

BETONIJULKISIVUJEN JA PARVEKKEIDEN SÄILYVYYS SUOMALAISISSA SUUNNITTELUOHJEISSA

Jukka Lahdensivu

Kuten monet muutkin merkittävät keksinnöt myös nykyisenkaltainen portlandsementti keksittiin vahingossa. Englantilainen Isaac Johnson teki keksinnön vuonna 1844 liian korkeassa lämpötilassa poltetusta Aspdinsementin pilalle menneestä erästä.¹ Betonirakenteiden säilyvyyteen ei vielä moniin vuosikymmeniin kiinnitetty juurikaan huomiota, vaan betonirakentamisen alkuaikoina kehitystyö keskittyi uusien käyttökohteiden keksimiseen sekä betonin puristuslujuuden parantamiseen.

Säälle alttiissa betonirakenteissa voi erilaisen olosuhde- ja muiden rasitustekijöiden vaikutuksesta tapahtua muutoksia, jotka heikentävät rakenteen ominaisuuksia ja aiheuttavat siten eriasteista korjaustarvetta. Betonijulkisivuissa ja -parvekkeissa esiintyvät tyypilliset korjaustarvetta aiheuttavat tekijät (vaurioitumistavat) voidaan luokitella esim. seuraavasti:

- betonissa olevien terästen korroosio betonin karbonatisoitumisen seurauksena tai klorideista johtuen
- betonin rapautuminen pakkasen vaikutuksesta, ettringiitin muodostuksesta tai alkalikiviainesreaktiosta johtuen
- kiinnitysten, kannatusten ja sidontojen heikkeneminen
- rakenteiden kosteustekniset toimivuuspuutteet
- pintatarvikkeiden vaurioituminen (tiili- ja klinkkerilaatat)
- pintakäsittelyjen vaurioituminen
- betonin halkeilu ja rakenteiden muodonmuutokset
- käytön aiheuttama vaurioituminen
- terveydelle ja ympäristölle haitallisten aineiden esiintyminen.

RAUDOITTEIDEN KORROOSIO

Betonissa olevat raudoitteet ovat yleensä hyvin korroosiolta suojassa, koska betonin korkean alkalisuuden ($\text{pH} > 13$) ansiosta terästen pinnalle muodostuu ns. passiivikalvo, joka estää korroosion. Korroosiosuojaus on virheettömässä rakenteessa hyvin pysyvä, koska passiivikalvo on itseään jatkuvasti korjaava, ja terästä suojaava betonikerros hidastaa tiivistymään ja yhtenäisyydellään erilaisten korroosioita aiheuttavien aineiden (hapot, kloridit, sulfaatit) pääsyä raudoitteiden pinnalle.² Korroosio saattaa kuitenkin käynnistyä, jos suojabetonin tiiviys ja/tai paksuus ovat puutteellisia.

Ilman sisältämän hiilidioksidin reagoi-
dessa betonin alkalisen kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kanssa betonin huokosveden luontaisesti korkea alkalisuus laskee suunnilleen tasolle $\text{pH}=8$. Ilmiötä kutsutaan betonin karbonatisoitumiseksi. Tämä alkaa betonin pinnasta ja etenee rintamana hitaasti syvemmälle. Karbonatisoituminen on suhteellisen hidasta, koska hiilidioksidin tunkeutuminen betonin huokosverkostoon on hidasta, karbonatisoituvaa ainesta ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) on runsaasti ja koska ilman

CO₂-pitoisuus on alhainen, noin 0,04–0,1 tilavuusprosenttia. Betonin tiiviyteen hiili-dioksidin tunkeutumista vastaan vaikuttavat betonin huokoisuus ja kosteuspitoisuus. Betonin huokoisuuteen vaikuttavat pääasiassa betonin vesisementtisuhde ja sementin hydrataatioaste. Vesisementtisuhteen aletessa ja samalla betonin puristuslujuuden yleensä kasvaessa myös huokoisuus vähenee ja tiiviys kasvaa voimakkaasti.³

Betoniterästen korroosio voi käynnistyä vasta, kun terästä korroosiolta suojaava passiivikalvo on tuhoutunut joko kloridien tai betonin karbonatisoitumisen vaikutuksesta.⁴ Korroosio voi edetä huomattavankin pitkään ennen kuin se näkyy suojabetonipeitteen rikkoutumisena. Suurimmalta osalta hapettumisreaktioissa muodostuvat korroosiotuotteet eivät ole vesiliukoisia, joten ne kerääntyvät teräksen pinnalle anodisen alueen läheisyyteen. Tästä aiheutuu betonin sisään painetta, koska korroosiotuotteiden tilavuus on 4–6 kertaa alkuperäistä terästä suurempi.⁵ Näkyviä korroosiovaurioita esiintyy ensimmäisenä alueilla, joissa raudotteiden peitepaksuus on pienin ja kyseiset julkisivut altistuvat saderasitukselle.

BETONIN PAKKASRAPAUTUMINEN

Betonin pakkasrapautuminen aiheutuu betonin huokosverkostossa olevan veden jäätymislaajenemisen aiheuttamasta hydraulisesta paineesta.⁶ Huokosverkostoon pääsee vettä esimerkiksi viistosateen ja sulavan lumen vaikutuksesta. Talvikautena rakenteen kuivuminen on hidasta alhaisesta lämpötilasta, korkeasta ilman suhteellisesta kosteudesta ja vähäisestä auringon säteilystä johtuen. Betonin pakkasenkestävyys edellyttää riittävää määrää riittävän lähellä toisiaan olevia niin sanottuja suojahuokosia, jotka eivät täyty vedellä kapillaarisesti. Tällaisten huokosten aikaansaaminen edellyttää yleensä lisähuokostimien käyttöä betonin valmistuksessa.⁷

Rakenteiden ikääntyessä tapahtuva vaurioituminen johtuu pääosin ilmastoinnosta säärasituksesta, joka saa aikaan materiaalien ominaisuuksien heikkenemistä eli turmeltumista. Turmeltuminen voi olla haitallisen nopeaa, mikäli käytetyt materiaalit tai työnsuoritus ovat olleet heikkolaatuisia tai rakenneratkaisut virheellisiä tai huonosti toimivia. Säärasitus käynnistää useita rinnakkaisia turmeltumisilmiöitä, jolloin julkisivun vaurioituminen tapahtuu yleensä useiden turmeltumisilmiöiden yhteisvaikutuksesta. Turmeltumisilmiöt ovat alkuvaiheessa hitaasti eteneviä, mutta vaurioiden edetessä turmeltumisnopeus yleensä kiihtyy. Betonirakenteen kestävyys säärasituksia vastaan määrytyy suunnittelu- ja toteutusvaiheessa. Rakenteen valmistuttua niitä ei enää ole mahdollista muuttaa. Tästä syystä suunnittelu- ja toteutusohjeilla on aivan keskeinen asema pitkäikäisten rakenteiden aikaansaamisessa.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää betonijulkisivujen ja parvekkeiden säilyvyyteen vaikuttavien asioiden kehittymistä suunnitteluohjeissa sekä ohjeistuksen vaikutuksia käytännön rakentamiseen.

BETONIRAKENTAMISEN KEHITYMINEN SUOMESSA

Ensimmäinen tuontierä sementtiä saapui Suomeen varsin nopeasti sen keksimisen jälkeen vuonna 1856, ja jo 1869 valmistettiin Saviolla kotimaista sementtiä, tosin heikon kysynnän takia vain vuoteen 1894 saakka. Varsinainen laajamittainen suomalainen sementin valmistus ja sen myötä laajamittainen betonirakentaminen mahdollistui vasta, kun Paraisten Kalkkivuori Oy aloitti sementin valmistuksen vuonna 1914 ja sitä seurasi Lohjan Kalkkitehdas Oy:n sementtitehdas vuonna 1919.⁸

Talonrakentamisessa betoni alkoi korvata ensimmäiseksi luonnonkiviä rakennus-

ten perustuksissa 1800-luvun lopulla.⁹ Tämän jälkeen teräsbetonirakenteet alkoivat syrjäyttää asuinrakennusten puuvälipohjia betonirakenteen paremman palonkestävyyden ansiosta.¹⁰ Teräsbetonisia välipohjia tehtiin pystyrungoltaan tiilestä muurattuihin taloihin.

Teräsbetonirakenteita alettiin käyttää erityisesti teollisuuden tuotantorakennuksissa 1890-luvulta lähtien. Teräsbetonirakenteet olivat tuolloin lähinnä pilareita, palkkeja ja välipohjalaattoja ulkoseinien ollessa perinteisesti muurattuja. Teräsbetonista alettiin valmistaa myös erilaisia siiloja ja varastorakennuksia 1910-luvulla. Näissä myös julkisivut olivat betonia, tosin pintakäsittelyinä kalkkimaalilla.¹¹ Betonirakentamisen osaamisen kehittyminen lisäsi myös uskallusta uusiin haasteisiin. 1920–30-luvuilla on tehty varsin merkittäviä ja haastavia rakenteita teräsbetonista, joista mainittakoon eduskuntatalon istuntosalin kupolikonstruktio ja Helsingin olympiastadion torneineen.¹²

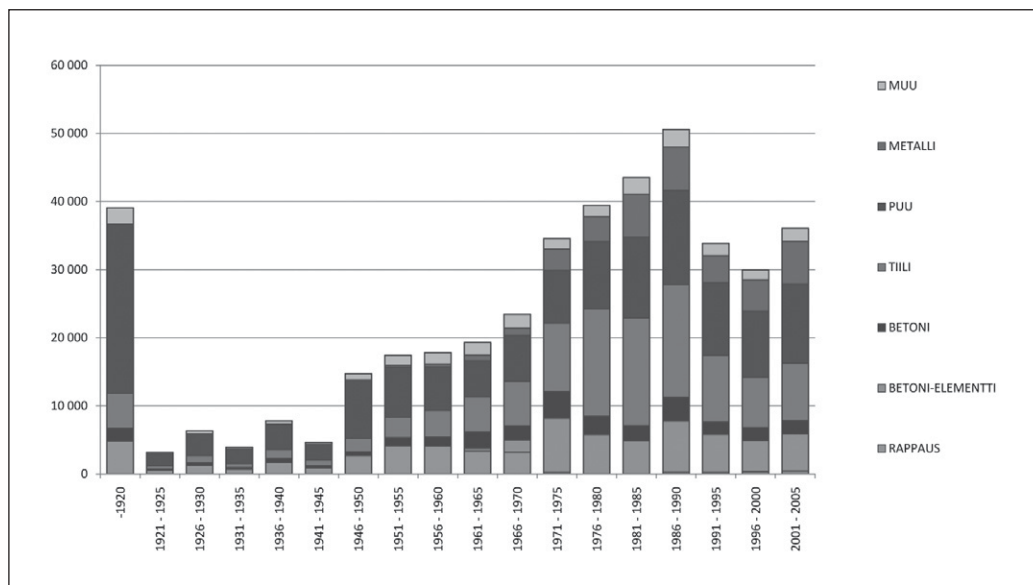
Varhaisimmat teräsbetonirakenteita valmistavat yritykset tulivat Suomeen ulkomailta, lähinnä Saksasta, Venäjältä ja Ruotsista. Ensimmäinen kotimainen rakennusliike aloitti 1907 teräsbetonirakentamisen. 1910-luvulla alalla toimi jo useita suomalaisia yrityksiä. Betonirakentamisen osaaminen siirtyi Suomeen sekä ulkomaalaisten yritysten kautta että betonin mahdollisuuksiin tutustuen etupäässä opintomatkoilla ja ulkomaalaista teknillistä kirjallisuutta opiskelemalla. Ehkä merkittävin alkusysäys suomalaiselle betonirakentamiselle on ollut kuitenkin Helsingin Polyteknillisen opiston ulkomaalaisten opettajien tuoma betonitietous ja henkilökohtaiset kontaktit ulkomaille. Merkittäviä opettajia ovat olleet Endre Lekve (1833–1882), Mikael Strukel (1851–1923) sekä Jalmar Castrén (1873–1946). Ensimmäinen suomalainen teräsbetonirakenteiden ohjeistus sisältyi Turun teollisuuskoulun lehtorin

G. E. Aspin vuonna 1908 julkaistuun *Huonerakenteiden oppiin*, missä käsiteltiin kaikkien muiden rakennusmateriaalien rinnalla myös teräsbetonirakenteita. Näiltä osin Aspin ohjeistus perustuu lähinnä saksalaisiin lähteisiin.¹³ Voidaan siis todeta, että suomalainen betonirakentaminen on alkanut puhtaasti teknologian siirrolla ulkomailta Suomeen.

Sotien jälkeisessä Suomessa oli suuri pula pääomista, asunnoista ja rakennustarvikkeista. Rakennustarvikkeet joutuivat säännöstelyn alle mikä luonnollisesti rajoitti rakentamista, mutta samalla lisäsi erilaisten kokeilujen määrää, kun piti löytää korvaavia ratkaisuja.¹⁴ Talonrakentamisessa rakennustekniikka oli hyvin samankaltaista 1940- ja 50-luvuilla kuin 1930-luvullakin. Asuinkerrostalojen kantavat rakenteet muodostuivat betonipilarirungosta, betoniseinärun- gosta tai muuratusta tiilirungosta.¹⁵ Julkisivut olivat edelleen pääosin muurattuja ja pintakäsittelynä rappaus. Asuinkerrostalojen parvekkeet olivat usein teräskiskoin kannatettuja betonisia ulokeparvekkeita.

RAKENTAMISEN ”HULLUT VUODET”

1960-luvun maaltamuutto aiheutti suuren asuntorakentamistarpeen kaupunkeihin. Vanha rakennustekniikka oli liian hidasta tuottamaan asuntoja kysyntää vastaavasti. Tästä syystä useat rakentajat kehittivät ja kokeilivat omia esivalmistusjärjestelmiään kerrostalorakentamisessa. Betonirakentamiseen tuli suurmuotitekniikoita, joilla saatiin tehtyä kerralla suuria seinä- ja välipohjavaluja. Useita kokeiluja elementti- ja suurmuotitekniikalla oli tehty jo 1950-luvulla, mutta tekniikat alkoivat yleistyä vasta kymmenen vuotta myöhemmin. Suomalaiset urakoitsijat tekivät opintomatkoja Keski-Eurooppaan, Tanskaan ja Ruotsiin tutustumaan nousussa olevaan betonielementtirakentamiseen. Jos betonirakentamisen alkuaikoina ulkomailta kävi yksittäisiä henkilöitä omien



Kuva 1. Suomen rakennuskannan julkisivujen materiaali jakauma rakennusten valmistusajankohdan mukaan. Yhteensä 425 milj.m² vuonna 2005. Lähde: Vainio et al. 2005, liite 3.

kontaktinsa pohjalta, kävi elementtirakentamiseen tutustumassa kymmeniä henkilöitä erilaisissa tapahtumissa. Lontoossa vuonna 1962 pidetystä kansainvälisessä elementtirakentamisen katselmuksesta saatiin runsaasti virikkeitä.¹⁶ Erityisesti ranskalaisen Camus'n kehittämä suurmuotteja käyttävä täselementtijärjestelmä oli tehnyt suuren vaikutuksen.¹⁷ Suomalaiset urakoitsijat kehittivät omia elementtijärjestelmiään näiden ulkomailta saatujen oppien pohjalta. Voidaankin todeta, että elementtirakentamisessa tapahtui merkittävässä määrin teknologian siirtoa ulkomailta Suomeen.

Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö (SBK) suoritti vuosina 1968–1970 asuinkerrostalojen avointa betonielementtijärjestelmää koskeneen selvitystyön, BES- eli betonielementtisysteemitutkimuksen. Tutkimuksen rahoittivat asuntohallitus ja Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestön (SBK) jäsenet.¹⁸ Tutkimuksen tuloksena julkaistiin keväällä 1970 ns. BES-raportti. Ensimmäiset BES-koetalot

valmistuivat Tampereelle ja Espooseen vuonna 1971.¹⁹ SBK teki vuonna 1972 BES-elementtijärjestelmän rakenteita ja liitoksia koskevan suosituksen, joka otettiin laajaan käyttöön. Tarkistukset siihen julkaistiin vuosina 1974 ja 1979.

BES-tutkimuksen tulosten pohjalta kehittyi 1970-luvun alussa avoin elementtijärjestelmä. Avoimen elementtijärjestelmän puitteissa valmistettavista elementeistä voidaan koota rakennus, jossa voi olla useiden eri valmistajien tekemiä yhteensopivia elementtejä. Tähän mennessä kehitys oli tapahtunut yrityskohtaisesti siten, että elementtijärjestelmät olivat periaatteeltaan samanlaisia, mutta erosivat toisistaan yksityiskohdissa. Tavoitteena ei kuitenkaan ollut tyyppitalon suunnittelu, vaan sellaisen tuotantojärjestelmän luominen, jolla olisi mahdollista toteuttaa erilaisia ratkaisuja.²⁰

BES-järjestelmän kehitystyön pohjaksi valittiin ns. kantavat seinät -malli. BES-tutkimuksen tuloksena syntyi mm. ei-kantavien ruutuelementtien tuentatapa, jossa itsensä

kantavat elementit on tuettu suoraan perustuksiin ja ainoastaan sidottu rakennuksen runkoon. Aikaisemmin ei-kantavat elementit olivat usein kerroksittain poikittaisista väliseinistä kannatettuja, mikä mm. rajoitti jännevälit (väliseinien keskinäiset etäisyydet) tietyn mittaisiksi. BES-tutkimus ei rajoittunut koskemaan ainoastaan rakennuksen kantavaa runkoa, vaan siinä syvennyttiin ”teolliseen rakentamiseen kokonaisuutena lähtien asumisesta ja sen asettamista vaatimuksista käyden läpi kaikki suunnitteluun ja rakentamisprosessiin liittyvät osatekijät tutkimukseen käytettävissä olevien resurssien suomin edellytyksin”.²¹

Kehitetty betonielementtijärjestelmä mahdollisti varsin tehokkaan asuntotuotannon. Betonielementtikerrostaloja valmistui erityisesti kaupunkien lähiöihin vuosina 1972–1975 noin 42 000 asuntoa vuosittain.²² Tämä jäi kuitenkin jonkin verran val-

tioneuvoston vuonna 1966 asettamasta tavoitteesta, minkä mukaan asuntoja olisi pitänyt valmistua 50 000 kpl vuosittain.²³ Parhaana vuotena yllettiin 46 000 asuntoon (1974).²⁴ Kuvassa 1 näkyy hyvin rakentamisen määrän kasvu 1970-luvulla sekä aika-kausien muoti-ilmiot julkisivupinnoissa.

Kaikkiaan Suomen kerrostalokannassa on nykyisin noin 57 000 kerrostaloa, joissa on asuntoja noin 1,2 miljoonaa kappaletta. Näistä puolet on rakennettu vuosien 1960–1979 välisenä aikana.²⁵ Vuoteen 2008 mennessä Suomeen on rakennettu noin 44 miljoonaa neliometriä betonijulkisivuja ja 975000 betoniparveketta.²⁶ Betonijulkisivuja ja -parvekkeita on Suomeen rakennettu käytännössä 1960-luvulta lähtien. Sitä ennen tehtyjen julkisivujen ja parvekkeiden määrä on varsin vähäinen. Tyypillinen suomalainen lähiökerrostalo on viisikerroksinen ja siinä on kaksi porrashuonetta, ks. kuva 2.

Kuva 2. Tyypillisiä 1970-luvulla rakennettuja asuinkerrostaloja Tampereen Hervannassa.
Kuva: Jukka Lahdensivu.



RAKENNUSVIENTIÄ

Kuten aiemmin on todettu, betonirakentaminen on alkanut Suomessa teknologian siirtäen ulkomailta. Suomessa betonielementtien tuotanto ja elementtirakentaminen kehittyivät kuitenkin varsin tehokkaaksi sekä kustannusten että rakentamisen nopeuden puolesta. Rakennustuotevientiä oli erityisesti 1970-luvulla Neuvostoliittoon, mikä jatkui pitkälle 1980-luvulle. Painavien betonielementtien vieminen naapurimaita kauemmas ei korkeiden kuljetuskustannusten vuoksi ollut kannattavaa. Ontelolaattatuotannosta tuli betonielementteille ydinosaamista 1970-luvulla ja niiden valmistustekniikan teknologiasta vientituote useisiin maihin.²⁷ Näin osaamisen ja rakentamiskokemusten karttuessa tuontiteknologiasta syntyi vientiteknologiaa.

SÄILYVYYSASIASTUUNNITTELUOHJEISSA

Raudoitteiden korroosio joko betonin karbonatisoitumisesta tai klorideista johtuen yhdessä betonin pakkasrapautumisen seurauksena ovat keskeisiä säärasitukselle alttiiden betonirakenteiden korjaamiseen johtaneita tekijöitä.²⁸ Betoninormeista tulisi siis löytyä näihin vauriomekanismeihin liittyviä ohjeita ja määräyksiä.

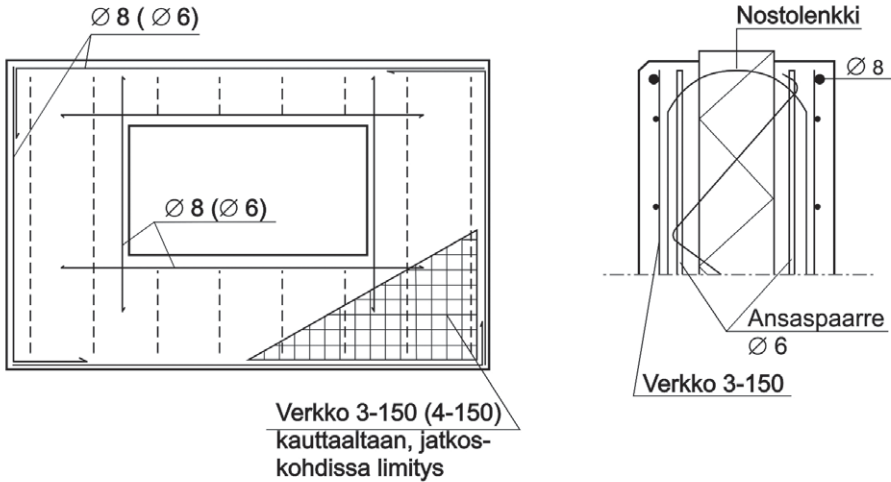
Suomen ensimmäiset betonirakentamisen suunnitteluohjeet julkaistiin vuonna 1913 Helsingin rakennustarkastuskonttorin toimeksiannosta. Ohjeita uusittiin vuonna 1923, mutta niitä pidettiin jo ilmestyessään sisällöltään vanhentuneina. Suomen Betoniyhdistys laati uudet betoni- ja rautabetonirakenteiden määräykset, jotka valtioneuvosto vahvisti vuonna 1929 koko Suomea koskeviksi. Betoninormeja uudistettiin seuraavaksi vuosina 1936 ja 1941. Kaikki em. normit olivat hyvin suurelta osin alkuperältään saksalaisia. Ensimmäisissä betoninor-

meissa määrättiin ensisijaisesti betonin sallitusta puristuslujuudesta sekä minimisementtimäärästä. Vasta vuoden 1941 betoninormeissa edellytetään betonointityön järjestämistä siten, että vesimäärä, ainesosien sekoitussuhde ja muut betonin laatuun vaikuttavat seikat ovat valamisen aikana todettavissa. Vuoden 1946 normeissa sovelletaan betonin kiviaineksen rakeisuuskäyrää ja käytetään vesisementtisuhdetta kuvaamaan betonin lujuusominaisuuksia sekä laatua. Vuoden 1946 normeissa vähimmäisementtimäärä vaihtelee välillä 200–330 kg/m³ betonin laatuluokan mukaan.²⁹

Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden säilyvyyteen vaikuttavat ensimmäiset suunnitteluohjeet ovat vuodelta 1954. Betoninormien kehitys oli voimakasta 1960-luvulla betonirakentamisen merkittävän kehityksen johdosta. Rakennusalan teknisten määräysten ja ohjeiden hoito keskitettiin Sisäasiainministeriölle 1970-luvulla ja vuonna 1976 julkaistu Suomen Rakentamismääräyskoelman viralliseksi rakentamisen ohjeistoksi kumoten kaikki aiemmat käytössä olleet normit.³⁰

Betonin puristuslujuus oli vuoden 1954 betoninormeissa määritelty olevan vähintään K20, mikä tarkoittaa 20 MPa:n puristuslujuutta 200 mm:n särmäisillä betonikuutioilla 28 vuorokauden iässä. Vuonna 1965 betonin lujuusluokka nostettiin vähintään K25:een missä se sitten olikin julkisivujen osalta aina vuoteen 1989 saakka, jolloin se nostettiin lujuusluokkaan K30.³¹ Julkisivubetonin puristuslujuusvaatimusta nostettiin vuonna 1992 uusituissa *Betonirakenteiden säilyvysohjeissa ja käyttöikämitoituksessa* luokkaan K45, mistä tultiin hieman takaisinpäin jo seuraavana vuonna (K40) ja edelleen vuonna 1995 (K35), missä tasossa ollaan edelleen.³² Merkittävä betonin lujuustason nosto tehtiin suurelta osin sementin lisäämisellä sekä sementin hienontamisella. Nämä yhdessä johtivat betonin merkittävään kuivumiskutistumisen lisääntymiseen ja sen

Kuva 3. Tyypillinen betonisandwich-elementin raudoitus ja raudoituksen sijainti ulkokuoressa.
Lähde: Pentti et al. 1998, s. 25.



seurauksena kaareutumisen ja halkeilutaipumuksiin. Palaaminen julkisivubetoneissa lujuusluokkaan K35 vähensi merkittävästi kutistumahalkeilua. Betonin puristuslujuustasolla on epäsuora vaikutus betonin säilyvyyteen, sillä lujuustason nostaminen on yleisesti tarkoittanut sementtimäärän lisäystä, jolloin karbonatisoituvaa ainesta on enemmän ja eteneminen siten hitaampaa. Lujemmat betonilaadut ovat tyypillisesti myös tiiviimpiä, jolloin hiilidioksidin diffuusio sekä veden kapillaarinen tunkeutuminen betonin sisään on hitaampaa kuin alhaisen lujuustason betoneissa. Korkeamman puristuslujuustason betonissa myös vetolujuus on korkeampi, mikä tarkoittaa mm. betonin parempaa jäätymissulamisasituksen kesto.

RAUDOITTEIDEN BETONIPAITEPAKSUUDET

Raudoitteiden suojapeitevaatimus oli vuoden 1954 normeissa 20 mm. Vuoden 1963 normeissa suojabetonipeitevaatimus määrytyi ainoastaan lujuusopillisten sekä muo-

donmuutosten asettamien vaatimusten sekä terästen suojabetonipeitevaatimusten mukaan. Tuolloin katsottiin, ettei sandwich-elementin ulkokuoren tarvitse ei-kantavana rakenteena täyttää rakenteellisen betonin suojabetonipeitevaatimusta. Näin ollen minimibetonipeitepaksuudeksi määräytyi 10 mm. Asia korjaantui vuoden 1965 normeissa harjaterästen osalta 20 millimetriin ja sileiden tankojen osalta 15 millimetriin.³³ Vuoden 1977 betoninormeissa suojabetonipeitevaatimus nostettiin 25 millimetriin kosteissa sisä- ja ulkotiloissa oleville betonirakenteille. Vuonna 1980 betoninormeissa otettiin käyttöön erilaisia rasitustasoja kuvaavat ympäristöluokat. Julkisivut kuuluivat ympäristöluokkaan Y2, missä raudoitteiden betonipeitepaksuuden perusarvo oli 25 mm, mistä voitiin vähentää 10 mm lähinnä työraudoitteiden osalta.³⁴ Vuoden 1989 säilyvyysohjeista lähtien raudoitteiden betonipeitepaksuuden on tullut olla vähintään 25 mm kaikkien raudoitteiden osalta.³⁵ Kuvasa 3 on esitetty julkisivuelementin ulkokuoren tyypillinen raudoitus.

BETONIN PAKKASENKESTÄVYYS

Betonin pakkasenkestävyyteen vaikuttavat ensimmäiset ohjeet on annettu vasta vuoden 1976 Betonin säilyvyysohjeissa. Pakkaseenkestävyys määriteltiin vedellä kapillaarisesti täyttymättömien huokosten suhteena betonin kokonaishuokoisuuteen. Julkisivubetonin ns. suojahuokossuhteen tuli olla vähintään 0,15 ja vaikeissa olosuhteissa 0,20.³⁶ Jo vuonna 1969 betonin lisähuokostusta on käsitelty julkaisussa *RIL 70 Betonin lisäaineiden käyttö*, mutta mitään ohjeistusta tai vaatimusta betonin pakkasenkestävyyden parantamiseksi ei siinä esitetä.³⁷ Vuoden 1980 betoninormeissa julkisivubetoneille tuli aina asettaa pakkasenkestävyysvaatimus, mikä käytännössä tarkoitti vuonna 1976 annetun suosituksen muuttumista määräykseksi. Vuoden 1989 säilyvyysohjeista lähtien betonin pakkasenkestävyyden osoittama suojahuokosvaatimus on ollut 0,20 aina vuoteen 2004 saakka.³⁸ Tällöin suojahuokosuhdevaatimuksesta luovuttiin ja tilalle tuli huokosjakovaatimukset. Huokosjako tarkoittaa betonin suojahuokosten keskimääräisen etäisyyden puolikasta ja määritetään betonin mikrorakennetarkastelussa mikroskoopilla. Myös rasisluokat muutuivat tässä yhteydessä eurooppalaisten standardien mukaisiksi. Julkisivubetoneiden huokosjaon tuli tästä eteenpäin olla $\leq 0,27$ mm (XF 1, 50 vuotta) tai $\leq 0,25$ (XF 1, 100 vuotta). Suojahuokosten välisen etäisyyden tulee kirjallisuuden mukaan olla $< 500 \mu\text{m}$, jotta huokosia on betonissa pakkasenkestävyyden kannalta riittävästi.³⁹ Betonissa olevien suojahuokosten määrä ei itsessään kerro suojahuokosten koosta eikä niiden välisestä etäisyydestä. Tästä syystä suojahuokossuhteen mittaamisesta liian epätarkkana menetelmänä siirryttiin huokosjaon mittaamiseen. Suojahuokossuhde 0,20 vastaa tyypillisesti huokosjakoa 0,25 mm.⁴⁰

LAADUNVARMISTUS

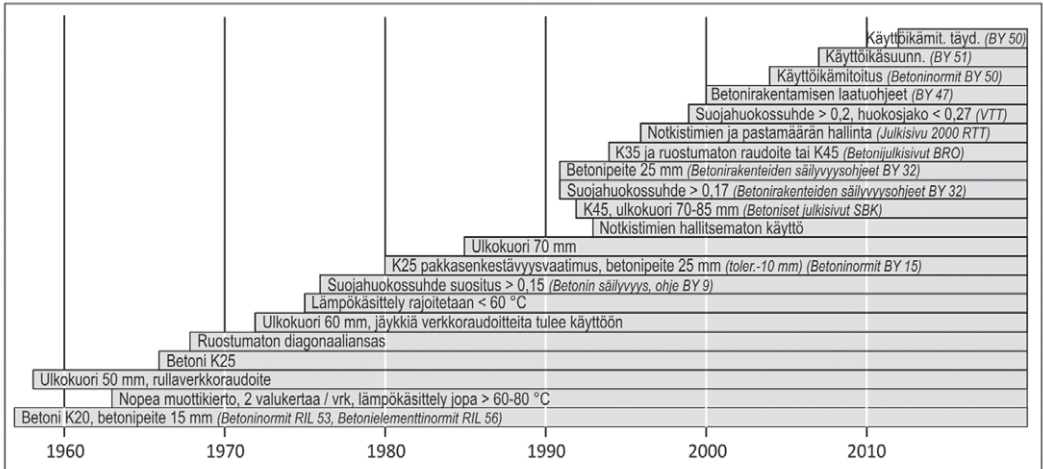
Betonin laadunvarmistukseen oli betoninormeissa kiinnitetty huomiota vuodesta 1941 lähtien erilaisten tuoreen ja kovettuneen betonin koestuksilla.⁴¹ Näitä laadunvarmistusmenetelmiä on vuosien varrella lisätty ja tarkennettu teknologian kehityksessä. Merkittävimmin laadunvarmistukseen puututtiin vuoden 1965 betoninormeissa, missä esitettiin vaatimuksia betonitöiden työnjohtolle sekä betonin kelpoisuuden toteutamiselle.⁴² Vuonna 1965 julkaistiin myös erilliset betonielementtinormit, joissa annettiin ohjeita betonin jälkihoitoon liittyen ennen muotista nostamista sekä muotistanostolujuusvaatimukset. Samoin annettiin ohjeet betonielementtien kuljettamiseen ja asentamiseen kylmällä säällä.⁴³

Betonissa olevien lisäaineiden käyttöä on rajoitettu monin eri tavoin. Alkuaikoina lisäaineiden käytöstä tuli ilmoittaa rakennustarkastajalle. Tämä oli ainoa betoninormien ohje vuoteen 1965, jolloin betonissa olevien kloridien määrä rajoitettiin 2 %:iin sementin painosta.⁴⁴ Betonissa olevilla klorideilla on haitallinen vaikutus betoniterästen säilyvyyteen. Seuraavan kerran kloridien määrää alennettiin 1,0 %:iin vuoden 1980 normeissa ja edelleen 1989 0,4 %:iin.⁴⁵ Vuonna 1992 sallittu kloridipitoisuus puolitettiin arvoon 0,2 %, millä tasolla se on edelleenkin.⁴⁶

BETONITEOLLISUUDEN OMIA OHJEITA

Normien lisäksi betonteollisuus on laatinut omia suunnittelu- ja valmistusohjeita, joissa käsitellään betonijulkisivujen ja -parvekkeiden säilyvyyteen liittyviä asioita. Keskeisiä betonielementtien tekniseen laatuun ja säilyvyyteen liittyviä asioita on esitetty kuvassa 4.

Julkisivuelementtien ulkokuoren kuten ei myöskään parvekekaiteiden rakennepaksumutta ole määrätty betoninormeissa. Näistä on kuitenkin ollut alan omat ohjeet ja suo-



Kuva 4. Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden tekniseen laatuun ja säilyvyyteen liittyvien keskeisten tekijöiden kehitystä. Lähde: Hytönen et Seppänen 2009, s. 185.

situkset. Kuten kuvasta 4 voidaan todeta, ulkokuoren paksuus on 1960-luvulla ollut varsin pieni, vain 50 mm.⁴⁷ Myös parvekkeitaiteet olivat varsin ohuita samoihin aikoihin, minimipaksuus on ollut 70 mm.⁴⁸ Näin ohuisiin rakenteisiin on ollut käytännössä mahdotonta saada raudoiteille riittäviä betonipeitepaksuuksia.

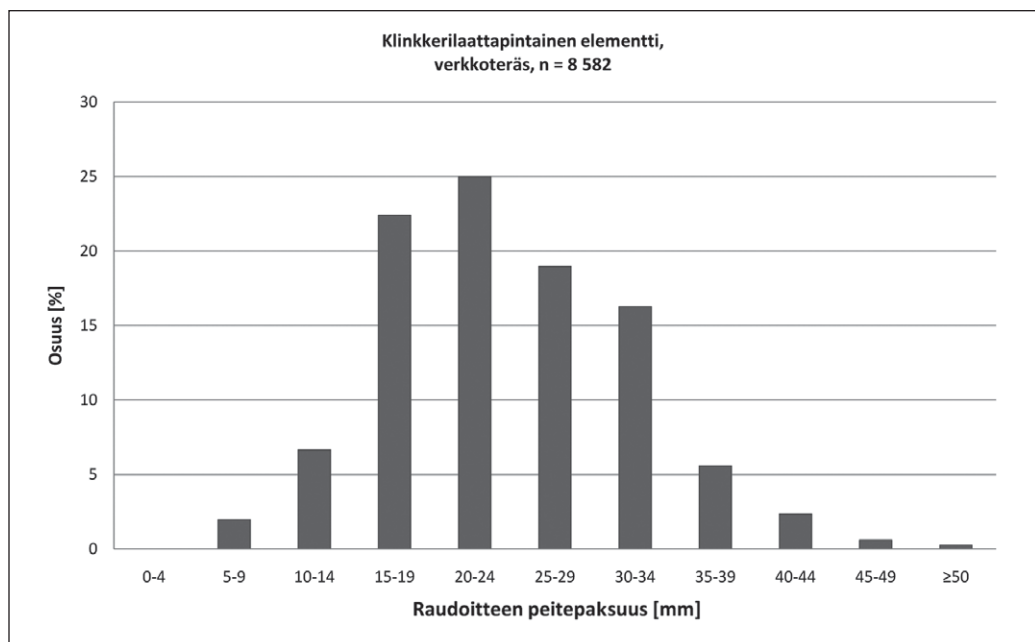
Julkisivuelementtien ulkokuoren kiinnikkeinä vakiintui ansasraudoitus 1960-luvun loppupuolella. Tätä ennen käytössä oli monenlaisia rakennesuunnittelijoiden terästyksiä, joiden korroosiosuojaus oli toteutettu sementtiin kastamalla, bitumoimalla tai valamalla niihin betonia ympärille.⁴⁹ Vuoden 1965 betonielementtinormeissa oli annettu määräys tehdä syöpymisvaaralle alttiit kiinnikkeet korroosion kestävästä aineesta.⁵⁰

Betoninormeissa ei oteta kantaa betonirakenteiden käyttöikään ennen vuoden 2004 betoninormeja, missä tavoitekäyttöiän perusarvoksi asetetaan julkisivuilla 50 vuotta ja runkorakenteilla 100 vuotta.⁵¹ Tähän perustuen aina silloin tällöin julkisuudessa esiintyvälle väitteelle lähiökerrostalojen 30 vuoden suunnitellusta käyttöiästä ei

normeista ja teknisistä suunnitteluohjeista löydy evidenssiä. Pikemminkin tilanne on päinvastainen: betonirakenteiden säilyvyyteen on kiinnitetty kokoajan aina enemmän ja enemmän huomiota, tosin merkittävässä määrin vasta 1980-luvulta lähtien. Oletettavasti tuo suhteellisen lyhyt lähiökerrostalojen käyttöikäolettaisuus juontaa juurensa BES-tutkimuksesta, missä elementtjärjestelmän kehittämisen tavoitteeksi asetettiin siirtojoustavuus. Rakennuksen tulisi olla purettavissa ja pystytettävissä kokonaisuudessaan uudelleen kehittyvien kaupunkien ennalta arvaamattomat uudet tilanteet esim. liikenne- tai saneerausjärjestelyiden vuoksi.⁵² Näin ollen järjestelmän kehityksessä ei oletettu syntyvän ongelmia betonirakenteiden säilyvyyden suhteen, eihän vaurioituneita rakennuksia olisi voinut siirtää.

TOTEUTUKSESSA VAKAVIA PUUTTEITA

Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden toteutuneita säilyvyysominaisuuksia on tutkittu Tampereen teknillisen yliopiston *Betonijulki-*



Kuva 5. Klinkkerilaattapintaisten elementtien verkkoraudoitteiden peitepaksuusjakauma, n = 8582. Lähde: Lahdensivu 2012, liite 3.

sivujen korjausstrategiat -tutkimuksessa, missä kerättiin yhteensä 947:n vuosina 1960–1996 valmistuneen betonielementtikerrostalon kuntotutkimusdata taulukkolaskentaohjelmaan. Seuraavassa esitetyt havainnot perustuvat kirjoittajan väitöskirjaan.

Betonisandwich-elementtien ulkokuoresta irrotettujen betoninäytteiden pituudet eli betoniulkokuoren paksuus vaihteli välillä 26–175 mm (n= 3868 näytettä). Keskimääräinen ulkokuoren paksuus oli 55–70 mm julkisivun pintatyyppistä riippuen. Parvekekaiteissa vaihteluväli oli 45–148 mm (n= 696 näytettä) keskiarvon ollessa 87 mm.⁵³ Ohuimmissa julkisivuissa ja alle 80 mm:n paksuisissa parvekekaiteissa ei ole ollut mahdollista saavuttaa suunnitteluohjeissa vaadittuja betonipeitepaksuuksia. Parvekielet ja laatat olivat paksuudeltaan 120–329 mm, joten niissä pitäisi olla hyvät mahdollisuudet saavuttaa vaaditut raudoitteiden peitepaksuudet.⁵⁴

Raudoitteiden betonipeitepaksuusmitaustuloksia oli julkisivuista yhteensä 249 693 kpl ja parvekkeista 133 514 kpl. Pienten, alle 5 mm:n betonipeitepaksuuksien osuus on yleisesti varsin pieni kaikissa elementtityypeissä ja elementtien pintatyypeissä, luokkaa 0,5–1,0 %, lukuun ottamatta parvekekaiteita, joissa alle 5 mm:n betonipeitepaksuuksien osuus on ulkopinnassa 1,45 % ja sisäpinnassa 2,63 %. Lähtökohtaisesti alle 15 mm:n betonipeitepaksuuksia ei pitäisi esiintyä ollenkaan, mutta tyyppillisesti niiden osuus on julkisivuissa luokkaa 3–18 %. Betonipeitepaksuudet ovat yleisesti pienimpiä klinkkerilaattapintaissa julkisivuissa ja parvekekaiteissa. Suurimmat betonipeitepaksuudet ovat harjatussa maalatussa julkisivuelementissä.⁵⁵ Raudoitteiden betonipeitepaksuudet ovat selvästi suurempia vasta 1990-luvulla valmistuneissa elementeissä kuin aiemmin valmistetuissa, mutta näissäkin normien vaatimustaso alittuu kes-

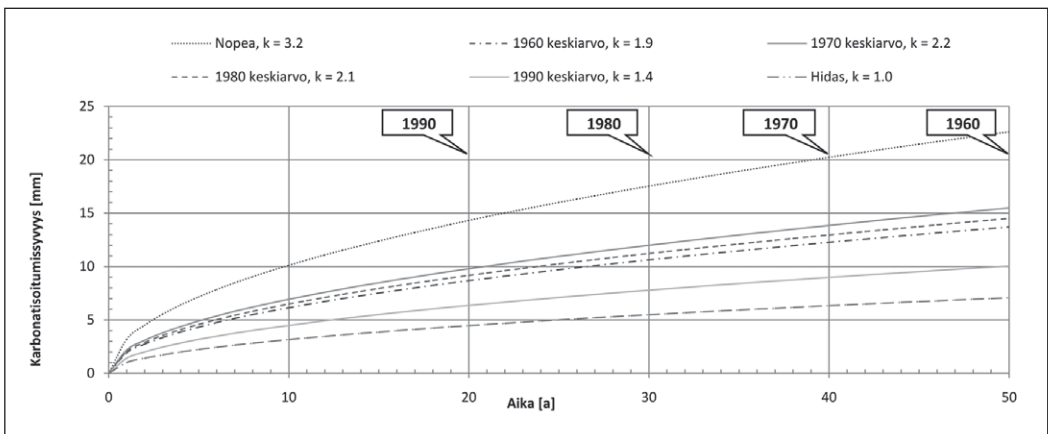
kimäärin 5 %:ssa. Klinkkerilaattapintaiset elementit on valmistettu ulkopinta alaspäin, joten puutteellisten välikkeiden johdosta raudoitteet ovat valun aikana painuneet alaspäin ja siten jääneet liian lähelle ulkopintaa. Vastaavasti ulkopinta ylöspäin valetuissa elementeissä raudoitteet ovat painuneet syvemmälle rakenteeseen, mikä näkyy mm. kaide-elementtien sisäpintojen pieninä betonipeitepaksuuksina. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen raudoitteiden betonipeitepaksuuksien jakauma. Suuri hajonta betonipeitepaksuuksissa kertoo laadunvalvonnan puutteesta elementtien valmistuksessa.

Karbonatisoituminen on saavuttanut jo laajasti 1960- ja 70-lukujen betonijulkisivujen raudoitteita. Esimerkiksi 1970 rakennetun betonijulkisivun keskimääräinen karbonatisoitumissyvyys on tällä hetkellä 16 mm. Betonin karbonatisoitumissyvyyksien lisäksi myös raudoitteiden peitepaksuuksissa on suurta vaihtelua julkisivun pintatyyppin mukaan.⁵⁶ Korjaustavan valinnan kannalta oleellisinta on pienten peitepaksuuksien osuus. Alle 10 mm:n peitepaksuuksia on tyypillisesti 5–10 % kaikista julkisivun raudoitteista. Raudoitteiden korroosio on siis mahdollista hyvin suuressa osassa suomalaisista betonijulkisivuista.

Betonin keskimääräinen karbonatisoitumisnopeus vaihtelee eri vuosikymmenten julkisivuja ja parvekerakenteita tarkasteltaessa, ks. kuva 6. Karbonatisoitumisnopeus hidastuu 1970-luvun julkisivuista 1990-luvulle tultaessa. Tähän ovat syynä mm. tuoreen betonin alhaisempi vesisementtisuhde uudemmissa betonielementeissä sekä betonin lujuuden kasvu, jonka seurauksena myös sementin määrä betonissa on kasvanut. Sen sijaan 1960-luvun betonirakenteissa karbonatisoitumisnopeus on samaa luokkaa kuin 1990-luvun betonijulkisivuissa. Vielä 1960-luvulla sementti jauhettiin huomattavasti nykyistä karkeammaksi ja sitä käytettiin enemmän, joten betoniin jäi hydratoitumatonta sementtiä, joka myöhemmässä vaiheessa hidastaa karbonatisoitumisen etenemistä.⁵⁷ Betonin vesisementtisuhde on eräs keskeisimmistä betonin huokoisuuteen ja siten mm. karbonatisoitumiseen vaikuttavista tekijöistä. Vesisementtisuhteen suuruudesta ei kuitenkaan ole betoninormeissa annettu määräyksiä.

Suojahuokossuhdemäärityksiä on tehty julkisivunäytteille yhteensä 2365 kpl ja parvekenäytteille 1943 kpl. Betonin normien mukaisesti pakkasenkestävän betonin kriteerinä on pidetty suojahuokossuhdetta

Kuva 6. Betoniparvekkeiden keskimääräinen karbonatisoitumisnopeus ja syvyys eri vuosikymmenillä. Lähde: Lahdensivu 2012, s. 75.



$p_r \geq 0,20$ ja vastaavasti täysin epäonnistuneen huokostuksen kriteerinä $p_r < 0,10$. Betonin pakkasenkestävyys poikkeaa eri julkisivun pintatyypeillä toisistaan huomattavasti. Huonoin pakkasenkestävyys todettiin olevan pesubetoni-, klinkkerilaatta- ja maalamattomalla muottipintaisella julkisivulla. Näissä julkisivun pintatyypeissä noin 50 %:ssa suojahuokossuhde p_r on alle 0,10, eli niissä ei ole rakenteen pakkasenkestävyyden kannalta toimivaa suojahuokostusta ollenkaan. Parhaiten betonin suojahuokostus on onnistunut maalipintaisessa harjatussa betonissa sekä tiililaattapintaisessa ja valkobetoni-julkisivuissa. Näissä betoninormien ulkobetonirakenteiden suojahuokosvaatimuksen $p_r \geq 0,20$ ylittää 32 %, 41 % ja 54 % näytteistä vastaavassa järjestyksessä, ks. kuva 7. Tarkasteltaessa suojahuokostuksen onnistumista ohuthieanalyysillä huokosjaon suhteen pakkasenkestävyydekriteerin täyttää suunnilleen samanlainen osuus näytteistä. Tällä perusteella käytetyllä pakkasenkestävyyden tarkastelumenetelmällä ei vaikuttaisi olevan vaikutusta lopputulokseen.⁵⁸

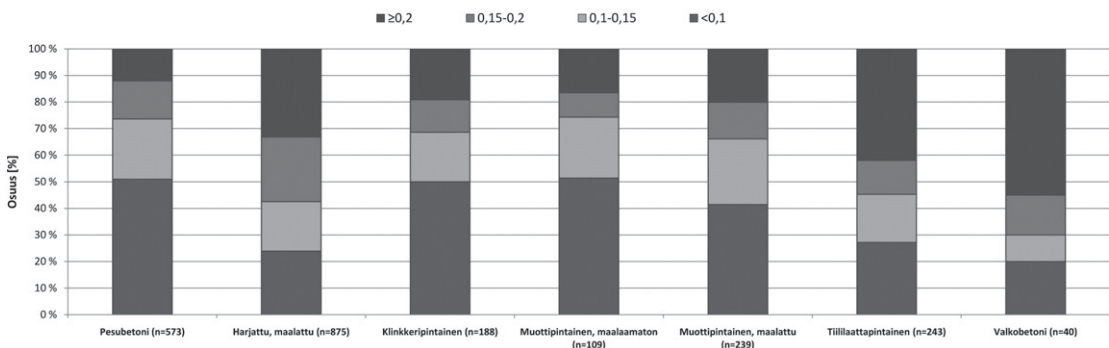
Käytännössä betonirakenteissa lisähuokostuksen käyttöönotto voidaan havaita alkavan hitaasti vuodesta 1976 lähtien. Vasta vuoden 1981 jälkeen betonin lisähuokostus

alkaa vakiintua elementtituotannossa, ks. kuva 8.⁵⁹ Toki tämän jälkeenkin pakkasenkestävyysvaatimuksen alituksia esiintyy melko paljon, mutta julkisivuissa käytetyn betonin lujuusluokan kasvattaminen on osaltaan parantanut betonin pakkasenkestävyyttä.

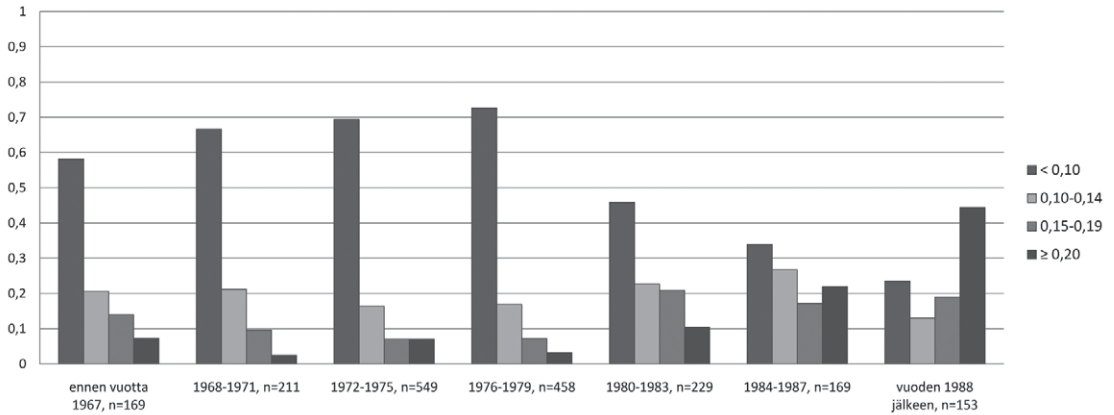
Raudoitteiden korroosion kannalta kriittisenä kloridipitoisuutena suomalaisissa ohjeissa pidetään 0,03–0,07 painoprosenttia klorideja betonin painosta.⁶⁰ Tässä kriittisenä alarajana on pidetty 0,03 painoprosenttia. Betonin kloridipitoisuus on määritetty 496 julkisivunäytteestä ja 580 parvekenäytteestä. Julkisivuista kriittisen kloridipitoisuuden ylitti seitsemän näytettä ja parvekkeista 22. Korkeimmillaan kloridipitoisuus oli 0,11 painoprosenttia. Kloridien käyttöä betonin kiihdyttimenä on pidetty yleisenä elementtirakentamisen alkuaikoina, kun elementtejä valmistettiin työmaavalimoissa. Yllättäen kohteista viisi oli valmistunut niinkin myöhään kuin 1979, 1981, 1983, 1987 ja 1988.⁶¹ Kaiken kaikkiaan korkeiden kloridipitoisuuksien esiintyminen suomalaisissa julkisivubetoneissa ja parvekkeissa on hyvin harvinaista.

Sandwich-elementin ulkokuoren kiinnitystapaa on tarkasteltu kuntotutkimuksen yhteydessä yhteensä 414 rakennuksesta. Näissä ulkokuoren kiinnitys on toteutettu

Kuva 7. Eri julkisivun pintatyyppien toteutunut suojahuokosjakauma. Lähde: Lahdensivu 2012, s. 83.



Kuva 8. Betoniparvekkeiden toteutunut suojuhuokosjakauma neljän vuoden periodeissa.
Lähde: Lahdensivu 2012, s. 86.



pääasiassa teräsansain, joissa diagonaaleina on käytetty ruostumatonta terästä. Kaikkiaan kahdeksassa rakennuksessa lämmöneristeen läpäisevät teräsosat olivat tavanomaista ruostuvaa raudoitusta, jota ei ollut mitenkään korroosiosuojattu. Viidessä rakennuksessa ulkokuoren kiinnitykseen oli käytetty ruostumatonta rakenneterästä ja kaikkiaan seitsemässä rakennuksessa oli käytetty erilaisia korroosionsuojaustapoja teräsosien suojaamisessa. Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta voidaan todeta, että 1970-luvulta lähtien julkisivuelementtien ulkokuorten kiinnityksessä on käytetty ruostumattomia ansaita.⁶²

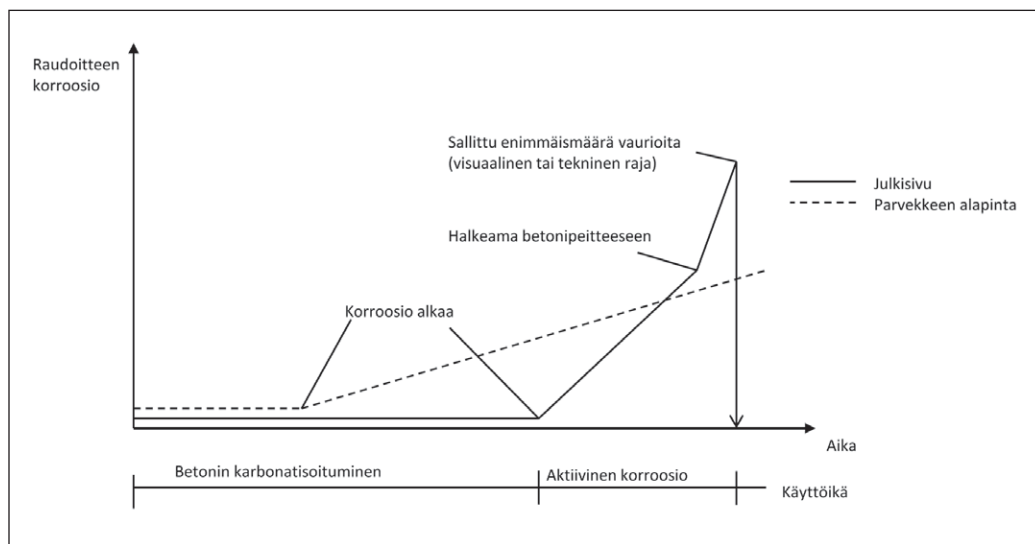
Elementtirakentamisen alkuvuosina 1960-luvun puolivälistä 1970-luvun puoliväliin valun jälkeen elementeille tehtiin 80 °C:n tai jopa sen ylittävä lämpökäsittely tarkoituksena betonin sitoutumisen nopeuttaminen ja siten nopeampi muottikierto.⁶³ Tuoreen betonin voimakkaan lämpökäsittelyn seurauksena syntyy betonin hydrataation tuloksena voimakkaasti ettringiittiä, jonka tilavuus on 100–140% suurempi lähtöaineesiin verrattuna.⁶⁴ Betoninäytteiden mikro-rakennetutkimuksissa havaittiin ettringiitin

muodostumista betonin huokosverkostoon sekä selkeä yhteys ettringiitin ja betonin pakkasrapautumisen välillä. Ettringiittireaktio itsessään ei kuitenkaan ollut aiheuttanut betoniin sisäistä säröilyä, ainoastaan pienentänyt betonin huokostilavuutta ja siten lisännyt pakkasrapautumisen riskiä.⁶⁵

SÄILYVYSSUUNNITTELU TULEE OSAKSI RAKENNESUUNNITTELUA

Betonirakenteiden laskennallisen käyttöikämitoituksen periaatteet julkaistiin vuonna 1989 Betonirakenteiden säilyvyysohjeiden osana. Tarkastelu perustui vauriotodennäköisyyteen erilaisissa silloin käytössä olleissa ympäristöluokissa ja näissä käytettävillä betonin lujuusluokilla.⁶⁶ Koska käyttöikämitoitusta ei rakennuttajien toimesta talonrakentamisessa vaadittu, sen käyttö ei suunnittelijakunnan käytössä levinnyt.

Vuoden 2004 betoninormeissa esitettiin kaksi menetelmää betonirakenteiden säilyvyysuunnitteluun: taulukkomitoitus sekä laskennallinen mitoitus.⁶⁷ Nämä perustuvat yhteiseurooppalaisen standardiin käyttöiän



Kuva 9. Betonirakenteen vaurioitumisen etenemismalli raudoitteiden korroosion suhteen.

laskemiseksi. Lähtökohdانا on, että käyttöiän jakauma noudattaa log-normaalista muotoa ja suunnittelukäyttöikä oletetaan saavutettavan 95 %:n todennäköisyydellä.⁶⁸

Yleisesti nykyisissä käyttöikämallissa rakenteen vaurioituminen jaetaan kahteen osaan: vaurioitumisen kehittymiseen kuuluva aika ja aktiivisen vaurioitumisen aika näkyvään vaurioon saakka.⁶⁹ Raudoitteiden korroosion tapauksessa betonin karbonatisoitumiseen kuuluva aika on vaurioitumisen kehittymiseen kuuluva aika, ja raudoitteen ruostuminen siten, että betonipintaan syntyy näkyvä vaurio, on aktiivisen vaurioitumisen aika, ks. kuva 9.

Raudoitteiden korroosion tapauksessa aktiivisen korroosion aika on suuresti riippuvainen betonin kosteuspitoisuudesta, eli julkisivujen ja parvekkeiden tapauksessa yksinkertaistaen vesisateen määrästä. Tällöin sateelta suojatussa parvekkeen alapinnassa karbonatisoituminen tapahtuu melko nopeasti mutta aktiivinen korroosioaika on tyypillisesti hyvin pitkä, koska alapinta pysyy

kuivana. Julkisivuissa tilanne on päinvastainen.

Käyttöikälaskennassa oletetaan, että raudoitettun betonirakenteen käyttöikä päättyy sillä hetkellä kun karbonatisoituminen saavuttaa raudoitteen ensimmäisessä pisteessä. Eli toisin sanoen rakenteen käyttöikä päättyy silloin kun sen vaurioituminen voi alkaa. Käytännössä julkisivujen ja parvekkeiden korjaustoimiin ryhdytään vasta kun näkyvistä vaurioista on jo muodostunut selvä ulkonäköhaitta.

YHTEENVETO

Betonirakentaminen alkoi Suomessa varsin nopeasti sementin ja betonirakenteiden valmistamisen alettua Keski-Euroopassa jälkeen. Teknologian siirtoon kului vain 12 vuotta. Talonrakentamisessa keskityttiin aluksi perustusten ja kantavien rakenteiden tekemiseen rautabetonirakenteilla. Kaupungistumisen myötä kaupunkeihin syntyi suuri

asuntotarve, johon käsityövaltaisella paikallarakentamisella ei ollut mahdollista vastata.

Nopea elementtirakentamisen malli haettiin suomalaisten rakentajien opintomatkoilla Keski-Euroopasta ja sovellettiin nopeasti tšekäläiseen asuntotuotantoon. Tämä edellytti huomattavia investointeja elementtitehtaisiin sekä nosto- ja ajoneuvokalustoon, jolla suuret tehtaalla valmistetut elementit saatiin kuljetettua työmaille ja nostettua paikoilleen.

Betonirakentamisen suunnitteluohjeita on julkaistu vuodesta 1915 lähtien. Alkuvuosikymmenien kehitystyössä keskityttiin betonin puristuslujuuden kasvattamiseen ja kiviaineksen suhteutuksen kautta tasalaatuiseen lopputulokseen eri sekoituserien välillä. Varsinaisesti betonirakenteiden säilyvyyteen alettiin suunnitteluohjeissa kiinnittää huomiota vasta 1970-luvulla, kun lämpökäsittelyn lämpötiloihin asetettiin rajoituksia. Varsinaisesti betonin pakkaskestävyyteen kiinnitettiin huomiota vasta 1976 betonin lisähuokostusohjeistuksen myötä sekä vaatimalla betoniteräksille suurempia (≥ 20 mm) suojabetonipeitteitä. Toki betonin puristuslujuuden kasvattaminen on myös lisännyt välillisesti betonirakenteen säilyvyyttä, sillä lujemmat betonit ovat yleensä tiiviimpiä ja kestävät paremmin ulkoilman aiheuttamia rasituksia.

Betoninormit sekä muu suunnitteluohjeistus on vaikuttanut betonijulkisivujen ja -parvekkeiden säilyvyysominaisuuksiin varsin pitkällä viiveellä. Käytännössä vasta 1990-luvun betonielementtituotanto alkaa laajassa mittakaavassa olla säilyvyysominaisuuksiltaan sellaista kuin normeissa on vaadittu jo toista kymmentä vuotta aiemmin.

Betoninormeilla on kaiken aikaa pyritty parantamaan betonirakentamisen laatua. Rakenteiden käyttöikään ei niissä oteta kantaa ennen vuoden 2004 betoninormeja, missä tavoitekäyttöään perusarvoksi asetetaan julkisivuilla 50 vuotta ja runkorakenteilla 100 vuotta. Tähän sekä betonielementti-

ollisuuden suuriin investointeihin 1970-luvulla perustuen julkisuudessa aina silloin tällöin esiin tulevalle väitteelle lähiökerrostalojen 30 vuoden suunnitellusta käyttöiästä ei normeista ja teknisistä suunnitteluohjeista löydy evidenssiä.

Tekniikan tohtori Jukka Lahdensivu toimii korjausrakentamisen asiantuntijana ja Rakenteiden elinkaaritekniikan tutkimusryhmän vetäjänä Tampereen teknillisessä yliopistossa.

¹ Penttala 1991, 9.

² Page 1988; Parrott 1987.

³ Bakker 1988; Parrot 1987; Tuutti 1982.

⁴ Bakker 1988; Gjørsv 2009.

⁵ Tuutti 1982.

⁶ Pigeon et Pleau 1995, 11–23.

⁷ Pigeon et Pleau 1995, 159–185.

⁸ Penttala 1991, 9; Putkonen 1991, 31–32.

⁹ Putkonen 1991, 34–35.

¹⁰ Lahti 1960, 107–114; Putkonen 1991, 33–34.

¹¹ Putkonen 1991, 38–59.

¹² Putkonen 1991, 59–60 ja 70–72.

¹³ Asp 1908, 102–156; Putkonen 1991, 36–37.

¹⁴ Hurme 1991, 77–79.

¹⁵ Mäkiö et al. 1994, 64–65.

¹⁶ Hankonen 1994, 217–218.

¹⁷ Hankonen 1994, 141–142.

¹⁸ Seppänen 2009, 223.

¹⁹ Mäkiö et al. 1994, 38–39.

²⁰ Mäkiö et al. 1994, 41–42.

²¹ BES-raportti 1970.

²² Tilastokeskus 2013.

²³ Seppänen 2009, 223.

²⁴ Tilastokeskus 2013.

²⁵ Tilastokeskus 2013.

²⁶ Vainio et al. 2005, 10–11.

²⁷ Seppänen 2009, 243–268.

²⁸ Pentti et al. 1998, 45.

²⁹ Penttala 1991, 20–23.

³⁰ Pentti et al. 1998, 8.

³¹ Pentti et al. 1998, 9–10; Betoninormit 1965; BY 32 1989, 5.

³² BY 32 1992, 6; Betoninormit 1993; Valmisosarakentaminen 1995.

³³ Pentti et al. 1998, 9; Betoninormit 1965.

- ³⁴ Pentti et al. 1998, 12; Betoninormit 1977.
- ³⁵ BY32 1989; BY32 1992; Betoninormit 1993; Betoninormit 2004; Betoninormit 2012.
- ³⁶ Pentti et al. 1998, 11; Betoninormit 1977.
- ³⁷ RIL 70 1969.
- ³⁸ Pentti et al. 1998, 12; Betoninormit 1980; BY 32 1989; BY 32 1992; Betoninormit 1993.
- ³⁹ Pigeon et Pleau 1995, 51.
- ⁴⁰ Koskiahde 2004, 331.
- ⁴¹ Penttala 1991, 20–21.
- ⁴² Pentti et al. 1998, 9.
- ⁴³ Pentti et al. 1998, 9.
- ⁴⁴ Pentti et al. 1998, 10; Betoninormit 1965.
- ⁴⁵ Pentti et al. 1998, 12; Betoninormit 1980; BY 32 1989.
- ⁴⁶ BY 32 1992; Betoninormit 1993; Betoninormit 2004; Betoninormit 2012.
- ⁴⁷ Hytönen et Seppänen 2009, 185.
- ⁴⁸ Lahdensivu 2012, 59.
- ⁴⁹ Pentti et al. 1998, 18–31.
- ⁵⁰ Pentti et al. 1998, 9.
- ⁵¹ Betoninormit 2004.
- ⁵² BES-raportti 1970, 21.
- ⁵³ Lahdensivu 2012, 57–58.
- ⁵⁴ Lahdensivu 2012, 59.
- ⁵⁵ Lahdensivu 2012, 64–67.
- ⁵⁶ Lahdensivu 2012, 70–75.
- ⁵⁷ Lahdensivu 2012, 70–75.
- ⁵⁸ Lahdensivu 2012, 82–86.
- ⁵⁹ Lahdensivu 2012, 86–87.
- ⁶⁰ Mattila et al. 1997,15; Lahdensivu et al. 2013, 25 ja 102–104.
- ⁶¹ Lahdensivu 2012, 75–76.
- ⁶² Lahdensivu 2012, 67–68.
- ⁶³ Hytönen et Seppänen 2009, 111 ja 185; Clark et al. 2008; Escadeillas et al. 2007.
- ⁶⁴ Clark et al. 2008; Escadeillas et al. 2007.
- ⁶⁵ Lahdensivu 2012, 98–99.
- ⁶⁶ BY 32 1989, 41–49.
- ⁶⁷ BY 50 2004, 93.
- ⁶⁸ BY 502004, 85.
- ⁶⁹ Tuutti 1982; Siemes et al. 1985; Liu et Weyers 1998.

LÄHTEET:**Arkistolähteet**

Tilastokeskus. 2013. www.tilastokeskus.fi (30.12.2013)

Painetut lähteet

A 46. 1965. Betoninormit. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. ja Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 102 s.

Asp. G. E. 1908. Huonerakenteiden oppi. Osa 3: Rautarakenteet ja Rautabetonirakenteet. Turku. Turun suomalainen kirjapaino ja Sanomalehden Oy. s. 102-156.

BY 10. 1977. Betoninormit. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 202 s.

BY 15. 1980. Betoninormit ja viranomaisohjeet. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 130 s.

BY 15. 1993. Betoninormit. RakMK B4 ja korkealujuuksisten betonien lisäohjeet. Helsinki. Suomen betoniyhdistys ry. 170 s.

BY 32. 1989. Betonirakenteiden säilyvysohjeet ja käyttöikämitoitus. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 60 s.

BY 32. 1992. Betonirakenteiden säilyvysohjeet ja käyttöikämitoitus. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 66 s.

BY 50. 2004. Betoninormit 2004. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 240 s.

BY 50. 2012. Betoninormit 2012. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 250 s.

RIL 70. 1969. Betonin lisäaineiden käyttö. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 41 s.

SEPPÄNEN, M., Koivi, T. (toim.) 1970. BES. Tutkimus avoimen elementtjärjestelmän kehittämiseksi. Helsinki. Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö ry. 88 s.

Valmisosarakentaminen I. 1995. Osa D. Betonijulkisivut. Helsinki. Rakennustuoteteollisuus RTT. 108 s.

Tutkimuskirjallisuus

BAKKER, R. 1988. Initiation period. Teoksessa Schiessl, P. (editor) Corrosion of steel in concrete. London. Chapman and Hall. Pp. 22-55.

CLARK, S.M., COLAS, B., KUNZ, M., SPEZIALE, S., MONTEIRO, P. J. M. 2008. Effect of pressure on the crystal structure of ettringite. Cement and Concrete Research. Vol. 38. Pp. 19-26.

DENG, M., TANG, M. 1994. Formation and expansion of ettringite crystals. Cement and Concrete Research. Vol. 24. Pp. 119-126.

- ESCADEILLAS, G., AUBERT, J.-E., SEGERER, M., PRINCE, W. 2007. Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37. Pp. 1445-1452.
- GJØRV, O. E. 2009. Durability design of concrete structures in severe environments. Taylor & Francis. 220 p.
- HANKONEN, J. 1994. Lähiöt ja tehokkuuden yhteiskunta. Suunnittelujärjestelmän läpimurto suomalaisten asuntoalueiden rakentamisessa 1960-luvulla. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisu 551. 539 s.
- HURME, R. 1991. Asuntorakentamisen murrosvaiheita 1940-luvulta 1960-luvulle. Teoksessa Hurme, R., Häyrynen, M., Penttala, V., Putkonen, L., Soini, E. *Betoni Suomessa 1860-1960*. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 195 s.
- HYTÖNEN, Y, Seppänen, M. 2009. Tehdään elementteistä. Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia. Helsinki. SBK-säätiö. 332 s.
- KOSKIAHDE, A. 2004. An experimental petrographic classification scheme for the condition assessment of concrete in facade panels and balconies. *Materials Characterization*. Vol. 53. Pp. 327-334.
- LAHDENSIVU, J. 2012. Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. Tampere. Tampere University of Technology. Publication 1028. 117 p. + 34 app.
- LAHDENSIVU, J., KÖLIÖ, A., PAKKALA, T., KOSKINEN, J. 2013. Betonijulkisivun kuntotutkimus. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 163 s.
- LAHTI, M. J. 1960. Kuinka Helsinkiä on rakennettu. Helsinki. Rakentajain Kustannus Oy. 336 s.
- LIU, Y. and WEYERS, R.E. 1998. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 6, pp. 675-681.
- MATTILA, J., LINDBERG, R., PENTTI, M. 1997. Betonijulkisivun kuntotutkimus. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 131 s.
- MÄKIÖ, E., MALINEN, M., NEUVONEN, P., VIKSTRÖM, K., MÄENPÄÄ, R., SAARENPÄÄ, J., TÄHTI, E. 1994. Kerrostalot 1960-1975. Helsinki. Rakennustieto Oy. 288 s.
- PAGE, C. L. 1988. Basic principles of corrosion. Teoksessa Schiessl, P. (editor) *Corrosion of steel in concrete*. London. Chapman and Hall. Pp. 3-21.
- PARROTT, L. J. 1987. Review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association. Wexham Springs. 48 p.
- PENTTALA, V. 1991. Betonitekniiikan 100 ensimmäistä vuotta Suomessa. Teoksessa Hurme, R., Häyrynen, M., Penttala, V., Putkonen, L., Soini, E. *Betoni Suomessa 1860-1960*. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 195 s.
- PENTTI, M., MATTILA, J., WAHLMAN, J. 1998. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa I Rakenteet, vauriot ja kunnan tutkiminen. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, talonrakennustekniikka. Julkaisu 87. 156 s.
- PIGEON, M., PLEAU, R. 1995. Durability of concrete in cold climates. Suffolk. E & FN Spon. 244 p.
- PUTKONEN, L. 1991. Betonin käyttö talonrakennuksessa 1800-luvun lopulta 1930-luvulle. Teoksessa Hurme, R., Häyrynen, M., Penttala, V., Putkonen, L., Soini, E. *Betoni Suomessa 1860-1960*. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry. 195 s.
- SIEMES A., VROUWENVELDER A. & BEUKEL A. van den. 1985. Durability of Buildings: a Reliability Analysis. *Heron* 30(1985)3. Pp. 3-48.
- SEPPÄNEN, M. 2009. Elementtirakentamisen kehitys arkkitehdin näkemänä. Teoksessa Hytönen, Y, Seppänen, M. 2009. Tehdään elementteistä. Suomalaisen betonielementtirakentamisen historia. Helsinki. SBK-säätiö. 332 s.
- TUUTTI, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Stockholm. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Research 4:82. 304 p.
- VAINIO, T., LEHTINEN, E., NUUTTILA, H. 2005. Julkisivujen uudis- ja korjausrakentaminen. Tampere. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniiikka. 40 s.