

Betonirakenteiden säilyvyysvaatimusten riittävyys FRAME-tutkimuksen mukaan

Jukka Lahdensivu, tekniikan tohtori,
Tampereen teknillinen yliopisto,
Rakennustekniikan laitos
Arto Köliö, diplomi-insinööri,
Tampereen teknillinen yliopisto,
Rakennustekniikan laitos
www.tut.fi/elinkaari

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) FRAME-tutkimuksessa keskityttiin lämmöneristepaksuuden lisäyksen vaikutuksiin ilmastomuutoksen ja rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta. Näiden lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin mm. miten erilaisissa rakennetyypeissä lämmöneristeiden merkittävä lisääminen vaikuttaa niiden rakenteelliseen toimintaan ja liitoksiin sekä ilmastomuutoksen mukanaan tuovan lisääntyneen sateisuuden vaikutuksia detajisuunnitteluun. Betonirakenteiden osalta keskeinen tutkimuskysymys oli: ovatko betonirakenteiden nykyiset säilyvyysvaatimukset riittäviä tulevaisuuden ilmastossa?

Säälle alttiissa betonirakenteissa voi erilaisten olosuhde- ja muiden rasitustekijöiden vaikutuksesta tapahtua muutoksia, jotka heikentävät rakenteen ominaisuuksia ja aiheuttavat siten eriasteista korjaustarvetta. Suomessa yleisimmät betonirakenteen korjaamiseen johtavat vauriomekanismit ovat betonin karbonatisoitumisen seurauksena mahdollisesti tapahtuva raudotteiden korrosio sekä betonin pakkasrapautuminen puutteellisen pakkasenkestävyyden seurauksena.

Rakenteiden ikääntyessä tapahtuva vaurioituminen johtuu pääosin ilmastosta aiheuttamasta säärasituksesta, joka saa aikaan materiaalien ominaisuuksien heikkenemistä eli turmeltumista. Turmeltuminen voi olla haitallisen nopeaa, mikäli käytetyt materiaalit tai työnsuoritus ovat olleet heikkolaatuisia tai rakennusvirheitä tai huonosti toimivia. Säärasitus käynnistää useita rinnak-

kaisia turmeltumislmiöitä, jolloin julkisivun vaurioituminen tapahtuu yleensä useiden turmeltumislmiöiden yhteisvaikutuksesta. Turmeltumislmiöt ovat alkuvaiheessa hitaasti eteneviä, mutta vaurioiden edetessä turmeltumisenopeus yleensä kiihtyy.

Tutkimusaineisto

Betonirakenteiden raudotteiden korroosioon sekä betonin pakkasrapautumiseen liittyvä aineisto koostui Ilmatieteen laitoksen generoimasta säädatasta vuosille 2030, 2050 ja 2100, Tampereen teknillisen yliopiston 2010 päättyneestä Betonijulkisivujen korjausstrategiat-tutkimuksesta sekä muista tutkimuksista raudotteiden korroosionopeuteen ja betonin pakkasrapautumiseen liittyen.

Betonirakennuksissa julkisivut ja parvekkeet ovat alttiina ympäristön aiheuttamalle säärasitukselle ja tätä kautta rasitusten aiheuttamille erilaisille vaurioitumislmiöille. Betonielementtirakenteissa rakennuksissa näitä rakennosia ovat tyypillisesti sandwich-seinäelementtien betoniset ulkokuoret sekä parvekkeiden kaide-, laatta- ja pieliementit. Nämä elementtityypit ja niiden valmistustapa ovat säilyneet verrattain samanlaisina jo useamman vuosikymmenen ajan. Tämän tarkastelun aineisto koostuu betonielementtirakenteiden kerrostalojen kuntotutkimusaineistosta [1]. Tarkasteluihin valittiin kohteet, jotka ovat valmistuneet vuonna 1990 tai sen jälkeen, jotka ovat mahdollisimman paljon nykyisten rakenteiden kaltaisia. Näitä kohteita

on tietokannassa 47 kpl koostuen yhteensä 72 rakennuksesta.

Betonirakenteiden vaurioitumisen kannalta keskeisiä ilmastoon vaikuttavia tekijöitä ovat sateisuus (rakenteen kosteus) sekä rakenteiden märkänä tapahtuvien jäätymissulamissykliin määrä. Ilmatieteen laitoksen toimesta on kerätty aineisto betonirakenteiden vaurioitumiselle kriittisten sääolosuhteiden kehittymisestä ilmastosta muuttuessa tietyn ilmastomuutos-skenaarion mukaan (SRES A2-skenaario). Havainnot laadittiin neljältä havaintoasemalta Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä, Sodankylä [2].

Raudotteiden korroosiotarkasteluja varten on laadittu seuraavat suuret:

- vesisadepäivien lukumäärä ja vesisadepäivien sademäärä talvikausittain
- tuulensuunta-vedisade-ruusut viiden talvikauden jaksoina laskettuina
- ilmastosuureiden muuttuminen vuosina 2030, 2050 ja 2100.

1 Julkisivuissa on jo pitkään yleisesti käytetty ruostumattomia raudotteita, joten niiden osalta on oleellisempaa varmistaa pakkasenkestävyys.





Taulukko 1

Tarkasteluissa käytetyt eri elementtityyppien karbonatisoitumiskertoimet.

	keskiarvo	ka. + keskihajonta	95 % fraktiili
Julkisivut			
valkobetoni	0,59	1,29	2,17
tiililaatta	1,06	2,37	4,11
maalattu betoni	2,62	4,26	5,88
Parveke-elementit			
kaiteen ulkopinta	1,09	2,21	3,95
kaiteen sisäpinta	1,48	2,49	3,49
laatan yläpinta	1,15	2,05	2,82
laatan alapinta	3,21	4,63	6,02
pielen ulkopinta	1,50	2,52	3,47
pielen sisäpinta	1,63	2,87	4,14

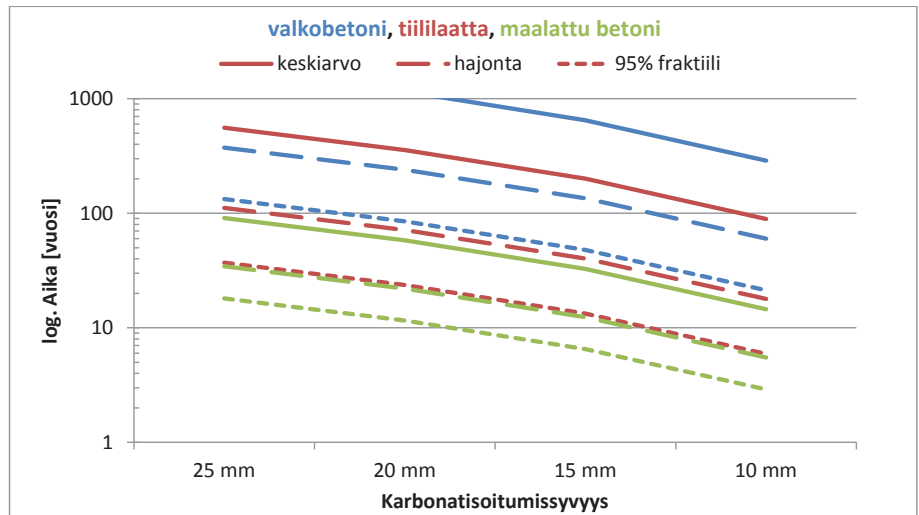
Betonin pakkasrapautumatarkasteluja varten on laadittu seuraavat suuret:

- jäätymissulamissykliin lukumäärä eri alimpiin lämpötiloihin (0°C, -2°C, -5°C, -10°C, -15°C, -20°C), kun vesi- tai räntäsade ollut ≤ 2 vrk ennen jätymistä
- ilmastosuureiden muuttuminen vuosina 2030, 2050 ja 2100.

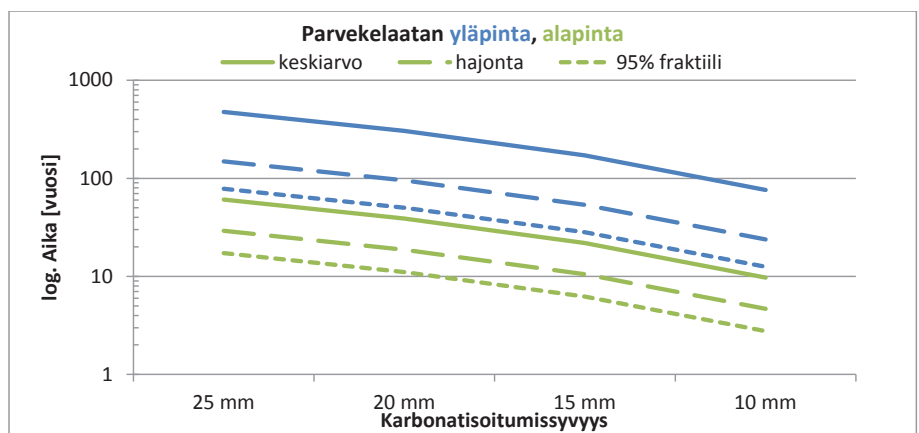
Betonin karbonatisoitumisnopeus

Betonijulkisivuissa on jo pitkään käytetty ruostumattomia teräksiä, joten niiden osalta korroosiosuoja on hyvin hoidossa. Myös ns. tavanomaiset betoniraudotteet ovat yleensä hyvin korroosiolta suojassa, koska betonin korkean alkalisuuden ansiosta terästen pinnalle muodostuu ns. passiivikalvo, joka estää korroosion [3 ja 4]. Ehjän betonin pH on luokkaa 13. Korroosiosuojaus on virheettömässä rakenteessa hyvin pysyvä, koska passiivikalvo on itseään jatkuvasti korjaava [5]. Kloridittomassa betonissa betonin huokosveden alkalisuuden tulee pysyä tasolla $\text{pH} \geq 11$, jotta teräksen ympärille muodostunut passiivikalvo pysyy ehjänä [6]. Kemiallisen suojauksen lisäksi terästä suojaava betonikerros hidastaa tiiviydellään ja yhtenäisyydellään erilaisten korroosiota aiheuttavien aineiden (hapot, kloridit, sulfaatit) pääsyä rau-

1 Betonin karbonatisoitumiseen kuluva aika vuosina eri julkisivutyypeissä terästen peitepaksuuden funktiona. (Pystyakseli on logaritminen.)



2 Betonin karbonatisoitumiseen kuluva aika vuosina parvekelaatassa terästen peitepaksuuden funktiona. (Pystyakseli on logaritminen.)



doitteiden pinnalle. Korrosio saattaa kuitenkin käynnistyä, jos suojabetonin tiiveys ja/tai paksuus ovat puutteellisia.

Alkalisen kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagoidessa ilman hiilidioksidin (CO_2) kanssa muodostuu kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) ja samalla betonin huokosveden alkalisuus laskee tasolle $\text{pH} = 8\text{--}8,5$. Reaktiota kutsutaan betonin karbonatisoitumiseksi [3]. Betonin karbonatisoituminen alkaa betonin pinnasta ja etenee hitaasti rintamana syvemmälle betoniin sitä mukaa kun kaikki kalsiumhydroksidi on pinnasta lähtien reagoinut.

Betonin karbonatisoitumisnopeustarkastelut tehtiin kuntotutkimustietokantaan tallennettujen julkisivujen ja parvekkeiden karbonatisoitumistietoihin perustuen. Karbonatisoitumisen etenemistä kuvataan yleisesti Fickin ensimmäisen lain mukaisella kaavalla [7 ja 3]:

$$(1) \quad x = k \cdot \sqrt{t}$$

missä,

x = karbonatisoitumissyvyys [mm]

k = karbonatisoitumiskerroin [mm/ $\sqrt{\text{a}}$]

t = rakennuksen ikä vuosina.

Neliöjuurimallin avulla selvitetiin käänteisesti kuinka kauan karbonatisoituminen

tietyille syvyyksille vie aikaa tarkastelluissa rakenteissa. Tarkasteltavat syvyydet ovat 10, 15, 20 ja 25 mm. 25 mm on tyypillinen raudoituksen peitepaksuuden suunnittelu-arvo. Käytännössä on kuitenkin havaittu runsaastikin tämän arvon alittavia peitepaksuuksia. Rakennetyyppikohtaisesti karbonatisoitumiskertoimien aineistosta laadittiin jakaumaa kuvaavat keskiarvo, keskihajonta sekä 95 % fraktiili. Tarkasteluissa käytetyt karbonatisoitumiskertoimet eri elementtityypeille on esitetty taulukossa 1.

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty betonin karbonatisoitumisaikojen eri julkisivupintatyypeille ja parveke-elementeille karbonatisoitumiskertoimen ja terästen peitepaksuuden vaihdellessa.

Maalatuissa betonijulkisivuissa betonin karbonatisoituminen etenee huomattavan nopeasti. Karbonatisoitumisrintama saavuttaa 5 % raudotteista jotka ovat 25 mm syvyydellä jo 18 vuodessa. Sen sijaan tiililaatta tiivistää betonin pintaa merkittävästi ja siten hidastaa karbonatisoitumisen etenemistä. 95 % 25 mm syvyydellä olevista raudotteista on alkalisessa betonissa vielä 37 vuoden käytön jälkeen. Valkobetonissa karbonatisoitumisen on todettu olevan kaikkein hitainta, joten 95 % rakenteista saavuttaa helposti 100 vuoden käyttöiän, ks.

kuva 1. Kuvaajista voidaan helposti todeta riittävän peitepaksuuden merkitys rakenteen käyttöikä. Jo 5 mm peitepaksuuden pienennys pienentää karbonatisoitumisaikaa noin 10 vuotta.

Parvekerakenteissa eniten raudoitusta on kaiteissa sekä laattojen alapinnoissa, joten ne ovat siten kriittisimmät rakenteen käyttöikää rajoittavat alueet. Betonin karbonatisoituminen on nopeinta parvekelaattojen alapinnassa, missä karbonatisoituminen saavuttaa 25 mm syvyydellä olevista raudotteista 5 % 18 vuodessa ja 20 mm syvyydellä olevat jo 10 vuoden aikana, ks. kuva 2. Parvekelaattojen alapinnan karbonatisoituminen on siten kriittisin tekijä koko parvekerakenteen käyttöiän suhteen, mikäli kriteerinä pidetään betoninormien mukaista rakenteen käyttöikää.

Aktiivinen korrosio

Raudotteiden korrosio voi alkaa kun teräksiä suojaava passiivikalvo on tuhoutunut joko betonin karbonatisoitumisen seurauksena tai kloridien vaikutuksesta. Aktiivinen korrosio vaihe voi kestää useita vuosia. Aktiivisen korrosion aikaan vaikuttavat raudoitteen betonipeitteen paksuus suhteessa raudoitteen halkaisijaan sekä betonin kosteuspitoisuus ja lämpötila.

Taulukko 2

Betonissa olevien raudoitteiden korroosioaika eri ilmasto-olosuhteissa kriittiseen raja-alueeseen 50 µm vuodessa [a].

	Vantaa	Jokioinen	Jyväskylä	Sodankylä
Nykyilmasto	5,7	6,1	8,2	37,5
2030	5,5	5,7	7,8	37,5
2050	5,3	5,5	7,4	37,5
2100	5,3	5,1	6,1	19,7

Taulukko 3

Ohuhteissa havaittavaa alkavaa pakkasrapautumaa, kun vesi- tai räntäsade ≤ 2 vrk ennen jäätymistä.

	Vantaa [vuotta valmistumisesta]		Jyväskylä [vuotta valmistumisesta]	
	alle -5 °C	alle -10 °C	alle -5 °C	alle -10 °C
2000	26	35	37	45
2030	40	61	40	58
2050	50	78	41	59
2100	79	350	53	90

Huokosverkoston suhteellisen kosteuden lisääntyessä betonin sähkönjohtavuus kasvaa huomattavasti. Huokosverkoston täyttyminen vedellä toisaalta myös vähentää hapen diffuusiota rakenteeseen. Betonin karbonatisoitumisen seurauksena käynnistyneen teräksen korroosion katsotaan yleisesti alkavan, kun suhteellinen kosteus betonissa ylittää 65–70 %. Korroosionopeus kasvaa merkittävästi suhteellisen kosteuden noustessa yli 80–85 % tason [7]. Näin sateelle alttiissa pinnoissa aktiivinen korroosio etenee nopeammin kuin sateelta suojatuissa pinnoissa.

Aktiivisen korroosion tarkastelu perustui aiempaan tutkimustietoon, jonka mukaan vuosittaisen sademäärän ylittäessä 480 mm suojaamattomassa betonissa olevien raudoitteiden korroosio on nopeaa ja sademäärän alittaessa 425 mm korroosionopeus on häviävän pieni [8]. Korroosionopeuden ja syöpymän vastaavuus perustuu kirjallisuustutkimukseen. Nopea korroosio vastaa 10 µm syöpymää vuodessa ja hidas 1 µm vuodessa. Betoniraudoitteiden korroosiolle kriittinen raja on asetettu 50 µm syöpymään [9].

Kuten taulukosta 2 voidaan havaita karbonatisoitumisen saavutettua raudoitteet, korroosio etenee Etelä-Suomessa varsin nopeasti niin pitkälle, että rakenteisiin syntyy näkyviä korroosioaurioita. Pohjois-Suomessa aktiivinen korroosio on merkittävästi hitaampaa myös tulevaisuuden ilmastossa huomattavasti vähäisempien vesi- ja räntäsateiden johdosta.

Sellaisten betonirakenteiden, mitkä eivät saa viistosaderasitusta, aktiivinen korroosio on huomattavan hidasta. Tästä syystä parvekelaattojen alapinnan nopeasta karbonatisoitumisesta huolimatta niissä esiintyy korroosiota huomattavan harvoin, mikäli laattojen alapintaan ei kohdistu kosteusrasitusta esim. huonosti toimivan parvekkeen vedenpoiston seurauksena.

Näin ollen parvekkeen käyttöä kriittisimmiksi rakenneosiksi muodostuvat viistosaderasitetut kaiteiden ulkopinta sekä pieliementin etureuna. Kaiteiden ulkopinnassa karbonatisoituminen saavuttaa 5 % 25 mm syvyydellä olevista raudoitteista 40 vuodessa ja pielissä 52 vuodessa. 20 mm peitepaksuudella vastaavat ajat ovat 26 vuotta ja 33 vuotta.

Yhteenveto raudoitteiden korroosiosta

Raudoitteiden näkyviin korroosioaurioihin kuluva aika on karbonatisoitumiseen kuluva aika (initiation period) laskettuna yhteen aktiivisen korroosion (propagation period) ajalla. Käytännössä ehjässä betonissa olevien raudoitteiden korroosio ei ala välittömästi kun karbonatisoitumisrintama on saavuttanut teräkset, vaan syvempää betonista tuleva huokosvesi on vielä alkalista ja näin huokosveden alkalisuus korjaa terästen rikkoutunutta passiivikalvoa vielä muutamia vuosia.

Korroosion käynnistymiseen vaaditaan riittävän korkea betonin kosteus sekä hapen läsnäoloa. Betonin suhteellisen kosteuden ollessa alle 85 % raudoitteiden korroosion on niin hidasta, ettei sillä ole mitään merkitystä [7 ja 10]. Korroosiovirta on niin alhainen, että raudoitteiden syöpymisnopeus on tuolloin <1 µm/a, mikä vastaa yli 50 vuoden korroosioaikaa näkyvien korroosioaurioiden aikaansaamiseksi.

Julkisivuelementeissä käytettävät pienet teräkset (Ø4 mm) eivät aiheuta niin suurta painetta, että betonipinta voisi rikkoutua yli 20 mm syvyydeltä. Käytännössä siis vain julkisivuelementtien pieliteräkset (Ø8 mm) sekä parvekkeissa käytettävät teräkset voivat aiheuttaa näkyviä korroosioaurioita myös 25 mm syvyydeltä.

Raudoitteiden korroosio tapahtuu huomattavasti nopeammin mikäli raudoitteiden

peitepaksuudet ovat työvirheiden seurauksena jääneet liian lähelle pintaa. Jo 15 mm syvyydellä olevissa raudoitteissa karbonatisoitumisen seurauksena tapahtuva korroosio on mahdollinen noin 20 vuoden käyttöänsä jälkeen.

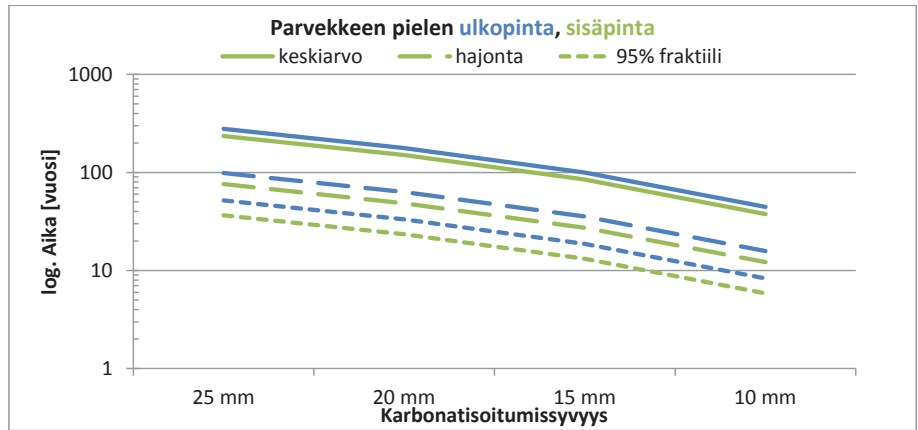
Betonin pakkasrapautuminen

Betonin pakkasrapautumiseen vaikuttavat ensisijaisesti valmistusvaiheessa betonin lisähuokostuksen onnistuminen sekä rakenteen käytön aikana vallitseva rasitustaso. Pakkaskestävyyden kannalta riittävän tiheä suojahuokostus saadaan aikaan käyttämällä betonin valmistuksen yhteydessä lisähuokostusainetta. Suuruusluokaltaan noin 10 µm suurempia huokosia voidaan pitää pakkaskestävyyden kannalta hyödyllisinä. Käytännössä keskimääräinen suojahuokosten halkaisija on suuruusluokkaa 150–300 µm. Suojahuokosten toimivuuden kannalta niitä tulee olla riittävän tiheästi, jolloin niiden keskinäinen maksimivälimatka on noin 500 µm.

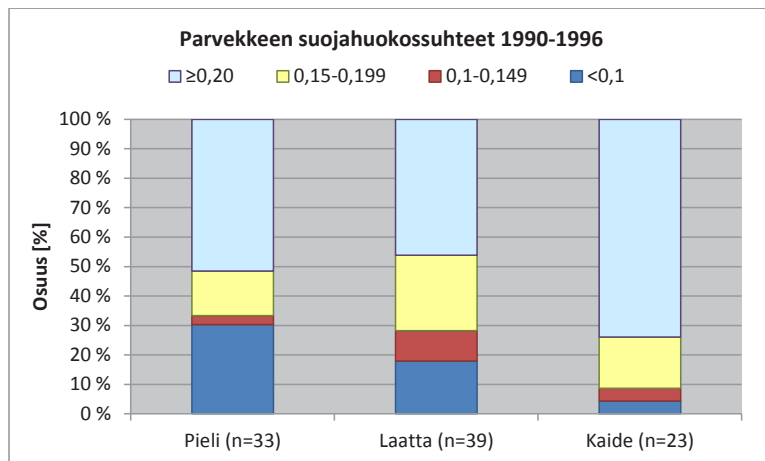
Julkisivuissa ja parvekkeissa käytetyn betonin lisähuokostuksen onnistumista tarkasteltiin BeKo-tietokannan 1990 ja sitä uudempien kohteiden näytetiedoista. Ohjeistus betonin lisähuokostamisesta on annettu vuonna 1976 ja betonin lujustasoja on nostettu nykytasolle vuoden 1989 säilyvyysohjeissa. BeKo-tietokannassa betonin lisähuokostuksesta kertova tieto on ilmoitettu betonin suojahuokossuhteena, mikä oli käytäntö vuoteen 2004 saakka. Suojahuokossuhteen tuli olla vähintään 0,20, eli 20 % betonin kokonaishuokoisuudesta tuli olla kapillaarisesti täyttymättömiä. Suojahuokossuhde 0,20 vastaa nykyvaatimuksen huokosjakoa 0,25 mm [11], mikä on vaatimuksena rasitusluokassa XF 1 100 vuoden käyttöänsä.

Betonin lisähuokostus on onnistunut varsin vaihtelevasti 1990-luvulla valmistuneissa betonijulkisivuissa ja parvekkeissa. Pakkaskestä-

3 Betonin karbonatisoitumiseen kuluva aika vuosina parvekepielessä terästen peitepaksuuden funktiona. (Pystyakseli on logaritminen.)



4 1990-luvulla valmistuneiden eri parveke-elementtien suojahuokossuhteet BeKo-tietokannan mukaan.



vyysvaatimus täyttyy vain noin 50 % elementteistä, ks. kuva 4. Suojahuokossuhteen ollessa <0,1 betoni ei ole pakkasenkestävää kosteusrasituksessa eli tavanomaisessa suomalaisessa ulko-olosuhteessa.

Betonin pakkasrapautumisen edellytyksenä on, että huokosverkosto on täyttynyt vedellä yli kriittisen pisteen [12] ja että jäätyminen tapahtuu riittävän alhaiseen lämpötilaan [13]. Kuivan betonin jäätyminen ei siis aiheuta pakkasrapautumista. Lahdensivun väitöstutkimuksessa [14] betonirakenteiden jäätymissulamissyklejä on tarkasteltu seuraavilla kriteerillä:

- vesi- tai räntäsade enintään 3 vrk ennen jäätymistä
- jäätymissulamissykliä määrä lämpötilan laskiessa alle -5°C
- pakkasrapautumisen tarkastelu ohuthie-näytteistä ($n = 245$ kpl)
- näytteet pesubetonijulkisivuista (ei sadeveden kapillaarista imeytymistä haittaavaa pintakäsittelyä).

Käytössä olevista rakenteista irrotetuissa betoninäytteissä ei pakkasenkestävässä betonissa (suojaus $\geq 0,20$) ole ohuthietutkimuksessa havaittu edes alkavaa pakkasrapautumaa yli 500 todellisissa luonnonolosuhteissa tapahtuvan jäätymissulamissyklin jälkeen.

Ohuthieessä havaittavaa alkavaa pakkasrapautumaa Jyväskylän ilmastossa havaittiin keskimäärin 388 syklin jälkeen ja Vantaan ilmastossa 307 syklin jälkeen. Sisämaassa jäätymissulamissykliä määrä on Etelä-Suomea suurempi mutta vähäisemmän sademäärä johdosta samaan vaurioasteeseen tarvittiin enemmän jäätymissulamissyklejä. Yleisen pakkasrapautumisen esiintymiseen tarvittiin vain noin 20 jäätymissulamissykliä enemmän, joten pakkasrapautuminen etenee alkuun päästyään varsin nopeasti. [14].

Taulukkoon 3 on koottu tulevaisuuden säätietoihin ja em. tutkimukseen perustuva arvio puutteellisesti pakkasrasitusta kestävä betonin ohuthieessä havaittavan alkavan pakkasrapautuman esiintymiseen tarvittavasta ajasta.

Ilmastomuutoksen seurauksen betonin märkänä tapahtuvan pakkasrasituksen suhteen olosuhteet helpottuvat eteläisellä rannikkoalueella merkittävästi jo 2030. Sen sijaan sisämaassa olosuhteet pysyvät nykytasolla ja sateisuuden lisääntyessä vielä ankarampina lähes vuosisadan loppuun saakka. Betonin lisähuokostuksen täydellinen epäonnistuminen (suojaus $< 0,10$) merkitsee varmaa pakkasrapautumista ennen tavoitellun käyttöajan päättymistä (vähintään 50 vuotta).

Betoninormien [15] vaatimuksissa betonin pakkasenkestävyyttä tulee testata laboratoriossa jäädytyskulutuskokeessa 100 kierrosta (XF 1, 50 vuotta) tai 300 kierrosta (XF 1, 100 vuotta ja XF 3, 50 vuotta). Laboratoriokokeessa kapillaarisesti kyllästetty koekappale altistetaan lämpötilavaihtelulle $+20^{\circ}\text{C} \dots -20^{\circ}\text{C}$. Koestus on siten huomattavasti ankarampi kuin luonnonolosuhteissa tapahtuvat jäätymissulamissyklit. Voidaankin todeta, että normien mukaisen koestuksen kestävä betoni kestää hyvin myös todellisissa ilmasto-olosuhteissa tavoitellun käyttöajan ajan myös tulevaisuudessa.

Päätelmät ja suositukset

Betonin karbonatisoitumisnopeus vaihtelee suuresti betonin ominaisuuksien mukaan. Betoni ei ole homogeeninen materiaali vaan sen ominaisuudet vaihtelevat mm. tiivistyksestä ja jälkihoidosta riippuen. Myös eri sekoituserien välillä voi olla suuria eroja mm. kiviaineksen kosteuspitoisuuseroista ja siten vesisementti-suhteesta riippuen. Betoniteknologialla on suuri vaikutus betonin kapillaarihuokoisuuteen. Yleisesti betonin karbonatisoituminen on hidasta tiiviissä matalan vesisementtisuhteen betoneissa, joiden jälkihoito on tehty huolellisesti.

Ilmastomuutos lisää sateiden määrää sekä tuulisuutta, jolloin julkisivuille tulee nykyistä



5,6 Parveke-elementeissä käytetään yleisesti tavanomaisia raudotteita, joten pitkän käyttöiän varmistamiseksi raudotteiden riittäviin peitepaksuuksiin on kiinnitettävä huomiota.

5

korkeampi viistosaderasitus. Aktiivisen korroosion nopeuteen sateisuuden lisääntymisellä on kuitenkin varsin vähäinen vaikutus, sillä Etelä- ja Keski-Suomessa aktiivinen korroosioaika on jo nykyisellään varsin lyhyt, luokkaa 6–8 vuotta, mikä nopeutuu 5–6 vuoteen vuosisadan loppuun mennessä.

Raudotteiden peitepaksuuden ollessa betoninormien vaatimalla tasolla (25 mm) näkyvät korroosioauriot ovat tavanomaisissa julkisivu- ja parvekerakenteissa hyvin harvinaisia myös tulevaisuudessa, vaikka karbonatisoituminen olisi edennyt raudotteiden syvyydelle saakka. Erityisesti sateelta suojattujen rakenteiden, kuten parvekelaattojen alapinnoissa tai parvekekaiteiden sisäpinnoissa olevien terästen korroosio on hyvin hidasta.

Liian lähelle (alle 15 mm) ulkopintaa jääneissä betoniteräksissä raudotteiden korroosioaurioita tulee esiintymään tulevaisuudessa ennen kuin suunnitteluvaiheessa tavoiteltu käyttöikä on saavutettu. Valmistusvaiheessa raudotteiden riittävät peitepaksuudet tulee varmistaa välikkein ja huolellisella asennustyöllä. Julkisivuissa on jo pitkään käytetty ruostumattomia raudotteita, jolloin karbonatisoitumisesta ei aiheudu korroosio-ongelmia. Ruostumattomien raudotteiden käyttöä tulee harkita myös sellaisiin kohteisiin, joissa vaadittavien peitepaksuuksien aikaansaaminen välikkeiden avulla on epävarmaa.

Sadevettä hylkivillä, mutta vesihöyryä läpäisevillä pinnoitteilla on mahdollista estää tai ainakin hidastaa merkittävästi raudotteiden korroosiota karbonatisoituneessa betonissa. Tällaisten pinnoitteiden käyttöä tulee edistää maalattavissa betonijulkisivuissa ja parvekeissa. On kuitenkin muistettava, että vain ehjä pinnoite suojaa alla olevaa betonirakennetta. Pinnoitteet ovat siis yksi huollettava kohde.

Betonin pakkasenkestävyyden suhteen nykyinen vaatimustaso on riittävä myös tulevaisuudessa. On kuitenkin huolehdittava siitä, että betonin lisähuokostus onnistuu aina. Suojaavat pinnoitteet alentavat betonin kosteustason niin alas, että pakkasrapautumien ei ole mahdollista.

Parvekkeiden vedenpoiston toimivuuteen on kiinnitettävä huomiota sekä suunnittelussa, toteutuksessa että rakennuksen huoltamisessa. Betonin karbonatisoitumisen seurauksena raudotteiden korroosio on ensimmäisenä mahdollista laatan alapinnan teräksissä. Korroosio ei kuitenkaan etene, mikäli rakenne pysyy kuivana. Parvekelasitus vähentää tehokkaasti parvekkeelle tulevan viistosateen määrää ja näin alentaa parvekkeen rasitustasoa.

Lähteet

- 1** Lahdensivu, J, Varjonen, S, Köliö, A. 2010. BeKo – Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden korjausstrategiat. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 148. 79 s.
- 2** Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Mäkelä, H., Hyvönen, R., Pirinen, P., Lehtonen, I. 2013. Rakennusfysiikan testivuosiensa sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa. Helsinki. Ilmatieteen laitos. Raportteja 1:2013. 48 s.
- 3** Bakker, R. 1988. Initiation period. In Schiessl, P. (editor) Corrosion of steel in concrete. London. Chapman and Hall. Pp. 22–55
- 4** Gjörv, O. E. 2009. Durability design of concrete structures in severe environments. Taylor & Francis. 220 p.
- 5** Page, C. L. 1988. Basic Principles of Corrosion. In: Schiessl, P. (ed.) Corrosion of Steel in Concrete. London. Chapman and Hall. Pp. 3–21
- 6** Parrott, L. J. 1987. Review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association. Wexham Springs. 42 p.
- 7** Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Stockholm. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Research 4:82. 304 p.
- 8** Mattila, J. 2003. On the durability of cement-based patch repairs on Finnish concrete facades and balconies. Tampere. Tampere University of Technology. Publication 450. 111 p.
- 9** Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J., Diez, J.M. 1998. Factors controlling cracking of concrete affected by



6

reinforcement corrosion. *Materials and Structures*. Vol. 31. Pp. 435–441

10 Andrade, C. 2002. Measurement of R_p on-site. In Weydert, R. (editor) *Corrosion of steel in reinforced concrete structures. Final reports of single projects 1997–2002*. Luxembourg University of Applied Sciences. Pp. 88–104

11 Koskiahde, A. 2004. An experimental petrographic classification scheme for the condition assessment of concrete in façade panels and balconies. *Materials Characterization*. Vol. 53. Pp. 327–334.

12 Fagerlund, G. 1977. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Tentative RILEM recommendation. Prepared on behalf of RILEM Committee 4 CDC. *Materiaux et Constructions* 1977 no 58. Pp. 217–229

13 Litvan, G. 1972. Phase transitions of adsorbates IV – Mechanism of frost action in hardened cement paste. *Journal of the American Ceramic Society* 55 (1). Pp. 38–42

14 Lahdensivu, J. 2012. Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. Tampere. Tampere University of Technology. Publication 1028. 117 p + app. 37 p.

15 Betoninormit 2012. BY 50. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 251 s.

Adequacy of durability requirements applied to concrete structures according to FRAME study

The objectives of the FRAME research project conducted at the Tampere University of Technology was to study e.g. how a significant increase in the amount of thermal insulation affects the structural performance and the joints of different types of structures and what effects the increase in precipitation resulting from the climate change has on detail design. As far as concrete structures are concerned, the key question for which an answer was sought in the study was: are the current durability requirements applied to concrete structures adequate in the future climate.

The carbonation rate of concrete varies a lot depending on the properties of the concrete. Carbonation is generally slow in high-density concrete, which has a low water-cement ratio and has been cured with care.

Climate change increases the amount of precipitation and wind speeds, which result in higher wind-driven rain stress on the facades. The rate of active corrosion increases in south and central Finland from the current 6–8 years to 5–6 years by the end of the century.

With reinforcement cover thickness on the level required by concrete standards (25 mm), visible corrosion damage will also in the future be extremely rare in normal facade and balcony

structures. Reinforcement with an inadequate cover thickness (less than 15 mm) will display in the future more corrosion damage on rebars before the end of the target lifespan. Adequate reinforcement cover thickness shall be assured by means of spacers and through careful erection work. The use of stainless reinforcement shall be considered also in applications where the achievement of the required cover thickness with spacers is uncertain.

Water repellent coatings with water vapour permeability can be used to prevent or at least to significantly retard the corrosion of reinforcement in carbonated concrete.

The current requirement level for the frost resistance of concrete is adequate also in the future.

Attention shall be paid in the design, implementation and maintenance of buildings to the functioning of water drains in balconies. Corrosion can attack reinforcement first on the rebars in the bottom surface of the concrete slab. However, corrosion will not propagate if the structure stays dry. Balcony glazing is an effective way to reduce the amount of wind-driven rain hitting the balcony and thus to decrease the stress level of the balcony.