

Elina Lahdensivu

**BETONIELEMENTTIKERROSTALOJEN
JULKISIVUJEN JA PARVEKKEIDEN
VAURIOITUMINEN 1990-LUVUN RAKEN-
NUSTUOTANNOSSA**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Emeritusprofessori Matti Pentti
TkT Toni Pakkala
Lokakuu 2022

TIIVISTELMÄ

Elina Lahdensivu: Betonielementtikerrostalojen julkisivujen ja parvekkeiden vaurioituminen 1990-luvun rakennustuotannossa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto

Lokakuu 2022

Betonijulkisivujen ja parvekkeiden systemaattisia kuntotutkimuksia on tehty yli 30 vuoden ajan. Tutkimukseen on kerätty tietoa betonin säilyvyysominaisuuksista ja vaurioitumisesta 1990-luvulla valmistuneiden rakennusten kuntotutkimusraporteista. Tässä tutkimuksessa selvitetään, miten 1990-luvun taitteessa voimaan tulleet betonin käyttöikä- ja säilyvyysohjeistukset ovat vaikuttaneet sen pitkäaikaiskestävyyteen julkisivuilla ja parvekkeilla.

Voimaan tulleita ohjeistusmuutoksia olivat mm. ympäristöluokkien muutos ja betonin lujuusluokan valinnan sitominen niihin. Lujuusluokkavaatimukset vaihtelivat välillä K25-K45. Myös betonin kloridipitoisuudelle asetettiin raja-arvoja. Pakkaskestävyysvaatimukset tulivat voimaan vuoden 1980 Betoninormissa ja ne olivat myös sidottu ympäristöluokkiin. Vaatimukset eivät olleet kuitenkaan yksiselitteiset. Vuonna 1990 tuli voimaan ohjeistus, jonka mukaan sandwich-elementin ulkokuoren raudoitteiden tuli olla ruostumatonta terästä, mikäli suojabetonipeitepaksuusvaatimuksia ei voitu täyttää. Peitepaksuusvaatimus on pysynyt 25 mm:ssä vuodesta 1977 asti, mutta myöhemmissä ohjeistuksissa siihen on tullut erikoistapauksien tarkennuksia.

Suomessa betonin vaurioitumiseen vaikuttaa eniten viistosade ja sen jälkeiset pakkassyklit aiheuttaen betonin halkeilua. Betonin karbonatisoitua raudoitteiden kemiallinen suojaus katoaa ja ne alkavat ruostua. Näiden lisäksi betonista voi löytyä klorideja ja erilaisia huokostäytteitä, jotka voivat lyhentää betonirakenteen käyttöikää.

1990-luvun taitteessa voimaan tulleiden ohjeistuksien vaikuttavuutta tutkittiin vertaamalla 1990-luvun rakennuskantaa vanhemman rakennuskannan betonin ominaisuuksiin.

Kaikki betonin säilyvyysominaisuudet olivat parantuneet vanhempaan rakennuskantaan verrattuna. Karbonatisoituminen on hidastunut sekä julkisivuilla että parvekkeilla. Hitaan karbonatisoitumisen osuus on kasvanut ja vastaavasti nopean osuus on pienentynyt. Myös peitepaksuudet ovat parantuneet huomattavasti ja alle 20 mm peitepaksuuksia ei enää juuri ole. Tästä syystä tavoiteltu käyttöikä saavutetaan todennäköisemmin.

Betonin huokostus pakkaskestävyyden saavuttamiseksi on parantunut, mutta täysin huokostamatonta betoniakin on havaittavissa. Tästä huolimatta pakkasrapautumisaste on pysynyt hyvin pienenä sekä julkisivuilla että parvekkeilla. Myös vetolujuustulokset ovat parantuneet ja osoittavat pakkasrapautumisen olevan vähäistä.

Kloridipitoisuudet ovat hyvin maltillisia ja vain yksi parvekenäyte ylitti nykyisen pitoisuusrajan 0,05 p-%.

Huokostäytteiden määrä on vähentynyt. Yleisin huokostäyte oli ettringiitti. Ettringiitin ja pakkasrapautumisen väliltä löydettiin yhteys. Kun huokosissa on ettringiittiä, pakkasrapautuminen on todennäköisempää ja suuriasteisempää kuin betonilla, jonka huokosissa ei ole täytteitä.

Alkali-kiviainesreaktion riski on suurempi uudemmassa rakennuskannassa. Luokkaan II, mahdollisesti reagoivia kivilajeja löydettiin 70 % näytteistä ja luokkaan III, todennäköisesti reagoivia kivilajeja 4 %. Tulosten perusteella laboratoriot eivät voi enää etsiä vain reaktioon yhdistettyä geeliä. Niiden on etsittävä myös muita AKR:oon viittaavia merkkejä, kuten hienorakeista kvartsia.

Avainsanat: betoni, kuntotutkimus, vaurioituminen, karbonatisoituminen, pakkasrapautuminen, huokosrakenteen täyteisyys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Elina Lahdensivu: Deterioration of concrete facades and balconies constructed in the 1990s
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
October 2022

Systematic condition assessments have been performed for concrete facades and balconies for more than 30 years. Data from concrete's durability properties and deterioration mechanisms have been gathered from buildings erected in the 1990s. The scope of this study is to determine if the instructions, which have come into force in 1990s, had any effect on durability of concrete.

Changes that came into force included new environmental classes and the strength class of concrete was now tied to those. The required concrete strength class ranged between K25-K45. The maximum chloride content was also limited. A requirement for freeze-resistance came into effect in 1980 and was tied to environmental classes. However, the requirements were not unambiguous. In 1990 a requirement for rust resistant steel use in sandwich elements' outer shell if the cover depth requirements could not be met. The cover depth requirement has stayed as 25 mm since 1977 but later instructions have specified cover depths for unusual cases.

In Finland the deterioration of concrete is mostly affected by wind-driven rain and freeze-thaw cycles that follow causing cracking of concrete. As concrete carbonizes the chemical shield of reinforcement neutralizes and rusting can begin. Alongside these, chlorides and pore fillers can be found that can shorten the service life of a structure.

The effectiveness of the durability instructions was investigated by comparing the newer buildings' properties to older building stock.

All the properties of concrete had improved when compared to the older building stock. Carbonation has slowed for facades and balconies. The share of slow carbonation has increased and the share for fast carbonation decreased. The cover depths have also improved and meet the requirements more often. Cover depths less than 20 mm are rarely found anymore. For these reasons the aimed service life is more likely to be met.

The air-entrainment of the concrete has improved making it more freeze-thaw resistant but completely non-air-entrained concrete can still be found. Despite that the freeze deterioration degree has stayed low for both facades and balconies. Tensile strength of concrete has improved confirming that freeze damage is not common.

The chloride content of concrete has remained low and only one sample from a balcony exceeded the limit of 0.05 w-%.

Secondary void fillings have decreased. The most commonly found one is ettringite. A connection between ettringite and freeze-thaw damage was found. Freeze-thaw damage is more likely when ettringite is present and the degree of it is more severe than in concrete without pore fillers.

The risk for alkali-silica reaction is higher in newer building stock. Aggregates from class II, i.e., possibly reactive aggregate, were found in 70% of the samples and from class III, i.e., likely reactive aggregate, in 4%. With these results it is obvious that laboratories cannot only look for the gel associated with the reaction. Other signs e.g., fine grained quartz should be looked for.

Keywords: Concrete, Condition Assessment, Deterioration, Carbonation, Freeze-thaw damage, Secondary void fillings

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Haluan kiittää työni tarkastajia emeritusprofessori Matti Penttiä sekä tutkijatohtori Toni Pakkalaa työn kommentoinnista ja arvioinnista. Kiitos myös A-Insinööreille työssä käytetystä aineistosta sekä vertaistuesta kollegoille, jotka ovat itsekin diplomityön tehneet.

Kiitos perheelle tsemppaamisesta etenkin, kun työn tekeminen tuntui vaikealta. Science Sundayt jatkuvat vielä tämänkin työn loppuun saaton jälkeen muutaman tieteellisen artikkelin merkeissä.

Kiitos ystäville, kun varmistitte, että elämässä on muutakin tekemistä kuin diplomityö.

Tampereella, 26.10.2022

Elina Lahdensivu

SISÄLLYSLUETTELO

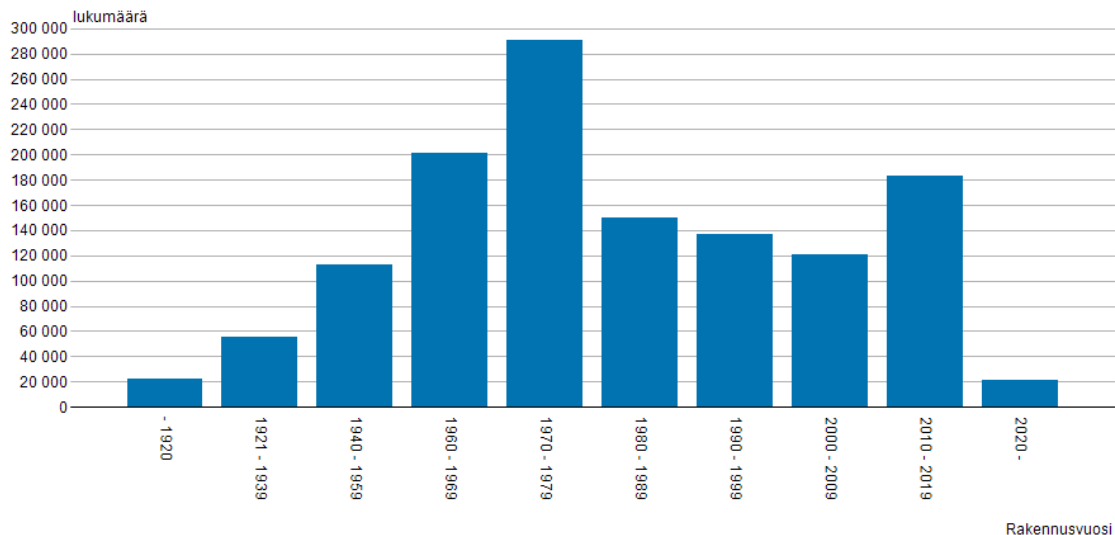
1. JOHDANTO	1
1.1 Julkisivu- ja parveke-elementtien kehitys	1
1.2 Ohjeistuksen kehitys	4
1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	6
2. JULKISIVUJEN JA PARVEKKEIDEN VAURIOMEKANISMIT	8
2.1 Julkisivujen rasitukset	8
2.2 Raudotteiden korroosio	12
2.2.1 Betonin karbonatisoituminen	13
2.2.2 Kloridit	16
2.3 Betonin rapautuminen	18
2.3.1 Pakkasrapautuminen	18
2.3.2 Muut ilmiöt	20
2.4 Aiempi tutkimus suomalaisesta rakennuskannasta	22
2.5 Aiempi tutkimus ulkomaisesta rakennuskannasta	25
2.6 Yhteenvedo	27
3. TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT	28
4. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	31
4.1 Peitepaksuudet	31
4.2 Karbonatisoituminen	33
4.2.1 Karbonatisoituminen eri vuosikymmenillä	43
4.2.2 Näkyvät korroosiovauriot	46
4.3 Karbonatisoitumisen ja peitepaksuuden vaikutus käyttöikään	48
4.4 Kloridipitoisuus	51
4.5 Pakkaskestävyys	53
4.5.1 Pakkasrapautuminen ohuthieestä	56
4.5.2 Pakkasrapautuminen vetolujuuksista	61
4.5.3 Betonin rapautumisesta johtuvat näkyvät vauriot	65
4.5.4 Pakkasrapautumisen yhteys pakkaskestävyyteen	66
4.6 Huokostäytteet	69
4.6.1 Huokostäytteiden yhteys pakkasrapautumiseen	70
4.6.2 Alkali-kiviainesreaktion mahdollisuus otannassa	71
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	75
5.1 Lisätutkimustarpeet ja kehitysehdotukset	75
LÄHTEET	77
LIITE A: KOHDETIEDOT	81
LIITE B: PEITEPAKSUUSJAKAUMAT	83
LIITE C: HUOKOSTÄYTE-PAKKASRAPAUTUMISKUVAAJAT	84

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AKR	alkali-kiviainesreaktio
BeKo	Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden korjausstrategiat -tutkimus, jonka on toteuttanut Tampereen yliopiston Rakenteiden elinkaaritekniikan tutkimusryhmä vuosina 2006–2009. Tutkimuksessa syntynyttä tietokantaa nimitetään BeKo-tietokannaksi.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, kansainvälinen ilmastopaneeli
p-%	painoprosentti
RH	relative humidity, suhteellinen kosteus
v/s-suhde	vesi-sideainesuhde

1. JOHDANTO

Tilastokeskuksen (2020) mukaan Suomen kerrostaloasuntorakentaminen lähti huomattavaan nousuun teollistumisen ja siitä syntyneen kaupungistumisen myötä. Tämän seurauksena aloitettiin elementtirakentaminen 1950- ja 1960-luvulla. (Hytönen ja Seppälä 2009, s. 214) Huomattava osa nykyisestä kerrostaloasuntokannastamme on rakennettu 1970-luvulla, kuten kuvasta 1 voidaan havaita. Näinä vuosikymmeninä rakentamisen tavoitteena oli tehokkuus, moduulimitoitus ja standardointi (Neuvonen 2006, s. 143).



Kuva 1. Kerrostaloasuntojen määrä Suomessa rakennusvuoden mukaan (Tilastokeskus 2020).

Huippuvuosien jälkeen asuntotuotanto on selvästi hidastunut. 2010–2019 välisenä aikana asuntoja on rakennettu kolmanneksi eniten tilastokauden aikana. Tähän on johtanut jatkuva kaupungistuminen, matala korkotaso sekä asuntosijoittaminen. Uudisrakentaminen painottuu pääkaupunkiseudulle sekä yliopistokaupunkeihin. (Roti 2017, s. 9)

1.1 Julkisivu- ja parveke-elementtien kehitys

Julkisivuelementtejä on kehitetty 1960-luvulta alkaen elementtien käytön yleistyttyä. Tämän tutkimuksen kannalta oleellisempaa on 1980- ja 1990-luvun kehitys. Julkisivutyyppeinä käytettiin sandwich- ja kuorielementtejä 1980-luvulta eteenpäin. Sandwich-elementin ulkokuoren paksuus on vaihdellut 50–100 mm välillä riippuen sen pintamateriaalista. Pintana käytettiin mm. erilaisia klinkkeri- ja keraamisia laattoja, pesubetonia sekä

hierrettyä pintaa. 1990-luvulla julkisivujen käsittelyvaihtoehdot laajenivat huomattavasti. 1980-luvun lopussa lämmöneristekerros on ollut noin 120 mm paksu, mutta nykyisin 220 mm luokkaa. Taulukossa 1 näkyy U-arvon vaihtelu rakennusmääräyskokoelman mukaisesti eri vuosina, joka on vaikuttanut lämmöneristeen paksuuden vaihteluun. Sisäkuoren paksuus on kantavilla seinillä 150 mm ja ei-kantavilla 70–80 mm. (Neuvonen 2015, s. 45–46)

Taulukko 1. Ulkoseinän U-arvot rakennusmääräyskokoelman mukaisesti (muokattu lähteistä Boström et al. 2012, s. 17; Hytönen ja Seppänen 2009, s. 184; elementtisuunnittelu.fi 2020b)

Vuosikymmen ja rakennusmääräyskokoelma	1976, C3	1978, C3	1985, C3	2003, C3	2007, C3	2010, C3	2012, D3
Ulkoseinän U-arvo [W/m ² K]	0,40	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17	0,17
Lämmöneristeen paksuus [mm]	90	120	120	160	160	220	220

Kuorielementit ovat erillään kantavasta rungosta. Niiden paksuus on vaihdellut 80–150 mm välillä. Niiden käyttö koko julkisivun materiaalina on kuitenkin jäänyt vähäiseksi, sillä sisä- ja ulkokuori rakennetaan erikseen ja siten rakentaminen kestää kauemmin ja kustannukset ovat korkeammat. Kuorielementtejä käytettäessä voidaan varmistua julkisivun tuuletuksesta erillisten rakennusvaiheiden takia. (Elementtisuunnittelu.fi 2020a)

1970-luvun parvekkeet olivat usein pieliseinin kannatettuja, joko sisäänvedettyjä tai ulkonevia. 1980- ja 1990-luvuilla parvekkeisiin alkoi tulla variaatiota ja pieliseinin tilalla käytettiin myös pilareita. Lisäksi ripustetut parvekkeet yleistyivät. 1990-luvulla yleistyi parvekelasitusten käyttö uudiskohteissa, mikä vähensi parvekkeiden kosteusrasitusta huomattavasti. Samoihin aikoihin betonikaiteet alkoivat väistyä teräskaiteiden tieltä. (Neuvonen 2015, s. 51–52)

Taulukossa 2 on esitetty betonielementtien rakennepaksuuksia sekä yleisiä raudoituksia. Paksuudet ovat vaihdelleet eri vuosikymmeninä. Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen 1990-luvun kerrostalo.

Taulukko 2. Tyypillisten elementtien paksuudet ja raudoitukset suomalaisissa rakennuksissa (muokattu lähteestä Koliö 2016, s. 15).

Rakenne	Paksuus	Rauditus	Huomiot
Sandwich-elementti	Ulkokuori 40–70 mm Sisäkuori, kantava 150 mm Sisäkuori, ei-kantava 80 mm	Ulkokuori: Verkko 3–4 mm #150 Pieliteräkset 6–8 mm Ansaat 600 mm ja- kovälillä	Eristepaksuus vaihtelee taulukon 1 mukaisesti. Tuuletusväli puutuu usein
Parvekelaatta	140–200 mm, kal- listettu yläpinta	10–12 mm #100– 150 alapinnassa	Vedenpoistotapa vaihtelee
Parvekepieli	150–180 mm	Pieliteräkset 10–12 mm	Alle 8-kerroksiset parvekkeet voidaan mitoittaa raudoittamattomina.
Parvekekaide	70–85 mm	6–8 mm #150 mo- lemmilla pinnoilla	Usein valetaan laatan kanssa yhdeksi elementiksi.



Kuva 2. Tyypillinen 1990-luvun kerrostalo, jossa julkisivuelementtien pintatyypinä on sekä valkobetonia että klinkkerilaattaa (A-Insinöörit Oy).

1.2 Ohjeistuksen kehitys

Betoninormit ovat ohjanneet betonirakenteiden suunnittelua siitä lähtien, kun ensimmäiset koko maata koskevat normit julkaistiin vuonna 1929 (Neuvonen 1989, s. 206). Vuoden 1965 Betoninormissa rakenteiden ympäristöolosuhteet jaettiin neljään luokkaan, mutta niillä ei ollut tunnuksia (A 46 1965, s. 20). Vuoden 1980 Betoninormissa ympäristöluokkia oli kolme ja niillä oli tunnuksia Y1-Y3 (BY 15 1980, s. 54). Betonirakenteiden säilyvyysohjeiden myötä ympäristöluokkien määrä lisääntyi ja ne noudattelivat pitkälti vanhoja luokkia (BY 32 1989, s. 3). Betoninormin puolella kuitenkin mainittiin edelleen vanhat luokat. Vuonna 2004 ympäristöluokkiin tuli suuri muutos ja uudet rasitusluokat eivät ole suoraan rinnastettavissa vanhoihin. Lisäksi niitä valitaan rakenteelle samanlaisesti useita, toisin kuin ennen. Uudet luokat pohjautuvat SFS-EN 206 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus -standardiin. (BY 50 2004, s. 3) Taulukossa 3 on esitetty Y- ja E-rasitusluokkien suora yhteys sekä nykyisten X-luokkien paras mahdollinen sovittaminen niihin.

Taulukko 3. Rakenteiden ympäristö olosuhdeluokat eri aikakausina.

RakMK B4		BY 32, 1989	BY 50, 2004	
Y3	Helpot olosuhteet	E1	Suhteellinen kosteus < 80 %, asuin- ja toimistorakennuksen sisätilat	X0
Y2	Tavalliset olosuhteet, ei suolarasitusta	E2a	RH > 80 %, ei pakkasrasitusta, sisä- ja ulkotilat	XC1-XC4
		E2b	Pakkasrasitus kosteissa oloissa, julkisivut, parvekkeet, muurit, sokkelit	
		E2c	Perustukset, ei aggressiivisessa ympäristössä	
Y1	Vaikeat olosuhteet, suolarasitus	E3a	Meriveden vaikutuksen alaisena, ei pakkasrasitusta	XD1-XD3, XS1-XS3, XF1-XF4, XA1-XA3
		E3b	Meriveden vaikutuksen alaisena, pakkasrasitus	
		E4	E3a ja E3b olosuhteiden lisäksi kemiallinen rasitus	

Betonin säilyvyysominaisuuksiin alettiin kiinnittää huomiota normitasolla vasta 70-luvulla. Julkisivubetonin lujuusluokka on ollut Betoninormissa 1977 (BY 10 1977, s. 100) sekä julkisivujen säilyvyysohjeessa (BY 9 1976, s. 33) K25, joka vastaa nykyistä C20/25-lujuusluokkaa. Lisäksi säilyvyysohje suosittelee vaikeissa olosuhteissa minimilujuudeksi K30 (C25/30). Julkisivuelementit oletetaan normaaleihin olosuhteisiin, kun niitä ei aseteta pakkasrasitukselle alttiiksi ennen kuin betoni on saavuttanut 40–60 % nimellislujuudestaan. Normeissa lujuusluokkavaatimus on pysynyt samana 2000-luvulle asti. Vuoden 1989 säilyvyysohjeen myötä ympäristöluokkia oli useampia ja siinä julkisivuille suositeltiin lujuutta K30 (C25/30) (BY 32 1989, s. 5). Seuraavassa uudistuksessa lujuusluokka nostettiin arvoon K45 (C35/45) (BY 32 1992, s. 6).

Vaatimukset betonin enimmäiskloridipitoisuuksista tulivat vuoden 1980 Betoninormissa, ennen sitä betonin ainesosien kloridipitoisuudelle ei ole annettu lukuarvoja (BY 10 1977, s. 98–99). Kyseisen Betoninormin mukaan kiviaineksen kloridipitoisuus ei saa ylittää 0,02 % painoprosenttia vesiliukoisena kloridina ilmoitettuna (BY 15 1980, s. 85). Lisäksi betonissa käytettävä vesi ei saa sisältää klorideja yli 0,03 p-%. Ympäristöluokassa Y1 (vaikeat olosuhteet) ei saa näiden lisäksi olla klorideja sisältäviä ainesosia. Luokissa Y2 ja Y3 on kloridien sallittu kokonaismäärä 1 % sementin painosta (BY 15 1980, s. 87). Tähän sisältyvät kiviaineksen ja veden kloridipitoisuudet. Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus (BY 32 1989, s. 5) sallivat vain 0,4 % klorideja sementin painosta ympäristöluokissa E2-E4. Luokassa E1 kloridien sallittu kokonaismäärä on 1 % sementin painosta. Vuoden 1992 säilyvyysohjeessa kloridien sallittu määrä kiristyi luokkien E2-E4 osalta 0,2 %:iin sementin painosta (BY 32 1992, s. 7). Kloridien vaikutusta betonin pitkäaikaiskestävyyteen käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.2.

Ensimmäisen kerran pakkasenkestävälle betonille annettiin suojahuokossuhteelle ohjearvot vuonna 1976. Normaaleissa olosuhteissa se oli 0,15 ja vaikeissa 0,20. (BY 9 1976, s. 33) Ympäristöluokassa Y1 (vaikeat olosuhteet) vaaditaan rakenteelle pakkasenkestävyyttä, joka Betoninormin mukaan on riittävä, kun suojahuokossuhde on 0,20. Y2 luokalle suunnittelijan tuli selvittää tarpeelliset vaatimukset, Y3 luokalla ei pakkasenkestävyyksivaatimusta ollut. Julkisivubetonille asetettiin kuitenkin aina pakkasenkestävyyksivaatimus, vaikka se kuului ympäristöluokkaan Y2. (BY 15 1980, s. 86) Vuoden 1989 säilyvyysohjeessa (BY 32 1989, s. 4) julkisivuissa käytettävälle betonille suositeltiin samaa 0,20 suojahuokossuhdetta. Seuraavassa säilyvyysohjeessa (BY 32 1992, s. 6) suojahuokossuhde alle lujuusluokan K40 betonille oli 0,20 ja sitä korkeammille 0,17. Vuoden 1993 Betoninormissa ympäristöluokalle Y1 vaadittu suojahuokossuhde oli 0,25 (BY 15 1993, s. 72) ja samaa suositeltiin BY 32:ssa (1989, s. 5; 1992, s. 6). Vuonna 2004 beto-

ninormit uudistettiin täysin ja rasisluokalle XF1 huokosjaon on oltava $\leq 0,27$ mm ja rasisluokalle XF3 $\leq 0,23$ mm (BY 50 2004, s. 234). Suojahuokosten määrän lisäksi huokosjaolla on merkitystä. Laadukkaassa betonissa niiden jako on $\leq 0,25$ mm ja epäonnistuneesti huokostetussa betonissa $\geq 0,40$ mm (Koskiahde 2004). Suojahuokosten merkitystä betonin pakkasenkestävyyteen käsitellään luvussa 2.3.1.

Ruostumattoman teräksen käyttöön julkisivuelementeissä ohjeistettiin ensimmäisen keran vuoden 1977 Betoninormissa. Silloin ansaiden eli sisä- ja ulkokuoren yhdistävien terästen tuli olla korroosion kestävästä aineesta. Lisäksi muut elementtien kiinnikkeet tulivat olla ruostumattomia. (BY 10 1977, s. 102) Hytösen ja Seppäsen mukaan ruostumatonta diagonaalia olisi käytetty jo 1960-luvun lopussa (Hytönen ja Seppänen 2009, s. 185). Vuoden 1990 Betoninormissa kaikki metalliosat, joiden suojabetonipeitepaksuus ei yllä vaatimuksiin, tulee olla korroosion kestävästä terästä (BY 15 1990, s. 90). Vuoden 1993 Betoninormissa ansaiden ulkokuoren paarteen tuli olla samaa ainetta kuin itse ansas (BY 15 1993, s. 76).

Raudoituksen suojabetonipeitevaatimus on pisimpään elementin käyttöiän kannalta voimassa ollut vaatimus. Se on ollut 25 mm vuoden 1977 Betoninormista lähtien. Kyseisessä Betoninormissa minimipeitepaksuus oli kuitenkin vain raudoitustangon paksuinen (BY 10 1977, s. 76). Betoninormissa (BY 15 1980, s. 86) betonipeitepaksuuksille esitettiin korjausarvot. Peitepaksuutta tuli lisätä 5 mm, jos raudoitus on korroosioherkkää, toisin sanoen, jos kyseessä on jänneteräs. Sitä sai kuitenkin heikentää 10 mm, jos raudoitusta ei ollut huomioitu kapasiteetteja laskettaessa. Tällainen tapaus on julkisivun ulkokuori, sillä ne eivät ole kantavia. 1993 peitepaksuutta lisättiin 5 mm, jos betonin lujuus alitti 5 MPa suositellun lujuusluokan ja 10 mm, jos lujuusaliitus oli 10 MPa. Peitepaksuuden vähennys ei ollut sallittua. Samat ehdot pätevät myös vuoden 2000 Betoninormissa, 15 mm lisäyksellä, jos raudoitus on korroosioherkkää ja lujuus 10 MPa pienempi kuin suositeltu (BY 15 2000, s. 77). Vuonna 1993 Y1-luokassa (vaikeat olosuhteet) peitepaksuus nostettiin 35 mm:iin, Y2-luokassa sen pysyessä 25 mm:ssä. Säilyvyysohjeessa samat peitepaksuudet pätevät.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan vuodesta 1990 eteenpäin valmistuneita, betonisia kerrostaloja ja julkisia rakennuksia. Kansallisen BY 42 Tilaajan ohjeen mukaisesti ensimmäinen kuntotutkimus olisi suositeltavaa tehdä noin 15–20 vuotta rakentamisen jälkeen eli ensimmäinen kuntotutkimus pitäisi olla tehtynä kaikkiin 1990-luvulla valmistuneisiin kerrostaloihin (BY 42 Tilaajan ohje 2020, s. 6).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on vastata seuraaviin kysymyksiin

- Ovatko betonin säilyvyysominaisuuksia koskevat ohjeet vaikuttaneet toteutuneisiin betonin säilyvyysominaisuuksiin?
- Millaisia 1990-luvun rakennusten betonin säilyvyysominaisuudet ovat?
- Onko 1990-luvun julkisivuissa ja parvekkeissa havaittavissa vaurioitumista?
- Kuinka pitkä käyttöikä voidaan olettaa saavutettavan 1990-luvun julkisivu- ja parvekerakenteilla?

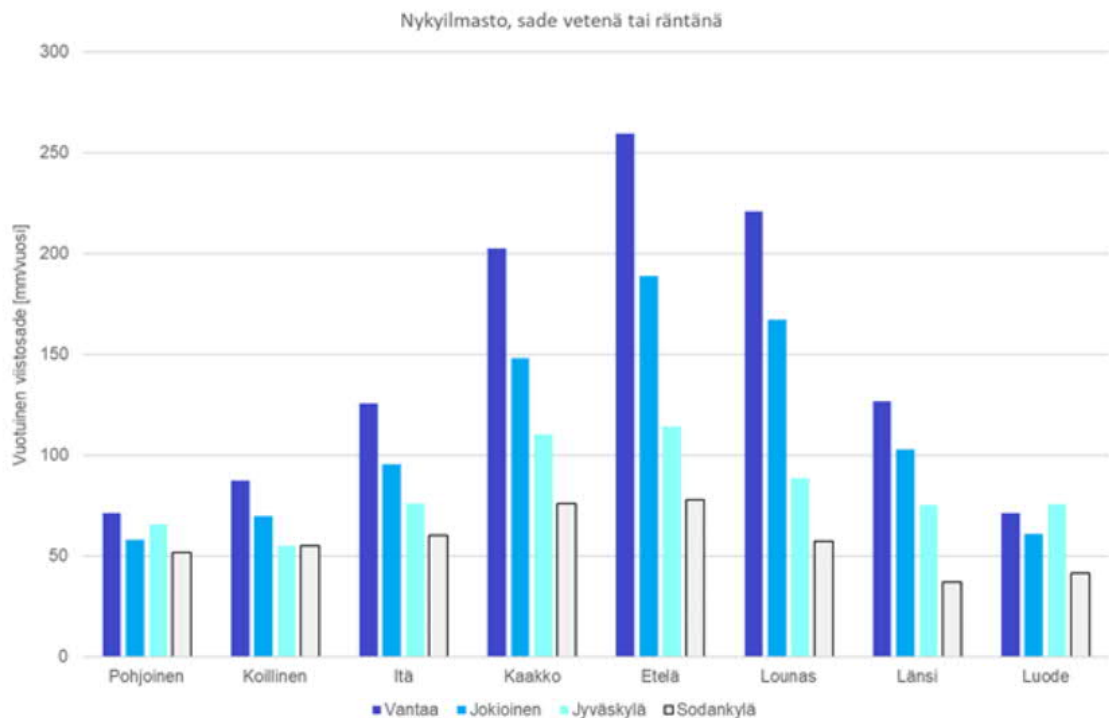
Tutkimuksessa pyritään saamaan yleiskäsitys 15–30 vuotta vanhojen betonijulkisivujen ja -parvekkeiden kunnosta sekä vastaamaan kysymyksiin. Tutkimus rajautuu 1990- ja 2000-luvuilla rakennettuihin rakennuksiin, sillä niiden kuntotutkiminen ja korjaus tulevat olemaan ajankohtaisia. Käytössä ollut tutkimusaineisto painottuu Etelä-Suomeen, etenkin pääkaupunkiseudulle.

2. JULKISIVUJEN JA PARVEKKEIDEN VAURIO- MEKANISMIT

Luvussa käsitellään betonirakenteiden vauriomekanismeja sekä niihin johtavia säärasituksia. Lisäksi tarkastellaan aiheesta löytyvää aiempaa tutkimusta Suomesta ja ulkomailla.

2.1 Julkisivujen rasitukset

Suomen rakennukset altistuvat pohjoiselle ilmastolle. Suomessa sataa paikkakunnasta riippuen 400–700 mm vuodessa ja sade on keskittynyt syksyyn ja talveen (Pirinen et al. 2012, s. 20–57). Saderasitus ei ole kuitenkaan tasaista rakennusten jokaiselle julkisivulle, vaan tietyt ilmansuunnat saavat enemmän viistosadetta osakseen. Kuvassa 3 on esitetty vuotuiset viistosademäärät nykyilmastossa neljässä eri kaupungissa.



Kuva 3. Vuotuiset viistosademäärät eri ilmansuunnille neljässä eri kaupungissa (Laukkarinen et al. 2022, s. 93)

Kuten kuvasta 3 havaitaan, tuulen takia viistosade rasittaa kaakko-lounaisakselin julkisivuja. Lisäksi viistosaderasitus on huomattavasti voimakkaampaa Etelä-Suomessa ja erisuuntaisten julkisivujen välillä erot ovat suuremmat kuin Pohjois-Suomessa. Vallitsevista tuulista johtuen kyseisten ilmansuuntien julkisivut ovat rasitetumpia ja siten alttiimpia

pakkasrapautumiselle kuin muihin ilmansuuntiin olevat julkisivut (Pakkala et al. 2019). Sade ei rasita julkisivua kuitenkaan tasaisesti, kuten Pakkala et al. (2016) tutkimuksessaan osoittaa. Esimerkkirakennuksen eteläsivu oli kaikista rasitetuin ja kyseisen sivun länsipää rasitetumpi kuin itäpää. Vain pohjoiseen päin oleva julkisivu oli vaakasuunnassa tasaisesti rasittunut. Kaikissa ilmansuunnissa rakennusten yläosat ovat alttiimpia sateille kuin alaosat. Esimerkissä rakennus sijaitsi rannikkoalueella, mutta sama tarkastelu tehtiin myös muille alueille ja tulokset olivat samat. Koska rannikkoalueiden tuulet ovat voimakkaampia, on viistosateen osuus sateesta suurempi kuin sisämaassa. Täten julkisivujen saderasitus on hieman suurempaa. Kun tuulee idän ja pohjoisen suunnasta, sade tulee yleensä lumena (Ruosteenoja et al. 2013, s. 33). Lumi ei imeydy kapillaarisesti julkisivuun, joten lumi ei siten vaikuta rakenteen kastumiseen ja sen seurauksena vaurioitumiseen.

Sen lisäksi, että sade kastelee julkisivun, se ei pääse syksyn aikana kuivumaan. Ilman suhteellinen kosteus pysyy noin 80 %:ssa paikkakunnasta riippuen ja täten julkisivu märkänä (Pirinen et al. 2012, s. 20–57). Kun julkisivu ei pääse kuivumaan ja ilman lämpötila laskee alle 0 °C:een, betonin huokosissa oleva vesi alkaa jäätyä. Mitä useammin huokosverkostossa oleva vesi jäätyy ja sulaa talven aikana, sen ankarampi rasitus on pakkasrapauman syntymisen kannalta. Taulukossa 4 on esitetty pakkassykliin lukumäärä kunkin rajalämpötilan suhteen.

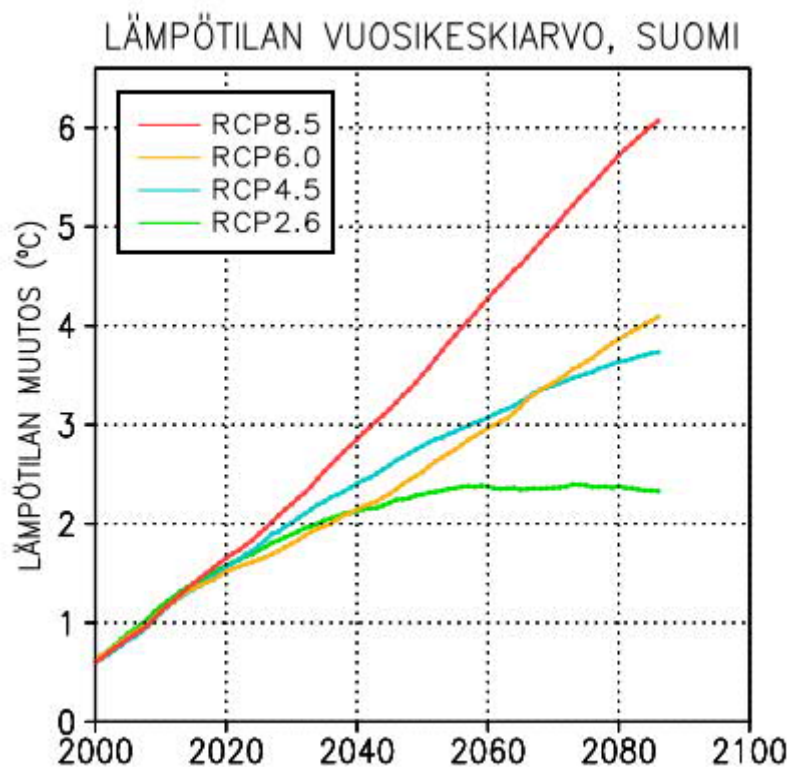
Taulukko 4. *Pakkassykliin keskimääräinen lukumäärä rajalämpötilojen alapuolelle 48 tunnin sisällä sadejakson loppumisesta vuosina 1980–2009 (Ruosteenoja et al. 2013, s. 34; Pirinen et al. 2012, s. 22; 34).*

Paikkakunta	0 °C	-2 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C	Pakkaspäivien kokonaismäärä, jolloin $T \leq 0$ °C
Vantaa	37,8	23,5	11,7	4,0	1,3	0,2	66
Jyväskylä	30,4	20,2	10,4	4,2	1,6	0,5	91

Kuten taulukosta 4 nähdään, laskee lämpötila usein alle 0 °C:een sadejakson jälkeen. Tätä voi tapahtua syksyisin ja keväisin yön aikana, päivälämpötilan ollessa kuitenkin plussan puolella. Lämpötilan laskeminen 48 tunnin sisällä vesi- tai räntäsateesta -20 °C asteeseen on harvinaista sekä rannikolla että sisämaassa. Betonin kapillaarihuokosvesi ei vielä jäädy lämpötilan laskiessa 0 °C asteeseen, jos veteen on liuennut suoloja. Jäätyminen tapahtuu silloin noin -3...-4 °C:ssa. Tämän lisäksi huokosvesi pystyy alijäähtymään, jolloin jäätyislämpötila on vieläkin alhaisempi. (BY 201 2018, s. 117–118) Pakkassykliin merkityksestä on kerrottu enemmän luvussa 2.3.1.

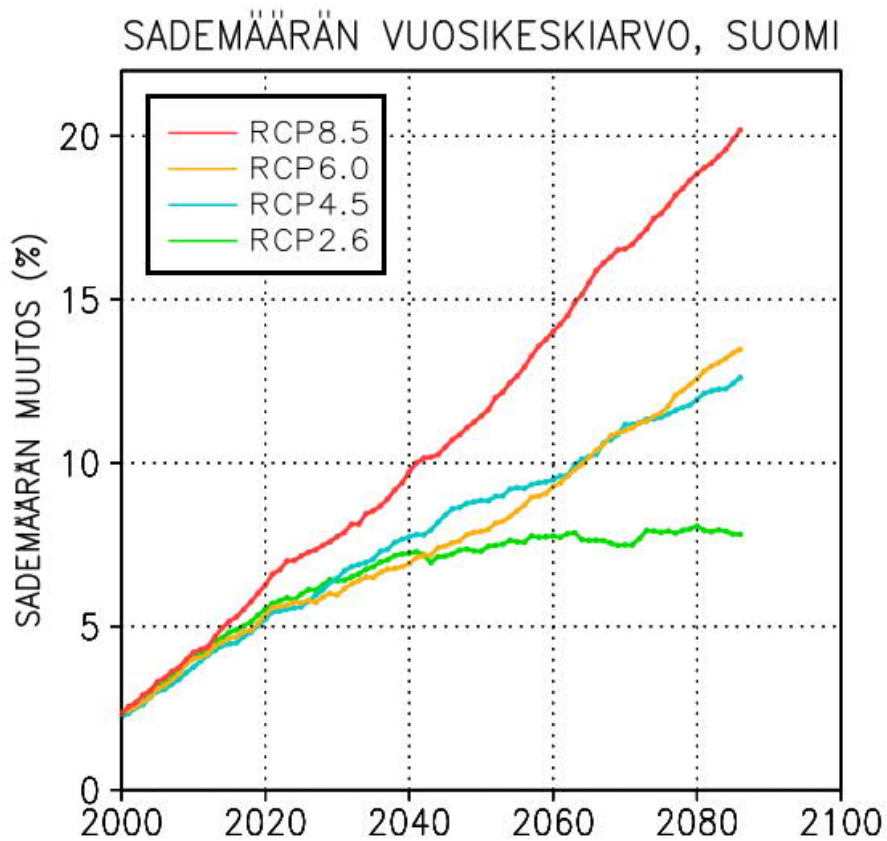
Rasitukset tulevaisuudessa

Viidennen kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC) raportin, vuodelta 2014, pohjalta Ilmatieteenlaitos on tarkastellut sen mukaiset olosuhdemuutokset Suomeen. Tämän raportin pohjalta tehtyjen analyysien mukaan Suomessa lämpötila nousee vuosisadan loppuun mennessä 2,3–6 °C skenaariosta riippuen. Lämpötilojen noustessa pakkassykliä pitempiä ja vähemmän. Tämä voi vaikuttaa pakkasrapautumisen syntyymiseen. Kuvassa 4 on esitetty lämpötilan keskiarvo eri skenaarioille. Kaikilla skenaarioilla lämpötila tulee nousemaan.

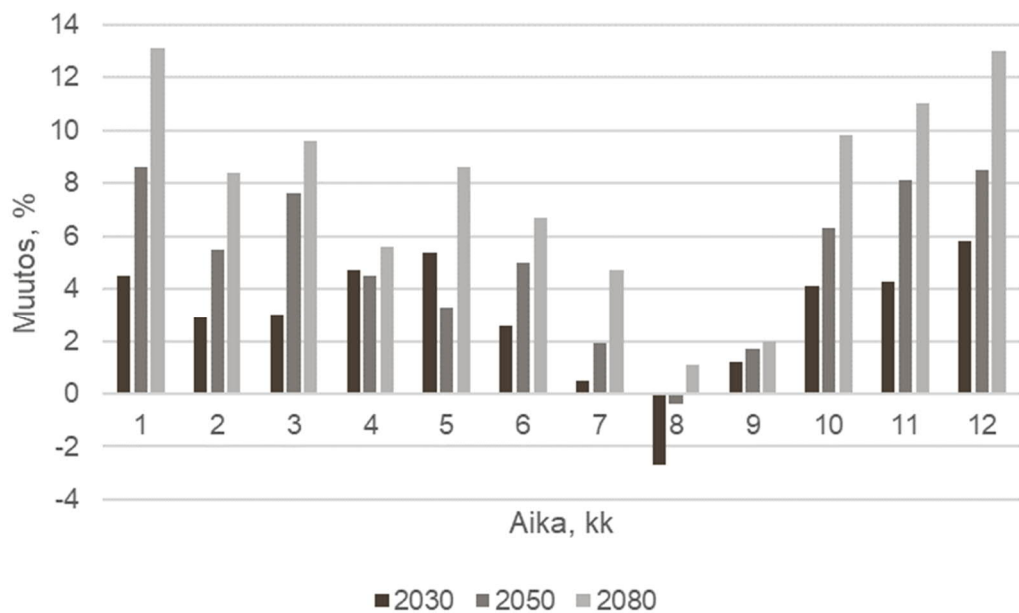


Kuva 4. Lämpötilan vuosikeskiarvo Suomessa eri RCP-kehityspoluille (Maa- ja metsätalousministeriö 2014, s. 11).

Lämpötilan lisäksi sademäärä tulee kasvamaan 8–20 %. Kuvassa 5 on esitetty sademäärän muutos eri RCP-kehityspoluille vuosikeskiarviona. Kuvassa 6 on esitetty sademäärän muutos kuukausikohtaisesti rakennusfysikaalisia laskelmia varten tehdyn testi-vuoden 2020 ennusteilla.



Kuva 5. Sademäärän muutos prosentteina eri RCP-kehityskäytännöille Suomessa (Maa- ja metsätalousministeriö 2014).



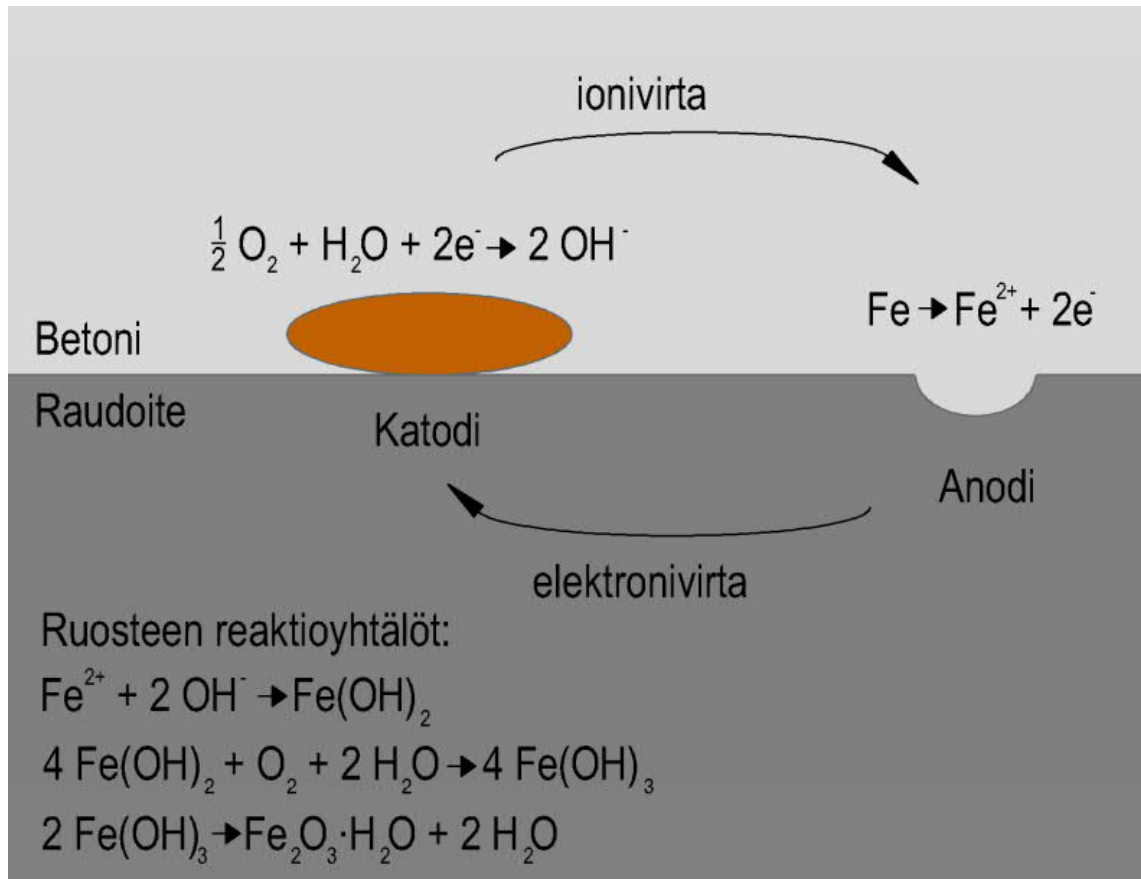
Kuva 6. Sademäärän muutos Vantaalla prosentteina kuukausittain rakennusfysiikan testivuosisien 2020 mukaan (visualisoitu lähteestä Jylhä et al. 2020, s. 80).

Kuten kuvasta 6 nähdään, suurin muutos sademäärissä on syys- ja talvikuukausien aikana. Tämä tarkoittaa, että rakenteet pysyvät märkänä pidempiä jaksoja kerrallaan. Lisäksi talvella sade tulee yhä useammin nestemäisenä sateena lumen sijasta.

Uusimman IPCC:n raportin ensimmäinen osa julkaistiin 9.8.2021. Raportin mukaan Pohjois-Euroopassa sateet tulevat lisääntymään vielä enemmän kuin edellisessä raportissa kerrottiin. Täten kuvien 5 ja 6 ennusteet ovat alakanttiin. Lisäksi raportin mukaan rankkasateet tulevat suurella todennäköisyydellä lisääntymään. Rankkasateet aiheuttavat tulvia viemärintijärjestelmien kapasiteetin riittämättömyyden takia, mikä johtaa suurempaan rasitukseen myös rakennuksen sokkeleille.

2.2 Raudoitteiden korroosio

Aktiivinen korroosio on itse raudoitteen ruostumista. Raudoitteeseen muodostuu anodi- ja katodialueita. Anodialueilla rauta liikenee veteen muodostaen rautaioneja ja elektroneja. Raudan liuetessa veteen raudoitus syöpyy. Samaan aikaan katodilla raudan hajoamisesta muodostuneet elektronit reagoivat veden ja hapen kanssa muodostaen hydroksidi-ioneja. Katodilla rauta- ja hydroksidi-ionit jatkavat reagoimista usean eri yhtälön kautta muodostaen lopulta ruostetta. (Broomfield 2007, s. 7–8) Yksinkertaistettu reaktioketju on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Ruostumisen reaktioyhtälöt raudoitteen pinnalla (Broomfield 2007, s. 7–8)

Yleisesti ajatellaan, että aktiivinen korroosio alkaa, kun raudoitteen pinnassa ollut oksidikalvo rikkoutuu. Se voi rikkoutua joko paikallisesti kloridien vaikutuksesta, ns. pistekorrosiona, tai laaja-alaisesti karbonatisoitumisrintaman saavutettua raudoituksen (Broomfield 2007, s. 7). Aktiivisen korroosion alusta halkeaman muodostumiseen aikaa kuluu laskelmien mukaan 0,6–1,4 vuotta 5 % varmuuskertoimella. Empiirisessä tutkimuksessa on havaittu, että tämä aika on jopa 6–12 vuotta. (Köliö et al. 2014)

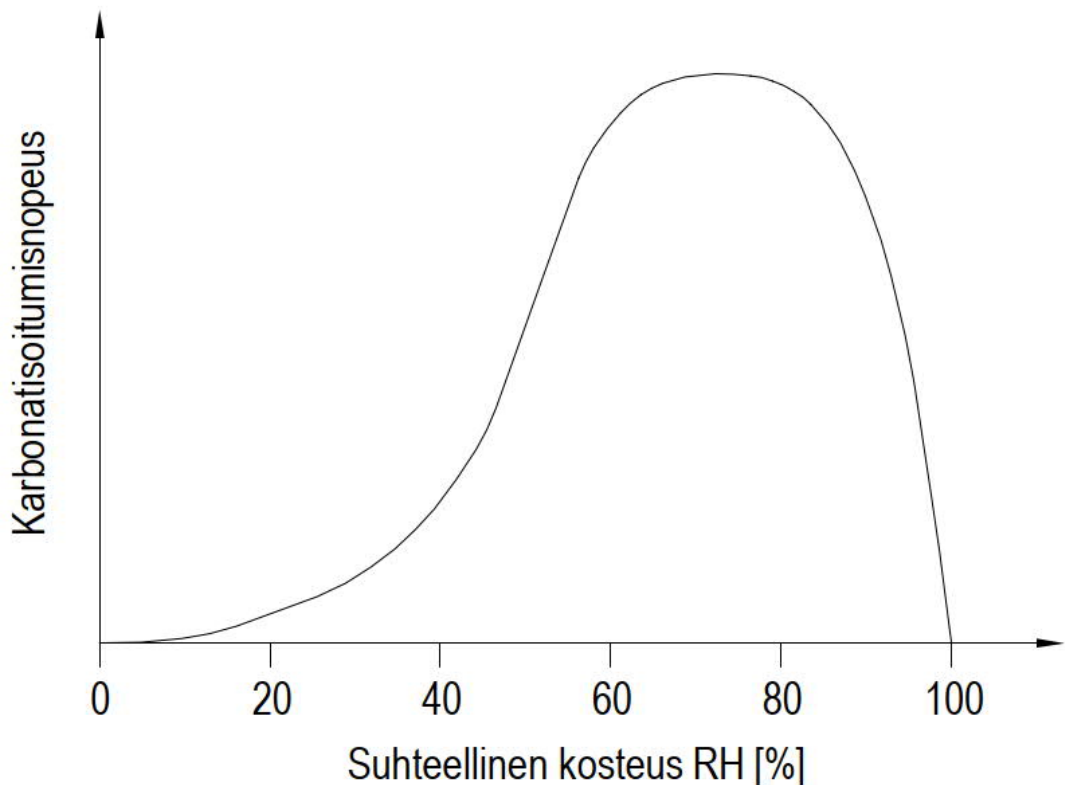
Ruostumisen reaktiotuotteet ovat tilavuudeltaan jopa 6 kertaa suurempia kuin lähtöaineet (Köliö et al. 2015). Tästä voi seurata betonin halkeilua, lohkeilua tai sisäisiä säröjä (BY 201 2018, s. 110). Nämä heikentävät betonin rakenteellisia ominaisuuksia ja nopeuttavat entisestään aktiivista korroosiota.

2.2.1 Betonin karbonatisoituminen

Betonin raudoitteita suojaava ominaisuus perustuu sen emäksisyyteen sekä siihen, että veden ja hapen on ensin läpäistävä suojabetonikerros ennen kuin ne ovat kosketuksissa raudoituksen kanssa. Lisäksi raudoitus passivoituu emäksisessä ympäristössä eli se pystyy muodostamaan pinnalleen oksidikalvon (Broomfield 2007, s. 6).

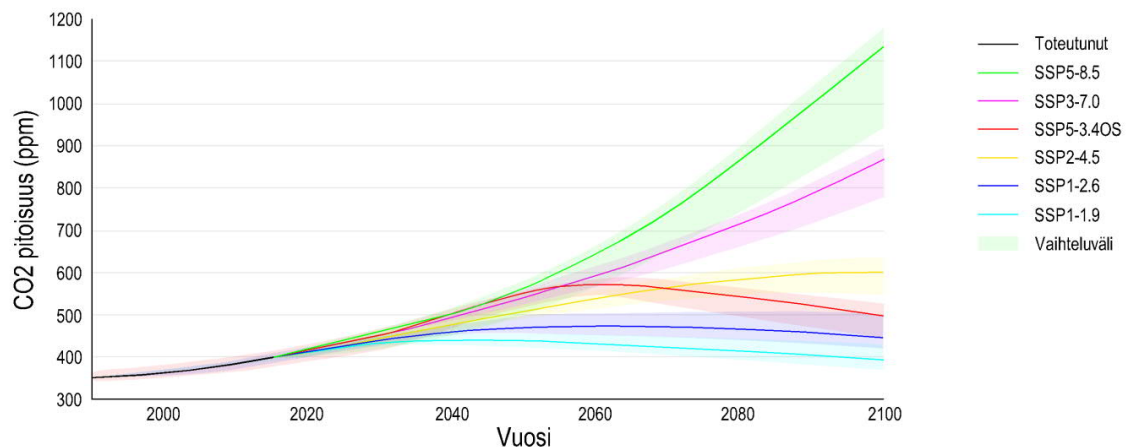
Betonin karbonatisoituminen on kemiallinen reaktio, jossa ilman hiilidioksidi reagoi betonin kalsiumhydroksidin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kanssa. Reaktion seurauksena syntyy kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) ja samalla betonin pH-arvo alenee eli betoni neutraloituu. (Bakker 1988, s. 25) Karbonatisoitumattoman betonin pH on luokkaa 12–13, kun taas karbonatisoituneen betonin 9–10 (Somerville 2008, s. 104).

Karbonatisoitumisnopeuteen vaikuttaa usea tekijä. Kosteus on yksi merkittävimmistä huokoisuuden jälkeen, sillä hiilidioksidi voi tunkeutua vain betonin huokosiin, jotka eivät ole vedellä kyllästyneitä (Bakker 1988, s. 29–30, 49). Jatkuvasti märkänä olevissa rakenteissa betonin karbonatisoituminen on hitaampaa kuin kuivissa olosuhteissa olevissa rakenteissa, sillä hiilidioksidin diffuusio vedessä on 10 000 kertaa hitaampaa kuin ilmassa (Bakker 1988, s. 29). Nopeimmin karbonatisoituvat rakenteet, jotka ovat ulkoilmassa, mutta sateelta suojassa, kuten parvekelaattojen alapinnat. Karbonatisoituminen kuitenkin vaatii kosteutta, jotta hiilidioksidi voi reagoida betonin kanssa (Neville 1995, s. 498), eli täysin kuivissa olosuhteissa karbonatisoituminen pysähtyy. Voimakkainta karbonatisoituminen on 50–60 % RH:ssa (Bertolini et al. 2014, s. 81). Kuvassa 8 on esitetty ilman suhteellisen kosteuden ja karbonatisoitumisnopeuden yhteys.



Kuva 8. Suhteellisen kosteuden yhteys karbonatisoitumisnopeuteen. Pystyakselilla karbonatisoitumisnopeus ja vaaka-akselilla suhteellinen kosteus. (Bertolini et al. 2014, s.82)

Karbonatisoitumisreaktio vaatii hiilidioksidia. Vaikka julkisivuelementin ulkokuoren sisäpinnassa on kuivemmat olosuhteet kuin ulkopinnassa, ei karbonatisoituminen välttämättä ole nopeampaa, päinvastoin. Sandwich-elementeissä ei välttämättä ole tuuletusväliä, joten hiilidioksidi ei pääse ulkokuoren sisäpinnalle. Bertolini et al. (2014, s. 84) kertoo Ho ja Lewisin tutkimuksesta, jossa koekappaleet altistettiin normaalille ilmakehän hiilidioksidipitoisuudelle (n. 400 ppm) sekä ilmastolle, joka sisälsi 4 % hiilidioksidia. Viikon jälkeen karbonatisoitumisrintama oli edennyt suuremman hiilidioksidipitoisuuden näytteissä yhtä syväälle kuin normaalioloissa se etenisi vuodessa. Karbonatisoituminen tulee siis nopeutumaan tulevaisuudessa, sillä IPCC-skenaarioiden mukaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuus tulee nousemaan. Eri skenaarioiden pitoisuudet ajan funktiona on esitetty kuvassa 9. Hiilidioksidipitoisuus voi pahimmillaan nousta kolminkertaiseksi nykyisestä vuoteen 2100 mennessä.



Kuva 9. Ilmakehän hiilidioksidikonsentraatio tulevaisuudessa eri skenaarioiden mukaan. Piirretty uudelleen IPCC teknisestä tiivistelmästä (IPCC 2021, s. 131).

Betonin tiivys ja karbonisoituvan aineksen ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) määrä vaikuttavat karbonisoitumisen etenemisnopeuteen. Huokoinen betoni karbonisoituu nopeammin kuin tiivis, koska huokosverkosto on yhtenäisempi. Mitä pienempää vesi-sideainesuhdetta käytetään, sitä tiiviimpää betoni on, sillä hydrataatiotuotteet täyttävät betonin rakenteen. Sama yhteys pätee betonin lujuusluokan ja tiivyyden välillä (Neville 1995, s. 502–503). Lisähuokostetussa betonissa huokosverkoston tilavuutta on kasvatettu, joten hiilidioksidi pääsee tunkeutumaan betoniin helpommin. Pinnan karbonisoitumisella on myös positiivinen vaikutus. Karbonisoitumisreaktiossa syntyvät reaktiotuotteet ovat tilavuudeltaan suurempia kuin lähtöaineet, jolloin huokokset hieman täyttyvät tehden betonista tiiviimpää. (Neville 1995, s. 505) Täten hiilidioksidi ei pääse yhtä helposti syvemälle betoniin.

Betonin halkeilulla on vaikutusta karbonisoitumisnopeuteen. Jos betoniin muodostuu halkeama teräksen kohdalle jostain muusta syystä kuin teräksen ruostumisesta, alkaa

teräksen aktiivinen korroosio nopeammin. Ghantous et al. (2017) tarkastelivat eri halkeamaleveyksien vaikutusta betonin karbonatisoitumisnopeuteen teräksen suunnassa. Heidän kokeissaan keinotekoiset halkeamat ulottuivat raudoitteeseen asti. Betoni alkaa karbonisoidumaan kohtisuorasti halkeamaan nähden. Leveämmällä 500 µm halkeamalla teräs ruostui selkeästi pidemmältä matkalta kuin 100 µm halkeamalla. Karbonatisoitumissyvyys kohtisuoraa halkeamaa vastaan ei ole kuitenkaan rajaton. Korroosiomatka vakiintui 60 sadesyklin jälkeen. Bakkerin (1988, s. 44) mukaan hallittu halkeilu on yleensä välillä 0,1–0,4 mm. Suomessa betonirakenteiden laskennallinen halkeilu rajoitetaan usein 0,1–0,3 mm:iin (BY 201 2018, s. 102).

Karbonatisoitumisnopeutta ennustetaan ns. neliöjuurimallilla, kaava (1), joka perustuu diffuusiolakeihin. Se ei ota huomioon betonin kosteuspitoisuuden vaihtelua ja sen takia sitä on pidetty epäluotettavana.

$$x = k\sqrt{t}, \tag{1}$$

jossa x on karbonatisoitumissyvyys, k on karbonatisoitumiskerroin ja t on aika (Tuutti 1982, s. 35).

Köliö et al. (2016) ovat kuitenkin osoittaneet kaavan pitävän hyvin paikkaansa Suomen olosuhteissa. He tutkivat vierekkäin otetuista betoninäytteistä karbonatisoitumissyvyyden ja laskivat karbonatisoitumiskertoimen. Jälkimmäinen näyte oli otettu keskimäärin 8 vuotta ensimmäisen jälkeen. Näytteiden karbonatisoitumiskertoimet olivat pääosin samoja. Näytepareja oli yhteensä 18 ja ne sisälsivät sekä julkisivu- että parvekenäytteitä. Lahdensivu et al. (2019) tekivät samanlaisen tarkastelun yksittäiselle kohteelle, jossa kuntotutkimusten väli oli 20 vuotta. Tuloksien mukaan neliöjuurimalli toimii hyvin karbonatisoitumisnopeuden ennustamisessa, kun betoni ei ole pakkasrapautunut. Jos pakkasrapautumista esiintyy, neliöjuurimalli antaa liian pessimistisen arvion käyttöiästä.

2.2.2 Kloridit

Kloridit rikkovat terästen passiivisen kalvon vain paikallisesti, toisin kuin betonin karbonatisoituminen. Kalvon rikkouduttua teräs alkaa ruostumaan. Kloridit toimivat katalyyttinä, eli kemiallisen reaktion kiihdyttiminä, ja tästä syystä paikallinen teräksen korroosio voi edetä hyvinkin nopeasti. (Broomfield 2007, s. 21)

Klorideja voi löytyä betonista seuraavista syistä:

- klorideja sisältävät kiihdyttimet
- meriveden käyttö
- saastunut runkoaines
- merivesi, suora kontakti tai ilman mukana

- tiesuolojen roiskevedet tai ilman mukana (Broomfield 2007, s. 20).

Klorideja sisältäviä kiihdyttimiä, kuten kalsiumkloridia CaCl_2 , on käytetty 70-luvun puoleen väliin asti (Broomfield 2007, s. 20). Betoninormeissa ja säilyvyysohjeissa on kuitenkin annettu betonin kloridipitoisuuksille raja-arvot 1980 Betoninormissa. Lahdensivu toteaa kuitenkin väitöskirjassaan (2012, s. 75–76), että vain kolmessa 60-luvulla rakennetussa ja kahdessa 70-luvulla rakennetussa julkisivussa kloridien pitoisuus ylitti 0,03–0,07 p-% kriittisen rajan betonin painosta. Raja on määritetty by 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus -teoksessa (2013, s. 25), mutta on sittemmin nostettu tavanomaisilla raudoitteilla karbonatisoitumattomassa betonissa 0,05–0,07 p-%:iin (BY 42 2019, s. 21). Karbonatisoituneessa betonissa korroosion alkamisen alaraja on 0,03 p-% kaikilla raudoitteilla. Parvekkeissa tapauksia oli hieman enemmän, yhdeksän 70-luvulta ja neljä 80-luvulta (Lahdensivu 2012, s. 75–76).

Meriveden kanssa suorassa tai epäsuorassa kontaktissa olevia rakennuksia on vain rannikolla. Epäsuora kontakti tarkoittaa tässä tuulen tai sumun mukana julkisivuille kulkeutuvaa suolarasitusta. Meren suolasumun rasiuksen ajatellaan ulottuvan noin 100 metriä rannasta (Liikennevirasto 2018, s. 13). Itämeren suolapitoisuus on kuitenkin huomattavasti alhaisempi kuin esimerkiksi Atlantin, sillä Itämeri on murtovetinen. Itämeren suolapitoisuus on 0,7 % ja Atlantin 3,6 % (Neville 1995, s. 515). Tästä johtuen meren suolarasitus ei ole merkittävä.

Tiesuolat aiheuttavat rasitusta lähinnä rakennusten alimpiin kerroksiin. Roiskevesien voidaan ajatella vaikuttavan noin 6 metriä tien reunasta sivusuunnassa (Liikennevirasto 2018, s. 19). Lisäksi tiesuolat voivat kulkeutua korkeammalle julkisivulla ns. suolasumun mukana.

Kloridirasituksen nopeuteen ja voimakkuuteen vaikuttavat hyvin pitkälti samat tekijät kuin karbonatisoitumiseenkin. Kloridit tarvitsevat liuoksen tunkeutuakseen betoniin eli ne eivät voi tunkeutua ilmatäytteisiin huokosiin toisin kuin hiilidioksidi. Kloridit voivat joko olla liuenneina veteen tai kapillaarisesti imeytyä huokosveteen (Bakker 1988, s. 49). Kloridipitoisuutta on myös vaikeampi arvioida, sillä se ei etene tasaisena rintamana vaan gradienttina niin, että pinnassa pitoisuus on suurempi kuin syvällä (Broomfield 2007, s. 21). Tästä johtuen kloridirasitus voi olla hyvin pistemäistä.

Koska kloridit tarvitsevat vesiliuoksen tunkeutumiseen, on betonin huokosverkostolla ja tiiviydellä suuri vaikutus kloridien diffuusionopeuteen. Sementin korvaavien aineiden käyttö vaikuttaa huokosverkostoon siten, että ne muodostavat pienempiä huokosia, jolloin huokosverkostosta tulee epäjatkovampi (Kurdowski 2002, s. 299). Mitä enemmän sementtiä korvataan esimerkiksi masuunikuonalla tai lentotuhkalla, sitä hitaampaa on

kloridien diffuusio (Kurdowski 2002, s. 299). Korkea vesi-sideainesuhte nopeuttaa diffuusiota yhtenäisen huokosverkoston takia, samoin kuin karbonatisoitumisella.

Betonin halkeamilla on suurempi vaikutus kloridien aiheuttamaan korroosioon kuin karbonatisoitumisen aiheuttamaan. Koska kloridit etenevät veteen liuenneina, hyvin pienetkin halkeamat vaikuttavat niiden etenemiseen. Kloridien tunkeutumissyvyys kasvaa halkeaman leveyden kasvaessa, kunnes se saavuttaa 0,1 mm leveyden. Tämän jälkeen tunkeutumissyvyys kohtisuoraan halkeamaan nähden pysyy vakiona ja muistuttaa pituusprofiililtaan pinnan kloriditunkeuman profiilia. (AL-Ameeri et al. 2021)

2.3 Betonin rapautuminen

Betonin rapautuminen on ilmiö, jossa betonin sideainemassaan syntyy halkeamia. Halkeamat syntyvät eri rapautumisilmiöiden tilavuuden muutoksista, joko veden olomuodon muutoksesta tai kemiallisten reaktiotuotteiden tilavuudesta verrattuna lähtöaineisiin. Kun mikrohalkeamien verkosto alkaa olla säännöllinen ja yhtenäinen, voi betonin ja terästen välinen tartunta heikentyä tai rakenteesta voi murentua paloja irti. Yhteistä kaikille ilmiöille on korkea kosteusrasitus. Suomessa ylivoimaisesti merkittävin ilmiö on pakkasrapautuminen. Alkavan rapautumisen syy voidaan erottaa vain mikroskopoinnilla, koska kaikkien ilmiöiden aiheuttama vaurio on ulospäin samannäköistä.

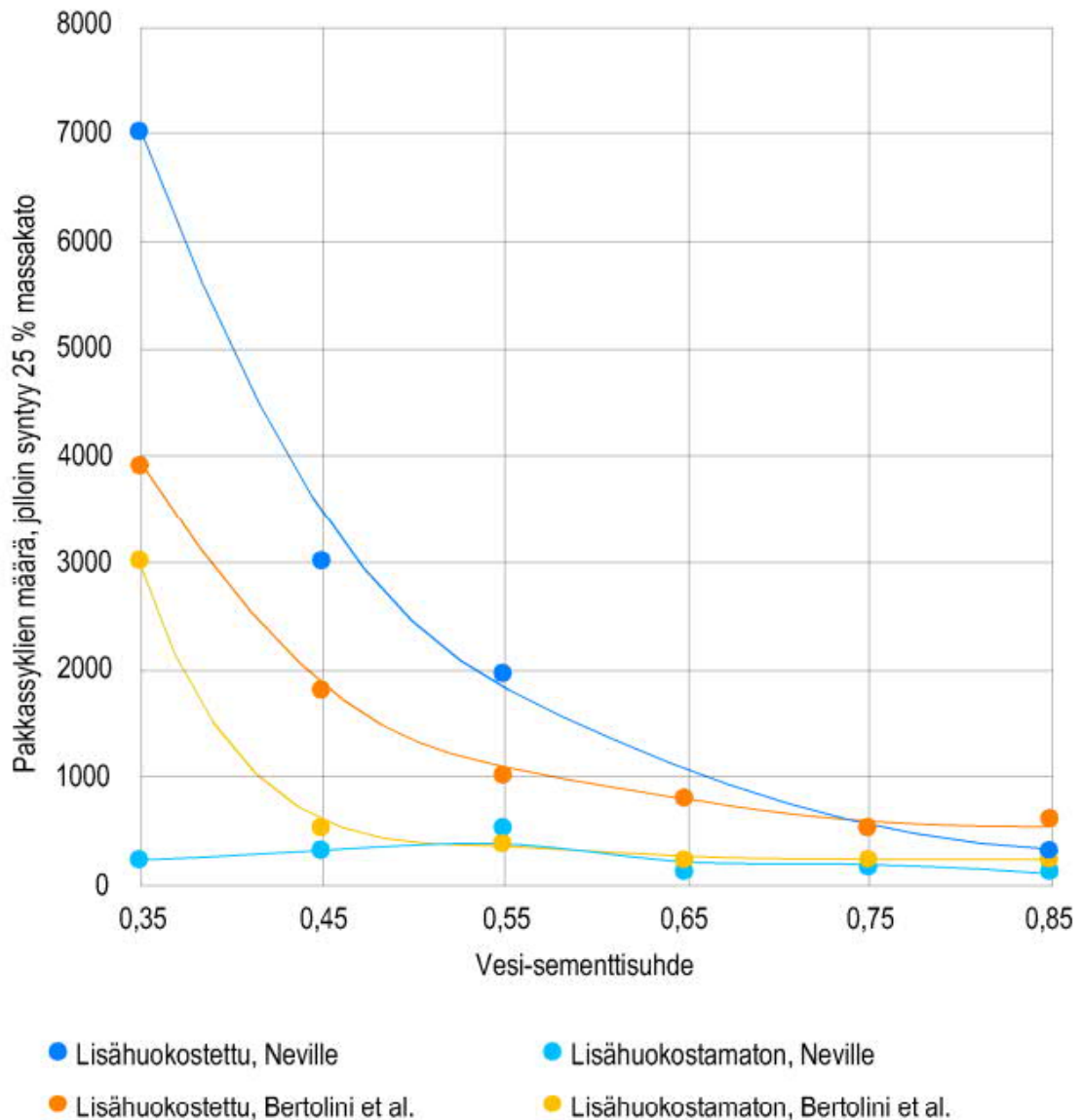
2.3.1 Pakkasrapautuminen

Pakkasrapautuminen aiheutuu betonin huokosveden jatkuvasta jäätymisestä ja sulamisesta. Kun huokokset ovat kyllästyneitä vedestä ja lämpötila laskee alle 0 °C asteeseen, alkavat huokokset jäätyä eri lämpötiloissa riippuen niiden halkaisijan koosta. Mitä pienempi huokonen on, sitä matalammassa lämpötilassa se kyllästettynä jäätyy. Kelvinin lain mukaisesti voidaan laskea tietyn huokoskoon jäätyislämpötila (Pigeon & Pleau 1995, s. 20) ja esimerkiksi kapillaarihuokokset jäätyvät yleensä -3...-4 °C:ssa (BY 201 2018, s. 117). Veden tilavuus kasvaa 9 % sen jäätyessä (Neville 1995, s. 538). Powersin teorian mukaan jäätyvätön vesi lähtee liikkeelle aiheuttaen painetta huokosissa. Paine ja ylimääräinen vesi purkautuvat suojahuokosiin. Mikäli suojahuokosia ei ole tarpeeksi, syntyy betoniin mikrohalkeamia paineen takia. Tämä teoria on kuitenkin osittain kumottu myös Powersin itsensä toimesta, sillä tutkimukset ovat osoittaneet veden kulkevan kohti kapillaarihuokosia eikä päinvastoin. Perusajatus veden ja paineen purkautumisesta suojahuokosiin on kuitenkin relevantti. (Pigeon ja Pleau 1995, s. 12)

Seuraavan, sateen jälkeisen pakkassyklin tullessa mikrohalkeamat ovat täyttyneet vedellä, ja laajentumisesta johtuva paine kasvattaa niitä lisää. Ajan myötä rakenteessa on

halkeamia niin paljon, että betonin, kiviaineksen ja terästen väliset tartunnat voi heikentyä tai rakenteesta voi murentua paloja irti.

Pakkasrapautuman syntymiseen riittävien pakkassykliä määrä riippuu useasta tekijästä. Nevillen (1995, s. 540–541) mukaan yksi merkittävimpiä on vesi-sideainesuhde betonin lisähuokostuksen lisäksi. Kuvassa 10 on esitetty yhteys.



Kuva 10. Vesi-sementtisuhteen vaikutus pakkassykliä määrään, jossa betonin massasta katoaa 25 % (Neville 1995, s. 541; Bertolini et al. 2014, s. 52).

Kuvan 10 Nevillen betoni oli jälkihoidettu siten, että koekappaleita on säilytetty kosteissa olosuhteissa 14 päivää, jonka jälkeen 76 päivää 50 % RH:ssa. Tämän jälkeen kappaleille on tehty jäätymis-sulamiskokeet. Saman yhteyden on huomannut Massazza, josta kerrotaan Bertolini et al. (2014, s. 52) teoksessa. Massazzan koekappaleet säilytettiin vedessä 28 päivää ennen pakkasrasitusta. Vesisäilytyksessä betonin huokosrakenne on

vedellä kylläinen, kun taas kosteissa oloissa säilytetyn betonin ei. Tämä johti siihen, että v/s-suhteella 0,35 rapautumiseen vaaditut syklit olivat hieman alle 4000 ja laskivat samaan tapaan kuin Nevillen v/s-suhteen kasvaessa. Massazzan jälkihoitotavalla myös lisähuokostamaton betoni, jonka v/s-suhde on 0,35, vaadittavat syklit ovat noin 3000, reilusti alle tuhannen sijaan. Kummassakaan lähteessä ei kerrottu betonin lujuusluokkaa, joten tuloksia ei voi suoraan verrata toisiinsa. Lahdensivun tutkimuksessa todellisissa kohteissa pakkasrapautumisen aiheuttaman halkeilun syntymiseen tarvittiin 388 pakkas-sykliä sisämaassa ja 307 sykliä rannikolla, kun tarkasteltiin alle -5 °C sykliä 48 tuntia sateen jälkeen (Lahdensivu 2012, s. 98). Tämä viittaisi samaan tulokseen kuin Nevillen kokeet.

Jälkihoidolla on siis myös suuri merkitys pakkasrapautumisen syntymiseen. Onnistunut jälkihoito vähentää rakenteen pinnassa olevan jäätyvän veden määrää. Ajan myötä betonissa olevan veden jäätymispiste laskee. Kolmen päivän jälkeen osa vedestä alkaa jäätyä jo -1 °C:ssa, kun taas 28 päivän ikäisessä betonissa vasta -5 °C:ssa. (Neville 1995, s. 541–542) Jos rakenteen ensimmäinen jäätyminen tapahtuu ennen jäätymislujouden, 5 MPa, saavuttamista, rakenne vaurioituu pysyvästi. Veden jäätymisen estää betonin hydrataation ja siten rakenne ei voi saavuttaa toivottua lujuutta. (BY 201 2018, s. 91)

Ilmastonmuutoksen seurauksena pakkassykliä määrä yhdessä talven aikana laskee, jolloin rapautuma voi ajallisesti tulla esiin myöhemmin, vaikka tarvittava syklien määrä pysyisi vakiona. Pakkalan (2020) mukaan rasitus tulisi jakautumaan tasaisemmin ja vaikka pohjoisessa syklien määrä tulee lisääntymään, ei niiden intensiteetti ole yhtä korkea kuin muualla Suomessa (s. 81).

2.3.2 Muut ilmiöt

Muita, harvinaisempia rapautumisilmiötä ovat ettringiittireaktio sekä alkalikiviainesreaktio. Nämä voivat esiintyä yhdessä, erikseen tai pakkasrapautuman yhteydessä.

Ettringiittireaktio

Ettringiitillä viitataan usein niin sanottuun myöhäisen vaiheen ettringiittiin, joka on haitallista betonin rapautumisen kannalta. Ettringiittireaktio on sisäisen sulfaattihyökkäyksen aiheuttama rapautumisilmiö. Sitä esiintyy lujittuneessa betonissa, joka on valun jälkeen lämmityksen johdosta tai hydrataatiolämmön takia altistunut yli 70 °C lämpötilalle. Todellisissa olosuhteissa ettringiittiä on löydetty myös elementeistä, jotka eivät ole altistuneet korkeille lämpötiloille. (Famy et al. 2002, s. 282)

Ettringiitti on neulamaista ja syntyy betonin tyhjiin tiloihin (Odler 2003, s. 262). Betonin mikrorakennetutkimuksissa sen havaitaan useimmiten sijaitsevan suojahuokosissa, mutta sitä voi muodostua myös betonin halkeamiin. Tästä syystä sen voidaan olettaa heikentävän betonin pakkasenkestävyyttä, mutta aiheesta ei löydy vertaisarvioituja julkaisuja.

Edellä mainitun, haitallisen ettringiitin lisäksi betonin hydrataation alussa esiintyy erilaista ettringiittiä. Tämä ettringiitti eroaa kemialliselta koostumukseltaan myöhäisen vaiheen ettringiitistä. Lisäksi se alkaa hajota monosulfaatiksi alle vuorokauden kuluttua hydrataation alkamisesta reagoidessaan muiden yhdisteiden kanssa eikä sitä täten löydy lujittuneesta betonista. (Odler 2003, s. 265–266)

Alkali-kiviainesreaktio

Alkali-kiviainesreaktio (AKR) on betonin kiviaineksen ja sementtikiven välinen kemiallinen reaktio. Sen yleisin muoto on sementtikiven alkalien ja kiviaineen piiksidin välinen reaktio (ASR). Reaktiossa muodostuva alkali-piidioksidigeeli kiinnittyy kiviaineen sisälle tai pinnalle heikentäen näin kiviaineen ja sementtikiven tartuntaa toisiinsa. Geelin tilavuus laajenee sen kyllästyessä vedellä. Laajeneminen aiheuttaa betonissa painetta ja tämä voi johtaa halkeamiin. (Neville 1995, s. 144–145)

Alkali-kiviainesreaktio tarvitsee tapahtuakseen reaktiivista piidioksidia sisältävää kiviainesta, korkeaa alkalipitoisuutta huokosissa sekä riittävää kosteutta (BY 74 2021, s. 9) Lahdensivu et al. (2018) mukaan alin RH-pitoisuus, jolloin reaktio jo alkaa on 50 % ja 80 % RH:ssa tilavuuden kasvu kiihtyy. Yhden reaktion edellytyksistä puuttuessa tai poistuesssa, reaktio ei tapahdu tai etene (BY 74 2021, s. 9).

Suomessa on pitkään ollut ajatus, ettei alkali-kiviainesreaktiota esiinny (Richardson 2002, s. 135; Holt & Ferreira 2013). Kiviä on pidetty vahvoina ja reagoimattomina, vaikka ne ovat samoja kuin Ruotsissa, jossa ongelma on tiedostettu jo yli 20 vuotta. Holtin ja Ferreiran tutkimuksen mukaan rakenteissa, joissa esiintyi AKR:ta, kivilajeina olivat useimmiten tumma kiille ja graniitti. 43 % näytteistä sisälsi kivilajien sekoitusta tai kivilajeja ei ollut selvitetty. Koska suomalaisia kivilajeja on pidetty reagoimattomina, on AKR voitu tulkita virheellisesti pakkasrapautumaksi. Erityisesti, jos reaktiossa syntynyt geeli on huuhtoutunut halkeamista pois.

AKR:n esiintymistä Suomessa kyseenalaistettiin jo 1990-luvulla Pyy, Punkin ja Suomen toimesta. Artikkeleissa he kyseenalaistivat, miksi Suomessa ei esiintyisi AKR:ta kuten naapurimaissa. Norjan, Ruotsin ja Suomen kallioperien koostumus ei eroa toisistaan merkittävästi ja muut reaktioon vaadittavat olosuhteet ovat samanlaiset. (Pyy et al. 2012,

s. 11, Punkki & Suominen 1994) Tieteellistä tutkimusta aiheesta ei tehty kuitenkaan vielä reiluun vuosikymmeneen.

Ensimmäisen kerran AKR:ta tutkittiin liikenneviraston, nykyisen väyläviraston, rahoittamassa tutkimuksessa 2011. Tutkimus oli kyselytutkimus yrityksille, jotka suorittavat ohuthietutkimuksia. Kyselytutkimuksen perusteella 33 % ohuthienäytteistä osoitti merkkejä AKR:sta. Tutkimuksessa oli mukana useita rakenteita, siltoja 41 % ja rakennuksia 34 % kohteista. AKR-havainnot olivat keskittyneet Etelä-Suomeen. (Holt & Ferreira 2013)

Lahdensivu et al. (2018a) tutkivat AKR:ta suomalaisissa silloissa. Tutkimuksessa käytettiin 97 kuntotutkimusraporttia, joista 27 löydettiin reagoinutta kiviainesta. Sitä löydettiin useimmin 1970-luvun silloista, joita tutkimuksessa myös oli eniten. Useimmiten reagoinut kiviaines oli granitoidit sekä kvartsi.

Lahdensivu et al. (2018b) tarkastelivat 15 kuntotutkimusraporttia vuosilta 2005–2017, joissa AKR oli löydetty. Reagoinutta kiviainesta löydettiin julkisivuista, parvekkeista, silloista, uima-altaista sekä 7 muusta betonirakenteesta. Tutkimuksen mukaan AKR:ta esiintyy koko Suomessa metamorfoituneen peruskallion ja alkalipitoisen sementin takia. AKR alkoi esiintymään noin 40 vuotta vanhoissa rakenteissa, mutta uima-altaissa jo 30 vuoden iässä otollisten olosuhteiden takia.

Lahdensivu ja Lahdensivu (2022) analysoivat 1910 ohuthienäytettä vuosilta 1993–2013 ja vertasivat niissä raportoituja kivilajeja BY:n päivittyvän AKR ohjeen kivilajijaotteluun. Useimmiten betoni sisälsi graniittia, gneissia ja kvartsia tai kvartsiittia. Alkali-kiviainesreaktiolle alttiita kivilajeja löydettiin 255 näytteessä ja epävarmoja reaktiolle alttiita kivilajeja 470 näytteessä. Löydettyjä alttiita kivilajeja olivat fylliitti, erilaiset kiilteet, serisiittikvartsi ja savikivi. Tämän lisäksi kvartsi ja kvartsiitti sekä gneissi ovat mahdollisesti reaktioalttiita riippuen niiden raekoosta.

Koska AKR on Suomessa vasta viime vuosina tunnistettu ilmiö, liittyy siihen paljon epävarmuutta. Sen etenemisnopeus ja etenemisen hidastaminen kaipaavat vielä tutkimusta. Sen aiheuttamien vaurioiden korjaustavat eivät ole vakiintuneet. AKR:n tutkimiseen betonirakenteissa sekä korjaustapoihin on ohjeistettu by 74:ssä (2021).

2.4 Aiempi tutkimus suomalaisesta rakennuskannasta

Betonin karbonatisoitumista on tutkittu Tampereen teknillisen korkeakoulun toimesta jo 1980- ja 1990-luvuilla. Tutkimuksissa selvisi, että karbonatisoitumissyvyys on vaihdellut suuresti, peitepaksuudet ovat pääosin olleet yli 25 mm ja karbonatisoitumiskerroin on vaihdellut välillä 2,5–3,5 mm/a^{0.5}. (Mehto et al. 1990, Huopainen 1997)

Suomessa laajimman tutkimuksen olemassa olevasta rakennuskannan kunnosta on tehnyt Lahdensivu väitöskirjassaan (2012), jossa hyödynnettiin ja analysoitiin tarkemmin BeKo-tutkimuksessa kerättyä tietokantaa (Lahdensivu et al. 2010). Tutkittuja rakennuksia oli yhteensä 947 eri puolilla Suomea, suurin osa keskittyneenä pääkaupunkiseudulle sekä Pirkanmaalle. Eniten raportteja on 1970-luvun rakennuksista, joita Suomen rakennuskannassa myös on eniten. (Lahdensivu 2012, s. 45–46)

Väitöskirjatutkimuksessa selvisi, että suojabetonipaksuudet eivät ole suositusten mukaisia kaikissa näytteissä. Alle 5 ja 10 mm:n peitepaksuuksien osuus on kuitenkin hyvin pieni, alle 3,6 %. Klinkkerilaattapintaisissa julkisivuissa osuus oli kuitenkin suurempi, 6,2 %. Parvekerakenteissa alle 10 mm:n peitepaksuuksien osuus oli paljon suurempi. Kaidarakenteissa sisäpuolen pintojen alle 10 mm:n peitepaksuuksien osuus oli 7,7 %. (Lahdensivu 2012, s. 104–105)

Näkyvää raudoituksen korroosiota oli parvekkeissa enemmän kuin julkisivuissa. Kaikille julkisivutyypeille korroosioaurio on yleisin korjaussyy, lukuun ottamatta pesubetonia. Karbonatisoitumisnopeus vaihtelee suuresti eri julkisivutyypin välillä. Yleisesti 5 mm karbonatisoitumisvyvyys saavutetaan alle kymmenessä vuodessa ja 10 mm syvyys 20–30 vuodessa. Tämä yleistys ei koske valkobetonia eikä klinkkerilaattoja. (Lahdensivu 2012, s. 76) Tutkimuksessa todistettiin myös, että kuorielementin sisäpinnalla karbonatisoituminen etenee nopeammin kuin sääoloille alttiilla ulkopinnalla (Lahdensivu 2012, s. 73).

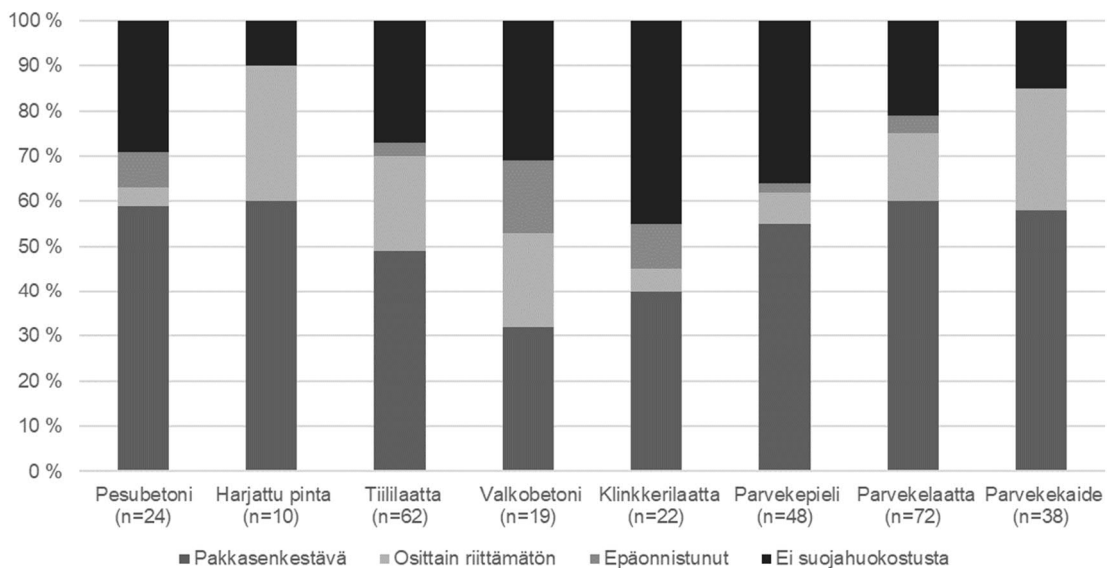
Kloridipitoisuusrajan ylittäviä rakennuksia oli tutkimuksessa käytetyssä aineistossa vain muutamia. Suuret kloridipitoisuudet on usein yhdistetty elementtirakentamisen alkuvuosiin ja erityisesti työmaalle perustettuihin elementtitehtaisiin. Parvekkeissa raja-arvon (0,03 p-%) ylittäviä näytteitä oli enemmän (3,8 %) kuin julkisivunäytteissä (1,4 %). Tästä huolimatta kloridien aiheuttama korroosio on Lahdensivun mukaan harvinaista. (Lahdensivu 2012, s. 105)

Ohuthienäytteistä sekä suojahuokoskokeista havaittiin betonin pakkasenkestävyyden olevan yleisesti riittämätön. Erityisesti parvekepielien ja -laattojen pakkasenkestävyys on huono. Koska parvekepielet ovat kantavia rakenteita, niiden kunto lyhentää koko parvekerakenteen käyttöikä. (Lahdensivu 2012, s. 105) Betonin pakkasenkestävyyteen alettiin kiinnittää huomiota BY-julkaisuissa 80-luvulla. Tästä huolimatta jopa 24 % parvekkeista ja 17 % julkisivuista on huono pakkasenkestävyys, vaikka ne on valmistettu vuoden 1988 jälkeen (Lahdensivu 2012, s. 106).

Huonosta pakkasenkestävyydestä huolimatta näkyvää pakkasrapautumaa havaittiin 43 % eri julkisivutyypeistä ja vain 27 %:ssa parvekkeista. Pakkasrapautuman havaittiin olevan paikallista ja esiintyvän useimmiten rakennuksen yläkulmissa ja elementtien reunoissa. Parvekkeissa rapautuminen keskittyi yläosiin, erityisesti pielielementtien reunoihin. Pesubetonijulkisivuissa havaittiin pakkasrapautumaa eniten. (Lahdensivu 2012, s. 88; s. 90)

Huokostäytteitä havaittiin jopa 25 % julkisivuista ja parvekkeista. Näitä olivat ettringiitti sekä portlandiitti. Kuntotutkimusten ohuthienäytteissä ei havaittu alkali-kiviainesreaktiota. (Lahdensivu 2012, s. 108)

Pakkala et al. (2014) on tutkinut betonin kestävyysvaatimuksia pakkasrapautumaa vastaan tulevaisuuden skenaarioissa. Tässä yhteydessä tutkittiin vuosina 1990–1996 rakennettujen 72 kerrostalon suojahuokostuksen onnistumista. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Suojahuokostuksen onnistuminen 72 betonirakennuksessa, jotka ovat valmistuneet 1990–1996 välillä (muokattu lähteestä Pakkala et al. 2014)

Kuten kuvasta 11 nähdään, vielä 1990-luvullakin suojahuokostus puuttuu noin 25 % julkisivuista ja 15 % parvekkeista. Näin ei pitäisi olla, sillä vaatimus suojahuokostuksen käytöstä julkisivuille on tullut voimaan 1980. Lahdensivun tutkimuksiin, joissa oli mukana rakennuksia 1960-luvulta asti (Lahdensivu 2012, s. 84), verrattuna pakkasenkestävän betonin määrä on lisääntynyt huomattavasti. Kyseisessä tutkimuksessa ääripäät eli onnistunut tai epäonnistunut suojahuokostus korostuivat, osittain riittämättömän ja epäonnistuneen suojahuokostuksen ollessa hyvin pienessä osassa. 1990-luvulla epäonnistuneen suojahuokostuksen määrä on pysynyt osittain samana ja joillain julkisivutyypeillä

vähentynyt. Sen sijaan osittain riittämättömän suojahuokostuksen määrä on lisääntynyt suhteessa merkittävästi.

Lahdensivu (2012) selvitti väitöskirjassaan myös aiempaa suomalaista tutkimusta ja niiden perusteella elementtien todellinen paksuus on vaihdellut todella paljon, suojabetonipaksuus oli pääosin yli 20 mm, karbonatisoitumisnopeus vaihteli julkisivutyyppeiden kesken ja välillä ja karbonatisoitumissyvyys oli 2–25 mm julkisivuille ja 10–30 mm parvekkeille. (s. 39–40) Mattila ja Pentti selvittivät raudoitteiden korroosionopeutta todellisissa sääolosuhteissa. Tärkein löytö tutkimuksessa oli yhteys sateen rasittavuuden ja korroosionopeuden välillä. Lisäksi vettä hylkivä pinnoite hidastaa korroosionopeutta, mutta suojaava ominaisuus häviää, jos pinnoite menee rikki. Korroosionopeus hidastuu merkittävästi lämpötilan laskiessa 0 °C asteeseen, nopeimmillaan se on 0–10 °C välillä. (s. 40)

2.5 Aiempi tutkimus ulkomaisesta rakennuskannasta

Köppen-Geiger ilmastoluokituksen mukaan, joka perustuu 1951–2000 (Kottek et al.) sekä 1980–2016 (Beck et al.) väliselle lämpötila- ja sadedatalle, Suomen luokitus on Dfc ja aivan etelärannikon Dfb. D tarkoittaa pääasiassa lumista ilmastoa, f täysin kosteaa ilmakehää, c kylmää kesää ja b lämmintä kesää. Tämän luokituksen mukaisesti Suomeen rinnastettavia maita olisivat Ruotsi, Norja, Manner-Venäjä sekä Kanada suurelta osalta. (Kottek et al. 2006; Beck et al. 2018)

Kyseisistä maista ei löytynyt kuntotutkimusten pohjalta tehtyä laaja-alaista analyysia. Sen sijaan paikallisia rakennuksia rasittavista oloista nyt ja tulevaisuudessa löytyi tutkimusta.

Norjassa SINTEF on kerännyt systemaattisesti kuntotutkimuksia arkistoonsa, lähinnä Oslon ja Trondheimin alueelta. Arkisto ei ole keskittynyt vain betonirakenteisiin, vaan sinne on kerätty tietoa kaikista rakennustyypeistä. Tutkimukset ovat peräisin yksityisiltä yrityksiltä. Lisø, Kvande ja Thue ovat analysoineet kyseisiä tutkimuksia konferenssijulkaisussaan *Learning from experience – an analysis of process induced building defects in Norway*, mutta julkaisu ei valitettavasti ole saatavilla.

Kvande et al. (2009) ovat tutkineet tiilitalojen ilmastomuutokseen sopeutumista todellisten kohteiden tutkimusten pohjalta. Suurin osa kohteiden ongelmista oli muuhun kuin korroosioon tai rapautumiseen liittyviä. Suurin ongelmien aiheuttaja oli kosteuden pääsy väärin paikkoihin aiheuttaen vaurioita. Kestävien tiilirakenteiden kannalta viistosade ja pakkassyklit ovat kriittiset tekijät, joihin on varauduttava rakenteita suunniteltaessa.

Kanadassa Dukhan ja Sushama (2021) ovat tutkineet viistosateen tulevaisuuden skenaarioita ja niiden vaikutusta rakennusten vaipoille. Kanadassa tuulen suunnat sateen aikana ovat keskenään tasaisempia eikä yksittäinen suunta ole hallitseva. He ovat kuitenkin arvioineet suurimmassa osassa 16 tarkastellusta kaupungista kriittiset tuulen suunnat suurin piirtein samoiksi kuin Suomessa eli itä-lounaisakselille. Kanadan topografia on hyvin erilainen kuin Suomessa, koska Kanadassa on vuoristoa. Vuoristo vaikuttaa tuulensuuntiin sekä sateiden määrään. Merenrantakaupungeissa vallitsevat tuulensuunnat sateen aikana tulevat pääosin mereltä. Kanadan itäosissa suurin osa sateesta sataa kesällä, mutta tulevaisuudessa sateet siirtyvät syksymmällä muuttaen olosuhteita enemmän Suomen kaltaisiksi.

Bostonissa tehdyn tutkimuksen mukaan karbonatisoitumisrintama saavuttaa raudoituksen 26 vuotta aiemmin IPCC-raportin tulevaisuuden pahimmalla skenaarioilla kuin nykyisessä ilmastossa. Kloridien tunkeuma saavuttaisi teräkset vastaavasti 10 vuotta aiemmin. Bostonissa suojabetonipaksuus on 38 mm paikallisten ohjeiden mukaisesti, joka on noin 10 mm enemmän kuin Suomessa yleinen laskennallinen suojabetonipaksuus. (Saha ja Eckelman 2014)

Virossa Simo Ilomets (2017) ja Mihkel Kiviste (2011) ovat tehneet väitöskirjat korjausrakentamisesta. Ilometsin väitöskirjassa rakennuksia käsitellään rakennusfysikaalisesta näkökulmasta. Rakennuksista tarkasteltiin sisäilman lämpötilaa ja kosteutta sekä kylmäsiltoja. Lisäksi tarkasteltiin eristerappauksen vaikutusta betonijulkisivujen rapautumiseen, mutta tämä tehtiin laskennallisesti Delfin-ohjelmaa käyttäen. Eristerappauksen käyttö vanhan julkisivun pinnalla estää peittyvän rakenteen pakkasrasituksen ja pysäyttää sen raudoitteiden korroosion etenemisen, sillä kosteus ei pääse enää raudoitteen pinnalle. (Ilomets et al. 2016)

Kivisteen väitöskirjassa tarkastellaan olemassa olevien betonirakenteiden kuntoa ja jäljellä olevaa kantokykyä. Kunnan tarkastelu perustuu visuaaliseen luokitteluun ja kantokyvyn tarkastelu kuormituskokeisiin. Lisäksi tarkasteltiin näiden vaikutusta rakenteiden käyttöikäen. Kuormituskokeet tehtiin rakenteisiin, jotka olivat olleet todellisessa säärasituksessa laboratorio-olosuhteiden sijaan. Väitöskirjassa on kaksi case-tutkimusta kemian tehtaasta. (Kiviste 2011)

Useista maista löytyi artikkeleita, joissa arvioitiin laskentamallilla karbonatisoitumisen etenemistä olemassa olevissa rakenteissa. Näitä maita olivat muun muassa Japani ja Indonesia, joiden ilmasto eroaa Suomesta huomattavasti. Yleisesti sellaista ulkomaista tutkimusta, joka olisi relevanttia tämän tutkimuksen kannalta, ei ole tehty.

2.6 Yhteenveto

Hitaimmin vaurioitumiseen johtavat ilmiöt etenevät betonissa, joka on

- alhaisella vesi-sideainesuhteella valmistettu,
- lisähuokostettu,
- asianmukaisesti jälkihoidettu,
- jossa raudoitteet sijaitsevat tarpeeksi syvällä sekä
- on käytetty lujaa, ei AKR-altista kiviainesta.

Julkisivuissa, joiden ulkopinta on muottipinta tai tuoreena käsitelty, näkyy jälkihoidon vaikutus alun karbonatisoitumisnopeudessa. Muottipintaisissa se on hitaampaa, sillä niillä jälkihoito on käytännössä optimaalinen, kun taas tuoreena käsiteltyjen ei.

Suomalaiset betonijulkisivut eivät ole klorideista johtuvalle korroosiolle alttiita, sillä kloridipitoisia kiihdyttimiä ei enää käytetä. Ulkoiset tekijät ovat Suomessa vähäisiä ja betoniin tunkeutuvat pitoisuudet eivät ylitä korroosion kannalta kriittistä raja-arvoa.

Nykyään tehtävissä kuntotutkimuksissa ei voida jättää AKR mahdollisuutta ulkopuolelle. Lisääntyvän murskatun kiviaineksen käytön myötä AKR tulee yleistymään. Ettringiittiä ei pitäisi periaatteessa esiintyä, sillä elementtejä ei enää lämpökäsitellä kovettumisen nopeuttamiseksi.

3. TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksessa analysoitavat kuntotutkimukset on suorittanut A-Insinöörit Oy:n kuntotutkijat Betoniyhdistyksen Betonijulkisivujen kuntotutkimus -ohjeiden (BY 42 2002, 2013, 2019) mukaisesti. Tulosten käsittelyssä näihin viitataan aineistona. Kuntotutkimukset on suoritettu vuosien 2007–2021 välillä. Vaikka kuntotutkimusohje on päivittynyt useamman kerran aineiston keräysaikana, ei tutkimuksen ja tulosten tulkinnan sisältö ole muuttunut oleellisesti. Taulukossa 5 on esitetty 1990-luvun kohteiden määrä sekä niiden sijainnit.

Taulukko 5. *Tutkimuksessa tarkasteltavien 1990-luvulla rakennettujen rakennusten sijainti ja lukumäärä.*

Sijainti	Rannikko	Etelä-Suomi	Sisä-Suomi
Määrä	14	13	1

Taulukon 5 mukaisesti kohteet ovat sijoittuneet rannikolle sekä Etelä-Suomeen. Tämä johtuu siitä, että A-Insinöörien liiketoiminta on keskittynyt näille alueille. Jako perustuu BeKo-tutkimuksen (2010, s. 15) jaotteluun. Suurin osa kohteista on suurten kiinteistönomistajien omistamia, mutta myös julkisia rakennuksia sekä yksityisiä taloyhtiöitä aineistosta löytyy. Kohteiden ikä tutkimushetkellä oli keskimäärin 22 vuotta, 5,5 vuoden keskihajonnalla. Lisäksi tarkastellaan 2000-luvun rakennuksia yksittäistapauksina, sillä kohteita on vain viisi.

Tutkimuksen tuloksia verrataan BeKo-tietokantaan, joka on vuosien 2006–2009 välillä kerätty kuntotutkimustietokanta. Se sisältää kohteita, jotka on rakennettu 1960–1996. Kohteiden ikä tutkimushetkellä oli keskimäärin 24 vuotta, 7,9 vuoden keskihajonnalla. Tässä tutkimuksessa kerättyä aineistoa verrataan koko BeKo-tietokantaan, 1985–1989 rakennettuihin parvekkeisiin sekä 1990-luvun rakennuksiin. 1980-luvun lopun tarkastelu erillisenä muusta vanhemmasta rakennuskannasta on oleellista, jotta voidaan säilyvyysohjeiden vaikutusta betonin toteutuneeseen laatuun. BeKo-tutkimuksen kuntotutkimustietokantaan viitataan sekä BeKo-tietokantana että vanhempana rakennuskantana. Kuntotutkimukset on tehty Betoniyhdistyksen Betonijulkisivun kuntotutkimus -ohjeiden mukaisesti.

Rakennuksen kuntotutkimuksen tarkoituksena on selvittää rakennuksen kunto ja rakenteiden turvallisuus. Kuntotutkimuksessa selvitetään vaurioiden olemassaolo, laajuus, sijainti, aste, syy, vaikutus sekä etenemisen mahdollisuus.

Kuntotutkimussuunnitelma laaditaan jokaiselle kohteelle erikseen, mutta yleensä kenttätutkimukseen kuuluu silmämääräinen tarkastelu, betonipinnan vasarointi, raudoitteiden

peitepaksuuksien mittaaminen sekä poralieriöiden porauslaboratoriossa tehtäviä tarkempia tutkimuksia varten. Lisäksi betonista kerätään porajauhenäyte kloridipitoisuuden määrittämistä varten. Poralieriöistä tehdään silmämääräistä tarkastelua, vetolujuuskokeita ja mikrorakennetutkimuksia ohuthieestä.

Raudoitteiden peitepaksuuksia mitataan peitepaksuusmittarilla. Sillä saadaan ainetta rikkomattomasti nopeasti mitattua satojen raudoitteiden peitepaksuus. Tällä tavalla saadaan selvitettyä, kuinka suuri osa raudoituksesta on korroosiovaarassa vertaamalla peitepaksuutta betonin karbonatisoitumissyvyysmittauksiin. Mittaus tehdään kaikista eri rakennetyypeistä, julkisivun pintatyypeistä sekä raudoitetyypeistä.

Betonin karbonatisoitumissyvyys selvitetään poratuista näytelieriöistä mahdollisimman nopeasti näytteenoton jälkeen. Lieriön pinta puhdistetaan porauspölystä ja sivellään fenoliftaleiinilla, jolloin karbonatisoitumaton betoni värjäytyy pinkiksi. Poralieriöiden pinnalta mitataan karbonatisoitumissyvyysmittauksen minimi, maksimi sekä keskiarvo.

Näytteen kloridipitoisuus selvitetään liuottamalla kerätty jauhe happoliuokseen. Laboratoriolaite ilmoittaa kloridipitoisuuden, jota verrataan raja-arvoihin. Kloridipitoisuuden mittaukseen laboratoriot ovat käyttäneet standardiin SFS-EN 14629 (2007) perustuvaa määrittämissä.

Pakkasrapautumista tarkastellaan laboratoriossa vetolujuuskokein sekä mikrorakennetutkimuksella. Pakkasrapautumisen seurauksena betoniin syntyy halkeamia, jotka alenuttavat sen vetolujuutta. Vetolujuuskokeesta saatua arvoa verrataan taulukkoarvoihin, joiden pohjalta voidaan tehdä arvio pakkasrapautumisen asteesta. Mikrorakennetutkimusta varten lieriönäytteestä valmistetaan 25–30 µm paksu, ulkopintaan nähden kohtisuora levy, eli ohuthie, jota tarkastellaan mikroskoopilla. Näytteestä voidaan erottaa mm. syntyneet mikrohalkeamat, betonin huokosrakenne sekä huokosten mahdollinen täyteisyys. Lisäksi voidaan tarkastella betonin kiviaineksen ja sideaineen välisiä tartuntoja ja kiviaineksen koostumusta.

Ettringiitti sekä alkali-kiviainesreaktio ovat havaittavissa vain ohuthienäytteestä. Ettringiitti näkyy neulamaisena täytteenä, yleensä suojahuokosissa. Alkali-kiviainesreaktio taas näyttäytyy kiviaineen ja sementtimassan heikentyneenä tartuntana. Alkali-kiviainesreaktio voidaan havaita myös kenttätutkimusten yhteydessä, jos rakenteen pinnalla näkyy sille ominaista geeliä tai kiviaineksen murtopinnoilla tyypillinen reaktiokehä. Kenttähavainto varmistetaan laboratoriossa.

Taulukossa 6 on esitetty tutkimuksessa käytettyjen näytteiden määrät.

Taulukko 6. Tutkimuksessa käytettävien näytteiden määrä näytetyypeittäin. Taulukossa vain 1990-luvun näytteet.

Näytetyyppi	Näytemäärä, julkisivut [kpl]	Näytemäärä, parvekkeet [kpl]
Peitepaksuus	29 721	25 164
Karbonatisoitumissyvyys	324	269
Kloridipitoisuus	67	58
Vetolujuuskokeet	221	175
Ohuthienäytteet	324	269

Parvekeosien kanssa yhteen on niputettu luhtikäytävien vastaavat osat, sillä niiden olosuhteet ovat samanlaiset kuin parvekkeiden. Näytteissä oli myös parvekepilareita ja niiden tulokset on yhdistetty parvekepielien kanssa samaan.

Tuloksissa esitetyt eri vuosikymmeniä koskevat kuvaajat on piirretty eri väreillä, jotta on helpompi erottaa mikä vuosikymmen on kyseessä. 1990-luvun kuvaajat ovat sinisen sävyisiä, 1980-luvun kuvaajat harmaan sävyisiä ja 2000-luvun kuvaajat vihreän sävyisiä.

4. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

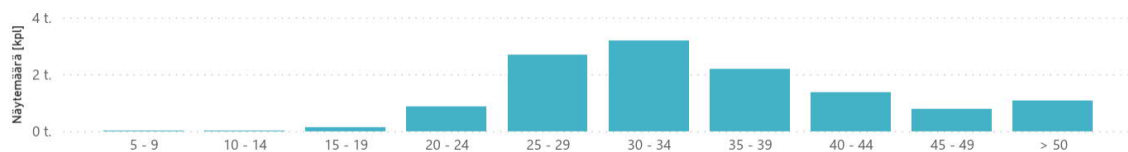
Luvussa käsitellään tutkimustulokset ja niistä tehtävät johtopäätökset.

4.1 Peitepaksuudet

Luvussa tarkastellaan betonipeitepaksuuksia julkisivuilla ja parvekkeissa sekä niiden onnistumista peitepaksuusvaatimuksiin verrattuna.

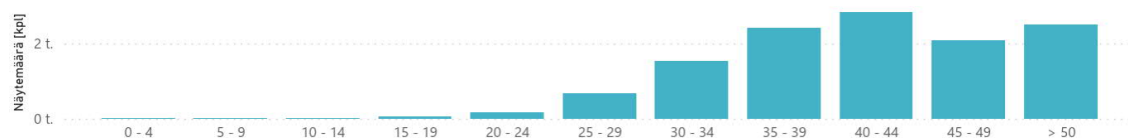
Julkisivut

Kuvissa 12 ja 13 on esitetty julkisivupintatyyppien peitepaksuusjakauma. Kuvassa 12 on yhdistetty muottipinnat, pesubetoni sekä valkobetoni (betonipintaisten). Kuvassa 13 on esitetty klinkkeri- ja tiililaattapinnat (pintatarvikkeelliset) yhdistettynä. Jako perustuu siihen, että laattapintaisten julkisivuilla peitepaksuudet ovat erilaisia kuin muilla pintatyypeillä. Peitepaksuudet on mitattu elementtien ulkopinnasta.



Kuva 12. Betonipeitepaksuusjakauma 1990-luvun betonipintaisten julkisivuissa ($n=15\ 376$).

Kuvan 12 mukaisesti suurin osa betonipintaisten julkisivujen raudoituksista sijaitsee syvemmällä kuin 25 mm elementin pinnasta. 0,18 % raudoitteista sijaitsi 10–14 mm syvyydellä, 1,00 % 15–19 mm syvyydellä ja 5,61 % 20–24 mm syvyydellä. Alle 10 mm syvyydellä olevia raudoitteita havaittiin yhteensä vain 11 kappaletta ja 0–4 mm syvyydellä olevia raudoitteita ei ollut yhtään. 1990-luvulla suojabetonipeitteen ohjeistusarvo on ollut 25–35 mm riippuen olosuhdeluokasta. Ohjeistusarvon alittavia paksuuksia oli yhteensä 6,86 %, mikä ei ole merkittävä määrä.



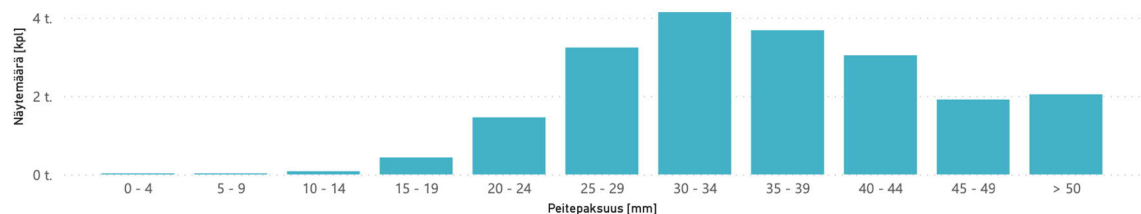
Kuva 13. Betonipeitepaksuusjakauma 1990-luvun klinkkeri- ja tiililaattapintaisten julkisivuilla ($n=14\ 931$). Huom! Y-akselin asteikko erilainen verrattuna kuvaan 12.

Kuvan 13 mukaisesti tiilipintaisilla julkisivuilla raudoitukset sijaitsevat yleisesti yli 35 mm syvyydellä. 0,09 % raudoitteista sijaitsi 10–14 mm syvyydellä, 0,42 % 15–19 mm syvyydellä ja 1,15 % 20–24 mm syvyydellä. 25–29 mm syvyydellä sijaitsi 4,46 % raudoitteista ja 30–34 mm syvyydellä puolestaan 10,21 %. Paksummat suojabetonipaksuudet johtuvat laattapinnoista. Tiililaatat ovat yleisesti n. 20 mm paksuja ja klinkkerilaatat 6–10 mm, mutta paksuus voi vaihdella. Laattojen paksuus on jo vähennetty peitepaksuuksista eli mittaus on tehty betonin ulkopinnasta. Julkisivun ulkopinnasta alle 25 mm syvyydellä sijaitsee yhteensä 1,68 % raudoitteista.

Vanhempaan rakennuskantaan (1960–1989) verrattuna alle 20 mm peitepaksuudet ovat käytännössä hävinneet, joten sen kannalta elementtien laatu on parantunut. Ohjeistuksen (25 mm) alituksia on kuitenkin havaittavissa. Peitepaksuusjakauma on edelleen laakea, etenkin laattapintaisilla julkisivuilla.

Parvekkeet

Kuvassa 14 on esitetty parvekkeiden elementtien peitepaksuusjakauma. Kuvaajaan on yhdistetty parvekepielen, -laatan ja -kaiteen peitepaksuudet. Mittaustulokset ovat sekä elementin sis- että ulkopinnoista ja laatan osalla ylä- ja alapinnoista. Parvekeosien tulokset on esitetty yhdistettynä, sillä parvekeosien välillä suojabetonipeitepaksuuksien jakaumassa ei ollut eroja. Jakaumat löytyvät eriteltyinä liitteestä B.



Kuva 14. Betonipeitepaksuuksien jakauma parvekkeissa 1990-luvulla ($n=25\ 164$).

Kuten kuvasta 14 nähdään, parvekeosilla raudoitteiden suojabetonipeitepaksuus on useimmiten 30–34 mm. Tämä osuu vielä mittapoikkeamatoleranssiin, joka on 10 mm (BY 68 2016, s. 34). Parvekemittauksissa ilmeni myös muutamia 10–14 mm peitepaksuuksia. Yhteensä alle 25 mm syvyydellä sijaitsevia raudoituksia on 7,9 %. BeKo-tietokantaan verrattuna tilanne on parantunut merkittävästi, sillä vanhemmassa rakennuskannassa alle 20 mm peitepaksuuksia oli noin 25 % parvekeosasta riippuen.

4.2 Karbonatisoituminen

Tässä luvussa tarkastellaan 1990-luvun kohteiden karbonatisoitumissyvyyksiä sekä -nopeuksia julkisivutyypeittäin ja parvekeosittain, ja verrataan niitä vanhempaan rakennuskantaan (1960–1989). 2000-luvun kohteita oli liian vähän systemaattiseen tarkasteluun, mutta yksittäiset tulokset on esitetty.

Julkisivut

Taulukossa 7 on esitetty karbonatisoitumiskertoimien keskiarvo, keskihajonta, minimi- ja maksimiarvot sekä näytteiden määrät eri julkisivutyypin ulkopinnoille. Oikean puolimmaisessa sarakkeessa on esitetty karbonatisoitumiskertoimen vertailuarvo Lahdensivun (2012) tutkimuksista vanhemmasta rakennuskannasta. Karbonatisoitumiskertoimet on selvitetty karbonatisoitumissyvyyden sekä rakennuksen iän avulla.

Taulukko 7. *Karbonatisoitumiskertoimet elementtien ulkopinnoille eri julkisivutyypeille 1990-luvun rakennuksissa. Vertailuarvo on karbonatisoitumiskertoimen keskiarvo vanhemmassa rakennuskannassa Lahdensivun (2012, s. 71) tutkimuksen mukaisesti.*

Pintatyyppi	Keskiarvo [mm/a ^{0,5}]	Keskihajonta [mm/a ^{0,5}]	Minimi [mm/a ^{0,5}]	Maksimi [mm/a ^{0,5}]	n [kpl]	Vertailuarvo [mm/a ^{0,5}]
Pesubetoni	0,35	0,52	0	2,24	59	1,96
Klinkkerilaatta	0,99	1,03	0	3,06	54	0,57
Muottipinta, maalattu	2,88	1,24	0,6	5,77	33	2,03
Valkobetoni	0,55	1,02	0	5,88	58	0,61
Tiililaatta	0,62	0,74	0	3,05	115	1,47

Taulukossa 7 on esitetty karbonatisoitumiskertoimia eri julkisivutyypeille. Hitainta karbonatisoituminen on ollut pesubetonilla ja nopeinta maalatulla, muottipintaisella julkisivulla.

1990-luvun rakennuskannassa pesubetonin karbonatisoitumiskerroin on keskimäärin 0,35 ja keskihajonta vain 0,52 eli hyvin suppea. Maksimikarbonatisoitumiskerroin on 2,24, joka on pienempi kuin muilla julkisivutyypeillä. Verrattuna vanhempaan rakennuskantaan, karbonatisoitumiskerroin on huomattavasti pienempi. Pesubetonilla karbonatisoituminen on siis hitaampaa uudessa rakennuskannassa. Tähän on voinut vaikuttaa korkeampi betonin lujuusluokka sekä parempi pakkasenkestävyys, ks. luku 4.5.1., sekä hienompi kiviaines. Vanhemmassa rakennuskannassa pesubetonijulkisivuissa on usein pakkasrapautumaa, jolloin karbonatisoituminen etenee

paikallisesti nopeasti (esim. Lahdensivu et al. 2019). Karbonatisoitumissyvyys on selvitetty sekä pH-indikaattorilla että ohuthiestä.

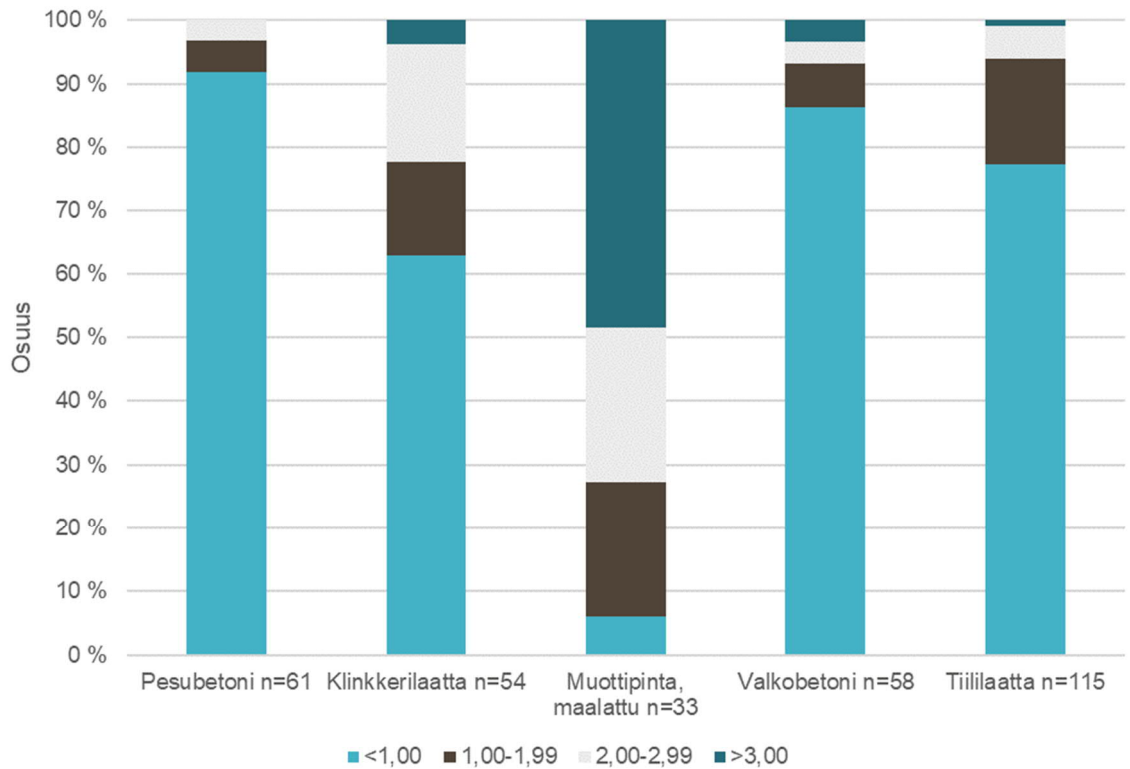
Klinkkerilaattapintaisilla julkisivuilla karbonatisoitumiskertoimien keskiarvo on 0,99 ja keskihajonta 1,03 eli hajonta on suurempaa kuin pesubetonilla. Maksimikarbonatisoitumiskerroin on 3,06. Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna karbonatisoituminen on keskimäärin ollut hieman nopeampaa uudessa rakennuskannassa.

Maalatuilla, muottipintaisilla julkisivuilla karbonatisoituminen on ollut selkeästi nopeampaa kuin muilla julkisivutyypeillä. Karbonatisoitumiskertoimen keskiarvo on 2,88 ja keskihajonta 1,24, joka on laajin kaikista julkisivutyypeistä. Minimikarbonatisoitumiskerroin on 0,6, jolloin kyseinen julkisivutyyppi on ainut, jonka minimikarbonatisoitumiskerroin ei ole nolla. Muottipintaisella julkisivulla karbonatisoituminen vaikuttaisi nopeutuneen hieman vanhempaan rakennuskantaan verrattuna. Tuloksiin on voinut vaikuttaa 1990-luvun betonin oleellisesti parempi lisähuokostus sekä avohuokoisen maalin käyttö tiiviin sijaan. Lisäksi rakenteet ovat voineet olla sateelta suojattuja, kuten parvekkeiden taustaseinät, jolloin karbonatisoituminen on nopeampaa.

Valkobetonipintaisilla julkisivuilla karbonatisoitumiskerroin on keskimäärin 0,55 ja keskihajonta 1,02. Maksimikarbonatisoitumiskerroin on 5,88, mikä on eri julkisivutyypien suurin kerroin. BeKo-tietokantaan verrattuna karbonatisoituminen on hidastunut hieman, mutta valkobetonia on käytetty lähinnä 1980-luvun lopulla sekä 1990-luvulla, joten vertailua eri vuosikymmenten välillä ei voida tehdä.

1990-luvun tiililaattapintaisille julkisivuille karbonatisoitumiskertoimien keskiarvo on 0,62 ja keskihajonta 0,74, joka on suppeahko. Tiililaattapintaisia näytteitä oli eniten. Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna karbonatisoituminen on hidastunut merkittävästä ja hajonta on huomattavasti suppeampi.

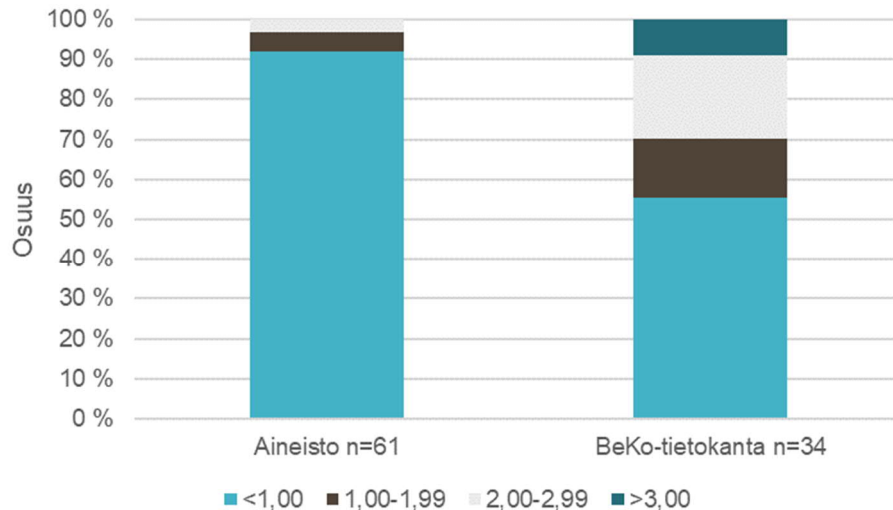
Kuvassa 15 on esitetty karbonatisoitumiskerroinjakauma viidelle yleiselle julkisivupintatyypille 1990-luvulla. Karbonatisoitumiskerroin on laskettu kaavan (1) avulla selvittämällä yksittäisten näytelieriöiden karbonatisoitumissyvyys sekä kohteen ikä tutkimushetkellä. Kertoimien jako perustuu siihen, että Lahdensivun (2012, s. 76) mukaan alle yhden kerroin on hidasta karbonatisoitumista ja yli kolmen on nopeaa.



Kuva 15. Karbonatisoitumiskertoimien jakauma 1990-luvun kohteissa julkisivupintatyyppin mukaan jaoteltuna.

Kuten kuvasta 15 nähdään, karbonatisoituminen etenee hitaasti ($k < 1$) suuressa osassa eri julkisivupintatyyppisiä. Maalatuilla, muottipintaisilla julkisivuilla reilulla 40 % näytteistä karbonatisoitumiskerroin on yli kolme eli nopeaa. Kuvasta puuttuvat harjatut, hierretyt ja maalaamattomat muottipinnat, sillä tutkimusaineistoon ei kuulunut kyseisiä julkisivun pintatyyppisiä.

Vertailtaessa kuvan 15 tuloksia vanhempaan rakennuskantaan, pesubetonilla on selkeästi erilainen karbonatisoitumiskerroinjakauma. 1990-luvun pesubetonin karbonatisoitumiskertoimista yli 90 % on alle yhden, kun taas vuosien 1960–1996 datassa näiden osuus on vain 20 %. Kuvassa 16 on molempien tietokantojen 1990-luvun näytteet vierekkäin.



Kuva 16. Pesubetonin karbonatisoitumiskerroinjakauma kahdessa eri aineistossa 1990-luvun rakennuksissa.

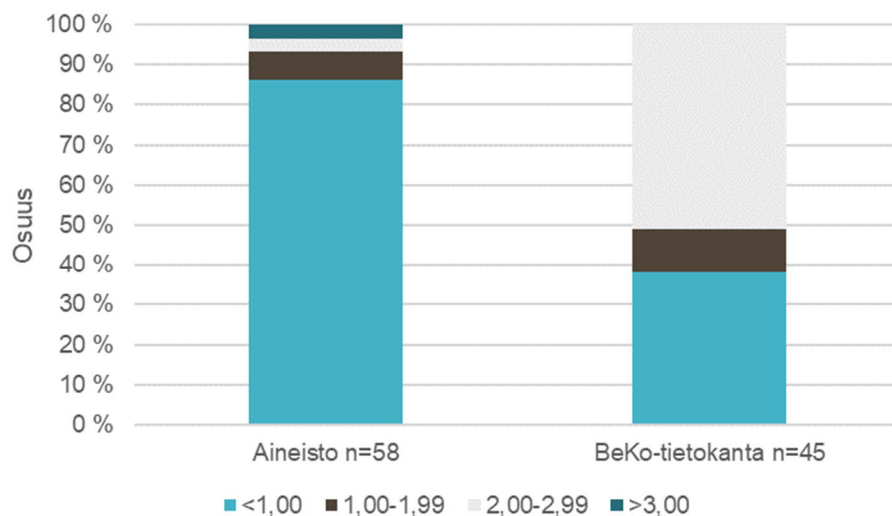
Jos BeKo-tietokannasta erotellaan 1990-luvun tulokset, voidaan piirtää kuva 16. Tulokset ovat hyvin erilaisia keskenään, vaikka tarkastellut rakennukset ovat samalta vuosikymmeneltä. Eroteltuja näytteitä on vain 34 kappaletta ja ne ovat kohteista, jotka on rakennettu 90-luvun alkupuolella. Varovasti voidaan arvioida pesubetonin karbonatisoitumisen olevan hitaampaa kuin aiemmassa tutkimuksessa pienemmällä otannalla on esitetty.

Klinkkerilaattapintaisilla julkisivuilla kuvan 15 mukaan näytteitä, joissa karbonatisoitumiskerroin on yli $2 \text{ mm/a}^{0,5}$, on enemmän kuin vanhemmasta rakennuskannasta (1960–1989) tehdyissä tarkasteluissa. Näytteitä oli 54. Täten $<1 \text{ mm/a}^{0,5}$ karbonatisoitumiskertoimen näytteet ovat vähentyneet noin 10 prosenttiyksiköllä. BeKo-tietokannassa ei ollut 90-luvulla valmistuneita klinkkerilaattapintaisia kohteita.

Muottipintaisen, maalatun betonin karbonatisoitumiskertoimien jakauma on samansuuntainen vanhemman rakennuskannan kanssa. Näytteitä, joiden karbonatisoitumiskerroin on yli $3 \text{ mm/a}^{0,5}$ on melkein 50 %, joka on huomattavasti enemmän kuin vanhemman rakennuskannan joukossa. Alle $1 \text{ mm/a}^{0,5}$ nopeudella eteneviä näytteitä oli n. 5 %, kun vanhemmassa rakennuskannassa niitä oli melkein 20 %. Tähän eroon vaikuttaa huomattavasti näytteiden määrä, sillä tarkasteltavassa aineistossa niitä on vain 33 ja BeKokannassa yli 350, joista vain muutama on 1990-luvulta. 33 näytettä on 4 eri kohdetta eli kovin suppea. Karbonatisoitumiskerroinjakauman ero muihin julkisivutyyppeihin johtuu pinnan valmistustavasta ja sijainnista. Tiililaattapinta tiivistää alla olevaa betonia, jolloin karbonatisoituminen on hidasta ja klinkkerilaatta estää hiilidioksidin diffuusion. Muottipintaiset elementit ovat voineet sijaita parvekkeiden taustaseinissä tai sokkelissa,

jolloin ne eivät saa viistosadetta osakseen. Olosuhteet ovat kuitenkin kosteat ja karbonatisoituminen pääsee etenemään nopeasti. Tarkempaa tietoa betonin kapillaariominaisuuksista ei ole, sillä näytteille ei ole tehty suojahuokoskokeita. Käytetystä maalityypistäkään ei ole tietoa, joten sen karbonatisoitumista mahdollisesti hidastavaa vaikutusta ei voida arvioida. Muottipintaisten elementtien valmistetaan teräsmuottia vasten, joka ei ime betonista vettä ja täten tiivistä elementin pintabetonia. Kokeneiden elementtisuunnittelijoiden kanssa käydyn keskustelun perusteella muottipintaisten elementtien on valmistettu tehtaissa aina teräsmuotteilla. Puumuotteja on voitu käyttää työmailla sijaitsevilla elementtituotantolinjoilla. Muotin valmistusmateriaalin mahdollinen vaihto ei siis selitä kasvannutta nopean karbonatisoitumisen lisääntynyttä osuutta. Lisähuokostuksen käyttö on tehnyt betonista myös huokoisempaa, jolloin karbonatisoituminen voi edetä nopeammin kuin tiiviissä betonissa. Luvussa 4.5 on käsitelty lisähuokostuksen onnistumista 1990-luvulla ja verrattu sitä aiempaan rakennuskantaan.

Valkobetoninäytteiden karbonatisoitumiskerroinjakauma on samanlainen sekä 1990-luvun että vanhemmassa rakennuskannassa. Vanhassa rakennuskannassa näytteitä oli vain 58 (huomattavasti vähemmän kuin muilla julkisivun pintatyypeillä). Kuvassa 17 on molempien tietokantojen näytteet 1990-luvulta.

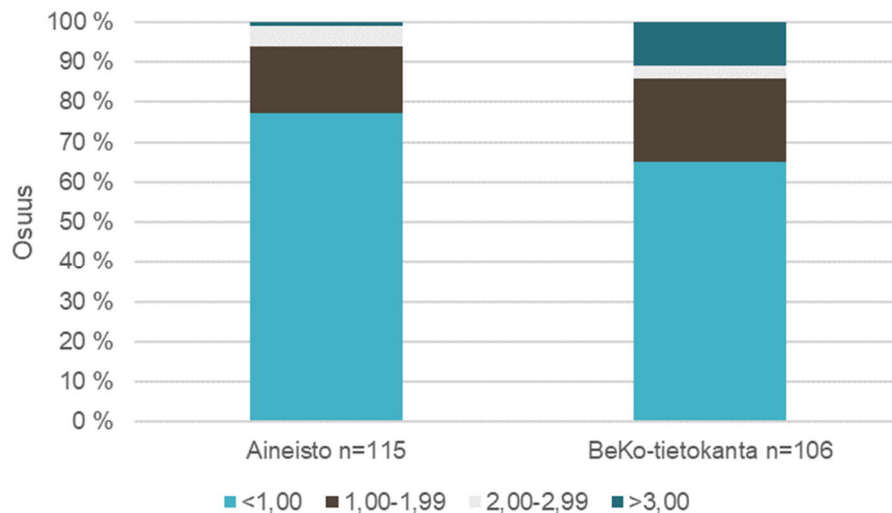


Kuva 17. Valkobetonin karbonatisoitumiskertoimet 1990-luvun rakennuksissa kahdessa eri aineistossa.

Kun 1990-luvun kohteet eroteltiin vanhemmasta rakennuskannasta, kuvaajasta tuli hyvin erilainen (kuva 17). Näytteiden määrä väheni vain 13:lla koko BeKo-tietokannan valkobetoninäytemäärästä. Köliön (2011, s. 22) mukaan valkobetonin käyttö on yleistynyt vasta 1990-luvulla, mikä selittää BeKo-tietokannan vähäisen näytemäärän. Se ei kuiten-

kaan selitä 50 % osuutta 2,00–2,99 mm/a^{0,5} karbonatisoitumiskertoimille, kun vuosikymmenen ulkopuoliset näytteet poistetaan. Lisäksi <1 mm/a^{0,5} kertoimen näytteitä oli vain 40 %, kun 1990-luvun aineistossa niitä oli suurin osa, 85 %.

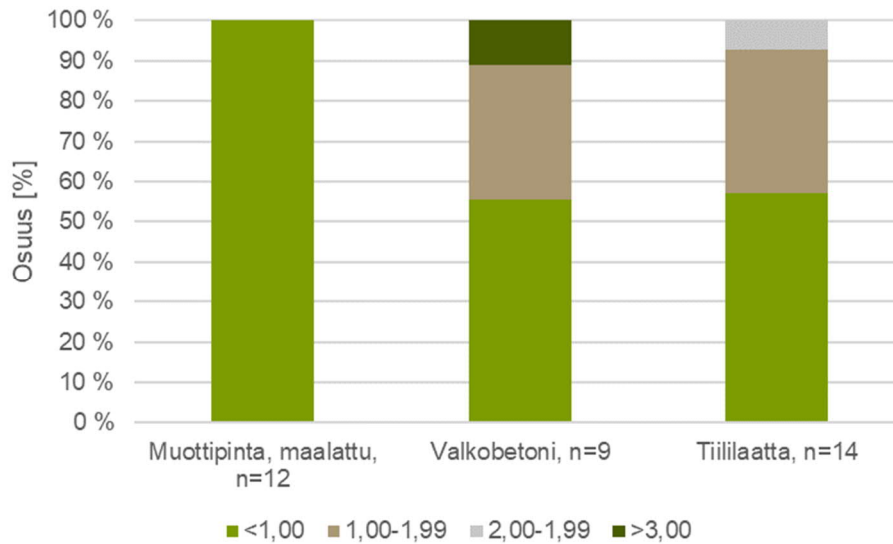
1990-luvun tiililaattapintaisten julkisivuilla näytteitä, joiden karbonatisoitumiskerroin on alle 1 mm/a^{0,5}, on prosentuaalisesti enemmän kuin vanhemmassa rakennuskannassa, 85 % verrattuna aiempaan 60 %:iin. Erittäin nopeasti karbonatisoituneita näytteitä on vain prosentin luokkaa, kun taas vanhemmassa kannassa niitä on yli 10 %. 1,00–1,99 mm/a^{0,5} karbonatisoitumiskertoimen näytteitä on molemmissa rakennuskannoissa noin 20 %. Kuvassa 18 on molempien tietokantojen 1990-luvun näytteet vierekkäin.



Kuva 18. Tiililaattapintaisten julkisivujen karbonatisoitumiskerroinjakaumat kahdessa eri aineistossa 1990-luvun rakennuksissa.

Kun BeKo:sta erotellaan 1990-luvun näytteet, ovat jakaumat hyvin samanlaisia (kuva 18). Yli 3 mm/a^{0,5} karbonatisoituvien näytteiden osuus on huomattavasti suurempi BeKo-tietokannassa. Erotellussa datassa näytteitä on 106 eli otanta on lähes samankokoinen vertailtavissa aineistoissa. Köliön (2011, s. 22) mukaan tiililaattapinta on 1980- ja 1990-lukujen hallitseva julkisivupintatyyppi BeKo-tietokannassa, joten tietokannan kaikki näytteet ovat lähes samalta aikakaudelta kuin tarkasteltavan aineiston.

Kuvassa 19 on esitetty 2000-luvulla rakennettujen kohteiden karbonatisoitumiskerroinjakaumat. Julkisivutyyppejä oli vain maalattu muottipinta, valkobetoni sekä tiililaattapinta. Kohteet ovat valmistuneet 2000–2003.



Kuva 19. 2000-luvulla rakennettujen julkisivujen karbonatisoitumiskerroinjakaumat.

2000-luvun aineistosta ei voida tehdä systemaattista tarkastelua, sillä näytemäärä on hyvin pieni. Karbonatisoituminen on edennyt pääosin hitaasti.

Parvekkeet

Taulukossa 8 on esitetty parvekekaiteiden ja -pielien karbonatisoitumiskertoimien keskiarvot, keskihajonnat, minimi, maksimit sekä näytemäärä ulko- ja sisäpinnoille. Parvekelaatalle on esitetty samat suureet sen ala- ja yläpinnalle. Oikean puolimmaisessa sarakkeessa on esitetty vertailuarvo vanhemmasta rakennuskannasta (Lahdensivu 2012, s. 73).

Taulukko 8. Karbonatisoitumiskertoimet eri parvekeosille 1990-luvun rakennuksissa. Vertailuarvo on karbonatisoitumiskertoimen keskiarvo vanhemmassa rakennuskannassa Lahdensivun (2012, s. 73) tutkimuksen mukaisesti.

Parvekeosa	Pinta	Keskiarvo [mm/a ^{0,5}]	Keskihajonta [mm/a ^{0,5}]	Minimi [mm/a ^{0,5}]	Maksimi [mm/a ^{0,5}]	n [kpl]	Vertailuarvo [mm/a ^{0,5}]
Parvekekaide	Ulkopinta	1,38	1,29	0	7,70	72	2,06
	Sisäpinta	1,67	1,12	0	4,24	72	2,17
Parvekepieli	Ulkopinta	2,01	1,52	0	6,60	98	2,61
	Sisäpinta	2,27	1,98	0	8,94	87	2,92
Parvekelaatta	Yläpinta	0,82	0,71	0	3,54	99	1,21
	Alapinta	2,75	1,53	0	9,84	99	3,08

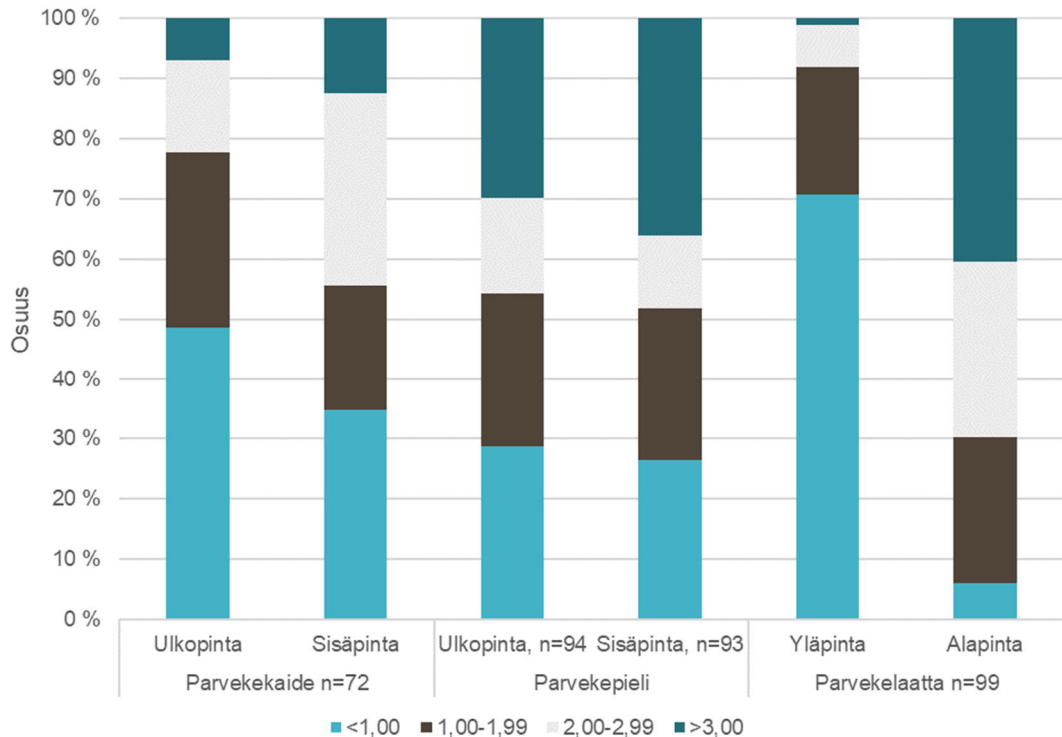
Taulukossa 8 on parvekeosien karbonatisoitumiskertoimet eri pinnoille. Keskihajonnat ovat suuria paitsi parvekelaattojen yläpinnoilla. Parvekepielien näytemäärä ulko- ja sisäpinnalle on eri, sillä parvekepielien kanssa on yhdistetty pilarinäytteet, joiden ajatellaan olevan parvekepielen ulkopinnan kaltaisissa olosuhteissa.

Parvekekaiteiden ulkopinnan karbonatisoitumiskertoimien keskiarvo on 1,38 ja keskihajonta 1,29. Sisäpinnalle vastaavasti 1,67 ja keskihajonta 1,12 eli karbonatisoituminen on nopeampaa sisäpinnalla. 1960–1989 rakennuskantaan verrattuna karbonatisoituminen näyttäisi hidastuneen huomattavasti kummallakin pinnalla.

Parvekepielien ulkopinnan karbonatisoitumiskertoimien keskiarvo on 2,01 ja keskihajonta 1,52. Sisäpinnalle keskiarvo on 2,7 ja keskihajonta 1,98, joka on laajin hajonta. Karbonatisoituminen on hidastunut molemmilla pinnoilla vanhempaan rakennuskantaan verrattaessa.

Parvekelaattojen ylä- ja alapinnan karbonatisoitumiskertoimien välillä on huomattava rakenteesta johtuva ero. Alapinnalla kerroin on jopa 2,75, keskihajonnan ollessa 1,53 ja yläpinnalle vain 0,82. Yläpinnan keskihajonta on 0,71, joka on parvekeosien suppein. Vanhaan rakennuskantaan verrattuna karbonatisoitumiskertoimet ovat pienentyneet.

Kuvassa 20 on esitetty parvekekaiteiden ja -pielien karbonatisoitumiskerroinjakauma ulko- ja sisäpinnalle sekä parvekelaatan karbonatisoitumiskerroinjakauma ala- ja yläpinnalle.



Kuva 20. Karbonatisoitumiskertoimien jakauma parvekeosien mukaan 1990-luvulla rakennetuissa kohteissa.

Kuvassa 20 on esitetty karbonatisoitumiskertoimien jakauma eri parvekeosille sekä eroteltu ne eri pintojen mukaan. Erottelu sisä- ja ulkopintoihin johtuu niiden erilaisista rasitusolosuhteista. Kuten kuvasta 20 nähdään, etenee karbonatisoituminen hyvin eri vauhtia parvekeosien kesken. Lisäksi karbonatisoituminen näyttää etenevän parvekkeilla nopeammin kuin julkisivuilla.

Parvekekaiteiden ulkopinnassa hidasta karbonatisoitumista ($k < 1$) on vain hieman alle 50 % näytteistä. Hieman nopeampaa ($k = 1-1,99$) karbonatisoitumista on jopa 30 %. Sisäpinta tarjoaa otollisemmat olosuhteet karbonatisoitumiselle ja hidasta karbonatisoitumista on havaittavissa vain 35 % näytteistä. Nopeaa karbonatisoitumista ($k > 3$) on reilu 10 % näytteistä.

Verrattaessa 1990-luvun parvekekaiteita vanhempaan rakennuskantaan ovat tulokset hyvin samansuuntaisia. Nopean karbonatisoitumisen havainnot ovat kuitenkin pienentyneet 20 %:sta 5–10 %:iin pinnasta riippuen.

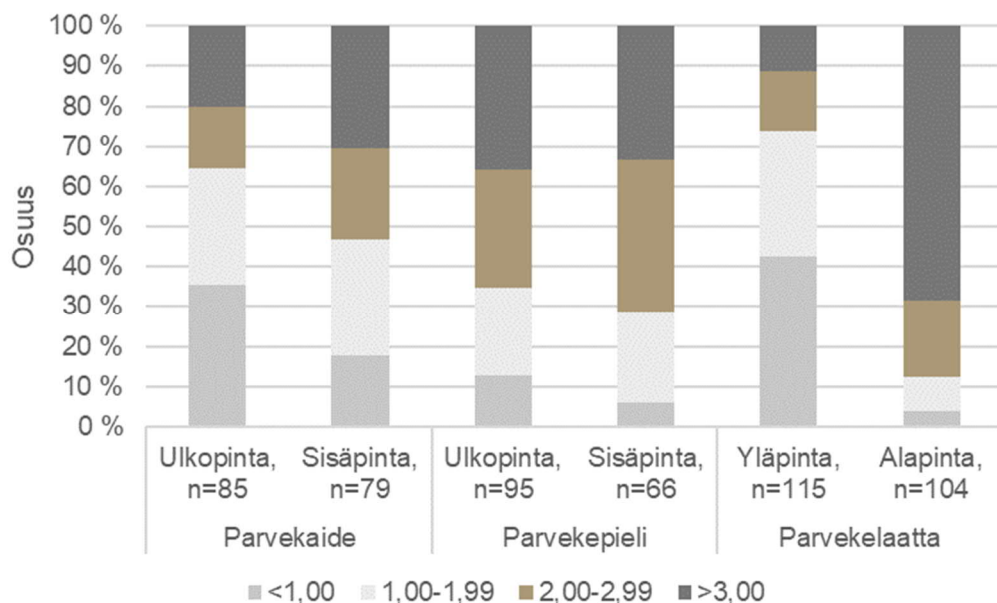
Parvekepielillä karbonatisoituminen on edennyt nopeammin kuin kaiteilla. Hidasta karbonatisoitumista on noin 30 %, mutta nopeaa karbonatisoitumista 30 % ulkopinnalla ja 35 % sisäpinnalla. 1,00–1,99 k-kertoimen näytteitä on n. 25 % kummallakin pinnalla.

Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna nopean karbonatsoitumisen osuus on laskeutunut noin 10 prosenttiyksikköä kummallakin pinnalla. Hitaan karbonatsoitumisen osuus on noussut noin 20 prosenttiyksiköllä.

Parvekelaatalla ylä- ja alapinnan olosuhteet ovat erilaisimmat ja karbonatsoitumiskertoimien jakauma hyvin erilainen. Alapinnalla olosuhteet ovat otollisemmat nopealle karbonatsoitumiselle ja se näkyy nopean karbonatsoitumisen ($k > 3$) jopa 40 % osuutena. Hidasta karbonatsoitumista on vain noin 5 %. Yläpinta on usein päällystetty vesi- ja ilmatiiviillä pinnoitteella ja siten hitaan karbonatsoitumisen osuus on 70 % kaikista näytteistä. Nopeaa karbonatsoitumista on vain muutama prosenttiyksikkö.

1960–1989 rakennuskannassa karbonatsoituminen on ollut nopeampaa. Nopean karbonatsoitumisen osuus on pienentynyt 10 prosenttiyksiköllä laatan alapinnassa. Hitaan karbonatsoitumisen osuus puolestaan on kasvanut noin 20 prosenttiyksiköllä yläpinnalla.

Kuvassa 21 on esitetty 1985–1989 välillä rakennettujen parvekkeiden karbonatsoitumisjakauma parvekekaiteiden ja -pielien ulko- ja sisäpinnalle sekä parvekelaatan ylä- ja alapinnalle.

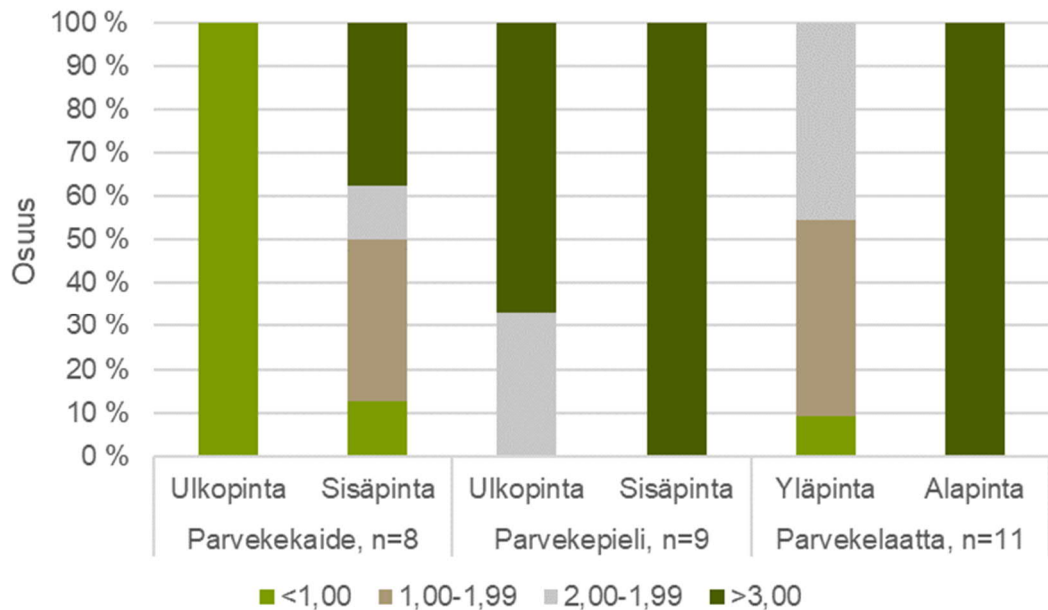


Kuva 21. Parvekeosien karbonatsoitumisnopeusjakauma 1985–1989 rakennetuissa parvekkeissa.

Vertailtaessa kuvan 21 tuloksia 1990-luvun parvekkeiden karbonatsoitumisjakaumaan, on karbonatsoituminen hidastunut selkeästi 90-luvulla. Hitaan karbonatsoitumisen osuus on kasvanut kaikilla osilla ja pinnoilla noin 10 prosenttiyksikköä ja nopea karbonatsoituminen vähentynyt saman verran. Poikkeuksen tähän trendiin tuo parvekelaatan

alapinta. Hitaan karbonatisoitumisen osuus ei ole juuri noussut. Sen sijaan nopean karbonatisoitumisen osuus on laskenut 30 prosenttiyksikköä ja kertoimien 1,00–2,99 osuudet kasvaneet.

Kuvassa 22 on esitetty parvekekaiteiden ja -pielien karbonatisoitumiskerroinjakauma ulko- ja sisäpinnalla sekä parvekelaatan jakauma ala- ja yläpinnalle 2000-luvulla rakennetuille parvekkeille.



Kuva 22. Parvekeosien karbonatisoitumiskerroinjakauma pinnoittain 2000-luvun rakennuskannassa.

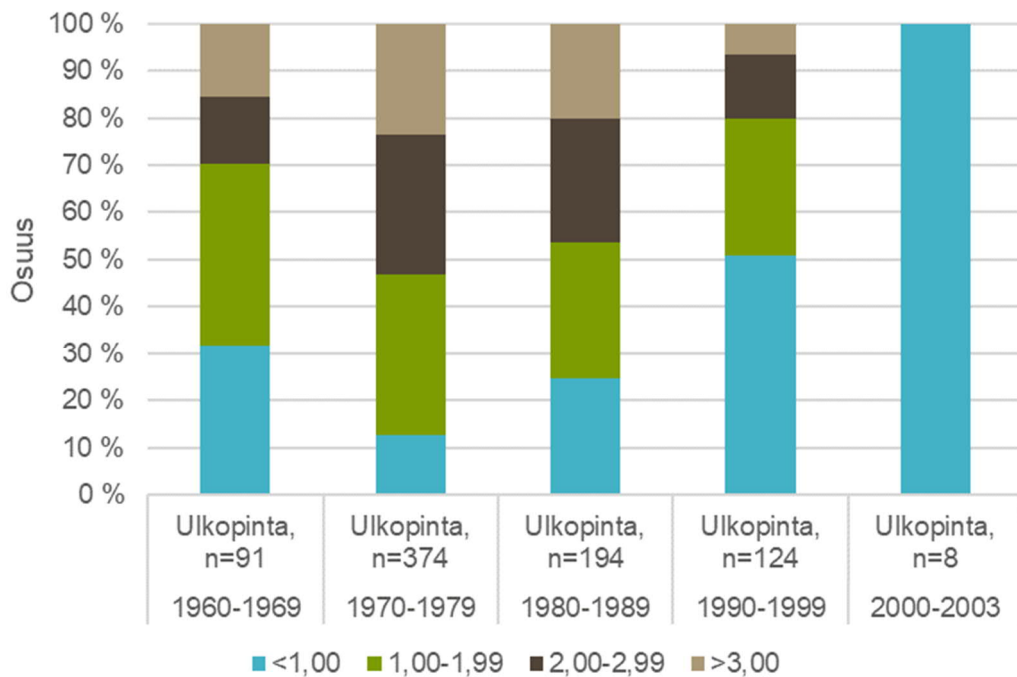
Kuvasta 22 nähtävät tulokset eivät anna luotettavaa tulosta karbonatisoitumisen etenemisnopeudesta. Näyttemäärä on hyvin pieni.

4.2.1 Karbonatisoituminen eri vuosikymmenillä

Luvussa tarkastellaan karbonatisoitumista eri vuosikymmenien parvekkeissa. Tarkastelu tehdään vain parvekkeille, sillä julkisivun pintatyypit vaihtelevat trendien mukaan, eikä kaikista pintatyypeistä ole siten käytettävissä aineistoa eri vuosikymmeniltä.

Parvekekaide

Kuvassa 23 on esitetty parvekekaiteiden ulkopinnan karbonatisoitumisnopeusjakauma. Ulkopinta on alttiina sateelle, joten sen tarkastelu on oleellisempaa raudoituksen aktiivisen korroosion kannalta kuin sisäpinnan tarkastelu. 1960–1989 vuosien kertoimet on saatu BeKo-tietokannasta, 1990-luvun kertoimet on yhdistetty BeKo:sta sekä aineistosta ja 2000-luvun kertoimet on saatu aineistosta.

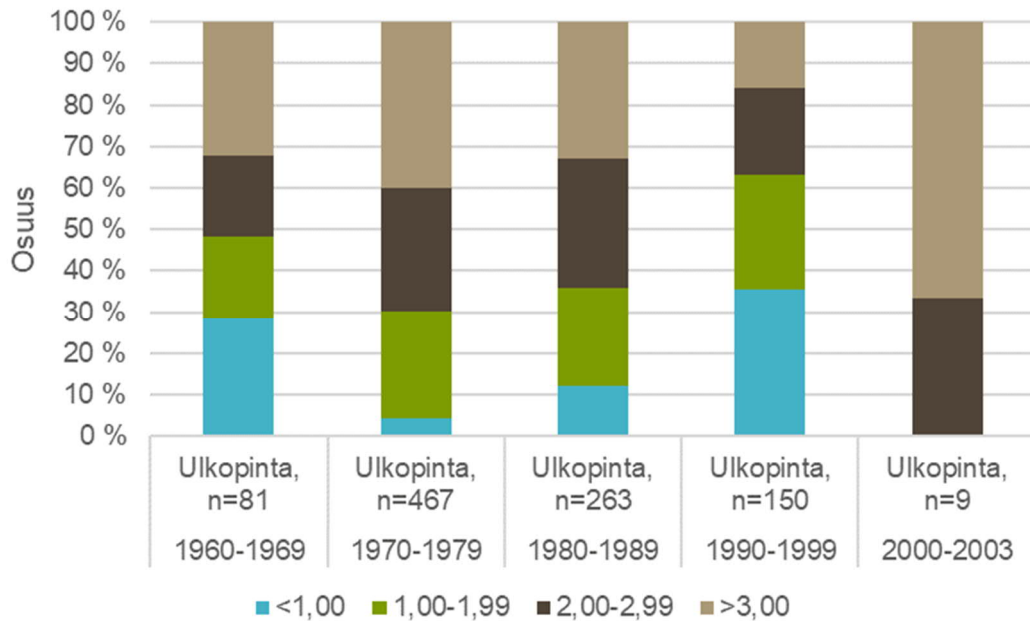


Kuva 23. Karbonatisoitumisjakauma eri vuosikymmeninä parvekekaiteiden ulkopinnalla.

Kuten kuvasta 23 huomataan, on karbonatisoituminen hidastunut 1970-luvulta eteenpäin. Hitaan karbonatisoitumisen ($k < 1$) osuus on kasvanut ja vastaavasti nopean karbonatisoitumisen ($k > 3$) osuus on pienentynyt jokaisella vuosikymmenellä. 2000-luvun näytteitä on liian vähän, jotta saataisiin käsitys, onko karbonatisoituminen hidastunut entisestään. Erot 1960- ja 1970-lukujen välillä johtuvat todennäköisesti betonin lujuusluokasta ja sitä kautta karbonatisoituvan aineen määrästä, v/s-suhteesta sekä 1960-luvun karkeammasta sementistä.

Parvekepieli

Kuvassa 24 on esitetty parvekepielien ulkopinnan karbonatisoituminen eri vuosikymmeninä. Data on kerätty kuten parvekekaiteillekin.

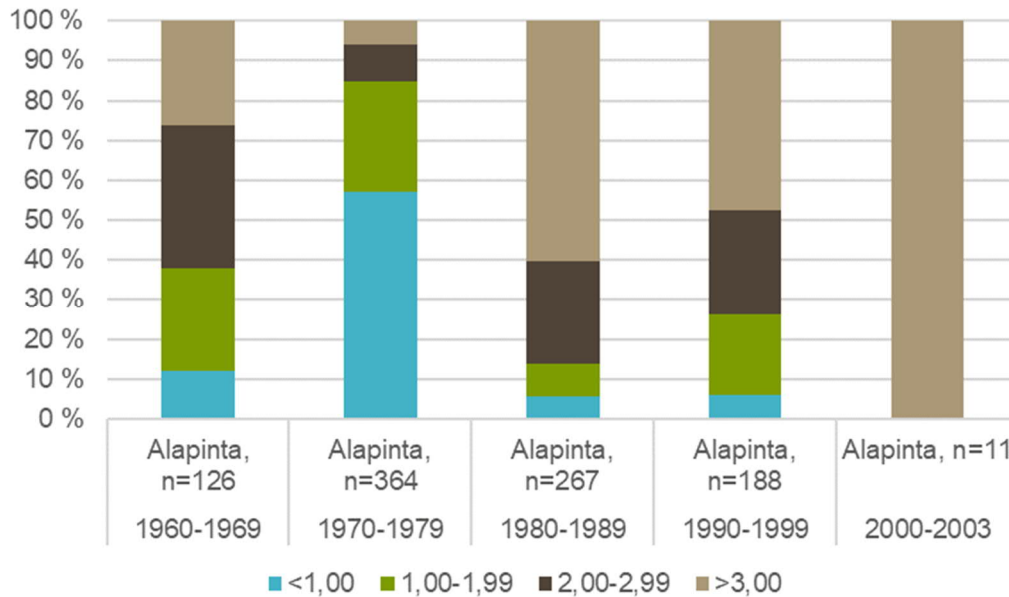


Kuva 24. Karbonatisoitumisjakauma eri vuosikymmeninä parvekepielien ulkopinnalla.

Kuvan 24 mukaisesti myös parvekepielillä karbonatisoituminen on hidastunut 1970-luvulta 1990-luvulle. Nopea karbonatisoituminen on puolittunut tultaessa 1970-luvulta 1990-luvulle ja hidas karbonatisoituminen moninkertaistunut. 2000-luvun näytteitä on taas liian vähän, mutta olemassa olevat näytteet viittaavat nopeaan karbonatisoitumiseen. Tämä todennäköisesti johtuu paremmasta lisähuokostuksesta, ks. 4.5., jolloin hiilidioksidi pääsee tunkeutumaan betoniin nopeammin.

Parvekelaatta

Kuvassa 25 on esitetty parvekelaattojen alapinnan karbonatisoitumisjakaumat eri vuosikymmenillä. Laatan alapinta on paremmin vertailtavissa eri vuosikymmeninä, sillä 1990-luvulla parvekelasitus on yleistynyt, jolloin parvekelaattojen yläpinnan rasisolosuhteet ovat muuttuneet. Data on kerätty kuten muillekin parvekeosille.



Kuva 25. Karbonatisoitumisjakauma eri vuosikymmeninä parvekelaattojen alapinnalle.

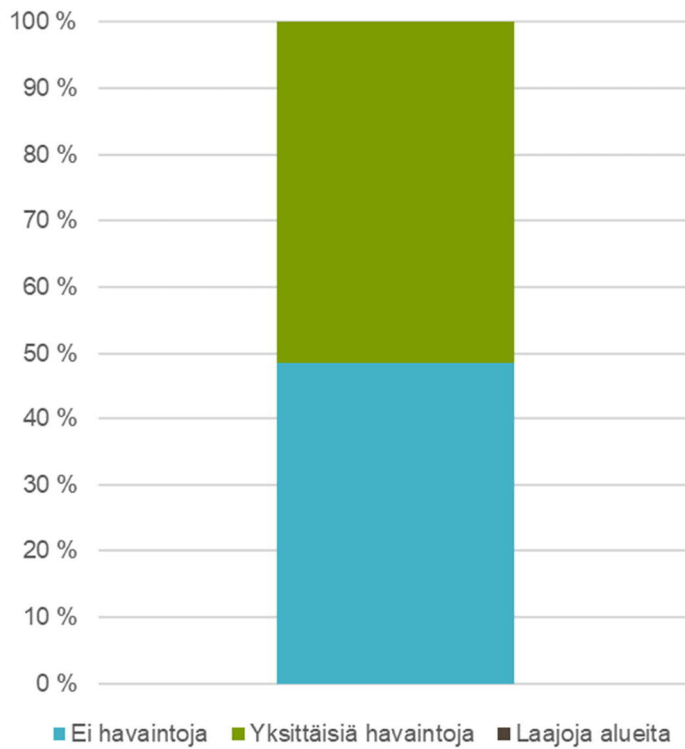
Kuvasta 25 nähdään, että parvekelaattojen alapinnan karbonatisoitumisnopeusjakoumassa on todella suuria eroja vuosikymmenien välillä ja trendiä parempaan tai huonompaan suuntaan ei ole havaittavissa. 1970-luvulla hidasta karbonatisoitumista on jopa 55 % ja nopeaa vain noin 5 %. Kuitenkin 1980-luvulla tilanne on huonontunut merkittävästi ja jakauma on kääntynyt päinvastaiseksi. 2000-luvun näytteitä on taas hyvin vähän.

4.2.2 Näkyvät korroosioauriot

Luvussa tarkastellaan näkyviä vaurioita, jotka ovat aiheutuneet raudotteiden korroosiosta tai johtaneet siihen.

Julkisivut

Kuvassa 26 on esitetty julkisivujen havaitut näkyvien korroosioaurioiden osuudet.



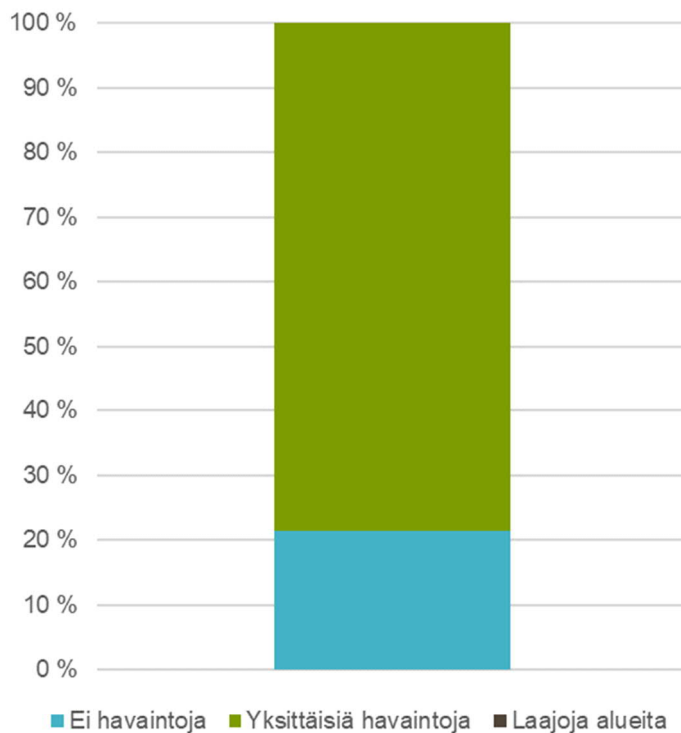
Kuva 26. Näkyvät raudotteiden korroosioauriot 1990-luvun rakennuksissa (n=33).

Kuten kuvasta 26 nähdään noin puolessa kohteista ei havaittu näkyviä raudotteiden korroosioaurioita. Yksittäisiä havaintoja tehtiin lopuissa kohteissa. Näitä olivat mm. halkeamat sekä lohjennut betoni tai tiili, jolloin kyseisellä kohdalla näkyi ruostunut teräs.

Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna laajoja korroosioaurioita ei ole havaittavissa. Yksittäisten havaintojen osuus on pysynyt suurin piirtein samana.

Parvekkeet

Kuvassa 27 on esitetty parvekkeiden näkyvien korroosiovaurioiden osuudet.



Kuva 27. Havaitut raudotteiden korroosiovauriot 1990-luvun parvekkeissa (n=26).

Parvekkeilla yksittäisiä korroosiovauriohavaintoja on jopa 80 % kohteista, kuten kuvasta 27 voidaan nähdä. Parvekkeilla yksittäisiä havaintoja oli useampia per kohde, kun julkisivuilla niitä saattoi olla tasan yksi koko kohteessa. Parvekkeilla havaittiin halkeilua, ruostuneita nostolenkkejä ja yleisesti vaurioita elementtien reunoilla.

Vanhemmassa rakennuskannassa laajoja korroosiovaurioita löytyi noin 20 %. 1990-luvun parvekkeissa niitä ei ole.

4.3 Karbonatisoitumisen ja peitepaksuuden vaikutus käyttöikänsä

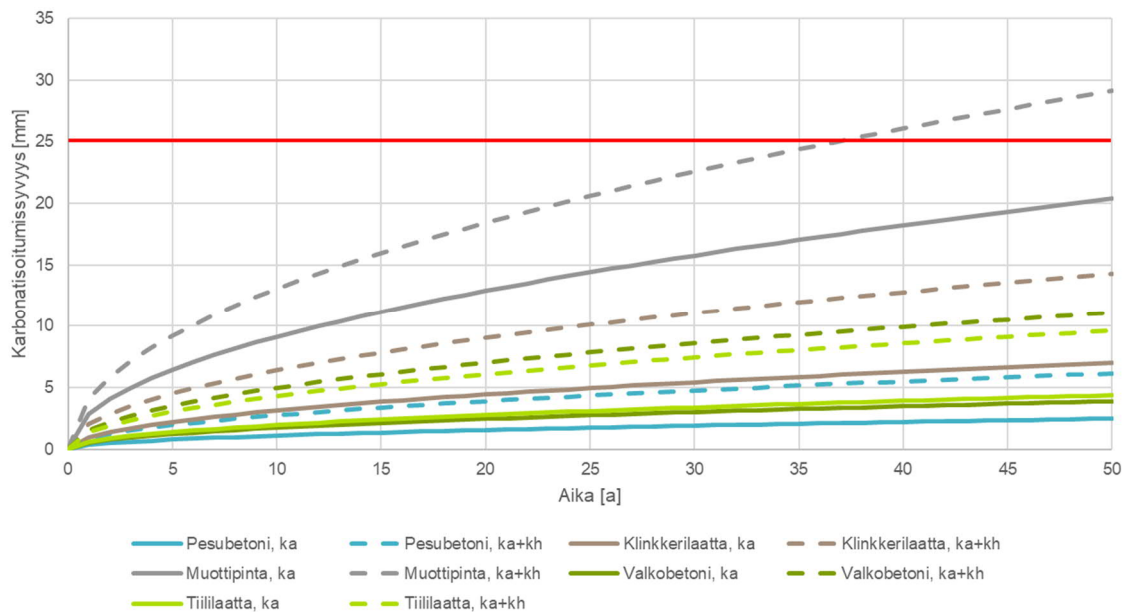
Yleisesti ottaen karbonatisoituminen on hitaampaa 1990-luvun rakennuskannassa kuin vanhemmassa rakennuskannassa. Selittävä tekijä on todennäköisesti karbonatisoituvan sideaineen määrä. Lujuusluokkien noston myötä sementin määrä ja siten karbonatisoituvan aineen määrä on kasvanut. Betoni on myös tiiviimpää, jolloin hiilidioksidi tunkeutuu siihen hitaammin. Lisäksi vesi-sementtisuhte joko lisää tai vähentää karbonatisoituvan aineen määrää sekä vaikuttaa betonin tiiviyyteen. Jos sementin tilalla on käytetty korvaavia kuona-aineita, se vaikuttaa myös karbonatisoitumisnopeuteen.

Julkisivujen ja parvekkeiden peitepaksuudet ovat myös parantuneet huomattavasti aiempan rakennuskantaan verrattuna. Näiden tekijöiden perusteella betonirakenteiden käyttöä voidaan arvioida olevan pidempi kuin aiemmin.

Luvussa on tarkasteltu 50 vuoden ajanjakso, joka on yleinen julkisivuille ja parvekkeille valittu suunnittelukäyttöikä. Karbonatisoitumissyvydeksi on valittu 25 mm, sillä se on betoninormeissa suositeltu peitepaksuus. Käyttöä katsotaan päättyneen, kun karbonatisoitumisrintama saavuttaa raudoitteet ensimmäisen kerran (BY 65 2016, s. 147).

Julkisivut

Kuvassa 28 on esitetty julkisivupintatyyppien karbonatisoitumissyvyys ajan funktiona. Laskelmat on esitetty sekä karbonatisoitumisnopeuden keskiarvolla, että yhdistetyllä keskiarvolla ja -hajonnalla.



Kuva 28. Karbonatisoitumissyvyys ajan funktiona 1990-luvun julkisivuilla.

Kuten kuvasta 28 voidaan havaita, vain maalatulla muottipintaisella julkisivulla karbonatisoitumisrintama saavuttaa peitepaksuusvyöhykkeen 25 mm 50 vuoden ajanjaksolla. Tämäkin saavutetaan vain yhdistetyllä keskiarvon ja -hajonnan k-kertoimella. Yhdistetyllä keskiarvolla ja -hajonnalla viitataan pahimpaan mahdolliseen tapaukseen, eli nopeimpaan karbonatisoitumisen etenemiseen tässä aineistossa. Se on saatu lisäämällä keskihajonta karbonatisoitumisen etenemisen keskiarvoon. Raudoitteet saavutetaan noin 37 vuoden iässä. Köliö et al. (2014) ovat tarkastelleet aktiivisen korroosion pituutta ja se vaihtelee olosuhteiden mukaan. Olemassa olevista rakennuksista tehtyjen tarkastelujen perusteella se vaihtelee noin 20–40 vuoden välillä. Täten 50 vuoden todellinen käyttöikä saavutetaan helposti kaikilla julkisivutyypeillä.

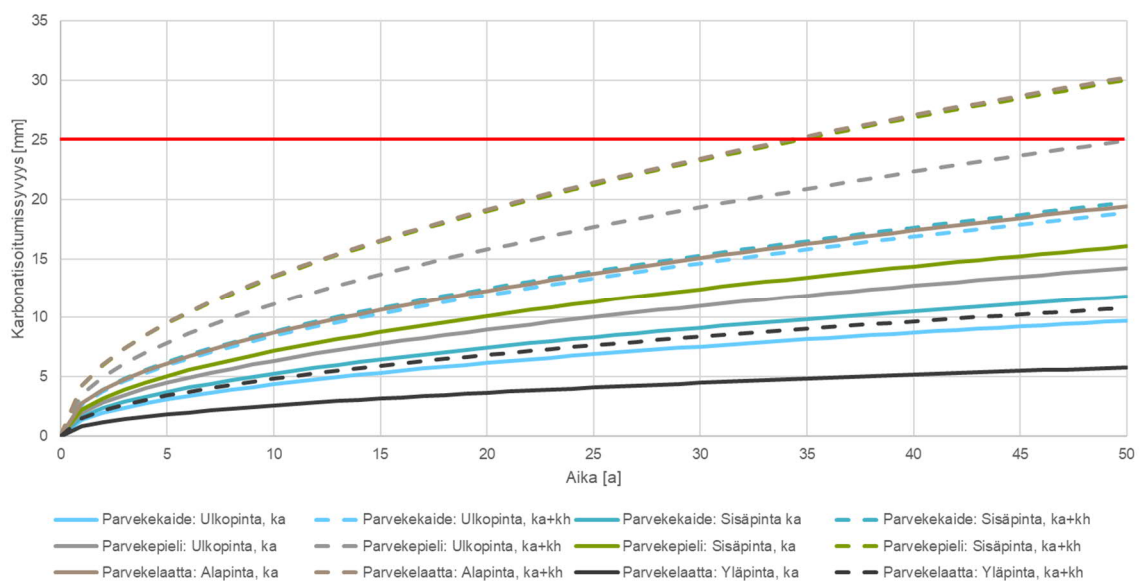
Erilaisilla betonipintaisilla julkisivuilla vain 6,86 % raudoitteista oli alle 25 mm syvyydellä julkisivuissa. 5 mm:n syvyydellä olevat raudoitteet saavutetaan 5–10 vuoden iässä, riippuen julkisivutyypistä eli betoninormien (BY 65 2016, s. 147) mukaisesti käyttöikä päättyy jo silloin. Pesu- ja valkobetoniset julkisivut eivät karbonatisoidu 5 mm:n syvyydelle 50 vuoden aikana. Sen sijaan yhdistetty keskiarvo ja -hajonta saavuttavat 5 mm syvyyden. Muottipintaisilla julkisivuilla 10 mm:n syvyys saavutetaan jo varhain. Yhdistetty keskiarvo ja -hajonta saavuttaa sen noin 6 vuoden jälkeen ja pelkkä keskiarvo noin 12 vuodessa.

Jos tiililaatan paksuus 20 mm vähennetään peitepaksuudesta, 16,35 % raudoitteista sijaitsee alle 25 mm syvyydellä laattapintaisilla julkisivuilla. 50 vuoden aikana karbonatisoitumisrintama ei kuitenkaan saavuta edes 15 mm syvyyttä. Klinkkerilaattapintaisilla julkisivuilla karbonatisoituminen etenee nopeammin kuin tiililaattapintaisilla.

Julkisivuelementtien ulkokuorissa on alettu käyttää ruostumattomia teräksiä 1990-luvulla raudoituksena (Hytönen & Seppänen 2009, s. 185). Käytettäessä ruostumattomia teräksiä, karbonatisoitumisnopeudella ei ole merkitystä, sillä rauditus ei korrodoidu. Tarkastelluista kohteista vain yhdessä havaittiin julkisivun verkkoraudituksen olevan ruostumatonta terästä. Täten karbonatisoitumisnopeudella on edelleen suuri vaikutus julkisivun käyttöikään.

Parvekkeet

Kuvassa 29 on esitetty parvekekaiteiden, -pielien ja -laattojen karbonatisoitumissyvyudet ajan funktiona. Lisäksi on eroteltu sisä- ja ulkopinnat erikseen kaiteille ja pielille sekä alaja yläpinta laatoille. Kuvassa on esitetty tulokset karbonatisoitumisnopeuden keskiarvolle sekä yhdistetylle keskiarvolle ja -hajonnalle.



Kuva 29. Parvekeosien karbonatisoitumissyvytydet ajan funktiona 1990-luvun rakennuskannassa.

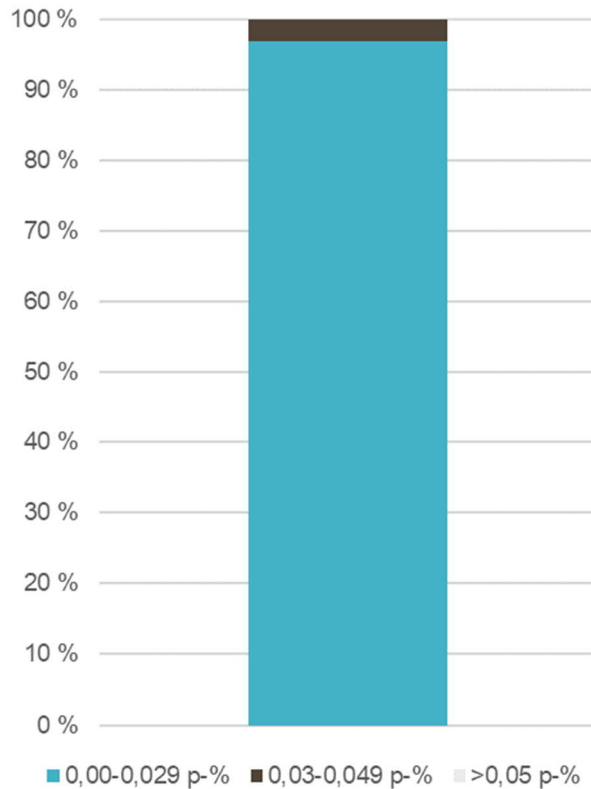
Kuvasta 29 havaitaan, että 25 mm karbonatisoitumissyvyys saavutetaan 50 vuoden aikana vain parvekeosien kuvaajilla, joissa on yhdistettynä keskiarvo ja keskihajonta. Noin 34 vuoden jälkeen 25 mm karbonatisoitumissyvyys saavutetaan parvekepielen sisäpinnalla ja parvekelaatan alapinnalla. 50 vuodessa myös parvekepielen ulkopinnan karbonatisoituminen saavuttaa 25 mm.

Parvekkeilla alle 25 mm syvyydellä sijaitsee 7,9 % raudotteista. Näistä marginaalinen osuus on alle 10 mm syvyydellä, joka saavutetaan aikaisintaan jo reilun viiden vuoden kuluttua. Parvekelaatan yläpinta on ainut, jolla karbonatisoituminen 50 vuoden aikana jää alle 10 mm:iin. Kaiteen ulkopinta saavuttaa 10 mm syvyyden juuri 50 vuodessa.

Parvekeosien karbonatisoitumiskertoimien keskiarvot ja -hajonnat ovat suurempia kuin julkisivuilla, joten raudotteet saavutetaan paljon aiemmin kuin julkisivuilla. Aivan pintaan jääneetkin (<5 mm syvyydellä) raudotteet saavutetaan viimeistään noin 35 vuoden käyttöänsä jälkeen. Aktiivisen korroosion aika kuitenkin kestää 20–40 vuotta passiivisen korroosion jälkeen (Köliö et al. 2014), jolloin 50 vuoden käyttöikä on mahdollista saavuttaa.

4.4 Kloridipitoisuus

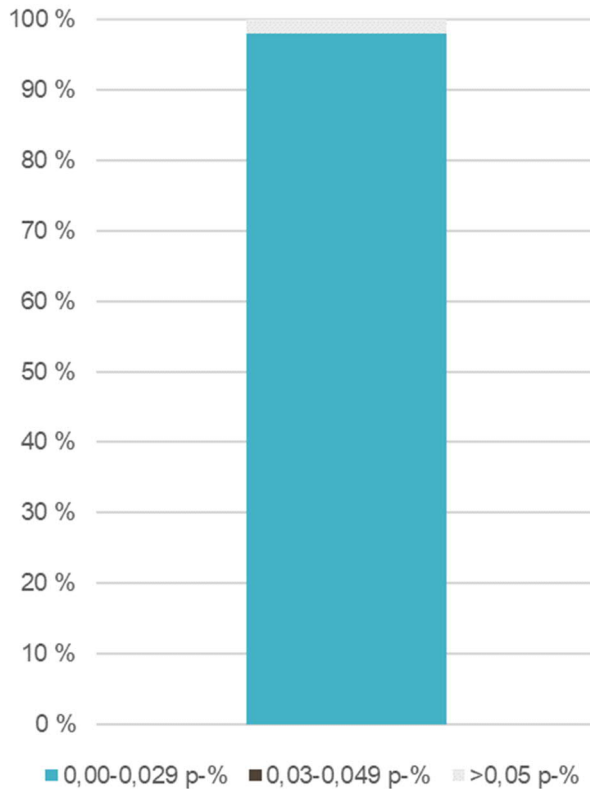
Luvussa tarkastellaan julkisivujen ja parvekkeiden kloridipitoisuutta 1990-luvun rakennuksissa. Kuvissa 30 ja 31 on esitetty kloridipitoisuudet julkisivuille ja parvekkeille. Kuntotutkimusraporteissa ei kerrottu kloridien tunkeumasyvyyttä betonipinnasta, sillä se ei rakennusten kuntotutkimuksessa ole oleellinen asia selvittää.



Kuva 30. Julkisivunäytteiden kloridipitoisuudet 1990-luvun rakennuksissa (n=64).

Kuvassa 30 on esitetty julkisivuista otettujen näytteiden kloridipitoisuudet. 95 %:lla näytteistä kloridipitoisuus on 0,01 p-% tai vähemmän. 0,02; 0,03 sekä 0,04 pitoisuuksia oli vain yksittäiset. BY42 (2019, s. 21) mukaan tavanomaisille raudoitteille kriittinen kloridipitoisuus karbonatisoitumattomassa betonissa on 0,05–0,07 p-% betonin painosta. Tämän perusteella julkisivunäytteistä yhdenkään kloridipitoisuus ei ole kriittinen.

Vanhemmassa rakennuskannassa 1,4 % julkisivunäytteistä ylitti 0,03 p-% rajan. Kloridipitoisuudet olivat välillä 0,04–0,09 p-%. Kloridipitoisuus betonirakenteissa on edelleen laskenut ja se ei ole todennäköinen syy raudoitteiden korroosiolle.



Kuva 31. Kloridipitoisuus 1990-luvun parvekkeissa (n=51).

Kuvassa 31 on esitetty parvekenäytteistä löytyneet kloridipitoisuudet. 92 %:lla näytteistä kloridipitoisuus on 0,01 p-% tai sen alle. 0,02 p-% näytteitä oli kolme ja 0,07 p-% yksi. Vain yksittäinen näyte ylittää kriittisen kloridipitoisuuden 0,05 p-%.

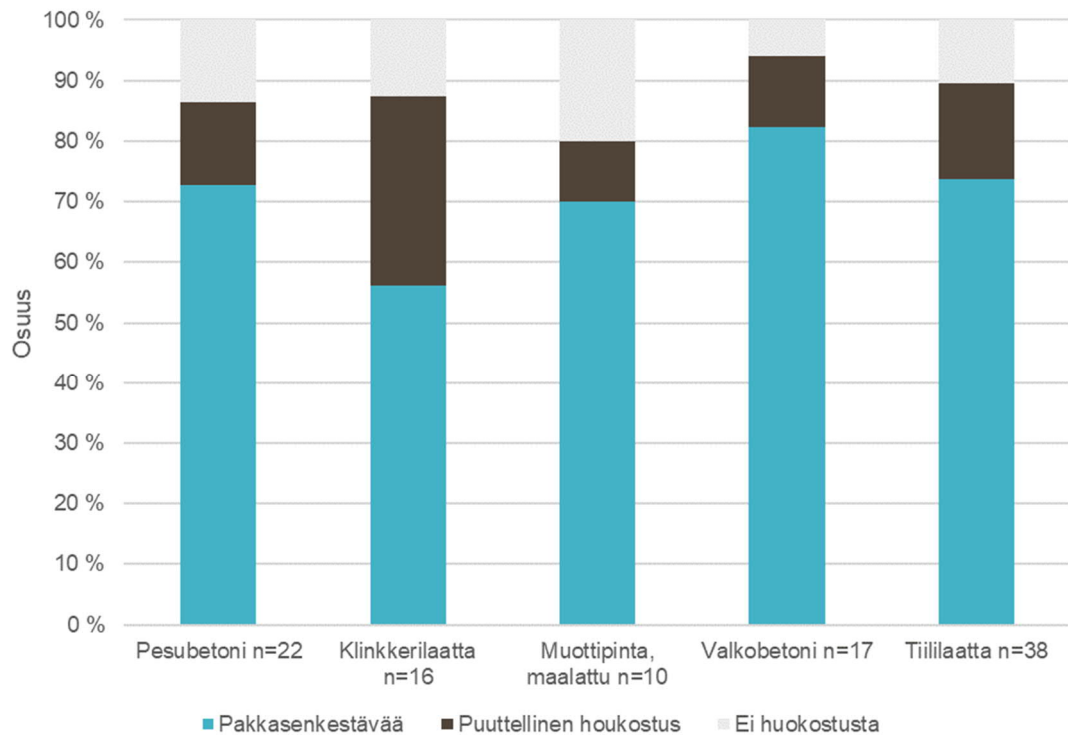
Vanhemmassa rakennuskannassa 3,8 % parvekenäytteistä ylittää 0,03 p-% alarajan. Pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,03–0,11 p-% keskiarvon ollessa 0,06 p-%. Uusin kohde, josta löydettiin kloridia kriittisen paljon, oli vuodelta 1988.

4.5 Pakkaskestävyys

Luvussa tarkastellaan eri julkisivupintatyyppien sekä parvekeosien pakkaskestävyyttä eri menetelmillä mitattuna.

Julkisivut

Kuvassa 32 on esitetty pakkasenkestävyys eri julkisivupinnoille. Pakkasenkestävyys on arvioitu ohuthieistä tarkastelemalla huokostuksen määrää, kokoa ja etäisyyttä toisiinsa.



Kuva 32. Betonin pakkasenkestävyys ilmahuokostuksen riittävyyden mukaan 1990-luvun rakennuskannassa.

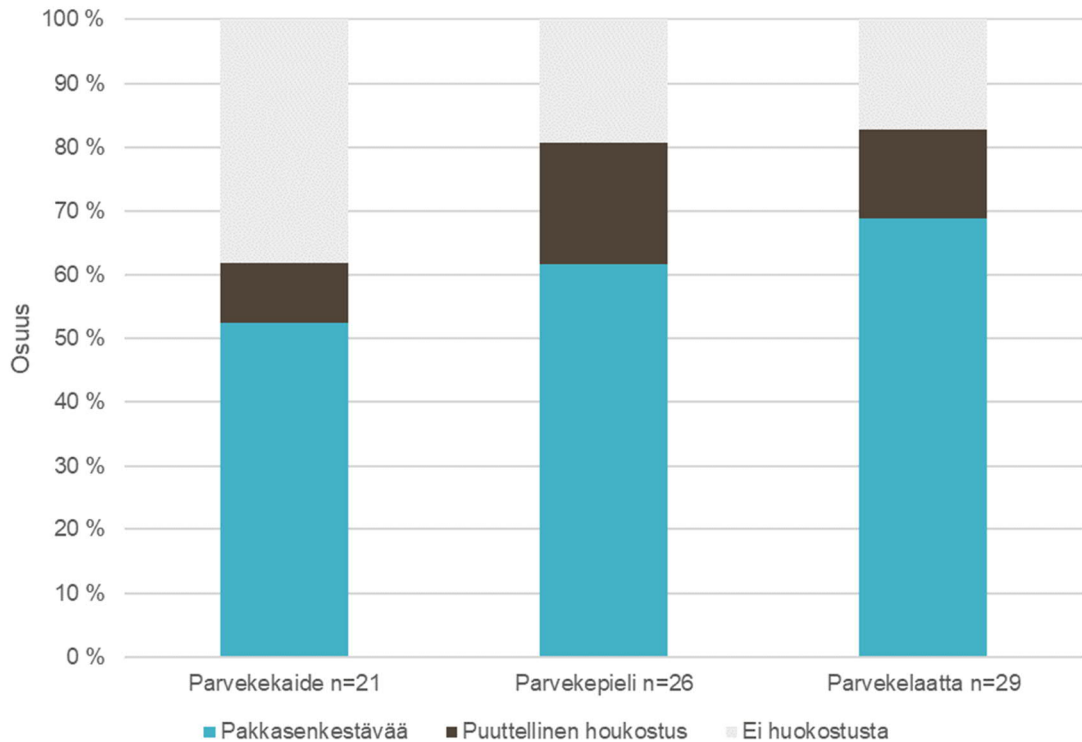
Kuten kuvasta 32 nähdään, suurin osa betonista on pakkasenkestävää pintatyyppistä riippumatta. Muottipintaisella julkisivutyypillä näyttäisi olevan eniten pakkasenkestämätöntä betonia, mutta näytteitä on vain 10, joten luotettavia päätelmiä ei voida tehdä. Klinkkerilaattapinnalla taas vaikuttaisi olevan eniten puutteellista huokostusta.

Verrattaessa tuloksia vanhempaan rakennuskantaan, tulokset ovat hyvin erilaisia. Pakkasenkestävää betonia ei siinä juuri ole. Sen sijaan puutteellista huokostusta, johon luokituu epäonnistunut sekä riittämätön huokostus, on eri pintatyypeillä runsaasti. Pakkasenkestämättömän betonin osuus on pienentynyt merkittävästi. Erityisesti pesubetonijulkisivuilla on ollut ongelmia pakkasenkestävyyden kanssa ja tulokset osoittavat, että täysin huokostamattoman betonin osuus on 1990-luvulla huomattavasti pienentynyt.

2000-luvun rakennuksissa näytemäärä oli alle 5 kpl / julkisivutyypin. Maalattuja, muottipintaisia näytteitä oli neljä ja kaikki olivat pakkasenkestäviä. Valkobetonisia näytteitä oli kolme ja myös ne olivat pakkasenkestävää betonia. Tiililaattapintaisista betoninäytteistä kaksi oli pakkasenkestäviä ja kahdessa ei ollut huokostusta.

Parvekkeet

Kuvassa 33 on esitetty parvekekaiteiden, -pielien sekä -laattojen pakkasenkestävyys huokostuksen määrän, koon ja keskinäisen etäisyyden perusteella.



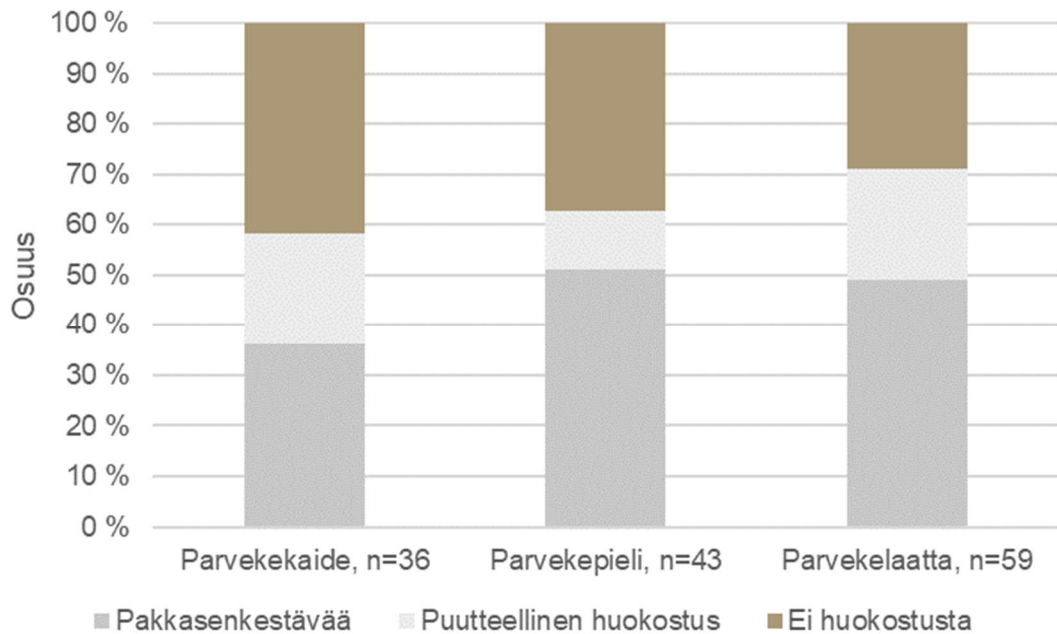
Kuva 33. Parvekeosien pakkasenkestävyys 1990-luvulla rakennetuissa parvekkeissa.

Kuten kuvasta 33 nähdään parvekelaattojen huokostus pakkasenkestävyyden edistämiseksi on onnistunut paremmin kuin muiden rakenneosien. Näyttemäärä on kuitenkin suhteellisen alhainen. Suurimmaksi osaksi huokostus on onnistunutta, ja puutteellista eli alun perin riittämätöntä tai epäonnistunutta huokostusta on 10–20 % rakenneosasta riippuen.

Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna voidaan selvästi havaita, että pakkasenkestävän betonin osuus on lisääntynyt merkittävästi. Parvekekaiteilla pakkasenkestävän betonin osuus on lisääntynyt noin 50 %:iin aiemmasta 25 %:sta. Puutteellisen huokostuksen määrä on tippunut noin 10 %:iin, mutta huokostamatonta betonia on edelleen havaittavissa melkein 40 %:ssa näytteistä. Parvekepielillä pakkasenkestävän betonin osuus on noussut 20 %:sta reiluun 60 %:iin. Koska näytteitä aineistossa on vain 26, puutteellisen huokostuksen osuus näyttäisi lisääntyneen. BeKo-tietokannassa näytteitä on yli kymmenen kertaa enemmän. Huokostamattoman betonin osuus on laskenut 70 %:sta 20 %:iin. Parvekelaatoilla pakkasenkestävän betonin osuus on noussut noin 70

%:iin aiemmasta noin 30 %:sta. Puutteellisen huokostuksen osuus on pysynyt samana. Huokostamattoman betonin osuus on laskenut 50 %:sta 20 %:iin.

Kuvassa 34 on esitetty 1985–1989 rakennettujen parvekekaiteiden, -pielien ja -laattojen pakkasenkestävyys.



Kuva 34. Pakkasenkestävyys 1985–1989 rakennetuissa parvekkeissa.

Vertailtaessa kuvan 34 tuloksia 1990-luvun parvekkeiden pakkasenkestävyyteen, on se yleisesti hieman parantunut 1980-luvulta 1990-luvulle tultaessa. Lisäksi on huomattavissa sama trendi kuin 1990-luvulla, että kaiteet ovat heikoiten pakkasenkestäviä ja laatat kestävimpiä. Parvekekaiteilla ja -laatoilla pakkasenkestävän betonin osuus on noussut noin 20 prosenttiyksikköä, mutta parvekepielillä vain 10 prosenttiyksikköä. Parvekekaiteilla huokostamattoman betonin osuus on pysynyt samana. Pielillä osuus on vähentynyt 20 prosenttiyksikköä ja laatoilla 10 prosenttiyksikköä.

2000-luvun parvekenäytteitä oli todella vähän. Parvekekaiteen kaksi näytettä olivat pakkasenkestäviä kuten myös parvekelaatan neljä näytettä. Parvekepielen näytteistä yksi oli huokostamatonta betonia ja kaksi muuta pakkasenkestäviä.

4.5.1 Pakkasrapautuminen ohuthieestä

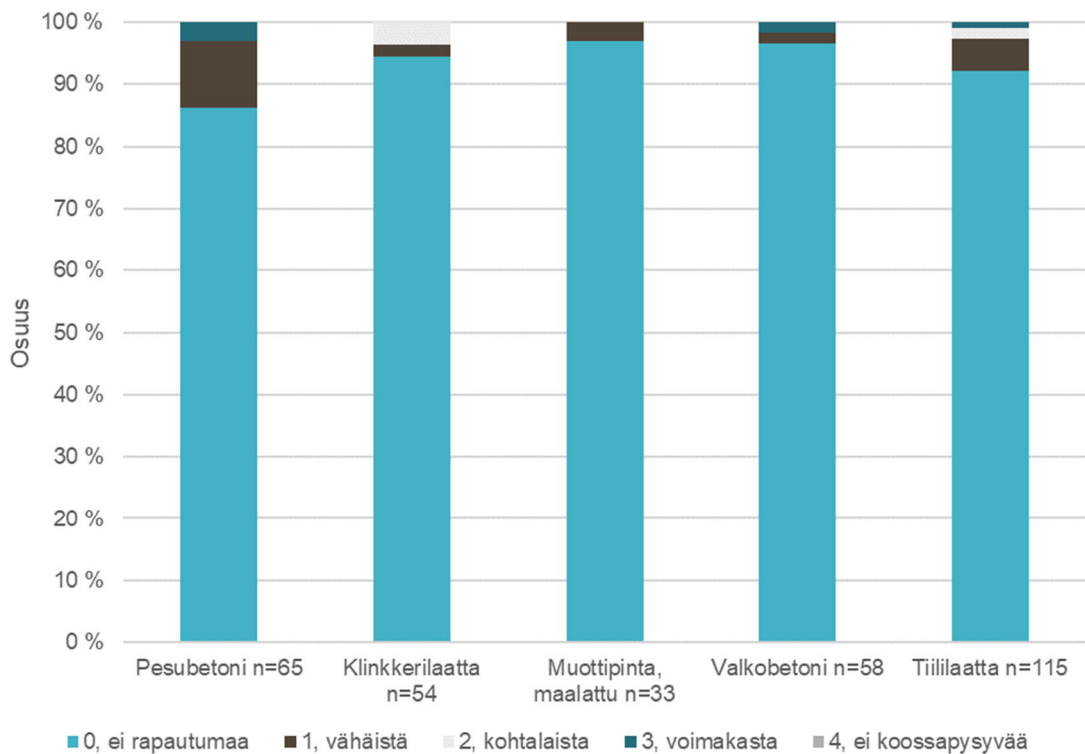
Taulukossa 9 on esitetty viisiportainen rapautumisasteikko, johon joidenkin laboratorioden poikkeavat omat asteikot on muunnettu yhtenäisyyden vuoksi. Pakkasrapautumistarkastelu on tehty vain taustabetonille klinkkeri- ja tiililaattapintaisilla julkisivuilla.

Taulukko 9. Laboratoriotutkimusten rapautumisasteikko selitteineen.

Rapautumisaste	0	1	2	3	4
Selite	Ei rapautumaa	Vähäistä	Kohtalaista	Voimakasta	Ei koossapysyvää

Taulukossa 9 on esitetty betonin rapautumisasteikko selitteineen, jota kuvissa käytetään. Käytännössä rapautumisasteen neljä rapautumaa ei pitäisi näytteissä olla, sillä koossapysymättömiä näytteitä ei yleensä lähetetä laboratorioon.

Kuvassa 35 on esitetty pakkasrapautumisaste eri julkisivupintatyypeille. Rapautumisaste on arvioitu ohuthienäytteistä niiden halkeilun laajuuden perusteella.

**Kuva 35.** Pakkasrapautumisaste eri julkisivupintatyypeillä 1990-luvun rakennuksissa.

Yli 85 % julkisivunäytteistä pakkasrapautumisaste on 0 eli betoni on rapautumatonta, kuten kuvasta 35 havaitaan. Pesubetonilla noin 10 % näytteistä on asteeltaan 1 eli rapautuma on vähäistä. Pesubetonilla on todettu muita pintatyyppejä suurempi rapautumisriski (Lahdensivu 2012, s. 107), joten tulokset viittaavat siihen, että tilanne on vastaava myös 1990-luvun rakennuksissa. Myös asteen 3 eli kohtalaista rapautumaa osoittavia näytteitä löytyy muutamia.

Vertailu vanhempaan rakennuskantaan täytyy tehdä hieman soveltaen, sillä rapautumisasteikko on neliportainen. Täysin rapautumattoman betonin osuus näyttää olevan suurempi 1990-luvun rakennuksissa, mikä viittaa betonin säilyvyysominaisuuksien parantamiseen.

Pesubetonin pakkasrapautuminen on vähentynyt, sillä BeKo-tietokannassa suurin osa pesubetoninäytteistä on 1970-luvulta, jolloin betoni ei ole ollut säännöllisesti lisähuokostettua. Kun BeKo-tietokannasta erotetaan 1990-luvun kohteet, tulokset mukailevat tämän aineiston tuloksia. Näitä näytteitä tietokannassa oli 24, mikä on suhteellisen vähän. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että 30 vuoden aikana pesubetoni ei pakkasrapaudu merkittävästi.

Klinkkerilaattapintaisilla julkisivuilla on selkeästi huomattava ero 1990-luvun ja vanhemman rakennuskannan välillä. Vähäisen rapautuman näytteet ovat vähentyneet 10 %:sta muutamaan prosenttiin. Kohtalaisen rapautuman näytteitä on molemmissa muutama. Sen sijaan vanhemmassa rakennuskannassa voimakkaan rapautumisen merkkejä osoittavia näytteitä on melkein 20 %. Aineistossa näin rapautunutta betonia ei havaittu lainkaan.

Maalatuilla muottipintaisilla julkisivuilla pakkasrapautuma ei ole yhtä pitkälle edennyt kuin vanhemman rakennuskannan kohteilla. Vähäistä ja kohtalaista rapautumaa havaittiin noin 5 % näytteistä. Vanhemman rakennuskannan kohteista jopa 20 % osoitti vähäisen rapautuman merkkejä. Asteiden 2 ja 3 näytteitä oli 1960–1989-lukujen aineistossa yhteensä 10 %, tällaisia ei havaittu 1990-luvun kohteissa yhtään.

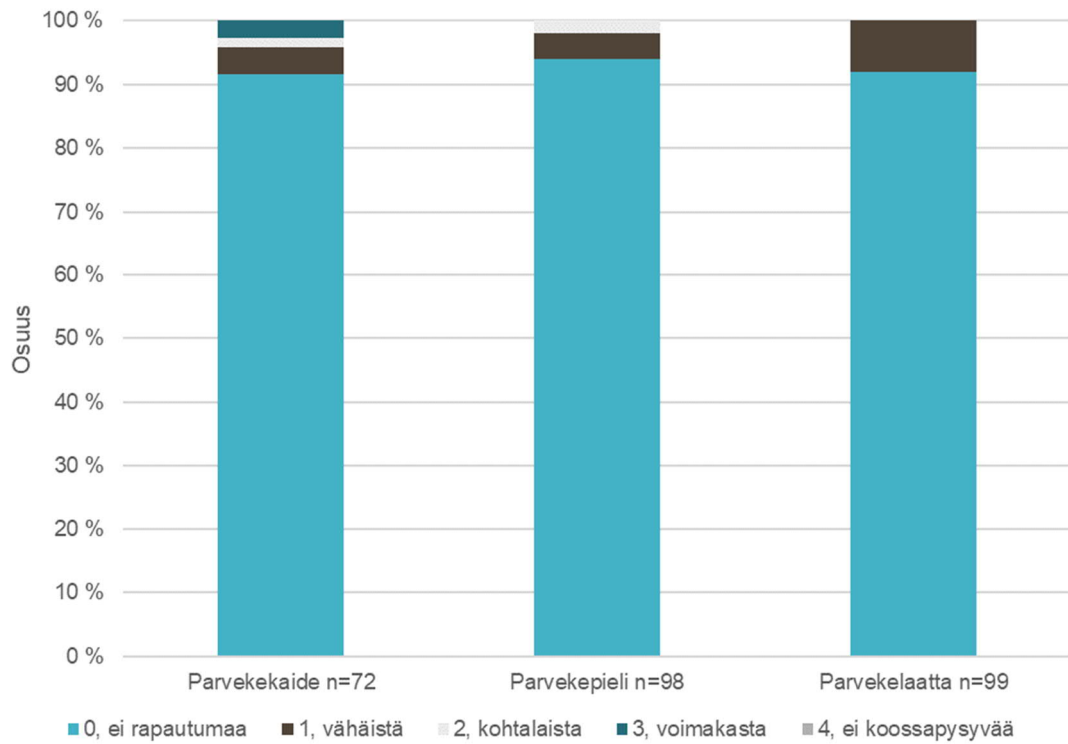
Valkobetonin näytteistä jopa 95 % on rapautumattomia ohuthietarkastelun mukaan. Asteiden 1 ja 3 näytteitä oli vain yksittäiset. Vanhemmassa rakennuskannassa valkobetonisia näytteitä, joista on tarkasteltu pakkasrapautumisastetta, on vain 17. Tästä johtuen niitä ja kuvan 35 tuloksia ei voida verrata keskenään. Lisäksi, kuten aiemmin on todettu, valkobetoni on ollut tyypillisempää 1990-luvulla kuin sitä edeltävillä vuosikymmenillä.

Myös tiililaattapintaisilla julkisivuilla pakkasrapautumisaste on pysynyt olemattomana. Vanhemmassa rakennuskannassa viitteitä pakkasrapautumisesta on noin 20 % näytteistä. 1990-luvun rakennuskannassa tällaisia näytteitä on noin 5 %. BeKo-tietokannan 1990-luvun näytteistä tulokset mukailevat tämän aineiston tuloksia, noin 90 % näytteistä on rapautumattomia.

2000-luvun rakennuskanta ei ole pakkasrapautunutta, sillä kaikkien näytteiden rapautumisaste on 0 julkisivutyypistä riippumatta. Maalattuja muottipintaisia näytteitä oli 14, valkobetonisia 9 ja tiililaattapintaisia 14.

Parvekkeet

Kuvassa 36 on esitetty eri parvekeosien pakkasrapautuminen asteikolla 0–4. Rapautumisaste on arvioitu ohuthienäytteistä näytteiden halkeilun laajuuden perusteella.



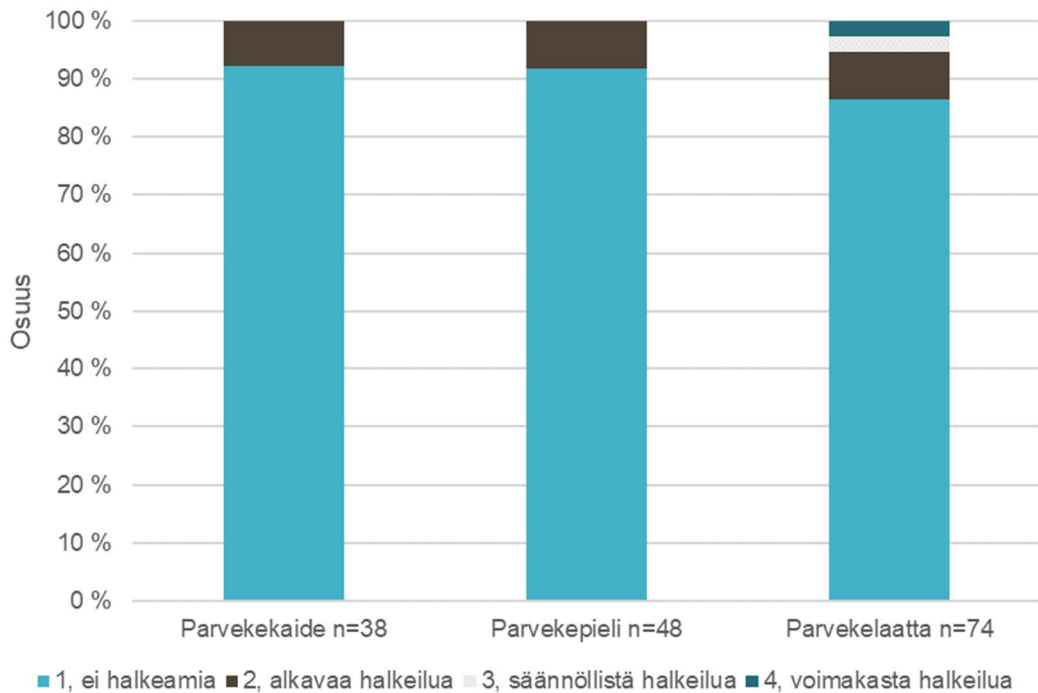
Kuva 36. Pakkasrapautumisaste 1990-luvulla rakennetuille parvekeosille.

Yli 90 % parvekenäytteistä on pakkasrapautumattomia eli pakkasrapautumisaste on 0, kuten kuvasta 36 havaitaan. Yksittäisiä näytteitä on noin 100 jokaiselle parvekeosalle, joten otos on kattava. Vain parvekekaiteet osoittavat kohtalaisen rapautuman merkkejä. Tämä voi johtua paikallisesti ankarammasta kosteusrasituksesta, joka aiheutuu parvekelaseista. Sadevesi valuu lasitusta myöten parvekekaiteille kastellen niitä enemmän kuin pelkkä kaiteeseen osuva viistosade.

1990-luvun parvekerakenteissa pakkasrapautumista on havaittavissa huomattavasti vähemmän kuin aiempien vuosikymmenten parvekkeissa ja rapautumisasteet ovat yleisesti pienempiä. 1960–1980-lukujen parvekkeissa vähiten rapautunut parvekeosa on parvekekaide, 1990-luvun aineistossa se on rapautunein. Vähäistä rapautumista on havaittavissa noin 15 % vanhemmassa rakennuskannassa, mutta vain muutama prosentti 90-luvun kohteissa. Kohtalaista ja voimakasta rapautumista on molemmissa rakennuskannoissa noin 5 %. Parvekepielillä täysin rapautumatonta betonia on yli 90 %, mutta vanhemmassa rakennuskannassa vain reilu 60 %. Vähäistä rapautumaa on noin 20 % 1960–1989 näytteistä, 1990-luvun näytteissä vain muutamia. 90-luvun parvekelaatalle vähäistä rapautumaa osoittaa hieman alle 10 % ja vanhemmassa kannassa noin 15 %.

Lisäksi vanhemmasta rakennuskannasta löytyy asteiden 2 ja 3 rapautumista yhteensä 10 %.

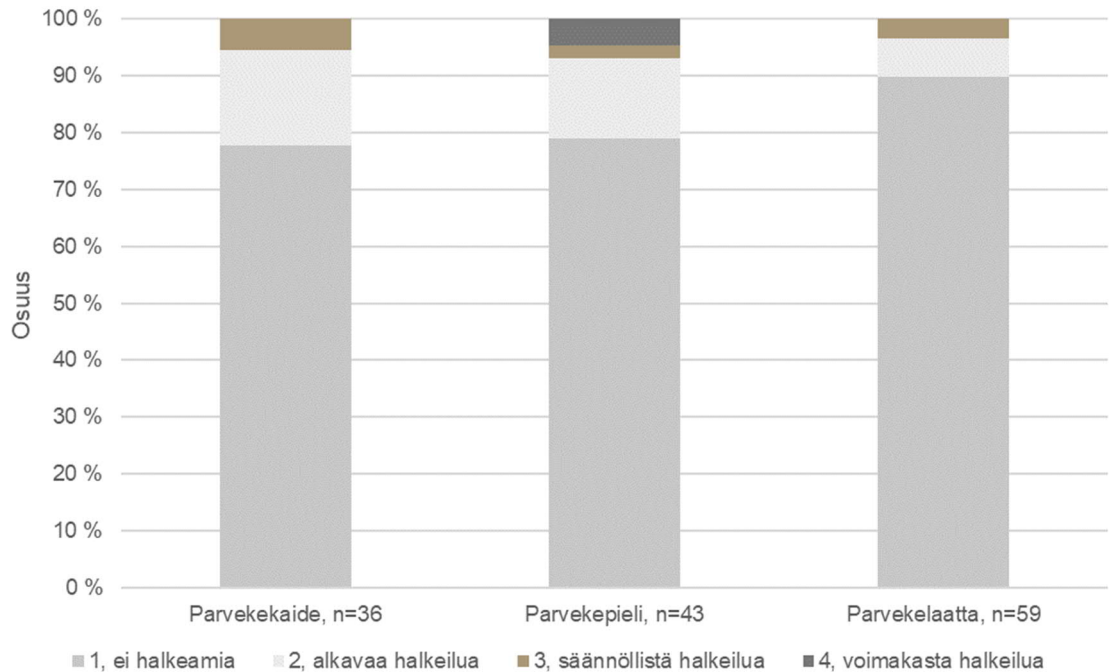
Kun vertaillaan BeKo-tietokannan 1990-luvun parvekkeiden pakkasrapautumisastetta tähän aineistoon, saadaan samansuuntaisia tuloksia (kuva 37). Kuvista 36 ja 37 nähdään, että suurin osa parvekeosista on pakkasrapautumattomia.



Kuva 37. BeKo-tietokannan parvekeosien pakkasrapautumisaste neljäportaisella asteikolla ilmaistuna 1990-luvun rakennuksissa.

Kuvan 37 mukaisesti vain parvekelaatoilla pakkasrapautumisaste viittaa merkittävämpään rapautumiseen. Kuvien 36 ja 37 erot johtuvat pienistä näytemääristä ja yleisesti voidaan tulkita, että noin 10 %:lla parvekeosista on merkkejä alkaneesta rapautumisesta.

Kuvassa 38 on esitetty parvekekaiteiden, -pielien ja -laattojen pakkasrapautumisaste asteikolla 1–4. Parvekkeet on rakennettu 1985–1989.



Kuva 38. 1985–1989 välillä rakennettujen parvekkeiden pakkasrapautumisaste.

Kun vertaillaan kuvan 38 tuloksia 1990-luvun parvekeosien pakkasrapautumisasteeseen, huomataan, että rapautumattoman betonin osuus on pienempi 1980-luvulla. 1980-luvun lopulla rapautumattoman betonin osuus on 80 %, kun 1990-luvulla se on jopa 90 % kaiteille ja pielille. Laatoilla rapautumattoman betonin osuus on noin 90 % molemmilla vuosikymmenillä. Pieniasteisen rapautuman (aste 2) osuus on 1980-luvulla selkeästi suurempi.

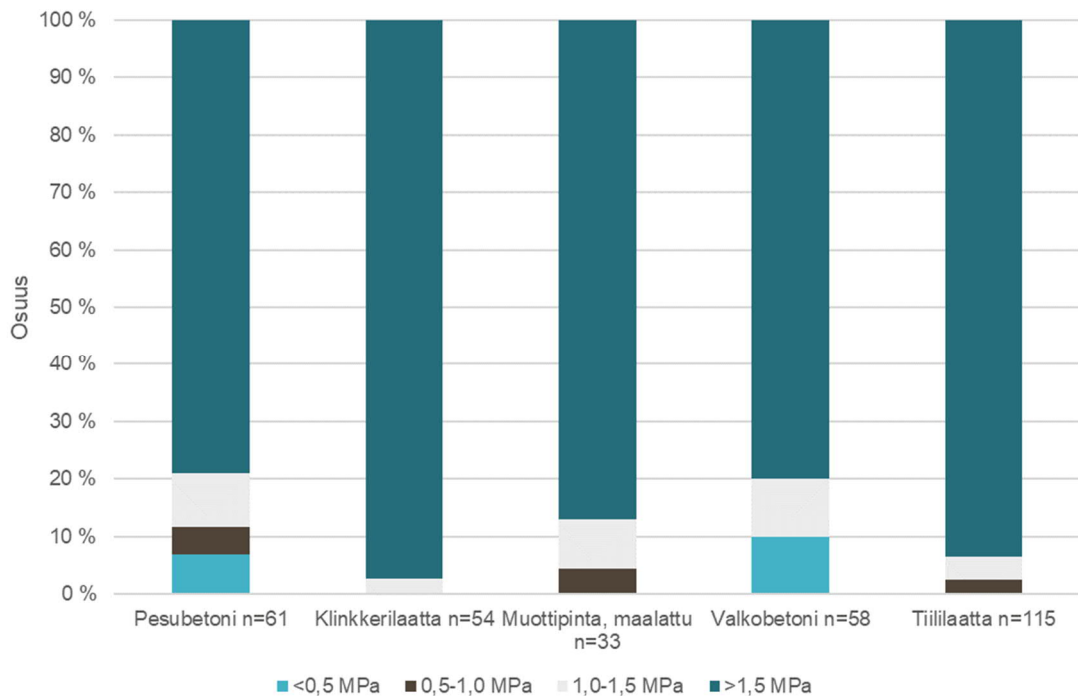
2000-luvun parvekeosat ovat pakkasrapautumattomia. Parvekekaidenäytteitä oli 8, pielinäytteitä 9 ja laattanäytteitä 11.

4.5.2 Pakkasrapautuminen vetolujuuksista

Julkisivujen kuntotutkimusohjeen (BY 42 2019, s. 93) mukaan alle 0,5 MPa betonin vetolujuudet viittaavat pitkälle edenneeseen rapautumiseen. Jos vetolujuus on yli 1,5 MPa, näyte ei todennäköisesti ole rapautunut.

Julkisivut

Kuvassa 39 on esitetty betonin vetolujuustulokset eri julkisivutyypeille. Näytelieriöille on tehty vetolujuuskoe ja vain ensimmäinen vetolujuustulos on huomioitu, vaikka huonon tuloksen antaneet näytteet on uudelleenvedetty.



Kuva 39. Betonin vetolujuuksien jakautuminen eri julkisivutyypeille 1990-luvun rakennuksissa.

Kuvan 39 mukaisesti noin 80 % näytteistä vetolujuudeksi saatiin yli 1,5 MPa, mikä viittaa siihen, ettei pakkasrapautumaa ole. Alle 0,5 MPa tuloksia oli vain pesubetonilla sekä valkobetoniilla.

Vanhemmassa rakennuskannassa lähes kaikilla julkisivutyypeillä vetolujuus on yli 1,5 MPa 50–60 % näytteistä. Vain pesubetoni jää tämän alle. Tulosten perusteella 1990-luvun betoni on paremmassa kunnossa kuin aiempien vuosikymmenten, mutta tuloksiin vaikuttaa merkittävästi myös parantunut betonin laatu ja lujuusluokka. Vetolujuus ei yksistään anna luotettavaa tulosta betonin pakkasrapautumisesta.

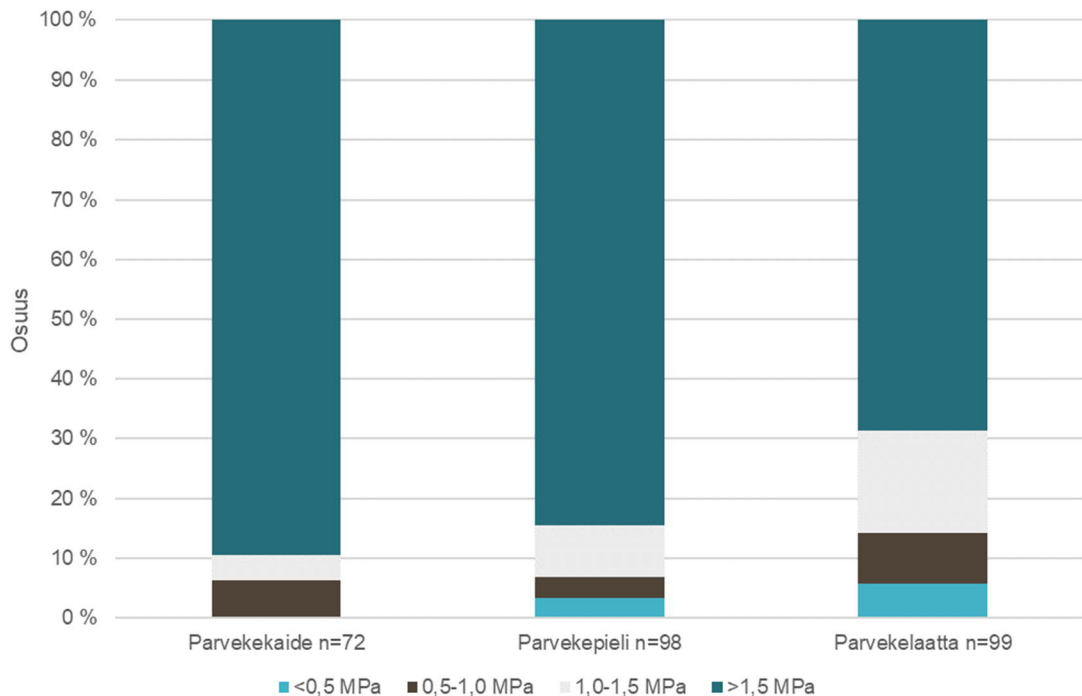
2000-luvun julkisivuilla vetolujuustulokset ovat hyviä. Maalatus, muottipintaisen julkisivun kaikki 8 näytettä olivat yli 1,5 MPa kuten myös tiililaattapintaisen betonin 10 näytettä. Valkobetonin kuudesta näytteestä yksi oli alle 0,5 MPa ja toinen välillä 1,0–1,5 MPa. Loput olivat yli 1,5 MPa.

Parvekkeet

Heikko vetolujuus ei johdu pelkästään pakkasrapautumisesta vaan sille on myös muita selittäviä tekijöitä. Jos betonin puristuslujuus on alun perin ollut huono, sen vetolujuustulos voi jäädä alle 1,5 MPa. Lisäksi pyöreä luonnonkiviaines voi myös aiheuttaa alempia vetolujuustuloksia. (BY 41 2016, s. 22) Parvekelaatat ovat usein raudoitettuja ala- ja yläpinnastaan 150 mm jaolla. Lisäksi niissä voidaan käyttää suurempaa kiviainesta kuin

julkisivuissa. Näyteliieriötä vedettäessä lieriö voi katketa näitä pitkin antaen huonon vetolujuustuloksen.

Kuvassa 40 on esitetty vetolujuusarvot parvekekaiteille, -pielille ja -laatoille.

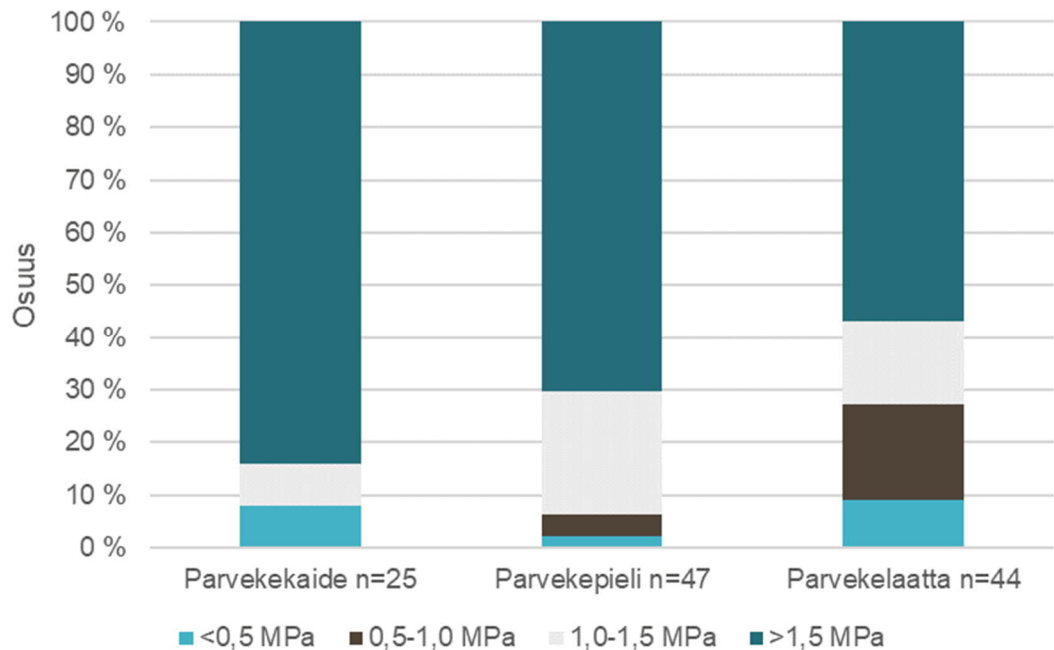


Kuva 40. Vetolujuuksien jakautuminen parvekeosille 1990-luvun rakennuksissa.

Parvekekaiteet ovat vähiten pakkasrapautuneita vetolujuuskokeiden perusteella, kuten kuvasta 40 nähdään. Alle 1,5 MPa tuloksia on eniten parvekelaatoilla ja vähiten parvekekaiteilla. Alle 1,0 MPa vetolujuuksia on kaiteilla ja pielillä noin 5 % ja laatoilla 15 %. Kaidenäytteitä on vähemmän kuin muiden osien näytteitä, mikä todennäköisesti johtuu siitä, että 1990-luvulla alettiin käyttämään enemmän myös kevytrakenteisia (teräs, lasi ja puu) kaiteita betonisten sijaan.

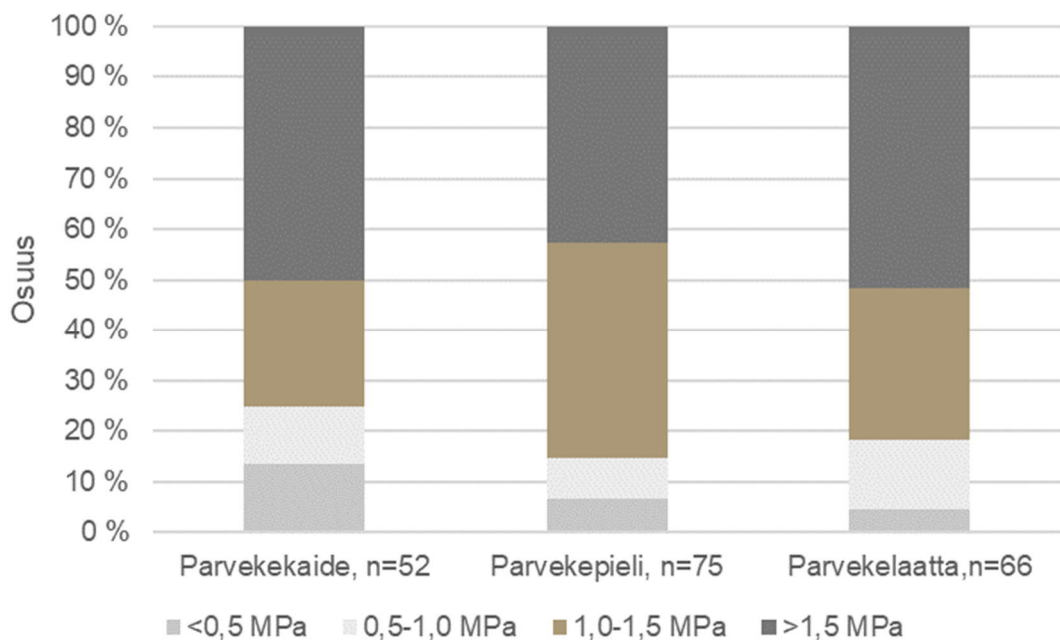
Verrattaessa kuvan 40 tuloksia vanhempaan rakennuskantaan, on huomattavissa, että yli 1,5 MPa vetolujuuden tuloksia on selkeästi suurempi osuus ja alle 1,0 MPa tuloksia on vähemmän. Selittävän tekijän pitäisi olla voimaan tullut vaatimus parvekkeiden betonin lisähuokostuksesta, jolla parannetaan betonin pakkasenkestävyyttä. Vanhemmassa rakennuskannassa vain 40 % näytteistä antoi vetolujuudeksi yli 1,5 MPa. Aineistossa vastaavasti näitä oli 70–90 %. Alle 1,0 MPa vetolujuuksia vanhemmassa rakennuskannassa oli noin 30 % pielillä ja kaiteilla ja 25 % laatoilla. Vanhemmassa rakennuskannassa ei ollut selkeää eroa jakaumissa eri parvekeosien välillä, mutta aineiston kuvaaja viittaisi parvekelaattojen vetolujuustulosten olevan heikompia kuin muiden osien.

Kun 1990-luvun rakennusten tulokset erotellaan BeKo-tietokannasta, voidaan piirtää kuva 41. Kuva vahvistaa tuloksen, että parvekelaattojen vetolujuustulokset ovat heikompia kuin piilien tai kaiteiden. Otos on noin puolet pienempi kuin aineistossa.



Kuva 41. BeKo-tietokannan 1990-luvulla rakennettujen rakennusten parvekeosien vetolujuusjakaumat.

Kuvassa 42 on esitetty vuosien 1985–1989 välillä rakennettujen parvekekaiteiden, -piilien ja -laattojen vetolujuustulokset.



Kuva 42. Parvekeosien vetolujuustulokset 1985–1989 rakennetuilla parvekkeilla.

Vertailtaessa kuvan 42 tuloksia 1990-luvulla rakennettuihin parvekkeisiin, on vetolujuudet huomattavasti parempia 1990-luvulla. 1990-luvun parvekekaiteissa alle 0,5 MPa tuloksia ei ollut yhtäkään, mutta 1980-luvulla jopa yli 10 %. Parvekepielillä ja -laatoilla alle 0,5 MPa tulosten osuus on pysynyt suurin piirtein samana molemmilla vuosikymmenillä. Yli 1,5 MPa tuloksia on 1980-luvulla 40–50 %, mutta 1990-luvulla jopa 70–90 %. Hieman alenneiden vetolujuuksien osuus on siis laskenut huomattavasti 1990-luvulla.

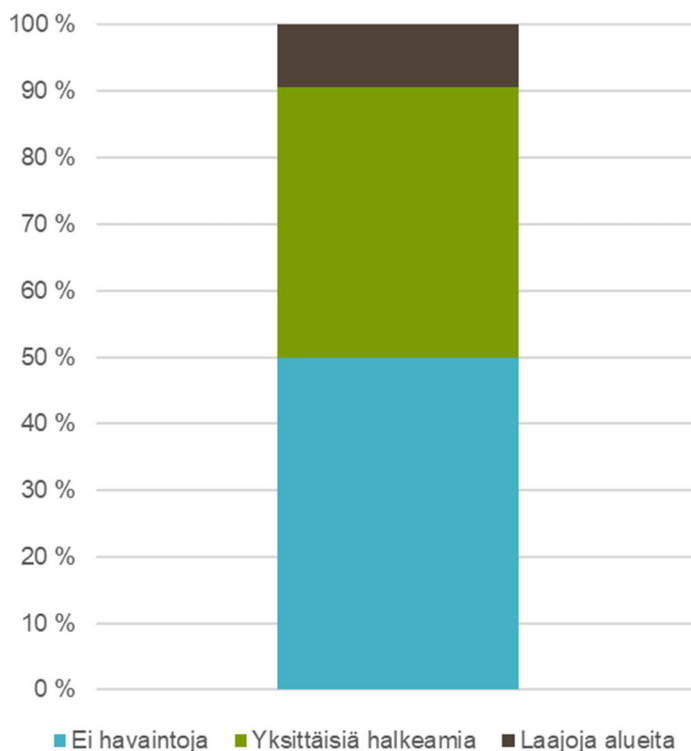
2000-luvun parvekkeiden vetolujuustulokset olivat hyviä. Kaikki kuusi parvekekaidenäytettä olivat yli 1,5 MPa. Kaksi parvekepielinäytettä oli välillä 1,0–1,5 MPa ja toiset kaksi yli 1,5 MPa. Parvekelaattanäytteistä kaksi oli välillä 1,0–1,5 MPa ja loput viisi yli 1,5 MPa.

4.5.3 Betonin rapautumisesta johtuvat näkyvät vauriot

Luvussa tarkastellaan betonin rapautumisesta johtuvia näkyviä vaurioita julkisivuilla ja parvekkeilla.

Julkisivut

Kuvassa 43 on esitetty rapautumisesta johtuneet näkyvät vauriot julkisivuille.



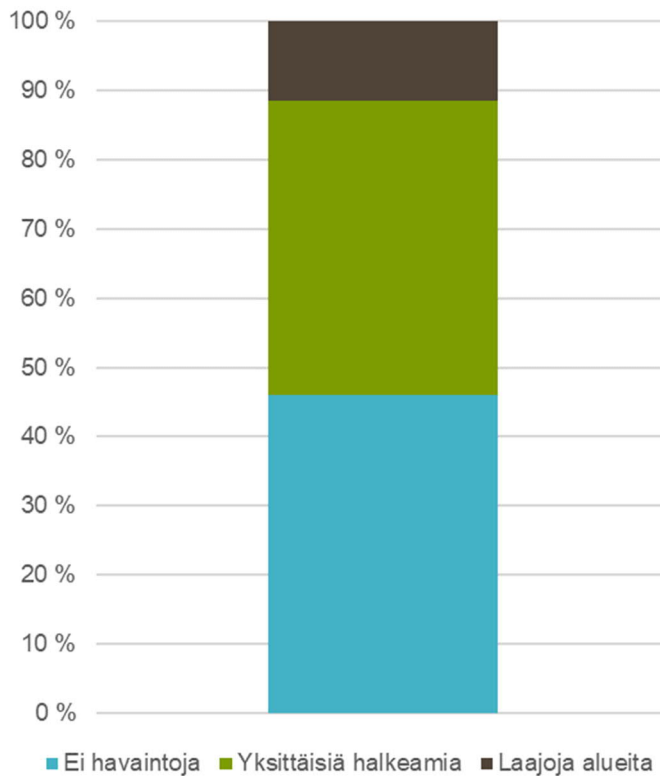
Kuva 43. Betonin rapautumisesta johtuvien vaurioiden esiintymislaajuus 1990-luvun julkisivuilla (n=32).

Kuten kuvasta 43 nähdään, halkeilua havaittiin laajalla alueella noin 10 % kohteista. Yksittäistä halkeilua havaittiin 40 % kohteista.

Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna kohteiden osuus, joissa havaintoja ei tehty on pienentynyt. Tämä johtuu kuitenkin todennäköisesti luokitteluerosta. Vanhemmassa rakennuskannassa yksittäinen halkeamahavainto on luultavasti luokiteltu ei havaintoja -kohtaan, toisin kuin tässä.

Parvekkeet

Kuvassa 44 on esitetty rapautumisesta johtuvat näkyvät vauriot parvekkeille.



Kuva 44. Betonin rapautumisesta johtuvien vaurioiden esiintymislaajuus 1990-luvun parvekkeissa (n=26).

Laajaa rapautumista havaittiin reilussa 10 % kohteista kuvan 44 mukaisesti. Se on kuitenkin vain 3 kohdetta pienen otannan takia. Yksittäisiä halkeamia havaittiin noin 40 % kohteista.

Vanhempaan rakennuskantaan verrattuna yksittäisten halkeamien osuus on lisääntynyt ja rapautumattomien osuus pienentynyt. Syy tähän on sama kuin julkisivuilla. Yksittäiset havaitut halkeamat ovat voineet johtaa kuntotutkimuksen tilaamiseen ja senkin takia niiden osuus voi olla suuri.

4.5.4 Pakkasrapautumisen yhteys pakkasenkestävyyteen

Tarkasteltaessa betoninäytteiden pakkasenkestävyyttä, pakkasrapautumisastetta sekä vetolujuustuloksia, saadaan kokonaiskuva betonin kunnosta.

Julkisivut

Yleisesti eri julkisivutyypin betoni on pakkasenkestävää ja rapautumatonta pakkasrapautumistiasteen ja vetolujuuden avulla arvioituna.

Pesubetoninäytteissä on paljon huokostamatonta sekä puutteellisesti huokostettua betonia. Tämän takia yli 10 %:lla näytteistä on vähäistä rapautumaa eli pakkasrapautumistiaste 1. Muutamalla näytteellä pakkasrapautumistiaste on 3 eli pakkasrapautuminen on voimakasta. Näytteistä 20 % alittaa 1,5 MPa vetolujuuden. Reilulla 5 %:lla näytteistä vetolujuus alittaa 0,5 MPa eli niissä voidaan tulkita olevan pitkälle edennyttä rapautumaa.

Klinkkerilaattapintaisella betonilla jopa 30 %:lla näytteistä huokostus oli puutteellista ja reilu 10 % huokostamatonta. Tämä ei kuitenkaan näy rapautumistiasteessa tai vetolujuuksissa. Alle 5 %:lla näytteistä on vähäistä tai kohtalaista pakkasrapautumaa. Vain muutama vetolujuusnäyte alittaa 1,5 MPa, mutta ne osuvat välille 1,0–1,5 MPa eli alitus on hyvin pieni ja voi viitata jonkinasteiseen rapautumaan. Puutteellinen huokostus ei todennäköisesti näy rapautumisena tai alenneina vetolujuustuloksina, sillä klinkkerilaatta ei läpäise vettä ja täten taustabetoni ei pääse laajasti kastumaan ja jäätymään. Vesi kulkeutuu kapillaarisesti taustabetoniin vain laattasaumojen kautta. Vetolujuudet ovat kuitenkin hyviä ja rapautumistiaste alhainen. Tähän vaikuttaa todennäköisesti myös betonin lujuusluokkien nosto.

Muottipintaisella, maalatulla betonilla huokostamattomia näytteitä on kaksi kymmenestä. BeKo-tietokannassa tämän julkisivutyypin näytteitä ei ollut tarpeeksi, jotta olisi saatu luotettavampi tarkastelu huokostuksesta. Ohuthiessä vähäistä rapautumaa oli vain muutamassa näytteessä. Vetolujuuskokeiden tulokset osoittavat jonkinasteista rapautumaa jopa reilussa 10 % näytteistä.

Valkobetoninäytteillä huokostamatonta betonia on vähiten, noin 5 %. Kuitenkin pakkasrapautumistiasteen 1 ja 3 (vähäistä ja voimakasta) näytteitä löytyy. Jopa 10 % vetolujuustuloksista alittaa 0,5 MPa eli rapautuma olisi pitkälle edennyttä. Lisäksi 10 % vedetyistä näytteistä osui 1,0–1,5 MPa välille eli jonkinasteista rapautumaa voi olla.

Tiililaattapintaisilla näytteillä noin kymmenesosa on huokostamattomia. Näytteistä 10 % on pakkasrapautumistiasteella välillä 1–3, eli eriasteista rapautumaa on havaittavissa. Vetolujuustuloksista pienempi osa viittaa pakkasrapautumaan.

Yleisesti voidaan todeta, että betoni on hyvässä kunnossa aineiston kohteissa. Vain yksittäisissä tapauksissa betonin kunto on heikkoa ja vaatii korjaustoimenpiteitä. Lisäksi vetolujuus ja pakkasrapautumistiasteen tulokset korreloivat keskenään hyvin. Säilyvyysominaisuudet ovat selvästi parantuneet vanhaan rakennuskantaan verrattuna.

Parvekkeet

Parvekeosista parvekekaiteiden huokostamattoman betonin osuus on suurin, melkein 40 %. Niillä on myös eniten ja suurempiasteista pakkasrapautumaa muihin osiin verrattuna. Vetolujuustulokset viittaavat jonkinasteiseen rapautumaan, alle 0,5 MPa vetolujuustuloksia ei näytteissä ole.

Mahdollinen selitys huonolle kunnolle voi olla parvekelasitus. Vesisateen aikana lasitukseen osuva sadevesi valuu sitä pitkin parvekekaiteelle aiheuttaen sille suurempaa kosteusrasitusta. Parvekekaiteet ovat myös suhteellisen ohuita kylmiä rakenteita ja jäätymis-sulamisrasitus on siten ankarampaa.

Parvekepielistä huokostamatonta betonia on 20 % näytteistä ja niissä on pakkasrapautumisasteeltaan 1–2 olevia näytteitä noin 5 %. Vetolujuustuloksista reilu 10 % viittaa jonkinasteiseen rapautumaan ja 5 % merkittävään rapautumaan. Kuntotutkimusraporteista selvisi, että monissa kohteissa parvekepielien vetolujuuskokeiden murtopinta myötäili kiviainesta. Kiviaines oli myös paikoittain suurta, 18–26 mm halkaisijaltaan, mikä osaltaan selittää huonoja vetolujuusarvoja.

Parvekelaatoilla betonin huokostus on onnistunut parhaiten. Kuitenkin hieman alle 10 % näytteistä on löydetty pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua, rapautumisasteeltaan 1. Laattojen vetolujuustulokset ovat kuitenkin heikoimmat kaikista parvekeosista. Noin 5 % alittaa 0,5 MPa vetolujuuden ja siten viittaa todennäköiseen merkittävään rapautumaan. Alle 1,5 MPa alittavia vetolujuuksia on yhteensä 30 %.

Kuntotutkimusraportteja yksittäin tarkasteltuna parvekelaattojen vetolujuuskokeiden murtopinta myötäili kiviainesta sekä raudoituksia. Kiviaineksen maksimikoko oli 10–17 mm ja raudoitteiden 6–8 mm, mutta niitä saattoi olla murtokohdassa useita. Nämä tekijät selittävät erityisesti 1,0–1,5 MPa vetolujuuksien suuren osuuden verrattuina muihin parvekeosiin. Samankokoista kiviainesta ja raudoitusta löytyi kuitenkin myös vetokoenäytteistä, joiden tulokset ylittivät 1,5 MPa.

Parvekkeiden betonin laatu on parantunut vanhaan rakennuskantaan verrattuna huomattavasti. Laadullisesti pakkasenkestävyyden kannalta epäonnistunutta betonia on noin 10 % kohteista.

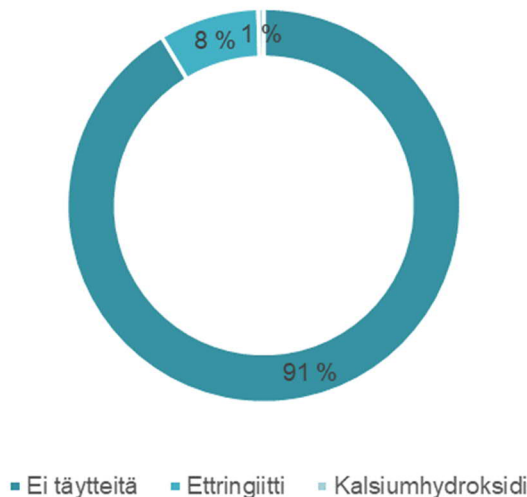
Pakkasrapautumisesta ei voida tehdä samanlaisia käyttöikä tarkasteluja kuin karbonatisoitumisesta. Betoninormeissa (BY 65 2016, s. 142) annettua kaavaa F-luvun laskentaan ei voida soveltaa, sillä v/s-suhde ei ole vanhoille rakenteille saatavilla. Muut luvut käyttöiän laskentaan ovat tunnettuja.

4.6 Huokostäytteet

Luvussa tarkastellaan huokostäytteiden osuutta kaikista näytteistä sekä alkali-kiviainesreaktion mahdollisuutta.

Julkisivut

Kuvassa 45 on esitetty julkisivuista löytyneet huokostäytteet. Täytteet on selvitetty ohuthietutkimuksen yhteydessä mikroskoopilla.



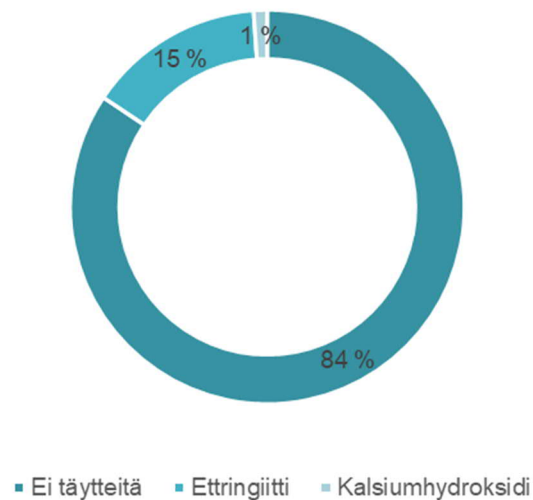
Kuva 45. Huokostäytteet 1990-luvun julkisivuissa (n=291).

Kuvassa 45 on esitetty julkisivujen huokostäytteet sekä niiden osuudet. Huokostäytteet on tarkasteltu ohuthienäytteistä. 90 % näytteistä ei ollut havaittavissa huokostäytteitä. Ettringiittiä havaittiin 8 % ja kalsiumhydroksidia 1 % näytteistä. Näytteitä oli 291 kappaletta.

BeKo-tietokantaan verrattuna huokostäytteiden määrä on vähentynyt huomattavasti. Julkisivutyypistä riippuen täytteettömiä näytteitä vanhemmassa rakennuskannassa oli vain 35–65 %.

Parvekkeet

Kuvassa 46 on esitetty parvekkeiden huokostäytteet 1990-luvun rakennuskannassa.



Kuva 46. Huokostäytteet 1990-luvun parvekkeissa (n=269).

Parvekkeissa ettringiitin osuus on suurempi kuin julkisivuissa, kuten kuvasta 46 nähdään. Osuus on 15 % ja täytteettömiä huokosia on 84 %. Kalsiumhydroksidia löytyi 1 % näytteistä. Näytteitä oli 269 kappaletta.

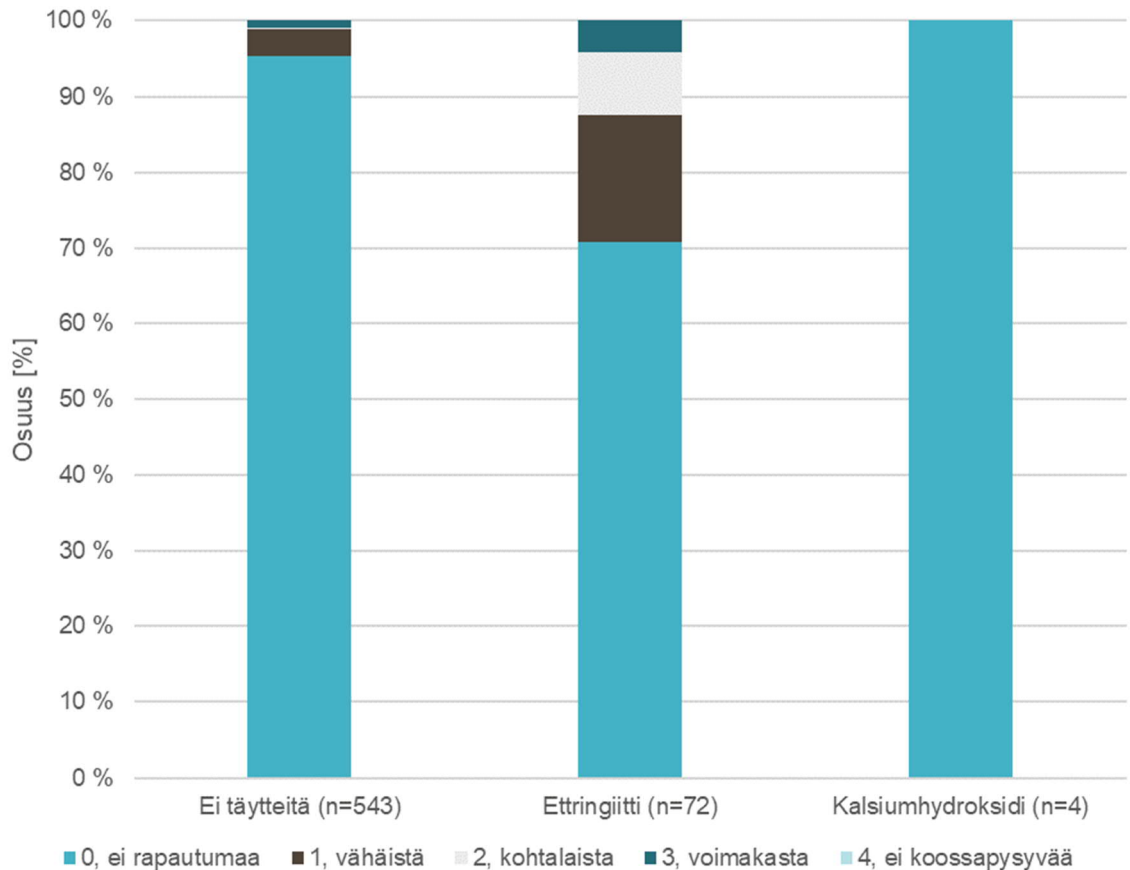
Parvekkeiden kohdalla ero täytteettömien näytteiden määrässä BeKo-tietokantaan ei ole yhtä selkeä kuin julkisivuilla. Täytteettömiä huokosia löytyi 60–70 % näytteistä parvekeosasta riippuen.

Osassa näytteistä havaittiin useampaa eri täytettä, mutta tietokantaan merkittiin vain täyte, jota oli havaittavissa eniten. Tämän takia ettringiitti on täytteistä yleisin. Lisäksi, jos raportissa mainittiin ”vähäistä ettringiittiä”, tulkittiin se samanarvoiseksi kuin lause ”ettringiittiä”. Tämä johtaa arvioon ettringiitin todellisuutta suuremmasta määrästä.

Sekä julkisivujen että parvekkeiden tapauksessa on kyse myöhäisen vaiheen ettringiitistä, joka on haitallista betonin rapautumisen kannalta. Kalsiumhydroksidin löytyminen huokosista johtuu yksinomaan hydratoitumattomasta sementistä.

4.6.1 Huokostäytteiden yhteys pakkasrapautumiseen

Luvussa tarkastellaan, esiintyykö huokostäytteellisillä näytteillä enemmän ja suurempiasteista pakkasrapautumaa kuin huokostäytteettömillä näytteillä. Kuvassa 47 on esitetty pakkasrapautumisasteiden osuudet näytteissä. Huokokset olivat joko täytteettömiä, ettringiittiä sisältäviä tai kalsiumhydroksidia sisältäviä. Julkisivu- ja parvekenäytteet on yhdistetty, sillä tulokset olivat hyvin samankaltaiset erikseen tarkasteltuna. Erotellut kuvat on esitetty liitteessä C.



Kuva 47. Julkisivu- ja parvekenäytteiden pakkasrapautumisaste sekä havaittu huokostäyte 1990-luvun rakennuskannassa (n=619).

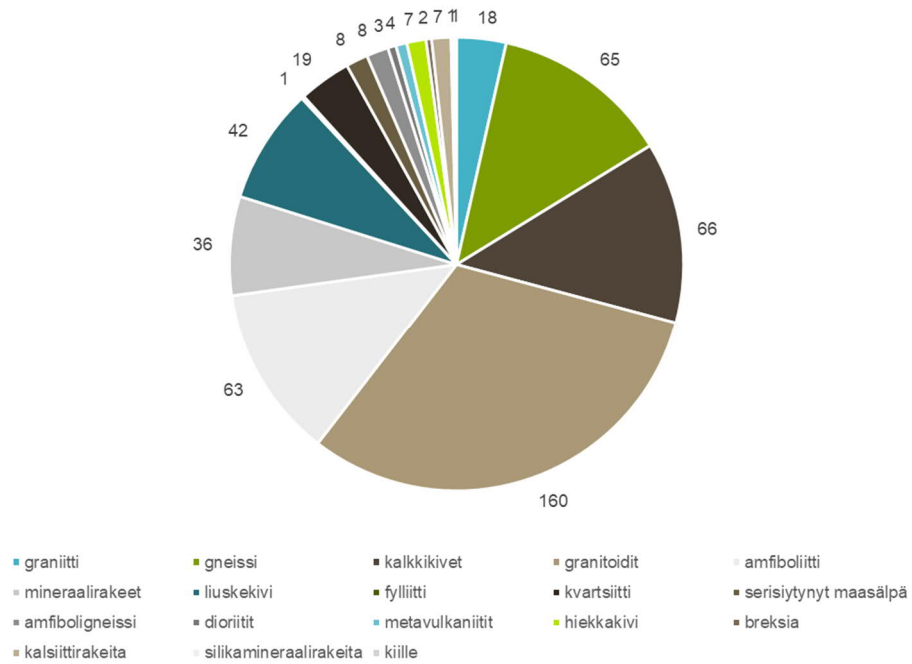
Kuvasta 47 voidaan havaita, että ettringiittiä huokostäytteenä sisältävissä näytteissä on enemmän ja suurempiasteista pakkasrapautumaa kuin täytteettömässä näytteissä. Täysin rapautumattomia näytteitä on 70 % verrattuna täytteettömien näytteiden 95 %:iin. Vähäistä pakkasrapautumaa on noin 15 % näytteistä. Kohtalaista rapautumaa löytyy noin 10 % näytteistä ja voimakasta 5 % näytteistä.

Koska huokostäytteen määrää ei eritelty (ovatko huokokset täysiä vai vain muutamia kiteitä havaittavissa), ei voida tehdä päätelmiä aiheuttaako huokostäytteet pakkasrapautumaa nopeammin ja suurempiasteisena. Kuvan 47 perusteella ettringiitin esiintyminen betonin huokosverkostossa lisää riskiä pakkasrapautumiselle.

Kalsiumhydroksidia sisältäviä näytteitä on vain neljä ja niiden kaikkien pakkasrapautumisaste on 0.

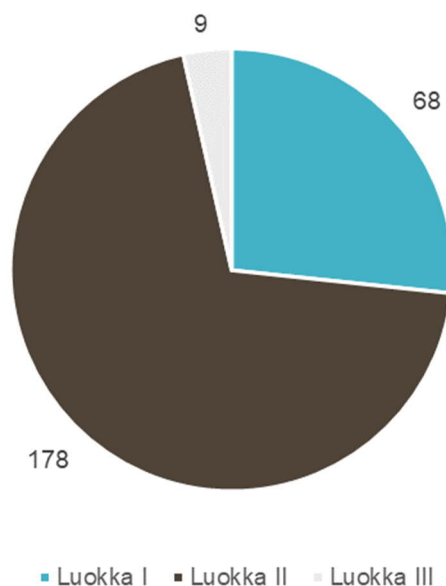
4.6.2 Alkali-kiviainesreaktion mahdollisuus otannassa

Kuvassa 48 on esitetty betoninäytteistä löytyneet kivilajit 1990-luvun rakennuskannassa. Kuvassa on sekä julkisivujen että parvekkeiden kivilajit.



Kuva 48. Ohuthietutkimuksista löydetty kivilajit 1990-luvun rakennuksissa (n=254).

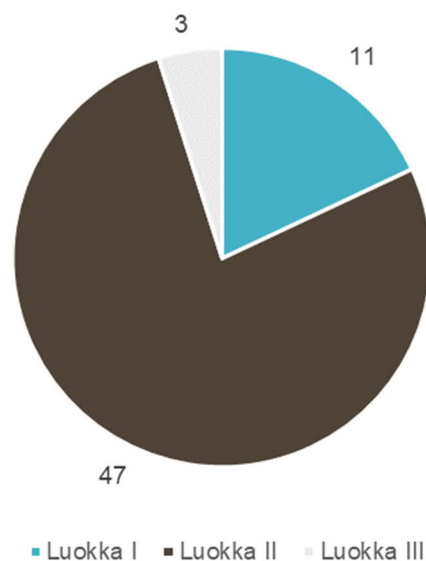
Kuvassa 48 on esitetty ohuthietutkimuksista löydetty kivilajit sekä niiden kappalemäärät. Näytteitä tutkittiin yhteensä 254 ja jokaisesta näytteestä tunnistettiin 2–4 eri kivilajia. Tästä syystä kivilajien summaksi saadaan enemmän kuin 254. Yleisin kivilaji oli erilaiset granitoidit, joka on yleisnimitys graniitin kaltaisille magmakiville. Kuvassa 49 yksittäiset kivilajit on esitetty kolmessa eri luokassa.



Kuva 49. Ohuthieraporteissa havaitut kivilajit petrografisen analyysin perusteella jaoteltuna eri luokkiin (n=255).

Kuvassa 49 on esitetty ohuthietutkimuksissa löydetyt kivilajit lajiteltuna luokkiin niiden alkali-kiviainesreaktiivisuuden mukaan. Kuvassa on esitetty absoluuttinen näytemäärä. Luokitus perustuu BY päivittyvään ohjeeseen betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi. Luokkaan I kuuluvat kivilajit, joiden alkali-kiviainesreaktiivisuus on erittäin epätodennäköistä. Luokan II kivilajeille reaktiivisuus on mahdollista ja luokalle III todennäköistä. (BY päivittyvä ohje, s. 19) Osaa kivilajeista ei osattu luokitella oikeaan luokkaan, joten ne eivät näy kuvassa 49. Tällaisia kivilajeja oli 47 kappaletta.

Luokkaan I eli reaktiivisuus erittäin epätodennäköistä kuului 68 näytettä eli 27 % näytteistä. Kolme yleisimmin löydettyä tähän luokkaan kuuluvaa kivilajia olivat kalkkikivet, gneissi ja amfiboliitti. Gneissi voi kuulua joko luokkaan I tai II riippuen sen sisältämän kvartsin raekoosta. Luokkaan II eli alkali-kiviainesreaktiivisuus mahdollista kuului 178 näytettä eli 70 %. Yleisin kiviaine oli granitoidit, jota seuraavat liuskekivi ja kvartsiitti. Alkali-kiviainesreaktiivisuus todennäköistä eli luokkaan III kuuluvia kivilajeja löytyi 9 kappaletta eli 4 % näytteistä. Näytteistä 8:ssä löytyi serisiytyneitä kivilajeja. Lisäksi tehtiin yksittäinen fylliitti-havainto. Kuvassa 50 kivilajiluokat on esitetty kohteittain.



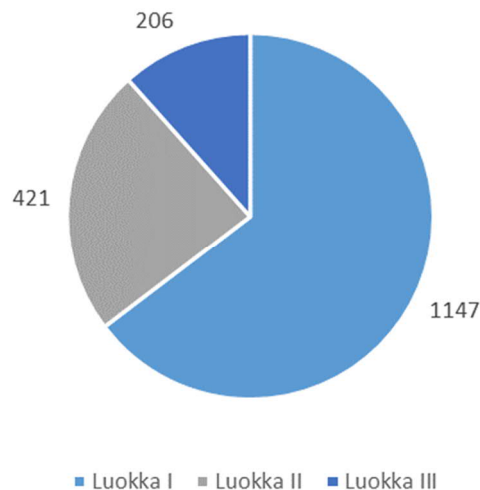
Kuva 50. Ohuthieraporteista havaitut kivilajit kohteittain eri luokkiin lajiteltuina (n=61).

Kuvassa 50 on esitetty kivilajiluokat kohteittain niin, että yhdestä kohteesta on aina yksi julkisivunäyte ja yksi parvekenäyte. Kohteista 77 % löytyi luokan II kivilaji eli AKR on mahdollista. 1990-luvulla asuinrakennuksia on rakennettu noin 8 000 eli jopa 6 160 kohteessa AKR on mahdollista. Luokan III kivilajeja löytyi 5 % kohteista eli 400 aikakaudella rakennetussa asuinrakennuksessa AKR on todennäköistä.

Rakennusten sijainnilla ei ole merkitystä kivilajiluokkien esiintymisen kannalta, sillä elementit voidaan toimittaa pitkienkin etäisyyksien päästä. Tämän lisäksi näytteet analysoineilla laboratorioilla on erilaiset merkintätavat kivilajeille ja tämä korostui sijainnin mukaan lajiteltaessa.

Kuntotutkimusraporteissa kolmen näytteen kohdalla oli maininta alkali-kiviainesreaktiosta. Kahdessa kivilajia ei tunnistettu tarkemmin, se oli sedimenttistä alkuperää ja kolmannessa kivilajiksi tunnistettiin serti. Molemmat havainnot kuuluvat luokan III kivilajeihin. Maininta AKR:sta piti etsiä näytteiden yksityiskohtaisesta analyysistä, sitä ei oltu nostettu laboratorion tulosten yhteenvetoon.

Kuvassa 51 on esitetty BeKo-tietokannan kivilajit.



Kuva 51. Kivilajien luokitukset vanhemmassa rakennuskannassa (n=1 774).

Kuvan 51 mukaisesti BeKo-tietokannassa luokkaan I kuuluvia kivilajeja havaittiin huomattavasti enemmän kuin luokan II ja III kivilajeja. Kun tätä tulosta verrataan kuvaan 49, voidaan havaita, että AKR esiintymisen todennäköisyys on kasvanut uudemmassa rakennuskannassa. Kuitenkin luokan III kivilajeja löytyi 12 % näytteistä eli useammin kuin uudemmassa rakennuskannasta. BeKo-aineistossa yleisimmät kivilajit olivat graniitti ja gneissi, jotka ovat luokan I kivilajeja, sekä kvartsi, joka on luokan II kivilaji.

Ohuthienäytteissä havaittiin useita kivilajeja ja 70 % niistä löytyi luokan II kivilajeja. Tämän perusteella alkali-kiviainesreaktion mahdollisuutta ei pitäisi enää sivuuttaa. Lisäksi vertailu vanhempaan rakennuskantaan osoittaa, että AKR todennäköisyys on suurempi uudemmassa rakennuskannassa. Laboratorioiden pitäisi etsiä muitakin AKR:oon viittaavia merkkejä kuin siihen yhdistettyä geeliä.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Säilyvyysominaisuuksien ohjeistuksien julkaisun myötä 1980–1990-lukujen vaihteessa on betonin laatu ja sen säilyvyysominaisuudet parantuneet selkeästi. Eniten on parantunut betonin pakkasenkestävyys. Vaikka betonin huokostus on edelleen osittain puutteellista, ovat pakkasrapautumisasteet pysyneet pieninä. Lisäksi raudoitteiden peitepaksuudet ovat lähempänä suunnitteluarvoa ja selkeästi sen alittavat paksuudet ovat lähes hävinneet. Näytteiden kloridipitoisuudet ovat pysyneet suurin piirtein samoina eli raja-arvojen ylityksiä on vain yksittäisiä. Korroosion tai rapautumisen aiheuttamia näkyviä vaurioita on havaittavissa vain yksittäisiä sekä julkisivuissa että parvekkeissa.

Betonin karbonatisoitumisen suhteen 1990-luvun betonijulkisivut ja parvekkeet saavuttavat yleisesti 50 vuoden käyttöiän. Ainoastaan yksittäisiä paikallisia korroosiovaurioita voi esiintyä aivan lähelle betonipintaa jääneiden raudoitteiden takia. 50 vuoden käyttöikä ei kuitenkaan päästä, mikäli rakenteessa on myös pakkasrapautumaa.

Betonin pakkasrapautumisen osalta 50 vuoden käyttöikä ei tämän tutkimusaineiston perusteella tulla saavuttamaan kaikissa betonirakenteissa. Jo nyt on havaittavissa pakkasrapautumaa noin 10 %:ssa tutkituista rakenteista.

Alkali-kiviainesreaktion todennäköisyys betoninäytteissä on kasvanut. Laboratoriot ovat tähän mennessä lähinnä etsineet reaktiolle tyypillistä geeliä, mutta sitä ei aina löydy. Kun reagoinutta kiviainesta löytyi, sitä ei ollut nostettu yhteenvedoon eli epävarmuutta AKR:n tunnistamisen ja merkityksen suhteen on edelleen havaittavissa. Laboratorioiden on siis etsittävä myös muita AKR:oon viittaavia merkkejä ja sen mahdollistavia tekijöitä, kuten hienorakeista kvartsia.

Tutkimuksessa käytössä ollut aineisto on kooltansa ollut kattava. Aineistoa oli vähän muun muassa muottipintaisten maalattujen julkisivujen kohdemäärän osalta ja yleisesti pakkasenkestävyyden osalta. Tulosten yleistämisessä koko Suomen rakennuskantaan on kuitenkin oltava varovainen. Suurin osa kohteista oli suurien kiinteistönomistajien omistamia eli kuntotutkimukset ovat olleet osa kiinteistönhoitoa eikä tilattu, kun näkyviä vaurioita on huomattu.

5.1 Lisätutkimustarpeet ja kehitysehdotukset

Laboratoriotutkimuksissa ei ole tarkasteltu betonin huokoisuutta kovin tarkasti. Tästä syystä karbonatisoitumisen hidastumisen syytä ei yksiselitteisesti pystytä selittämään. Se voi johtua joko pelkästään sementin määrän lisääntymisestä tai myös tiiviimmästä

betonin huokosrakenteesta. Useiden kohteiden analyysia varten tieto olisi hyödyllinen, mutta yksittäisillä kohteilla tieto ei ole yhtä merkittävä. Jatkossa kuntotutkimusten yhteydessä tulisi betoninäytteille tehdä suojahuokoskoe standardin SFS 4475 mukaan. Vaihtoehtoisesti betonin huokoskokojakaumaa voidaan selvittää elohopeaporisimetrialla. Betonin huokosrakenteen paremman tuntemisen avulla voidaan tehdä luotettavia päätelmiä sekä karbonatisoitumisen etenemiseen johtaneista syistä että betonin kastumispotentialista viistosaderasituksessa.

Kuntotutkimuksia tulisi hyödyntää paremmin rakennusten elinkaaren hallinnassa. Kuntotutkimus tilataan yleensä vasta, kun rakennuksessa on jo näkyviä vaurioita kuten halkeamia. Poikkeuksen tähän tekevät useita kiinteistöjä omistavat yhtiöt, joilla säännöllisten kuntotutkimusten tekeminen on osa kiinteistöhuoltostrategiaa.

Sandwich-elementtien ulkokuorissa on alettu käyttää ruostumatonta verkkoa, kun kuoren paksuus on pienentynyt niin ohueksi, että peitepaksuusvaatimuksia ei voida täyttää. On kuitenkin epäselvää, milloin näin on alettu toimimaan ja siksi peitepaksuusmittauksia on edelleen hyvä tehdä kuntotutkimusten yhteydessä.

1990-luvun rakennukset ovat altistuneet ulkoilman rasituksille nyt 22–32 vuotta. Tarkastelemalla rakenteiden saamaa viistosaderasitusta ja jäätymis-sulamissykliä voidaan laajalla aineistolla saada käsitys kuinka suurella jäätymis-sulamissyklimäärällä betonirakenteeseen alkaa muodostua pakkasrapautumista. Tämä edellyttää myös betonin huokosrakenteen parempaa tuntemusta.

Kiertotalous ja rakentamisen ympäristövaikutukset ovat nousseet suunnittelua ohjauksiksi tekijäksi lähivuosina. Niiden johdosta tavallista sementtiä korvataan enenevässä määrin mm. masuunikuonalla. Korvaavat sideaineet voivat vähentää karbonatisoituvan aineen määrää ja vaikuttaa betonin tiivyyteen ja täten betonin karbonatisoitumisnopeutta on hankalampi ennustaa uudessa rakennuskannassa. Jos betonin reseptivaihtelu on suurta, ei yleistyksiä voida enää tehdä.

LÄHTEET

- A 46. 1965. Betoninormit 1965. Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisuja, Helsinki, 102 s.
- AL-Ameeri, A.S., Rafiq, M.I., Tsioulou, O. 2021. Combined impact of carbonation and crack width on the chloride penetration and corrosion resistance of concrete structures. Cement and Concrete Composites. Vol 115.
- Bakker, R. 1988. Initiation period. Julkaisussa Schiessl, P. (toim.) Corrosion of steel in concrete. Chapman and Hall, Lontoo, s. 22–55
- Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific data. Vol 5. 12 s.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedefferri, P., Redaelli, E., Polder, R.B. 2014. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, repair. John Wiley & Sons Inc., Weinheim. 414 s.
- Boström, S., Uotila, U., Linne, S., Hilliaho, K., Lahdensivu, J. 2012. Erialaisten korjaustoimien vaikutuksia lähiökerrostalojen todelliseen energiankulutukseen. Tutkimusraportti 158. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 77 s.
- Broomfield, J. 2003. Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair. 2nd Edition. Taylor & Francis, Lontoo. 296 s.
- BY 74. 2021. Päivittyvä ohje betonin alkali-kiviainesreaktion hallitsemiseksi. Suomen betoni-yhdistys ry, 55 s. Saatavissa (luettu 7.12.2021): https://issuu.com/betoni-yhdistys/docs/akr_pa_ivittyva_ohje_24.6.2021
- BY 9. 1976. Betonin säilyvyys: vesirakennusbetoni, julkisivubetoni. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 44 s.
- BY 10. 1977. Betoninormit 1977. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 202 s.
- BY 15. 1980. Betoninormit 1980. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 130 s.
- BY 15. 1990. Betoninormit 1990. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 184 s.
- BY 15. 1993. Betoninormit 1993. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 170 s.
- BY 15. 2000. Betoninormit 2000. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 181 s.
- BY 32. 1989. Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus 1989. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 60 s.
- BY 32. 1992. Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus 1992. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 66 s.
- BY 41. 2016. Betonirakenteiden korjausohjeet 2016. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 115 s.
- BY 42. 2019. Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 136 s.
- BY 42. 2014. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden kuntotutkimus, tilaajan ohje 2014. Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 17 s. Saatavissa (viitattu 5.10.2021): <http://www.betoni-yhdistys.fi/media/julkaisut/betonijulkisivun-kuntotutkimus-tilaajan-ohje.pdf>

- BY 50. 2004. Betoninormit 2004. Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki, 239 s.
- BY 65. 2016. Betoninormit 2016. Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki, 164 s.
- BY 68. 2016. Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016. Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki, 95 s.
- BY 201. 2018. Betonitekniikan oppikirja 2018. Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki, 568 s.
- Dukhan, T., Sushama, L. 2021. Understanding and modelling future wind-driven rain loads on building envelopes for Canada. *Building and Environment*. Vol. 196.
- Elementtisuunnittelu 2020a. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2021): <https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/julkisivujarjestelmat/eriytettyt-julkisivut>
- Elementtisuunnittelu 2020b. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2021): <https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/lampo-ja-kosteustekniikka>
- Famy, C., Scrivener, K.L., Taylor, H.F.W. 2002. Delayed ettringite formation. Julkaisussa Bensted, J, Barnes, P. (toim.) *Structure and Performance of Cements*. Taylor & Francis, Lontoo, 565 s.
- Ghantous, R.M., Poyet, S., L'Hostit, V., Tran, N.-C., Francois, R. 2017. Effect of crack openings on carbonation-induced corrosion. *Cement and Concrete Research*. Vol 95. s. 257–569.
- Holt, E., Ferreira, M. 2013. Addressing ASR in concrete construction in Finland. Konferenssijulkaisu. *Nordic-Baltic Mini Seminar, Alkali Aggregate Reactions (AAR) in Concrete*.
- Huopainen, J. 1997. Betonijulkisivujen karbonatisoituminen: kenttätutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. Diplomityö. 104 s.
- Hytönen, Y., Seppänen, M. 2009. Tehdään elementeistä. SBK-säätiö, Jyväskylä, 332 s.
- Ilomets, S. 2017. *Renovation Need and Performance of Envelopes of Concrete Apartment Buildings in Estonia*. Tallinna, Tallinn University of Technology. Väitöskirja. 200 s.
- Ilomets, S., Kalamees, T., Lahdensivu, J., Klõšeiko, P. 2016. Impact of ETICS on corrosion propagation of concrete facade. *Energy Procedia*. Vol 96. s. 67–76.
- IPCC. 2021. Ilmatoraportti, tekninen tiivistelmä. 159 s. Saatavissa (viitattu 20.10.2021): https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Böök, H., Lindfors, A., Pirinen, P., Laapas, M., Mäkelä, A. 2020. Nykyisen ja tulevaisuuden ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2020:6, Helsinki, 81 s.
- Kiviste, M. 2011. Condition and residual bearing capacity of existing reinforced concrete structures. Tartu, Estonian University of Life Sciences, 164 s.
- Koskiahde, A. 2004. An experimental petrographic classification scheme for the condition assessment of concrete in facade panels and balconies. *Materials Characterization*. Vol 53, Issues 2–4. s. 327–334.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. Vol 15. s. 259–263.
- Kurdowski, W. 2002. Chloride corrosion in cementitious system. Julkaisussa Bensted, J, Barnes, P. (toim.) *Structure and Performance of Cements*. Taylor & Francis, Lontoo, 565 s.

Kvande, T., Lisø, K.R. 2009. Climate adapted design of masonry structures. *Building and Environment*. Vol. 44, Iss. 12. s. 2442–2450.

Köliö, A. 2011. Betonilähiöiden julkisivujen tekninen korjaustarve. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere. Diplomityö. 74 s. + 36 s.

Köliö, A. 2016. Propagation of Carbonation Induced Reinforcement Corrosion in Existing Concrete Facades Exposed to the Finnish Climate. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, 146 s.

Köliö, A., Honkanen, M., Lahdensivu, J., Vippola, M., Pentti, M. 2015. Corrosion products of carbonation induced corrosion in existing reinforced concrete facades. *Cement and Concrete Research*. Vol 78, part B. s. 200–207.

Köliö, A., Niemelä, P.J., Lahdensivu, J. 2016. Evaluation of a carbonation model for existing concrete facades and balconies by consecutive field measurements. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 65. s. 29–40.

Köliö, A., Pakkala, T.A., Annala, P.J., Lahdensivu, J., Pentti, M. 2014. Possibilities to validate design models for corrosion in carbonated concrete using condition assessment data. *Engineering Structures*. Vol 75. s. 539–549.

Lahdensivu, J. 2012. Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, 117 s.

Lahdensivu, J., Kekäläinen, P., Lahdensivu, A. 2018b. Alkali-silica Reaction in Finnish Concrete Structures. *Nordic Concrete Research*. Vol. 59. s. 31–44.

Lahdensivu, J., Köliö, A., Husaini, D. 2018a. Alkali-silica reaction in Southern-Finland's bridges. *Case Studies in Construction Materials*. Vol. 8. s. 469–475.

Lahdensivu, J., Lahdensivu, E., Köliö, A. 2019. Case Study on the 20 Years Propagation of Carbonation in Existing Concrete Facades and Balconies. *Nordic Concrete Research*. Vol. 60. s. 1–12.

Lahdensivu, J., Lahdensivu, E. 2022. Alkali-aggregate reaction possibility in existing Finnish concrete facades and balconies. *Esitys 24th NCR Symposium -konferenssissa 18.8.2022*.

Lahdensivu, J., Varjonen, S., Köliö, A. 2010. Betonijulkisivujen korjausstrategiat. Tutkimusraportti 148. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 79 s.

Laukkarinen, A., Jokela, T., Vinha, J., Pakkala, T., Lahdensivu, J., Lestinen, S., Jokisalo, J., Kosonen, R., Lindfors, A., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. 2022. Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdystystehontarpeen mitoitusolosuhteet. Tampereen yliopisto, Tampere. Tutkimusraportti 3. 203 s.

Liikennevirasto. 2018. Taitorakenteiden erikoistarkastusten laatuvaatimukset – Sillat. Liikenneviraston ohjeita 28/2018. Helsinki, 51 s. Saatavissa (viitattu 16.11.2021): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-28_taitorakenteiden_erikoistarkastusten_web.pdf

Maa- ja metsätalousministeriö. 2014. Kansallinen ilmastonmuutokseen sopeutumissuunnitelma 2022. Valtioneuvoston periaatepäätös 20.11.2014. 41 s.

Mehto, L., Pentti, M., Kähkönen, H. 1990. Betonijulkisivujen karbonatisoituminen. Tutkimusraportti 41. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. 149 s.

Neuvonen, P. (toim.) 2006. Kerrostalot 1880–2000. Rakennustieto Oy, Helsinki, 288 s.

Neuvonen, P. (toim.) 1989. Kerrostalot 1940–1960. Rakennustieto Oy, Helsinki, 273 s.

Neuvonen, P. (toim.) 2015. Kerrostalot 1975–2000. Rakennustieto Oy, Helsinki, 117 s.

- Neville, A. 1995. *Properties of Concrete*. Longman Group, Essex. 844 s.
- Odler, I. 2003 *Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement*. Julkaisussa Hewlett, P. (toim.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier, Oxford, 1058 s.
- Pakkala, T. 2020. *Assessment of the Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies*. Tampere, Tampereen yliopisto, 240 s.
- Pakkala, T., Köliö, A., Lahdensivu, J., Kiviste, M. 2014. Durability demands related to frost attack for Finnish concrete buildings in changing climate. *Building and Environment*. Vol 82. s. 27–41.
- Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., Huuhka, P., Kivioja, H., Lemberg, A.-M. 2019. Freeze-thaw Damage Dependence on Wind-driven Rain of Outdoor Exposed Concrete – A Case Study. *Nordic Concrete Research*. Vol 61, no. 2. s. 91-106.
- Pakkala, T. A., Lemberg, A.-M., Lahdensivu, J., Pentti, M. 2016. Climate change effect on wind-driven rain on facades. *Nordic Concrete Research*. Vol 54. s. 31–49.
- Pigeon, M., Pleau, R. 1995. *Durability of Concrete in Cold Climates*. Taylor & Francis, Lontoo, 259 s.
- Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J.-P., Karlsson, P., Ruuhela, R. 2012. *Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2012:1*, Helsinki, 96 s.
- Punkki, J., Suominen, V. 1994. Alkalikiviainesreaktio Norjassa – ja Suomessa? *Betoni-lehti* 2/1994. s. 30-32.
- Pyy, H., Holt, E., Ferreira, M. 2012. *Esitutkimus alkalikiviainesreaktiosta ja sen esiintymisestä Suomessa*. VTT:n tutkimusraportti, 27 s.
- Richardson, M. G. 2002. *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*. Spon Press, Lontoo. 260 s.
- Roti. 2017. *Rakennetun omaisuuden tila 2017*. Saatavissa (luettu 8.12.2021): https://www.ril.fi/media/2017/2017-vaikuttaminen/roti-2017/taustat/roti-2017_painettu-raportti.pdf
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Mäkelä, H., Hyvönen, R., Pirinen, P., Lehtonen, I. 2013. *Rakennusfysiikan testivuosien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa ilmastossa, REFI-B-hankkeen tuloksia*. Ilmatieteen laitoksen raportteja 2013:1, Helsinki, 56 s.
- Saha, M., Eckelman, M.J. 2014. Urban scale mapping of concrete degradation from projected climate change. *Urban Climate*. Vol. 9. s. 101–114.
- SFS-EN 14629. 2007. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of chloride content in hardened concrete*. Standardi.
- Somerville, G. 2008. *Management of deteriorating Concrete Structures*. Taylor & Francis, Lontoo. 344 s.
- Sims, I., Poole, A. 2017. *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review*. Taylor & Francis, Lontoo. s. 309–315.
- Tilastokeskus 2020. www.tilastokeskus.fi. Viitattu 5.10.2021
- Tuutti, K. 1982. *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Tukholma. 469 s.

LIITE A: KOHDETIEDOT

Alla olevissa taulukoissa on esitetty aineistossa käytettyjen kohteiden sijainti, rakennus- ja tutkimusvuosi.

Taulukko A1. Aineiston kohteet 1990-luvulta.

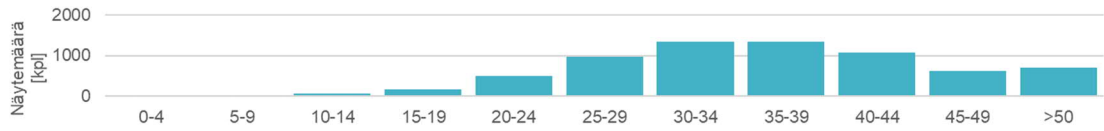
Kohde	Kaupunki	Raken- nus- vuosi	Tutki- mus- vuosi	Kohde	Kaupunki	Raken- nus- vuosi	Tutki- mus- vuosi
1	Espoo	1992	2018	15	Kankaan- pää	1990	2020
2	Espoo	1991	2018	16	Lahti	1991	2009
3	Espoo	1993	2018	17	Tampere	1992	2019
4	Espoo	1993	2018	18	Tampere	1992	2018
5	Espoo	1991	2018	19	Tampere	1996	2016
6	Espoo	1993	2019	20	Tampere	1990	2021
7	Espoo	1994	2019	21	Tampere	1991	2009
8	Espoo	1994	2019	22	Tampere	1996	2009
9	Espoo	1990	2017	23	Tampere	1994	2009
10	Espoo	1996	2017	24	Tampere	1990	2008
11	Espoo	1993	2017	25	Tampere	1990	2008
12	Espoo	1993	2016	26	Tampere	1993	2007
13	Espoo	1992	2016	27	Valkeakoski	1990	2008
14	Helsinki	1990	2021	28	Ylöjärvi	1994	2019

Taulukko A2. Aineiston kohteet 2000-luvulta.

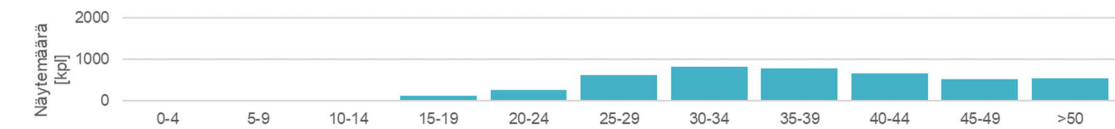
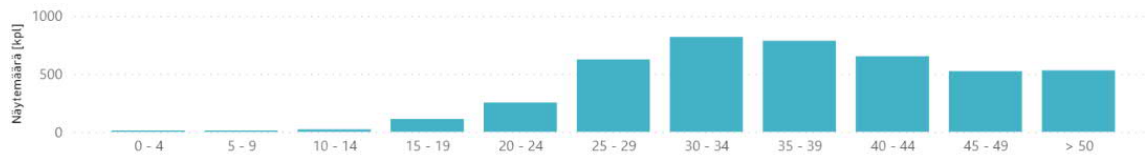
Kohde	Kaupunki	Raken- nus- vuosi	Tutki- mus- vuosi	Kohde	Kaupunki	Raken- nus- vuosi	Tutki- mus- vuosi
29	Tampere	2001	2019	32	Tampere	2001	2009
30	Tampere	2002	2020	33	Tampere	2004	2020
31	Tampere	2001	2021				

LIITE B: PEITEPAKSUUSJAKAUMAT

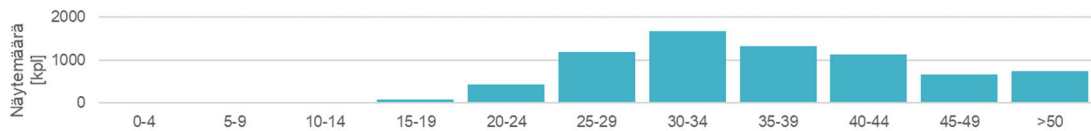
Alla on esitetty parvekeosien peitepaksuusjakaumat eriteltynä kaiteille, pielille ja laatoille.



Kuva B1. Parvekekaiteen peitepaksuusjakauma 1990-luvun rakennuskannassa (n=8 574).



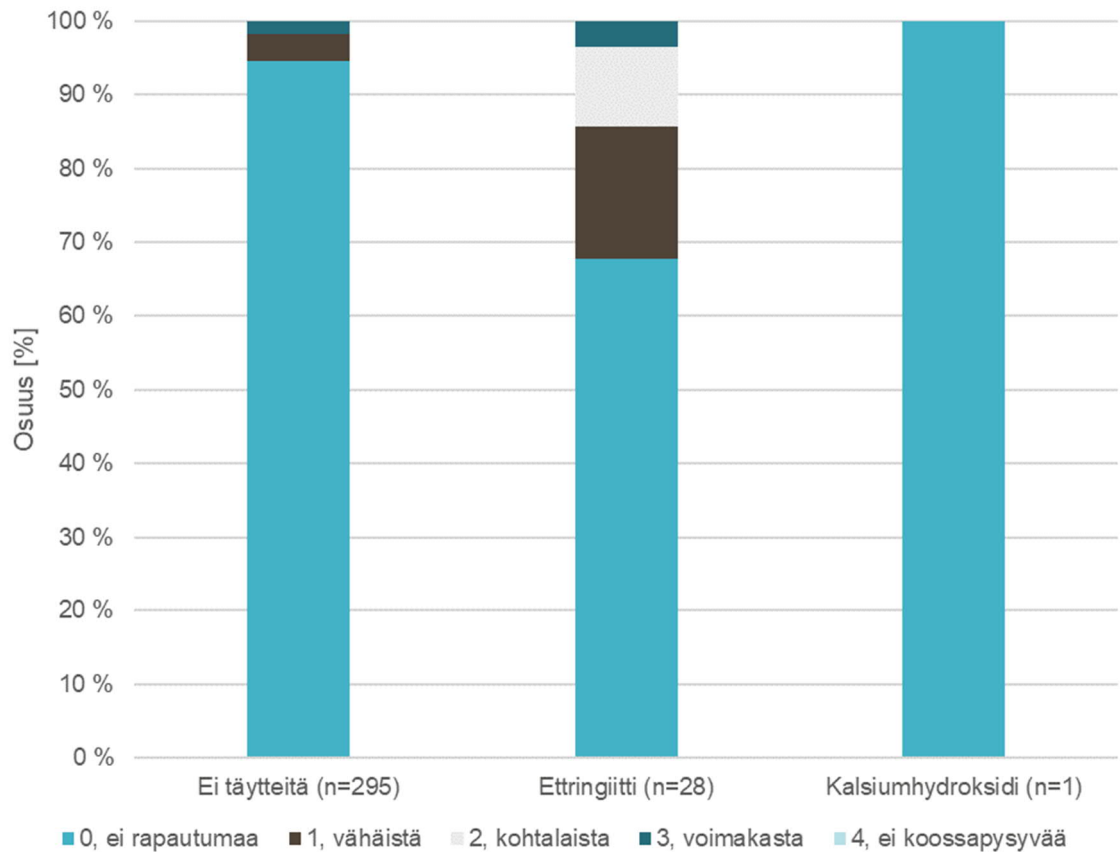
Kuva B2. Parvekepielen peitepaksuusjakauma 1990-luvun rakennuskannassa (n=5 396).



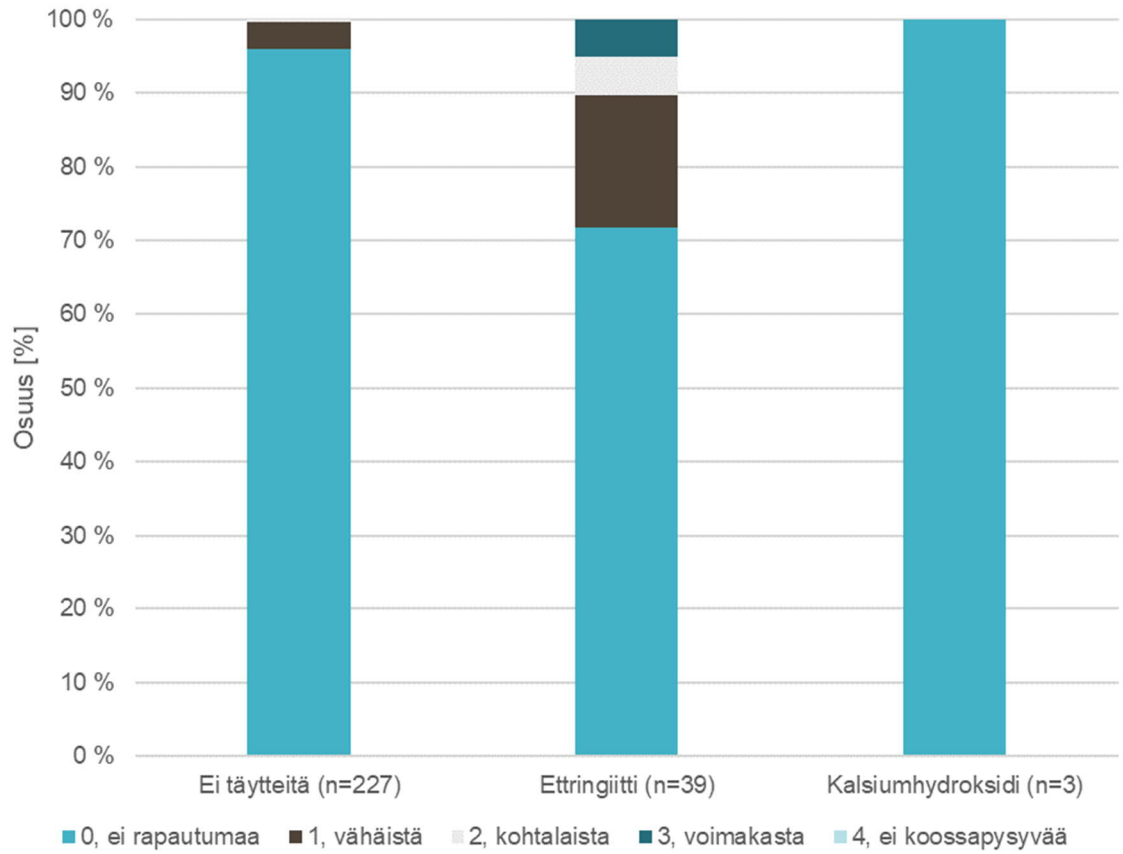
Kuva B3. Parvekelaatan peitepaksuusjakauma 1990-luvun rakennuskannassa (n=9 133).

LIITE C: HUOKOSTÄYTE- PAKKASRAPAUTUMISKUVAAJAT

Alla on esitetty pakkasrapautumisasteet ja havaitut huokostäytteet julkisivuihin ja parvekkeisiin eroteltuina.



Kuva C1. Julkisivunäytteiden pakkasrapautumisaste ja havaittu huokostäyte 1990-luvun rakennuskannassa (n=324).



Kuva C2. Parvekkeiden pakkasrapautumisaste ja havaittu huokostäyte 1990-luvun rakennuskannassa (n=269).