

Jukka-Pekka Pesonen

**TALOTEHTAAN RAKENNELIITOKSIEN KYLMÄSILTATARKAS-
TELU**

TALOTEHTAAN RAKENNELIITOKSIEN KYLMÄSILTATARKAS- TELU

Jukka-Pekka Pesonen
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka, talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä(t): Jukka-Pekka Pesonen
Opinnäytetyön nimi: Talotehtaan rakenneliitoksien kylmäsiltojen tarkastelu
Työn ohjaaja(t): Kimmo Illikainen
Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Kevät 2015 Sivumäärä: 61

Suomen ympäristöministeriön vuonna 2012 julkaisemat uudet määräykset tiukensivat rakennuksen energiatehokkuuden laskentaa. Uusissa määräyksissä tulee ottaa huomioon viivamaiset kylmäsiltojen energiatehokkuuslaskennassa. Opinnäytetyön tavoitteena oli laskea talotehtaan rakenneliitoksien kylmäsiltojen todelliset laskenta-arvot sekä verrata niitä Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 ohjeisiin. Lisäksi selvitettiin, kuinka suuri vaikutus lasketuilla kylmäsiltojen lämpöhäviöllä on talotehtaan esimerkkikohteen johtumislämpöhäviöön.

Työssä mallinnettiin talotehtaalta saadut liitosdetaljit AutoCAD-ohjelmalla viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaan mukaisesti. Sen jälkeen laskentamallit simuloitiin Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Simuloinnin tuloksena saatiin liitoksen lämpövirta, jonka avulla määritettiin viivamaisen lisäkonduktanssin psi-arvo. Laskennassa tarvittavat rakennusosien lämmönläpäisykerroimet laskettiin käsin Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 ohjeiden mukaan.

Tutkimuksessa kaikki lasketut lisäkonduktanssiarvot olivat pienempiä kuin ohjearvot. Erityisesti välipohjaliitoksien lasketut arvot alittivat ohjearvon selvästi. Tässä työssä tutkitun esimerkkikohteen kylmäsiltoista johtuva lämpöhäviö pieneni noin 60 prosenttia ohjearvoilla lasketusta. Kylmäsiltojen osuus kokonaislämpöhäviöstä oli noin 8 prosenttia tutkituilla arvoilla laskettuna. Ohjearvoilla laskettuna kylmäsiltojen osuus oli 18 prosenttia kokonaislämpöhäviöstä, joka kertoo paljon uusien määräyksien tarpeellisuudesta. Vuoden 2012 määräyksien myötä talotehtaiden on syytä tutkia omia rakenneliitoksia, sillä se antaa hyvän kuvan rakennuksien todellisesta energiatehokkuudesta.

Asiasanat: lisäkonduktanssi, kylmäsilta, simulointi, rakennusfysiikka, lämpöhäviö, energiatehokkuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building Engineering

Author(s): Jukka-Pekka Pesonen

Title of thesis: Measurements of Thermal Bridges in Adjoining Structures

Supervisor(s): Kimmo Illikainen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2015 Pages: 61

In the year 2012 the Finnish building energy regulations were tightened. In the new regulations thermal bridges have to be a part of the energy efficiency calculations. The aim of this thesis was to calculate the linear thermal transmittance values for a house factory and compare the calculated values with the reference values of National Building Code of Finland. In addition it was examined how large impact of the calculated thermal bridge heat loss had compared to conductive heat loss in an example building.

The adjoining structures were modeled with Autocad software using the help of Finnish linear thermal transmittances accounting guide. Then, the calculated models were simulated with Comsol Multiphysics software. The linear thermal transmittance values were determined from the simulation results. The overall heat transfer coefficients were calculated with the instructions of the National Building Code of Finland, part C4.

In the study all the calculated thermal transmittance values were lower than the reference values. In particular, the floor joints calculated values were clearly below the reference value. The example building's conductive heat loss was 60 percent lower compared to the reference values. The calculated thermal bridges were about 8 percent of the conductive heat loss. When calculated with reference values it was 18 percent, which tells a lot of the necessary of the new regulations. The calculations according to the new regulations give a good picture of the actual energy performance of buildings.

Keywords: thermal transmittance, thermal bridge, building physics, heat loss, energy efficiency

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 LÄMMÖN JOHTUMINEN	8
2.1 Rakennuksen johtumislämpöhäviö	8
2.2 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen	9
2.3 Maanvastaiset rakenteet	14
3 VIIIVAMAISEN LISÄKONDUKTANSSIN MÄÄRITYS	19
3.1 Menetelmät	21
3.2 Laskentaperiaate	21
3.3 Ohjearvot	22
3.4 Pintavastukset	24
4 LIITOSTEN SIMULOINTI	25
4.1 Mallintaminen	25
4.2 Ulkoseinän nurkkaliitokset	26
4.3 Ulkoseinän ja yläpohjan liitokset	34
4.4 Ulkoseinän ja välipohjan liitokset	40
4.5 Ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitos	45
4.6 Ikkunaliitokset	49
4.7 Oviliitokset	52
5 ESIMERKKIKOHTTEEN JOHTUMISLÄMPÖHÄVIÖ	54
6 KYLMÄSILTATARKASTELUN TULOKSET	55
6.1 Lisäkonduktanssiarvot	55
6.2 Kylmäsiltojen merkitys	56
7 YHTEENVETO	59
LÄHTEET	61

SANASTO

Abiabaattireunaehto

Täydellinen lämmöneristys, joka ei ota huomioon rakennusosan liittymistä muihin rakenteisiin.

Kylmäsilta

Rakennusosassa oleva rakenneosaa, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi johtuvan lämpövirran tiheys on viereiseen alueeseen verrattuna suurempi.

Lämmönläpäisykerroin

Ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien tilojen välillä on yksikön suuruinen.

Viivamainen lisäkonduktanssi

Ilmoittaa rakennusosassa olevan, pituusyksikön mittaisen viivamaisen kylmäsiltaa aiheuttaman lisäyksen rakennusosan läpi johtuvaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.

1 JOHDANTO

Vuonna 2012 rakentamismääräyskokoelman osissa D3/2012, C4/2012 sekä D5/2012 tulivat voimaan ympäristöministeriön uudet määräykset rakennuksen energiatehokkuuden laskennassa. Edelliset rakentamismääräykset ottivat huomioon vain säännölliset kylmäsillat, jotka sisältyvät rakennusosan lämmönläpäisykertoimeen. Uusissa energiamääräyksissä otetaan huomioon myös rakenteiden liittymistä johtuvat kylmäsillat, joita tarkastellaan tässä opinnäytetyössä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on laskea talotehtaan rakenneliitoksien kylmäsillojen aiheuttamat viivamaiset lisäkonduktanssit ja verrata arvoja Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjearvoihin. Työssä tutkitaan talotehtaan passiivi- ja välimalliseinän liittymistä eri rakennusosiin. Lisäksi talotehtaan passiivirakenteiselle esimerkkikohteelle lasketaan kokonaislämpöhäviö työssä lasketuilla lisäkonduktanssiarvoilla sekä selvitetään, kuinka suuri merkitys kylmäsilloilla todellisuudessa on esimerkkikohteen energiatehokkuuteen.

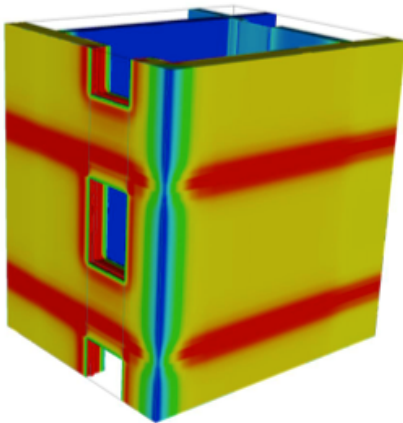
Talotehtaalta saadut liitosdetaljit mallinnetaan AutoCAD-ohjelmalla lisäkonduktanssin laskentaoppaan ohjeiden mukaan. Tämän jälkeen laskentamallit simuloidaan Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Simuloinnin tuloksena saadaan liitoksen lämpövirta, jonka avulla määritetään viivamaisen lisäkonduktanssin arvo. Laskentaa varten talotehtaan rakennusosille lasketaan lämmönläpäisykerroin rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan.

2 LÄMMÖN JOHTUMINEN

Prosessi, jossa energia siirtyy eri lämpötilan omaavien rakennusosien välillä, kutsutaan lämmönsiirroksi. Lämmöllä on kolme siirtymistapaa: johtuminen, säteily ja konvektio. Lämmönjohtumisessa energia siirtyy värähtelemällä. Kappaleen molekyylit värähtelevät lämpötilan mukaan eri nopeudella, minkä tuloksena värähtelevät rakenneosat törmäävät toisiinsa siirtäen energiaa. Rakennusosissa lämpöenergia siirtyy kappaleen sisällä ja osasta toiseen. (Hagentoft 2001, 4.)

2.1 Rakennuksen johtumislämpöhäviö

Rakennuksen ulkovaipan johtumislämpöhäviö on mahdollista määrittää kolmiulotteisella laskentamallilla, jolloin kylmäsiltoja ei tarvitse erikseen ottaa huomioon (kuva 1).



KUVA 1. Esimerkki rakennusvaipan kolmiulotteisesta laskentamallista (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 7)

Käytännössä rakennusta ei tulisi tarkastella kokonaisuutena vaan se pitää jakaa erillisiin rakennusosiin, joita ovat esimerkiksi seinät, ikkunat ja yläpohjat. Rakennusosille määritetään lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan. (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 7.)

Lämmönläpäisykertoimet lasketaan tai mitataan kullekin rakennusosalle erikseen. Rakennusosan liittymistä muihin rakennusosiin ei oteta laskennassa

huomioon. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennusosan reunalla oletetaan olevan täydellinen lämpöeristys eli adiabaattireunaehto. Tämän oletuksen epätarkkuus korjataan laskemalla koko rakennuksen johtumislämpöhäviö rakentamismääräyskokoelman osan D5 kaavalla (kaava 1). Korjauksessa käytetään rakennusosien välisten liitosten viivamaisia lisäkonduktansseja. (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 7.)

$$H_{\text{joht}} = \sum U_{\text{ulkoseinä}} A_{\text{ulkoseinä}} + \sum U_{\text{yläpohja}} A_{\text{yläpohja}} + \sum U_{\text{alapohja}} A_{\text{alapohja}} + \sum U_{\text{ikkuna}} A_{\text{ikkuna}} + \sum U_{\text{ovi}} A_{\text{ovi}} + \sum_k \psi_k l_k + \sum_j X_j \quad \text{KAAVA 1}$$

H_{joht}	rakennusosien ja niiden liitosten yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö [W/K]
U	rakennusosan lämmönläpäisykerroin [W/(m ² K)]
A	rakennusosan pinta-ala [m ²]
Ψ_k	kahden rakennusosan välisen liitoksen k viivamainen lisäkonduktanssi [W/(mK)]
l_k	kahden rakennusosan välisen liitoksen k pituus [m]
X_j	pistemäisen kylmäsilan j aiheuttama lisäkonduktanssi [W/K]

Kaavan lisäkonduktanssit käsittelevät siis rakenteen epäsäännöllisiä kylmäsiltoja eivätkä säännöllisiä kylmäsiltoja, jotka jo sisältyvät kaavassa oleviin lämmönläpäisykertoimiin. Termi X_j ottaa huomioon yksittäiset kylmäsilat, kuten parvekekiinnitykset, joita ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 8.)

2.2 Lämmönläpäisykerroimen määrittäminen

Lisäkonduktanssilaskennassa tarvitaan lämmönläpäisykerroimet eli U-arvot liitetyille rakenteille. U-arvo kertoo rakenteen kyvystä päästää lämpöä lävitseen. Mitä pienempi lämmönläpäisykerroin rakenteella on, sitä vähemmän se päästää lämpöä lävitseen. U-arvot lasketaan rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan. (Torvikoski 2013.)

Rakennusosan lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan kaavalla 2 (Lämmöneristys. 2012, 6).

$$U = \frac{1}{R_T}$$

KAAVA 2

U rakennusosan lämmönläpäisykerroin [$W/(m^2/K)$]

R_T rakennusosan kokonaislämmönvastus [$m^2 K/W$]

Rakennusosa yleensä koostuu useasta ainekerroksesta, jotka voivat poiketa toisistaan sekä paksuudeltaan että lämmönjohtavuudeltaan. Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus (R_T) lasketaan kaavalla 3. (Lämmöneristys. 2012, 7.)

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

KAAVA 3

R ainekerroksen lämmönvastus [$m^2 K/W$]

D ainekerroksen paksuus [m]

λ ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [$W/(mK)$]

Rakennusosan ainekerrokset voivat olla lämpövirran suuntaan nähden peräkkäin tai rinnan. Ainekerrokset muodostavat rakennusosan (kuva 2), jonka kokonaislämmönvastus (R_T) lasketaan kaavalla 4. (Lämmöneristys. 2012, 7.)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

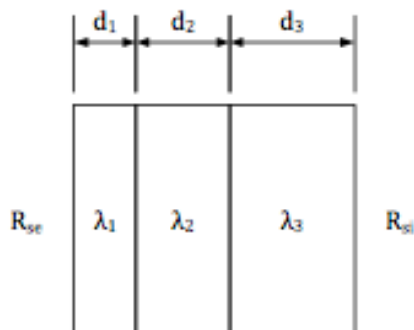
KAAVA 4

R_T rakennusosan kokonaislämmönvastus [$m^2 K/W$]

R_{si} sisäpuolen pintavastus [$m^2 K/W$]

R_1, R_2, \dots, R_n rakennusosan ainekerrosten 1, 2, ..., n lämmönvastukset [$m^2 K/W$]

R_{se} ulkopuolen pintavastus [$m^2 K/W$]



KUVA 2. Esimerkki rakennusosasta, joka muodostuu useasta ainekerroksesta (Lämmöneristys. 2012, 9)

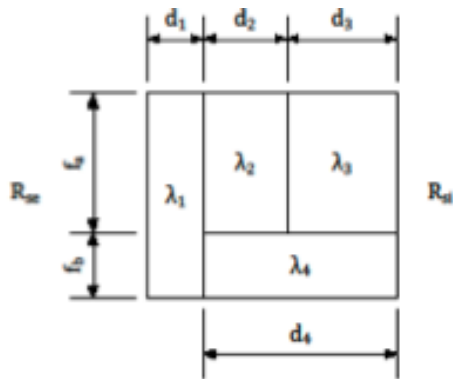
Useita ainekerroksia sisältävän rakenneosan, jossa on lämpövirran suuntaan nähden lämmönjohtavuudeltaan erilaisia rinnakkaisia ainekerroksia (kuva 3), kokonaislämmönvastukselle lasketaan yläkiiarvo (R_T') ja alalikiarvo (R_T''). Rakennusosan kokonaislämmönvastus (R_T) muodostuu näiden arvojen keskiarvosta kaavalla 5. (Lämmöneristys. 2012, 7.)

$$R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2}$$

KAAVA 5

R_T' rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo [$m^2 K/W$]

R_T'' rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo [$m^2 K/W$]



KUVA 3. Esimerkki rakennusosasta, jossa lämpövirran suuntaan nähden rinnakkaisia ainekerroksia (Lämmöneristys. 2012, 9)

Kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvon laskennassa rakennusosa jaetaan lämpövirran suuntaan nähden itsenäisiin lohkoihin (kuva 4), jotka ulottuvat koko rakenneosan läpi. Jokaisen lohkon kokonaislämmönvastus lasketaan erikseen aiemmin esitetyllä kaavalla 4 (s. 10). Lohkojen kokonaislämpövastukset sijoitetaan yhtälöön (kaava 6), josta saadaan kokonaislämpövastuksen yläkiiarvo (R_T'). (Lämmöneristys. 2012, 8.)

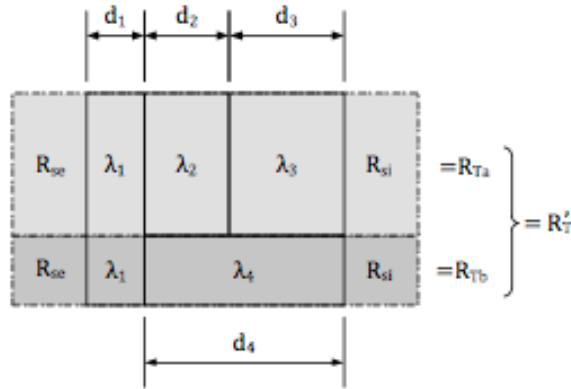
$$\frac{1}{R_T'} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{Tn}}$$

KAAVA 6

R_T' rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo [$m^2 K/W$]

F_a, f_b, \dots, f_n lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tn}$ lohkojen a, b, ..., n kokonaislämmönvastukset [$m^2 K/W$]



KUVA 4. Esimerkki yläikiarvoa laskettaessa käytettävistä lohkoista (Lämmöneristys. 2012, 9)

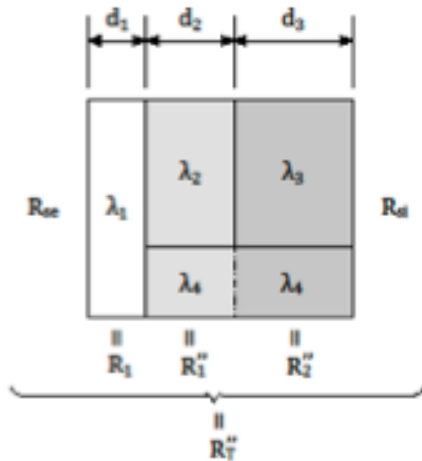
Kokonaislämpövastuksen alalikiarvon laskennassa rakennusosa jaetaan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuoriin koko rakenneosan läpi ulottuviin kerroksiin (kuva 4). Lämpövirran suunnassa jokainen kerros on lämmönjohtavuudelta yhtenäinen. Erilaiset rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset yhdistetään toisiinsa käyttäen kaavaa 7. (Lämmöneristys. 2012, 8.)

$$\frac{1}{R_j''} = \frac{f_a}{R_{ja}} + \frac{f_b}{R_{jb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{jn}} \quad \text{KAAVA 7}$$

R_j'' rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisien lohkojen a, b, ..., n yhteenlaskettu lämmönvastus [$m^2 K/W$]

F_a, f_b, \dots, f_n yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta

$R_{ja}, R_{jb}, \dots, R_{jn}$ rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisien lohkojen a, b, ..., n lämmönvastukset [$m^2 K/W$]



KUVA 5. Esimerkki alalikiarvoa laskettaessa käytettävistä kerroksista lohkoista (Lämmöneristys. 2012, 9)

Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo lasketaan erilaisten rinnakkaisten lämmönvastusten yhdistämisen jälkeen kaavalla 8 (Lämmöneristys. 2012, 8).

$$R_T'' = R_{si} + (R_1'' + R_2'' + \dots + R_j'') + (R_1 + R_2 + \dots + R_k) + R_{se} \quad \text{KAAVA 8}$$

R_T''	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo [m ² K/W]
R_{si}	sisäpuolen pintavastus [m ² K/W]
R_{se}	ulkopuolen pintavastus [m ² K/W]
$R_1'', R_2'', \dots, R_j''$	rakennusosan kerroksissa a, b, ..., j olevien rinnakkais- ten lohkojen yhdistetyt lämmönvastukset [m ² K/W]
R_1, R_2, \dots, R_k	rakenneosan tasa-aineisista ja tasapaksuista aineker- roksista muodostuvien kerrosten 1, 2, ..., k lämmönvas- tukset [m ² K/W]

Rakennusosan korjattu lämmönläpäisykerroin saadaan, kun kaavalla 2 (s. 10) laskettuun lämmönläpäisykerroimen arvoon lisätään lämmönläpäisykerroimen korjaustermi kaavalla 9 (Lämmöneristys. 2012, 10).

$$U_c = U + \Delta U \quad \text{KAAVA 9}$$

U_c	rakennusosan korjattu lämmönläpäisykerroin [W/(m ² /K)]
U	rakennusosan lämmönläpäisykerroin [W/(m ² /K)]

ΔU lämmönläpäisykertoimen korjaustermi [W/(m²/K)]

Lämmöneristyksessä mahdollisesti olevien ilmarakojen sekä epäideaalisen asennuksen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen korjaustermi lasketaan kaavalla 10 (Lämmöneristys. 2012, 12).

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_1}{R_{Th}} \right)^2 \quad \text{KAAVA 10}$$

ΔU_g ilmaraoista aiheutuva korjaustekijä [W/(m²/K)]

$\Delta U''$ ilmaraoista aiheutuva korjauskerroin [W/(m²/K)]

R_1 ilmarakoja sisältävän lämmöneristekerroksen lämmönvastus ilman kylmäsiltojen vaikutusta [m² K/W]

R_{Th} tarkasteltavan rakenneosan kokonaislämmönvastus ilman korjaustekijöiden ja kylmäsiltojen vaikutusta [m² K/W]

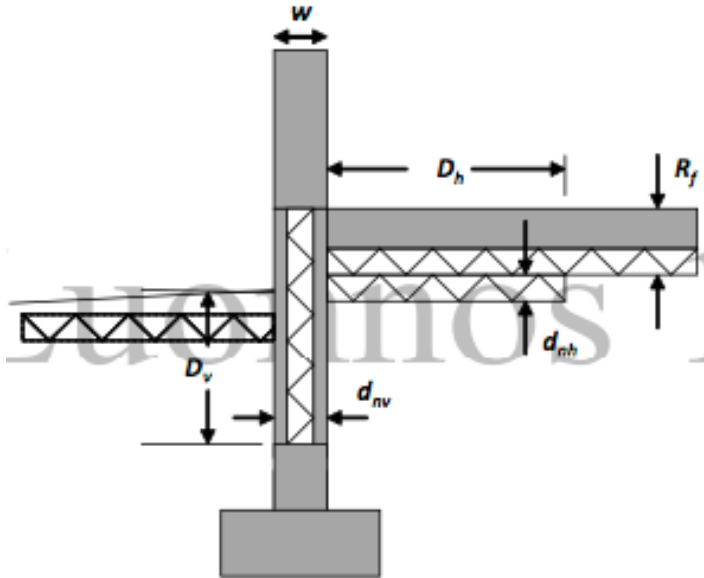
Ilmaraoista aiheutuva korjauskerroin valitaan taulukosta 1.

TAULUKKO 1. Ilmaraoista aiheutuva korjauskerroin (Lämmöneristys. 2012, 12)

Taso	Ilmaraon kuvaus	$\Delta U''$ W/(m ² K)
0	Lämmöneristeessä ei ole ilmarakoja tai lämmöneristeessä on vain vähäisiä ilmarakoja, joilla ei ole merkittävää vaikutusta lämmönläpäisykertoimeen.	0,00
1	Lämmöneristeessä on eristeen läpäiseviä ilmarakoja, jotka eivät kuitenkaan aiheuta ilman kiertokulkua lämmöneristeen lämpimän ja kylmän puolen välillä.	0,01
2	Lämmöneristeessä on eristeen läpäiseviä ilmarakoja, jotka aiheuttavat ilman kiertokulkua lämmöneristeen lämpimän ja kylmän puolen välillä.	0,04

2.3 Maanvastaiset rakenteet

Maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin voidaan laskea yksinkertaistettusti kertomalla pelkän lattiarakenteen U-arvo kertoimella 0,9. Kerroin ottaa huomioon maan lämmönvastuksen, mutta menetelmä ei ota huomioon rakenteen geometriaa. Tarkemmin maanvastaisen rakenteen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavoja 11 - 17 käyttäen. Laskentakaavoissa käytettyjä merkintöjä on esitetty kuvassa 6. (Lämmöneristys. 2012, 27.)



KUVA 6. Maanvastaisten alapohjan lämmönläpäisykerroimen määrittämisessä tarvittavia tietoja (Lämmöneristys. 2012, 27)

Hyvin eristetyin alapohjan ($d_t \geq B'$) lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 11 (Lämmöneristys. 2012, 28).

$$U_f = \frac{\lambda_s}{0,475B' + d_t} + \frac{2\psi_{ge}}{B'} \quad \text{KAAVA 11}$$

U_f	maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin [W/(m ² K)]
λ_s	maan lämmönjohtavuus [W/(mK)]
B'	suhteellinen lattiamitta [m]
d_t	maanvastaisen alapohjan ekvivalentti paksuus [m]
Ψ_{ge}	lattiarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristeen (Ψ_{geh}) tai perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristykseen (Ψ_{gev}) huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi [W/(mK)]

Lattiarakenteen suhteellinen lattiamitta eli karakteristinen mitta lasketaan kaavalla 12 (Lämmöneristys. 2012, 26).

$$B' = \frac{A}{0,5P} \quad \text{KAAVA 12}$$

B'	suhteellinen lattiamitta [m]
A	lattiarakenteen pinta-ala [m ²]
P	lattiarakenteen piiri [m]

Alapohjan ekvivalentti paksuus (d_t) lasketaan kaavalla 13 (Lämmöneristys. 2012, 27).

$$d_t = w + \lambda_s(R_{si} + R_f + R_{se}) \quad \text{KAAVA 13}$$

d_t	maanvastaisen alapohjan ekvivalentti paksuus [m]
w	seinän paksuus lattiarakenteen kohdalla [m]
λ_s	maan lämmönjohtavuus [W/(mK)]
R_{si}	sisäpuolen pintavastus [m ² K/W]
R_f	lattiarakenteen lämmönvastus [m ² K/W]
R_{se}	maan pinnan pintavastus ulkona [m ² K/W]

Kaavaan 9 tuleva viivamainen lisäkonduktanssi (Ψ_{ge}) lasketaan sekä vaakasuuntaisen reuna-alueen lisälämmöneristeelle (Ψ_{geh}) että perusmuurin pystysuuntaiselle lämmöneristykselle (Ψ_{gev}). Viivamaiseksi lisäkonduktanssiksi (Ψ_{ge}) valitaan itseisarvoltaan suurempi. (Lämmöneristys. 2012, 28.)

Alapohjan reunalla olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristysten huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi (Ψ_{geh}) lasketaan kaavalla 14 (Lämmöneristys. 2012, 29).

$$\psi_{geh} = -\frac{\lambda_s}{\pi} \left[\ln\left(\frac{D_h}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{D_h}{d_t + d'_h} + 1\right) \right] \quad \text{KAAVA 14}$$

Ψ_{geh}	lattiarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristeen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi [W/(mK)]
λ_s	maan lämmönjohtavuus [W/(mK)]
d_t	maanvastaisen alapohjan ekvivalentti paksuus [m]
D_h	lattiarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristysten leveys [m]

d'_h lattiarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus [m]

Alapohjarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus (d'_h) lasketaan kaavalla 15 (Lämmöneristys. 2012, 30).

$$d'_h = \lambda_s \left(R_{nh} - \frac{d_{nh}}{\lambda_s} \right) \quad \text{KAAVA 15}$$

d'_h lattiarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus [m]

λ_s maan lämmönjohtavuus [W/(mK)]

R_{nh} lattiarakenteen reuna-alueella olevan lämmöneristeen lämmönvastus [$\text{m}^2 \text{K/W}$]

d_{nh} lattiarakenteen reuna-alueella olevan lämmöneristeen paksuus [m]

Perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristykseen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi lasketaan kaavalla 16 (Lämmöneristys. 2012, 29).

$$\psi_{gev} = -\frac{\lambda_s}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2D_v}{d_t + d_v} + 1 \right) \right] \quad \text{KAAVA 16}$$

Ψ_{gev} lattiarakenteen reuna-alueella olevan perusmuurin pystysuuntaisen lisälämmöneristeen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi [W/(mK)]

λ_s maan lämmönjohtavuus [W/(mK)]

d_t maanvastaisen alapohjan ekvivalentti paksuus [m]

D_v lattiarakenteen reuna-alueella olevan perusmuurin pystysuuntaisen lisälämmöneristykseen korkeus maanpinnan alapuolella [m]

d'_v lattiarakenteen reuna-alueella olevan pystysuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus [m]

Alapohjarakenteen reuna-alueella olevan pystysuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus (d'_v) lasketaan kaavalla 17 (Lämmöneristys. 2012, 30).

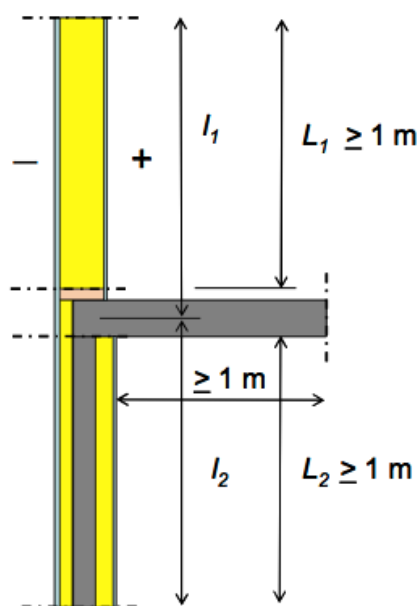
$$d'_v = \lambda_s \left(R_{nv} - \frac{d_{nv}}{\lambda_s} \right) \quad \text{KAAVA 17}$$

d'_v	lattiarakenteen reuna-alueella olevan pystysuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus [m]
λ_s	maan lämmönjohtavuus [W/(mK)]
R_{nv}	perusmuurin lämmönvastus [m ² K/W]
d_{nv}	perusmuurin paksuus [m]

3 VIIVAMAISEN LISÄKONDUKTANSSIN MÄÄRITYS

Kylmäsilillä tarkoitetaan rakenteessa olevaa rakennusosaa, joka on viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtava. Lämpötilaeron vaikutuksesta johtuen rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa suurempi verrattuna viereiseen alueeseen. Viivamaisella kylmäsilillä tarkoitetaan rakenteen pinnan suunnassa olevaa jatkuvaa kylmäsiltaa. (Lämmöneristys. 2003, 3.)

Viivamaisen lisäkonduktanssin havainnollistamiseksi tarkastellaan kahden seinän ja välipohjan välistä liitosta (kuva 7), johon muodostuu kylmäsilta. Tarkastelugeometriaa otetaan riittävän laajalti, jotta liitoksen vaikutus ei näy rakenteen lämpötiloissa.



KUVA 7. Esimerkki seinien ja välipohjan liitoksen kylmäsillassa (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 8)

Kuvan 7 rajaaman alueen johtumislämpöhäviön laskentakaava (kaava 18) saadaan johtamalla kaavasta 1 (s. 9).

$$H_{\text{joht}} = U_1 A_1 + U_2 A_2 + \psi l$$

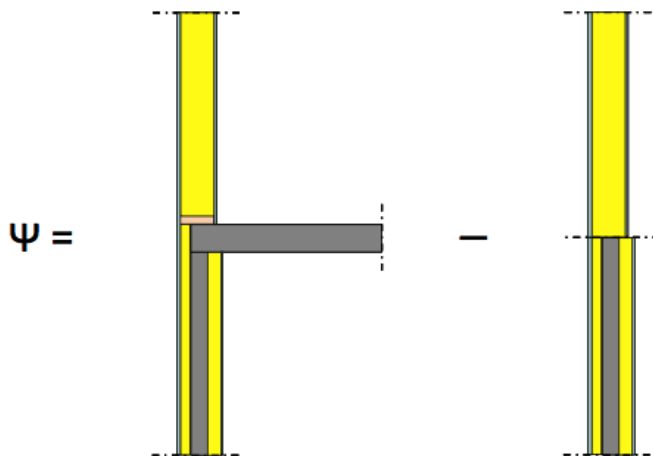
KAAVA 18

H_{joht}	rakennusosien 1 ja 2 ja niiden liitoksen yhteenlaskettu johtumislämpövähtiö [W/K]
Ψ	seinien 1 ja 2 välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi [W/mK]
l	seinien 1 ja 2 välisen liitoksen pituus (kohtisuorassa kuvatasoa vastaan) [m]
U_1	seinän 1 lämmönläpäisykerroin [W/(m ² /K)]
A_1	rakennusosan 1 pinta-ala [m ²]
U_2	seinän 2 lämmönläpäisykerroin [W/(m ² /K)]
A_2	rakennusosan 2 pinta-ala [m ²]

Kun viivamainen lisäkonduktanssi Ψ ratkaistaan kaavasta 18, muodostuu kaava 19.

$$\psi = \frac{H_{joht}}{l} - U_1 l_1 - U_2 l_2 \quad \text{KAAVA 19}$$

Viivamainen lisäkonduktanssi on siis laskenta-alueen todellisen lämpövirran ja lämmönläpäisykerroimilla lasketun lämpövirran erotus. Tämä on havainnollistettu kuvassa 8. Pistekatkoviivojen kohdalla oletetaan lämpövirta laskennassa nolaksi.



KUVA 8. Liitoksen lisäkonduktanssi Ψ havainnollistettuna (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 8)

3.1 Menetelmät

Viivamainen lisäkonduktanssi voidaan määrittää tarkkuudeltaan erilaisin menetelmin. Menetelmää valittaessa on syytä ottaa huomioon kyseisen kylmäsilan merkitys koko rakennuksen johtumislämpöhäviössä. Standardissa SFS-EN ISO 14683 on esitetty tyypilliset tarkkuudet neljälle vaihtoehdoiselle menetelmälle:

- numeerinen laskenta $\pm 5 \%$
- tyyppirakenteille laskettujen arvojen käyttö $\pm 20 \%$
- käsin laskenta $\pm 20 \%$
- ohjearvotaulukot 0% - 50% .

(Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 11.)

Tarkimpaan tulokseen päästään käyttämällä numeerista menetelmää, jolla tarkoitetaan rakenteiden simulointia siihen tarkoitettulla ohjelmalla. Ympäristöministeriön viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaassa on selkeät ohjeet erilaisten liitosten laskentaperiaatteille ja tuloksille. Tässä opinnäytetyössä rakenteiden simulointi suoritetaan Comsol Multiphysics 4.4 –ohjelmalla, josta saadaan liittyvien rakenteiden lämpötekkinen kytkentäkerroin (L_{2D}).

3.2 Laskentaperiaate

Kaksi- ja kolmeulotteisessa geometriassa lämmönjohtumista tarkastellaan jatkuvuustilassa differentiaaliyhtälöllä, jonka ratkaisuun tarvitaan numeerista menetelmää. Laskenta-alue jaetaan riittävään moneen laskentaelementtiin, joista ratkaistaan elementissä vallitsevien lämpötilojen yhtälöryhmä. Laskentaverkon tiheytyessä lämpötilakenttä lähenee differentiaaliyhtälön tarkkaa ratkaisua. Laskennassa tulee ottaa huomioon laskenta-alueen reunaehdot, kuten ympäröivä lämpötila ja pintavastus. (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 12.)

Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentakaava (kaava 20) on määritelty standardissa SFS-EN ISO 10211 (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 13).

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j$$

KAAVA 20

L_{2D}	kaksiulotteisella laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekninen kytkentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille [W/(mK)]
U_j	liittyvän rakennusosan j lämmönläpäisykerroin [W/(m ² K)]
l_j	mallissa kuvatun rakenneosan j pituus [m]

Maanvastaisen sekä ryömintätillaisen alapohjan ja ulkoseinän liitoksessa viivamainen lisäkonduktanssi lasketaan kaavalla 21 (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 17).

$$\psi = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 * B' U$$

KAAVA 21

L_{2D}	numeerisesti määritetty lämpövirta koko rakenteelle [W/(mK)]
U_w	liittyvän ulkoseinän lämmönläpäisykerroin [W/(m ² K)]
h_w	seinärakenteen korkeus käytetyssä mallissa [m]
U	alapohjarakenteen lämmönläpäisykerroin [W/(m ² K)]
B'	alapohjan karakteristinen mitta [m]

3.3 Ohjearvot

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D5 on esitetty kylmäsiltojen aiheuttamalle lisäkonduktanssille ohjearvoja erilaisissa liitoksissa. Taulukoiden 2, 3 ja 4 ohjearvot ovat suuntaa antavia ja niitä tulee käyttää vain, jos suunniteluarvoja ei ole käytettävissä. Ohjearvojen käyttö kuitenkin edellyttää, että liitokset on toteutettu hyvän rakentamistavan mukaan pyrkien minimoimaan liitosalueelle syntyvät kylmäsilat. (Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012, 16.)

TAULUKKO 2. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsilan aiheuttamalle lisäkonduktanssille (Ψ_k) ulkoseinän ja alapohjan, ulkoseinän ja välipohjan sekä ulkoseinän alapohjan välisissä liitoksissa (Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012, 17)

Ulkoseinä-materiaali	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(m K)									
	Yläpohjan (ulkonurkka) runkomateriaali			Välipohjan runkomateriaali			Alapohjan runkomateriaali			
	betoni	kevyt-betoni	puu	betoni	kevyt-betoni	puu	betoni, maan-vast.	betoni, ryöm. tila	kevyt-betoni, ryöm. tila	puu, ryöm. tila
betoni	0,08		0,04	0,00			0,24	0,28		
kevytbetoni	0,18	0,06	0,04	0,10	0,00		0,09	0,08	0,03	
kevytsorabetoni	0,13		0,04	0,07			0,15	0,11		
tiili	0,08		0,04	0,00			0,17	0,06		
puu			0,05			0,05	0,10			0,06
hirsi			0,04			0,00	0,11			0,09

TAULUKKO 3. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsilan aiheuttamalle lisäkonduktanssille (Ψ_k) ulkoseinien välisissä nurkkaliitoksissa sekä ikkuna- ja oviliitoksissa (Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012, 17)

Liitos	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(m K)					
	Ulkoseinän runkomateriaali					
	betoni	kevyt-betoni	kevyt-sora-betoni	tiili	puu	hirsi
ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
ikkuna- ja oviliitos, lämmöneristeen kohdalla ^{*)}	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ikkuna- ja oviliitos muussa tapauksessa	0,15	0,07	0,10	0,10	0,07	0,07

^{*)} Karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

TAULUKKO 4. Ohjearvot viivamaisen kylmäsilan aiheuttamalle lisäkonduktanssille (Ψ_k) liitoksissa, joille ei ole annettu erillistä arvoa taulukoissa 1 ja 2 (Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012, 17)

Liitos	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(m K)
ulkoseinän ja yläpohjan liitos	0,3
ulkoseinän ja alapohjan liitos	0,5
ulkoseinän ja välipohjan liitos	0,2
ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	0,1
ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	-0,1
ikkuna- ja oviliitos	0,2

On syytä huomata, että taulukossa 3 olevat ohjearvot ovat reilusti varmalle puolella. Taulukko on tarkoitettu liitoksille, joille ei ole annettuja arvoja taulukoissa 1 ja 2. Muut rakenteiden väliset liitokset, joita ei taulukoissa erikseen listattu, voidaan jättää laskennassa huomioimatta. (Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012, 17.)

3.4 Pintavastukset

Lämpövirtalaskennoissa rakenneosien pintavastukset annetaan rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan. Suure riippuu lämpövirran suunnasta ja arvot annetaan ulko- ja sisäpinnalle, joiden pintavastukset on annettu taulukossa 5. (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 15.)

TAULUKKO 5. Rakenneosan sisä- ja ulkopuolen pintavastukset (R_{si} ja R_{se})
(Lämmöneristys. 2012, 22)

Pintavastus $m^2 K/W$	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
sisäpuolen pintavastus (R_{si})	0,10	0,13	0,17
ulkopuolen pintavastus (R_{se})	0,04	0,04	0,04

Rakennusosissa, joissa on hyvin tuulettuva ilmakerros, ilmakerroksen ja sen ulkopuolella olevien ainekerroksien lämmönvastuksia ei oteta huomioon U-arvoa laskettaessa. Tällöin ulkopinnan pintavastuksena käytetään sisäpinnan pintavastusta (R_{si}) taulukon 4 mukaan. (Lämmöneristys. 2012, 24.)

4 LIITOSTEN SIMULOINTI

Tämän työn tarkoituksena oli laskea viivamaisen lisäkonduktanssin arvoja talotehtaan passiivirakennuksen rakenneliitoksille. Mallintaminen ja lisäkonduktanssilaskenta suoritettiin seuraaville liitostyypeille:

- ulkoseinän ulko- ja sisänurkkaliitos
- ulkoseinän ja yläpohjan liitos
- ulkoseinän ja välipohjan liitos
- ulkoseinän ja maanvaraisen alapohjan liitos
- ulkoseinän ja ikkunan liitos
- ulkoseinän ja oven liitos.

Ylä- ja välipohjaliitokset laskettiin rakennuksen pääty- ja sivuseinälle. Ikkuna- ja oviliitokset laskettiin pysty- ja vaakaleikkaukselle. Lisäksi työssä tarkasteltiin kaikki liitokset niin sanotulla välimallin ulkoseinällä, joka erottui passiiviseinästä ainoastaan 50 mm kapeammalla polyuretaanilevyllä.

Tässä työssä lasketut viivamaiset lisäkonduktanssiarvot on koottu liitteeseen 1, joka on tarkoitettu ainoastaan talotehtaan sisäiseen käyttöön. Liite 1 on poistettu työn julkisesta versiosta.

4.1 Mallintaminen

Rakennesuunnittelijan piirustuksia apuna käyttäen liittymärakenteista luotiin leikkauskuva AutoCAD-ohjelmalla. Rakenneliitoksissa oli tärkeää tehdä liitoskohta ja sen läheinen alue mahdollisimman todenmukaisesti ottamalla rakenteen yksityiskohdat mukaan (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 29). Laskenta-alue rajattiin siten, että tarkasteltava etäisyys liitoksesta oli vähintään 1,0 m tai kolme kertaa liitokseen liittyvän rakenneosan paksuus (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 13).

Liitostyyppien laskennassa käytettiin apuna Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopasta, josta löytyivät laskentaperiaatteet eri liitostyypeille. Leikkauskuva avattiin Comsol Multiphysics 4.4 –ohjelmalla, jolla annettiin liittymässä oleville

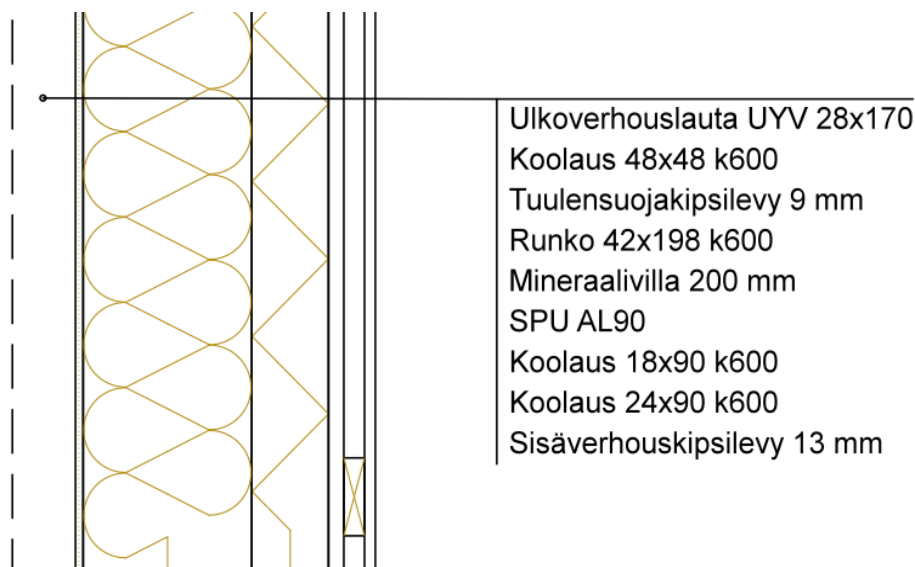
materiaaleille lämmönjohtavuuden arvot sekä sisä- ja ulkopinnoille pintavastuksien arvot. Lämpötilaeron tuli olla yhden yksikön verran, joten sisälämpötilaksi annettiin +1 °C ja ulkolämpötilaksi 0 °C. Ohjelmasta saatiin tuloksena lämpötekninen kytkentäkerroin (L_{2D}), joka syötettiin kaavaan 20 tai 21 (s. 22), josta saatiin lopullinen viivamaisen lisäkonduktanssin psi-arvo (Ψ).

Viivamaisen lisäkonduktanssin laskemiseen tarvittiin rakenteiden U-arvot, jotka laskettiin käsin kaikille rakenteille. Rakennusosien U-arvot määriteltiin Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. Laskennassa oli tärkeää saada materiaalien tarkat mitat ja lämmönjohtavuudet. Tarkat tiedot rakennusmateriaaleista saatiin talotehtaalta.

4.2 Ulkoseinän nurkkaliitokset

Talotehdas käyttää puurunkoista ulkoseinää. Rakenteen laskennasta jätettiin pois ulkoverhous, koska sen takana on hyvin tuulettuva ilmarako. Tämän seurauksena ulkopinnan pintavastuksena käytettiin sisäpinnan pintavastusta.

Lämmönläpäisykertoimet laskettiin kahdelle seinätyypille. Passiivikuloseinälle ja niin sanotulle välimallille, jossa SPU-eriste on 50 mm kapeampi. U-arvoihin otettiin mukaan alueella olevat säännölliset kylmäsilat, kuten koolaukset. Passiiviseinän rakenne on esitetty kuvassa 9 ja taulukossa 6.



KUVA 9. Passiiviseinän rakennekuva

TAULUKKO 6. Passiiviseinän rakenne

ULKOSEINÄ (SPU 90mm)				
Kerros	Rakennekerros	rakennepaksuus d [m]	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
si	pintavastus R _{si}			0,13
1	sisäverhoukipsilevy	0,013	0,21	0,062
2(1)	ilmarako	0,024	0,133	0,180
2(2)	vaakakoolaus 24x90 k600	0,024	0,12	0,200
3(1)	ilmarako	0,018	0,1	0,180
3(2)	pystykoolaus 18x90 k600	0,018	0,12	0,150
4	SPU AL90	0,09	0,023	3,913
5(1)	runko 42x198 k600	0,2	0,12	1,667
5(2)	mineraalivilla	0,2	0,035	5,714
6	tuulensuojakipsilevy	0,009	0,21	0,043
se	pintavastus R _{se}			0,13

Ulkoseinä sisältää kolme ainekerrosta (2 ,3 ja 5), joissa on lämpövirransuuntaan nähden erilaisia rinnakkaisia ainekerroksia. Lämmönläpäisykertoimen laskemiseen tarvittiin ala- ja yläikiarvoja. Yläikiarvo laskettiin kaavalla 6 (s. 11).

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{0,0506}{6,305} + \frac{0,6719}{10,352} + \frac{0,0089}{6,275} + \frac{0,1186}{10,322} + \frac{0,0089}{6,325} + \frac{0,1186}{10,372} + \frac{0,0016}{6,295} + \frac{0,0209}{10,342} = 0,100956$$

$$\Rightarrow R_T' = 9,9053 m^2 K / W$$

Rakennekerroksien, joissa on useita ainekerroksia, laskettiin yhteenlaskettu lämmönvastus kaavalla 7 (s.12).

$$\text{Kerros 2: } \frac{1}{R_2} = \frac{0,85}{0,18} + \frac{0,15}{0,2} = 5,472 \Rightarrow R_2 = 0,183 m^2 K / W$$

$$\text{Kerros 3: } \frac{1}{R_3} = \frac{0,85}{0,18} + \frac{0,15}{0,15} = 5,722 \Rightarrow R_3 = 0,175 m^2 K / W$$

$$\text{Kerros 5: } \frac{1}{R_5} = \frac{0,07}{1,667} + \frac{0,93}{5,714} = 0,205 \Rightarrow R_5 = 4,884 m^2 K / W$$

Kokonaislämpövastuksen alalikiarvo laskettiin kaavalla 8 (s. 13).

$$R_T' = 0,13 + 0,062 + 0,183 + 0,175 + 3,913 + 4,884 + 0,043 + 0,13 = \underline{9,52} m^2K/W$$

Kokonaislämmönvastus muodostuu ala- ja yläikiarvon keskiarvosta, ja se laskettiin kaavalla 5 (s. 11).

$$R_T = \frac{9,9053 + 9,52}{2} = \underline{9,71265} m^2K/W$$

Passiiviseinän U-arvo saatiin kaavasta 2 (s. 10).

$$U = \frac{1}{9,71265} = \underline{0,103} W/(m^2K)$$

Passiiviseinän lopullinen U-arvo saatiin, kun edelliseen U-arvoon lisättiin lämmönläpäisykertoimen korjaustermi kaavalla 9 (s.13).

$$U_c = 0,103 + 0,01 * \left(\frac{5,714}{9,71265} \right)^2 = \underline{0,106} W/(m^2K)$$

Välimallin seinärakenne laskettiin samalla periaatteella kuin edellinen passiiviseinä. Välimalliseinän rakenne on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Välimalliseinän rakenne

ULKOSEINÄ (SPU 40mm)				
Kerros	Rakennekerros	rakennepaksuus d [m]	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
si	pintavastus R _{si}			0,13
1	sisäverhouksipsilevy	0,013	0,21	0,062
2(1)	ilmarako	0,024	0,133	0,180
2(2)	vaakakoolaus 24x90 k600	0,024	0,12	0,200
3(1)	ilmarako	0,018	0,1	0,180
3(2)	pystykoolaus 18x90 k600	0,018	0,12	0,150
4	SPU AL40	0,04	0,023	1,739
5(1)	runko 42x198 k600	0,2	0,12	1,667
5(2)	mineraalivilla	0,2	0,035	5,714
6	tuulensuojakipsiievy	0,009	0,21	0,043
se	pintavastus R _{se}			0,13

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{0,0506}{4,131} + \frac{0,6719}{8,178} + \frac{0,0089}{4,101} + \frac{0,1186}{8,148} + \frac{0,0089}{4,151} + \frac{0,1186}{8,198} + \frac{0,0016}{4,121} + \frac{0,0209}{8,168} = 0,130692$$

$$\Rightarrow R_T' = \underline{7,6516 m^2 K / W}$$

Rakennekerrokset, joissa on useita ainekerroksia, ovat passiivi- ja välimalliseinäissä samat, joten laskennassa käytettiin passiiviseinän yhteenlaskettuja lämmönvastuksia R_2 , R_3 ja R_5 (s. 27).

$$R_T'' = 0,13 + 0,062 + 0,183 + 0,175 + 1,739 + 4,884 + 0,043 + 0,13 = \underline{7,346 m^2 K / W}$$

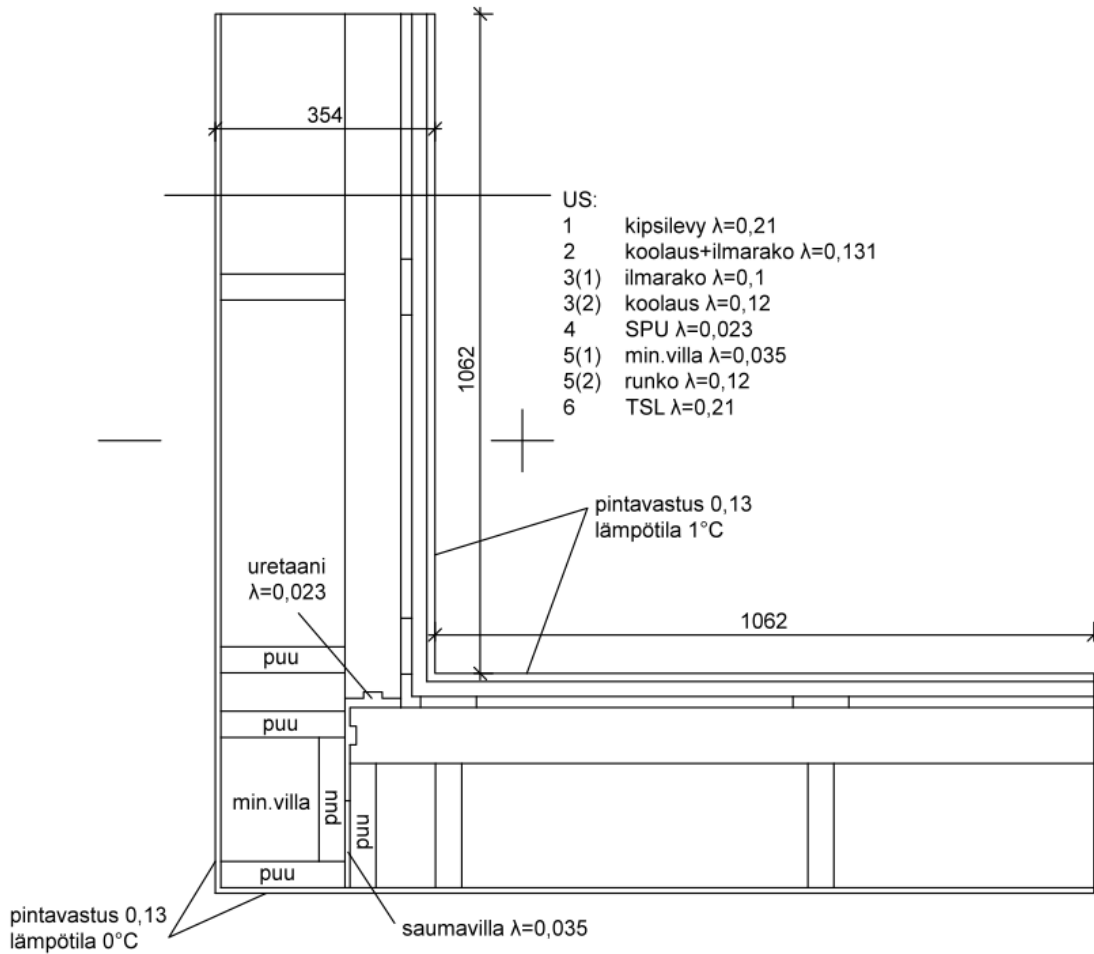
$$R_T = \frac{7,6516 + 7,346}{2} = \underline{7,4988 m^2 K / W}$$

$$U = \frac{1}{7,4988} = \underline{0,1334 W / (m^2 K)}$$

$$U_c = 0,1334 + 0,01 * \left(\frac{5,714}{7,4988} \right)^2 = \underline{0,139 W / (m^2 K)}$$

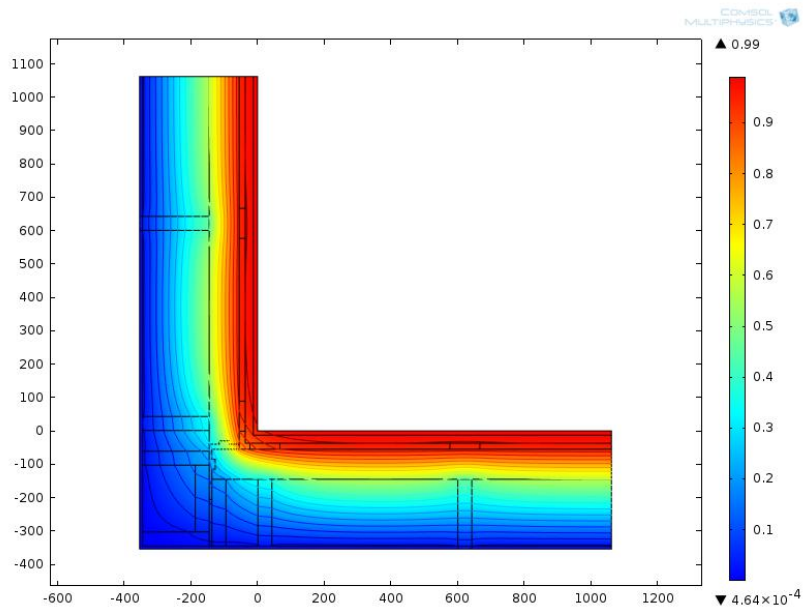
Ulkonurkka

Mallintaminen aloitettiin tekemällä ulkonurkkaliitoksesta laskentamalli (kuva 10). Laskentamallia rajattiin U-arvolaskennan tapaan tuulensuojalevyyn. Laskentamallissa seinän pituus oli kolme kertaa seinän paksuuden verran lisäkonduktanssin laskentaoppaan mukaisesti. Passiiviliitoksessa seinän pituus laskentamallissa oli 1,062 m ja välimallin liitoksessa 1 m.

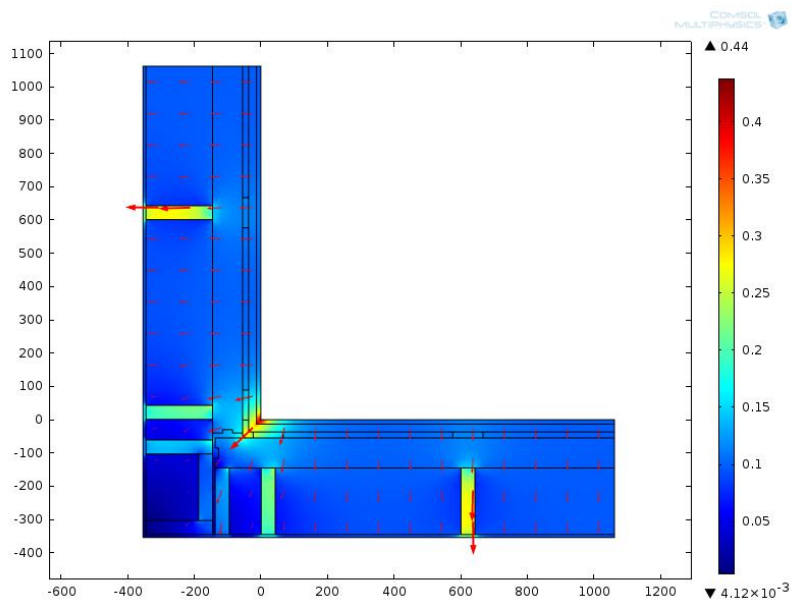


KUVA 10. Ulkonurkkaliitoksen laskentamalli

Laskentamallit tehtiin 90 mm:n ja 40 mm:n SPU-eristeellä. Laskentamallit tuotiin Comsol-ohjelmaan, jossa ainekerroksille annettiin lämmönjohtavuudet. Lämpösimulointi tehtiin yhden asteen lämpötilaerolla. Ulkonurkkaliitoksen lämpötilakuvaaja on esitetty kuvassa 11 ja lämpövirtakuvaaja kuvassa 12.



KUVA 11. Ulkonurkkaliitoksen lämpötilakuvaaja

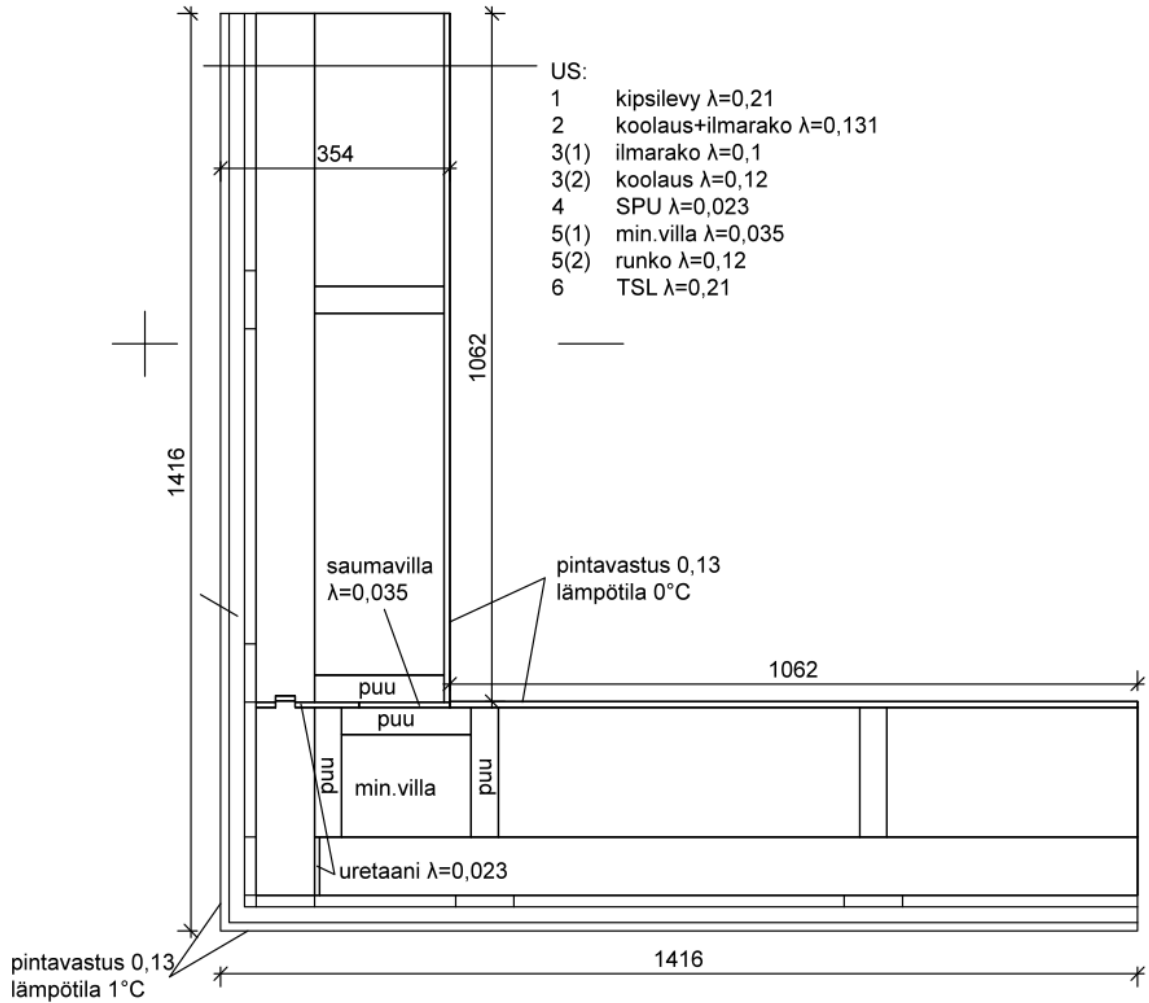


KUVA 12. Ulkonurkkaliitoksen lämpövirtakuvaaja

Ulkonurkkaliitosten lopulliset viivamaiset lisäkonduktanssit saatiin, kun lämpöteknisestä kytkentäkertoimesta (L_{2D}) vähennettiin seinien U-arvoilla laskettu lämpövirta kaavalla 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

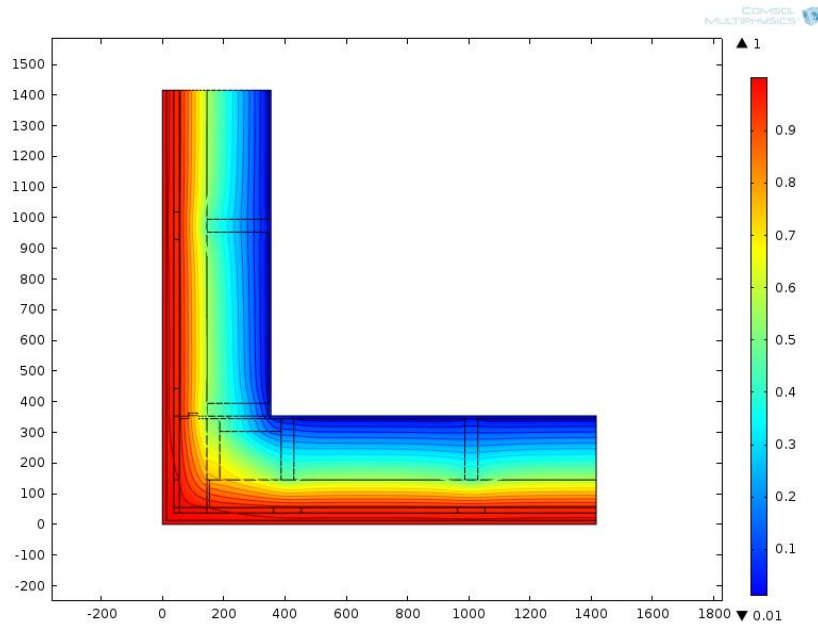
Sisänurkka

Sisänurkkaliitokselle tehtiin oma laskentamalli (kuva 13). Ulkonurkasta poiketen ulkoseinän lämpövirtaa laskiessa käytetään pidempää seinän mitta, joka oli passiiviliitoksessa 1,416 m ja välimalliseinän liitoksessa 1,304 m.

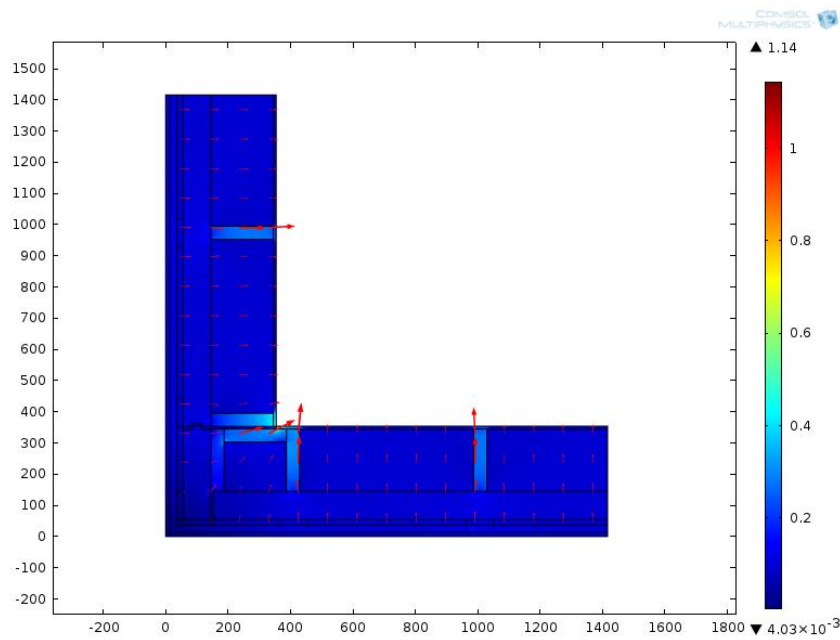


KUVA 13. Sisänurkkaliitoksen laskentamalli

Laskentamallit siirrettiin Comsol-ohjelmaan ulkonurkkaliitoksien tapaan, jolla laskettiin liitoksien lämpövirrät (L_{2D}). Sisänurkkaliitoksen lämpötilakuuvaja on esitetty kuvassa 14 ja lämpövirtakuvaaja kuvassa 15.



KUVA 14. Sisänrakkaliitoksen lämpötilakuvaaja

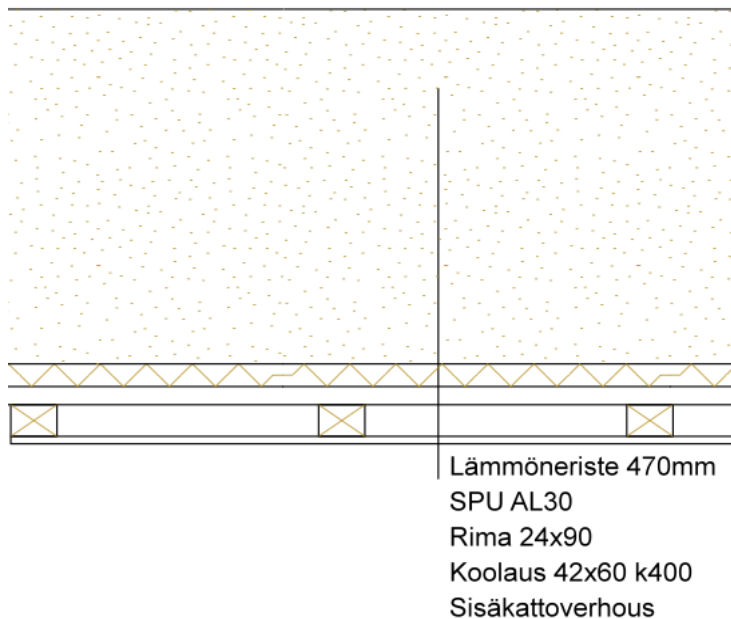


KUVA 15. Sisänrakkaliitoksen lämpövirtakuvaaja

Sisänrakkaliitoksen aiheuttama viivamainen lisäkonduktanssi saatiin kaavasta 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

4.3 Ulkoseinän ja yläpohjan liitokset

Talotehtaan yläpohja on ulkoseinän tapaan puurakenteinen. Laskenta suoritettiin pääty- ja sivuseinän liitoksille. Yläpohjan eristäminen on toteutettu 470 mm:n vahvuisella puhallusvillalla. Yläpohjan rakenne on esitetty kuvassa 16 ja taulukossa 8.



KUVA 16. Yläpohjan rakennekuva

TAULUKKO 8. Yläpohjan rakenne

YLÄPOHJA				
Kerros	Ainekerros	rakennepaksuus d [m]	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
si	pintavastus R _{si}			0,1
1	sisäkattoverhous	0,013	0,14	0,093
2(1)	ilmarako	0,042	0,2625	0,160
2(2)	koolaus 42x60 k400	0,042	0,12	0,350
3(1)	ilmarako	0,024	0,15	0,160
3(2)	koolaus 24x90 k600	0,024	0,12	0,200
4	SPU AL30	0,03	0,023	1,304
5	Puhallusvilla	0,47	0,039	12,051
se	pintavastus R _{se}			0,04

Ulkoseinän tapaan yläpohja sisältää rakennekerroksia (2 ja 3), joissa on eri lämmönjohtavuuden omaavia ainekerroksia. U-arvon määrittämiseksi on laskettava kokonaislämpövastuksen ala- ja ylälikiarvo. Ylälikiarvo laskettiin kaavalla 6 (s. 11).

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{0,7225}{13,868} + \frac{0,1275}{13,908} + \frac{0,1275}{14,058} + \frac{0,0225}{14,098} = 0,07193 \Rightarrow R_T' = \underline{13,90 m^2 K / W}$$

Rakennekerroksien 2 ja 3 yhteenlaskettu lämmönvastus laskettiin kaavalla 7 (s. 12).

$$\text{Kerros 2: } \frac{1}{R_2} = \frac{0,85}{0,16} + \frac{0,15}{0,35} = 5,741 \Rightarrow R_2 = \underline{0,174 m^2 K / W}$$

$$\text{Kerros 3: } \frac{1}{R_3} = \frac{0,85}{0,16} + \frac{0,15}{0,2} = 6,063 \Rightarrow R_3 = \underline{0,165 m^2 K / W}$$

Kokonaislämpövastuksen alalikiarvo laskettiin kaavalla 8 (s. 13).

$$R_T'' = 0,1 + 0,093 + 0,174 + 0,165 + 1,304 + 12,051 + 0,04 = \underline{13,927 m^2 K / W}$$

Kokonaislämmönvastus muodostuu ala- ja ylälikiarvon keskiarvosta ja se laskettiin kaavalla 5 (s. 11).

$$R_T = \frac{13,90 + 13,927}{2} = \underline{13,914 m^2 K / W}$$

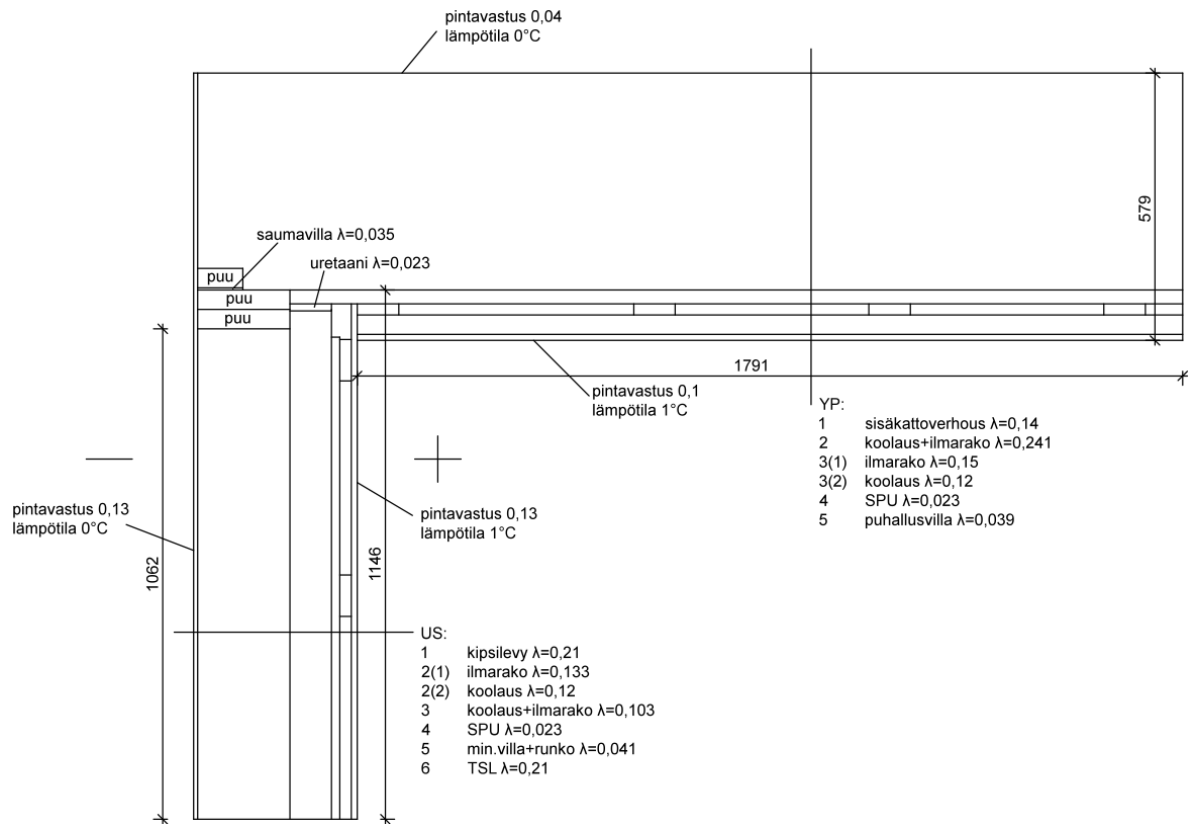
Yläpohjan lopullinen U-arvo saadaan kaavalla 2 (s. 10).

$$U = \frac{1}{13,914} = \underline{0,072 W / (m^2 K)}$$

Päätöseinä

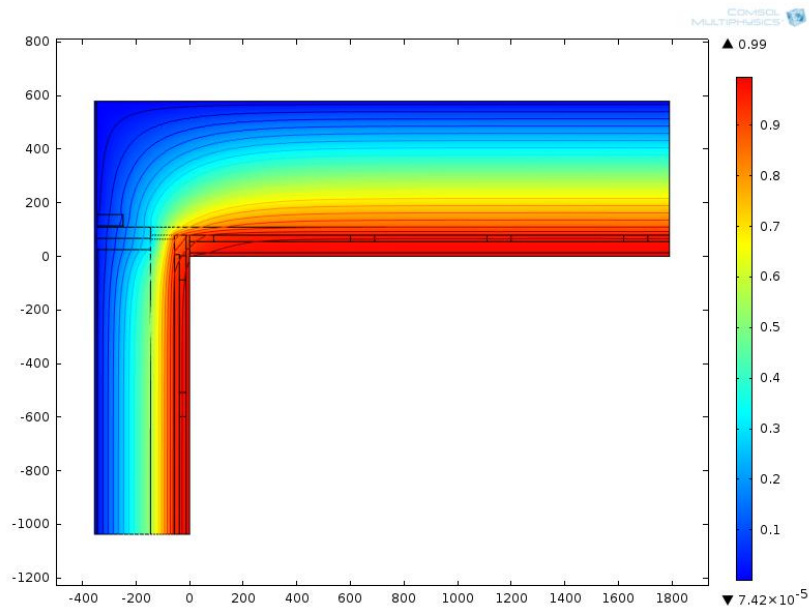
Ulkoseinälaskennan tapaan ulkoseinä rajattiin tuulensuojalevyyn ja seinää tarkasteltiin passiiviseinässä 1,062 m:n ja välimallin seinässä 1,0 m:n matkalta vaakakoolauksen alareunasta. Yläpohja rajattiin puhallusvillan yläpintaan. Laskentamallissa yläpohjan paksuus on 0,597 m, joten yläpohjaan tarkasteltiin

1,791 m:n matkalta sisäseinästä lukien. Päätyseinän ja yläpohjan liitoksen laskentamalli on esitetty kuvassa 17.

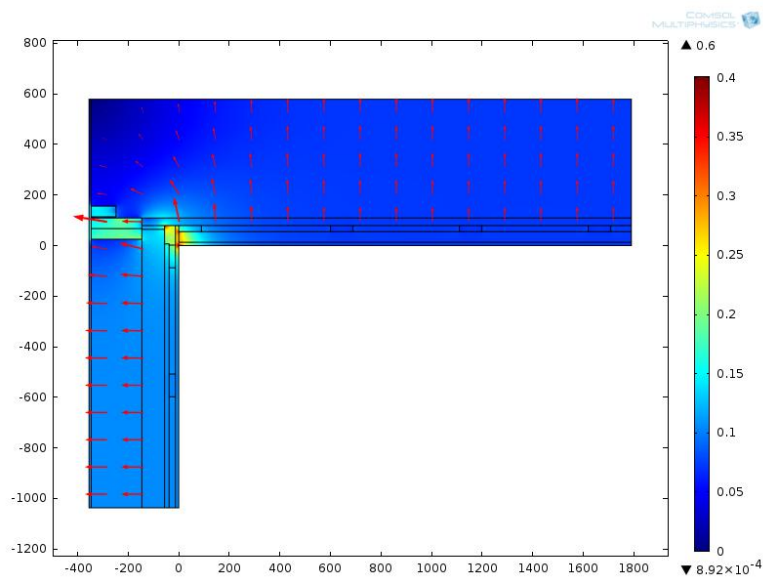


KUVA 17. Päätyseinän ja yläpohjan liitoksen laskentamalli

Laskentamallit tehtiin kahdelle ulkoseinälle, jossa toisessa oli 90 mm:n ja toisessa 40 mm:n SPU-eriste. Mallit tuotiin Comsol-ohjelmaan, jossa ainekerroksille annettiin lämmönjohtavuudet laskentamallin mukaan. Lämpösimulointi tehtiin yhden asteen lämpötilaerolla. Liitoksen lämpötilakuvaaja on esitetty kuvassa 18 ja lämpövirtakuvaaja kuvassa 19.



KUVA 18. Päätyseinän ja yläpohjan liitoksen lämpötilakuvaaja

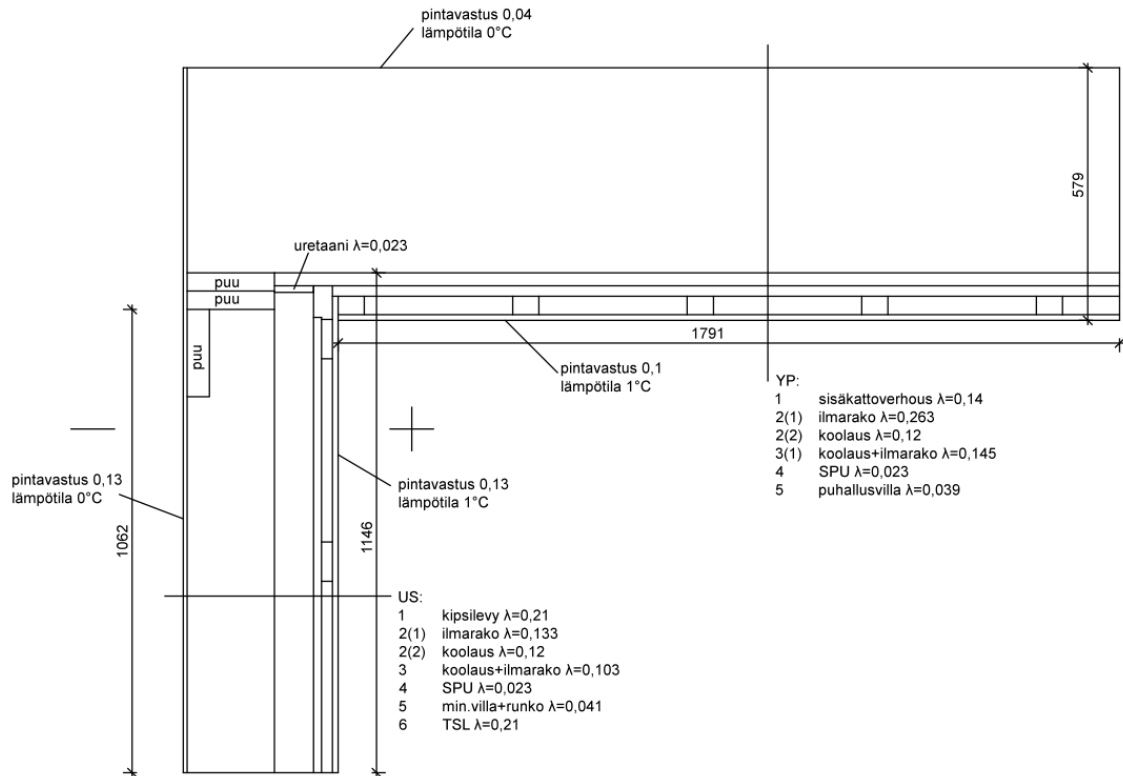


KUVA 19. Päätyseinän ja yläpohjan liitoksen lämpövirtakuvaaja

Viivamainen lisäkonduktanssi saatiin, kun lämpövirroista (L_{2D}) vähennettiin seinä- ja katto-osan lämpövirrat kaavalla 20 (s. 22). Seinän korkeus otetaan ilmevälin yläpintaan asti (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 23). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

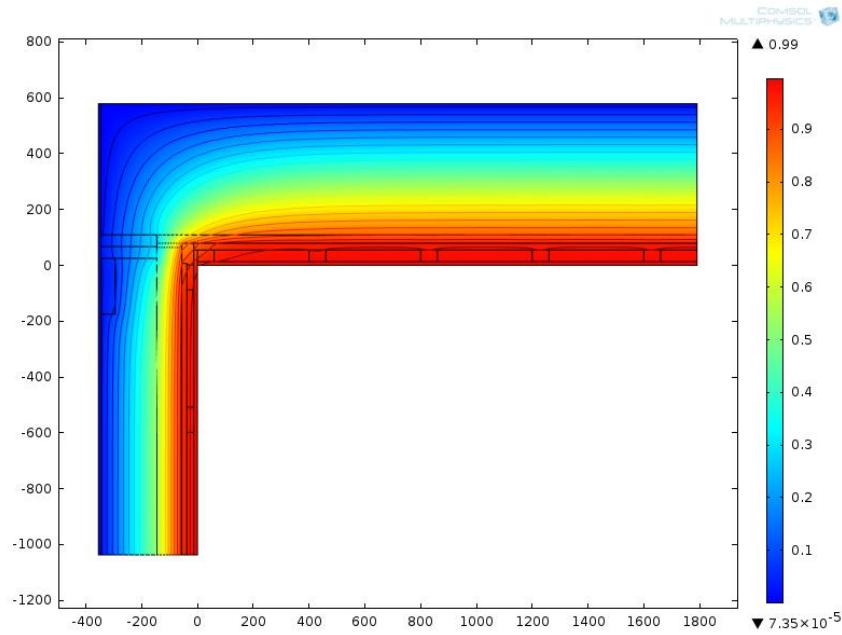
Sivuseinä

Sisäseinän laskentamalli rajattiin samaan tapaan kuin päätyseinän laskentamalli. Seinän mitaksi passiiviseinässä annettiin 1,062 m ja välimallin seinässä 1,0 m. Yläpohjan mitta oli 1,791 m sisäseinästä. Laskentamalli on esitetty kuvassa 20.

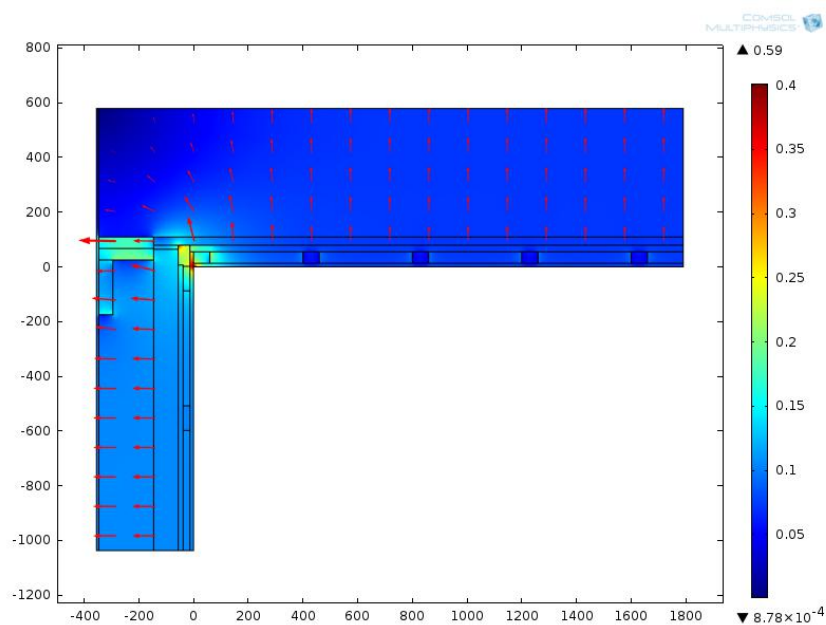


KUVA 20. Sivuseinän ja yläpohjan liitoksen laskentamalli

Laskentamallit siirrettiin Comsol-ohjelmaan, jolla laskettiin liitoksen lämpövirrat (L_{2D}). Sivuräystäliitoksen lämpötilakuuvaja on esitetty kuvassa 21 ja lämpövirtauvaaja kuvassa 22.



KUVA 21. Sivuseinän ja yläpohjan liitoksen lämpötilakuvaaja

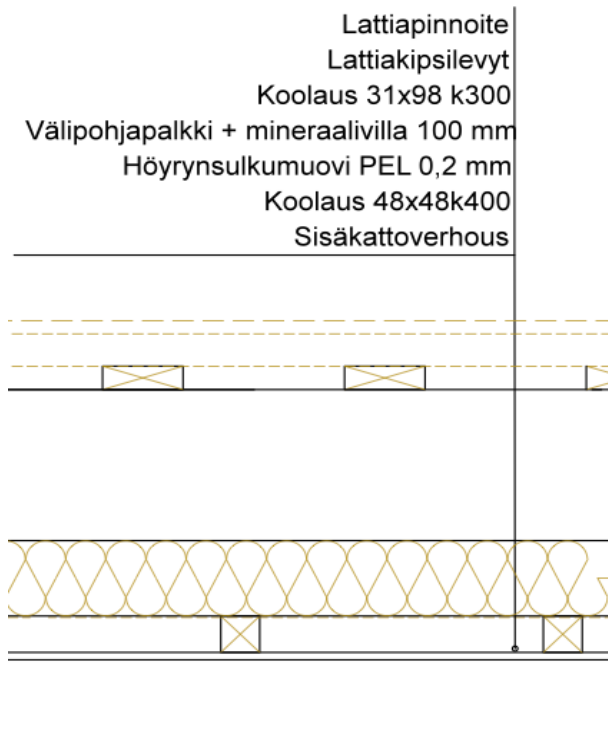


KUVA 22. Sivuseinän ja yläpohjan liitoksen lämpövirtakuvaaja

Sivuseinien ja yläpohjan viivamainen lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

4.4 Ulkoseinän ja välipohjan liitokset

Talotehtaan välipohjan runkona ovat 300 mm korkeat palkit, joiden jako on 600 mm. Laskennassa tarkasteltiin välipohjan liittymistä passiivi- ja välimalliseinään. Laskenta suoritettiin sekä pääty- että sivuseinälle. Välipohjan rakenne on esitetty kuvassa 23 ja taulukossa 9.



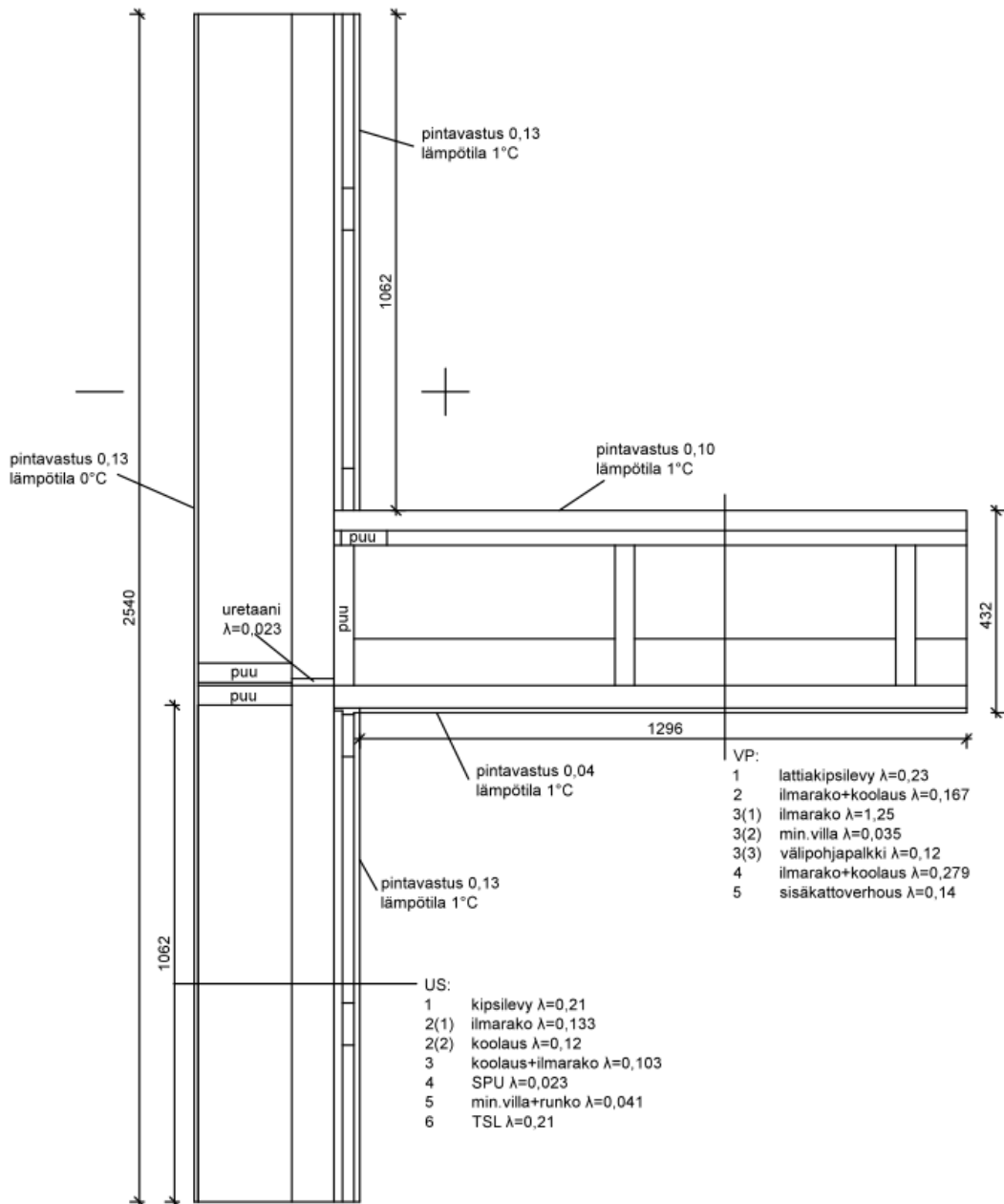
KUVA 23. Välipohjan rakennekuva

TAULUKKO 9. Välipohjan rakenne

VÄLIPOHJA			
Kerros	Ainekerros	rakennepaksuus d [m]	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]
1	lattiakipsilevy	0,044	0,23
2(1)	ilmarako	0,031	0,19
2(2)	koolaus 31x98 k300	0,031	0,12
3(1)	ilmarako	0,2	1,25
3(2)	mineraalivilla	0,1	0,035
3(3)	Välipohjapalkki 300x42 k600	0,3	0,12
4(1)	ilmarako	0,048	0,3
4(2)	koolaus 48x48 k400	0,048	0,12
5	sisäkattoverhous	0,01	0,14

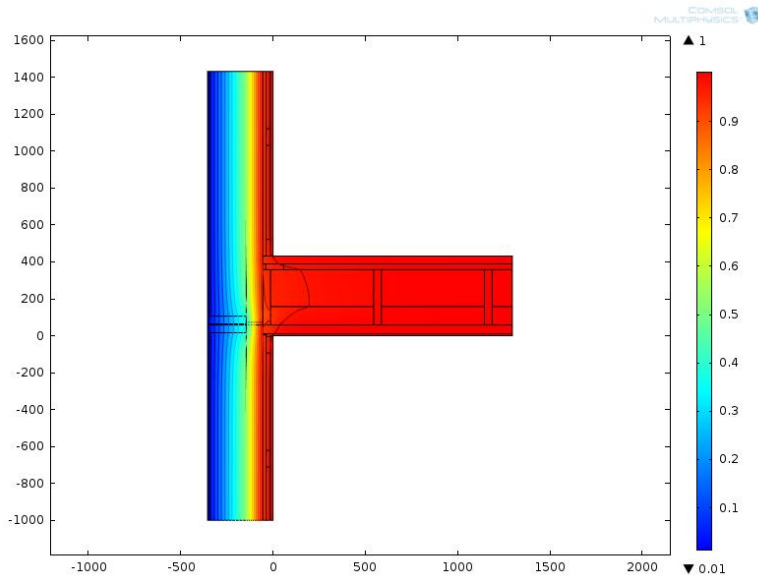
Päätyseinä

Välipohjaliitoksen laskentamallissa (kuva 24) välipohjan paksuus on 0,432 m. Liittyvän rakenteen pituus laskentamallissa on oltava vähintään kolme kertaa rakenteen paksuuden verran, joten välipohjaa tarkasteltiin 1,296 m:n matkalta. Seinän mitta laskentamallissa oli kolme kertaa seinän paksuus. Passiiviseinää tarkasteltiin 1,062 m:n matkalta ja välimallin seinää 1,0 m:n matkalta.

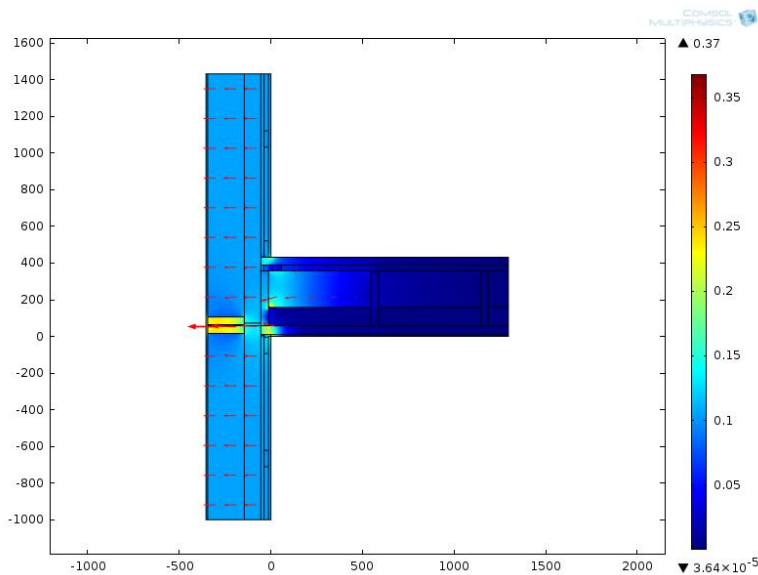


KUVA 24. Päätyseinän ja välipohjan liitoksen laskentamalli

Päätyseinän ja välipohjan liitoksen laskentamallit siirrettiin Comsol-ohjelmaan, jossa malleille annettiin oikeat lämmönjohtavuudet ja pintavastukset. Välipohjaliitoksen lämpötilakuvaaja on esitetty kuvassa 25 ja lämpövirtakuvaaja kuvassa 26.



KUVA 25. Päätyseinän ja välipohjan liitoksen lämpötilakuvaaja



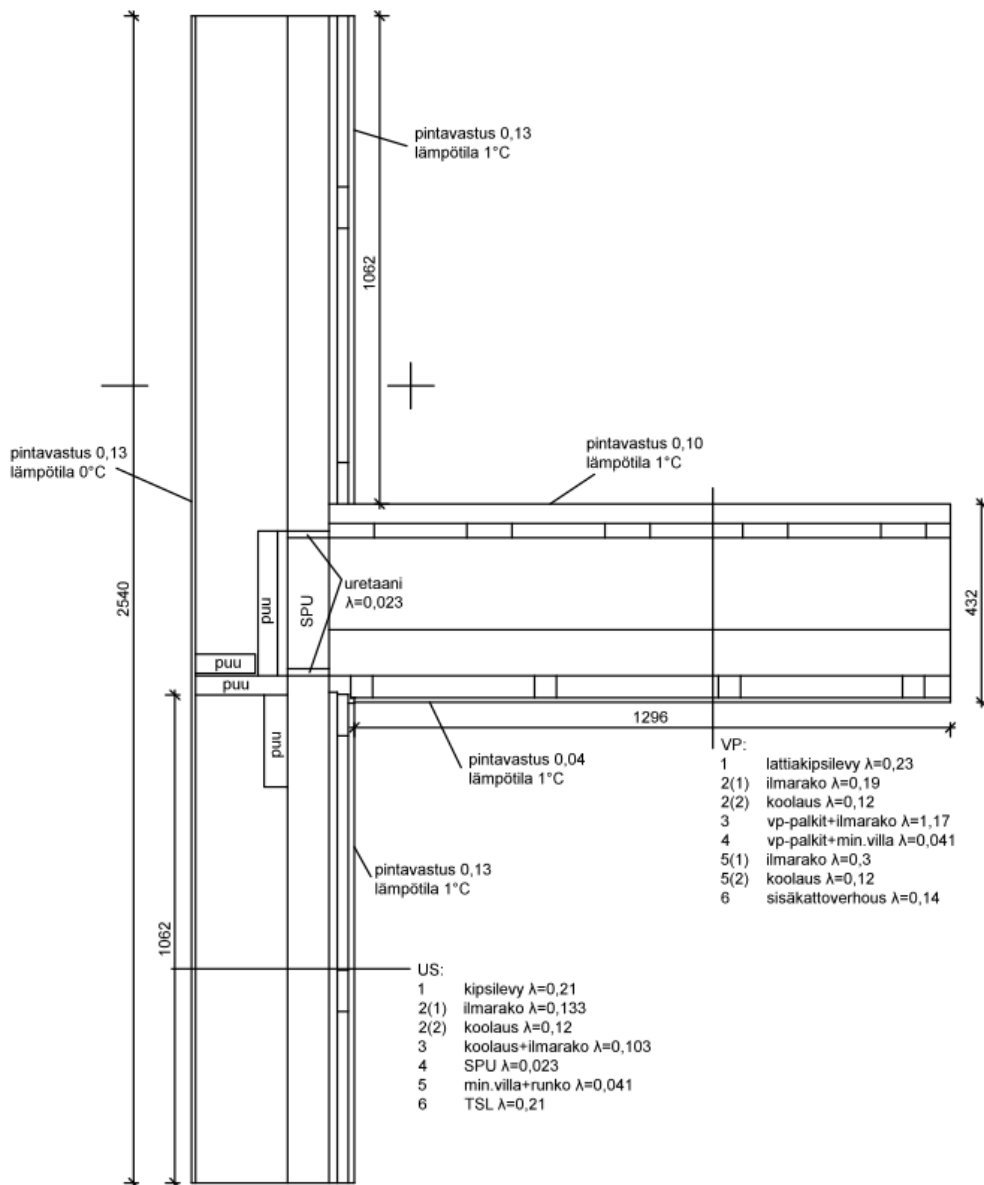
KUVA 26. Päätyseinän ja välipohjan liitoksen lämpövirtakuvaaja

Päätyseinän ja välipohjan lopulliset viivamaiset lisäkonduktanssit saadaan, kun todellisesta lämpövirrasta (L_{2D}) vähennetään seinien U-arvoilla laskettu lämpö-

virta kaavalla 20 (s. 22). Seinän korkeus otettiin koko liitoksen mitalta, joka oli passiiviseinällä 2,540 m ja välimallin seinällä 2,416 m. Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

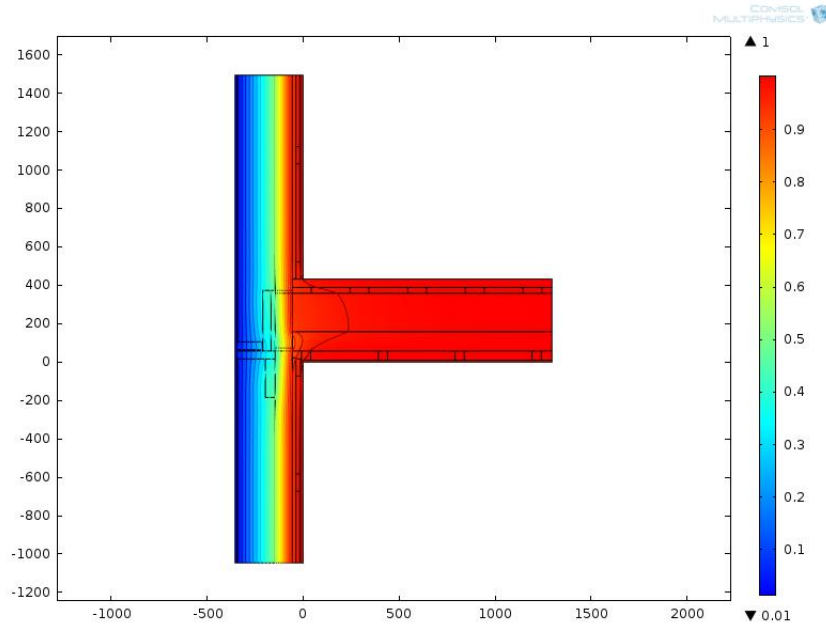
Sivuseinä

Sivuseinän ja välipohjan liitoksen laskentamalli (kuva 27) toteutettiin päätyseinän mukaisesti.

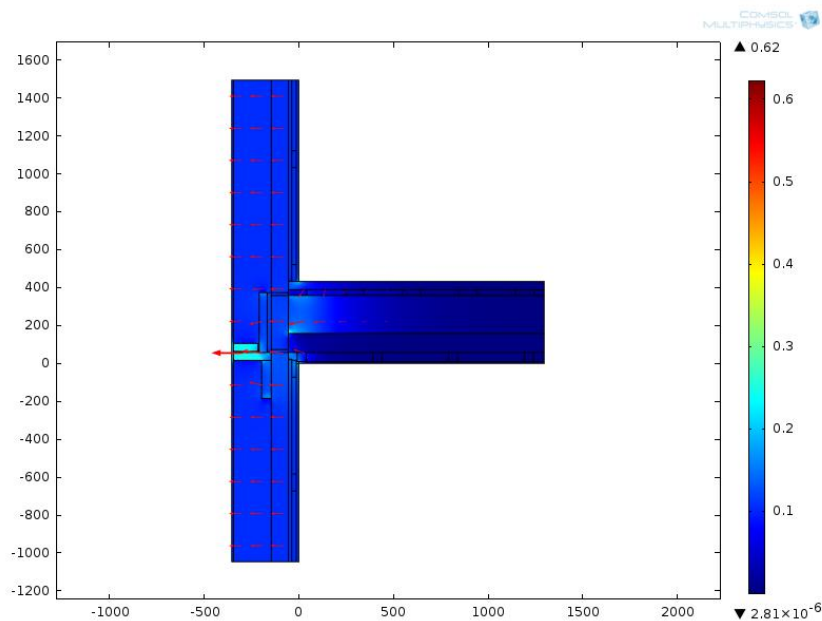


KUVA 27. Sivuseinän ja välipohjan liitoksen laskentamalli

Laskentamallit siirrettiin Comsol-ohjelmaan (kuva 20), jolla laskettiin liitoksien todelliset lämpövirrat (L_{2D}). Liitoksen lämpötilakuvaaja on esitetty kuvassa 28 ja lämpövirtakuvaaja kuvassa 29.



KUVA 28. Sivuseinän ja välipohjan liitoksen lämpötilakuvaaja



KUVA 29. Sivuseinän ja välipohjan liitoksen lämpövirtakuvaaja

Sivuseinien ja välipohjan viivamainen lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

4.5 Ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitos

Maanvastaisen alapohjan liitos laskettiin kahdelle seinätyypille. Tulokset saatiin passiiviseinälle, jonka laskentamallin paksuus w oli 354 mm ja U-arvo 0,106 sekä välimalliseinälle, jonka laskentamallin paksuus w oli 304 mm ja U-arvo 0,139.

Talotehdas rakentaa maanvaraisia betonialapohjia, joissa on massiivinen betonirakenteinen perusmuuri. Alapohjan lämmönläpäisykertoimen laskentaan täytyi ensin laskea lattiarakenteen (taulukko 10) ja perusmuurin (taulukko 11) lämmönvastukset.

TAULUKKO 10. Lattiarakenne

LATTIARAKENNE			
Ainekerros	rakennepaksuus d [m]	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
betonilattia	0,08	2	0,04
EPS 50	0,05	0,036	1,389
EPS 100	0,1	0,036	2,778
EPS 100 Platina	0,1	0,031	3,226
R_T			7,432
U-arvo [W/m²K]			0,135

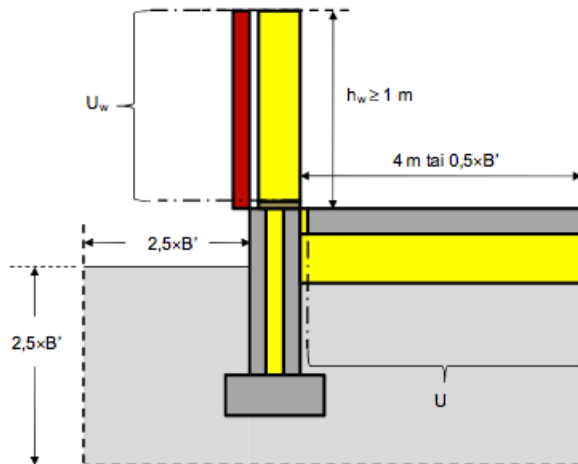
TAULUKKO 11. Perusmuurirakenne

PERUSMUURIRAKENNE			
Ainekerros	rakennepaksuus d [m]	Lämmönjohtavuus [W/(mk)]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
EPS 100	0,05	0,036	1,389
EPS 100	0,1	0,036	2,778
EPS 100	0,05	0,036	1,389
betoni	0,15	2	0,075
pintavastus R_{se}			0,040
R_T			5,631
U-arvo [W/m²K]			0,178

Lisäkonduktanssiarvot laskettiin talotehtaan esimerkkikohteelle, jonka lattiarakenteen pinta-ala on 80 m² ja sen piiri on 37 m. Arvoilla laskettiin suhteellinen lattiamitta (B') kaavalla 12 (s. 15).

$$B' = \frac{80}{0,5 * 37} = 4,3m$$

Laskentamalliin (kuva 30) otetaan vähintään 1 m:n korkeudelta seinää ja $0,5 \times B'$ tai 4 m lattiarakennetta. Rakenteen ulkopuolisia maamassoja otetaan mukaan 2,5 kertaa rakennuksen suhteellisen leveyden verran rakennuksen sivulle ja alapuolelle. (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 16.)



KUVA 30. Esimerkki ulkoseinän, maanvastaisen alapohjan ja sokkelin välisestä liitoksesta (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 16)

Maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykertoimen laskeminen aloitettiin laskemalla alapohjan ekvivalentti paksuus kaavalla 13 (s. 16).

$$\text{SPU AL90: } d_t = 0,354 + 2(0,17 + 7,432 + 0,04) = 16,238m$$

$$\text{SPU AL40: } d_t = 0,304 + 2(0,17 + 7,432 + 0,04) = 16,188m$$

Talotehtaan alapohjassa ei käytetä vaakasuuntaista lisälämmöneristystä reuna-alueella, joten sen vaikutusta alapohjan U-arvoon ei tarvitse ottaa huomioon.

Alapohjarakenteen reuna-alueella olevan pystysuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus laskettiin kaavalla 17 (s. 17).

$$d_v = 2 \left(5,631 - \frac{0,3}{2} \right) = 10,96m$$

Perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristyksen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 16 (s. 17)

$$\text{SPU AL90: } \psi_{gev} = -\frac{2}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2*0,5}{16,238} + 1\right) - \ln\left(\frac{2*0,5}{16,238 + 10,96} + 1\right) \right] = -0,0151 \text{ W/(mK)}$$

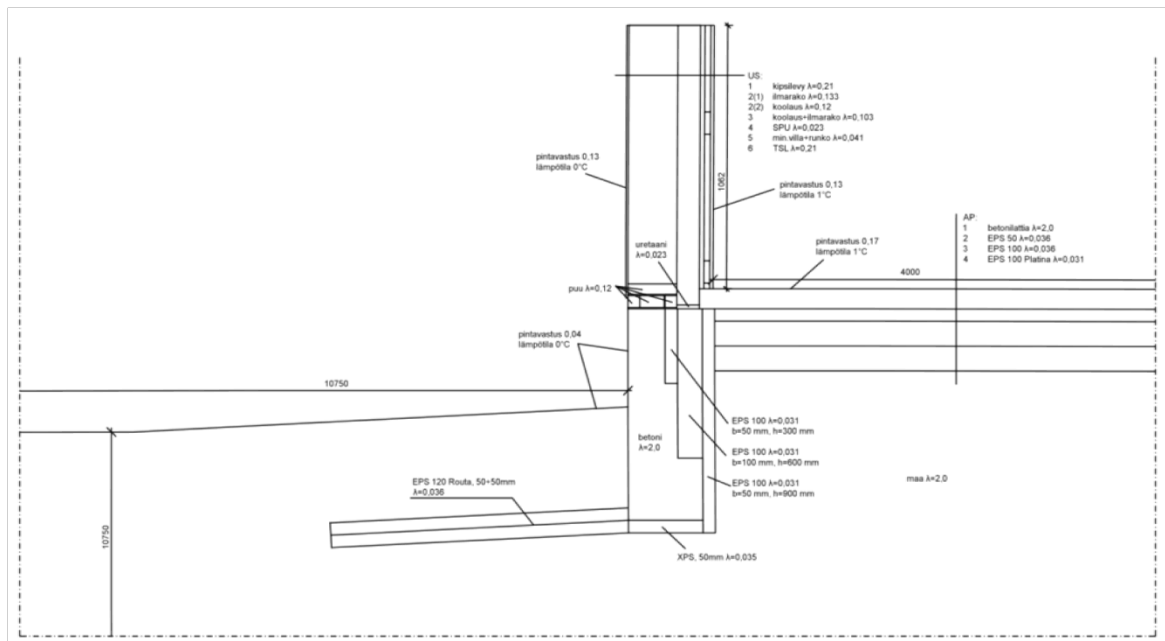
$$\text{SPU AL40: } \psi_{gev} = -\frac{2}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2*0,5}{16,188} + 1\right) - \ln\left(\frac{2*0,5}{16,188 + 10,96} + 1\right) \right] = -0,0151 \text{ W/(mK)}$$

Lopullinen maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin laskettiin kaavalla 9 (s. 13).

$$\text{SPU AL90: } U_f = \frac{2}{0,475 * 4,3 + 16,238} + \frac{2 * (-0,0151)}{4,3} = \underline{\underline{0,102 \text{ W/(m}^2\text{K)}}}$$

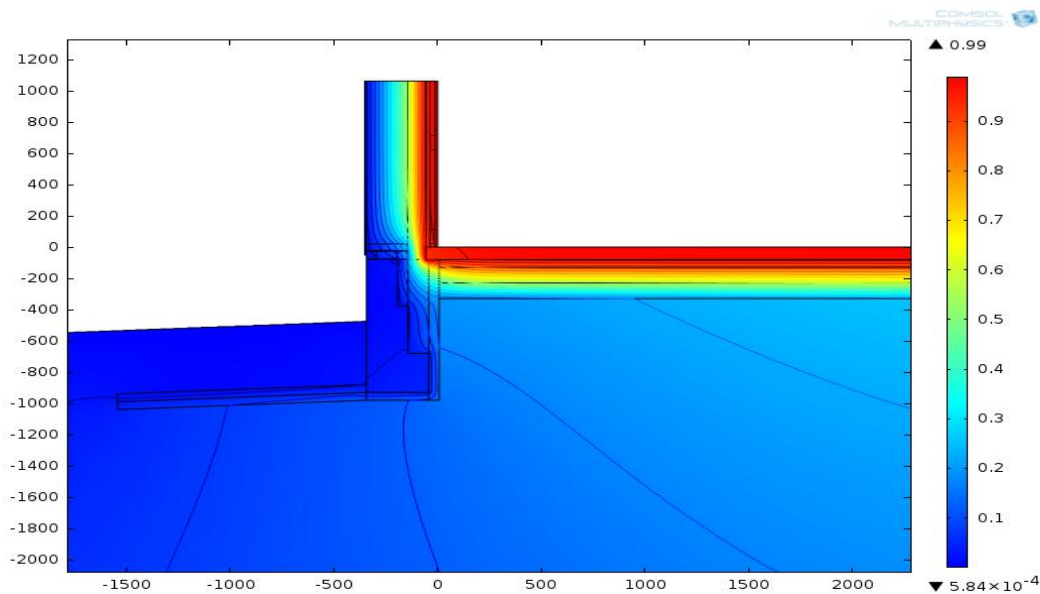
$$\text{SPU AL40: } U_f = \frac{2}{0,475 * 4,3 + 16,188} + \frac{2 * (-0,0151)}{4,3} = \underline{\underline{0,103 \text{ W/(m}^2\text{K)}}}$$

Maanvastaisen alapohjan laskentamalliin (kuva 31) otettiin passiivirakenteessa 1,062 m:n ja välimallirakenteessa 1,0 m:n korkeudelta seinää. Lattiarakenteen pituudeksi annettiin 4 m. Rakenteen ulkopuolisia maamassoja otettiin mukaan $2,5 \times 4,3 = 10,750 \text{ m}$.

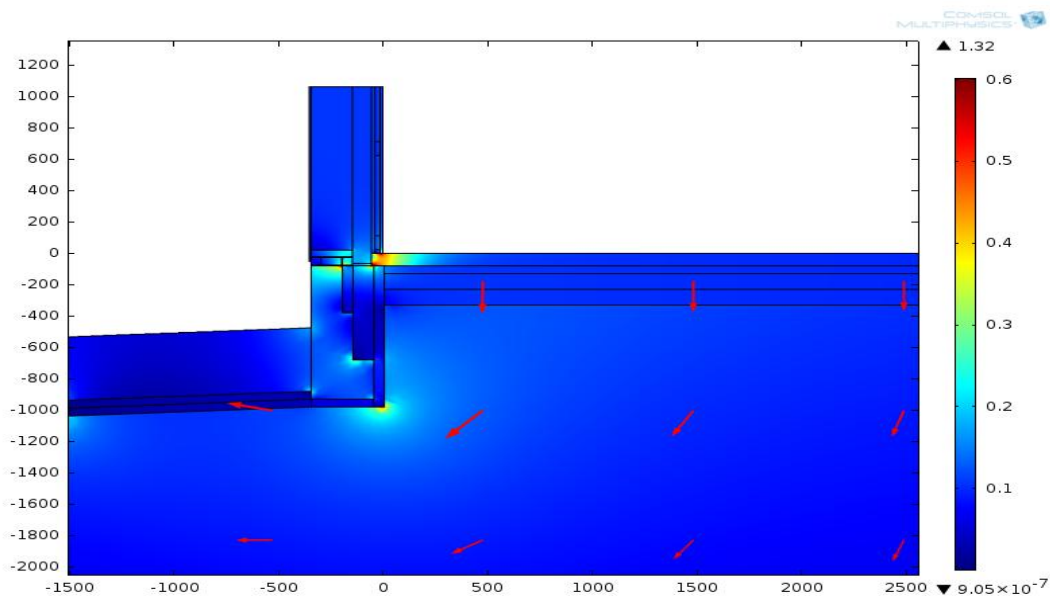


KUVA 31. Maanvastaisen alapohjaliitoksen laskentamalli

Comsol-ohjelmalla tehtiin lämpösimulointi kahdelle seinätyypille yhden asteen lämpötilaerolla. Ohjelmasta saatiin liittymärakententeiden lämpövirrat (L_{2D}). Alapohjaliitoksen lämpötilakuvaaja on esitetty kuvassa 32 ja lämpövirtakuvaaja kuvassa 33.



KUVA 32. Maanvastaisen alapohjaliitoksen lämpötilakuvaaja



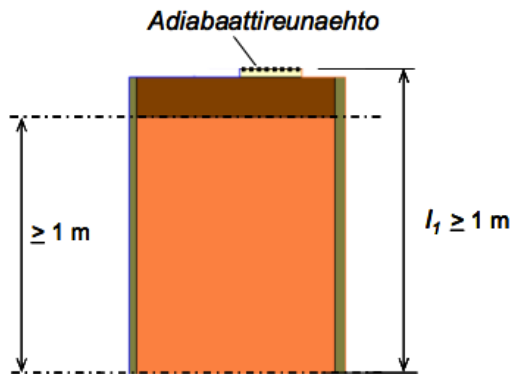
KUVA 33. Maanvastaisen alapohjaliitoksen lämpövirtakuvaaja

Liittymärakenteiden viivamainen lisäkonduktanssi saatiin kaavasta 21 (s. 22).

Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

4.6 Ikkunaliitokset

Ikkunaliitoksien kylmäsilat laskettiin yksinkertaistetulla menetelmällä. Laskentaa yksinkertaistetaan jättämällä ikkuna pois laskenta-alueesta ja asettamalla ikkunan karmin paikalle adiabaattireunaehto eli täydellinen lämmöneristys (kuva 34).



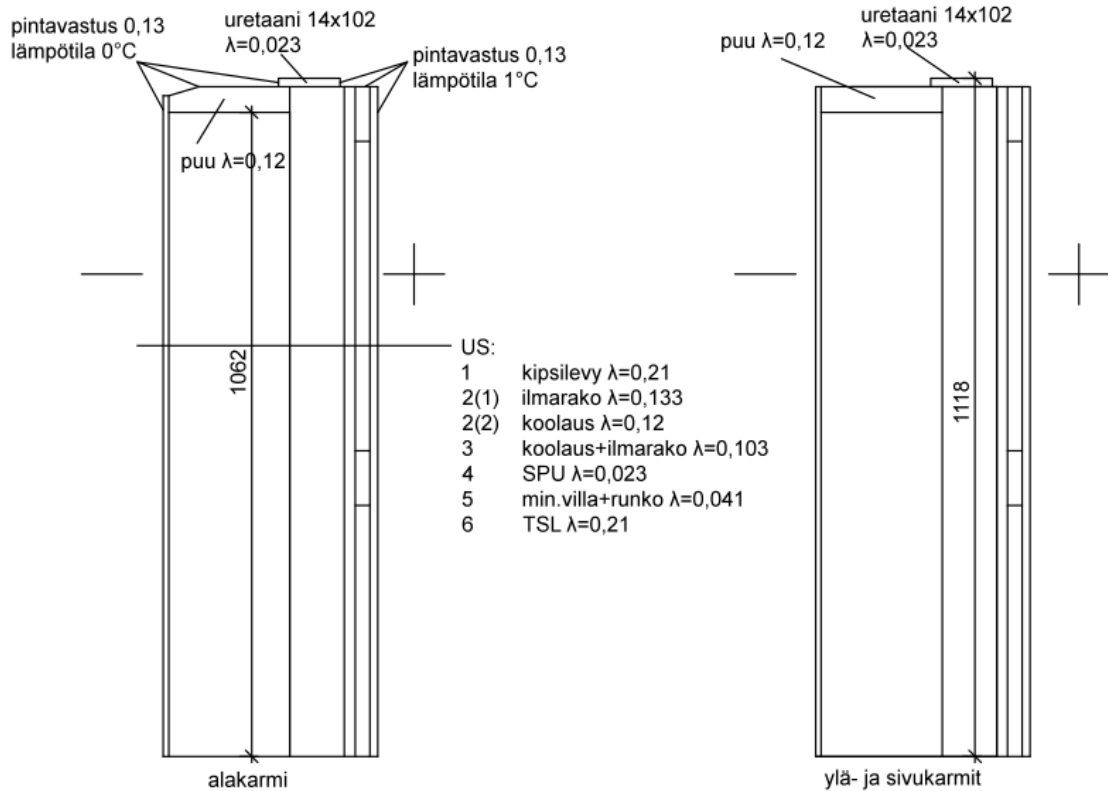
KUVA 34. Ikkunan liitoksen yksinkertaistettu menettely kylmäsilan laskentaan (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 28)

Yksinkertaistettua menetelmää käytettäessä adiabaattireunaehdon yhteydessä karmia on kavennettava. Laskennallinen karmisyvyys riippuu ikkunatyypistä, josta saadaan kerroin, jolla kerrotaan karmin todellinen syvyys taulukon 12 mukaan. Karmia kavennetaan laskennassa ulkopuolelta.

TAULUKKO 12. Laskennallinen karmisyvyys käytettäessä adiabaattireunaehtoa (Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012, 28)

Ikkunatyyppe	Karmin laskennallinen syvyys
SEK, MS2E	0,7 x karmisyvyys
MSE, MS3E	0,6 x karmisyvyys
MEK, SE	Pienempi luvuista 0,95 x karmisyvyys sekä 100 mm

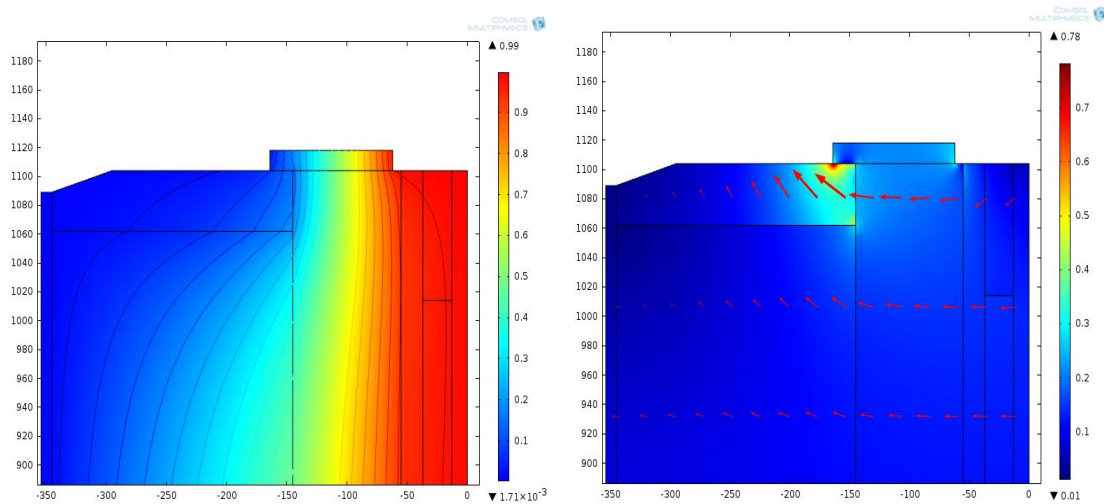
Ikkunaliitokset laskettiin kahdelle seinätyypille. Ikkunatyypinä liitoksissa käytettiin MSE-ikkunaa, jonka todellinen karmisyvyys oli 170 mm. Karmisyvyys kerrottiin 0,6:lla, jolloin laskennalliseksi karmisyvyudeksi saatiin 102 mm. Yksinkertaistetut laskentamallit on esitetty kuvassa 35.



KUVA 35. Ikkunaliitoksien laskentamallit

Alakarmi

Passiivi- ja välimalliseinän laskentamallit simuloitiin Comsol-ohjelmalla, josta saatiin liitoksien lämpövirrat (L_{2D}). Ikkunan alakarmiliitoksen lämpötila- ja lämpövirtakuvaaja on esitetty kuvassa 36.

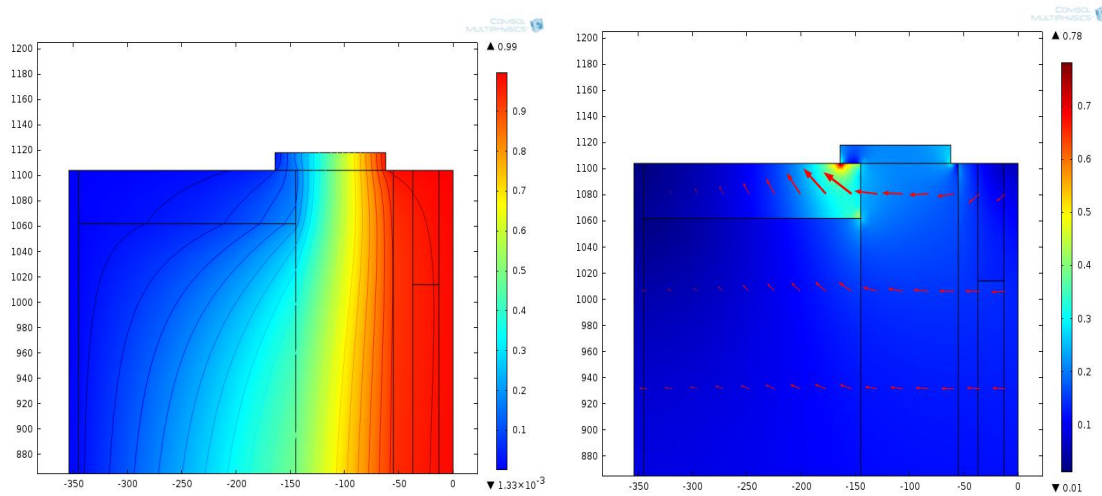


KUVA 36. Ikkunan alakarmiliitoksen lämpötila- (vas.) ja lämpövirtakuvaaja

Ikkunan alakarmiliitoksien viivamaiset lisäkonduktanssit laskettiin kaavalla 20 (s. 22). Seinän korkeus otettiin uretaaniivistyksen yläreunaan asti. Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

Ylä- ja sivukarmit

Alakarmiliitoksien tapaan ylä- ja sivukarmien laskentamallit simuloitiin Comsol-ohjelmalla yhden asteen lämpötilaerolla. Ikkunan ylä- ja sivukarmiliitoksen lämpötila- ja lämpövirtakuvaaja on esitetty kuvassa 37.

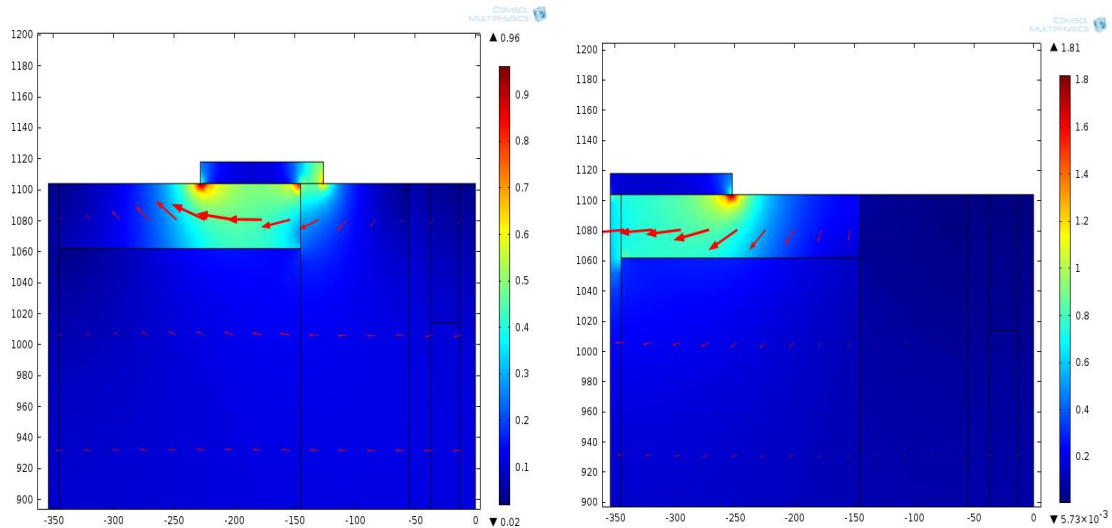


KUVA 37. Ikkunan ylä- ja sivukarmiliitoksen lämpötila- (vas.) ja lämpövirtakuvaaja

Ikkunan ylä- ja sivukarmiliitoksien viivamaiset lisäkonduktanssit laskettiin kaavalla 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

Vertailutapaukset

Talotehtaan liitoksissa karmit on kiinnitetty 7 mm:n päähän SPU-eristeen sisäreunasta. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös tilanteita, joissa yläkarmit on kiinnitetty passiiviseinän keskelle ja ulkoreunaan. Tarkastelun tarkoituksena oli selvittää, onko ikkunan sijainnilla vaikutusta liitoksen lisäkonduktanssiin. Vertailutapauksien lämpövirtakuvaajat on esitetty kuvassa 38.

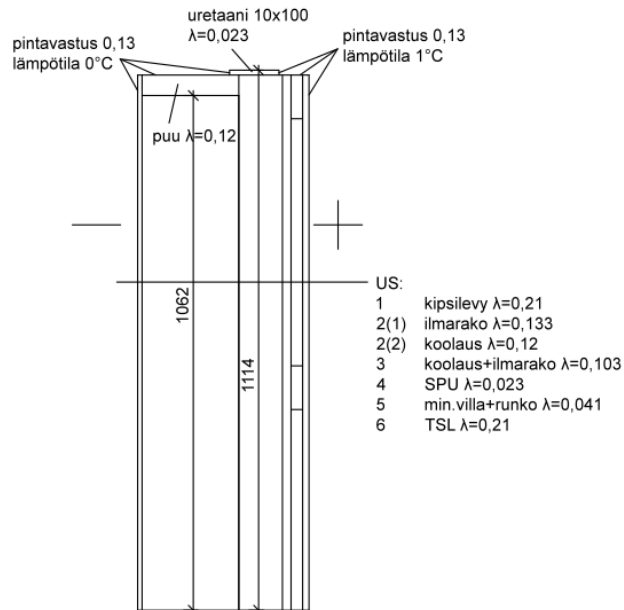


KUVA 38. Ikkunaliitoksien lämpövirtakuvaajat, joissa karmi sijoitettu seinän keskelle (vas.) ja ulkoreunaan

Vertailutapauksille laskettiin viivamainen lisäkonduktanssi kaavalla 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

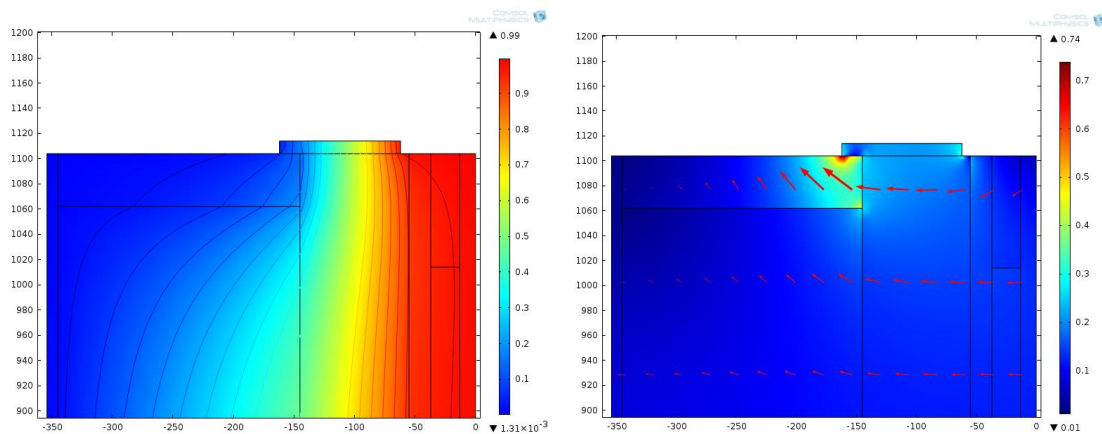
4.7 Oviliitokset

Oviliitokset laskettiin Ikkunaliitoksien tapaan yksinkertaistetulla menetelmällä kahdelle seinätyypille. Ovikarmin paikalle laitettiin adiabaattireunaehto ja todellista karmisyvyyttä 170 mm kavennettiin. Tyypillinen ovi vastaa ikkunatyyppeä MEK, joten karmin laskennalliseksi syvyydeksi saatiin 100 mm. Oviliitokset laskettiin ylä- sekä sivukarmeille (kuva 39). Alakarmi jätettiin tässä opinnäytetyössä laskematta laskentaperiaatteen ja ohjeiden puutteiden takia. Jatkossa oven alakarmiliitoksen lisäkonduktanssiarvona käytetään ylä- ja sivukarmin arvoja. On kuitenkin syytä huomauttaa, että alakarmiliitoksen lisäkonduktanssi on todellisuudessa ylä- ja sivukarmien arvoja suurempi. Tämä johtuu alakarmin liittymästä perustukseen, mikä on lämpöteknisesti huonompi kuin laskennassa käytetyt ulkoseinät.



KUVA 39. Oviliitoksen laskentamalli

Laskentamallit siirrettiin Comsol-ohjelmaan simulointia varten, mistä saatiin liitoksille lämpövirrat (L_{2D}). Oviliitoksen lämpötila- ja lämpövirtakuvaaja on esitetty kuvassa 40.



KUVA 40. Oviliitoksen lämpötila- (vas.) ja lämpövirtakuvaaja

Oviliitoksien viivamaiset lisäkonduktanssit laskettiin kaavalla 20 (s. 22). Laskennan tulokset on koottu liitteeseen 1.

5 ESIMERKKIKOHTTEEN JOHTUMISLÄMPÖHÄVIÖ

Laskettuja viivamaisia lisäkonduktansseja käyttäen tarkasteltiin talotehtaan passiivirakennusta, joka sijaitsee Oulun Hiukkavaaran uusiutuvan energian pilttialueella. Rakennukselle laskettiin johtumislämpöhäviö, jonka tarkoituksena oli selvittää, kuinka suuri merkitys rakennusosien liittymistä aiheutuvilla kylmäsilloilla on kokonaislämpöhäviöön. Laskennassa eriteltiin rakennusosien pinta-alat ja liitoksien pituudet. Rakennusosien pinta-alojen ja U-arvojen avulla laskettiin rakennusosista johtuva johtumislämpöhäviö. Rakennusosien välisten kylmäsiltojen aiheuttama johtumislämpöhäviö laskettiin viivamaisten lisäkonduktanssiarvojen ja liitoksien pituuksien avulla.

Hiukkavaaralla sijaitseva passiivitalo on suorakaiteen muotoinen kaksikerroksinen asuinrakennus, jonka kerrosala on 186 m² ja tilavuus 610 m³. Ulkoseinän kokonaispinta-ala on 172,8 m² ja ulkonurkista muodostuvien kylmäsiltojen yhteenlaskettu pituus on 20 m. Ylä-, väli- sekä alapohjan pinta-ala on 80,4 m². Ylä- sekä välipohjan ja päätyseinän muodostava kylmäsilta on pituudeltaan 14,1 m. Sivuseinällä vastaava pituus yläpohjalla on 19,1 m ja välipohjalla 14,1 m. Välipohjan ja sivuseinän kylmäsiltojen pituudesta on vähennetty portaikosta muodostuvan aukon pituus ulkoseinään nähden. Maanvastaisen alapohjan ja perustuksen välisen kylmäsiltojen pituus on 36,9 m. Rakennuksessa on 18 ikkunaa, niiden kokonaispinta-ala on 21,1 m². Ikkunoiden yhteenlaskettu piiri on 81,7 m. Asuinrakennuksessa on yhteensä kolme ovea, joiden kokonaispinta-ala on 7,8 m² ja kylmäsiltojen yhteenlaskettu pituus on 12,2 m.

Rakennusosien mittojen sekä laskettujen U-arvojen ja viivamaisen lisäkonduktanssiarvojen avulla asuinrakennukselle laskettiin johtumislämpöhäviö. Ikkunoiden ja ovien U-arvot saatiin talotehtaalta. Rakennusosien ja niiden liitoksien yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö laskettiin kaavalla 1 (s. 9).

$$\begin{aligned} H_{\text{joht}} &= 172,8 * 0,106 + 80,4 * 0,07 + 80,4 * 0,102 + 21,1 * 0,75 + 7,8 * 0,7 \\ &+ 20 * 0,022 + 14,1 * 0,021 + 22,8 * 0,021 + 14,1 * (-0,007) + 19,1 * 0,009 + 36,9 * 0,060 \\ &+ 81,7 * 0,013 + 12,2 * 0,012 \\ &= \underline{\underline{58,14 W / K}} \end{aligned}$$

6 KYLMÄSILTATARKASTELUN TULOKSET

Laskettuja lisäkonduktanssiarvoja verrattiin Suomen rakentamismääräyskoelman osan D5 ohjearvoihin. Suurin osa lasketuista lisäkonduktansseista alitti ohjearvon selvästi. Tuloksista laadittiin taulukot, joissa on ohje- ja lasketut arvot sekä niiden erotus ja laskettujen arvojen prosenttiosuudet ohjearvoista. Passiiviseinän liitoksien tulokset on esitetty liitteen 1 taulukossa 1 ja välimalliseinän liitokset liitteen 1 taulukossa 2.

6.1 Lisäkonduktanssiarvot

Ulkonurkkien lisäkonduktanssiarvot paranivat ohjearvoista passiivirakenteella melkein puolella ja välimallirakenteella neljänneksen. Sisänurkissa passiivirakenne oli viidenneksen ohjearvoa parempi. Välimallirakenteen sisänurkka oli 0,009 W/(mK) parempi kuin passiivirakenteella. Tämä johtuu siitä, että välimallirakenteen sisäkoolaukset voidaan sijoittaa lämpöteknisesti paremmin kuin passiivirakenteen, jolloin lämpövirta on hieman pienempi. Rakennuksen sisänurkat eivät aiheuta lämpöhäviötä vaan toimii pikemminkin lämmöneristeenä, jolloin sisänurkista tuleva negatiivinen arvo vähentää rakennuksen kylmäsilloista johtuvaa kokonaislämpöhäviötä.

Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksissa lisäkonduktanssiarvo oli passiivirakenteella yli puolet parempi kuin ohjearvo. Välimallirakenteen arvot olivat hieman huonompia ollessaan kuitenkin vähän alle puolta parempia kuin ohjearvo. Pääty- ja sivuseinien liitoksien arvot poikkesivat molemmilla seinätyypeillä todellisuudessa noin 0,001 W/(mK), mutta pyöristyksistä johtuen passiiviseinälle saatiin samat lisäkonduktanssin arvot ja välimalliseinän arvot poikkesivat toisistaan tuloksissa 0,002 W/(mK) verran.

Välipohjan ja ulkoseinän liitoksissa lisäkonduktanssit olivat huomattavasti ohjearvoja pienempiä. Päätyseinällä passiivirakenteen liitos oli jopa negatiivisen puolella, joten välipohjaliitos toimii ulkoseinän sisänurkan tapaan lämmöneristeenä, joka ei johda lämpöä lävitseen. Välimallirakenteella päätyseinän lisäkonduktanssi pääsi myös lähelle nolla-arvoa. Päätyseinien liitoksia puisemmat si-

vuseinien liitokset olivat passiivirakenteella 82 % ja välimallirakenteella 78 % parempia kuin ohjearvo.

Maanvastaisen alapohjan lisäkonduktanssi oli passiiviseinällä 40 % ja välimalliseinällä 12 % ohjearvoa parempi. On syytä huomauttaa, että maanvastaisen alapohjan U-arvo laskettiin talotehtaan esimerkkikohteelle, jossa liitoksen pituus oli 36,9 m. Laskettaessa U-arvoa muille kohteille täytyy jokaisessa tapauksessa huomioida rakennuksen koko erikseen.

Ikkunaliitoksen laskettiin yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä, joka hieman heikentää laskennan tarkkuutta. Passiivirakenteella lisäkonduktanssin arvot olivat hieman alle 70 % parempia kuin ohjearvot. Välimallirakenteen arvot paraniivat ohjearvoista noin 60 %. Passiivirakenteen ikkunaliitos laskettiin talotehtaan rakennekuvan lisäksi vertailutapauksille, joissa karmi on sijoitettu seinän keskelle sekä ulkoreunaan. Vertailutapauksien lisäkonduktanssit olivat talotehtaan käyttämää liitosta huonompia. Karmin ollessa seinän ulkoreunassa lisäkonduktanssi oli jopa ohjearvoa huonompi. Laskennan perusteella ikkunaliitos on parhaimmillaan, kun se on talotehtaan rakennekuvien mukainen.

Oviliitokset laskettiin ikkunaliitoksien tapaan yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä. Oviliitokset olivat passiivirakenteella 70 % ja välimallirakenteella 60 % paremmat kuin ohjearvo. Oven alakarmiliitokselle ei saatu laskettua lisäkonduktanssin arvoa ohjeiden puutteen takia.

6.2 Kylmäsiltojen merkitys

Uusien ympäristöministeriön määräysten mukaan rakennuksen johtumislämpöhäviössä ovat mukana myös rakennusosien kylmäsiltojen merkitystä tarkasteltiin laskemalla talotehtaan esimerkkikohteelle kokonaisjohtumislämpöhäviö. Liitteen 1 taulukossa 3 on esitetty esimerkkikohteen kylmäsiltojen johtumislämpöhäviöt, jotka olivat yhteensä 4,71 W lämpötilaeroastetta kohti. Alapohja- ja ikkunaliitoksilla oli suurin merkitys lämpöhäviöihin, kun taas välipohjan merkitys oli hyvin pieni.

Kylmäsiltojen aiheuttamaan johtumislämpöhäviöön lisättiin rakenneosista johtuva lämpöhäviö, jolloin rakennukselle saatiin kokonaislämpöhäviö. Taulukossa

13 on esitetty esimerkikohteen kokonaislämpöhäviö, joka oli yhteensä 58,14 W/K. Kylmäsilloista aiheutuvat lämpöhäviöt olivat tässä tapauksessa noin 8 % kokonaislämpöhäviöstä.

TAULUKKO 13. Esimerkkikohteen kokonaislämpöhäviö

	A [m ²]	U [W/m ² K]	A*U [W/K]
Ulkoseinät	172,8	0,106	18,3
Yläpohja	80,4	0,07	5,6
Alapohja	80,4	0,102	8,2
Ikkunat	21,1	0,75	15,8
Ovet	7,8	0,7	5,5
Rakennusosat yhteensä			53,4
Kylmäsilat yhteensä			4,71
kokonaislämpöhäviö			58,14

Esimerkkikohteelle laskettiin vertailun vuoksi kylmäsiltojen lämpöhäviöt Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 ohjearvoilla (taulukko 14). Ohjearvoilla laskettujen kylmäsiltojen lämpöhäviöt olivat yhteensä 11,75 W lämpötilaeroas-tetta kohti. Eli rakennuksen kylmäsiltoista johtuva lämpöhäviö on todellisuudessa jopa 7,04 W/K ja noin 60 % pienempi kuin ohjearvoilla laskettu lämpöhäviö. Erityisesti välipohja- sekä ikkunaliitoksien lämpöhäviöt poikkeavat todellisesta arvosta erittäin paljon.

TAULUKKO 14. Esimerkkikohteen kylmäsiltojen johtumislämpöhäviöt Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 ohjearvoilla

	Pituus P [m]	Psi [W/(mK)]	P*Psi [W/K]
ulkonurkkaliitos	20	0,04	0,80
yläpohja - päätyseinä	14,1	0,05	0,71
yläpohja - sivuseinä	22,8	0,05	1,14
välipohja - päätyseinä	14,1	0,05	0,71
välipohja - sivuseinä	19,1	0,05	0,96
maanvastainen alapohjaliitos	36,9	0,1	3,69
ikkunaliitos	81,7	0,04	3,27
oviliitos	12,2	0,04	0,49
Ohjearvoilla lasketut Kylmäsilat yhteensä			11,75
Todelliset kylmäsilat yhteensä			4,71
Todellisten ja ohjearvoilla laskettujen kylmäsiltojen erotus			-7,04

Käytännössä todellisten ja ohjearvojen kylmäsiltojen lämpöhäviöt eroavat toisistaan hyvin merkittävästi. Esimerkiksi Oulun korkeudella vuoden keskilämpötila on noin +2 °C, jolloin sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroksi tulee $21 - 2 = 19$ °C. Täten 7,04 W/K ero tarkoittaa vuodessa 19 asteen lämpötilaerolla yhteensä noin 1 200 kWh. Rahallisesti, sähkön hinnan ollessa 0,15 €/kWh, talotehtaan rakenneratkaisut säästävät 180 euroa vuodessa.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli laskea talotehtaan rakenneliitoksien kylmäsiltojen aiheuttamat viivamaiset lisäkonduktanssit ja verrata arvoja Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjearvoihin. Työssä tutkittiin talotehtaan passiivi- ja välimalliseinän liittymistä eri rakennusosiin. Viivamaiset lisäkonduktanssit laskettiin ympäristöministeriön laatiman lisäkonduktanssin laskentaoppaan mukaan. Työssä tutkittiin myös talotehtaan esimerkkikohdetta, jolle laskettiin kokonaislämpöhäviö. Laskennan tavoitteena oli selvittää kylmäsiltoista johtuvan lämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöstä.

Työssä mallinnettiin talotehtaalta saadut rakennedetailit AutoCAD-ohjelmalla, josta saadut laskentamallit simuloitiin Comsol Multiphysics -ohjelmalla. Laskentamallien piirtäminen ja simulointi tehtiin viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaan mukaisesti. Rakennneosien U-arvot laskettiin käsiin Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan.

Talotehtaan kaikkien rakenneliitoksien viivamaiset lisäkonduktanssit alittivat odotetusti niiden ohjearvot. Erityisesti välipohjaliitoksien kylmäsiltoivat olivat selvästi ohjearvoja parempia. Välimallirakenteen lisäkonduktanssit olivat hieman passiivirakenteen arvoja heikompia, mutta molempia voidaan pitää hyvin energiatehokkaana ratkaisuna. Talotehdas voi jatkossa käyttää tässä työssä laskettuja lisäkonduktansseja energialaskennassa.

Talotehtaan esimerkkikohteen kokonaislämpöhäviön laskeminen antoi hyvän kuvan uusien määräyksien tarpeellisuudesta. Vanhoihin määräyksiin verrattuna kokonaislämpöhäviöön tuli 8 %:n korotus. Ohjearvoilla laskettu kylmäsiltojen lämpöhäviö laski noin 60 %, kun lämpöhäviö laskettiin työssä laskettujen lisäkonduktanssin arvojen avulla. Talotehtaiden on syytä tarkastaa omat rakenneliitokset laskennallisesti, koska siitä saatu hyöty energialaskennassa voi olla erittäin merkittävä.

Lisäkonduktanssilaskenta on erittäin pikkutarkkaa työtä ja erityisesti U-arvon määrittäminen nousee laskennassa isoon rooliin. Numeerisen laskentamenetelmän laskentatarkkuus on viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaan mu-

kaan ± 5 %. Ottaen huomioon, että lähes kaikissa tuloksissa puhutaan tuhannesosaluvuista, pitäisin todellista laskentatarkkuutta vähän suurempana. Pienet muutokset tai virheet laskentamallissa tai U-arvossa voivat heittää tulosta tois-
takymmentä prosenttia. Tämä on syytä ottaa huomioon tarkastellessa tämän työn tuloksia.

LÄHTEET

Hagentoft, Carl-Erik 2001. Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur.

Lämmöneristys. 2003. Suomen Rakentamismääräyskokoelma C4. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. Hakupäivä 24.1.2015.

Lämmöneristys. 2012. Luonnos 16.3.2012. Suomen Rakentamismääräyskokoelma C4. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BE3549160-2ED6-4807-8556-230BDC60275B%7D/30749>. Hakupäivä 14.1.2015.

Torvikoski, Antti 2013. T522105 Rakennusfysiikka 5 op. Opintojakson materiaalit keväällä 2013. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B8C5C3B41-E127-4889-95B0-285E9223DEE6%7D/40468>. Hakupäivä 25.1.2015.

Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaopas. 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B0708E7A2-7EE5-4DA5-AEF2-2801630E2300%7D/30996>. Hakupäivä 14.1.2015.