



Harith Saleh

# Itsekorjautuva betoni ja sen käyttö talonrakentamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

3.10.2023

# Tiivistelmä

Tekijä: Harith Saleh  
Otsikko: Itsekorjautuva betoni ja sen käyttö talonrakentamisessa  
Sivumäärä: 44 sivua  
Aika: 3.10.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka  
Ammatillinen pääaine: Rakennetekniikka  
Ohjaaja: Lehtori Anne Aalto

---

Tässä opinnäytetyössä esitellään itsekorjautuvaa betonia ja sen käyttöä talonrakentamisessa. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoa itsekorjautuvasta betonista sekä tarkastella sen käyttötapoja talonrakentamisessa.

Opinnäytetyö palvelee rakennustuotantoa ja rakennesuunnittelua Suomessa, eli työn tarkoituksena oli tarjota suunnittelijoille ja rakentajille tietoa itseään korjaavien betonien erityisominaisuuksista, käyttökelpoisuudesta ja mahdollisista haasteista. Opinnäytetyössä käytiin läpi betonin ominaisuuksia rakennusmateriaalina, rasiustekijöitä ja niistä aiheutuvia vaurioita.

Työ keskittyi vain betonin korjaamiseen bakteerien avulla ja muut menetelmät, kuten SAP-polymeeri (SuperAbsorbent Polymer), jäivät työn ulkopuolelle. Lisäksi kerättiin tietoa itsekorjautuvasta betonista ja sen käyttötavoista talonrakentamisessa.

Tutkimusmateriaaliksi valittiin betonialan kirjallisuutta, itsekorjautuvaan betoniin liittyviä tutkimusraportteja, verkkojulkaisuja sekä vanhoja tutkimuksia betonista.

Loppuvaiheessa tarkasteltiin sekä rakentamisen että ylläpidon taloudellisia näkökohtia. Betonissa käytetään bakteereja tukena, jotka lisäävät materiaalin lujuutta ja kykyä korjata itseään, mikä parantaa betonirakennusten kestävyyttä.

Avainsanat: betoni, itsekorjautuva, halkeilu, bakteerit, polymeerit

## Abstract

Author: Harith Saleh  
Title: Self-Healing Concrete and Its Use In House Construction  
Number of Pages: 44 pages  
Date: 3 October 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Engineering  
Supervisor: Anne Aalto, Senior Lecturer

---

The primary objective of the graduate study was to provide information about self-healing concrete and its use in construction in Finland. The initial section of the thesis concentrates on studying concrete as a building material, examining the characteristic factors that cause stress and common types of damage it may sustain. Additionally, various methods for repairing cracks were explored.

Specifically, the study focused on investigating repair techniques using bacteria and other approaches such as SAP polymer (SuperAbsorbent Polymer). Bacteria play a role in enhancing material strength while enabling self-correction.

The study lacks the implementation or collection of SAP polymer in house construction; instead, it emphasizes the self-healing properties of concrete and their practical utilization.

To conduct the thesis, sources have been extensively examined of information on concrete. This includes reviewing research reports on self-healing concrete from publications as well as delving into older studies on the subject.

As a conclusion, an analysis of the aspects associated with both construction and maintenance was conducted.

Keywords: concrete, self-healing, bacteria, and polymers

# Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Aiheen tausta	2
1.2	Tavoitteet ja rajaus	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	3
2	Betoni	4
2.1	Sementti	4
2.2	Vesi	5
2.3	Runkoaineet	5
2.4	Lisäaineet	6
2.5	Betonin lujuus	7
2.6	Betonin rasitusluokat	8
2.6.1	X0-luokka: eivät ole alttiina korroosiolle tai syöpmiselle	8
2.6.2	XC-luokka: teräksen korroosio karbonatisoitumisen seurauksena	8
2.6.3	XD- ja XS-luokka: teräksen syöpyminen kloridien vaikutuksesta	9
2.6.4	XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus	10
2.6.4	XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus	10
2.6.5	XA-luokka: kemiallinen rasitus	11
3	Betonirakenteiden rasittuminen sekä vaurioituminen	13
3.1	Betonin karbonatisoituminen	13
3.2	Pakkasrapautuma	15
3.3	Korroosio	16
3.4	Kloridit	17
3.5	Betonirakenteiden halkeamat	18
4	Betonihalkeamien korjaus	19
4.1	Betonin korjaustavoite	19
4.2	Korjausmenetelmät	20
4.2.1	Pakkaus ja pinnan korjaus	20
4.2.2	Halkeamien injektointi	22
4.2.3	Pintakäsittely	23
5	Itsekorjautuva betoni	25
5.1	Kohteen kuvaus	25
5.2	Itsekorjautuvan betonin historia	26

5.3 Menetelmät	26
5.4 Materiaalit ja valmistusmenetelmä	27
6 Toimintatavat ja periaatteet	28
6.1 Bakteerit	29
6.1.1 Biomineralisaatio	30
6.1.2 Mikrobin toiminnasta johtuva karbonaatin saostuminen	31
6.1.3 Urean hajoaminen ja CaCO <sub>3</sub> :n muodostuminen	32
6.2 SAP-polymeerit	34
6.2.1 Toimintaperiaatteet	34
6.2.2 Kestävyyden ja mekaanisten ominaisuudet	35
7 Itsekorjautuvan betonin näkökulmat	37
7.1 Käyttö	37
7.2 Edut ja haitat	38
7.3 Tulevaisuudennäkymät	40
8 Johtopäätökset	41
9 Yhteenveto	44
Lähteet	45

## 1 Johdanto

Betoni on yleisimmin käytetty rakennusmateriaali maailmassa sen monien ominaisuuksien vuoksi. Betonin suosion taustalla on useita tekijöitä, kuten sen korkea puristuslujuus, suhteellisen alhaiset kustannukset ja monipuolisuus eri rakennussovelluksissa. Lisäksi sitä on helppoa valmistaa. Betonin vetolujuus on yleensä paljon heikompi verrattuna sen puristuslujuuteen, mikä tekee siitä alttiin halkeamien muodostumiselle erityisesti silloin, kun siihen kohdistuu vetokuormitusta. [1.]

Betonirakenteet ovat alttiita halkeilulle, mikä voi heikentää niiden kestävyyttä. Siksi on saatettava harkita korjaustoimenpiteitä halkeamien laajenemisen estämiseksi. Tällaiset korjaukset kuitenkin lisäävät betonirakenteiden elinkaarikustannuksia, koska ne vaativat paljon työtä, ja samalla rakenne joudutaan poistamaan käytöstä korjaustöiden ajaksi. [1.]

Itsekorjautuva betoni on mielenkiintoinen aihe rakennusalalla, ja sen tarkoituksena on, että betoni itseasiassa korjaa itseään vahingoittuessaan. Tämän ominaisuuden ansiosta betonin käyttöikä kasvaa ja huolto- ja korjaustarpeet vähenevät. Halkeilu on yksi tärkeimmistä syistä betonin heikentymiseen. Se mahdollistaa kemikaalien tunkeutumisen ja voi johtaa betonirakenteiden fyysismekaanisten ominaisuuksien menettämiseen. [2.]

Itsekorjautuvassa betonissa voi olla useita erilaisia mekanismeja, jotka mahdollistavat sen itsekorjautuvuuden:

- Bakteeripohjaiset mekanismit: tietyt bakteerikannat voivat tuottaa kalsiumkarbonaattia, joka kykenee täyttämään ja korjaamaan halkeamat betonissa.
- Polymeerien käyttö: joissakin itsekorjautuvissa betonityypeissä on mikrokapseleita, jotka sisältävät polymeeriyhdisteitä. Kun halkeama muodostuu, kapselit rikkoutuvat vapauttaen polymeerin, joka reagoi ja täyttää halkeaman. [2.]

## 1.1 Aiheen tausta

Opinnäytetyön aihe on erittäin ajankohtainen ja merkityksellinen. Tällaisten betonien ymmärtäminen ja soveltaminen voivat tuoda merkittäviä etuja rakennusalalle ja auttaa rakennusten pitkäaikaisessa suorituskyvyssä, erityisesti haastavissa sääolosuhteissa kuten Suomessa.

Opinnäytetyön alkuosassa käsitellään betonin ominaisuuksia, vaurioitumismekanismeja ja vaurioiden korjaustapoja. Itsekorjautuvaa betonia koskevassa tutkielmassa keskitytään biobetoniin, joka perustuu bakteereihin sekä betonin itsestään korjautumiseen superabsorboivien polymeerien avulla.

## 1.2 Tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tarkoituksena on tarjota tietoa itsekorjautuvasta betonista sekä tarkastella niiden käyttötapoja talonrakentamisessa ja lisäksi selvittää, mitkä tekijät ja betonin ominaisuudet aiheuttavat halkeilua ja millaisilla menetelmillä niitä voitaisiin korjata.

Opinnäytetyö palvelee rakennustuotantoa ja rakennesuunnittelua Suomessa, eli työn tarkoituksena on tarjota tietoa itseään korjaavan betonin ominaisuuksista, käyttötarkoituksista ja sen aiheuttamista mahdollisista haasteista suunnittelijoille ja rakennuttajille.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan itsekorjautuvaa betonia ja sen käyttötapoja talonrakentamisessa. Työ keskittyy vain betonin korjaamiseen bakteerien avulla, ja muut menetelmät, kuten SAP-polymeeri (SuperAbsorbent Polymer), jäävät työn ulkopuolelle. Lisäksi kerätään tietoa itsekorjautuvasta betonista ja sen käyttötavoista talonrakentamisessa. [2.]

Tutkimusmateriaaliksi valittiin betonialan kirjallisuutta, itsekorjautuvaan betoniin liittyviä tutkimusraportteja, verkkojulkaisuja sekä vanhoja tutkimuksia betonista. Lopussa analysoitiin saadut tiedonkeruun tulokset ja käytettiin niitä opinnäytetyön raportin laatimiseen.

## 2 Betoni

Betonista on tullut yksi maailman käytetyimmistä rakennusmateriaaleista, ja vuosittain sitä valmistetaan noin 13 miljardia kuutiometriä. Betonia käytetään laajasti muun muassa talonrakentamisessa, infrarakentamisessa ja ympäristörakentamisessa. Betonin suosio perustuu sen monipuolisuuteen, kuten esimerkiksi kosteudenkestävyyteen, helppoon valmistettavuuteen sekä kilpailukykyiseen hintaan. [1.]

Betoni on keinotekoisista kiveä, jonka pääraaka-aineena ovat sementti, vesi ja kivet. Betoni valmistetaan sementistä, vedestä ja erikokoisista kivirakeista. Lisäksi käytetään erilaisia lisä- ja seosaineita, jotka auttavat parantamaan tuoreen betonimassan työstettävyyttä sekä kovettuneen betonin tiheyttä, lujuutta ja säilyvyyttä. [1.]

Betonia valmistetaan lisäämällä runkoaineeseen vettä ja sementtiä. Sementti sekoittuu veden kanssa muodostaen sementtiliiman, joka sitoo kivirakeet yhteen. Tätä liimaa kutsutaan myös sementtipastaksi. Sementtiliimassa tapahtuu kemiallinen reaktio sementin ja veden välillä, mikä aiheuttaa liiman kovettumisen betoniksi. Hyvässä runkoaineessa tulisi olla erilaisia raekokoja aina hienoimmasta suurimpaan mahdolliseen. Tällöin betonissa tarvitaan mahdollisimman vähän sementtiä, joka on yksi betonin kalleimmista aineosista. [1.]

### 2.1 Sementti

Portland-sementti, jota kutsutaan myös tavalliseksi sementiksi, on sekoitus hienoksi jauhettua Portland-klinkkeriä ja kipsiä. Klinkkerin raaka-aineisiin kuuluvat kalsiumkarbonaatti, ( $\text{CaCO}_3$ ), piidioksidi ( $\text{SiO}_2$ ), rautadioksidi ( $\text{FeO}_2$ ) ja alumiinitrioksidi ( $\text{AlO}_3$ ) [1.]

Yleensä betonirakenteet reagoivat herkemmin veden kanssa, mikä johtaa liima-aineen muodostumiseen, joka kovettuessaan pysyy kiinnittyneenä. Tämän

kovettuneen osan nimi on sementtikivi. Sementtikivi yhdistää betonin eri elementit ja täyttää aukot materiaalin hiukkasten välillä. [1.]

## 2.2 Vesi

Veden, jota käytetään betonin sekoittamiseen, tulisi olla puhdasta ilman suuria epäpuhtauksia tai haitallisia aineita, kuten humusta. Vesi ei myöskään saisi maistua pahalta eikä sisältää klorideja. Taulukossa 1 on kirjattu, miten veden suurin kloridipitoisuus määräytyy standardinmukaisesti (SFS-EN-1008) [1.]

Liialliset määrät epäpuhtauksia ja haitallisia aineita voivat vaikuttaa haitallisesti sementin sitoutumiseen tai heikentää betonin kestävyyttä ja lujuutta. Betonin valmistamiseen voidaan käyttää puhdasta vettä, kuten vesijohtovettä. Joskus hieman kierrätettyä vettä voidaan myös käyttää, mutta kuitenkin betonin valmistuksessa ei voida käyttää pintavettä tai jätevettä. Jos on epäily veden sopivuudesta betonin valmistukseen, tulee se tutkia kemiallisesti.

Betonin valmistuksessa tarkistetaan veden soveltuvuus luotettavammin tarkalla kemiallisella analyysillä, joka auttaa määrittämään betonin käyttökohteen ja tarvittavan veden laadun. [1.]

Taulukko 1. Eri betonityyppien valmistuksessa käytettävän veden suurin mahdollinen kloridipitoisuus. [1.]

Betonin käyttökohde	Suurin kloridipitoisuus (mg/l)
Jännitetty betonirakenne tai injektointilaasti	500
Raudoitettu tai metalliosia sisältävä betonirakenne Raudoitettu tai metalliosia sisältävä betonirakenne	1000
Rakennus, joka on valmistettu betonista ilman raudoitusta tai metalliosia.	4500

## 2.3 Runkoaineet

Suurin osa betonimassasta koostuu runkoaineesta, joka muodostaa 65–80 prosenttia kokonaismäärästä. Yleisin tapa valmistaa betonia on käyttää luonnollista kiviainesta, joka voi koostua aineksista, jotka ovat peräisin luonnosta tai jotka on murskattu. Suomessa on harvoin tarjolla täydellisen kokoista

luonnonsoraa, joten betonin valmistuksessa käytetään yleensä erikokoisia kiviaineksia, kuten soraa, hiekkaa ja täyteainetta. Rakeisuus vaikuttaa betonin ominaisuuksiin huomattavasti. [1.]

Rakennusmateriaalina käytettävien runkoaineiden on oltava puhdistettuja ja vapaita rapautumisesta sekä epäpuhtauksista, kuten jätteistä, öljystä, roskista sekä jopa lumesta ja jäästä. Kiviaineet on luokitettu eri rakeisuusluokkiin. Taulukossa esitetään kivien eri raekoot. [1.]

Taulukko 2. Kiviainetuotteiden luokittelu raekoon perusteella. [1.]

Kiviainestuotteiden jaottelu	Raekoot (mm)
Fillerikiviaineisto	< 0.063
Kova kivimateriaali	0/1, 0/2, 0/4
Luonnollinen järjestys. 0/8	0/8
Rakennuskiviaines (joko sora tai murskattu kallio)	0/5, 0/6, 0/8

## 2.4 Lisäaineet

Lisäaineita käytetään sekoittaessa betonimassaan kemikaaleja. Menetelmää hyödynnetään esimerkiksi pakkasenkestävän betonin sekä korkealujuusbetonin valmistuksessa. Lisäaineiden tarkoituksena on parantaa betonin ominaisuuksia, sen rakenteellista laatua ja madaltaa valmistuskustannuksia. Silti päämäärämme on, että betoni olisi korkealaatuista myös ilman näitä lisäyksiä. [1.]

Lisäaineiden määrät betonissa ovat todella vähäisiä verrattuna muihin betonin ainesosiin. On tärkeää, että lisäaineiden yhteismäärä ei ylitä valmistajan suosittelemaa enimmäisannostusta. Lisäaineita ei myöskään tulisi olla enempää kuin 50 g sementtikilogrammaa kohti, ellei tiedetä, miten suurempi määrä vaikuttaa betonin ominaisuuksiin ja kestävyYTEEN. [1.]

Lisäaineiden teho perustuu niin fysikaalisiin kuin kemiallisiin ominaisuuksiin, ja on tärkeää, että tehdään riittäviä ennakkokokeita ennen niiden käyttöä. Kun kahta lisäainetta sekoitetaan yhteen, ne voivat mahdollisesti heikentää toistensa vaikutuksia. [1.]

Lisäaineet on järjestetty SFS-EN 934-2-standardin mukaisesti:

- notkistimet
- viivästyttävät tekijät hidastavat sitoutumista
- nopeuttavat tekijät edistävät sitoutumista
- tehonotkistimet ja nesteyttimet
- sitoutumista hidastavat tekijät ovat niitä, jotka vastustavat voimaa ja nostavat vettä
- kiihdyttimet, jotka nopeuttavat sitoutumista
- kiihdyttimet, jotka nopeuttavat kovettumista
- hidastimet, jotka hidastavat sitoutumista
- lisäaineet, jotka vähentävät veden erottumista
- lisäaineet, jotka estävät veden imeytymistä
- aineet, joilla säädellään viskositeettia. [1.]

## 2.5 Betonin lujuus

Betonin laatu ja ominaisuudet ovat tiiviisti sidoksissa sen lujuuteen. Betonin lujuuteen vaikuttavat erityisesti sen koostumus, kuten veden ja sementin määrä sekä valittu kiviaines. Yleensä betonin puristuslujuus vaihtelee 30–80 megaPascalin (MPa) välillä. [1.]

Betoni kestää erinomaisesti puristusta, mutta sen vetolujuus on yleensä vain noin 10 prosenttia puristuslujuudesta. Lujuusluokat määritellään betonin käyttötarkoituksen perusteella. Yleisesti ottaen betonin kestävyys mitataan megaPascalleina (MPa), joka vastaa 1 (MN/m<sup>2</sup>). Betonin kestävyys yleensä määritellään, kun se on saavuttanut 28 vuorokauden iän. Betonin lujuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten:

- vesipitoisuus ja sementin määrä
- sementin tyyppi ja määrä
- betonin kovettumisen aikainen lämpötila
- kiviaineksen laatu ja sen hiukkaskoko

- jälkihoito
- betonimassan kovettumisaika
- erilaiset seokset ja käytetyt lisäaineet
- veden laatu
- betonimassan tiivistys. [3.]

## 2.6 Betonin rasitusluokat

Rasitusluokkien tarkoituksena on kuvata, millaisissa ympäristöissä betonirakenteita rakennetaan. Betonirakennukseen voivat kuulua erilaiset rasitusluokat samanaikaisesti. Esimerkiksi julkisivut luokitellaan jäätyminen ja sulamisen vaikutusten mukaan XF1-luokkaan, kun taas karbonatisoitumisesta johtuneen korroosion yhteydessä ne luokitellaan XC3- tai XC4-luokkiin. Tavallisesti julkisivut suunnitellaan siten, että ne täyttävät sekä XC3- että XC4-vaatimukset. [4.]

Betonirakenteiden rasitusluokkien valitsemisessa on tärkeää välttää ylimääräistä mitoitusta, koska tämä voi lisätä rakentamiskustannuksia. Jos betonirakennuksessa valitaan liian korkea rasitusluokka, voi se vaikuttaa negatiivisesti betonin muihin ominaisuuksiin ja siten heikentää rakenteen laatua. [4.]

### 2.6.1 X0-luokka: eivät ole alttiina korroosiolle tai syöpymiselle

Raudoittamatonta betonia tai betonia, joka ei sisällä valettuja metalliosia, voi käyttää kaikissa ympäristöluokissa paitsi silloin, kun betoni altistuu jäätymis-, sulamis-, kulutus- tai kemialliselle rasitukselle. Tällaisissa tapauksissa ei käytetä raudoitusta tai jos rakenteessa on raudoitus, se on suojattu kuivissa olosuhteissa eikä altistu pakkasen rasitukselle. [4.]

### 2.6.2 XC-luokka: teräksen korroosio karbonatisoitumisen seurauksena

Tämä luokka käsittää betonit, joiden osat ovat pitkän ajan veden kanssa kosketuksissa. Tämä altistuminen voi aiheuttaa betonin karbonatisoitumista ja

siten myös betonin teräsosien korroosiota. Betonin emäksisyys, (yleensä on pH-arvoltaan 13–14) toimii kemiallisena suojana. [4.]

Tämän pH-tason ansiosta teräsraudoituksen pinnalle muodostuu tiivis oksidikalvo. Hiilidioksidin vaikutuksesta betonin emäksisyys kuitenkin laskee. Taulukossa 3 on esitetty XC-rasitusluokkien määritelmät sekä niihin yleisimmin liittyvät rakenteet. [4.]

Taulukko 3. XC-rasitusluokkien määritelmät sekä niihin yleisimmin liittyvät rakenteet. [4]

Rasitusluokka, määritelmä		Tyypilliset rakenteet
XC1	Kuivaa tai aina kosteaa.	Sisätilat, joissa kosteus on vähäistä. Rakenteet, jotka ovat jatkuvasti veden alla. WC-tilat, portaat ja rakenteet, jotka ovat veden alla. Useampikerroksiset seinärakenteet sisäpinnalla. Osat sillasta vedenpinnan alapuolella.
XC2	Kostea, harvoin kuiva	Betoni sisätiloissa. Yleisimmät perustukset. Sillan perustukset ja liitoslaatat.
XC3	Osittain märkätilat	Betonipinnat sisätiloissa, joissa on keskimääräistä korkeampi ilmankosteus. Ulkorakenteet, jotka ovat joko osittain tai kokonaan suojattu sateelta. Sateenvarjoilla varustetut julkisivut ja muut ulkopinnat, jotka on suojattu sateelta. Parkkipaikkojen betonilaatat. Vesiliikuntakeskukset, saunat, suuret keittiötilat ja useat teollisuusrakennukset. Siltojen yläosien rakenteet, jotka ovat suojassa sateelta, kuten alapalkit ja pilarirakenteet sekä sadesuojatut tuki- ja pilarirakenteet.
XC4	Toistuva kostuminen ja kuivaus.	Betonipinta on vuorovaikutuksessa veden kanssa, mutta ei ole osa rasitusluokkaa XC2. Tämä koskee parvekkeiden betonilaattoja, julkisivuja, jotka altistuvat sateelle sekä perustuksia. Myös siltarakenteiden osat, kuten reunatuet, maatukien ulkopinnat, tukiseinät ja pilareiden osat voivat altistua sateelle.

### 2.6.3 XD- ja XS-luokka: teräksen syöpyminen kloridien vaikutuksesta

Yleensä, kun teräsraudat betonissa altistuvat kloorille, hiilidioksidille, vedelle ja ilmalle, ne luovat optimaaliset olosuhteet korroosiolle. Tämä ilmiö tunnetaan yleisesti nimellä karbonisaatiokorroosio tai hiilidioksidista johtuva korroosio.

Kloridit voivat päästä betonielementtien sisään ja lyhentää teräsbetonirakenteiden elinikää monissa tilanteissa. Kun teräkset betonissa syöpyvät, ne menettävät poikkipinta-alaa ja aiheuttavat betonin halkeilua. [4.]

Taulukko 4. XD ja XS. Rasitusluokkien määritelmät sekä niihin yleisimmin liittyvät rakenteet. [4]

Rasitusluokka, määritelmä		Tyypilliset rakenteet
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonia kuormittavat, ilman mukana kulkeutuvat suolat. Meluseinät tien reunalla. Uimahallien sisätilat.
XD2	Usein märkä ja harvoin kuiva.	Teollisuusvedet, jotka sisältävät klorideja. Uima-altaat.
XD3	Jaksollinen kastumien ja kuivuminen	Rakenteet, jotka voivat altistua suolaisille roiskeille tai tulla suolattaviksi. Pysäköintitalot ja lämpimät autotallit. Sillan osat, jotka ovat herkkiä tiehiekalle, kuten reunapalkit, siirtymälevyt ja betoniset kaiteet, sekä suolasumulle alttiit siltapylväät ja tukirakenteet.
XS1	Altistuvat ilman tuomalle suolalle, mutta ilman suoraa kosketusta meriveden kanssa.	Avomerellä tai rannikolla sijaitsevat rakenteet.
XS2	Jatkuvasti veden alla	Merirakenteiden ja siltojen merivedenalaiset osat.
XS3	Vesirajan roiskeiden vaikutusalueella.	Merirakenteiden tai siltojen kaltaisten rakenteiden välituet, jotka altistuvat meriveden vaihtelulle ja roiskeille.

#### 2.6.4 XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus

Veden jäätyminen aiheuttaa ongelmia betonille, erityisesti kun se tapahtuu pilarihuokosissa. Kun suolapitoisuus lisääntyy rakenteessa, pakkasrasitus kasvaa. Tämä johtaa siihen, että kosteus imeytyy betoniin myös matalammissa lämpötiloissa, jolloin suolat aiheuttavat painetta jäätyksen yhteydessä. Betonin kykyä kestää pakkasta voi parantaa tehokkaimmin betonin huokoisuutta vähentämällä. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty XF-luokat. [3; 4.]

#### 2.6.4 XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus

Veden jäätyminen aiheuttaa ongelmia betonille, erityisesti kun se tapahtuu pilarihuokosissa. Kun suolapitoisuus lisääntyy rakenteessa, pakkasrasitus kasvaa. Tämä johtaa siihen, että kosteus imeytyy betoniin myös matalammissa lämpötiloissa, jolloin suolat aiheuttavat painetta jäätyksen yhteydessä. Betonin

kykyä kestää pakkasta voi parantaa tehokkaimmin betonin huokoisuutta vähentämällä. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty XF-luokat. [3; 4.]

Taulukko 5. XF-luokka: jäätymis-sulamisrasitus. [4]

Rasitusluokka, määritelmä		Tyypilliset rakenteet
XF1	Keskiverto veden imeytymisaste ilman jäänestoaineita.	Pystysuorat betonipinnat, jotka voivat altistua sateelle ja jäätymiselle. Nämä pinnat ovat yleensä nähtävissä, kuten kansilaatta, palkit sekä maa- ja välituet.
XF2	Kun vesi imeytyy maltillisesti yhdessä jäänsulatusaineiden kanssa.	Betonirakenteet, jotka ovat herkkiä vedelle ja jäätymiselle, voivat vaurioitua, kun ne jäätyvät tai altistuvat ilman mukana kulkeville jäänsulatusaineille. Meluseinät ja tien reunalla olevat perustukset. Komponentit suolatuilla teiden silloilla, kuten tukipalkit, päällystyslaatat sekä maatuet ja välitukirakenteet.
XF3	Suuri kyllästyminen veteen ilman jäänsulatusaineita	Betonipinnat, jotka ovat herkkiä vedelle ja jäätymiselle. Tällaisia pintoja voivat olla esimerkiksi terassit, siltapylväät sekä rakennelmat makean veden äärellä, kuten patoalueet ja uima-altaat. Myös suolattomilla teillä olevien siltojen osat, kuten laitapalkit, liitoslaatat, pilarimaiset tukirakenteet, ympyräsillan perustukset sekä suojaamattomat rakenteet vesistöisillä voivat altistua veden korkeuden vaihteluille.
XF4	Korkea veden imeytymisaste yhdessä jäänsulattamisaineiden tai suolaisen meriveden kanssa.	Betonipinnat, jotka ovat herkkiä jäänsulatusaineroiskeille ja jäätymiselle, sekä teiden siltojen osat, jotka altistuvat jäänsulatusaineille. Parkkikerrokset, päällysmateriaalit ja lämpimät autotallit. Suolaa käyttävien teiden siltojen laitapalkit, liitoslaatat, betoniset kaiteet ja ympyräsillan perustukset. Tuet siltojen alla olevilla teillä, joilla käytetään suolaa. Suojaamattomat rakennelmat meressä sijaitsevilla silloilla tasosta NW-1 ylöspäin.

### 2.6.5 XA-luokka: kemiallinen rasitus

Suomessa betonin kemiallinen vahingoittuminen johtuu usein aineista, jotka päätyvät betoniin ympäristöstä. Nämä aineet voivat joko liuottaa sementtiä happamuudellaan ja heikentää sen ominaisuuksia tai aiheuttaa sementtikiven turpoamista, mikä vaurioittaa rakennetta. Jotta kemiallista korroosiota voi tapahtua, täytyy betonissa olla läsnä vettä ja haitallisia aineita. Betonille erityisen haitallisia ovat esimerkiksi sulfaatit, hapot ja aggressiivinen hiilidioksidi.

Tiivis betoni estää haitallisten aineiden tunkeutumista ja parantaa kemiallista kestävyyttä. SR-sementin käyttö sideaineena parantaa myös betonin sulfaatinkestävyyttä. Alla olevan taulukko 6, XA-luokka: kemialliset rasitukset. [3; 4.]

Taulukko 6. XA-luokka: rasisusluokkien määrittelyt, niiden selitykset ja yleiset rakenteet.

Rasisusluokka, määritelmä		Tyypilliset rakenteet
XA1	Kemiallisesti lievästi hyökkäävä ympäristö.	Tietyt maatalouden rakenteet.
XA2	Kemiallisesti maltillisesti hyökkäävä ympäristö	Tietyt maatalouden rakenteet.
XA3	Kemiallisesti maltillisesti hyökkäävä ympäristö	Tietyt maatalouden rakenteet.

Taulukko 7. Raja-arvot kemiallisten rasisusten osalta, jotka johtuvat luonnon maaperästä ja pohjavedestä, on määritelty eri rasisusluokkiin. [3, 4.]

Kemialliset ominaisuudet	Testausmenetelmät	XA1	XA2	XA3
<b>Pohjavesi</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 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 <sub>2</sub> mg/l aggressiivinen	SFS-EN 13577	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	>100 kyllästymiseen asti
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 ja ≤ 1000	>1000 ja ≤ 3000	>3000 kyllästymiseen asti
<b>Maaperä</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg <sup>(a)</sup> kokonaismäärä	SFS-EN 196-2 <sup>(b)</sup>	≥ 2000 ja ≤ 3000 <sup>(c)</sup>	> 3000 <sup>(c)</sup> ja ≤ 1200	< 12000 ja ≤ 24000
Baumann-Gullyn happamuusmääritelmän mukaisesti ml/kg	prEN 16502	> 200	Ei ilmene käytännössä.	
<sup>a</sup> Savimaat, joiden läpäisykyky on alle 10–5 m/s, voidaan sijoittaa matalampaan luokkaan. <sup>b</sup> Testausmenetelmäperiaate on uusi SO <sub>24</sub> -suolahapon käyttö. Toisena vaihtoehtona voidaan harkita vesiuuttoa, jos betonin käyttöpaikalla on aiempaa kokemusta sen käytöstä. <sup>c</sup> Mikäli betonissa on riski sulfaatti-ionien kertymiseen toistuvan kuivumisen, kastumisen tai kapillaarisen kosteuden takia, raja-arvo, joka on alun perin ollut 3000 mg/kg, vähennetään nyt 2000 mg/kg:aan.				

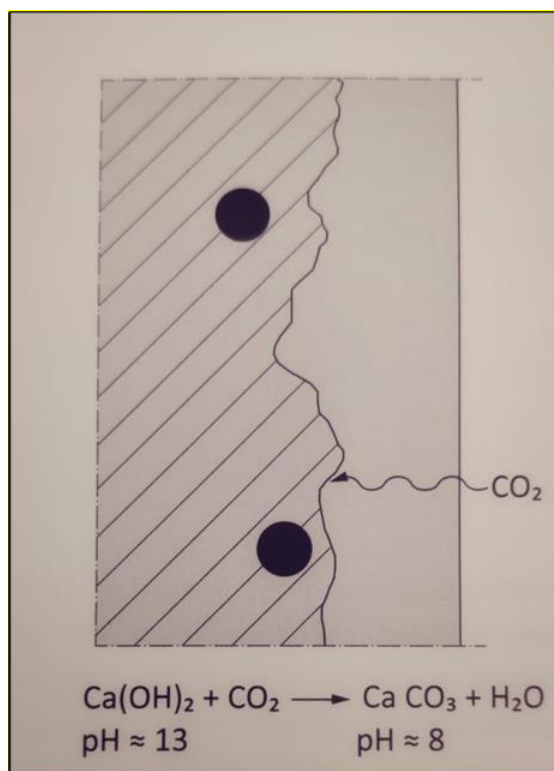
### 3 Betonirakenteiden rasittuminen sekä vaurioituminen

Tässä luvussa käsitellään tavallisimpia ilmaston aiheuttamia vaurioita betonirakenteille. Ulkopuoliset tekijät voivat vaikuttaa betonirakenteiden laatuun ja altistaa ne erilaisille rasitustekijöille, kuten säteilylle, lämmölle, kosteudelle, haitallisille aineille, tuulelle ja paineelle. Siksi betonirakennukselle asetetut vaatimukset riippuvat siitä, millaisissa olosuhteissa betonirakenteet joutuvat olemaan. Ilmastolliset olosuhteet vaikuttavat usein Suomessa betonirakenteisiin aiheuttaen erilaisia vaurioita. Yleisimpiä näistä ovat betonin vahingoittuminen pakkasrapautumisen seurauksena sekä raudoitusten ruostuminen, joka johtuu betonin karbonatisoitumisesta tai kloridien vaikutuksesta. Lisäksi rakenteet voivat kärsiä kosteusongelmista, pinnan vaurioista ja käsittelyjen heikentymisestä, halkeamista, muodonmuutoksista sekä kiinnikkeiden ja tukirakenteiden ongelmista. [6.]

#### 3.1 Betonin karbonatisoituminen

Betonin pH-taso voi laskea karbonatisoitumisen seurauksena. Tämä tapahtuu, kun ilmassa oleva hiilidioksidi  $\text{CO}_2$  reagoi betonissa olevan kalsiumhydroksidin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ja kalsiumsilikaattihydraattigeelin kanssa. Karbonatisointireaktio esitetään yksinkertaisella kaavalla, joka on nähtävissä kuvassa 1. [1.]

Karbonatisoituminen voi tapahtua betonipinnoilla, kun niihin pääsee tunkeutumaan ilmaa, mikä voi aiheuttaa betonin pinnan neutraalin alueen. Jos tämä neutraali alue ulottuu lähelle terästä, se saattaa altistua korroosiolle. Betonirakenteissa tapahtuu kemiallisia reaktioita, kun hydroksidit liikkuvat rakenteen sisällä ja hiilidioksidi ulkopuolella. Tämä johtaa karbonatisoitumiseen, mikä aiheuttaa betonin pH-arvon laskemisen noin 8,5:een. [1.]



Kuva 1. Betonin Karbonatisointireaktion ilmiö. [1.]

Ympäristötekijät vaikuttavat merkittävästi betonirakenteisiin. Kun rakenteet suojataan sateelta, karbonatisoituminen tapahtuu nopeammin verrattuna rakenteisiin, jotka altistuvat sateelle. Hiilidioksidi pääsee tunkeutumaan vain betonin ilmahuokosiin. Kun betonin huokokset täyttyvät vedellä, hiilidioksidin tunkeutumiskyky heikkenee (alla oleva taulukko 8). Karbonatisoituminen on voimakkaimmillaan silloin, kun ilman suhteellinen kosteus on 50–60 prosenttia. [1.]

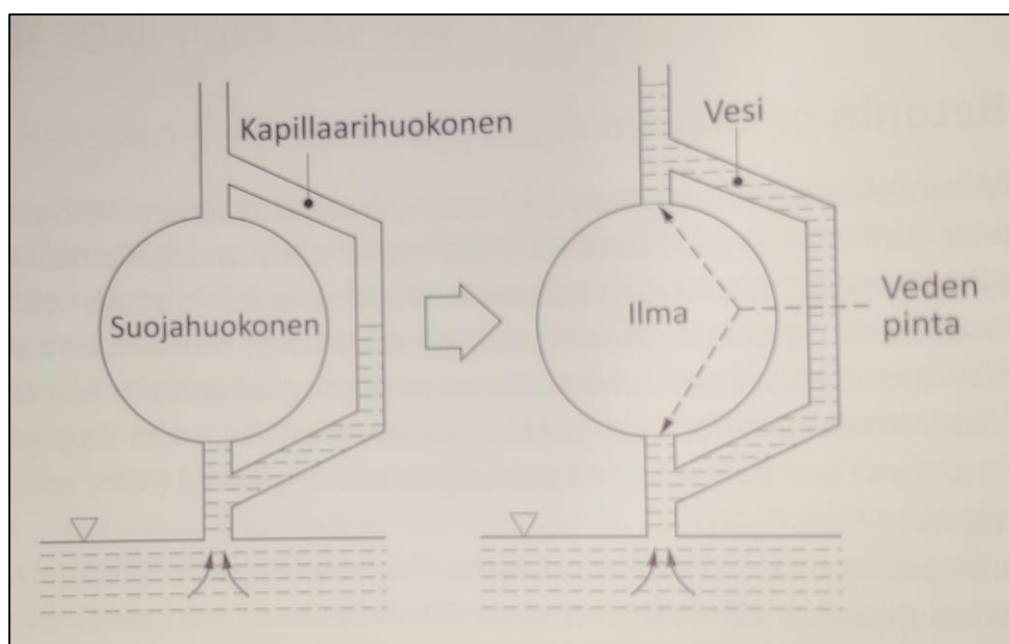
Taulukko 8. Olosuhteiden vaikutus betonin karbonatisoitumisnopeuteen.

Betonin säilytysolosuhteet	Relatiivinen karbonatisoitumisnopeus.
Ulkona sateelta suojassa	1
Sateelle alltiina	0,25
Suhteellinen kosteus 70 %	1.60
Suhteellinen kosteus 45 %	1.80

### 3.2 Pakkasrapautuma

Betonirakenteet voivat vaurioitua esimerkiksi pakkasrapautumisen vuoksi. Kun betonissa olevan veden lämpötila laskee alle 0 °C:een, veden tilavuus kasvaa 9 prosentilla sen jäätyessä, jolloin laajentuminen aiheuttaa sisäistä painetta huokosiin. Tämä lisää painetta, ja ajan myötä betonirakenteet murtuvat sisältä päin. Betonin pakkasrapautuminen voi tapahtua nopeammin heikommassa betonissa, kun betoni altistuu enemmän kosteudelle ja kun kostea betoni altistuu useille sulamis- ja jäätymissykleille. [1.]

Kaksi keskeisintä betonirakenteen pakkasenkestävyyteen vaikuttavaa tekijää ovat vesi-sementtisuhde ja suojahuokokset. Vesi-sementtisuhde on tärkeä tekijä betonin lujuuden määrittämisessä. Pienempi suhde auttaa vähentämään kapillaarihuokoisuutta, ja asianmukainen jälkihoito varmistaa korkean hydrataatioasteen. Mikäli vesi-sementtisuhde ylittää 0,60–0,65 raja-arvon, kapillaarihuokosverkostosta muodostuu yhtenäinen. Lisäämällä tiettyjä lisäaineita sementtikiveen voidaan luoda pieniä huokosia, joita kutsutaan suojahuukosiksi. Nämä huokokset ovat halkaisijaltaan noin 0,01–0,5 millimetriä, eivätkä ne täyty vedellä kapillaarisesti vaikuttaessaan (kuva 2). [1.]



Kuva 3. Suojahuukosten toimintaperiaate. [1.]

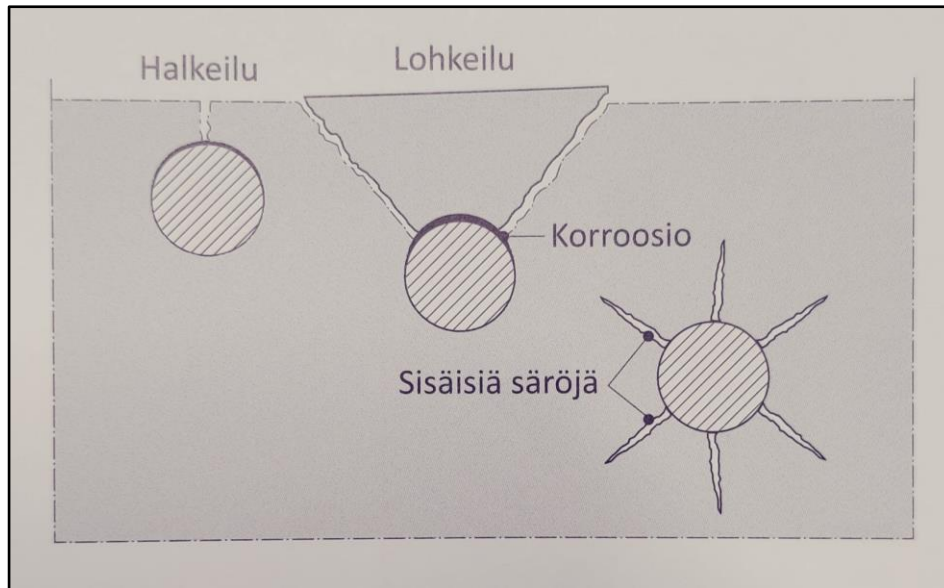
Betonin rakenteen huokoisuuden ja haurauden vuoksi se on erityisen herkkä kosteusvaurioille. Suomen talviset lämpötilavaihtelut voivat johtaa kostean betonin jäätyessä rapautumisriskin kasvuun (kuva 3). [7]



Kuva 3. Betonin pakkasrapautuminen julkisivussa. [7.]

### 3.3 Korroosio

Tavallisissa olosuhteissa teräsbetonirakenteen rauditus ei yleensä ruostu, koska betonin emäksisyys muodostaa suojakalvon raudituksen ympärille. Betonirakenteiden teräsrudituksen korroosio on sähkökemiallinen ilmiö. Tässä ilmiössä rauta pyrkii palaamaan luonnolliseen muotoonsa. Korroosion vuoksi rauditteen pinnasta voi liueta materiaalia. Tässä tapauksessa raudituksen poikkipinta-ala pienenee, jolloin betonirakenteen kantavuus heikkenee. Lisäksi korroosio voi aiheuttaa teräsbetonirakenteissa sisäistä halkeilua. [1.] Korroosion aiheuttamat vaikutukset aiheuttavat betonin halkeilua. Kun korroosio etenee betoniin, se voi aiheuttaa halkeamia, sisäisiä säröjä ja lohkeamia, joissa raudituksen betonipeite saattaa irrota kokonaan (kuva 4). [1.]



Kuva 4. Korroosion aiheuttamat vauriot teräbetonirakenteissa. [1.]

### 3.4 Kloridit

Kloridien vaikutus voi aiheuttaa raudituksen ruostumiseen myös betonirakenteessa, joka ei ole karbonisoitunut. Suolauksen ja meriveden vuoksi betoniin tunkeutuu klorideja nopeammin. Rakenteiden pinnalla, joihin suolainen vesi vaikuttaa, muodostuu kloridipitoisuuden vaihtelua, jossa kloridipitoisuus vähenee tasaisesti syvyyden mukaan. Kloori-ionit (Cl) voivat siirtyä betoniin kosteuden vaikutuksesta, mikä voi aiheuttaa halkeamien syntymistä betonissa. Lisäksi betonin altistuminen jatkuvasti vaihteleville kosteusolosuhteille nopeuttaa kloridipitoisuuden kasvua betonissa. [1; 4.]

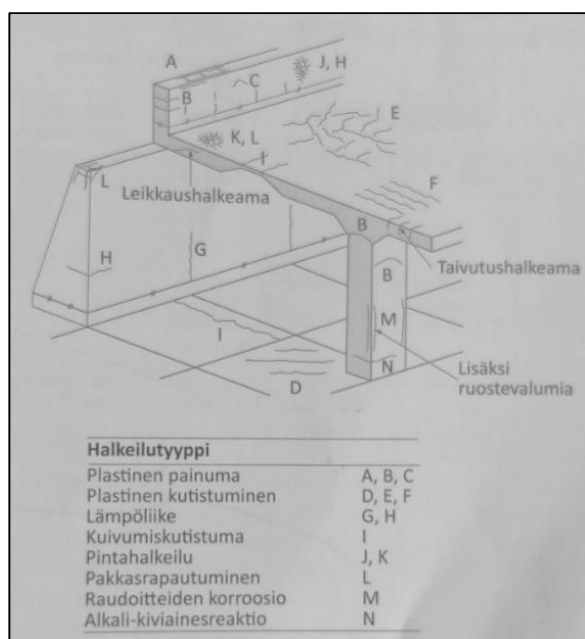
Kloridien vaikutus Suomessa on merkittävä, erityisesti rakenteissa kuten siltojen reunapalkeissa, välituissa, maatuissa, siltojen pilareissa, melusteissa, parkkihallien infrastruktuurissa, pysäköintialustoissa sekä laitureissa ja muissa merellisissä rakennelmissä. Käyttämällä tiiviimpää ja vähemmän huokoista betoniseosta, betoniin korroosionesto lisäaineita tai käyttämällä suojapinnoituksia. Sen lisäksi raudituksen oikea sijoittelu ja riittävä betonipeite auttavat vähentämään kloridien pääsyä rauditukseen ja siten suojaamaan sitä korroosiolta. [1.]

### 3.5 Betonirakenteiden halkeamat

Betonirakenteiden halkeilu on betonirakenteille tyypillinen ominaisuus. Betonirakenteisiin vaikuttavat monet tekijät, jotka voivat heikentää betonin kestävyyttä ja aiheuttaa halkeilua. Halkeamat lisäävät huomattavasti betonin läpäisevyyttä, mikä heikentää betonin kestävyyttä ja lujuutta. [1.]

Betonissa olevat halkeamat mahdollistavat haitallisten aineiden helpomman tunkeutumisen betoniin. Tämä puolestaan vähentää betonin fyysistä ja kemiallista suojaa sekä heikentää sen raudoitusta. Betonin halkeilun välttämiseksi on tärkeää valita oikea betonin koostumus, suorittaa työ huolellisesti, hoitaa betonia asianmukaisesti ja suunnitella rakenteet laadukkaasti. Betonirakenteiden halkeilu voi johtua monista eri syistä. (kuva 5). [1.]

Mahdollisia tekijöitä ovat betonin vetolujuuden ylittäminen tai kovettuneen betonin kutistuminen ja painuminen. Lisäksi lämpötilaeroilla, tulipaloilla, jäätymis- ja sulamissykleillä, raudoituksen ruostumisella sekä kuivumisesta johtuvalla kutistumisella voi olla vaikutusta. [1.]



Kuva 5. Tyypilliset halkeamat betonirakenteissa. [1.]

## 4 Betonihalkeamien korjaus

Ulkoiset olosuhteet vaikuttavat betonirakenteiden ominaisuuksiin heikentävästi esimerkiksi lämpötilan, kosteuden, säteilyn, tuulen, pakkasen ja muiden rasiustekijöiden myötä. Samaa tekevät erilaiset haitalliset aineet, kuten kloridit ja ilman hiilidioksidi. Yleisimmät vauriot ilmenevät betonijulkisivuissa, betoniparvekkeissa, betonisilloissa ja infrarakenteissa. Betonin korjausprosessissa on tärkeää valita sopiva materiaali ja korjausmenetelmä. Korjauksessa tulee ottaa huomioon rakennuksen omistajan budjetti, korjausyrityksen vaatimukset, rakenteen odotettu käyttöikä sekä korjaustarpeen syyn ymmärtäminen. [1; 9.]

Betonirakenteen korjaaminen on tärkeää asukkaiden turvallisuuden varmistamiseksi. Tämän takia käytetään useampaa kuin yhtä materiaalia. Valitun materiaalin tulisi kyetä palauttamaan rakenteen kunto joko vahvistamalla sitä tai lisäämällä sen kestävyyttä samalla estäen haitallisten aineiden tunkeutumisen rakenteen sisään. [1; 9.]

### 4.1 Betonin korjaustavoite

Betonin korjaaminen tulee aloittaa, kun betonirakenteeseen tulee halkeama tai muita vaurioita. Betonirakenteiden halkeamia pyritään korjaamaan siten, että estetään niiden laajeneminen. Yleisesti käytettyjä materiaaleja tähän tarkoitukseen ovat epoksi ja sementti. [10.]

Korjausprosessi on keskeinen osa rakennustekniikkaa, ja sillä on useita tavoitteita. Korjauksen päätavoitteet riippuvat betonivaurion laadusta ja sijainnista, mutta yleisesti ottaen korjauksen tavoitteita ovat turvallisuuden varmistaminen, tarve kestävyydelle, ulkonäköseikat, kustannussäästöt, rakenteelliset kysymykset ja työtekniinen toteutettavuus. Lisäksi on otettava huomioon rakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta. [10.]

## 4.2 Korjausmenetelmät

Betonirakenteiden korjaamiseen on useita eri menetelmiä.

Korjaustoimenpiteestä vastaavan yrityksen tulee ottaa huomioon monia tekijöitä, kuten ympäristöolosuhteet, aikataulu, budjetti ja halkeamien koko. Tavoitteena on löytää optimaalinen korjausmenetelmä, joka on tehokas, kestävä ja säästää sekä aikaa että rahaa. Kuitenkin tärkein ja vaikuttavin tekijä menetelmän valinnassa on itse halkeaman tyyppi.

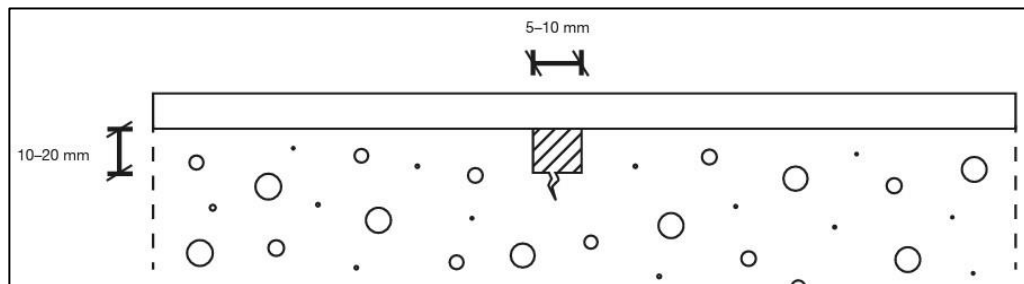
Tarve betonirakenteen korjaukselle ilmenee yleensä silloin, kun rakenteessa havaitaan näkyviä vaurioita, kuten halkeamia, lohkeamia tai raudoituksen paljastumista. Kuitenkin korjaustarve voidaan havaita ennen näiden näkyvien vaurioiden ilmenemistä rakenteen kunnon tarkistuksen avulla. Tämä takia on erittäin tärkeää valita oikea korjausmenetelmä, jotta varmistetaan, että korjaus kestää pitkään ja on tehokas. Korjauksen suunnittelun ja toteuttamisen tulisi olla pätevien asiantuntijoiden vastuulla. [10; 11.]

### 4.2.1 Pakkaus ja pinnan korjaus

Betonin halkeamien korjaus sekä pinnoitus- ja pakkauskorjaukset jaetaan kahteen osaan, kevyisiin pinnoituskorjauksiin ja laastinpaikkaus- ja pinnoituskorjauksiin. Vanhoissa betonirakenteissa esiintyy yleisesti halkeamia, ja näiden korjaaminen on erittäin tärkeää ennen pinnan käsittelyä. On välttämätöntä korjata halkeamat asianmukaisesti, jotta veden ja muiden aineiden tunkeutumisen rakenteeseen estetään, sillä tämä voisi heikentää betonin rakennetta entisestään. Betonia käsiteltäessä tulisi harkita seuraavia vaiheita, joilla varmistetaan, että halkeamat avautuvat riittävän leveiksi (noin 1–2 cm syvyyteen) ja että ne on korjattu ennen pinnan käsittelyä (kuva 6). [9; 12.]

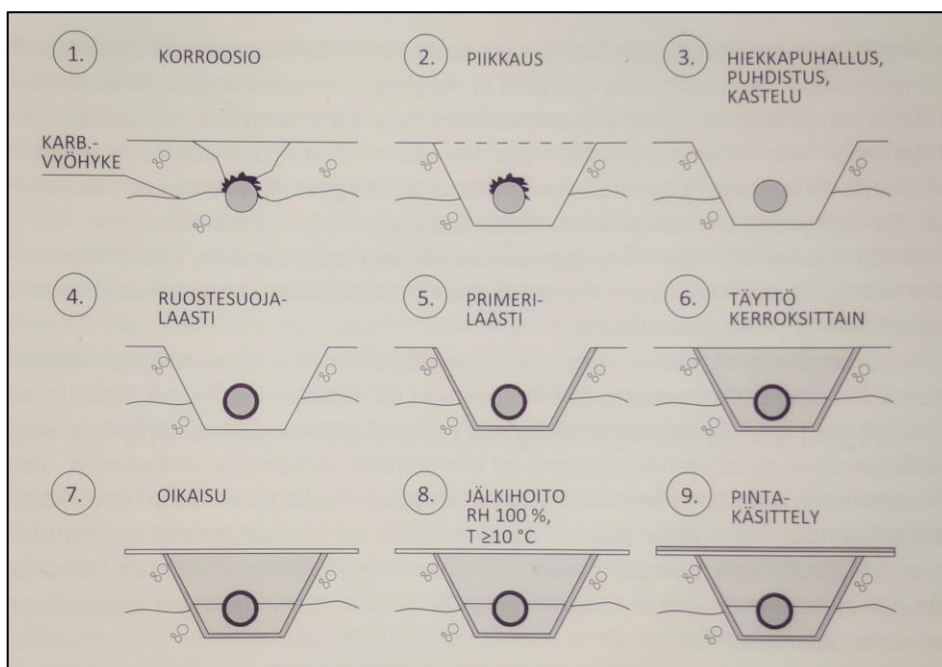
Poistetaan kaikki irtonainen materiaali ja pöly sen varmistamiseksi, että korjausaine tarttuu kunnolla olemassa olevaan betoniin. Erityisesti tulee ottaa huomioon, että pinnoitus tehdään huolellisesti ja sopivalla tuotteella oikein

valmistellulle pinnalle. Kevyttä pinnoituskorjausta suoritettaessa on aina tärkeää tiedostaa korjaukseen liittyvät riskit ja usein myös lyhyt käyttöikä. [9; 12.]



Kuva 6. Halkeamien avaaminen ja paikkaaminen. [12.]

Laastipaikkauskorjauksella viitataan betonirakenteiden paikallisten korroosio- ja rapautumisvaurioiden sekä erilaisten kolhujen korjaamiseen (kuva7). Vanha pinnoite poistetaan usein vesihiekkapuhaltamalla. Menetelmä on tehokas, koska se poistaa pinnoitteen lisäksi myös epäpuhtaudet ja mahdolliset korroosiotuotteet. Laastipaikkaus- ja pinnoituskorjaus ovat erittäin hyödyllisiä menetelmiä tilanteissa, joissa rakenteessa on vain vähän korjattavaa. [10; 12.]



Kuva 7. Laastipaikkauksen vaiheita. [10.]

Täydellisesti suoritettu ja riittävän laaja laastipaikkaus sekä kosteusteknisesti toimiva ja ehjä pinnoite hidastavat tehokkaasti teräksen korroosiota. Rakenteen pinta pinnoitetaan uudelleen. Tämä ei ainoastaan paranna rakenteen ulkonäköä, vaan myös suojaa sitä sekä mekaanisilta tekijöiltä että ympäristön vaikutuksilta. Pinnat, jotka ovat vähemmän alttiita sateelle, kuten parvekkeiden ja muiden rakenteiden sisä- ja alapinnat, voivat kerätä kosteutta, vaikka ne eivät olisikaan suorassa kosketuksessa veden kanssa. Kosteus voi ajan myötä aiheuttaa vaurioita rakenteille, kuten korroosiota. On tärkeää ottaa tämä huomioon suojaamalla nämä pinnat asianmukaisesti. [10; 12.]

#### 4.2.2 Halkeamien injektointi

Injektointi on menetelmä, jossa paineen avulla pumpataan nestemäistä kovettuvaa ainetta täyttämään muotoja, tyhjiä tiloja ja halkeamia. Yli 0,2 millimetrin halkeamat voidaan korjata injektoinnilla. Yleensä tätä pienemmät halkeamat käsitellään muilla menetelmillä, kuten imeyttämällä tai pinnoituksella. [10.]

Betonirakenteita injektointimenetelmällä korjattaessa voidaan käyttää joko kovettuvia muoveja, yleensä polyuretaania tai epoksia, tai hienoa sementtilaastia, kuten sementtiä, hienosementtiä tai mikrosementtiä. Yleensä injektointi suoritetaan käyttämällä muovia, mutta tarvittaessa myös suuret halkeamat voidaan injektoida sementillä. [10; 13.]

On muutamia asioita, jotka on otettava huomioon, jos injektion halutaan onnistuvan. Tärkeää on varmistaa, että halkeama puhdistetaan perusteellisesti mahdollisista irtoaineista ja kosteudesta. Tämä varmistaa, että injektoitava aine tarttuu kunnolla. Ennen injektointia halkeaman pinta suljetaan, jotta injektoitava aine ei pääse vuotamaan ulos. Injektointinipat ovat pieniä putkia tai venttiileitä, jotka porataan halkeamaan mahdollistamaan paineen alaisena tapahtuva aineen ruiskuttaminen halkeaman sisään. [10; 13.]

Sementin injektointi voi tuoda taloudellisia etuja verrattuna vaihtoehtoisiin menetelmiin, kuten poistoon, vaihtoon tai pinoamiseen. Injektointimenetelmä voidaan toteuttaa myös sellaisissa paikoissa, joihin on hankala päästä ja joissa tilaa on rajoitetusti. [13.]

#### 4.2.3 Pintakäsittely

Yleisesti betonirakenteiden korjaamiseen sisältyy pinnan uudelleenkäsittelyä. Tyypillisesti betonirakenteissa pinnan käsittelyn tarkoitus on lähinnä ulkonäöllinen, mutta korjauksen yhteydessä pinnan käsittelyllä voidaan myös suojata rakennetta mahdolliselta vaurioitumiselta. Pintakäsittelyn tavoitteena on rajoittaa betoniin imeytyvän veden määrää käyttämällä pinnoitetta. Tällä tavoin voidaan hidastaa mahdollista raudoitteen korroosiota tai pitää betonin kosteuspitoisuus alle pakkasrapautumisen vaatiman veden täyttymisasteen. [10.]

Betonirakenteiden pintakäsittelymenetelmät voidaan ryhmitellä läpäisevyyden perusteella kolmeen luokkaan:

- pintakäsittelyt, jotka ovat avoimia
- pintakäsittelyt, jotka ovat osittain avoimia
- tiiviit pintakäsittelyt. [10.]

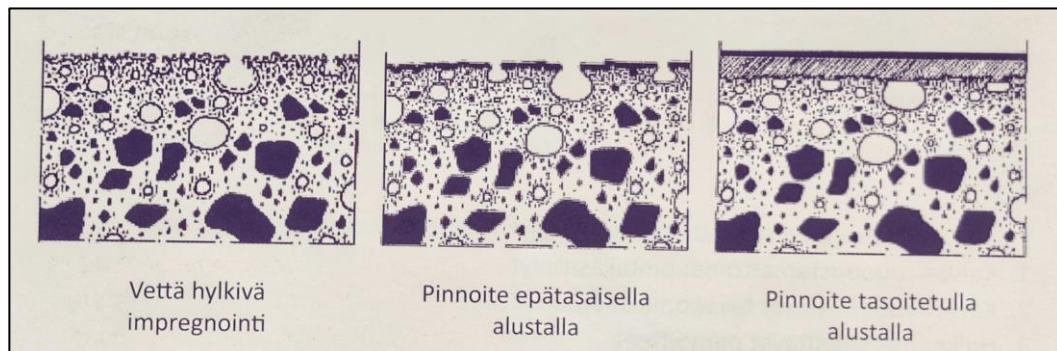
Avoimet pintakäsittelyt mahdollistavat veden ja ilman vapaan liikkumisen betonin läpi. Niitä käytetään yleisesti silloin, kun betonin rakenteesta täytyy haihduttaa kosteutta. Esimerkkejä avoimeen pintakäsittelyyn käytettävistä aineista ovat kalkki, sementti ja silikaatti. Puoliavoimilla pintakäsittelymenetelmillä pyritään hidastamaan veden imeytymistä. Ne eivät kuitenkaan kokonaan estä vesihöyryn kulkua rakenteen läpi. Puoliavoimessa pintakäsittelyssä hyödynnetään esimerkiksi impregnointiaineita sekä suojamaaleja (silikonihartsimaalit ja -pinnoitteet). Tiiviit pintakäsittelyaineet muodostavat veden ja ilman estävän kalvon betonin pinnalle, jolloin kosteuden ja ilman pääsy betonirakenteeseen estyy. Tiiviiseen pintakäsittelyyn käytetään muun muassa orgaanisia maaleja sekä tähän ryhmään kuuluvia pinnoitteita. [10.]

Kalvon muodostuminen on tärkeä vaihe pinnoitusprosessissa, kun halutaan antaa materiaalille erityisiä ominaisuuksia, kuten korroosionkestävyyttä, esteettisyyttä tai kulutuksen kestävyyttä. Kalvomuodostuksen perusteella pintakäsittelyt voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- pintakäsittelyt, jotka eivät muodosta kalvoa
- tavalliset pinnoitteet, jotka muodostavat kalvon
- pinnoitteet, jotka täyttävät halkeamat. [10.]

Käsittelyt, jotka eivät muodosta kalvoa, viittaavat yleensä impregnointiin. Impregnoinnin aikana neste tai geeli levitetään betonin pinnalle, minkä jälkeen se tunkeutuu betonin huokosiin muodostaen vettä hylkivän kerroksen huokosten seinämiin. Kalvomaiset pinnoitteet ovat tyypillisesti 0,1–1 millimetrin paksuisia, ja tavallisesti näihin pinnoitteisiin kuuluu erilaisia maalityyppejä. [10.]

Halkeamien tasoittamiseen tarkoitettujen pinnoitteiden paksuus on melko paksua ja taipuisia tuotteita. Tuotteen ominaisuudet vaihtelevat kalvon paksuudesta ja lämpötilasta riippuen. Kuvassa 8 esitetään esimerkit eri pinnoitetyypeistä. [10.]



Kuva 8. Esimerkit eri pinnoitetyypeistä. [10.]

## 5 Itsekorjautuva betoni

### 5.1 Kohteen kuvaus

Tämän luvun tavoitteena on esitellä ympäristöystävällisempiä ja taloudellisesti kannattavampia tapoja betonin halkeamien korjaamiseen. Tällainen lähestymistapa auttaa vähentämään tarvetta manuaaliseen työhön. Betonin käyttö on yleistä rakennusalailla sen helpon saatavuuden ja edullisen hinnan vuoksi siitä huolimatta, että betoni voi altistua halkeamien muodostumiselle. Erilaiset rasitukset ja ulkoiset tekijät vaikuttavat betonin kuntoon. Tämän seurauksena betoniin syntyy halkeamia ja vaurioita. Halkeamat ovat yksi tärkeimmistä tekijöistä, jotka vähentävät betonin kestävyyttä. Ne mahdollistavat kemiallisten liuosten tunkeutumisen ja voivat vaikuttaa merkittävästi betonirakennusten fyysisiin, mekaanisiin ja niiden kestävyteen vaikuttaviin ominaisuuksiin. [14.]

Kutistumisen seurauksena betoniin saattaa syntyä pieniä halkeamia, jotka voivat kuitenkin myös laajentua ulkoisten rasitusten vaikutuksesta, mikä puolestaan johtaa useiden halkeamien syntymiseen. Tällaiset ongelmat ovat erityisen yleisiä alueilla, joilla sataa paljon ja ilmankosteus on korkea. Betonirakenteissa olevat halkeamat voidaan korjata, mutta betonin fyysinen korjaaminen ja ylläpitäminen aiheuttaa monia haasteita, kuten kustannuksia ja ympäristövaikutuksia. [14.]

Tutkimukset osoittavat, että sementin valmistus rakennusalan tarpeisiin aiheuttaa noin 8 prosenttia maailman hiilidioksidipäästöistä. Lisäksi kemialliset korjausmateriaalit luovat terveysriskejä. [15.]

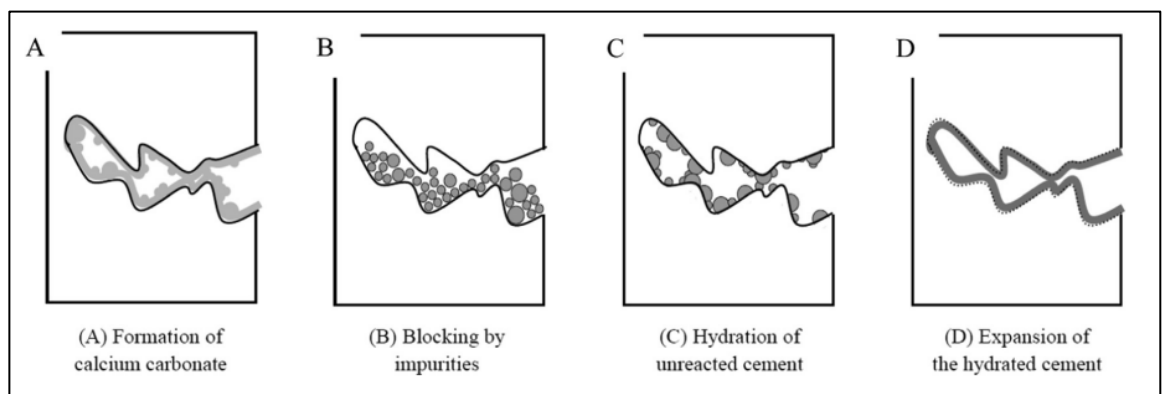
## 5.2 Itsekorjautuvan betonin historia

1990-luvulla tutkijat alkoivat kokeilla erilaisia menetelmiä halkeamien korjaamiseksi, kuten betonin itsekorjautuvuutta. Illinoisin yliopiston arkkitehtuuriprofessori Carolyn Dry oli ensimmäinen, joka otti tämän idean vakavissaan huomioon. Itsekorjautuva betoni kehitettiin vuonna 2006 uutena betonityyppinä Alankomaiden Delftin teknillisessä yliopistossa mikrobiologian asiantuntijoiden Jonkersin ja Schlangenin toimesta. Pitkän aikavälin testauksen jälkeen tutkijat löysivät täydellisen korjausaineen, joka tunnetaan nimellä *bacillus*-bakteeri. [16; 17.]

Itsekorjautuva betoni on erinomainen ratkaisu, joka yhdistää laadukkaat materiaalit ja kyvyn korjata halkeamia. Rakennusalalla on suurta kiinnostusta tämän menetelmän tarjoamiin etuihin, ja sen uskotaan voivan merkittävästi vähentää korjaus- ja ylläpitokustannuksia. [14.]

## 5.3 Menetelmät

Nykyään on saatavilla monia erilaisia korjausmateriaaleja ja -menetelmiä betonin korjaukselta varten. Kuvassa 9 esitetään betonin halkeamien erilaiset korjausmenetelmät. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vain niitä kahta erilaista tapaa, jotka liittyvät itseään korjaavaan betoniin.



Kuva 9. Betonin halkeamien erilaiset korjausmenetelmät. [19.]

Itsekorjautuva betoni on erinomainen rakennusmateriaali, joka pystyy korjaamaan itsensä ilman fyysistä työtä. Seuraavassa on tiivistelmä menetelmistä, joilla betoni korjaa itseään:

- Bakteerit: tässä menetelmässä käytetään bakteereja, jotka pystyvät tuottamaan kalsiumkarbonaattia betonin sisällä. Kun betoni halkeilee ja bakteerit altistuvat vedelle, ne alkavat tuottaa kalsiumkarbonaattia, joka täyttää halkeamat. Yksi yleisesti käytetyistä bakteereista tähän tarkoitukseen on *Bacillus pseudofirmus*. Käyttämällä näitä bakteereita itsekorjautuvassa betonissa voidaan parantaa betonin kestävyttä ja vähentää sen korjaustarvetta. [2; 28.]
- SAP-polymeerit (*Superabsorbent polymers*): aineita, jotka pystyvät imemään itseensä ja säilyttämään suuria määriä vettä. Kun SAP-polymeerejä lisätään betoniin, voidaan vettä varastoida betonin sisälle. Jos betoniin syntyy halkeamia, varastoitu vesi vapautuu ja aktivoi betonin korjausmekanismin. SAP-polymeerit voivat myös vähentää kutistumisen aiheuttamien halkeamien muodostumista betonissa, koska ne pystyvät sitomaan vettä ja vapauttamaan sitä betonin kuivuessa. [2; 28.]

#### 5.4 Materiaalit ja valmistusmenetelmä

Itsekorjaavan betonin sekoitussuhteet määritellään yleensä samalla tavalla kuin perinteisen betonin. Valmistustavan, nopeuden, aikataulun ja kestävyuden vaikutus vasta muodostuneiden ja kovettuneiden sementtipohjaisten yhdisteiden ominaisuuksiin on yleisesti ottaen tärkeää itsekorjautuvan betonin tuotannossa, ja tällöin käytetään mineraaliseoksia, jotka korvaavat osan sementistä. Tämä mahdollistaa sementtimäärän vähentämisen samalla kun säädellään materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. [19.]

Betonirakenteiden raaka-aineet lisätään yleensä mekaaniseen sekoittimeen, ja niitä sekoitetaan erissä, kunnes saavutetaan toivottu tasalaatuisuus. Nykyään betonin valmistusprosessissa käytetään erilaisia menetelmiä sekä fysikaalisia että kemiallisia, joilla pyritään parantamaan materiaalin leviämistä ja

juoksevuutta prosessin aikana. Näihin menetelmiin kuuluvat esimerkiksi ultraäänikäsitteily ja erilaisten pehmittimien sekä voimakkaiden vedenvähentäjien käyttö. [19.]

Itsekorjaantuvan betonin osalta valmistusprosessit voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan, jotka ovat riippuvaisia korjausaineen sekoittamisen olosuhteista:

- märkäsekoitus
- kuivasekoitus
- myöhäinen sekoitus

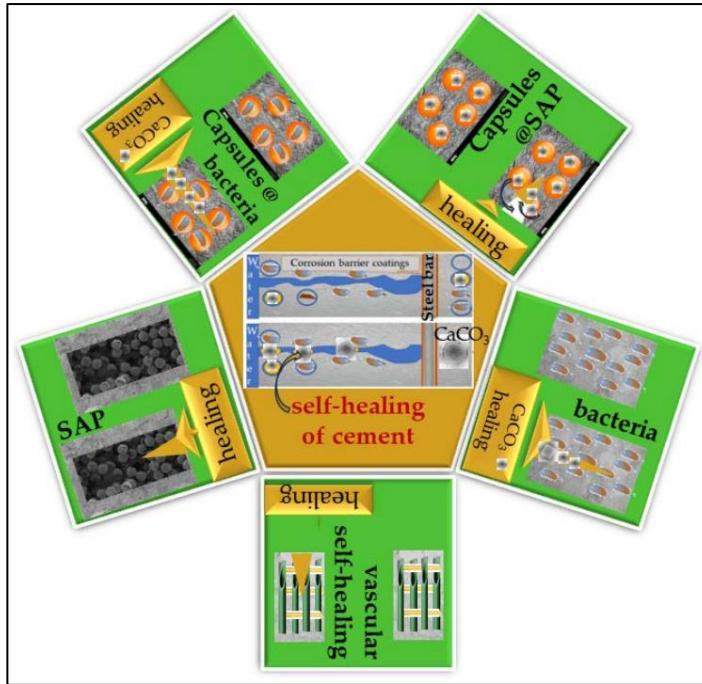
Nämä luokat perustuvat raaka-aineisiin ja niiden ominaisuuksiin. [19.]

Valmistusprosessissa voidaan lisätä hauraita itsekorjaantuvan betonin aineosia viimeisen sekoitusvaiheen aikana sementtikomposiittien rikkoutumisen estämiseksi. [19.]

## **6 Toimintatavat ja periaatteet**

Itsekorjautuvalla betonilla on kyky parantaa halkeamiaan itsestään ja palauttaa osittain omat mekaaniset ominaisuutensa. Halkeamat heikentävät betonin kestävyyttä ja aiheuttavat teräsraudoituksen korroosiota. Kuten aiemmin mainittiin, betoni voi parantua itsestään käyttämällä autogeenistä parantumiskykyään. Halkeamat voivat korjaantua, kun mineraali kostutetaan tai kalsiumhydroksidi kovettuu. Betoniin on mahdollista lisätä erilaisia aineita, jotka mahdollistavat sen itsensä korjaantumisen. Esimerkkejä näistä ovat kapselit, mikrobit, verisuonimaiset itsekorjautuvuutta edistävät rakenteet sekä erittäin imukykyisten polymeerien käyttö. [20; 27.]

Tässä vaiheessa tarkastellaan korjausaineita, joita voivat olla joko polymeerimateriaalit tai biologiset materiaalit. Valintaprosessissa otetaan huomioon sekä tekniset että taloudelliset näkökulmat. Kuvassa 10 esitellään itsekorjautuva betoni ja sen toimintaperiaatteet. [20.]



Kuva 10 Itsekorjautuvan betonin toimintaperiaatteet. [20.]

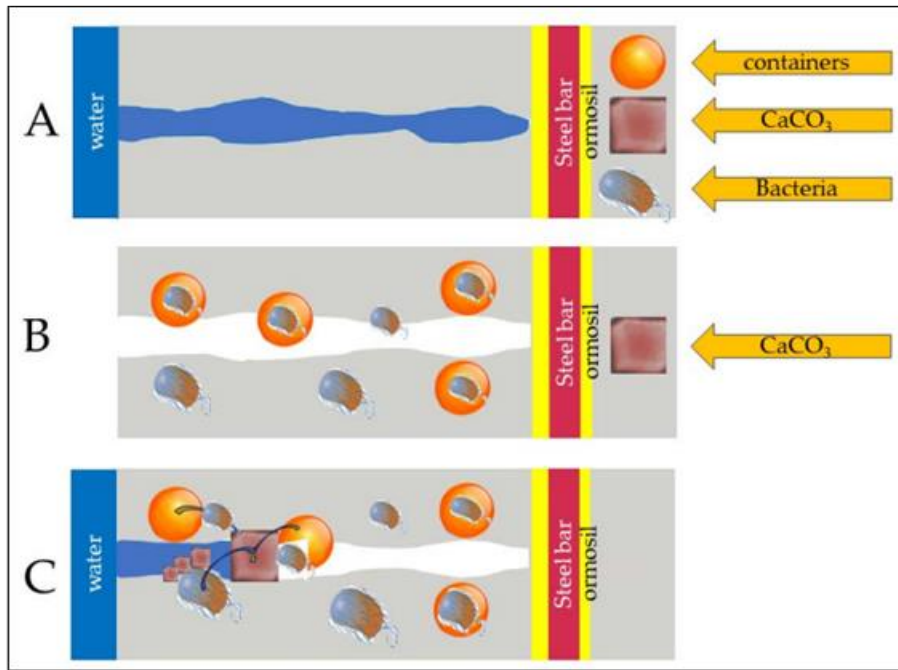
## 6.1 Bakterit

Betonista voidaan tehdä itsekorjautuvaa lisäämällä sementtiin bakteereita. Kun bakteeri käsittelee ureaa, se tuottaa kalsiumkarbonaattia, joka täyttää betonin halkeamat. Betonissa esiintyvien bakteerien ansiosta halkeamien muodostuminen hidastuu ja betonin puristuslujuus sekä jäykkyys lisääntyvät verrattuna tilanteeseen ilman bakteereja. Mikrobikalsiitin käyttö vähentää sulamisen ja jäätyksen kemiallisia vaikutuksia sekä alentaa materiaalien läpäisykykyä, mikä taas estää jään muodostumista. [20; 24.]

*Bacillus* on grampositiivinen, sauvanmuotoinen bakteeri, joka voi olla joko aerobinen tai fakultatiivisesti aerobinen ja joka kykenee tuottamaan endosporeja. Erytispiirteidensä vuoksi bakteeri kykenee elämään kaikenlaisissa ympäristöissä. [27.].

Kuvassa 11 näytetään bakteeriaan erilaisia ilmiöitä: (A) Kun betoniin syntyy halkeama, vesi voi tunkeutua sisään. (B) Betoniin on lisätty erityistä ainetta, jota kutsutaan bakteeriksi. (C) Kun betonia kostutetaan, bakteeri alkaa turvota ja

estää veden virtauksen halkeamassa. Samalla bakteeri vapauttaa aineitaan, jotka reagoivat muiden aineiden kanssa muodostaen  $\text{CaCO}_3$ -yhdistettä halkeaman sisällä. Tämä estää veden pääsyn syvemmälle halkeamaan ja suojaa rautaa haitallisilta korroosiotuotteilta. [20.]



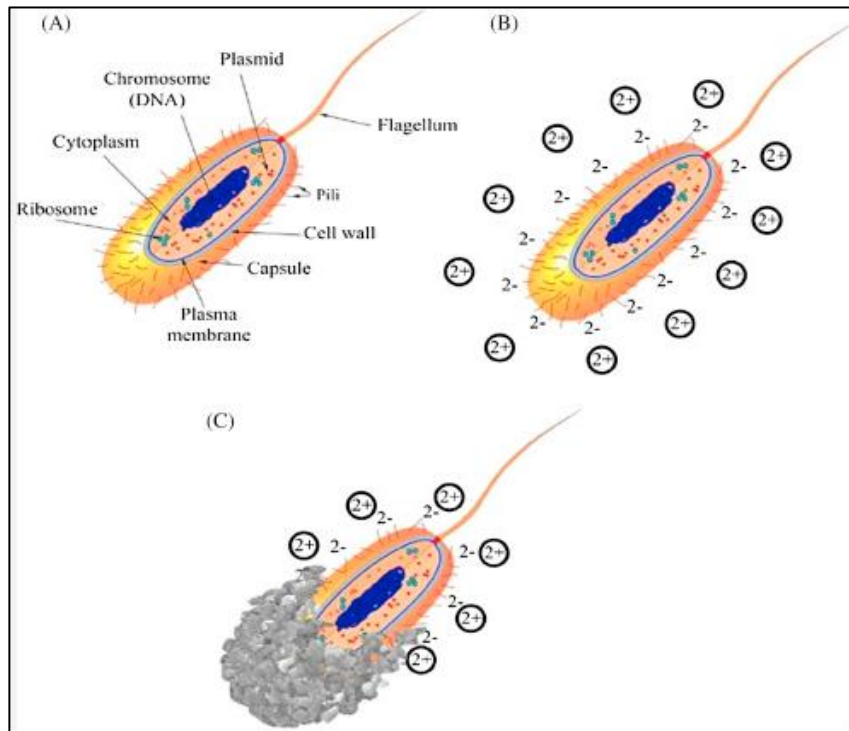
Kuva 11. Erilaisia ilmiöitä, joita voi esiintyä bakteerissa korjausprosessissa. [20.]

### 6.1.1 Biomineralisaatio

Biomineralisaatiolla tarkoitetaan elävien olentojen kykyä tuottaa mineraaleja. Tämä tapahtuma voi perustua biologisesti laukaistuun mineralisaatioon. Tällaista mineralisaatiota esiintyy yleensä avoimessa ympäristössä mikro-organismien aineenvaihdunnan luonnollisena seurauksena. Tässä prosessissa mikro-organismien tuottamat aineenvaihdunnan sivutuotteet reagoivat ympäristönsä kanssa ja synnyttävät biomineraaleja. Kuvassa 12 esitetään bakteerin rakenne ja kalsiumkarbonaatin tuotannon kaavio. [25; 26.]

Biologinen mineralisaatio alkaa yleensä anaerobisissa olosuhteissa tai happi-anoksisuuden rajapinnalla. Prosessin tehokkuus riippuu liuenneen

epäorgaanisen hiilen määrästä, nukleaation alkamishetkestä, pH-arvosta, lämpötilasta ja Hartree-energiasta (Eh). [25; 26.]



Kuva 12. (A) Bakterin rakenne. (B) Negatiivisesti varautunut soluseinä ja positiivisesti varautuneiden ionien läsnäolo. (C) Biomineraalien tuotanto ionien sitoutumisen kautta. [26.]

### 6.1.2 Mikrobin toiminnasta johtuva karbonaatin saostuminen

Täydellinen betonin itsekorjautumismenetelmä olisi sellainen, joka pystyisi havaitsemaan vauriot tai halkeamat ja laukaisemaan parantavan aineen vapautumisen. Betonin itsekorjausmenetelmät tarjoavat tehokkaita tapoja korjata betonin mikrohalkeamia, ja tulokset ovat lupaavia mikrohalkeamien korjaamisessa betonissa. Betoni on voimakkaasti emäksistä, ja siihen lisätyt bakteerit kestävät hyvin emäksistä ympäristöä. Mikrobiologisesti tuotettu kalsiumkarbonaatin saostuminen edistää mikrorakojen täyttymistä ja auttaa betonin muiden osien, kuten hiekan ja soran yhdistymisessä. [25; 26.]

Urea muuttuu ammoniumiksi ja karbonaatiksi *Bacillus*-bakteerin läsnä ollessa, ja bakteeri kykenee saostamaan  $\text{CaCO}_3$ :ta emäksisissä olosuhteissa. Alle 0,2

millimetrin levyiset halkeamat voidaan korjata itsestään betonilla. Jos halkeamat ovat yli 0,2 millimetrin levyisiä, betoni ei parane automaattisesti, mikä voi aiheuttaa haitallisten aineiden pääsyn betonin sisään. Itsekorjautuvassa betonissa bakteerit aktivoituvat halkeamien muodostuessa. Bakteerien aineenvaihdunnan seurauksena syntyy kalsiumkarbonaattia, joka korjaa halkeamat itsestään paranemisprosessin aikana. Kun halkeamat ovat täysin täyttyneet kalsiumkarbonaatilla, bakteerit siirtyvät lepotilaan. [20; 21.]

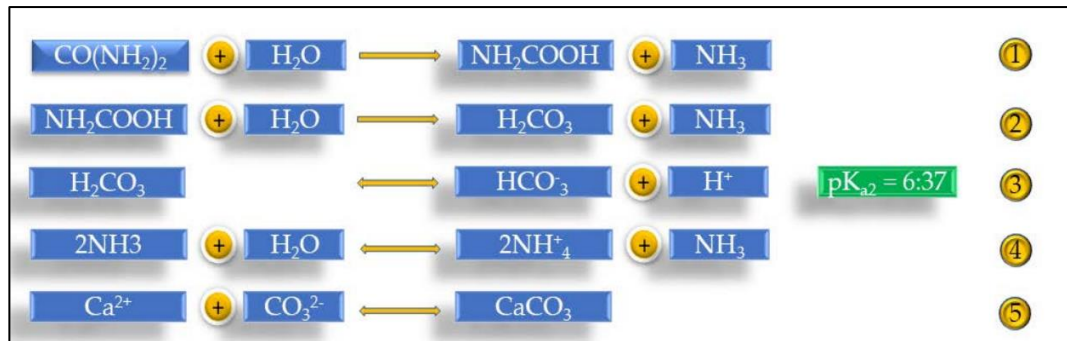
Jos halkeamia muodostuu tulevaisuudessa, bakteerit aktivoituvat taas ja täyttävät ne. Bakteerit toimivat yhdessä pysyvänä parantavana aineena, ja tätä prosessia kutsutaan mikrobiologisesti aiheutetuksi kalsiumkarbonaattisaostukseksi (MICP). [20; 21.]

### 6.1.3 Urean hajoaminen ja CaCO<sub>3</sub>:n muodostuminen

Kun urea hajoaa, pH-arvo nousee, mikä puolestaan johtaa siihen, että mikrobit vapauttavat runsaasti kalsiumkarbonaattia hiilidioksidin muodossa kalsiumia sisältävässä ympäristössä. Kalsiumkarbonaatin saostumisen tärkein tekijä on ylikyllästysaste, joka määrittää ionisten aineiden pitoisuuden suhteen:

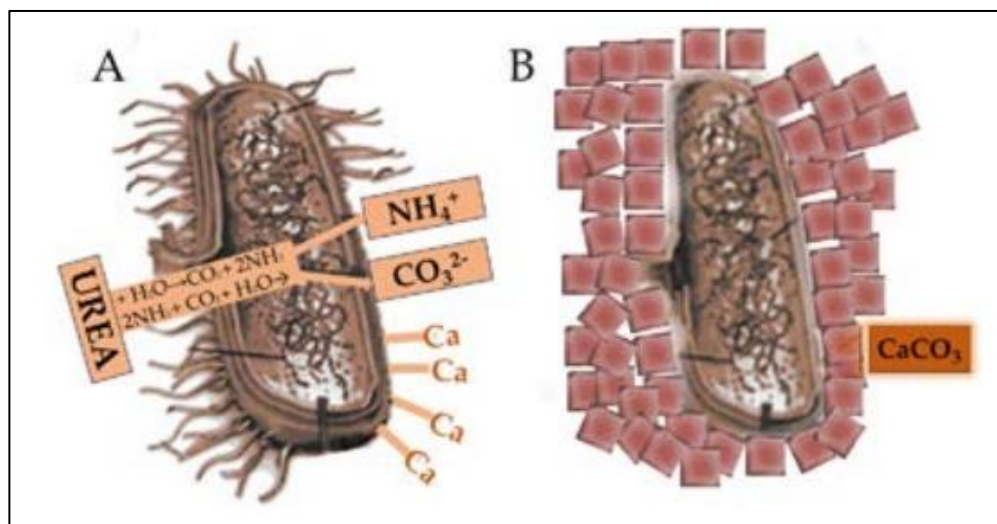
$$S = [\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}] / K_{\text{so}} [20.]$$

Kun kemiallinen reaktio etenee, yksi mooli ureaa hajoaa kennoissa, tuottaen 1 moolin NH<sub>3</sub> ja 1 moolin karbamidia. Karbamidi hajoaa luontaisesti, mikä johtaa toiseen mooliin NH<sub>3</sub> ja hiilihappoa. Kaikki nämä aineet hajoavat vedessä muodostaen molbikarbonaatti-ionin ja kaksi ammonium- ja hydroksyyli-ioneja. Tämä lisää tuotantoa entisestään, mikä auttaa muodostamaan karbonaatti-ioneja. Kun bakteerisolun ympäristön pH nousee, se vaikuttaa myös bakteerisuspensioon liuoksessa. Tämä korkeampi pH edistää karbonaatti-ionien muodostumista, mikä puolestaan johtaa kalsiumkarbonaatin laskeutumiseen. Tämä saostuma voidaan havaita solun ympärillä, kun kalsiumionit liukenevat liuokseen. Kuvassa 13 esitetään yllä mainitut kemialliset reaktiot. [20.]



Kuva 13. Bakteerit aiheuttavat mineraalien muodostumisen monimutkaisten kemiallisten reaktioiden avulla. [20.]

Kun ureaa lisätään bakteeriliuokseen, siitä vapautuu epäorgaanisia karbonaatti-ioneja ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ja ammoniakkia ( $\text{NH}_4^+$ ) bakteerien lähiympäristöön, kuten nähdään kuvan 14 vaiheessa (A). Bakteerin soluseinä on negatiivisesti varautunut, mikä houkuttelee kalsiumioneja tarttumaan siihen. Tämä ilmiö voi johtaa kalsiumin liialliseen pitoisuuteen, mikä puolestaan aiheuttaa kalsiumkarbonaatin kertymisen bakteerin soluseinälle, kuten vaiheessa (A). Ajan myötä solu joutuu ansaan, mikä estää ravintoaineiden pääsyn solun sisälle ja aiheuttaa lopulta sen kuoleman (B). [20; 26.]



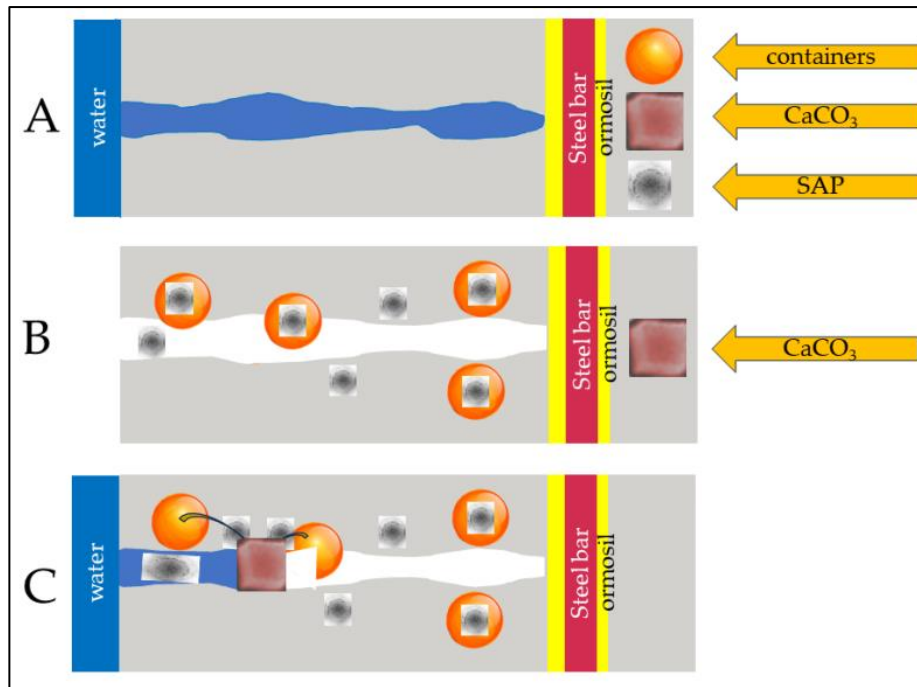
Kuva 14. Kalsiumkarbonaatin muodostuminen urean hajoamisprosessissa (A). Kalsium aiheuttaa kalsiumkarbonaatin epähomogeenisen saostumisen bakteerin soluseinämässä (B). [20.]

## 6.2 SAP-polymeerit

Itsekorjautuvaa betonia pidetään yhtenä parhaista menetelmistä kutistumista ja halkeilua vastaan. Betonissa on sellainen hyvä ominaisuus, että kun siihen lisätään sisäinen kovettava aine, pystyy se vapauttamaan ajoissa ylimääräistä kovettumisnestettä pitääkseen kosteustasonsa korkealla ja siten edesauttamaan sideaineen kostumista. Superabsorbentit polymeerit (SAP) ovat innovatiivisia korjausmateriaaleja, jotka tarjoavat uusia mahdollisuuksia vaikuttaa tuoreiden sementtipohjaisten materiaalien ominaisuuksiin. [29; 30.]

### 6.2.1 Toimintaperiaatteet

Superabsorbentit polymeerit (SAP) toimivat betonin sisäisenä kovetusaineena, ja ne auttavat hallitsemaan veden tunkeutumista halkeamiin betonissa. Superabsorbentteja käytetään betonissa itsekorjautumisen tehostamiseen ja halkeamien täyttämiseen. Superabsorbentit imevät vettä ja samalla paisuvat, mikä johtaa huokosten sulkeutumiseen. [29; 30.]. Tämä puolestaan edistää kalsiumkarbonaatin muodostumista hydraatioreaktioiden avulla. Betoni voi korjata itseään, kun aineet reagoivat veteen ja täyttävät halkeamia. Tämän seurauksena halkeamiin muodostuu kalsiumkarbonaattia, joka estää veden pääsyn niiden läpi. Kuvassa 15 on esitetty erilaisia ilmiöitä: (A) Kun betoniin tulee halkeama, vesi voi päästä sisään. (B) Betoniin on lisätty erityistä ainesosaa, jota kutsutaan SAP:ksi, ja siinä on myös pieniä säiliöitä, jotka sisältävät SAP:ta. (C) Kun betonia kastellaan, SAP alkaa turvota ja estää veden virtauksen halkeamassa. Samalla SAP vapauttaa aineitaan, jotka reagoivat muiden aineiden kanssa muodostaen  $\text{CaCO}_3$ -yhdistettä halkeaman sisällä. Tämä estää veden pääsyn syvemmälle halkeamaan ja suojaa rautaa haitallisilta korroosiotuotteilta. [20.]



Kuva 15. Erilaisia ilmiöitä, joita voi esiintyä SAP:ssa, jossa on korkea sementtipitoisuus. [20.]

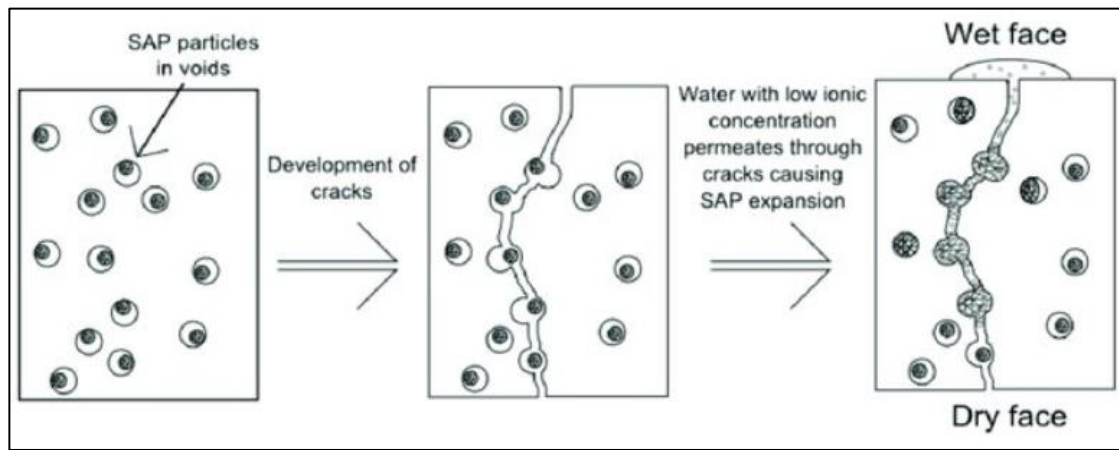
Nykyään SAP on yksi parhaimmista itsekorjautuvista materiaaleista, joka osoittaa erinomaisia kykyjä sekä imeä vettä itseensä että vapauttaa sitä. Aiemmassa tutkimuksessa on myös todettu, että kun käytetään SAP:ta betonissa, kutistuminen ja halkeilu vähenevät. Kutistuminen väheni noin 31–41 prosenttia käyttämällä 2 prosentin annostelua SAP:lle. [29.]

### 6.2.2 Kestävyyden ja mekaanisten ominaisuudet

Betonin halkeamat mahdollistavat veden ja kemikaalien pääsyn sisään, mikä heikentää sekä terästä että itse betonia. On tärkeää korjata tai tiivistää nämä halkeamat, koska se parantaa betonin kuntoa ja siten lisää sen kestävyttä. Betonin vedenläpäisevyys vähenee korjauksen jälkeen, mutta läpäisevyys on silti hieman korkeammalla tasolla ehjien vertailunäytteiden arvoihin verrattuna. Tämä johtuu korjausaineesta, jossa on putkimaisia kapsseleita, jotka estävät veden tunkeutumisen materiaalin. [19.]

Betonissa, joka sisältää runsaasti tuhkaa, on nopea kloridin läpäisykyky, kun taas betonissa, johon on lisätty lasikapseloituja mineraaleja, on erinomainen

kaasutiiviys. SAP:lla on kyky korjata halkeamia, jotka johtuvat veden imeytymisestä ja laajenemisesta. Tämän korjauskyvyn tehokkuuteen vaikuttavat suuresti liuoksen happamuus ja anionipitoisuus. Kun neste imeytyy, se vapautetaan ja SAP kutistuu, mikä aiheuttaa suuria ilmakuplia sementtipastassa kuivumisen aikana. SAP:n on paisuttava ennen kuin se voi toimia esteenä. Kun vesi pääsee halkeamiin, se täyttää tyhjiöt ja aiheuttaa SAP:n turpoamisen. Tämä laajentuminen estää haitallisten hiukkasten pääsyn sisään, kuten kuvassa 16 on esitetty. [19; 30.]



Kuva 16. Betonirakenteiden halkeamien korjaaminen itsestään korjautuvalla SAP:lla. [19.]

## 7 Itsekorjautuvan betonin näkökulmat

Itsestään korjautuva betoni on erittäin hyödyllistä materiaalia, joka on suunniteltu korjaamaan itseään, kun sen rakenteessa esiintyy vaurioita, kuten halkeamia. Tämä ominaisuus voi merkittävästi pidentää rakenteiden käyttöikää ja vähentää tarvetta huoltotoimenpiteisiin. Itsestään korjautuvalla betonilla on sekä etunsa että haittansa korjausmateriaalina. Tämän vuoksi tutkijat pyrkivät kehittämään ja parantamaan sitä. Lisäksi he haluavat tarkastella sitä mahdollisena korjausaineena tulevaisuudessa. [27.]

### 7.1 Käyttö

Tulevaisuudessa itsekorjautuva betoni voi tuoda muutoksia rakennusalalle. Kyseessä on mielenkiintoinen tapa auttaa luomaan betonirakenteita, jotka kestävät vaurioita eivätkä vaadi jatkuvaa korjaamista. Itsekorjautuva betoni tulee olemaan keskeisessä roolissa rakentamisessa. Sen avulla voidaan helposti korjata halkeamia betonirakenteissa ilman suuria kustannuksia tai vaivaa. [21.]

Menetelmän osalta on kuitenkin vielä paljon tutkittavaa ja sen käyttö käytännön projekteissa on toistaiseksi rajallista. Alla olevassa kuvassa 17 näkyy, kuinka sillan betonipilareiden teräsvahvikkeet ovat altistuneet korroosiolle. Tämän vaurion voi korjata itsekorjautuvan betonin menetelmällä. [21; 23.]



Kuva 17. Sillan betonipilareiden teräsvahvikkeet ovat altistuneet korroosiolle. [23.]

Paikat, joissa itsekorjautuvaa betonia voidaan käyttää:

- tunnelit ja maanalaiset rakenteet
- teollisuuslaitosten lattiat
- merirakenteet, kuten laiturit ja satamat
- ydinjätteen säilytysaltaat
- arkkitehtoninen suunnittelu
- kiitoradat ja lentoaseman tasoalueet
- tuulivoimaloiden perustukset
- tukiseinät
- rakennukset ja infrastruktuuri, kuten padot, vesisäiliöt ja putkistot
- muurit ja tulvasuojaukset
- pilvenpiirtäjät
- betonielementtirakenteet
- betonipinnoitteet
- siltojen ja moottoriteiden rakentaminen. [23.]

## 7.2 Edut ja haitat

Betonista on tullut erittäin suosittu ja laajasti käytetty rakennusmateriaali sen mahdollistamien monipuolisten suunnittelumahdollisuuksien ansiosta.

Halkeamien korjaaminen on sekä aikaa vievää että kallista. Itsekorjautuva betoni tarjoaa erittäin hyvän ratkaisun tähän ongelmaan. Kyseessä on prosessi, joka palauttaa betonin alkuperäisen suorituskyvyn vaurioiden ilmenemisen jälkeen.

Tällainen betoniteknologia voi vähentää ylläpitokustannuksia ja maksimoida rakennusmateriaalin eliniän. Itsekorjautuvalla betonilla on rakennusmateriaalina sekä hyviä että huonoja puolia. Alla esitellään molempia. [20; 21.]

Itsekorjautuvan betonin edut:

- betonirakenteiden käyttöikä pitenee
- korjaustarve vähenee itseparantumiskyvyn ansiosta
- itsekorjautuvuusominaisuuden avulla betoni muuttuu vähemmän läpäiseväksi
- teräsvahvikkeen ruostumisriski pienenee, kun käytetään itsekorjaavaa betonia
- parempi puristuslujuus verrattuna perinteiseen betoniin

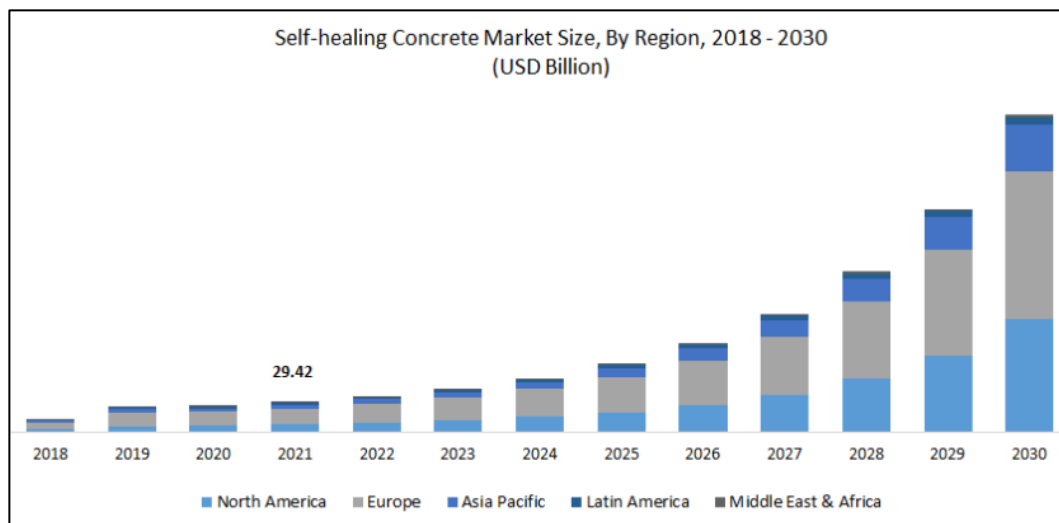
Itsekorjautuvan betonin haitat:

- kallista verrattuna tavalliseen betoniin
- itseään korjaavalle betonille ei ole olemassa standardikoodia
- vain harva tietää itsekorjautuvasta betonista, koska kyseessä on uusi tuote. [20; 21.]

### 7.3 Tulevaisuudennäkymät

Nykyään itsekorjautuvaan betoniin liittyvään teknologiaan liittyy vielä haasteita. Jatkuva tutkimus- ja kehitystyö ohjaavat kuitenkin itsekorjautuvaa betonia kohti tulevaisuutta, jossa kestävät rakenteet ovat standardi. Tekniikan käyttöönotto raivaa tietä entistä turvallisemmalle ja kestävämmälle rakennusympäristölle. [22.]

Itsekorjautuvan betonin markkina-arvo oli 29,42 miljardia Yhdysvaltain dollaria vuonna 2021. Markkinoiden odotetaan kasvavan 31,3 prosentin vuosittain, kuten kuvassa 18 ilmenee. Itsekorjautuvan betonin suosio tulevaisuudessa tulee perustumaan jatkuvaan kysyntään niin infrastruktuurin kuin myös kaupallisten, teollisten ja asuinrakennusten osalta sekä kestävyiden että luotettavuuden näkökulmasta. Lisäksi rakennusten huoltotarpeen väheneminen todennäköisesti edistää markkinoiden kasvua rakennusalaalla globaalisti. [18; 27.]



Kuva 18. Analyysi itsekorjautuvan betonin markkinoista vuosina 2018–2030. [18.]

## 8 Johtopäätökset

Viimeisen vuosikymmenen aikana itsekorjautuvien materiaalien tutkimus on lisääntynyt, erityisesti sementtipohjaisten aineiden itsekorjautuvien ominaisuuksien suhteen. Useat asiantuntijat sekä tutkijat ovat esittäneet erilaisia lähestymistapoja aiheeseen.

Betonin itsekorjaantuminen on monimutkainen prosessi, johon liittyy erilaisia fyysisiä, kemiallisia ja mekaanisia tekijöitä. Betonirakenteen halkeamien koko vaikuttaa merkittävästi betonin lujuuteen ja samalla raudoituksen kyky säilyttää lujuutensa heikkenee.

Betonin kestävyys heikkenee halkeamista, jotka mahdollistavat veden ja haitallisten aineiden tunkeutumisen betonirakenteisiin. Tästä syystä tutkijat ovat pyrkineet keksimään keinoja, joilla halkeamat pysyvät hallinnassa ja joilla ne pystytään korjaamaan mahdollisimman nopeasti. Tavoitteena on kehittää itsekorjautuvaa betonia, koska betonirakenteiden ylläpitokustannukset ja korjauskulut voivat nousta merkittäviksi.

Itsekorjautuva betoni on merkittävä innovaatio rakennusalalla. Tämä pitkäikäinen materiaali pystyy korjaamaan halkeamia ja vaurioita itsenäisesti, mikä lisää rakennusten kestävyttä, vähentää ylläpitokustannuksia ja edistää ympäristön hyvinvointia. Lisäksi itsekorjautuvaa betonia on hyödynnetty korjausmateriaalina erityisesti äärimmäisissä sääolosuhteissa sen erinomaisen kestävyden ansiosta.

Tällä hetkellä itsekorjautuvaa betonia pidetään vielä kokeellisena materiaalina, jolle on asetettu tiettyjä rajoituksia. Itsekorjautuvan betonin materiaalien ja ympäristövaikutusten taloudellista vaikutusta ei vielä täysin ymmärretä.

Vaikka nykyteknologialle asetetaan haasteita, jatkuva innovaatio ja tutkimus vievät itsekorjaantuvaa betonia kohti tulevaisuutta, jossa kestävät rakennukset ovat yleisempiä. Tämän menetelmän omaksuminen edistää turvallisempaa ja pitkäikäisempää rakentamisen aikakautta.

Seuraavat ovat keskeisiä johtopäätöksiä tästä opinnäytetyöstä:

- Tutkimukset viittaavat siihen, että betonin puristuslujuutta voidaan parantaa lisäämällä itsekorjaavaa ainetta. Tämä tapahtuu hyödyntämällä luonnollisia, biokemiallisia ja kemiallisia mekanismeja.
- Itsekorjaavia aineita sisältävässä betonissa, kalsiitin muodostuminen ja kerääntyminen, joka kestää enemmän aikaa betonissa olevien halkeamien tai aukkojen täyttämiseen.
- Itsestään korjaavaa tekniikkaa ei ole käytetty vain laboratoriotutkimuksissa, vaan sitä on hyödynnetty myös monissa erilaisissa sovelluksissa sekä rakennusalalla että sen ulkopuolella.
- Lisäämällä itsekorjaavaa ainetta betoniin ei ainoastaan tiivistetä betonin halkeamia, vaan se myös hidastaa korroosiota ja estää kloridi-ionien leviämistä betonissa.
- Useissa tutkimuksissa havaittiin, että itsekorjaavien osien käyttö voi muodostaa suojakalvon, joka estää kloridi-ionien tunkeutumisen raudoitustankoon.

Suomessa betonin yleinen ongelma liittyy sen halkeamiin, jotka johtuvat erilaisista ulkoisista tekijöistä, kuten vaihtelevista sääolosuhteista, betonin kutistumisesta ja rakenteen kuormituksesta. Nämä halkeamat saattavat vaatia korjaustoimenpiteitä joko välittömästi rakentamisen jälkeen tai myöhemmin vuosien kuluessa. Itsekorjautuva betoni voi mullistaa rakennusalaan, sillä se vähentää tarvetta jatkuville korjauksille ja kunnossapidolle. Itsekorjautuvan betonin tavoitteena on, että sen ansiosta vanhat rakennelmat säilyvät hyvässä kunnossa eivätkä rapistu.

Kuitenkin itsekorjautuva betonin käyttö ei ole vielä yleistä Suomessa. Tutkimuslaitoksissa on tehty tutkimuksia ja testejä tällaisen materiaalin osalta, mutta ennen sen laajamittaista käyttöönottoa se vaatii monia testejä ja varmistuksia erityisesti Suomen sääolosuhteissa.

VTT ja Fescon osallistuivat HealCON-projektiin, joka keskittyi kehittämään itsekorjautuvaa betonia, joka pystyy korjaamaan itseään. Hankkeen alkamisvuosi oli 2013. Projektin pääasiallinen tarkoitus oli selvittää parhaat menetelmät itsestään korjautuvan betonin tuotteistamiseksi kaupallisesti.

HealCON-hankkeeseen osallistuivat Suomen lisäksi myös Tanska, Saksa, Espanja, Portugali, Alankomaat ja Belgia. Alankomaat ja Belgia ovat johtavia maita itsestään korjautuvan betonin alalla. Belgiassa, Antwerpenissa sijaitsevassa kanavassa on yksi kohteista, jossa testataan itsekorjautuvan betonirakenteen toimintaa. Lisäksi Tanskassa on rakennettu siltaelementti hankkeen aikana, joka testaa itsekorjautuvuutta tulevina vuosina.

Tulevaisuudessa odotetaan merkittäviä edistysaskeleita itsekorjautuvan betonin osalta, kun teknologiaa yhdistetään infrastruktuuriin ja betonirakenteisiin. Tämä avaa mahdollisuuksia ennakoiviin huoltotoimenpiteisiin, mikä on tärkeää rakennusteollisuudelle.

## 9 Yhteenveto

Opinnäytetyössä tutkitaan itsekorjautuvuusmenetelmiä ja -tekniikoita betonirakenteissa. On olemassa erilaisia menetelmiä, joilla betoni saadaan korjaamaan itseään, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään tarkastelemaan kahta erityyppistä menetelmää ja tekniikkaa.

Näissä menetelmissä käytetään bakteereja ja superabsorbenttipolymeerejä (SAP) itsekorjausprosessien toteuttamiseksi. Nämä olivat yleisesti käytettyjä tekniikoita korjaavan betonin tuotannossa.

Bakteerien käyttö betonirakenteissa on erittäin hyödyllinen menetelmä, joka edistää ja parantaa betonin ominaisuuksia. Kalsiumkarbonaatin tuottaminen halkeamien estämiseksi auttaa korjaamaan halkeamia, mikä puolestaan parantaa perinteisen betonin lujuutta ja monia muita ominaisuuksia.

Tämä betoni eroaa perinteisestä betonista, koska se hyötyy niistä mekaanisista ominaisuuksista, joita bakteerit siihen tuovat.

Työn tavoitteena on ollut palvella rakennustuotantoa ja rakennesuunnittelua Suomessa tarjoamalla suunnittelijoille ja rakentajille tietoa itseään korjaavien betonien erityisominaisuuksista, käyttökelpoisuudesta ja niihin liittyvistä mahdollisista haasteista.

## Lähteet

- 1 Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. By 201 Betonitekniikan oppikirja 2018. Helsinki. Suomen Betonitieto Oy. s. 13–22. Luettu 12.8.2023.
- 2 Rajczakowska, Magdalena. 2019. Self-Healing Concrete. <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1366001/FULLTEXT01.pdf>>. Luettu 12.8.2023.
- 3 Betonin lujuus. FINNSEMENTTI. Verkkoaineisto. <<https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaalle/betonin-lujuus/>>. Luettu 28.8.2023.
- 4 Suomen Betoniyhdistys ry. 2021. BY 65 Betonitermit oppikirja 2021. Helsinki: BY-Koulutus Oy, s. 40–45. Luettu 29.8.2023.
- 5 Kastarinen, Henri. 2019. Betonin vaurioituminen. Opinnäytetyö. Theseus-tietokanta. s. 2–10. Luettu 30.8.2023.
- 6 Suomen Betoniyhdistys ry. 2019. BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. Helsinki: BY-Koulutus Oy, s. 17–22. Luettu 30.8.2023.
- 7 Suvanen, Santtu. Betonirakenteita kurittavat betoniteräskorroosio ja rapautuminen. Verkkoaineisto. <<https://raksystems.fi/ajankohtaista/betonirakenteita-kurittavat-betoniteraskorroosio-ja-rapautuminen-muista-kuntotutkimus-ajoissa>> Luettu 30.8.2023.
- 8 Vaidehi, Aniket Dakwale. P.D.Pachpor. Shubham, Mahesh Deepanshu, Namdeo. Use of metakaolin with polymer modified concrete in repairing of structures. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322033399>>. Luettu 1.9.2023.

- 9 Suomen Betoniyhdistys ry. 2019. By 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. Helsinki. Suomen Betonitieto Oy. Luettu 2.9.2023.
- 10 Suomen Betoniyhdistys ry. 2016. By 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 2016. Helsinki. Suomen Betonitieto Oy. Luettu 3.9.2023.
- 11 Elkhatib, Lelian Aajdi. Elkordi, Adel. Khatib, Jamal M. Verkkoaineisto. Methods and surface materials repair for concrete structures -a review. <[10.54729/2706-784X.1099](https://doi.org/10.54729/2706-784X.1099)>. Luettu 2.9.2023.
- 12 Betonin pintakäsittelyn käsikirja. Teknos Oy 2014. Verkkoaineisto. <[https://www.teknos.com/globalassets/teknos.com/industrial-coatings/special-applications/floor-coatings-for-concrete/betonin\\_pintakasittelyn\\_kasikirja\\_fi.pdf](https://www.teknos.com/globalassets/teknos.com/industrial-coatings/special-applications/floor-coatings-for-concrete/betonin_pintakasittelyn_kasikirja_fi.pdf)>. Luettu 3.9.2023.
- 13 Cementitious Grouting. America's Cement Manufacturers. Verkkoaineisto. <<https://www.cement.org/cement-concrete/cement-specific-materials/geotechnical/cementitious-grouting>>. Luettu 4.9.2023.
- 14 Althoey, Fadi; Zaid, Osama; Arbili, Mohamed M; Martínez-García, Rebeca; Alhamami, Ali; Shah, Hammad Ahmed; Yosri, Ahmed.M. 8.2022. Verkkoaineisto. Physical, strength, durability, and microstructural analysis of self-healing concrete: A systematic review. <<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01730>>. Luettu 5.9.2023.
- 15 Tracy, Ben; Novak, Analisa. Cement industry accounts for about 8% of CO2 emissions. One startup seeks to change that. 1.2023. Verkkoaineisto. <<https://www.cbsnews.com/news/cement-industry-co2-emissions-climate-change-brimstone/>>. Luettu 5.9.2023.
- 16 Mugahed, Amran; Ali M, Onaizi; Roman, Fediuk; Nikolai, Ivanovich Vatin; Raizal Saifulnaz, Muhammad Rashid; Hakim, Abdelgader; Togay, Ozbakkaloglu. Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review. 4.2022. Verkkoaineisto. <[PMC9106089](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01730)>. Luettu 6.9.2023.

- 17 Mastercivilengineeri. What is Bacterial Self-Healing Concrete? 7.2020. Verkkoaineisto. <<https://mastercivilengineer.com/bacterial-self-healing-concrete/>>. Luettu 6.9.2023.
- 18 Chemicals And Material. Self-Healing Concrete Market, 2022-2030. 11.2022. Verkkoainsto. <<https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/self-healing-concrete-market>>. Luettu 8.9.2023.
- 19 Md. Montaseer, Meraz; Nusrat, Jahan Mim; Md. Tanjid, Mehedi; Badhon, Bhattacharya; Md. Reduan, Aftab; Md. Mustakim, Billah; Md. Musfike, Meraz. Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures. 3.2023. Verkkoaineieisto. <<https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.008>>. Luettu 10.9.2023.
- 20 Kordas, George. Self-Healing Cement: A Review. 8.2023. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing3030021>>. Luettu 11.9.2023.
- 21 Concrete Technology. Self-Healing Concrete: Revolutionizing Infrastructure with Sustainable Innovation. 2.2024. Verkkoaineisto. <[https://qnaengine.com/self-healing-concrete/?expand\\_article=1](https://qnaengine.com/self-healing-concrete/?expand_article=1)>. Luettu 12.9.2023.
- 22 Asad, Ali. The Concrete of the Future: Self-Healing Concrete and Its Revolutionary Potential. 1.2023. Verkkoaineisto. <<https://www.linkedin.com/pulse/concrete-future-self-healing-its-revolutionary-potential-asad-ali/>>. Luettu 11.9.2023
- 23 Gerrard, Neil. Will self-healing concrete ever play a significant role in construction? 3.2023. Verkkoaineisto. <<https://www.international-construction.com/news/will-self-healing-concrete-ever-play-a-significant-role-in-construction-/8026219.article>>. Luettu 12.9.2023.

- 24 Jonathan, Smith. This Biotech Makes Self-Healing Concrete Using Bacteria. 1.2023. Verkkoaineisto. <<https://www.labiotech.eu/startup-scout/green-basilisk-self-healing-concrete/>>. Luettu 13.9.2023.
- 25 Yousefi, Reza; Soltani, Mohammad Sajjad; Amooe, Amir Abbas. Self-healing property of concrete by using bacteria. 3.2020. Verkkoaineisto. <[https://www.researchgate.net/publication/352246858\\_Self-healing\\_property\\_of\\_concrete\\_by\\_using\\_bacteria](https://www.researchgate.net/publication/352246858_Self-healing_property_of_concrete_by_using_bacteria)>. Luettu 13.9.2023.
- 26 Afzal, Ansari; Vasi Uddin, Siddiqui; Imran, Khan; M. Khursheed, Akram; Waqar Ahmad, Siddiqi; Anish, Khan; Abdullah Mohamed, Asiri. Effect of self-healing on zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites. 11.2019. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817354-1.00014-4>>. Luettu 15.9.2023.
- 27 Pedro Pinto, Ferreira Brasileiro; Yana Batista, Brandão; Leonie Asfora, Sarubbo; Mohand, Benachour. Self-Healing Concrete: Background, Development, and Market Prospects. 6.2021. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.33263/BRIAC116.1470914725>>. Luettu 15.9.2023.
- 28 Törmänen, Eeva. Itseään korjaavaa betonia kehitetään nyt vauhdilla – Kaksi menetelmää on ylitse muiden. 6.2021. Verkkoaineisto. <<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/itseaan-korjaavaa-betonia-kehitetaan-nyt-vauhdilla-kaksi-menetelmaa-on-ylitse-muiden/ed3d3b08-e9f1-48f1-8dd2-3cc7ee483138>>. Luettu 15.9.2023.
- 29 Bingchuaun, Cheng; Xiuhao, Li; Ynakai, Liu; Mengjun, Cheu; Sanlin, Du. Effect of Superabsorbent Polymers on the Self-Healing Properties of Pre-Damaged Concrete. 10.2022. Verkkoaineisto. <<https://doi.org/10.3390/pr10112333>>. Luettu 18.9.2023.

- 30 Rajamony, Lija Laila; Karmegam, Aarthi; Avudaiappan, Siva; Flores Erick, Saavedra. Microstructure and Water Retention Kinetics in Autogenous Cured Self-Compacting Concrete Blends Using Super Absorbent Polymer. 9.2023. Verkkoaineisto. <[3390/polym15183720](#)>. Luett 22.9.2023.

