

Sulo Laitinen

**BETONIN VAURIOMEKANISMIT JA
PITKÄAIKAISKESTÄVYYSSUUNNITTE-
LUN PERUSTEET SUOMALAISESSA
ASUINRAKENTAMISESSA**

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Toni Pakkala
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Sulo Laitinen: Betonin vauriomekanismit ja pitkäaikaiskestävyyssuunnittelun perusteet suomalaisessa asuinrakentamisessa (Damage mechanisms of concrete and the basics of long-term durability planning in Finnish residential construction)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Joulukuu 2022

Betoni on eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa. Huonosti suunniteltuna betoni jäisi heikkolaatuiseksi, jolloin se vaurioituisi helposti lyhentäen rakennusten ja rakenteiden käyttöikä. Jotta betonista voidaan rakentaa pitkäikäisiä rakenteita, tulee rakenteita suunniteltaessa tuntea betoniin liittyvät laatutekijät. Betonin säilyvyysominaisuuksia on tutkittu vuosikymmenien ajan, mutta vasta vuonna 2005 Suomessa tehtiin betoninormeihin uudistus, jonka myötä käyttöikämitoituksen laatimisesta tuli velvoite rakennuksia suunniteltaessa. Tässä tutkimuksessa selvitetään betonirakenteiden käyttöikämitoituksen yleiset periaatteet. Lisäksi tutkimuksessa perehdytään betonin vauriomekanismeihin, niiden aiheuttamiin vaikutuksiin rakenteessa sekä keinoihin, joilla betonin vaurioitumista voidaan ehkäistä tai hillitä.

Tutkimus tehtiin kokonaisuudessaan kirjallisuustutkimuksena hyödyntäen sekä painettuja julkaisuja että verkkojulkaisuja ja artikkeleita. Tutkimuksessa käytettyjä tärkeimpiä lähteitä olivat Suomen Betoniyhdistys ry:n painetut julkaisut, rakentamiseen liittyvät ohjeet ja standardit sekä asiantuntijoiden ja tuotevalmistajien verkkosivut.

Tutkimuksen tuloksena todetaan rakenteiden käyttöikämitoituksen laatimisen olevan äärimmäisen tärkeä ja hyödyllinen rakennesuunnittelun vaihe rakennusten pitkän käyttöiän takaamiseksi. Tärkeimpiä keinoja betonin vauriomekanismeilta suojaumisessa ovat riittävän betoni-peatepaksuuden saavuttaminen, suojahuokosmien käyttö sekä betonirakenteen riittävän tiiveyden saavuttaminen alhaisen vesi-sementtisuhteen avulla. Lisäksi betonirakenteen suojaaminen kosteudelta ja lialta sekä rakenteen halkeilun hallinta pidentävät rakenteen käyttöikää. Laadukkaasti suunnitellut rakennukset ja rakenteet saavuttavat helpoimmin pitkät käyttöiät tehden rakentamisesta tehokkaampaa, taloudellisempaa ja ympäristöystävällisempää, joten onnistuneella käyttöikämitoituksella on positiivisia vaikutuksia kaikille rakennushankkeen osapuolille.

Avainsanat: betoni, käyttöikä, teräsbetonirakenne, rakennesuunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KÄYTTÖIKÄSUUNNITTELUN PERIAATTEET	3
2.1 Suunnittelukäyttöikä	3
2.2 Rasitusluokat	4
3. BETONIN VAURIOITUMINEN JA VAURIOMEKANISMIIEN VAIKUTUKSET RAKENTEESSA	6
3.1 Fysikaalinen vaurioituminen	6
3.2 Kemiallinen vaurioituminen	8
3.2.1 Pehmeän veden aiheuttamat vauriot	8
3.2.2 Happojen aiheuttamat vauriot	9
3.2.3 Kloridien aiheuttamat vauriot	10
3.2.4 Sulfaattien aiheuttamat vauriot	11
3.2.5 Alkali-kiviainesreaktion aiheuttamat vauriot	12
3.2.6 Karbonatisoitumisen aiheuttamat vauriot	13
3.3 Mekaaninen vaurioituminen	14
3.4 Betonirakenteen halkeilu	16
3.5 Kosteus betonin rasiustekijänä	16
4. BETONIN VAURIOITUMISEN EHKÄISEMINEN	19
4.1 Fysikaalisten vauriomekanismien ehkäiseminen	19
4.2 Kemiallisten vauriomekanismien ehkäiseminen	19
4.3 Mekaanisten vauriomekanismien ehkäiseminen	22
4.4 Raudotteiden peitepaksuuden suunnittelu	23
5. YHTEENVETO	24
LÄHTEET	26
LIITE A	30

1. JOHDANTO

Rakennuksilta edellytetään pitkää käyttöikää monista eri syistä. Rakennusten pitkäikäisyys vaikuttaa erityisesti niiden ekologisuuteen ja taloudellisuuteen mutta myös kaupunkikulttuuriin. Myös kestävän kehityksen näkökulmasta rakennusten pitkäikäisyydellä on valtava merkitys. Hyvin säilyneet yli 100-vuotiaatkin rakennukset voivat olla edelleen täydessä käytössä ja kaupunkikuvan kannalta merkittäviä. [1]

Betoni on käytetyin rakennusmateriaali maailmassa [2], ja sen säilyvyysominaisuuksia on tutkittu jo vuosikymmenien ajan, joten käyttöikäsuunnittelu on siltä osin rakennusalalla tuttua, vaikka se ei ole aina ollut pakollista. Vuoden 2005 alusta lähtien Suomessa otettiin kuitenkin käyttöön uudet betoninormit, jotka vaativat betonirakenteille käyttöikämitoituksen. Uudistuksen seurauksena betonirakenteet tulee siis aina suunnitella ja valmistaa 50–200 vuoden käyttöiälle. [3, s. 1] Nykyisessä käyttöikämitoituksessa betonirakenteet suunnitellaan yleensä 50 vuoden käyttöiälle, mutta esimerkiksi sisätilojen betonirakenteet voidaan mitoittaa jopa 200 vuodelle. Tämä johtuu siitä, ettei normaaleissa sisätiloissa ole olemassa mitään sellaista vauriomekanismia, joka turmelisi betonin. [1]

Betonin käyttöikään vaikuttaa useita tekijöitä, joista merkittävimmät ovat betonipeitteen paksuus raudoitteiden ympärillä ja ympäristön rasisolosuhteet. Muita käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ovat betonin lujuusluokka, vesi-sideainesuhde, sementin määrä ja laatu, betonin lisäaineistus ja raudoitteen materiaali. [1] Rakennesuunnittelijan on aluksi tunnettava suunniteltavan kohteen ympäristörasitusten vaatavuudet, minkä jälkeen hän voi määrittellä betonin ja raudoitteiden ominaisuudet.

Käyttöikäsuunnittelua on tutkittu jo entuudestaan paljon. Systemaattisella käyttöikäsuunnittelulla onkin suuri merkitys rakenteiden laadun varmistamiselle. Jos käyttöikäsuunnittelua ei tehtäisi, betoni voisi jäädä heikkolaatuiseksi ja se vaurioituisi helposti. Pahimmassa tapauksessa betonirakenne menettäisi vaurioituessaan lujuutensa ja esimerkiksi sortuisi. Onnistuneella käyttöikäsuunnittelulla on siis positiivinen vaikutus kaikille hankkeen osapuolille.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää periaatteet, joiden avulla betonirakenteiden pitkäaikaiskestävyys voidaan maksimoida. Tutkimuksen luvussa 2 esitetään käyt-

töikäsuunnittelun periaatteet yleisellä tasolla. Luvussa 3 syvennyttään betonin fysikaalisten, kemiallisten ja mekaanisten vauriomekanismien syntytapoihin ja näiden vaikutuksiin betonirakenteissa. Luvussa 4 käsitellään vauriomekanismien ehkäisykeinoja käyttöikäsuunnittelun näkökulmasta ja luvussa 5 esitetään tutkimuksen johtopäätökset. Tutkimus tehdään kirjallisuustutkimuksena ja sen aihe rajataan koskemaan suomalaista asuinrakennusten uudisrakentamista. Aihetta käsitellään rakennesuunnittelijan näkökulmasta. Lisäksi tutkimuksessa rajataan aihe koskemaan rakennuksen ja rakenteiden normaalikäytön tilaa, joten erilaiset onnettomuustilanteet jätetään tutkimatta.

2. KÄYTTÖIKÄSUUNNITTELUN PERIAATTEET

Käyttöikäsuunnittelu alkaa useimmiten siitä, että rakennushankkeen tilaaja määrittelee rakennuksen tavoitekäyttöiän. Tavoitekäyttöikä perustuu rakennuksen käyttötarkoitukseen. Rakennuksen suunnittelukäyttöiän määrittää suunnittelija, ja se pohjautuu tavoitekäyttöikään. Suunnittelija määrittelee suunnittelukäyttöiät koko rakennuksen lisäksi myös sen tärkeimmille yksittäisille rakenneosille. [3, s. 1]

Käyttöikäsuunnittelun peruseriaate on se, että mitä vaikeampaa ja kalliimpaa rakenteen korjaaminen on, sitä pidemmäksi sen käyttöikävaatimus tulee valita. Näistä syistä esimerkiksi rakennuksen perustuksien ja rungon käyttöikä tulee valita rakennuksen suunnittelukäyttöiän pituisiksi. [3, s. 1] Helpommin vaihdettavien rakenneosien, kuten julkisivujen, suunnittelukäyttöikä voi olla runkorakenteita lyhyempi. Rakennuksen käyttökelpoisuus ei kuitenkaan häviä suunnittelukäyttöiän päättyessä, vaan rakennusta voidaan korjata ja käyttöikänsä lopussa olevia rakenteita voidaan vaihtaa uusiin. [3, s. 2]

2.1 Suunnittelukäyttöikä

Suunnittelukäyttöiällä tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka aikana betonirakenne säilyttää ominaisuutensa vaadittavalla tasolla. Tyypillisimmillään rakennuksen suunnittelukäyttöiäksi valitaan 50 tai 100 vuotta, mutta monumentaalisten ja muiden arvokkaiden rakennusten käyttöiäksi valitaan usein 100 tai 200 vuotta. [4, s. 2] Suunnittelukäyttöiän määrittämisessä käytetään tyypillisesti 95 % varmuustasoa log-normaalilla jakaumalla. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi 50 vuoden käyttöiälle suunnitelluista rakenteista 5 % voi vaurioitua ennen suunnittelukäyttöiän saavuttamista, jolloin puolet rakenteista kestäisi noin 150 vuotta ja pitkäikäisimmät noin 300 vuotta. [3, s. 2]

Rakenteen todellisella käyttöiällä on siis suuri hajonta. Tämä oletus pätee kuitenkin vain silloin, kun rakennuksesta pidetään asianmukaisesti huolta. Voidaan siis ajatella, että suunnittelukäyttöiällä tarkoitetaan aikaa, jonka rakenne kestää korjaamatta. Korjaustarpeen todennäköisyys kasvaa, kun suunnittelukäyttöikä saavutetaan mutta korjaustarpeen realisoituminen saattaa kuitenkin olla pitkällä tulevaisuudessa. Vauriotodennäköisyyttä voidaan siis olennaisesti pienentää suunnittelukäyttöikää kasvattamalla. [3, s. 2]

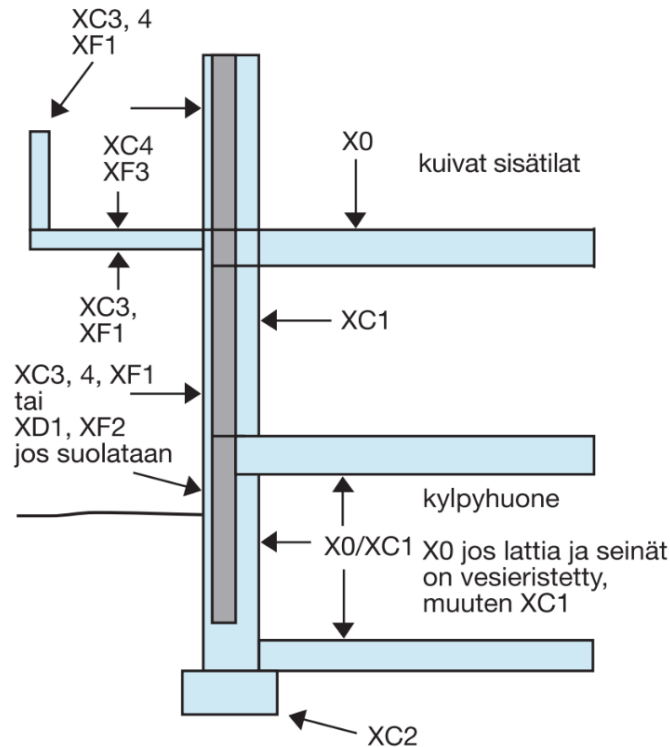
2.2 Rasitusluokat

Rasitusluokat kuvaavat betonirakenteeseen kohdistuvia ympäristön vaikutuksia [5, s. 8]. Rakennetta kuormittavat ympäristötekijät on pyrittävä arvioimaan mahdollisimman todennukaisina niitä kuitenkaan liioittelematta [5, s. 29]. Rasitusluokkien avulla rakenteelle voidaan määritellä tarvittava betonin laatu ja raudoitusta suojaavan betonipeitteen paksuus [6, s. 63]. Standardissa SFS-EN 206 [7] ja eurokoodissa SFS-EN 1992-1-1 [8] on määritetty rasitusluokat. Rasitusluokkien avulla suunnittelija määrittelee rakenteessa käytettävän betonin lujuusluokan ja betonipeitteen paksuuden sekä joissain tapauksissa myös sementtityypin. Muut betonin ominaisuudet määrittelee tyypillisesti betonin valmistaja. [5, s. 9] Rasitusluokat jaetaan kuuteen kokonaisuuteen taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Rasitusluokkaryhmät [6, s. 64]

Tunnus	Kuvaus
X0	Ei korroosiorasituksen vaaraa
XC	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
XD	Muun kuin meriveden aiheuttama korroosio
XS	Meriveden aiheuttama korroosio
XF	Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä
XA	Kemiallinen rasitus

Jokainen rasitusluokkaryhmä jakautuu rasitusluokkiin, jotka on esitetty liitteessä A. Rasitusluokkajako perustuu vauriomekanismeihin, ja siksi jokainen rasitusmekanismi käsitellään erikseen. Koska rakenteisiin kohdistuu useimmiten useampia rasitustekijöitä, tulee rakenne määritellä useampaan rasitusluokkaan kuuluvaksi. Tällöin puhutaan rasitusluokkayhdistelmistä. Rasitusluokkajako voi olla joissain tilanteissa liian karkea, mutta suunnittelijan on valittava sopivimmat rasitusluokat ja rasitusluokkayhdistelmät lähtötietojen pohjalta. [5, s. 29] Kuvassa 1 on esitetty tyypillisiä rasitusluokkia kerrostalon rakenteille.



Kuva 1. Tyypilliset kerrostalorakenteiden rasitusluokat [4, s. 4]

Betonin suunnittelukäyttöään määrittämiseen on olemassa kaksi eri mitoitus tapaa: taulukkomitoitus ja laskennallinen mitoitus [9]. Taulukkomitoitus on näistä yksinkertaisempi menetelmä. Standardien SFS-EN 1992-1-1 [8, s. 50] ja SFS-EN 206-1 [7, s. 78] kansallisissa liitteissä esitetään taulukot 50 ja 100 vuoden suunnittelukäyttöäille. Standardin SFS-EN 1992-1-1 liitteessä A [8, s. 195] on lisäksi esitetty pienennetyt mittapoikkeamat. Halkeamaleveyksiin liittyvät raja-arvot esitetään rasitusluokittain standardissa SFS-EN 1992-1-1 [8, s. 118]. Taulukkomitoituksen yksinkertaisuuden vuoksi rakenteet saatetaan kuitenkin ylimitoittaa, jolloin käyttöiät kasvavat tarpeettoman pitkiksi [9].

Suunnittelukäyttöään optimointiin parempi menetelmä on laskennallinen mitoitus. Laskennallisessa mitoituksessa jokaisen rakenteen käyttöikä tarkastellaan erikseen jokaisen rasitusluokan suhteen ja näistä määrääväksi tulee käyttöältään lyhin. Tätä mitoitus tapaa suositellaan käytettäväksi erityisesti pakkasrasitetuille mutta ei suola-pakkasrasitetuille ulkorakenteille. Laskennallisessa mitoituksessa käyttöään laskennassa huomioidaan myös betonirakenteen pinnoitteiden vaikutukset. Laskennalliseen suunnittelukäyttöään mitoitukseen liittyvät kaavat esitetään julkaisussa Betoninormit By65 2021. [9]

3. BETONIN VAURIOITUMINEN JA VAURIOMEKANISMIIEN VAIKUTUKSET RAKENTEESSA

Betonirakenteiden vauriomekanismit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: fysikaalisiin, kemiallisiin ja mekaanisiin vaurioihin. Fysikaaliset vauriomekanismit ovat fysikaalisten ilmiöiden aiheuttamia. Esimerkiksi betonirakenteessa olevat sisäiset pakkovoimat ja lämpöliikkeet voivat aiheuttaa betonipinnan kulumista ja rakenteen halkeilua tai säröilyä. Tällöin kyse on fysikaalisesta vaurioitumisesta. Mekaanisissa vauriomekanismeissa vauriot aiheutuvat mekaanisten rasitusten kuten kitkan, painumien, värähtelyn tai törmäysten, seurauksena. Kemiallisissa vauriomekanismeissa vauriot syntyvät kemiallisten ilmiöiden ja rasitusten seurauksena. Kemiallisia ilmiöitä ovat esimerkiksi betonin paisumis- ja rapautumisilmiöt sekä raudotteiden korroosioreaktion käynnistyminen. [10, s. 4]

3.1 Fysikaalinen vaurioituminen

Eräitä merkittävimpiä betonin fysikaalisia vauriomekanismeja ovat pakkasrapautuminen ja suola-pakkasrapautuminen. Rapautumiseksi kutsutaan betonin sisäisen rakenteen hajoamista. Betonin rapautuu tyypillisesti sideaine-kiviaineskontaktin heikkenemisen johdosta. Myös betonipinta voi rapautua, ja tällöin kyse on tyypillisesti sideaineen kulumisesta tai hajoamisesta. Betonirakenteen rapautuessa sen lujuusominaisuudet, erityisesti vetolujuus, heikkenee. Lisäksi rakenteen pintakovuus ja eheys heikkenevät. [10, s. 9]

Betonirakenteen pakkasrapautumisessa on kyse betonin huokosiin, erityisesti kapillaarihuokosiin, imeytyneen veden jäätymisestä. Yleisesti tunnettuna fysikaalisena ilmiönä tiedetään, että veden tilavuus kasvaa sen jäätyessä. Kun veden tilavuus kasvaa betonin huokosissa, aiheuttaa se hydraulisen paineen betonin huokosiin. Hydraulisen paineen kasvaessa betonin vetolujuutta suuremmaksi aiheutuu rakenteeseen sisäistä halkeilua. [10, s. 11] Jäätyvän veden tilavuuden kasvu pakottaa myös nestemäisenä olevan veden liikkumaan kapillaariverkoston lisäten huokosissa olevaa painetta ja edistäen siten halkeilua [10, s. 12]. Toistuvana ilmiönä tämä aiheuttaa betonirakenteen pakkasrapautumisen. Kuvassa 2 nähdään rapautumisen edenneen parvekepielielementissä jo näkyviksi vaurioiksi.



Kuva 2. Parvekkeen piellelementin rapautunut etureuna [11, s. 25]

Erilaiset suolat voimistavat pakkasrapautumisen vaikutuksia. Tämä johtuu siitä, että suo-
lojen avulla betoniin pääsee imeytymään kosteutta normaalia tilannetta matalammissa-
kin lämpötiloissa. Samalla suolat kasvattavat jäätymispainetta, jolloin kriittinen kyllästys-
aste laskee. [5, s. 20] Fysikaalisiksi vauriomekanismeiksi luokitellaan myös lämpötila-
eroista, kuivumiskutistumisesta, tulipalosta ja raudoituksen ruostumisesta aiheutuva be-
tonirakenteen halkeilu [12].

Pakkasrapautuminen ja suola-pakkasrapautuminen heikentävät betonirakenteen lujuus-
ominaisuuksia, erityisesti vetolujuutta. Myös betonin kantokyky heikkenee. Tällöin beto-
nipinnan tartunta- ja ankkurointilujuudet pienenevät. Korjauskohteissa suunnittelijan on-
kin tarkastettava betonipinnan kunto korjaustoimenpiteitä ajatellen. Lisäksi rakenteen
pintakovuus ja eheys heikkenevät. Tällä tarkoitetaan sitä, että itse rakenteen ankkurointi
ja liitokset heikkenevät. Eheyden heikkenemisen seurauksena betonista voi irrota jopa
palasia. Lujuusteknisten ominaisuuksien heikkenemisen lisäksi rakenteeseen saattaa

syntyä siis myös kosmeettista haittaa. Rakenteessa esiintyvien halkeamien myötä betoniin voi myös päästä vettä ja erilaisia haitta-aineita sekä hiilidioksidia entistä nopeammin, jolloin muutkin betonin vauriomekanismit kiihtyvät. [10, s. 16] Vaurioiden syntymiseen kuluva aika riippuu ympäristön olosuhteista ja betonin laadusta, mutta kyse on useista vuosista [13]. Suomen sääolosuhteista johtuen rakennesuunnittelijan tulee huomioida säiden vaihtelulle alttiiden rakenteiden suunnittelussa pakkasrapautumisen ja suola-pakkasrapautumisen mahdolliset vaikutukset.

3.2 Kemiallinen vaurioituminen

Kun betonissa tapahtuu kemiallisia muutoksia, kyse on kemiallisesta korroosiosta. Kemialliset vauriot jaetaan sisäiseen ja ulkoiseen korroosioon [14, s. 2]. Kun betonin kanssa kosketuksissa ovat kemialliset aineet pääsevät reagoimaan betonin kanssa ja esimerkiksi liuottavat betonin osa-aineita, kyse on ulkoisesta kemiallisesta korroosiosta. Sisäistä korroosiota voivat puolestaan aiheuttaa betonin kiviaineksen epäpuhtaudet, kuten humus, alkali-kiviainesreaktio sekä betonin raaka-aineissa esiintyvän sulfaatin aiheuttamat paisumisreaktiot. [15]

Kemiallisia vauriotekijöitä ovat pehmeä vesi, erilaiset hapot ja happamat kaasut, kloridit, sulfaatit, alkalit ja karbonatisoituminen. Betonin kosteuspitoisuus vaikuttaa oleellisesti kemiallisten rasitusten voimakkuuteen, sillä monet haitalliset kemialliset aineet kulkeutuvat betoniin ja betonissa veden avulla. Lisäksi kemiallisten liuosten aiheuttama mahdollinen paine tai virtaus sekä lämpötila vaikuttavat korroosion voimakkuuteen. [15]

3.2.1 Pehmeän veden aiheuttamat vauriot

Pehmeällä vedellä tarkoitetaan vettä, joka muodostuu sateesta sekä lumen ja jään sulamisesta. Pehmeän veden kalsiumpitoisuus on vähäinen, jolloin vesi voi hajottaa betonin kalsiumpitoisia tuotteita, kuten sementtikiveä. Reaktio jatkuu, kunnes kemiallinen tasapaino on saavutettu. Sementtikiven sisältämä kalsiumhydroksidi on betonin herkin osa-aine pehmeän veden aiheuttamalle hydrolyysireaktiolle. Betonin pinnalle syntyy liuenneen kalsiumhydroksidin ja ilman hiilidioksidin yhteisvaikutuksesta kalsiumkarbonaattia eli kalkkihärmää, kuten kuvassa 3 näkyy. [15] Kalkkihärmää syntyy betonirakenteissa alueille, joissa betonissa oleva kosteus pääsee haihtumaan. Betonista haihtuva vesi kuljettaa mukanaan kalkkia betonin pintaan, ja veden haihtuessa rakenteen pinnalle jää vain kalkkihärmä. Kalkkihärmä on kuitenkin vain kosmeettinen haitta, eikä se heikennä betonirakenteen kestävyyttä tai lujuutta. [16]

Kalkkihärmä voidaan poistaa rakenteen pinnasta harjaamalla. Myös sade voi huuhtoa sen pois rakenteen pinnasta. Valmisbetonituotteissa kalkkihärmää syntyy harvemmin kuin maisematuotteissa, sillä valmisbetonin tehollinen vesimäärä on maisematuotteita huomattavasti korkeampi, jolloin suurempi osa kalkista on sitoutunut rakenteeseen. [17]

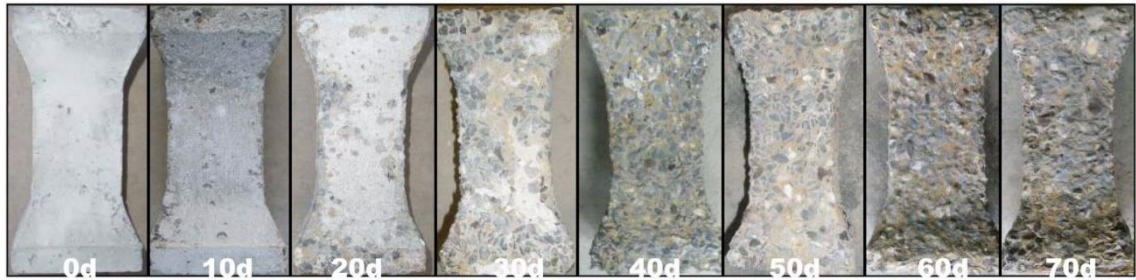


Kuva 3. Kalkkihärmää rakennuksen sokkelin pinnassa [17]

3.2.2 Happojen aiheuttamat vauriot

Erilaiset happoyhdisteet luovat betonille usein aggressiivisenkin ympäristön, sillä ne syövyttävät sementtikiven yhdisteitä hyvin voimakkaasti [15], kuten kuvasta 4 ilmenee. Kuvassa 4 tutkittava betonikappale on altistettu laboratorio-olosuhteissa happamalle saateelle ja samalla seurattu rakenteen vauriotumista tietyin aikaväleillä [18, s. 5].

Hapot reagoivat sementtikiven kalsiumyhdisteiden kanssa muodostaen näiden happojen kalsiumsuoloja, jotka voivat edelleen liueta pois betonista. Betonin vaurioitumisen nopeus riippuu olennaisesti rakenteeseen kosketuksissa olevan hapon aggressiivisuudesta ja määrästä. Toisaalta voidaan ajatella, että vaurioitumisnopeus riippuu reaktiossa syntyvien suolojen liukenemisnopeudesta. [15]



Kuva 4. Laboratorio-olosuhteissa tuotetun happaman sateen vaikutukset betonirakenteeseen [18, s. 5]

Syövyttävien happojen vaikutukset betoniin korostuvat etenkin teollisuuden laitoksissa. Asuinrakentamisessa happojen vaikutuksia saattaa joutua tarkastelemaan sadeveden happamuuteen liittyen. Happojen aiheuttamat vauriot kohdistuvat erityisesti betonirakenteen pintaosiin, jossa sementtikiven alkuperäinen rakenne tuhoutuu täysin. Mikäli rakenteen pintaosat ovat jääneet huokoisiksi, voivat hapot tunkeutua syvemmälle betoniin aiheuttaen vaurioita myös siellä. [15]

3.2.3 Kloridien aiheuttamat vauriot

Kloridien aiheuttama korroosio on yksi merkittävimmistä betonin vauriomekanismeista. Klorideja voi siirtyä betonirakenteen pinnalle muun muassa tiesuolauksista, suoloja sisältävistä roiskeista, meriveden läheisyydestä ja uima-allasvesistä. Betonirakenteen sisällä kloridit etenevät vesitäytteisissä huokosissa pääasiassa diffuusion eli kloridipitoisuuserojen tasoittumisen avulla. Kloridipitoisuus on tyypillisesti korkeimmillaan rakenteen pinnassa, ja se laskee tasaisesti syvyyden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että betonin pinta on yleensä huokoisempaa syvemmällä olevaan betoniin verrattuna. Kloridien aiheuttamat vauriot kohdistuvat betonirakenteessa sen sisältämään raudoitukseen. [19] Vaurioiden syntymiseen kuluu tyypillisesti useita vuosia [13].

Betoniraudoitteiden pinnalla on aluksi oksidikalvo betonin huokosveden alkalisuuden johdosta. Oksidikalvoa kutsutaan myös passiivikalvoksi. Kloridien päästessä terästen pinnalle passiivikalvo rikkoutuu ja terästen passiivisuus häviää. Tällöin teräkset alkavat ruostua. [19] Kloridikorroosio voi alkaa, kun rakenteessa olevien kloridien pitoisuus ylittää kriittisen pitoisuuden. Tyypillisesti kloridipitoisuuden kriittisenä pitoisuutena käytetään noin 0,03...0,07 paino-% betonin painosta. [14, s. 20]

Kloridit aiheuttavat raudoituksessa yleensä pistemäistä korroosiota. Tällä tarkoitetaan sitä, että raudoitus syöpyy pieniltä alueilta aggressiivisesti. Syöpymisessä sähkökemiallisen reaktion anodina toimiva syöpyvä alue on pinta-alaltaan siis pieni, ja katodina toimiva ympäröivä raudoitus on pinta-alaltaan suuri. Kun raudoitustanko syöpyy, sen poikkipinta-ala pienenee. Tämän seurauksesta teräksen kantokyky ei välttämättä vastaa

enää suunniteltua kantokykyä, ja rakenteen toiminta heikentyy. Lisäksi sähkökemiallisessa reaktiossa syntyvät reaktiotuotteet ovat tilavuudeltaan lähtöaineita suurempia, jolloin tilavuuden kasvu aiheuttaa betoniin sisäistä painetta. Sisäisen paineen ylittäessä betonin vetolujuuden aiheuttaa se rakenteeseen halkeamia. [20] Kloridikorroosion edessä pitkälle halkeamat voivat kasvaa ja rakenteesta lohkeaa betonia lopulta isompina paloina, kuten kuvassa 5 näkyy.



Kuva 5. Kloridikorroosion aiheuttamia vaurioita betonipalkissa [21]

Suomen olosuhteissa Itämeren kloridipitoisuutta voidaan pitää matalana verrattuna valtamerien kloridipitoisuuksiin [22, s. 9], joten rakenteiden suunnitteluun sillä ei ole suurtaakaan vaikutusta. Jos rakenne suunnitellaan jonkin valtameren läheisyyteen, tulee kloridirasituskin huomioida merkittävästi suurempana.

3.2.4 Sulfaattien aiheuttamat vauriot

Myös sulfaatit vaurioittavat betonirakenteita. Sulfaatteja esiintyy teollisuusprosesseissa ja luonnon vesissä. Sulfaatin aiheuttamassa vaurioitumisessa sulfaatti-ionit reagoivat betonirakenteeseen päästyään sementissä olevan trikalsiumalumiinin ja sen hydrataatio tuotteiden kanssa. Näiden kemiallisten reaktioiden reaktiotuotteet ovat tilavuudeltaan lähtöaineita suurempia, jolloin tilavuuskasvun aiheuttamien jännitysten ylittäessä betonin vetolujuuden, betonin rakenne rikkoutuu. Betonin halkeilu edesauttaa edelleen sulfaattien kulkeutumista rakenteeseen. Reaktiotuotteena voi syntyä esimerkiksi kalsiumsulfoalumiinia eli ettringiittiä. [19]

Sulfaattikorroosion mahdollisuus korostuu etenkin maaperän sisään rakennettavissa betonirakenteissa, sillä sulfaatteja esiintyy maaperässä ja pohjavesissä. Suomessa sulfaattipitoista maata löytyy etelä- ja länsirannikoilta. Mikäli rakenne siis suunnitellaan näille

alueille, tulee sulfaattirasitus huomioida. Geologian tutkimuskeskus GTK ylläpitää kartoitustietoa Suomen happamista sulfaattimaista. [19]

3.2.5 Alkali-kiviainesreaktion aiheuttamat vauriot

Alkali-kiviainesreaktiossa hydratoituneessa sementissä oleva alkalipitoinen huokosvesi reagoi kiviaineksen sisältämän reaktiivisen piioksidin kanssa. Reaktiossa syntyy voimakkaasti hygroskooppista eli vettä imevää geeliä, joka laajenee vettä imiessään. Geelin tilavuuden kasvaessa sen aiheuttama sisäinen paine kasvaa, ja ylittäessään betonin vetolujuuden se rikkoo betonin rakennetta. Alkali-kiviainesreaktion seurauksena betonirakenteen pinnasta saattaa tulla laikukas. Rakenteessa esiintyy tyypillisesti myös tiheää ja epäsäännöllistä verkkohalkeilua sekä paisumista. Halkeamissa voi esiintyä myös geelimäisiä reaktiotuotteita. [15]

Alkali-kiviainesreaktion erottaminen erityisesti pakkasrapautumisesta voi kuitenkin olla haastavaa silmämääräisesti, sillä molemmat näistä vauriomekanismeista aiheuttavat betonirakenteen pintaan lähes saman näköisiä vaurioita. Tarkempien tutkimusten perusteella on kuitenkin havaittu pakkasrapautumisesta aiheutuvan halkeilun keskittyvän betonirakenteen pintaosiin toisin kuin alkali-kiviainesreaktiossa, jossa halkeilua esiintyy tasaisesti koko rakenteessa. Alkali-kiviainesreaktiossa syntyvät vauriot voivat olla betonirakenteen sisällä paljon pakkasrapautumisen vaurioita suuremmat. [23, s. 2]

Alkali-kiviainesreaktio tarvitsee käynnistyäkseen huokosten korkean alkalipitoisuuden, reaktiivista piioksidia sisältävää kiviainesta ja riittävän korkean kosteuspitoisuuden [15]. Lisäksi reaktio tarvitsee paljon aikaa, ja monesti vaurioituminen kestääkin yli viisi vuotta [13]. Suomen ilmastosta johtuen alkali-kiviainesreaktion synnyttämät vauriot saattavat tulla näkyviin vasta yli 30 vuodenkin ikäisissä rakenteissa [23, s. 3].

Alkali-kiviainesreaktioita tapahtuu niin siltarakenteissa, uima-altaissa kuin erilaisissa rakennuksissakin [15]. Kuvassa 6 näkyy alkali-kiviainesreaktion aiheuttamia vaurioita eräässä kanadalaisessa siltarakenteessa [24]. Reaktion aiheuttamia korjausta vaativia vaurioita tapahtuu Suomessa hyvin harvoin [15].

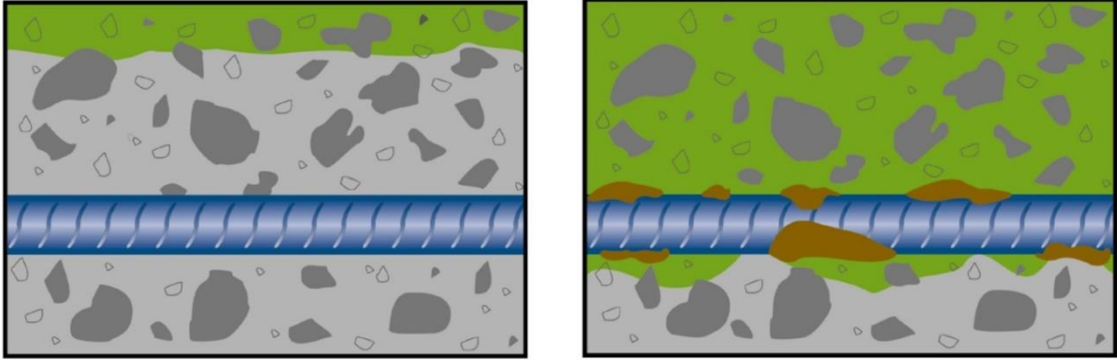


Kuva 6. Alkali-kiviainesreaktion vaikutukset siltarakenteessa [24]

3.2.6 Karbonatisoitumisen aiheuttamat vauriot

Betonin karbonatisoitumisreaktio on kloridikorroosion ohella toinen merkittävimmistä betonin vauriomekanismeista. Betonin karbonatisoituessa sen sisältämä kalsiumhydroksidi reagoi ilmassa olevan hiilidioksidin kanssa, jolloin betonin huokosveden pH-alenee eli kyse on neutraloitumisreaktiosta. Betonin huokosveden pH on aluksi tyypillisesti 12–13, mutta karbonatisoituneessa rakenteessa se laskee noin arvoon 8,5–9. [14, s. 14] Karbonatisoituminen alkaa betonirakenteen pinnasta, ja se etenee ajan myötä rintama syvemmälle betoniin [25, s. 45], kuten kuvassa 7 näkyy. Tässä kuvassa vihreä alue kuvaa karbonatisoitunutta aluetta, harmaa ”tervettä” betonia ja ruskea ruostetta.

Karbonatisoitumisen nopeus ei ole kuitenkaan vakio vaan se muuttuu, mutta se kestää tyypillisesti kuitenkin useita vuosia ennen kuin rakenne on vaurioitunut [13]. Karbonatisoitumisnopeus hidastuu mitä syvemmälle betonirakenteessa edetään, sillä rakenteeseen tunkeutuvan hiilidioksidin on kuljettava aina hiukan pidempi matka edetäkseen [25, s. 48].



Kuva 7. Karbonatisoitumisvyöhykkeen eteneminen [26]

Betonimateriaalille itselleen karbonatisoitumisesta ei ole vaaraa, se jopa hieman lujittaa betonia, mutta terästen korroosioon se vaikuttaa [27]. Kun betonin emäksisyys pienenee reaktion myötä, se ei enää pysty ylläpitämään terästen pinnalla oksidikalvoa. Näin ollen oksidikalvon rikkoutuessa teräkset ovat alttiit korroosiolle. [14, s. 12] Karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion etenemisnopeus riippuu monista tekijöistä mutta pääosin betonin tiiveydestä, kosteuspitoisuudesta ja kalsiumhydroksidipitoisuudesta [25, s. 49]. Mitä tiiviimpää betoni on, sen hitaammin hiilidioksidi pääsee etenemään rakenteessa eli karbonatisoituminen hidastuu [25, s. 65]. Sama ilmiö toteutuu myös, jos huokosverkosto täyttyy vedestä [14, s. 17]. Ilman suhteellisen kosteuden suhteen karbonatisoituminen on nopeimmillaan kun RH on noin 50...60% [5, s. 14] mutta reaktio pysähtyy kokonaan, jos ilman suhteellinen kosteus laskee alle 30% RH pitoisuuteen [14, s. 17].

Karbonatisoituminen tapahtuu vain vesiliuoksessa, joten ympäristön kuivuessa reaktio lakkaa etenemästä. Karbonatisoitumista tapahtuu kaikissa ilmalle alttiina olevissa betonirakenteissa mutta esimerkiksi parvekelaattojen yläpinnoissa, siltarakenteissa ja uima-allasrakenteissa karbonatisoitumisreaktion nopeus on hyvin hidas. [14, s. 17]

3.3 Mekaaninen vaurioituminen

Mekaanisella vaurioitumisella tarkoitetaan vauriomekanismeja, joissa betonin sideaine kuluu pois betonirakenteen pinnasta. Pistekuormasta tai toistuvasta pyöräkuormasta johtuen betonin pintakerros voi myös puristua rikki. Tyypillisiä mekaaniselle vaurioitumiselle alttiita betonirakenteita ovat liikennöidyt tasot ja betonilattiat. Pistekuormia voivat aiheuttaa esimerkiksi varastohyllyt. [28, s. 9] Kuvassa 8 näkyy parkkihallin betonista lattiaa, jonka pintakerros on mekaanisen kulutuksen seurauksena hävinnyt erityisesti sauma-alueen vasemmalta puolelta. Suomalaisissa olosuhteissa parkkihalleja kuormittaa erityisesti nastarenkaiden aiheuttama rasitus [29].



Kuva 8. *Betonin pintakerroksen kuluminen [29]*

Betonirakenteen pinnan vaurioituessa myös pinnoitemateriaali voi vaurioitua. Ulkoilmassa tapahtuvat lämpötilojen ja kosteusolosuhteiden vaihtelut edistävät mekaanisen kulutuksen aiheuttamia vaurioita. [28, s. 9] Lisäksi rakenteiden, useimmiten perustusten, painuminen epätasaisesti voi aiheuttaa rakennukseen suunnitelluista rasituksista poikkeavia leikkaus- ja taivutusrasituksia [28, s. 22]. Tällöin seinärakenteissa ja saumoissa voi ilmetä vinosti suuntautuneita halkeamia [28, s. 24]. Erilaiset värähtelyt saattavat aiheuttaa myös halkeilua rakenteissa [28, s. 29].

Jos rakenne on altis mekaaniselle vaurioitumiselle, on suunnitteluvaiheessa syytä tehdä rakenteen kantavuustarkastelu. Kantavuustarkastelussa esitetään rakenteen kantokyky kokeellisesti määriteltyjen rakenteen ja materiaalien ominaisuuksien avulla. [28, s. 17] Jos rakenne on altis värähtelylle, tulee rakenteelle tehdä myös ominaistaajuustarkastelu. Ominaistaajuustarkastelussa rakenteelle etsitään 3–6 alinta ominaistaajuutta. Ominaistaajuuksiin vaikuttavat betonirakenteen taivutusjäykkyys, jänneväli ja massa. [28, s. 29]

3.4 Betonirakenteen halkeilu

Edellä esitetyistä vauriomekanismeista todetaan, että mekanismit aiheuttavat betonirakenteissa hyvin usein halkeilua, joka puolestaan heikentää betonin säilyvyyttä. Halkeilua siis syntyy, kun betoniin kohdistuva paine ylittää sen vetolujuuden. Halkeilulta ei voida täysin välttyä, mutta rakenteen toiminnan kannalta on tärkeää, että halkeilua voidaan hallita ja halkeamaleveydet pysyvät riittävän pieninä. Seuraavassa luvussa käsitellään edellä mainittujen vauriomekanismien ehkäisemistä ja sitä, miten betonin halkeilua voidaan hallita.

Halkeamien aiheuttama haitta riippuu vallitsevista ympäristöolosuhteista, mutta yli 0,2...0,4 mm:n levyisiä halkeamia voidaan pitää jo monissa tapauksissa haitallisina. Jos halkeamat ovat raudoitusterästen suuntaisia, voivat ne aiheuttaa laajallakin alueella raudoitusten korroosiota. Rakennesuunnittelussa halkeamaleveydet pyritään rajoittamaan laskennallisesti välille 0,1...0,3 mm. [30] Edellä mainittujen syiden lisäksi halkeamia voi aiheutua myös plastisesta kutistumasta, plastisesta painumasta, kuivumiskutistumisesta, lämpötilan muutoksista vastavaletussa betonissa, rakenteeseen kohdistuvista liian suurista kuormista sekä huonosta valutyön suorituksesta [13]. Tässä tutkimuksessa näihin tekijöihin ei kuitenkaan perehdytä, sillä ne eivät suoraan liity pitkäaikaiskestävyyden suunnitteluun. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että betonirakenteen kuivumisen ja kutistumisen tulee olla hallittua halkeamien minimoimiseksi. Lisäksi betonin peitepaksuuden ylimitoitusta tulee välttää, sillä liian suuret peitepaksuudet kasvattavat halkeamaleveyksiä [3, s. 6].

3.5 Kosteus betonin rasiustekijänä

Tässä pääluvussa esitetyistä vauriomekanismeista todetaan kosteuden olevan eri muodoissaan yhdistävä tekijä lähes kaikkiin betonin vauriomekanismeihin. Asuinrakentamiseen liittyvät merkittävimmät kosteuslähteet ovat sadevesi, ulkoilman kosteus ja pinnoille kondensoitua ilman kosteus. Kosteusrasitus voi olla peräisin myös sisäilmasta, maaperästä, rakennuksessa käytettävästä vedestä tai erilaisista vuotovesistä. [31, s. 15]

Asuinrakennusten julkisivuja tarkasteltaessa, merkittävimmän kosteusrasituksen aiheuttaa vetenä tai räntänä satava viistosade. Rannikkoalueilla viistosateen määrä on suurempi kuin sisämaassa, sillä rannikkoalueilla sataa sisämaata enemmän sekä tuulee voimakkaammin. Vuotuisesta sademäärästä viistosateen osuus on rannikkoalueilla noin 60 % ja sisämaassa noin 40 %. Myös ilmansuunnalla on merkitystä. Suomessa vesi- ja

räntäsateiden aikana tuulee tyypillisesti kaakko...länsi-sektorilta, joten näihin ilmansuuntiin olevat julkisivut ovat merkittävästi rasitetumpia kuin muihin ilmansuuntiin osoittavat julkisivut. [31, s. 16]

Rakennesuunnittelijan tulee kiinnittää huomiota rakennetta rasittaviin sademääriin, sillä tulevaisuudessa viistosateen määrä kasvaa ilmastonmuutoksesta johtuen. Ilmastonmuutokseen liittyvien ennusteiden mukaan vuotuinen sademäärä lisääntyy 7,1 % ja tuulisuus 1,3 % vuodesta 2000 vuoteen 2050 mennessä ja vastaavasti 19,1 % ja 3,6 % vuoteen 2100 mennessä. Ennusteiden mukaan tuulensuunnat pysyvät ennallaan. [31, s. 16]

Betonisissa julkisivuissa viistosateen aiheuttama rasitus korostuu etenkin seinien yläosissa, korkeissa ja räystäättömissä, avoimilla paikoilla sijaitsevilla rakennuksissa. Betonin laadulla on suuri merkitys sen vedenimukykyyn. Betoniseen julkisivuun syntyy saateella vesikalvo, joka pääsee imeytymään elementin eristetilaan vuotavien saumojen ja toimimattomien liitoksien kautta. Rakenteen kuivuminen tapahtuu elementin uritetuissa eristeissä tuuletusurien kautta ja tuulettumattomissa rakenteissa elementin ulkokuoren ulkopinnasta haihtumalla. Haihtumista tehostaa seinän sisäpuolelta ulospäin kulkeutuva lämpövirta. [31, s. 16] Korroosioaurioita syntyy julkisivuissa tyypillisimmin elementtien pieliterästen kohdille, joissa betonin peitepaksuudet ovat pieniä ja sateen rasitus suurta [32, s. 3]. Kuvassa 9 näkyy, miltä korroosioaurio voi näyttää tällaisessa liitosalueessa.



Kuva 9. Korroosioaurioita seinäelementin liitosalueella [32, s. 3]

Parvekelaattojen yläpinnat ovat lähes suoraan sadevedelle ja lumelle alttiina, mikäli parveke ei ole lasitettu tai muuten suojattu. Koska kyse on vaakarakenteesta eivätkä kallistukset ole suuria, parvekelaatat voivat olla pitkään märkinä. Parvekelaatalle aiheutuu paikallista kosteusrasitusta myös vedenpoistoon liittyen. Lisäksi parvekepielet, kaiteet ja muut laatan ulkopuoliset pystypinnat altistuvat viistosateelle. Parvekerakenteet ovat ulkotiloissa, jolloin ne ovat tyypillisesti kokonaan kylmiä rakenteita. Tällöin rakenteen kuivumista tukevaa lämpövirtaa ei ole toisin kuin ulkoseinissä. Parvekerakenteet kuivuvat siis vain haihtumalla. [31, s. 17]

4. BETONIN VAURIOITUMISEN EHKÄISEMINEN

Edellisessä luvussa käsitellyistä vauriomekanismeista voidaan todeta, että betonin ja sitä ympäröivän ilman kosteudella on merkittävä vaikutus rakenteen säilyvyyteen. Lisäksi voidaan todeta, että monet vauriomekanismeista aiheuttavat betonirakenteessa halkeilua, joka edesauttaa kosteuden tunkeutumista rakenteeseen ja rakenteessa. Eri-tyisesti näihin kahteen asiaan rakennesuunnittelijan tulee kiinnittää huomiota betonirakenteita suunniteltaessa.

4.1 Fysikaalisten vauriomekanismien ehkäiseminen

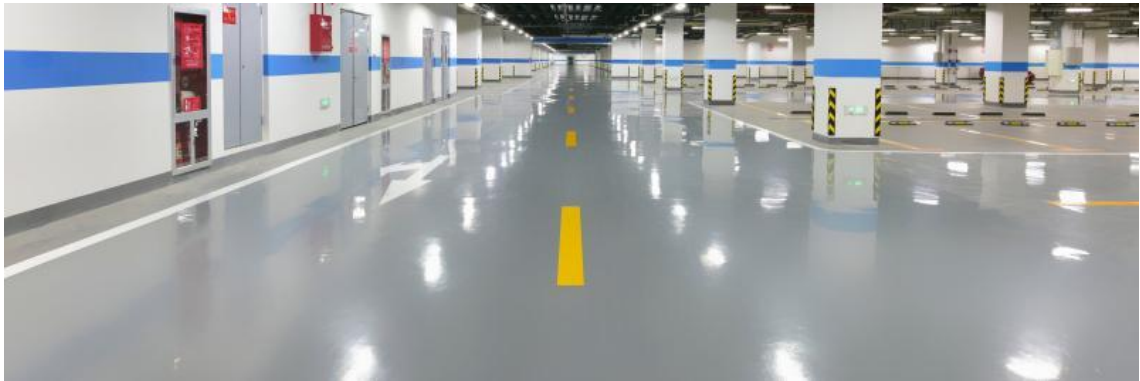
Pakkasrapautumiseen ja suola-pakkasrapautumiseen liittyen betonirakenteesta pyritään tekemään kestävä lisäaineena käytettävien huokostimien avulla. Huokostinta sekoitetaan märkään betonimassaan ja valun kovettuessa ne muodostavat betonirakenteeseen ylimääräisiä ilmakuplia. [33] Kun kapillaarihuokosissa oleva vesi jäätyy, se työntää laajentuessaan vielä nestemäisenä olevaa vettä tieltään ja tämä vesi pääsee kulkeutumaan lopulta huokostimien avulla syntyneisiin ilmakupliin. Betoni ei näin ollen siis vaurioidu, koska jäätyvän veden aiheuttama rakenteen sisäinen paine pääsee purkautumaan suo-
jahuokosiin. [25, s. 20]

Suojahuokosten halkaisija on tyypillisesti noin 0,01–0,8 mm [25, s. 20]. Jotta suo-
huokoistus toimisi rakenteessa hyvin, tulee sen olla tasaisesti jakautunut ja riittävän tiheä verkosto. Huokosten välisen etäisyyden ollessa tarpeeksi lyhyt, vesi pääsee liikkumaan kapillaarihuokosista suo-
jahuokosiin jäätymissyklien aikana. [34] Huokosjaolla tarkoitetaan suo-
jahuokosten välisen etäisyyden puolikasta [25, s. 26]. Kun huokosjako on on-
nistunut, sen arvo on noin 0,2 mm. Jos huokosjako ylittää arvon 0,25 mm, betoniraken-
netta ei enää luokitella pakkasenkestäväksi. [34]

4.2 Kemiallisten vauriomekanismien ehkäiseminen

Aggressiivisia happoja vastaan betonirakenne voidaan suojata vain haponkestäviä pin-
noitteita käyttämällä [15]. Betonin pinnoittamiseen soveltuvia materiaaleja ovat epoksit,
vinyyliesterit, polyesterit, metyyylimetakrylaatit ja polyuretaanit [35, s. 7]. Esimerkiksi ku-
van 10 betonilattia on pinnoitettu epoksimaalilla. Edellä mainituissa pinnoitetyypeissä si-
deaineena toimii hartsi [35, s. 7]. Pinnoitteen tulee olla tiiviysominaisuuksiltaan [35, s. 7]

ja tartuntaominaisuuksiltaan [35, s. 12] hyvä, jotta sen suojausteho olisi korkea. Lattianpinnoitteen paksuus määrittelee hyvin vahvasti sen käyttöiän. Tämän vuoksi pinnoitemateriaali ja sen paksuus on määriteltävä huolellisesti lattian käyttöaste, puhdistustiheys ja -tehokkuus, mekaaninen kulutus sekä mahdolliset iskut huomioiden. [36, s. 19] Teollisuuden käyttämät kemikaalit ovat kuitenkin niin monimuotoisia, ettei yksiselitteisiä ohjeita pinnoitteiden kemikaalikestosta voida antaa. Tämän vuoksi pinnoitteet tulee tarkastella ja valita tapauskohtaisesti. [36, s. 20]



Kuva 10. Epoksimaalilla pinnoitettu betonilattia [37]

Kloridi- ja karbonatisoitumisreaktioiden tapauksissa rakenteen vaurioituminen kohdistuu raudoitusteräksiin. Raudoitukset ovat sekä fysikaalisesti että kemiallisesti suojattuja. Fysikaalinen suojaus perustuu betonin riittävään peitepaksuuteen, betonin tiiveyteen ja halkeamien hallintaan ja kemiallinen suojaus betonin emäksisyyden luomaan oksidikalvoon. [5, s. 13] Vaurioituneessa rakenteessa betonin fysikaalisen suojan pettäessä pettää myös kemiallinen suoja, joten vaurioiden ehkäisemiseksi tulee kiinnittää erityistä huomiota fysikaalisen suojauksen onnistumiseen.

Kloridirasituksen vähentämiseksi oleellista on estää kloridipitoisen veden tunkeutuminen betonirakenteeseen [19]. Veden tunkeutumiseen voidaan vaikuttaa betonin tiiveyden avulla, käytännössä siis betonin vesi-sementtisuhteella. Alhainen vesi-sementtisuhte tekee betonista tiiviimmän, jolloin kosteuden tai ilman hiilidioksidin tunkeutuminen betoniin hidastuu. [5, s. 16] Myös betonin peitepaksuutta kasvattamalla kloridit ja hiilidioksidi joutuvat kulkeutumaan pidemmän matkan saavuttaakseen raudoitukset, joten aika rakenteen vaurioitumisen alkamiseen pitenee. Koska halkeamat nopeuttavat vauriomekanismeja, tulee etenkin kloridirasitetuissa rakenteissa huomioida myös XC-rasitusluokkaa tiukemmat halkeamaleveysvaatimukset. [5, s. 18]

Jos rakenne on vain lievästi kloridirasitettu, eli se kuuluu joko XD1- tai XS1-rasitusluokkaan, voidaan raudoitteena käyttää myös ruostumatonta terästä. Tämä voi pidentää rakenteen käyttöikä, vaikka sitä ei käyttöikämitoituksessa todellisuudessa huomioida.

Ruostumaton teräs voi kuitenkin ruostua teräsjännityksen alaisena, joten sitä ei tule käyttää kloridirasitusluokan ollessa XD1 tai XS1 luokkia vaativampia. [5, s. 18]

Betonirakenteen karbonatisoitumista voidaan hillitä myös sadevettä hylkivien mutta vesihöyryä läpäisevien pinnoitteiden avulla. Tällainen pinnoitekäsittely sopii erityisesti maallattaville betonijulkisivuille ja parvekkeille. Pinnoitteiden tulee olla ehjiä, jotta niiden suojausteho pysyy ennallaan, joten niitä tulee huoltaa tasaisin väliajoin. [38, s. 7]

Sulfaattien aiheuttamalta korroosiolta voidaan välttyä käyttämällä betonissa sulfaatinkestävää SR-sementtiä, joka vähentää ettringiitin muodostumista [39]. Tässä sementtilaadussa trikalsiumaluminaatin pitoisuutta on rajoitettu, ja se on enintään 3,0 % [40]. Myös masuunikuonasementtiä ja pozzolaaneja sisältäviä sementtejä käyttämällä voidaan suojautua sulfaattikorroosiolta. Masuunikuonasementti sisältää vähintään 70 % masuunikuonaa, mutta masuunikuonan sisältämä alumiini ei kemiallisessa reaktiossaan tuota ettringiittiä. Pozzolaania sisältävien sementtien suojausteho perustuu pienempään kalsiumhydroksidipitoisuuteen ja valmiin betonin tiiviimpään huokosrakenteeseen, mikä pienentää sulfaattien tunkeutumista rakenteeseen. [39]

Alkali-kiviainesreaktiolta voidaan uusissa betonirakenteissa suojautua neljällä eri menetelmällä. Betonimassassa voidaan käyttää reagoimatonta kiviainesta, betonin huokosveden alkalisuutta voidaan rajoittaa, betonirakenne voidaan pitää kuivana tai alkali-kiviainesreaktiogeelin paisuminen voidaan estää. Reagoimattomina kivilajeina pidetään sellaisia, jotka eivät sisällä kvartsia. Yleisimpiä tällaisia Suomen kallioperästä löytyviä kivilajeja ovat gabro, diabaasi ja vulkaniitti. Jos betonissa käytettävä kalliomurske koostuu näistä kivilajeista, alkali-kiviainesreaktio estyy. [41, s. 19] Betonin huokosveden alkalisuutta voidaan puolestaan alentaa pienentämällä betonin alkalipitoisuutta, käyttämällä alhaisalkalisementtiä tai korvaamalla sementtiä toisilla sideaineilla [41, s. 34]. Betonirakenteen kuivana pitäminen on näistä neljästä keinosta tehokkain. Sisätiloissa betonirakenteen kuivana pitäminen on helppoa mutta ulko-olosuhteissa ja etenkin viistosateelle alttiit pinnat on tärkeää suojata pellitysten tai muun tuulettuvan rakenteen avulla. [41, s. 36] Viimeisenä keinona alkali-kiviainesreaktiolta voidaan pyrkiä suojautumaan lisäämällä betonimassaan liukoisia litiumsuoloja kuten litiumnitraattia. Tämä estää alkali-kiviainesreaktion tuottaman geelin vedenimukyvyn, jolloin myös geelin paisuminen estyy. [41, s. 37]

4.3 Mekaanisten vauriomekanismien ehkäiseminen

Betonin mekaanisiin vauriomekanismeihin liittyen kovettuneen betonin kulutuksenkestävyyttä voidaan parantaa useilla keinoilla. Betonille voidaan tehdä silikaattikäsittely, siihen voidaan lisätä sirotepinnoite tai kantavan rakenteen päälle voidaan valaa kovabetonista pintabetonikerros. Betonin kulutuksenkestävyyden kannalta heikoin tekijä on betonin sementtikivi. Kulutuksenkestävyyttä voidaan siis parantaa myös betonipinnan hionnalla, jolloin betonin pinnasta poistuu sementtikiveä. Kulutuksenkestävyyttä vaativissa kohteissa käytetään tyyppillisesti joko imubetonia tai notkistettua betonia, koska kulutuksenkestävyys paranee myös alhaisen vesi-sementtisuhteen myötä. Alhainen vesi-sementtisuhte yhdessä kestävä kiviaineksen kanssa takaavat betonirakenteelle parhaimman kestävyuden mekaanista kulutusta vastaan. [5, s. 44]

Vaikka kuitubetonin ensisijainen tarkoitus on kasvattaa rakenteen lujuutta, voidaan myös sillä rajoittaa betonin halkeilua ja lisätä rakenteen kulutuksenkestoa. Kuitubetonissa betonimassaan on sekoitettu esimerkiksi teräskuituja, polypropyleenikuituja tai lasikuituja, ja tämän avulla rakenteen varsinaisesta raudoittamisesta voidaan luopua. [42, s. 1] Kuvassa 11 on esitetty teräskuiduilla vahvistettu kuitubetonirakenne. Suomessa kuitubetonia käytetään erityisesti maanvaraisessa betonilattiassa [42, s. 1].



Kuva 11. Teräskuiduilla vahvistettu kuitubetoni [43]

4.4 Raudoitteiden peitepaksuuden suunnittelu

Kuten edellä on tullut esille, betonin peitepaksuudella on suuri merkitys rakenteen käyttöikään. Peitepaksuuden mitoitus voidaan tehdä sekä taulukkomitoituksena että laskennallisena mitoituksena [5, s. 35]. Tässä tutkimuksessa käsitellään betonipeitteen taulukkomitoitusta, joka perustuu rasitusluokkiin. Tarkemman tuloksen antava laskennallinen mitoitus on esitetty teoksen Betoninormit By65 2021 liitteessä 3 [44, s. 137].

Raudoituksille asetetut betonipeitteen arvot esitetään nimellisarvoina. Betonipeitteen nimellisarvo on betonipeitteen vähimmäisarvon ja mittapoikkeaman summa. Vähimmäisarvon suuruus on vähintään ankkuroitavan tangon halkaisija ja mittapoikkeaman tyypillinen arvo on 10 mm. [5, s. 34] Taulukossa 2 esitetään betonipeitteiden vähimmäisarvot eri rasitusluokissa rakenteen käyttöiän ollessa 50 tai 100 vuotta.

Taulukko 2. Betonipeitteiden vähimmäisarvot [5, s. 35]

Rasitusluokka	Betonipeitteen vähimmäisarvo 50 vuoden käyttöiälle [mm]		Betonipeitteen vähimmäisarvo 100 vuoden käyttöiälle [mm]	
	Betoniteräs	Jänneteräs	Betoniteräs	Jänneteräs
X0	10	10	10	10
XC1	10	20	10	20
XC2	20	30	25	35
XC3, XC4	25	35	30	40
XS1, XD1	30	40	35	45
XS2, XD2	35	45	40	50
XS3, XD3	40	50	45	55

5. YHTEENVETO

Betoninormeihin kohdistuneen vuoden 2005 uudistuksen myötä betoniset rakenteet tulee suunnitella ja valmistaa käyttöikämitoituksen avulla. Rakennesuunnittelijan määrittämä suunnittelukäyttöikä voi vaihdella 50 ja 200 vuoden välillä. Yleisenä periaatteena rakenteen suunnittelukäyttöiän tulee olla sitä pidempi mitä hankalampaa tai kalliimpaa rakenteen korjaaminen tai vaihtaminen on. Betonin suunnittelukäyttöikä ja lopulta betonin ominaisuudet määrittyvät betoniin kohdistuvien ympäristörasitusten vaativuudesta. Erilaisia ympäristörasituksia kuvataan rasitusluokkien ja rasitusluokkayhdistelmien avulla. Suunnittelukäyttöiän määrittäminen voidaan tehdä joko taulukoiden avulla tai laskennallisesti, joista jälkimmäinen on työläämpi mutta tarkempi menettely.

Betonirakenteiden vauriomekanismit voidaan jakaa fysikaalisiin, kemiallisiin ja mekaanisiin vaurioihin. Fysikaalisissa vauriomekanismeissa vauriot aiheutuvat tyypillisesti betonirakenteen sisäisten pakkovoimien purkautuessa ja lämpöliikkeissä. Kemiallisissa vauriomekanismeissa rakenteessa tapahtuu aina jokin tai joitakin kemiallisia reaktioita, jotka heikentävät betonin laatua. Vauriomekanismien aiheuttajia on monia, mutta Suomen olosuhteissa merkittävimmät ovat pakkasrapautuminen sekä kloridi- ja karbonatisoitumisreaktiot. Mekaanisissa vauriomekanismeissa betonirakenne kuluu jonkin mekaanisen tekijän, kuten värähtelyn tai pyöräkuorman, seurauksena. Käyttöikää suunniteltaessa on huomioitava, että eri vauriomekanismit voivat vaikuttaa betonirakenteessa samanaikaisesti kiihdyttäen rakenteen vaurioitumista.

Yhteinen tekijä lähes kaikille vauriomekanismeille on kosteuden läsnäolo rakenteessa muodossa tai toisessa. Kosteuden merkitys vauriomekanismien käynnistymiseen on merkittävä, sillä betonia rasittavat haitta-aineet kulkeutuvat rakenteeseen erityisesti kosteuden avulla. Lisäksi kosteat pinnat keräävät myös likaa ja jäätyvät pakkasessa. Rakenteeseen muodostuvat halkeamat edesauttavat kosteuden ja lian imeytymistä betoniin, joten halkeamien suuruuksille on laadittu tietyt raja-arvot. Rakennesuunnittelijan tärkeimpiin tehtäviin kuuluukin betonirakennetta suunniteltaessa betonin kosteusteknisen toimivuuden varmistaminen ja halkeilun minimointi.

Betonirakenteen vauriomekanismeilta voidaan suojautua monin eri tavoin, mutta tärkeimpiä keinoja ovat riittävä betonipeitepaksuus, suojahuokostimien käyttö pakkasrapautumista vastaan ja betonirakenteen riittävän tiiveyden saavuttaminen alhaisen vesisementtisuhteen sekä oikean sementtilaadun valinnoilla. Lisäksi rakenteita voidaan suo-

jata erilaisten pinnoitteiden avulla karbonatisoitumista, happoja sekä mekaanista kulu-
tusta vastaan. Näiden keinojen avulla betonirakenteen käyttöikä voidaan siis maksimi-
moidsa. Toisaalta on kuitenkin huomioitava, ettei jollain suunnittelukäyttöikää pidentävällä
toimella heikennetä rakenteen kestävyyttä jotain toista vauriomekanismia vastaan. Käyt-
töikäsuunnittelu vaatii siis optimointia vauriomekanismien ja niiden ehkäisykeinojen vä-
lillä.

Rakennusten pitkäikäisyydellä voidaan saavuttaa monia yhteiskunnallisia ja kaupunki-
kulttuurillisia etuja. Laadukkaasti suunnitellut, valmistetut ja huolletut rakennukset ja ra-
kenteet saavuttavat helpoimmin pitkän käyttöiän ja tekevät rakentamisesta näin myös
tehokkaampaa, taloudellisempaa ja ympäristöystävällisempää. Betonin vauriomekanis-
mien torjuminen on näin ollen yksi rakennusalan merkittävimmistä kulmakivistä.

LÄHTEET

- [1] Säilyvyys, Betonirakenteita suunniteltu jopa 1000 vuoden käyttöiälle, Betoniteollisuus ry. Saatavissa (viitattu 15.9.2022): <https://betoni.com/tietoa-betonista/pe-rustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/sailyvyys/>
- [2] Betoni rakennusmateriaalina, Suomen Betoniteollisuus ry. Saatavissa (viitattu 10.12.2022): <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/>
- [3] J. Punkki, Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu, Betoniviidakko Oy, 2004, 6 s. Saatavissa (viitattu 15.9.2022): https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/11/BETO404_s36-41.pdf
- [4] Betonirakenteiden käyttöikäsuunnitteluohje, Parma Oy, 2005, 8 s. Saatavissa (viitattu 17.9.2022): https://parma.fi/userassets/uploads/2018/06/parma_betonirakenteiden_kayttoikasuunnitteluohje_2005.pdf
- [5] J. Punkki, H. Räisänen, Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille BY68, Suomen Betoniyhdistys ry, 2016, 95 s.
- [6] P. Nykyri, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - Osa 1 BY211, Suomen Betoniyhdistys ry, 2015, 253 s.
- [7] Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2021, SFS-EN 206:2014 + A2:202, 193 s.
- [8] Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2015, SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 219 s.
- [9] Säilyvyys, Elementtisuunnittelu.fi, 2020. Saatavissa (viitattu 24.9.2022): <https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys>
- [10] A. Köliö, Betonirakenteiden fysikaaliset vauriot, luento Betonirakenteiden korjaaminen 2022, Suomen Betoniyhdistys ry, 2022, 37 s. Saatavissa (viitattu 26.9.2022): https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2022/1.-jakso/luento3.kolio_betonirakenteiden_fysikaaliset_vauriot_2022.pdf
- [11] J. Lahdensivu, S. Varjonen, A. Köliö, Betonijulkisivujen korjausstrategiat, Tutkimusraportti 148, Tampereen teknillinen yliopisto, 2010, 79 s. Saatavissa (viitattu 23.12.2022): https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/128246/lahdensivu_varjonen_kolio_betonijulkisivujen_korjausstrategiat.pdf?sequence=1
- [12] Betonin halkeilu, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 26.9.2022): <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu.html>
- [13] Betonirakenteiden halkeilun syyt, halkeilutyypit ja niiden sijainti rakenteessa sekä keinoja halkeilun vähentämiseksi, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 8.10.2022): <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu/halkeilun-syyt-tyypit-ja-valttaminen.html>

- [14] H. Pyy, Betonirakenteiden kemialliset vauriot, luento Betonirakenteiden korjaaminen 2022, Suomen Betoniyhdistys ry, 2022, 64 s. Saatavissa (viitattu 9.10.2022): <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2022/1.-jakso/hannu-pyy-betonin-korjauskurssi-2022.pdf>
- [15] Betonin kemialliset korroosiot, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 9.10.2022): <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/betonin-kemialliset-korroosiot.html>
- [16] Kalkkihärme, Lakka konserni. Saatavissa (viitattu 23.12.2022) https://lakka.fi/wp-content/uploads/2022/05/Kalkkiharme_200522.pdf
- [17] Kalkkihärmä, Raksystems Group, 2017. Saatavissa (viitattu 1.12.2022): <https://raksystems.fi/sanasto/kalkkiharma/>
- [18] Y.F. Fan, Z.Q. Hu, H.Y. Luan, Deterioration of tensile behavior of concrete exposed to artificial acid rain environment, Interaction and Multiscale Mechanics, Vol. 5, No. 1, 2012, 16 s. Saatavissa (viitattu 1.12.2022): <http://www.techopress.org/samplejournal/pdf/imm0501004.pdf>
- [19] Kloridien tunkeutuminen betoniin, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 9.10.2022): <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/kloridien-tunkeutuminen-betoniin.html>
- [20] Betonisanasto, Pistekorrosio, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 9.10.2022): <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto.html>
- [21] Types of Chemical Attacks on Concrete Structures, The Construction Encyclopedia. Saatavissa (viitattu 2.12.2022): <https://theconstructor.org/concrete/chemical-attacks-types-concrete-structures/7237/>
- [22] Betonin säilyvyysvaatimukset ja kestävyysuunnittelu, luento Rakennusten elinkaaritiete, Tampereen yliopisto, 58 s. Saatavissa (viitattu 11.12.2022): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/2298424/mod_resource/content/1/RAK.RS.270%20Betoni%20S%C3%A4ilyvyysvaatimukset%20ja%20kest%C3%A4vyysuunnittelu.pdf
- [23] H. Pyy, Onko Suomessa ongelmaa nimeltä alkali-kiviainesreaktio?, Betoni 4, 2010, 3 s. Saatavissa (viitattu 23.12.2022): https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1004_46-48.pdf
- [24] I. Fernandes, M.A.T.M. Broekmans, Alkali–Silica Reactions: An Overview, Part I. Metallogr. Microstruct. Anal. 2, 2013. Saatavissa (viitattu 2.12.2022): <https://link.springer.com/article/10.1007/s13632-013-0085-5>
- [25] Betonirakenteiden säilyvyysvauriot, luento Rakennusten elinkaaritiete, Tampereen yliopisto, 71 s. Saatavissa (viitattu 14.10.2022): https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/2285295/mod_resource/content/1/RAK.RS.270%20Betonin%20S%C3%A4ilyvyysvauriot.pdf
- [26] M. Matsinen, Raudoitusterästen korrosio, Piimat, 2021. Saatavissa (viitattu 4.12.2022): <https://piimat.fi/raudoitusterasten-korroosio/>

- [27] Betonin karbonatisoituminen, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 17.10.2022): <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/betonin-sailyvyys/betonin-karbonisoituminen.html>
- [28] A. Köliö, Betonirakenteiden mekaaniset vauriot, luento Betonirakenteiden korjaaminen 2022, Suomen Betoniyhdistys ry, 2022, 31 s. Saatavissa (viitattu 17.10.2022): https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2022/1.-jakso/luento4.kolio_betonirakenteiden_mekaaniset_vauriot_2022.pdf
- [29] Kauppakeskus Saaren pysäköintihallin betonilattian korjaaminen, Helsinki, Piimat, 2022. Saatavissa (viitattu 8.12.2022): <https://piimat.fi/kauppakeskus-saaren-pysakointihallin-betonilattian-korjaaminen-helsinki/>
- [30] Betonin halkeilu, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 25.10.2022): <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-halkeilu.html>
- [31] J. Lahdensivu, et al., Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019 BY42, Suomen Betoniyhdistys ry, 2019, 136 s.
- [32] J. Lahdensivu, Suomalaisten betonijulkisivujen ja -parvekkeiden vaurioituminen BeKo-tutkimuksen mukaan, Betoni 4, 2011, 6 s. Saatavissa (viitattu 9.12.2022): https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1104_38-43.pdf
- [33] Pienrakentajien ja rautakauppioiden kysytyimmät kysymykset, Finnsementti Oy. Saatavissa (viitattu 4.11.2022): <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-pienrakentajalle-ja-rautakauppiaille/kysytyimmat-kysymykset/>
- [34] Betonin pakkasenkestävyys, Eurofins Scientific, 2021. Saatavissa (viitattu 4.11.2022): <https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakennusmateriaalien-testaus/betoni/betonin-pakkasenkestaevyys/>
- [35] E. Häkkä-Rönholm, T. Haimala, L. Rautiainen, BLY 11 Teollisuuslattioiden pinnoitus, VTT Rakennustekniikka, 1999, 38 s. Saatavissa (viitattu 1.12.2022): <http://www.bly.fi/File/bly-11.pdf?641373>
- [36] A. Juvakka, Betonilattioiden pinnoitusohjeet 2010 BY54-BLY12, Suomen betonitieto, 2010, 64 s.
- [37] Epoksimaalit ja epoksinnoitteet, Epoksimaalit ja pinnoitteet sisäkäyttöön ja ulkokäyttöön, Alimex Oy. Saatavissa (viitattu 6.12.2022): <https://www.alimex.fi/epoksinnoitteet-ja-epoksimaalit/>
- [38] J. Lahdensivu, A. Köliö, Betonirakenteiden säilyvyysvaatimusten riittävyys FRAME-tutkimuksen mukaan, 2013, 8 s. Saatavissa (viitattu 4.12.2022): https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1303_58-65.pdf
- [39] Sulfaattikorroosio, Eurofins Scientific, 2022. Saatavissa (viitattu 4.12.2022): <https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakennusmateriaalien-testaus/betoni/sulfaattikorroosio/>
- [40] Sulfaatinkestävyys, Suomen Betoniyhdistys ry. Saatavissa (viitattu 4.12.2022): <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/sulfaatinkestavyys.html>

- [41] J. Tikkanen, et al., Päivittyvä ohje betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi, Suomen Betoniyhdistys ry, 2021, 50 s. Saatavissa (viitattu 4.12.2022): https://issuu.com/betoniyhdistys/docs/akr_pa_ivittyva_ohje_24.6.2021
- [42] P. Lumme, Kuitubetonien käyttö lisääntyy rakenteissa – jopa kantavissa rakenteissa, Betoni 3, 2008, 6 s. Saatavissa (viitattu 7.12.2022): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0803-s-72-77.pdf>
- [43] Fibre reinforced concrete, Sika Ireland Ltd. Saatavissa (viitattu 8.12.2022): <https://irl.sika.com/en/construction/concrete-admixtures/fibre-reinforced-concrete.html>
- [44] J. Tikkanen, et al., Betoninormit 2021 BY65, Suomen Betoniyhdistys ry, 2021, 157 s.

LIITE A

Taulukko A/1. Rasitusluokat [8, s. 48]

Luokan merkintä	Ympäristön kuvaus	Opastavia esimerkkejä paikoista, joissa rasitusluokkia voi esiintyä
1 Ei korroosion tai rasituksen riskiä		
X0	Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni: Kaikkiin ympäristöihin lukuun ottamatta niitä, joissa esiintyy jäädytys-sulatus- tai kemiallista rasitusta. Raudoitettu tai metallia sisältävä betoni: hyvin kuiva	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on hyvin alhainen.
2 Karbonatisoitumisen vaikutuksista aiheutuva korroosio		
XC1	Kuiva tai pysyvästi märkä	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on alhainen. Pysyvästi vedenalainen betoni.
XC2	Märkä, harvoin kuiva	Betonipinnat, jotka ovat pitkään kosketuksissa veden kanssa. Usein perustukset.
XC3	Kohtalaisen kostea	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on kohtalainen tai suuri. Ulkona oleva sateelta suojattu betoni.
XC4	Märkä ja kuiva vaihtelevat	Betonipinnat, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, mutta eivät kuulu rasitusluokkaan XC2.
3 Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonipinnat, jotka ovat alttiina ilman sisältämillä klorideille

XD2	Märkä, harvoin kuiva	Uima-altaat. Betoni on alttiina kloridipitoisille teollisuusvesille.
XD3	Märkä ja kuiva vaihtelevat	Sillan osat, jotka ovat alttiina kloridipitoisille roiskeille. Jalkakäytävät. Paikoitustalojen laatat.
4 Meriveden kloridien aiheuttama korrosio		
XS1	Kosketuksissa ilman kuljettaman suolan kanssa, mutta ei suorassa kosketuksessa meriveteen	Lähellä rannikkoa tai rannikolla olevat rakenteet
XS2	Pysyvästi veden alla	Merirakenteiden osat
XS3	Vuoroveden ja roiskeen vyöhykkeellä	Merirakenteiden osat
5 Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä		
XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Tierakenteiden pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamille jäänsulatusaineille
XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Jäänsulatusaineille alttiit teiden ja siltojen kannet. Suoralle jäänsulatusaineroiskeelle ja jäätymiselle alttiit betonipinnat. Roiskevyöhykkeellä olevat jäätymiselle alttiit merirakenteet.

6 Kemiallinen rasitus		
XA1	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen vähän aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi
XA2	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen kohtalaisen aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi
XA3	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen hyvin aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi