



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tuomo Kangasrääsio

VAASAN KIRKON KOSTEUSVAURION PYSÄYTTÄMINEN

Tekniikka

2019

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tuomo Kangasrääsio
Opinnäytetyön nimi	Vaasan kirkon kosteusvaurion pysäyttäminen
Vuosi	2019
Kieli	Suomi
Sivumäärä	51 + 12 liitettä
Ohjaaja	Jari Lehtiö

Vaasan kirkon julkisivuille on ilmestynyt kosteusvaurioita, eikä niiden syitä ei ole pystytty yksiselitteisesti määrittämään. Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää korjaustoimenpide-ehdotus, jolla vaurioituminen saadaan pysähtymään.

Opinnäytetyössä tutkitaan vaurioitumisen aiheuttajaa mittausten ja COMSOL Multiphysics 5.4 -ohjelmiston avulla. Rakenteen nykyisen tilanteen lämpö- ja kosteusolosuhteet selvitetään, minkä jälkeen niiden arvot asetetaan simulointiin. Tämän jälkeen simulointiin yhdistetään mahdolliset korjaustoimenpiteet ja tutkitaan, miten lämpö- ja kosteus tilanne muuttuu. Rakenteen mahdollisista korjauksista luodaan piirustukset, jotka ovat korjaustoimenpide-ehdotuksia.

Opinnäytetyön tuloksena vaurion syntymisen syyt selvitettiin. Tulokset osoittivat, että ullakko lämpenee ja kostuu, viistosade osuu usealle pinnalle ja ullakon kosteus estää seinärakenteen kuivumista. Korjaustoimiksi esitetään rakenteiden pintojen suojaamista viistosateelta, ullakon tuulettumisen järjestämistä sekä yläpohjan lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden parantamista piirustuksissa kuvatulla tavalla.

ABSTRACT

Author	Tuomo Kangasrääsiö
Title	Stopping the Moisture Damage of Vaasa Church
Year	2019
Language	Finnish
Pages	51 + 12 Appendices
Name of Supervisor	Jari Lehtiö

Moisture damage has appeared onto the facades of Vaasa Church and the causes have not been unambiguously determined. The idea of this thesis is to devise a renovation suggestion that stops the damage.

This thesis studies the causes of the damage with the help of measurements and simulation with COMSOL Multiphysics 5.4 software. The current heat and moisture conditions of the building structures were measured after which the values were set into the simulation. After this the possible renovation suggestion was combined with the simulation and the change of heat and moisture was examined. The blueprints of possible changes were created, which are then considered as a renovation suggestion.

The result of the thesis is that causes of the damage was determined. The results point out that the attic gets warm and wet due to diagonal rain hitting many surfaces and the moisture in the attic prevents the structure from drying. The renovation suggestions were to prevent diagonal rain from hitting the surfaces, creating ventilation for the attic and improving the technical performance regarding heat and moisture in the attic floor, as presented in drawings.

ESIPUHE

Haluan kiittää Contria Oy:tä mahdollisuudesta tähän opinnäytetyöhön. Contria Oy:n henkilökunnasta kiitoksen saavat Kenneth Grönroos, Seppo Nissilä, Kaisa Salmi, Jack Sandén, ja Kai Mänty. Vaasan ammattikorkeakoulun puolesta kiitoksen saa opinnäytetyön ohjaaja Jari Lehtiö. Kiitän Vaasan seurakuntayhtymää ja erityisesti sen entistä kiinteistöpäällikköä Mikko Päälysaaho. Kiitoksen saavat myös Technobotnian laboratorioinsinööri Petter Forth sekä COMSOL Oy:n Timo Karvinen.

Vaasassa 1.5.2019

Tuomo Kangasrääsiö

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	11
2	VAASAN KIRKON KOSTEUSVAURIO.....	12
	2.1 Vaurioituminen yläpohjan tasalla.....	12
	2.2 Tutkimuksen tehtävät ja tavoitteet	13
3	RAKENTEIDEN TOIMINTAPERIAATTEET	15
	3.1 Alapohja ja maanvastainen rakenne	15
	3.2 Ulkoseinä	16
	3.3 Yläpohja ja vesikatto	16
4	RAKENTEEN KASTUMINEN JA KUIVUMINEN	18
	4.1 Tiivistyminen	18
	4.2 Kosteuden sitoutuminen	21
	4.3 Kosteusvirta	22
	4.3.1 Konvektio	23
	4.3.2 Diffuusio.....	23
	4.3.3 Kapillaarinen siirtyminen.....	24
	4.3.4 Painovoimainen siirtyminen.....	25
	4.4 Kosteuden lähteet	25
	4.5 Rakennuksen muodon vaikutus kastumiseen	26
5	RAKENTEEN TUTKIMUS JA SIMULOINTI.....	28
	5.1 Kohteessa suoritettut mittaukset	28
	5.2 Simulointi	29
	5.2.1 Simuloinnin kaavoja	31
	5.2.2 Simuloitavat tapaukset ja niiden tulokset.....	34
6	KORJAUSTOIMENPIDE-EHDOTUS.....	38
	6.1 Rakenteiden suojaaminen ja tuuletus	38
	6.2 Vaikutus rakennuksen lämpötekniikkaan	42
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	43

7.1 Tutkiminen piirustusten perusteella	43
7.2 Ullakon ja katteen kunnan tarkastelu	44
7.3 Mittausten suorittaminen	45
7.4 Simuloinnin suorittaminen	46
7.5 Simuloinnin tulokset ja korjaustoimenpiteet	47
7.6 Korjaustoimenpiteiden simulointi.....	48
7.7 Korjaustoimenpide-ehdotuspiirustukset.....	48
7.8 Vaihtoehtoinen korjaustapa.....	49

LÄHTEET	50
---------------	----

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Vaasan kirkko ja kosteusvaurio räystään alla /3/	13
Kuva 2. Rakenneleikkaus pilasterin kohdalta.	14
Kuva 3. Vaurioitumisen syntyminen kirkon seinässä.	14
Kuva 4. Tiiliseinän rakenneleikkaus /13/.	16
Kuva 5. Yläpohjarakenne RT YP 411, ja alipainetuuletin /14, 15/.	17
Kuva 6. Tiivistyminen rakenteeseen kohtaan (x) /16/.	19
Kuva 7. Kosteusvirtaus rakenteessa, kun rakenne ei kuivu riittävän nopeasti.	22
Kuva 8. Vesihöyryn eteneminen kivivillan läpi /18/.	24
Kuva 9. Kapillaarinen nousu eri maa-aineksissa /19/.	25
Kuva 10. Paine-erot rakennuksen sisällä.	27
Kuva 11. Yläpohja, seinä ja katto. Ullakolla RH % = 65 ja t = -3 °C.	29
Kuva 12. Elementtiverkko geometrian sisällä.	30
Kuva 13. Tarkastelupisteet pilasterin keskellä sekä räystästiilessä.	34
Kuva 14. Kosteuden määrä rakenteessa elokuussa.	35
Kuva 15. Lämpötilan 0 °C raja nykytilanteessa.	36
Kuva 16. Lämpötilan 0 °C raja korjaustoimenpiteiden jälkeen.	37
Kuva 17. Pilasterin korjaustoimenpiteet.	39
Kuva 18. Yläpohjaan tehtävät muutokset pilasterin vieressä.	39
Kuva 19. Räystäsdetalji.	40
Kuva 20. Kuparikatteen liitosdetalji.	41
Kuva 21. Pilasterin taustan suojaaminen.	41
Kuva 22. Yläpohjaan tehtävät muutokset.	42
Kuva 23. Ullakon simulointi.	47
Taulukko 1. Vesimäärät nykytilanteessa 365 päivää.	36
Taulukko 2. Vesimäärät korjaustoimenpiteiden jälkeen 365 päivää.	37

LIITELUETTELO

LIITE 1. Vesihöyryn kyllästymistaulukko.

LIITE 2. Kirkon yläpohja rakenne.

LIITE 3. Sademäärät kirkon itäiselle ja läntiselle puolelle.

LIITE 4. DOF-Lämpö laskelmia.

LIITE 5. Kuvia kirkon yläpohja rakenteesta.

LIITE 6. Lämpökamerakuvia kirkon rakenteteista.

LIITE 7. Tasapainokosteuskäyrä ja kosteuspitoisuuden kasvaminen.

LIITE 8. Maanvastainen seinärakenne ja sadevesijärjestelmä.

LIITE 9. Tuulen aiheuttama paine ja imu seinille.

LIITE 10. Kirkon yläpohja.

LIITE 11. Yläpohja rakennedetalji.

LIITE 12. U-arvon laskeminen rakenteesta.

KÄSITELUETTELO

Diffuusio	Kosteuden siirtyminen rakenteessa vesihöyrynä. Kosteus siirtyy korkeamman vesihöyryn osapaineen omaavasta ilmasta alemman osapaineen omaavaan ilmaan /1/.
Hygroσκοoppisuus	Aineen kyky sitoa tai luovuttaa vesihöyryä, kun suhteellinen kosteus muuttuu /1/.
Ilman kokonaispaine	Ilmanpaine, jossa typen, hapen, hiilidioksidin ja vesihöyryn yhteispaine /2/.
Ilmasulku	Ainekerros, joka estää ilmavirtauksen rakenteen läpi puolelta toiselle /1/.
Konvektio	Paine-eron aiheuttama ilmavirtaus rakenteen tai huokoisen materiaalin läpi /3/.
Kosteuden painoprosentti	Kuinka monta prosenttia vettä on aineessa aineen kuivapainoon nähden /1/.
Kosteus konvektio	Kosteuden siirtyminen ilmavirtauksessa /1/.
Luonnollinen konvektio	Lämpötila erojen aiheuttaman paine-eron aikaansaama ilmavirtaus /1/.
Pakotettu konvektio	Paine-eron aiheuttama ilmavirtaus rakenteen raosta. Tuuli yleisin aiheuttaja /2/.
Poltettu tiili	Pääraaka-aineena savea oleva muurauskappale, joka on valmistettu polttamalla riittävän korkeassa lämpötilassa keraamisen sidoksen aikaansaamiseksi /1/.
PUR/PIR-levy	Kova polyuretaanilevy, jonka tiiviissä soluissa on punneaineita. Heikko vedeneristävyyttä ja lämmönjohtavuus 0,022 W/(mK). PIR-eristessä polyuretaanin lisäksi polyisocyanuraattia/1/.

Rakennuksen vaippa	Rakennusosat, jotka erottavat lämpimän ja puolilämpimän tilan ulkoilmasta /1/.
Suhteellinen kosteus (RH)	Kuinka paljon ilma kuutiossa on vesihöyryä verrattuna siihen mahtuvaan maksimi määrään tietyssä lämpötilassa [%] /1/.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys δv tai δp ilmoittaa sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien tilatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Yksikköinä käytetään $\delta v = [\text{m}^2/\text{s}]$ ja $\delta p = [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ /1/.
Vesihöyrynläpäisykerroin	Vesihöyrynläpäisykerroin Wv tai Wp ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien tilatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Yksikköinä käytetään $Wv = [\text{m}/\text{s}]$ ja $Wp = [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ /1/.
Vesihöyryn osapaine	Vesihöyryn paineen osuus koko ilmanpaineesta [Pa] /3/.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastuksella Zv tai Zp tarkoitetaan vesihöyrynläpäisykertoimen käänteisarvoa. Yksikköinä käytetään $Zv = [\text{s}/\text{m}]$ ja $Zp = [\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}]$ /1/.
Vesihöyrypitoisuus	Ilman sisältämä vesihöyrypitoisuus v ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän vesihöyrypitoisuutena $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Vesihöyrypitoisuus p_v ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden vesihöyryn osapaineena [Pa] /1/.

1 JOHDANTO

Rakennuksen katto ja seinät altistuvat käyttökänsä aikana erilaisille rasituksille, kuten kosteuden ja lämpötilan vaihteluille. Kosteus on rakenteille yleisin rasitus-tekijä, mikä voi aiheuttaa rakenteen turmeltumisen. Turmeltumisen korjaaminen tai ehkäiseminen on suunniteltava tapauskohtaisesti. Korjaamisen taustalla on rakennusmateriaalien uusiminen ja ehkäisemisen taustalla rakenteiden toimintaperiaatteiden tunteminen. Käytettävien rakennusmateriaalien ominaisuudet ja ympäristöolosuhteet on myös tunnettava. Rakenteen toimivuuden tarkastelun apuvälineeksi on tehty simulointi, laskenta- ja mitoitusohjelmistoja, kuten DOF-lämpö ja COMSOL Multiphysics /4/.

Vaasan kirkon räystäärakenteeseen on ilmaantunut kosteusvauriota jokaisen pilasterin kohdalle. Kosteusvaurion syitä on pyritty selvittämään avaamalla kattorakennetta ja paikallistamalla mahdollisia vuotokohtia kuparikatteesta. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Vaasan kirkon kosteusvaurion aiheutuminen ja simuloida vastaava tilanne COMSOL Multiphysics 5.4 -ohjelmistoon, jolla voi tarkastella lämmön ja kosteuden yhteisvaikutusta. Ja ottaa selvää simulaation kautta kuinka mahdolliset korjaustoimenpiteet muuttavat tilannetta. Vaasan kirkon räystäärakenteen toimintaa parannetaan mahdollisesti perustuen tämän opinnäytetyön tuloksiin /5/.

Tämä opinnäytetyö on hankkeistettu ja tehdään Contria Oy:lle. Contria Oy on vuonna 2009 perustettu Vaasassa ja Seinäjoella toimiva rakennusalan konsultti-toimisto, jonka päätoimiala on rakennesuunnittelu. Yritys on erikoistunut myös rakennusfysiikkaan ja BIM-tietomallinnukseen ja on osa Solwers-konsernia /6/.

2 VAASAN KIRKON KOSTEUSVAURIO

Vaasan kirkon on aikoinaan suunnitellut Carl-Axel Setterberg ja se valmistui käyttöön vuonna 1862. Rakennukselle on tehty laajat peruskorjaukset vuosina 1960–1961, ja viimeisin vuonna 2000. Vuosien 1960–1961 suurin uudistus oli, että kirkkoon rakennettiin kellari. Vuoden 2000 laajassa peruskorjausprojektissa Vaasan kirkkoon asennettiin kaukolämmöllä toimiva lattialämmitys ja yläpohjan muun muassa 100 mm sahanpurua sisältänyt eristyskerros vaihdettiin yhteensä 225 mm paksuun mineraalivillalevy kerrokseen. Kirkkosalissa ja lehterillä on istumapaikkoja yhteensä 900:lle hengelle. Salin seinien sisäpintojen mukaan laskettu pinta-ala on 682 m². Rakennuksen harjakorkeus on 20,8 metriä ja kellotornin 41 metriä. Kirkko on rakennettu täystiilistä ja seinän paksuus on 770 mm, mutta pilasterin kohdalla jopa 1210 mm. Kirkon ikkunoissa on vain yksi lasikerros. Muurauksessa on käytetty kalkkilaastia, joka on valmistettu kalkista, hiekasta ja vedestä. /7/.

Rakennuksen itäisen ja läntisen julkisivun räystäslislojen alle on tullut kosteusvaurioita lähes jokaisen pilasterin kohdalle (Kuva 1). Pilasterit ovat muuta seinää ulompana olevia koristeena toimiva pilareita, jotka tulevat katteen läpi. Vaurioissa on näkyvissä laastin rapautumista, irronneita tiiliä sekä laastin suojojen muodostamaa suolahärmää /4/.

2.1 Vaurioituminen yläpohjan tasalla

Vaurion syy on ilmeisesti viistosateen osuminen pilasterirakenteeseen, joka jatkuu suojaamattomana kattopinnan yläpuolella metrin verran. Samantapaisia ongelmia on havaittu esiintyvän myös suojaamattomissa savupiipuissa. Vaurioon vaikuttaa myös räystään muoto, joka ei estä viistosateen osumista seinän ylimpiin osiin. Kylminä aikoina sisäilman lämpö virtaa helpoimman reitin kohdalta ulos, jolloin itse pilasteriin ei siirry lämpöä. Tuolloin on myös yleistä, että lämpö vaihtelee nol-larajan eri puolilla, jolloin rakenteissa tapahtuu toistuvaa jäätymistä ja sulamista. Lämpiminä aikoina viistosade osuu pakkasen rapauttamiin laastisaumoihin, josta imeytyy sisään enemmän kosteutta kuin ehyistä saumoista /8/.

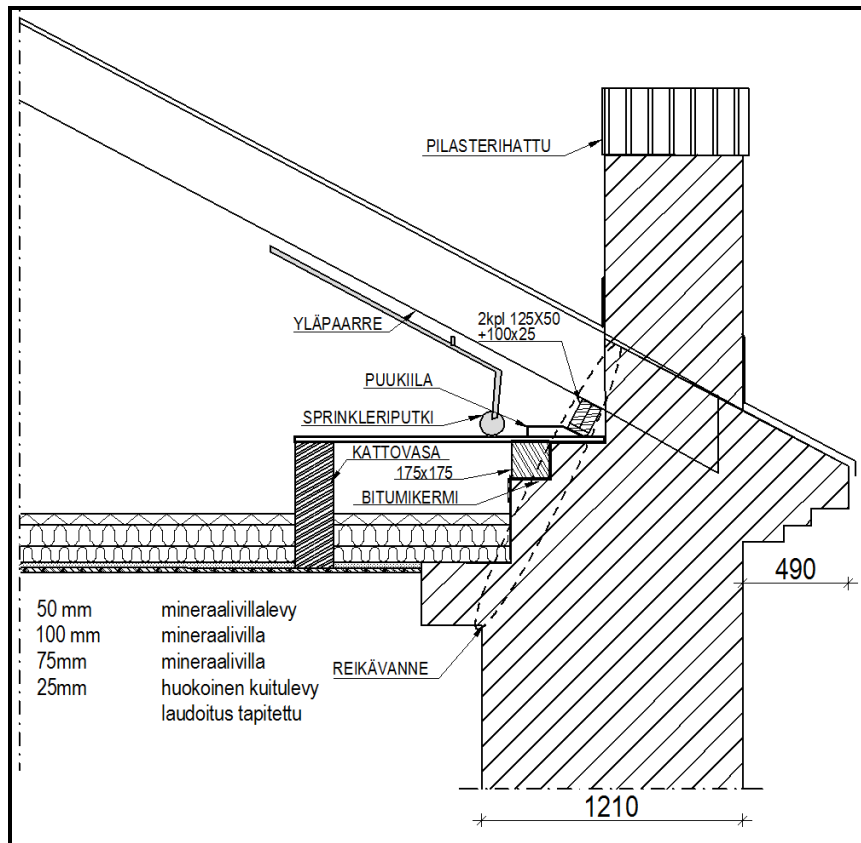


Kuva 1. Vaasan kirkko ja kosteusvaurio räystäään alla /9/.

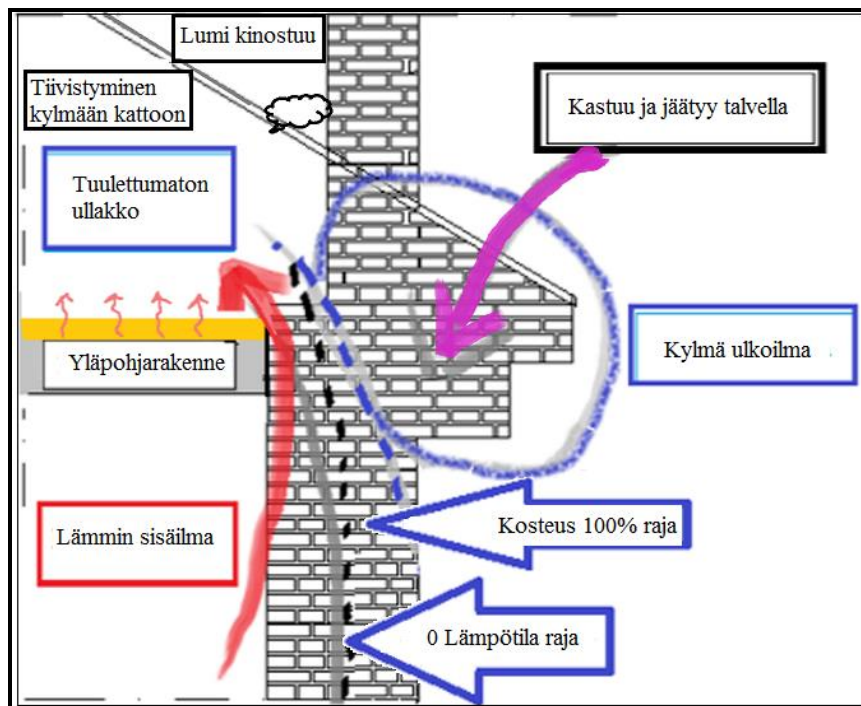
Kattona on konesaumattu kuparikate, jossa ei ole aluskatetta. Konesaumattun katon saumat joutuvat vuodenaikojen vaihtelun takia kovalle rasitukselle ja saumaan mennyt vesi vaurioittaa saumaa toistuvan jäätyamisen ja sulamisen seurauksena. Tämän lisäksi konesaumattu katto ei kestä paineellista vettä, eli seisova vesi pääsee saumoista sisään. Peltikaton ja profiilikaton toiminta perustuu toimivaan aluskatteeseen, joka ohjaa katteen läpi tulevan sekä alapintaan tiivistyvän veden ulkoseinälinjan ulkopuolelle. Nykyinen rakenne kuvassa (Kuva 2) /10/.

2.2 Tutkimuksen tehtävät ja tavoitteet

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää millainen korjaustoimenpide estää kosteusvaurioitumisen jatkumisen mittausten, laskelmien ja COMSOL Multiphysics 5.4 -simuloinnin avulla. Rakenteesta hankitaan tietoa rakennusfysikaalisilla mittauksilla sekä tutkimuksilla. Suoritettavina mittauksina ovat lämpökamerakuvaus, kosteus- ja lämpötilamittaukset ullakolla ja kirkkosalissa sekä porareikämittaukset räystäsrakenteen kohdalta. Nämä mittaukset antavat suuntaa sille, mitä simulaatiossa tulee ottaa huomioon. Rakenteen vaurioituminen talvella kuvassa (Kuva 3).



Kuva 2. Rakenneleikkaus pilasterin kohdalta.



Kuva 3. Vaurioitumisen syntyminen kirkon seinässä.

3 RAKENTEIDEN TOIMINTAPERIAATTEET

Ennen vaurion tutkimista on ymmärrettävä, mitkä asiat ovat keskeisiä vaurion syntymiseen ja etenemiseen vaikuttavia tekijöitä. Rakennuksien on kestävä vuodenaikojen vaihtelun aiheuttamia ympäristöolosuhteita, jolloin vaipan rakenteet voivat altistua mm. pitkäaikaiselle vesirasitukselle tai pakkasrasituksille. Sisätiloissa oleva ilman vesihöyry ei saa tiivistyä rakenteen pinnassa tai sen sisällä. Eli rakenteen kastumisen tulee olla estettyä ja kuivuminen mahdollista /3/.

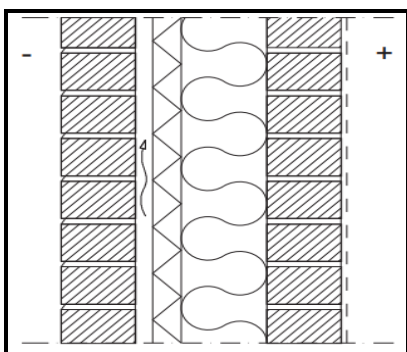
RT-kortistoon on koottu tietoa ja ohjeita rakenteista ja niiden toimintaperiaatteista. RT-korttien lähteenä ovat mm. SFS-EN-standardeissa esiintyvät tuotteiden vaatimukset sekä ympäristöministeriön rakentamismääräyskokoelma. Nykyaikaisten rakennusten suunnittelussa näitä ohjeita käytetään oikeaoppisen rakentamisen lähtökohtana. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti yläpohjan, ulkoseinän ja vesikaton toimintaan. Kirkon nykyisten rakenteiden toimintaa voidaan tarkastella verraten niitä RT-korteissa esitettyihin rakentamisohjeisiin /11/.

3.1 Alapohja ja maanvastainen rakenne

Sade- ja sulamisvesi ohjataan pois päin rakennuksesta maanpinnan muotoilun, sekä hulevesikaivon ja viemärin avulla. Maanpintaa kallistetaan kolmen metrin matkalla 15 senttimetriä. Rakennuksen maanalaisten osien kastumista voidaan vähentää, jos rakennetaan kosteutta ehkäisevä kehä salaojilla, sokkelilevyllä, suodattinkankaalla sekä soralla, jossa on heikko kapillaarinen nousukyky. Näin pyritään estämään kosteuden virtaaminen rakenteen läpi. Rakennuksen alta ja vierestä on poistettava humusmaa sekä lahoavat orgaaniset aineet. Maanalaisten osien on kestävä kastumisen ja vedenpaineen aiheuttamat rasitukset muuttamatta niiden ominaisuuksia tai muotoa. Kellarin seinärakenteen on pyrittävä estämään kosteuden haitallinen tunkeutuminen rakenteeseen. Maanalaisille kastuville rakenteille on mahdollistettava kuivuminen sisään päin, joten rakennetta ei tulisi pintakäsittellä vesihöyryä läpäisemättömäksi. Lämpöeristäminen auttaa nostamaan kantavan rungon lämpötilaa ja alentaa suhteellista kosteutta, jos kellarissa on lämmitysjärjestelmä. Maanvastaisen rakenteen toiminta esitetään liitteessä (Liite 8) /11, 12/.

3.2 Ulkoseinä

Seinän vesihöyrynvastuksen ja ilmatiiveyden on oltava niin suuri, ettei sisäilman vesihöyry virtaa sinne ja aiheuta siinä haitallista kastumista. Jos seinärakenne voi läpäistä haitallisen määrän sisäilman kosteutta, on seinään asennettava tuulensuojana, höyryn- ja ilmasulkuna toimivat kerrokset. Sulkujen saumat, reunat ja läpivientikohdat on tiivistettävä huolellisesti. Seinän rakenteen on kyettävä kuivumaan ulospäin, joten on tuulensuojalevyn vesihöyrynvastuksen oltava niin pieni, ettei se hidasta sisempien osien kuivumista. Rakenteen suositeltava ilmasulun ilmanläpäisykerroin enintään $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ Rakenteen tuulensuoja rakenteen ilmanläpäisykerroin enintään $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Kuvassa on esitetty RT-kortissa RT 82-11006 esiintyvä tiiliseinä, jossa 85 mm ulkoverhous, 30 mm tuuletusväli, 50 mm tuulensuoja, 150 mm lämmöneriste ja 130 mm kantava rakenne (Kuva 4) /13/.



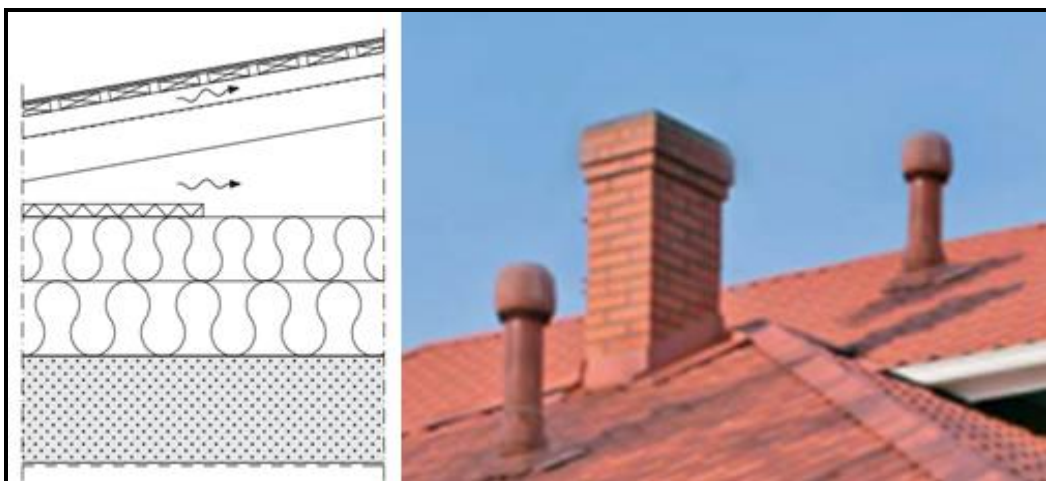
Kuva 4. Tiiliseinän rakenneleikkaus /13/.

3.3 Yläpohja ja vesikatto

Yläpohjan rakennekerrokset ja tuulettuminen on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei sinne ala kerääntymään kosteutta. Vesihöyryn eteneminen estetään lämmöneristyksen alle asennettavalla höyrynsululla ja ilmanvirtaus estetään ilmasululla. Höyrynsulkumuovissa höyrynsulku ja ilmansulku ovat samassa materiaalissa. Yläpohjan ilmansulku liitetään seinien ilmansulkuihin ja liittymät tiivistetään. Yläpohja tuuletetaan räystäään kohdalta sekä katon harjalla olevilla tuuletusaukoilla. Tuuletusaukko kiertää koko talon ympäri ja aukon on oltava vähintään 30 mm korkea /14/.

Tuuletus ohjaa ulkoilmaa yläpohjaan, jolloin ilmaan sitoutuu yläpohjan kosteutta. Kosteutta sitonut ilma ohjataan ulos katon ylimmistä osista. Luonnollisessa tuuletuksessa ilma etenee tuulen avulla ja nousee seinää pitkin räystäään alla sijaitsevaan tuuletusaukkoon. Ilma poistuu katon harjan alapuolella olevasta korvausilma-aukosta tai katolle asennettavista alipainetuulettimista (Kuva 5). Tuuli muodostaa paineen sille pinnalle, jolle se osuu, ja alipaineen rakennuksen toiselle puolelle. Alipaine imee räystäään tuuletusaukosta ullakolla olevaa ilmaa ulos /14/.

Vesikattorakenteen on estettävä sateen, lumen ja sulamisveden läpäisy yläpohjan rakenteisiin sekä seiniin. Räystäiden on oltava niin ulkonevia, että ne estävät kattoveden valumisen seinille. Sadeveden on poistuttava katon räystäskourusta syökytorveen, josta sadevesikaivoon. Jos katolla ei ole räystäskourua, kattovesi valuu maanpinnan kallistuksen kautta kauemmaksi rakennuksesta. Vesikaton suositeltu vähimmäiskaltevuus metalliselle poimulevykatteelle on 1:4 eli 14 astetta ja ohutlevykatteelle 1:6 eli 9,5 astetta. Ruuveilla tai nauloilla kiinnitettävä kate ei ole vesitiivis. Tämän takia katteen alapuolella on oltava aluskate, joka on valmistettu esimerkiksi laminoidusta kuitukankaasta. Aluskate hylkii yläpuolelta tulevaa kosteutta ja sitoo alapuolelta tulevaa kosteutta, joka haihtuu kankaan läpi tuuletusväliin. Rakenne-esimerkki on esitetty kuvassa, jossa rakenteen osina ovat peltikate, vaimennuskaista, ruodelaudoitus, tuuletusväli, korokerimat, aluskate, kattokannattajat, tuulensuojalevy, lämmöneriste sekä kantava rakenne (Kuva 5) /14/.



Kuva 5. Yläpohjarakenne RT YP 411, ja alipainetuuletin /14, 15/.

4 RAKENTEEN KASTUMINEN JA KUIVUMINEN

Ulkoseinärakenteen kosteuspitoisuus on tasapainossa ympäröivän ilman kanssa, kun niiden suhteelliset kosteudet RH [%] ovat saman suuruiset. Ilman kosteutta ilmaistaan ilman suhteellisella kosteudella RH [%] sekä ilman absoluuttisella kosteus sisällöllä [g/m^3]. Suhteellinen kosteus kertoo, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä suhteessa siihen, miten paljon se voi sisältää vesihöyryä vallitsevassa lämpötilassa. Luonnossa suurempi kosteuspitoisuus pyrkii tasapainoon alemman kosteuspitoisuuden kanssa siten, että suurempi etenee pienempään. Samanlainen ilmiö tapahtuu myös korkean ja alhaisen lämmön sekä paineen kanssa, kun lämmin etenee kylmempään /16/.

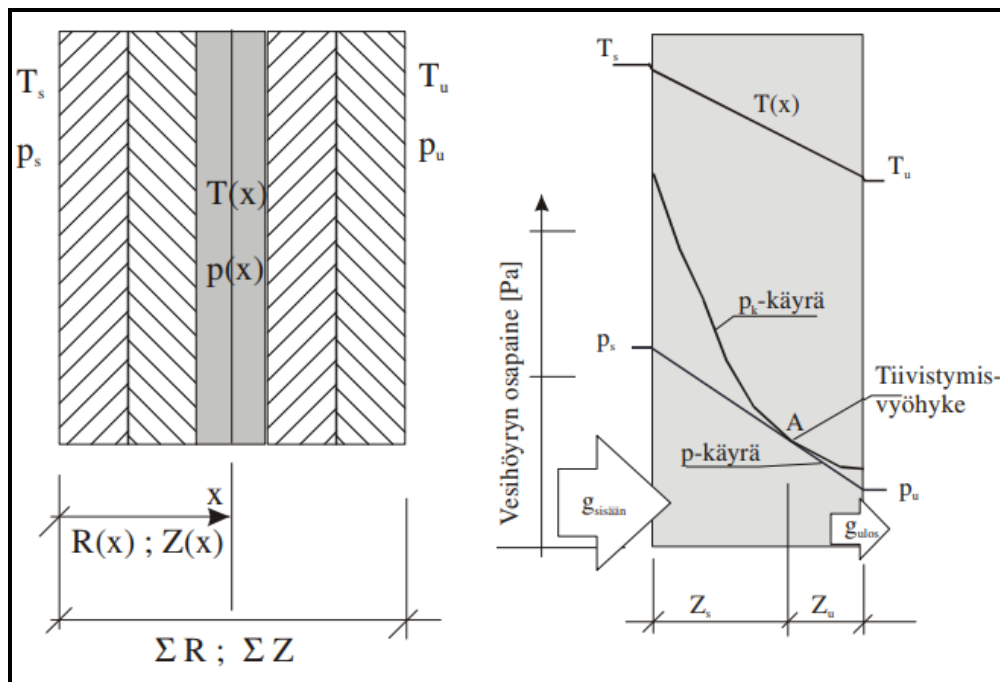
Rakenteen kastumiseen ja kuivumisnopeuteen vaikuttavat rakenteen mitat, aineominaisuudet sekä ympäristöolosuhteet. Rakenteessa ja sen pinnoilla tapahtuvia muutoksia voidaan tutkia rakennusfysiikan avulla. Kirjoissa tai muissa lähteissä esitetään usein ristiriitaisia arvoja muuttujille. Laskelmien perusteella voidaan kuitenkin päästä sellaisiin tuloksiin, mitä rakenteessa mahdollisesti tapahtuu tietyn virhemarginaalin sisällä. Minimi vesihöyrynläpäisevyysarvolla laskemisessa rakenne voidaan mahdollisesti todeta sellaiseksi, ettei siinä tapahdu tiivistymistä. Tästä huolimatta rakenteessa voi todellisuudessa tapahtua tiivistymistä. Rakennuksen sisätiloissa tapahtuville muuttujille on myös oletusarvot, kuten rakennuksen käyttötavan perusteella määritelty lisäkosteus sisäilmaan /16/.

4.1 Tiivistyminen

Osa ilmassa olevasta vesihöyrystä tiivistyy rakenteessa, kun rakenteen lämpötilaa vastaava kyllästymispaine on alhaisempi kuin ilman vesihöyryn osapaine. Tämä on yleensä merkittävin rakenteen kosteutta kasvattava ilmiö. Rakenteessa lämpötila siirtyy pääasiassa johtumalla, jossa lämpö siirtyy aineen sisällä tai aineesta aineeseen materiaalin molekyylien välityksellä korkeammasta matalampaan. Lämmin ilma pystyy sitomaan enemmän kosteutta kuin kylmä ilma. Liitteen 1 taulukossa on esitetty maksimi vesihöyrypitoisuudet [g/m^3] tietyssä lämpötilassa [$^{\circ}\text{C}$]. Rakenteessa tiivistyminen tapahtuu yleensä kahden eri materiaalin yhtymäkohdassa, koska materiaaleilla on eri vesihöyrynläpäisevyys ja lämmönjohtavuus ar-

vot. Tiivistyminen voi tapahtua myös seinän pinnassa, ikkunassa tai yläpohjarakenteiden pinnoissa. Tiivistymistä seinärakenteessa voidaan estää paikkaamalla mahdolliset ilmavuotokohdat sekä alentamalla sisäilman kosteutta lisäämällä ilmanvaihtoa, joka poistaa kostean sisäilman ulos ja tuo kuivempaa ulkoilmaa tilalle /16/.

Kun tarkastellaan vesihöyryn mahdollista tiivistymistä rakenteen tietyssä tarkastuspisteessä, on siitä määriteltävä vallitsevat lämpötila [°C] sekä vesihöyryn osapaine [Pa]. Rakenteessa tapahtuu tiivistymistä, jos vesihöyryn osapaineen käyrä leikkaa vesihöyryn kyllästymiskäyrän (Kuva 6). Vallitsevaa lämpötilaa vastaava kyllästymisospaine määrittää kuinka paljon vallitsevasta vesihöyryn osapaineesta tiivistyy vedeksi [g/m³] /16/.



Kuva 6. Tiivistyminen rakenteeseen kohtaan (x) /16/.

Tiivistymisen määrän laskemiseen tarvittavat materiaalien ominaisuuksia ovat:

δ_p	vesihöyryn läpäisevyys [kg/m · s · Pa]
λ	rakenteen lämmönjohtavuus [W/m · °C]
d	rakenne osan paksuus [m]

Näistä ominaisuuksista johdetaan edelleen kaavat:

Ainekerroksen vesihöyryn vastus Z_p [$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$] /kg]

$$Z_p = (d/\delta_p) = (1/W_p) \quad (1)$$

, jossa W_p vesihöyrynläpäisykerroin [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

Rakenne osan lämmönvastus R [$\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$]

$$R = d/\lambda \quad (2)$$

Näiden ominaisuuksien lisäksi on otettava selvää ympäristöolosuhteista, jotka vaikuttavat rakennuksen ulkopintaan ja sisäpintaan.

p_s, p_u vesihöyryn osapaine sisä- ja ulkoilma [Pa]

T_s, T_u sisä- ja ulkoilman lämpötilat [°C]

Lämpötila rakenteen tarkastelupisteessä $T(x)$ [°C] lasketaan koko rakenteen lämmönvastuksen sekä sisäpinnan ja rakenteen sisäiseen tarkastelupisteen välillä olevien kerrosten lämmönvastusten summan suhdeluvulla [-], sekä sisä- ja ulkoilman lämpötiloilla [°C] /16/.

$$T(x) = T_s - \frac{R(x)}{\Sigma R} \cdot (T_s - T_u) \quad (3)$$

Vesihöyrynosapaine tarkastelupisteessä $p(x)$ [Pa] lasketaan koko rakenteen vesihöyryn vastuksen sekä sisäpinnan ja rakenteen sisäiseen tarkastelupisteen välillä olevien kerrosten vesihöyryjen summan suhdeluvulla [-] /16/.

$$p(x) = p_s - \frac{Z(x)}{\Sigma Z} \cdot (p_s - p_u) \quad (4)$$

Jos tiivistymistä tapahtuu, laskeminen jatkuu tiivistymismäärän g_{tiiv} [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] laskennalla. Lausekkeessa ensimmäinen osa $(p_s - p_A)/Z_s$ kuvaa rakenteeseen tulevaa ja tiivistyvää kosteutta ja toinen osa $(p_A - p_u)/Z_u$ kuvaa rakenteesta diffuusion avulla poistuvaa kosteutta /16/.

$$g_{tiiv} = (p_s - p_A)/Z_s - (p_A - p_u)/Z_u \quad (5)$$

4.2 Kosteuden sitoutuminen

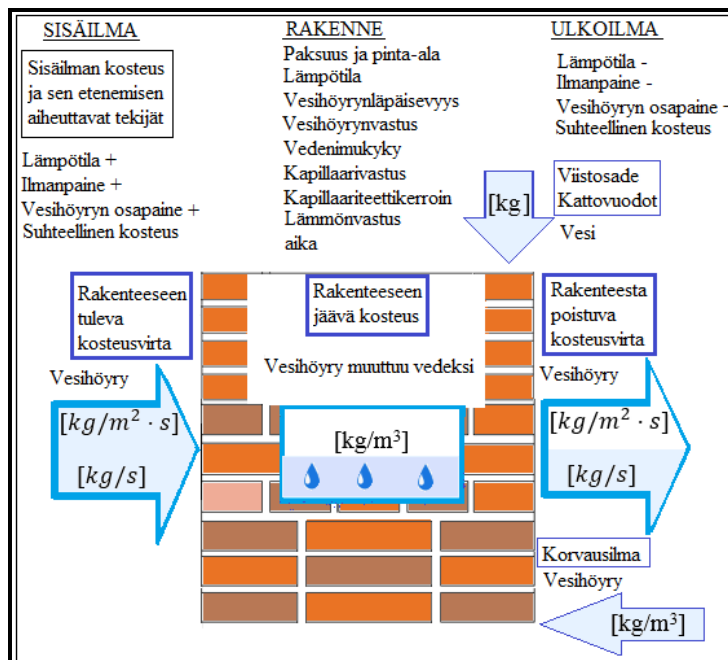
Rakenteen kosteudensitomiskyvystä voidaan määrittää kuinka paljon kosteutta voi sitoutua rakenteeseen ennen kuin kosteuspitoisuus nousee niin korkeaksi, että vaurioituminen on mahdollista. Rakennusmateriaaleille tämä on määritetty kriittisen kosteuspitoisuuden rajana. Erilaiset vauriot alkavat tapahtua eri kosteuspitoisuuksissa ja eri materiaalit vaurioituvat eri tavalla. Kosteuden ja lämmön yhteisvaikutus aiheuttaa valtaosan rakennusten vaurioista, joita ovat esimerkiksi home, korrosio ja laho. Kosteuden ja pakkasen aiheuttamia vaurioita ovat kivirakenteen pakkasrapautuminen ja maan routimisen aiheuttamat siirtymiset /16/.

Useimmilla rakentamiseen käytetyillä materiaaleilla on oma tasapainokosteuskäyrä, jossa kuvataan materiaalin kostumista ja kuivumista hygroskooppisella alueella 0–98 % +20 °C lämpötilassa. Liitteessä esitetään tiilen tasapainokosteuskäyrä (Liite 7). Materiaalin kosteuspitoisuus w [kg/m^3] kasvaa, kun ilman suhteellinen kosteuspitoisuus RH [%] kasvaa ja vastaavasti kuivuu, kun ympäröivän ilman suhteellinen kosteus pienenee. Kostumisessa huokosen pintaan alkaa kiinnittymään vesimolekyylejä luoden ohuen vesikalvon huokosen pintaan, joka kasvaa RH [%] kasvaessa. Kun vesimolekyylikerros on muodostunut, niin sen päälle alkaa muodostumaan toinen vesimolekyylikerros jne. Mutta vaikka huokosverkostossa on vesikalvo, niin se pystyy sisältämään vesihöyryä, jonka RH [%] on sama materiaalia ympäröivällä ilmalla. Jos yksi kuutio materiaalia sisältäisi pelkää vesihöyryä, kun RH 50 % 20 °C lämpötilassa, niin siinä olisi alle 9 grammaa vettä. Esimerkiksi betonissa on 40 litraa vettä, kun RH on 50 % 20 °C lämpötilassa. Materiaalin huokosten sisältämän ilman vesihöyrypitoisuus asettuu stationääritilassa tasapainoon materiaalia ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuuden kanssa. Kastumisen ja kuivumisen tasapainokosteuskäyrä liikkuu eri kohdassa siten, että materiaali kuivussa kosteuspitoisuus pysyy korkeammalla kuin kostumisessa. Materiaalin kosteuden ollessa yli 98 % kosteus alkaa edetä myös vetenä, ja huokokset alkavat täyttyä liikkuvalla vedellä. Materiaalin kosteus on tällöin kapillaarisella alueella. Rakenteen huokosten tilavuus on täyttynyt kokonaan vedellä, kun kosteus on 100 %. Tiili kykenee imemään vettä 7–20 %, mutta laskennassa käytetään arvoa $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ /1, 16, 17/.

4.3 Kosteusvirta

Rakenteen kosteuspitoisuuteen vaikuttaa rakenteeseen tuleva kosteusvirta, rakenteesta poistuva kosteusvirta sekä rakenteen kyky sitoa kosteutta. Kosteusvirrassa kosteus etenee rakenteen huokosverkostossa vesihöyrynä tai vetenä. Rakenne alkaa kostumaan kyllästymispitoisuuteen asti silloin, kun rakenteeseen tuleva kosteusvirta on suurempi kuin siitä poistuva. Kosteuden tiivistymiseen vaikuttaa rakenteen lämmönvastus, sisäpinnan lämmönvastus, sisäilman kosteuspitoisuus sekä ulkoilman lämpötila. Rakenteen kasuessa materiaalin lämmönjohtokyky kasvaa, koska veden lämmönjohtokyky on noin 25 kertaa suurempi kuin ilman. Lämmönjohtavuuden kasvaessa sisäilman lämpö virtaa nopeammin ulkopuolen alhaisemman lämpötilan suuntaan. Rakenteen lämmön kasvaessa se alkaa kuivumaan nopeammin. Kosteusvirta esitetty kuvassa (Kuva 7) /5, 12/.

Kyllästyminen on tapahtunut silloin, kun rakenteessa olevat huokokset ovat täyttyneet vedellä. Etenemiseen vaikuttavat tekijät ovat: vedenpaine, tuulenpaine, kapillaarisuus sekä vesihöyryn osapaine-erot. Vesihöyry, joka on rakenteen huokosisa, pääsee liikkumaan diffuusion ja konvektion avulla /5, 9, 12/.



Kuva 7. Kosteusvirtaus rakenteessa, kun rakenne ei kuivu riittävän nopeasti.

4.3.1 Konvektio

Vesihöyryn etenemisen aiheuttaa pääasiassa konvektio, jossa vesihöyry kulkeutuu ilmavirtauksen mukana rakenteen läpi (Kuva 8). Konvektion aiheuttaa paine-erot, tuuli sekä LVI-tekniikka. Ilmavirtaukset voidaan jakaa kahteen ryhmään: rakennevirtauksiin ja läpivirtauksiin. Rakennevirtauksessa ilma tulee rakenteeseen ulkoa ja poistuu ulos. Esimerkiksi seinän sisällä voi olla ilmavirtaus, joka ei pääse ilmasulun läpi sisätiloihin. Läpivirtauksessa ilma virtaa rakenteen läpi sisältä ulos tai ulkoa sisälle. Läpivirtausta ei ole, jos rakenne on ilmatiivis. Tiivistävän kerroksen, kuten muovikalvon, on parasta sijaita mahdollisimman lähellä sisätilaa. Puurunkoisessa seinärakenteessa muovikalvo asennetaan 50 mm etäisyydelle seinästä, jotta pistorasia asennukset eivät rikkoisi muovioita. Rakenteet, jotka ovat ilmatiiviitä, kuten betonirakenne, eivät tarvitse erillistä tiivistävää kerrosta. Konvektiolla on kuivattava vaikutus, kun lämmin ilmavirta läpäisee rakenteen sitoen kosteutta itseensä. Kuivumista tapahtuu myös, kun korvausilma lämpenee virratessa rakenteen läpi ulkoa sisälle. Kesällä konvektio voi aiheuttaa vesihöyryn tiivistymistä, kun lämmin ilma virtaa ulkoilmaa viileämpään tuulettuvaan alapohjaan /4, 5/.

4.3.2 Diffuusio

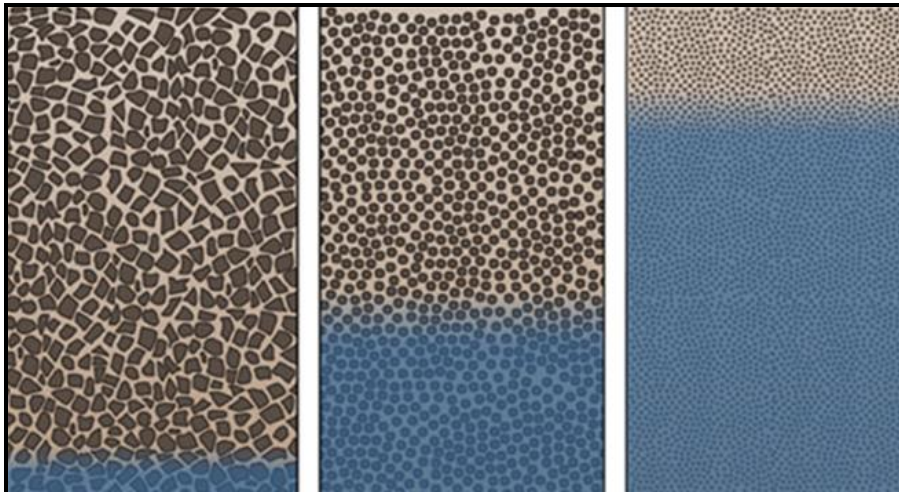
Kosteuden eteneminen diffuusiolla tarkoittaa vesihöyryn siirtymistä rakenteen huokosverkostossa sen koko pinta-alan läpi. Tämän aiheuttaa rakenteen eri puolilla olevien vesihöyryn osapaineiden paine-erot. Kosteus pyrkii siirtymään korkeamman vesihöyryn osapaineisesta ilmasta alempi osapaineiseen ilmaan, kunnes osapaineet ovat tasapainossa. Rakenne, jonka RH on alle 98 % alkaa kuivua diffuusion avulla, kunnes huokosten ilmatilan suhteellinen kosteus on asettunut tasapainoon rakennetta ympäröivän ilman kanssa. Talvella diffuusio tapahtuu sisältä ulos päin, koska ulkoilman vesihöyryn osapaine on pienempi kuin sisäilman vesihöyryn osapaine. Kesällä diffuusiota voi tapahtua myös ulkoa sisälle. Sisään ja ulos siirtyvä kosteus on lähes tasapainossa, kun seinässä on höyrysulku. Rakenteen lämmitessä huokosverkoston sisältämä vesihöyryn osapaine kasvaa ja vesihöyryn liike ulos voimistuu. Diffuusion aiheuttama kosteusvirta on vähäistä verrattuna muihin kosteusvirran aiheuttajiin /4, 5/.

4.3.3 Kapillaarinen siirtyminen

Kun kapillaarinen materiaali on kosketuksessa veden kanssa, se alkaa imeä vettä itseensä. Lämpötilan on tuolloin oltava yli 0 °C. Vesi nousee kapillaarisesti painovoiman vastaiseen suuntaan niin kauan, että imeytyneen vesipatsaan paino on tasapainossa imuvoiman kanssa. Rakenne voi kuitenkin kuivua ympäröivään ilmaan tietyssä rajassa, jolloin tasapaino syntyy haihtumisen ja kapillaarisen nousukorkeuden välille. Vesi liikkuu huukosissa, jotka toimivat kapillaariputkina. Mitä pienempi huokonen, sitä suurempi kapillaarinen imeytyminen. Esimerkiksi tiilen kapillaarinen vedentunkeutumiskerroin voi olla yli kymmenen kertaa suurempi kuin betonilla. Huukokset imevät vettä kaikkiin suuntiin, mutta painovoiman vastaisessa suunnassa vain tiettyyn nousukorkeuteen asti. Kosteus etenee rakenteen läpi pinnasta pintaan, jos kastuminen jatkuu tarpeeksi kauan. Rakenne, jonka RH on yli 98 % alkaa kuivua kapillaarisen siirtymisen avulla. Kun vesi siirtyy kapillaariverkostoa pitkin materiaalin pintaan, se haihtuu pois. Rakenteen pinta pysyy kosteana, kun sen kriittinen kosteuspitoisuus ylittyy. Korkea kapillaarisuus aiheuttaa nesteen nopean siirtymisen, joten pinta pysyy kosteana kauemmin kuin materiaalilla, jolla on heikko kapillaarinen siirtokyky. Rakenteen kuivuminen on nopeampaa, jos sen pintaan siirtyy vettä sen sisältä. Kapillaariset nousukorkeudet esitetty kuvassa (Kuva 9) /4, 5/.



Kuva 8. Vesihöyryn eteneminen kivivillan läpi /18/.



Kuva 9. Kapillaarinen nousu eri maa-aineksissa /19/.

4.3.4 Painovoimainen siirtyminen

Vesi etenee painovoiman vaikutuksesta mm. katolla, räystäissä, salaojaputkissa, raoissa, halkeamissa sekä saumoissa. Painovoima on kapillaarista voimaa heikompi, mutta joillakin materiaaleilla ei ole kapillaarisia ominaisuuksia, kuten lasilla ja metallilla. Kun kapillaarinen materiaali ei ole enää kosketuksissa vesipinnan kanssa, vesi alkaa valua painovoiman takia pois. Suuri osa vedestä poistuu valumalla, ja rakenteen kosteus alkaa tasoittua ympäröivän ilman kanssa. Kapillaarisesti tai muuten kyllästyneeseen rakenteeseen tuleva lisäkosteus valuu painovoiman vaikutuksesta alas /1, 3/.

4.4 Kosteuden lähteet

Kosteudenlähteet jaotellaan ulkoisiin ja sisäisiin kosteudenlähteisiin. Kosteus tulee rakenteeseen ulkoa kiinteänä, nesteinä, sekä vesihöyrynä. Lumi ja jää ovat kiinteitä kosteudenlähteitä. Nestemäisen veden lähde on kapillaarinen nousu maaperästä ja sade, joka jaetaan pystysuoraan sateeseen ja viistosateeseen. Vesihöyry tulee sisä- tai ulkoilman sisältämästä vesihöyrystä. Rakennuksen sisällä on yleensä enemmän kosteutta kuin ulkona. Suhteellinen kosteus on silti alhaisempi, sillä lämpimään sisäilmaan mahtuu enemmän kosteutta. Ilmankosteuteen vaikuttaa ulkoilman vesihöyrypitoisuus, sisällä kehittyvä kosteus sekä ilmanvaihdon nopeus. Aikuinen ihminen kehittää kosteutta huoneenlämmössä noin 1–3 l/vrk. Sisällä ke-

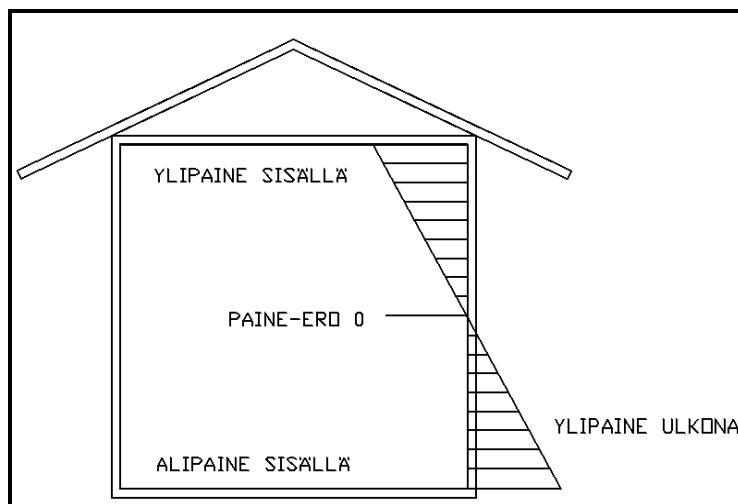
hittävä kosteus kuvataan laskelmissa kosteuslisänä [g/m^3] esimerkiksi asuinrakennuksissa ja kokoontumistiloissa $5 \text{ g}/\text{m}^3$ varastoissa $3 \text{ g}/\text{m}^3$. Ilmanvaihto siirtää kosteaa sisäilmaa pihalle ja ottaa kuivempaa ulkoilmaa sisälle, mikä alentaa sisäilman kosteuspitoisuutta /1, 20/.

Sademäärä kertoo, paljonko vettä on tullut tietyllä alueella vetenä, lumena tai räntänä. Kun sade tulee vetenä, ilmoitetaan se kertymänä [mm] tai intensiteettinä [mm/h]. Sateen tullessa katolle, pihalle tai muulle vaakapinnalle, kutsutaan sitä pystysuoraksi sateeksi. Sadevesi voi tunkeutua rakenteeseen mm. savupiipun ja kattoikkunan epätiiviyshkohdista. Kun tuuli aiheuttaa sateeseen sivuttaisvoiman ja sade osuu seinäpintaan, kutsutaan sitä viistosateeksi. Viistosateen määrä on Suomessa noin 20–30 % pystysuoran sateen määrästä. Mutta viistosateen rasitus on suurempi saaristossa ja rannikolla kuin sisämaastossa. Viistosateen osumiseen rakennuksen seinään vaikuttaa sen korkeus, seinää suojaavien puiden ja ympäröivien rakennusten korkeus. Räystäiden pituudella voidaan estää seinien kastuminen. Viistosade voi joko imeytyä seinään tai valua alas, riippuen seinäpinnan vedenimukyvyistä. Jos seinällä on heikko imukyky, syntyy sen pintaan vesikalvo heti sateen alkaessa. Julkisivuaineet, jotka imevät viistosadetta ovat puu, tiilet, rappaus, kevytbetoni, kevytsorabetoni ja betoni. Tiiliseinä imee niin kauan vettä, että sen huokokset ovat täyttyneet vedellä eli kyllästyneet. Tämän jälkeen seinäpintaan syntyy yhtenäinen vesikalvo, jota tuulen synnyttämä paine puskee koko rakenteen läpi. Ulkoseinät kastuvat pääasiassa viistosateen vaikutuksesta ja diffuusion ja konvektion vaikutus on siihen verrattuna pieni /1, 21/.

4.5 Rakennuksen muodon vaikutus kastumiseen

Rakenteen kastumiseen ja kuivumiseen vaikuttaa myös sen korkeus, koska tuulen nopeus on korkealla suurempi. Tuuli saa viistosateen osumaan korkean rakennuksen isolle seinä pinta-alalle. Sateen lisäksi korkea rakennus altistuu myös suurille painevaihteluille. Rakennuksen sisällä oleva paine ja sen ero ulkoilman paineeseen määrättyvät tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutuksesta. Painesuhteet vaihtuvat joka päivä ja vuodenaikalla on suuri merkitys sisä- ja ulkoilman paine-eroon. Yli 10 metriä korkea tila luokitellaan kategoriaan erittäin korkeat tilat. Tällaisessa rakennuksessa yläosissa ulko- ja sisäilman lämpötila ero

nostaa sisäilman paineen normaalia painetta korkeammaksi. Normaali ilmanpaine on 101 325 Pa. Paine kasvaa koska kostea lämmin ilma on kuivaa ilmaa kevyempää, ja pyrkii täten nousemaan ylöspäin. Tätä ilmiötä kutsutaan savupiippuvaikutukseksi, joka taas aiheuttaa painovoimaisen ilmanvaihdon. Ylipaineinen lämmin kostea sisäilma tunkeutuu rakenteisiin seinien yläosiin ja yläpohjaan pakotettuna konvektiona. Tämän takia yläpohjan sisäpinta ja saumat on rakennettava mahdollisimman ilmatiiviiksi. Kosteus siirtyy savupiippuvaikutuksessa myös diffuusiolla, koska ilma ja sen vesihöyry liikkuvat korkeammasta kokonaispaineesta alhaisempaan kokonaispaineeseen. Rakennuksen alaosassa alipaine imee korvausilmaa raoista ja kohdista, missä ilmantiiviys on alhainen. Kuvassa esitetty painejakauma, jossa yli- ja alipaineen välillä on neutraaliakseli, jossa sisä- ja ulkoilman paineet ovat yhtä suuret (Kuva 10) /1, 22, 23/.



Kuva 10. Paine-erot rakennuksen sisällä.

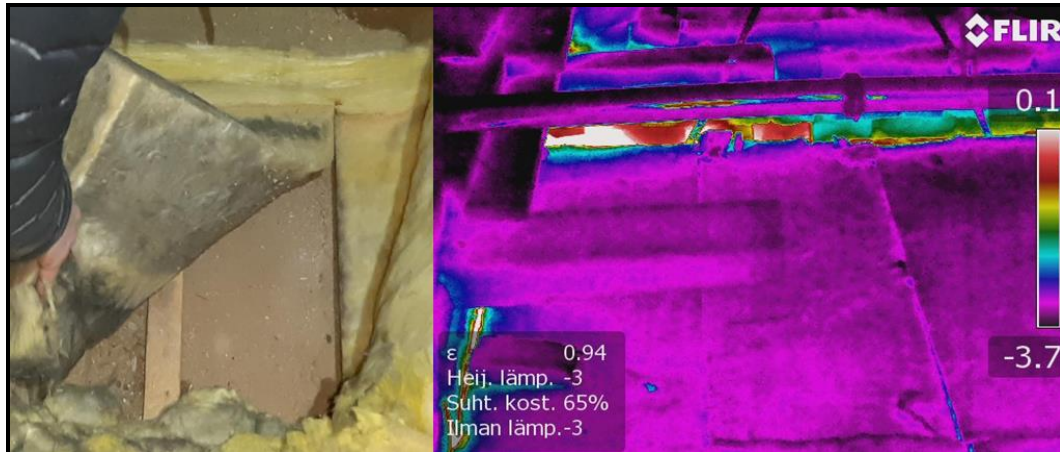
Tuuli aiheuttaa paineen sille pinnalle, johon se osuu. Muille pinnoille syntyy imuvoima (Liite 9). Tämä vaikuttaa myös rakennuksen sisäosien paineeseen, jos rakennuksen tuulen puoleinen seinä on muita epätiiviimpi, muodostuu rakennuksen sisäpuolelle ylipaine. Kun suojan puoleisilla seinillä on suurin osa ovista ja ikkunoista, niin syntyy rakennuksen sisälle alipaine. Korkeampaan rakennukseen osuva tuuli aiheuttaa enemmän painetta kuin matalaan, koska tuulen nopeus kasvaa logaritmisesti korkeuden kasvaessa. Tuuli aiheuttaa viistosateen sille seinäpinnalle mistä päin tuulee /1, 20/.

5 RAKENTEEN TUTKIMUS JA SIMULOINTI

Rakennuksessa paikan päällä suoritettavissa mittauksissa tavoitteena on määrittää rakennuksen seinän kosteuspitoisuus ja lämpötilat sekä ullakolla että sisätiloissa. Tavoitteena on myös mitata ullakon ja sisätilojen ilman kosteus ja lämpötilat (Kuva 11). Mittaustulokset toimivat apuna simuloinnin reunaehtojen määrittämisessä, sekä lähtöarvoina. Olosuhteiden määrittämiseen käytetään lämpökameraa, jolla kuvataan lämpöjakaumaa rakenteiden liittymäkohdissa. Lämpökameralla määritetään myös lämpötila- ja kosteuserot kirkkosalissa sekä ullakolla. Näitä arvoja verrataan ulkoilman vastaaviin arvoihin. Olosuhteiden määrittämiseen käytetään myös Vaisala-kosteusmittaria, jolla mitataan suhteellinen kosteus seinän sisällä räystään kohdalla ja salin puolella. Mittauslaitteena oli tarkemmin sanottuna Vaisala HMI41 indicator, jossa HMP42 probe ja kalibroidut anturit. Mittauspäivänä 24.01.2019 klo 10:40 ulkoilman RH % 73 ja lämpötila oli -13 °C.

5.1 Kohteessa suoritettut mittaukset

Liitteessä olevista kuvista voidaan päätellä, että kirkkosalin katto on rakenteen kuumin alue (Liite 6). Katossa näkyy tumma alue, joka on kosteuden aiheuttama kylmäsilta. Ullakolla otetuissa kuvissa lämpimintä on ulkoseinän pinnassa (Kuva 11). Kosteus- ja lämpötilamittausten tuloksista voidaan laskea vesihöyrypitoisuus. Ilman vesihöyrypitoisuus oli mittausajankohtana ulkona 1,22 g/m³, sisällä 2,46 g/m³ ja ullakolla 2,53 g/m³. Ullakolla olevan ilman lämpötila oli -3 °C ja RH % 65, kun ilma etenee -8,5 °C lämpötilassa olevaan rakenteen osaan on sen RH % 100. Ilman edetessä -13 °C lämpötilaan tapahtuu vesihöyryn tiivistymistä 1,31 g/m³. Tästä voidaan päätellä, että seinä ei kuivu ullakolle päin, vaan olosuhteet nostavat sen kosteutta. Höyrysuluttomassa yläpohjassa on niin vähän eristettä, että lämpö ja kosteus virtaavat ullakolle, jossa lämpötila on jopa 10 astetta korkeampi verrattuna ulkoilmaan. Porareikämittaukset osoittivat, että ullakolla seinän kosteuspitoisuus on lähes sama kuin ullakon ilman. Betoni- ja tiiliseinän kosteus voidaan määrittää mittaamalla rakenteen huokosissa olevan ilman suhteellinen kosteus. Jos rakenteen RH on yli 98 %, niin kosteus voidaan määrittää koekappaleesta. Koekappaleen paino mitataan kosteana sekä kuivattuna, minkä jälkeen voidaan määrittää kosteuspitoisuus [%] ja kosteussisältö [kg/m³] /1/.



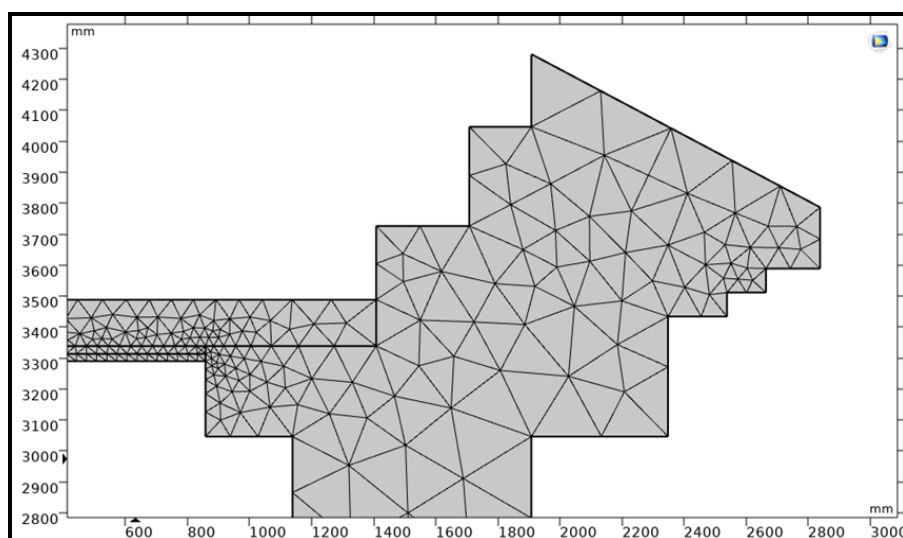
Kuva 11. Yläpohja, seinä ja katto. Ullakolla RH % = 65 ja $t = -3$ °C.

5.2 Simulointi

Comsol Multiphysics 5.4 on simulointiohjelmisto, jolla voidaan tarkastella voimien ja virtausten vaikutusta tietyt materiaaliominaisuudet omaavaan kappaleeseen tai rakenteeseen. Simulointi voidaan tehdä aikariippuvaisena, jolloin laskentaan voi yhdistää kapillaarisuuden sekä hygroskooppisuuden. Simulointia varten on määriteltävä mitä rakenteen eri pinnoilla tapahtuu, kun rakenne on tietyssä ympäristössä. Ympäristön olosuhteet, eli lähimmän sääaseman havainnot, ovat ladattavissa ilmatieteenlaitoksen internet-sivulta. Comsol -ohjelmistoon on yhdistetty ASHRAE Weather Data Viewer -sääaineisto, jossa on yli 8000 mittausaseman mittaustulokset usealta vuodelta. ASHRAE -säädatassa on tuulen nopeus, suhteellinen kosteus, ilmanpaine sekä lämpötila, muttei sademäärien arvoja /5/.

Simuloinnin vaiheet ovat ympäristön luominen, geometrian luominen, materiaaliominaisuuksien määrittäminen, reunaehtojen määrittäminen, geometrian pinnan muuttaminen laskentaverkoksi eli elementtiverkoksi, simulaation suorittaminen ja tulosten jälkikäsitely. Ympäristön luomisessa määritetään, kuinka monta akselia x-, y- ja z-akselista otetaan käyttöön geometrian rakentamisvaiheessa. Tässä vaiheessa voidaan myös määrittää mitä eri fysiikkamoduuleja käytetään simuloinnissa. Fysiikkamoduulien sisään on rakennettu osittaisdifferentiaaliyhtälöitä käyttävä ratkaisumalli, jota voidaan käyttää sekä ajasta riippuvassa tarkastelussa, että stationääritilassa. Ympäristön luomisen jälkeen avautuu näkymä mallinrakentamis työkaluihin. Comsol Multiphysics 5.4 -ohjelmisto sisältää geometrian piirtämis-

työkalun, mutta ohjelmistoon voi tuoda myös AutoCAD:illä rakennettuja geometrioita. Materiaalikirjastoon on määritelty useita eri aineita ja niille on asetettu oletusarvot. Ohjelmistoon voidaan luoda omia aineita ja muuttaa olemassa olevien arvoja. Materiaaleille ei ole rakennettu kaikkia ominaisuuksia, vaikka valitun fyysisen tarkastelussa tarvitaan sen kaavoissa esiintyvien suureiden kaavat tai arvot. Suureen arvo voidaan kirjoittaa lukuna, paloittain määriteltynä funktiona, interpolaationa tai analyttisenä funktiona. Interpolaatiovaihtoehdolla ohjelmistossa voidaan käyttää esimerkiksi sadetaulukkoa, jossa ilmoitettu päivät ja sademäärät. Luodussa mallissa tapahtuvat asiat kuvataan reunaehdoilla. Reunaehdoilla voidaan rajata tarkastelualue eristys ehdolla, jolloin kyseisen pinnan arvot ovat nollia. Kosteusvirta on myös reunaehto, joka voidaan määrittää malliin kuvaamaan sisätilan vesihöyrypitoisuuksien arvoja tai ulkona tapahtuvaa sadetta. Elementtiverkon tiheydellä määritetään, kuinka tarkasti arvojen nousua halutaan kuvata analysointia varten, sillä arvojen laskeminen suoritetaan elementtiverkon jokaisessa silmässä. Yläpohjan ja seinän elementtiverkko esitetty kuvassa (Kuva 12). Simulointi laskee arvot mallista ja tulosten jälkikäsitteilyllä voidaan tarkentaa mikä on tarkasteltava muuttujan yksikkö. Tarkastelupiste voidaan myös määrittää. Simuloinnin tuloksista voidaan luoda funktion kuvaajia, taulukoita ja animaatioita. Animaatiossa voidaan tarkastella esimerkiksi vesimäärän [kg/m^3] ja lämpötilan [$^{\circ}\text{C}$] muuttumista mallissa /5/.



Kuva 12. Elementtiverkko geometrian sisällä.

5.2.1 Simuloinnin kaavoja

Lämpö- ja kosteussiirron fysiikan ilmiöiden suureissa ja yksiköissä on eroavaisuuksia, riippuen siitä, minkä lähteen kaavoja käytetään. Esimerkiksi standardoidulla Glaser-menetelmällä SFS-EN ISO 13788 tarkastellaan vesihöyryn tiivistymistä, muttei veden etenemistä tai sitä, kuinka vesi vaikuttaa materiaalien ominaisuuksiin. Käsin laskennassa käytetään kaavoja, joissa on yleensä noin kolme muuttujaa. Näiden muuttujien arvot löytyvät useista fysiikan kirjoista. Simulaation fysiikoiden kaavat ja muuttujat löytyvät usein simulaatiota käsittelevistä standardeista. Tässä simulaatiossa käytettyjä kosteuden- ja lämmönsiirtymiskaavoja löytyy standardista DIN EN 15026. Ohjelmissa käytetyt lämmön- ja kosteuden siirtymisen kaavat on listattu käyttöoppaaseen Heat transfer module users guide. Simuloinnin kaavoissa esiintyy osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, joissa esimerkiksi lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat funktioita $T(x,y,z)$ ja $\phi(x,y,z)$. Funktio muutetaan vektorimuotoon kaavassa esiintyvällä Nabla operaattorilla ∇ . /1, 5/.

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Kosteudensiirtyminen G [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$] rakennusmateriaaleissa ratkaistaan kaavalla:

$$G = \xi(\partial\phi/\partial t) + \nabla \cdot (-\xi D_w \nabla \phi - \delta_p \nabla(\phi p_{sat}(T))) \quad (7)$$

, jossa $-\xi D_w \nabla \phi$ kapillaarinen kosteusvirta

$\delta_p \nabla(\phi p_{sat}(T))$ diffuusion kosteusvirta

D_w kosteusdiffusiviteetti [m^2/s]

δ_p vesihöyrynläpäisevyys [s]

ξ kosteuskapasiteetti [kg/m^3]

P_{sat} vesihöyry kyllästymisosaapaine [Pa]

T lämpötila [K]

ϕ ilman suhteellinen kosteus (0-1) [-]

Lämmönsiirtyminen Q [W/m^2] huokoisissa rakennusmateriaaleissa ratkaistaan kaavalla:

$$Q = (\rho C_p)_{eff} \cdot (\partial T / \partial t) + \nabla \cdot q \quad (8)$$

Tilavuuksellinen tehollinen lämpökapasiteetti $(\rho C_p)_{eff}$ [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$] lasketaan huokoisien materiaalin tiheyden, vesimäärän sekä materiaali ja veden lämpökapasiteettien avulla /5/.

$$(\rho C_p)_{eff} = \rho_s C_{p,s} + w C_{p,w} \quad (9)$$

Lämmön eteneminen johtumisena lasketaan huokoisien materiaalin ja veden ominaisuuksien sekä vesimäärän avulla, missä johtumisen lämpövirta q [W/m^2] /5/.

$$q = -(k_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})) \quad (10)$$

, jossa	L_v	latentti haihtumislämpötila [J/kg]
	k_{eff}	tehollinen lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
	ρ	tiheys [kg/m^3]
	C_p	ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
	$C_{p,w}$	veden lämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
	w	kosteuspitoisuus [kg/m^3]

Simuloinnin aikariippuvaisissa laskuissa osa materiaalien ominaisuuksista tarvitsevat informaation ilmanpaineesta, lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Nämä kaavat käyttävät sääaineiston dataa interpolaation avulla. Kuten Vesihöyrynläpäisevyys δ_p [s] /5/.

$$\delta_p = \delta / \mu \quad (11)$$

, jossa	δ	seisova ilman vesihöyrynläpäisevyys [s]
	μ	diffuusiovastus [-]

Standardin DIN 52615 mukaan ilman vesihöyrynläpäisevyyden voi määrittellä absoluuttisen lämpötilan ja ilmanpaineen avulla. Paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys δ [s] /12/.

$$\delta = 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot (T^{0,81}/P_L) \quad (12)$$

, jossa T vallitseva lämpötila [K]
 P_L vallitseva ilmanpaine [Pa]

Diffuusiovastuskerroin μ [-] tarkoittaa paikallaan olevan ilman ja tietyn paksuisen huokoisen materiaalin vesihöyrynläpäisevyyksien suhdetta. Seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyyden arvona voidaan käyttää δ_p $195 \cdot 10^{-12}$ [kg/m·s·Pa] /1/.

$$\mu = \delta_{v,a}/\delta_v = \delta_{p,a}/\delta_p \quad (13)$$

, jossa $\delta_{v,a}$ materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [m²/s]
 δ_v ilman vesihöyrynläpäisevyys [m²/s]
 $\delta_{p,a}$ aineen vesihöyrynläpäisevyys [kg/m·s·Pa]
 δ_p ilman vesihöyrynläpäisevyys [kg/m·s·Pa]

Kosteusdiffusiviteetti D_w [m²/s] kuvaa kosteuden nopeutta huokoisessa materiaalissa, missä se etenee pinta-alan läpi aikayksikössä. Sorptiokäyrän muoto määrittää kuinka nopeasti vesihöyrynläpäiseminen tapahtuu, eri kosteuspitoisuuksissa /1/.

$$D_w = (\delta_v \cdot v_k) / \xi \quad (14)$$

, jossa v_k vesihöyrynläpäisevyyden kyllästymiskosteus [kg/m³]

Kosteuskapasiteetti ξ [kg/m³] on sorptiokäyrän derivaatta

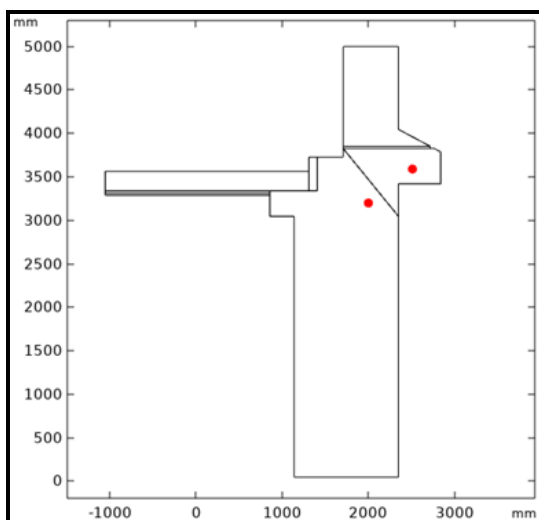
$$\xi = dw/d\varphi \quad (15)$$

, jossa w kosteuspitoisuus [kg/m³]
 φ ilman suhteellinen kosteus (0-1) [-]

5.2.2 Simuloitavat tapaukset ja niiden tulokset

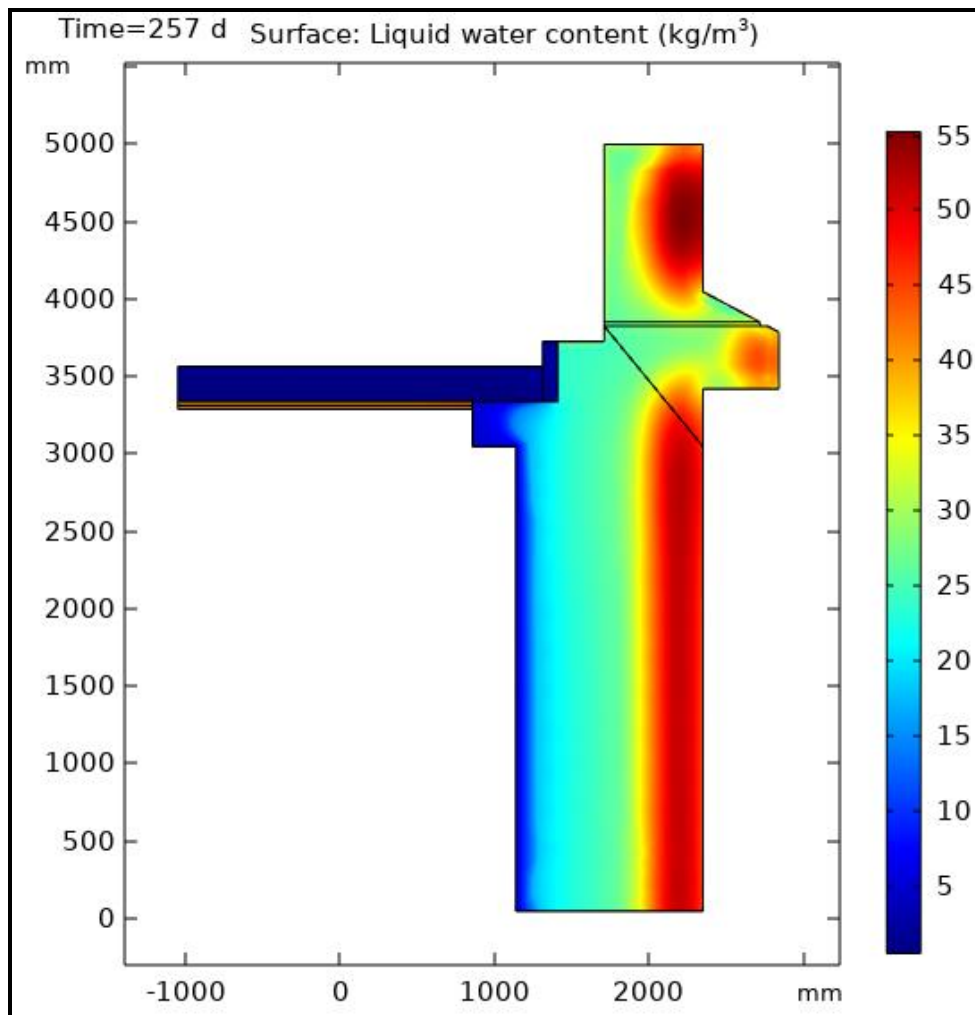
Simuloinnilla voidaan mallintaa nykyisen tilanteen kaltainen tilanne ja tarkistaa, miten mahdolliset korjaustoimenpiteet vaikuttavat yläpohjarakenteen lämpö- ja kosteustoimintaan. Kohteessa tehtyjä mittaustuloksia hyödynnetään simuloinnissa. Mallin eri alueille voi asettaa mittausten arvoja simuloinnin alkuhetken arvoiksi. Simuloinnilla voi myös tarkistaa millaiset sademäärät tai sisäilman kosteudet aiheuttavat samanlaisen vaurioitumisen. On huomioitava, että jos kuutio tiilimuurauksista on täysin kyllästynyt, kun siinä on 300 litraa vettä, niin yksi tiili on kyllästynyt, kun siinä on 0,56 litraa vettä. Kyllästyminen etenee ketjureaktion tapaisesti tiilestä tiileen painovoimaisen siirtymisen takia, jonka jälkeen tiilen pinta pysyy kosteana alhaisen kapillaarivastuksen takia /1/.

Simuloitavissa tapauksissa on yhteistä, että kaikki simuloinnit alkavat 01.01.2016 ja jatkuvat 365 päivää käyttäen Vaasan lentoaseman säädataa Sisäilman lämpötilana on 20 °C ja RH 50 %. Kaikki tilanteet tarkastelevat poikkileikkausta pilasterin kohdalla. Sade on asetettu kosteusvirran reunaehdoksi pinnoille, johon viistosade osuu. Sademäärät ovat esitetty taulukkona liitteessä 3. Viistosateen voimakkuudeksi on asetettu 0,8 pystysateen määrästä. Simuloinneissa otetaan myös selvää, missä kohdassa rakennetta lämpötilan nollarajat sijaitsevat. Simuloinneilla vertaillaan, miten pilasterin pinnan suojaaminen vaikuttaa veden määrään pilasterin keskellä sekä räystäästiessä (Kuva 13).

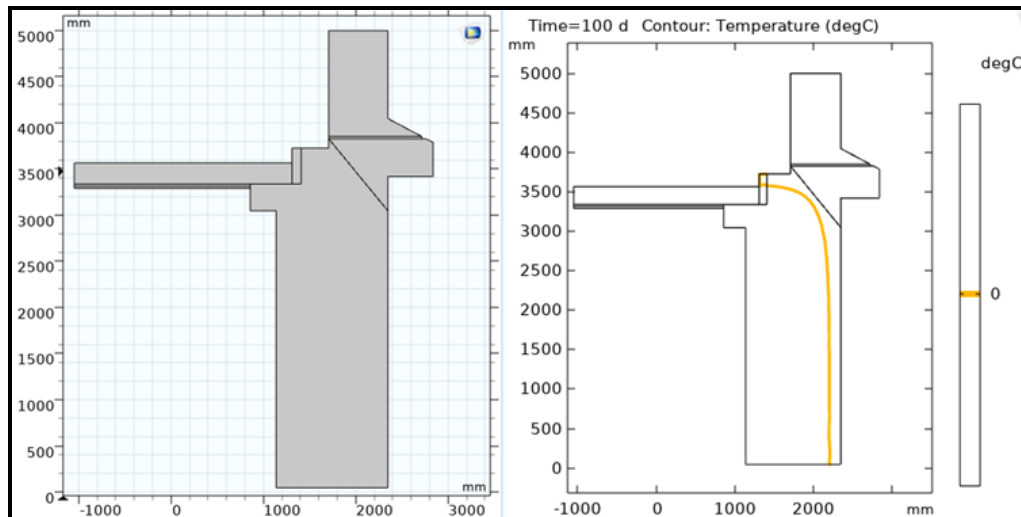


Kuva 13. Tarkastelupisteet pilasterin keskellä sekä räystäästiessä.

Nykyisen kaltaiseen tilanteeseen simuloinnissa pääsee vain lisäämällä viistosateen määrää rakenteen yläosille, kuten kuvassa (Kuva 14). Sisäilman kosteuden diffuusio ja konvektio eivät aiheuttaneet tämän geometrian simuloinnissa haitallista tiivistymistä. Mittauksien perusteella ullakon ilman lämpötila oli jopa 10 astetta ulkoilmaa lämpimämpää ja sisälsi kosteutta haitallisen paljon. Ullakon olosuhteita ei olla kuitenkaan huomioitu tässä simuloinnissa. Simuloinnissa ei ollut mahdollista asettaa kaikkia olosuhteita, joita kohteessa suoritetuista mittauksista kirjattiin ylös. Höyröyksen tai ilmanpaineen lisääminen sisätilan puolelle ei vaikuttanut simuloinnissa odotetulla tavalla. 70 Pascalin lisääminen normaaliin ilmanpaineeseen ei lisännyt tiivistyneen kosteuden määrää. Höyröyksen asettaminen kasvatti kosteuden määrää pilasterin keskelle 8 kiloa.



Kuva 14. Kosteuden määrä rakenteessa elokuussa.



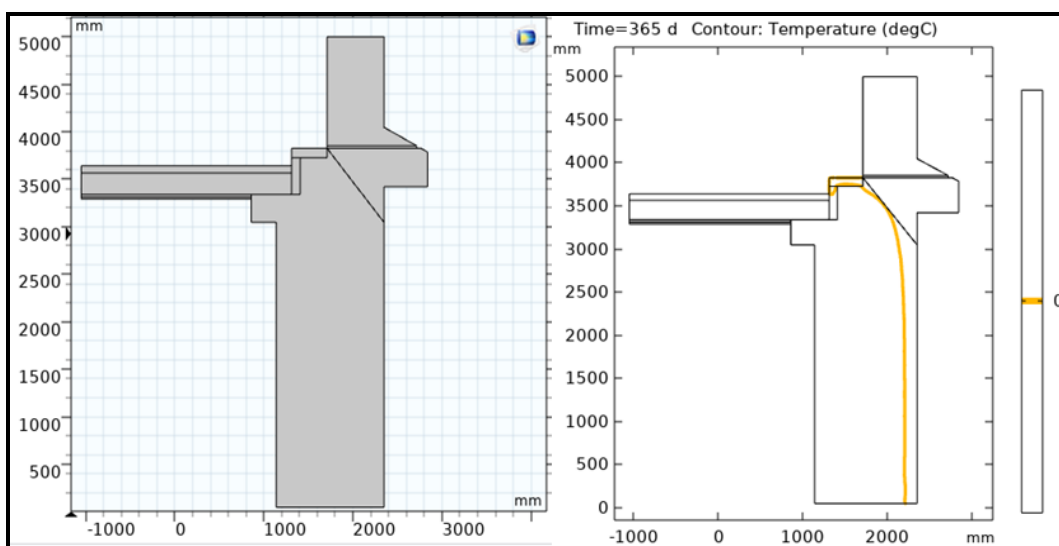
Kuva 15. Lämpötilan 0 °C raja nykytilanteessa.

Taulukko 1. Vesimäärät nykytilanteessa 365 päivää.

Time (d)	VESIMÄÄRÄ (kg/m ³) RÄYSTÄSTIILESSÄ	VESIMÄÄRÄ (kg/m ³) PILASTERIN KESKELLÄ
0.0000	18.585	13.239
30.000	29.336	14.018
60.000	42.900	18.800
90.000	62.991	44.247
120.00	38.872	40.148
150.00	28.272	33.187
180.00	27.563	33.874
210.00	23.615	28.591
240.00	23.801	26.189
270.00	32.480	35.903
300.00	54.110	42.496
330.00	78.929	59.384
360.00	82.249	63.082

Simuloinnin perusteella vain viistosateelle altistumisen estämisellä ja imeytymisen rajoittamisella voidaan saada parempia tuloksia. Näin ollen on mietittävä mahdollisia korjaustoimenpiteitä vesikatteelle ja seinärakenteelle, jotka eivät muuta rakennuksen ulkonäköä merkittävästi. Mahdollisia korjaustoimenpiteitä ovat pilasterin taustan pellitys, räystäspellin pidennys, laastisaumojen korjaaminen ja pilasterihatun pidentäminen. Tässä simuloinnissa pilasterin takaseinän ja räystästiilen kosteusvirran arvoksi voidaan asettaa nolla, ja pilasterin etuosan viistosateen kertoimen arvoa voidaan pienentää 0,8 arvosta 0,6 arvoon. Taulukosta nähdään, että vesimäärä laskee näillä toimenpiteillä jopa 23 kg/m³ (Taulukko 2).

Yläpohjarakenteelle tehtävät muutokset voidaan asettaa samaan simulointiin. Muutoksia yläpohjalle on 100 mm paksun alumiinipintaisen PIR-levyrakenteen asentaminen yläpohjan ja seinän liittymään (Käsiteluettelo). PIR-levyrakenteen päälle asetetaan 300 mm paksusti puhallusvillaa. PIR-eriste on polyuretaanista valmistettu eristelevy. PIR-eristeen lämmönjohtavuus on 0,022 W/mK ja mineraalivillalla lämmönjohtavuus on 0,033 W/mK. Alhaisemman lämmönjohtavuuden vuoksi sillä voidaan rakentaa ohuempia rakenteita.



Kuva 16. Lämpötilan 0 °C raja korjaustoimenpiteiden jälkeen.

Taulukko 2. Vesimäärät korjaustoimenpiteiden jälkeen 365 päivää.

Time (d)	VESIMÄÄRÄ (kg/m ³) RÄYSTÄSTIILESSÄ	VESIMÄÄRÄ (kg/m ³) PILASTERIN KESKELLÄ
0.0000	18.590	13.239
30.000	28.950	13.953
60.000	39.476	18.372
90.000	47.688	38.963
120.00	30.174	32.981
150.00	24.045	29.055
180.00	22.627	31.810
210.00	22.125	27.059
240.00	23.164	25.170
270.00	26.640	35.079
300.00	45.197	40.533
330.00	53.328	52.385
360.00	58.869	54.087

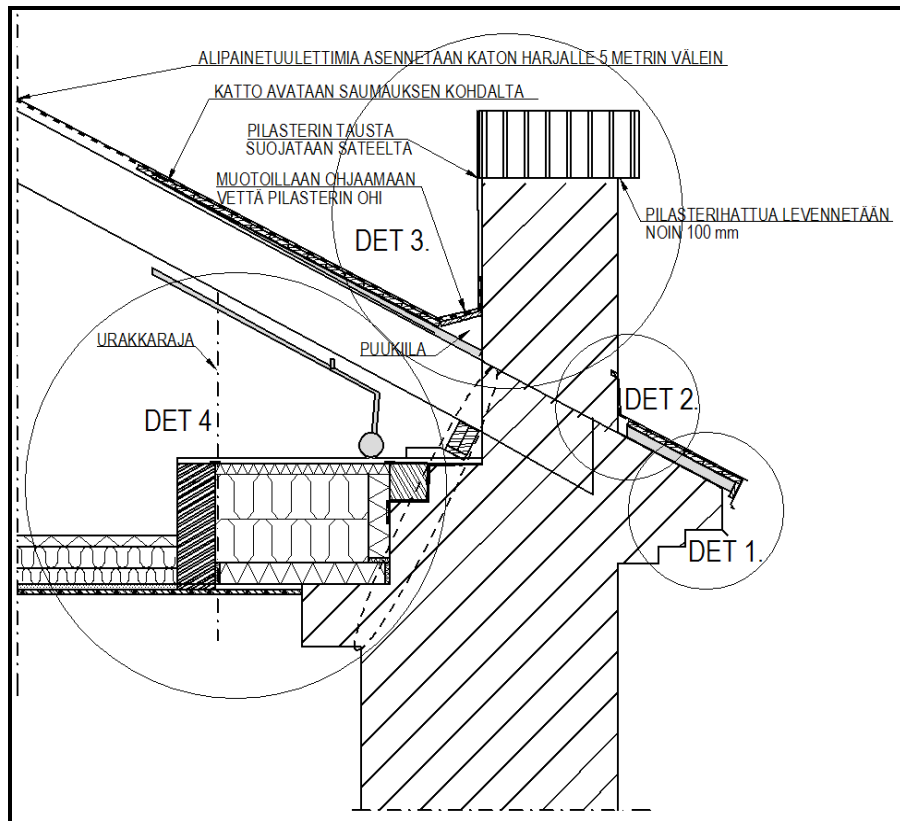
6 KORJAUSTOIMENPIDE-EHDOTUS

Rakennukseen on saatava tehokkaita korjauksia, jotka eivät vaikuta merkittävästi sen ulkonäköön. Mahdollisia korjauksia suunniteltaessa on ajateltava, mikä on tärkeintä, ja miten eri korjaukset vaikuttavat pitkällä aikavälillä. Valittava rakenteiden korjaustoimenpide ei saa olla väliaikainen, eikä vaurioituminen saa jatkua samanlaisena kuin tällä hetkellä. Tässä opinnäytetyössä ei oteta kantaa mahdollisten korjausten kustannuksiin. Seuraavassa on mahdollisia korjaustoimenpide-ehdotuksia, joita kannattaisi tehdä.

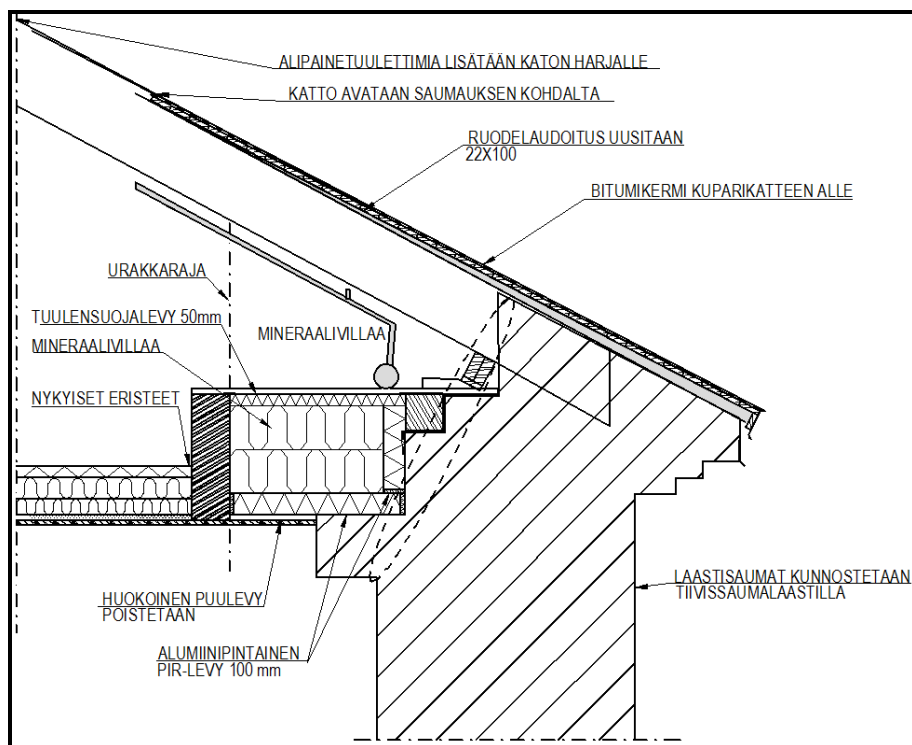
6.1 Rakenteiden suojaaminen ja tuuletus

Simuloinnin perusteella tärkeintä on rakenteiden suojaaminen viistosateelta. Seuraavana on selostettu asennettavien osien tarkoitus ja toimintaperiaate detaljikuviin viitaten. Viistosateen suojauksen lisäksi korjaussuosituksena on yläpohjan tuuletus ja rakenteen uusiminen, sillä se on rakennettava ilmatiiviiksi. Korjaaminen sijoittuu ensimmäisessä vaiheessa räystään läheisyyteen, mutta sitä on tarkoitus jatkaa koko yläpohjan alueelle. Rakenneleikkaus pilasterin kohdalla on esitetty korjaustoimenpiteiden jälkeen kuvassa (Kuva 17) ja rakenneleikkaus pilasterin vieressä (Kuva 18).

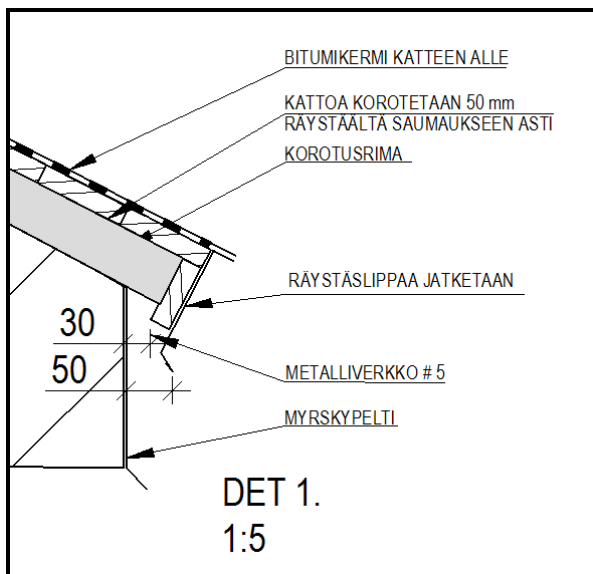
Kattoa korotetaan sahatavaralla 50 x 50 mm. Tämä mahdollistaa tuuletuksen koko räystääslinjalla. Tuuletus saadaan aikaan kattoa nostamalla ja alipainetuulettimien lisäämisellä, millä voidaan poistaa ullakolta se kosteus, joka on tullut sinne höyrösuluttoman yläpohjan läpi. Räystäslippaa jatketaan suojaamaan räystäästiiltä ja sen taakse asennetaan myrskypelti estämään lumen tunkeutuminen tuuletusaukkoon (Kuva 19). 50 x 50 mm sahatavaran päälle asennetaan uusi ruodelaudoitus 22 x 100 mm, jonka päälle asennetaan bitumikermikate estämään vesivuotoja kuparikatteesta. Bitumikermin päälle rakennetaan kuparikate. Kate avataan ja bitumikermitetään lähimmästä saumauslinjasta räystäälle, josta kuva liitteessä (Liite 5).



Kuva 17. Pilasterin korjaustoimenpiteet.

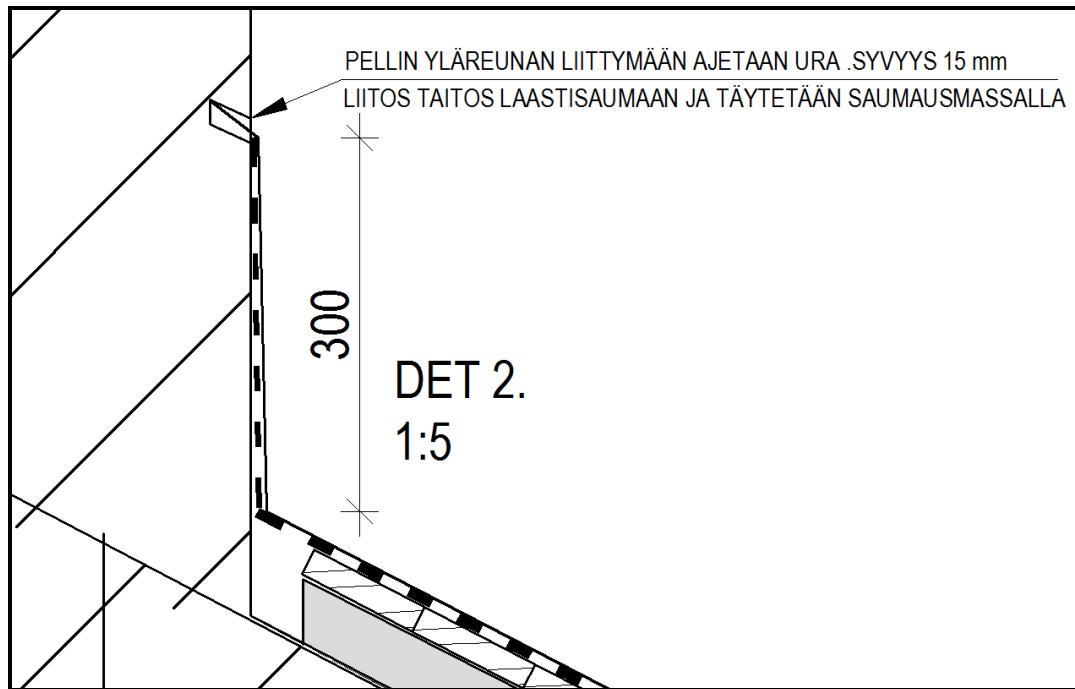


Kuva 18. Yläpohjaan tehtävät muutokset pilasterin vieressä.

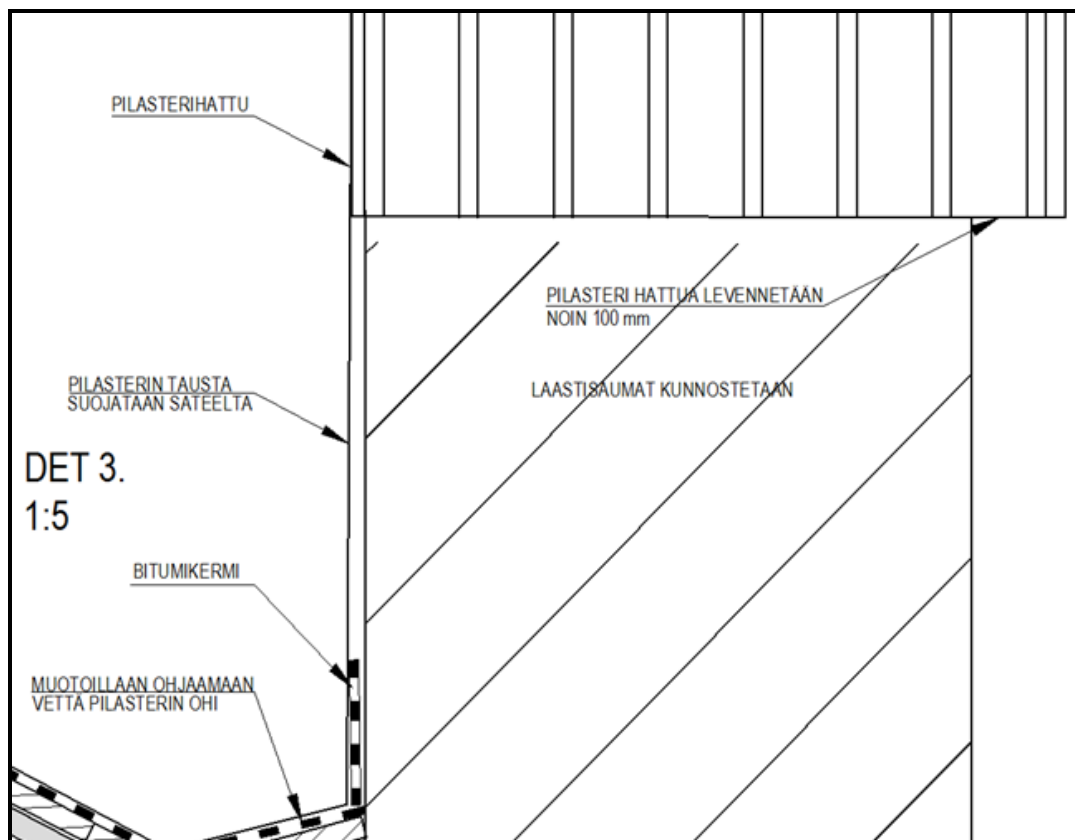


Kuva 19. Rästäsdetalji.

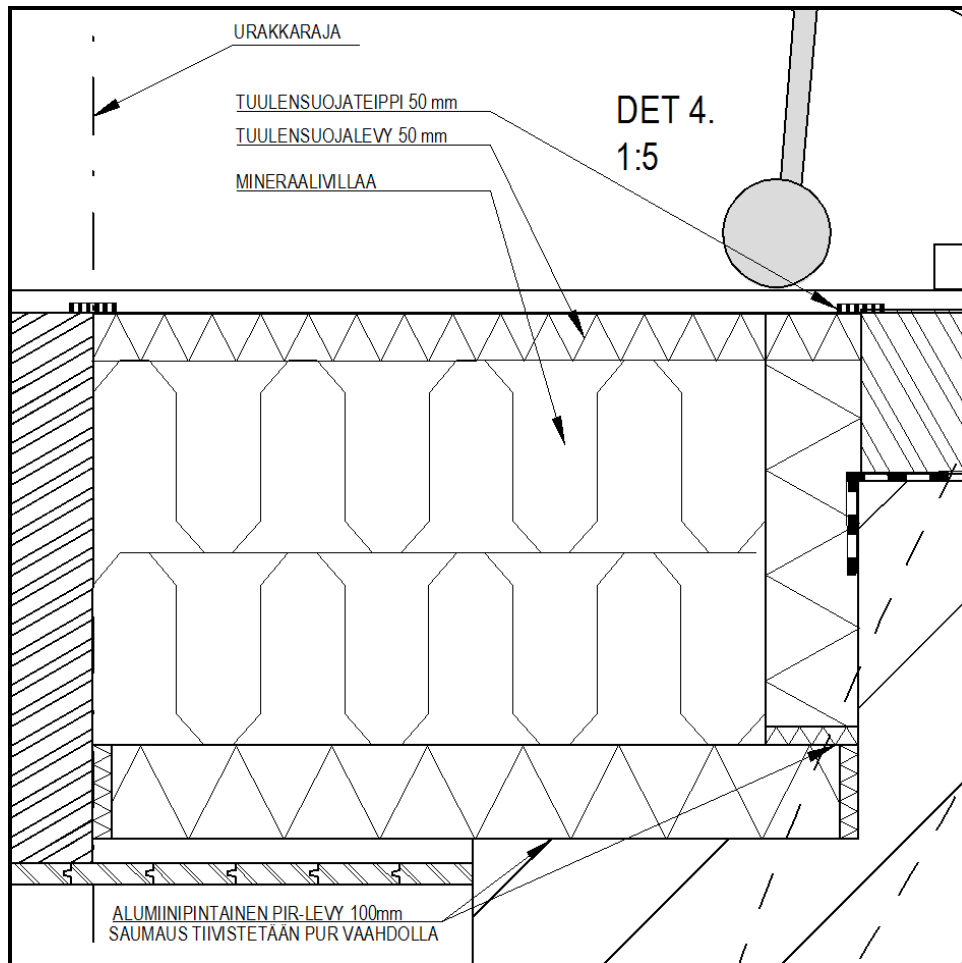
Katetta nostetaan vähintään 300 mm julkisivun näkyvällä puolella. Katteen nostamisella vähennetään lumen kinostumisen aiheuttavia ongelmia. Katteen yläreuna taitetaan laastisaumaan leikattuun 15 mm syvään uraan ja saumataan umpeen. Tämä estää veden valumisen suoraan katteen taakse (Kuva 20). Pilasterin tausta suojataan sateelta. Suojaamisen voi tehdä pilasterien takaseinän pellityksellä. Pakkasen ja kosteuden rapauttamat laastisaumat kunnostetaan. Kunnostaminen uusilla saumauksilla estää sadeveden tunkeutumista. Pilasterihatun levennyksellä estetään sateen osumista pilasterin näkyvään pintaan. Pilasterin ja katon liittymä on muotoiltava siten, että se ohjaa veden pilastereiden ohi eikä jää seisomaan katonlelle (Kuva 21). Bitumikermitystä nostetaan pilasterin pintaa vasten vähintään 300 mm. Yläpohjassa asennetaan 100 mm paksu alumiinipintaisen PIR-levy estämään vesihöyryn nousemisen salin puolelta (Kuva 22). Alumiinipinta tulee lämpimän pinnan puolelle, koska se on diffuusiotiivis. PIR-levyrakenteen päälle asennetaan mineraalivillaa kattovasaa ja 175 x175 mm puun tasalle. Mineraalivilla estää lämmön nousemista ullakolle. Ilman virtausnopeus kasvaa merkittävästi tuuletuksen rakentamisen myötä, jolloin virtaus on ohjattavan mineraalivillan yli. Mineraalivillan yläpuolelle asennetaan 50 mm paksu tuulensuojalevy. Tuulensuojalevy lämmönjohtavuus 0,032 W/mK tai pienempi. Tuulensuojalevyn saumat teipataan tuulensuojateipillä ilma- ja vesivuotojen estämiseksi.



Kuva 20. Kuparikatteen liitosdetalji.



Kuva 21. Pilasterin taustan suojaaminen.



Kuva 22. Yläpohjaan tehtävät muutokset.

6.2 Vaikutus rakennuksen lämpötekniikkaan

Rakennuksen lämpötekniinen toiminta ei muutu merkittävästi yläpohjan lisäeristyksen myötä. Lisäeristäminen saa lämmön virtaamaan seinärakenteen suuntaan. U-arvo laskettu liitteessä [$\text{W/K}\cdot\text{m}^2$] (Liite 2). Tarkempi rakennedetalji liitteessä (Liite 11). Yläpohjassa olevia kantavia rakenteita ei muuteta, joten yläpohjassa on kylmäsiltoja. Kylminä aikoina rakennusta lämmitettäessä lämpö virtaa pääasiassa seinien ja niissä olevien ikkunapintojen kautta ulos. Julkisivun pinta-alasta 21 % on yksikerroksisia ikkunoita, mikä vaikuttaa seinän lämmönläpäisykertoimeen todella paljon. Seinän U-arvo on laskelmien mukaan $1,97 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Liite 12). U-arvoa voi verrata passiivitalon seinän vaadittuun $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$ U-arvoon. Lisäeristyksellä pystyy kuitenkin rajoittamaan sitä kosteuden määrää, mikä voisi sitoutua ullakon ilmaan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, millainen korjaustoimenpide estää Vaasan kirkon kosteusvaurioitumisen. Lähestymistapana tämän ratkaisemiseen oli rakenteiden tutkiminen piirustusten pohjalta, ullakon kunnan tarkastelu ja mittaus-ten suorittaminen. Tutkimus suoritettiin Vaisala HMI41-mittalaitteella, FLIR-lämpökameralla ja porausreikiin asennettavilla Vaisalan HMP110-mittapäillä. Simulointi suoritettiin COMSOL Multiphysics 5.4 -ohjelmiston avulla. Vaurioitumisen aiheuttajaa tutkittiin lämpö- ja kosteusteknisien mittaustulosten ja COMSOL Multiphysics 5.4 -ohjelmiston avulla. Lämpö- ja kosteusolosuhteiden selvittämisen jälkeen niiden arvot asetettiin simulointiin. Tulokset osoittivat, että ullakko lämpenee ja kostuu, viistosade osuu usealle pinnalle ja ullakon kosteus estää seinärakenteen kuivumista. Korjaustoimenpiteet suunniteltiin näiden havaintojen perusteella. Korjaustoimiksi esitettiin rakenteiden pintojen suojaamista viistosateelta, ullakon tuulettumisen järjestämistä sekä yläpohjan lämpö- ja kosteusteknisien toimivuuden parantamista. Tämän jälkeen simulointiin yhdistettiin mahdolliset korjaustoimenpiteet ja tutkittiin, miten lämpö- ja kosteustilanne muuttuu. Rakenteen mahdollisista korjauksista luotiin piirustukset, jotka ovat korjaustoimenpide-ehtotuksia.

7.1 Tutkiminen piirustusten perusteella

Opinnäytetyössä sain avukseni vuoden 1999–2000 peruskorjausten piirustukset. Piirustuksissa oli kuvattu kirkon yläpohjan entiset rakennekerrokset ja niiden korvaavat kerrokset. Piirustuksista saatiin apua myös simuloitavan geometrian piirtämiseen. Pohjapiirustuksista pystyttiin laskemaan kirkon pinta-ala. Huomioitavaa oli, että vuonna 2000 uusittuun yläpohjan eristekerrokseen ei ollut asennettu ilman- tai höyrynsulkua ja eristekerroksen paksuus oli 225 mm. Yläpohjaeristepaksuutena tämä määrä on liian pieni, joten lämpö ja kosteus pääsee nousemaan ullakolle. Yläpohjarakenteen toimintaa pystyttiin tarkastelemaan DOF-Lämpö -ohjelmistolla ja toteamaan tuloksista, että siinä ei tapahdu tiivistymistä. Tämän täytyy tarkoittaa, että yläpohjassa olevan kosteuden on täytynyt tippua siihen katon läpi tai katon alapinnasta. Piirustuksissa oli selitetty myös, mikä oli vaurioitu-

nut ennen peruskorjauksia. Katon ja seinän liitoskohdan lähellä olevat 150 x 150 mm sekä 175 x 175 mm tukipuut olivat lahonneet niin paljon, että se vaihdettiin painekyllästettyihin tukipuihin. Kosteuden aiheuttamat ongelmat ovat siis olleet haittana kymmeniä vuosia. Puun homehtuminen alkaa, kun RH on yli 80 % ja lahoaminen alkaa, kun RH on yli 90 % /24/.

7.2 Ullakon ja katteen kunnan tarkastelu

Ullakolla suoritettiin tarkastelua ennen peruskorjausten piirustusten löytymistä. Tutkittavina asioina oli, että onko rakenteiden kastuminen estetty ja onko kuivuminen mahdollista. Tarkastelussa tutkittiin yläpohjan rakennekerroksia sekä ullakon puolella näkyvän tiilirakenteen kuntoa. Yläpohjarakenteen eristevillan sekä huokoisen puulevyn liitoskohdassa on merkkejä ilmeisesti homeen aiheuttamasta tummumisesta. Mikrobikasvuston mahdollinen kasvaminen alkaa, kun materiaalin RH ylittää 70 % ja lämpötila on yli 2 °C. Ihanteelliset olosuhteet homeen kasvamiselle pH 5–9, RH 80–90 % yli 20 °C lämpötilassa. Ullakolla oli havaittavissa myös sienikasvustoa. Sienten kasvamisen ihanneolosuhteet ovat RH yli 95 % ja lämpötila 20 – 40 °C. Tiilirakenteesta, joka oli ullakon puolella, oli havaittavissa erittäin rapautunutta laastia sekä irtonaisia tiiliä. Tämän perusteella voi päätellä, että seinän kunto heikkenee kylmässä ja kosteassa ympäristössä hajoamispisteeseen.

Katteen kuntoa tarkasteltiin saumauksia tutkimalla ja avaamalla katon sauma pilasterin vierestä. Näissä tutkimuksissa ei löytynyt selkeää ongelman aiheuttajaa. Pilasterista voidaan sanoa, että se on samalla tavalla vaurioitumisaltis kuin katon läpi tuleva suojaamaton savupiippu. Tutkimusten perusteella pystyy silti sanomaan, että katon ja tiilirakenteen liitoskohdat ovat huono kuntoisia ja että kattoveisi jää makaamaan katolle pilasterin takana ja räystään lähellä. Katon avaamisen yhteydessä huomattiin, että ullakon tuulettuminen ei ole mahdollista useassa kohdassa. Räystäslippa on niin lyhyt, että se ei suojaa seiniä. Räystäslipan alapuolella oleva muuraus on vaurioitunut eniten ja siitä on pudonnut alas paloja. Vaurion jatkuminen voi rapauttaa muurausta niin paljon, että kaikki laasti- ja tiilisedokset irtoavat /24/.

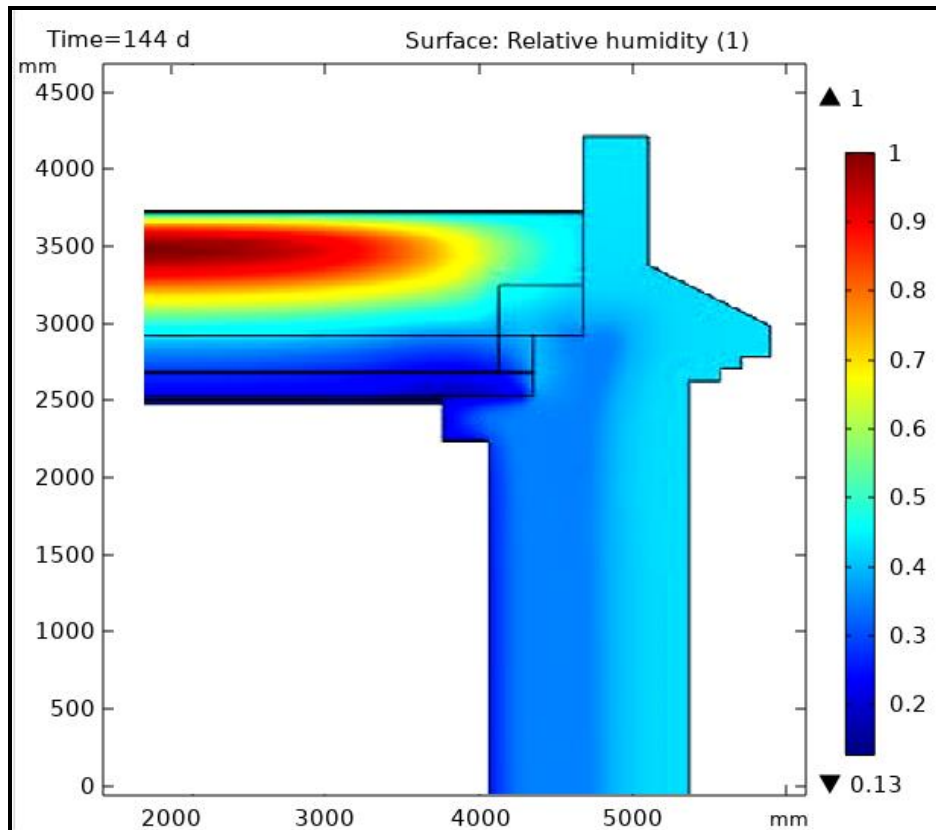
7.3 Mittausten suorittaminen

Mittausten tarkoituksena oli selvittää ullakon ja rakenteen suhteellinen kosteus ja lämpötilajakaumat rakenteen pinnoissa. Käytettyjen laitteiden kalibrointipäivämäärät olivat mittaushetkellä kunnossa, joten mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Suhteellisen kosteuden mittausten perusteella voidaan todeta, että kirkkosalin suhteellinen kosteus on alhainen ja sen seinät ovat kuivia. Kirkkosalin puolella olevissa lämpöjakaumista voidaan todeta, että kattovasat toimivat kylmäsiltoina ja yläpohjan lähellä kuumin alue on salin katto. Yläpohjassa oli myös kosteuden aiheuttamia kylmäsiltoja, jotka olivat lähellä seinää. Seinästä tai ullakon katosta on levinnyt kosteutta yläpohjarakenteeseen. Ullakon lämpö- ja kosteusmittausten perusteella siellä oli kosteaa ja lämpimämpää kuin ulkona. Rakenteen olosuhteiden mittauksina suoritettiin porareikämittauksia, joissa havaittiin seinän kosteuspitoisuuden olevan 380 mm syvyydessä sama kuin ullakon ilman kosteuspitoisuus. Porareikämittaus suoritettiin RT-kortin RT 14-10984 ohjeita noudattaen. Epätarkkuustekijöitä mittauksissa on mm. mittausräin puhdistus, mittausvyvyys, mittauspätkän tiivistys. Seinärakenteen kuivumista ei tapahdu ullakon puolelle, jos siellä on kosteaa. Rakenteen toiminnasta saatiin mielestäni selkeä kokonaiskuva, jo tässä vaiheessa. Lämpökamerakuvauksista nähtiin, että seinärakenne on lämpimin osa ullakon räystään lähellä olevista rakenteista. Kattovasat loivat kylmäsiltoja myös ullakon puolella. Mittauksista voidaan päätellä, että ullakolle kerääntyy kosteutta, joka tiivistyy kylmiin pintoihin. Ullakolla suoritettiin myös paine-eromittaus. Tässä mittauksessa selvitettiin, että millaiset paineolosuhteet ovat ullakolla verrattuna ulkoilmaan. Ullakon ja ulkoilman paineissa ei ollut eroa, koska ullakolla on iso verkotettu aukko, josta paineet tasaantuvat. Salin katon ja ullakon välistä paine-eroa ei kyetty suorittamaan, koska anturia ei saatu yläpohjan läpi salin puolelle. Lämpökuvauksella saatiin erittäin paljon tietoa rakenteen toiminnasta, mitä pystyttiin hyödyntämään simuloinnissa. Mittauksia, joita olisi kyetty suorittamaan, mutta ei suoritettu, olivat yksittäisen tiilen ominaisuuksien tutkiminen. Tiilestä olisi voitu tutkia maksimikosteuspitoisuus, lämmönjohtavuus, tiheys, kapillaarinen nousukorkeus. Maksimikosteuspitoisuuden määrittämisestä olisi ollut hyötyä simuloinnissa käytettävänä arvona /25/.

7.4 Simuloinnin suorittaminen

Simulointi suoritettiin COMSOL Multiphysics 5.4 -ohjelmistolla, jonka käyttämisen oppiminen vei suurimman osan koko opinnäytetyöhön käytetystä ajasta. Ohjelmiston käytöstä pidettiin Helsingissä COMSOL Oy:llä koulutus, joka kesti yhden päivän. Koulutuksessa opittiin geometrian luominen, laskentaverkon rakentaminen sekä hieman simuloinnin periaatteita. Sain myös jatkossa apua COMSOL Oy:stä simuloinnin ongelmiin. Ohjelmistossa vaikeinta oli materiaaliominaisuuksien luominen interpolaation avulla. Simulointimallin luomisessa fysiikkamoduulien valitseminen on yksi ensimmäisistä asioista. Simulointiin valitut fysiikkamoduulit olivat heat transfer in building materials ja moisture transport in building materials. Moduulien yhdistämisessä käytettiin multiphysics heat and moisture -moduulia, jolla yhdistetään lämmön ja kosteuden yhtäaikaista vaikutusta. COMSOL Multiphysics -ohjelmistoon piirrettiin simuloitava malli AutoCAD-ohjelmistolla. Mallina oli rakenneleikkaus pilasterin kohdalta, minkä mitat otettiin peruskorjausten piirustuksista. Suurin osa materiaalien ominaisuuksista otettiin kirjasta RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka I, joka oli mielestäni luotettava, koska ne perustuvat standardeissa esitettyihin arvoihin ja laboratorio-olosuhteissa suoritettuihin kokeisiin. Sääinformaationa käytettiin ASHRAE-sääaineistoa, joka oli yhdistetty COMSOL-ohjelmistoon. Sademäärät haettiin Forecan internetsivun havaintojen latauspalvelusta. Pidin Forecan sääaineistoa myös luotettavana lähteenä. ASHRAE-sääaineistossa oli Vaasan lentokentän mittausaseman data, jota käytin lämpötilan, ilmanpaineen ja suhteellisen kosteuden arvoihin. Sääaineistojen ASHRAE:n ja Forecan vertailua en kuitenkaan suorittanut. Simulointiin viety malli oli miltei samoissa mitoissa räystään poikkileikkauksen kanssa. Malliin tehtiin kuitenkin hieman yksinkertaistuksia, jotta laskeminen ei pitkittyisi hankalien geometrioiden takia. Seinä- ja pilasterirakenteessa on laskelmien mukaan 68 % tiiltä ja 32 % kalkkilaastia ja se on periaatteessa rakennettu symmetrisesti keskilinjan molemmin puolin. Simuloinnissa se korvattiin homogeenisella aineella, joka on sekoitus tiilen ja laastin ominaisuuksista. Mallissa ei otettu huomioon kuparikatetta, koska se muutti mallin toimintaa simuloinnissa väärään suuntaan. Katon ja ilmatilan lisääminen siirsi tiivistymisalueen kuvassa näkyvään pisteeseen (Kuva 23). Simuloinnissa laskenta suoritettiin 365 päivälle. Päivän olosuhteiden arvot on

laskettu 24 tunnin tarkastelun keskiarvona, joten sääarvoissa ei ole yön kylmimpiä lämpötiloja. Huomioitavaa on myös, että tuuli-, kosteusolosuhteet muuttuvat todella paljon yön ja iltapäivän välillä. Toisaalta massiivisen tiiliseinän sisäiset olosuhteet eivät muutu nopeasti. Vuoden mittainen tarkastelujakson on mielestäni riittävän pitkä aika, koska simulaation lähtöarvoksi voidaan asettaa suuret vesimäärän arvot ja katsoa kuinka ne muuttuvat vuoden aikana.



Kuva 23. Ullakon simulointi.

7.5 Simuloinnin tulokset ja korjaustoimenpiteet

Tuloksista pystyttiin päättelemään, että diffuusion kuljettama vesihöyry ei tiivisty rakenteessa niin paljoa, että aiheuttaisi nykyistä vauriota. Huomioitavaa on kuitenkin, että tässä simuloinnissa ei ollut mukana ullakon kosteutta. Kosteusvaurioista otetut valokuvat on otettu toukokuussa, jolloin tiivistyminen rakenteessa on epätodennäköistä. Sen sijaan sademäärät olivat olleet suuria ennen kuvien ottamista. Simuloinnissa päästiin kuvien kaltaiseen tilanteeseen vain lisäämällä viistosade seinäpinnoille. Tästä voi päätellä, että viistosade aiheuttaa kosteuden kerty-

mistä seinärakenteeseen. Korjaustoimenpiteiden on estettävä viistosateen osuminen seinäpinnoille. Huomaamattomina muutoksina olisivat pilasterin taustan suojaaminen sekä pilasterihatun ja räystäslipan pidentäminen. Näillä toimenpiteillä saataisiin estetty suuri osa rakenteen sisään tulevasta kosteudesta.

7.6 Korjaustoimenpiteiden simulointi

Ajasta riippuvan simuloinnin tuloksista pystyttiin toteamaan, että viistosateen estäminen vähentää kosteutta rakenteessa merkittävästi. Näin ollen COMSOL Multiphysics 5.4 -simuloinnista oli höytyä tutkimukseen. Simulointi tehtiin usealla tapauksella, mutta vain kaksiulotteiselle mallille. Kolmiulotteisessa tarkastelussa itse pilasteriin ei voi siirtyä paljon lämpöä, koska se on 440 mm ulompana muusta seinästä. Kolmiulotteisessa mallissa on myös enemmän seinäpintoja, joille sateen voi asettaa. Simuloinnissa ei otettu huomioon yläpohjan höyröyksen rakentamista, ullakon olosuhteita, konvektiota, tuuletuksen lisäämistä eikä savupiippuvaikutusta. Näitä ei otettu huomioon, koska ne eivät vaikuttaneet laskentaan odotetulla tavalla. Yläpohjan höyröyksen lisääminen lisäsi veden määrää rakenteen tarkastelupisteessä noin 8 kiloa. Ullakon olosuhteiden jäljitteleminen ei luonut simulointituloksia, jotka olisi vastannut mittaustulosten arvoja. Konvektio ilmaraon kautta ja tuuletuksen lisääminen olisi tarvinnut rakenteen katkaisua, joten rakenne ei olisi ollut verrattavissa todelliseen rakenteeseen. Savupiippuvaikutuksen lisääminen sisäpintoihin 70 Pascalin lisäämisellä normaalin ilmanpaineeseen ei lisännyt kosteuden määrää tarkastelupisteissä, joten se jätettiin pois simuloinnista. Jos nämä viisi asiaa olisi saatu toimimaan simulaatiossa oikein olisi päästy tarkempiin vesimääriin rakenteessa. Huonona puolena simuloinnissa oli pitkä laskenta-aika. Yhden rakentamani mallin laskentaan kului noin 90 minuuttia, mitä tein noin 70 erilaista. Laskenta-arvojen muutoksilla vertailin miten tarkasteluajavälin, olosuhteiden ja materiaaliominaisuuksien muuttaminen vaikuttaa lopputulokseen.

7.7 Korjaustoimenpide-ehdotuspiirustukset

Piirustuksissa katolle tehtäviksi muutoksiksi ehdotetaan räystäslipan ja pilasterihatun jatkamista, katteen ja tiilirakenteen liitosten uusimista, laastisaumojen uusimista, bitumikermin lisäämistä katteen alle, katteen korottamista räystäslinjasta

sekä alipainetuulettimien lisäämistä katonharjalle viiden metrin välein. Nämä toimenpiteet ovat tärkeitä, sillä simulaation perusteella viistosateen vaikutus on suurin osa rakenteen kastumisessa. Tuuletuksen varmistaminen on myös tärkeää, jotta ullakon ilmassa ei tapahtuisi kosteuden kerääntymistä. Tuuletus siirtäisi kuivempaa ulkoilmaa ullakolle. Korjausehdotuksiksi yläpohjassa esitettiin eristekerrosten vaihtamista uusiin eristeisiin. Uusi eristerakenne olisi PIR-eristelevy, mineraalivilla ja tuulensuojalevy. Liitteessä on esitetty yläpohjan rakennedetalji (Liite 11). Alumiinipintainen PIR-levy estäisi sisäilman kosteuden nousua ullakolle ja toimisi samalla eristävänä kerroksena. Mineraalivillalla estettäisiin lämmön nousemista ullakolle, jolloin ullakon ilmaan ei pystyisi sitoutumaan niin paljon kosteutta. Tuuletuksen järjestäminen kasvattaisi ilman virtausnopeutta merkittävästi, joten virtaus olisi ohjattavan mineraalivillan yli. Mineraalivillan yläpuolelle asennettaisiin 50 mm paksu tuulensuojalevy. Jos kylmä ilmavirta pääsee mineraalivillan, se etenee helposti villan sisällä ja aiheuttaa mahdollisesti tiivistymistä.

7.8 Vaihtoehtoinen korjaustapa

Opinnäytetyössä esitetty tuuletuksen järjestäminen katteen avaamisen jälkeen tarkoittaa, että olisi rakennettava sääsuojakatot. Ehdotetut korjaustoimenpiteet muuttavat kirkon ulkonäköä hieman, kuten alipainetuulettimien asentaminen 5 metrin välein. Toisaalta alipainetuulettimien ulkonäkö sopii kirkon uusgoottiseen tyyliin. Tuuletuksen tai kosteuden poiston järjestäminen ullakolle voi olla mahdollista samalla tavalla kuin umpeen rakennettuun rossipohjaan rakennetaan koneellinen tuuletus. Ilmankuivausjärjestelmä imee ilmaa putkistoon ullakon eri alueilta ja kuljettaa sen kuivaajan läpi. Koneen kuivausjärjestelmään sitoutuu ilman kosteus ja sen voi ohjata viemäriin. Jos ullakolle saadaan tällainen järjestelmä kattoa ei tarvitse nostaa, mutta pilasterin suojaus. Höyrynsulun rakentaminen, lämmöneristeen lisääminen ja tuuletuksen varmistaminen auttaisi merkittävästi ullakon kosteustoimintaa. Mahdollisina jatkotutkimuksina on rakenteen toiminnan tarkkailu korjaustoimenpiteiden jälkeen /26/.

LÄHTEET

- /1/ RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka I Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Tammerprint Oy, 2014.
- /2/ RAKENNUSFYSIKKA 2015. Uusimmat tutkimustulokset ja käytännön ratkaisut 20.-22.10.2015, Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto Rakennustekniikan laitos. Juvenes Print Suomen Yliopistopaino Oy. Tampere. 2015.
- /3/ Björkholtz, D. 1987. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Dick Björkholtz ja Rakentajain Kustannus Oy. Vammalan Kirjapaino Oy.
- /4/ Kaivonen, J-A & Pentti, M. 1994. Rakennusten korjaustekniikka ja talous. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Yliopiston Pikapaino, Helsinki 1994.
- /5/ HeatTransferModuleUsersGuide.pdf. Version: COMSOL 5.4. 2018.
- /6/ Tietoa meistä. Viitattu 13.12.2018. <https://www.contria.fi/>
- /7/ Vaasan läänin kirkkojen ympäristöjen kaavoitustilanne. Vaasa 1994.
- /8/ RIL 155 Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Gummerus Osakeyhtiön kirjapaino.
- /9/ Trefaldighetskyrkan. Viitattu 13.12.2018.
<https://www.vasasvenskaforsamling.fi/kyrkor-och-lokaler/kyrkor/trefaldighetskyrkan>
- /10/ RIL 250–2011 Kosteudenhallinta ja homevaurion estäminen. Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Saarijärven Offset Oy, 2011.
- /11/ RT 83-10955 PERUSTUSTEN JA PERUSMUURIEN VEDEN- JA KOSTEUDENERISTYS, 2009. Rakennustieto Oy. Rakennustietosäätiö RTS.
- /12/ Künzl, H. 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Dissertation, Fraunhofer Institute of Building Physics.
- /13/ RT 82-11006 ULKOSEINÄRAKENTEITA, 2010. Rakennustieto Oy. Rakennustietosäätiö RTS 2010.
- /14/ RT 83-11010 YLÄPOHJARAKENTEITA, 2010. Rakennustieto Oy. Rakennustietosäätiö RTS 2010.
- /15/ VILPE-ilmanvaihtotuotteet ja kattotarvikkeet. Viitattu 02.04.2019.
https://www.netrauta.fi/attachments/products/vilpe/VIL7814607/vilpe_ilmanvaihtotuotteet_ja_kattotarvikkeet_esite.pdf
- /16/ Hahtokari, T. Rakennusfysiikka. Vaasan ammattikorkeakoulun käyttöön tarkoitettu oppimateriaali.

- /17/ Ahlgren, L. 1972. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Rapport 36. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund.
- /18/ PAROC-kivivilla. Viitattu 02.04.2019. <https://www.paroc.fi/miksi-kivivilla/energiatehokas>
- /19/ Salaojat. Viitattu 02.04.2019. https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8664/salaojat_ja_patolevyt.htm
- /20/ Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. 5. Viitattu 02.04.2019. <https://www.ym.fi/download/noname/%7B43C6031D-0236-41B1-9D8E-5640E6AB4F9D%7D/111281>
- /21/ Rakennusfysiikkaa insinööreille. Kosteus . Viitattu 02.04.2019. http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf
- /22/ Seppänen, O. Seppänen, M. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Sisäilmayhdistys Ry. Gummerus kirjapaino Oy. Jyväskylä. 1996.
- /23/ Tuulen nopeus. Viitattu 02.04.2019. <https://ilmatieteenlaitos.fi/tuulet>
- /24/ rakennusmikrobiologia. Viitattu 02.04.2019. https://www.utu.fi/fi/yksikot/biodiversiteettiyksikko/aerobiologia/rakennusmikrobiologia/koulutus/PublishingImages/Miksi_rakennukset_homehtuvat_.pdf
- /25/ RT 14-10984 BETONIN SUHTEELLISEN KOSTEUDEN MITTAUS, 2010. Rakennustieto OY. Rakennustietosäätiö RTS 2010.
- /26/ Tuulettuvat alapohjat ja lattiat. Viitattu 02.04.2019. <http://www.drymon.fi/korjaaminen.html>
- /27/ Nevander, L. - Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok. 2. uud. p. Tukholma: AB Svensk Byggtjänst. Svenskt Tryck AB, Tukholma 1994.
- /28/ Puurakenteiden jäykistysuunnittelun ohje. Viitattu 02.04.2019. VTT. 2006. https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/jaykistys_2006.pdf

LIITE 1 Vesihöyryn kyllästymistaulukko.

Kuutioon lämmintä ilmaa 20 °C voi sitoutua 17,3 grammaa vesihöyryä, kun taas kuutioon kylmää -10 °C 2,2 grammaa.

t[°C]	v _k [g/m ³]	P _k [Pa]	t[°C]	v _k [g/m ³]	P _k [Pa]	t[°C]	v _k [g/m ³]	P _k [Pa]	t[°C]	v _k [g/m ³]	P _k [Pa]
-20,0	0,9	102,3	6,0	7,3	941,5	32,0	33,8	4752,5	58,0	119,4	18242,3
-19,5	0,9	106,7	6,5	7,6	974,6	32,5	34,7	4889,1	58,5	122,0	18673,7
-19,0	1,0	111,5	7,0	7,8	1008,6	33,0	35,6	5029,1	59,0	124,7	19113,6
-18,5	1,0	116,7	7,5	8,1	1043,7	33,5	36,6	5172,7	59,5	127,5	19562,0
-18,0	1,0	122,4	8,0	8,3	1079,7	34,0	37,5	5319,8	60,0	130,2	20019,2
-17,5	1,1	128,4	8,5	8,6	1116,8	34,5	38,5	5470,5	60,5	133,1	20485,3
-17,0	1,1	134,8	9,0	8,9	1155,0	35,0	39,6	5625,0	61,0	136,0	20960,4
-16,5	1,2	141,6	9,5	9,2	1194,3	35,5	40,6	5783,2	61,5	138,9	21444,6
-16,0	1,3	148,8	10,0	9,5	1234,7	36,0	41,7	5945,4	62,0	141,9	21938,1
-15,5	1,3	156,4	10,5	9,8	1276,4	36,5	42,8	6111,5	62,5	144,9	22441,0
-15,0	1,4	164,4	11,0	10,1	1319,2	37,0	43,9	6281,6	63,0	148,0	22953,4
-14,5	1,4	172,8	11,5	10,4	1363,2	37,5	45,0	6455,8	63,5	151,1	23475,5
-14,0	1,5	181,6	12,0	10,7	1408,6	38,0	46,2	6634,2	64,0	154,3	24007,4
-13,5	1,6	190,8	12,5	11,0	1455,2	38,5	47,4	6816,9	64,5	157,6	24549,3
-13,0	1,7	200,4	13,0	11,4	1503,2	39,0	48,6	7003,9	65,0	160,9	25101,2
-12,5	1,7	210,4	13,5	11,7	1552,6	39,5	49,9	7195,4	65,5	164,2	25663,4
-12,0	1,8	220,8	14,0	12,1	1603,4	40,0	51,2	7391,3	66,0	167,7	26236,0
-11,5	1,9	231,6	14,5	12,5	1655,6	40,5	52,5	7591,9	66,5	171,1	26819,1
-11,0	2,0	242,8	15,0	12,9	1709,3	41,0	53,8	7797,1	67,0	174,7	27412,9
-10,5	2,1	254,4	15,5	13,2	1764,6	41,5	55,2	8007,1	67,5	178,3	28017,5
-10,0	2,2	266,5	16,0	13,7	1821,4	42,0	56,5	8222,0	68,0	181,9	28633,0
-9,5	2,3	279,0	16,5	14,1	1879,9	42,5	58,0	8441,8	68,5	185,6	29259,7
-9,0	2,4	292,0	17,0	14,5	1940,0	43,0	59,4	8666,7	69,0	189,4	29897,6
-8,5	2,5	305,4	17,5	14,9	2001,8	43,5	60,9	8896,6	69,5	193,2	30546,9
-8,0	2,6	319,2	18,0	15,4	2065,3	44,0	62,4	9131,8	70,0	197,1	31207,9
-7,5	2,7	333,6	18,5	15,8	2130,6	44,5	63,9	9372,3	70,5	201,1	31880,5
-7,0	2,8	348,3	19,0	16,3	2197,8	45,0	65,5	9618,2	71,0	205,1	32565,0
-6,5	3,0	363,6	19,5	16,8	2266,8	45,5	67,1	9869,6	71,5	209,2	33261,6
-6,0	3,1	379,4	20,0	17,3	2337,8	46,0	68,8	10126,6	72,0	213,3	33970,3
-5,5	3,2	395,6	20,5	17,8	2410,7	46,5	70,4	10389,3	72,5	217,5	34691,4
-5,0	3,3	412,4	21,0	18,3	2485,6	47,0	72,1	10657,8	73,0	221,8	35425,1
-4,5	3,5	429,7	21,5	18,8	2562,6	47,5	73,9	10932,2	73,5	226,1	36171,4
-4,0	3,6	447,5	22,0	19,4	2641,7	48,0	75,7	11212,5	74,0	230,6	36930,6
-3,5	3,7	465,9	22,5	20,0	2723,0	48,5	77,5	11499,0	74,5	235,0	37702,7
-3,0	3,9	484,9	23,0	20,5	2806,5	49,0	79,3	11791,6	75,0	239,6	38488,1
-2,5	4,0	504,4	23,5	21,1	2892,3	49,5	81,2	12090,6	75,5	244,2	39286,8
-2,0	4,2	524,5	24,0	21,7	2980,3	50,0	83,1	12395,9	76,0	248,9	40099,0
-1,5	4,4	545,3	24,5	22,4	3070,8	50,5	85,1	12707,8	76,5	253,7	40924,9
-1,0	4,5	566,6	25,0	23,0	3163,7	51,0	87,1	13026,3	77,0	258,5	41764,7
-0,5	4,7	588,6	25,5	23,7	3259,1	51,5	89,1	13351,5	77,5	263,4	42618,5
0,0	4,9	611,3	26,0	24,3	3357,0	52,0	91,2	13683,5	78,0	268,4	43486,5
0,5	5,0	634,6	26,5	25,0	3457,5	52,5	93,3	14022,5	78,5	273,5	44368,9
1,0	5,2	658,6	27,0	25,7	3560,7	53,0	95,5	14368,5	79,0	278,6	45265,9
1,5	5,4	683,3	27,5	26,4	3666,7	53,5	97,7	14721,7	79,5	283,8	46177,6
2,0	5,6	708,8	28,0	27,2	3775,3	54,0	99,9	15082,2	80,0	289,1	47104,3
2,5	5,8	735,0	28,5	27,9	3886,9	54,5	102,2	15450,1			
3,0	6,0	762,0	29,0	28,7	4001,3	55,0	104,5	15825,5			
3,5	6,2	789,8	29,5	29,5	4118,7	55,5	106,9	16208,5			
4,0	6,4	818,4	30,0	30,3	4239,2	56,0	109,3	16599,3			
4,5	6,6	847,9	30,5	31,1	4362,7	56,5	111,8	16997,9			
5,0	6,8	878,2	31,0	32,0	4489,4	57,0	114,3	17404,6			
5,5	7,1	909,4	31,5	32,9	4619,3	57,5	116,8	17819,3			

Taulukko. Vesihöyryn kyllästymiskosteus vk ja osapaine P_k lämpötilassa t.

LIITE 2 Kirkon yläpohja rakenne.

Tieto:		Arvo:	
U-arvo:		0.164 W/m ² K	
Pintavastus, ulko (U):		0.040 m ² K/W	
Pintavastus, sisä (S):		0.130 m ² K/W	
Kulma (0-90):		0.000	
Pinta-ala:		1.00 m ²	
Paksuus:		278.000 mm	
Vesihöyryn vastus:		2.523e+03 m ² hPa/g	
Vesih.läpäisykerroin:		3.964e-04 g/m ² hPa	
Lämmönvastus:		6.079 m ² K/W	
Paino:		49.61 kg	
Hinta:		0.00 euro	

Nro:	Kerros:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [kg/msPa]	Hinta [euro/m3]:	Paino [kg/m3]:	Kylmäsilta:	Laskenne:
1	mineraalivilla 50mm	50.00	0.0360	1.600000e-10	0.00	100.00	ON	ON
2	mineralluosisolering 100	100.00	0.0360	1.600000e-10	0.00	100.00	ON	ON
3	mineralluosisolering 75mm	75.00	0.0360	1.600000e-10	0.00	100.00	ON	ON
4	HUOKOINEN KUITULEVY	25.00	0.0560	3.700000e-11	0.00	300.00	ON	ON
5	Puu(mänty)	28.00	0.1200	4.000000e-12	0.00	450.00	EI	ON

Kuva. Nykyinen yläpohjan U-arvo [W/K·m²].

Tieto:		Arvo:	
U-arvo:		0.103 W/m ² K	
Pintavastus, ulko (U):		0.040 m ² K/W	
Pintavastus, sisä (S):		0.130 m ² K/W	
Kulma (0-90):		0.000	
Pinta-ala:		1.00 m ²	
Paksuus:		372.000 mm	
Vesihöyryn vastus:		5.306e+05 m ² hPa/g	
Vesih.läpäisykerroin:		1.885e-06 g/m ² hPa	
Lämmönvastus:		9.672 m ² K/W	
Paino:		455.62 kg	
Hinta:		0.00 euro	

Nro:	Kerros:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [kg/msPa]	Hinta [euro/m3]:	Paino [kg/m3]:	Kylmäsilta:	Laskennassa:
1	tuulensuojalevy	50.00	0.0320	1.400000e-07	0.00	1050.00	ON	ON
2	Mineraali villa	200.00	0.0360	3.800000e-12	0.00	2000.00	ON	ON
3	PIR	100.00	0.0220	5.400000e-14	0.00	200.00	ON	ON
4	Puu(mänty)	22.00	0.1200	4.000000e-12	0.00	450.00	EI	ON

Kuva. Korjausehdotus yläpohjan U-arvo [W/K·m²] ilman kylmäsiltoja.

Kerrostietojen muuttaminen

Materiaalikirjasto: V:\doflampo\lamda_declared\materials.mab

Kirjastomateriaali: Info

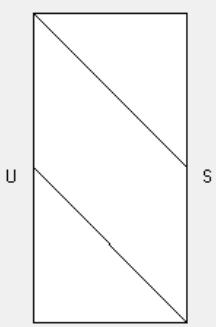
Rakennekerros: Kylmäsilta

Suhteellinen osuus Lisäkonduktanssi

Ominaisuus:	Yksikkö:	Arvo:
Nimi		Puu(mänty)
Prosentuaalinen osuus:	[%]	8.50
Lämmönjohtavuus (suunnitteluarvo):	[W/mK]	0.120000
Hinta:	[euro/m3]	0.00
Paino:	[kg/m3]	450.00

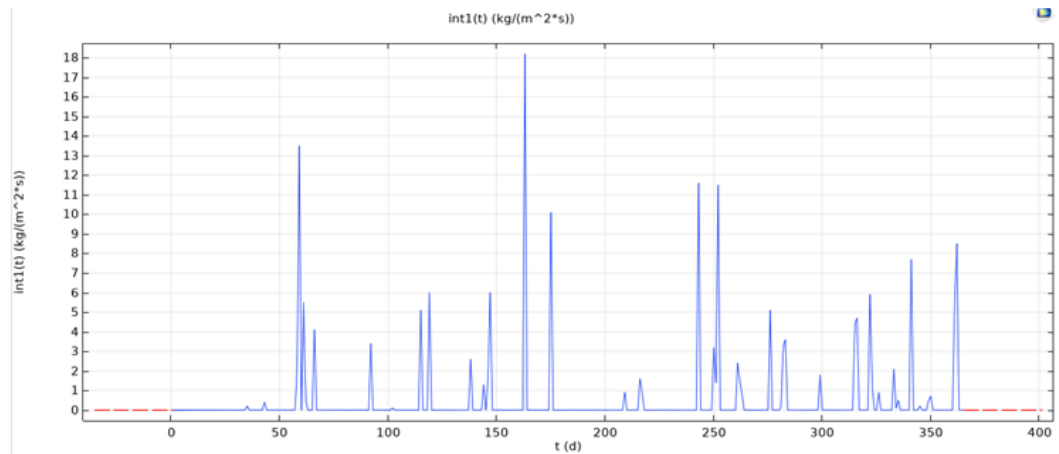
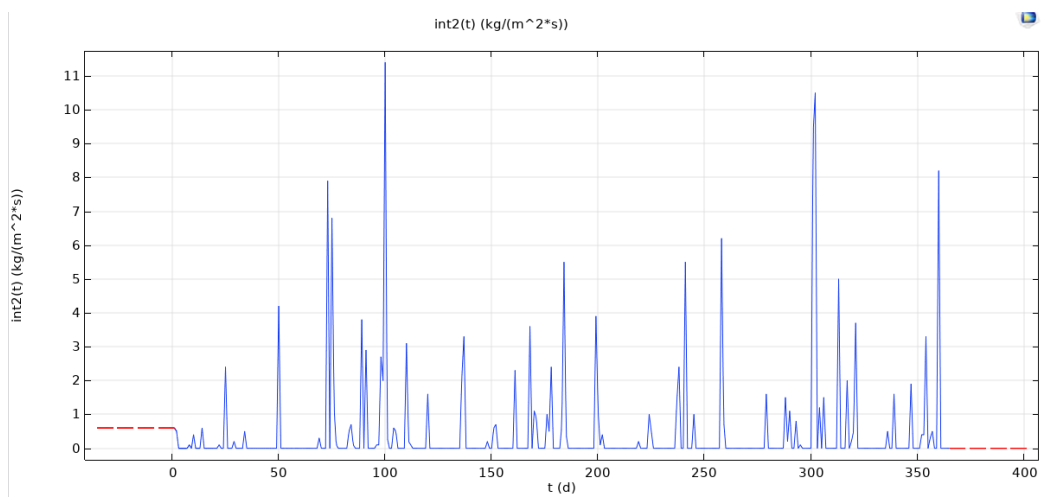
Muuta kerros Paluu

Kuva. Yläpohjan kylmäsilan prosentuaalinen osuus.

		Tieto:	Arvo:					
		U-arvo:	1.064 W/m2K					
		Pintavastus, ulko (U):	0.040 m2K/W					
		Pintavastus, sisä (S):	0.130 m2K/W					
		Kulma (0-90):	90.000					
		Pinta-ala:	1.00 m2					
		Paksuus:	770.000 mm					
		Vesihöyryn vastus:	4.278e+04 m2hPa/g					
		Vesihöyrykerroin:	2.338e-05 g/m2hPa					
		Lämmönvastus:	0.940 m2K/W					
		Paino:	1540.00 kg					
		Hinta:	0.00 euro					
Nro:	Kerros:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [kg/msPa]:	Hinta [euro/m3]:	Paino [kg/m3]:	Kylmäsilta:	Laskennassa:
1	Tiili, savi	770.00	1.0000	5.000000e-12	0.00	2000.00	EI	ON

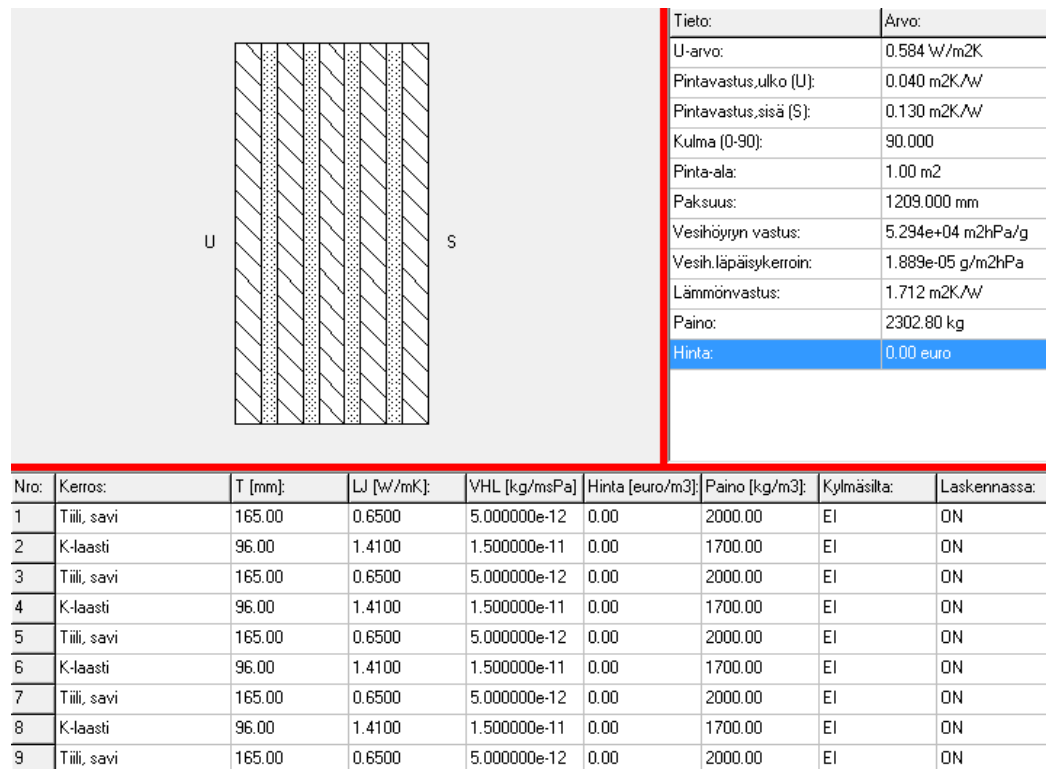
Kuva. Tiiliseinä 770 mm U-arvo.

LIITE 3 Sademäärät kirkon itäiselle ja läntiselle puolelle.

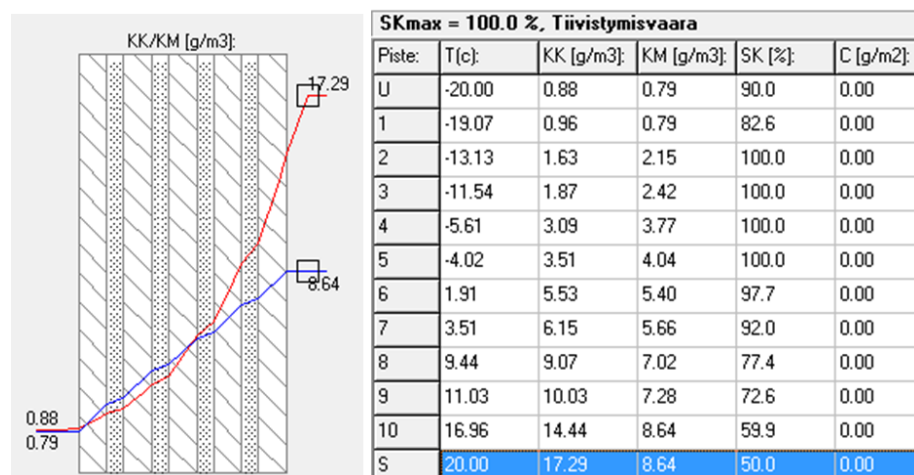
**Kuva.** Sade itäiselle puolelle 365 päivää.**Kuva.** Sade läntiselle puolelle 365 päivää.

LIITE 4 DOF-Lämpö laskelmia.

Vaasan kirkon tiiliseinässä on laskelmien mukaan 68 % tiiltä ja 32 % kalkkilaastia. Tiiliseinä on periaatteessa rakennettu symmetrisesti keskilinjän molemmin puolin, joten seinän kosteus toimintaa voi tarkastella homogeenisena kappaleena.



Kuva. Pilasterin U-arvo DOF-Lämpö ohjelmalla laskettuna.



Kuva. Tiivistymisen alueet pilasterissa DOF-Lämpö ohjelmistolla laskettuna.

LIITE 5 Kuvia kirkon katoilta.



Kuva. Pilastereiden tausta.



Kuva. Katto avattuna pilasterin kohdalta. Katossa ei ole aluskatetta.



Kuva. Katon ja pilasterin liitoskohta.



Kuva. Vaurion alle on asennettu vuonna 2018 suojaverkko, mikä estää tiili ja laasti palojen tipahtelemisen alla olevalle kulkureitille.



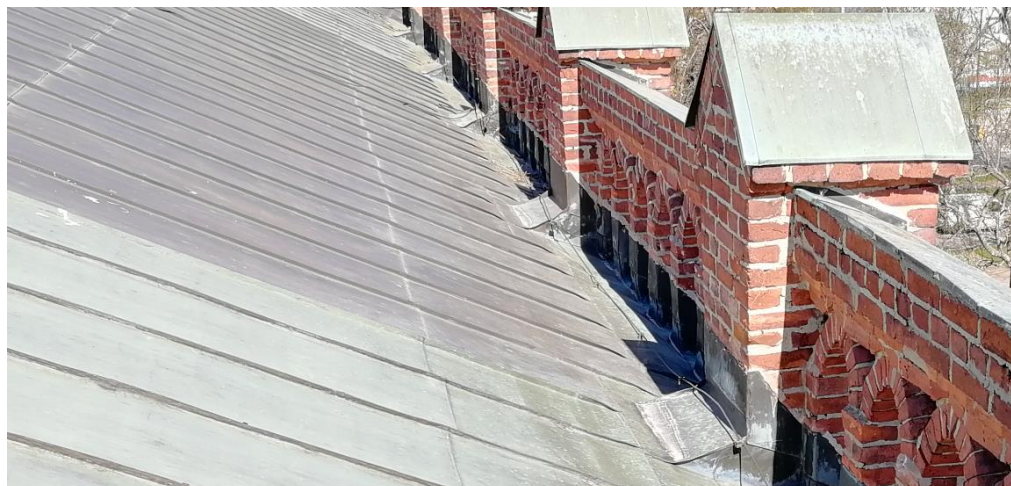
Kuva. Rästäsliipan pituus.



Kuva. Pilasterin ja räystäään kohdalta.



Kuva. Kattosaumat.



Kuva. Saumauslinja ja pilasterit.



Kuva. Pilasterin tausta näkyy ullakon puolelta.



Kuva. Yläpohjan lasivillaa, sammutusjärjestelmä ja kattovasa.

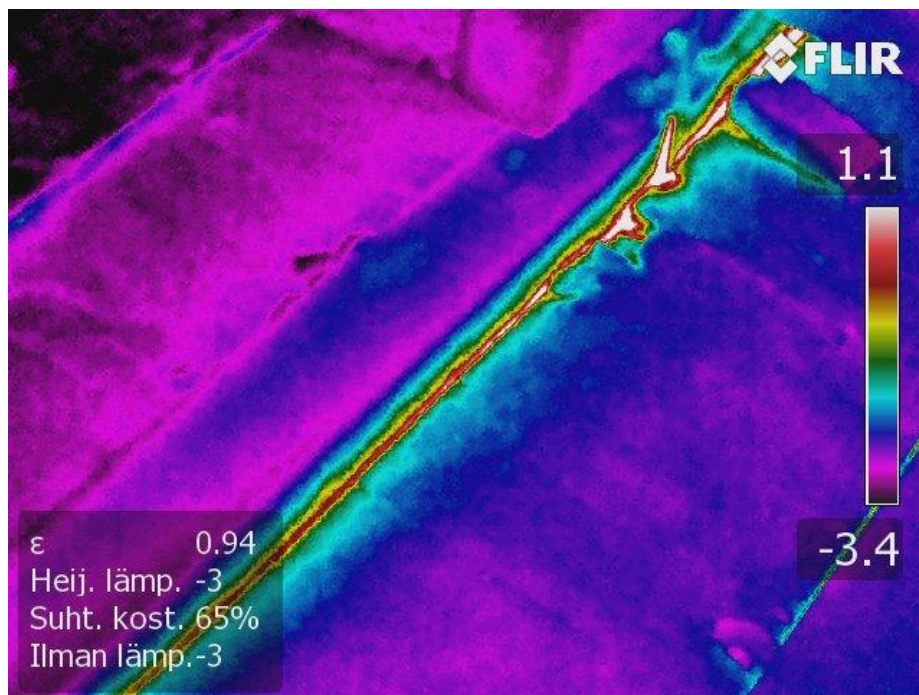


Kuva. Rästäs.

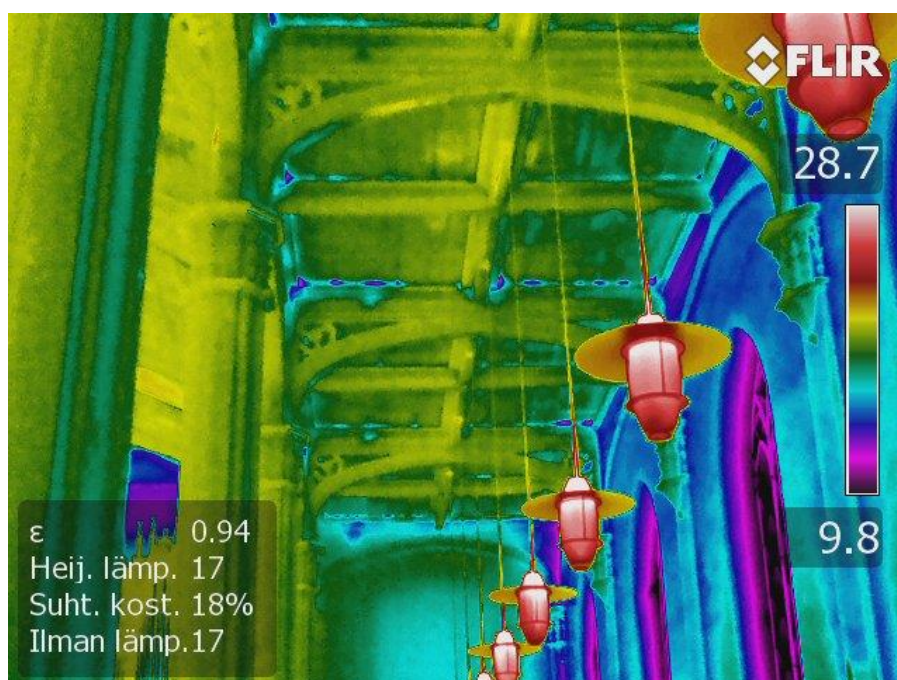


Kuva. Läntinen julkisivu.

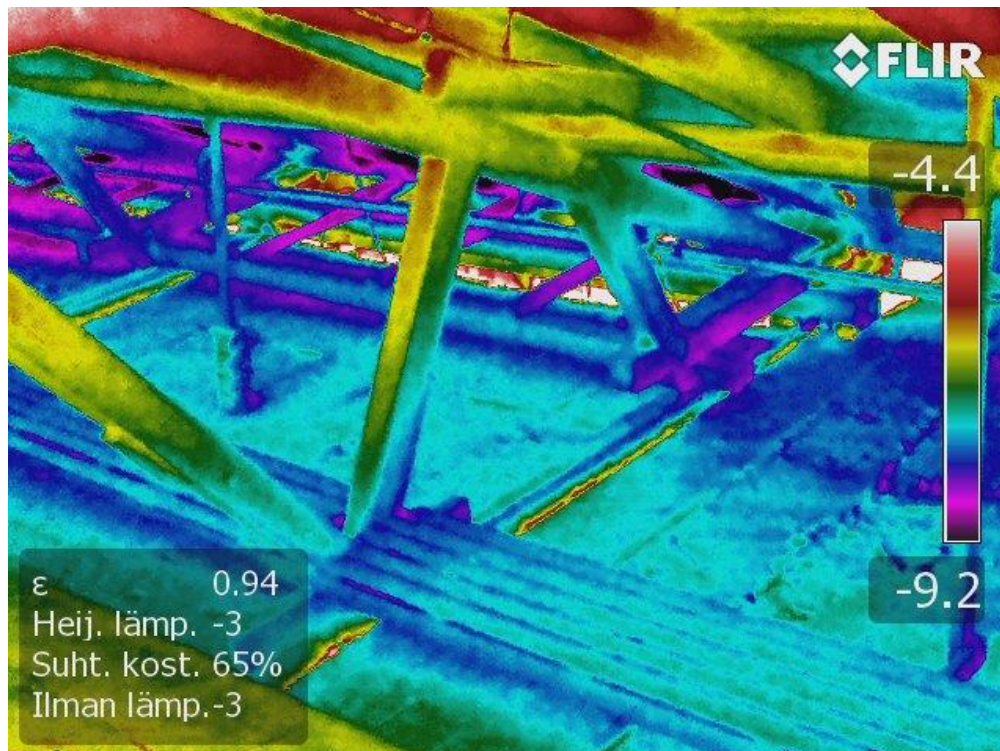
LIITE 6 Lämpökamerakuvia kirkon rakenteteista.



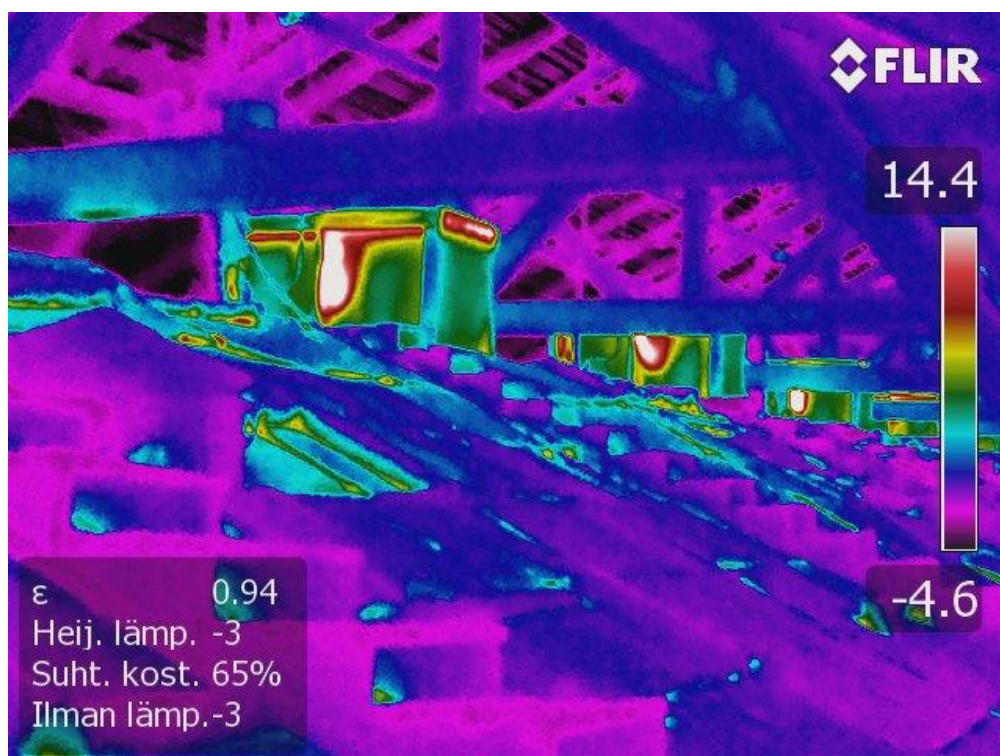
Kuva. Kattovasa upotettu lasivillaan, joka on kylmäsilta.



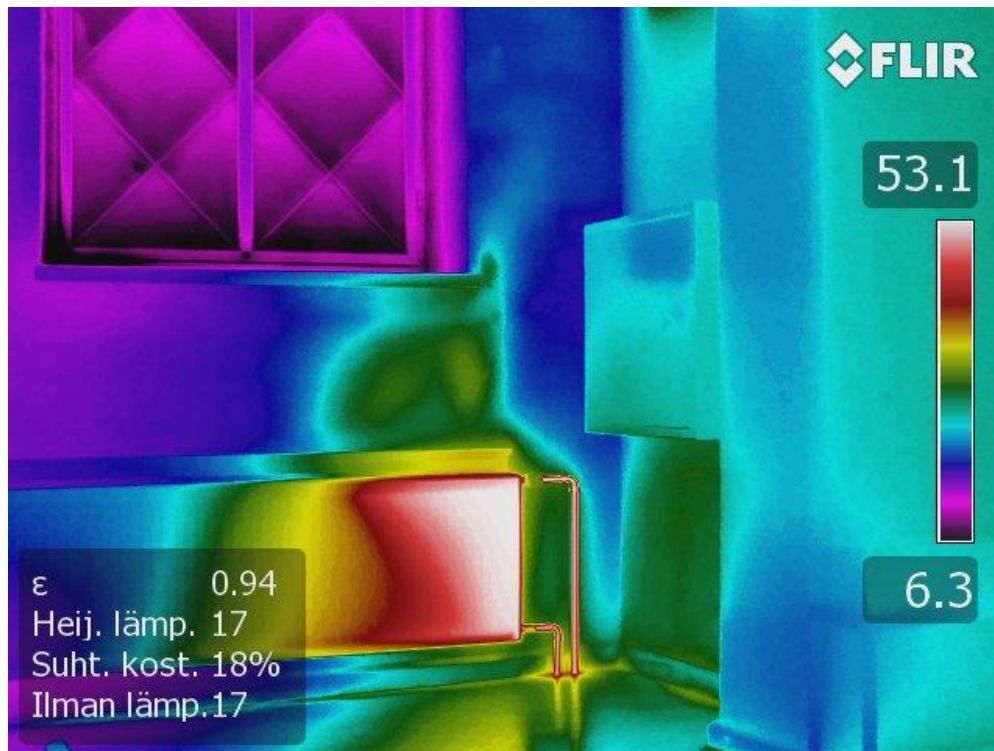
Kuva. Kirkon katto.



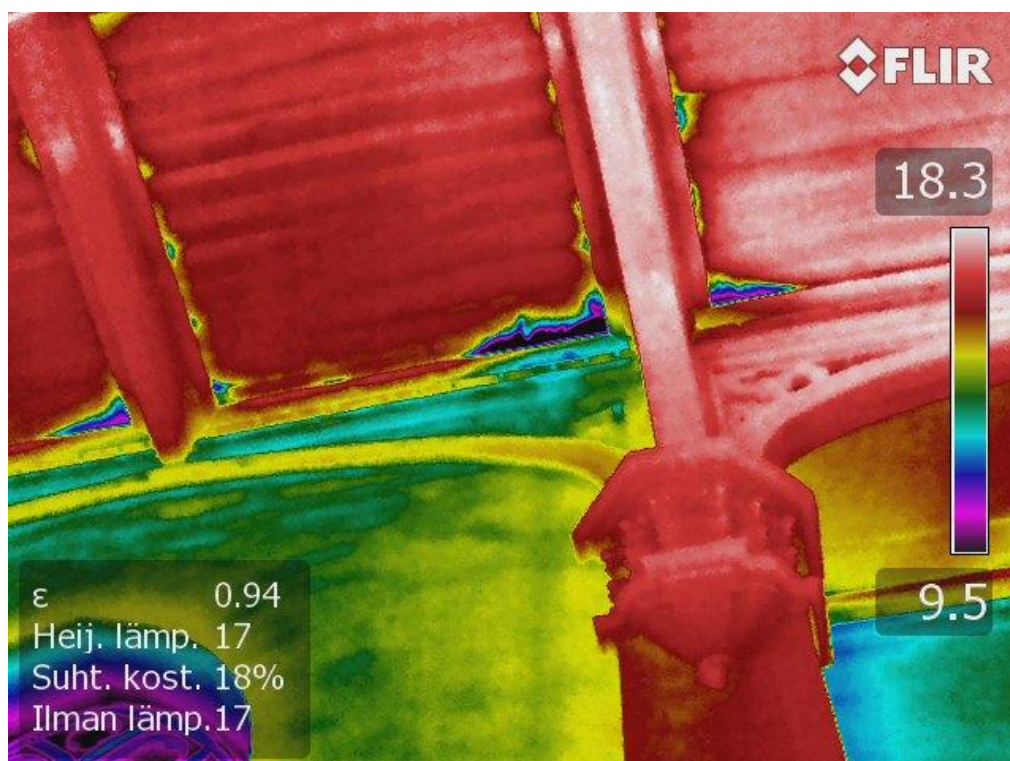
Kuva. Ullakon huoltokäytävä.



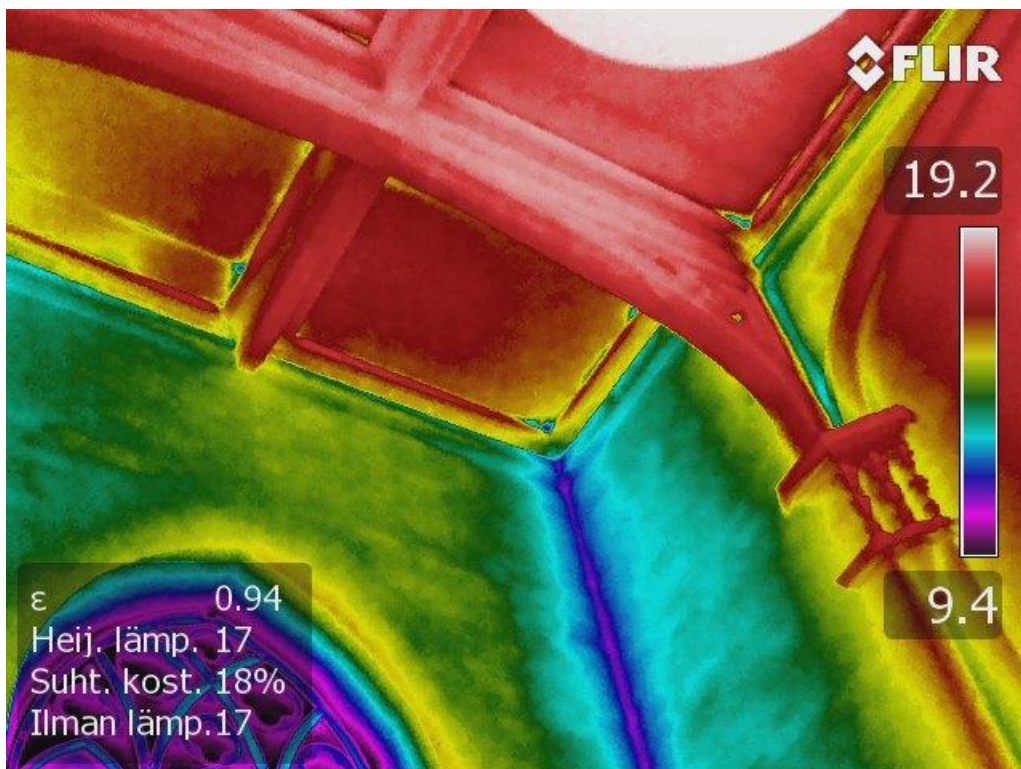
Kuva. Kirkon kattovalojen huonosti eristetyt kotelot.



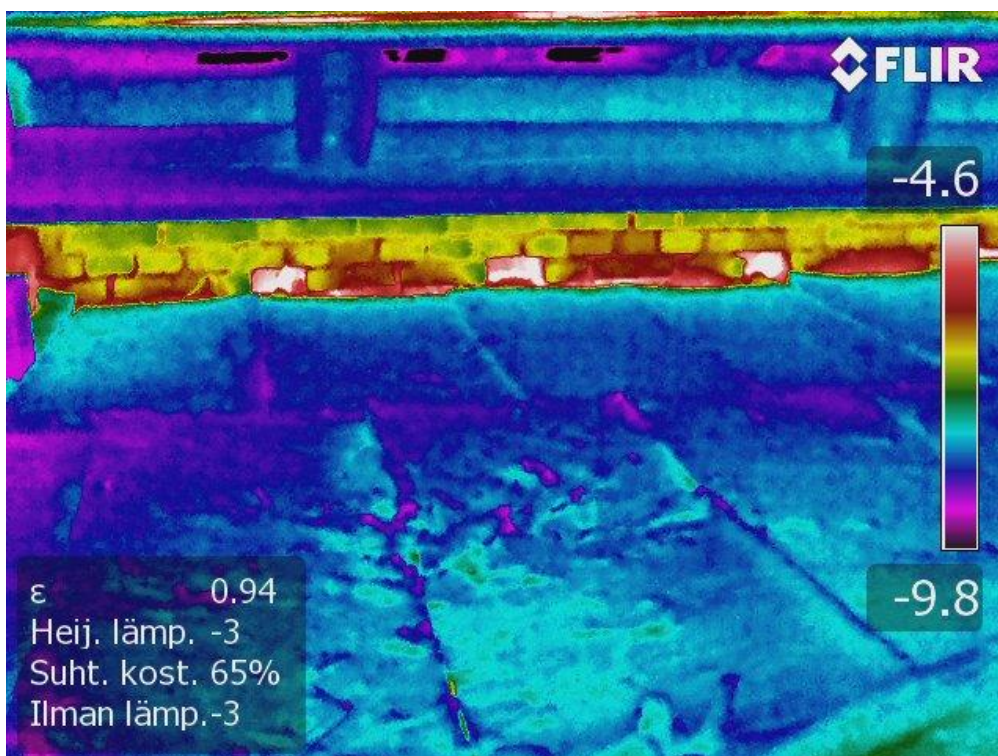
Kuva. Lämpöpatteri.



Kuva. Kosteaa aluetta katossa.

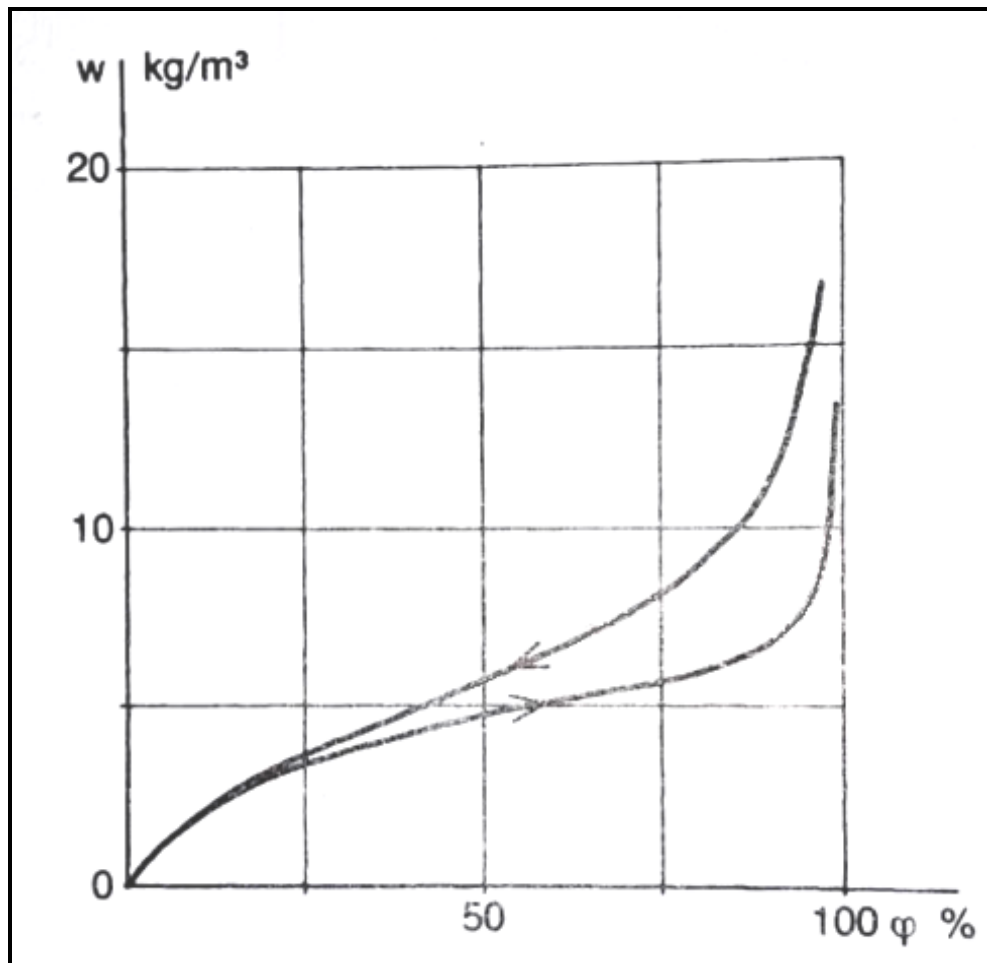


Kuva. Katto ja seinänurkka.

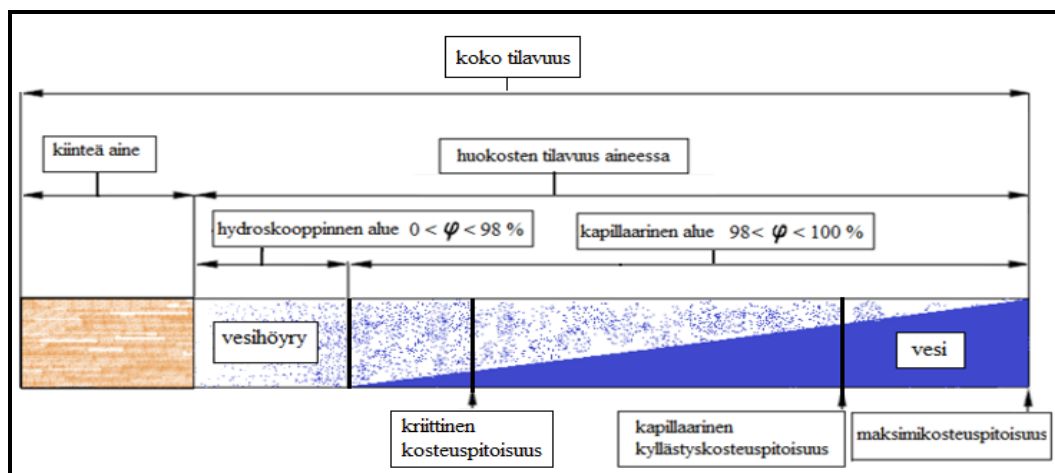


Kuva. Ullakolla.

LIITE 7 Tasapainokosteuskäyrä ja kosteuspitoisuuden kasvaminen.

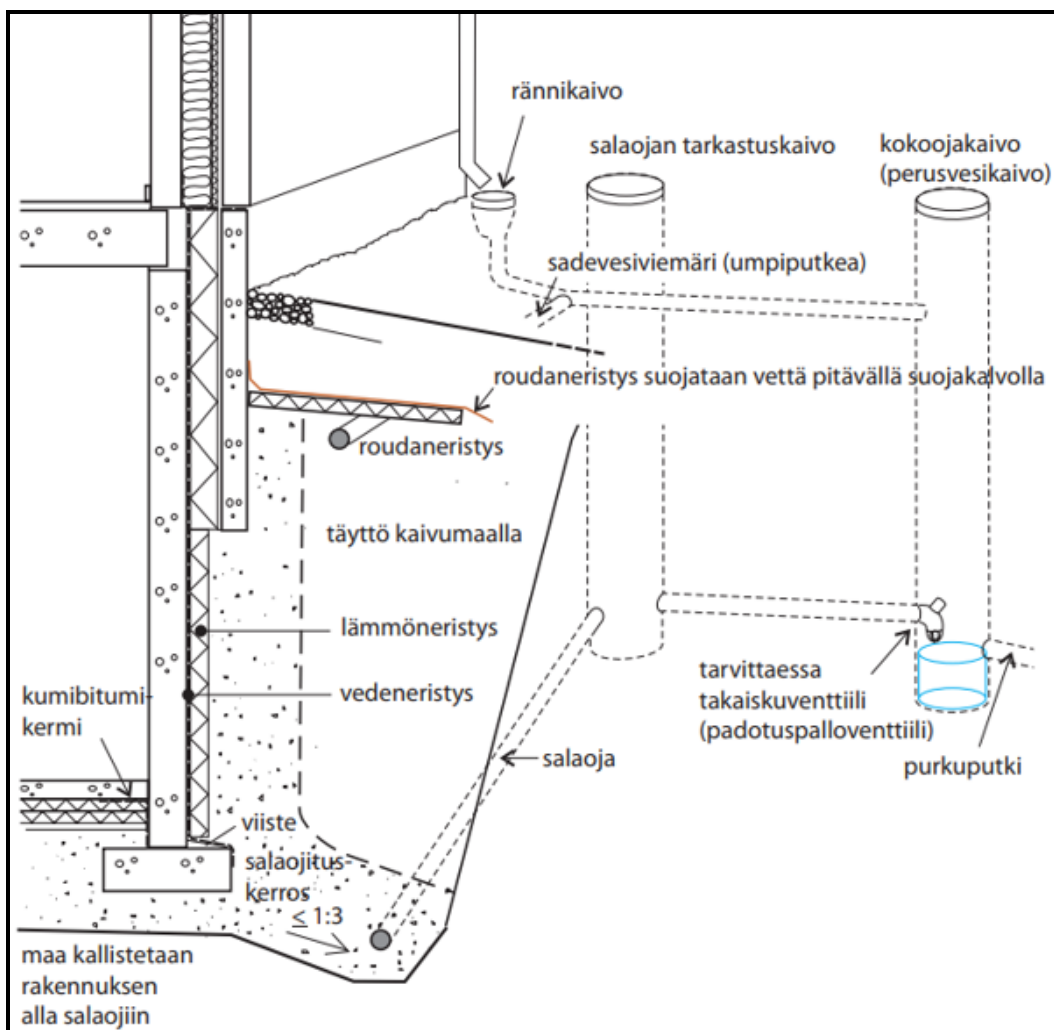


Kuva. Tiili tasapainokosteuskäyrä /27/. Käyrä loppuu 98 %, koska tämän jälkeen RH ei määritä kosteuspitoisuutta vaan huokosten tilavuus.



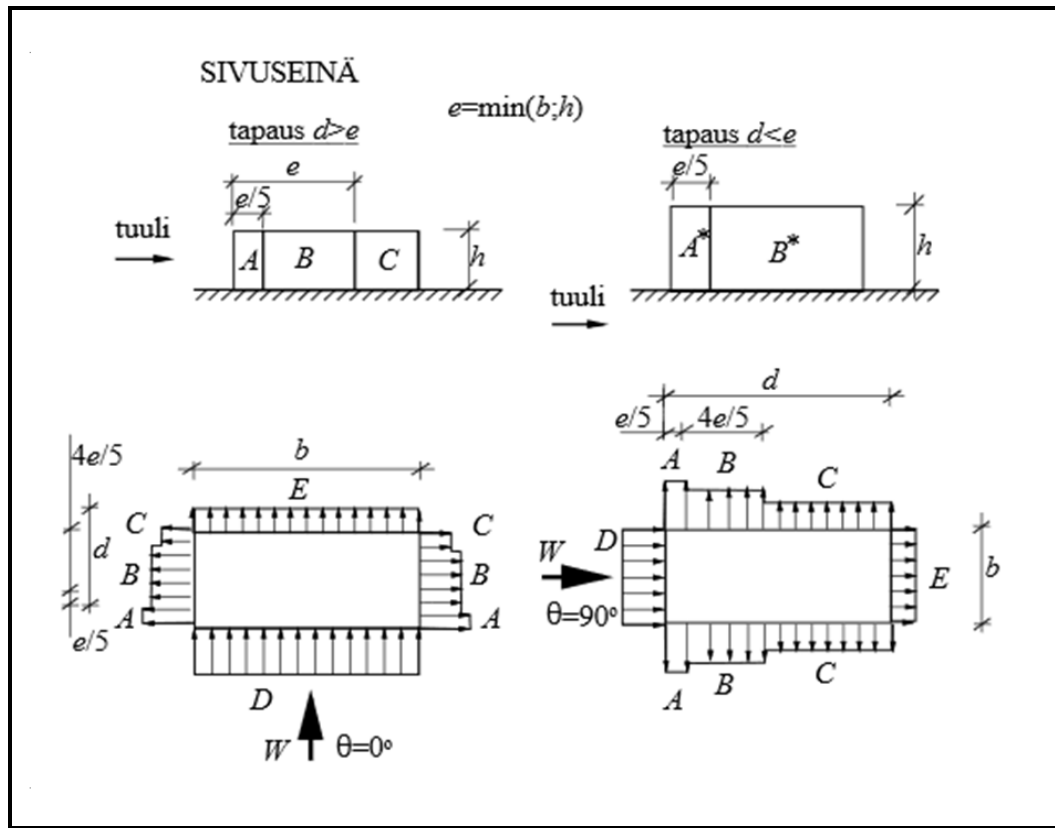
Kuva. Kosteuspitoisuuden kasvaminen huokoisessa aineessa.

LIITE 8 Maanvastainen seinärakenne ja sadevesijärjestelmä.



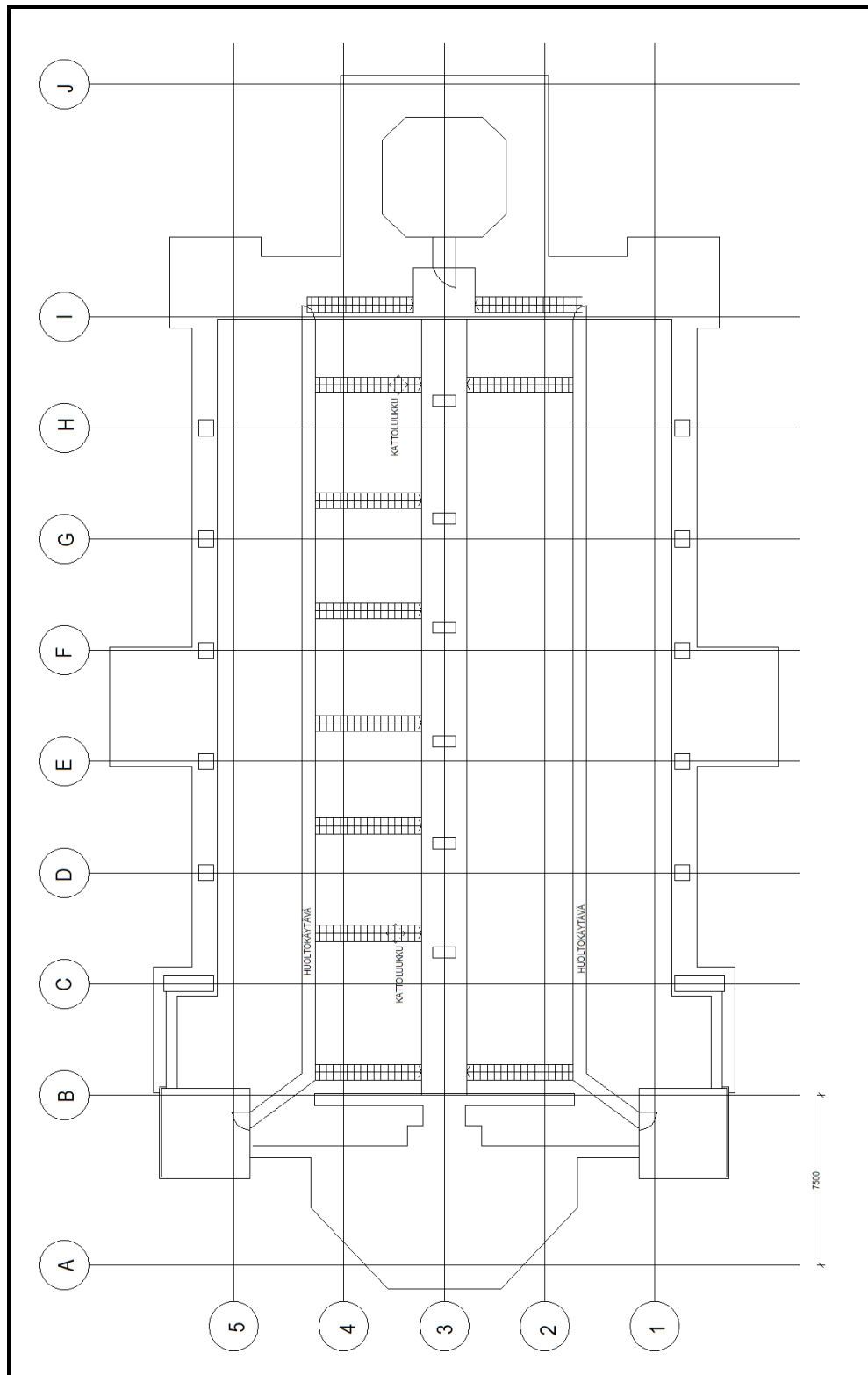
Kuva. Maanvastainen seinärakenne ja sadevesijärjestelmä /11/.

LIITE 9 Tuulen aiheuttama paine ja imu seinille.

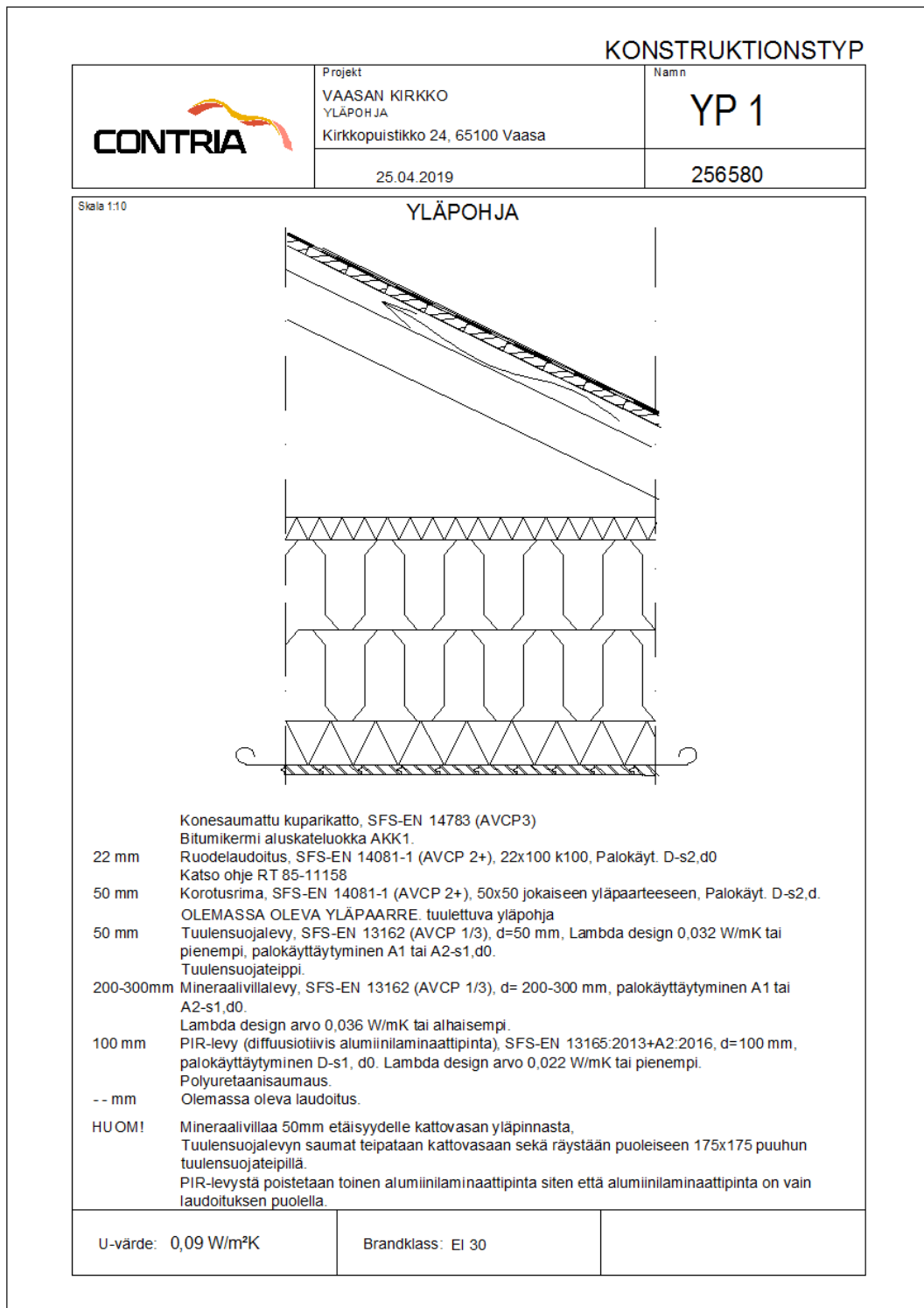


Kuva. Tuulen aiheuttama paine ja imu seinille /28/.

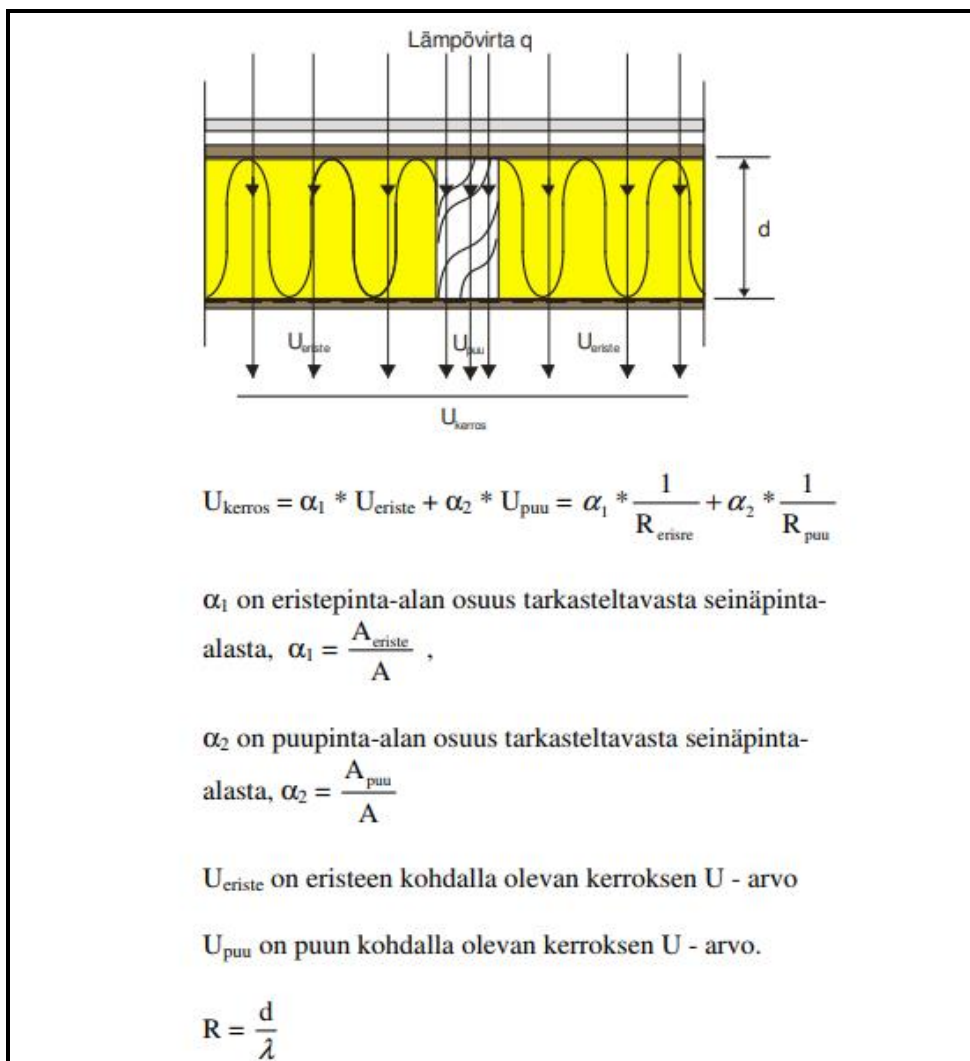
LIITE 10 Kirkon yläpohja.



LIITE 11 Yläpohja rakennedetalji.



LIITE 12 U-arvon laskeminen rakenteesta.



Kuva. U-arvon laskeminen rakenteesta /12/.

$$\alpha_{ikkuna} = 0,21$$

$$\alpha_{770 \text{ seinä}} = 0,63$$

$$\alpha_{1210 \text{ seinä}} = 0,16$$

$$U_{ikkuna} = 5,747 \text{ W/m}^2\text{K (DOF-Lämpö arvo)}$$

$$U_{770 \text{ seinä}} = 1,064 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{1210 \text{ seinä}} = 0,584 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{koko seinä}} = 1,97 \text{ W/m}^2$$