

Julkisivujen pitkäaikaisestävyyden rasisolosuhteet

Toni Pakkala¹ ja Jukka Lahdensivu¹

¹ Tampereen yliopisto, Rakenteiden korjaaminen ja elinkaaritekniikka

Tiivistelmä

Ympäristöministeriö on käynnistänyt hankkeen Rakentamisen mitoitussäät (RAMI), jossa Tampereen yliopisto, Aalto-yliopisto ja Ilmatieteen laitos selvittävät yhdessä rakentamisen mitoituserusteita ja -aineistoa rakenteiden rakennusfysikaalista mitoitusta ja rakennusten sisäolosuhteita varten. Yksi Tampereen yliopiston osa-alueista hankkeessa on julkisivurakenteiden pitkäaikaiskestävyyden kannalta kriittisten rasisolosuhteiden tunnistaminen ja kyseisten olosuhteiden muuttuminen tulevaisuuden ilmastossa. Julkisivurakenteisiin liittyvässä tutkimusosiossa selvitetään olemassa olevan rakennuskannan vaurioitumisen ja säärasituksen tason laskennallisten tarkastelujen pohjalta kriittiset vuotuiset rasisolosuhteet huokoisten kiviainespohjaisten materiaalien pakkasrasituksen ja betoniraudoitteiden korroosion kannalta. Tarkastelut tehdään RASMI-aineiston kolmelle eri päästöskenaariion tilanteelle. Tuloksena saadaan arvioitua tulevaisuuden sääolosuhteiden rankkuutta olemassa olevaan rakennuskantaan sekä sen vaikutusta korjausten sekä uudisrakentamisen suunnitteluun. Tämän artikkelin kirjoitusaikaan on laskettu sateen jälkeiset jäätymis-sulamissyklit sekä sademäärät ennen syklejä kolmella eri skenaariolla Vantaalla 2050 ja 2080 sekä Jokioisilla 2080.

1. Johdanto

Kiviainespohjaisten säälle alttiiden rakenteiden vaurioitumiselle kriittisiksi vauriomekanismeiksi on aiemmissa tutkimuksissa todettu pakkasrapautuminen ja betonilla raudoitteiden korroosio [1, 2]. Erityisesti viistosademäärällä on havaittu erittäin suuri merkitys molempiin vauriomekanismeihin. Lahdensivu [1] havaitsi väitöstutkimuksessaan, että julkisivu- ja parvekebetonista irrotetuissa näytelieriöissä alkavaa pakkasrapautumista havaittiin n. 80 sateen jälkeistä jäätymis-sulamissykliä aiemmin rannikolla (keskimäärin 307 sykliä) kuin sisämaassa (keskimäärin 388 sykliä). Pakkala et al. [3, 4] on havainnut tarkasteluissaan, että todennäköisin syy rannikolla tapahtuneella nopeammalla vaurioitumiselle on selkeästi suurempi viistosademäärä sisämaahan nähden. Lisäksi Pakkala et al. [4] havaitsi, että pitkälle edennyttä pakkasrapautumista on havaittu julkisivu- ja parvekerakenteissa tiettyjen ilmansuuntien puolella lähes samassa suhteessa niille ennen jäätymis-sulamissyklejä satavan viistosademäärän kanssa. Nykyilmastossa (tutkimuksen aikaan 1980–2009) selvästi suurin osuus jäätymis-sulamissyklejä edeltävästä viistosademäärästä (78 %) on tullut länsi-kaakko-suuntaisilta ilmansuunnilta, ja puolestaan ennen vuotta 1995 rakennetuilla betonijulkisivuilla 81 % pitkälle edenneestä pakkasrapautumasta on havaittu kyseisten ilmansuuntien julkisivuilla. Molempien osuus on suurempi rannikolla ja vähenee sisämaata ja Lappia kohden.

Betoniterästen korroosiovaurioituminen voidaan jakaa kahteen osaan: käynnistymisvaihe, jonka aikana betonin karbonatisoitumisrintama saavuttaa teräsvyydyden ja siten menettää terästä suojaavan alkalisuutensa sekä aktiivisen korroosion vaihe, jolloin teräs alkaa ruostua ja lopulta aiheuttaa halkeaman tai lohkeaman betonin pintaan. Kyseisten vaiheiden pituus riippuu rakenteen ominaisuuksien, kuten betonin peitepaksuuden lisäksi merkittävästi rakenteen suojaisuudesta, sillä kosteus hidastaa karbonatisoitumista, mutta nopeuttaa itse korroosiota. Jos rakenne on

suojassa viistosateelta, kuten parvekelaatan alapinta, käynnistymisvaihe voi olla melko lyhyt ja aktiivisen korroosion vaihe pitkä. Jos rakenne on altis viistosateelle, kuten parvekepieli, käynnistymisvaihe voi olla melko pitkä, mutta aktiivisen korroosion vaihe hyvin lyhyt. Köliö mallinsi väitöskirjassaan [5], että esimerkiksi rannikko-olosuhteissa nykyilmastossa eteläjulkisivulla sijaitsevan parvekelaatan alapinnan korroosion käynnistymisvaihe on n. 10 vuotta, pielellä n. 12 vuotta ja julkisivulla 25 vuotta. Aktiivisen korroosion vaiheen kesto puolestaan olisi vastaavilla rakenteilla 80 vuotta, 2 vuotta ja 3 vuotta.

Tässä artikkelissa esiteltävän tutkimuksen pakkasrapautumisen rasiustason arviointi tehdään rasiustasoa kuvaavan jäätymis-sulamissykliä määrän avulla, määrittäen nämä uudelle Ilmatieteen laitoksen tuottamalle 30 vuoden tuntiaineistolle nyky- ja tulevaisuuden ilmastosta (RASMI-aineisto) ottaen huomioon myös viistosateen määrän erisuuntaisille julkisivupinnoille. Raudoitteiden korroosiotarkasteluissa hyödynnetään laskennallisen karbonatisoitumisen yleisiä laskennallisia malleja sekä Tampereen yliopiston Rakenteiden korjaamisen ja elinkaaritekniikan tutkimusryhmässä kehitettyä ja aikaisempaa kattavampaa aktiivisen korroosion laskentamallia. Tarkastelut tehdään RASMI-aineiston kolmelle eri päästöskenaariolle tilanteelle ja tuloksia verrataan aiemman FRAME-hankkeen tuloksiin. Tuloksena saadaan arvioitua tulevaisuuden sääolosuhteiden rankkuutta olemassa olevaan rakennuskantaan sekä sen vaikutusta korjausten sekä uudisrakentamisen suunnitteluun.

2. Tutkimusmenetelmät

2.1 Pakkasrapautuminen

Kiviainespohjaisten, säälle alttiiden julkisivurakenteiden, kuten betoni, tiili ja rappaus, pakkasrapautuminen perustuu materiaalien altistumiseen jäätymis-sulamisasiintukselle silloin, kun niiden huokosverkostossa on riittävä määrä vettä. Varsinaiseen pakkasrapautumisen mekanismiin on useita erilaisia teorioita [6], mutta yksinkertaistetusti yleensä käytetään hydraulisen paineen teoriaa [7], jonka mukaan huokosverkostossa jäätyvän veden laajeneminen aiheuttaa hydraulisen paineen huokosverkostoon, mikä aiheuttaa sisäisiä jännityksiä ja voi lopulta johtaa halkeaman syntyyn. Mitä pienemmistä huokosista puhutaan sitä matalampi on huokosverkostossa vapaana olevan veden jäätyislämpötila. Käytännössä kapillaarihuokosten tapauksessa jäätyislämpötila on noin $-5 \dots -10 \text{ }^\circ\text{C}$ [8]. Pakkasrapautumiselta voidaan suojautua mm. lisähuokostuksella, jossa huokoiseen materiaaliin saadaan sopivan kokoisia suojahuokosia sopivalle etäisyydelle toisistaan, jolloin jäätyminen aiheuttama huokospaine pääsee purkautumaan niihin. Kuten Lahdensivu [1] on esittänyt, olemassa olevassa rakennuskannassa suojahuokostus on ollut kuitenkin usein puutteellista vielä nykymääräyksiä vastaavilla vaatimuksella tehdyissä betonirakennuksissa.

Pakkasrapautumisen mallintamiseen tai sen riskin laskennalliseen tarkasteluun ei ole maailmanlaajuisestikaan kehitetty käytännöllisiä menetelmiä [9]. Norjassa Lisø et al. [10] esittelivät yhdistelmän, jossa tarkastellaan erikseen jäätymis-sulamissykliä vuosittaista määrää sekä niitä edeltävän sademäärän vuosisummaa. Pakkala [9] arvioi väitöskirjassaan, että tarkastelu on puutteellinen mm. siksi, että jäätymis-sulamissykleissä on tarkastelu kaikkia syklejä eikä syklejä, joita on edeltänyt vesi- tai räntäsade. Aiemmin Pakkala et al. [4] oli esittänyt, että viistosademäärällä ennen jäätymis-sulamissyklejä on hyvin selkeä yhteys havaittuihin rapautumavaurioihin. Tässä tutkimuksessa hyödynnetään kyseisiä havaintoja ja tarkastellaan erityisesti julkisivulle satavaa viistosademäärää maksimissaan 72 tuntia ennen $-5 \text{ }^\circ\text{C}$:een alitusta. Viistosademäärän laskenta on toteutettu standardin SFS-EN ISO 15927-3 [11] mukaisesti vapaan viistosateen kaavalla:

$$I_A = \frac{2 \sum_{i=1}^N v r^2 \cos(D - \theta)}{9N} \quad (1)$$

missä v = tuulennopeuden tuntikeskiarvo [m/s]
 r = tunnitainen kokonaissademäärä [mm]
 D = tunnitainen tuulen suunnan keskiarvo [°]
 θ = seinän suunta suhteessa pohjoiseen [°]
 N = tarkasteltavan aineiston vuosien määrä

Kaavan (1) summa lasketaan kaikilta tunneilta, jolloin lause $\cos(D - \theta)$ on positiivinen. Koska standardi ei ota huomioon, tuleeko sade vetenä, räntänä vai lumena, laskennan lisämääreeksi on otettu vaatimus, että sadehetkellä ilman lämpötila on yli 0 °C. Laskenta on toteutettu sekä vuoden kokonaissademääränä ennen jäätymis-sulamissyklejä että keskimääräisenä sademääränä ennen yksittäistä jäätymis-sulamissykliä.

Tutkimusmateriaalina on käytetty Ilmatieteen laitoksen tuottamaa RASMI-aineistoa nykyilmastolle (vuosien 1989–2019 tunnitainen mittausdata) sekä kolmelle eri ilmastonmuutosennusteille (RCP2.6, RCP4.5 sekä RCP8.5) vuosille 2050 ja 2080. Ilmastonmuutosennusteista RCP2.6 on optimistisin teollisuuden vuoksi ilmaan päätyvän hiilidioksidimäärän suhteen ja RCP8.5 pessimistisin. Tämän artikkelin tekovaiheessa kyseiset tarkastelut on tehty rannikkoilmastoa kuvaavan Helsinki-Vantaan säähavaintoasemalle sekä eteläistä sisämaata kuvaavalle Jokioisen säähavaintoasemalle.

2.2 Raudoitteiden korroosio

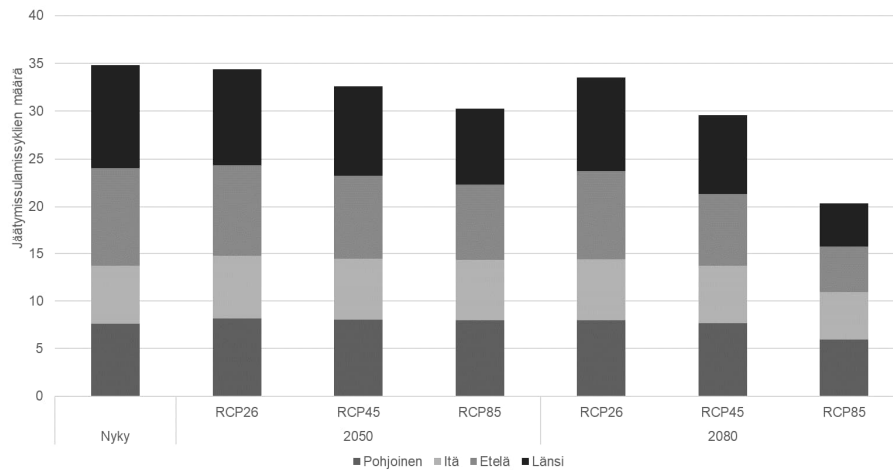
Tutkimuksessa tullaan selvittämään myös raudoitteiden korroosion käynnistymisvaiheen ja aktiivisen korroosion vaiheen mallinnusta. Koska laskenta ei artikkelia kirjoittaessa ole vielä käynnistynyt, laskentamenetelmiä ei esitellä tässä artikkelissa.

3. Tulokset

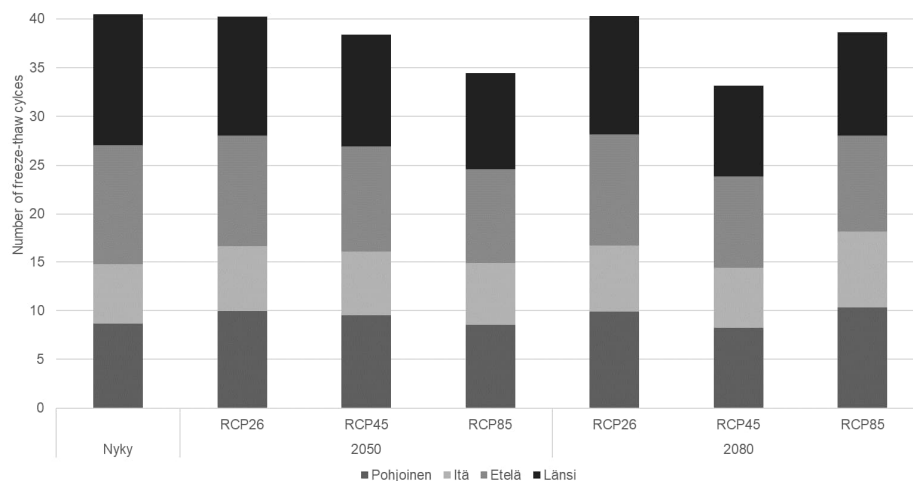
3.1 Jäätymis-sulamissyklit sateen jälkeen

Jäätymis-sulamissyklien määrä vetenä tai räntänä tulleen sateen jälkeen on laskettu tutkimuksen tässä vaiheessa rannikkoilmastoa kuvaavan Helsinki-Vantaan säähavaintoasemalle sekä eteläistä sisämaata kuvaavalle Jokioisen säähavaintoasemalle nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2080 ilmastonmuutosennusteilla. Laskennan tulokset Helsinki-Vantaalle on esitetty kuvassa 1 ja Jokioiselle kuvassa 2.

Kuten kuvaajista nähdään, jäätymis-sulamissyklien määrä sateen jälkeen tulee ennusteista riippuen vähenemään melko maltillisesti riippumatta siitä, tarkastellaanko rannikkoa vai eteläistä sisämaata. Merkittävin eroavaisuus tulee esiin vasta ennusteen RCP8.5 kohdalla vuonna 2080, jossa rannikolla syklimäärä putoaa 58 %:iin nykytilanteesta. Eteläisessä sisämaassa puolestaan kyseisen ennusteen mukaan määrä nousee vuoden 2050 tilanteesta takaisin lähemmäs nykytilannetta.



Kuva 1. Jäätymis-sulamissyklijen määrä maksimissaan 72 tuntia vetenä tai räntänä tulleen sateen jälkeen Helsinki-Vantaalla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.

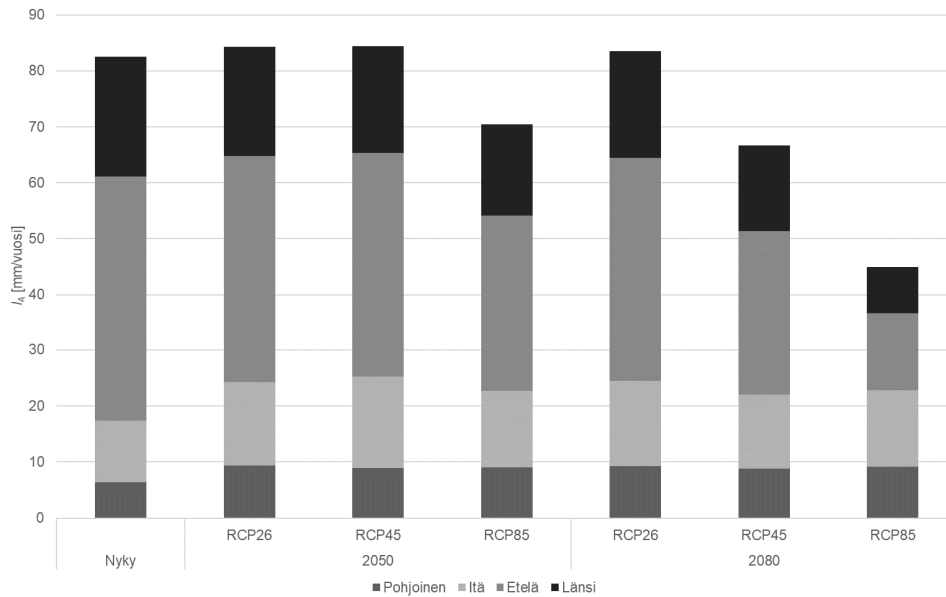


Kuva 2. Jäätymis-sulamissyklijen määrä maksimissaan 72 tuntia vetenä tai räntänä tulleen sateen jälkeen Jokioisilla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.

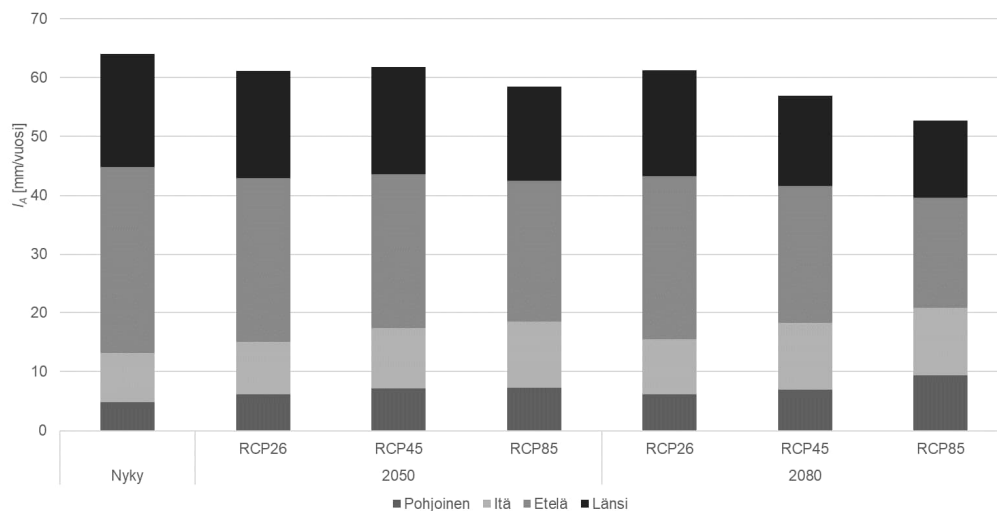
Lahdensivun väitöskirjassaan [2] esittämän, nykyilmastossa rannikolla alkavaan pakkasrapautumiseen vaadittu sateen jälkeinen jäätymis-sulamissykliäärä (307 kpl) saavutettaisiin laskennan mukaan nopeimmin, n. 31 vuodessa, ennusteen RCP2.6 vuoden 2050 ilmastossa länsijulkisivulla. Hitaimmin, n. 64 vuodessa, se saavutettaisiin niin ikään länsijulkisivulla ennusteen RCP8.5 vuoden 2080 ilmastossa. Sisämaassa nykyilmastossa alkavaan pakkasrapautumiseen vaadittu jäätymis-sulamissykliäärä (388 kpl) saavutettaisiin nopeimmin, n. 32 vuodessa, länsijulkisivulla ennusteen RCP2.6 vuoden 2050 ilmastossa ja hitaimmin, n. 63 vuodessa, ennusteen RCP4.5 vuoden 2080 ilmastossa. Sisämaatarkastelu on kuitenkin aiemmin tehty Jyväskylän sääaineiston perusteella eikä siten ole suoraan vertailukelpoinen.

3.2 Viistosademäärä jäätymis-sulamissyklijen jälkeen

Vuotuinen viistosademäärä ennen jäätymis-sulamissyklejä rannikolla ja eteläisessä sisämaassa on esitelty kuvissa 3 ja 4.



Kuva 3. Maksimissaan 72 h ennen jäätymsulamissyklejä vetenä tai räntänä tulleen viistosateen vuosisumma Helsinki-Vantaalla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.



Kuva 4. Maksimissaan 72 h ennen jäätymsulamissyklejä vetenä tai räntänä tulleen viistosateen vuosisumma Jokioisilla nykyilmastossa sekä eri ennusteilla vuosien 2050 ja 2080 ilmastoissa.

Toisin kuin sateen jälkeisissä sykleissä, viistosademäärässä ennen kyseisiä syklejä voi ennusteesta riippuen tapahtua jopa kasvua. Rannikolla kasvua tapahtuu ennusteella RCP2.6 niin 2050 kuin 2080 ennusteellakin. Sen sijaan ennusteella RCP8.5 syklejä edeltävä viistosademäärä putoaa jo 2050 ja merkittävästi (46 %) vuonna 2080. Jokioisilla erot nykytilanteeseen ovat hyvin vähäisiä ja määrät ovat myös huomattavasti rannikkoa pienemmät kaikilla ennusteilla paitsi RCP8.5 vuonna 2080. Kaikissa tapauksissa tapahtuu pudotusta nykyilmastossa rankimmin rasiitetuilla etelä- ja länsijulkisivuilla. Erityisesti itäjulkisivuilla puolestaan tapahtuu kasvua.

Tarkasteltaessa yksittäisen jäätymsulamissyklin intensiteettiä eli viistosadesademäärää ennen yksittäistä sykliä, tapahtuu kasvua rannikolla kasvua nykyilmastoon nähden kaikilla ennusteilla. Eteläisessä sisämaassa kasvua tapahtuu ennusteella RCP4.5 2050 ja 2080 ilmastoissa sekä ennusteella RCP2.6 2050 ilmastossa. Suurin kasvu (15 %) tapahtuu rannikon 2050 ilmastossa ennusteella RCP4.5.

4. Yhteenveto

Tämän artikkelin kirjoittamisen hetkeen mennessä tehdyistä laskelmista on selvinnyt, että kiviainespohjaisten julkisivumateriaalien pakkasrasituksessa ilmastonmuutoksen myötä tapahtuva muutos riippuu merkittävästi sijainnin lisäksi käytetystä ennusteesta. Rannikolla sateen jälkeisten jäätymis-sulamissykliä määrä tulee kaikilla ennusteilla vähenemään nykyilmastoon nähden. Aiemmissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu jäätymis-sulamissyklejä edeltävän viistosateen määrän merkittävä vaikutus ja sen muutos riippuu hyvin paljon käytetystä ennusteesta. Ilman hiilidioksidipitoisuuden kannalta pessimistisimmällä RCP8.5 ennusteella pakkasrasitus tulee helpottamaan huomattavasti 2080 vuoden ilmastossa, mutta optimisimmalla ennusteella RCP2.6 puolestaan kasvamaan. Eteläisessä sisämaassa ennusteen vaikutus on huomattavasti vähäisempi eikä rasitus tule merkittävästi muuttumaan nykytilanteesta.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa selvitetään aineistosta testivuosia. Testivuosien valinta toteutetaan rakennusfysikaalisen laskennan testivuosien tapaan valitsemalla aineistosta vuodet, joita rankempaa rasitusta on enintään kerran 10 vuodessa.

Lähdeluettelo

- [1] Lahdensivu, J., Varjonen, S. ja Köliö, A. 2010. Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden korjausstrategiat. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 148.
- [2] Lahdensivu, J. 2012. Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University of Technology. Väitöskirja. TUT Publ. 1028. 117 s.
- [3] Pakkala, T. A., Köliö, A. Lahdensivu J. ja Kiviste M. 2014. Durability demands related to frost attack for Finnish concrete buildings in changing climate. *Building and Environment*, 82 (2014). Pp. 27–41.
- [4] Pakkala, T. A., Lahdensivu, J. Huuhka, P., Kivioja, H. ja Lemberg, A.-M. 2019. Freeze-thaw Damage Dependence on Wind-driven Rain of Outdoor Exposed Concrete – A Case Study. *Nordic Concrete Research*, Publication no. 61, 2/2019. Pp. 91–106.
- [5] Köliö, A. 2016. Propagation of Carbonation Induced Reinforcement Corrosion in Existing Concrete Facades Exposed to the Finnish Climate. Tampereen teknillinen yliopisto. Väitöskirja. TUT Publ. 1399. 147 s.
- [6] Kuosa, H. ja Vesikari, E. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 1: Perusteet ja käyttöikämitoitus. VTT. VTT Tiedotteita 2056. 141 s.
- [7] Powers, T. C. 1949. The air requirement of frost-resistant concrete. Chicago: Portland Cement Association, Research and Development laboratories, Development Department. Bulletin 33.
- [8] Pigeon, M. ja Pleau, R. 1995. Durability of concrete in cold climates. London. E & FN Spon. 244 s.
- [9] Pakkala, T. 2020. Assessment of Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University Dissertations 204. 98 s. 23 liites.
- [10] Lisø, K.R., Kvande, T., Hygen, H.O., Thue, J.V. ja Harstveit, K. 2007. A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and Environment*, 42(10), Pp. 3547–3555.
- [11] SFS-EN ISO 15927-3. 2009. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki. 31 s.