminta perustuu super-absorbentteihin polymeerikuituihin, jotka sekoitetaan betonimassaan betonin valmistuksen aikana. Kuidut imevät itseensä vettä betonin sekoituksen ja valamisen aikana, ja luovuttavat sitä vähitellen betonin kuivuessa. Betonin haljetessa ja veden päästessä halkeamaan kuidut imevät sen sisälleen ja paisuvat (Kuva 25). Paisuneet SAP-kuidut muodostavat pehmeän ja veteen liukenemattoman geelin ja täyttävät muodostuneen halkeaman. Myöhemmin kun kastunut betoni kuivuu, alkaa SAP-kuitu luovuttamaan vettä takaisin ympäristöönsä, kutistuen takaisin alkuperäiseen kokoonsa. Tämä vedenluovutus puolestaan tehostaa betonin itsestään korjautumista. /42, 43/



Kuva 25. Kuiva ja paisunut SAP-kuula. /44/

7.2 Super-absorbentit polymeerit

Super-absorbentit polymeerikuidut eli SAP-kuidut ovat joukko ristosilloitettuja polyelektrolyytti polymeerejä, jotka kykenevät imemään suuria määriä vettä itseensä, muodostaen veteen liukenemattoman geelin. Super-absorbentit polymeerit kuuluvat hydrogeelien ja polyelektrolyyttisten polymeerigeelien joukkoon. Pääosa

kaupallisesti saatavilla olevista SAP:stä on anionisia geelejä. Ne muodostuvat ristosilloitetuista akryylihapoista, jotka ovat osittain neutralisoituneet natriumhydroksidista. Näitä kutsutaan polyakrylaateiksi (poly(AA)) ja ne sisältävät osittain neutralisoituneita karboksylaattiryhmiä, joiden vastaioneina toimii yleensä vety, natrium ja kalium. Myös muita monomeerejä käytetään, esimerkiksi akryyliamideja muodostamaan kopolymeerejä, kuten polyakrylaatti/akryliamidi (poly(AA-co-AM)). Poly(AA) ja poly(AA-co-AM) ovat sementtipohjaisissa materiaaleissa yleisimmin käytetyt polymeerit. /43/

SAP-kuitujen betonirakenteissa tapahtuvaan paisumiseen ja kutistumiseen vaikuttavien asioiden ymmärtäminen on tärkeää, jotta niiden käyttö voidaan optimoida. Tämän lisäksi on tärkeää oppia ymmärtämään millaisia pitkäaikaisvaikutuksia SAP-kuiduilla voi betonirakenteisiin olla. Esimerkiksi tuoreessa betonissa SAP-kuitujen paisumisen kinetiikan tunteminen on tärkeää, sillä se vaikuttaa sekoituksen suunnitteluun, rheologiaan ja betonin työstettävyyteen. Valitun super-absorbenttin polymeerin ioniryhmittymät vaikuttavat siihen, milloin polymeeri luovuttaa imevänsä veden betonin jälkihoitoa varten. Lisäksi ioniryhmittymät vaikuttavat polymeerin uudelleen paisumiseen ulkopuolisen kosteuden tunkeutuessa betonirakenteeseen ja kuinka polymeerin paisumiset ja kutistumiset vaikuttavat betoniin pitkällä aikavälillä. /45/

7.2.1 Paisuminen

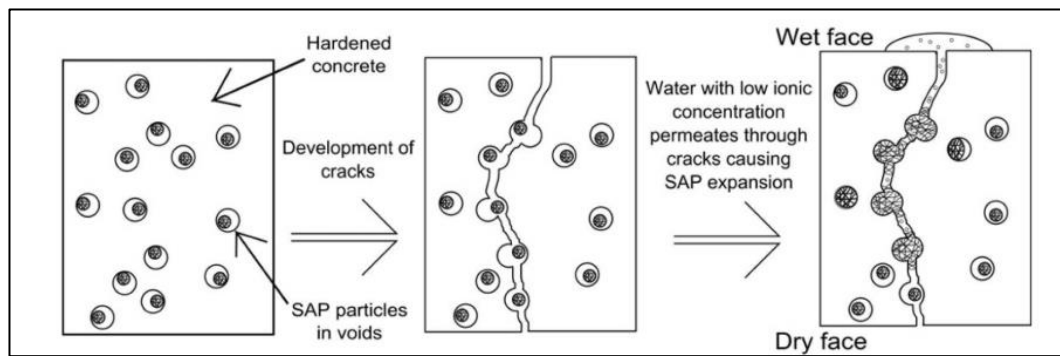
SAP-kuidun joutuessa alttiiksi vesipohjaisille liuoksille, tapahtuu kemiallisen potentiaalinsiirtymän polymeerin ja liuoksen välillä. Tämä reaktio johtaa SAP-kuidun paisumiseen tai kutistumiseen. Paisumisen aiheuttava päävoima on osmoottinen paine. Paine johtuu polymeerin ja liuoksen välisestä ionipitoisuuksien erosta. Tätä reaktiota tasapainottaa elastinen voima, joka muodostuu paisumista estävien polymeerien deformaatiosta. Deformaation määrä riippuu kuidun kimmokertoimesta, mikä puolestaan on riippuvainen polymeerin ristosilloitusten tiheydestä. SAP kykenee myös kutistumaan. Kutistumisen aiheuttaa käänteinen osmoosi. Tasapaino saavutetaan, kun nämä potentiaalit ovat yhtä suuret ja paisumisen nettopaine on nolla. /45/

Näin ollen SAP-kuidun paisuminen riippuu polymeerin ominaisuuksista, kuten polymeerin ionien tyyppi, ristosilloitusten määrä ja tiheys sekä partikkelien koko. Paisumisen vaikuttavat myös liuoksen ominaisuudet, kuten ionien tyyppi, pitoisuus, pH, paine, sekä lämpötila. super-absorbenttien polymeerin absorptiokapasiteetti voi olla tislatussa vedessä jopa 500 g/g, mutta se putoaa arvoon 50 g/g miedossa suolaliuoksessa. Betonin huokosvedessä absorptio kapasiteetti on noin 10 g/g. /43, 45/

Betoniin sekoitettaessa SAP-kuidut imevät itseensä betonimassasta vettä ja paisuvat. Sementin hydrataation aikana SAP-kuidut luovuttavat imemänsä veden ja jättävät jälkeensä makrohuokosia. Näillä makrohuokosilla on kuitenkin betonin lujuuden kannalta heikentävä vaikutus. Testit ovat kuitenkin osoittaneet, että esimerkiksi kalsiumnitraatin lisääminen polymeerien mukana pienentää SAP-kuitujen paisumista valuvaiheessa ja pienentää näin kuitujen jättämien makrohuokosten kokoa. Makrohuokosten koon pienentäminen pienentää samalla niiden vaikutusta betonin lujuuteen. Kalsiumnitraatin lisäys myös tehostaa betonin itsestään korjautumista. /43/

7.2.2 Halkeamien korjaus

Kun betoni halkeaa, kulkevat nämä halkeamat todennäköisesti SAP-kuitujen aiheuttamien makrohuokosten kautta. Halkeaman kautta tunkeutuva kosteus saa kuidut paisumaan uudestaan. Koska betonirakenteeseen tunkeutuvan veden ionipitoisuus on erilainen huokosveden ionipitoisuuteen verrattuna, saa se SAP-kuidut paisumaan enemmän, kuin ne valuvaiheessa paisuivat. Paisuessaan super-absorbentista polymeeristä muodostuu veteen liukenematon hydrogeeli, joka ensiksi täyttää muodostamansa makrohuokosen. Paisumisen jatkuessa se myös tukkii muodostuneen halkeaman, estäen näin veden tunkeutumisen syvemmälle betonirakenteeseen (Kuva 26). /30/



Kuva 26. Betonirakenteeseen muodostuneen halkeaman täytyminen SAP-kuitujen avulla. /43/

Kun halkeaman alue pääsee taas kuivumaan, alkaa SAP luovuttamaan imemäänsä vettä. Luovutettu vesi tehostaa reagoimattomien partikkeleiden hydratoitumista. Paisunut SAP-kuitu tarjoaa nukleatiopinnan hydratoitumiselle ja kalsiumkarbonaatin saostumiselle. Super-absorbenttien polymeerien tehostaman betonin itsestään korjautumisen vuoksi halkeama sulkeutuu ja polymeeri palaa alkuperäiseen tilaansa, kunnes uusi halkeama muodostuu. /43/

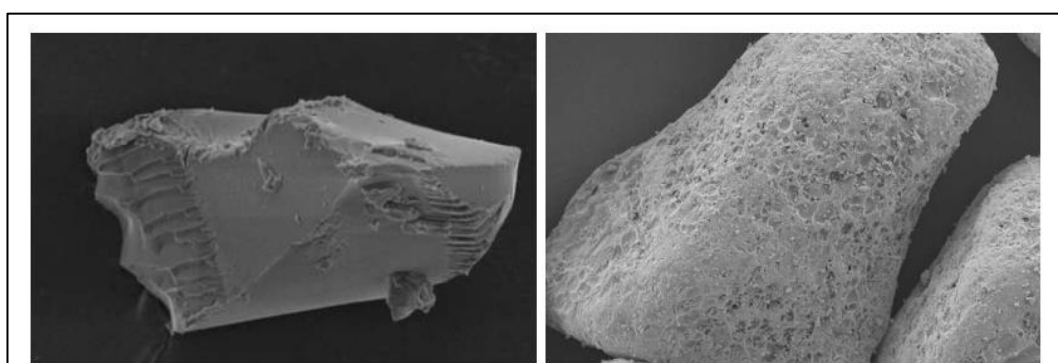
7.3 Käyttökohteet

SAP-kuituja voidaan käyttää betonirakenteissa turvaamaan betonin vedenpitävyyttä. SAP-kuitujen avulla voidaan myös pidentää betonirakenteiden käyttöikää, sillä polymeerit tukkivat betoniin muodostuvia halkeamia ja estävät näin betonille haitallisten aineiden kulkeutumisen syvemmälle rakenteeseen. SAP-kuitujen parhaita käyttökohteita ovat rakenteet, joissa betonilta tarvitaan tiiveyttä ja vedenpitävyyttä. Yksi mahdollinen käyttökohde SAP-kuiduille voisi olla biobetonissa bakteerien kosteuden lähteenä ja suojamateriaalina sekoituksen aikana. Eräässä Wangin ym. suorittamassa kokeessa huomattiin super-absorbenttien polymeerien kykenevän paisumaan ilmankosteudesta (RH 60 % ja lämpötila 20 °C) ilman varsinaista kosketusta veteen. Täten super-absorbenttien polymeerien muodostama hydrogeeli pystyisi toimittamaan biobetonin bakteereille niiden tarvitseman veden, tehostaen sekä bakteerien toimintaa, että betonin omaa itsestään korjautumista. /46/

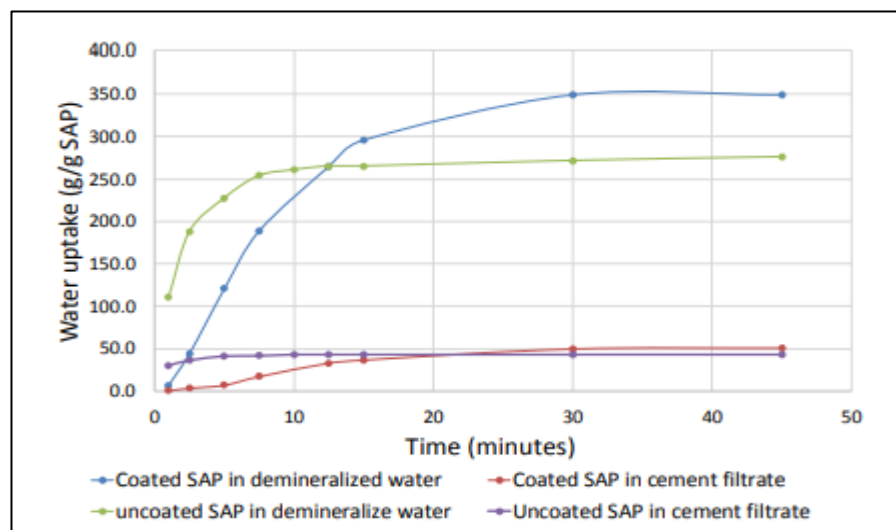
7.4 Kehitystarpeet

SAP-kuitujen käyttäminen itsekorjautuvan betonin valmistamisessa aiheuttaa muutamia ongelmia. Ensimmäinen ongelmista on se, että SAP-kuitujen käyttö ei itsessään korjaa betonia, vaan ainoastaan tehostaa betonin omaa itsekorjautumista. Tämän vuoksi SAP-kuitubetonin halkeamien korjautumisella on samat halkeamien leveysrajoitukset, kuin tavallisella betonilla. Tärkeämpi ongelma on kuitenkin makrohuokosten muodostuminen betoniin, ja niiden myötä betonin lujuuden pienentyminen. /47/

Makrohuokosten muodostumista on koetettu ratkaista kahdella eri tavalla, kuten kapseloimalla polymeerit tai luomalla pH-herkkiä polymeerejä. HEALCON-projektin aikana testattiin Ghent'n yliopistossa myös kalvopäällysteisiä SAP-kuituja (Kuva 27). Päällysteen tarkoitus on estää tai vähintäänkin rajoittaa polymeerien paisumista betonin sekoittamisen ja valamisen aikana. Tällöin saataisiin rajoitettua makrohuokosten muodostumista ja pienennettyä niiden kokoa. Testissä käytetty päällyste kykeni estämään polymeerien veden imemisen kuitenkin vain noin 10–15 minuutin ajan. Tämän jälkeen päällystetty polymeeri päätyi imemään yhtä paljon vettä, kuin päällystämätönkin polymeeri (Kuva 28). Jatkotutkimusta tarvitaan, jotta löytyisi parempi keino kuitujen päällystämiseen. Toinen vaihtoehto olisi käyttää kuitujen kapselointia. /47/

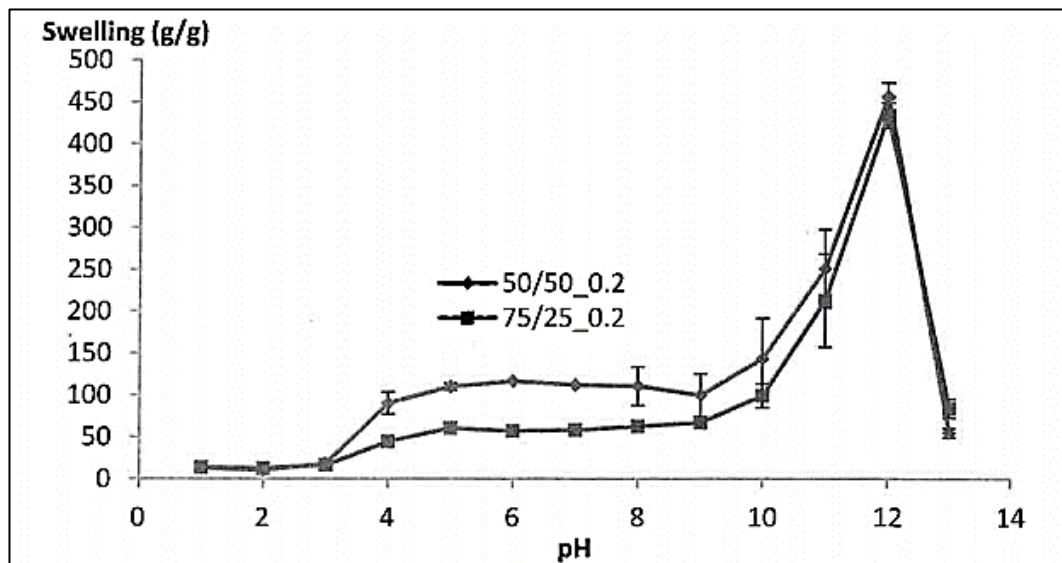


Kuva 27. Päällystetty (oikealla) ja päällystämätön (vasemmalla) SAP-partikkeli. /47/



Kuva 28. Päällystetyn ja ei-päällystetyn SAP:n paisumisnopeudet. /47/

Toinen keino super-absorbenttien polymeerien paisumisen rajoittamiseen betonin alkuvaiheissa on käyttää pH-sensitiivisiä polymeerejä. Näiden polymeerien paisumiskyky riippuu ympäristön kosteuden lisäksi myös ympäristön pH-arvosta. Tätä menetelmää on kokeiltu konseptitasolla laboratorionkokeissa. Kokeessa verrattiin kahden eri pH-herkän polymeerin paisumista tavallisiin kaupallisesti saataviin SAP:hin. Kahta eri pH-herkkää polymeeriyhdistettä, 50/50_0.2 (koostumus 50 % AA / 50 % AM) ja 25/75_0.2 (koostumus 25 % AA / 75 % AM). Kokeessa käytetyt pH-herkät polymeerit paisuivat suuressa pH:ssa paljon enemmän kuin pienessä, todistaen konseptin toimivuuden (Kuva 29). /48/



Kuva 29. Testattujen pH-herkkien SAP:ien paisumisen kuvaaja. /48/

Tulevaisuudessa pH-herkkiä SAP-kuituja voitaisiin kehittää siten, että ne eivät paisuisi korkeissa pH-arvoissa kuten betonin kovettumisen alkuvaiheessa, vaan vasta pienemmissä pH-arvoissa. Tällöin pystytäisiin pienentämään muodostuvia makrohuokosia ja polymeerit aktivoituisivat kunnolla betoniin tunkeutuvasta vedestä vasta betonin kovetuttua ja pH-arvon laskettua. SAP-kuitujen käyttöä biobetonissa tulisi myös tutkia lisää tulevaisuudessa ja selvittää tällaisen yhdistelmä betonin mahdollisuudet ja rajoitukset. /48/

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

8.1 Johtopäätökset

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että itsekorjautuvissa betoneissa on suurta potentiaalia tulevaisuuden rakentamisen kannalta. Varsinkin infrarakentamisessa voitaisiin hyötyä betonin itsekorjautumisen tuomista mahdollisuuksista ympäri maailmaa. Itsekorjautuvien betonien avulla voitaisiin rakentaa pidempään säilyviä siltoja, tunneleita, maamuureja, patoja yms. ja tämän myötä vähentää korjauskustannuksia ja uuden betonin valmistamisen tarvetta. Asuin- ja toimistorakennuksissa itsekorjautuvia betoneja eivät välttämättä tulla paljoakaan käyttämään, ellei niiden hinta pienene lähemmäs tavallisen betonin kuutiohintaa ja käytettävyys helpotu tulevaisuudessa.

Tähän mennessä suoritettavat laboratoriotestit, sekä todellisten kohteiden testivalut antavat lupaavia tuloksia itsekorjautuvista betoneista, sekä niiden käyttömahdollisuuksista. Näiden lupaavien tulosten toteutuminen vaatii kuitenkin sen, että itsekorjautuvien betonien potentiaali saadaan otetuksi käyttöön. Tämä potentiaalin käyttöönotto vaatii kuitenkin itsekorjautuvien betonien kehittämistä edelleen. Itsekorjautuvien betonien kehittämisen ja lisäpotentiaalin saavuttamisen myötä voidaan tulevaisuudessa päästä tilanteeseen, jossa itsekorjautuva betoni on yleisesti käytetty rakennusmateriaali. Itsekorjautuvan betonin käytön yleistyminen ei todennäköisesti tapahdu tämän vuosikymmenen aikana. Uskoisin tämän vuosikymmenen kuluvan oikeita testikohteita tutkien, sekä itsekorjautumisen mahdollistavien aineiden tuotantoa kehittäen. Tulevaisuudessa nähdään minkälaiseen asemaan rakentamisessa itsekorjautuvat betonit pääsevät, ja mikä tai mitkä itsekorjautumisen menetelmät toimivat parhaiten.

Yleisesti itsekorjautuvista betoneista tulisi tutkia lisää niiden käyttöä rajoittavia tekijöitä, sekä käyttäytymistä epäedullisissa olosuhteissa, kuten esimerkiksi pakkasessa. Epäedullisten olosuhteiden vaikutusta itsekorjautuviin betoneihin olisi erityisen tärkeää tutkia, mikäli itsekorjautuvaa betonia halutaan käyttää Suomessa. Pääosa laboratorioskokeista on tehty itsekorjautumisen mahdollistavan aineen kannalta optimaalisissa olosuhteissa, joten tarpeellista olisi suorittaa todellisia testikäyttöjä

erilaisissa käyttöympäristöissä. Tämän lisäksi, jos biobetonia haluttaisiin käyttää asuin- tai toimistorakennuksissa, olisi hyvä selvittää siinä käytettyjen bakteerien vaikutukset rakennuksen sisäilman laatuun. Biobetonin valmistamisessa käytettyjen bakteerien ravinteiden vaikutusta betonirakenteen pinnalla tapahtuvaan mikrobian kasvamiseen olisi myös hyvä selvittää, sillä tietyissä käyttöympäristöissä tällä voi olla rajoittavia tekijöitä biobetonin käyttämiseen.

8.2 Vertailu

Biobetoni ja SAP-kuitubetoni ovat kaksi erilaista itsekorjautuvaa betonia. Kummankin betonin päämäärä on sama: Palauttaa rakennelman alkuperäinen tiiveys halkeamien ilmestyessä. Betonien toimintatavalla ja tehokkuudella on kuitenkin eroja (Taulukko 9).

Taulukko 9. Itsekorjautuvien betonien vertailu.

	Biobetoni	SAP-kuitubetoni
Halkeamien täyttötapa	Betonin itsestään korjautuminen ja bakteerien muodostama kalsiumkarbonaatti.	Aluksi SAP-kuitujen paisuminen, jonka jälkeen betonin itsestään korjautuminen.
Halkeamien täyttönopeus	Hidas, biomineralisaatio vaatii aikaa. Halkeamat täytyvät jo muutamassa viikossa tai viimeistään parissa kuukaudessa.	Nopea, SAP-kuidut alkavat paisumaan heti kostuessaan ja täyttävät halkeaman.
Korjattavissa olevien halkeamien leveys	Maksimileveys jopa 0,85–0,97 mm optimaalisissa olosuhteissa. Suurempien halkeamien korjaantuminen kuitenkin hitaampaa.	Maksimi leveys 0,2 mm, joutuessa betonin itsestään korjautumisen rajallisuudesta.
Vaikutukset betoniin	Bakteerilajista ja valituista ravinteista riippuen betonin lujuus voi heiketä suorassa lisäyksessä. Haittavaikutukset pienentyvät huomattavasti suojatussa lisäyksessä.	Kuitujen suora lisäys heikentää betonin työstettävyyttä, mikäli ei lisätä ylimääräistä vettä. Lisäksi kuidut aiheuttavat rakenteeseen makrohuokosia. Kuituihin varastoitunut vesi vapautuu betonin kuivussa antaen betonille jälkihoitoa.
Suojauksen tarpeellisuus	Suojaus on tarpeellinen, mikäli halutaan varmistaa, että bakteerit selviävät mahdollisimman pitkään elinkelpoisina betonirakenteessa. Lisäksi suojausta tarvitaan, jotta bakteerien ja ravinteiden haittavaikutukset betonin lujuuden muodostumiseen saadaan minimoitua.	Suojaus ei ole välttämätöntä, mutta sen avulla voidaan minimoida haitallisia makrohuokosia, sekä betonin muokattavuuden heikentymistä.

SAP-kuitujen suurin etu bakteeripohjaisiin keinoihin verrattuna on niiden halkeamien täyttönopeus. Kuitujen paisuminen tukkii halkeaman nopeasti, jolloin epäpuhtauksia ei pääse rakenteen sisään paljoo. Tämän lisäksi SAP-kuidut voidaan lisätä betoniin ilman suojausta, kunhan tästä aiheutuvat haitat otetaan huomioon valmistuksen aikana. Biobetonin suurin etu SAP-kuitubetoniin verrattuna on korjattavissa olevien halkeamien leveys. Biobetoni kykenee korjaamaan suurempia halkeamia, kuin SAP-kuitubetoni. Korjausnopeus on kuitenkin hidas ja korjaaminen kestää pidemmän aikaa, mikäli halkeama on suuri. Biobetonin kunnollisen toiminnan varmistaminen vaatii, että betoniin lisätyt bakteerit ja bakteerien tarvitsemat ravinteet suojataan.

Biobetonin ja SAP-kuitubetonin kehityksen tässä vaiheessa on kuitenkin vaikea verrata, kumpi näistä itsekorjautuvista betoneista on kokonaisvaltaisesti parempi vaihtoehto. Molemmista betoneista löytyy asioita, jotka toinen betoni tekee paremmin kuin toinen. Lisäksi molemmissa itsekorjautuvissa betoneissa on vielä puutteita, joiden ylitse pääseminen vaatii kummankin itsekorjautuvan betonin jatkokehitystä. Puutteiden ja ongelmien korjaamisen lisäksi molempien betonien hinta täytyy saada kilpailukykyiseksi tavalliseen betoniin verrattuna, mikäli näistä itsekorjautuvista betoneista halutaan yleisiä rakennusmateriaaleja.

8.3 Luotettavuuden arviointi

Opinnäytetyössä on käytetty lähdemateriaalina paljon betonialan kirjallisuutta. Pääosa tästä käytetystä betonialan kirjallisuudesta on Suomen Betoniyhdistyksen julkaisemia teoksia, joita voidaan pitää luotettavina. Itsekorjautuvan betonin osalta ei löydy paljon betonialan kirjallisuutta kirjoina, vaan lähteinä käytettiin eri yliopistojen julkaisemia tutkimuksia ja tutkimustuloksia. Lisäksi käytettiin ja näistä saatuja tuloksia. Itsekorjautuvia betoneita ovat tutkineet mm. Ghentin, Delftin, Cardiffin, Bathin, Cambridgen, Waikataton ja Tayuan yliopistot. Yliopistotutkimusten lisäksi lähteinä käytettiin erilaisia tutkielmia ja Construction and Building Materials-lehden julkaisuja. Pääosaa näistä tutkimuksista ja kokeista voidaan pitää luotettavina, sillä ne ovat yliopistotason tutkimustyötä ja niitä ovat olleet mukana toteuttamassa

tohtoritutkinnon omaavat henkilöt. Näitä henkilöitä ovat mm. H. M. Jonkers, J. Wang, J. Zhang ja F. Silva.

Epävarmuutta opinnäytetyössä käytetyn lähdeaineiston luotettavuuteen tuo kuitenkin se, että osaa tutkimusten käyttämistä alkuperäislähteistä ei voitu varmentaa, sillä nämä lähteet eivät olleet julkisesti luettavissa. Opinnäytetyön aikana tutkielmia luettaessa havaittiin, että parissa tutkielmassa lähteitä oli tulkittu vääriin, tai niistä oli tehty vääränlaisia johtopäätöksiä. Todellisuudessa näitä vääriä tulkintoja saattoi olla enemmänkin, kuin mitä löytyi. Osa alkuperäislähteistä ei ollut käytettävissä, joten kaikkia alkuperäislähteiden tulkintoja tai niihin perustuvia päätelmiä ei voitu varmentaa. Yksi mahdollinen virheen- ja epävarmuudenlähde opinnäytetyössäni on työn aikana tehty käännöstyö. Teknistä tekstiä käännettäessä on mahdollista, että kääntäjä on ymmärtänyt lähdetekstin tarkoituksen vääriin tai tehnyt käännösvirheitä.

8.4 Pohdinta

Opinnäytetyön tekeminen vaati paljon tarkkaa perehtymistä uusiin betoniin liittyviin asioihin. Myös betonin itsekorjautumisen konsepti vaati jonkin verran perehtymistä. Itsekorjautuvaan betoniin liittyvien lähteiden löytäminen oli ajoittain haasteellista, sillä monet tutkimustulokset olivat maksullisia tai vaativat tutkimuksen tehneen henkilöstön luvan lukuoikeuksien saamiseen. Näihin lukuoikeuksien pyyntöihin eivät monetkaan tutkijoista vastanneet, joten joiltain osa-alueilta lähdeaineisto jäi suppeammaksi kuin olisin toivonut. Tulevaisuudessa opinnäytetyötä voitaisiin laajentaa ja täydentää, mikäli tulee mahdollisuus nähdä uusimpia tutkimustuloksia.

Pääresursseina opinnäytetyössä olivat betonialan kirjallisuus, sekä itsekorjautuviin betoneihin liittyvät tutkimukset ja tutkimusraportit mm. Researchgate-sivustolla. Oman haasteensa lähteiden käyttöön toi teknisten termien määrä, sekä niiden ajoittain hankala kääntäminen suomenkielelle. Hankalat tekniset termit pakottivat perehtymään lisää esimerkiksi kemian aineistoon, jotta lähdetekstien ymmärtäminen ja kääntäminen oli mahdollista. Hankaluuksista huolimatta lopputuloksena työstä

kuitenkin muodostui laaja tietopaketti, jonka avulla voidaan perehtyä itsekorjautuvien betonien perusteisiin, käyttömahdollisuuksiin, sekä niiden puutteisiin.

LÄHTEET

- /1/ Siikanen, U. 2009. Rakennusaineoppi. 7. painos. Viro. Rakennustieto Oy s.131-164
- /2/ Suomen Betoniyhdistys ry. 2007. Betonirakenteiden korjausohjeet 2007 by 41. Helsinki. Suomen Betonitieto Oy. s. 83
- /3/ Betoni hiilinieluna. Viitattu 18.2.2020.
http://www.betoniyhdistys.fi/media/betonitutkimusseminaari/co2-uptake_kekkonen.pdf
- /4/ Tietoa betonista. Viitattu 4.3.2020
<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/>
- /5/ Bio-concrete: next generation of self-healing concrete. Mostafa Seifan, Ali Khajeh Samani & Aydin Berenjian. Viitattu 12.3.2020. [https://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/11244/Bioconcrete%20\(PDF\).pdf?sequence=58](https://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/11244/Bioconcrete%20(PDF).pdf?sequence=58)
- /6/<https://www.rakennuslehti.fi/2017/11/itsekorjautuvaa-betonia-kehitetaan-myos-suomessa-bakteerit-kurovat-halkeamat-umpeen/>
- /7/ Toorikka, A. 2020. Asiantuntija, RI. Vahanen. Aloituskokous. 24.2.2020
- /8/ Tietoa Vahasesta. Viitattu 14.5.2020. <https://vahanen.com/fi/vahanen/>
- /9/ Suomen Betoniyhdistys ry. 2019. Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019 by 42. Helsinki. BY-Koulutus Oy.
- /10/ Seosaineet, betonilaborantti ja -mylläri pätevyitysmiskurssi. Viitattu 4.3.2020
<http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/7.1.2020-seosaineet.pdf>
- /11/ Suomen Betoniyhdistys ry. 2017. Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – Opas suunnittelijoille 2016 by 68. Helsinki. BY-Koulutus Oy. s. 13-31
- /12/ Betonirakenteiden kemialliset vauriot. Hannu Pyy. 2019. Viitattu 7.5.2020.
<http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2019/hannu-pyy-betonin-korjauskurssi-2019.pdf>

/13/ Characterization of bioconcrete and the properties for self-healing. Alves, Mello & Barros. 2019. Viitattu 25.4.2020.

https://www.researchgate.net/publication/338189689_Characterization_of_Bioconcrete_and_the_Properties_for_Self-Healing

/14/ Investigations on the development of self-healing properties in protective coatings for concrete and repair mortars. E. Cailleux & Valérie Pollet. 2009. Viitattu 25.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/313571760_Investigations_on_the_development_of_self-healing_properties_in_protective_coatings_for_concrete_and_repair_mortars

/15/ ROTI rakennetun omaisuuden tila 2019. Viitattu 25.4.2020.

https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti_2019_raportti.pdf

/16/ Väylien kunnossapidon näkymät vuodelle 2019. Viitattu 8.5.2020.

<https://vayla.fi/-/vaylien-kunnossapidon-nakymat-vuodelle-2019>

/17/ Bacteria-based self-healing concrete. H. M. Jonker. Viitattu 11.3.2020.

<http://heronjournal.nl/56-12/1.pdf>

/18/ A review of self-healing concrete research development. Viitattu 12.3.2020.

<http://jett.dormaj.com/docs/Volume2/Issue%201/A%20Review%20of%20Self-healing%20Concrete%20Research%20Development.pdf>

/19/ Up-scaling the production of bacteria for self-healing concrete application.

2015. F. Silva. Viitattu 20.4.2020. <https://biblio.ugent.be/publication/5954593/file/5954599.pdf>

/20/ Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasterii*. Liang Ma, Ai-Ping Pang, Yongsheng Luo, Xiaolin Lu & Fengming Lin.

2020. Viitattu 21.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/338786947_Beneficial_factors_for_biomineralization_by_ureolytic_bacterium_Sporosarcina_pasteurii

/21/ Ureolysis and denitrification based microbial strategies for self-healing concrete. Y.C. Ersan, J.Y Wang, N. Boon & N. De Belie. Viitattu 21.4.2020.

https://www.researchgate.net/publication/271906549_Ureolysis_and_denitrification_based_microbial_strategies_for_self-healing_concrete

/22/ Bacteria based self-healing of concrete: Effects of environment, exposure and crack size. Kevin Paine. 2016. Viitattu 21.4.2020. https://pure-host.bath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/146678313/Paine_delft_conference_revised_archive.pdf

/23/ Bacteria: Internal Components. Viitattu 21.4.2020. <https://open.oregon-state.edu/generalmicrobiology/chapter/bacteria-internal-components/>

/24/ Endosporin muodostuminen ja kehitysvaiheet. Viitattu 23.4.2020. <https://en.wikipedia.org/wiki/Endospore#/media/File:Sporulation.png>

/25/ Effect of microbiological growth components for bacteria-based self-healing on the properties of cement mortar. Xin Chen, Jie Yuan & Mohamed Alazhari. 2019. Viitattu 23.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/332593086_Effect_of_Microbiological_Growth_Components_for_Bacteria-Based_Self-Healing_on_the_Properties_of_Cement_Mortar

/26/ Calcium carbonate precipitation by bacterial strains isolated from a limestone cave and from loamy soil. Paola Cacchio, Claudia Ercole, Giorgio Cappuccio & Aldo Lepidi. 2003. Viitattu 24.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/248985168_Calcium_Carbonate_Precipitation_by_Bacterial_Strains_Isolated_from_a_Limestone_Cave_and_from_a_Loamy_Soil

/27/ General physiology of alkaliphiles. Koki Horikoshi. 2011. Viitattu 24.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/278650903_General_Physiology_of_Alkaliphiles

/28/ X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing on concrete. Jianyun Wang, Dewanckele Jan, Veerle Cnudde & ym. 2014. Viitattu 24.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/264086052_X-ray_computed_tomography_proof_of_bacterial-based_self-healing_in_concrete

/29/ Basilisk Self-healing concrete. Viitattu 30.4.2020. <https://www.basiliskconcrete.com/?lang=en>

/30/ Self-healing in cementitious materials-a review. Kim Van Tittelboom & Nele De Belie. 2013. Viitattu 27.4.2020. https://www.researchgate.net/publication/258806267_Self-Healing_in_Cementitious_Materials-A_Review

/31/ Self-healing concrete in the Netherlands. Andrew Williams. 2017. Viitattu 28.4.2020. <https://www.waterworld.com/international/utilities/article/16201170/selfhealing-concrete-in-the-netherlands>

/32/ Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. Jianguang Zhang, Yuanzhen Liu, Feng Tao, ym. 2017. Viitattu 27.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/316982882> Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete

/33/ Vascular self-healing optimization and evaluation by means of four-point bending. Gerlinde Lefever & Jannes Van Cauwenberghe. 2016. Viitattu 25.4.2020. https://www.scriptiebank.be/sites/default/files/thesis/2016-09/thesis_1.pdf

/34/ Porous network concrete: a new approach to make concrete structures self-healing using prefabricated porous layer. Senot Sangadji & Erik Schlangen. 2011. Viitattu 28.4.2020. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Af84a56f5-597d-41df-a00e-a3ec7c33862f>

/35/ First large scale application with self-healing concrete in Belgium: Analysis of the laboratory control tests. Tim Van Mullem, Elke Gruyaert, Robby Caspeele & Nele De Belie. 2020. Viitattu 28.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/339447254> First Large Scale Application with Self-Healing Concrete in Belgium Analysis of the Laboratory Control Tests

/36/ Self-healing concrete full-scale site trial. Oliver Teall, Robert Davies, ym. 2016. Viitattu 28.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/309489379> Self-healing concrete full scale site trials

/37/ Large scale Application of self-healing concrete: design, construction and testing. Robert Davies, Oliver Teall, ym. 2018. Viitattu 28.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/327429813> Large Scale Application of Self-Healing Concrete Design Construction and Testing

/38/ Water basin repairs itself due to self-healing concrete. 2017. Viitattu 28.4.2020. <https://www.basiliskconcrete.com/bluswaterbassin-herstelt-zichzelf-door-zelfhelend-beton/?lang=en>

/39/ Industrial application of biological self-healing concrete: Challenges and economical feasibility. Filipe Silva, Nico Boon, Nele De Belie & Willy Verstraete. 2015. Viitattu 28.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/270586240> Industrial Application of Biological Self-healing Concrete Challenges and Economical Feasibility

/40/ Bacteria based self-healing: Towards standardization. Jonkers HM. 2019. Viitattu 30.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/333097000> Bacteria-Based Self-Healing Concrete Towards Standardization

/41/ A bacteria-based bead for possible self healing marine concrete applications. D. Palin, V. Wiktor & M. Jonkers. 2016. Viitattu 28.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/305317176> [A bacteria-based bead for possible self-healing marine concrete applications](#)

/42/ The course of water absorption and desorption from superabsorbent polymers (SAP) in cementitious environment. Maciej Kalinowski & Piotr Woyciechowski. 2019. Viitattu 30.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/337008193> [The course of water absorption and desorption from superabsorbent polymers SAP in cementitious environment](#)

/43/ Self-sealing of cracks in cement-based materials using superabsorbent polymers. H.X.D. Lee, H.S. Wong & N.R. Buenfeld. 2016. Viitattu 4.5.2020. <https://www.researchgate.net/publication/293049195> [Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers](#)

/44/ Super absorbent polymers to stimulate self-healing in ECC. J.S. KIM & E. Schlangen. 2010. Viitattu 30.4.2020. <https://www.researchgate.net/publication/283998405> [Super absorbent polymers to simulate self healing in ECC](#)

/45/ Effect of alkalinity and calcium concentration of pore solution on the swelling and ionic exchange of superabsorbent polymers in cement paste. H.X.D Lee, Hong S. Wong & Nick Buenfeld. 2018. Viitattu. 3.5.2020. <https://www.researchgate.net/publication/323106969> [Effect of alkalinity and calcium concentration of pore solution on the swelling and ionic exchange of superabsorbent polymers in cement paste](#)

/46/ Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching realistic self-healing in concrete. Jianyun Wang, Didier Snoeck & ym. 2014. Viitattu 5.5.2020. <https://www.researchgate.net/publication/263893379> [Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete](#)

/47/ Evaluation of the performance of self-healing concrete at small and large scale under laboratory conditions. E. Gruyaert, B. Debbaut, ym. Viitattu 4.5.2020. <https://www.researchgate.net/publication/340896362> [Evaluation of the performance of self-healing concrete at small and large scale under laboratory conditions](#)

/48/ Comparing pH-sensitive with commercial superabsorbent polymers in cementitious materials. A. Mignon, D. Snoeck, ym. 2014. Viitattu 5.5.2020. <https://biblio.ugent.be/publication/5705640>