



KAKSOISJULKISIVUN LÄMPÖ- TEKNISEN TOIMINNAN HAL- LINTA

Ghada Al-Adulrazzaq

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019

Rakennus- ja Yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

ALKUSANAT

Haluaisin alkuun kiittää Haka pks Oy:n julkisivu-urakoitsijan edustaja Jaakko Soinia sekä Sweco Rakennetekniikka Oy:n osastopäällikköä Jukka Sammia, diplomi-insinööriä Andreas Limnelliä ja erityisasiantuntijaa, tekniikan tohtoria Maria Lindqvistiä aineistosta, ohjauksesta ja neuvoista opinnäytetyön prosessin aikana.

Tampere 04.05.2019

Ghada Al-Adulrazzaq

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

GHADA AL-ADULRAZZAQ

Kaksoisjulkisivun lämpötekniisen toiminnan hallinta

Opinnäytetyö 88 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Toukokuu 2019

Metalli-lasirakenteinen julkisivu on yksi kaksoisjulkisivujen malleista. Kaksoisjulkisivun verhouslasi päästää lävitseen suurimman osan siihen kohdistuvasta säteilystä, mutta samalla se on ilmavirtauksia läpäisemätön materiaali. Tämän takia lämpöenergiaa kerääntyy kaksoisjulkisivun vaipparakenteisiin auringonpaiseilla. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kaksoisjulkisivun lämpötekniistä toimintaa tarkastelemalla materiaalien ominaisuuksien, välitilan tuuletuksen ja ympäristön vaikutusta julkisivurakenteen lämpötiloihin. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Sweco Rakennetekniikka Oy ja työ tehtiin yhteistyössä Haka pks Oy:n kanssa.

Opinnäytetyön teoriakatselmus sisältää standardeja, aiheen verkkojulkaisuja, alan kirjallisuutta, tuotevalmistajien tarjoamaa aineistoa sekä yhden haastattelun. Opinnäytetyössä esiteltiin kaksoisjulkisivun yleisimmät toiminta- ja rakennemallit, yleisimmät rakennusmateriaalit, kuormien jakautuminen seinällä, yleisesti kaksoisjulkisivuun liittyviä suunnitteluohjeita sekä kaksoisjulkisivun lämpötekniinen toiminta. Kaksoisjulkisivun osien lämpötilojen tutkimusta varten mitattiin ulkoilmassa olevan lämmitetyn huoneen seinän kaksoisjulkisivun lämpötiloja, kosteutta, ilmanpaineita ja säteilyä sekä analysoitiin saadut tulokset teorian pohjalta. Mittaukset toteutettiin viikon ajalta ja tarkempaa tarkastelua varten valittiin yksi aurinkoinen päivä ja pakkasyö.

Opinnäytetyön tuloksina saatiin, että kaksoisjulkisivun lämpötekniiseen toimintaan vaikuttavat mm. seuraavat tekijät: välitilan materiaalien pinnoitteiden väri ja ominaisuudet, lasin ominaisuudet, välitilan tuuletus, tuuli, lämpösäteilyt, julkisivuun kohdistuvat varjostukset sekä seinän ilmansuunta. Analyysi osoitti, että kaksoisjulkisivun lämpötekniisessä suunnittelussa tulee ottaa huomioon materiaalien valinnan lisäksi myös vaippojen välisen välitilan suuruus ja tuulettustapa. Lisäksi tulee ottaa huomioon vaippojen materiaalinpinnoitteiden ominaisuudet ja väri, julkisivun ulkopuoliset varjostukset sekä materiaalien liikevarat.

Asiasanat: kaksoisjulkisivu, metalli-lasijulkisivu, lämpötekniikka, lämpötilamittaukset

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building Construction

GHADA AL-ADULRAZZAQ

Controlling the Thermodynamics Performance of Double Skin Façade

Bachelor's thesis 88 pages, appendices 5 pages
May 2019

The metal glass double skin façade is one of the glass façade structure types. Glass transmits a significant part of the solar radiation that is directed to it, and at the same time it prevents wind from cooling down the wall parts that are behind the glass. Because the radiation gets absorbed, materials behind the glass get overheated when the sun shines. The objective of this thesis was to study the thermal performance of a double skin façade by examining the effect the qualities of materials, ventilation gap, and environment may have on the thermal behavior of the structure. The thesis was made in cooperation with Sweco Structures Ltd and Haka pks Oy.

The literature review of this thesis was gathered from standards, web publications and relevant literature, and by interview. In the thesis was presented the most usual structural models used in double skin façade, designs, building materials, partition of load on the wall, some designing instructions, and an overview of the thermodynamics. To clarify the temperatures of the double skin façade components, a double skin façade test wall element was measured. The measurements performed on the test wall element were temperature, humidity, pressure and radiation measurements. The results of the measurements were analyzed according to the state-of-the-art theory. The test wall element measurements were executed for one week, of which one sunny day was examined more in detail.

The results showed that temperatures of the façade components were affected by colors, glass properties, ventilation gap, wind, thermal radiation, shadows and the compass point of the wall. The main contribution of this thesis is to present the key elements affecting the thermal behavior of double skin façade. The main points in the double skin façade design process are to select the material properties, ventilation gap, glass features and color of coatings and in addition to select external shading. Because the temperatures of a double skin façade's parts can rise very high, it is important to design and calculate the suspension travel, supports and fastenings of materials accurately.

Key words: double skin façade, metal glass façade, thermodynamics, temperature measurements

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	KAKSOISJULKISIVUT RAKENTAMISESSA	9
2.1	Kaksoisjulkisivujen määritelmä.....	11
2.2	Kaksoisjulkisivujen kuormitus ja mitoitus.....	14
2.2.1	Kaksoisjulkisivuihin kohdistuva kuormitus	14
2.2.2	Kaksoisjulkisivujen suunnittelu ja mitoitus	15
2.3	Yleisimmät rakennusmateriaalit kaksoisjulkisivuissa.....	18
2.3.1	Lasi.....	19
2.3.2	Alumiini.....	21
2.3.3	Teräs	22
2.4	Kaksoisjulkisivujen rakennemallit	24
3	KAKSOISJULKISIVUJEN LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA.....	26
3.1	Materiaalien pintalämpötilat	27
3.2	Materiaalipinnoitteet	29
3.3	Lämpösäteily	31
3.4	Kaksoisjulkisivun paine-erot.....	33
3.5	Kosteuden vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötilaan	34
3.6	Kaksoisjulkisivun rakennusfysikaalinen toiminta	36
4	KAKSOISJULKISIVUN KOKEELLINEN LÄMPÖTEKNINEN TARKASTELU	41
4.1	Malliseinän rakenne	43
4.2	Mittausolosuhteet	46
4.3	Malliseinän mittaukset.....	47
4.3.1	Lämpömittaukset	47
4.3.2	Auringon säteilymäärän mittaus	49
4.3.3	Ilmanpainemittaukset.....	50
4.3.4	Kosteusmittaukset	51
4.4	Mittaustulokset	52
4.5	Tulosten analyysi	63
4.6	Mittausten analyysi.....	67
5	KAKSOISJULKISIVUN LÄMPÖTEKNINEN ANALYYSI	68
5.1	Ympäristön vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötiloihin.....	68
5.2	Välitilan materiaalien vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötiloihin.....	70
5.3	Taustapellille tuleva säteilymäärä	73
5.4	Lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero	74

5.5 Termoelementin kautta siirtyvä energiamäärä	74
5.6 Ikkunan kondenssi	76
6 POHDINTA	78
LÄHTEET	80
LIITTEET	83
Liite 1. Opinnäytetyön malliseinä	83

ERITYISSANASTO

Absorptio	ilmiö, jossa kappale imee itseensä osan ympäristön siihen kohdistuvasta lämpösäteilystä.
Lämpökarkaistu lasi	ohjatulla lämmitys- ja jäähdytysprosessilla aikaansaatu lasiin pysyvä pinnan puristusjännitys.
Emissiivisyys	kappaleen pinnan kyky säteillä pitkäaaltoista, silmin näkymätöntä säteilyä. Se syntyy pinta-atomien vapaiden elektronien liikkeistä ja tiheydestä ja sen arvo on nollan ja ykkösen välissä.
g-arvo	auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin, jonka avulla mitataan, kuinka paljon materiaali päästää lävitseen auringonsäteilyä.
Galvaaninen korroosio	sähkökemiallinenreaktio, joka tapahtuu, kun kaksi tai useampi metalli ovat keskenään sähköisessä kontaktissa. Se johtuu eri metallien välisestä potentiaalierosta.
Nettosäteily	maan pintaan tulevan ja sieltä lähtevän auringonsäteilyn tasetta, joka vaikuttaa maan pintalämpötilaan.
Näkyvyyskerroin	esittää jostain kappaleesta lähtevät säteilyn osumista tarkasteltavaan pintaan. Siinä huomioidaan tarkasteltavan pinnan koko, välimatka ja muoto. Se myös riippuu tarkastelukulmasta. Mitä lähempänä säteilylähde sen isompi on tarkastelukulma.
Suhteellinen kosteus	Ilmassa oleva kosteusmäärä suhteessa kyllästyskosteu-teen [%]
U-arvo	lämmönläpäisykerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$], joka kuvaa rakenteen eri rakennusosien lämmöneristyskyky. Mitä pienempi U-arvo on, sitä paremmin rakenne eristää.
Vastasäteily	kasvihuoneilmiöstä johtuva ilmakehän pitkäaaltoinen lämpösäteily, joka kohdistuu maanpintaan. Sen lähteinä ovat pilvet ja kasvihuonekaasut.

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään alumiini-lasirakenteisen kaksoisjulkisivun eri kerrosten lämpötiloja. Työssä tutkitaan lasin ominaisuuksien, lasin taustamateriaalien värin sekä välitilan tuuletuksen vaikutus rakenteen lämpötiloihin. Tutkimus rajataan tilanteeseen, jossa sää on aurinkoinen ja ulkoilman lämpötilat ovat -5...10 °C välillä. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Sweco Rakennetekniikka Oy ja tutkimus tehdään yhteistyössä Haka pks Oy:n kanssa.

Kaksoisjulkisivulla tarkoitetaan julkisivurakennetta, jossa lämpöeristetyin vaipan ulkopuolella on erillinen vaippa. Tämä julkisivumalli on ollut käytössä 1900-luvun alusta lähtien. Opinnäytetyössä esitellään tämän julkisivumallin käytetyt toimintatavat ja rakennemallit sekä yleisimmät rakennustuotteet ja niihin liittyvät määräykset ja ohjeet. Opinnäytetyössä lisäksi avataan sekä kaksoisjulkisivun ominaisuuksien että ympäristön vaikutus järjestelmän lämpötekniseen toimintaan.

Opinnäytetyö sisältää sekä teoreettista tarkastelua, jossa avataan kaksoisjulkisivujen lämpöteknistä toimintaa että kokeellinen osio, joka toteutetaan mittaamalla mallikappaleen lämpötiloja, paine-eroja, ulkoilman ja välitilan kosteutta sekä mallikappaleeseen kohdistuvaa auringon säteilymäärää. Ulkoilmassa suoritettujen mittausten mallikappaleen sisempi vaippa on peltiverhoiltua termoelementtiä ja ulompi kevytrakenteinen vaippa on alumiini-lasirakenteinen.

Opinnäytetyössä tutkitaan kaksoisjulkisivun lämpöteknisiä ominaisuuksia. Kaksoisjulkisivun lämpötilat tulivat erityisesti esille kesällä 2018. Kesän harvinaisen korkeat ulkolämpötilat aiheuttivat kaksoisjulkisivujen välitilan materiaalien lämpötilojen tavallista korkeampaa nousua monessa kohteessa. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää eri tekijöiden vaikutus kaksoisjulkisivujen lämpötiloihin, jotta jatkossa olisi mahdollista suunnitella paremmin korkeat lämpötilat huomioon ottaen.

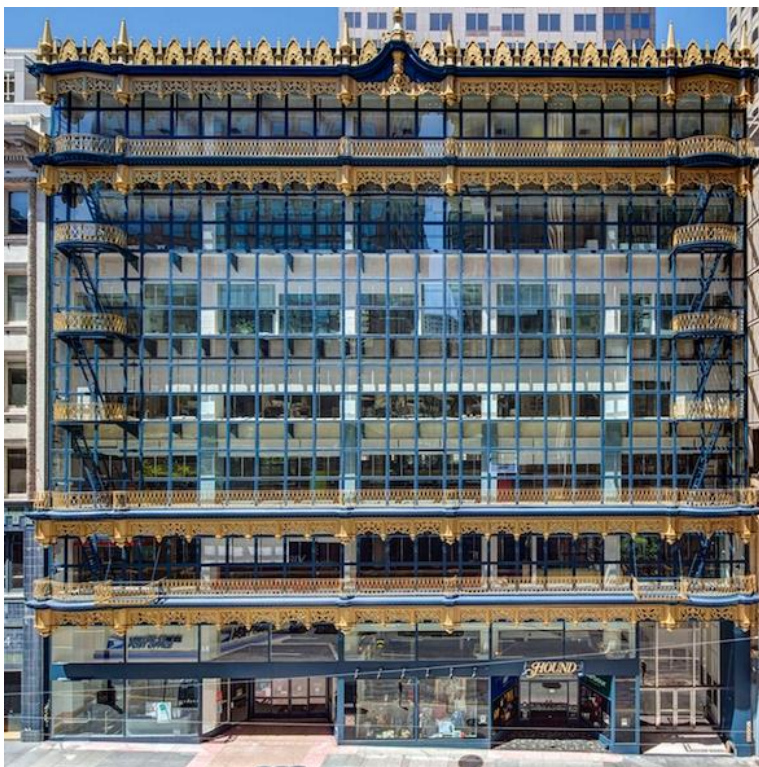
2 KAKSOISJULKISIVUT RAKENTAMISESSA

Lasijulkisivujen käyttö on nykypäivänä hyvin yleistynyt, sillä ne kytkevät rakennuksen ympäristöön sekä antavat valoa ja avaruutta sisätiloihin. Ensimmäisiä lasijulkisivuja käytettiin kirkkojen isoissa koristeellisissa lasimaalauksissa. Lasijulkisivujen tarkoitus siihen aikaan oli saada sisätiloihin mahdollisimman paljon auringon valoa sekä mahdollisimman suuria valoa läpäiseviä koristemaalauksia. (Olenius, Toikka & Uusitalo, 505)

Ensimmäiset kaksoisjulkisivujen esimerkit ovat jo 1900-luvun alkupuolelta. Alkuun kaksoisjulkisivut käytettiin ainoastaan teollisuusrakentamisessa. Niiden käyttö virasto- ja asuinrakennuksissa kokeiltiin vasta myöhemmin. (Tenhunen, Lehtinen, Lintula, Lehtovaara, Vuolio, Uuttuu, Alinikula, Kesti, Viljanen, Söderlund, Halonen, Mäkeläinen 2001, 12.) Maailman ensimmäinen kaksoisjulkisivu käytettiin Giengenin vuonna 1903 valmistuneessa maailmalla melko tuntemattomassa Steiff-konehallissa (Kuva 1) (Poirazis 2006, 29). Rakennus ei valmistuttuaan saanut juuri huomiota ja se sai ansaitun huomionsa vasta noin 30 vuotta myöhemmin. Paljon tunnetumpi on esimerkiksi San Franciscossa vuonna 1917 valmistunut Hallidie building. Hallidie Building, kahdeksankerroksinen kaupungintalo, jonka julkisivu on maailman tunnetumpia ja Yhdysvaltojen ensimmäinen kaksoisjulkisivu. (Kuva 2)



Kuva 1. Steiff-konehalli, Giengen (www.erih.net)



Kuva 2. Hallidie building, San Fransisco (<https://www.livabl.com>)

Euroopan ensimmäiset tunnetut kaksoisjulkisivut suunnitteli arkkitehti Le Corbusier Moskovaan 1920-luvulla ja Pariisiin 1930-luvulla. Moskovan teollisuusministeriön virastotalon, Centrosoyosin, julkisivua ei lopulta rakennettu suunnitellulla tavalla ja Pariisin Cité de Refuge de l'Armée du Salut ei toiminut toivotulla tavalla varsinkin kesäaikana riittämättömän talotekniikan vuoksi. (Tenhunen ym. 2001, 12, Piironen 2001)

1970-luvun energiakriisi pysäytti suurten ikkunoiden ja laajojen lasipintojen käyttöä ulkoseinissä, minkä myötä hiipui myös lasijulkisivurakenteiden kehitystyö. 1990-luvulla lasin käyttö julkisivuissa kasvoi merkittävästi niin sanotun high tech -rakentamisen myötä. (Olenius ym., 505)

Monikerroksinen ja -aineinen kaksoisjulkisivu on yleistynyt eri puolilla maailmaa korkeatasoisen arkkitehtuurisuunnittelun, kehittyneen materiaalitekniikan sekä suunnitelmallisen käytönaikaisen huolto- ja säätötoiminnan ansiosta. Kaksoisjulkisivun päätavoite on tuottaa käyttäjäläheistä, pitkäikäistä ja ympäristön huomioivaa rakentamista, jonka rakenne on mahdollisimman hoikka, kevyt ja ilmava. (Olenius ym. 12, Piironen 2001)

Kaksoisjulkisivuilla toteutuneita rakennuksia ovat hyvin paljon sekä maailmalla että Suomessa. Yksi esimerkki on Helsingissä vuonna 1999 valmistunut Sano-matalo, jonka länsi-, etelä- ja itäjulkisivut koostuvat kolmesta lasikerroksesta. Toi-nen Suomessa toteutettu hyvä esimerkki on Martela, jonka kaksoisjulkisivun ulompi vaippa on täysin erotettu rakennuksen kehästä. Helsingin Viikin infokes-kus Koronan julkisivu on $\frac{3}{4}$ kaksoisjulkisivua, jonka välitilan ilmanotto tapahtuu lämpiminä vuodenaikoina pohjoispuolelta ja kylminä vuodenaikoina esilämmitet-tynä eteläsivulta. Tämän avulla on pystytty säästämään jopa 75% lämmityskus-tannuksista. (Poriz 2006, 163...179). Lisää esimerkkikohteita ovat High Tech Centre, Iso Omena, Kone Building. Lisäksi yksi esimerkkikohde on Sibeliustalo, jonka suurin osa seinistä ovat puurunkoisia.

2.1 Kaksoisjulkisivujen määritelmä

Kaksoisjulkisivun julkisivumalli edustaa uudenaikaista high tech -rakentamista (Olenius ym., 505). Tämä tarkoittaa sitä, että julkisivurakenteet muodostavat kak-soisrakenteita, joissa lämpöeristetyin vaipan ulkopuolella on toinen erillinen vaippa. Tämä opinnäytetyö on rajattu käsittelemään kaksoisjulkisivuja, joissa ulompi vaippa on listallinen alumiini-lasirakenteinen. Kaksoisjulkisivurakenteella pyritään alentamaan rakennuksen energiakulutusta ja hallitsemaan rakennuksen sisäilmastoa helpommin (Olenius ym., 506).

Kaksoisjulkisivut on mahdollista jakaa kolmeen eri toimintamalliin rakennusfysi-kaaliselta ja ilmanvaihtotekniseltä kannalta;

- passiivisesti toimivat julkisivut
- aktiiviset julkisivut
- yhdistettyjen toimintojen tilat

Passiivisessa toimintamallissa kaksoisjulkisivu toimii erillisenä ulkoverhouksena. Kyseisessä toimintamallissa välitila ei siten ole yhteydessä sisätiloihin ja välitila voi tuulettua joko luonnollisesti tai koneellisesti. Kaksoisjulkisivu on aktiivinen, jos sitä hyödynnetään osana ilmanvaihtoa. Tällöin välitila käytetään tulo-/poistoilma-kanavana, luonnollisen tuuletuksen osana tai välitilaa yhdistetään sisäpuolisten

hormien kanssa. Kaksoisjulkisivun välitilasta voi myös tehdä leveä tila, jolloin sitä voi käyttää huolto-/ kulkuväylänä tai virkistystilana. Tätä viimeistä toimintamallia kutsutaan yhdistettyjen toimintojen tilaksi. (Tenhunen ym. 2001, 39)

Opinnäytetyössä keskitytään kaksoisjulkisivun passiiviseen toimintamalliin, koska se on käytetty opinnäytetyön kokeellisen osion malliseinässä. Passiivisessa julkisivuratkaisussa julkisivu on kaksoisjulkisivun ja perinteisen lasijulkisivun välimaasto. Rakenteellisesti passiivinen julkisivu on avosaumoin toteutettu lasijulkisivu (Tenhunen ym. 2001, 15). Tällöin ulomman vaipan tarkoitus on muodostaa visuaalinen pinta ja toimia sääsuojana sisemmälle vaipalle. Passiivisesta kaksoisjulkisivusta pidemmälle vietyjä kaksoisjulkisivuratkaisuja edustavat ”sadetakki”-ratkaisut. Sadetakki-malli tarkoittaa säältä suojaava ratkaisua, jossa uloin lasi muodostaa suljetun yhtenäisen pinnan suojaten varsinaista julkisivua. Välitila kyseisessä ratkaisussa on leveydeltään tyypillisesti vähintään 600 mm mahdollistaen julkisivujen huollon ja korjauksen. Kyseisessä julkisivutyypissä kaksoisjulkisivut ovat ylhäältä ja alhaalta avattavia säädettävin luukuin, minkä avulla pystytään hallitsemaan välitilan tuuletuksen voimakkuutta. Tällä pyritään hallitsemaan välitilan lämpötiloja ja vähentämään rakennuksen kokonaisenergian kulutusta. (Tenhunen ym. 2001, 15-16)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa kaksoisjulkisivurakennetta, jonka ulompi vaippa on lasirakenteinen. Kaksoisjulkisivun yleisimmät lasin liitostavat julkisivurunkoon ovat perinteinen lasituslistaliitos, SG-lasitus ja ripustettu lasi (RT 38-10901 2007, 17). Liitostavan valinta riippuu vahvasti lasin ja sen ominaisuuksien valinnasta. Opinnäytetyössä keskitytään pääasiassa lasituslistaliitokseen, jossa lasi on karkaistu ja lista on alumiinia.

Perinteisessä lasituslistaliitoksessa lasiruutu asetetaan asennuskiilojen kautta vaakasuuntaisen karmirakenteen päälle ja metallilistalla estetään lasin liikkuminen vaakasuunnassa. Lasin listat voidaan kiinnittää ruuvaamalla, niittaamalla tai piilokiinnitteisesti painamalla. Rakenteen ilma- ja kosteustiiviys varmistetaan tiivistäineellä. (Tanhunen ym. 2001, 71)

SG-lasituksessa (Structural grazing) eli liimarakennelasituksessa lasi liimataan silikoniliimalla runkorakenteeseen. Standardissa EOTA ETAG 002 määritetään tähän menetelmään soveltuvat silikoniliimat. Tässä tapauksessa yksi-, kaksi- tai kolmilasiset paketit liimataan tehtaalla alumiinipuitteeseen ja puite kiinnitetään runkoon mekaanisesti työmaalla (Tenhunen ym. 2001, 71-72). Syntyvät kylmäsilat estetään muovisten lämpökatkoprofiilien avulla. Tämän ratkaisun avulla saadaan aikaiseksi läpinäkyviä listattomia ratkaisuja ja tasaisia lasipintoja. Tämä tarkoittaa kuitenkin sitä, että silikoniliiman tulee paitsi tiivistää saumaa myös toimia rakenteellisesti kuormia siirtävänä komponenttina ja lisäksi kestää auringon UV-säteilyä, koska se on sille suoraan alttiina (Olenius ym., 508).

Ripustettu lasi tarkoittaa, että lasi kannatetaan pistekiinnitysmenetelmällä. Tällöin rei'itetyt lasit ripustetaan taustarakenteeseen pistemäisesti useasta kohdasta lasipulttien ja taustakiinnikkeiden avulla. Tämä tarkoittaa siis sitä, että lasilevyjen väliin jää ainoastaan ohut silikonisauma tai väritön liimasauma. Haasteena on aiheutuvat suuret jännitykset lasin porattujen reikien reunoissa, pienet liitostoleranssit ja lämpötilamuutosten aiheuttamat jännitykset (Tenhunen ym. 2001, 73, Kallioniemi 1999).

Yksi toteutettu kaksoisjulkisivuratkaisu on aktiivisesti päivänvaloon reagoiva ja sitä hyödyntävä kaksoisjulkisivu. Tällöin välitilaan asennetaan ikkunoiden kohdalla automaattisesti ohjautuva säleikkö, jonka avulla pystytään hallitsemaan liiallista häikäisyä ja heijastetaan epäsuoraa valoa sisätiloihin. Auringon paistaessa matalalta säleikön alaosa voi esimerkiksi heijastaa osan valosta ulos. Tämä ratkaisu on käytetty esimerkiksi Kauhavan Tietotalossa. (Tenhunen ym. 2001, 16)

Kun suunnitellaan kaksoisjulkisivua, tulee miettiä julkisivun materiaalien siivottavuutta ja huollettavuutta, esimerkiksi RakMk osa A4 ohjeiden mukaisesti. Siivouksen ja huollon helpottamiseksi kaksoisjulkisivujen välitilaan voidaan tarpeen mukaan asentaa huoltotasoja kerroksien kohdalla. Kaksoisjulkisivun huolto on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.2.2. Välitilan voi hyödyntää muullakin tavalla, kuten Helsingin Viikin infokeskus Koronassa, jossa n. 2000 mm leveään välitilaan on tehty sisätiloista lasiseinillä erotettuja puutarhoja 3 kappaletta (Tenhunen ym. 2001, 16).

Kaksoisjulkisivun rakennusfysikaalinen toiminta muistuttaa lasitetun parvekkeen toimintaa. Tätä on hyödynnetty esimerkiksi Kööpenhaminan Danneborgsgade 18:ssa, jossa asuinkerrostalon saneerauksen yhteydessä vaihdettiin parvekkeiden tilalle yhtenäisellä julkisivulla verhottu puolilämmin oleskeluvyöhyke (Tenhunen 2001, 18).

Kaksoisjulkisivun yksi tärkeimmistä ominaisuuksia on ulomman vaipan sääsuoja sisävaipalle, joka tarkoittaa sitä, että sisävaippaa ei tarvitse suojata tuulelta eikä vinosateelta. Aikaisemmin mainituista toimintamalleista riippuen kaksoisjulkisivun välitilaa voi hyödyntää talon lämmityksessä talvisin ja jäähdytyksessä kesäisin. Kaksoisjulkisivun suuri välitila toimii myös tärkeänä kadulta tulevien äänien vaimentamana elementtinä sekä helpottaa huomattavasti välitilan ja sen rajoittavien materiaalien siivouksen, hoidon ja huollon.

2.2 Kaksoisjulkisivujen kuormitus ja mitoitus

2.2.1 Kaksoisjulkisivuihin kohdistuva kuormitus

Kaksoisjulkisivun eri rakenneosat ottavat eri kuormitukset vastaan. Kaksoisjulkisivun sisempi lämpöeristetty vaippa kuljettaa tavallisen ulkoseinän tapaan yläpuolisten rakenteiden kuormat alas perustuksiin. Sisävaipalle tulevat kuormat ovat suurimmalta osin samat kuin yleisesti käytetylle ulkoseinälle tulevat kuormat, kuten vaipan omapaino, ylempien rakenteiden pysyvät kuormat, hyötykuorma, tungoskuorma ja lumikuorma. Näiden lisäksi sisävaippa kantaa ulomman vaipan kuormat, huoltosillat ja hyötykuorma, huoltolaitteiston kuorma, valaisimet, kaihtimet jne.

Ulommalle, kevytrakenteiselle vaipalle tulevat kuormat ovat omapaino, tuulikuorma, räystään osalta lumikuorma, lämpöliikkeistä aiheutuva kuorma sekä mahdollisesti isku- ja törmäyskuorma. Myös lasin kannatustavasta johtuen saatetaan aiheutua kuormitus lasille, sillä pitkäaikainen veto esimerkiksi heikentää lasin

kestävyyttä. Jos kaksoisjulkisivu ylettyy katutasolle asti, verhouslasin ja sen rungon mitoituksessa tulee huomioida iskuista ja ajoneuvon liikenteestä aiheutuvat kuormat (Tenhunen 2001, 59). Lasirakenteen tulee tällöin olla joko törmäystä kestävä, jolloin se ei mene rikki tai turvalasia, joka rikkoutuessaan sirpaleet eivät aiheuta haavoittumisvaaraa. Lasin mitoittaessa on tärkeää huomioida lämpötilaerot lasin keski- ja reuna-alueiden välillä, sillä keskialue lämmitessään laajenee ja aiheuttaa reunoille vetojännityksiä (RT 38-10901 2007, 6).

Lasi ottaa pääasiassa kaksoisjulkisivulle kohdistuvaa tuulikuormaa vastaan. Tästä huolimatta sisävaippa on yleensä sekä mitoitettava myös tuulelle että ilmatiiivistettävä, sillä se saattaa olla pitkäänkin rakennusaikana paljaana tuulelle. Sisävaipan tulee kestää tuolikuormaa myös silloin, jos ulkovaipan saumat ovat auki. Kiinnikkeiden suunnittelussa on myös huomioitava tuulen aiheuttama imu-kuorma, sekä mahdollisen ilmastoinnin aiheuttama alipaine saattaa olla merkittävä joissakin tapauksissa.

Kaksoisjulkisivua mitoittaessa on tavallisten kuormien lisäksi huomioitava palo-osastointi sekä palotilanne, jossa huoneistopalo leviää välitilaan. Jos tuuletusrako on liian kapea, syntyy kova lämpörasitus lasille ja siihen liittyville rakenteille. Palovaarat liittyvät pääasiassa savun ja kuumuuden leviämiseen välitilaan. Tästä tilanteesta voi aiheutua lasin rikkoutumisen tai rakenteiden pettämisen tai molemmat. Ontelojen ja julkisivujen palotilanteita tutkinut VTT totesi tutkimuksensa ”ontelojen ominaispiirteet” (2002, 112, 120-121) perusteella, että 20 m korkea kaksoisjulkisivu vaatisi noin 700 mm syvä välitila vaaran poistamiseksi.

2.2.2 Kaksoisjulkisivujen suunnittelu ja mitoitus

Kaksoisjulkisivua erottavia tekijöitä muista julkisivuista ovat sen kaksoisrakenne sekä kaksoisrakenteen toiminta ja tuuletus. Koska julkisivu on kaksoisrakenteinen, U-arvon laskentaan vaikuttaa enemmän muuttujia kuin tavallisen seinän U-arvoon ja kuormien jako sisä- ja ulkovaipalle menee hieman eri tavalla kuin yleisesti käytetyillä seinillä. Kaksoisjulkisivun U-arvon laskennassa tärkeimmät muuttujat ovat molempien vaippojen rakenteiden lämmönjohtavuudet, rakenteiden

paksuudet, seinän kantava runko, joka on opinnäytetyön malliseinän tapauksessa termoelementin termoranka, sekä vaippojen välinen tuuletustila.

Kaksoisjulkisivun lämmönläpäisykerroin koostuu sisemmän vaipan, välitilan sekä ulomman vaipan lämmönläpäisykertoimista. Sisemmän seinän, eli lämpöeristetyin seinän U-arvolla on suurin vaikutus lopulliseen U-arvoon, mutta sitä parantavat ulommat rakenteet. Tietämällä lämpöeristetyin umpiseinän sekä ulomman alumiinilaseinän U-arvot on mahdollista laskea välitilan U-arvo. Eurokoodin standardissa SFS-EN ISO 6946 (2017) on esitetty yleiset ohjeet ja laskentaesimerkit eri mallisten ja rakenteellisten kappaleiden lämmönvastusten ja -läpäisykertoimien laskentaan. Standardissa SFS-EN ISO 12631 (2017) on esitetty välitilan lämmönläpäisykertoimelle laskentamenetelmä ja -esimerkki julkisivulle, jonka ulompi vaippa on lasirakenteinen tai paneelia. On kuitenkin huomioitavaa, että välitilan lämmönläpäisykerroin saattaa olla välitilan tuuletustavasta riippuen erilainen kesä- ja talviaikaan. Tästä esimerkkinä välitila, jonka tuuletus suljetaan talvella ja avataan kesällä.

Tuulikuorman oletetaan kohdistuvan lasivaippaan kuormitusohjeissa annettujen muotokertoimien mukaisesti huomioiden reuna-alueiden korotetut arvot. Tuulikuorma määritellään tavallisesti RIL 144-2002 Rakenteiden kuormitusohjeet tai Eurokoodin SFS-EN 1991-1-4 mukaisesti. Lisäksi dokumentista prEN 13474-2 "Glass in Building – Design of glass panes – Part 2" löytyy laskentaohjeita lasia kohtisuorasti kuormitetuille lasilevyille. Tuulen mitoituksessa on myös otettava huomioon lasin suurimmat sallitut taipuma-arvot Eurokoodin standardin SFS-EN 12150-1 mukaisesti (2015).

Alumiini-lasirakenteista seinää suunnitellessa on tärkeää muistaa, ettei lasille saa tulla kehän tai rakenteen siirtämiä kuormia. Alumiini-lasirakenteiseen seinään tulevien kuormien tulee kulkea lasituslistan kautta kehään ja ympäröivään rakenteeseen. Kehän tulee lisäksi olla riittävän jäykkä reunataipuman ehkäisemiseksi. Lasirakenteiden mitoitus voidaan diplomi-insinöörin Tenhusen (2001, 64) mukaan suorittaa RIL 198-2001 "Valoaläpäisevät rakenteet" -ohjeen mukaisesti. Alumiini-lasirakenteisen seinän lasi ei saa olla kosketuksessa muuhun lasilevyyn eikä metalliin. Tämän takia perinteisessä lasituslistaliitoksessa lasien tulee maata

lasitukien päällä. Mekaanisella lasin tuella on oltava korkea murtolujuusarvo ja sen on sovittava yhteen lasimateriaalin, kehän ja muiden komponenttien kanssa. Alumiinisen lasikehän tiivistämisessä käytetään suulakepuristettuja materiaaleja eli tiivisteitä. (SFS-EN 12488 2016, 11)

Kaksoisjulkisivulle aiheutuu myös kuormitus rakennuksen kantavan rungon siirtymisestä. Julkisivurungon tukeutuessaan esimerkiksi välipohjaan välipohjan taipumat täytyy huomioida. Välipohjan taipumaan varautuminen voidaan huomioida esimerkiksi jättämällä lasin ja rungon liitoksiin riittävät välykset pystysuunnassa, jolloin välipohjan taipumasta ei synny lisärasituksia lasirakenteelle. Rasituksia julkisivurungolle voivat aiheuttaa myös rakennuksen päärungon vaakasiirtymät. Kaksoisjulkisivun alumiini-lasi-seinäjärjestelmästä ja sen tukemisesta riippuen on mahdollisesti tarpeellista asettaa rakennuksen rungon vaakasiirtymille tavallista tiukemmat raja-arvot ja vaatimukset.

Kaksoisjulkisivun isosta lasipinta-alasta johtuen julkisivun pesu- ja huoltotöiden merkitys korostuu. Lasin on oltava aina puhdas ja kirkas täyttääkseen sille annetut vaatimukset. Lasin vaatima pesutiheys vaihtelee lasin pinnasta ja ominaisuuksista riippuen. Alumiini-lasijulkisivun tiivisteet ja saumat vaativat puolestaan tarkistusta ja uusimista tietyin aikavälein, erityisesti SG-lasitetun julkisivujen sauma. Kaksoisjulkisivun pesu- ja huoltotöitä varten on mahdollista joko käyttää tilapäisiä nostolaitteita tai sitten kiinteitä tai irrotettavia huoltojärjestelmiä. Kiinteät ja irrotettavat huoltojärjestelmät vaativat kiinteitä rakenteita, jotka saattavat vaikuttaa rakennuksen ulkonäköön. Ulko- ja sisävaipan välisen tilan huoltoa varten yleensä käytetään kiinteitä huoltotasoja, jotka kiinnitetään ulkovaippaa kannattaviin rakenteisiin. Huoltotasot varustetaan tason kiertävillä vaijereilla huoltotöiden tekijän putoamisen estämiseksi turvallisuusvaatimusten mukaisesti. Toisaalta mikäli lasi suoja koko huoltotason ja se mitoitetaan kestäväksi kaidekuormaa, lasi voidaan käyttää putoamissuojana. Edellä mainittu ratkaisu voisi Tenhusen (2001, 77) mukaan olla mahdollisesti jopa turvallisempi ratkaisu kuin erillinen putoamisenesto-järjestelmä. Mikäli huoltotasoa ei haluta tai välitila on liian kapea, on mahdollista käyttää sisävaipan avattavat ikkunat välitilan huoltoa ja pesua varten. Määräyksiä ja ohjeita huoltokelkkojen suunnittelua varten löytyvät standardista SFS-EN 1808

”Riipputelinejärjestelmien turvallisuusvaatimukset”. Suomessa kaikkien huoltojärjestelmien on myös oltava RakMK osan F2 mukaisia.

2.3 Yleisimmät rakennusmateriaalit kaksoisjulkisivuissa

Kaksoisjulkisivun sisempi vaippa on rakenteeltaan tavallinen kantava, lämpöeristetty ulkoseinärakenne. Tenhusen (2003, 24) mukaan kaksoisjulkisivuissa sisempi vaippa on kuitenkin yleensä toteutettu metallirunkoisista kevyistä elementeistä, sillä sisävaippa ja sen liitokset jäävät ulkovaipan sääsuojaan. Kaksoisjulkisivun lämpöeristetyn sisävaipan ulkoverhous voi olla julkisivulasia, alumiinia, maalattua teräsohutlevyä tai ruostumatonta teräslevyä.

Kaksoisjulkisivun ulkovaipan materiaalina on käytetty lasia, alumiinia, ruostumatonta terästä ja rei’itettyä terästä, kuten Helsingin Arabianrannan Portaalissa. Yleisin nykypäivänä käytetty ulkovaipan materiaali on yksikerroksinen karkaistu tai laminoitu lasi riippuen kohteesta ja mitoitusiedoista. Tällöin lasituslistat ovat useimmiten olleet alumiinisia. Lasilistat voivat myös olla materiaaliltaan puiset tai muoviset. (Tenhunen 2003, 25)

Kevyttä ulkovaippaa kannattava runko on tehty metallista. Kannattavan rungon metallina on käytetty alumiinia, ruostumatonta terästä, sinkittyä terästä, pinnoittamatonta säänkestävää terästä tai maalattua terästä. Lämpöeristetyn sisävaipan ja kevyen ulkovaipan välisen välitilan ritilöiden materiaalina on yleensä käytetty sinkittyä terästä. Ritilät voivat kuitenkin olla myös alumiinista tai ruostumatomasta teräksestä toteutettuja.

Ominaisuuksiltaan erilaisten materiaalien suunnittelu samaan rakenteeseen on tarkka asia. Siinä on otettava huomioon eri materiaalien ominaisuudet kuten asennusaikaiset liikkeet, lämpötilojen ja kuormitusten aiheuttamat liikkeet, valmistus- ja asennustoleranssit. Taulukossa 1 on esitetty joitakin materiaaleja ja niille lämpölaajenemiskertoimet vertailun vuoksi. Taulukosta huomataan, että

yleisempien kaksoisjulkisivussa käytettyjen materiaalien lämpölaajenemiskertoimet poikkeavat toisistaan. Tästä johtuen on useimmiten pyritty käyttämään esimerkiksi alumiinisen profiilijärjestelmän kiinnityksessä alumiiniset kiinnikkeet

TAULUKKO 1. Esimerkkejä materiaalien lämpölaajenemiskertoimista (Seppänen, Kervinen, Parkkila, Karkela, Meriläinen, 2012, 73, 77)

Materiaali	Pituuden lämpötilakerroin ($1/^{\circ}\text{C}$)
Lasi	$8 \dots 9 \cdot 10^{-6}$
Alumiini	$23 \dots 24 \cdot 10^{-6}$
Teräs	$12 \cdot 10^{-6}$
Ruostumaton teräs	$16 \cdot 10^{-6}$
Haponkestävä teräs	$16 \cdot 10^{-6}$
Kupari	$17 \cdot 10^{-6}$
Puu	$10 \cdot 10^{-6}$

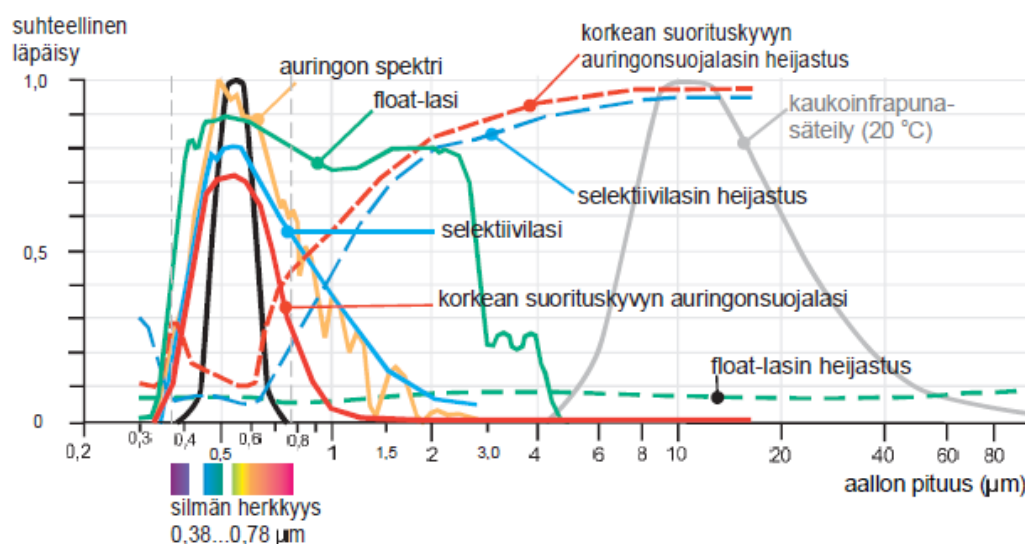
Kaksoisjulkisivun kiinnityksessä käytetyt kiinnikkeet valitaan julkisivumateriaalien ja kiinnitystavan mukaan. Ruuvien, aluslevyjen ja muttereiden on aina hyvää olla samaa materiaalia galvaanisen korroosion välttämiseksi. Peruseriaate tässä on se, että kiinnikkeen tulisi olla jalompaa materiaalia kuin kiinnitettävä rakenne, jolloin kiinnike ei syövy eikä galvaaninen korroosio pääse merkittävästi etenemään kiinnitettävässä rakenteessa. Tiivisteet on puolestaan valittava kohteeseen sopivia, kimmoisia, säänkestäviä, kovettumattomia, tarttuvia massoja tai tiivistysmuotonauhoja (Ratu 1197-S 2002, 15). Elastisen tiivisteiden yksi tärkeimpiä tehtäviä veden ja kosteuden pääsyn estämisen lisäksi on tasata lasin lämpöliikkeitä ja estää kiinnityksestä aiheutuvan jännityksen muodostumisen lasiin ja siten lasin murtumisen.

2.3.1 Lasi

Rakentamisessa eniten käytetyt lasityypit ovat tavallinen float-lasi, karkaistu lasi sekä laminoitu lasi. Tasolasi, jota kutsutaan myös rakennuslasiksi, on ollut CE-merkinnän piirissä syyskuusta 2006 lähtien (RT38-10901 2007, 3). Lasi on ma-

terialina täysin lineaarisesti kimmoinen, homogeeninen ja isotrooppinen. Kuorituksessa lasi rikkoutuu virumatta, toisin kuin metallit. Lasi on myötäämätön materiaali, mikä johtuu siitä, että aineen molekyylit eivät ole sidoksissa toisiinsa ki-derakenteilla ominaisilla voimilla, vaan kovalenttisilla kemiallisilla sidoksilla. (RT38-10901 2007,5)

Lasi on rakentamisessa suosittu materiaali sen hyvän valonläpäisevyydestä johtuen. Lasi päästää auringon valosta 85...92% ja auringon lämmöstä 80...87% läpi. Lasin hyvä auringonläpäisyominaisuuden haittapuoli on se, että se voi kesällä aiheuttaa sisäilman liiallista lämpenemistä ja epäviihtyisyyttä, joka puolestaan lisää sisäilman jäähdytystarvetta (RIL 255-1-2014 2014, 77). Lasi päästää lyhytaaltoisia infrapunasäteitä melko hyvin, mutta pidempiä aallonpituuksia huonosti. Se ei päästä aallonpituuksiltaan alle 300nm ja yli 3000nm säteilyä (Kuva 3). (RT38-10901 2007, 3). Kuvan 3 termistö on selitetty ohjekortissa RT38-10901 (2007). Lasi ei ole fotokemiallisille vaikutuksille herkkä materiaali, siten peruslasisuotteiden spektriominaisuudet kuten valon ja aurinkoenergian läpäisy eivät muutu suoran tai epäsuoran säteilyn vaikutuksesta (SFS-EN 572-1+A1 2016,8).



Kuva 3. Rakennuslasin läpäisy- ja heijastusspektrit. (RT38-10901 2007, 2)

Lasityyppejä valitaan kohdekohtaisesti ja valinta tehdään yleensä kohteelta vaaditun lämmönläpäisevyyden (U-arvo), auringonsäteilyn kokonaisläpäisevyyden (g-

arvo) ja ulkonäön perusteella. Verhouslasin käsittelyn avulla ja materiaaliominaisuuksia muuttamalla pystytään säätämään auringon valon ja lämpösäteilyn kulkeutumista ulkoa sisälle ja päinvastoin.

Karkaistu lasi on samaa materiaalia kuin tavallinen float-lasi, mutta se on karkaistu kuumentamalla ja tämän jälkeen kylmällä ilmalla nopeasti jäähdyttämällä. Karkaisumenetelmällä aikaansaadaan lasiin pysyvä pinnan puristusjännitys. Tämä lisää lasin mekaanisen peruslujuuden lisäksi myös merkittävästi lasin mekaanisen ja lämpöjännityksen sietoa ja määrittää sirpaloitumisen piirteet. Jos karkaisumenetelmä suoritetaan oikein, rikkoutuessaan karkaistu lasi hajoaa lukuisiksi pieniksi, turvallisiksi tylppäreunaisiksi sirpaleiksi. Sirpaloitumisominaisuudet ovat suoraan riippuvaisia pinnan puristusjännityksen määrästä. (SFS-EN 12150-1 2015, 6-7)

Laminoitu lasi voi olla joko tavallista float-lasia tai karkaistua lasia, jossa kahden kerroksen väliin puristetaan kovassa paineessa ja kuumuudessa muovikalvo. Laminoinnilla on mahdollista parantaa lasin UV-suojasta poistamalla UV-säteilyä noin 98% aallonpituuteen 380 nm saakka. Käyttämällä erikoiskalvoja on mahdollista parantaa laminoidun lasin ääneneristävyyttä ja murtumalujuutta. Rikkoutuessaan laminoidun lasin sirpaleet pysyvät kiinni elastisessa PVB-kalvossa (polyvinyl butyral) ja lasi pysyy yhtenäisenä paikallaan. Näin lasi suojaa rikkiinäisenäkin sen läpi putoamiselta sekä murtumista ja säätä vastaan. (RT38-10901 2007, 13). Pudotessaan yhtenäisenä kappaleena rikkiinäinen laminoitu lasi voi toisaalta aiheuttaa enemmän tuhoa kuin tavallinen lasi, joka putoaisi muruisina.

2.3.2 Alumiini

Alumiini on kevyt metalli, jolla on suhteellisen alhainen kimmokerroin, suuri pituuden lämpötilakerroin ja hyvä muokattavuus. Näistä syistä johtuen alumiinin mitoitus on hyvin erilainen kuin esimerkiksi teräksellä. Suunnittelussa on otettava huomioon esimerkiksi se, että alumiini taipuu helpommin kuin teräs. Alumiinin mitoituksessa taipuma tulee yleensä määrääväksi. Toinen tapa, jolla alumiinin mitoitus

eroaa teräksestä, on hitsausliitoksen kestävydessä. Alumiinin hitsausliitoksien lujuus on pienempi kuin muu osa rakenteesta. (RT 39-10451 1991, 5)

Alumiini on rakennusteollisuudessa laajalti käytetty materiaali sen keveyden ja yleensä riittävän lujuuden vuoksi. Muita alumiinin tärkeitä ominaisuuksia ovat sen hyvä korroosionkestävyys ilman pintakäsittelyäkin ja hyvä lämpösäteilyn heijastuskyky. Se on helposti työstettävä ja alumiiniosia on helppo liittää toisiinsa usealla tavalla. Alumiiniosia on mahdollista liittää toisiinsa ruuveilla, nauloilla, niiteillä, hitsaamalla, juottamalla ja liimaamalla. (RT39-20451 1991, 1,9)

Materiaalin hyvästä korroosionkestävyydestä johtuen se soveltuu käytettäväksi julkisivuissa. Aineen hyvä korroosionkestävyys perustuu sen erittäin herkkään hapettumiseen. Alumiinin pinnalle muodostuu tiivis 0,01...0,02 µm paksu oksidikerros sen reagoidessa ilman kanssa. Alumiinin pintakäsittely ei siis ole yleensä välttämätön ainoastaan korroosionkestävyyden kannalta. Pintakäsittelyllä pyritään yleensä saavuttamaan tietty ulkonäkö, pysyvyys sekä ominaisuuksia, jotka sopivat tarvikkeen käyttöolosuhteisiin. (RT39-20451 1991, 4, 6)

Alumiinin kierrättäminen on hyvin taloudellisesti kannattava. Alumiini voidaan kierrättää ja käyttää yhä uudelleen ja uudelleen. Kierrätyksessä alumiinijäte sulatetaan yhteen ja epäpuhtaudet poistetaan. (SIT 22-610052 2007, 2). Alumiinituotteet tulee olla CE-merkittyjä tai saaneet tuotehyväksynnät lain 954/2012 mukaisesti (RT RakMK-12757 2018, 2).

2.3.3 Teräs

Teräs on tärkein rakennusteollisuudessa käytettävä raudan jatkojalostustuote. Teräket ovat rautametallin ja hiilen sekä pieniä määriä erityyppisiä seoksia. Hiili vahvistaa terästä ja tekee siitä lujemman, mutta samalla heikentää sen notkeutta ja sitkeyttä. Seostettuja teräksiä ovat esimerkiksi ruostumattomat teräket, kuumalujat teräket ja tulenkestävät teräket. Teräket on mahdollista jakaa käytön mukaan ryhmiin, joista suurin on rakenneteräket. Rakenneteräksestä on mahdollista muodostaa hitsaamalla monoliittisiä liitoksia. (SIT 22-610045 2007, 2-3)

Teräs on julkisivumateriaalina perinteisempi ja sen tärkeimpiä etuja alumiiniin verrattuna ovat halvemmat hinnat alumiiniin verrattuna, parempi saatavuus ja pienempi lämpölaajenemiskerroin. On silti muistettava, että teräs on materiaalina painavampi kuin alumiini. Terästä käytetään yleisesti myös julkisivukiinnikkeissä, joissa täytyy ottaa huomioon sähkökemiallinen korroosio muiden metallien kanssa. Teräksen huonosta korroosionkestävyydestä johtuen julkisivuissa yleensä käytetään pinnoitettuja ja käsiteltyjä teräksiä. Teräksiä pinnoitetaan myös ulkonäön parantamiseksi sekä pinnan kestävyys- ja kovuuden lisäämiseksi (SIT 22-610045 2007, 5).

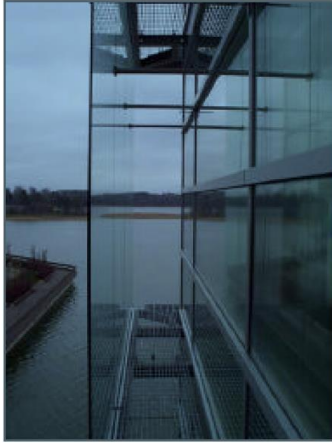
Ruostumattomat teräkset käytetään yleensä kohteissa, joissa rakenne voi altistua vedelle, runsaalle kosteudelle tai materiaalilta edellytetään erityistä kulutuksen- ja korroosionkestävyyttä. Ruostumattomuus saadaan aikaseksi seostamalla teräkseen kromia. Seoksen kromin reagoidessa ilman hapen kanssa syntyy teräksen pinnalle suojaava kromioksidikerros. Ruostumattomalla teräksellä on hyvän korroosionkestävyyden lisäksi hyvä lujuus/painosuhte sekä palonkesto. Ominaisuuksiensa ansiosta sillä on alhaiset elinaarikustannukset ja se on täysin kierrettävissä. Sen ero hiiliteräkseen on suurempi lämpölaajeneminen ja pienempi lämmönjohtavuus. (SIT 22-610077 2010, 2).

Ruostumattomien terästen ominaisuuksiin on mahdollista vaikuttaa muuttamalla seosaineita ja niiden pitoisuuksia. Muuttuvia ominaisuuksia ovat mm. työstettävyys, muovattavuus, hitsattavuus, ulkonäkö, palonsuojaus ja korroosionkestävyys. Suorassa kosketuksessa heikomman metallien kanssa ruostumattomalla teräksellä on taipumus kiihdyttää toisen metallin korroosiota. Tämän takia ruostumattoman teräksen kiinnikkeiden täytyy olla joko ruostumatonta terästä tai niitä täytyy eristää ruostumattomasta teräksestä ti-metallisella aluslevyllä tai holkeilla. Ruostumatonta terästä koetaan yleensä kalliiksi, mutta pitkän käyttöiän ja erinomaisen kierrettävyyden ansiosta jää ns. elinkaarikustannus useimmiten pieneksi moneen muuhun materiaaliin verrattuna. (SIT 22-610077 2010, 2-3)

2.4 Kaksoisjulkisivujen rakennemallit

Kaksoisjulkisivut ovat rakenteellisesti jaoteltu niiden tuki- ja jäykistysratkaisujen perusteella kolmeen eri tuentatapaan:

1. ulokkeellinen rakenne: kaksoisjulkisivun runko kiinnitetty kiinnikkeellä, kuvan 3 vasemman puoleisen mallin tapaisesti joka kerroksen välipohjalaatan reunaan joko hitsaamalla tai pulteilla. Kiinnikkeeseen liitetään lasia ja niiden tukirakenteita, tuulikuormia ja mahdollisia ritilätasojen hyötykuormaa kantava teräsprofiili. Tästä rakennemallista Suomessa toteutunut esimerkkikohde on Espoon Radiolinja
2. ripustettu rakenne: ulkovaipan lasi ja sen tukirunko ovat ripustettuja, kuvan 3 keskimmäisen mallin mukaisesti. Lasi voi tällöin olla joko ripustettu vetotangoilla vesikatolla olevista ulokepalkeista ja tuettu kerroksittain rakennusrunkoon säädettävillä vaaka- ja vinosauvoilla tai kannatettu tiheämmin väliltäkin, jolloin vinosauvoissa on korkeudensäätömahdollisuus. Rungon teräsprofiilit ovat huomattavasti kevyimpiä kuin ulokkeellisessa mallissa. Tästä rakennemallista Suomessa toteutunut esimerkkikohde on Helsingin Ruoholahden Nokian toimistotalo.
3. kehärakenne: kaksoislasia tukevat pystytuet ja niihin jäykästi kiinnitetyt vaakasuuntaiset palkit, kuvan 3 oikean puoleisen mallin tapaisesti, tai pilarit kantavat julkisivun suoraan perustuksista. Palkit on joko hitsattu tai kiinnitetty pultein sisävaippaan. Ulkolasi on tässä tuentatapauksessa tuettu neljältä sivulta. Taipuma ei tässä tuentatavassa tule yleensä mitoittavaksi. Tästä rakennemallista Suomessa toteutunut esimerkkikohde on Espoon Keilalahden vanha Nokian pääkonttori.



Ulokkeellinen rakenne



Ripustettu rakenne



Kehärakenne

Kuva 4. Kaksoisjulkisivun rakennemallit

3 KAKSOISJULKISIVUJEN LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA

Lämpö on atomien ja molekyylien värähtelyliikettä. Lämpö voi siirtyä sekä rakenteessa että tilassa kolmella eri tavalla: johtumisen, säteilyn ja konvektion avulla. Kun tarkastellaan kaksisjulkisivun lämpötekniikkaa, voidaan todeta, että kaikki edellä mainitut lämmön siirtymistavat vaikuttavat kaksisjulkisivun materiaalien lämpötiloihin. Edellä mainittujen lämmön siirtymistapojen lisäksi lämpö siirtyy aineen olomuodon muutoksessa, kuten sulamisessa lämpötilan muuttumatta (Siikanen 2015, 40-41).

Lämpövirta on lämpötilaeroista johtuva energian siirtymistä lämpimämmästä kappaleesta viileämpään kappaleeseen. Yksi lämmön siirtymistapa on johtuminen, joka tarkoittaa lämmön virtaamista eli molekyylien liike-energian siirtymistä molekyylistä toiseen (Björkholtz, 1987, 12). Eri aineet johtavat lämpöä eri voimakkuudella. Metallit esimerkiksi johtavat lämpöä paremmin kuin puu.

Lämpö voi lisäksi siirtyä säteilyn avulla, jolloin energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella emittoivat eli lähettävät säteilyä. Rakennustekniikassa lämpösäteily jakautuu lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen kappaleiden säteilemään lämpöön. Säteilyn osuessa pintaan, se osittain absorboituu, osittain heijastuu ja läpäisevissä pinnoissa kuten lasissa osa säteilystä menee pinnan läpi. (Siikanen 2015, 40-41)

Lämpö voi siirtyä konvektion avulla nesteessä tai kaasussa lämmön aiheuttamien virtausten mukana. Virtaukset syntyvät rakenteen yli vallitsevan kokonaispaineeron vaikutuksesta. Konvektio voi olla luonnollinen tai pakotettu. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerojen aiheuttamat tiheyserot aikaansaavat liikkeen. Pakotetussa konvektiossa virtaus tapahtuu ulkopuolisen voiman kuten tuulen tai koneellisen ilmanvaihdon vaikutuksesta. (Siikanen 2015, 40-41)

Kirkkaalla ilmalla lämpötilan vuorokausivaihtelut ovat melko suuria. Päivällä maan pintaan tulee suuri auringonsäteily määrä ja yöllä maa jäähtyy voimakkaasti

pitkääaltoisen ulossäteilyn myötä. Pilvisellä ilmalla pilvet pienentävät suoraa auringonsäteilyä päivällä ja lisäävät ilmakehän vastasäteilyä yöllä. Tästä johtuen maanpinnalle tulevan nettosäteilyn ja lämpötilan vaihtelut ovat pienempiä. Ulkona oleviin pintoihin kohdistuvan vastasäteilyn takia voivat siis pintojen lämpötilat poiketa huomattavasti ulkoilman lämpötilasta. Kirkkaina talviöinä pintojen lämpötilat voivat olla jopa alhaisemmat kuin ulkoilman lämpötila. (Björkholtz, 1987, 31)

Kaksoisjulkisivun lämpökäyttäytymiseen vaikuttavat mm. pintamateriaalien ominaisuudet ja pinnoitteet, välitilan virtaukset, seinän lämmönläpäisevyys, tuulen suunta ja voimakkuus, ulkoilman sää sekä ilmavuodot (Tenhunen ym. 2001, 38). Opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa kaksoisjulkisivun välitilan ja sen rajoittavien materiaalien lämpötekniistä toimintaa. Kaksoisjulkisivun tuuletuksen virtausta rajoittaa sekä erilaiset metallit että lasit. Välitilaa rajoittavien materiaalien ominaisuudet ja lämpökäyttäytyminen ovat toisistaan poikkeavat. Julkisivurakenteiden ja päärunгон väliset liike-erot on tehtävä mahdolliseksi esimerkiksi saumojen avulla. Alumiinille on jätettävä riittävät liikevarat ja riittävän pienet liikunta-saumavälit. Tiivisteiden ja tiivistemassojen materiaali on oltava huonosti lämpöä johtava, jotta se ei esimerkiksi siirtäisi alumiinilistan korkea lämpötila viileämmälle lasille. Välitilan ilma ja materiaalit lämpenevät suorasta auringonsäteilystä, erilaisista säteilyn heijastumisista, materiaalien absorptiokertoimista, verhouslasiin absorboituneesta lämmöstä sisäpuolelle sekä raoista sisä- ja ulkoilmaan. Ulkopuolisten säteilylähteiden lähettämä säteily ei osu kaikille seinän pisteille samalla voimakkuudella vaan voimakkuus riippuu näkyvyyskertoimesta (Çengel 2008, 681...682).

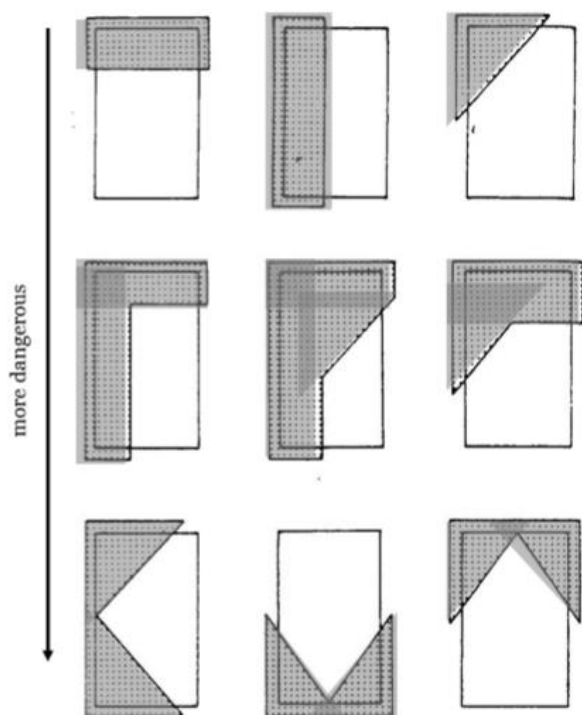
3.1 Materiaalien pintalämpötilat

Materiaalien pintalämpötilat nousevat absorptiokertoimen kasvaessa. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä suurempi osuus lämpösäteilystä absorboituu välitilan pinnoille sitä suuremmat ovat rakenteiden ja ilmatilan lämpötilat päivällä ja siten suuremmat vuorokautiset lämpötilavaihtelut. Koska välitilaa rajoittaa ominaisuuksiltaan erilaiset pinnat, suurien lämpötilavaihtelujen takia materiaalit lämpenevät ja

jäähtyvät eri nopeudessa. Kaksoisjulkisivun toimintamallin ja materiaalien valinnalla voidaan välitilaan mahdollisesti varastoida lämpösäteilyenergiaa, mikä puolestaan tasoittaisi päivittäiset lämpötilavaihtelut.

Välitilan pintoihin varastoituvan lämpöenergian vähentäminen tapahtuu vahvistamalla välitilan tuuletusta. Useimmiten kesäkaudella halutaan suurta virtausnopeutta, jotta välitilan ylimääräinen lämpö poistuisi. Talvella puolestaan halutaan mahdollisimman olematon välitilan tuuletus, jotta välitilaa voitaisiin hyödyntää lämmöneristyksessä. Välitilan ilman virtausnopeuteen on mahdollista vaikuttaa välitilan dimensioiden lisäksi myös ulkoilma-aukkosuhteiden, tuuletustavan ja tuuletustilan materiaalien kitkakertoimien avulla. Myös paikalliset tuuliolosuhteet ja auringon säteily vaikuttavat välitilan virtausnopeuteen. Välitilaa on tärkeää tuulettaa ainakin sisältä tulevan ilmankosteuden poistamiseksi, jotta ei syntyisi suuri kosteusrasitus välitilan rakenteille.

Opinnäytetyön kaksoisjulkisivun ulompi vaippa on alumiini-lasirakenteinen, jossa lasin liitostapa on lasituslistaliitos. Lasituslistaliitoksessa lasin reunat jäävät piiloon listojen ja massojen takana, jolloin lasin reuna- ja keskiosan väliset lämpötilaerot suurenevat ja ne laajenevat eri nopeudessa. Kun lasin keskialue pyrkii laajenemaan nopeammin kuin reuna-alue, syntyy reunan suuntainen vetojännitys, joka voi aiheuttaa lasin rikkoutumista. Insinööri Anastasiou opinnäytetyössään (2016, 25; AGC 2008) esittää esimerkkejä ikkunan lasin kriittisistä varjomuodoista (kuva 5). Lasin rikkoutuminen vaatii kuitenkin suuremmat lämpötilavaihtelut kuin tavalliset ulkoilman lämpötilavaihtelut, sillä lämpötilaeron ollessa 55 °C rikkoutumisriski on 50%. (Rainamo, Riikonen 1999, 58-59)



KUVA 5. Ikkunan lasin kriittiset varjomuodot. (Anastasiou 2016, 25, AGC 2008)

Lasin lämpöjännitykseen vaikuttavat auringonsäteilyn voimakkuus, ulkolämpötilan vaihtelut, tuulen ja tuuletuksen voimakkuus, lasityyppi, lasin reunan laatu, lasin käsittely ja laatu, lasilevyn koko ja paksuus, lasitusjärjestelmän lämpötekniset ominaisuudet, ulkoiset ja sisäpuoliset osittaiset varjostimet, lasin sijainti julkisivulla ja julkisivun taustarakenteen ominaisuudet. Lisäksi kylmä metallikermi ja -puite lisäävät lasin pinnan tason suuntaisia vetojännityksiä. Lasin rikkoutuminen voi myös johtua suuresta lämpösäteilyn absorptio-ominaisuudesta, auringonpisteelle alttiista sijainnista, huonosti tuulettuvista välitilan kohdista, lämpöä imevistä massiivisista rakenteista lasin lähellä, kuten tummat metallikehykset ja puut, lämpöä lasiin heijastavat pinnat, kuten vaaleat metalliset sälekaihtimet, lämpimän ilman voimakas virtaus lasia päin sekä tukirakenteiden siirtymät.

3.2 Materiaalipinnoitteet

Lasirakenteen ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä eri paksuisia laseja, muuttamalla säteilyominaisuudet sekä välitilan olosuhteita, jonka kautta konvektio muuttuu. Yksi voimakas tapa lasirakenteen säteilyominaisuuksien, kuten hei-

jastusominaisuuteen, muuttamiseen on käyttää auringonsuojakalvo. Lisäksi julkisivulasiin on mahdollista vaikuttaa pinnoittamalla ja sekoittamalla eri pigmenttejä. Jokaisella lasitoimittajalla on omat pinnoitteet ja kalvot. Lasin lämmöneristävyyttä voidaan parantaa käyttämällä esimerkiksi selektiivilasia tai eristyslasia.

Alumiinipellillä on hyvin suuri pituuden lämpötilakerroin verrattuna muihin materiaaleihin. Pellin materiaalin lisäksi väri vaikuttaa pellin lämpötilaan ja siten lämpölaajenemiseen. Tummat verhouslevyt elävät enemmän kuin vaaleat levyt, koska tummien peltien lämpötilat nousevat auringonpaisteessa korkeammiksi. Tämän takia suunnittelussa tulee huomioida pellin ominaisuudesta ja väristä aiheutuvat lämpöliikkeet. Mikäli lämpöliikkeille ei varata riittävästi tilaa, pellit saattavat pullistua ulospäin tai rikkoa kiinnikkeitä lämpötilan noustaessa.

Opinnäytetyön kokeellisen osion malliseinän (kappale 4.1) verhouslasin takana olevat pellit ovat pinnoitettuja PVDF-pinnoitteella (polyvinyylideenifluoridi). Kemian alan diplomi-insinööri Antti Markkula (2019) kertoo PVDF-pinnoitteen UV-säteilyn suojan johtuvan sen vahvasta kemiallisesta sidosenergiasta. Pinnoite ei kuitenkaan estä säteilyn pääsyä levyllä asti. Pinnoitteen ominaisuuksiin kuuluu myös korroosion kestävyys. Se tarkoittaa sitä, että pinnoite hidastaa veden ja hapen pääsyä kosketukseen metallin kanssa, joka on suhteellisen herkkä hapettumiselle. Pinnoitteen säteilyominaisuudet, kuten NIR-säteilyn absorptio- ja heijastuskyky määräytyvät väripigmentin mukaan. Pinnoitteen värin absorboima lämpösäteily johtuu väristä riippuen suoraan levyllä asti. Yleisesti tiedetään vaalean värin heijastavan voimakkaammin ja absorboivan heikommin säteilyä kuin tumma väri. Lisäksi väripigmentin määrä suhteessa muuhun pinnoitteeseen vaikuttaa merkittävästi pinnoitteen säteilyominaisuuksiin, esimerkiksi valkoisessa värissä pigmentin osuus kuivakalvossa on yli 50 %. Tummassa värissä lämpötila nousee voimakkaasti, joka voimistaa pinnoitteen hajoamisprosessia, Markkula (2019) kertoo. Kun pinnoitteen sideaine hajoaa, se muodostaa liitumaisen kalvon, joka näyttää siltä, että pinnoite olisi muuttamassa väriään (haalistuu). Yleisenä nyrkkisääntönä lämpötilan vaikutuksesta pinnoitteiden hajoamisprosessiin on se, että lämpötilan kaksinkertaistuessa hajoamisprosessi nelinkertaistuu.

Markkula (2019) kertoo olemassa olevista heijastavista pigmenteistä, joita on mahdollista sekoittaa pinnoitteisiin. Heijastavat pigmentit nimensä mukaisesti lisäävät pinnoitteen heijastusominaisuuksia. Heijastavia pigmenttejä lisättäessä voidaan käyttää tummia värejä ja silti pitää pinnan lämpötilat suhteellisen matalina. Pinnoitteen värin ja ominaisuuksien lisäksi loppulämpötilaan vaikuttaa myös metallilevyn materiaali. Jos verrataan alumiinia ja sinkittyä terästä, nähdään kuinka alumiini emittoi eli lähettää säteilyä paremmin kuin sinkitty teräs. Tämän takia alumiinilevy on viileämpi, vaikka molemmat materiaalit pinnoitettaisiin täysin samanvärisellä pinnoitteella. Mahdollisemman viileä metallinen levy siis saadaan käyttämällä lämpösäteilyä tehokkaasti emittoivaa materiaalia, kuten alumiinia, sekä heijastavalla pigmentillä varustettua vaaleanväristä pinnoitetta. (Markkula 2019)

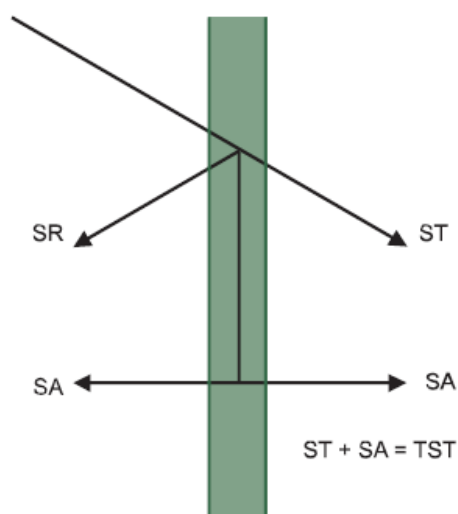
3.3 Lämpösäteily

Säteily on energian etenemistä aaltojen muodossa. Maanpinnalle tuleva auringonsäteily jakautuu aallonpituudeltaan alueelle 100...3000 nm, josta lämpösäteilyn alue on noin 250...2500 nm. Maanpinnalle tuleva auringonsäteily koostuu suorasta auringonsäteilystä, ilmakehän aiheuttamasta hajasäteilystä ja maan pinnalta heijastuneesta säteilystä. (Raino ym. 1999, 23). Maanpinnalle tuleva säteily määrä muuttuu vuodenajan mukaan siten, että talvikaudella lämpösäteily määrä on matala ja kesällä hyvin korkea.

Lopullinen pinnalle tuleva auringon lämpösäteilyn määrä riippuu aurinkoisten tuntien määrästä, pilvisyydestä, maan kiertämisakselista auringon kulmasta sekä julkisivun ilmansuunta. Pilvisenä päivänä auringon lämpösäteily vaikuttaa noin 30...35 % auringonsäteilyn kokonaismäärästä (Raino ym. 1999, 38). Auringon korkeuskulman suuruus vaikuttaa säteilyn voimakkuuteen, joka kappaleeseen kohdistuu. Auringon suurin korkeuskulma on suoraan riippuvainen kappaleen sijainnista, paikkakunnan leveyspiiristä ja vuodenajasta. Kuitenkin suurimman ja pienemmän aurinkokulman välinen ero kaikkialla maailmassa on 47 astetta. (Raino ym. 1999, 38-39)

Mitä pidempi säteilyn aallonpituus on sitä vähemmän se sisältää lämpöenergiaa. Tämän takia säteilyn aallonpituus muuttuu lyhytaaltoisemmaksi rakenteen lämmetessä. Kaikki pinnat lähettävät sähkömagneettista säteilyä pintalämpötilansa mukaisesti. Pintojen lähettämä säteily on pitkäaaltoinen. Mustan kappaleen emissiviteetti on 1, joka on suurin mahdollinen emissiviteetin arvo. Pienin mahdollinen emissiviteetti on 0,02, joka vastaa kiillotettua hopeapintaa. (Rainamo ym. 1999, 27).

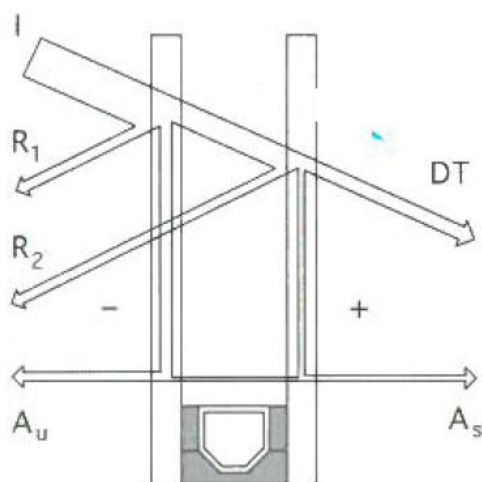
Lasille tulevasta auringonsäteilystä osa läpäisee lasin, osa heijastuu lasin pinnasta ja osa absorboituu lasiin (Raino ym. 1999, 23). Lasia läpäisevä säteily on lyhytaaltoinen. Lasiin absorboitunut säteily jakaantuu lasin molemmille pinnoille kuvan 6 mukaisesti. Kuvan 6 SR tarkoittaa lasista heijastuva lämpösäteily, ST suoraan läpäissyt säteily, SA lasiin absorboitunut säteily ja TST on lämpösäteilyn kokonaisläpäisy, joka tunnetaan myös nimellä g-arvo.



KUVA 6. Lasiin kohdistuvan lämpösäteilyn käyttäytyminen. (RT38-10901)

RIL 255-1-2014 (2014, 323) on esitetty esimerkkinä 3 mm paksun lasin g arvon koostumus. Esimerkissä lasi päästää suoraan lävitseen $ST = 85\%$ auringon säteilyä, $SR = 7\%$ heijastuu lasin ulkopinnasta ja $SA = 8\%$ absorboituu lasiin, josta kuusi prosenttiyksikköä siirtyy konvektiolla ja pitkäaaltoisena säteilynä ulos ja kaksi prosenttiyksikköä siirtyy sisälle. Sisälle pääsee yhteensä $TST = 87\%$ säteilymäärästä ja se merkitään $g = 0,87\%$.

Lasin emissiviteetti kuvaa heijastuneen pitkäaaltoisen säteilyn määrä takaisin huonetilaan. Mitä pienempi on lasin emissiviteetti sitä huonommin se päästää pitkäaaltoista lämpösäteilyä läpi. Tavallisin lasin emissiviteetin arvo on 0,837. (Raino ym. 1999, 25). Lasin emissiviteetti riippuu säteilyn aallonpituudesta. Tavallinen kirkas lasi päästää lähes täysin lyhytaaltainen auringon säteily, mutta absorboi itseensä suurimman osan pitkäaaltoisesta säteilystä ja heijastaa loput takaisin ympäristöön. Kuvassa 7 on vielä esitetty 2k eristyslasiin tulevan säteilyn jako. Kuvassa esiintyvä I on lasin pinnalle tuleva kokonaissäteily, R on lasin pinnan heijastussäteily, DT on lasia suoraan läpäissyt säteily, A on lasiin absorboitunut säteily ja TT on lasia läpäissyt kokonaissäteily eli g-arvo.



KUVA 7. Eristyslasiipaketille kohdistuvan säteilyn käyttäytyminen (Rainamo ym. 1999, 23)

3.4 Kaksoisjulkisivun paine-erot

Rakennuksen lämpötekniiseen toimintaan vaikuttaa lämmön lisäksi rakennuksessa esiintyvät ilmanpaineet ja niiden vaihtelut. Rakennuksen paine-erot aiheutuvat savupiippuvaikutuksesta, tuulesta sekä lämmityksen ja ilmanvaihdon järjestelyistä (sisäilmayhdistys 2008). Aurinkoisena päivänä pienillä tuulen nopeuksilla ja avoimilla välitilan ilma-aukoilla savupiippuvaikutus on merkittävin ilman vaihtuvuuteen vaikuttava tekijä. Sään ollessa pilvinen ja tuulen kohdistuessa julkisivuun ilmavirtauksiin vaikuttavat lisäksi julkisivupinnalle muodostuvat paine-erot. Tällöin

esimerkiksi sivuvirtaukset voivat olla merkittäviä suhteessa nouseviin ilmavirtauksiin.

Välitilan tuuletusvirtauksen syntyminen vaatii paine-ero ala- ja ylätasoon välillä. Kun välitilan alatasoon vallitseva paine on suurempi kuin ylätasoon paine, paineet yrittävät tasaantua ja siten syntyy virtaus ylöspäin. Ilman tuulta ja lämpötilaeroa ei synny tuuletustilassa virtausta. Lämmin ilma kulkeutuu ylöspäin. Eli kylmänä, pilvisenä, tyynenä päivänä ilmanpaineen ero ylä- ja alatasoon välillä on likimain nolla. Kun alkaa tuulla tai aurinko paistaa, paine-ero alkaa nousta, jonka myötä myös ilmanvirtaus alkaa syntyä. Alatasoon paine saattaa myös hetkellisesti laskea tuulen aiheuttamasta imusta johtuen. Julkisivun välitilan korkeuseroista aiheutuu myös paine-erot ylä- ja alatasoon välillä. Yhtälöstä 1 (Nevander & Elmarsson 2001, 449) voidaan yksinkertaistetusti laskea välitilan korkeudesta sekä välitilan ja ulkoilman lämpötilaerosta riippuva paineen muutos.

$$dp = \frac{(\rho g_0)}{T} \cdot \Delta T \cdot h, \quad (1)$$

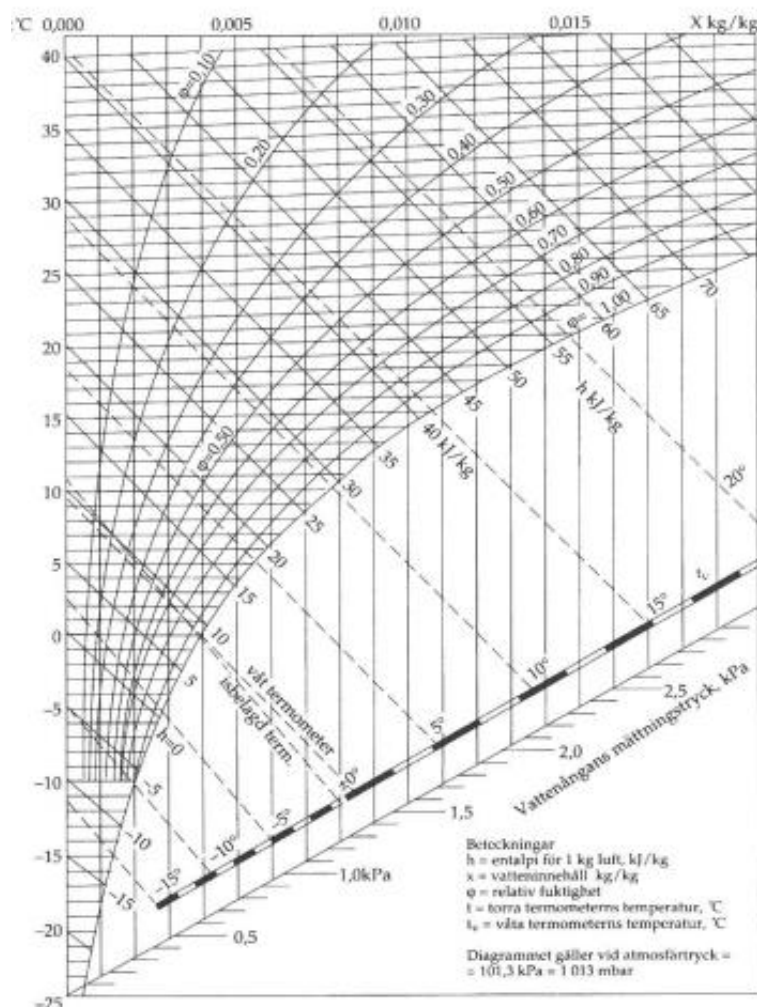
jossa $\frac{(\rho g_0)}{T}$ on vakio, jonka arvo on noin 0,043, T on absoluuttinen lämpötila kelvineinä ja h on välitilan korkeus metreinä

3.5 Kosteuden vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötilaan

Kostea ilma koostuu kahden kaasun, kuivan ilman ja vesihöyryn seoksesta. Vesihöyry on kevyempi kaasu kuin kuiva ilma. Kuivan ilman moolimassa $M_{ki} = 28,96$ kg/kmol, kun taas vesihöyryn moolimassa $M_{vh} = 18,02$ kg/kmol (Björkholtz 1987, 44). Lämpötilan suurista vaihteluista eri vuodenaikojen välillä myös vesihöyrypitoisuuksien vaihtelut ovat suuret. Kesällä ulkoilmassa on noin viisi kertaa enemmän vesihöyryä kuin talvella vaikka suhteellinen kosteus onkin kesällä alhaisempi. (Björkholtz 1987, 49)

Vedellä on suurempi lämpökapasiteetti kuin ilmalla, josta johtuen ilma lämpenee enemmän kosteuden lisääntyessä. Opinnäytetyön mittaukset (mittaukset esitetty kappaleessa 4) suoritetaan maaliskuun aikana, jolloin ulkona maassa on enää vain vähän lunta. Esimerkiksi helmikuun aikana, kun ulkona on paljon lunta vielä,

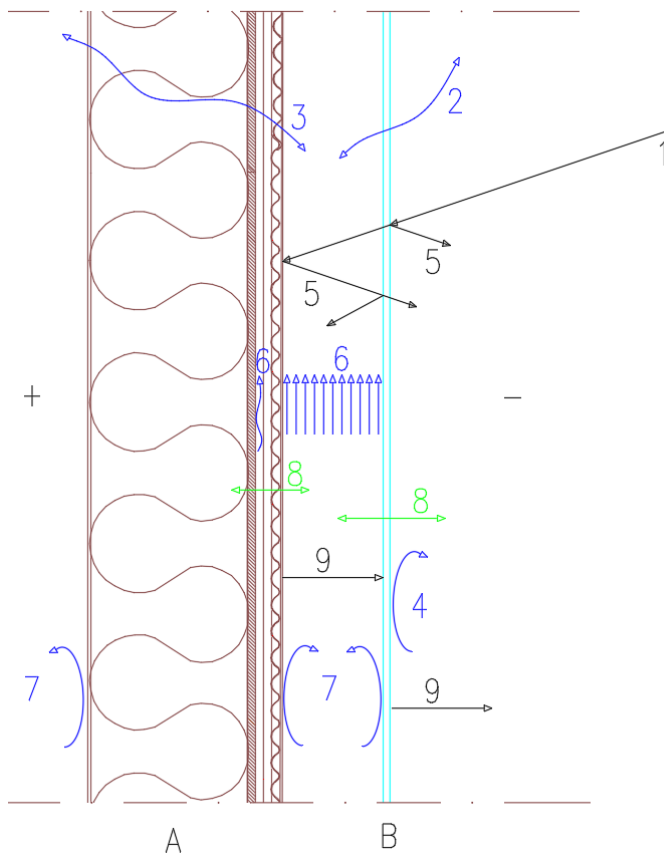
auriongon paisteella lumesta haihtuu kosteutta ilmaan. Kaksoisjulkisivun alla olevan lumen haihtuessa kosteus nousee välitilaan ja siten nostaa välitilan ilman lämpötila. Kostea ilma välitilassa aiheuttaa maalien hilseilyä, teräsrakenteiden korroosiota ilman korkea lämpötila ja pinnoitteiden värit saattavat muuttua. Kun välitilan materiaalien pintaan tiivistyy kosteutta, vapautuu samanaikaisesti lämpöä, joka nostaa materiaalin pinnan lämpötilaa. (Björkholtz, 1987, 30). Kuvaajassa 1 esitetään suhteellisen kosteuden ja lämpötilan riippuvuus. Kuvaajasta huomataan, että jos suhteellisen kosteuden arvo nousee ja energian määrä pysyy samana, lämpötilan arvo laskee. Kuvaajan perusteella voidaan päätellä, että lämpötilan riippuvuus suhteellisesta kosteudesta on suhteellisen pieni.



KUVAAJA 1. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan riippuvuus (Nevander & Elmarsson 2001, 474)

3.6 Kaksoisjulkisivun rakennusfysikaalinen toiminta

Kuvissa 8 ja 9 hahmotellaan kaksoisjulkisivun rakennusfysikaaliseen käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä. Kuvassa 8 esitetään rakennusfysikaalinen käyttäytyminen kaksoisjulkisivun vaippojen välillä, kun taas kuvassa 9 esitetään rakennusfysikaalinen käyttäytyminen kaksoisjulkisivun ikkunan kohdalla. Kuvissa näytetään opinnäytetyön malliseinän oikea rakenne ja malliseinässä käytetyn ikkunan rakenne. Kuvan 8 A tarkoittaa sisempi vaippa ja B ulompi lasinen vaippa. Kuvassa 8 vastaavasti A on kaksoisjulkisivun sisemmän vaipan ikkuna ja B on ulomman vaipan lasi.



KUVA 8. Kaksoisjulkisivun rakennusfysikaalinen toimintaumpiseinän kohdalla.

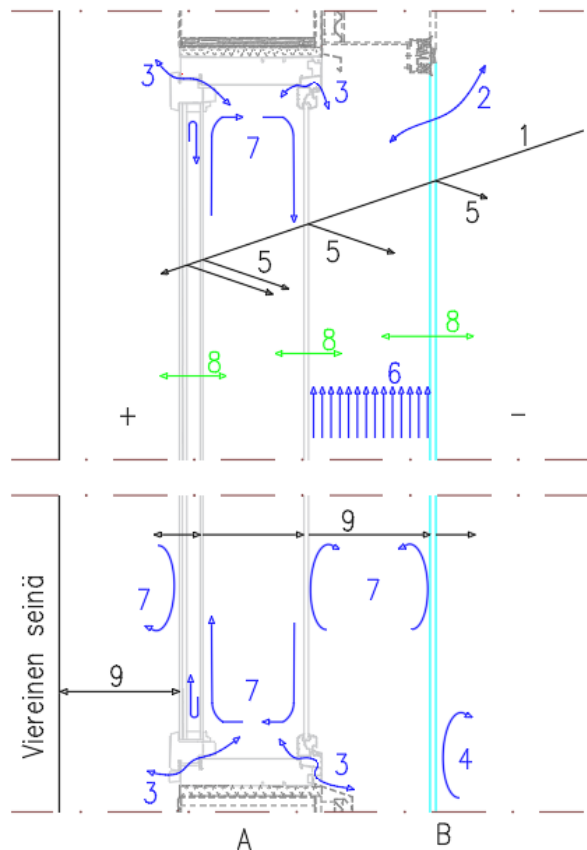
Rakennusfysikaalinen toiminta kuvassa 8:

1. Auringon säteilyn ja viereisistä rakennuksista ja ulkopuolisista kohteista heijastuneen säteilyn kohdistuminen kaksoisjulkisivuun.
2. Välitilan raot ulkoilmaan tasaavat paine-eroja. Tuulen aiheuttamat paine-erot esim. sivusuunnassa eri julkisivun osien välillä synnyttävät ilmavirtauksia aukkojen välillä.
3. Välitilan raot sisäilmaan tasaavat paine-eroja.

4. Ulkoilman lämpötilan vaikutus ulkolasin ulkopinnan lämpötilaan. Lämpö siirtyy ulkolasin ulkopinnalla pakotetusti ilmavirtauksen vaikutuksesta tai luonnollisesti pinnan ja ulkoilman lämpötilaeroista johtuen konvektiolla.
5. Kaksoisjulkisivun välitilan pinnat lämpiävät ja heijastavat toisiinsa ja ympäristöön säteilyä absorptio- ja emissiokertoimien mukaisesti.
6. Pintojen lämpötilaeroista ilmaan nähden, tulo- ja poistoilma-aukkojen sekä välitilan dimensioista syntyvät ilmavirtaukset. Virtausprofiili vaihtelee välitilan materiaalien pintojen lähellä. Kun pinta on ilmaa kylmempi, virtaus pinnan lähellä on hitaampi kuin välitilan keskellä. Kun aurinko alkaa vasta lämmittämään pintaa, kuvio on tasainen kuten kuvassa 7. Kun aurinko on paistanut jonkin aikaa ja lämmittänyt pinnan lämpimämmäksi kuin välitilan ilmaa, syntyy nousevia ilmavirtauksia ja virtausnopeus pinnan lähellä on siten suurempi kuin välitilan keskellä.
7. Lämpö siirtyy välitilan sisäpintojen ja ilman välillä konvektiolla.
8. Välitilan materiaalien lämpöominaisuudet kuten lämmönläpäisevyys ja lämpökapasiteetti vaikuttavat rakenteiden lämpenemiseen ja lämpenemisnopeuteen sekä mahdollisen välitilan yllämmön siirtymiseen sisätiloihin ja toisinpäin.
9. Lämpösäteily pinnasta pintaan. Pellistä lähtevä pitkäaaltoinen säteily absorboituu lasiin. Lasista lähtevä absorboitunut säteily kohdistuu vierisen rakennuksen pintaan. Pinnan lähettämä pitkäaaltoinen säteily on kylmää säteilyä. Mitä pidempi on lähtevän säteilyn aallonpituus sitä vähemmän se sisältää lämpöenergiaa. Johtumalla siirtyvän lämmön määrään vaikuttavat aineiden lämmönjohtavuudet, osien pinta-alat ja virtausmatka (RIL 255-1-2014 2014, 76).

Lasia läpäissyt lämpösäteily lämmittää lasin takana olevaa materiaalia, eli materiaali absorboi lämpöä ja näin materiaali alkaa säteilemään itse pitkäaaltoista säteilyä lasiin päin. Tämä pitkäaaltoinen säteily ei läpäise lasia vaan osa siitä absorboituu lasiin ja osa jää lämmittämään lasin ja materiaalin välistä välitilaa. Tätä ilmiötä kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. Tuulettumattoman seinäosan tapauksessa aurinko lämmittää peltiä, josta lämpö siirtyy osittain konvektiolla ja osittain pois säteilemällä välitilan ilmaan ja lämmittää sen.

Umpiseinän kohdalla kaksoisjulkisivuun kohdistuva lämpösäteily ei pääse välitilasta sisälle. Ikkunan kohdalla säteily ei jää välitilaan, vaan pääsee osittain ikkunan lasien kautta sisätilaan. Ikkunan kohdalla sekä ikkunan ulkolasin ulkopinnan lämpötila ei nouse yhtä korkeaksi kuin pellin lämpötila, koska lasi päästää osan säteilystä läpi eikä absorboi yhtä paljon säteilyä kuin pelti. Kaksoisjulkisivun toiminta ikkunan kohdalla on kuvattu kuvassa 8.



KUVA 9. Kaksoisjulkisivun rakennusfysikaalinen toiminta ikkunan kohdalla

Kaksoisjulkisivun rakennusfysikaalinen toiminta ikkunan kohdalla:

1. Auringon säteilyn ja viereisistä rakennuksista ja ulkopuolisista kohteista heijastuneen säteilyn kohdistuminen kaksoisjulkisivun osiin.
2. Välitilan raot ulkoilmaan tasaavat paine-eroja. Tuulen aiheuttamat paine-erot esim. sivusuunnassa eri julkisivun osien välillä synnyttävät ilmavirtauksia aukkojen välillä.

3. Raot sisäpuolelle tasaavat paine-eroja. Huoneesta tuleva ilma ikkunan välitilaan ei saa olla isompi kuin ikkunan välitilasta siirtyvä ilma sisäpuolelle, jotta huoneesta tuleva vesihöyry ei kondensoidu ikkunan lasiin.
4. Ulkoilman lämpötilan vaikutus ulkolasin ulkopinnan lämpötilaan. Lämpö siirtyy ulkolasin ulkopinnalla pakotetusti ilmavirtauksen vaikutuksesta tai luonnollisesti pinnan ja ulkoilman lämpötilaeroista johtuen konvektiolla.
5. Kaksoisjulkisivun välitilan pinnat lämpiävät ja heijastavat toisiinsa ja ympäristöön säteilyä absorptio- ja emissiokertoimien mukaisesti.
6. Pintojen lämpötilaeroista ilmaan nähden, tulo- ja poistoilma-aukkojen sekä välitilan dimensioista syntyvät ilmavirtaukset. Virtausprofiili vaihtelee välitilan materiaalien pintojen lähellä. Kun pinta on ilmaa kylmempi, virtaus pinnan lähellä on hitaampi kuin välitilan keskellä. Kun aurinko alkaa vasta lämmittämään pintaa, kuvio on tasainen kuten kuvassa 7. Kun aurinko on paistanut jonkin aikaa ja lämmittänyt pinnan lämpimämmäksi kuin välitilan ilmaa, syntyy nousevia ilmavirtauksia ja virtausnopeus pinnan lähellä on siten suurempi kuin välitilan keskellä.
7. Lämmönsiirtyminen pintojen ja ilman välillä konvektiolla. Konvektio voimistuu, kun kylmä ilma pääsee sisään ikkunaan, jolloin olemassa oleva lämmin ilma nousee ylös.
8. Välitilan materiaalien lämpöominaisuudet kuten lämmönläpäisevyys ja lämpökapasiteetti vaikuttavat rakenteiden lämpenemiseen ja lämpenemisnopeuteen sekä mahdollisen välitilan yllämmön siirtymiseen sisätiloihin.
9. Jokainen pinta lähettää pitkäaaltoista säteilyä lämpötilansa mukaisesti. Kyseinen pitkäaaltoinen säteily absorboituu toiseen pintaan. Säteilyä siirtyy Lämpimämmästä pinnasta kylmempään pintaan. Johtumalla siirtyvän lämmön määrään vaikuttavat aineiden lämmönjohtavuudet, osien pinta-alat ja virtausmatka (RIL 255-1-2014 2014, 76).

Ikkunan pinnoille ja lasien välissä lämpö siirtyy lämpimämmästä pinnasta kylmempään pintaan. Ilman lämpeneminen ja jäähtyminen aiheuttaa lämpimän ilman ylösnousu ja kylmän ilman alas painuminen. Virtaava ilma siirtää mukanaan lämpöä, jota se luovuttaa kylmempiin pintoihin. Ilmavirtauksen lämmön määrään

vaikuttavat ilman ja pinnan välinen lämpötilaero, pinnan koko ja mahdolliset ilmavirtauksia aiheuttavat tekijät kuten tuuli ja lämmityslaitteet. (RIL 255-1-2014 2014, 76)

Ilmavuodot kuljettavat mukanaan lämpöenergiaa. Ilmavuodon määrään ja sen sisältämään lämpömäärään vaikuttavat raon suuruus, pinta-ala ja materiaalin eri puolilla vallitsevien ilmanpaineiden erot. (RIL 255-1-2014 2014, 76). Ilmavuotoihin vaikuttavat myös raon mutkat ja raon pintojen epätasaisuudet. Katso kuvat 7 ja 8, kohdat 2 ja 3.

4 KAKSOISJULKISIVUN KOKEELLINEN LÄMPÖTEKNINEN TARKASTELU

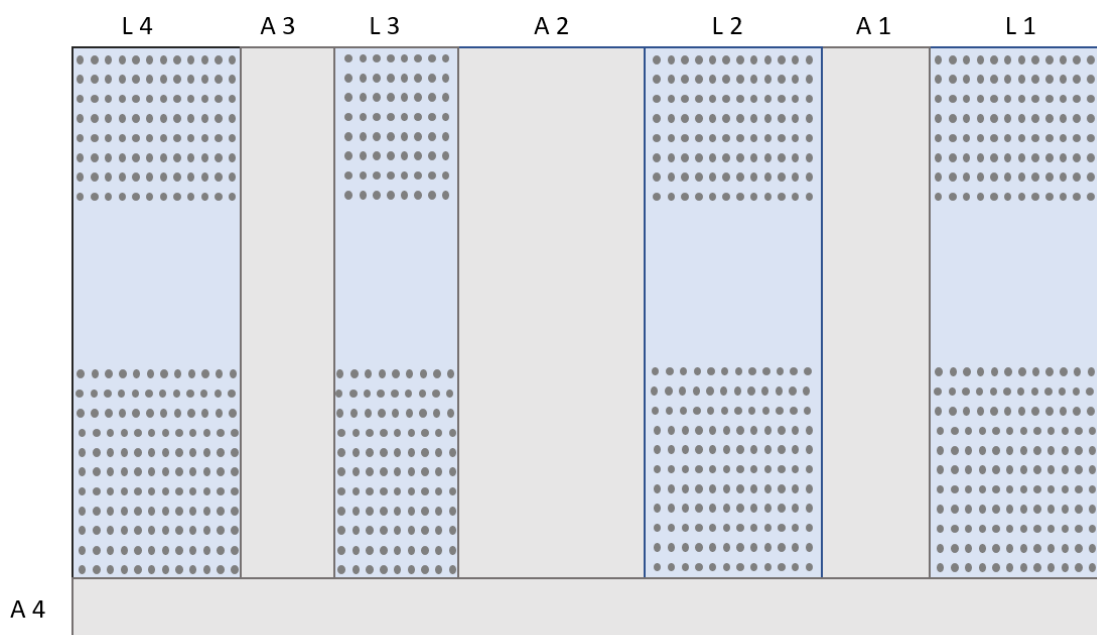
Opinnäytetyön kokeellisen osion mittaukset suoritetaan Helsingissä sijaitsevalle Haka pks Oy:n malliseinälle (Kuva 10). Mittausten ajankohta on 24.3 klo 00:01-30.3 klo 23:59. Malliseinä koostuu neljästä alumiini-lasiverhoillusta osasta sekä kolmesta erikokoisista pystyalumiinikotelosta ja yhdestä vaaka-alumiinikotelosta kuvien 10 ja 11 mukaisesti. Malliseinän suunta on länteen päin, ja aurinko alkaa paistamaan siihen vasta klo 13:00 maissa.



KUVA 10. Malliseinä

Malliseinän alumiini-lasiverhoilluista osista ensimmäinen L1, kolmas L3 ja neljäs L4 ovat tuuletettuja (kuva 11). Toinen alumiini-lasiverhoiltu osa, L2, on tuulettumaton. Malliseinän L1-osaan suoritetaan paine-ero- ja kosteusmittaukset sekä suurin osa lämpötilamittauksista. Kuvassa 11 esitetyissä L1...L4 kaksoisjulkisi-

vun ulompi vaippa on alumiini-lasirakenteinen ja A1...A4 ulompi vaippa on alumiinikotelo. Kuvissa 8 ja 9 esitetyt rakenteen toimintatavat pätevät alumiini-lasirakenteisissa osissa.



KUVA 11. Malliseinän jako (naamakuva)

Malliseinän mittaukset suoritetaan Haka pks Oy:n mittareilla. Paine-ero-, kosteus- sekä lämpötilamittaukset suoritetaan MIRAN DLS langattomalla loggerijärjestelmällä. Järjestelmä on suunniteltu erilaisten suureiden mittaamiseen ja mitausten seurantaan. Järjestelmä koostuu keskusyksiköstä (kuva 12) ja erilaisista lähettimistä, joilla on mallista riippuen erilaiset anturit. Auringon säteilymäärän mittauksissa käytetään AMP SOLAR-100 aurinkoenergiamittari.

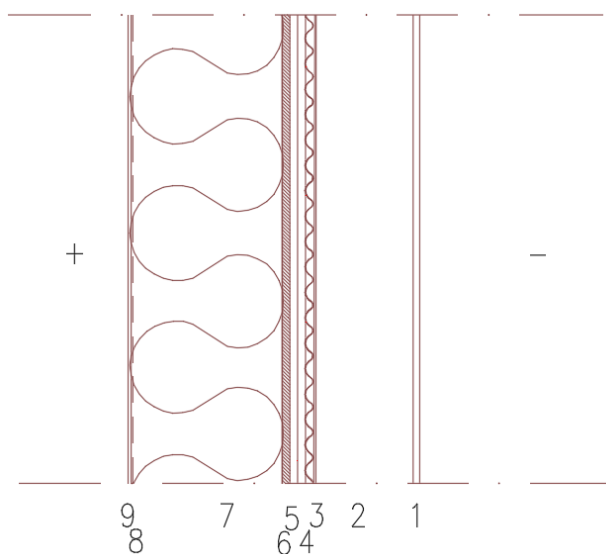
Mittausten aikana loggerijärjestelmän kanssa käytetään pilvipalvelua. Tällöin keskusyksikkö lähettää edelleen lähettimiltä saamansa ja tallentamansa mittausdatan GSM/GPRS-yhteyden välityksellä suoraan pilvipalveluun. Näin lämpötila-, paine- ja kosteusmittausten tulosten seuranta suoritetaan etänä. Järjestelmän keskusyksikköön on mahdollista kytkeä maksimissaan 16 lähetintä samaan aikaan. Opinnäytetyön mittauksia varten keskusyksikköön kytketään kymmenen lähetintä, joista kuusi ovat termoparilähtimiä, kaksi paine-erolähetintä ja kaksi rakennekosteuslähetintä. Mittausväliksi asetetaan 10 sekuntia. Kaikki opinnäytetyössä käytetyt mittarit ovat CE-merkittyjä.



KUVA 12. MIRAN DLS APw-keskusyksikkö

4.1 Malliseinän rakenne

Helsingissä sijaitseva Haka pks Oy:n malliseinä on noin 8,3 m leveä ja 5,8 m korkea. Malliseinän sisempi vaippa on peltiverhoiltua termoelementtiä ja ulompi vaippa on osittain listallista alumiini-lasijärjestelmää ja osittain alumiinikoteloä (kuvat 10 ja 11). Seinän taakse rakennetaan uretaanipaneeleista lämmintä tilaa, jotta tilanne vastaa mahdollisimman paljon oikean rakennuksen tilannetta. Malliseinä on leveyssuunnassa jaettu neljään alumiini-lasirakenteiseen osaan, joiden välissä on kolme kotelo-osaa (kuva 11). Malliseinän rakennetyyppi alumiini-lasi-verhouksen umpiosan kohdalla on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Malliseinän umpiosan rakennetyyppi.

1. alumiini-lasi-järjestelmä sekä alumiinikotelot
2. välitila
3. pelti, sileä
4. profiilipelti
5. tuuletusrako + vaakakoolaus k600
6. tuulensuoja
7. termoelementti
8. höyrynsulkumuovi
9. sinkitty pelti

Julkisivun lasi on karkaistu ja osittain silkkipainettu sisäpinnassa. Karkaistu lasi on kirkas puuikkunoiden kohdalta ja silkkipainettu peltien kohdalta. Silkkipainomenetelmässä kuvat tulostetaan suoraan lasille ja tämän jälkeen lasia karkaistaan. Silkkipainolla on mahdollista vaikuttaa paitsi lasin ulkonäköön myös lasin valonläpäisevyyteen. Silkkipainetut kuviot eivät aiheuta tavallista suurempaa lämmön absorboitumista lasiin, jos kuvioihin valitaan heijastavaa, eli vaaleaa maalia (kappale 3.1). Malliseinän lasin silkkipainon kuvio on tumma, tasaisesti jakautunut ja täysin peittävä. Malliseinän silkkipainetun lasin osalta silkkipaino peittää puolet lasin alasta

Malliseinän kaksoisjulkisivun lasituslistat, kotelot, pellit ja säleiköt ovat alumiinisia. Kotelot ovat 5 mm paksut ja erikoispulverilla. Alumiinin suuren lämpölaajenemiskertoimen vuoksi alumiinikoteloitten kiinnityksessä on huomioitu lämpöliikkeet jättämällä 8 mm liikevaraa vaakasuuntaan ja 10 mm pystysuuntaan. Kaksoisjulkisivun lasin takana olevat pellit ovat HIARC pinnoitetut (kappale 3.1) alumiiniset 1,2 mm paksut sileät pellit. Malliseinän ensimmäisen ja toisen lasiosan takana olevat pellit ovat väriltään RR41, kolmas on RR20 ja neljäs on RR45 (kuva 14). Peltien pinnoitteiden värien emissiviteetti-arvot löytyvät taulukosta 2. Kaikki julkisivussa käytettyjen kiinnikkeiden materiaalit ovat joko alumiini tai ruostumaton teräs.



KUVA 14. Malliseinän peltien HIARC värimallit.

TAULUKKO 2. Peltien värien emissiviteetit

Väri	Emissiviteetin arvo
RR20	0,72
RR41	0,24
RR45	0,11

Malliseinän jokaisen julkisivulasin takana on puuikkuna. Malliseinän puuikkunat ovat tyypiltään MSEA-ikkunoita ja ne ovat kiinnittytyjä suoraan kantavaan termorankaan. Ikkunoissa on käytetty kaksikerroksisia, 2k eristyslasipaketteja, joiden sisempi lasi on laminoitu. Puuikkunoiden ulkopinnat ovat alumiinilla pinnoitetut ja ikkunapellit ovat PVDF-pinnoitetut.

Malliseinän ensimmäisen alumiini-lasiverhoillun osan (L 1) paine-eron mittauksia varten rakennetaan mittausten ajaksi puurakenteinen räystäs. Räystään ideana on pakottaa tuuletusvälistä tuleva ilma kääntymään. Räystäs ei ole suunniteltu hidastamaan välitilasta tuleva ilma. Toisen alumiini-lasiverhoillun osan (L 2) tuuletusvälistä tehdään tuulettumaton. Tuuletusväli suljetaan ikkunan alatason kohdalta (kuva 15) ja julkisivulasin päältä styroksilla ja teipillä sekä sivuilta teipillä.



KUVA 15. Malliseinän tuulettumattoman välin sulkuriima.

4.2 Mittausolosuhteet

Opinnäytetyön kokeellisen osion seinä sijaitsee Helsingin läntisessä kantakaupungissa merenrannan lähellä. Seinä tukeutuu sivureunoiltaan betonisen ”kehän” päälle, joka pitää seinän noin puolen metrin korkeudella maan pinnalta. Malliseinän, sen takana rakennetun lämpimän huoneen sekä sitä tukevan teräskehän sadesuojana toimii suojapeite (pressu).

Osa malliseinän tukirungosta on julkisivun edessä ja sivuilla. Seinän edessä on pieni ylämäki, jonka päällä on kahden kerroksen korkeat talot sekä iso puu vasemmalla puolella. Tukirunko, talot ja puu aiheuttavat varjoa julkisivulla.

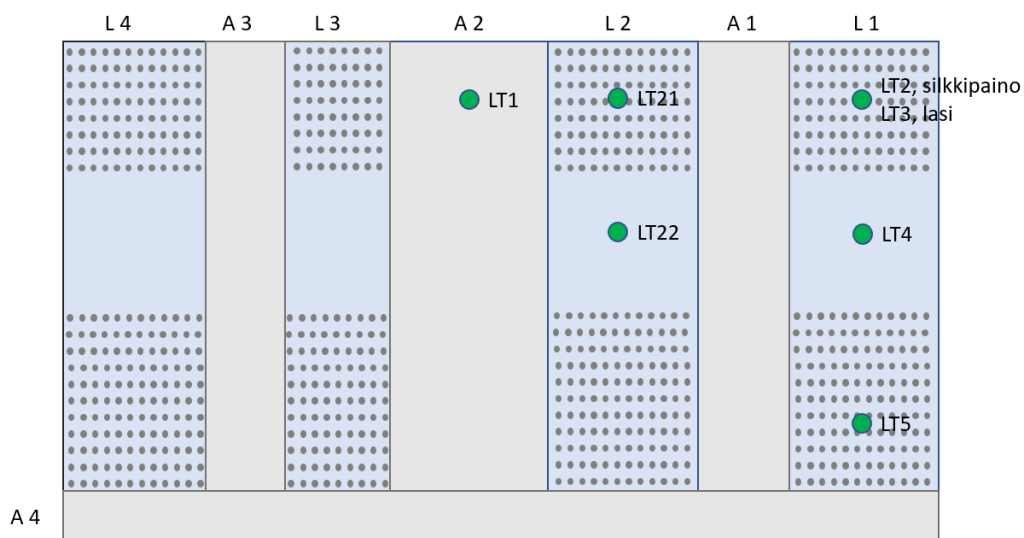
Mittausten ajankohta on 24.3. klo 00:01 ... 31.3. klo 23:57. Mittaukset kestävät yhden viikon, koska aurinko ei paista tarpeeksi monena päivänä maaliskuun aikana eikä mittauksia voida venyttää huhtikuulle. Malliseinä on seissyt paikallaan jo jonkin aikaa, joten sen materiaalien lämpötilat ovat jo muokkautuneet sään mukaan. Seinän mittarit ja lämpimän puolen lämmittimet viedään paikalleen noin kaksi viikkoa ennen mittausten alkua. Mittauspäivinä öiden lämpötilat liikkuvat -5...2°C välillä, ulkoilman tuulen keskimääräinen nopeus on noin 3...7 m/s yöstä

riippuen ja ilman suhteellinen kosteus vaihtelee 70...90 RH% välillä. Päivisin ilman lämpötilat liikkuvat päivästä riippuen 2...8 °C välillä. Ulkoilman keskimääräinen tuulen nopeus vaihtelee päivän ja kellonajan mukaan 3...8 m/s välillä ja suhteellinen kosteus 35...98 RH% välillä. Sadetta tulee 23. ja 31.3 päivien aikana. Mittauspäivistä 26.3. päivän ulkoilman suhteellinen kosteus on pienin, noin 35 RH%.

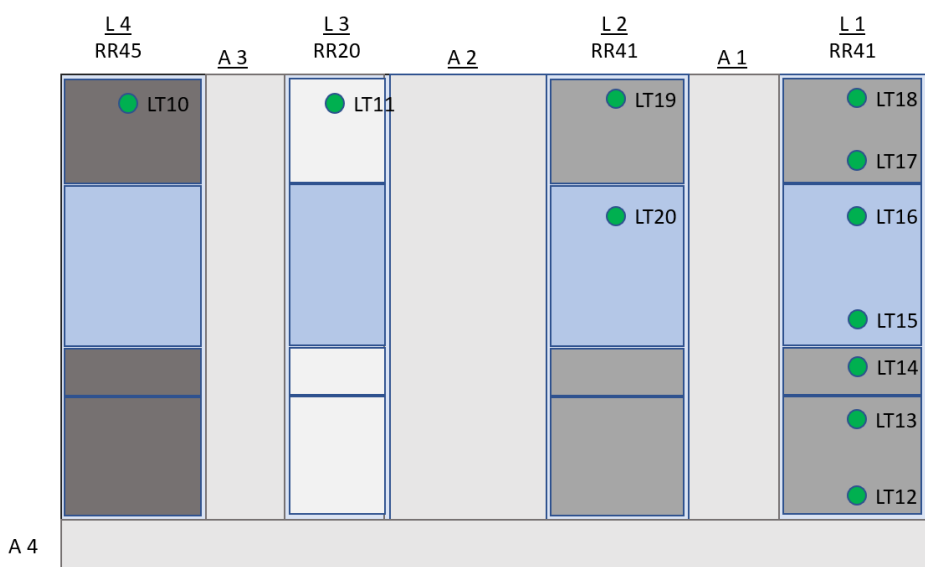
4.3 Malliseinän mittaukset

4.3.1 Lämpömittaukset

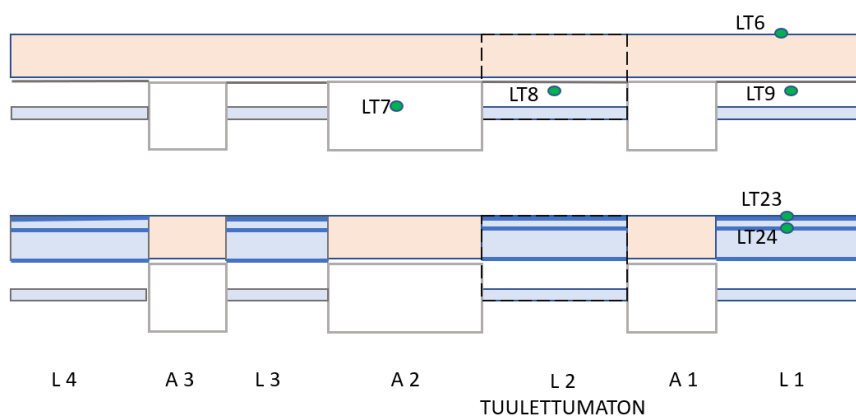
Opinnäytetyön lämpötilamittauksilla halutaan selvittää mallikappaleen eri materiaalien ja toimintamallien vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötiloihin. Lämpötilamittauksissa mitataan 24 seinäkohdan lämpötilat (liite 1). Osa mittauspisteistä ovat seinän materiaalien pinnoista ja osa ulkovaipan ja sisävaipan välisestä tilasta. Kuvissa 16...18 esitetään lämpötilamittausten mittauspaikat malliseinällä edestäpäin (kuvat 16 ja 17) ja ylhäältäpäin katsottuna (LT17). Kuvasta 16 nähdään malliseinän ulomman vaipan materiaalien ulkopintojen lämpötila-anturit. Kuvassa 17 esitetään malliseinän verhouslasin takana olevien ikkunoiden (vaalean siniset) ja peltien (väri RR41, RR20 ja RR45) lämpötilamittausten paikat. Kuvassa 18 näytetään malliseinän ikkunoita korkeammalla olevien vaippojen välisen tilan, alumiinikotelon ilman ja sisäpellin lämpötila-anturit sekä ikkunoiden korkeudella L1 osan ikkunan mittauspaikat.



KUVA 16. Lämpötilamittausten (LT) mittauspaikat, verhouslasi ja alumiinikotelot



KUVA 17. Lämpötilamittausten (LT) mittauspaikat, ikkunat ja pellit

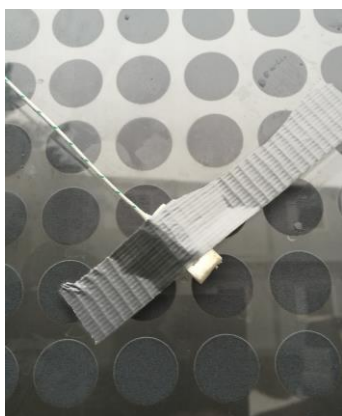


KUVA 18. Lämpötilamittausten (LT) mittauspaikat, ikkunat, välitilat ja sisäpelti

Lämpötilamittausten tuloksien avulla halutaan verrata aurinkoisena päivänä saman seinäosan eri rakenneosien lämpötilat, eri väristen peltien (kuva 14) lämpötilat, suljetun ja avoimen seinäosan välisen lämpötilaerot sekä alumiini-lasiverhoillun osan ja alumiinikotelon väliset lämpötilaerot. Näiden lisäksi halutaan verrata pakkasyönä avoimen ja suljetun toimintamallin lämpötilaerot.

Lämpötilan mittauksissa käytetään MIRAN DLS EP.4TC-K -termoparilähettä kuusi kappaletta. Jokaiseen termoparilähettimessä on mahdollista kytkeä neljä anturia kerralla. Lähettimet toimivat paristoilla, joiden kesto on 2...5 vuotta.

Mittaukset suoritetaan lasikuituvahvistetuilla termoparikaapeleilla. Anturit ovat viisi metriä pitkät ja halkaisijaltaan 1+1 mm paksut. Pintalämpötilojen mittauksia varten lanka painetaan mitattavaan pintaan kiinni pienellä styroksipalalla ja teipillä kuvan 19 mukaisesti. Kyseisillä termopariantureilla pystytään mittaamaan -300...+1370 °C ja niiden mittaustarkkuus on $\pm 0,01$ °C.



KUVA 19. Lämpötilamittausanturi LT13 teipattu lasin pintaan.

4.3.2 Auringon säteilymäärän mittaus

Kaksoisjulkisivuun kohdistuvan auringon säteilyn määrään vaikuttaa vahvasti aurinkoisten tuntien määrä, pilvisuus sekä julkisivun suunta. Koska seinän julkisivu on suurin piirtein länteen päin, siihen ei paista aurinkoa aamupäivästä. Seinälle tulevan varjon takia seinän ikkunoiden alareunasta alas ei paista aurinkoa enää noin kello 15-16 jälkeen. Tästä johtuen optimaalinen mittausaika on noin kello 13-15.

Seinälle tulevan auringon säteily määrän selvittämisessä käytetään AMP SOLAR-100 aurinkoenergiamittari. Mittauslaite mittaa auringon säteily määrää $2\,000\text{ W/m}^2$ asti. Mittari ilmoittaa tulokset sekä yksikössä W/m^2 että $\text{BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ ja sen mittaustarkkuus on $\pm 10\text{ W/m}^2$. Mittauslaite mittaa lukemat on 0,25 sekunnin välein. Poikkeuksena muihin mittareihin, säteilymittari ei pysty tallentamaan mitattua dataa. Tuloksia varten on käytävä malliseinällä mitaamassa lukemat aurinkoisina päivinä. Säteilymittaukset suoritetaan julkisivun suuntaisesti kuvan 20 mukaisesti, jotta saadaan seinälle tulevan säteilyn voimakkuus.

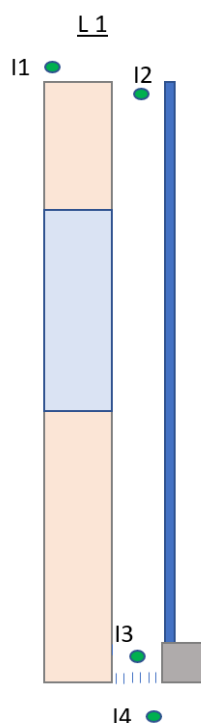


KUVA 20. Seinän alumiinikotelon pinnalle tulevan säteily määrän mittaus AMP SOLAR-100 aurinkoenergiamittarilla.

4.3.3 Ilmanpainemittaukset

Kaksoisjulkisivun välitilan paine-erot aiheuttavat välitilaan ilmvirtausta. Välitilan paine-erot voidaan jakaa kolmeen osaan: ritilän aiheuttama paine-ero seinän alaosassa (pisteet I3 ja I4), räystäään aiheuttama painehäviö seinän yläosassa (pisteet I1 ja I2) sekä seinän välitilan ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta ja välitilan korkeudesta johtuva painemuutos (yhtälö 1). Kuvasta 21 nähdään malliseinän paine-erojen mittauspaiikat, jotka sijoittuvat L1 osaan. Tarkemmat mittauspaiikat löytyvät liitteestä 1. Kuvassa 21 katsotaan seinäelementtiä sivusta.

Opinnäytetyön ilmanpainemittauksissa mitataan ritilän ja räystäään aiheuttamat paine-erot MIRAN DLS IAQ.THB+PB -lähettimillä. Lähettimeen on mahdollista kytkeä kaksi paineletkua kerralla, jolloin se ilmoittaa suoraan kytkettyjen paineletkujen väliset paine-erot. Lähettimet toimivat paristoilla, joiden kesto on 2...5 vuotta. Lähettimien mitta alue on ± 500 Pa ja mittaustarkkuus on ± 3 % lukemasta eli 0-pistetarkkuus on $\pm 0,1$ Pa. Paineletkun pituus on 2 m.



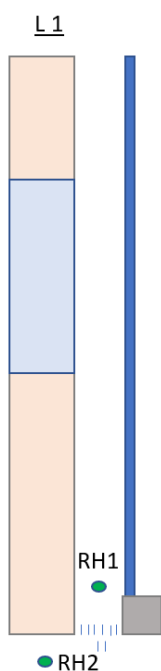
KUVA 21. Ilmanpainemittauksen (I) mittaushaikat (sivusta katsottuna).

4.3.4 Kosteusmittaukset

Ilmankosteus vaikuttaa ilman lämpötilaan siten, että mitä kosteampi ilma on, sen korkeammat ilman lämpötilat ovat. Kosteuden ja lämpötilan riippuvuus esitetään kuvaajassa 1 (kappale 3.4). Mittaukset suoritetaan maaliskuun viimeisellä viikolla, kun lumet sulavat ja sataa suhteellisen usein, joten ilman suhteellinen kosteus on toisinaan korkea. Opinnäytetyön kosteusmittauksissa mitataan sekä ulkoilman suhteellinen kosteus (RH2) ennen kuin ilma pääsee ritilän kautta malliseinän välitilaan että ritilän kautta välitilaan päässyt ilman suhteellinen kosteus (RH1). Kuvasta 22 nähdään malliseinän suhteellisen kosteuden mittaushaikat,

jotka sijoittuvat L1 osaan. Suhteellisen kosteuden tarkemmat mittauspajat löytyvät liitteestä 1. Kuvassa 22 katsotaan seinäelementtiä sivusta.

Opinnäytetyön kosteusmittaukset suoritetaan MIRAN DLS IAQ.THB+eTH-HMP 110 -rakennekosteuslähettimillä. Jokaiseen lähettimeen on mahdollista kytkeä ai-noastaan yksi HMP110-kosteusanturi kerralla. Kolme metriä pitkä anturi mittaa sekä lämpötilaa että rakennekosteutta. Lähettimet toimivat paristoilla, joiden kesto on 2...5 vuotta. Lähettimien mittausalue on $-40...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus $0...100\text{ \%RH}$. Mittalaitteen mittaustarkkuus on $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $\pm 1,5\text{ \%}$ suhteellisen kosteuden ollessa $0...90\text{ \%RH}$ sekä $\pm 2,5\text{ \%}$ suhteellisen kosteuden ollessa $90...100\text{ \%RH}$.

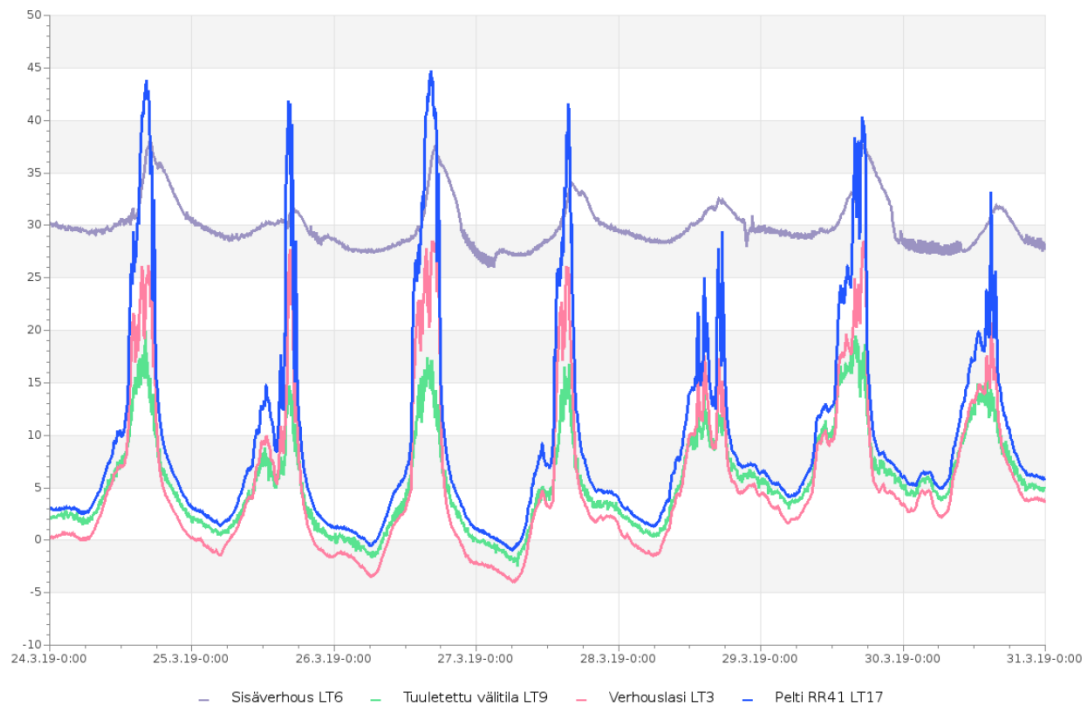


KUVA 22. Kosteusmittausten (RH) mittausantureiden paikat (sivusta katsottuna).

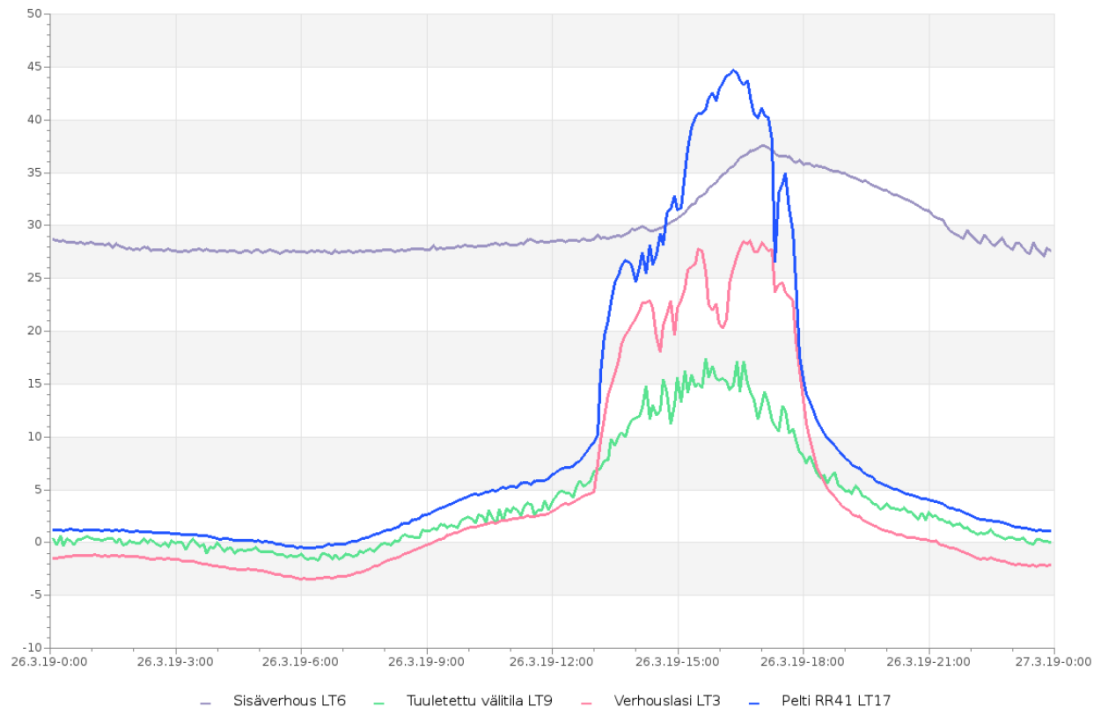
4.4 Mittaustulokset

Opinnäytetyön kokeellisessa osiossa suoritetaan neljä eri mittausta, lämpötila-, paine-, kosteus- ja säteilymäärämittaukset. Mittaukset toteutetaan 24.3.2019... 31.3.2019. Mittauspäivistä valitaan mittaustulosten (kuvaaja 2) perusteella yksi päivä, jota tarkastellaan tarkemmin. Kuvaajista 2...15 nähdään lämpötilamittaus-

ten tulokset. Käyrät ovat lämpötilojen arvo ajan suhteen, jolloin lämpötilat ilmoitetaan celsius asteina. Kuvaajassa 2 esitetään L1-osan lämpötiloja koko mittausajalta. Kuvaajasta nähdään, että monena päivänä lämpötilat nousevat suhteellisen korkeiksi. Valitaan tarkemmin tarkasteltavaksi päiväksi 26.3.2019, koska sinä päivänä lämpötilat ovat korkeimmillaan ja pilviä on sinä päivänä vähiten. Kuvaajissa esiintyvät lyhenteet up = ulkopinta, sp=sisäpinta ja tm=tuulettumaton.

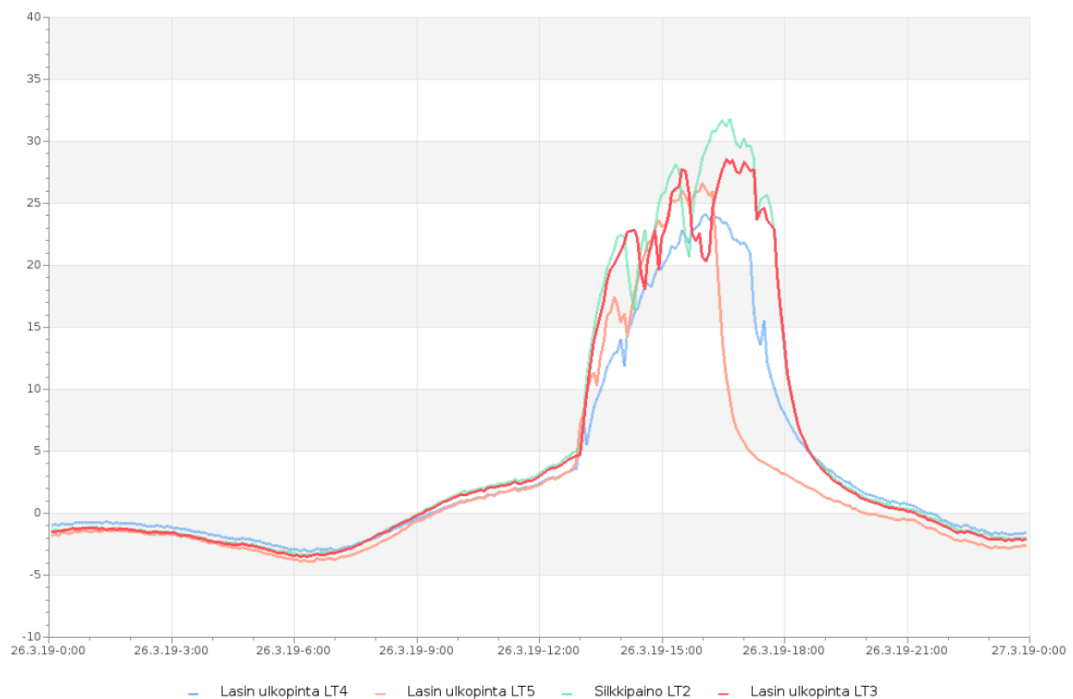


KUVAAJA 2. L1 osan lämpötilat seinän läpi koko mittausajalta.



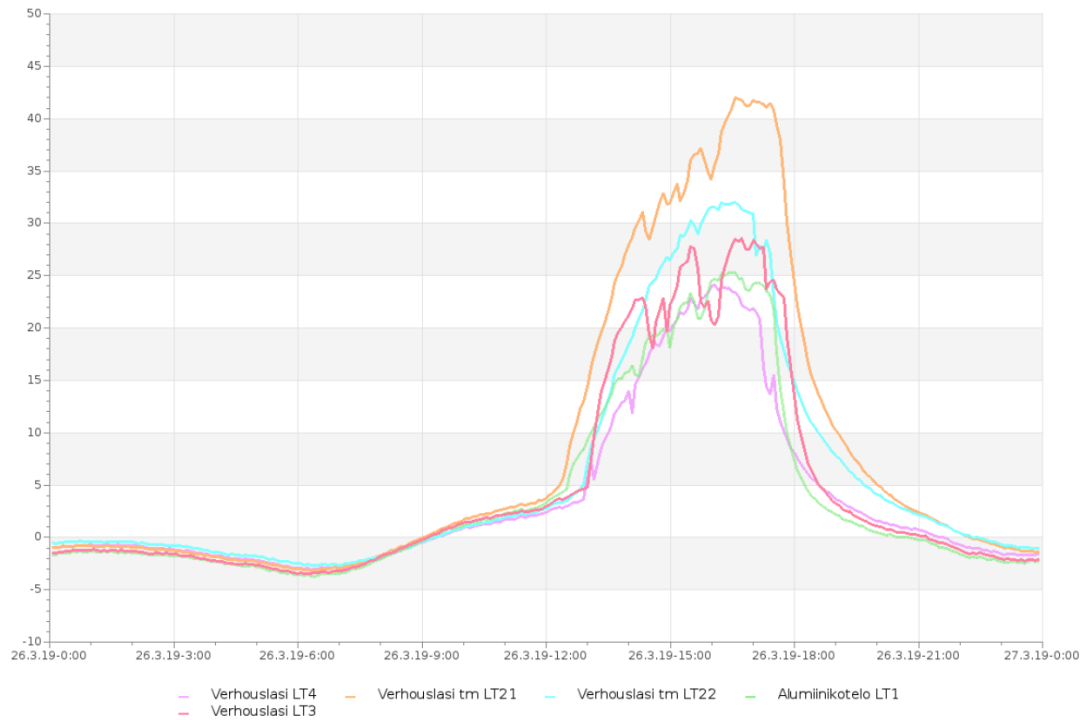
KUVAAJA 3. L1 osan lämpötilat seinän läpi tarkasteltavalta päivältä.

Kuvaajasta 4 nähdään saman seinäosan, L1 osan verhouslasin lämpötilat eri korkeudella. Silkkipaino on lasin sisäpuolella ja sen takia sen anturi on myös sisäpuolella, kun taas muut kuvaajan anturit ovat ulkopuolella kirkkaan lasin kohdalla. Mittauspisteiden LT2, LT3 ja LT5 takana on RR41 pelti.



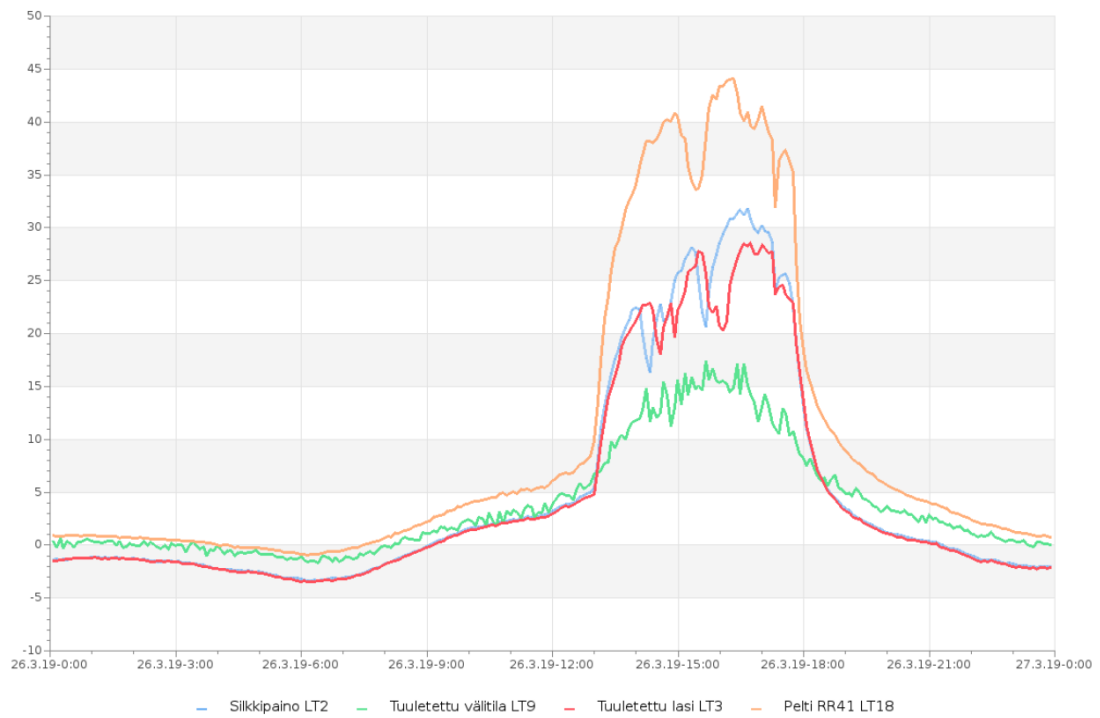
KUVAAJA 4. L1 osan verhouslasin lämpötilat tarkasteltavalta päivältä.

Kuvaajassa 5 verrataan L1, L2 ja A2 osien ulkopintojen lämpötiloja. Lämpötila-anturit LT3, LT21 ja LT1 ovat keskenään samalla korkeudella ja LT4 ja LT22 ovat samalla korkeudella. L2 osan takana on tuulettumaton välitila. L1 ja A2 osien takana on tuuletettu välitila.

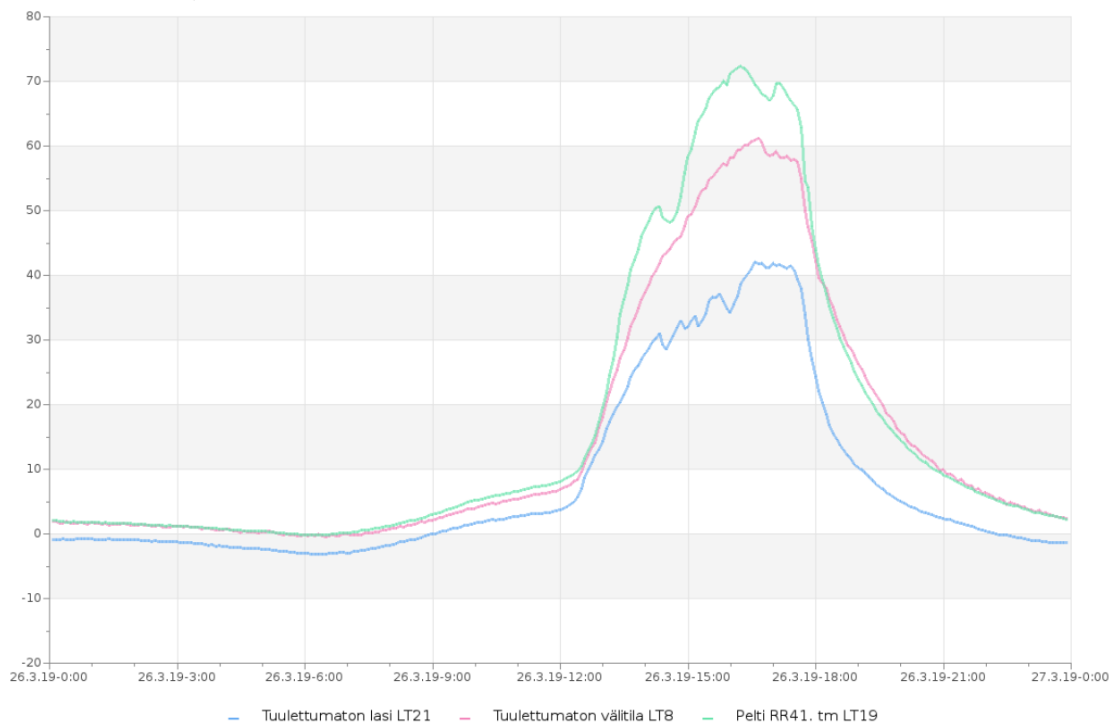


KUVAAJA 5. L1, L2 ja A2 ulkopintojen lämpötilat tarkasteltavalta päivältä.

Kuvaajassa 6 esitetään L1 osan lämpötilat. Anturit mittaavat osan eri rakenteiden lämpötilat suurin piirtein samalla korkeudella. Kuvaajassa 7 esitetään seinäosan L2 vastaavien rakenteiden lämpötilat.



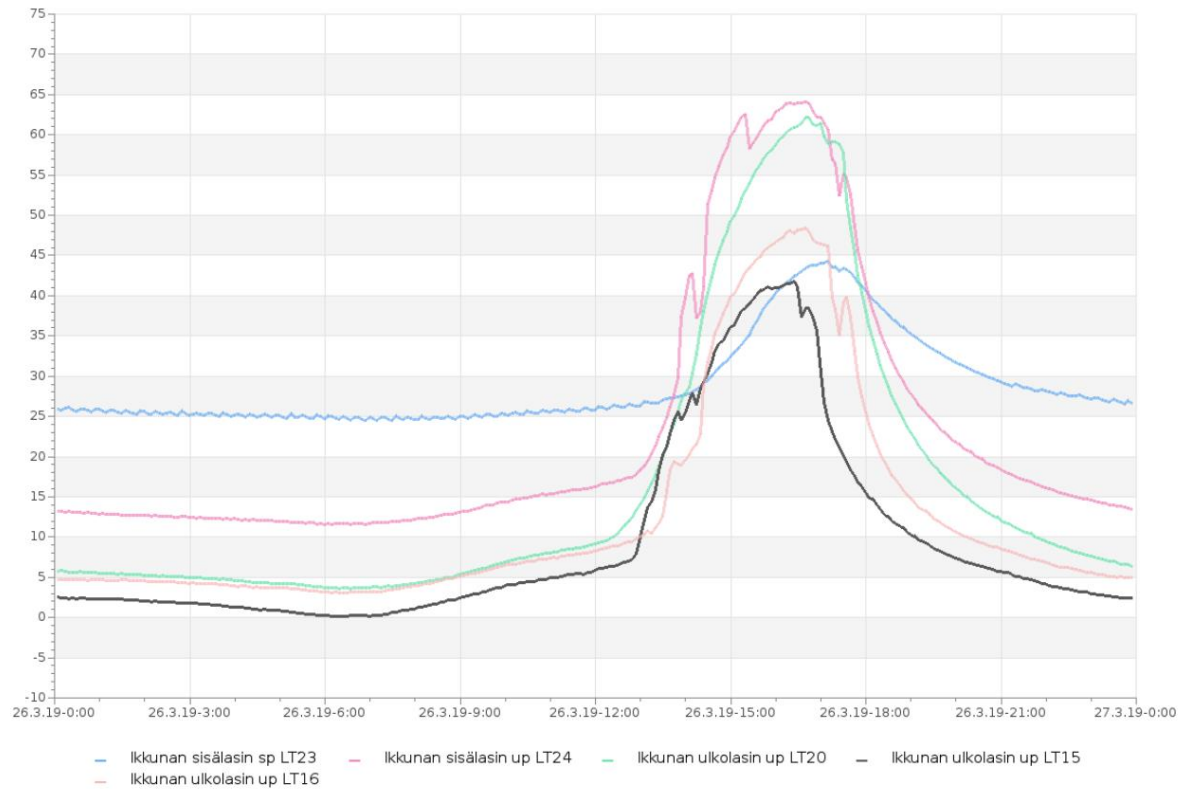
KUVAAJA 6. L1 osan rakenteiden lämpötiloja tarkasteltavalta päivältä.



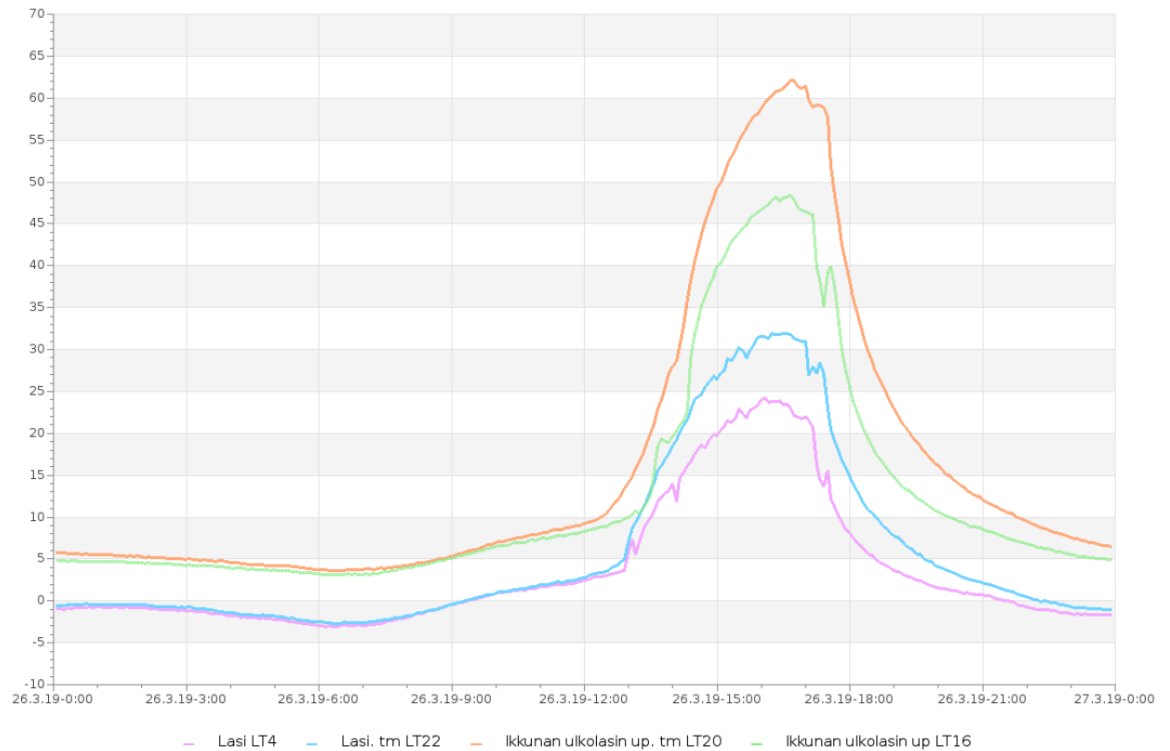
KUVAAJA 7. L2 osan rakenteiden lämpötiloja tarkasteltavalta päivältä.

Kuvaajasta 8 nähdään sekä L1 osan ikkunan eri pintojen lämpötilat että L2 osan ikkunan ulkopinnan lämpötila. LT20 on L2 osan eli tuulettumattoman osan ikku-

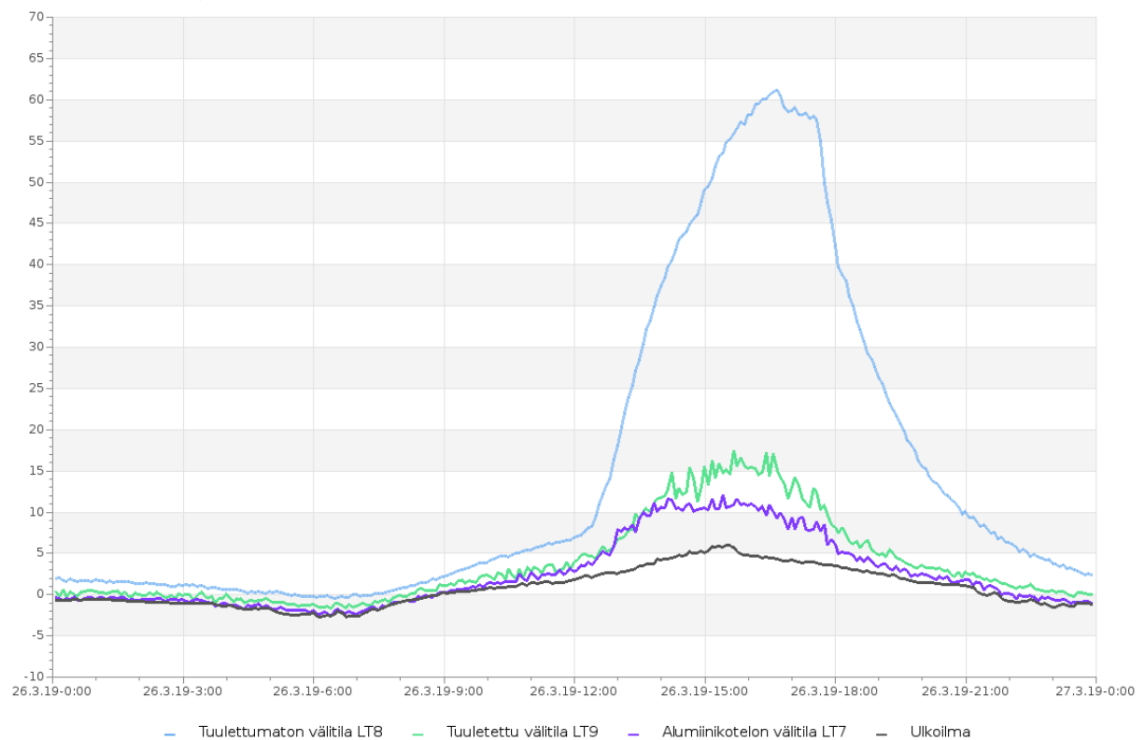
nan ulkolasin lämpötila. LT24 on L1 osan ikkunan auringonsuojalasin pinnan lämpötila. Kuvaajassa 9 verrataan L1 ja L2 osien karkaistujen verhouslasien ja ikkunoiden ulkopintojen lämpötilat. Kuvaajassa 10 verrataan L1, L2 ja A2 osien välitilojen lämpötilat. Osien L1 ja L2 ero on ainoastaan välitilan tuulettuvuus. Osien L1 ja L2 välitilojen lämpötilaa mittaavat anturit sijoittuvat yläosien silkkipainettujen lasien ja peltien väliin.



KUVAAJA 8. L1 ja L2 osien ikkunoiden pintalämpötilat tarkasteltavalta päivästä.

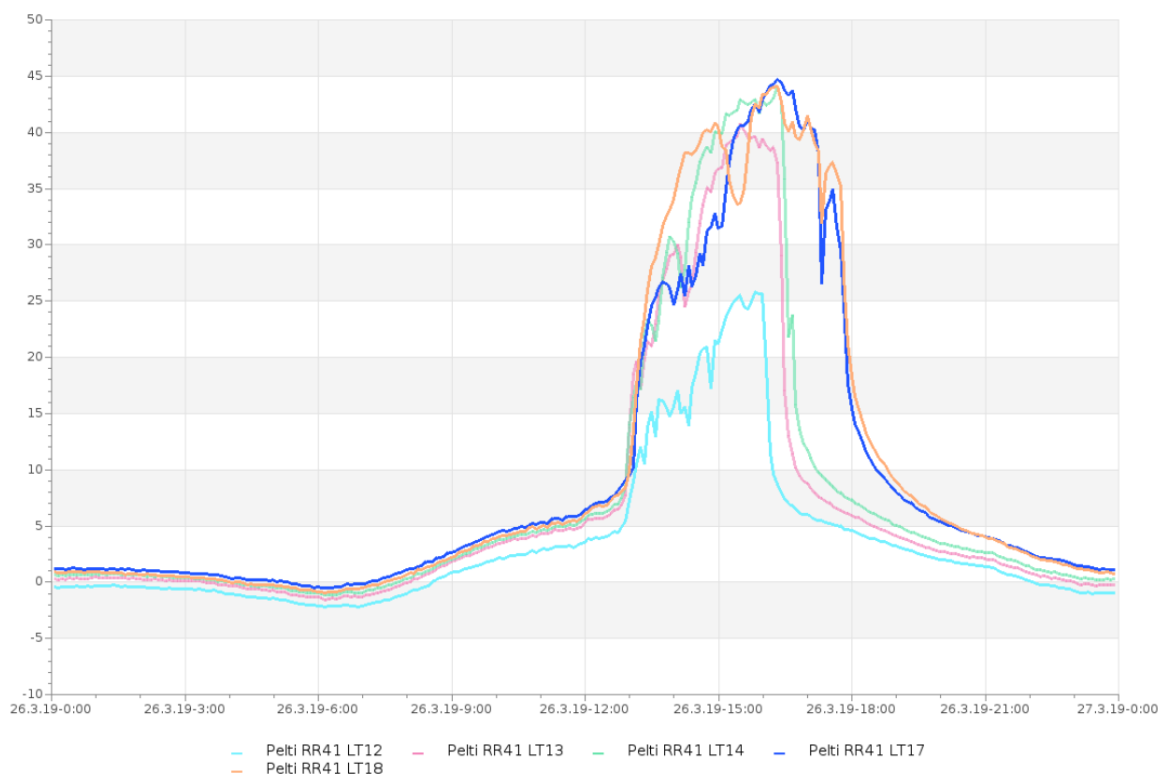


KUVAAJA 9. L1 ja L2 osien verhouslasien ja ikkunoiden pintalämpötilat tarkasteltavalta päivästä.

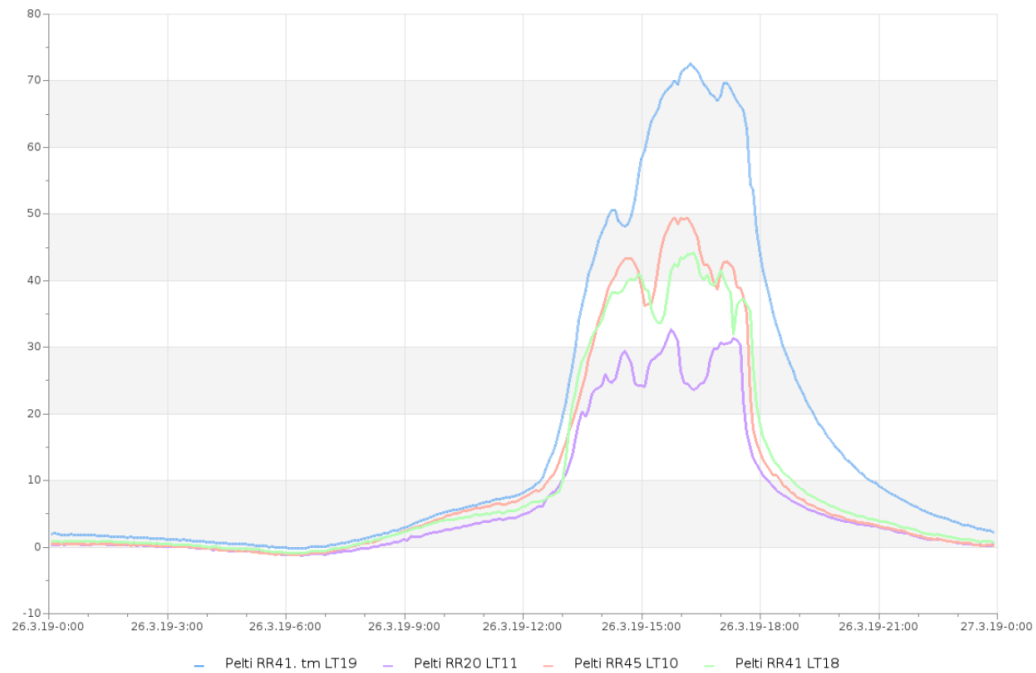


KUVAAJA 10. L1, L2 ja A2 osien välitilojen lämpötilat tarkasteltavalta päivästä.

Kuvaajassa 11 verrataan osan L1 peltien lämpötilat. L1 osan pellit ovat samanväriset, RR41. Kuvaajassa 12 puolestaan verrataan erilaiset pellit, jotka ovat samalla korkeudella. LT18 on tuuletetun osan L1 pelti ja väriltään RR41. LT19 on tuulettumattoman L2 osan pelti ja väriltään RR41, eli samanvärisen kuin L1 osan pellit. LT11 on tuuletetun L3 osan pelti ja väriltään RR20 eli valkoinen. LT45 on tuuletetun L4 osan pelti ja väriltään RR45 eli peltien väreistä tummin.

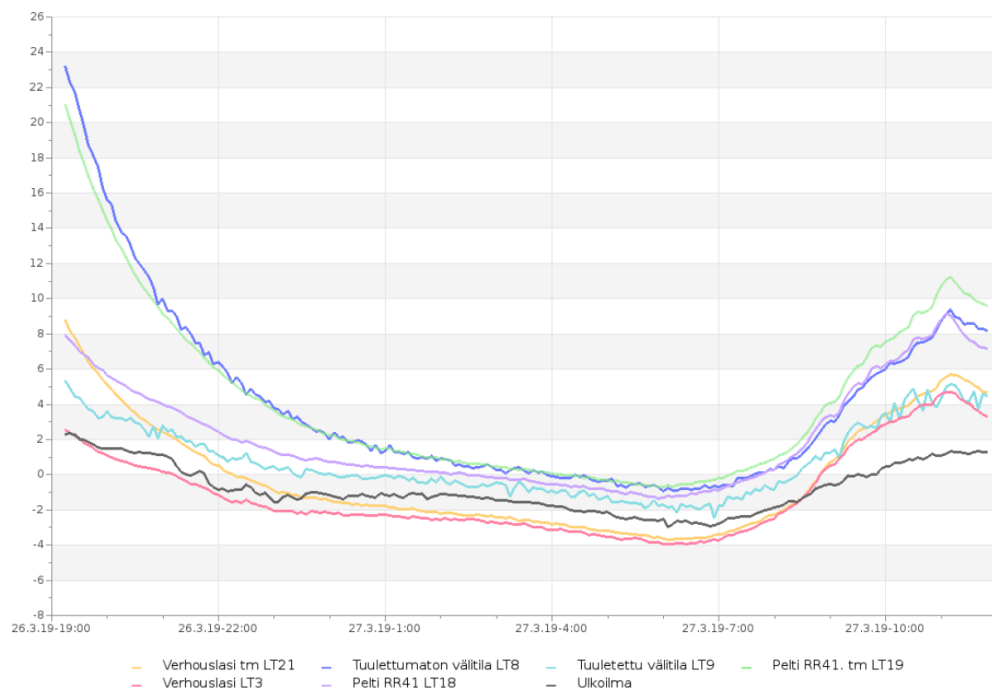


KUVAAJA 11. L1 osan RR41 peltien lämpötilat tarkasteltavalta päivältä. Vertailuna L1 osan peltien sijainti.



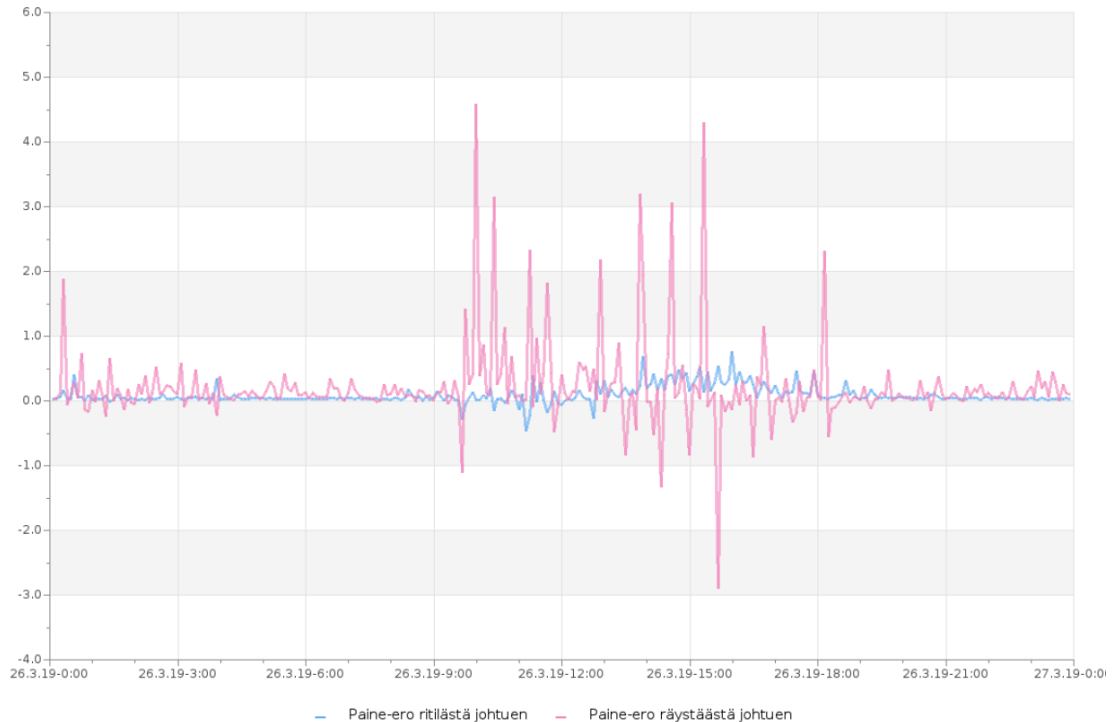
KUVAAJA 12. Eri alumiini-lasiosien peltien lämpötilat tarkasteltavalta päivästä. Vertailuna peltivärin pintalämpötila.

Lämpötilojen vertailun vuoksi tarkastellaan kuvaajassa 13 yhden pakkasyön aikaiset tuuletetun (L1) ja tuulettuman (L2) osan lämpötiloja. Kuvaajassa esitetään 26.3 ja 27.3 välisen yön lämpötilat. Kuvaajassa verrataan ulkoilman, verhoukasin, välitilan ilman sekä peltien lämpötiloja.



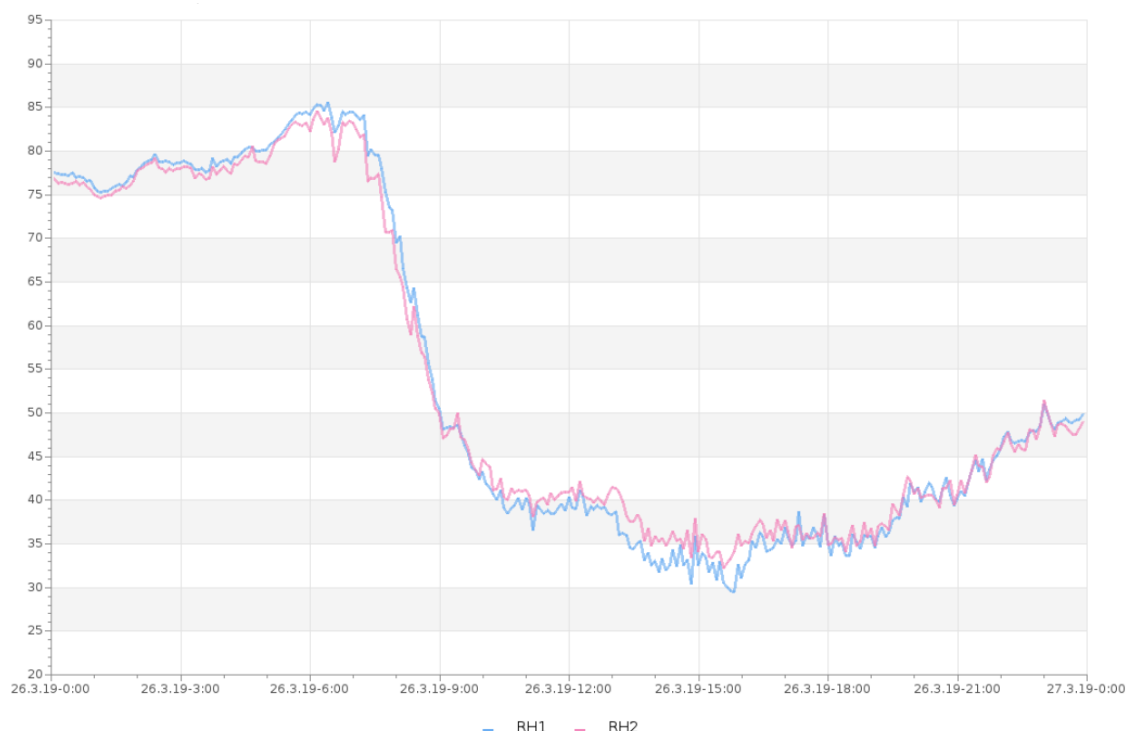
KUVAAJA 13. Pakkasyön lämpötilat malliseinässä.

Kuvaajassa 14 esitetään L1 osan ritilän ja räystäään aiheuttamat paine-erot. Kuvaajan pystyakseli ilmoittaa paine-eron yksikössä [Pa] ja vaaka-akseli aika tunteina. Kuvaaja on samalta tarkastelupäivältä kuin lämpötilakuvaajat myös.



KUVAAJA 14. L1 osan paine-eron käyrät tarkasteltavalta päivältä.

Kuvaajassa 15 esitetään suhteellinen kosteus ennen L1 osan ritilää ja sen jälkeen. Kuvaajan RH1 kuvaa suhteellista kosteutta L1 osan välitilassa ja RH2 kuvaa ulkoilman suhteellista kosteutta juuri ennen sen pääsyä ritilään. Kuvaajan pystyakseli ilmoittaa ilman suhteellinen kosteus prosentteina ja vaaka-akseli aika tunteina. Kuvaaja on samalta tarkastelupäivältä kuin lämpötilakuvaajat myös, eli 26.3.2019.



KUVAAJA 15. L1 osan ja ulkoilman suhteellisen kosteuden käyrät tarkasteltavalta päivästä.

Taulukossa 3 esitetään säteilymittausten tulokset. Mittaukset suoritetaan seinän lasien suuntaisesti. Säteilymäärän yksikkö on W/m^2 . Mielenkiinnon vuoksi mitataan myös ikkunan läpi päässyt säteilymäärä.

TAULUKKO 3. Säteilymittaukset [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Kellonaika	Seinälle tuleva säteily	Ikkunan läpi päässyt säteily
13:30	635	170
14:00	725	199
14:30	784	
15:00	860	

4.5 Tulosten analyysi

Mittaukset osuvat maaliskuun viimeiselle viikolle 24.3.2019...31.3.2019, jolloin aurinko paistaa monena päivänä. Tarkempaa lämpötilatarkastelua varten valitaan tarkasteltavaksi päiväksi 26.3.2019 ja sen jälkeinen yö, koska sinä päivänä lämpötilat näyttävät olevan korkeimmillaan. Seinän takana oleva tila lämmitetään koko mittausten ajan.

Verhouslasien ulkopintojen käyrien tarkastelussa ensimmäisenä huomataan tuulettumattoman seinäosan eli L2 osan verhouslasin ulkopinnan korkeat lämpötilat. Korkein lämpötila löytyy käyrältä LT21 (kuvaaja 5), joka on tuulettumattoman osan silkipainetun lasin lämpötila. Myös tuuletetun L1 seinäosan samalla korkeudella oleva anturin eli LT3 lämpötila on korkein L1 osan ulkolasin ulkopinnan lämpötiloista. Verhouslasien ulkopintoja verratessa huomataan, että samalla korkeudella olevien LT4 ja LT22 lämpötilaero on noin 8 °C ja LT3 ja LT21 välinen lämpötilaero on noin 10 °C. Kuvaajasta 5 huomataan myös, että LT21 käyrä nousee aikaisemmin kuin saman seinäosan LT22. Tämä sama ilmiö toistuu myös seuraavana päivänä. Syy siihen on todennäköisesti auringon nousun suunta. Aurinko siis nousee kulmassa, jolloin LT21 anturille paistaa aikaisemmin kuin LT22 anturille. Se, että LT3 käyrä ei lähde nousemaan samaan aikaan kuin LT21 johtuu L1 osan viereisen malliseinän tukirungon aiheuttamasta varjosta.

Anturien LT3, LT21 ja LT1 käyrissä esiintyy hyvin suuret hetkelliset lämpötilapiikit (kuvaaja 5). Kyseiset hetkellisesti lämpötilaa laskevat piikit käyrissä arvioidaan johtuvan tuulesta, koska piikit esiintyvät käyrillä kuvaajassa melkein samoissa paikoissa. Se, että yhtä vahvoja piikkejä ei esiinny anturien LT4 ja LT22 käyrissä johtuu anturien korkeudesta. Anturit LT3, LT21 ja LT1 ovat korkeammalla kuin LT4 ja LT2 ja ylhäällä tuuli on voimakkaampi ja pyörteisempi verrattuna keskiseinään tulevaan tuuleen, joka virtaa tasaisemmin.

L1 osan verhouslasien ulkopintojen anturien LT5 ja LT3 lämpötiloihin vaikuttaa hieman lasin sisäpinnan silkipainokuvio. LT4 kohdalla lasin sisäpinnalla ei ole silkipainoa. Saman lasin anturien LT4 ja LT5 lämpötilojen välinen ero on maksi-

missaan noin 5 °C, joka ei vielä aiheuta pahoja lämpöjännityksiä lasilevyssä. Silkkipainon lämpötila näyttää kuitenkin olevan joissakin kohdissa jopa 10 °C korkeampi kuin saman kohdan lasin ulkopinta. Tämä tarkoittaa, että saman lasikappaleen silkkipainon ja kirkkaan lasin välinen lämpötila on jopa 15 °C. Koska malliseinän verhouslasi on karkaistu, tämä lämpötilaero ei vielä ole kriittinen. Malliseinän karkaistun lasin sisäiset lämpötilaerot alkavat olla huolestuttavia vasta noin 30 °C. Float-lasi on puolestaan paljon herkempi lämpötilavaihteluille. Kaikkiin L1 seinäosan laseihin varjostaa jo kello 17...18.

Korkeimmat ikkunan lasin lämpötila-arvot auringonpaisteella ovat anturilla LT24 (kuvaaja 8), joka on auringonsuojapinnan lämpötila. Seinäosan L1 ikkunan lämpötilojen käyrissä on noin kello 15:30 notkahdus, joka johtuu viereisen tukirungon aiheuttamasta varjosta. LT24 mittaaman lasin pinnassa oleva auringonsuojakalvo laskee LT23 lämpötilaa. Tuulettumattoman osan, L2 ikkunan ulkopinnan anturi LT20 korkeat lämpötilat johtuvat sekä seinävaippojen välisestä suljetusta tilasta että lämpimästä takana olevasta ikkunavälistä. L2 osassa ilmavirtaus ei jäähdytä välitilan pintoja, siksi pintojen lämpötilat ovat siinä korkeammat kuin L1.

L1 osan ikkunan ulkolasin ulkopinnan lämpötila-anturin LT16 käyrä (kuvaaja 8) alkaa nousta myöhemmin kuin muut. Tämä sama ilmiö toistui muidenkin mittauspäivien käyrissä. Tämä arvellaan johtuvan ulkolasin vaakaprofiilin aiheuttamasta varjosta, mutta syynä voi myös olla seinän viereisen tukirungon aiheuttama varjo. LT16 ja LT15 välinen lämpötilaero johtuu ikkunan lasien välisen välitilan lämpöliikkeistä. Ikkunan välitilan lämpötila on ylhäällä korkeampi kuin alhaalla ja tästä johtuen LT16 takana oleva ilma lämmittää enemmän kuin LT15 takana oleva ilma. Anturin LT15 käyrä alkaa laskemaan aikaisemmin kuin saman pinnan LT16 anturin käyrä. LT15 alkaa varjostamaan jo noin kello 16:30 kun taas LT6 alkaa varjostamaan noin tunti myöhemmin. Tämä johtuu auringon laskusta.

Peltejä tarkasteltaessa huomataan L1 osan yläpellin anturien LT17 ja LT18 käyrien nousussa suuri ero (kuvaaja11), vaikka onkin kyse samasta pellistä. Ero johtuu viereisen tukirungon aiheuttamasta varjosta. Myös alimman pellin anturien LT12 ja LT13 käyrät ovat erilaiset ja niiden välillä on jopa 15 °C ero. Kyseisten

käyrien ero voi johtua siitä, että LT12 virtaa välitilaan tuleva kylmä ilma. Ilma lämpiää välitilassa vähitellen ja se ehtii jo saapuessaan LT13 olla vähän lämpimämpi. Ero voi myös johtua viereisen tukirungon varjosta. Seinän alla olevaan maahan ei paista aurinkoa, mikä voi aiheuttaa maan säteilevän kylmiä aaltoja ylös seinän välitilaan. Anturit LT13 ja LT14 ovat lähellä toisiaan ja vaikka mittaavatkin eri peltiä, niiden käyrät ovat samanlaiset. Seinällä korkeammalla olevan anturin LT14 käyrä liikkuu korkeammissa lämpötiloissa kuin seinällä matalampi anturin LT13.

Tuulettumattoman tilan L2 pellin anturin LT19 tulokset ovat jopa 27 °C suuremmat kuin muiden samalla korkeudella olevien peltien lämpötilat. Samanväristen peltien LT18 ja LT19 välillä on jopa 27 °C ainoastaan välitilan tuulettuvuudesta johtuen. Hieman tummempi RR45 pellin lämpötilat ovatkin hieman korkeammat kuin RR41 pellin lämpötilat. Valkoisen pellin, RR20 lämpötilat ovat jopa 20 °C matalammat kuin RR41 (vaalean harmaa). Käyrien lämpötiloja laskevat piikit voivat johtua joko varjosta tai pilvistä. Peltejä tarkasteltaessa huomataan myös peltien lämpötilakäyrien liikkuvan samassa suhteessa kuin verhouslasien lämpötilakäyrät. Kuvasta 23 nähdään tukirunkojen aiheuttamat varjot julkisivulle noin kello 14.00



KUVA 23. Seinälle osuva varjo kello 14.00

L2 osan välitilan lämpötila on jopa 45 °C korkeampi kuin L1 lämpötila. Suuri ero LT8 lämpötilassa verrattuna LT7 ja LT9 johtuu L2 tilan tuulettumattomuudesta. Tuulettettujen L1 ja A2 välitilojen välillä on maksimissaan noin 7 °C lämpötilaero. LT7 ja LT9 käyrien ero johtuu välitilojen materiaalien erilaisuudesta ja auringon säteilyn pääsystä välitilaan. Alumiinikotelo ei päästä auringonsäteilyä lävitseen, joten takana olevat materiaalit eivät kuumene yhtä voimakkaasti kuin lasin takana olevat pellit. Välitilojen lämpötilat liikkuvat samassa suhteessa kuin ulkoilma, mikä tarkoittaa sitä, että säteily ei vaikuta välitilojen ilman lämpötilaan voimakkaasti.

Pakkasyön käyriä (kuvaaja 13) tarkasteltaessa huomataan, että lämpötilojen ollessa alhaisimmillaan tuuletetun L1 ja tuulettumattoman L2 osan väliset lämpötilaerot ovat noin 1°C. Kun lämpötilat alkavat nousta noin kello 11:00, myös L1 ja L2 väliset lämpötilaerot nousevat, L2 korkeampi noin 4 °C. Lämpötiloihin vaikuttaa yön tyyneys ja ulkoilman lämpötila. Tarkasteltavan yön tuulen keskimääräinen nopeus on noin 2,5 m/s.

Paine-erojen käyrät ovat hyvin epätasaiset (kuvaaja 14). Räystäään aiheuttama paine-eron kuvaajan piikit ovat paljon isompia kuin ritilän aiheuttama paine-ero. Piikit tarkoittavat sitä, että paine-ero on sinä hetkenä iso. Räystäään paine-eron käyrän isommat piikit johtuvat tuulen aiheuttamasta tilavuuden muutoksesta pressun alla. Piikkien suuruudesta voidaan päätellä, etteivät tuulenpuuskat ole suuria. Ritilän aiheuttama paine-ero on hyvin tasainen yön ja aamun aikana. Päivän aikana molempien käyrien piikit suurenevat.

Suhteellisen kosteuden kuvaajasta (kuvaaja 15) huomataan ulkoilman ja välitilan suhteellisten kosteuksien kulkevan suurimmalta osin käsi kädessä. Suhteellinen kosteus on yön aikana paljon korkeampi kuin päivän aikana. Yön aikana välitilan suhteellinen kosteus on noin yhden prosentin verran korkeampi kuin ulkoilman suhteellinen kosteus, joka johtuu siitä, että välitilan ilman lämpötila on korkeampi kuin ulkoilma. Päivän aikana tilanne muuttuu. Päivällä ulkoilman kosteus on välitilan suhteellista kosteutta korkeampi jopa viidellä prosentilla.

4.6 Mittausten analyysi

Tutkimuksen varsinaiset mittaukset kestävät yhden viikon. Valitun mittausviikon aikana aurinko paistaa melkein joka päivä. Mittausten malliseinän suunnasta ja viereisistä rakennuksista johtuen aurinko paistaa seinän julkisivulle ainoastaan muutama tunti päivässä. Kuten kappaleessa 3.2 todetaan, kaksoisjulkisivun materiaalien lämpötilat riippuvat aurinkoisten tuntien määrästä. Julkisivun lämpötilat nousevat siis korkeammiksi auringon paistaessa pitempään. Koska mittaukset suoritetaan maaliskuun aikana, tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä, kuinka lämpötilat muuttuvat muina vuodenaikoina.

Viereisistä puista, rakennuksista ja seinän omasta tukirungosta aiheutuva varjo osuu malliseinän julkisivulle hetkittäin päivän mittaan. Varjostavien kohteiden aiheuttamat lämpötilaerot seinällä näkyvät selvästi lämpötilamittauksissa. Toisaalta myös oikeiden kohteiden kaksoisjulkisivujen seinille varjostaa, joten mitaustulokset voidaan olettaa vastaavan oikealta kohteelta saatuja tuloksia.

Mittausvälineet ovat opinnäytetyön mittauksille hyvin tarkkoja, ja tulokset on hyvin helppo käsitellä. Tulokset pystytään seuraamaan etänä, joten virheen tai ongelman ilmaantuessa saadaan ajoissa tietää asiasta. Mittauksissa käytetään poikkeuksellisesti ei dataa tallentavaa säteilymittaria, joten seinälle tulevien säteilymäärien tietämistä varten täytyy käydä paikan päällä. Loggaavalla säteilyanturilla olisi saatu mittaustiedot tiheämmin ja koko päivän ajalta.

5 KAKSOISJULKISIVUN LÄMPÖTEKNINEN ANALYYSI

Tässä kappaleessa verrataan malliseinän mittaustuloksista saatuja tietoja (kappale 4.5) teoreettiseen tarkasteluun kaksoisjulkisivun lämpöteknisestä toiminnasta (kappale 3). Kappaleessa käsitellään opinnäytetyön mittaustulosten pohjalta tehdyt johtopäätökset kaksoisjulkisivun lämpöteknisestä toiminnasta ja lisäksi selventävät laskennat saaduista mittaustuloksista.

Lämpötilan liiallinen nousu kaksoisjulkisivun välitilassa saattaa aiheuttaa pinnoitteiden hilseilyä, lasilevyn sisäistä lämpöshokkia, muovien heikentämistä, materiaalien värin muutosta, materiaalien suuret toisistaan poikkeavat lämpöliikkeet sekä sisätilan viilennystarpeen lisäämistä, joka puolestaan nostaa energiakuluja.

Kaksoisjulkisivun lämpökäyttäytymiseen voidaan vaikuttaa muuttamalla esimerkiksi lasin heijastumis- ja absorptio-ominaisuudet, käyttämällä lasiin erilaiset pinnoitteet ja kalvot, käyttämällä vähemmän lämpöä johtavia listoja, muuttamalla välitilan dimensioita, välitilan verhouspeltien pinnoitteiden ominaisuuksilla ja värillä sekä muuttamalla ulko- ja sisäpuoliset varjostavat kohteet.

5.1 Ympäristön vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötiloihin

Auringon säteily vaikuttaa kaksoisjulkisivun materiaalien lämpötiloihin hyvin vahvasti ja siten kaksoisjulkisivun välitilan ilmaan ja kokonaislämpötiloihin. Opinnäytetyön mittauksista nähdään auringon nousun suunnan tärkeä vaikutus kaksoisjulkisivun lähtölämpötilojen jakaumaan. Se, missä suunnassa aurinko alkaa paistamaan kaksoisjulkisivuun vaikuttaa siihen, mihin julkisivun osaan paistaa ensimmäisenä ja mihin varjostaa ja siten lähtölämpötiloihin ja lisäksi siihen, milloin lämpötilat missäkin osassa ja milläkin korkeudella alkavat nousta.

Opinnäytetyön mittaukset suoritetaan keväisessä säässä, josta johtuen kaksoisjulkisivun lämpötilat eivät nouse haitallisen korkeiksi. Kesällä ulkoilman lämpötila ja lämpösäteily määrä on korkeampi kuin keväällä, mutta auringon kulma on

isompi kuin keväällä. Kesällä auringon paistaessa korkeassa kulmassa rakennuksen eteläsivulle kohdistuva lämpösäteilyn määrä ei ole korkeampi kuin keväällä. Aurinko paistaa kesällä melkein kohtisuorasti itä- ja länsisivuilla montakin tuntia päivän aikana, joten niillä sivuilla aurinko voi todennäköisesti aiheuttaa korkeat lämpötilat.

Tuulen lisäksi varjot aiheuttavat hyvinkin suuria lämpötilaeroja saman rakenteen pinnassa. Pinnan lämpötilan laskemiseen vaikuttavat ulkopuolisten varjostavien rakenteiden lisäksi seinän omat varjoa aiheuttavat rakenteet kuten lasin alumiini-profiilit ja alumiinikotelot. Tuuli vaikuttaa pääasiassa niihin pintoihin, jotka ovat ulkoilmalla, kuten verhouslasin ulkopintaan, ja välitilan sisääntuloaukkoihin. Ulkopintoihin tuuli vaikuttaa vahvemmin korkealla, koska se on voimakkaampi ja pyörteisempi korkealla. Tuuli on useimmiten kylmempi kuin välitilan ilma ja materiaalit, joten päästyään välitilaan se viilentää välitilan materiaalit, kunnes se on itse lämmin.

Kaksoisjulkisivun lämpötilat nousevat ylhäällä korkeammiksi. Tähän vaikuttaa se, että ylhäällä aurinko paistaa tasaisemmin ja pitempään ja lisäksi siihen osuu vähemmän varjoa ja vasta myöhemmin kuin alaosiin. Kaksoisjulkisivun materiaaleihin vaikuttaa lisäksi jossain määrin ympäröivien rakennusten ja puiden lähettämä pitkäaaltonen säteily sekä näkyvyyskerroin. Jopa ikkunan saman lasipinnan välillä voi korkeussuunnassa olla suuria lämpötilaeroja, jotka johtuvat välitilan virtaussuunnasta, auringon paistamiskulmasta, ikkunakarmista sekä ikkunan sisällä olevan suljetun välitilan ilman konvektion liikkeestä.

Kevyen pakkasyön aikana lämpötilan ollessa noin -2 °C lämpötilaerot tuulettuvan ja tuulettumattoman seinäosan välillä ovat ainoastaan $1\ldots 2\text{ °C}$. Tuloksista voidaan päätellä, ettei välitilan sulkemisella ole merkitystä kevyellä pakkasilmalla. Tulokset ovat tosin tyneltä yöltä. Tuulisena yönä lämpötilavaihtelut olisivat erilaiset. Kylmä tuuli laskisi tuuletetun välitilan lämpötilat matalammiksi kuin tynen yön lämpötilat. Tuuletetun välitilan lämpötila ei silti laskisi matalammaksi kuin ulkoilman lämpötilaa, joka mittausyönä oli ainoastaan $1\ldots 2\text{ °C}$ matalampi kuin tuuletettu välitila. Lisäksi pakkaspäivän aurinko lisäisi tuulettumattoman välitilan läm-

pötilaero tuulettetusta välitilasta. Saatujen mittaustulosten perusteella ei ole mahdollista arvioida tuulettumattoman kaksoisjulkisivun eristävyys hyöty kovalla pakkasella.

Ulkoilman suhteellisen kosteuden ero kaksoisjulkisivun välitilan kosteuteen johtuu pääasiassa ulkoilman ja välitilan välisestä lämpötilaerosta. Suhteellisen kosteuden eroon voi myös vaikuttaa kostealla ulkoilmalla kaksoisjulkisivun tuloaukon ritilä ja sen jälkeinen vaaka-alumiinikotelo. Kaksoisjulkisivun välitilan alatasen ritilä rajoittaa ilman pääsyä sen läpi, joten ilma kiihtyy ritilän kohdalla. Ritilän jälkeisessä alumiinikotelossa on taas paljon isompi tilavuus, mikä aiheuttaa ilman virtausnopeuden huomattavaa hidastumista. Ilman hidastuessa siinä olevat vesipisarot putoavat pois ja tämän takia välitilan suhteellisen kosteuden lukemat ovat pienempiä kuin ulkoilman suhteellinen kosteus.

5.2 Välitilan materiaalien vaikutus kaksoisjulkisivun lämpötiloihin

Kaksoisjulkisivun välitilaa ympäröi moni keskenään erilainen materiaali. Kaikki välitilan materiaalit vaikuttavat sekä toistensa että ilman lämpötilaan niiden erilaisilla lämmönjohtavuuden arvoilla, säteilyominaisuuksilla sekä lämpökapasiteetilla. Välitilan materiaalien pintojen lämpötilat ja tuulen aiheuttama paine-ero vaikuttavat ilmavirran nopeuteen. Mitä korkeampi on pinnan lämpötila sen nopeammin ilma virtaa sen pinnan lähellä. Tämä toimii myös käänteisesti, eli mitä kylmempi on pinnan lämpötila, sen hitaammin ilma kulkee sen pinnan lähellä. Välitilan ilmavirran nopeuteen vaikuttaa myös ympäröivien materiaalien kitkakertoimet, välitilan dimensiot sekä väistettävät rakenteet kuten tippalistat ja alumiini-profiilit.

Opinnäytetyössä käsitellään malliseinää, alumiini-lasiverhoilua kaksoisjulkisivua, jonka verhouslasi on karkaistu ja sisäpinnalla on silkkipainettu kuvio. Verhouslasi päästää läpikirkkaalta osaltaan ainoastaan säteilyä välitilaan, sillä silkkipainokuvio on täysin peittävä. Lasin takana oleva pelti heijastaa sekä osan siihen kohdistuvasta säteilystä että säteilee itse. Pelliltä tulevasta säteilystä suuri osa absorboituu tummaan silkkipainoon. Silkkipainettu lasi lämpiää kirkasta lasia

lämpimämmäksi. Kirkas lasi jäähtyy nopeammin kuin silkkipaino osittain sen takia, että ilman konvektio vaikuttaa vahvemmin ulkolasin ulkopintaan kuin sisäpintaan. Silkkipainon lämpötila siirtyy johtumisella lasiin ja siten lämpötilat tasoittuvat vähitellen.

Tumma silkkipaino kuumenee hieman nopeammin kuin ympäröivä lasi, mikä aiheuttaa pienen lämpöjännitteen lasin sisään. Ulkoilman lämpötilan ollessa korkea aurinkoisena päivänä yhtäkkinen varjo laskee kirkkaan lasin lämpötilaa montakin astetta. Koska silkkipainon lämpötila ei laske yhtä voimakkaasti kuin lasin lämpötila, tämä aiheuttaa lasin sisäisen lämpötilaeron lähestymistä kriittiseen arvoon. Sama ongelma voi tulla vastaan pilvisenä kylmänä päivänä, jos aurinko paistaisi yhtäkkiä. Aurinko lämmittäisi silkkipainoa voimakkaasti lasin ollessa vielä viileä.

Kaksoisjulkisivun verhouslasi on vapaasti tuettu. Talvella alumiinilista kutistuu hieman nopeammin kuin lasilevy. Edellä mainitusta kutistumisnopeudesta johtuen alumiinilistan ja lasilevyn sovitus ei saisi olla liian tiukka, jos rakenteessa ei ole varauduttu tähän. Kesällä alumiini laajenee nopeammin kuin lasi, joten pahimmassa tapauksessa alempi vaakaprofiili saattaa jopa karata lasin alta. Nämä skenaariot eivät kuitenkaan ole todennäköisiä, sillä lasin ja alumiinin lämpötilakerroimien ero on suhteellisen pieni, joten tämä vaatisi hyvin suuret ulkoilman lämpötilaerot ja pitkät yhtäjaksoiset alumiiniprofiilit. Jos lasi olisi ainoastaan liimattu, SG-lasitus, rungon laajentuessa se saattaa vetää liimaa pois lasin takaa. Tämän ehkäisemiseksi on tarkistettava ainakin rakenteen jännitykset sekä liiman ominaisuudet ja kestävyys.

Kaksoisjulkisivun tuulettumaton välitila halutaan yleensä hyödyntää talvisin ulkoseinän lisäeristykseenä. Auringon paisteella tuulettumattoman kaksoisjulkisivun lämpötilat nousevat paljon korkeimmiksi kuin tavallisen tuuletetun julkisivun lämpötilat. Koska ilma ei pääse vaihtumaan tuulettumattomassa välitilassa, lämpötila nousee jatkuvasti eikä kylmä tuuli pääse viilentämään välitilan ilmaa. Tällöin viileä tuuli pääsee viilentämään ainoastaan verhouslasin ulkopintaan hetkellisesti sisäpinnan ja silkkipainon lämpötilan ollessa hyvin korkea. Tästä saattaa johtua suuret lasin sisäiset lämpötilaerot, jotka saattavat aiheuttaa jopa lasin rikkoutumista.

Jos tuulettumattoman seinäosan korkeat lämpötilat pääsisivät sisälle, ne aiheuttaisivat sisätilan kuumuutta ja epämukavuutta.

Kaksoisjulkisivun alumiinikotelon lämpötilojen noustaessa korkeiksi kotelo laajenee poispäin keskikohdasta. Kotelon keskikohta pysyy siis likimain paikallaan. Kun kotelon lämpötilat laskevat ja se yrittää palata takaisin sen alkuperäiselle muodolle ja koolle, se ei välttämättä palaa täysin samanlaiseksi vaan liikkeessä saattaa olla pieni ero. Tämä pieni liikkeen eroavaisuus saattaa aiheuttaa sitä, että jommankumman kotelon reunan saumat alkaisivat vähitellen näkyä. Alumiinikotelot ja -profiilit kiinnitetään teräksisiin hattuorsiin tietyllä jaolla. Jos kiinnitetään yhteen teräksiset ja alumiiniset kappaleet useammasta kiinnityspisteestä, kappaleiden hyvin erilaiset lämpöliikkeet saattavat pahimmillaan aiheuttaa niitä yhteen kiinnitettävien kiinnikkeiden katkeamista.

Silkkipainoa tarkasteltavassa seinäosassa peltien väri ei ole heijastava, joten siltä ei heijastu paljon säteilyä silkkipainon lämmittämiseen. Tumma pelti kuitenkin lämmittää välitilan ilmaa, joka puolestaan lämmittää silkkipainoa. Valkoisen (RR20) pellin heijastavuus on paljon suurempi kuin harmaan (RR41) pellin heijastavuus. Valkoinen pelti heijastaa silkkipainoon suurin osa peltiin tulevasta säteilystä, mutta se ei lämmitä välitilan ilmaa, joten silkkipainon lämpötila ei nouse korkeammaksi kuin harmaan pellin seinäosassa. Lisäämällä heijastavia pigmenttejä pellin pinnoitteeseen on mahdollista käyttää tummanvärisiä levyjä ja silti pitää sekä välitilan ilman että silkkipainon lämpötila suhteellisen matalana.

Aurinkoisena päivänä saman pellin pintaan saattaa sekä paistaa aurinkoa että varjostaa samaan aikaan, mistä aiheutuisi pellin reunan ja keskialueen välillä lämpötilaeroja. Koska pelti on kiinnitetty kaikista reunoistaan, se ei pääse liikkumaan, joten se saattaa pullistua ulospäin. Termoelementin verhouslevy on alumiinia, joten sen lämpöliikkeet eroavat siihen kiinnitetyistä hattuorsista. Lämpöliikkeiden eroavaisuus tässä tapauksessa saattaa aiheuttaa välillä häiritsevää ääntä.

Kaksoisjulkisivun verhouslasin takana olevien peltien lämpötilat liikkuvat samassa suhteessa kuin ulkolasin lämpötilat. Tämä tarkoittaa, että julkisivun välitilan materiaalien lämpötiloihin vaikuttaa eniten auringonsäteily. Välitilan lämpötila puolestaan liikkuu samassa suhteessa kuin ulkoilman lämpötila. Tästä voidaan päätellä, että välitilan ilmaan ei vaikuta auringon säteily määrä yhtä voimakkaasti kuin ulkoilman lämpötila.

5.3 Taustapellille tuleva säteily määrä

Malliseinän välitilan lämpötilamittausten tulosten parempaa ymmärtämistä varten tässä osiossa lasketaan silkipainetun lasin kautta pellille päässeeseen säteily määrä. Malliseinän kaksoisjulkisivun verhouslasin g-arvo on 0,89. Tämä tarkoittaa, että lasin kautta menee 89 % lasiin kohdistuvasta säteily määrästä. Lasin sisäpinnalla on täysin peittävä silkipaino, jonka pinta-ala on puolet lasin silkipainetusta pinta-alasta. Verhouslasin takana olevaan välitilan ilmaan sekä pellin pintaan tulee siis $0,89 \cdot 0,5 = 0,445$ eli 44,5 % lasille tulevasta säteily määrästä. Taulukossa 4 hahmotellaan mitattujen säteily määrien perusteella pellille tulevat säteilyt. Taulukon arvoista nähdään, minkä suuruiset säteily määrät pellille pääsee. Mitattu säteily määrä nostaa pellin pintalämpötilaa, jopa 45 °C asteeseen. Ilman silkipainon peittävyttä pellin lämpötilat voisivat olla paljon korkeammat, mutta tätä ei voida mitata malliseinästä.

TAULUKKO 4. Lämpösäteily määrä pellillä [W/m^2].

Kellonaika	Seinälle tuleva säteily	Pellille tuleva säteily
13:30	635	$0,89 \cdot 0,5 \cdot 635 = 282,6 \text{ W/m}^2$
14:00	725	$322,6 \text{ W/m}^2$
14:30	784	$348,9 \text{ W/m}^2$
15:00	860	$382,7 \text{ W/m}^2$

5.4 Lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero

Välitilan tuuletusvirtauksen syntyminen vaatii paine-eroa julkisivuelementin ylä- ja alatasen välillä. Välitilan eri tasojen ilmanpaineita aiheuttaa pääasiassa tuuli sekä välitilan ja ulkoilman välinen lämpötilaero. Näiden lisäksi välitilan korkeus vaikuttaa paine-eron suuruuteen. Alatasen ritilän ja ylätasen räystäään aiheuttamat paine-erot mitataan mallikappaleen mittausten yhteydessä (kappale 4.4). Lämpötilaerosta aiheutuva paineen muutos lasketaan kappaleen 3 yhtälöstä 1. Välitilan korkeus vaaka-alumiinikotelon päältä räystäälle asti on 5,6 m. Lasketaan paineen muutos tarkasteltavalta päivältä eli 26.3.2019 noin kello 15...16. Lämpötila arvoista otetaan keskiarvo. Katsotaan mittaustuloksista, että ulkoilman lämpötilan keskiarvo klo 15...16 välillä on noin 5 °C ja välitilan ilman lämpötilan keskiarvo samalta ajalta on noin 15,5 °C. Sijoitetaan arvot yhtälöön:

$$dp = 0,043 \cdot (15,5 - 5)K \cdot 5,6 \text{ m} = 2,53 \text{ Pa} \quad (1)$$

Tulos on suhteellisen iso verrattuna esimerkiksi ritilän aiheuttamaan paine-eroon, joka on noin 0,5 Pa. Tämä tulos kertoo, että lämpötilaerosta ja välitilan korkeudesta johtuva paine-ero on suurempi kuin ritilästä johtuva paine-ero. Ritilän aiheuttama paine-ero riippuu ritilän koosta ja sen tiheydestä. Tiheämpi tai pienempi ritilä aiheuttaisi isomman paine-eron ritilän yli, joka hidastaisi virtausnopeutta ja nostaisi lämpötilaeroa.

5.5 Termoelementin kautta siirtyvä energiamäärä

Tässä osiossa lasketaan mittauspäivän ja -pakkasyön tulosten perusteella välitilan ja sisätilan välinen energian siirtyminen termoelementin läpi sekä tuuletetussa (L1) että tuulettumattomassa (L2) seinäosassa. Pakkasyön tuloksia (kuvaaja 13) tarkasteltaessa voidaan todeta, että pienillä pakkasilla välitilan sulkemisesta aiheutuu ainoastaan noin 1...2 °C ero välitilan lämpötiloihin. On muistettava kuitenkin, että tarkasteltavana yönä ilma oli tyyni. Talvella tuloksiin voisi vaikuttaa tuuletettua tilaa viilentävä tuuli, joka lisäisi välitilojen välinen lämpötilaero. Talvella

aurinko paistaa edes muutaman tunnin ajan päivisin, mikä lämmittää tuulettumattomaa tilaa enemmän kuin tuuletettua ja siten hyödyntää tuulettumattoman tilan tuomaa lisäeristävyyttä.

Tässä osiossa tehdään havainnoiva laskenta, josta nähdään tuulettumattoman osan hyödyt ja haitat numeroina. Kaksoisjulkisivun sisemmän vaipan U-arvo sekä välitilojen ja sisäilman lämpötilat voidaan määrittää, joten näiden tietojen on mahdollista laskea välitilasta siirtyvä energiamäärä sisätilaan ja toisinpäin. Laskennassa on otettava huomioon myös ikkunan vaikutus energiamäärään. Otetaan laskentaa varten pinta-ala suljetun välitilan korkeuden mukaisesti. U-arvon laskentakaavoja (Çengel 2008, 403-407) muokatessa saadaan yhtälö:

$$\frac{1}{\frac{1}{A_{ikk} \cdot U_{ikk}} + \frac{1}{A_{seinä} \cdot U_{seinä}}} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

Jossa A_{ikk} on $2,95 \text{ m}^2$, U_{ikk} on $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A_{seinä}$ on $1,67 \text{ m}^2$, $U_{seinä}$ on $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$.

TAULUKKO 5. Sisältä välitilaan seinän kautta siirtyvä energiamäärä kokonaisseinäpinta-alalla ja seinäneliöllä.

Seinän osa	Tarkasteltava ajan-kohta	$T_{\text{sisä}}$ [°C]	$T_{\text{välitila}}$ [°C]	Energiamäärä [W]	Energiamäärä [W/m ²]
Tuuletetty välitila	Pakkasyö klo 6:30	25	-2	6,84	1,48
Tuulettumaton välitila	Pakkasyö klo 6:30	25	-1	6,59	1,43
Tuuletetty välitila	Lämmin päivä klo 16:30	33	17	4,05	0,88
Tuulettumaton välitila	Lämmin päivä klo 16:30	33	62	-7,35	-1,59

Nykypäivän korkeista U-arvon vaatimuksista johtuen lämpöhäviö seinän kautta on hyvin pieni. Koska U-arvot ovat paljon parantuneet siitä, kun kaksoisjulkisivuja alkuun tehtiin, välitilan sulkemisesta ei enää nykypäivänä saada samaa hyötyä kuin ennen. Kevyellä tyynellä pakkassäällä välitilan sulkemisen hyöty on ainoastaan $0,05 \text{ W/m}^2$. Lämpimänä päivänä tuulettumattoman välitilan ilman lämpötila nousee paljon korkeammaksi kuin sisätilan lämpötila, joten lämpö siirtyy välitilasta sisälle.

5.6 Ikkunan kondenssi

Mittausten aikana havaitaan tuuletetun seinäosan (L1) ikkunan ulkolasin sisäpintaan kondensoitunut kosteus. Tämä ilmiö kestää koko mittauksen ajan ja jatkuu mittauksen jälkeen. Kondenssi siis syntyy avattavien ikkunoiden välissä kuvan 24 mukaisesti.



KUVA 24. L1 seinäosan ikkunan ulkolasin sisäpintaan tiivistyy vesi

Kosteuden tiivistyminen ulkolasin sisäpintaan tässä tapauksessa johtuu todennäköisesti joko riittämättömän sisäpuiteen tiiveydestä tai liian hyvästä ulkopuiteen tiiveydestä. Jos sisäpuiteen ja karmin välinen tiivistys on riittämätön tai puite-/karmirakenteessa on ilmavuotoja, pääsee sisätilasta vesihöyryä ja se tiivistyy kylmille lasipinnoille. Jos ulkopuiteen tiivistys on liian hyvä, ikkunan välitilaan joutunut kosteus ei pääse ulos, joten se tiivistyy lasipinnoille. (Rainamo ym. 1999, 35-36)

Kondenssiongelman ratkaisemiseen on mahdollista tiivistää sisäpuutteen ja karmin liittymä huolellisemmin, vähentää ulkopuitteen ja karmin välistä tiivistystä tai huolehtia ikkunatilan tuuleuksesta muulla tavalla, kuten erillisillä pölysuodatuilla tuuletusaukoilla. (Rainamo ym. 1999, 36)

6 POHDINTA

Opinnäytetyössä tutkittiin kaksoisjulkisivun lasin, sen taustapellin värin ja välitilan tuuletuksen vaikutus alumiini-lasirakenteisen kaksoisjulkisivun lämpötiloihin. Opinnäytetyö rajattiin tutkimaan kaksoisjulkisivun lämpötiloja keväisenä, aurinkoisena päivänä ja yönä. Työssä verrattiin erivärisiä peltejä ja tuuletettua ja tuulettumatonta välitilaa sekä käsiteltiin kaksoisjulkisivun ikkunan lämpötekniinen toiminta ja silkipainetun lasin printin vaikutus lasin ja välitilan lämpötilaan.

Opinnäytetyössä avattiin kaksoisjulkisivun toiminta ja sen lämpötekniiseen käyttäytymiseen liittyvät tekijät sekä testattiin nämä asiat käytännössä malliseinän avulla. Tutkimuksen varsinaiset mittaukset kestivät yhden viikon, jonka aikana aurinko paistoi melkein joka päivä. Mittaustuloksiin vaikuttivat mittausten ajankohta, auringon suunta ja kulma, seinälle tuleva säteily määrä, ilmavirtaukset ja varjostavat kohteet.

Seinän oma rakenne ja materiaalivalinnat vaikuttavat myös kaksoisjulkisivun lämpötiloihin. Verhouslasin silkipaino vähensi huomattavasti pellille tulevaa säteily määrää, mutta samalla aiheutti suhteellisen suurta lämpötilaeroa lasilevyn sisällä. Kirkas lasi olisi päästänyt enemmän lämpösäteilyä taustapellille, mutta lasilevyn lämpötilajakauma olisi ollut tasaisempi. Jos välitilan tuuletus suljetaan, se nostaa välitilan materiaalien lämpötiloja korkeiksi, mikä voi lyhentää kyseisten materiaalien ikää ja aiheuttaa pellin lommahdusta.

Yhteenvetona voidaan sanoa, että kaksoisjulkisivun suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin: materiaalien, kuten lasin ja pellin, ominaisuudet, lämpölaajenemiskertoimet, liikevarat, kitkakertoimet sekä tuuletusvälin suuruus, tuuletustapa, tuuletusvälin virtauksen esteet, kuten tippalistat, pinnoitteiden ominaisuudet ja väri sekä sisä- ja ulkopuoliset varjostavat kohteet.

Julkisivun yläosassa lämpötilat ovat korkeammat ja varjostavia kohteita on vähemmän. Kaksoisjulkisivun välitilan materiaalien lämpötilat saattavat nousta korkeiksi, kun kyse on monen kerroksen rakennuksesta. Kaksoisjulkisivulle tulevaan

aurion säteily määrään voidaan vaikuttaa mm. ulkopuolisen ja sisäpuolisen varjostuksen sekä auringonsuojalasin avulla. Ulkopuolisen varjostuksen avulla suuri osa säteilystä voidaan pysäyttää ennen kuin se pääsee julkisivulle. Ulkopuolisen varjostuksen haittapuolena on se, että koko lasialaa täytyy siten varjostaa, jotta ei syntyisi erilämpöisiä alueita. Sisäpuolisten varjostusten kuten sälekaihtimien tehokkuus riippuu sen kyvystä heijastaa tuleva auringonsäteily ennen kuin säteily absorboituu julkisivumateriaaleihin ja muuttua lämmöksi. Auringonsuojalasi heijastaa pois suurimman osan siihen kohdistuvasta lämpösäteilystä. Auringonsuojalasia läpäissyt lämpösäteily on mahdollista poistaa luonnollisella ilmanvaihdolla tai ilmastoinnilla.

Opinnäytetyössä jäi tutkimatta kaksoisjulkisivun materiaalien lämpötilat muina vuodenaikoina, kuten kuumien kesien ilmalla sekä välitilan tuulettumattomuuden hyöty kovalla pakkasella. Edellä mainitut asiat olisi hyödyllistä tutkia tulevaisuudessa. Jos tiedetään, kuinka korkeiksi lämpötilat voivat kesällä nousta, voidaan valita kestävä ja kyseisiin lämpötiloihin soveltuvat materiaalit ja pinnoitteet. Välitilan sulkemiseen talvella menee jonkin verran energiaa, joten olisi hyvä tietää, että saadaanko siitä edes saman verran hyötyä nykypäivän hyvillä seinän lämmönjohtavuuden arvoilla. Tutkimatta jäi myös tuulettumattoman seinäosan verhouslasin silkkipainon lämpötilat ja kirkkaan lasin vertailu tuuletetun osan silkkipainoon.

Kaksoisjulkisivun materiaalien lämpötilakestävyysien lisätutkimuksia olisi mahdollisesti hyvä suorittaa esimerkiksi sääkaapissa, jolloin voidaan valita itse tutkitavat olosuhteet. Tulokset osoittivat, että lämpötila nousee korkeammalle mentäessä, joten useamman kerroksen talossa julkisivun lämpötilat poikkeavat yhden kerroksen malliseinästä. Tästä johtuen monen kerroksen kaksoisjulkisivurakenteen lämpötiloja olisi hyödyllistä tutkia. Lisäksi välitilan ilman virtausnopeuden arvo olisi havainnollistavaa tietää, erimuotoisten peltien kuten aaltoilevan lämpötilakäyttäytyminen, puhdas säteilyn vaikutus lämpötiloihin ilman varjostavia kohteita.

LÄHTEET

Anastasiou C. 2016. Thermal Breakage of Glass. Comparison and Validation of thermal shock calculation methods. Rakennus- ja yhdyskuntateknikka. Delft University of Technology. Opinnäytetyö

Björkholtz D. 1987. Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakentajain kustannus.

ETAG 002. 2012. Guidline for European Technical Approval for Atructural Sealant Glazing Kits. European Organisation for Technical Approvals

Çengel Y. 2008. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. 2. painos. United States: The McGraw-Hill Companies

Hietaniemi, J., Hakkarainen, T., Huhta, J., Korhonen, T., Siiskonen, J., Vaari, J. 2002. Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelojen tutkimus kokeellisesti ja mallintamalla. Vantaa: Tummavuoren Kirjapaino Oy

Lasifakta 2018. Pilkingtonin tuotekatalogi 2018.

Markkula, A. Diplomi-insinööri. 2019. Haastattelu 11.04.2019. Haastattelija Al-Adulrazzaq, G.

Nevander L., Elmarsson B. 2001. Fukt handbok. Praktik och teori. Tukholma: Elanders Svenskt Tryck AB.

Olenius, A., Toikka, R., Uusitalo, E. n.d. Lasi julkisivun materiaalina työmaalla. (toim.) Rakennustieto. Luettu 29.1.2019. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK020402.pdf>

Piironen, E. 2001. Kaksoislasijulkisivuarkkitehtuurista. Teräsrakennelehti 01/2001, 32. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys

Poirazis, H. 2006. Double skin facades. A literature review. Ruotsi: LUND.

prEN 13474-2:E. 2000. Glass in Building. Design of glass panes. Part 2: Design for uniformly distributed loads. European standard draft. Luettu 1.4.2019. <https://www.scribd.com>.

Rainamo M. & Riikonen M. 1999. Lasirakentajan käsikirja. Tampere: Enterpress Oy

RakMk F2. 2018. Rakennuksen käyttöturvallisuus. Ympäristöministeriön asetus. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Luettu 12.2.2019. <https://www.ym.fi>.

Ratu 1197-S. 2002. Metalli- ja lasijulkisivut. Tehtäväsuunnittelu-aliurakka, työkauppa. Rakennusteollisuus RT ry. Luettu 16.01.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.

RIL 198-2001. 2001. Valoa läpäisevät rakenteet. Luettu 1.4.2019 Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

RIL 255-1-2014. 2014. Rakennusfysiikka1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Luettu 10.2.2019 Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

RT 39-10451. 1991. Alumiini. Helsinki: Rakennusteollisuus RT ry. Luettu 16.01.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.

RT 38-10901. 2007. Rakennuslasit, tasolasit. Helsinki: Rakennusteollisuus RT ry. Luettu 16.01.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.

RT RakMK-21757. 2018. Alumiinirakenteet, ohjeet 2018. Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma, rakenteiden lujuus ja vakaus. Luettu 10.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.

Seppänen R., Kervinen M., Parkkila I., Karkela L., Meriläinen P. 2012. Maol tau-lukot. Fysiikka. Keuruu: Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

SFS 1808. 2015. Riipputelinejärjestelmien turvallisuusvaatimukset. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 20.3.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.
SFS 572-1+A1. 2016. Rakennuslasi. Perustuotteet. Soodakalkkisilikaattilasi. Osa 1: Määritelmät ja yleiset fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 22.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

SFS 5795. 1994. Puualumiini-ikkunoiden alumiinirakenteet. Yleiset ominaisuudet ja vaatimukset. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 15.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

SFS-EN ISO 6946. 2017. Building components and building elements- Thermal resistance and thermal transmittance- Calculation methods. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Luettu 15.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

SFS-EN 12488:2016. 2016. Rakennuslasi. Lasitusuusositukset. Lasin asennusohjeet pystysuoriin ja kalteviin rakenteisiin. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 22.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

SFS-EN 12150-1. 2015. Rakennuslasi. Lämpökarkaistu soodakalkkisilikaattiturvalasi. Osa 1: Määritelmä ja kuvaus. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 22.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

SFS-EN 13022-1. 2014. Rakennuslasit. Liimatut lasirakenteet. Osa 1: Tukematomat ja mekaanisesti tuetut yksin- ja moninkertaiset liimatut lasirakenteet. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 22.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

SFS-EN 15434+A1. 2010. Rakennuslasit. Rakenteellinen ja/tai ultraviolettisäteilyllynkestävä liimausmassa lasirakenteissa ja/tai eristyslasi-elementtien ulkosaumoissa. Tuotestandardi. Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 22.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi>.

Siikanen, U. 2015. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset. Rakennustieto Oy

Sisäilmayhdistys ry. 2008. Ilmavirtaukset rakennuksessa. Luettu 10.3.2019. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>

SIT 22-610045. 2007. Teräs. Ohutseinäputket, huonekaluteräkset, pintakäsittely. Aihekokoeelma. Luettu 25.2.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.

SIT 22-610052. 2007. Alumiini. Alumiini, ominaisuudet, käyttö. Aihekokoeelma. Luettu 25.02.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.

SIT 22-610077. 2010 Ruostumaton teräs. Aihekokoeelma. Luettu 25.02.2019. Vaatii käyttöoikeuden. <https://rt-rakennustieto-fi>.


Tenhunen, O.2003. Metallilasirakenteisen kaksoisjulkisivun materiaalien soveltamiskriteerit. Helsinki: Picaset Oy

Tenhunen, O., Lehtinen, T., Lintula, K., Lehtovaara, J., Vuolio, A., Uuttu, S., Alinikula, T., Kesti, J., Viljanen, M., Söderlund, J., Halonen, L., Mäkeläinen, P. 2001. Metallilasirakenteet kaksoisjulkisivussa, esitutkimus. Helsinki: Picaset Oy

LIITTEET

Liite 1. Opinnäytetyön malliseinä

Liite 1. Opinnäytetyön malliseinä

TUNN.	LUKUM.	MUUTOS	SUUNN.	PVM.	TARK./HYVÄKS.
K.OSA/KYLÄ		KORTTELI/TILA	TONTTI/RN _o	RAKENNUSLUVAN TUNNUS	
RAKENNUKSEN TAI RAKENNUSTEN NUMEROT TAI TUNNUKSET					
KOEKAPPALE			RAKENNEPIIRUSTUS	JUOKSEVA NRO	
OPINNÄYTETYÖN MALLISEINÄ			MITTAKAAVAT ENNEN PIEN.		
			POHJAKUVA 1:25		
			LEIKKAUS A–A 1:30		
			LEIKKAUS B–B 1:5		
 Sustainable engineering and design			TARKASTAJA		SUUNNITTELUALA
			ANDREAS LIMNELL		RAK
			HYVÄKSYJÄ		SUUNN. TYÖN NRO
			JUKKA SAMMI		
PVM.	PIIRTÄJÄ	SUUNNITTELIJA	S.LAJI	LOHKO	KRS
30.04.2019	GHADA	GHADA AL–ADULRAZZAQ	R		



ILMALANPORTTI 2
00240 HELSINKI
PUH. +358 207 393 000
www.sweco.fi

SUUNN. TYÖN NRO

PVM.

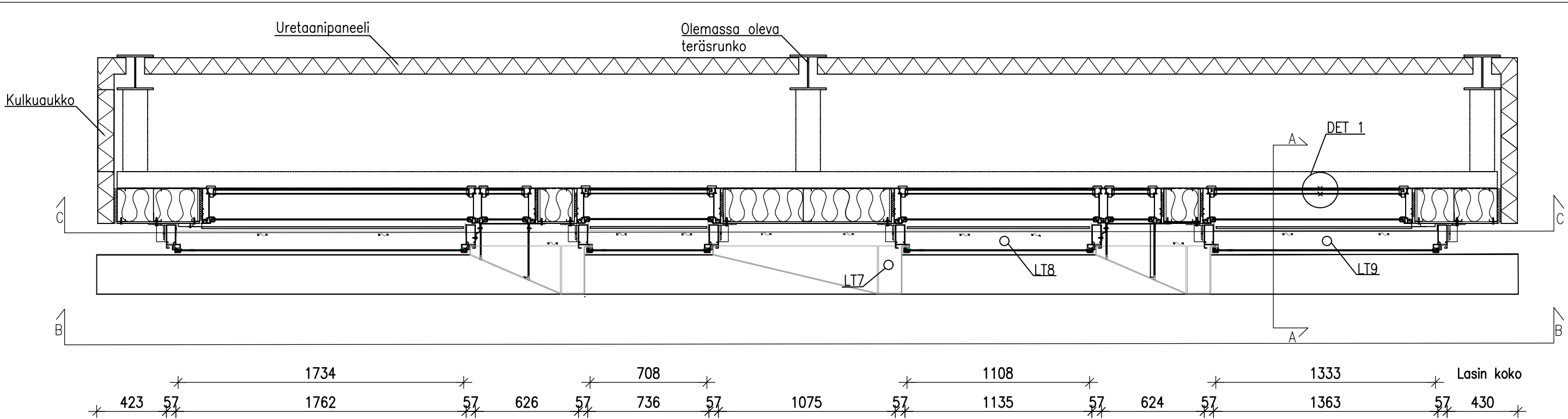
30.04.2019

PIIRTÄJÄ

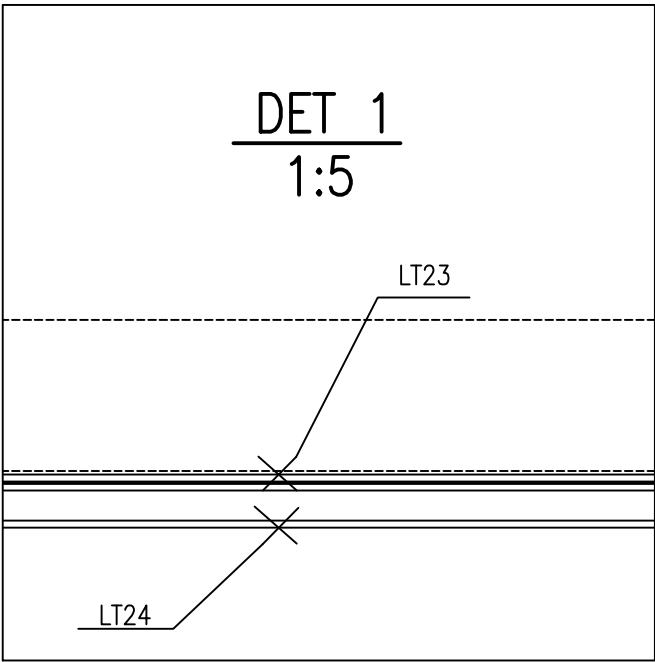
POHJAKUVA

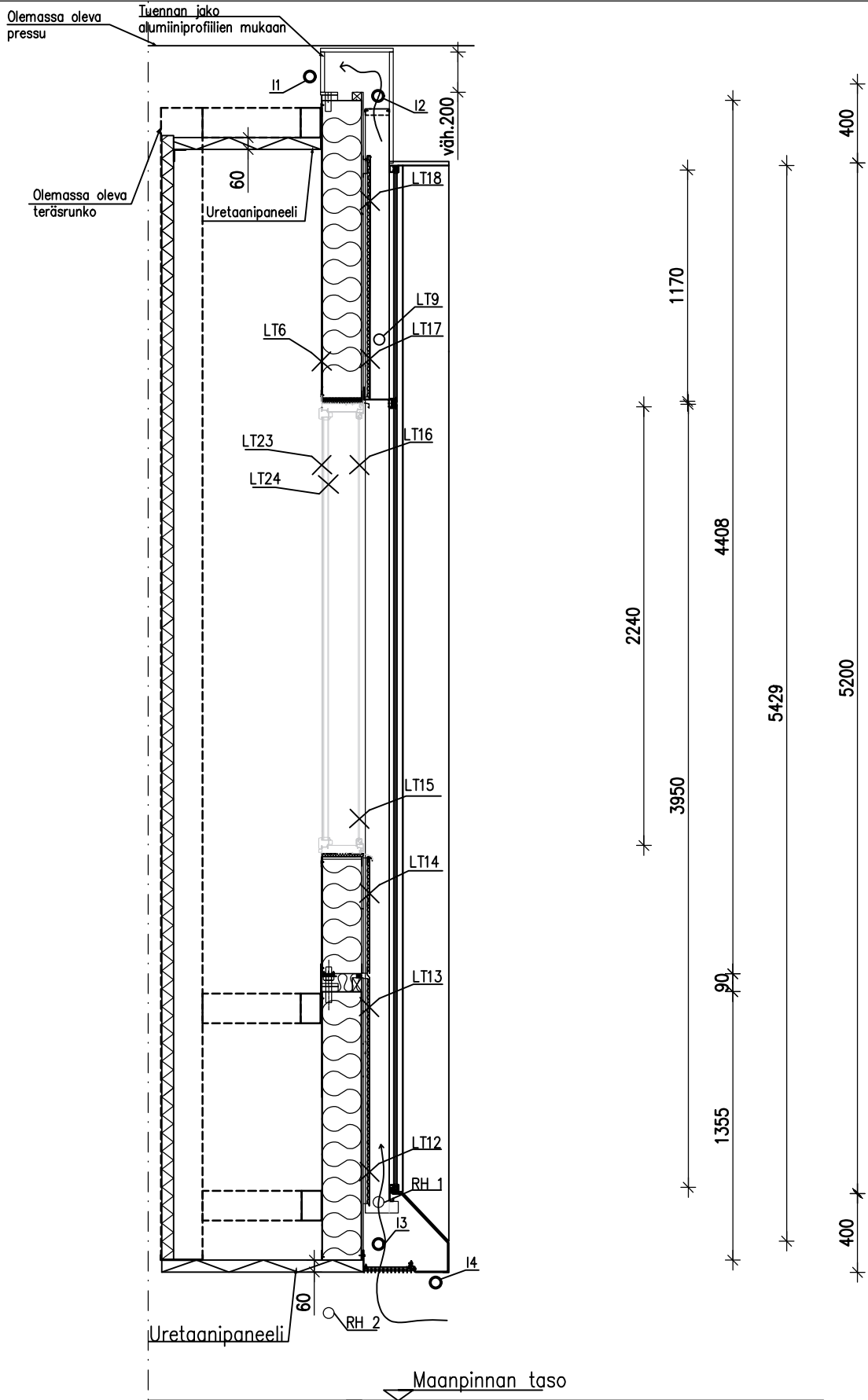
KOHDE
OPINNÄYTETYÖN MALLISEINÄ

SISÄLTÖ
MALLISEINÄN POHJAKUVA
VAAKALEIKKAUS MK 1:25



Pisteet LT1–LT24 ovat lämpötila-antureiden mittauspaikat





Pisteet LT1–LT24 ovat lämpötila-antureiden mittauspaikat

Pisteet RH1 ja RH2 ovat kosteusantureiden mittauspaikat

Pisteet I1–I4 ovat ilmanpaineantureiden mittauspaikat



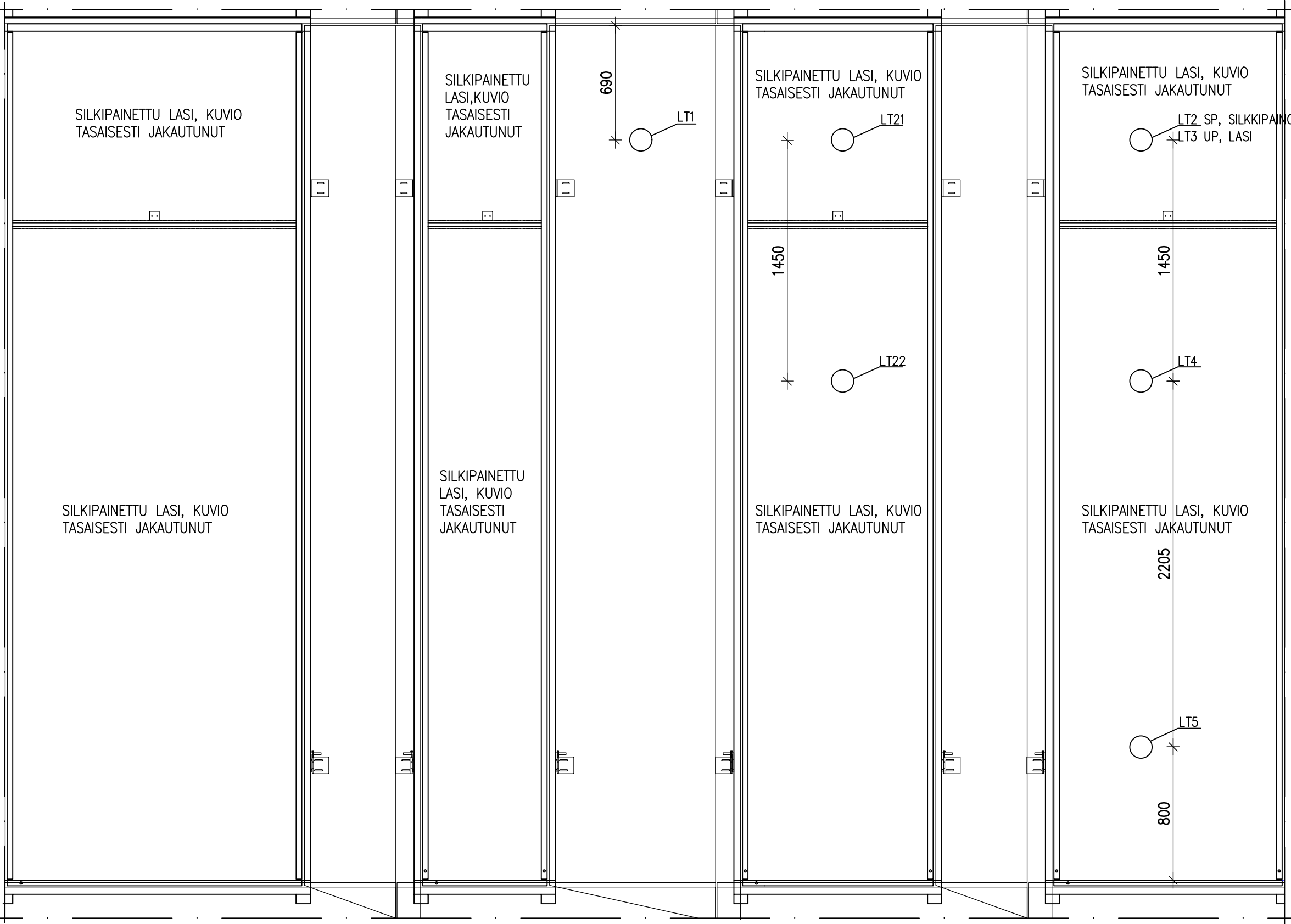
SWECO RAKENNETEKNIikka Oy
ILMALANPORTTI 2
00240 HELSINKI
PUH. +358 207 393 000
www.sweco.fi

SUUNN. TYÖN NRO
.
PVM.
30.04.2019
PIIRTÄJÄ

B-B

KOHDE
OPINNÄYTETYÖN MALLISEINÄ

SISÄLTÖ
MALLISEINÄN B-B LEIKKAUS
PYSTYLEIKKAUS MK 1:25



Anturit LT2 ja LT3 mittaavat saman lasin molempien puolten lämpötilat



SWECO RAKENNETEKNIikka Oy
ILMALANPORTTI 2
00240 HELSINKI
PUH. +358 207 393 000
www.sweco.fi

SUUNN. TYÖN NRO
.
PVM.
30.04.2019
PIIRTÄJÄ

C-C

KOHDE
OPINNÄYTETYÖN MALLISEINÄ

SISÄLTÖ
MALLISEINÄN C-C LEIKKAUS
PYSTYLEIKKAUS MK 1:25

