

Maria Parviainen

Korkeiden rakennusten toimiva julkisivu merenrantaolosuhteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

26.8.2013

Alkulause

Tämä insinööriyö on tehty Metropolia Ammattikorkeakoulun rakennustekniikan koulutusohjelman päättötyönä. Insinööriyön tavoitteena oli löytää Kalasataman tornitaloihin sopiva ja rakennusfysikaalisesti toimiva julkisivu sekä kerätä ohjeita ja antaa asiantuntevia näkemyksiä korkean rakennuksen julkisivujen toiminnalle merenrantaolosuhteissa.

Työn tilaajana ja rahoittajana toimi Aaro Kohonen Oy, joka vastaa Kalasataman keskuksen rakennesuunnittelusta. Haluan kiittää Hannu Nissistä ja Jouni Kalliomäkeä heidän antamistaan neuvoista ja työn ohjauksesta. Lämmin kiitos kuuluu Aaro Kohonen Oy:n erityisasiantuntija Teuvo Meriläiselle mielekkään aiheen antamisesta sekä kallisarvoisista neuvoista ja informaatiosta työn toteutuksen aikana. Haastattelun antamisesta haluan kiittää L2 Paloturvallisuus Oy:n toimitusjohtaja Juha-Pekka Laaksosta.

Kiitän myös muita insinööriyön toteutukseen vaikuttaneita henkilöitä. Erityisesti kiitos työkavereilleni ja perheelleni saamastani tuesta ja avusta insinööriyön toteutuksen aikana.

Espoossa 26.8.2013

Maria Parviainen

Maria Parviainen

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Maria Parviainen Korkeiden rakennusten toimiva julkisivu merenrantaolosuhteissa 57 sivua + 6 liitettä 26.8.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Toimitusjohtaja Hannu Nissinen Lehtori Jouni Kalliomäki
<p>Insinööriyössä tutkittiin Kalasataman tornitalojen julkisivuvaihtoehtojen rakennusfysikaalista toimintaa. Työssä huomioitiin rakennuksen korkeuden lisäksi lähinnä lämmöneristysmääräykset, ilmastonmuutokset sekä meren läheisyyden lisäämät haasteet. Näihin haasteisiin kuuluu kovien tuulien myötä ankarat viistosateet sekä merivedestä tuulen mukana kulkeutuvat kloridit. Työn tilaajana toimi Aaro Kohonen Oy, joka vastaa Kalasataman keskuksen rakennesuunnittelusta.</p> <p>Kalasataman julkisivun rakennusfysikaalisen toimivuuden tarkastelun laajuuden vuoksi keskityttiin ulkoseinän todellisen U-arvon ja kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun. Lisäksi julkisivun tuuletusrakojen toimivuutta oli tarkasteltava lähinnä ilmvirtausten ja kosteuden aiheuttamien mahdollisten jäätymishaittojen kannalta. Tavoitteena oli myös tuoda esille ohjeita ja vinkkejä julkisivujen suunnitteluun toimimaan korkean rakennuksen ja meren läheisyyden asettamissa vaativissa olosuhteissa.</p> <p>Tietoa kerättiin perehtymällä alan kirjallisuuteen, kuten voimassa oleviin määräyksiin ja virallisten tahojen julkaisemiin ohjeisiin. Arvokasta tietoa saatiin myös haastatteleamalla alan asiantuntijoita. Rakennusfysikaaliset tarkastelut tehtiin käsinlaskennan lisäksi COMSOL nimisellä fysiikansimulointiohjelmalla.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena saatiin koottua ohjeita sekä korkean rakennuksen että meren läheisyydessä olevan julkisivun suunnitteluun. Simulointien avulla todettiin, että valitun rakennetyypin runkoprofiilia olisi kehitettävä kylmäsiltaikutuksen pienentämiseksi. Paremmin lämpöä eristävä runkoprofiili parantaisi myös rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Virtaussimulointien avulla pystyttiin paikantamaan tuulen eniten rasittamat kohdat ja arvioimaan virtauksien kulkua sekä rakennuksen ympärillä että julkisivun ilmatiloissa. Tutkimuksen avulla ei pystytä vielä valitsemaan toimivaa julkisivuratkaisua, mutta saadut tulokset toimivat hyvänä lähtökohtana jatkoselvityksille.</p> <p>Tutkimukseen liittyy myös luottamuksellinen osuus.</p>	
Avainsanat	Korkeat rakennukset, julkisivu, rakennusfysiikka, meri, energiamääräykset.

Author Title	Maria Parviainen Functional Façade High-rise Buildings in Seaside Conditions
Number of Pages Date	57 pages + 6 appendices August 26 th 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Hannu Nissinen, Managing Director Jouni Kalliomäki, Senior Lecturer
<p>In this thesis, the building-physical function of Kalasatama high-rise building façade options was studied. This study took into consideration mainly the height of the building, but also the regulation for thermal insulation, the climate change and the challenges introduced by the proximity of the sea. These challenges include strong wind causing severe wind-driven rain and transporting chlorides from the sea water. The research was done for Aaro Kohonen Oy, which is responsible for the Kalasatama Center's structural design.</p> <p>The study of the building-physical function of the Kalasatama façade is very broad. Therefore, this study focused on examining the actual heat and moisture transfer in the external walls including the impact of thermal bridges. The risk of moisture freezing on the façade was additionally studied by examining the airflow on the façades outer surface and in its air cavities. The goal was also create guidelines and tips for façade design in demanding conditions, introduced by the height of the building and by the proximity of the sea.</p> <p>Information was gathered by studying literature specific to the subject, such as valid regulations and guidelines published by official sources. Valuable information was also obtained by interviewing experts in the field. Calculations were made manually in addition to the computer simulation made with COMSOL Multiphysics software.</p> <p>As a result of the research, guidelines were developed for designing façades for high-rise buildings on seacoasts. Simulations showed that the aluminium profiles in external walls functioned as effective thermal bridges. Therefore, the external wall frame should be developed to decrease the heat transfer through the wall, which would also improve the structural function in regards to moisture. The airflow simulations helped to locate the most wind stressed points on the façade and to evaluate the flow direction of air around the building and in the façades air cavities. This study does not give a final solution for the façade, but the results contribute to further studies concerning this subject.</p> <p>There is a confidential section in this study.</p>	
Keywords	High-rise buildings, façade, building physics, sea, energy regulations.

Sisällys

Sanasto

1	Johdanto	1
1.1	Tavoite ja rajaus	1
1.2	Tutkimusmenetelmät	2
2	Lähtötiedot	3
2.1	Korkean rakentamisen määritelmä	4
2.2	Julkisivua koskevat määräykset ja ohjeet	5
2.2.1	Lämpö- ja kosteustekninen toiminta	5
2.2.2	Merenrantarakentaminen	7
2.2.3	Palomääräykset	9
2.2.4	Muut ohjeet	10
2.3	Ulkoseinärakennetyypin valinta	11
2.4	Tutkittavat rakennetyypit	12
3	Rakennusfysiikka	16
3.1	Tulevaisuuden lisähaasteet	16
3.2	Lämmön siirtymismuodot	18
3.2.1	Lämmönläpäisykerroin U	19
3.2.2	Lämpöjakauma rakenteessa	20
3.3	Kosteus	21
3.3.1	Kosteuslähteet	22
3.3.2	Kosteuden siirtymismuodot	24
3.3.3	Rakennuksen painesuhteet	26
3.4	Home	28
3.5	Rakennekosteuden hallinta	29
3.6	Rakennuksen kuivuminen	30
3.7	Julkisivun ilmavirtaukset	31
4	Rakennusdetaljit	34
4.1	Lasirakenteet	34
4.2	Korroosio	36
4.3	Toleranssit ja teräksen väsyminen	37
4.4	Äänihaitat ja ääneneristävyys	38
4.5	Paloturvallisuus	38

4.6	Räystäät	40
5	Rakennusfysikaalinen simulointi	41
5.1	Kriittisten mitoitusolosuhteiden valinta	41
5.2	Rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytyminen	43
5.3	Koko rakennuksen simulointi	47
5.4	Julkisivun ilmatilan simulointi	49
5.4.1	Kaksoisjulkisivun ilmatilan virtaukset	50
5.4.2	Suoran lasijulkisivun virtaukset tuuletusraossa	53
6	Pohdinta	55
7	Yhteenveto	56
	Lähteet	58
	Liitteet	
	Liite 1. Haastattelukysymykset	
	Liite 2. Jatkoselvityksiä varten valitut rakennetyypit (luottamuksellinen)	
	Liite 3. Materiaaliominaisuudet	
	Liite 4. Runkotyyppien lämpö- ja kosteusjakaumat	
	Liite 5. Koko rakennuksen simulointi	
	Liite 6. Tuulennopeudet rakennuksen eteläjulkisivulla	

Sanasto

Energiatehokkuusluku (E)

E-luku kuvaa, kuinka paljon ostoenergiaa korreloituna energiamuotojen kertoimilla kuluu vuodessa rakennuksen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen.

Kaksoisjulkisivu

Kaksoisjulkisivu on lasihuntuun verhottu rakennus. Julkisivun ilmatila on usein leveämpi kuin tavallinen ilmarako (noin 30 mm).

Kastepiste

Kastepiste tarkoittaa kosteuden tiivistymistä, joka puolestaan tarkoittaa 100% suhteellista kosteutta (RH) vastaavaa lämpötilaa. Ulkoseinien kosteusteknisen toimivuuden kannalta on huolehdittava, ettei rakenteisiin muodostu kastepistettä.

Kyllästymisvajaus

Ilman suhteellisen kosteuden (RH) ollessa alempi kuin esimerkiksi ulkoseinässä, ilmassa on kyllästymisvajautta. Tämän ansiosta ulkoseinä kuivuu kosteuden pyrkiessä tasoittumaan siirtyessään suuremmasta kosteuspitoisuudesta pienempään.

Kylmäsilta

Rakennusosa tai -aine, joka johtaa paremmin lämpöä kuin sen vieressä olevat rakennusosat tai -aineet.

Lämmönjohtavuus (λ)

Lämmönjohtavuuden yksikkö on $W/(m \cdot K)$ ja se kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä. Rakennusosan lämmönläpäisykertoimen laskennassa käytetään lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvoa λ_U tai normaalista läm-

mönjohtavuutta λ_n , jotka huomioivat kaikki materiaalissa tapahtuvat lämmön siirtymismuodot.

Lämmönläpäisykerroin (U)

Lämmönläpäisykerroin U ilmoittaa, paljonko lämpöä siirtyy rakennusosan pinta-alayksikköä kohti kun lämpötilaero on rakennusosan eri puolilla asteen suuruinen. Lämmönläpäisykerroimen yksikkö on $W/(m^2 \cdot K)$.

Lämmönvastus (R)

Lämmönvastus R (m^2K/W) on lämmönläpäisykerroimen U käänteisluku. Lämmönvastus määräytyy lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon λ ja yksiaineisen materiaalikerroksen paksuuden d (m) avulla. Lämmönvastuksen laskennasta lisää luvussa 3.2.1 Lämmönläpäisykerroin U.

Nollaenergiarakentaminen

Nollaenergiarakennuksen energiatehokkuusluku on nolla. EU:n tavoitteena on päästä lähes nollaenergiarakentamiseen vuoteen 2021 mennessä.

”Sadetakki”

Julkisivumateriaalin taakse asennettu erillinen teräs- taikka alumiinilevy, jonka tehtävänä on varmistaa julkisivun vesitiiveyden sekä julkisivun kuivumisen muodostaessaan kaksi erillistä tuuletusrakoa.

Savupiippuilmio

Savupiippuilmio on lämpötilaeroista johtuva ilman erottuminen. Lämmin ilma nousee ylös muodostaen ylipaineen ilmatilan yläosaan ja alipaineen tilan alaosaan.

Simulointi

Simulointi tarkoittaa esimerkiksi rakennusfysikaalisella ohjelmalla tehtävää tarkastelua ja laskentaa.

1 Johdanto

Korkeiden rakennusten aikakausi on alkanut Suomessa. Tornitalokeskittyviä on kaa-voitettu viime vuosina muun muassa Espoon Keilaniemeen sekä Helsingin Pasilaan ja Kalasatamaan. Tornitalojen suunnittelussa ovat haastavia rakenteiden kantavuuden ja rakennuksen jäykkyyden suunnittelu mutta sen lisäksi myös julkisivujen suunnittelu vaikeutuu. Usein päädytään rakennuksen korkeuden takia julkisivujen valinnassa mahdollisimman keveisiin ja huoltovapaisiin elementteihin. Tällaisille ulkoseinäelementeille on ominaista niiden kerroksellisuus, jolloin rakennetyypin rakennusfysikaalista toimintaa on vaikea määrittää. Myös tiukentuneet energiamääräykset, ilmastonmuutos, rakennuksen korkeus ja sijainti pahentavat ulkoseinän rakennusfysikaalisia rasituksia.

Insinööriyön tilaaja on insinööritoimisto Aaro Kohonen Oy, joka kuuluu FMC-konserniin. Yhtiö kuuluu Suomen johtaviin rakennusalan suunnittelu- ja konsulttitoimistoihin. Yhtiön referensseihin kuuluu tunnettuja kohteita, kuten Kampin keskus, Mäkelänrinteen uintikeskus ja Messukeskuksen laajennukset. [Finnmap 2013.] Tällä hetkellä yhtiötä työllistää esimerkiksi Kalasataman keskuksen rakennesuunnittelu. Insinööri-työssä on tarkoitus tutkia keskuksen tornitalojen julkisivujen toimivuutta.

Kalasataman keskuksen pääsuunnittelija on Arkkitehtitoimisto Helin & Co Oy ja rakennuttajana toimii SRV Rakennus Oy. Keskus muodostuu kahdeksasta tornitalosta, joissa on 20–33 kerrosta ja korkein niistä nousee 126 metriin. Keskus sijaitsee meren äärellä, ja tornitalot sijoittuvat Kulosaaren sillanjatkeen molemmille puolille. [Kalasataman 2013.]

1.1 Tavoite ja rajaus

Insinööriyön tavoite on tutkia Kalasataman tornitalojen julkisivujen toimivuutta ja samalla tuoda esille ohjeita ja vinkkejä niiden suunnitteluun toimimaan vaativissa olosuhteissa. Toimivalla ulkoseinällä tarkoitetaan määräysten mukaista, turvallista ja huoltovapaata julkisivua, joka ei aiheuta terveyshaittaa eikä häiritseviä ääniä. Suomesta löytyy kovin vähän ohjeita rantarakentamisen ja korkean rakentamisen suunnittelusta. Tämän insinööriyön yhtenä tavoitteena onkin kerätä tietoa näistä suunnittelun erityistapauksista ja näin ollen toimia ohjeena tuleville projekteille.

Korkean rakennuksen toimintaan vaikuttavan teorian kokoamisen ohella tutkimuksessa on tarkoitus selvittää ulkoseinän rakennusfysikaalinen käyttäytyminen lähinnä lämmön, meren läheisyydestä aiheutuvan kosteuden ja kohteessa vallitsevien kovien tuulien suhteen. Tavoitteeseen kuuluu myös julkisivun kiinnikkeiden kemiallinen ja rakennetekninen tarkastelu. Samalla selvitetään ja esitetään ratkaisuja lähinnä tuulen aiheuttamille lisärasituksille kuten: kosteuden mahdolliselle jäätymiselle, tuulen nosteelle ja repimiselle, veden nousemiselle seinäpinnalla ja tämän vaikutus räystään deteljiikkaan.

Tarkasteltavien ulkoseinien rakennetyypit on rajattu kahteen. Rakennetyyppien rungot ovat samanlaiset ja molemmissa on valittu julkisivumateriaaliksi lasi. Rakennetyyppien erot näkyvät lähinnä julkisivun ulkopinnan geometriassa ja deteljiikassa. Valituista rakennetyypeistä on lisää luvussa 2.4 (Tutkittavat rakennetyypit) ja liitteessä 2, joka on luottamuksellinen. Ulkoseinäelementtien reuna-alueiden tarkastelu on rajattu pois tutkimuksesta, jolloin elementtien asennusdeteljiikkaan ei puututa. Työ tehdään lähinnä rakennesuunnittelijan ja käyttäjän näkökulmista.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Insinööritöyö tehdään tutkimalla voimassa olevia määräyksiä ja ohjeita sekä aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Uudisrakennukselle velvoittavia määräyksiä löytyy Suomen Rakentamismääräyskokoelmasta ja Eurokoodi-standardeista. Rakennusfysikaaliseen tutkimiseen apuna käytetään FRAME-hankkeen (*Future envelope assemblies and HVAC solutions*) raporteista saatavaa tietoa. FRAME-hankkeen tarkoitus oli tuottaa perustietoa lämmöneristyksen lisäyksen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksista vaipparakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan.

Ulkoseinän rakennusfysikaalisen tarkastelu tehdään lähinnä COMSOL Multiphysics -ohjelman avulla. Apuna käytetään toteutuneiden kohteiden sekä materiaalivalmistajien tietoa ja deteljeja. Tietoa ja vinkkejä kerätään myös haastattelemalla alan asiantuntijoita.

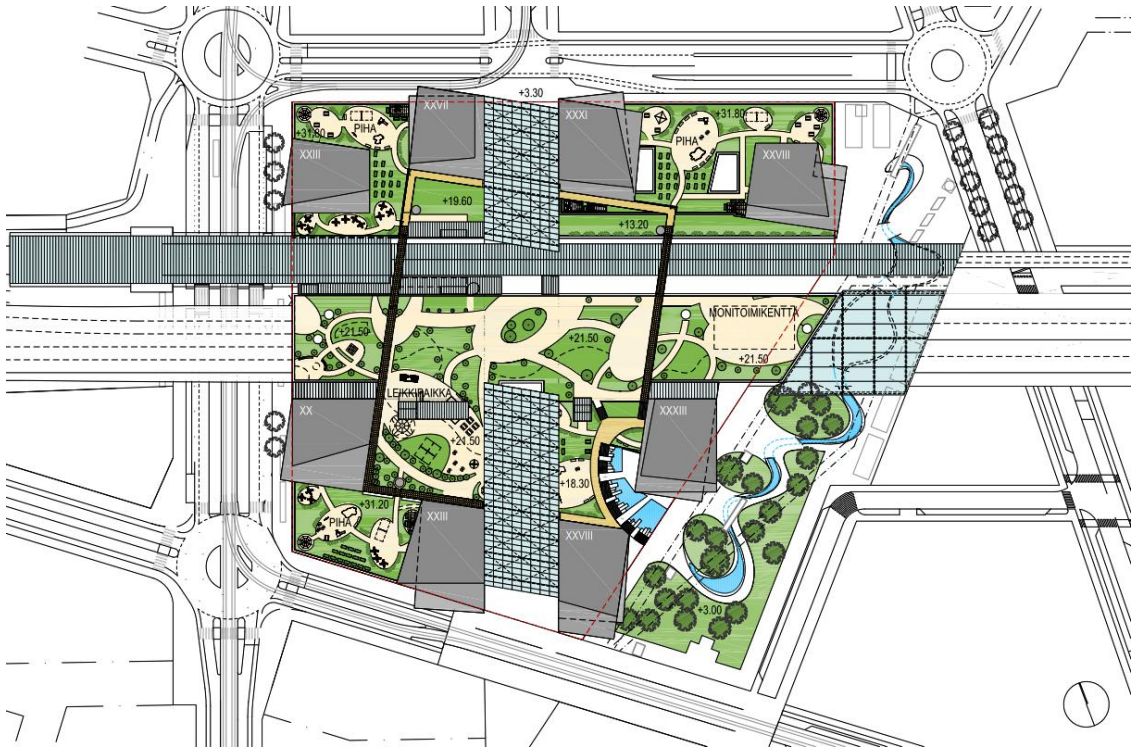
2 Lähtötiedot

Kalasadaman keskus tulee Helsingin itäiseen kantakaupunkiin. Keskus muodostuu kuudesta asuintornista sekä toimisto- ja hotellitornista. Tornitaloissa on 20–33 kerrosta ja korkein niistä nousee 126 metriin. Tornien yhteyteen tulee monipuolinen kauppakeskus sekä suuri sosiaali- ja terveysasema. Koko keskuksen on suunniteltu valmistuvan vaiheittain vuoteen 2021 mennessä. [Kalasatama 2013.] Alla on havainnekuva Kalasadaman keskuksesta (kuva 1). Vaaleat tornitalot erottuvat hyvin ympäristöstä ja ovat hyvien kulkuyhteyksien päässä Helsingin keskustasta.



Kuva 1. Kalasadaman keskuksen havainnekuva pohjoisesta otettuna. Kuvan vasemmassa reunassa näkyy Kulosaaren silta ja taustalla on Katajanokka. [Helin & Co. Arkkitehdit]

Kalasadaman keskuksesta on tulossa viihtyisä kokonaisuus meren äärelle. Keskuksen läpi kulkevat siltarakenteina Itäväylä, metro sekä Kalasadamankatu. Suunnitellut kulkuväylät on katettu viherkannella ja lasikatoksilla, jotka luovat monipuolisen puistoalueen kohteen vieraille ja asukkaille. Alla olevasta asemapiirustuksesta (kuva 2) näkyy keskuksen veistoksellinen viherkansi sekä kohteen läpi kulkevat liikenneväylät.



Kuva 2. Kalasataman keskuksen asemapiirustus (15.4.2013). Keskuksen läpi kulkee pystysuunnassa Kalasatamakatu ja vaakasuunnassa Itäväylä ja metro. [Helin & Co. Arkkitehdit.]

Suunnittelun kannalta kohde on erittäin vaativa. Meren läheisyys ja rakennusten korkeudet asettavat omalta osaltaan vaatimuksia varsinkin rakennuksen stabiiliteetin, geometrian ja julkisivujen suunnitteluun. Vanhan sanonnan mukaan merellä tuulee aina, minkä takia on varauduttava suuriin tuulikuormiin varsinkin nurkka- ja räystääsaluilla. Etelä-Suomen runsaat sateet yhdessä kovien tuulien kanssa lisäävät julkisivuja rasittavia viistosateita. Tuulen mukana kulkeutuu myös klorideja, jotka on otettava huomioon julkisivujen pinta- ja kiinnitysmateriaaleja valittaessa.

2.1 Korkean rakentamisen määritelmä

Korkea rakentaminen on suomennos englanninkieliselle termille High-rise building. *Korkea rakentaminen Helsingissä* -ohjeiston mukaan korkealle rakennukselle ei ole varsinaista määritystä, mutta siihen luetaan pitkälle erottuvat ympäristöään korkeammat rakennukset [Helsinki 2011]. Tampereella korkeaksi rakentamiseksi määritellään vähintään 12-kerroksisia tai yli 35-metrisiä rakennuksia [Arkkitehtistudio 2012].

Kansainvälisesti tietoa rakennuksista jakavan Emporis-sivuston [2012]. mukaan High-rise building käsittää rakennuksia, jotka ovat 35-100 metriä korkeita tai joissa on 12-39 kerrosta. Pilvenpiirtäjäksi (*skyscraper*) mielletään yli 100 metriä korkeat rakennukset [Arkkitehtistudio 2012]. Tornitalo on korkean rakennuksen synonyymi, mutta tornitalot kattavat asuin- ja toimistotalojen lisäksi myös muita tornimaisia rakennuksia, kuten vesitorneja.

2.2 Julkisivua koskevat määräykset ja ohjeet

Julkisivu kuuluu niin kutsuttuun rakennuksen vaippaan yhdessä alapohjan ja yläpohjan kanssa. Rakennuksen vaipan tehtävä on tuottaa sää-, melu-, lämpö- ja näkösuoja rakennuksen sisällä tapahtuvalle toiminnalle. [RIL 2011: 151.] Suomen rakentamista ja alueiden käyttöä säätelee maankäyttö- ja rakennuslaki ja -asetus (MRL) 132/1999, jota täydentää Suomen Rakentamismääräyskokoelman (RakMK) määräykset ja ohjeet.

MRL:n [1999] tärkeimpänä tavoitteena on pykälän 5 mukaan luoda terveellinen, turvallinen ja viihtyisä elinympäristö. Tämän saavuttamiseksi rakennuksen julkisivulla on suuri merkitys. Tähän ei vaikuta pelkästään julkisivun ulkonäkö vaan myös julkisivun oikea sekä määräysten mukainen lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Julkisivu ei myöskään saa aiheuttaa liian suuria turvallisuusriskejä esimerkiksi palotilanteessa tai ankarien sääolosuhteiden vallitessa. Lukuihin 2.2.1–2.2.4 on koottu tärkeimpiä julkisivujen suunnittelua ohjaavia määräyksiä ja ohjeita.

2.2.1 Lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Rakennuksen ja rakennusmateriaalien eliniän kannalta niiden oikea lämpö- ja kosteustekninen toiminta ovat erittäin tärkeitä. Suomi on sitoutunut vähentämään energiankäyttöä ja samalla kasvihuonepäästöjä. Tämän seurauksena uudisrakennusten lämmöneristysmääräyksiä on kiristetty merkittävästi viime vuosina. Kiristyneiden lämmöneristysmääräysten myötä on alettu rakentaa matalaenergiataloja, jotka virheellisesti suunniteltuna voivat aiheuttaa merkittäviä terveyshaittoja. Rakennuksen vaipan lämpö- ja kosteusteknistä suunnittelua ja toteutusta säätelevät pääasiassa Suomen RakMK osat D3 [2012] *Rakennuksen energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet* sekä C2 [1998] *Kosteus, määräykset ja ohjeet*.

Muita rakennuksen lämpö- ja kosteusteknisiä ohjeita antavat muun muassa RIL 250-2011 *Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen* ja RIL 107-2012 *Rakennuksen veden- ja kosteuseristysohjeet*. Lämmön- ja kosteusteknisen laskennan ohjeita ja kaavoja löytyy esimerkiksi Dick Björkholtzin [1997] kirjoittamasta *Lämpö ja kosteus* -kirjasta sekä Mikael Mäkitalon diplomityöstä [2012]; *Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa*. Ilmastonmuutoksen ja matalaenergiarakentamisen vaikutusta vaipparakenteessa on tutkittu FRAME-hankkeessa.

RakMK D3 Rakennuksen energiatehokkuus

Suomen rakentamismääräyskokoelma D3 astui voimaan 1. heinäkuuta 2012 ja on velvoittava uudisrakennuksille. Määräyksissä edellytetään rakennuksen energiatehokkuuden (E-luku) laskemista. E-luku kuvaa, kuinka paljon ostoenergiaa korreloituna energiamuotojen kertoimilla kuluu vuodessa rakennuksen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Uudisrakennuksissa E-luvun on oltava asuinkerrostaloissa enintään 130 kWh/m² ja toimistotaloissa enintään 170 kWh/m². [RakMK D3 2011: 8–9.]

Rakennuksen energiatarpeen määrittämisen kannalta rakennuksen vaipan lämpöhäviöllä on suuri merkitys. Rakennuksen lämpöhäviö riippuu rakennusosan lämmöneristävyydestä, jota merkitään lämmönläpäisykertoimella U . Rakennusosan lämmönläpäisykerroin U (W/(m²K)) kertoo, kuinka paljon lämpöä siirtyy pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan läpi, kun rakennusosan pintojen lämpötilaero on yhden asteen suuruinen. Seinän suunnittelussa käytettäviä lämmönläpäisykertoimen vertailuarvoja lämpimän ja puolilämpimän tilan rakennusosille näkyy alla olevasta taulukosta (taulukko 1). Lämpimän tilan mitoittava huonelämpötila on oltava lämmityskaudella vähintään +17 °C ja puolilämpimän tilan huonelämpötila on vastaavasti oltava +5 °C ja +17 °C välillä. Lämmönläpäisykertoimen laskemisesta on lisää luvussa 3.2.1 Lämmönläpäisykerroin U sekä RakMK osassa C4. [RakMK D3 2011: 5; Helsinki 2011]

Taulukko 1. Lämpimän ja puolilämpimän tilan julkisivuja koskevia lämmönläpäisykertoimen U vertailuarvoja Rakentamismääräyskokoelma D3 [2011] mukaan.

Lämmönläpäisykerroin U (W/(m ² K))		
Rakennusosa	Lämmin tila	Puolilämmin tila
Seinät	0,17	0,26
Ikkunat ja ovet	1,0	1,4

Rakennusosissa saa olla pieniä kylmäsiltoja, eli osia, jotka ylittävät edellä olevat lämmönläpäisevyyden vertailuarvot. Kylmäsiltoja ei kuitenkaan saa johtaa kosteuden tiivistymiseen rakennusta normaalisti käytettäessä. Rakennusosan kosteusteknisen toimintaan on myös kiinnitettävä huomiota varsinkin käytettäessä rakennusosia, joiden lämmönläpäisevyyksikertoimet ovat edellä olevia vertailuarvoja pienemmät. [RakMK D3 2011: 11.]

Rakennuksen tiloille on lisäksi asetettu lämmitys- ja jäähdytyslämpötilarajat. Asuintalojen lämpötilan on oltava 21–27 °C, toimistotaloissa sekä majoitusliikerakennuksissa 21–25 °C. Samoin rakennuksen ilmanvaihtomäärälle ja ilmanvuotoluvulle on asetettu raja-arvot. Laskelmissa tarvittavia säätietoja löytyy RakMK osan D3 liitteestä 2. [RakMK D3 2011: 10, 18, 29.]

RakMK C2 Kosteus

Rakentamismääräyskokoelman osa C2 tuli voimaan 1. tammikuuta 1999. Määräysten mukaan rakennusosiin ja niiden sisäpinoille ei saa kertyä rakennuksen suunnitellun käyttöikänsä aikana kosteutta, joka voi aiheuttaa hygienia- tai terveystarvikkeiden rakennuksen käyttäjille. Rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta on varmistuttava luotettavin selvityksin, jotka ovat yleensä laskennallisia tai kokeellisia. [RakMK C2 1998: 3, 5.]

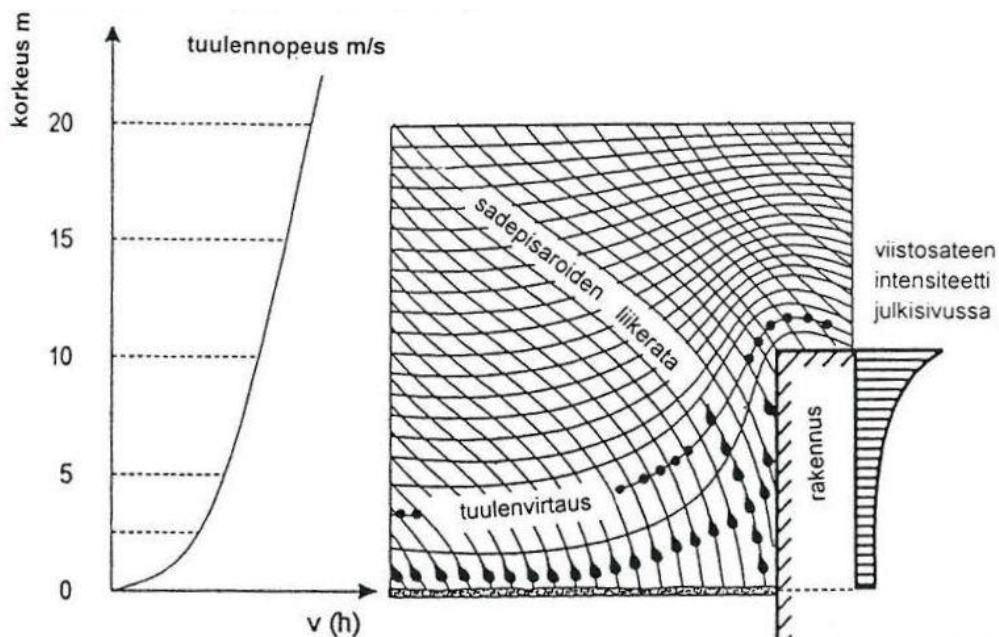
Rakennus on suunniteltava siten, ettei vesihöyry, vesi tai lumi pääse haitallisesti tunkeutumaan rakenteisiin. Samalla satunnaisesti rakenteisiin joutuneen veden tai kosteuden on kyettävä poistumaan tai kuivumaan vaurioita aiheuttamatta. Rakennuksen vaipan on samalla oltava niin ilmatiivis, että rakennus on mahdollista pitää alipaineisena esimerkiksi koneellisella ilmastoinnilla. Rakennusosat eivät myöskään saa kastua haitallisesti kuljetuksen, varastoinnin ja rakentamisen aikana. [RakMK C2 1998: 4, 9.]

2.2.2 Merenrantarakentaminen

Rannikolla on pitkälti samanlaiset ympäristöolosuhteet kuin sisämaassa, mutta rasisuuden ankaruus on huomattavasti suurempi vesistön äärellä. Merenrannan lisärasituksen tuo tuulen mukana kulkeutuvat kloridit, jotka vaikuttavat julkisivumateriaalien valintaan ja detaljien korroosiokestävyyteen. Suunnittelun kannalta haastavinta on rantojen tuulisuus, joka vaikuttaa rakennuksen geometriaan, sijoitteluun ja jäykkyyteen mutta myös julkisivun detajiiikkaan ja materiaalien valintaan. Sisämaan ympäristörasitukseen verrat-

tuna rannikolla on enemmän viistosateita, ankarammat kosteusolosuhteet sekä suuret sulamis- ja jäätymisrasitukset. [Varis ym. 2009.]

Tuulisuus lisää voimakkaasti viistosateen määrää, minkä seurauksena julkisivumateriaalien tulisi olla huonosti vettä läpäiseviä tai veden tukeutumisen on estettävä erillisellä ”sadetakilla”. Sadetakilla tarkoitetaan yleensä metallilevyä taikka muuta vesitiivistä materiaalia, joka asennetaan varsinaisen julkisivumateriaalin taakse muodostaen vesitiiviin julkisivun. Voimakkaan tuulenpaineen seurauksena vesi saattaa myös kulkeutua suoraan ylöspäin, mikä on otettava huomioon detaljisuunnittelussa. Samalla saumoja ja detaljeja kannattaa suuren vesi- ja kosteusteknisen rasituksen kannalta olla mahdollisimman vähän. [Varis ym. 2009.] Kuvasta 3 ilmenee, miten sateen liikerata muuttuu tuulen seurauksena. Jo 10 metriä korkean rakennuksen seinät altistuvat merkittävälle viistosaderasitukselle, jolloin yli sata metriä korkean rakennuksen julkisivuihin sade saattaa tulla myös vaakasuunnassa.



Kuva 3. Tuulen aiheuttama viistosaderasitus julkisivulle [RTT 1998].

Tuulen suunta ja merivedestä heijastuva auringonvalo vaikuttavat voimakkaasti rakennuksen suunnitteluun ja energiankäyttöön, kuten tilojen lämmitykseen ja jäädytykseen. Julkisivumateriaalin valinnan ja huoltojen kannalta on huomioitava että suurempi UV-säteily ja ankara kosteusrasitus vanhentavat materiaaleja tavanomaista nopeammin. Uusien energiamääräysten myötä tulleet paksueristeiset rakennetyypit ovat ra-

kennusfysikaalisesti riskialttiita varsinkin merenrannoilla. Tästä johtuen niiden pitkäaikainen rakennusfysikaalinen toiminta on suunniteltava huolellisesti. [Varis ym. 2009.]

2.2.3 Palomääräykset

Rakennuksen paloturvallisuutta säätelee RakMK osan E1, jonka keskeisten vaatimusten mukaan palo ja savu eivät saa levitä haitallisesti rakennuksessa eivätkä naapurissa oleviin rakennuksiin. Palon sattuessa rakennuksesta on päästävä poistumaan tai henkilö on toisella tavalla oltava pelastettavissa. Palavan talon läheisyys ei myöskään saa olla vaarallinen, jotta sammutustyöt ja henkilöiden pelastaminen on mahdollista. [RakMK E1 2011: 8, 33.] Julkisivurakenteiden kannalta tämä on huomioitava niin, ettei materiaaleja ala pudota talon palaessa ja näin olleen vaaranna pelastushenkilöstön turvallisuutta.

Ulkoseinä on suunniteltava siten, ettei palo pääse leviämään ulkopintaa pitkin eikä seinärakenteen sisällä. Palo ei myöskään saa levitä ikkunaliitosten eikä osastoivan seinän ja ulkoseinän liitoksen kautta. Sisäpuolisten materiaalien valinnassa on huomioitava niiden palokäyttäytyminen, kuten kuinka nopeasti materiaali leimahtaa, paljonko siitä vapautuu lämpöä sekä erittykö siitä savua ja palavia pisaroita. [RakMK E1 2011: 19–20.]

Rakennustarvikkeet on jaettu luokkiin A1–F, joista A1-luokan materiaali ei osallistu ollenkaan paloon ja F-luokan materiaalien palokäyttäytymistä ei ole määritelty. A1-luokan materiaaleja ovat esimerkiksi mineraalivilla, solulasi, betoni, kipsi, lasi, alumiini, teräs ja keraamit. Materiaalien savuntuotolle on luokitukset s1, s2, s3, joista s1-luokan materiaali savuttaa erittäin vähän. Lisäksi luokat d0, d1, d2 kertovat esiintyykö materiaaleissa palavia pisaroita, sekä sammuvatko pisarat nopeasti. Palavan pisaroinnin luokka d0 tarkoittaa, ettei palavia osia tai pisaroita esiinny. [RakMK E1 2011: 5, 41–42.]

RakMK osan E1 mukaan Kalasataman tornitalot kuuluvat paloluokkaan P1. Tämä on paloluokista P1–P3 vaativin, eikä aseta vaatimuksia henkilömäärän taikka kerrosluvun suhteen. Kohteen ulkoseinät ovat ei-kantavia, jolloin niiden kantavuusajoille ei ole vaatimuksia mutta niissä käytettävien rakennusmateriaalien on kuuluttava vähintään luokkaan B-s1, d0. [RakMK E1 2011: 11, 24.] Tornitalojen paloturvallisuutta on myös lisättävä esimerkiksi sammutus- ja pelastustyön käyttöön tulevilla palomieshissillä sekä asuntoihin tulevilla sprinklerillä [Laaksonen 2013].

2.2.4 Muut ohjeet

Asemakaavan mukaan Kalasataman tornitalojen julkisivujen on oltava yleisilmeeltään vaaleita. Julkisivumateriaalina on mahdollista käyttää metallia, lasia, luonnonkiveä tai keraamista laattaelementtiä. Rakennuksessa ei saa olla useiden kerrosten korkuisia yhtenäisiä lasipintoja. Lasipintojen ei tulisi olla voimakkaasti peilaavia ja vihreitä lasituksia tulee välttää. [SRV 2012.]

SRV:n laatiman *Kalasataman keskuksen tornien ulkoseinien suunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet* (19.10.2012) mukaan halutaan yksinkertaisia ja kaikin puolin toimintavaroja julkisivuelementtejä. Julkisivupinnasta halutaan yhtenäinen ja sileä, ilman lunta ja jäätä kerääviä ulokkeita ja säleikköjä. Asunnoissa tulisi olla suuria ikkunapintoja ilman näköalaa peittäviä esteitä. Julkisivu ei saa vaarantaa turvallisuutta esimerkiksi lasituksen putoaminen on estettävä ja sirpaleturvallisuus on otettava huomioon. Asumisviihtyvyyden takia julkisivun on oltava tiivis, hyvin ääntä eristävä eikä valittu rakennetyyppi saa heikentää matkapuhelimen toimivuutta. [SRV 2012.]

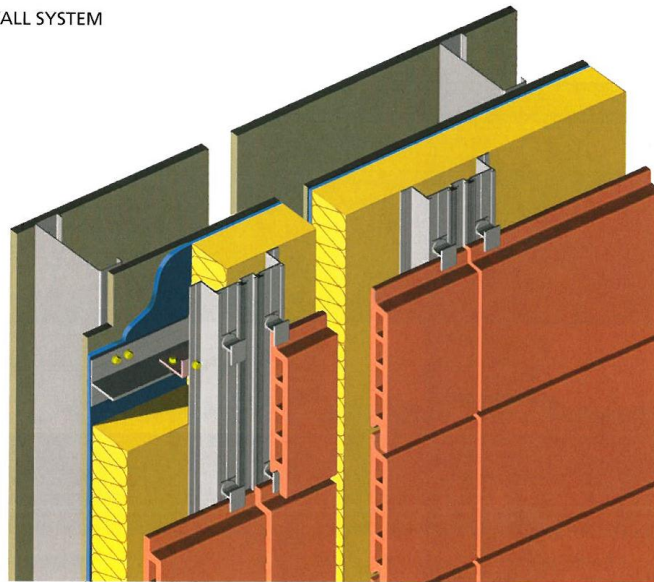
Julkisivun tulee olla mahdollisimman huoltovapaa ja materiaalien tulee kestää alueen olosuhteita. Rakennusfysikaaliset rasitukset on otettava huomioon. Niistä keskeisimmät ovat: meren aiheuttama suolarasitus, kova tuulirasitus, rakennuksen vaipan veden- ja ilmanpitävyys, materiaalien pakkasen- ja korroosionkestävyys, jään ja lumen kertyminen vaakapinnoille, UV säteilyn aiheuttama rasitus sekä julkisivun likaantuminen. Julkisivuelementeissä tulisi olla kaikki materiaalit ja kiinnikkeet paikallaan ennen niiden asentamista ja elementtien kiinnitys tehdään sisäpuolelta. [SRV 2012.]

Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto on julkaissut ohjeiston: *Korkea rakentaminen Helsingissä* (4:2011). Ohjeistossa otetaan kantaa lähinnä arkkitehtoonisiin kysymyksiin kuten kaupunkikuvaan, rakennusten sijoitteluun ja palvelujen sekä liikenteen yhdistämiseen rakennuskeskittyisiin. Rakennesuunnittelun näkökohdasta ohjeistossa halutaan korostaa korkeaan rakennukseen kohdistuvia tuulirasituksia sekä talojen paloturvallisuutta. Ohjeessa nostetaan esille myös auringon heijastumisesta ja rakennusten varjostamisesta aiheutuvia ongelmia. Julkisivujen kannalta ohjeistetaan niiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja vedenpitävyyden tarkistamista myös kokeellisesti. [Helsinki 2011.]

2.3 Ulkoseinärakennetyypin valinta

Korkeiden rakennusten ulkoseinät tehdään lähes poikkeuksetta kevytrakenteisista elementeistä, joissa julkisivumateriaalina käytetään ruostumatonta erikoisterästä ja lasia. Meren läheisyys asettaa teräksisille julkisivuille suuren korroosiovaaraan, mikä on otettava huomioon julkisivujen suunnittelussa ja teräslajien valinnassa. Betonielementit soveltuvat toisaalta erittäin hyvin rantarakentamiseen mutta painonsa ja vaikean saumattavuuden takia sitä ei käytetä usein tornitalojen julkisivuissa. Tornitalojen julkisivuihin sopisi myös esimerkiksi keraaminen laatta tai luonnonkivi. Alla on esimerkki (kuva 4) keraamisesta TerraCotta-laatasta. Laatan hyviin ominaisuuksiin kuuluu sen pakkasenkestävyys, vedentiiveys, yksinkertainen asennettavuus sekä rikkoutuneen laatan helppo vaihtaminen.

METAL STUD WALL SYSTEM



Kuva 4. Periaatekuva julkisivuun asennettavasta keraamisesta TerraCotta-laatta-järjestelmästä [Terrart 2006].

Nykyään käytetään paljon kaksoisjulkisivuja korkeissa rakennuksissa. Kaksoisjulkisivu on niin kutsuttuun lasihuntuun verhottu rakennus. Tämä ulkopuolinen lasitus suojaa varsinaista rakennuksen julkisivua ympäristörasituksilta, eli toimii käytännössä julkisivun ”sadetakkina”. [Mäkeläinen ym. 2003: 8.] Kaksoisjulkisivun ilmatila on usein leveämpi kuin tavallinen ilmarako.

Palotilanteessa henkilöturvallisuuden kannalta tornitalojen ulkoseinämateriaalien tulee olla palamattomia eli lämmöneristeen tulee käytännössä olla mineraalivillaa. Toisaalta

ohuempien seinäpaksuuksia tavoiteltaessa, polyuretaani olisi hyvä vaihtoehto, sen erinomaisen lämmöneristävyyden kannalta. Polyuretaani on vaikeasti syttyvä, mutta siitä erittyy palotilanteessa ihmiselle haitallisia kaasuja, minkä takia sen käyttö ei ole suositeltavaa varsinkaan korkeissa rakennuksissa [Laaksonen 2013]. Korkeissa julkisivuissa voimakas savupiippuvaikutus saa melkein minkä tahansa materiaalin palaamaan [Laaksonen 2013; Meriläinen 2013]. Savupiippuvaikutuksesta on lisää luvussa 3.3.3 Rakennuksen painesuhteet. Viime aikoina on uutisoitu monista tornitalopaloista esimerkiksi Dubaissa ja Kiinassa, joissa palot aiheutuivat muovipohjaisten eristeiden syttymisestä ja nopeasta leviämisestä eristeen kautta [Laaksonen 2013].

Teknisesti laadukas vaipparakenne on kosteusteknisesti toimiva ja tiivis. Vaipan tiiveyden saavuttamiseksi rakenteet on oltava huolellisesti suunniteltuja ja niiden asennuksessa on oltava tarkkana, ettei synny tarpeettomia kylmäsiltoja, kosteuskertymiä, ilma- ja lämpövuotoja. Höyrynsulku on hyvin keskeinen laatutekijä rakennuksen tiiveyden kannalta. Höyrynsulun tulisi olla reiätön, jolloin se kannattaa sijoittaa niin syvälle rakenteisiin, etteivät esimerkiksi sähköasennukset pääse puhkomaan sitä. Rakennuksia ei kuitenkaan saada absoluuttisen tiiviiksi ja kosteutta pääsee tavalla tai toisella rakennuksiin, jolloin rakenteiden kuivuminen on mahdollistettava. [RIL 2011: 22.]

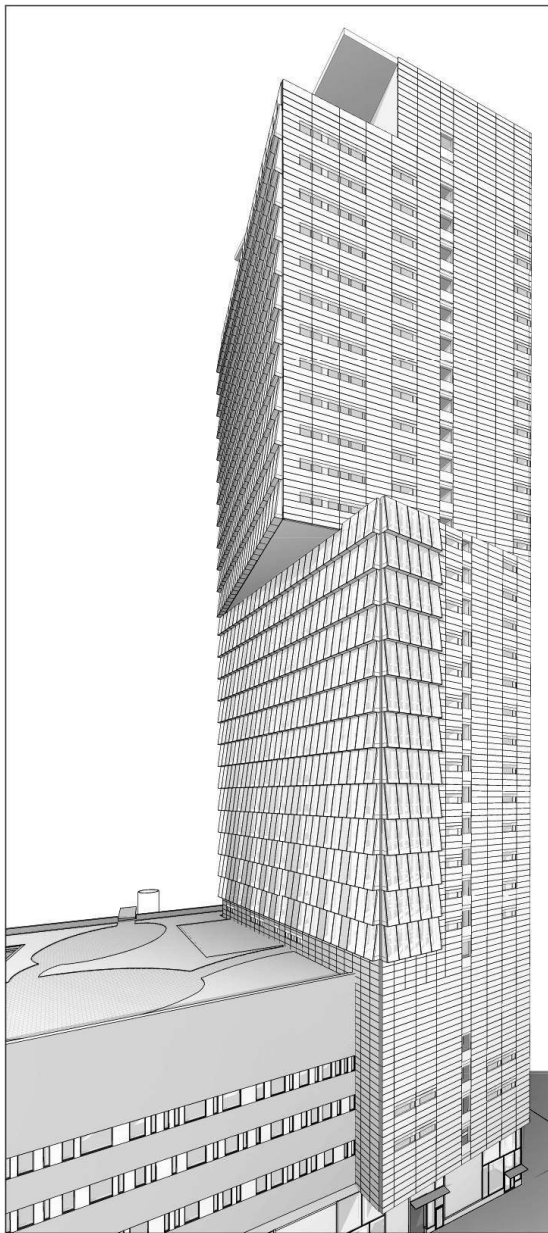
Tuuletusraon tehtävä on kuivattaa rakennetta. Vanhan käytännön mukaan rakenteen tulee harveta ulospäin mentäessä, jolloin huokoisemmat materiaalit ulkopinnassa mahdollistavat rakenteen kuivumisen. Tuuletusrako kuivattaa myös ulkoa tulevaa kosteutta. Esimerkiksi liitoksista tai tiilen läpi voi tulla vettä, jonka on päästävä kuivumaan. Tornitaloissa julkisivun vesitiiveydellä on erittäin suuri merkitys suuren viistosaderasituksen vuoksi. Vesitiiveyden saavuttamiseksi korkeissa rakennuksissa on usein tehtävä erillinen ”sadetakki”, jolloin teräs- taikka alumiinilevy asennetaan vettäläpäisevän julkisivumateriaalin taakse muodostaen kaksi erillistä tuuletusrakoa [Meriläinen 2013].

2.4 Tutkittavat rakennetyypit

Kalastamaan tornitalojen julkisivuratkaisuja ei ole vielä lopullisesti valittu. Eri rakennetyyppejä ja materiaalivaihtoehtoja on tutkittu ja niistä on valittu pari jatkoselvityksiä varten. Näiden rakennetyyppien runko on sama ja niiden rakenteet on sisäpinnasta ulkopintaan seuraavat: kipsilevy, vanerilevy, 50 mm lämmöneriste, höyrynsulkuna toimiva alumiinilevy, alumiinirunko ja lämmöneristeenä Paroc Cortex One, tuulensuojalevy ja

tuuletusrako. Julkisivumateriaalina on joko yksinkertainen suora lasi taikka viistolasinen kaksoisjulkisivu. Jatkoselvityksiä varten valitut rakennetyypit löytyvät liitteestä 2.

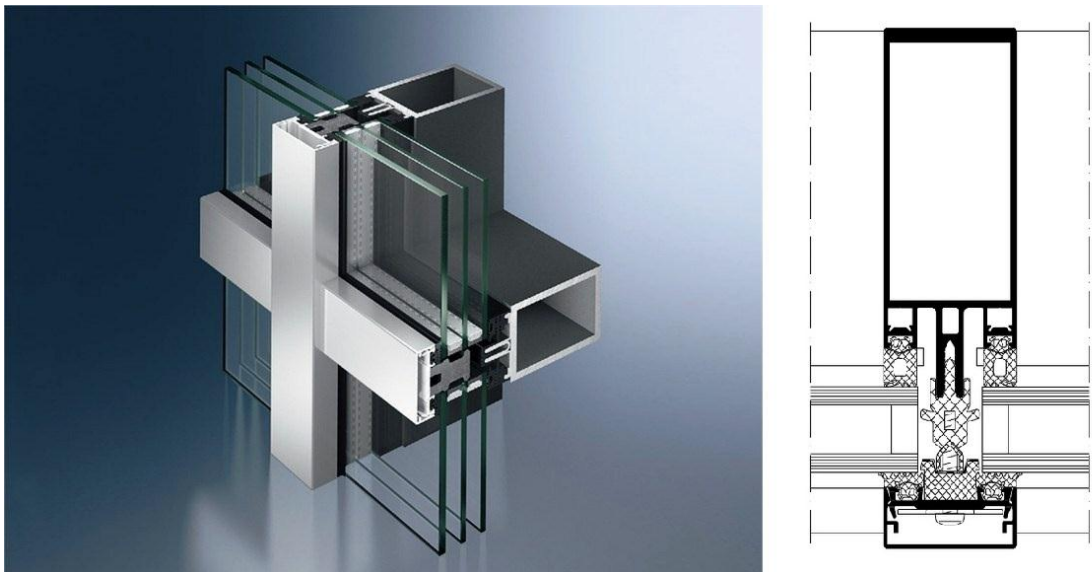
Tutkittavat rakennetyypit soveltuvat erittäin hyvin Kalasataman tornitaloihin, joissa halutaan mahdollisimman suuria ikkunapintoja asuntoihin samalla kun kohteessa on erittäin ankarat ympäristörasitukset. Kaksoisjulkisivuilla saadaan myös asukkaiden mukavuutta lisäävät ranskalaiset parvekkeet asuntoihin. Kuvassa 5 on perspektiivikuva yhdestä Kalasataman tornista, jossa porrastettu julkisivupintapinta on kaavailtu toteuttaa kaksoisjulkisivulla ja sileää vastaavasti yksinkertaisella lasituksella.



Kuva 5. Kalasataman tornitalon perspektiivikuva [Helin & Co. Arkkitehdit].

Rakennetyyppien materiaalien valintaan vaikuttivat monet asiat, joista keskeisimmät valintaperusteet on esitetty seuraavaksi. Sisäpinnassa ei palovaatimusten takia riitä pelkkä yksinkertainen kipsilevy vaan lisäksi sen alle on laitettava 12 mm vanerilevy, joka samalla parantaa elementin käsittelyä ja helpottaa esineiden kiinnittämistä sisäseinälle. Lisälämmöneristeen paksuudeksi on valittu 50 mm, jotta sähköasennukset olisi helpompi tehdä. Sähköasentajien toiveena on, että rakennuksen sisäpinnasta höyrynsulkuun olisi 80 mm tilaa sähköasennuksia varten, mikä melkein toteutuu valituissa julkisivurakenteissa [Meriläinen 2013]. Seinän höyrytiiveyden saavuttamiseksi höyrynsulkuna käytetään 2 mm alumiinilevyä, joka liitetään tiiviisti alumiinirunkoon.

Ulkoseinän runkojärjestelmäksi on ehdotettu Schüco:n tapainen alumiini-lasirakenne. Schüco on pitkälle kehitetty järjestelmä, jonka komponentit helpottavat elementin koossapysymistä ja lämpö- sekä kosteusteknistä toimintaa. Järjestelmän tiiveys sekä lämmöneristävyys on hoidettu yksilöllisillä kumitiivisteillä. Tiivisteet puolestaan poistavat jälkikittaustarpeen, minkä vuoksi tuote soveltuu erittäin hyvin vaikeasti huollettaviin rakennuksiin. Alla olevasta kuvasta (kuva 6) näkyy Schüco-järjestelmän pitkälle kehitetty kiinnitys-, lasitus- ja tiivistysdetaljiikka.



Kuva 6. Schüco-lasijulkisivujärjestelmän periaate- ja detaljikuva [RT 2012].

Rungon lämmöneristeeksi on suunniteltu 180 mm kivivilla tuotenimeltä Paroc Cortex One. Kivivilla ei pala ja soveltuu näin ollen hyvin P1-luokan rakennuksiin. Eristeen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ_U on vain 0,033 W/(m*K), mikä on mineraalivilloille erittäin alhainen. Lämmönjohtavuus λ ilmaisee, kuinka hyvin homogeeninen materi-

aali johtaa lämpöä ja sen suunnitteluarvoa käytetään lämmönläpäisykertoimen U laskennassa. Lisälämmöneristeen tarkoitus on vähentää kylmänsillan haittavaikutuksia. Suunniteltuihin rakennetyyppeihin on sisäpinnan lisälämmöneristeeksi valittu 50 mm Paroc eXtra, jonka λ_U on 0,036 W/(m*K).

Rakennetyyppien tuulensuojalevyksi on valittu 9 mm kova sementtipohjainen tuulensuoja, esimerkkinä Cembrit Windstopper. Periaatteessa Paroc Cortex One -lämmöneristeessä on valmiiksi tuulitiivis pinnoite, mutta ilman voimakas virtaaminen tuuletusraoissa saattaa repiä eristeet irti. Liian voimakas ilmavirtaus tuuletusraoissa heikentää paitsi rakenteen lämmöneristävyttä myös rakennuksen paloturvallisuutta, jolloin tuletraot on hyvä katkaista enintään 8-kerroksisiksi vyöhykkeiksi [Meriläinen 2013].

Lasi on teknisesti korkealaatuinen materiaali, minkä takia se soveltuu erittäin hyvin korkeisiin rakennuksiin. Lasin ainutlaatuinen ominaisuus on sen läpinäkyvyys, minkä takia Kalasatamaan halutaan suuria ikkunapintoja maiseman hyödyntämiseksi. Suuret ikkunapinnat ovat kuitenkin haasteena sisätilojen yllämpenemisen kannalta, jolloin auringonsäteilyn läpäisevyyttä on rajoitettava selektiivikalvoilla ja erillisillä sälekaihtimilla. Tornitalojen lasit on myös käsiteltävä itsepuhdistuvalla nanopinnoitteella niiden huollon helpottamiseksi. Kalasataman julkisivumateriaalien valintaan vaikuttaa ehkä eniten lasin vedentiiveys, huoltovapaus ja pitkä käyttöikä. Lasipintoja voi myös asentaa ilman lyhytikäisiä kittauksia esimerkiksi Schücon tapaisella elementtijärjestelmällä, jolloin niiden käyttöikä on erittäin pitkä. Samalla lasijulkisivu on mahdollista saada tasaiseksi, millä pyritään estää lumen ja jään kertymistä.

3 Rakennusfysiikka

Seinien rakenteet ovat muuttuneet paljon aikojen saatossa. Rakenteet olivat lähes yksiaineisia (massiivitiili- ja hirsiseinä) 1950-luvulle asti, jonka jälkeen alettiin valmistaa elementtejä ja sen seurauksena seinistä tuli kerroksellisia. Nykyään rakennetyypit koostuvat hyvin monesta eri materiaalista ja kehitetään myös uusia rakennetyyppejä samalla kun uusia materiaaleja tulee markkinoille. Rakennusfysikaalisesti ja varsinkin kosteusteknisesti kerrokselliset rakenteet ovat haastavia, minkä vuoksi rakenteen moitteettomasta toiminnasta on varmistuttava. [RIL 2011: 14.]

Kalasadamassa tuuli ja kosteusrasitukset ovat erittäin ankaria, minkä takia rakennetyyppien oikea rakennusfysikaalinen toimivuus korostuu. Vastaavalla rakennusfysiikan suunnittelijalla onkin oltava AA-tason pätevyys, juuri merenrannan läheisyyden takia. Vastaavalta rakennesuunnittelijalta vaaditaan myös AA-tason pätevyys rakennusten korkeuksien takia. [RakMK A2 2002.] Kohteen vaativustason vuoksi, vaaditaan AA-luokan pätevyyden omaava ulkopuolinen tarkastaja sekä rakennetekniikan että rakennusfysiikan osalta [RakMK A1 2006]. Keskeisimpiä asioita rakennusfysiikan suunnittelussa on ymmärtää ilman, lämmön ja kosteuden siirtyminen rakenteissa ja niiden läpi pyrkiessään tasapainotilaan ympäristön kanssa [RIL 2001: 152].

3.1 Tulevaisuuden lisähaasteet

Sekä ilmastonmuutos että matalaenergiarakentaminen ovat kosteudenhallinnan kannalta epäsuotuisia. On arvioitu, että Suomen ilmasto muuttuu sadan vuoden sisällä mm. seuraavasti; keskilämpötila nousee, sade ja kosteus lisääntyvät, tuuli lisääntyy, viistosateen ovat ankarampia, talvet ovat leudompia ja kesäkuukaudet ovat kosteampia. Tämä tarkoittaa, että rakenteiden kosteusrasitus kasvaa merkittävästi ja on vaarana, etteivät rakenteet ehdi kuivumaan niin kutsutun kuivatuskauden eli kevään ja kesän aikana. [RIL 2001: 18.]

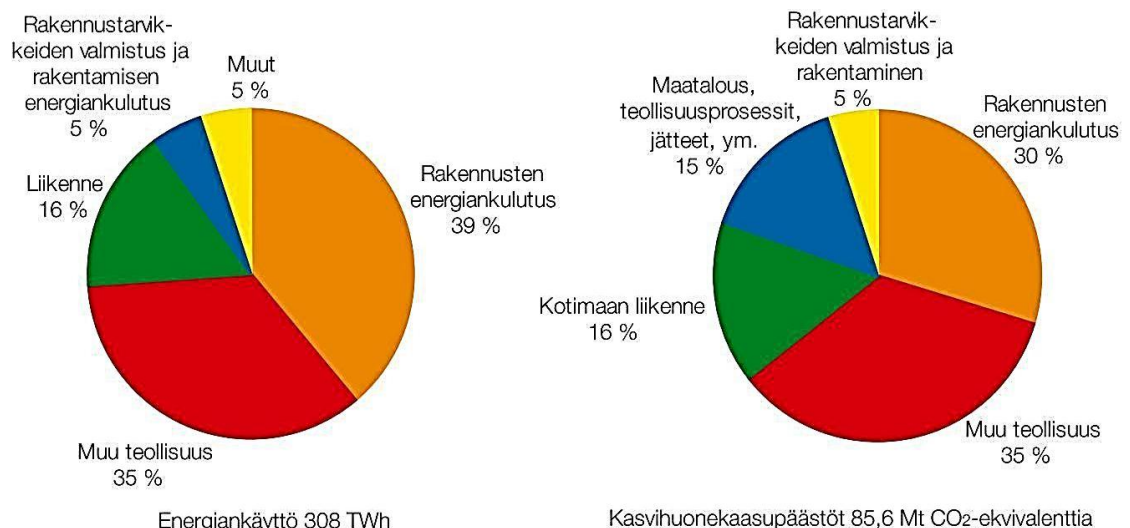
Kioton ilmastopimuksen myötä on sitouduttu alentamaan kasvihuonepäästöjä. Euroopan Unionin toimenpideohjelman 20-20-20 tavoitteena on energiakulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen pienentämiseksi samalla suosien uusiutuvia energialähteitä. Tavoitteena on pienentää vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä hiilidioksidipäästöjä

20%, parantaa energiatehokkuutta 20% ja lisätä uusiutuvien energialähteiden osuutta 20% (kuva 7). [Meriläinen 2012.]



Kuva 7. EU:n energiansäästö tavoitteet vuoteen 2020 mennessä [Meriläinen 2012].

Suomen kokonaisenergiakulutuksesta meni vuonna 2005 noin 40% rakennuksiin. Samalla rakennusten hiilidioksidipäästöt olivat 30% (kuva 8). EU:n energiatavoitteen saattamiseksi on lainsäädännöllä lähdetty leikkaamaan lähinnä rakennusten energia-käyttöä ja hiilidioksidipäästöjä. [Mäkitalo 2012: 9].



Kuva 8. Suomen energiakäytön ja kasvihuonepäästöjen jakautuminen vuonna 2005 [Mäkitalo 2012: 9].

Ympäristötavoitteiden myötä tullut matalaenergiarakentaminen on muun muassa paksummaksi lämmöneristeitä, jotka ovat rakennusfysikaalisesti haastavia. Paksummat eristeet eivät kastuessaan välttämättä pääse kuivumaan, jolloin ne aiheuttavat merkittävän homeutumisen riskin. Tämän takia eristeiden kastumista on vältettävä sekä rakentamisen että käytön aikana. Sekä ilmastonmuutoksen että matalaenergiarakentamisen muutosten myötä vaipan sisäpinnan tiiveyden ja ulkopinnan tuulettuvuuden merkitys on kasvanut. [RIL 2011: 17.]

3.2 Lämmön siirtymismuodot

Lämpöenergia pyrkii tasoittumaan siirtymällä lämpimämmästä kylmempään johtumalla, säteilemällä tai konvektion avulla. Ulkoseinää tarkasteltaessa lämmön johtuminen on merkittävin lämmön siirtymismuoto. Johtuminen perustuu molekyylien liike-energian siirtymiseen molekyylisestä toiseen, jolloin hyviä lämmönjohtajia ovat esimerkiksi metallit ja huonoja vastaavasti huokoiset lämmöneristeet. Rakennuksen vaipan suunnittelussa käytetään materiaalien lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvoa λ_U tai normaalista lämmönjohtavuutta λ_n , jotka huomioivat kaikki materiaalissa tapahtuvat lämmön siirtymismuodot. [Mäkitalo 2012: 12–13.]

Lämmön siirtyessä nesteen tai kaasun välityksellä tätä kutsutaan konvektioksi. Konvektio on joko luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa ilmavirtausta aiheuttavat ilman tiheyserot, jotka puolestaan johtuvat lämpötilaeroista. Luonnollista konvektiota kutsutaan myös savupiippuilmioiksi, josta on lisää luvussa 3.3.3 (Rakennuksen painesuhteet). Pakotettu konvektio aiheutuu ulkoisesta voimasta kuten tuulesta, puhaltimista tai ilmanvaihdon aiheuttamasta paine-erosta. Ulkoseinissä konvektio aiheutuu sisä- ja ulkopinnan lämpötilaerosta, ilmanvaihdon aiheuttamasta alipaineisuudesta ja huokoisen eristeen sisäisestä konvektiosta. Yli 200 mm paksujen eristeiden sisäinen konvektio ja eristeen asennuksessa muodostuvien epätäydellisten kontaktipintojen ilmavirtaukset alentavat eristyskykyä huomattavasti ja jopa -20 %. [Mäkitalo 2012: 15–17.]

Säteily on sähkömagneettista aaltoliikettä, joka muuttuu lämmöksi sen absorboituessa eli imeytyessä johonkin aineeseen. Musta kappale absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn kun taas kirkkaat ja sileät pinnat, kuten metallit heijastavat suurimman osan aalloista. Suurin osa rakennusmateriaaleista absorboi 80–95 % säteilystä. Säteily ei pelkästään absorboitu materiaalin pinnalla, vaan se myös heijastuu tai jopa läpäisee materiaalin kuten lasin. Kaikki materiaalit säteilevät, mutta aurinko on ulkoseinän merkittävin säteilijä. Seinän ulkopinta lämpenee tehokkaasti auringon valossa, minkä takia rakenteen kuivuminen tehostuu. [Mäkitalo 2012: 18–19.] Aurinko lisää myös rakennuksen lämpökuormaa, minkä seurauksena rakennusta saatetaan joutua jäähdyttämään kesäaikana.

3.2.1 Lämmönläpäisykerroin U

EU:n tavoitteena on päästä lähes nollaenergiarakentamiseen vuoteen 2021 mennessä [Kurnitski 2012]. Toisin sanoen rakennuksen energiatehokkuuden eli E-luvun on oltava lähes nolla. Nollaenergiarakentamisen saavuttamiseksi on lainsäädännöllä alettu poistamaan lämpövuotoja, esimerkiksi rajoittamalla rakennusosien lämmönläpäisykerroimia. Kuvassa 9 näkyy Rakentamismääräysten kehittymisen 1970-luvulta tähän päivään. Esimerkiksi ulkoseinän lämmönläpäisykerroin U on muuttunut noin 35 vuodessa arvosta 0,4 W/(m²K) arvoon 0,17 W/(m²K). Samoin yläpohjan, alapohjan ja ikkunoiden U-arvoja on tiukennettu energian säästämiseksi.

	C3 1976	C3 1978	C3 1985	C3 2003	C3 2007	C3 2010	D3 2012	?
Ulkoseinä, W/(m ² K)	0,40	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17	0,17	
Yläpohja, W/(m ² K)	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09	0,09	
Maanvarainen alapohja, W/(m ² K)	0,40	0,40	0,36	0,25	0,24	0,16	0,16	
Ikkuna, W/(m ² K)	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1,0	1,0	
Lämpöhäviön kompensatoraja, %				10	20	30	vapaa	
Ilmanpitävyys 50 Pa paine-erolla				n ₅₀ = 4,0	n ₅₀ = 4,0	n ₅₀ = 4,0	q ₅₀ = 4,0	
LTO:n vuosihyötysuhde, %				30	30	45	45	
Iv:n ominaissähköteho, kW/(m ³ /s)				2,5	2,5	2,5	2,0	
E-luku 150 m ² talolle, kWh/(m ² a)							162	lähes nolla

Kuva 9. Suomen Rakentamismääräysten kehittyminen vuodesta 1976 vuoteen 2012 [29].

Alla on lyhyesti esitetty lämmönläpäisykerroimen U laskenta. Kerroin on kokonaislämmönvastuksen R_T käänteisarvo. Lämmönvastus R (m²K/W) lasketaan lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon λ ja yksiaineisen materiaalikerroksen paksuuden d (m) avulla seuraavasti [SFS 2008]:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

R on lämmönvastus (m²K/W)

d on homogeenisen materiaalikerroksen paksuus (m)

λ on materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (W/(mK))

Lämmönvastuksen kokonaisluku, kaavassa 2 määräytyy pintavastusten sekä eri materiaalikerrosten lämmönvastuksien avulla. Sisäpuolinen pintavastus R_{si} on vaakapinnoille 0,13 m²K/W ja ulkopinnan pintavastus R_{se} 0,04 m²K/W. [SFS 2008.] Lämmönvastuk-

sen laskenta lopetetaan ulkopinnassa usein hyvin tuulettuvaan ilmvälisiin, jolloin ulkopinnan pintavastuksena voidaan käyttää sisäpinnan pintavastusta [RakMK C4 2003]. Seuraavassa on lämmönläpäisykertoimen laskennan kaava.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + \dots + R_n + R_{se}} \quad (2)$$

R_T on rakenteen kokonaislämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{si} on sisäpinnan pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

$R_{1\dots n}$ on rakennusosien lämmönvastukset ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{se} on ulkopinnan pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

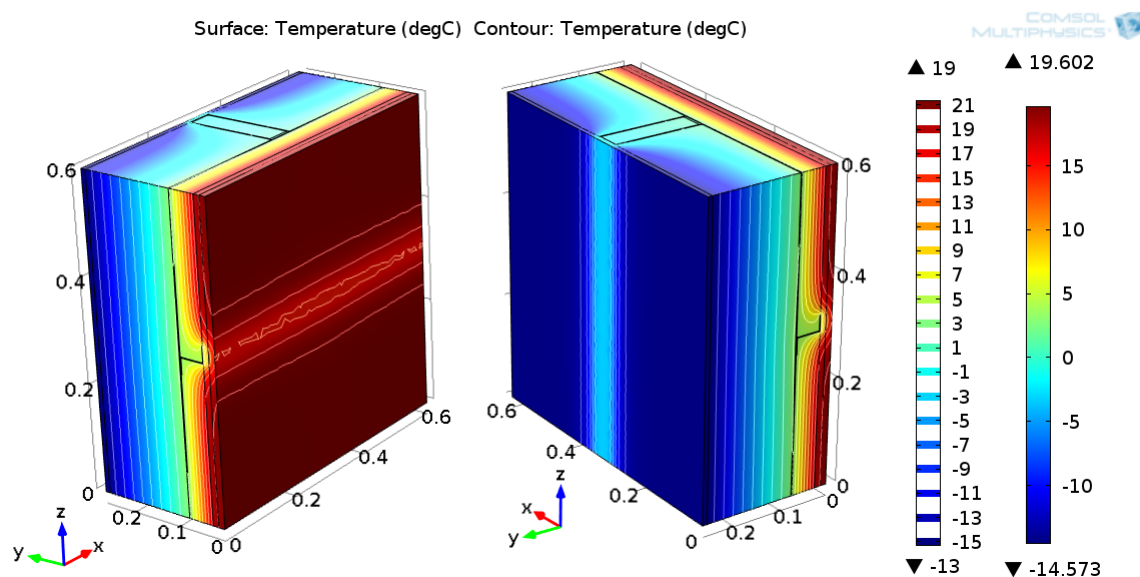
3.2.2 Lämpöjakauma rakenteessa

Lämmönläpäisykertoimen laskenta on hyvin yksinkertaista lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorille kerroksille. Yksittäisiä runkotolppia pystyy vielä lakemaan käsin mutta rakenteen sisältäessä esimerkiksi sekä vaaka- että pystysuuntaisia runkoprofiileja, U-arvon laskenta vaikeutuu oleellisesti. Tarkempaa laskentaa varten onkin kehitetty valmiita laskentapohjia ja ohjelmia. Näitä rakennusfysiikka ohjelmia on esimerkiksi DOF-Lämpö, WUFI ja COMSOL Multiphysics.

Rakenteen lämpöjakaumaan vaikuttaa läpimenevät profiilit, jolloin rakenteeseen syntyy kylmäsiltoja. Kylmäsiltojen vaikutus rakenteen lämpöjakaumaan johtuu yleensä profiilin lämmönjohtavuudesta. Esimerkiksi alumiinin lämmönjohtavuus on 160 W/(mK) kun taas teräksen lämmönjohtavuus on 50 W/(mK) ja puun $0,12 \text{ W/(mK)}$ [RakMK C4 2003]. Huomataan, että alumiinin lämmönjohtavuus on jopa kolme kertaa suurempi kuin teräksen lämmönjohtavuus samalla kun sen vetolujuus on vain noin puolet teräksen lujuudesta (katso liite 3) [Tenhunen 2003: 25]. Tästä johtuen alumiiniprofiililla on oltava suurempi rakennepaksaus, jolloin myös kylmäsiltojen vaikutus suurenee.

Kuvassa 10 on esimerkki Kalasataman ulkoseinän lämpöjakaumasta, tarkistettuna COMSOL-ohjelmalla. Kuvassa lämpötilajakauma on korostettu värein, jolloin punainen tarkoittaa lämmintä ja sininen kylmää pintaa. Kuvasta huomataan miten kylmä ilma pääsee tunkeutumaan hyvin lähelle sisäpintaa. Tämä johtuu alumiiniprofiilien muodostamasta tehokkaasta kylmäsiltojen verkosta. Rungon U-arvo on ilman alumiiniprofiileja $0,14$

$W/(m^2K)$. Alumiiniprofiilien huomioiminen nostaa lämmönläpäisykerrointa arvoon 0,46 $W/(m^2K)$, jolloin kylmäsiltojen osuus on 70 % tarkasta U-arvosta.



Kuva 10. COMSOL-ohjelmalla simuloitu lämpöjakauma tutkittavassa rakennetyypissä.

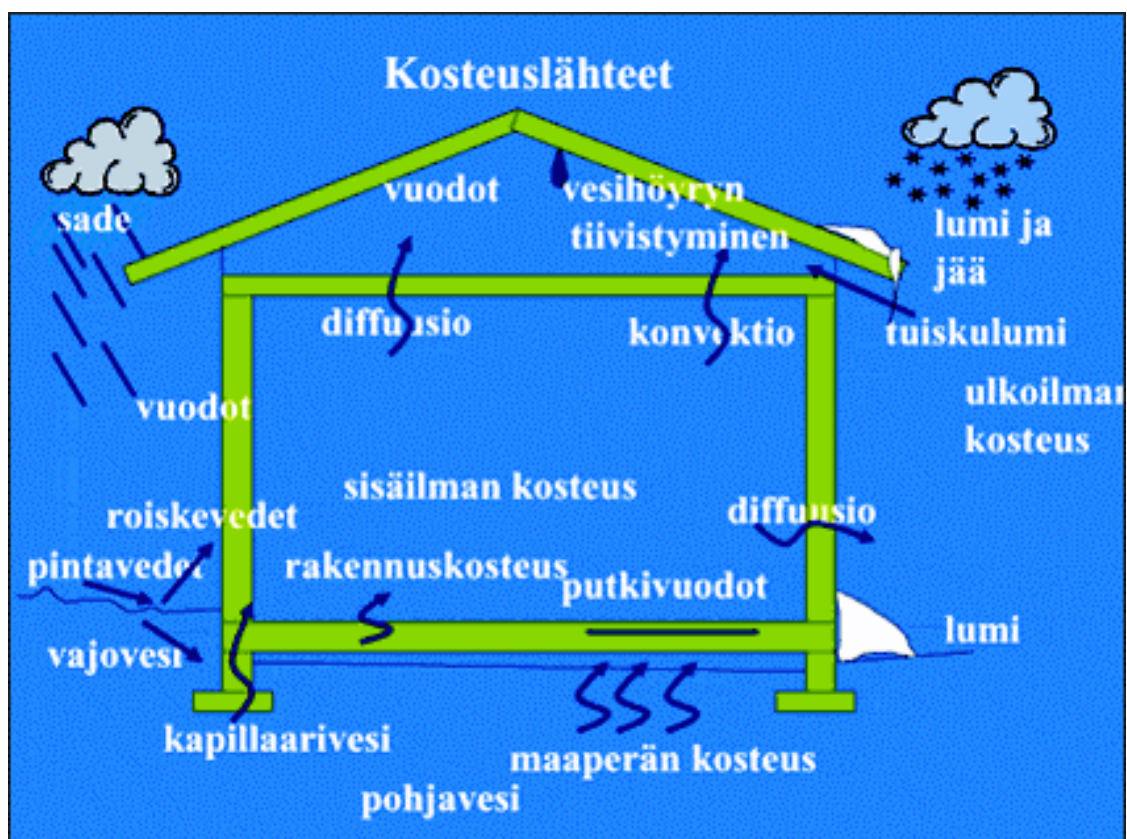
3.3 Kosteus

Ilma, kosteus ja lämpö siirtyvät fysiikan lakeja noudattaen rakenteiden läpi pyrkien tasapainotilaan ympäristön kanssa [RIL 2011: 152]. Rakennuksen vauriotapaukset johtuvat melkein poikkeuksetta liiallisesta kosteudesta. Liiallinen kosteus aiheuttaa lämmöneristeiden eristyskyvyn heikkenemisen lisäksi otollisen ympäristön homekasvulle. [Björkholz 1997: 8.] Homeesta on haittaa ihmisen terveydelle ja sen seurauksena joudutaan usein suuriin korjaustoimenpiteisiin.

Liiallinen kosteus aiheuttaa myös materiaalien lujuuden heikkenemistä ja käyttöiän alenemista. Esimerkiksi puu lahoaa, kivirakenteisiin voi tulla pakkasvaurioita ja teräsrakenteet ruostuvat. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelu kuuluu rakennussuunnittelijalle, mikä edellyttää rakennusfysiikan tuntemusta. Vain hyväksi todettu rakenne, joka on toiminut moitteettomasti riittävän pitkään, voidaan toteuttaa ilman erillistä kosteusteknistä tarkastelua. [Björkholz 1997: 8.]

3.3.1 Kosteuslähteet

Rakennuksen julkisivun kosteusrasitukset (kuva 11) muodostuvat sisäpuolisesta, ulko-
puolisesta ja rakennuskosteudesta. Kosteusrasitusten suuruudet määräytyvät: sisäpuo-
lella tapahtuvan toiminnan, rakennuksen sijainnin ja geometrian mukaan sekä raken-
nustyömaan materiaalien suojauksen tasosta. Kosteusrasituksen ankaruutta voidaan
myös kuvata ilman suhteellisen kosteuden (RH) avulla. RH:n suuruus riippuu lähinnä
lämpötilasta, sillä lämmin ilma kykenee sitomaan enemmän kosteutta kuin kylmä ilma.
Suhteellisen kosteuden ollessa 100 % ilma on vesihöyryllä kyllästynyt, jolloin vettä al-
kaa tiivistyä materiaalien pinnoille. [YM 1997: 48, 50.]

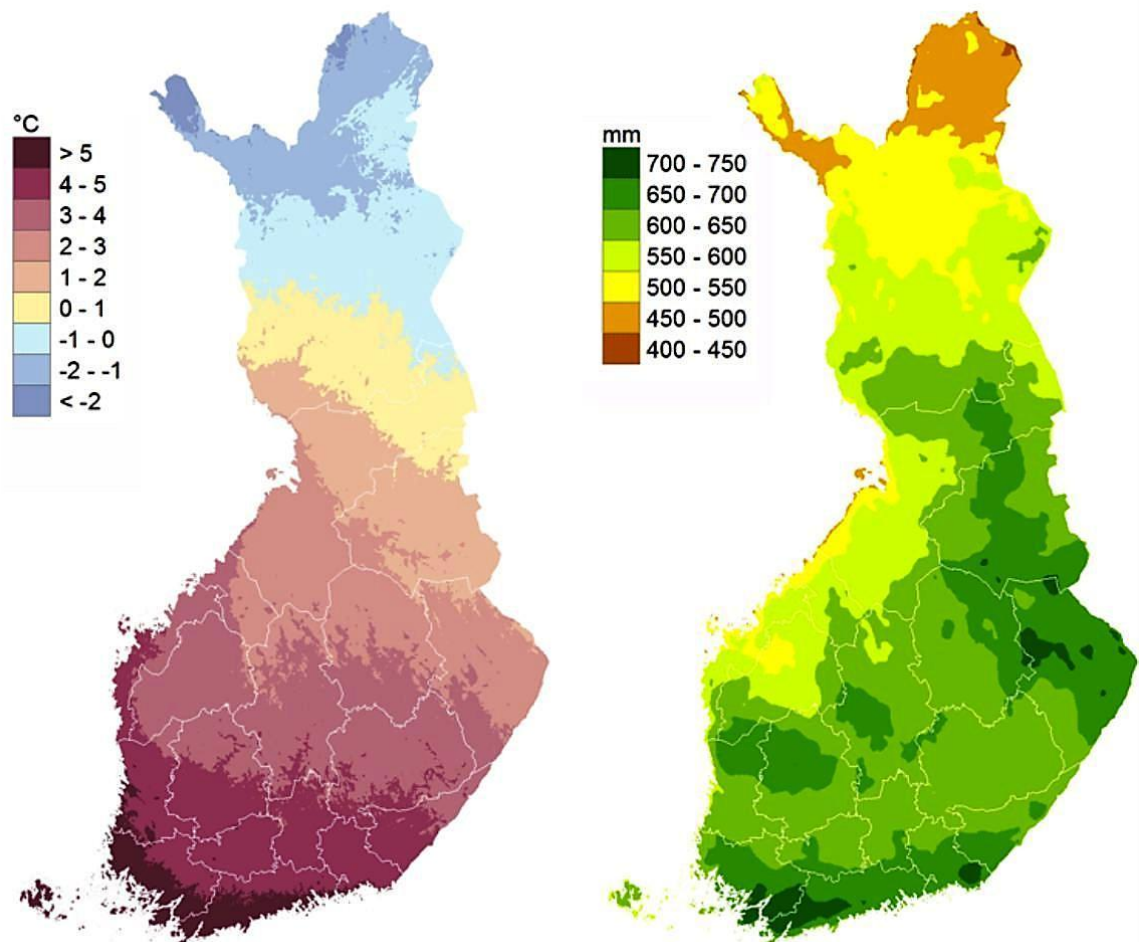


Kuva 11. Rakennuksen kosteusrasitukset [Kestävä kivitalo 2010].

Sisäpuolisia kosteuden lähteitä ovat ihmiset, eläimet, käyttövesi, pyykinkuivatus, ruoan
laitto, putkivuodot ja ilmankostuttimet. Sisälle pääsee myös kosteutta ulkoilmasta esi-
merkiksi ilmastoinnin kautta. Sisäilman kosteuspitoisuus on luokkaa 3 g/m^3 tavallisille
asuintiloille ja 2 g/m^3 toimistotiloille. Sisätila kosteusrasitukseksi luetaan myös raken-
nuskosteus, joka on tullut rakenteisiin ennen rakennuksen käyttöönottoa. Rakennus-
kosteuden tulisi kuivua yhden lämmityskauden aikana, minkä mahdollistamiseksi ra-

kennusmateriaalien riittävästä sääsuojauksesta on huolehdittava rakennusaikana. [YM 1997: 49–50.]

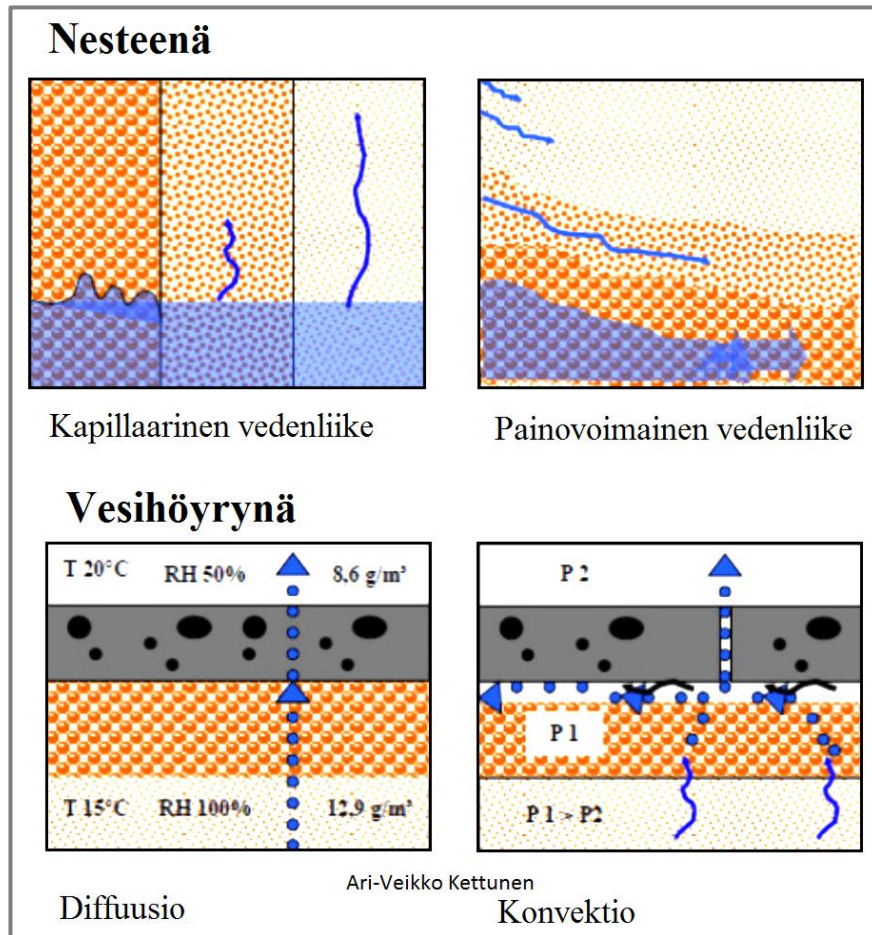
Ulkopuolisista kosteusrasituksista sade ja varsinkin viistosade muodostavat suurimmat kosteusrasitukset. Sade voi ilmetä myös lumena ja jäänä. Syksyllä saderasitus on suurin eivätkä rakenteet ehdi kuivua sadekuurojen välissä. Detaljisuunnittelussa on muistettava, että tuulen vaikutuksesta vesi saattaa liikkua ylöspäin ja lumi saattaa tunkeutua yläpohjaan. Vesi saattaa myös jäätyä ja sillä tavalla rikkoa rakenteita. [YM 1997: 51–52.] Suurin ulkopuolien kosteusrasitus määräytyy näin ollen rakennuksen sijainnin mukaan. Kuvassa 12 on havainnollistettu Suomen vuosittainen keskilämpötila ja sademäärä vertailukaudella 1981–2010. Huomataan, että etelärannikolla on sekä lämpimintä että sataa eniten.



Kuva 12. Vertailukauden 1981-2010 vuoden keskilämpötila (°C) vasemmalla ja oikealla keskimääräinen vuosisade (mm) [Ilmatieteenlaitos 2013].

3.3.2 Kosteuden siirtymismuodot

Luonto pyrkii kaikessa tasapainoon. Niin myös kosteutta siirtyy tasapainon saavuttamiseksi. Kosteutta siirtyy lähinnä ilman mukana mutta myös materiaalien huokosissa. Kuvassa 13 on kuvattu yleisimmät veden ja kosteuden siirtymismuodot, jotka ovat kapillaarinen ja painovoimainen vedenliike sekä vesihöyryn diffuusio ja konvektio.



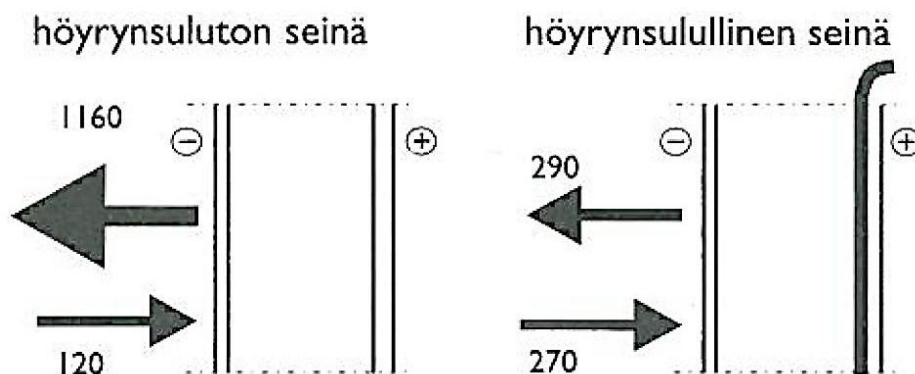
Kuva 13. Kosteuden liikkumismuodot rakenteissa. Alkuperäinen kuva [Sisäilmäyhdistys 2013].

Maan painovoima vetää massoja puoleensa. Tällöin vesikin pyrkii alaspäin, mikä otetaan huomioon julkisivun läpi tulleen veden poistamisessa tuuletusraon avulla. Vesi siirtyy myös ylöspäin esimerkiksi kapillaarisesti tai pakotetun konvektion eli tuulen avulla.

Kun huokonen tai rakeinen materiaali on kosketuksissa veteen, se imee kosteutta kapillaarisesti. Materiaalien huokosissa on alipainetta ja materiaali pyrkii tasoittamaan painetta imemällä vettä kapillaarisesti. Materiaalien huokosten koolla on merkitystä

siinä suhteessa, että pienemmissä huokosissa on suurempi alipaine ja näin ollen vesi imeytyy voimakkaammin rakenteisiin. Materiaali saavuttaa kosteustasapainon kun huokosalipaine ja painovoima ovat tasapainossa. Kapillaarinen kosteus lisää homehtumisriskiä merkittävästi ja vaatii nopeita korjaustoimenpiteitä. Vapaalle vedelle altistuvat rakenteet kuten julkisivut on suunniteltava kestämään tämän aiheuttamaa räsitusta. [YM 1997: 52–54.] Julkisivujen suunnittelussa kapillaarisuus otetaan huomioon muun muassa riittävällä tuuletusraolla ja korkeissa rakennuksissa vesitiiviillä julkisivumateriaalilla taikka erillisellä ”sadetakilla”.

Diffuusiolla tarkoitetaan vesihöyryn osapaine-erojen tai kosteuspitoisuuksien tasautamista. Suurempi vesihöyrypitoinen ilma kulkeutuu pienempi vesihöyrypitoiseen ilmiin materiaalien huokosten tai rakenteiden reikien kautta. Vesihöyryvastus määrää, kuinka hyvin materiaali vastustaa kosteuden siirtymistä diffuusion avulla materiaalin läpi. Vesihöyry pyrkii siirtymään sisäilmasta ulos, sillä sisäilman vesihöyryn osapaine on yleensä suurempi kuin ulkoilman. Tämän takia sisäpuolelle laitetaan höyrynsulku, ettei kosteutta pääse tiivistymään rakenteisiin. Kuvassa 14 on kuvattu höyrynsulun merkitystä puurunkoisessa seinässä. Huomataan vallitseva diffuusion siirtymissuunta on sisältä ulospäin ja että höyrynsuluttomassa seinässä kosteutta siirtyy reilusti enemmän rakenteisiin kuin höyrynsulullisessa seinässä. [YM 1997: 54–55.]



Kuva 14. Diffuusiolla siirtyvän kosteuden kokonaismäärä vuoden aikana höyrynsuluttomassa ja höyrynsulullisessa puurunkoisessa seinässä. [YM 1997: 55.]

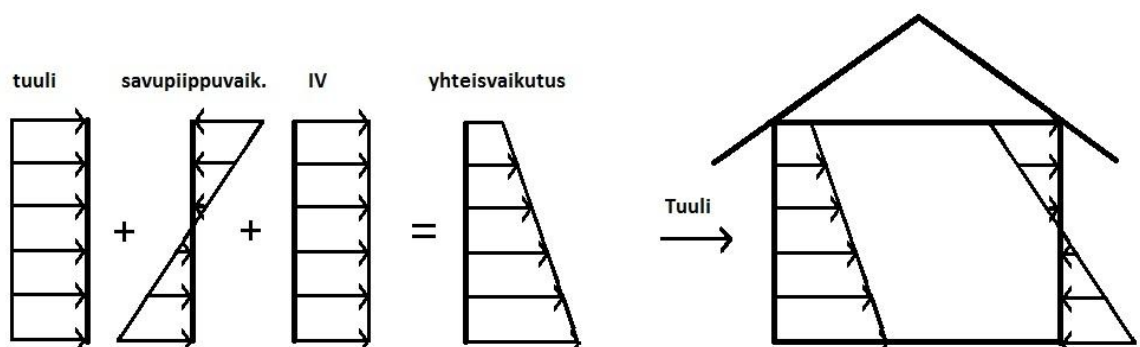
Ilman pyrkiessä tasaamaan paine-eroja rakenteen eri puolilla virtausta kutsutaan konvektioksi. Ilma virtaa suuremmasta paineesta pienempään reikien ja rakojen läpi, tuoden samalla kosteutta mukanaan. Paine-eroja syntyy ilmanvaihdon, lämpötilaerojen ja tuulen yhteisvaikutuksesta. Konvektiota ilmenee myös huokoisessa materiaalissa, mikä saattaa pienentää lämmöneristävyyttä. Konvektio kuivattaa rakennetta kun ilmavirta

lämpenee virratessaan rakenteen läpi. Samalla tavalla konvektio on erittäin haitallista, jos ilman sisältämä kosteus pääsee tiivistymään, eli haitallisesti jäähtymään virratessaan rakenteen läpi. [YM 1997: 56–57.]

Rakennuksen vesihöyrynvastuksen tulisi pienentyä rakenteessa ulospäin mentäessä, jotta rakennus pääsisi kuivumaan. Samalla rakennuksen on oltava tiivis, ettei ilman sisältämä kosteus pääsisi virtaamaan kylmiin rakenteisiin. Kosteuden diffuusio on suurin talvella kun taas konvektio riippuu paine-eroista. Julkisivun suunnittelussa kosteuden diffuusio on yleensä merkittävin siirtymismuoto. [YM 1997: 55–56.] Todettiin aikaisemmin, että lämmin ilma kykenee sitomaan enemmän vesihöyryä kuin kylmä, jolloin ilman suhteellinen kosteus nousee lämpötilan laskiessa. Tämä ilmiö korostuu talvella, jolloin lämpötilaerot sisä- ja ulkoilman välillä ovat suurimpia. Samalla diffuusion siirtymissuunta on talvella sisältä ulos, joka saattaa johtaa kosteuden tiivistymiseen eli kastepisteen muodostumiseen rakenteissa.

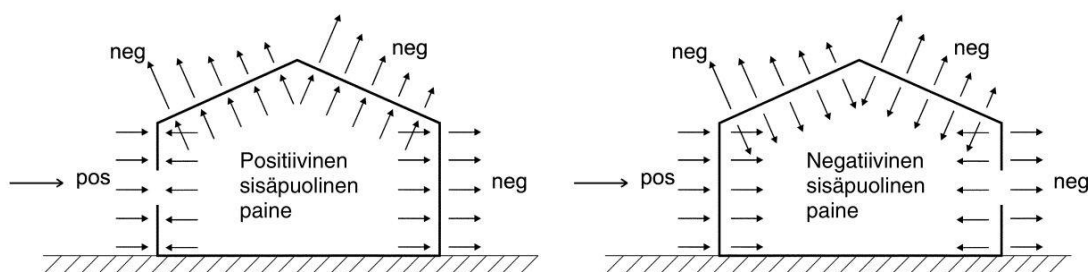
3.3.3 Rakennuksen painesuhteet

Rakennuksen painesuhteilla on varsinkin ilman konvektion kannalta erittäin suuri merkitys. Kuvassa 15 on havainnollistettu rakennuksen painesuhteiden määräytymistä. Rakennuksen painesuhteiden yhteisvaikutus ei saa koskaan aiheuttaa suurta ylipainetta, jottei kosteutta pääsisi virtaamaan kylmiin rakennusosiin [YM 1997: 60]. Ilmatiivis rakennus hidastaa ilmavirtausta sekä mahdollistaa rakennuksen pitämisen koneellisesti alipaineisena.



Kuva 15. Rakennuksen painesuhteet määräytyvät tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutuksesta. Alkuperäinen kuva [YM 1997: 61].

Tuulen aiheuttama paine tai imu on merkittävä tekijä varsinkin korkeissa rakennuksissa. Tuulen paineen ja imun suuruus riippuu rakennuksen korkeudesta, geometriasta ja sijoittelusta. Tuulta vastaan kohtisuoralle seinälle muodostuu painetta ja taka- sekä sivuseinille imua eli alipainetta. Tuulen aiheuttama paine rakennuksen sisälle riippuu tuulen suunnasta sekä julkisivun aukkojen, kuten ovien ja ikkunoiden suuruudesta ja sijainnista. Jos tuulenpuoleisella seinällä on muihin seiniin verrattuna enemmän aukkoja, tuuli aiheuttaa ylipaineen sisälle. Alipainetta muodostuu sisälle, jos suojanpuoleinen seinä on epätiivimpi tuulenpuoleiseen seinään verrattuna. [SFS 2001.] Kuvassa 16 on esimerkkejä tuulen aiheuttamasta paineesta ja imusta eri pinnoille sekä aukkojen sijoittelun vaikutus painejakaumaan.



Kuva 16. Tuulenpaineen vaikutus eri pintoihin aukkojen sijoittelun seurauksena [SFS 2001].

Paine-eroja syntyy myös savupiippuvaikutuksesta. Savupiippuilmio aiheutuu lämpötilaeroista, jolloin lämmin ilma pyrkii kevyempänä nousemaan ylös kylmän ilman jäädessä alas. Tämä aiheuttaa alipainetta huoneen alaosaan ja ylipainetta yläosaan. Paineerojen nollakohta eli neutraaliakseli määräytyy seinän tiiveyden mukaan, jolloin tasatäviissä seinässä se on ulkoseinän korkeuden puolivälissä. Savupiippuvaikutuksesta aiheutuva paine on suuruusluokaltaan 1 Pa/m sisä- ja ulkolämpötilaerojen ollessa 20 astetta. Huoneen ollessa korkea myös savupiippuilmion ylipaine on suuri, jolloin ilmanvaihdon avulla muodostettu alipaine saattaa kumoutua. Samoin talvella ulko- ja sisälämpötilaerojen ollessa suuria myös sisäinen ylipaine on merkittävä. [YM 1997: 58; RIL 2009.]

Sisäinen ylipaine kasvattaa homehtumisriskiä, sillä rakennusta ei saada niin tiiviiksi, ettei ilmaa pääsisi raoista ja rei'istä virtaamaan rakenteisiin. Vaurioiden pienentämiseksi rakenteet on tehtävä mahdollisimman ilmanpitäviksi, jolloin ilman- tai höyrynsulun asennuksen virheettömyys korostuu. Samoin ylipainetta pyritään estämään alipaineistamalla lämpimiä sisätiloja koneellisella ilmanvaihdolla. [YM 1997: 60.]

3.4 Home

Hometta voi käytännössä esiintyä minkä materiaalin pinnalla tahansa, kunhan pinnalla on pölyä tai muuta homeen kasvulle tarvittavaa ravinnetta. Homekasvustolle tarvittavat tekijät ovat lämpötila, kosteus, happi, ravinteet ja aika. Homeen kasvun estämiseksi on poistettava vähintään yksi yllä mainituista tekijöistä. Käytännössä ainoa mihin pystytään vaikuttamaan, on kosteus. [RIL 2011: 10, 152–155.]

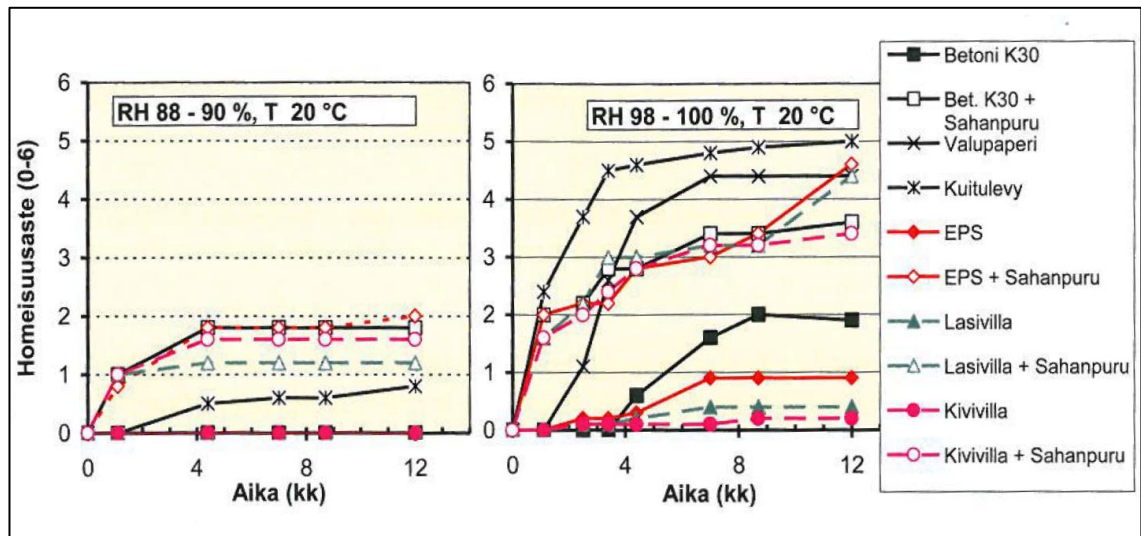
Ympäriämme on aina mikrobeja, jotka ovat peräisin muun muassa ihmisistä, rakennusmateriaaleista, kasveista ja luonnon hajoamisprosesseista. Nämä mikrobit eli bakteerit, home- ja lahottajasienet ovat tärkeä osa luonnon kiertokulkua mutta usein haitallisia rakennuksille. Home voi vaurioittaa materiaaleja sekä emittoida hajuaineita ja toksineja. Toksiinit ovat ihmisen terveydelle haitallisia ja saattavat aiheuttaa pitkäkestoisia sairauksia. [RIL 2011: 151, 154.]

Homehtuminen on mahdollista lämpötilan ollessa 5–50 °C ja ilman suhteellisen kosteuden ollessa viikkoja tai kuukausia jatkuvasti yli 75–80 %. Homehtuminen voi käytännössä alkaa jo –5 °C lämpötilassa mutta on tällöin hyvin hidasta ja vaatii pitkäaikaisesti yli 90 % suhteellisen kosteuden. Homeen kasvu on sitä nopeampi mitä korkeampi suhteellinen kosteus on. Lämpötilan ollessa 20–40 °C ja RH yli 95 % sienikasvustoa voi erottaa silmillä jo muutaman vuorokauden sisällä. [RIL 2011: 153–155.]

Kuvassa 17 on tutkittu rakennusmateriaalien pinnalla tapahtuvaa homeenkasvua vuoden aikana, ilman kosteuden ollessa RH 88–90 ja RH 98–100 %. Kokeet on tehty laboratorio-olosuhteissa 20 °C:n lämpötilassa. Homeenkasvun suuruus kuvataan usein homeindeksien avulla seuraavasti: mikroskoopilla on havaittavissa homeenkasvun alkamista (homehtumisaste 1), homeenkasvu erottuu paljain silmin (3) ja materiaalin pinta on kokonaan homeenkasvun peitossa (6). [RIL 2011: 155.]

Julkisivun suunnittelussa kannattaa välttää kosteutta kerääviä ratkaisuja. Arkkitehtuurisia ratkaisuja ovat vaipan muodon, oikeiden rakenteiden, materiaalien ja toimivien detailjien valinta. Rakenneteknisiä ratkaisuja ovat lähinnä rakenteiden lämpö-, vesi- ja kosteustekninen toiminta. Työmaalla riittävä sääsuojaus sekä pintojen nopea kuivattaminen estää tehokkaasti homeen kasvun alkamista. Jos hometta on ehtinyt syntyä, se jää rakenteeseen vaikka kosteus poistuu. Homeenkasvu on pyrittävä taannuttamaan

eli rakenne on kuivatettava 2–4 kuukauden sisällä kastumisesta, jottei home vaikuta sisäilman laatuun. [RIL 2011: 10, 12, 162–163.]



Kuva 17. Homeen kasvun laboratoriotutkimus eri materiaalien pinnoilla homeindeksin ja ajan funktiona. Kosteusolosuhteina on käytetty RH 88–90 % sekä 98–100 % ja lämpötila on 20°C. [RIL 2011: 155.]

3.5 Rakennekosteuden hallinta

Työmaan kuivanapidon varmistamiseksi työmaan kosteudenhallinnansuunnittelu on aloitettava jo hankesuunnittelun aikana [Vinha ym. 2013]. Työmaan kosteudenhallinnansuunnittelu korostuu korkeassa rakentamisessa, jossa rakennusaika saattaa olla pitkä ja tiukat aikataulut johtavat säästä riippumattomaan asennukseen [Nissinen 2013]. Työmaan kuivanapidossa on tärkeintä estää valumavesien ja sadeveden pääsy rakenteisiin ja materiaaleihin sekä kosteuden poistaminen rakenteista [Vinha ym. 2013].

Kastuneet materiaalit eivät saa pelkästään esteettisiä haittoja vaan materiaalin rakennusfysikaaliset ominaisuudet saattavat muuttua suuresti. Esimerkiksi eriste painuu kaasaan ja menettää lämmöneristyskykynsä kastuessaan, eikä paksu lämmöneriste välttämättä pääse kokonaan kuivumaan. Tämän takia kosteudelle arat materiaalit eivät saa kastua missään vaiheessa, ei tehtaalla, kuljetuksen, varastoinnin eikä asennuksen taikka sen jälkeisenä aikana. [Vinha ym. 2013; Lahdensivu ym. 2012: 11–12.]

Ennen vesikaton ja vaipan valmistumista tehokkain sääsuoja on suojata rakennus kultaaltaan, jolloin suojausrakenteet on mitoitettava tuuli- ja lumikuormille [RIL 2009]. Muita sääsuojaia ovat esimerkiksi peitteet ja väliaikaiset rakenteet. Kosteuden poistaminen rakenteista pystyy tehostamaan tuuletuksella, lämmityksellä ja koneellisella kuivatuksella. Ennen rakenteiden pinnoittamista tulisi varmistua rakenteen riittävästä kuivumisesta muun muassa kosteusmittauksin. [Vinha ym. 2013.] Ulkovaipan oikeasta rakennusfysikaalisesta toiminnasta voidaan kosteusmittauksen lisäksi varmistua esimerkiksi lämpökamerakuvauksilla ja ilmanpitävyysmittauksilla [RIL 2009].

3.6 Rakennuksen kuivuminen

Rakennusmateriaalin kuivuminen on hitaampaa kuin kastuminen, mistä johtuen on huolehdittava, etteivät ne pääse kastumaan missään vaiheessa. Rakennuksen käytön aikana viistosade kostuttaa ulkoseinää tehokkaimmin, mutta rakenteessa liikkuu myös kosteutta diffuusion ja konvektion avulla. [Björkholz 1997: 79–80.] Tämän vuoksi julkisivun on oltava vesitiivis eikä kosteutta saa päästä rakenteisiin liitoksien ja detaljien kautta. FRAME-tutkimuksessa todettiin myös paksimpien lämmöneristeiden hidastavan rakenteen kuivumista [Vinha 2011a].

Rakenteiden kuivuminen perustuu lähinnä kyllästymisvajaukseen, jolloin ilman suhteellinen kosteus on alhaisempi kuin kuivatettavan rakenteen kosteus [YM 1997: 49–51]. Rakennusaikana rakenteisiin tullut kosteus poistuu aluksi varsin nopeasti pinnan ollessa kostea, mutta kuivumisnopeus hidastuu pinnan kuivuessa ja kosteuden siirtymismuodon vaihtuessa kapillaarisesta kosteusvirrasta diffuusion. Käytön aikana kuivuminen tapahtuu lähinnä diffuusion avulla, eli pelkästään vesihöyrynä. [Björkholz 1997: 79.] Aikaisemmin todettiin rakennusaikana rakenteissa olevan ylimääräisen kosteuden poistuvan ensimmäisen lämmityskauden aikana, mikäli rakennusaikana on huolehdittu rakenteiden kuivanapidosta.

Ulkoseinän kuivuminen tapahtuu höyrynsulusta molempiin suuntiin. Rakenteen sisäpuolisen osan kuivumisessa ei ole yleensä ongelmia sisäilman ollessa jatkuvasti lämmintä ja suhteellisen kuivaa. Höyrynsulun ulkopuolisen rakenteen kuivuminen perustuu lähinnä ulkoilman kyllästymisvajaukseen [YM 1997: 63]. Ulkoseinän ilmarako toimii tehokkaana kosteudenpoistajan sekä paine-erojen tasaajana [Mäkitalo 2012: 43]. Tuuli ja savupiippuilmio aiheuttavat tuuletusrakoon virtausta, jonka mukana kosteutta siirtyy

pois rakenteista. Aurinko toimii myös erittäin tehokkaana ulkoseinän kuivattajana. Auringonsäteet lämmittävät rakenteiden pintoja, jolloin niiden ympäröimään ilmaan syntyy kyllästymisvajautta. Kyllästymisvajauksen seurauksena kosteutta alkaa virrata esimerkiksi kylmemmistä rakenteista lämmennyttä tuuletusrakoa kohti. [YM 1997: 61–63.]

Rakennusta kuivattavilla ilmiöillä ja olosuhteilla saattaa myös olla kosteuttavia vaikutuksia, jotka on hyvä tiedostaa. Näitä ovat muun muassa tuuletusraon tuloilman kosteus, tuulen katvealueet, auringon lämmittämisestä aiheutuvat lämpötilaerot ja öinen vastasäteily. Tuuletusraossa virtaava ilma kostuttaa rakennetta, mikäli sisään virtaava ilma on lämpimämpää kuin itse tuuletusrako, kun taas vastakohtaiset olosuhteet kuivatavat rakennetta [Björkholz 1997: 82]. Tuuletusraon toiminta saattaa myös häiriintyä seinän jäädessä tuulen katvealueeseen puuston tai muun suojauksen seurauksena. Tällöin tuuletusrakoon ei synny virtausta paine-eron ollessa mitätön raon ylä- ja alapään välillä. [YM 1997: 61.] Tämä on kuitenkin hyvin epätodennäköistä Kalasatamassa, mutta on hyvä tiedostaa varsinkin alimmissa kerroksissa.

Aurinko saattaa myös aiheuttaa rakenteen kostumista, esimerkiksi auringon lämmittäessä julkisivun ulkopintaa seinän eristeen ulkopinta alkaa kuivua samalla kun kosteus lisääntyy eristeen sisäpinnalla ja keskellä. Auringon aiheuttamista lämpötilaeroista kosteutta siirtyy myös rakennuksen nurkan taakse kylmempiin osiin. Tämä voi aiheuttaa vaurioita varsinkin useiden sulamis- ja jäätymiskertojen myötä. [YM 1997: 63.] Toinen merkittävä säteilyyn liittyvä ilmiö on öinen vastasäteily, jossa materiaalit säteilevät lämpöä avaruuteen. Tämä ilmiö korostuu varsinkin kirkkaina öinä, jolloin rakennuksen väli- ja pintamateriaalit voivat olla jopa 10–20 °C kylmempiä kuin ulkoilma [Björkholz 1997: 30]. Tämän seurauksena kosteutta tiivistyy kylmän rakenteen pinnoille, myös takapinnalle, jolloin kosteutta saattaa siirtyä sisälle rakenteisiin pinnan lämmitessä [YM 1997: 64–65].

3.7 Julkisivun ilmavirtaukset

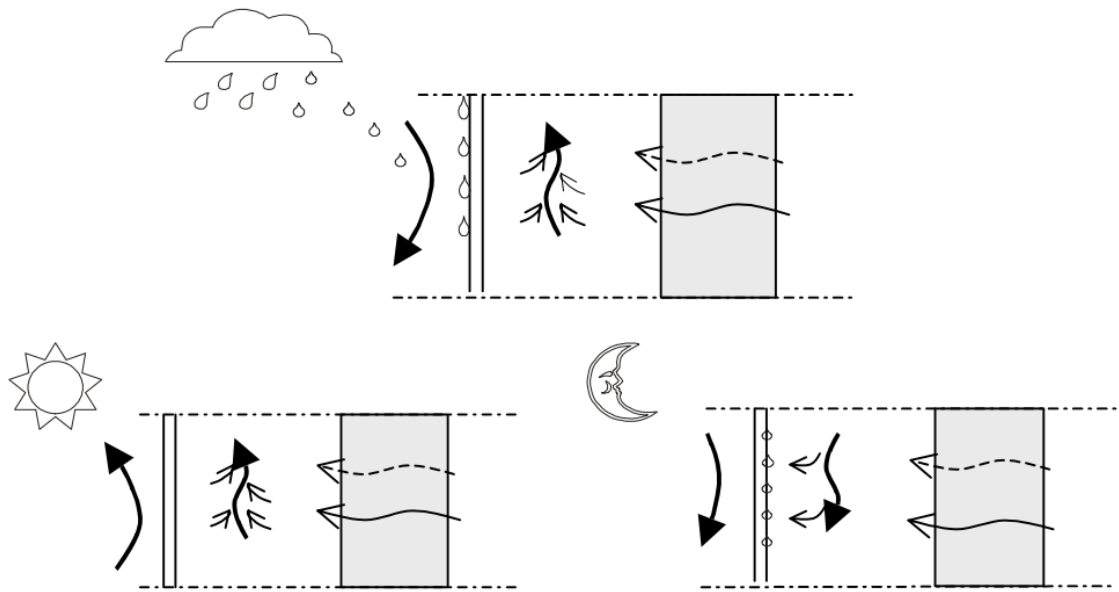
Julkisivun rakennusfysikaalisessa suunnittelussa ilmatilan ja tuuletusraon virtauksilla on keskeinen rooli rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymisessä. Rakennusfysikaalisesti oikein suunniteltu rakenne antaa myös hyvät edellytykset asukasviihtyvyydelle. Tässä luvussa on keskitytty lähinnä kaksoisjulkisivun ilmatilan virtauksiin. Kaksoisjulki-

sivun kokonaisvaltaiseen suunnitteluun löytyy ohjeita Teknillisen Korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion 26. julkaisusta *Kaksoisjulkisivun suunnitteluohjeet* [2003].

Julkisivun ilmatilan virtaukset syntyvät sekä luonnollisen että pakotetun konvektion avulla. Pakotettu konvektio aiheutuu lähinnä tuulesta ja sen suuruus riippuu lähinnä tuulen voimakkuudesta sekä tulo- ja poistoaukkojen koosta ja sijainnista. Ilmaraossa on myös tyynellä säällä virtauksia luonnollisen konvektion eli savupiippuilmiön takia. Savupiippuilmiöhön aiheutuu lämpötilaerojen aiheuttamasta paine-erosta. Ilmatila on pääasiallisesti hieman lämpimämpi kuin ulkoilma, jonka takia virtausta tapahtuu ilmatilassa. Savupiippuilmiötä voimistavat suuret lämpötilaerot sekä ilmatilan korkeus. [Mäkeläinen ym. 2003: 59.]

Kalasadamassa on yhden kerroksen korkuisia kaksoisjulkisivuelementtejä (katso liite 2), jolloin savupiippuilmiön aiheuttamat ilmavirtaukset eivät kasva liian suuriksi ilmatilassa. Ilmatilaan on myös suunniteltu ranskalaiset parvekkeet, minkä vuoksi hallitut ilmavirtaukset ovat mukana luomassa asukasviihtyvyyttä. Toisaalta liian hitaat virtaukset suurentavat lämpötilakuormia kesällä ja lisäävät rakenteen kosteusrasitusta. Tästä johtuen ilmanvaihto kannattaisi pitää kesällä mahdollisimman tehokkaana, kun taas energiasäästön takia sen kannattaisi olla talvella säädetty mahdollisimman pienelle [Mäkeläinen ym. 2003: 61].

Savupiippuilmiön seurauksena ylöspäin virtaava ilma lämpenee ja alaspäin virtaava jäähtyy [Mäkeläinen ym. 2003: 59]. Eli ylössuuntautuva ilma kuivattaa rakennetta, lämmenneen ilman aiheuttaessa kyllästymisvajauksen ilmatilaan. Ilmatilan kosteusteknistä käyttäytymistä on kuvattu kuvassa 18. Kaksoisjulkisivun ulkopuolinen lasi toimii rakennuksen ”sadetakkina”, jolloin ulkolasin saumojen on oltava niin tiiviitä, ettei sade taikka liiallinen kosteus pääse ilmatilaan. Aurinko lisää luonnollista konvektiota ilmatilassa, säteiden absorboituessa materiaaleihin ja näin ollen lämmittäessä ilmatilaa. Öi-
nen vastasäteily voi aiheuttaa uloimman lasin hetkittäistä huurtumista, lasin lämpötilan laskiessa ulkoilman lämpötilaa alemmaksi. Ilmatilan virtauksista on lisää luvussa 5.4 (Ilmatilan simulointi).



Kuva 18. Kosteuden käyttäytyminen kaksoisjulkisivussa [Mäkeläinen ym. 2003: 63].

4 Rakennusdetaljit

Tässä on esitetty lyhyesti korkean rakentamisen ja merenrannan läheisyyden asettamat haasteet detaljisuunnittelulle. Todettiin rannikon olevan tuulinen, jolloin julkisivujen tulisi olla vedenpitäviä. Suomen etelärannikolla ilmasto on myös leutoa, mikä lisää julkisivuja rasittavia sulamis-jäätymissyklejä. Tämän ansiosta julkisivujen tulisi olla mahdollisimman sileitä ja saumoja tulisi välttää [Varis ym. 2009].

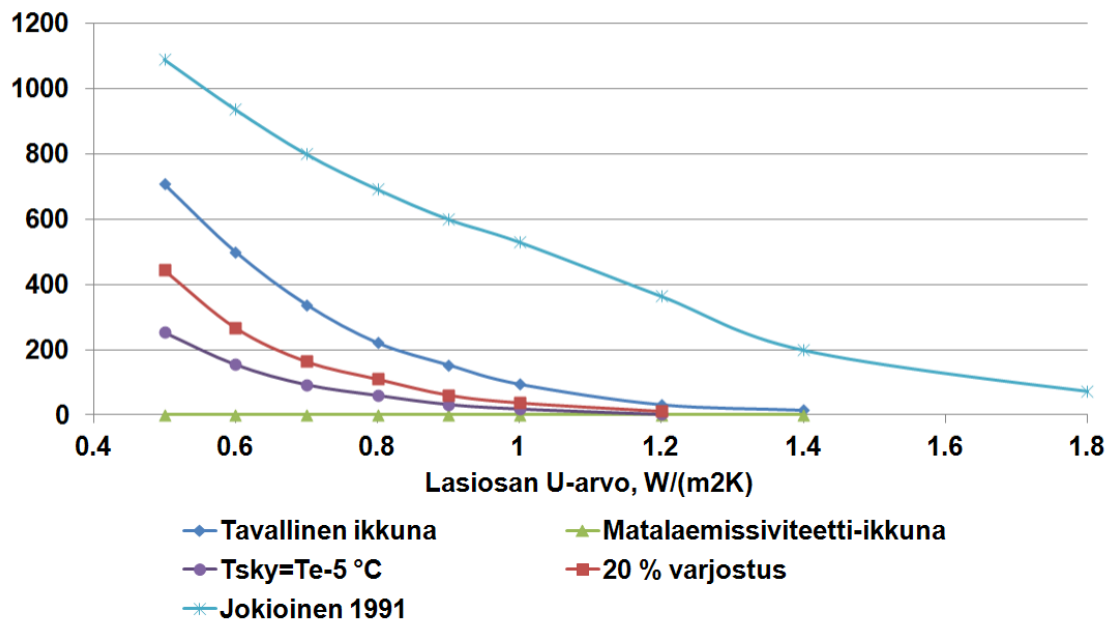
Lasi on lujaa, mutta haurasta materiaalia, josta oikein suunniteltuna voidaan saada erittäin kestäviä ratkaisuja. Lasia kannatteleville teräsrakenteille on tehtävä lujuuslaskelmat sekä valittava kohteeseen sopivat terässeokset. Valintaa vaikeuttaa tuulen mukana kulkeutuvat kloridit johtuen lähellä olevasta suolaisesta merivedestä. Lisäksi on sivuttu aiheita kuten liitosten toleransseja, tuulen aiheuttamia äänihaittoja sekä tuuletusrakojen palokatkoja.

4.1 Lasirakenteet

Suuret lasipinnat asettavat haasteita rakennuksen sisätilojen yllämpenemiselle. Lisäksi rakennuksen korkeudesta johtuen, rakennusta ei varjosta muut kuin vieressä olevat tornitalot. Tämän vuoksi kaksoisjulkisivun ilmatilaan on suunniteltu sälekaihtimet, joilla pystytään suojaamaan sisätiloja suoralta auringonvalolta. Selektiivikalvoilla pystytään myös pienentämään lämpökuormaa sekä lasin huurtumista. Selektiivikalvolla on myös haittapuolensa, koska se saattaa aiheuttaa matkapuhelimen kuuluvuusongelmia rakennuksen sisällä [Lahdensivu ym. 2012: 115].

Kuviossa 1 on esitetty FRAME-tutkimuksesta saatuja tuloksia ikkunoiden kondensoitumiselle. Kondensoitumistarkastelu on tehty lähinnä Jokioisen 2004 säädatan avulla. Vastasäteilyn kannalta kriittisin vuosi Jokioinen 1991 on myös lisätty kuvioon, vertailun vuoksi. Pystyakselilla on vuotuisten kondenssintuntien määriä ja vaaka-akselilla ikkunan U-arvoja. Kuviossa on myös verrattu selektiivipinnoitteisia, tavallisia ja varjostettuja ikkunoita keskenään. Lilan värinen viiva kuvaa taivaan tehollista lämpötilaa, joka aiheuttaa materiaalien vastasäteilyn kirkkaina öinä. Tämä lämpötila on keskimäärin 5 °C ulkoilman lämpötilaa matalampi. Kuvioista huomataan kondensoitumisajan kasvavan U-arvon pienentymisen myötä. Kondensoitumisen pienentämiseksi on selektiivikalvon

ohella mahdollista lisätä ikkunan sisäpinnan ilmanvaihtuvuutta taikka lämpöä, jotka molemmat lisäävät ilman kyllästymisvajautta pienentäen ikkunoiden huurtumisriskiä.



Kuvio 1. Ikkunan lasiosan vuotuiset kondensoitumistunnit U-arvon funktiona Jokioisen vuonna 2004 ilmastossa [Kero 2011].

Suuret lämpökuormat lisäävät myös lämpöliikkeitä, jotka voivat olla kohtalokkaita materiaalin kestävyden kannalta. Varsinkin suurien ikkunapinta-alojen ympärillä olevat karmit tai muut paikallisesti varjostavat elimet, saattavat aiheuttaa lasin rikkoutumisen, liian suurten lämpötilaerojen johdosta [Tenhunen 2003: 16]. Lasituksen lujuuden parantamiseksi sekä lasimateriaalin käyttämiseksi myös putoamisesteenä Kalasataman uloimmiksi laseiksi on ehdotettu 6+6 karkaistua ja laminoitua lasia. Karkaistut ja laminoituvat lasit kestävät rikkoutumatta paremmin pintaan kohdistuvasta kuormista sekä lämpökuormista. Vaara lasien rikkoutumisen aiheuttamista putoavista sirpaleista jää tällöin pienemmäksi.

Lasijulkisivun mitoituksen laskennallisina ulkolämpötiloina käytetään talvella -30 °C ja kesällä $+70\text{ °C}$, ellei sijaintipaikan ääriämpötilat poikkea näistä suuresti. Lasipinnat ovat herkkiä värähtelylle, jonka vuoksi myös tuulen dynaamiset kuormat on otettava huomioon. [RIL 2001: 37–38.] Julkisivulasien mitoituksesta on esimerkiksi RIL 198-2001 *Valoaläpäisevät rakenteet*.

4.2 Korroosio

Rannikkoalueen korroosio-olosuhteet ovat verrattavissa uimahalliolosuhteisiin [Meriläinen 2013]. Rannikkoilmaston korroosiluokka on EN-ISO 12944-2 mukaan C5 (hyvin ankara), jolloin sinkityt teräkset syöpyvät EN-ISO 14713 mukaan 4–8 µm vuodessa. Uimahallien rasiusluokka on astetta kevyempi, eli ne kuuluvat luokkaan C4 (ankara). [Rautaruukki 2000: 70.] Kloridien vaikutusta rakenneosien korroosiokestävyyteen on käsitelty seikkaperäisesti RIL 235-2009 *Uimahallin rakenteiden suunnittelu ja kunnonhallinta*.

Ilmassa kulkeutuu tuulen mukana noin 10 % meriveden suolapitoisuudesta [Meriläinen 2013]. Suomenlahden suola- eli kloridipitoisuus on noin 3–3,5 g/l, jolloin ilmassa voi olla jopa noin 300 mg/l klorideja. Ilman sisältämät kloridit aiheuttavat pistekorroosiota ja vaikeasti havaittavaa rakokorroosiota sekä edistävät erittäin haitallista jännityskorroosiota. [RIL 2009.]

Tavanomaiseen meri-ilmastoon soveltuvia teräslajeja on listattu SFS-EN 1993-1-4, liitteessä A. Eurokoodin mukaan nämä teräslajit ovat EN 1.4362, EN 1.4401, EN 1.4404, EN 1.4406 sekä EN 1.4571. Alumiiniseokset AlMg₃ ja AlMg_{4,5}Mn soveltuvat myös kloridipitoiseen ilmastoon. Teräksen kloridikestävyyttä lisää molybdeeni ja alumiinin kestävyttä magnesium. [RIL 2009.]

Kloridiolosuhteissa teräksen pinnan tulisi olla mahdollisimman sileä ja puhdas, jotta lika ei tartu niin helposti materiaalin pinnoille. Austeniittisten terästen lisäksi teräkselle soveltuvia pinnoitusvaihtoehtoina ovat esimerkiksi kuumasinkitys ja duplex-käsittely (sinkitys ja maalaus). Sähkösinkitys ei sovellu lainkaan rannikkoilmastoon. Kuumasinkittyä terästä voidaan käyttää myös ripustetuissa rakenteissa, kunhan niitä pystytään huolto-tarkastamaan säännöllisin väliajoin. Vaikeasti huollettavissa, vedolle altistuneissa rakenteissa, käytetään austeniittisiä ruostumattomia teräksiä. [RIL 2009.]

Työmaalla tehtävä asennushitsaus on herkkä korroosion alkamiselle, joten työmaalla tehtävät asennusliitokset on suunniteltava ruuviliitoksina. Ruuvien kierteitä ei tulisi tehdä koneistamalla (lastuava työstö) vaan ne on tehtävä valssaamalla. Ruostumattomille ruuvikiinnityksille on lisää ohjeita esimerkiksi SFS-EN 1993-1-4, liitteessä A. [RIL 2009.]

4.3 Toleranssit ja teräksen väsyminen

Kaksoisjulkisivun suunnitteluohjeen mukaan rakennuksen runkoon liittyvien osien tulisi suunnittelussa varautua vähintään ± 30 mm toleransseihin [Mäkeläinen ym. 2003: 16]. Tarkalla suunnittelulla voidaan pienentää säätövaroja tai jopa päästä niistä eroon. Kalasataman tornitaloihin tulevien elementtien tulisi olla mahdollisimman mittatarkkoja, jolloin liitokset tulee suunnitella huolella. Kuvassa 19 on esitetty yksinkertainen elementin kiinnitysluoto, joka mahdollistaa elementin säätelyn ja lisäksi se sallii esimerkiksi lämpöliikkeitä sekä dynaamisia kuormia. Elementtiin kiinnitetyt kyntteet tulevat runkoon kiinnitetyn teräslevyn reikiin. Teräslevyn reikiin on jätetty säätövaraa sivusuunnassa, kun taas syvyys suunnassa reikä on varsin tiukka. Tämä mahdollistaa elementin säätämisen ja lämpölaajenemisen, samalla kun tuulikuormat saadaan johdettua turvallisesti rakennuksen runkoon.



Kuva 19. Yksinkertainen elementin kiinnitysluoto vasemmalla päältä ja oikealla alta kuvattuna [Meriläinen 2013].

Materiaalin väsyminen on mahdollista rakenteille ja osille, jotka altistuvat dynaamisille kuormille kuten tuulelle [SFS 2001: 34]. Väsymismurto alkaa rakenteessa olevasta epäjatkuvuuskohtasta taikka kohdasta, jossa on suuria jännityskeskittymiä [Nissinen 2013]. Valitsemalla tasalaatuisia ja sileitä materiaaleja voidaan pienentää materiaalin väsymistä. Kriittisiä työvaiheita ovat leikkaukset ja hitsaus, joissa voi helposti syntyä materiaalin sisäisiä jäännösjännityksiä [Rautaruukki 2000: 106].

Kuumasinkitys huonontaa rakenteen väsymiskestävyyttä mutta sen käyttö on kuitenkin mahdollista, kunhan pienennetään tarvittavassa määrin rakenteissa vaikuttavaa jännitystä. Vaihtoehtoisesti kuumasinkittyjä rakenteita voidaan käyttää suunnittelemalla muun muassa rakenteen pinnan ja epäjatkuvuuskohtien muotoilu hyvin. [Nissinen 2013.] Ilmaston sisältävät kloridit kiihdyttävät myös jo alkanutta syöpymistä, joka puo-

lestaan lisää voimakkaasti teräksen väsymistä. Säänkestävien terästen väsymislujuuskaan ei poikkea suuresti normaalien rakenneterästen lujuudesta, vaikka säänkestävät teräkset on alun perin kehitetty nimenomaan kloridipitoisille ympäristöille. [Rautaruukki 2000: 105–111.]

4.4 Äänihaitat ja ääneneristävyys

Julkisivun aiheuttamia äänihaittoja syntyy esimerkiksi rakennedetaljien aiheuttaessa ”pullonpohjia” ilmavirtauksille. Merenrannalla vallitsevat voimakkaat tuulet voivat aiheuttaa viheltäviä tai ujeltavia ääniä pienissä säleissä ja raoissa [Varis ym. 2009]. Tuulenpuuskat voivat aiheuttaa rakennusmateriaalien paukkumista (vrt. teräsohutlevykattoon), joita pystytään pienentämään tai jopa välttämään esimerkiksi lisäämällä kumitiivisteet liitoksiin ja käyttämällä jäykempiä rakennuslevyjä. Rakennusmateriaalien lämpöliikkeet saattavat myös aiheuttaa kitinää, johon pystytään vaikuttamaan esimerkiksi valitsemalla detaljeihin sellaiset kumitiivisteet, jotka mahdollistavat äänettömät lämpöliikkeet.

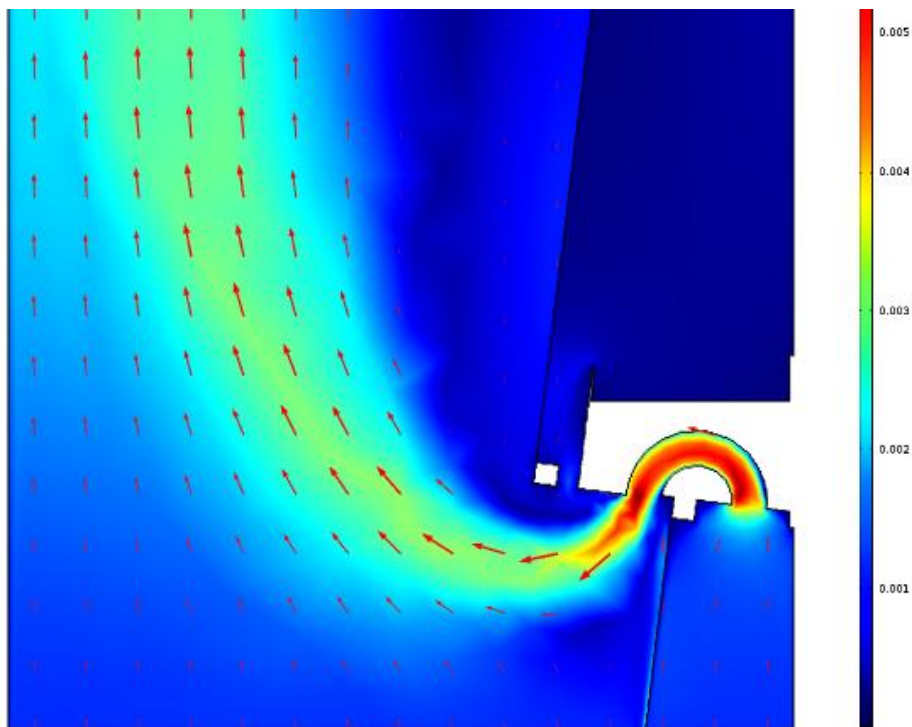
Erillisellä ulkolasituksella pystytään lisäämään julkisivun ääneneristävyyttä. Yhtenäisillä umpiolaseilla tehdyllä ulkolasituksella voidaan saada jopa yli 35 dB lisää ääneneristävyyttä rakennukselle. Epäsymmetriset rakenteet ja suuremmat lasipaksuudet vaikuttavat myös myönteisesti ääneneristävyyteen. [Mäkeläinen ym. 2006: 16.]

4.5 Paloturvallisuus

Tulipalossa savua ei saisi levitä kerroksesta toiseen, sen myrkyllisyyden takia. Suurin osa palossa kuolleista, kuolee savun takia [Laaksonen 2013]. Kalasataman kaksoisjulkisivuissa savun leviämien on huomioitu elementin yläpuolisen ilma-aukon muodossa. Kuvassa 20 nähdään, miten kaareva muoto toimii tehokkaana ulosheittäjänä raosta tulevalle voimakkaalle virtaukselle. Todettiin aikaisemmin lämpötilanousun voimistavan savupiippuilmiotä ja näin ollen myös lisäävän ilmatilan virtausta. Tämän takia kaksoisjulkisivun yläpinnan muoto toimii voimakkaana ulosheittäjänä, jolloin haitalliset savut eivät pääse suuressa määrin seuraavan kerroksen ilmatilaan.

Palo leviää useimmiten ulkokautta mutta myös välipohjan ja seinän liitoskohdasta. Liekkien kuumuus rikkoo ikkunat, jolloin tuli pääsee leviämään kerroksesta toiseen.

[Laaksonen 2013.] Karkaistut lasit rikkoutuvat myös jo palavan huoneen aiheuttaman kuumuuden vaikutuksesta [Mäkeläinen ym. 2003: 155]. Tornitalojen korkeudet hidastavat palokunnan pääsyä sammutustöihin, minkä takia huoneistoihin on asennettava paloa hidastavia sprinklereitä. Sprinklerit rajoittavat paloa, jolloin se ei leviä niin nopeasti ja palot ovat helpommin sammutettavissa. Rakennuksen paloturvallisuuteen kuuluu myös varmistaa, ettei materiaaleja putoa tulipalon aikana, vaarantaen asukkaiden ja pelastushenkilöstön turvallisuutta. [Laaksonen 2013.] Tämä on otettava huomioon materiaalivalinnassa ja kiinnitysdetaljien suunnittelussa.



Kuva 20. Kaksoisjulkisivun yläpinnan ilma-aukko toimii voimakkaana ulosheittäjänä tulipalon sattuessa.

Korkeissa rakennuksissa voimakkaat ilmavirtaukset, varsinkin tuuletusraoissa, moninkertaistavat palon leviämistä. Nämä voimakkaat ilmavirtaukset mahdollistavat myös vaikeasti syttyvien materiaalien palamisen kuten teräksen, joka palaa $+700\text{ °C}$. [Laaksonen 2013.] Samoin useat tornitalopalot ovat osoittaneet, että muovieristetyt korkeat rakennukset palavat kuin soihtu, koska tulipalo leviää eristeiden kautta erittäin nopeasti. [Laaksonen 2013; Meriläinen 2013]

Ulkoseinälle ei useimmiten ole palonkestovaatimuksia mutta P1-luokan rakennuksissa ulkoseinässä käytettävien materiaalien on oltava pääasiallisesti palamattomia [Laakso-

nen 2013]. Tuuletusvälin palo-osastointi on tehtävä minimissään vaaditun pinta-alaosastoinnin mukaan [Mäkeläinen ym. 2003: 155–156]. Tuuletusväli olisi kuitenkin syytä rajata lohkoihin liian suuren ilmavirtauksen pienentämiseksi. Korkeat rakennukset on juuri savupiippuvaikutuksen takia rajattava enintään 8-kerroksen mittaisiksi vyöhykkeiksi [Meriläinen 2013]. Kosteusteknisyyden ja lasien huurtumisen kannalta korkeiden rakennusten tuuletusraot on hyvä jakaa maksimissaan 3-kerroksen korkuisiksi vyöhykkeiksi [RIL 2001: 87]. Tuuletusraon katkaiseminen kerroksittain olisi kuitenkin paloteknisyyden kannalta varmintä, vaikka se ei välttämättä ole taloudellisinta [Laaksonen 2013].

4.6 Rästääät

Korkeiden rakennusten rästääät saatetaan joutua tekemään umpinaisena suuren viistosaderasituksen takia. Tällöin yläpohjan tuuletus hoidetaan alipaineistuksen avulla. Viistosaderasitus vaatii myös mahdollisten rakojen alle vastapellit, estämään julkisivulla ylöspäin liikkuvan veden tunkeutumasta rakenteiden sisälle. Rästääiden suunnittelua ei ole käsitelty tarkemmin tässä työssä.

5 Rakennusfysikaalinen simulointi

Rakennuksen fysikaalisen tarkastelun helpottamiseksi on kehitetty useita ohjelmia, joilla voidaan päästä hyvin tarkkoihin tuloksiin. Näitä ohjelmia ovat esimerkiksi HEAT2, DOFLÄMPÖ, WUFI ja COMSOL. HEAT2 ja DOFLÄMPÖ -ohjelmia käytetään lähinnä kylmäsiltojen tarkastamiseen. Rakennuksen pitkäaikaisessa tarkastelussa kannattaa käyttää WUFI:a, jonka avulla on mahdollista tarkistaa rakennuksen kuivuminen todellisten säädatojen avulla.

Tässä insinööriyössä on käytetty lähinnä COMSOL-ohjelmaa, sen monikäyttöisyyden ja 3D-ominaisuuksien takia. Ohjelmalla on mahdollista simuloida, eli laskea ja havainnollistaa elektrofysiikan ja virtausten lisäksi esimerkiksi lämpö- ja kosteusliikkeitä sekä näiden yhdistelmiä. Ohjelman käyttö on toisaalta erittäin haastava, sillä se vaatii syvälistä fysiikan tuntemusta.

Tässä insinööriyössä tutkittujen rakennetyyppien runko on sama mutta julkisivuvaihtoehtot ovat joko suorapintainen lasijulkisivu tai viistolasipintainen kaksoisjulkisivu. Julkisivuratkaisuista on enemmän luvussa 2.4 (Tutkittavat rakennetyypit) ja liitteessä 2 (Jatkoselvityksiä varten valitut rakennetyypit). Rakennetyyppien simuloinneissa on tarkastettu rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymisen lisäksi rakennuksen ympärillä ja julkisivun pinnalla vallitsevia maksimituulivirtauksia. Lisäksi julkisivun ilmatilojen virtauksien simuloinneissa on tarkistettu ilman virtausreittien ja -nopeuksien asettamat haasteet julkisivulle. Simuloinneissa on käytetty vähintään 90 % kriittisyystason täyttäviä lähtöarvoja.

5.1 Kriittisten mitoitusolosuhteiden valinta

Rakennuksen fysikaalisessa tarkastelussa ei käytetä varmuuskertoimia, kuten lujuuslaskennassa. Riittävän varmuuden saamiseksi mitoitusolosuhteiden tulisi kuitenkin täyttää 90 % kriittisyystason tarkasteltavan fysikaalisen ilmiön suhteen. [Mäkitalo 2012: 70–71.] Rakenteen kuivumisen, niin kutsutussa pitkäaikaisessa tarkastelussa käytetään Ilmatieteenlaitoksen nettisivuilta saatavien kriittisten referenssivuosien säädädataa. Kriittiset referenssivuosien valinta on tehty FRAME-tutkimuksen osana, jossa tutkittiin 30 vuoden säädädataa neljältä paikkakunnalta, jotka ovat Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä [Vinha 2011a].

Kokonaisen referenssivuoden valinta mahdollistaa kaikkien fysikaalisten toimintakriteerien huomioimisen, sillä niiden kriittisyys muuttuu vuodenaikojen mukana. Esimerkiksi homeenkasvun kannalta kesä ja syksy ovat kriittisimpiä korkean lämpötilan sekä korkean suhteellisen kosteuden (RH) vuoksi. Kosteuden kondensoitumisen kannalta syys- ja talvikuukaudet ovat kriittisimpiä, alhaisen lämpötilan ja korkean suhteellisen kosteuden vuoksi. [Mäkitalo 2012: 70]. Taulukkoon 2 on koottu esimerkkejä yleisimmistä rakennuksen kosteusteknisistä toiminnoista sekä niiden sääolosuhteellisia aiheuttajia. FRAME-tutkimuksen kriittiset referenssivuodet on valittu homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen perusteella [Vinha 2011a].

Taulukko 2. Referenssivuoden valinta rakennusfysikaalisen toimintakriteerin perusteella [32].

Toimintakriteeri	Referenssivuoden valintaperusteita
kosteuden kondensoituminen	korkea RH, saderasitus, nopeat lämpötilavaihtelut, alhainen lämpötila
homeen ja mikrobin kasvu, laho	lämmin ja kostea kesä ja syksy
liimojen tartunnan pettäminen	korkea RH, jäätyminen ja sulaminen
värimuutokset	auringonsäteily, korkea RH, saderasitus
pinnan rapautuminen , halkeilu, maalipinnan hilseily	aurinkoisen ja sateisen sään vaihtelu, pinnan jäätyminen ja sulaminen
metallien korrosio	lämmin ja kostea kesä ja syksy
kosteusmuodonmuutokset	RH:n suuri vaihtelu
lämpötilamuodonmuutokset	lämpötilan suuri vaihtelu
vedon tunne	tuulinen syksy ja talvi
ikkunoiden huurtuminen	pilvisyys, varjostukset, korkea RH, nopeat lämpötilavaihtelut
materiaaliemissiot	korkea suhteellinen kosteus, saderasitus

Valittujen toimintakriteerien perusteella kriittisimmiksi vuosiksi nousi Vantaa vuonna 2007 ja Jokioinen vuonna 2004. Säädatat on sovittu koskevan pienen pinta-alansa vuoksi koko Suomea. Vuosien valintaan vaikuttivat myös julkisivun rakenne sekä ilmansuunta. Vantaa vuonna 2007 on kriittisin eteläjulkisivuilla oleville sadetta läpäiseville julkisivuille, kuten tiiliverhotuille seinille. Sateenpitäville julkisivuille Jokioisen vuoden 2004 sää yhdessä pohjoisjulkisivun olosuhteiden kanssa ovat kosteusteknisesti kriittisimpiä. [Vinha 2011a.]

Kalasadaman julkisivu on joko ulkolasin tai erillisen ”sadetakin” myötä sateenpitävä, jolloin kriittiseksi referenssivuodeksi tulee Jokioinen vuonna 2004. Vaikka kriittisten referenssivuosien säädatat on sovittu koskevan koko Suomea, olisi syytä varmistaa, ovatko ne käyttökelpoisia myös rannikkoalueella. Vaihtoehtona voidaan myös käyttää

aikaisemmin mainittuja referenssivuosia, jolloin rakenne suunnitellaan siten, ettei laskentatarkasteluissa synny rakenteen kriittisiin kohtiin läheskään otollisia olosuhteita homeen kasvulle eikä kosteuden kondensoitumiselle [Vinha 2011a]. Lasijulkisivu on myös herkkä auringon ja öisen vastasäteilyn vaikutuksille, joita ei huomioitu referenssivuosien valinnassa. Ikkunoiden kondensoitumisen kannalta Jokioinen vuonna 1991 on FRAME-tutkimuksen mukaan kriittisin vuosi, mutta Jokioisen vuoden 2004 säädatoja voidaan käyttää sateelta suojatuille rakenteille [Kero 2011].

Rakennuksen kuivumistarkastelu on tehtävä myös arvioidun tulevaisuuden säämuutoksen mukaan. Ilmatieteenlaitoksen nettisivuille on lisätty Vantaan 2007 ja Jokioisen 2004 säätiöjen pohjalta lasketut arviot vuoden 2030, 2050 ja 2100 säätiöille. Nämä säädatat on arvioitu niin kutsutun pessimistisen A2-skenaariota mukaan, jossa oletetaan kasvihuonepäästöjen lisääntyvän tulevaisuudessa ja näin ollen lisäävän ilmastomuutoksen kehittymistä kosteusteknisesti negatiivisempaan suuntaan [Mäkitalo 2012: 67–68]. Tähän insinööriyöhön ei sisälly rakenteen pitkäaikaista tarkastelua, mutta tietoa on kerätty jatkotutkimuksia varten. Rakenteen kuivuminen on mahdollista tarkistaa esimerkiksi WUFI-ohjelmaalla

Sisäilman kosteuden hyvä mitoitussarvo on 5 g/m^3 . Kerrostalon laskennallinen normaalkosteus on lämmityskaudella 3 g/m^3 ja laskee noin puoleen kesällä. [Vinha 2011b: 67.] Sisäilman mitoitustilana suositellaan käytettävän kaikkina vuodenaikoina $21 \text{ }^\circ\text{C}$, mikä täyttää 90 % kriittisyystason [Mäkitalo 2012: 78]. Kosteuden tiivistymisen kannalta kriittiset kohdat ovat materiaalien rajapinnat. Useimmiten höyrynsulun ja tuulensuojalevyn sisäpintaan saattaa tiivistyä kosteutta [Lahdensivu ym. 2012].

5.2 Rakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytyminen

Ulkoseinän lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä on tutkittu taulukkolaskennan sekä COMSOL-ohjelman avulla. Taulukossa 3 on laskettu U-arvon lisäksi lämpötilojen ja suhteellisen kosteuden jakauma eri rakennetyypin materiaalikerrosten välissä. Kosteuden laskenta perustuu kosteuden siirtymiseen diffuusiolla. Lähtöarvoiksi on laitettu ympäristöolosuhteiden lisäksi materiaalien paksuudet, lämmönjohtavuudet ja vesihöyrynvastukset. Materiaaliominaisuudet on listattuna liitteessä 3.

Taulukossa sisäilman lämpötilana on edellisen suosituksen mukaan käytetty 21 °C ja suhteellisen kosteutena 50 %. Sisäilman kosteus 5 g/m³ vastaa 27,2 % suhteellista kosteutta yllä mainitussa lämpötilassa, jolloin 50 % RH on varmalla puolella. Ulko-olosuhteiksi neuvotaan valitsemaan kyseessä olevan paikkakunnan kylmimmän kuu-kauden olosuhteet [YM 1997: 125]. Kriittiseksi referenssivuodeksi valitun Vantaan vuoden 2007 kylmin kuukausi oli helmikuu, jolloin keskilämpötila oli –9,3 °C ja suhteellinen kosteus 83,2 % [Vinha ym. 2013]. Lisävarmuuden saavuttamiseksi on kuitenkin käytetty käsinlaskennassa usein käytettyä yksinkertaistusta, jolloin ulko-olosuhteiksi on laitettu –15 °C ja 90 % RH. Lähtöarvoina laitettujen mitoitusolosuhteiden taulukossa keltaisella pohjalla.

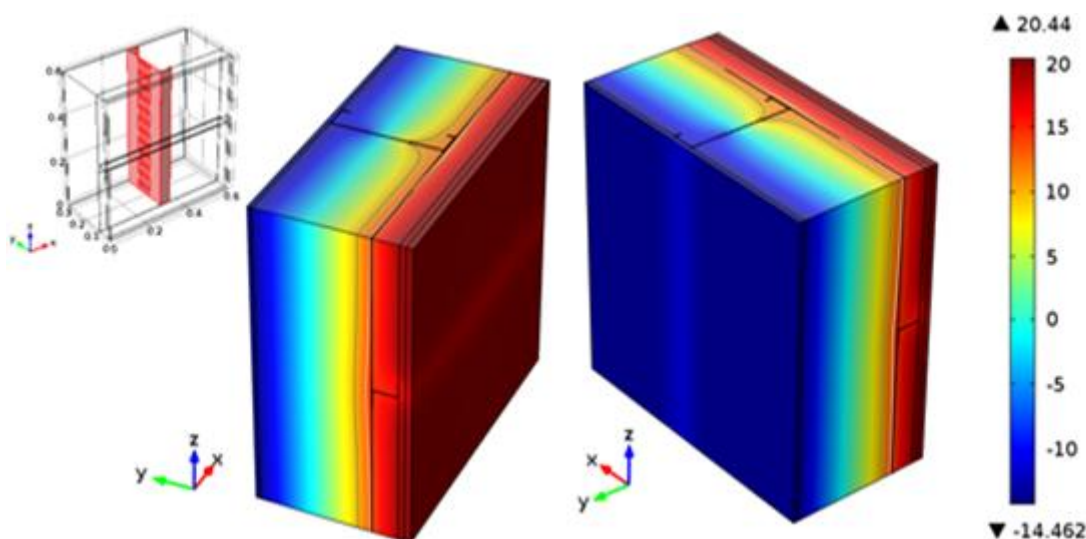
Taulukosta huomataan ilman suhteellisen kosteuden olevan korkea höyrynsulun ja lisälämmöneristeen rajapinnassa (punaisella korostettu). Kosteus ei pääse kuivumaan höyrynsulun läpi, minkä vuoksi on vaarana, että kosteus tiivistyy höyrynsulun sisäpintaan aiheuttaen suuren homehtumisriskin. Taulukon oikeaan alareunaan on lisäksi laskettu, paljonko kosteutta tiivistyy tähän kriittiseen rajapintaan. Tarkemmissa laskelmissa ja rakenteen pitkäaikaisissa tarkasteluissa, kannattaa kiinnittää erityistä huomiota nimenomaan höyrynsulun ja lisälämmöneristeen rajapintaan.

Taulukko 3. Rakennetyypin lämpö- ja kosteuslaskenta. Mitoitusolosuhteet ovat keltaisella pohjalla, kosteuden tiivistymisen kannalta kriittinen kohta on korostettu punaisella ja rakenteen U-arvo on korostettu vihreällä.

Aine	Paksuus d (mm)	Lämmön- johtavuus λ (W/mK)	Lämmön- vastus R _i =d/λ	Lämmönvas- tuksen suhde R _i /R _T	Lämpötila t (°C)	Kyllästys- paine p _k	Vesihöyrynvastus Z _{p,i} (m ² *s*Pa/kg)	Vesihöyrynvastuksen suhde Z _{p,i} /Z _{p,kok}	Paine rakenne- kerroksessa p _i (Pa)	Suhteellinen kosteus RH
			0,13	0,018	21	2485,8			1242,9	50,0 %
R _{si}					20,4	2389,6			1242,9	52,0 %
Kipsilevy GEK	13	0,25	0,052	0,007	20,1	2352,1	4,5E+07	4,5E-06	1242,9	52,8 %
Vanerilevy	12	0,11	0,109	0,015	19,6	2275,1	1,4E+10	1,4E-03	1241,3	54,6 %
Paroc eXtra	50	0,036	1,389	0,190	12,7	1470,2	2,5E+08	2,5E-05	1241,3	84,4 %
Al-levy	2	160	1,25E-05	1,71E-06	12,7	1470,2	1,0E+13	1,0E+00	149,2	10,1 %
Paroc Cortex One	180	0,033	5,455	0,748	-14,2	177,8	6,3E+08	6,2E-05	149,1	83,9 %
Windstopper	9	0,3	0,03	0,004	-14,4	175,4	2,5E+09	2,5E-04	148,8	84,8 %
R _{se}			0,13	0,018	-15	165,4			148,8	90,0 %
			R _T 7,295		ΔT (°C) 36		Z _{p,kok} 10017420000000		p _T 1094,067	
			U=1/R _T 0,137 W/(m ² K)							
			ΔU 0,322 W/(m ² K)							
			U _c =U+ΔU 0,459 W/(m ² K)							
							Tiivistynyt kosteus höyrynsulun sisäpinnassa -1,6E-08 kg/m ² s		Kuukaudessa neliölle tiivistynyt kosteus -0,043 kg	

Kylmäsiltojen vaikutusta U-arvoon on tutkittu lähemmin COMSOL-ohjelmalla. Lämmönläpäisykertoimen suuruus on, kuten jo luvussa 3.2.2 (Lämpöjakauma rakenteessa) todettiin, $0,46 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Tästä kylmäsiltojen osuus on noin 70 % eli $0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Näin ollen kylmäsiltoja on pienennettävä ja mahdollisesti lämmöneristettä lisättävä, jotta päästään määräysten mukaiseen U-arvoon eli $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Todettiin myös alumiinin lämmönjohtavuuden olevan noin kolminkertainen teräkseen verrattuna, samalla kun alumiiniprofiili vaatii paksumman rakennepaksuuden kestääkseen samat rasitukset kuin teräs.

Vaaditun U-arvon saavuttamiseksi vaihdettiin seinärakenteen pystyprofiili teräksiseen termorankaan, joka tunnetaan myös nimellä termo-orisi. Pystyprofiilin rakennepaksuudeksi valittiin 1,5 mm sekä vaihdettiin samalla höyrynsulun ja z-profiilin materiaalit 1 mm vahvuiseen teräkseen. Cortex One -lämmöneristeen paksuutta lisättiin myös 40 mm, jolloin sen paksuudeksi tuli 220 mm. Kuvassa 21 näkyy termorankaisen seinän lämpöjakauma. Huomataan lämpötilojen jakautuvan seinän paksuussuunnassa paljon tasaisemmin kuin alkuperäisessä rakennetyypissä (katso liite 4). Runkovaihtoehtojen erottamiseksi alkuperäinen runko on nimetty runkotyyppi 1:ksi ja termorankainen runko runkotyyppi 2:ksi.

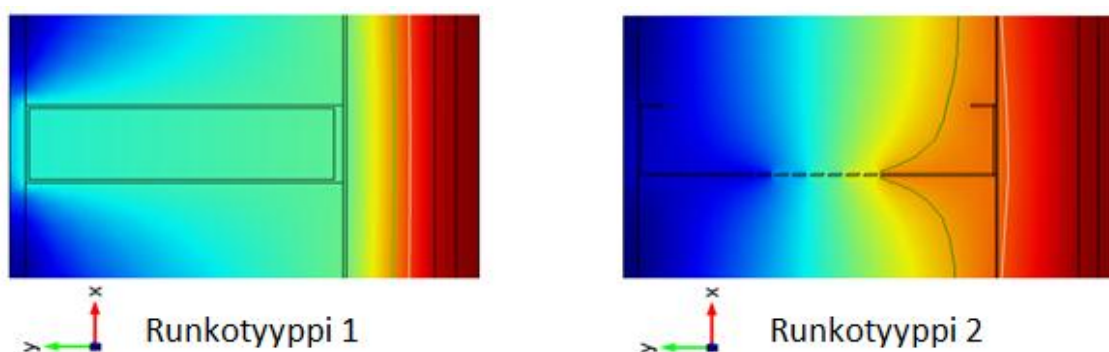


Kuva 21. Lämpöjakauma termorankaisessa seinässä (runkotyyppi 2). Punainen väri kuvaa lämmintä ja sininen kylmää lämpötilaa.

Rakennuksen kosteustekninen toiminta saatiin myös oleellisesti paremmaksi. Kuvassa 22 on otoksia runkotyyppi 1 ja 2 lämpöjakaumasta pystyprofiilin kohdalla. Kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi kuvaan on lisätty vihreä kastepistettä kuvaava viiva

(10,2 °C) sekä valkoinen homehtumista kuvaava viiva (13,15 °C). Kastepiste vastaa 100 % RH ja homehtumista kuvaava viiva on laskettu lämpötilalle, jossa suhteellinen kosteus on 80 %. Molemmat viivat on laskettu sisäilman arvoilla 21 °C ja 50 % RH.

Kuvasta huomataan, että runkotyyppissä 1 kastepiste sijoittuu reilusti höyrynsulun sisäpuolelle, jolloin seinän homehtumisriski on erittäin suuri. Runkotyyppissä 2 kastepiste on puolestaan höyrynsulun takana mutta 80 % RH saavutetaan pystyprofiilin kohdalla myös höyrynsulun sisäpuolella. Tämä ei kuitenkaan ole niin vakavaa koska sisäilman suhteellinen kosteus on harvoin ja silloinkin vain hetkellisesti yli 50 prosenttia. Homehtumisvaara on kuitenkin syytä tarkistaa esimerkiksi WUFI-ohjelmalla, jonka avulla pystytään varmistumaan rakenteen riittävästä ja nopeasta kuivumisesta hetkellisten kosteuspiikkien jälkeen.



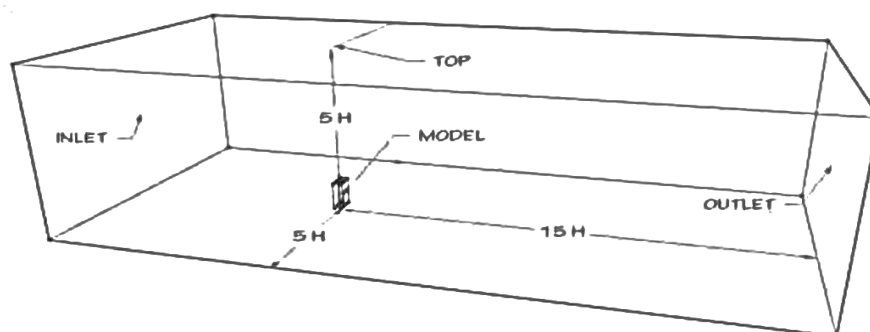
Kuva 22. Lämpöjakauma pystyprofiilin kohdalla runkotyyppissä 1 ja 2. Tummanvihreä viiva kuvaa kastepistettä (oranssinvärillä lämpötilavyöhykkeellä) ja valkoinen viiva kuvaa homehtumista (punaisella lämpötilavyöhykkeellä).

Huolimatta siitä, että runkotyyppi 2 osoittautui U-arvon kannalta toimivaksi rakenteeksi, se ei kuitenkaan ole tarpeeksi hyvä Kalasatamaan. Kalasataman rakennusten korkeus vaatii julkisivuelementeiltä keveyden lisäksi äärimmäistä mittatarkkuutta. Painon kannalta termoranka on kilpailukykyinen tuote mutta mittatarkkuudessa teräksellä ei päästä lähellekään alumiinin tarkkuuksia. Syynä mittatarkkuuden eroihin on profiilin erilainen valmistustekniikka, sillä alumiiniprofiilit valmistetaan painevaluprosessilla kun taas teräksiset termorangat muotoillaan valssaamalla teräsohutlevystä [Meriläinen 2013]. Näistä asioista johtuen on tarkistettu ideapohjana miten U-arvo muuttuisi, mikäli alumiiniprofiilin rei'ittäisi termorangan tapaan. Tätä runkoa kutsutaan runkotyyppi 3:ksi ja paksumman lämmöneristeen paksuutta on myös muutettu 250 mm:ksi. U-arvoksi tuli tällöin 0,31 W/(m²K), josta runkoprofiilien osuus oli 66 %, eli 0,21 W/(m²K).

Huomataan, että U-arvovaatimukset eivät toteudu runkotyyppi 3:lla ja rakenteen parantamiseksi tulisi tehdä lisätutkimuksia. Rakennetyypille ei näin olleen ehditä löytää ratkaisua tämän insinööriyön puitteissa. Runkotyyppien vertailu löytyy kokonaisuudessaan liitteestä 4.

5.3 Koko rakennuksen simulointi

Kalasadaman virtauksia on tutkittu COMSOL-ohjelmalla. Rakennuksen pinnalla vaikuttavien ilmavirtauksien tutkimiseen on käytetty COST-ohjeen mukaista simulointimenetelmää. COST-ohjeessa on määritetty minimimitat rakennuksen ympäröivän ilmatilan simuloinnille, tulosten oikeellisuuden takaamiseksi [Van Dronkelaar 2012]. Kuvassa 23 on esitetty COST-ohjeen mukaiset mitat, eli tuulensuuntaan nähden rakennuksen edessä, sivuilla ja päällä tulisi olla vähintään 5 kertaa rakennuksen korkeuden mittainen ilmatila ja rakennuksen takana 15 kertaa rakennuksen korkeuden mittainen ilmatila. Tässä koko rakennuksen simuloinnissa on tutkittu pelkästään korkeinta tornitaloa (Torni 4), eikä muiden rakennusten vaikutusta ei ole huomioitu.



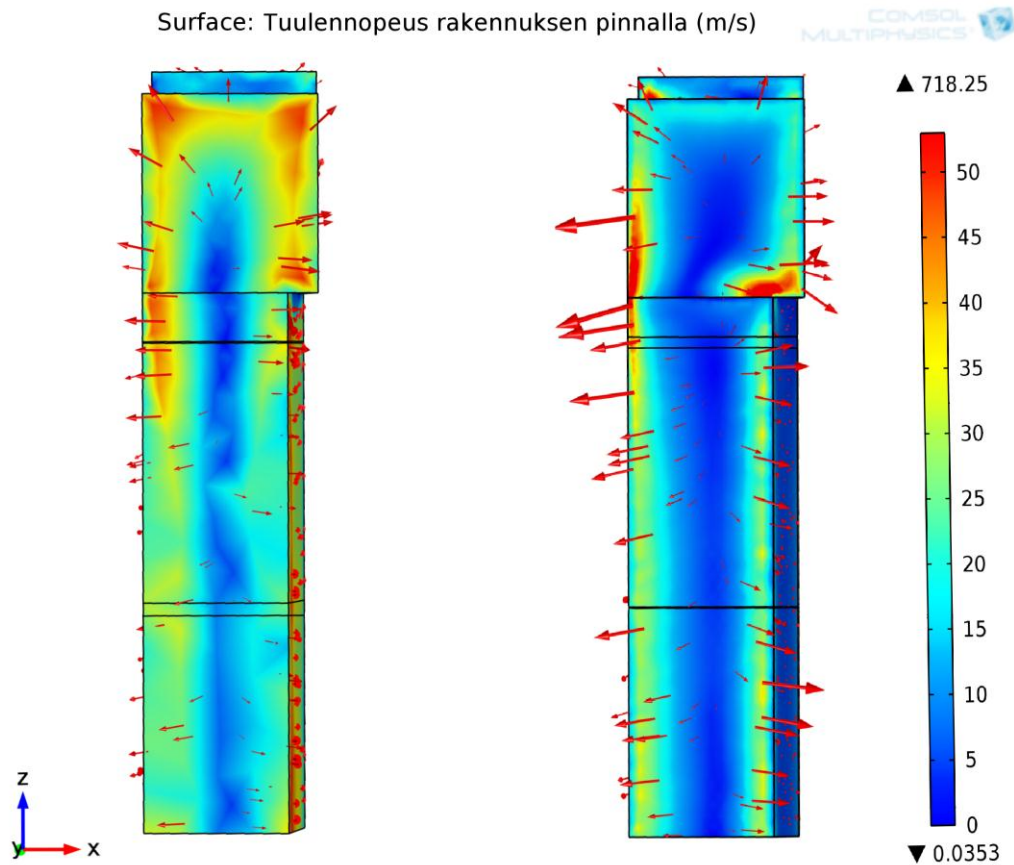
Kuva 23. Koko rakennuksen virtaussimuloinnissa käytettävän ilmatilan mitat COST-ohjeen mukaan [Van Dronkelaar 2012].

Simuloinnin helpottamiseksi on rakennuksen geometriaa yksinkertaistettu. Tuuliolosuhteina oli käytetty samoja lähtöarvoja kuin tuulitunnelikokeessa. Kalasadamassa voimakkaimmat tuulet tulevat mereltä, eli rakennuksen etelä- ja itäsuunnasta. Simulointi on tehty pelkästään eteläjulkisivulle ja tuulelle on käytetty 100 vuoden toistumisväliä ilmaantuvia 1 sekunnin puuskatuulia.

Simuloinnissa on ilmatila jaettu 3 vyöhykkeeseen, jolloin alimpaan 0–40 metrin sisään-tulovirtauksena on tuulitunnelikokeen mukaan laitettu 48 m/s. Seuraavan vyöhykkeen

(40–82 m) tulovirtaus on 51 m/s ja ylimmän vyöhykkeen virtaus 53 m/s. Ilmavirran turbulenssin intensiteettinä on käytetty yksinkertaisuuden vuoksi arvoa 0,1 koko ilmatilassa.

Simuloinnin avulla saatiin alla olevan kuvan (kuva 24) mukaisia virtauksia rakennuksen eteläjulkisivulle. Kuvasta huomataan virtauksen jakautuvan noin 2/3 rakennuksen korkeudesta ylös- ja alaspäin suuntautuviksi tuuliksi. Virtauksen tasaista jakautumista häiritsee hieman geometrian poikkeaminen rakennuksen yläosassa. Huomataan kuitenkin virtausten olevan voimakkaimpia rakennuksen reuna- ja erityisesti nurkka-alueilla. Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 [2001] mukaan on räystään nurkka-alueen tuulikuorma jopa 2,5-kertainen mitoittavaan tuulikuormaan verrattuna [SFS 2001: 68].



Kuva 24. Tornin 4 eteläjulkisivun pinnalla muodostuvat virtaukset maksimituulesta. Vasemmalla COST-ohjeen vastaisesta simuloinnista ja oikealle COST-ohjeen mukaisesta simuloinnista saadut tulokset.

Kuvassa vasemmalla näkyy selkeästi virtausten jakautuminen rakennuksen julkisivulla. Kuva on kuitenkin saatu COST-ohjeen vastaisesta simuloinnista, jossa rakennuksen ympäröimä ilmatila on liian pieni vaikuttaen täten julkisivun virtauksiin. Oikeanpuoleinen

kuva on saatu COST-ohjeen mukaisesta simuloinnista. Toisaalta oikeanpuoleisen kuvan simuloinnissa tuli pieniä virheitä, jolloin rakennuksen pinnalle muodostui epätodennäköisiä virtaushuippuja (jopa 700 m/s). Virheet saattavat johtua liian karhean hilaverkon (*mesh*) käytöstä mallissa, mikä puolestaan oli tehtävä tietokoneen rajallisen kapasiteetin vuoksi.

5.4 Julkisivun ilmatilan simulointi

Koko rakennuksen simuloinnin tuloksia on käytetty apuna tuuletusrakojen simuloinnissa. Kyseiset tuulennopeudet on otettu COST-ohjeen mukaisesta koko rakennuksen simuloinnista noin 1 m etäisyydellä rakennuksen eteläjulkisivun pinnasta. Tuulensuuntina on suosittu rakennuksen korkeus- ja syvyysuuntaisia tuulennopeuksia, jotta 2D-simuloinnin saataisiin vastaamaan mahdollisimman hyvin todellisuutta. Tämän takia arvot on otettu virtausten sivusuuntaisen jakautumisen keskikohdasta, joka sijaitsee lähellä eteläjulkisivun leveyden keskikohtaa. Ilmatilan simuloinnin ilmavirtausten arvot löytyvät liitteestä 6.

Kaksiulotteisesta simuloinnista johtuen, pystytään huomioimaan ainoastaan pystysuuntaisia ja kohtisuoria virtauksia. Julkisivun sivusuuntaisia virtauksia ei tässä työssä ole päästy tutkimaan simuloinnin laajuuden vuoksi. Nämä virtaukset ovat kuitenkin merkittäviä varsinkin viistosateen tunkeutumisen kannalta, jonka seurauksena sadevesi saattaa esimerkiksi jäätyä rakennuksen pinnoille.

Julkisivun ilmatilan virtausten toimintaa on tutkittu alas- ja ylöspäin suuntautuvien sekä julkisivun pintaan nähden kohtisuoraan tulevien virtausten avulla. Kohtisuoran tuulen simuloinneissa tuulennopeudet on otettu korkeudelta 70–90 m, jolloin pystysuuntaisten virtausten taitekohta saadaan mukaan simulointiin (katso liite 6). Alaspäin suuntautuvien virtausten arvot on otettu rakennuksen korkeudelta 60–80 metriä, eli simuloinnin yläpäässä tuulet tulevat suoraan julkisivua kohti ja lähtevät sitten virtaamaan alaspäin. Ylöspäin suuntautuvat virtaukset ovat korkeudelta 100–120 m, josta löytyy myös itseisarvoltaan lähes suurimmat virtausnopeudet. Kohtisuoran virtauskomponentin maksiminopeus on 17,6 m/s ja pystysuuntaisen virtauksen suurin nopeus 22,8 m/s.

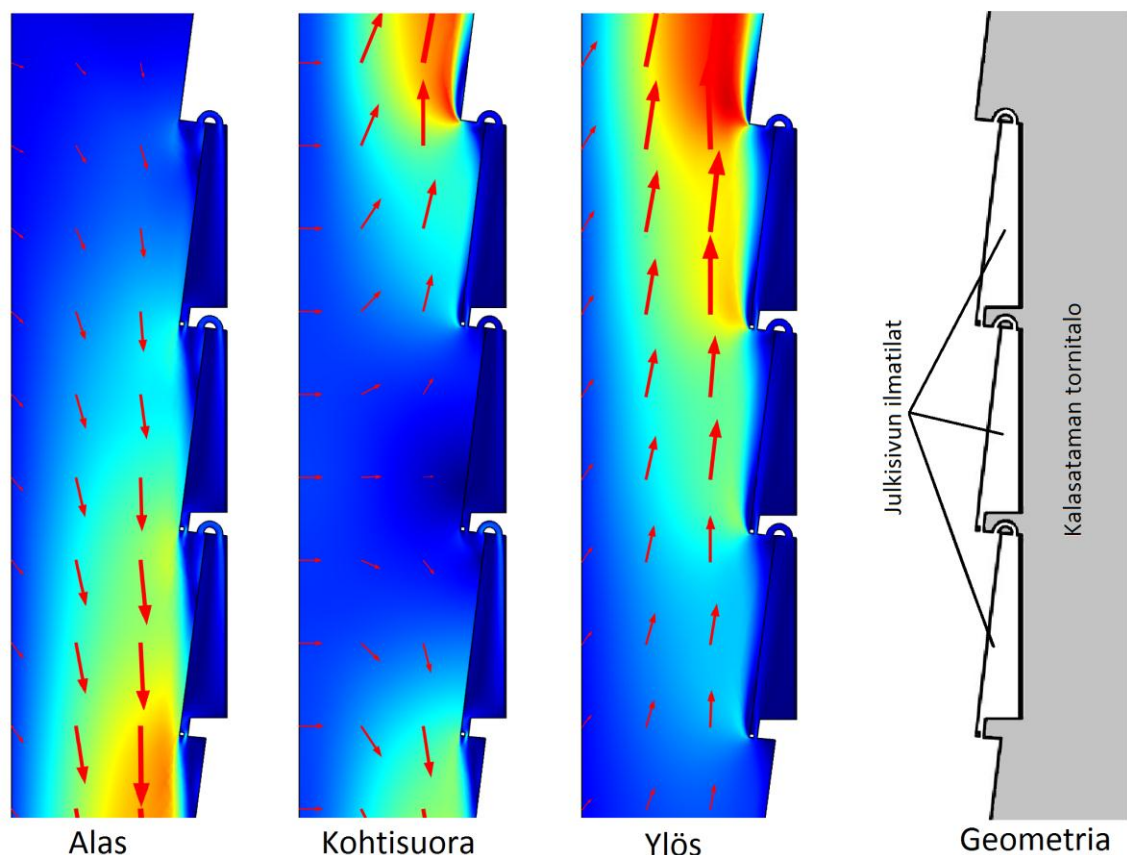
Simuloinneissa on huomioitu savupiippuvaikutus, mutta ei aurinkoa, eikä öistä vastasäteilyä. Aurinkohan lämmittää ilmarakoa, jonka seurauksena savupiippuvaikutus

korostuu. Simuloinneissa ei myöskään ole huomioitu rakennuksen seinien ja ikkunoiden läpi tulevaa lämpövirtaa, joka lisää myös savupiippuilmiön vaikutusta.

5.4.1 Kaksoisjulkisivun ilmatilan virtaukset

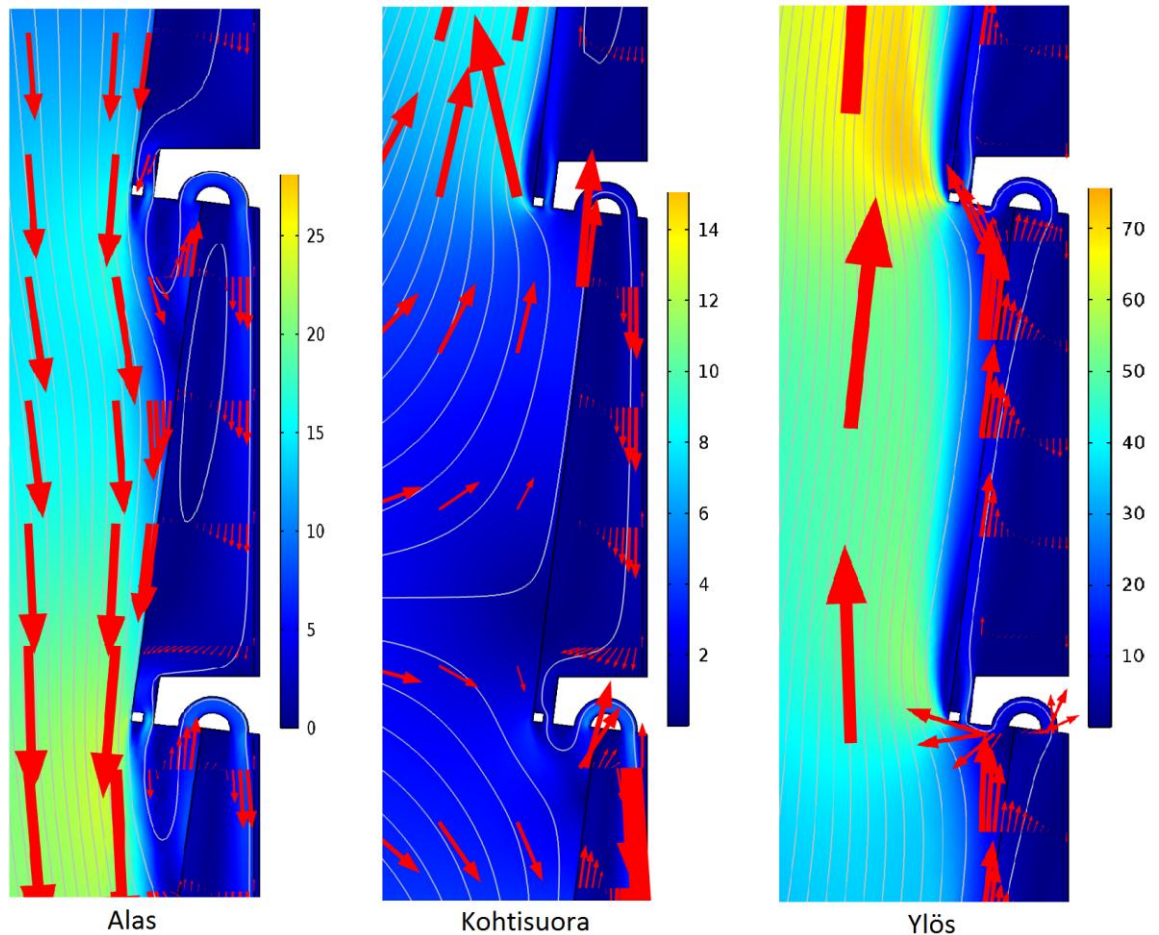
Kaksoisjulkisivun ilmatilan virtauksia on tutkittu suurimpien tuulikuormien avulla. Simulointien avulla on saatu selville ilmavirran suunnat ja kulkureitit. Seuraavana on myös pohdintoja virtauksista mahdollisesti aiheutuville vaaroille ja suunnitteluhaasteille.

Pystysuuntaisten virtausten vaikutukset kaksoisjulkisivun ilmatilan toimintaan näkyvät kuvassa 25. Simulointia on yksinkertaistettu kuvasta oikealla olevan geometrian mukaisesti säilyttämällä virtauksen kannalta tärkeät rakenneosat. Simuloitujen julkisivujen yksityiskohtaiset detaljit löytyvät liitteestä 2. Virtauskuvien alle on merkitty julkisivuun kohdistuvan tuulen virtaussuunnat. Ilmanvirtauksien suuruutta on kuvattu jo tutuksi tulleiden värien avulla, jolloin punainen kuvaa nopeata ja sininen hidasta virtausta.



Kuva 25. Pystysuuntaisten virtausten vaikutukset kaksoisjulkisivun ilmatilan toimintaan. Virtauskuvien alle on merkitty julkisivuun kohdistuvan tuulen virtaussuunnat.

Kuvassa 26 on suuremmat kuvat kaksoisjulkisivun ilmatiloista. Kuvan sisältämien pienempien kuvien alla on mainittu julkisivuun kohdistuvan tuulen virtaussuunnat. Virtaussuuntien kulkua ja suuntaa on lisäksi korostettu nuolien ja virtaviivojen (harmaat viivat) avulla. Virtauksien nopeudet näkyvät sekä nuolien suuruutena että värityksen avulla. Kuvien vierestä löytyy virtausnopeuksien asteikot (m/s). On hyvä kuitenkin tiedostaa näiden virtausnopeuksien edustavan kohteessa mahdollisesti ilmeneviä maksimiarvoja.

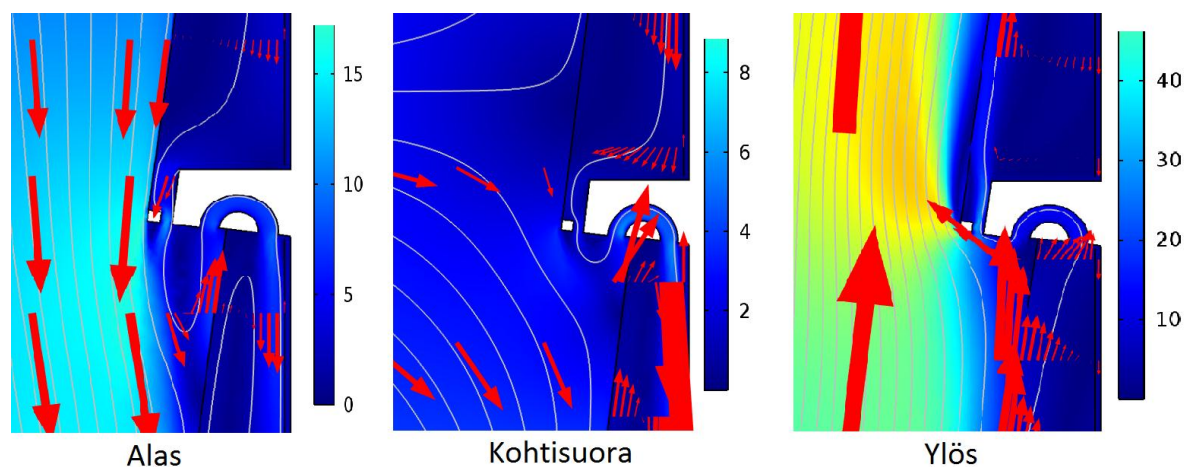


Kuva 26. Tuulesta ja savupiippuilmästä johtuvat virtaukset kaksoisjulkisivun ilmatiloissa. Tuulen suuntaa ja nopeuksia (m/s) on havainnollistettu virtaviivojen, nuolien ja värien avulla.

Alaspäin suuntautuvien tuulten myötä kaksoisjulkisivun ilmatilan suurimmat virtaukset kulkevat sen takaosan kautta ulos alapuolisesta sisääntuloaukosta. Osa näistä virtauksista jakautuu ilmatilan alapäässä ja kulkevat ilmatilan takaosassa olevassa tuuletusrasassa sekä ulkolasin sisäpinnalla takaisin ylös. Ylöspäin suuntautuvan tuulen seurauksena ilma virtaa voimakkaasti ulkolasin sisäpinnalla ja ulos yläpuolisesta ilma-aukosta. Osa ylöspäin suuntautuvasta virtauksesta vaihtaa suuntaa ja virtaa ilmatilan takaosan kautta takaisin alapäähän, jossa se yhdistyy valtavirtaan. Kohtisuorainen tuuli jakautuu

julkisivun pinnalla sekä ylös- että alaspäin suuntautuviksi virtauksiksi. Tämän takia tarkastelukohdan valinta määrää myös ilmatilassa olevien virtausten suunnan.

Kuvassa 27 on kaksoisjulkisivun ilmatilojen suuaukosta lähemmät kuvat. Kuvasta ilmenee, että ylöspäin suuntautuvan tuulen seurauksena ilmatilan sisääntuloaukoissa virtausnopeudet saattavat olla jopa 30 m/s. Kaksoisjulkisivun sisällä olevat suurimmat ilmavirtaukset (15 m/s) muodostuvat myös ylöspäin suuntautuvasta tuulesta. Tämän ansiosta virtauksen sisääntuloa kannattaa rajoittaa, etteivät liian voimakkaat virtaukset alenna ranskalaisten parvekkeiden käytettävyyttä.



Kuva 27. Ilmavirtauksen kaksoisjulkisivun sisääntuloaukkojen kohdalla. Kuvien alla lukee ja lisäksi nuolilla on merkitty julkisivuun kohdistuvan tuulen virtaussuunnat.

Voimakkaat ilmavirrat lisäävät myös viistosateen tunkeutumista koloihin ja rakoihin. Sadevesi saattaa kulkeutua ylöspäin suuntautuvan ilmavirran mukana ja kondensoitua ulkolasin sisäpinnalle. Tämä aiheuttaa suuren korroosiovaaran kaksoisjulkisivun alaosan teräskiinnikkeille. Samalla kosteus jäätyy helposti lasin pinnalla, joka aiheuttaa suuria jännityksiä rakenteille, veden tilavuuden kasvaessa jopa 9 % jäätyessään. Jään sulaminen ja sen seurauksena jäälohkareiden putoaminen aiheuttaa suuren vaaran rakennuksen vierellä liikkuville ihmisille. Toisaalta sisääntuloaukkoon suunniteltu ritilä saattaa pienentää suurempien jäälohkareiden putoamisvaaraa, mutta ei kuitenkaan estä jääpuikkojen muodostumista.

Jääpuikkoja muodostuu usein huonosti lämmöneristetyin talon räystäskohtiin. Rakennuksesta tuleva lämpö sulattaa lumen vedeksi, joka puolestaan jäätyy valuttuaan pois lämmönlähteestä. Kalasataman kaksoisjulkisivuihin saattaa myös muodostua jääpuikkoja. Lämmönlähteitä ovat esimerkiksi aurinko sekä sisäilma, jota pääsee ilmatilaan

suurten ikkunoiden kohdalta sekä avattavien terassiovien kautta. Kosteutta pääsee ilmatilaan esimerkiksi öisen vastasäteilyn seurauksena, sekä avattavien ovien myötä sisätilasta. Jääpuikkojen muodostumista voidaan estää esimerkiksi tippanokilla. Jääpuikkojen mahdollisen muodostumisen vuoksi, tulee ilmatilan sisääntuloaukkojen toimintaa tutkia jatkossa vielä tarkemmin.

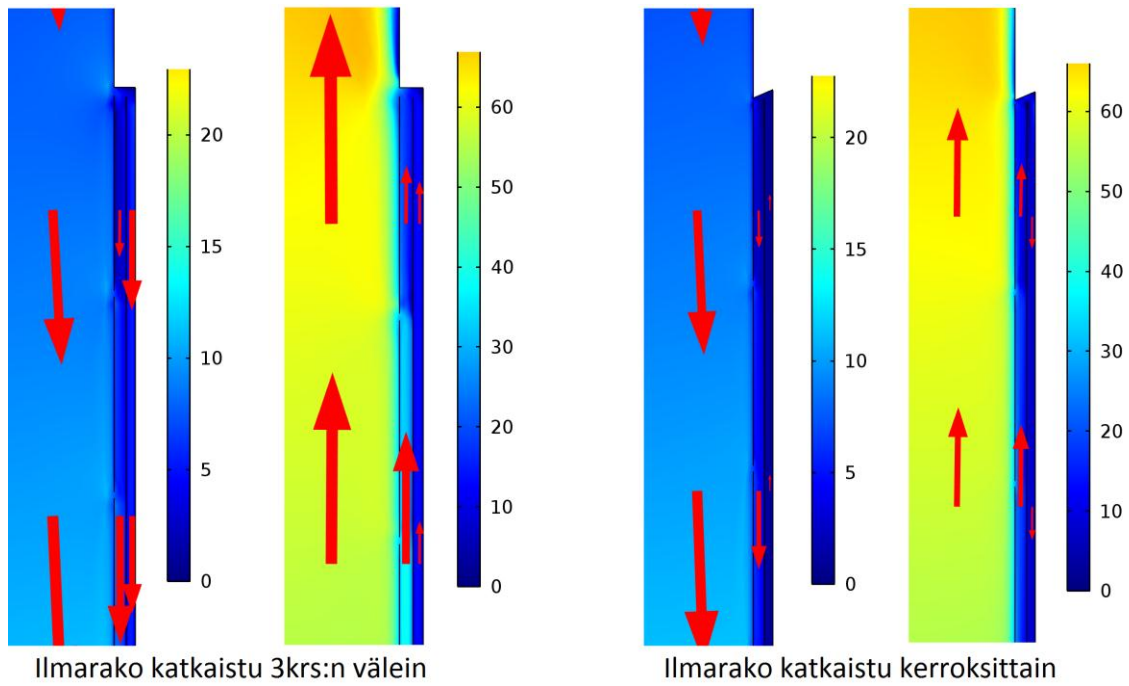
Voimakkailla ilmavirtauksilla on myös hyvät puolensa. Esimerkiksi ilmatilan suuri ilmanvaihtuvuus alentaa ulkolasin huurtumisriskiä sekä pienentää rakennuksen lämpökuormaa. Toisaalta ilmavirtauksen riittävyys on tutkittava myös ”tyynen” sään tuulilla. Tuulennopeuden ollessa lähes nolla ilmatilan tuuletus hoituu pelkän savupiippuvaikutuksen avulla. Nämä tarkastelut jäävät suoritettavaksi jatkoselvityksessä.

5.4.2 Suoran lasijulkisivun virtaukset tuuletusraossa

Suoralle lasijulkisivulle on käytetty samoja lähtöarvoja kuin kaksoisjulkisivussa. Lasijulkisivussa on virtaussuunnan ja -nopeuden lisäksi tutkittu, miten tuuletusraon katkaiseminen vaikuttaa ilmavirtauksiin (kuva 28). Simuloinneilla on tarkistettu kerroksittain sekä kolmen kerroksen välein katkaistuja tuuletusrakojta. Ulkolasitus on tehty liitteessä 2 olevan yksityiskohtapiirroksen mukaan, 660 mm korkeista levyiksi. Lasilevyjen väliin jää tällöin 20 mm rako.

Kuvassa 28 huomataan kolmen kerroksen välein katkaistun (kuvassa vasemmalla) ilmaraon ilmavirtausten olevan samansuuntaisia tuulen kanssa. Kerroksittain katkaistussa ilmaraossa (kuvassa oikealla) ”sadetakin” takaisen ilman virtaussuunta on vastakkainen tuulen virtaukselle. Kuvassa ilmenee, kuinka myös kerroksittainen ilmakatkaisu pienentää merkittävästi sisemmän ilmaraon virtauksia. Kuvasta selviää myös virtausnopeudet (m/s) värien ja nuolenpituuksien mukaan.

Sisempien tuuletusrakojen ilmavirtaukset ovat varsin pieniä, vaikka ulkopuolinen tuuli on erittäin voimakas. Tästä johtuen rakennuksen ilmarakojen tuuletuksen riittävyys olisi hyvä tarkistaa myös tyynellä säällä. Toisaalta ilmatilan lämpötila on suurimmaksi osaksi korkeampi kuin ulkolämpötila, jonka seurauksena tuuletukselta tapahtuu voimakkaammin luonnollisen konvektion avulla.



Kuva 28. Ilma virtausnopeudet (m/s) "sadetakilla" varustetun suoran lasijulkisivun tuuletusraoissa. Ilmarako on katkaistu vasemmanpuoleisessa kuvassa kolmen kerroksen välein ja oikeanpuoleisessa kerroksittain.

Tuuletusraon virtausten katkaiseminen vaikuttaa myös ilman virtausnopeuksiin. Kerroksittain katkaistun ilmanraon virtaukset ovat huomattavasti pienempiä kuin kolmen kerroksen välein katkaistuissa raoissa. Ilmanraon virtauskatkot voivat toimia myös palokatkoina, jolloin on huolehdittava niiden toiminnasta palotilanteissa. Näiden suunnittelussa on myös huomioitava, etteivät ne aiheuta vettä ja jäätä kerääviä tasanteita.

6 Pohdinta

Insinööriyöstä saatiin alustavia tietoja korkean rakennuksen julkisivun rakennusfysi-kaaliselle toiminnalle merenrantaolosuhteissa. Tämän työn tulokset toimivat suunnan-näyttäjänä jatkoselvityksiä varten, joiden avulla on mahdollista valita määräykset täyttävä terveellinen, turvallinen ja rakennuksen elinajan toimiva julkisivu. Työssä onnistuttiin kokoamaan ohjeita ja kirjallisuusvinkkejä korkean rakennuksen suunnitteluun meren-rantaolosuhteissa. Vaikka työssä annettiin hyviä ideoita julkisivun valintaan, toimivia rakennedetaljeja olisi voinut tutkia enemmän. Työn laajuuden vuoksi keskityttiin kuitenkin rakennuksen lämmön, kosteuden ja ilmavirtausten simulointiin.

Lämpö- ja kosteussimuloinneissa alumiiniprofiilin suuri kylmäsilta-vaikutus yllätti suuresti. Tutkittu rakenne ei täytä U-arvo vaatimuksia ja on altis homehtumiselle, jolloin läh-dettiin ideoimaan runkoprofiilin kehittämistä näiden vaatimusten saavuttamiseksi. Ra-kennetyypin oikean kosteusteknisen toiminnan ja näin ollen rakenteen terveellisyyden varmistamiseksi, todettiin pitkäaikaisen tarkastelun olevan tarpeen. Pitkäaikainen tar-kastelu voidaan tehdä esimerkiksi WUFI-ohjelmalla. Säädatoina voidaan käyttää FRA-ME-tutkimuksesta saatujen kriittisten referenssivuosien säädatoja. Rannikkoalueen suuremman kosteusrasituksen vuoksi näitä sisämaan kriittisiä säädatoja käytettäessä tulisi julkisivurakenne suunnitella siten, ettei synny kosteuden kannalta lähellekään kriittisiä kohtia rakenteeseen.

Ilmavirtaussimuloinnit olivat havainnollistavia ja antavat hyvän pohjan jatkoselvityksiä varten. Koko rakennuksen simuloinnin avulla saatiin havainnollistettua ilmavirtausten liikkumista rakennuksen ympärillä ja julkisivun pinnalla. Simuloinneissa jouduttiin hyväksymään pieniä virheitä tietokoneen kapasiteetin rajallisuuden vuoksi. Julkisivun tarkemmalle virtaussimuloinnille saatiin kuitenkin realistisia arvoja. Simuloinnin avulla oli myös helpompi ymmärtää viistosateen ankaruus ja tuulikuormien voimakas rasitus nurkka ja räystääsalveilla.

Kaksoisjulkisivun ilmatilan ja tuuletusraon simuloinneissa käytettiin koko rakennuksen simuloinnista saatuja tuuliarvoja. Simulointi tehtiin kaksiulotteisena ja kolmannen akse-lin suuntaiset tuulet jätettiin pois laskennasta, mistä johtuen simuloinnit eivät vastaa koko totuutta. Tarkastelujen avulla pystyttiin toteamaan ilman virtausreitit sekä maksimi-nopeudet julkisivun ilmatiloissa. Ylöspäin suuntautuvat tuulet aiheuttivat voimakkaan virran kaksoisjulkisivun ulkolasin sisäpinnalle, jolloin arvioitiin viistosateiden aiheutta-

van suurta jäätymisriskiä ilman sisääntuloaukon kohdalle. Ilmanrakojen tuuletuksen riittävyys rajattiin kuitenkin tämän insinööriyön ulkopuolelle ja jää selvitettäväksi myöhemmin.

Jatkotutkimuksissa jää tehtäväksi rakenteen pitkäaikaisen kosteustekniikan varmistamisen lisäksi, rakennetyypin kehittäminen energiamääräysten täyttäväksi, terveelliseksi, turvalliseksi ja huoltovapaaksi kokonaisuudeksi. Julkisivun kiinnikkeiden ja detaljien kannalta ehdittiin antaa vinkkejä esimerkiksi korroosion, toleranssien, äänihaittojen ja paloturvallisuuden kannalta. Kiinnikkeiden rakennetekninen tarkastelu jää myös selvitettäväksi jatkotutkimuksissa.

7 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin Kalasataman tornitalojen julkisivuvaihtoehtojen rakennusfysikaalista käyttäytymistä lämmön, kosteuden ja meren läheisyyden takia kovien tuulien suhteen. Tiukat lämmöneristysmääräykset sekä ilmastonmuutoksen huomioiminen vaikeuttivat suunnittelua entisestään. Mereltä puhaltavat voimakkaat tuulet ja niiden mukana merivedestä kulkeutuvat kloridit asettavat lisävaatimuksia detaljien ja materiaalien valinnalle.

Tutkittava ulkoseinä täytti käsinlaskennan mukaan energiamääräykset mutta runkoprofiilin kylmäsilta vaikutuksen tarkassa selvityksessä, todettiin U-arvon olevan reilusti sallittua arvoa suurempi. Alumiininen runkoprofiili olisi kuitenkin mittatarkkuutensa ja keveytensä takia hyvä vaihtoehto korkean rakennuksen ulkoseinässä. Jatkoselvityksissä haasteen on kehittää mittatarkka runkoprofiili, jonka lämmöneristävyyttä voidaan parantaa esimerkiksi käyttämällä monimateriaalista I-profiilia.

Ulkoseinän homehtumista voidaan ehkäistä estämällä kosteuden pääseminen ja kerääntyminen rakenteisiin. Viistosateen ankaruuden takia korkeassa rakennuksessa olisi varsinaisen julkisivun takana syytä olla kosteutta ja vettä läpäisemätön ”sadetakki”. Sateelta suojassa olevan ulkoseinän kriittisin kosteuslähde on useimmiten sisäilman kosteus, jonka tiivistymistä rakenteisiin estetään tiiviisti asennetulla höyrynsululla sekä minimoimalla kylmäsiltoja. Jatkoselvityksissä olisi syytä tarkistaa ulkoseinän pitkäaikainen kosteustoiminta käyttäen FRAME-tutkimuksen avulla saatuja kriittisten referenssi-vuosien säädatoja.

Tuulen vaikutusta rakennuksen ympärillä ja rakennuksen pinnoilla on tutkittu COMSOL-ohjelmalla. Tulosten avulla voitiin todeta rakennusten reuna ja nurkka-alueiden olevan suurimpien tuulirasituksen ja näin ollen myös kovimman viistosateen alaisina. Ilmavirtauksen maksiminopeuksia ja suuntaa julkisivulasituksen takana olevassa ilmatilassa pystyttiin tarkastelemaan simulointien avulla. Tuloksista ilmeni, että ylöspäin suuntautuvat virtaukset ovat kaksoisjulkisivussa kriittisiä. Tällöin julkisivuissa voimakkaan ilmavirran mukana kulkeutuva sadevesi ja ilman kosteus saattaa kerääntyä ulkolasin sisäpintaan luoden jäätymisriskin varsinkin kaksoisjulkisivun ilmatilan sisääntuloaukon kohdalle.

Jatkoselvityksissä tulisi selvittää ilmavirtausten riittävyys varsinkin ”sadetakin” takana olevalle ilmavirtaukselle tyynellä säällä. Yksi jatkoselvitys on myös tutkia julkisivun kiinnikkeitä. Tuulennopeussimulointeja pystytään käyttämään hyväksi esimerkiksi suurimman tuulirasituksen alaisten kiinnitysten valinnassa. Insinööriyön tulokset toimivat suunnannäyttäjinä jatkoselvityksiä varten, joiden avulla on mahdollista valita määräykset täyttävä terveellinen, turvallinen ja rakennuksen elinajan toimiva julkisivu.

Lähteet

A1 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakentamisen valvonta ja tekninen tarkastus, Määräykset ja ohjeet 2006. Helsinki: Ympäristöministeriö. s. 34–35.

A2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen suunnittelijat ja suunnitelmat, Määräykset ja ohjeet 2002. Helsinki: Ympäristöministeriö. s. 14.

Arkkitehtistudio M&Y. 2012. Korkean rakentamisen selvitys Tampereen keskusta-alueella, selvityksen loppuraportti 30.10.2012. Verkkodokumentti. <<http://www.tampere.fi/material/attachments/k/6C92ilb5A/korkeanrakentamisenselvitys.pdf>>. Luettu 20.8.2013.

Björkholz, Dick. 1997. Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto.

C2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki: Ympäristöministeriö.

C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Lämmöneristys ohjeet, 2003. Helsinki: Ympäristöministeriö.

D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiatehokkuus, Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö.

E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Emporis GmbH. 2013. High-rise building. Verkkodokumentti. <<http://www.emporis.com/building/standards/high-rise-building>>. Luettu 20.8.2013

Finnmap Consulting 2013. Aaro Kohonen Oy. Verkkodokumentti, <http://www.fmcgroup.fi/yritykset_ja_yhteystiedot/suomessa/aaro_kohonen_oy>. Luettu 20.8.2013.

Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston asemakaavaosaston selvityksiä 2011:4, Korkea rakentaminen Helsingissä. Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto.

Ilmatieteenlaitos. Ilmastollinen vertailukausi 1981-2010. Verkkodokumentti. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi-1981-2010>>. Luettu 20.8.2013.

Kalasadaman keskus. Tietoa hankkeesta. Verkkodokumentti, <<http://www.kalasadaman.keskus.fi/tietoa-hankkeesta>>. Luettu 20.8.2013.

Kero, Paavo. 2011. FRAME, yleisöseminaari 1.12.2011: Ikkunoiden kondensoitumisriskin muutokset. Verkkodokumentti. <<http://www.rakennusteollisuus.fi/download.aspx?intFileID=2762&intLinkedFromObjectID=14884>>. Luettu 20.8.2013.

Kestävä kivitalo. 2013. Verkkodokumentti. <<http://www.kivitalo.fi/betonirakentaminen/kosteudenhallinta/kosteudenhallinta-suunnittelussa.html>>. Luettu 20.8.2013.

Kurnitski, Jarek. 2012. Nollaenergiarakentamisesta kehityksen veturi, Sitran Energiaohjelman päätösseminaarissa 7.6.2012. Verkkodokumentti. <<http://www.slideshare.net/SitraEnergia/sitra-jarek-kurnitski-201267>>. Sitra oy. Luettu 2.7.2013.

Laaksonen, Juha-Pekka. 2013. Toimitusjohtaja. L2 Paloturvallisuus Oy. Helsinki. Puhe-
linhaastattelu. 30.5.2013.

Lahdensivu, Jukka ym. 2012. Tutkimusraportti 160, Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Maankäyttö- ja rakennuslaki. 1999. 132/5.2.1999

Meriläinen, Teuvo. 2012. Uudet rakentamisen energiamääräykset D3 tulevat voimaan 1.7.2012. Diaesitys 7.2.2012. Aaro Kohonen Oy.

Meriläinen, Teuvo. 2013. Erityisasiantuntija. Aaro Kohonen Oy. Espoo. Keskusteluja tammi–elokuu 2013.

Mäkeläinen, Pentti ym. 2003. TKK-TER-26, Kaksoisjulkisivun suunnitteluohjeet. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Mäkitalo, Mikael. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

Nissinen, Hannu. 2013. Toimitusjohtaja. Aaro Kohonen Oy. Espoo. Keskustelu 22.8.2013.

Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 1998. Yhdistelmäjulkisivut. Jyväskylä: Suomen Betonitieto Oy.

Rautaruukki. 2000. Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa. Keuruu: Rautaruukki Steel.

RT 38215. Schüco lasijulkisivu- ja valokattojärjestelmät alumiinista. 2012. Schüco International KG

Sisäilmayhdistys ry. 2013. Rakennusfysikaaliset kuntotutkimusmenetelmät. Verkkodokumentti. <http://www.sisailmayhdistys.fi/files/attachments/ailan_lisaykset/e_raunopelto-la.pdf>. Luettu 11.4.2013.

SRV Rakennus Oy. 2012. Kalasataman keskuksen tornien ulkoseinien suunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet. 19.10.2012. (Sisäinen jakelu)

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2001. RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet. Helsinki: RIL ry.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2009. RIL 235-2009, Uimahallien rakenteiden suunnittelu ja kunnonhallinta. Helsinki: RIL ry. Sivut 62–73, 165–174.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2011. RIL 250-2011, Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Saarijärvi: RIL ry.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2001. SFS-EN 1991-1-4 Rakenteiden yleiset kuormat. Tuulikuormat.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2008. SFS-EN ISO 6946, Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä.

Tenhunen, Olavi. 2003. TTK-TER-28, Metallilasirakenteisen kaksoisjulkisivun materiaalien soveltamiskriteerit. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Terrart esite: Architectural Terra Cotta. 2006. Marblehead: NBK North America Inc.

Van Dronkelaar, Chris & van Schijndel, Jos. 2012. Assessing the Potential of Ventilated Facades on Reducing a Buildings' Thermal Load Using Decoupled COMSOL Simulations. Verkkodokumentti <http://www.comsol.com/papers/12911/download/schijndel3_paper.pdf>. Luettu 20.8.2013.

Varis, M., Niemi, J. ja Valjus, J. 2009. Rantarakentamisen ohjeisto. Helsinki: Helsingin kaupunki. Kehittyvä kerrostalo. s.8, 14, 18–22.

Vinha, Juha. 2011a. FRAME, 3. yleisöseminaari, Helsinki 1.12.2011: Kriittisten referenssivuotien valinta homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle Suomen ilmastossa. Verkkodokumentti. <<http://www.rakennusteollisuus.fi/download.aspx?intFileID=2772&intLinkedFromObjectID=13296>>. Luettu 20.8.2013.

Vinha, Juha. 2011b. RTEK-3511 Rakennusfysiikka. Luentomoniste 2011, osa 1. Tampereen teknillinen yliopisto.

Vinha, Juha ym. 2013. Tutkimusraportti 159, Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennuksen energiakulutuksessa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. s. 316–321, liite 4.

Ympäristöministeriö. 1997. Ympäristöopas 28, Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Helsinki: Rakennustieto Oy.

WSP Finland Oy. 2012. Kalasataman tornien tuulitunnelikokeet. Lokakuu 2012. (sisäinen jakelu)

Liite 1: Haastattelukysymykset

L2 Paloturvallisuus Oy:n toimitusjohtaja Juha-Pekka Laaksosen haastattelu 30.5.2013

- Voisitteko mainita muutaman esimerkin maailmalla tapahtuneista tornitalojen julkisivupaloista?
- Mistä palot ovat aiheutuneet?
- Minkälaisia eristeitä näissä kohteissa oli käytetty?
- Minkälaisia palokatkoja tulisi tehdä julkisivuihin?
- Kuinka tiheässä palokatkojen tulisi olla julkisivuissa?

Liite 2: Jatkoselvityksiä varten valitut rakennetyypit (luottamuksellinen)

(Kuvat eivät ole mittakaavassa)

Liite 3: Materiaaliominaisuudet

Alla on laskennassa ja simuloinneissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia. Taulukossa 4 on lämpö- ja kosteudenlaskennassa käytettyjä arvoja. Materiaaliarvot ovat lähtökohtaisesti valmistajien ilmoittamia arvoja kyseessä olevalle tuotteelle. Jos valmistajan internetsivuilta ei ole löytynyt tarvittavia suureita, on käytetty COMSOL-ohjelman sisäänrakennettuja, RakMK C2 mukaisia taikka RIL 107 olevia arvoja.

Taulukko 4. Lämpö- ja kosteuslaskennassa käytettyjen materiaalien arvoja.

	Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (λ_U)	Tiheys (ρ)	Ominaislämpökapasiteetti (C_p)	Vesihöyrynvastus (Z_p)
	W/(m*K)	kg/m ³	J/(kg*K)	m ² *s*Pa/kg
Kipsilevy GEK	0,25	900	1090	4,5E+07
Vanerilevy (havu)	0,11	520	1600	1,4E+10
Paroc eXtra	0,036	30	850	2,5E+08
Paroc Cortex One	0,033	60	850	6,3E+08
Höyrynsulkumuovi PE (HD)	0,5	980	1800	5,0E+11
Alumiini	160	2800	880	1,0E+13
Teräs	44,5	7850	475	1,0E+13
Puu (havu)	0,12	450	2300	5,0E+09
Tuulensuojalevy: Cembrit Windstopper	0,3	1450	900	2,5E+09
Lasi	1	2500	750	

Taulukossa 5 on teräksen, alumiinin ja lasin materiaaliominaisuuksia. Tästä voidaan havaita teräksen vetolujuuden olevan selvästi suurempi kuin alumiinin. Samalla alumiinin lämmönjohtavuus on noin 3 kertaa suurempi kuin teräksen. Näiden takia paksumpia rakennepaksuuksia vaativa alumiini toimii voimakkaana kylmäsiltnä rakennuksen rungossa.

Taulukko 5. Teräksen, alumiinin ja lasin materiaaliominaisuuksia [Tenhunen 2003: 25].

Ominaisuus (20°C:n lämpötilassa)	Teräs ja sään- kestävä teräs	Ruostumaton ja hapon- kestävä teräs	Alumiini	Float-lasi
Tiheys (kg/m ³)	7850	7900...8000	2700	2500
Pituuden lämpötilakerroin (10 ⁻⁶ /°C)	12	16	23	9
Ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)	0,45	0,5	0,92	0,72
Lämmönjohtavuus (W/m°C)	55	15	200	1
Kimmokerroin (kN/mm ²)	210	200	70	70
Puristusrakenteellisuus (N/mm ²)				700...1000
Vetomurtolujuus (N/mm ²)	340...680	450...850	120...350	15...100
Poissonin vakio	0,3	0,3	0,3	0,2
Kovuus (Mohs)	4	4	3	6

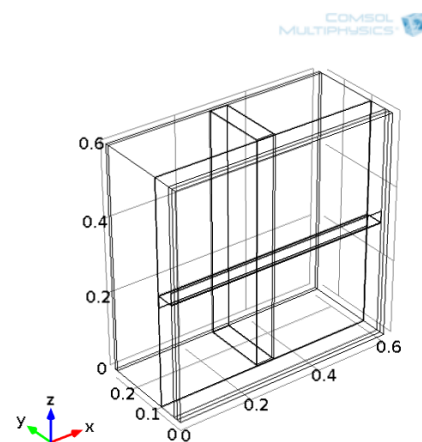
Liite 4: Runkotyyppien lämpö- ja kosteusjakauma

Kalasadaman tornitalojen runkotyyppin lämpö- ja kosteusteknisen tarkastelun yhteydessä on valittu tarkistettavaksi 3 runkotyyppiä. Tarkoitus oli alun perin tarkistaa pelkän alumiiniprofiilin vaikutus U-arvon suuruuteen. Alkuperäinen rakenne (runkotyyppi 1) osoittautui U-arvon puolesta määräysten vastaiseksi, jolloin lähdettiin hakemaan vaihtoehtoisia rakennetta. Aluksi tarkistettiin, paljonko termorankainen runko (runkotyyppi 2) pienentäisi kylmäsilta vaikutusta. Runkotyyppi 2:lla päästään määräysten mukaiseen U-arvoon, eli $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Teräs ei kuitenkaan sovellu korkeaan rakentamiseen suurten mittaepätarkuuksien takia, joten runkotyyppi 3 kehitettiin ideapohjana jatkotutkimuksia varten.

Seuraavaksi on runkotyyppien rakenteiden selitykset sekä havainnollistavat kuvat rungoista. Paksumman lämmöneristeen paksutta on myös jouduttu lisäämään paremman U-arvon saavuttamiseksi. Höyrynsulun ja vaakaprofiilin materiaalia on myös muutettu pystyrungon materiaalin mukaan, jotta ei tulisi ongelmia ruosteen kanssa.

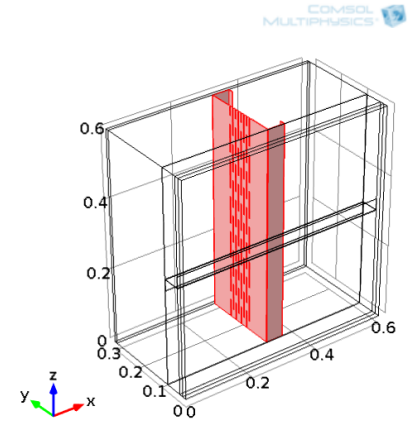
Runkotyyppi 1

1. Pintakäsittely huoneselityksen mukaan
2. 13 mm Kipsilevy GEK
3. 50 mm Z-profiili vaakaan k 600, alumiini (paksuus 2 mm)
Lämmöneriste, mineraalivilla esim. Paroc eXtra tai vastaava. ($\lambda_U = 0,036 \text{ W}/(\text{mK})$)
4. 2 mm Alumiinilevy höyrynsulkuna
5. 180 mm Pystyrunko, alumiiniprofiili 180 k 600
Mineraalivilla, esim. Paroc Cortex One (A2-s1,d0), ($\lambda_U = 0,033 \text{ W}/(\text{mK})$), saumat teipataan
6. 9 mm Tuulensuojalevy, esim. Cembrit Windstopper
7. 30 mm Tuuletusrako
8. Julkisivujärjestelmä arkkitehdin ja lasitoimittajan ohjeiden mukaan, esim. Schüco



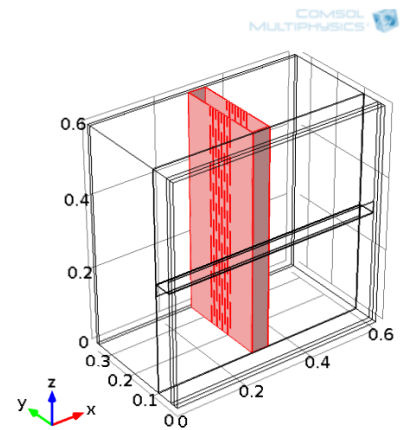
Runkotyyppi 2

1. Pintakäsittely huoneselityksen mukaan
2. 13 mm Kipsilevy GEK
3. 50 mm Z-profiili vaakaan k 600, teräs ($t = 1 \text{ mm}$)
Lämmöneriste, mineraalivilla esim. Paroc eXtra
tai vastaava. ($\lambda_U = 0,036 \text{ W/(mK)}$)
4. 1 mm Teräslevy höyrynsulkuna
5. 220 mm Pystyrunko, termoranka 220 k 600 ($t = 1,5 \text{ mm}$)
Mineraalivilla, esim. Paroc Cortex One
(A2-s1,d0), ($\lambda_U = 0,033 \text{ W/(mK)}$), saumat teipataan
6. 9 mm Tuulensuojalevy, esim. Cembrit Windstopper
7. 30 mm Tuuletusrako
8. Julkisivujärjestelmä arkkitehdin ja lasitoimittajan
ohjeiden mukaan, esim. Schüco



Runkotyyppi 3

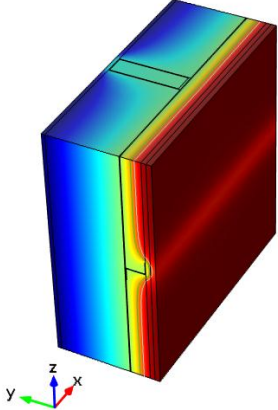
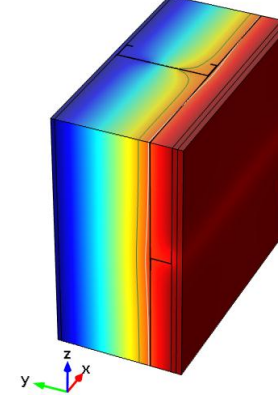
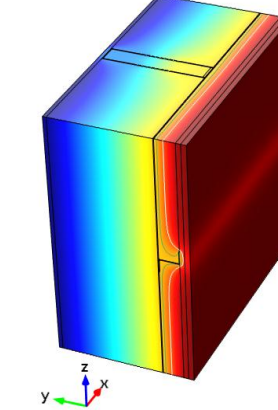
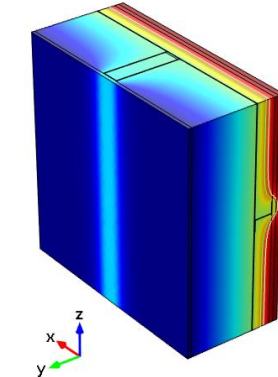
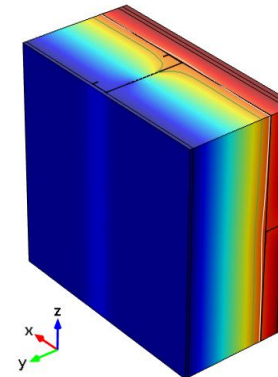
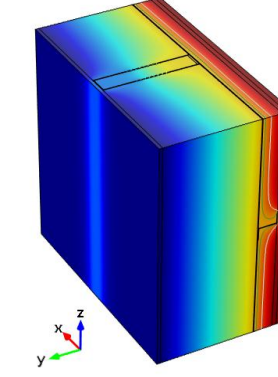
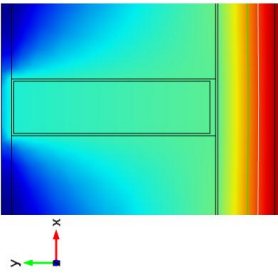
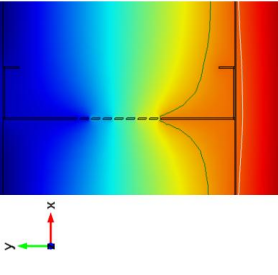
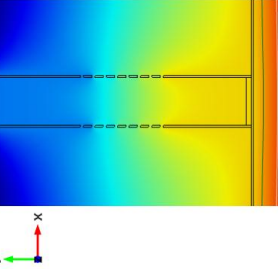
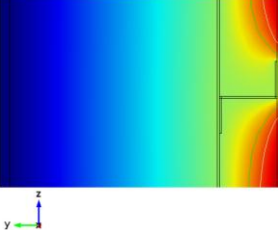
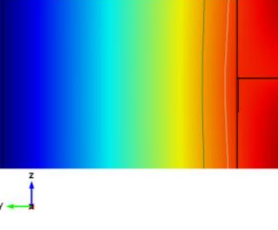
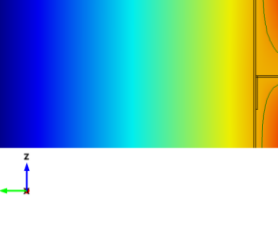
9. Pintakäsittely huoneselityksen mukaan
10. 13 mm Kipsilevy GEK
11. 50 mm Z-profiili vaakaan k 600, alumiini ($t = 1,5 \text{ mm}$)
Lämmöneriste, mineraalivilla esim. Paroc eXtra
tai vastaava. ($\lambda_U = 0,036 \text{ W/(mK)}$)
12. 2 mm Alumiinilevy höyrynsulkuna
13. 250 mm Pystyrunko, rei'itetty Al-profiili 250 k 600 ($t = 2 \text{ mm}$)
Mineraalivilla, esim. Paroc Cortex One
(A2-s1,d0), ($\lambda_U = 0,033 \text{ W/(mK)}$), saumat teipataan
14. 9 mm Tuulensuojalevy, esim. Cembrit Windstopper
15. 30 mm Tuuletusrako
16. Julkisivujärjestelmä arkkitehdin ja lasitoimittajan
ohjeiden mukaan, esim. Schüco.



Seuraavalla sivulla olevaan taulukkoon (taulukko 6) on koottu simuloinneista saadut kuvat runkotyypeistä. Taulukkoon on lisätty myös runkotyyppien U-arvot sekä kylmäsiltojen osuus U-arvosta. Kuvista huomaa myös eri runkoprofiilien vaikutukset lämpöjakaumaan. Lämpöjakauma on puolestaan havainnollistettu väriskaalan avulla, jolloin lämmin sisäpinta on punainen ja kylmä ulkopinta sininen.

Rakennuksen sisälämpötilana on käytetty $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkolämpötilana $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Pintavastuksina on käytetty kipsilevyn sisäpinnassa sekä tuulensuojalevyn ulkopinnassa sisäpuolisen pintavastuksen arvoa $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Rakenteen kosteusteknistä toimintaa kuvaamaan on lisätty vihreä kastepistettä kuvaava viiva ($10,2 \text{ }^\circ\text{C}$) sekä valkoinen homehtumista kuvaava viiva ($13,15 \text{ }^\circ\text{C}$). Kastepiste vastaa $100 \text{ } \%$ RH ja homehtumista kuvaava viiva on laskettu lämpötilalle, jossa suhteellinen kosteus on $80 \text{ } \%$. Molemmat viivat on laskettu sisäilman arvoilla $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja RH $50 \text{ } \%$.

Taulukko 6. Runkotyypin lämpöjakauman ja kriittisen kosteuden vertailu.

Runkotyyppi 1	Runkotyyppi 2	Runkotyyppi 3
$U = 0,46 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Runkoprofiilien vaikutus $\Delta U = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	Runkoprofiilien vaikutus $\Delta U = 0,054 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	Runkoprofiilien vaikutus $\Delta U = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Sisäpinta		
		
Ulkopinta		
		
Pystyprofiilin kohdalta		
		
Vaakaprofiilin kohdalta		
		

Huomataan alumiiniprofiilisen rungon olevan lämmöneristyksen kannalta paljon heikompi kuin termorankainen runko. Tämä johtuu alumiinin suuresta lämmönjohtavuudesta, joka on 160 W/(mK) . Teräksen lämmönjohtavuus on $1/3$ alumiinin lämmönjohtavuudesta samalla kun sen lujuus on noin kaksinkertainen. Tästä syystä alumiiniprofiililla on oltava suurempi rakennepaksuus, jolloin kylmäsiirtavaikutus suurenee merkittävästi.

Simuloineista huomataan runkotyyppi 2 olevan sekä lämpö- että kosteusteknisesti toimivin. Rakennuksen homehtumista kuvaava valkoinen viiva käy pystyprofiilin kohdalla höyrönsulun sisäpuolella. Tämä ei ole kuitenkaan niin vakavaa, sillä sisäilman suhteellinen kosteus on harvoin ja silloinkin vain hetkellisesti yli 50 prosentin.

Seuraavilla sivuilla olevissa taulukoissa on laskettu U-arvon lisäksi lämpötilojen ja suhteellisen kosteuden jakauma eri rakennetyypin materiaalikerrosten välissä. Kosteudenlaskenta perustuu kosteuden siirtymiseen diffuusiolla. Taulukoista huomataan kosteuden tiivistyvän helposti höyrönsulun sisäpintaan, joten tarkemmassa laskennassa tähän rajapintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi on huolehdittava että lähtöarvot ovat oikeita. Esimerkiksi saman materiaalin vesihöyrönsulun arvo saattaa vaihdella suuresti eri lähteissä. Virheen pienentämiseksi kannattaa suosia yhdestä lähteestä otettuja arvoja, jolloin materiaalien vesihöyrönsulut ovat keskenään oikeassa suhteessa.

Runkotyypipi 2

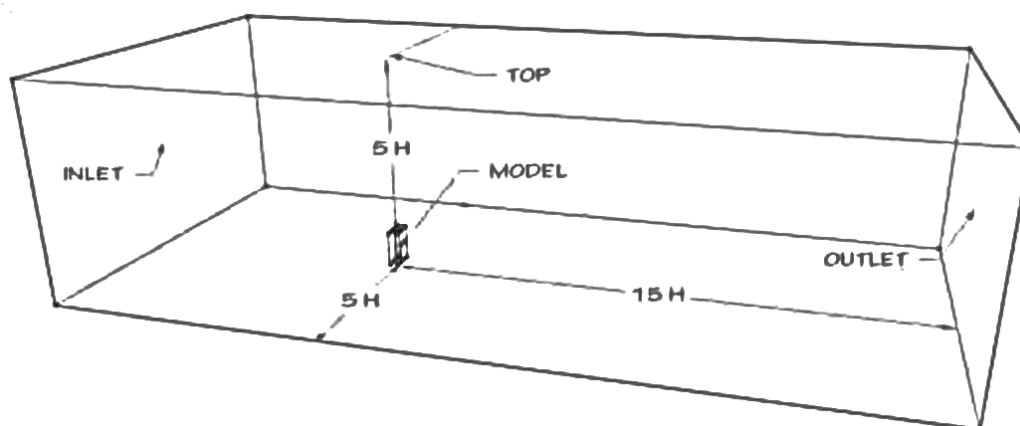
Aine	Paksuus d (mm)	Lämmön- johtavuus λ (W/mK)	Lämmön- vastus $R_i=d/\lambda$	Lämmön- tuksen suhde R_i/R_T	Lämpötila t (°C)	Kyllästys- paine p_k	Vesihöyrynvastus $Z_{p,i}$ (m ² *s*Pa/kg)	Vesihöyrynvastuksen suhde $Z_{p,i}/Z_{p,kok}$	Paine rakenne- kerroksessa p_i (Pa)	Suhteellinen kosteus RH
R_{si}			0,13	0,015	21	2485,8			1242,9	50,0 %
Kipsilevy GEK	13	0,25	0,052	0,006	20,4	2403,1	4,5E+07	4,5E-06	1242,9	51,7 %
Vanerilevy	12	0,11	0,109	0,013	20,2	2370,8	1,4E+10	1,4E-03	1242,9	52,4 %
Paroc eXtra	50	0,036	1,389	0,163	19,8	2304,1	2,5E+08	2,5E-05	1241,3	53,9 %
Höyrynsulkuateräs	1	44,5	2,25E-05	2,64E-06	13,9	1587,8	1,0E+13	1,0E+00	1241,3	78,2 %
Paroc Cortex One	220	0,033	6,667	0,784	13,9	1587,8	6,3E+08	6,2E-05	149,2	9,4 %
Windstopper	9	0,3	0,03	0,004	-14,3	176,0	2,5E+09	2,5E-04	149,1	84,7 %
R_{se}			0,13	0,015	-15	173,9			148,8	85,6 %
						165,4			148,8	90,0 %
			R_T 8,507		ΔT (°C) 36		$Z_{p,kok}$ 100174200000000		P_T 1094,067	
COMSOL	$U=1/R_t$	0,118	W/(m ² *K)							
	ΔU	0,054	W/(m ² *K)							
	$U_c=U+\Delta U$	0,172	W/(m ² *K)							
							Tiivistynyt kosteus sisäpinnassa -2,4E-08	höyrynsulun kg/m ² *s	Kuukaudessa neliölle tiivistynyt kosteus -0,065	kg

Runkotyyppi 3

Aine	Paksuus d (mm)	Lämmön- johtavuus λ (W/mK)	Lämmön- vastus $R_i=d/\lambda$	Lämmönvas- tuksen suhde R_i/R_T	Lämpötila t (°C)	Kyllästys- paine P_k	Vesihöyrynvastus $Z_{p,i}$ (m ² *s*Pa/kg)	Vesihöyrynvastus- tuksen suhde $Z_{p,i}/Z_{p,kok}$	Paine rakenne- kerroksessa p_i (Pa)	Suhteellinen kosteus RH
R_{si}			0,13	0,014	21	2485,8			1242,9	50,0 %
Kipsilevy GEK	13	0,25	0,052	0,006	20,5	2411,0	4,5E+07	4,5E-06	1242,9	51,6 %
Vanerilevy	12	0,11	0,109	0,012	20,3	2381,7	1,4E+10	1,4E-03	1242,9	52,2 %
Paroc eXtra	50	0,036	1,389	0,148	19,9	2321,1	2,5E+08	2,5E-05	1241,3	53,5 %
Alumiinilevy	2	160	1,25E-05	1,33E-06	14,6	1659,9	1,0E+13	1,0E+00	1241,3	74,8 %
Paroc Cortex One	250	0,033	7,576	0,805	14,6	1659,9	6,3E+08	6,2E-05	149,2	9,0 %
Windstopper	9	0,3	0,03	0,003	-14,4	174,9	2,5E+09	2,5E-04	149,1	85,2 %
R_{se}			0,13	0,014	-14,5	173,1			148,8	86,0 %
					-15	165,4			148,8	90,0 %
			R_T 9,416		ΔT (°C) 36		$Z_{p,kok}$ 100174200000000		P_T 1094,067	
COMSOL		$U=1/R_t$	0,106	W/(m ² K)						
		ΔU	0,208	W/(m ² K)						
		$U_c=U+\Delta U$	0,314	W/(m ² K)						
Tiivistynyt kosteus höyrynsulun sisäpinnassa					Tiivistynyt kosteus höyrynsulun sisäpinnassa					
-2,9E-08 kg/m ² s					-2,9E-08 kg/m ² s					
Kuukaudessa neliölle tiivistynyt kosteus					Kuukaudessa neliölle tiivistynyt kosteus					
-0,079 kg					-0,079 kg					

Liite 5: Koko rakennuksen simulointi

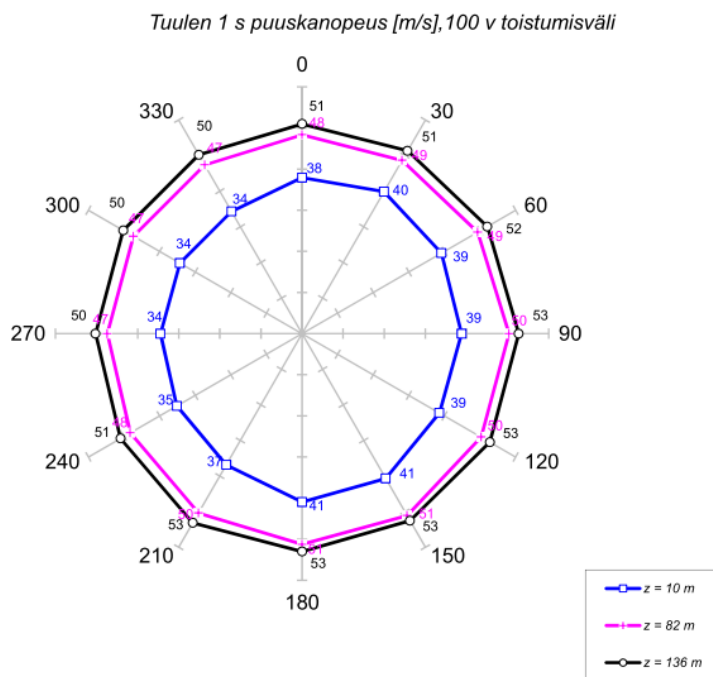
Koko rakennuksen simuloinnissa rakennuksen ympäröimälle ilmalle on varattava riittävästi tilaa, jottei ilmatilan koko häiritse rakennuksen pinnalla esiintyviä ilmavirtauksia. Kuvassa 32 on COST-ohjeen asettamat suositusmitat ilmatilan koolle. Tuulensuuntaan nähden rakennuksen edessä, sivuilla ja päällä tulisi olla vähintään 5 kertaa rakennuksen korkeuden ja rakennuksen takana 15 kertaa rakennuksen korkeuden mittainen ilmatila. Tässä koko rakennuksen simuloinnissa on tutkittu pelkästään korkeinta tornitaloa (Torni 4), joten muiden rakennusten vaikutusta ei ole huomioitu.



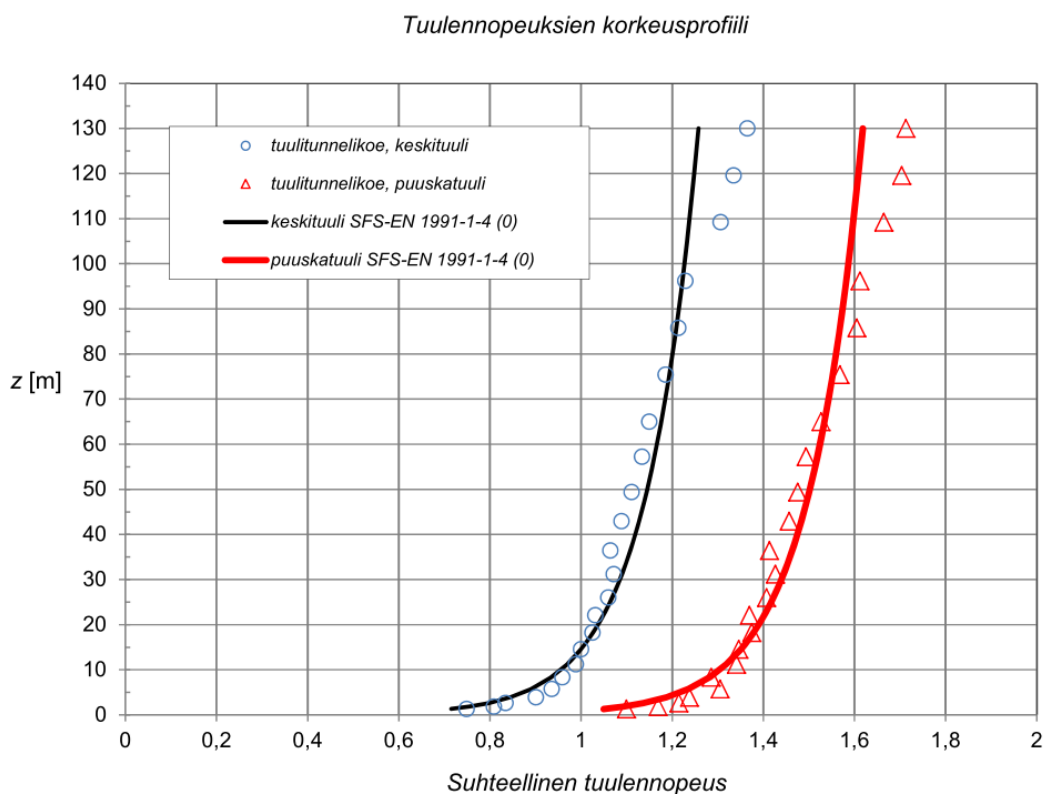
Kuva 29. Koko rakennuksen virtaussimuloinnissa käytettävän ilmatilan mitat COST-ohjeen mukaan [Van Dronkelaar 2012].

Simuloinnin helpottamiseksi on rakennuksen geometriaa yksinkertaistettu. Tuuliolosuhteina oli käytetty samoja lähtöarvoja kuin tuulitunnelikokeessa. Kalasatamassa voimakkaimmat tuulet tulevat mereltä, eli rakennuksen etelä- ja itäsuunnasta. Simulointi on tehty pelkästään eteläjulkisivulle ja tuulelle on käytetty 100 vuoden toistumisvälillä ilmaantuvia 1 sekunnin puuskatuulia.

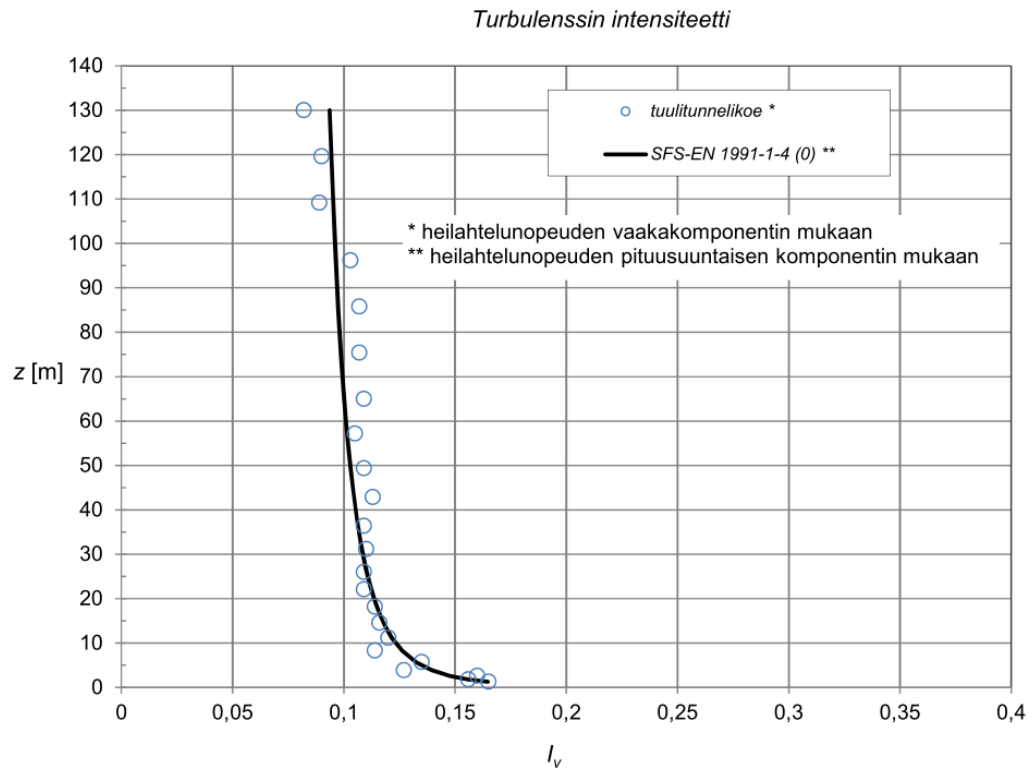
Simuloinnissa on käytetty kuvan 32 mukaisia arvoja. Ilmatilan sisääntulovirtauksina on 0–40 metrin korkeussuuntaisella vyöhykkeellä laskettu tuulennopeuden korkeusprofiiliin (kuva 34) avulla mitoittavaksi tuulennopeudeksi 48 m/s ($z = 40$ m). Seuraavan vyöhykkeen (40–82 m) tulovirtauksen nopeus on 51 m/s ja ylimmän vyöhykkeen tuulennopeus 53 m/s. Ilmavirran turbulenssin intensiteettinä on käytetty koko ilmatilassa arvoa 0,1, joka vastaa kuvan 35 mukaan turbulenssin intensiteetin keskiarvoa.



Kuva 30. Kalasatamassa vallitsevien tuulten 1 s puuskanopeudet, 100 vuoden toistumisväliillä [WSP 2012: 17].

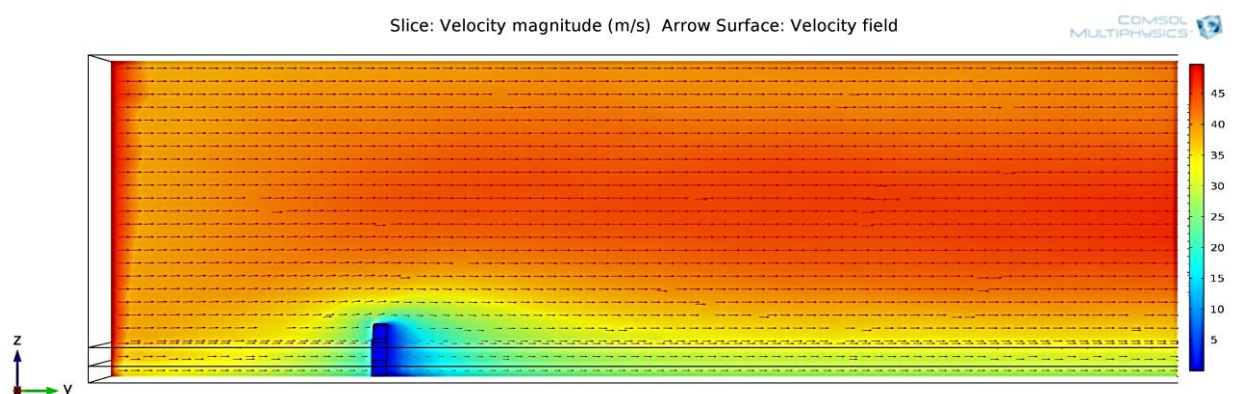


Kuva 31. Keski- ja puuskatuulennopeuksien korkeusprofiilit, rakennuksen korkeuden ja suhteellisen tuulennopeuden funktiona [WSP 2012: 20].



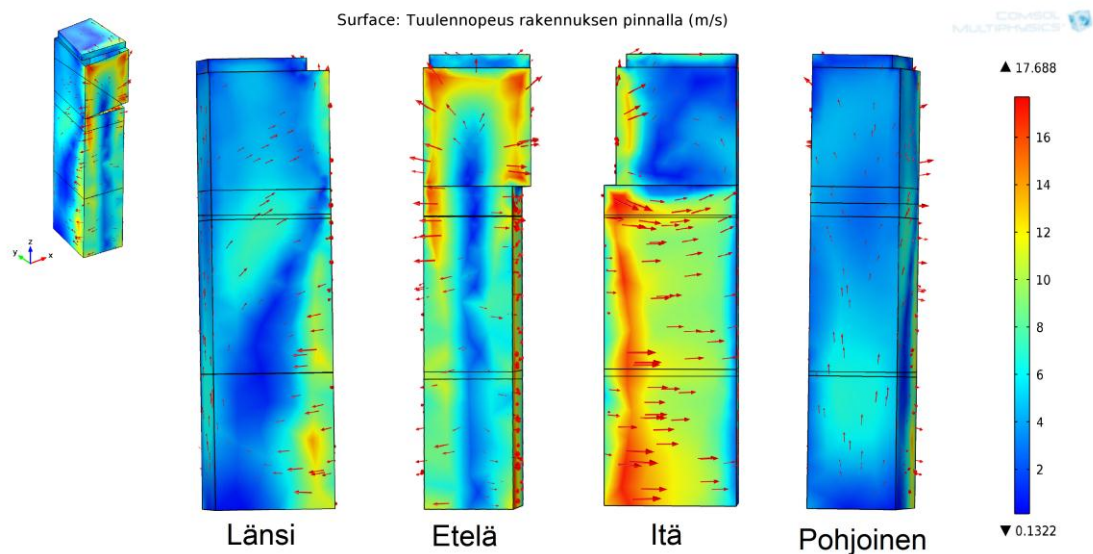
Kuva 32. Tuulen turbulenssin intensiteetti rakennuksen korkeuden suhteessa [WSP 2012: 20].

Simuloinnin avulla nähdään, miten rakennus syrjäyttää tuulen. Rakennuksen keskellä kulkevan tuulennopeuden suuntaisesta leikkauksesta (kuva 36) nähdään, miten tuuli joutuu kiertämään rakennuksen. Huomataan rakennuksen etu- ja takapuolella syntyvän pyörteitä, joissa tuulennopeus on selvästi laminaarisesti liikkuvaa tuulta alhaisempia.



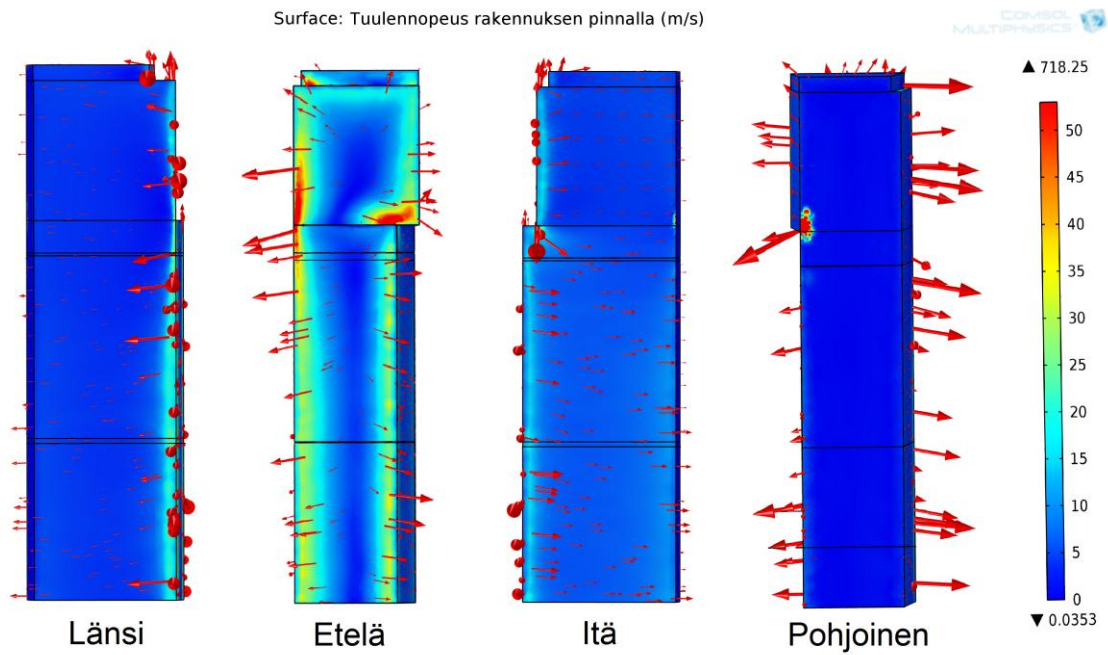
Kuva 33. Tuuliprofiili rakennuksen keskeltä kulkevan leikkauksen pinnalla.

Kuvassa 37 näkyy, miten etelätuuli jakautuu rakennuksen pinnalla. Kuvat on saatu COST-ohjeen vastaisesta simuloinnista, jossa rakennuksen ympäröimä ilmatila on liian pieni. Tämän ansiosta kuvan mukaisia ilman virtausnopeuksia ei voida käyttää. Kuva on kuitenkin selkeä ja hyvin havainnollistava. Siitä näkee selvästi, miten tuuli jakautuu eteläjulkisivulla 2/3 rakennuksen korkeuden kohdalla ylös- ja alaspäin suuntautuviksi tuuliksi. Kuvista huomaa myös selkeästi rakennuksen geometrian vaikutukset virtaus-ten kulkusuunnille. Voimakkaimmat virtaukset on rakennuksen reuna- ja nurkka-alueilla. Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 on painekertoimissa huomioitu nämä virtaushuiput.



Kuva 34. Etelätuulen jakautuminen rakennuksen pinnalla.

Rakennuksen pinnalla olevia ilmavirtauksia on tutkittu myös COST-ohjeen mukaisella ilmatilalla. Simuloinnissa tapahtui kuitenkin pieni virhe, jolloin rakennuksen pinnalle tuli muutamia epätodennäköisiä virtaushuippuja (jopa 700 m/s). Virheen syytä ei ehditty sen tarkemmin tutkia, mutta tämän insinööriyön tekijä arvelee niiden johtuvan liian karhean hilaverkon (*mesh*) käytöstä. Hilaverkkoa ei voitu muuttaa hienojakoisemmaksi tietokoneen kapasiteetin loppuessa kesken. Kuvassa 38 on kuitenkin tämän simuloinnin avulla saatuja rakennuksen pinnalla vaikuttavia virtausnopeuksia.



Kuva 35. Etelätuulen jakautuminen rakennuksen pinnalla (COST-ohjeen mukainen simulointi).

Rakennuksen pinnalla vaikuttavien tuulennopeusarvoja on käytetty tuuletusraon ilma-
virtausten tarkastelussa. Kyseessä olevat tuulennopeudet on otettu COST-ohjeen mu-
kaisesta simuloinnista. Arvot on otettu noin 1 m etäisyydellä rakennuksen eteläjulkisi-
vun pinnasta. Tuulensuuntina on suosittu rakennuksen syvyys ja korkeussuuntaisia
tuulennopeuksia, jotta 2D-simuloinista saataisiin mahdollisimman todellisen. Tämän
takia arvot on otettu virtausten sivusuuntaisen jakautumisen keskikohdasta, joka sijait-
see lähellä eteläjulkisivun keskikohtaa. Liitteessä 6 on ilmatilojen simulointeihin käytet-
tyjen tuulennopeuksien arvot.

Liite 6: Tuulennopeudet rakennuksen eteläjulkisivulla

Alla olevia tuulennopeuksia on käytetty julkisivun ilmatilojen simuloinneissa. Kaksiulotteisessa simuloinnissa on käytetty pelkkien kohtisuoraisten ja pystysuuntaisten tuulien arvoja. Tämän takia simuloinnit eivät ole ihan todenmukaisia, jolloin sivuttaisen tuulennopeuden suuruus lisää virheprosenttia. Nämä tuulennopeudet on pyritty ottamaan kohdasta, jossa sivuttaiset tuulennopeudet olisivat mahdollisimman lähellä nollaa. Geometrian vaihtelevuus vaikeuttaa kuitenkin oikean kohdan valitsemista, mikä näkyy esimerkiksi korkeudella 90 m.

Taulukosta huomataan pystysuuntaisten virtausten taitekohdan olevan 80 m korkeudella, joka vastaa noin 2/3 rakennuksen korkeudesta. Pystysuuntaisten virtojen maksimit ovat 22,8 m/s ($h = n. 120 \text{ m}$) ja -8 m/s ($h = n. 33 \text{ m}$). Kohtisuoraisten tuulennopeuden maksimiarvo löytyy rakennuksen räystäään läheltä ja sen arvo on 17,6 m/s. Huomataan myös korkeudella 86–90 m olevan poikkeuksellisen suuria sivuttaisia tuulennopeuksia. Tämä johtuu rakennuksen geometrian muuttumisesta näillä korkeuksilla.

Korkeus	Sivuttainen tuuli	Kohtisuorainen tuuli	Pystysuuntainen tuuli
h (m)	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)
126	-0,8	16,3	14,8
125	-0,5	16,6	17
124	-0,4	16,8	18,2
123	-0,4	17	19,6
122	-0,5	17,1	20,7
121	-0,5	17,6	22,7
120	-0,8	16,7	22,8
119	-1,4	15,4	22,8
118	-1,7	14,2	22,8
117	-2,2	12,8	21,4
116	-2,5	12	20,6
115	-2,9	11,4	19,2
114	-3,2	10,3	17,4
113	-3,4	9,9	16,1
113	-3,3	9,9	16,2
111	-3,9	9,6	14,6
110	-4	9,4	13,7
109	-4,1	9,2	13,3
108	-4,2	8,7	11,9
107	-4,2	8,4	11,1
106	-4,2	8,2	10,4

Korkeus	Sivuttainen tuuli	Kohtisuorainen tuuli	Pystysuuntainen tuuli
h (m)	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)
105	-4,1	8,2	9,8
104	-4,3	8,4	9,1
103	-4,1	8,5	8,8
102	-4	8,6	8,4
101	-3,9	8,6	8,1
100	-3,7	8,6	7,7
99	-3,5	9	7,2
98	-3,3	9,2	7
97	-2,7	9,5	6,6
96	-2,2	10	6,9
95	-2	10,4	7,3
94	-1,9	11,5	8,4
93	-1,5	12,6	10,4
92	-2	13,3	13,8
91	-3,9	11,8	18,1
90	-5,6	5,5	17,8
89	-6,8	3,6	14,6
88	-5,8	3,9	11,2
87	-5,1	3,8	9,1
86	-4,7	3,7	7,8
85	-3,9	3,7	6
84	-3,2	3,9	4,6
83	-2,6	3,9	3,5
82	-2,1	3,9	2,6
81	-2	3,9	1,6
80	-1,8	4	0,9
79	-1,8	3,8	-0,1
78	-1,8	3,7	-1,4
77	-1,7	4	-1,4
76	-1,8	4,1	-2
75	-2	4	-2,7
74	-2,2	3,9	-3,4
73	-2,4	3,9	-3,7
72	-2,5	3,8	-4,2
71	-2,6	3,8	-4,3
70	-2,9	3,7	-4,8
69	-3	3,8	-4,8
68	-3	3,8	-5
67	-3,1	3,8	-5,3
66	-3,1	3,8	-5,6
65	-3,2	3,9	-5,8
64	-3,2	3,9	-5,9

Korkeus	Sivuttainen tuuli	Kohtisuorainen tuuli	Pystysuuntainen tuuli
h (m)	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)
63	-3,1	3,9	-6,1
62	-3,3	4,2	-6,2
61	-3,2	4	-6,4
60	-3,2	4,2	-6,7
59	-3,1	4,1	-6,8
58	-3,1	4	-6,8
57	-2,9	3,9	-7
56	-3,1	4,1	-7,3
55	-3,1	4	-7,4
54	-3,1	4	-7,4
53	-3,5	4,3	-7,7
52	-3,5	4,1	-7,6
51	-3,5	4	-7,6
50	-3,6	3,7	-7,2
49	-3,7	4	-7,3
48	-3,8	3,9	-6,8
47	-3,7	3,9	-6,7
46	-3,7	4,2	-6,7
45	-3,7	4,4	-6,6
44	-3,7	4,5	-6,7
43	-3,5	4,4	-6,9
42	-3,3	4,3	-6,8
41	-3,3	4,2	-7,1
40	-3,4	4,1	-7,2
39	-3,6	4,4	-7,4
38	-3,7	4,5	-7,5
37	-3,7	4,4	-7,8
36	-3,6	4,3	-7,8
35	-3,5	4,5	-7,9
34	-3,4	4,4	-8
33	-3	3,9	-7,8
32	-3,1	3,8	-7,9
31	-3,3	4,1	-8
30	-3,3	4,1	-7,9
29	-3,2	4,2	-7,7
28	-3,1	4	-7,3
27	-3,1	4	-6,8
26	-3	4	-6,5
25	-2,9	4	-6,3
24	-3	4,1	-6
23	-3,2	4,4	-5,7
22	-2,9	4,3	-5,5

Korkeus	Sivuttainen tuuli	Kohtisuorainen tuuli	Pystysuuntainen tuuli
h (m)	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)
21	-3,1	4,4	-5,3
20	-3	4,6	-5,1
19	-3,1	4,5	-5
18	-3,3	4,5	-4,9
17	-3,2	4,4	-4,8
16	-3,7	4,8	-4,5
15	-3,6	4,7	-4,4
14	-3,6	4,6	-4,2
13	-3,8	4,7	-4
12	-3,7	4,6	-3,8
11	-3,6	4,8	-3,7
10	-3,5	5	-3,6
9	-3,3	5	-3,6
8	-3,1	4,8	-3,5
7	-3	4,6	-3,4
6	-3,1	4,4	-2,8
5	-3	4	-2,3
4	-3	3,5	-1,4
3	-2,7	3	0