



Heikki Rautio

**IEEB-PROJEKTI: RITAHARJUN ENERGIAKORTTELIN
ULKOSEINÄLIITTYMIEN KYLMÄSILTATARKASTELU**

**IEEB-PROJEKTI: RITAHARJUN ENERGIAKORTTELIN
ULKOSEINÄLIITTYMIEN KYLMÄSILTATARKASTELU**

Heikki Rautio
Opinnäytetyö
Lukukausi Kevät 2013
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Talonrakennus

Tekijä: Rautio Heikki

Opinnäytetyön nimi: IEEB-projekti: Ritaharjun energiakorttelin
ulkoseinäliittymien kylmäsilta tarkastelu

Työn ohjaaja: Lehtori Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: K2013 Sivumäärä: 69 + 28

Työn aiheena on Oulun Ritaharjuun rakennettujen ja rakenteilla olevien matalaenergia määräykset täyttävien omakotitalojen rakenteiden kylmäsilta tarkastelu. Tavoitteena oli selvittää liitosten kylmäsiltoista aiheutuva viivamainen lisäkonduktanssi erilaisille runkoratkaisuille. Saatuja tuloksia verrattiin Suomen rakennusmääräyskokoelmista löytyviin ohjearvoihin. Tarkastelussa oli yhteensä kolme puurankarakennusta, hirsitalo sekä kivitalo. Näistä kohteista tarkasteltiin ulkoseinän liitoksia yläpohjaan, välipohjaan ja ikkunoihin sekä ulkoseinien liitoksia nurkissa.

Työssä käytettiin Suomen rakennusmääräyskokoelman osaa C4 rakenteiden U-arvojen määrittämisessä. Liitosten aiheuttamien lisäkonduktanssien määrittämisessä käytettiin Ympäristöministeriön julkaisemaa Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopasta. Lämpövirtaussimulointiin tarvittavat laskentamallit mallinnettiin käyttäen AutoCAD-ohjelmistoa ja lämpövirtojen simulointiin COMSOL Multiphysics -ohjelmistoa. Ohjelmasta saatiin lämpöteknisen kytkentäkertoimen arvo, jonka avulla voitiin laskea liitosrakenteesta aiheutuva lisäkonduktanssi.

Rakennusmääräyskokoelmista löytyvät lisäkonduktanssien ohjearvot on lähtökohtaisesti määritelty niin, että tarkemmalla numeerisella laskentamenetelmällä lasketut lisäkonduktanssien arvot olisivat pienempiä. Tämä ei kuitenkaan toteutunut kaikissa tapauksissa. Esimerkiksi lähes kaikki kivitalosta lasketut liitostyyppit menivät yli ohjearvojen. Puurakenteisten talojen laskentatulokset olivat vastaavasti vain pieneltä osin yli ohjearvojen. Ikkunaliitosten laskentatuloksiin vaikuttaa omalta osaltaan laskennassa käytetty yksinkertaistettu laskentamenetelmä, jossa ikkuna korvataan adiabaattireunaehdolla. Tämä aikaa säästävä menetelmä antoi kuitenkin mahdollisuuden tarkastella myös karmin sijainnin vaikutusta lisäkonduktanssin määrään. Ideaali paikka karmille laskennan perusteella on esimerkiksi hirsiseinässä mahdollisimman lähellä seinän ulkopintaa ja puurankarakennuksissa hieman irti seinän sisäpinnasta. Lähes kaikissa tapauksissa karmien paikkaa siirtämällä saatiin pienempiä lisäkonduktanssin arvoja.

Asiasanat: lisäkonduktanssi, kylmäsilta, lämpöhäviö, adiabaatti, Comsol

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building Engineering

Author: Rautio Heikki

Title of thesis: IEEB-Project: Measurements of Thermal Bridges in External Wall Junctions at Ritaharju Energy Efficiency Quarter

Supervisor: Lecturer Illikainen Kimmo

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2013 Pages: 69 + 28 appendices

The topic of this study is to measure thermal bridges in external wall junctions in town houses which have been designed to meet the requirements of low-energy house. These houses are located in Oulu, Northern Finland. The object of the thesis was to study lineal additional conductance caused by thermal bridges in different Finnish frame solutions. The results obtained were compared to equivalent values found in The National Building Code of Finland.

The study included five different frame structure solutions. Three of those are timber frame houses, one log house and one concrete block house. The work is focused on measuring different kinds of external wall junctions in these buildings.

The study was carried out using The National Building Code of Finland section C4 in heat transfer coefficient calculations and calculation guide for lineal additional conductance published by Finland's Ministry of the Environment. The modeling and heat flux simulation were done with AutoCAD and COMSOL Multiphysics computer programs.

The values for additional conductance in Finnish building codes are in principle higher than the corresponding values of numerical calculation. This theory did not materialize in parts of the cases. For example, most of the calculation results made at concrete block house were over the Building Code values. However, the results were contrary when wooden houses were studied. Junctions between external wall and window frame were studied with a simplified and quicker calculation method at the expense of accuracy. However, this method made possible to study the effect on additional conductance value when the place of window frame in the wall is changed. The results show that in most of the cases the value of additional conductance decreased when the frame was moved at the right direction. The direction depended on the structure solution. For example, in a log house the best place for the frame seems to be as close as possible to the outer surface of the external wall.

Keywords: external wall, thermal bridge, low-energy house, Comsol, additional

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 LÄMMÖN JOHTUMINEN	9
2.1 Rakennuksen johtumislämpövähti	9
2.2 Viivamainen lisäkonduktanssi	11
3 VIIVAMAISEN LISÄKONDUKTANSSIN NUMEERINEN LASKENTA	13
3.1 Käytetyt ohjelmistot	14
3.1.1 AutoCAD	14
3.1.2 COMSOL Multiphysics	17
4 KOHTEIDEN MALLINTAMINEN	21
4.1 Rakennus A	22
4.1.1 Ulkoseinän nurkkaliitos	23
4.1.2 Ulkoseinän ja yläpohja liitos	25
4.1.3 Ulkoseinän ja välipohjan liitos	27
4.1.4 Ikkunaliitokset	29
4.2 Rakennus B	32
4.2.1 Ulkoseinän ulkonurkkaliitos	33
4.2.2 Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	34
4.2.3 Ulkoseinän ja välipohjan liitos	36
4.2.4 Ikkunaliitokset	37
4.3 Rakennus C	38
4.3.1 US1 + VP	39
4.3.2 US2 + VP	41
4.3.3 US2 + YP	42
4.3.4 Ulkoseinän nurkkaliitos	44
4.3.5 Ikkunaliitokset	46
4.4 Rakennus D	48
4.4.1 Ulkoseinän nurkkaliitos	48
4.4.2 Ulkoseinän yläpohjan liitos	50
4.4.3 Ulkoseinän ja välipohjan liitos	52

4.4.4 Ikkunaliitokset	53
4.5 Rakennus E	54
4.5.1 Ulkoseinän nurkkaliitos	55
4.5.2 Yläpohjaliitos	56
4.5.3 Ikkunaliitokset	58
5 TULOSSIEN VERTAILU	60
5.1 Rakennus A:n tulokset	61
5.2 Rakennus B:n tulokset	62
5.3 Rakennus C:n tulokset	63
5.4 Rakennus D:n tulokset	64
5.5 Rakennus E:n tulokset	65
6 POHDINTA	67
LÄHTEET	69
LIITTEET	70
Liite 1 U-ARVOLASKENTA	70
Liite 2 LISÄKONDUKTANSSILASKENTA	72

1 JOHDANTO

Rakennusten energiatehokkuusvaatimukset kasvavat vuosi vuodelta. Ulkokuoren ilmatiiveyttä on pyritty parantamaan lisäämällä eristemääriä ja parantamalla materiaaleja sekä rakennustekniikkaa. Näitä kehityssuuntia pyritään ohjaamaan muuttuvilla säännöksillä ja ohjeilla. Tästä osoituksena ovat muun muassa vuoden 2012 uudet versiot rakennusmääräyskokoelman osista D3, C4 ja D5. Epäsäännölliset kylmäsillat otetaan nyt myös mukaan rakennukset energiatehokkuuslaskuissa näiden päivitysten myötä. Kylmäsilloista aiheutuvan ylimääräisen johtumislämpöhäviön laskentaan on myös hiljattain julkaistu laskentaoppaan luonnosversio Ympäristöministeriön toimesta.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia uusien rakennusmääräysten mukaan rakennettujen matalaenergia- ja passiiviomakotitalojen ulkoseinien ja niihin liittyvien rakennusosien välisiä liitoksia ja niissä esiintyviä viivamaisia kylmäsilloja. Erityistä huomiota kiinnitettiin erilaisten rakenneratkaisujen tutkimiseen sekä vaihtoehtoisten laskentamenetelmien vertailuun.

Tarkastelu voidaan suorittaa käytännössä neljällä eri menetelmällä: numeerinen laskenta, tyyppirakenteille laskettujen arvojen käyttö, käsinlaskenta ja ohjearvotaulukot. Standardin SFS-EN ISO 14683 mukaan näistä numeerinen laskenta on tarkkuudeltaan paras ja ohjearvotaulukot huonoin. Tässä työssä laskenta tehdään numeerisesti käyttäen Ympäristöministeriön julkaisemaa Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopasta. Tarkoituksena oli verrata saatuja tuloksia tarjolla oleviin ohjearvotaulukoihin, joiden arvot rakenteiden välisille liitoksille ovat tarkoituksella määriteltä selvästi varmalle puolelle, eli yläkanttiin. Näin saatiin enemmän tietoa siitä, kuinka tarkkoja nämä ohjearvot oikeasti ovat ja kannattaako jatkossa rakennuksen energiatehokkuutta laskettaessa käyttää enemmän numeerista laskentaa.

Tarkasteluun otettiin oikeita rakennuskohteita Oulun Ritaharjun energiakorttelista. Kortteli ja tämä opinnäytetyö ovat osana kansainvälistä IEEB-hanketta, jossa Oulun seudun ammattikorkeakoulu on tiiviisti mukana. IEEB-

hankkeen tarkoituksena on muodostaa pohjoismainen verkosto korkeakoulujen, tutkimuslaitosten, yritysten ja yhteiskunnan välille. Verkoston tavoitteena on kehittää ja jakaa uusia suunnittelu- ja rakennusmenetelmiä, jotka parantavat rakennusten energiatehokkuutta ja edistävät kestävästä kehitystä.

2 LÄMMÖN JOHTUMINEN

Johtumisessa lämpö siirtyy liike-energiana molekyylistä toiseen. Kiinteässä aineessa tämä liike-energia on molekyylien värähtelyä. Energia siirtyy nopeammin värähtelevistä hitaampiin molekyylien välisten voimien ja törmäysten välityksellä. Lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan ja tasoittumisnopeus on verrannollinen rakenteen pintojen väliseen lämpötilaeroon. (3, s. 42.)

Tasoittumisnopeus stationäärisessä eli ajasta riippumattomassa tilassa voidaan laskea kaavasta 1.

$$q_s = -\lambda * \Delta T / \Delta x \quad \text{KAAVA 1}$$

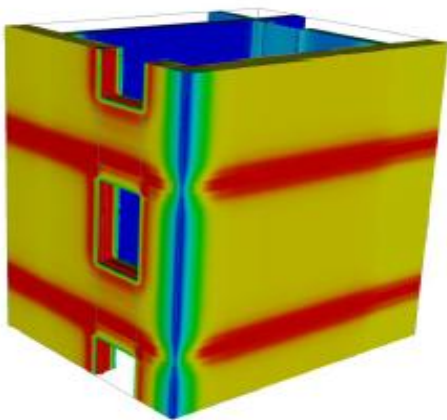
$$q_s \quad = \text{Lämpövirran tiheys suuntaan } s, \quad [W/m^2]$$

$$\lambda \quad = \text{Lämmönjohtavuus} \quad [W/Km]$$

$$\Delta T / \Delta x \quad = \text{Lämpötilaero matkalla } \Delta x \quad [K/m]$$

2.1 Rakennuksen johtumislämpöhäviö

Rakennuksen johtumislämpöhäviö on periaatteessa mahdollista määrittää kolmiulotteisella laskentamallilla. Näin ollen kylmäsiltoja ei tarvitsisi erikseen ottaa huomioon. (Kuva 1.)



KUVA 1. Esimerkki rakennuksen kolmiulotteisesta laskentakentästä (1, s. 7)

Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole järkevä menettelytapa. Sen sijaan rakennusta tulisi tarkastella erillisinä rakennusosina, joita ovat esimerkiksi ikkunat, ovet ja yläpohjat. Kaikille näille osille määritellään lämmönläpäisykerroin eli U-arvo rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan. (1, s. 7.)

Rakennusosien U-arvojen laskennassa tai mittauksessa ei tässä vaiheessa oteta huomioon, miten ne liittyvät muihin rakennusosiin. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennusosien reunoille oletetaan adiabaattireunaehto eli täydellinen lämmöneristys. Tämän oletuksen luoma epätarkkuus laskussa korjataan laskemalla koko rakennuksen tai huonetilan johtumislämpöhäviö käyttäen rakennusmääräyskokoelman osan D5 kaavaa. Korjaus suoritetaan lisäämällä johtumislämpöhäviön vanhaan kaavaan viivamainen ja pistemäinen lisäkonduktanssivaikutus. (Kaava 2.)

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

KAAVA 2

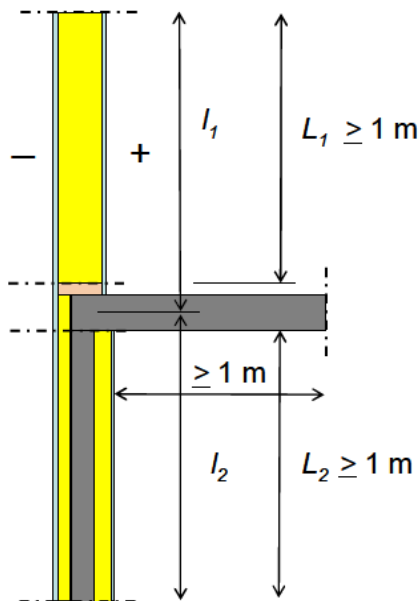
H_{joht}	= rakennusosien ja niiden liitosten yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö	[W/K]
U	= rakennusosan lämmönläpäisykerroin	[W/m ² K]
A	= rakennusosan pinta-ala	[m ²]
Ψ_k	= kahden rakennusosan välisen liitoksen k viivamainen lisäkonduktanssi	[W/(mK)]
l_k	= kahden rakennusosan välisen liitoksen k pituus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

Kaavan lisäkonduktanssitermit Ψ_k ja X_j käsittelevät siis nimenomaan rakenteen epäsäännöllisiä kylmäsiltoja eivätkä niinkään säännöllisiä kylmäsiltoja. Säännölliset kylmäsilat, kuten koolaukset, runkotolpat ja välipohjapalkit, on jo otettu huomioon laskettaessa rakententeiden lämmönläpäisykertoimia. (1, s. 8.)

2.2 Viivamainen lisäkonduktanssi

Kylmäsilalla tarkoitetaan rakenteessa olevaa ainekerrosta, joka on viereiseen ainekerrokseen verrattuna hyvin lämpöä johtava. Lämpötilaeron vaikutuksesta johtuen kylmäsiltaarakenteen pintojen läpi kulkeva lämpövirta on tiheydeltään jatkuvuustilassa viereistä aluetta suurempi. Viivamaisella kylmäsilalla tarkoitetaan rakennetta, jonka poikkileikkaus on jatkuvana samanlainen rakenteen pinnan suunnassa. (2, s. 3.)

Viivamaisen kylmäsilan, kuten esimerkiksi ikkunan ylityspalkin aiheuttamaa lisäystä rakenteen läpi kulkevaan lämpövirtaan kutsutaan viivamaiseksi lisäkonduktanssiksi (2, s. 3). Esimerkissä viivamainen kylmäsilta muodostuu kahden seinän ja välipohjan väliseen liitokseen. Tarkastelugeometriaan otetaan seiiniä ja välipohjaa riittävä määrä, jotta liitoksen vaikutus ei näy rakenteen lämpötiloissa. (Kuva 2.)



KUVA 2. Esimerkki seinien ja välipohjan liitokseen syntyvästä kylmäsilasta (1. s. 8)

Kuvan 2 mukaisen esimerkkiliitoksen johtumislämpöhäviö laskentayhtälö saadaan johtamalla kaavasta 2, mikä on esitetty kaavassa 3.

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

KAAVA 3

H_{joht} = rakennusosien 1 ja 2 ja niiden liitoksen yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö [W/K]

Ψ = seinien 1 ja 2 välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi [W/(mK)]

l = seinien 1 ja 2 välisen liitoksen pituus (kohtisuoraan kuvatasoa vastaan) [m]

U_1 = seinän 1 lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]

A_1 = rakennusosan 1 pinta-ala [m²]

U_2 = seinän 2 lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]

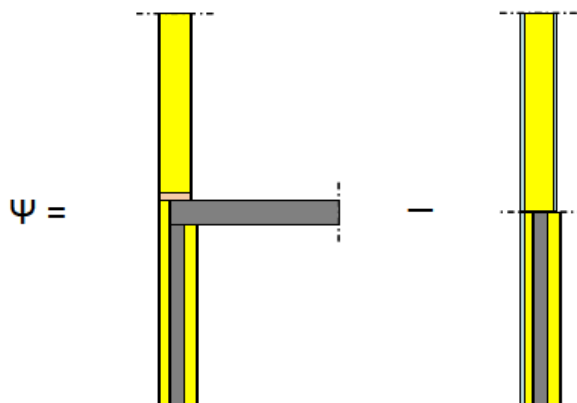
A_2 = rakennusosan 2 pinta-ala [m²]

Kun viivamainen lisäkonduktanssi Ψ ratkaistaan yhtälöstä, saadaan kaava 4. (1, s. 9.)

$$\Psi = \frac{H_{joht}}{l} - U_1 l_1 - U_2 l_2$$

KAAVA 4

Viivamainen lisäkonduktanssi on siis todellisen johtumislämpöhäviön ja lämmönläpäisekertoimien avulla lasketun lämpövirran välinen erotus. Tämä käy myös ilmi alla olevasta havainnollistavasta kuvasta. (Kuva 3.)



KUVA 3. Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ kuvallinen laskentaperiaate, jossa pistekatkoviivoilla merkityillä rajapinnoilla lämpövirta oletetaan nolaksi (1, s. 9)

3 VIIVAMAISEN LISÄKONDUKTANSSIN NUMEERINEN LASKENTA

Tarkasteltaessa kaksi- tai kolmiulotteisen geometrian lämmön johtumista päädytään yleensä differentiaaliyhtälöön, jonka ratkaisemiseen tarvitaan numeerista menetelmää. Laskenta-alue jaetaan riittävän moneen laskentaelementtiin, joista ratkaistaan lämpötilojen yhtälöryhmät. Laskenta lähenee sitä mukaa differentiaaliyhtälön tarkkaa ratkaisua, mitä tiukempaa laskentaverkkoa laskussa käytetään. Laskentaverkko on tarpeeksi tiheä silloin, kun verkon tihennys ei aiheuta muutoksia laskenta-alueen lämpövirrassa. Laskenta-alueen rajoilla käytetään tarkoituksenmukaisia reunaehtoja, kuten pintavastuksia (taulukko 1) ja adiabaattia. (1, s. 12.)

TAULUKKO 1. Pintavastukset lämpövirran suunnan mukaan (1, s. 15)

Pintavastus m ² K/W	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuuntaan	Alaspäin
Sisäpinta R _{si}	0,10	0,13	0,17
Ulkopinta R _{se}	0,04	0,04	0,04

Viivamainen lisäkonduktanssin laskentakaava (kaava 5) on standardin SFS-EN ISO 10211 mukaan seuraavassa muodossa:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad \text{KAAVA 5.}$$

L_{2D} = kaksiulotteisella laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekniinen kytkentäkerroin laskettavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille

[W/(mK)]

U_j = liittyvän rakenneosan j lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]

l_j = mallissa kuvatun rakenneosan j pituus [m]

Kaavasta 5 saatavaa lisäkonduktanssin arvoa Ψ käyttämällä saadaan oikea rakennuksen johtumislämpöhäviö kaavasta 2 (s. 10).

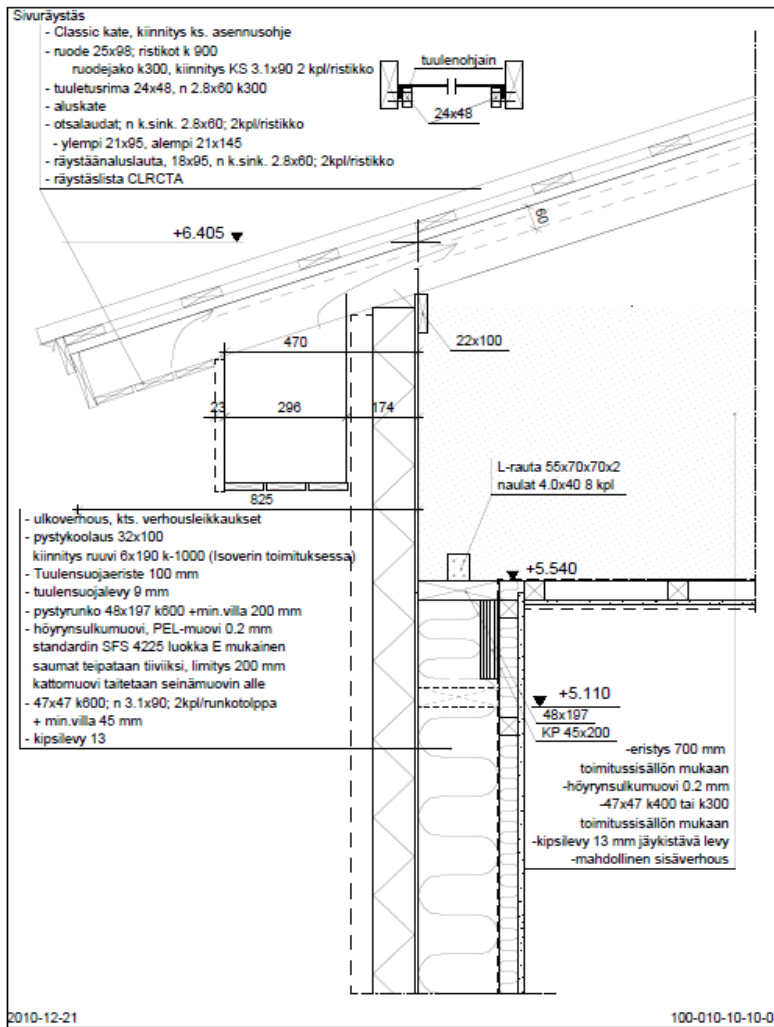
3.1 Käytetyt ohjelmistot

Kylmäsiltojen laskentaa varten löytyy paljon vaihtoehtoisia ohjelmia. Ominaisuudet ja luotettavuus kulkevat yleensä käsi kädessä ohjelman lisenssihinnan kanssa. Osa ohjelmista laskee lisäkonduktanssin ψ suoraan. Joitain perusohjelmia on tarjolla osin tai kokonaan ilmaiseksi. Yksi keino varmistua ohjelmien pätevyydestä on eri standardien mukaisten validointien tarkistaminen. Esimerkkinä on standardi EN ISO 10211, jossa ohjelmalla suoritetaan neljä laskuesimerkkiä. (1, s. 13.)

3.1.1 AutoCAD

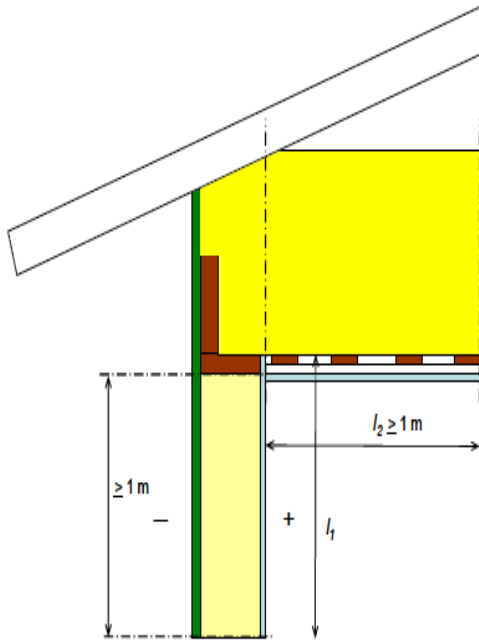
Tässä työssä liitosrakenteiden mallintaminen on tehty AutoCad-ohjelmalla. Talovalmistajien detaljikuvista muokataan ohjelmaa käyttäen tarkoituksenmukaisia lämpövirtauksen simulointia varten. Detaljikuvista poistetaan kaikki piirustusmerkinnät, pistemäiset kylmäsilat ja ne rakenneosat, joilla ei ole merkittävää vaikutusta rakenteen lämpökäyttäytymiseen.

Liitostyyppejä on monenlaisia, mutta mallinnus- ja laskentaperiaatteet ovat kaikilla suurin piirtein samat. Alla on esimerkkinä rakennus A:n yläpohjan ja ulkoseinän liitoskuva (kuva 4).



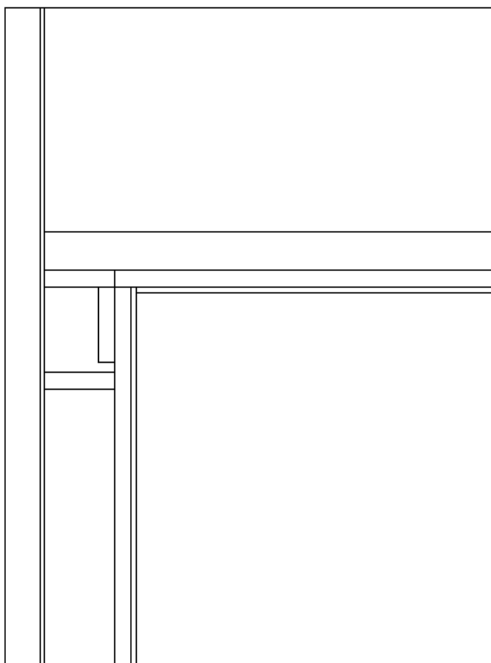
KUVA 4. Rakennus A:n yläpohjan ja ulkoseinän liitosdetaljokuva

Kuvassa 5 on esitetty periaatteet liitosdetaljokuvan muokkaamista varten. Seinän ja yläpohjan U-arvot lasketaan pistekatkoviivojen rajaamien rakenteiden perusteella (1, s. 23).



KUVA 5. Yläpohjan ja ulkoseinän välisen liitoksen muokkausperiaatekuva (1, s. 23)

Alla olevassa kuvassa 6 on esitetty kuvan 4 mukaisesta rakenteesta muokattu laskentamalli, joka on riisuttu ja rajattu standardin SFS-EN 10211 mukaan.



KUVA 6. Rakennus A:n muokattu yläpohjan ja seinän liitoskuva, valmiina lämpövirtaussimulointiin

Muokkauksen jälkeen rakennekuva tallennetaan AutoCAD-ohjelmalla niin sanotuksi "blockiksi" (pikanäppäin: w + enter), joka siirretään COMSOL Multiphysics -ohjelmaan lämpövirtasimulointia varten.

3.1.2 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics on Matlab-ympäristöön kehitetty elementtimenetelmään (FEM) perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) numeeriseen ratkaisuun tarkoitettu ohjelma. Ohjelmalla voidaan mallintaa monia erilaisia fysikaalisia ilmiöitä. Tämä ohjelma ei laske suoraan lisäkonduktanssin arvoa ψ , vaan antaa kaavassa 5 (s. 13) esiintyvän lämpöteknisen kytkentäkertoimen L_{2D} :n. Tätä arvoa käyttämällä voidaan kaavasta 5 ratkaista lisäkonduktanssin arvo ψ .

Laskenta suoritetaan stationääritilassa. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan, eivätkä muutu ajan kuluessa. Ulko- ja sisäilman lämpötilaeroksi määritellään yksi celsiusaste. Laskennan parametrit määritellään ohjelmaan, kuten kuvassa 7 on esitetty.

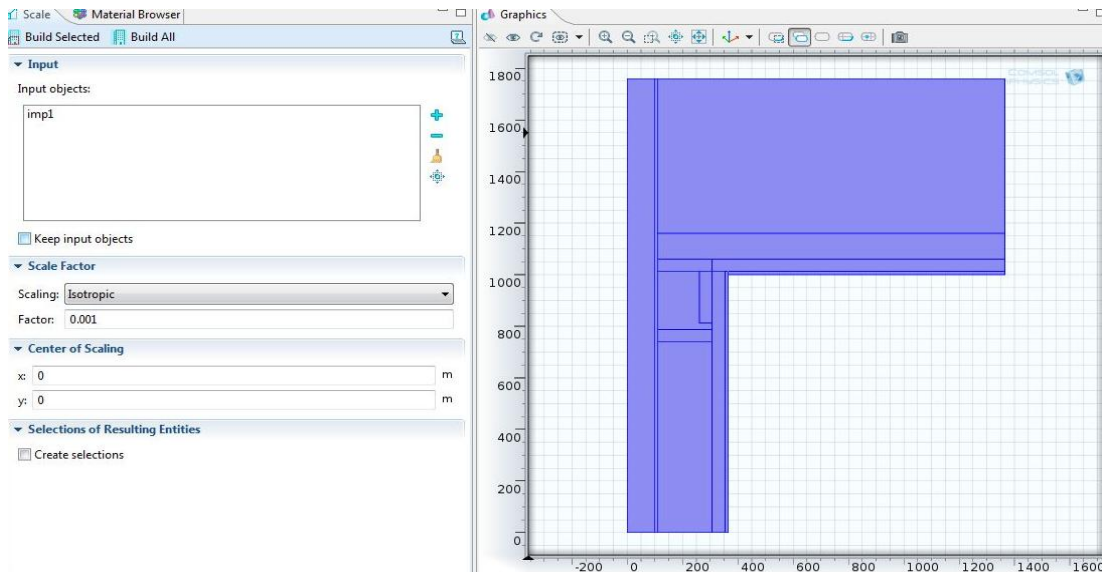
Name	Expression	Value	Description
alpha_out	1/0.04	25.000	Pintavastus_vaaka_ulkopinta
alpha_in	1/0.13	7.6923	Pintavastus_vaaka_sisäpinta
alpha_roof_out	1/0.04	25.000	Pintavastus_ylös_ulkopinta
alpha_roof_in	1/0.10	10.000	Pintavastus_ylös_sisäpinta
alpha_floor_out	1/0.17	5.8824	Pintavastus_alas_ulkopinta
alpha_floor_in	1/0.04	25.000	Pintavastus_alas_sisäpinta
T_out	0[degC]	273.15...	Ulkolämpötila
T_in	1[degC]	274.15...	Sisälämpötila
T_init	0[degC]	273.15...	Alkulämpötila

Name: T_init
 Expression: 0[degC]
 Description: Alkulämpötila

KUVA 7. Parametrit eli lähtötiedot laskentaan määritellään käsin

AutoCadilla luotu blocki tuodaan ohjelmaan Import-käskyllä. Kuva tulee ensimmäisenä skaalata (scale) tuhannesosaan, kuten kuvan 8 esimerkissä on

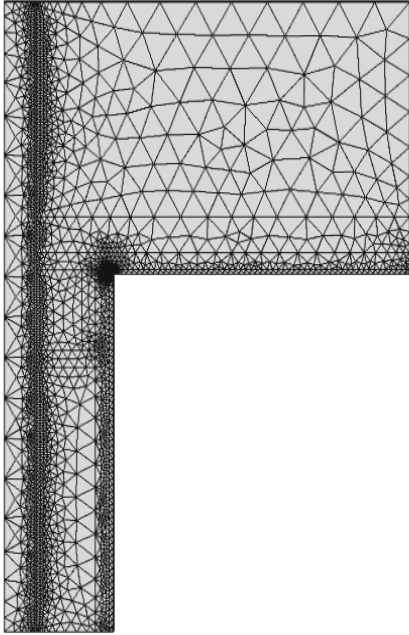
tehty, jotta mallista tulee oikean kokoinen. Tämä johtuu ohjelmien välisistä mittakaavaeroista.



KUVA 8. Laskentamallin koko tulee skaalata tuhannesosaan (Factor: 0,001)

Rakennusmateriaalikerroksien lämmönjohtavuudet määritellään standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisesti tai rakennusmääräyskokoelman osan C4 taulukoituja lämmönjohtavuuksien suunniteluarvoja käyttäen (1, s. 15). On syytä korostaa, että vaikka laskentamallista onkin ”siivottu” kaikki koolaukset ja runkotolpat, niin tulee ne silti ottaa huomioon sen kohdan lämmönjohtavuuteen. Tässä käytetään rakennusmääräyskokoelman osan C4 epätasa-aineisen ainekerroksen lämmönvastuksen laskentaopasta. (2, s. 5.)

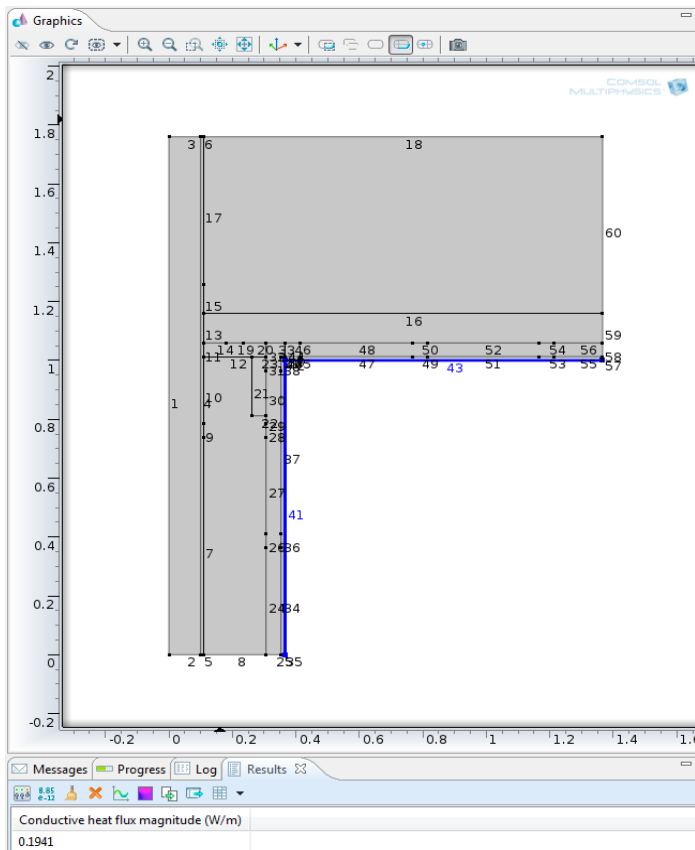
Mallille määritellään ohjelman avulla laskentaverkko. On tärkeää, että verkko määritellään riittävän tiheäksi. Vääränlainen verkko voi aiheuttaa laskennallisia epätarkkuuksia mallissa. Alla olevassa kuvassa 9 on esimerkki laskentaverkosta.



KUVA 9. Laskentaverkon tiheydellä määritellään ohjelman laskentatarkkuus rakenteessa

Kun laskentaverkko on säädetty riittävän tiheäksi, voidaan simulointi suorittaa ohjelmalla. Laskenta valmistuu yleensä muutamassa sekunnissa ja näytölle ilmestyy lämpötilajakaumaa esittävä versio laskentamallista.

L_{2D} -arvo saadaan ohjelmasta, kun käytetään Results-valikon Line Integration -työkalua. Työkalulla voidaan määrittää lämpövirtaus rakenteen läpi määritellyillä olosuhteilla. Laskentapinnaksi määritellään laskentamallin sisäpinnat, kuten alla olevassa kuvassa 10 on esitetty.



KUVA 10. Laskentapinta määritellään mallin sisäpintaan ja alanurkassa näkyy ohjelman laskema lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} (0,1942 W/mK)

4 KOHTEIDEN MALLINTAMINEN

Tässä työssä tarkasteltiin viiden omakotitalon ulkoseinärakenteita.

Mallintaminen on käyty läpi rakennuskohde kerrallaan aloittaen rakennus A:sta. Rakennukset A, B, C ja D ovat niin sanottuja matalaenergiataloja, eli niiden lämmitykseen käytetään normaalia vähemmän energiaa. Rakennukset sijaitsevat Oulun Ritaharjussa, ja ne ovat kaikki rakennettu viimeisen kahden vuoden sisällä.

Näiden lisäksi tässä työssä tarkasteltiin myös yhtä passiivitaloprojektia.

Rakennus oli vielä tämän työn tekohetkellä suunnitteluvaiheessa, joten tässä työssä käytettyihin rakenteisiin on voinut tulla muutoksia myöhemmin. Talo on tarkoitettu rakentaa samalle Ritaharjun energiakorttelille, kun suunnitelmat saadaan päätökseen.

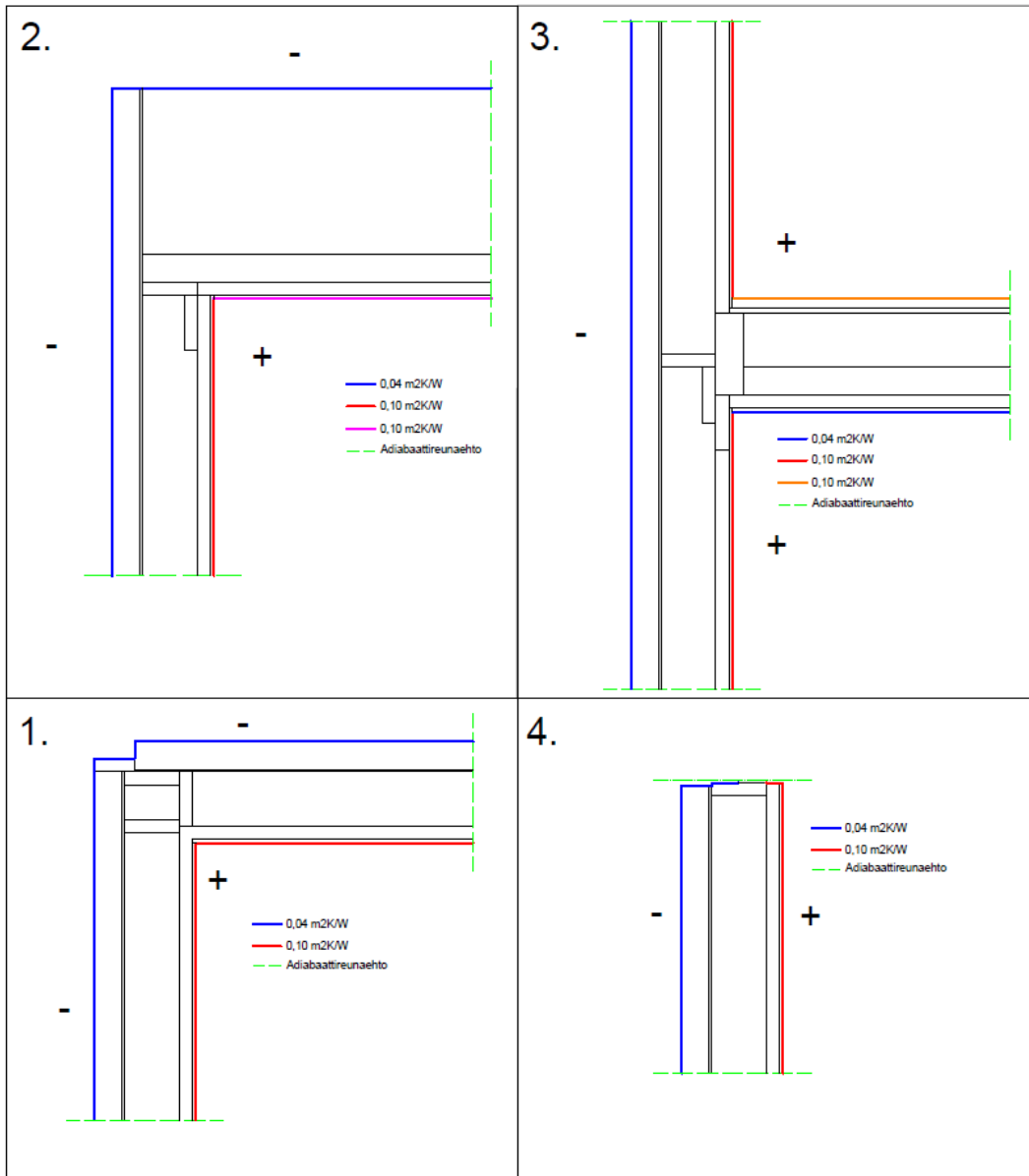
Mallintaminen on suoritettu käyttäen Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopasta. Tässä työssä tarkasteltiin pääasiassa seuraavia liitostyyppiejä:

1. ulkoseinän nurkkaliitos
2. ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos
3. ulkoseinän ja välipohjan välinen liitos
4. ulkoseinän ja ikkunan välinen liitos (yksinkertaistettu laskentamenetelmä).

Liitostyyppien laskentamallit on rajattu Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaasta löytyvien ohjeiden ja periaatekuvien mukaan (1, s. 31 - 102).

Tässä työssä tehdyissä laskuissa käytettiin kuvan 11 mukaisia reunaehtoja eri liitostyypeille. Liitostyyppit on numeroitu yllä olevan listan mukaan.

Pintavastukset ovat taulukon 1 (s. 13) mukaisia.



KUVA 11. Liitostyypeissä käytettävät reunaehdot ja pintavastukset. Sisäpuolen (+) lämpötilaksi määritellään 1 °C ja ulkopuolelle (-) 0 °C

Jos kuvassa 11 esitetyistä reunaehdoista tai/ja pintavastuksista poiketaan, siitä mainitaan tapauskohtaisesti.

4.1 Rakennus A

Rakennus A on lähtökohtaisesti perinteinen kaksikerroksinen puurunkotalo. Vaippaa on eristetty normaalia paksummin, jotta talo on saatu matalaenergiatasolle. Runkovälin eristäminen on tehty mineraalivillalla. Taulukossa 2 on eritelty rakennus A:n ulkoseinän lämmönläpäisykerroimen eli

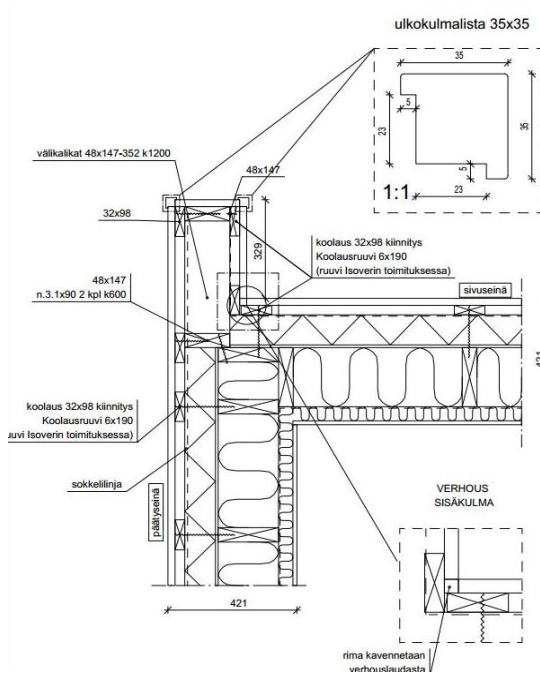
U-arvon muodostuminen. Tarkemmat tiedot U-arvolaskennasta kaikkien rakenteiden osalta löytyvät liitteestä 1.

TAULUKKO 2. Ulkoseinän (US1) rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

Rakennekerros	Kerros­paksuus [m]	Lämmön­johtavuus λ_0 [W/mK]	Lämmön­vastus R [(m ² K)/W]
Ulkopintavastus			0,0400
Tuulensuoja Isover RKL-31 Facade	0,100	0,0310	3,2258
Kipsilevy	0,009	0,2100	0,0429
Puurunko 48x197 mm k600 + Mineraalivilla Isover KL-33	0,197	0,12 + 0,033 = 0,03996	4,9299
Vaakakoolaus 47x47 mm k600 + Mineraalivilla Isover KL-33	0,047	0,12 + 0,033	1,1805
Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
Sisäpintavastus			0,1300
ΣR			9,6110
U-arvo [W/m ² K]			0,1040

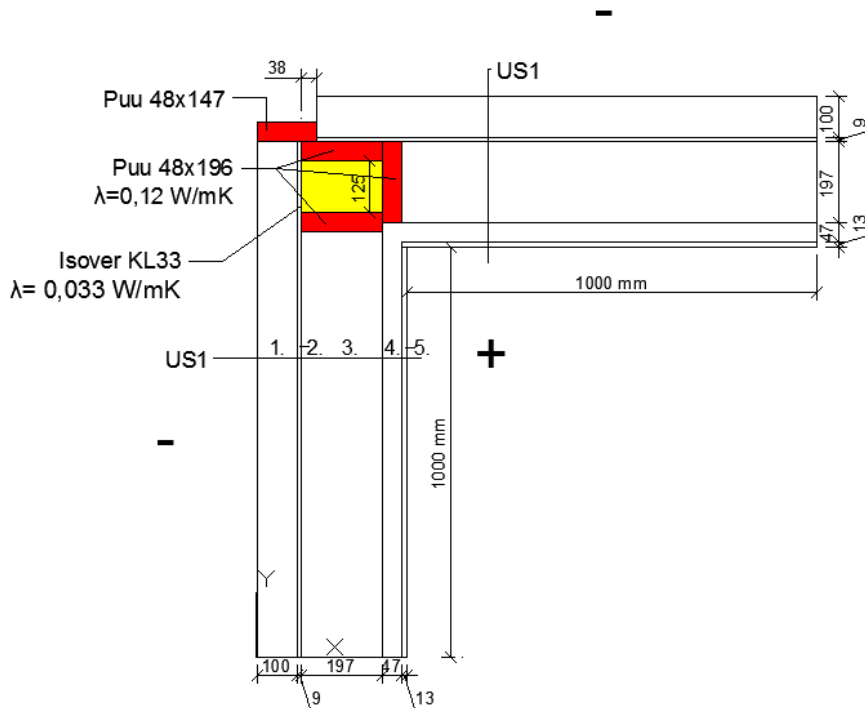
4.1.1 Ulkoseinän nurkkaliitos

Mallintaminen aloitettiin kuvan 12 rakennekuvan muokkaamisella simulointia varten.



KUVA 12. Talon A nurkkaliitodetalji

Ulkoverhouslauta jätetään mallista pois, koska sen takana on hyvin tuulettuva ilmarako. Samasta syystä pois jää myös ulkonurkassa oleva suorakaiteen muotoinen rännikotelo. Laskentamalliin otetaan yleensä vähintään 1 metri liittyvistä seinärakenteista. Päähuomio on tietenkin itse nurkkaliitoksessa ja sen rakenteissa. Yksityiskohdat tulee ottaa mahdollisimman tarkasti huomioon liitoksessa ja sen läheisyydessä (1, s. 29). Valmis laskentamalli on esitetty alla olevassa kuvassa 13.



KUVA 13. Yksinkertaistettu laskentamalli nurkkaliitoksesta

Muokkauksen jälkeen laskentamalli tuotiin Comsol-ohjelmaan. Laskentaa varten määriteltiin ohjelmaan kuvan 7 (s. 17) mukaiset parametrit. Seinän rakennekerroksille määriteltiin taulukon 2 mukaiset lämmönjohtavuuden arvot, jotta U-arvo pysyisi samana. Lopuksi määritellään vielä laskentaverkko malliin ja ajetaan ohjelma.

Lämpötekniiseksi kytkentäkertoimeksi saadaan $L_{2D} = 0,24332 \text{ W}/(\text{mK})$.

Liitoksen aiheuttama lisäkonduktanssi Ψ saadaan vähentämällä yllä olevasta todellisesta lämpövirran arvosta pelkillä seinän U-arvoilla laskettu lämpövirta, kuten kaavassa 5 (s. 13).

$$\Psi = 0,24332 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1 \text{ m}) = \mathbf{0,03532 \text{ W/(mK)}}.$$

Kaikki laskentatulokset on avattu tarkemmin liitteessä 2.

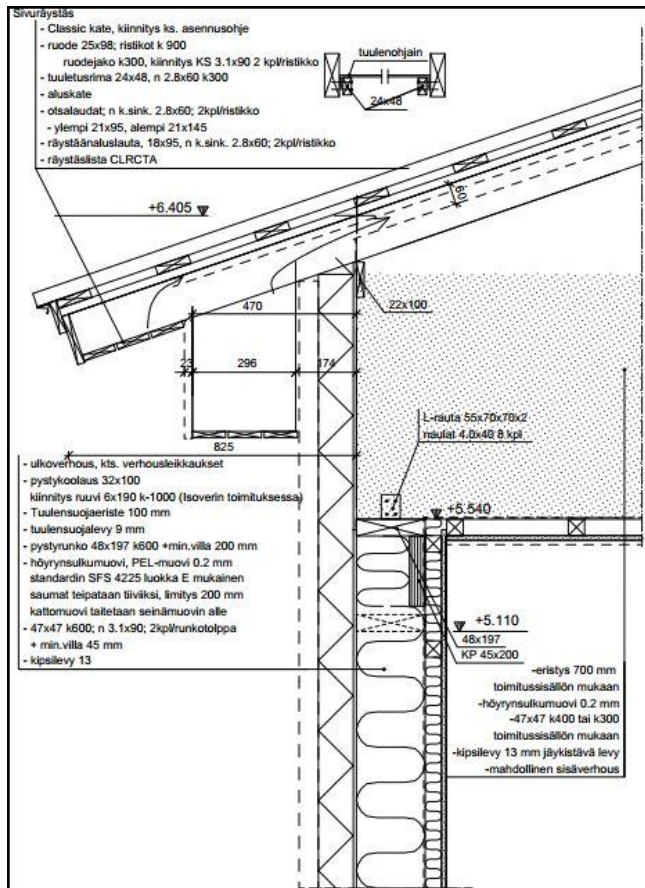
4.1.2 Ulkoseinän ja yläpohja liitos

Kuten ulkoseinäkin, myös yläpohjan kantavat rakenteet ovat puurakenteisia. Vesikaton kannatus on tehty perinteisellä puuristikolla. Yläpohjan eristäminen on tehty mineraalivillalevyillä ja puhalluseristeellä, joita on yhteensä 700 mm:n paksuinen kerros. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty yläpohjan lämmönläpäisykerroimen eli U-arvon muodostuminen. Tiedot on saatu materiaalien valmistajilta tai Rakennusmääräyskokoelman osasta C4 (2, s. 10 - 17). Lämpövirtausta tapahtuu ylöspäin, minkä mukaan määritellään pintavastukset. Seinän U-arvo on sama kuin edellisessä laskussa.

TAULUKKO 3. Yläpohjan (YP1) rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

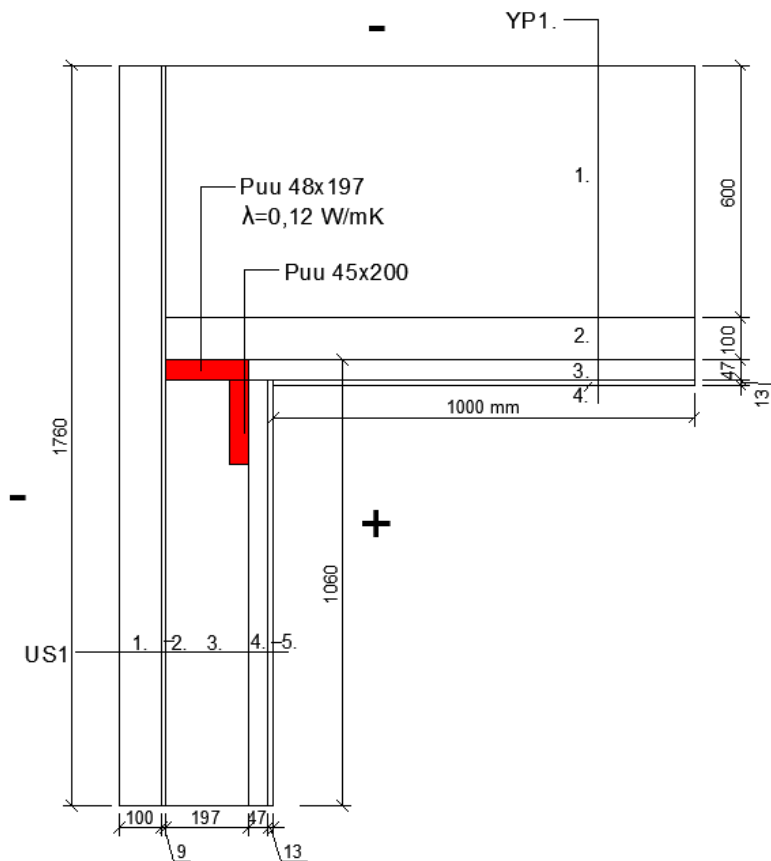
Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
Ulkopintavastus			0,0400
Katon ilmatilan lämmönvastus R_u			0,2000
Puhallusvilla, Ekovilla	0,600	0,0390	15,3846
Mineraalivilla, ISOVER KL-33 + Puuristikon alapaarre 125x50 mm	0,100	0,033 + 0,12 = 0,0378	2,6455
Tuulettumaton ilmarako + Koolaus 47x47 mm k400	0,047	0,294 + 0,12 = 0,274	0,1715
Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
Sisäpintavastus			0,1000
ΣR			18,6035
U-arvo [W/m²K]			0,0538

Mallintaminen aloitetaan kuten äskeisessä tapauksessa. Talovalmistajalta saadusta kuvan 14 detaljikuvasta muokataan ohjeiden mukainen laskentamalli.



KUVA 14. Talon A puurunkoisen seinän ja yläpohjan liitosdetalji

Vesikatto-osa ja seinän pintarakenteet jäävät pois laskentamallista, koska niiden alla on hyvin tuulettuva ilmarako. Vesikaton ja yläpohjan väliin jäävä ilmatila katsotaan termisesti homogeeniseksi kerrokseksi, jolla on lämmönvastus (2, s. 17). Tämän lämmönvastuksen arvon voi lisätä Comsol-ohjelmalla laskettaessa esimerkiksi ulkopintavastuksen parametriin. Valmis laskentamalli on esitetty kuvassa 15.



KUVA 15. Valmis laskentamalli

Rakenne on laskettu kaksiulotteisena, joten naularistikon vaikutus, alapaarretta lukuun ottamatta, liitoksen lämpövirtaan jää huomiotta. Tästä johtuen laskennasta saatu lisäkonduktanssi on hieman todellisuutta pienempi. Kun laskentamalli parametreineen on syötetty Comsol-ohjelmaan, saadaan lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi seuraava tulos: $L_{2D} = 0,1941 \text{ W/mK}$.

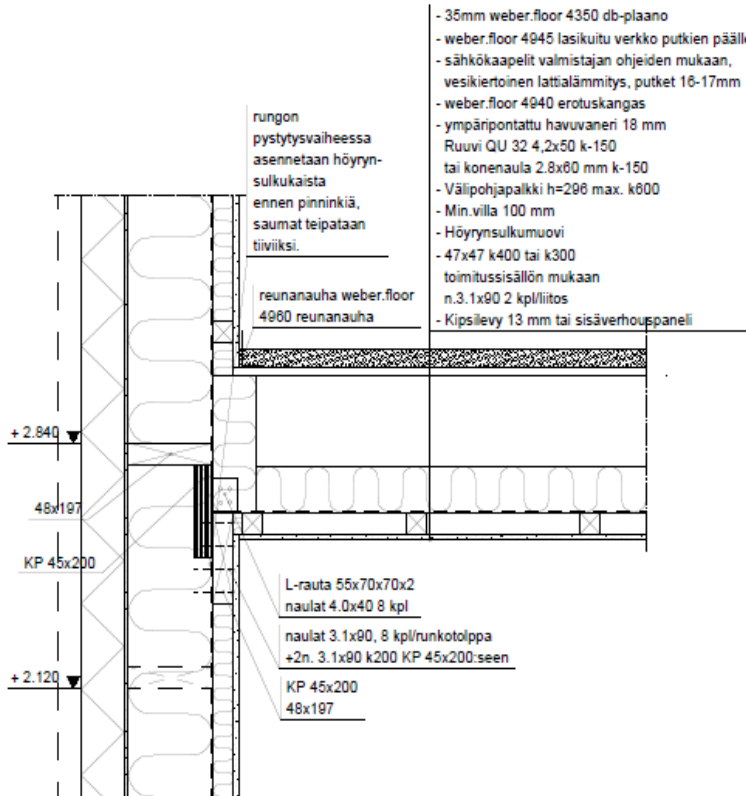
Lähtöarvot sijoitetaan kaavaan 5 (s. 13), jolloin saadaan rakennus A:n yläpohjaliitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi Ψ .

$$\Psi = 0,1941 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,06 \text{ m} - 0,0538 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m} \\ = \mathbf{0,02986 \text{ W/mK}}$$

4.1.3 Ulkoseinän ja välipohjan liitos

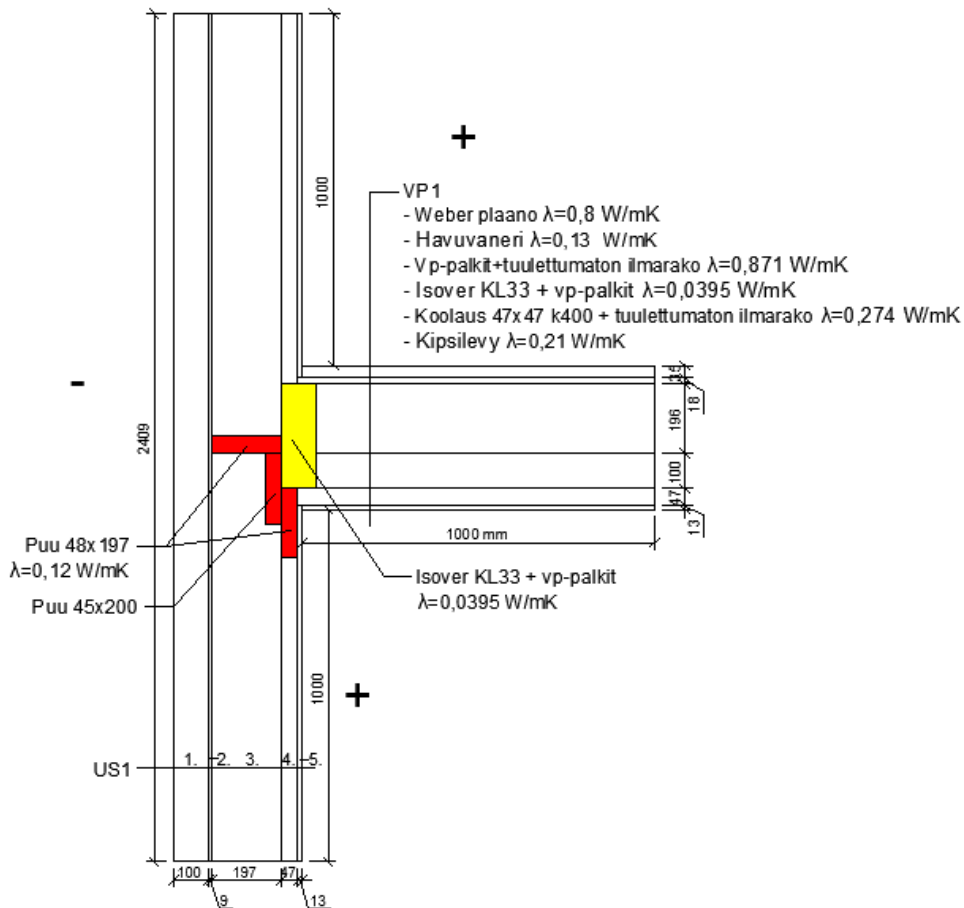
Välipohja rakentuu 296 mm korkeista kertopuupalkeista. Liitos mallinnetaan kaksiulotteisena, kuten muutkin edellä lasketut tapaukset. Tämä tarkoittaa sitä, että laskuista saatava lisäkonduktanssi on hieman todellisuutta pienempi.

Välipohjapalkkien vaikutus voidaan olettaa pieniksi Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa tehdyn esimerkkilaskun perusteella. Esimerkki osoittaa, että valta osa syntyneestä lisäkonduktanssista aiheutuu liitoksissa olevista rakenteista ja vain pieni osa palkkien vaikutuksesta. (1, s. 47 - 51.) Rakennuksen A:n välipohjan ja ulkoseinän välinen liitos on alla olevan kuvan 16 mukainen.



KUVA 16. Rakennus A:n ulkoseinän ja välipohjan välinen liitos

Ulkoseinän rakenne pysyy edelleen samana. Yllä olevasta kuvasta 16 mallinnetaan tutuiksi tulluilla periaatteilla laskentamalli, joka näkyy alla olevassa kuvassa 17.



KUVA 17. Yksinkertaistettu laskentamalli välipohjaliitoksesta

Laskennassa oletetaan pintavastuksien osalta, että lämpövirran suunta välipohjassa on alaspäin. Välipohjan erottamille sisätiloille määritellään kuitenkin sama lämpötila (1 °C), joten lämpövirtausta tapahtuu vain sisältä ulos. Näin saadaan laskennan päähuomio pidettyä liitoksessa tapahtuvassa lämpövirtauksessa.

Laskennan tuloksena saadaan liitoksen väliseksi todelliseksi lämpövirtauksen arvoksi yhden asteen lämpötilaerolla 0,25896 W/mK. Tästä arvosta vähennetään ulkoseinän osuus lämpövirrasta.

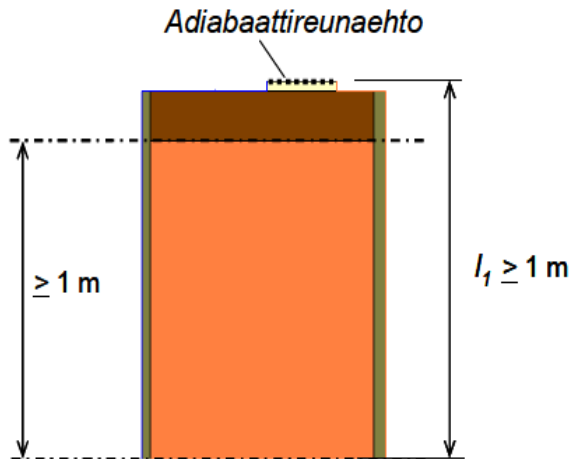
$$\Psi = 0,2590 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,4090 \text{ m} = \mathbf{0,0084 \text{ W/mK}}$$

4.1.4 Ikkunaliitokset

Ikkunaliitosten kylmäsiltilaskentaa voi tehdä kahdella eri tavalla.

Ensimmäisessä tapauksessa U-arvot ja lämpövirtaus lasketaan seinän ja

ikkunan muodostamasta laskenta-alueesta. Tämä laskentamenetelmä on erittäin työläs, sillä ikkunoiden U-arvon laskenta on melko haastavaa ja aikaa vievää. Menetelmää kannattaa käyttää silloin, kun ikkunoiden U-arvoja muutenkin lasketaan. Laskennan nopeuttamiseksi voidaan ikkuna jättää kokonaan pois laskenta-alueesta ja asettaa karmin paikalle adiabaattireunaehto, eli täydellinen lämmöneristys. (Kuva 18.)



KUVA 18. Laskennan yksinkertaistamiseksi ikkuna korvataan adiabaattireunaehdolla (1, s. 28)

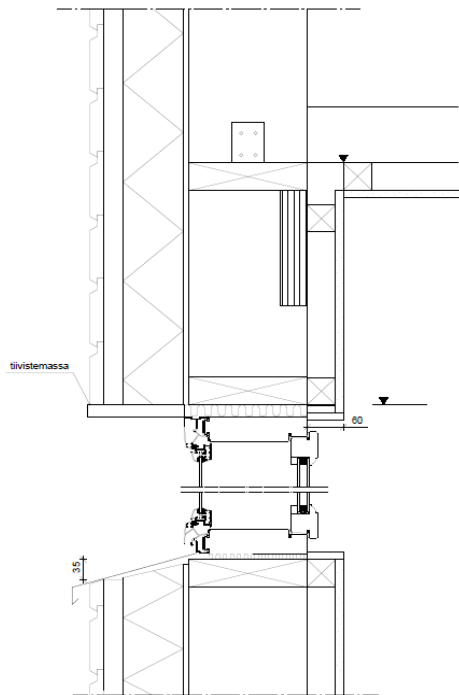
Menetelmää voidaan käyttää silloin, kun ikkuna on kiinnitetty apukarmiin tai massiiviseen seinään. Laskennassa käytetään laskennallista karmisyvyttä, eli karmia kavennetaan ulkopuolelta alla olevan taulukon 4 mukaisesti. Tässä työssä on käytetty yksinkertaistettua menetelmää kaikissa ikkunaliitoslaskuissa.

TAULUKKO 4. Laskennallisen karmisyvyys eri ikkunatyypeille käytettäessä adiabaattireunaehto (1, s. 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

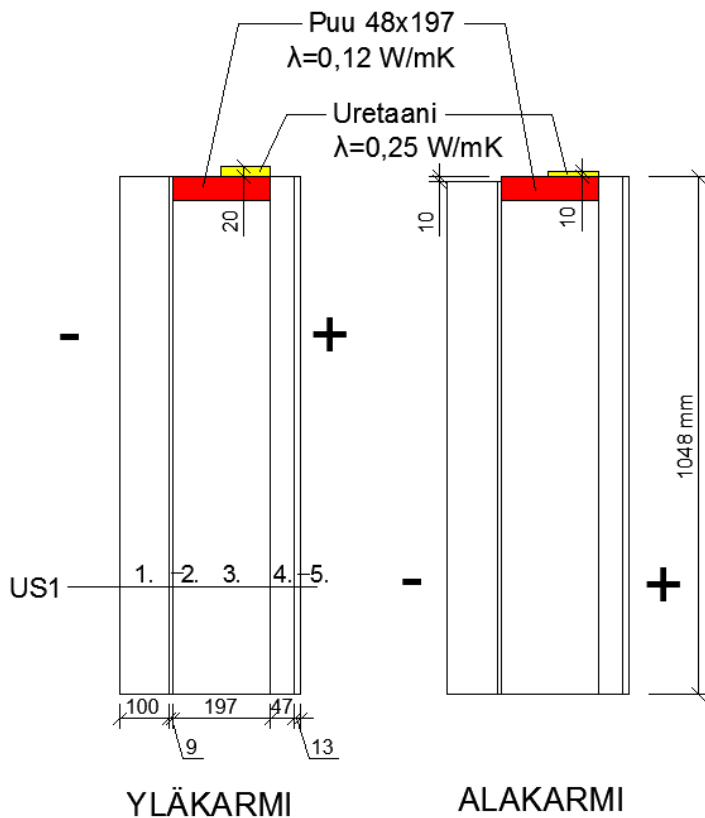
Rakennus A:n ikkunat on kiinnitetty puiseen apukarmiin, joten adiabaattireunaehdon pitäisi soveltua käytettäväksi tässä tapauksessa. Rakennus A:ssa käytetty ikkunatyyppe on MSE, eli ikkuna aukeaa sisäänpäin ja

sen leikkausprofiilissa on kaksi puitetta ja kolme lasia. Ikkunan karmisyvyys on 170 mm ja sen liitosdetalji näkyy kuvassa 19.



KUVA 19. Rakennus A:n ikkunaliitosdetalji

Karmisyvyys kerrotaan taulukon 4 mukaan luvulla 0,6, jolloin saadaan laskennalliseksi karmisyvyudeksi 102 mm. Seinärakenne on sama kuin edellisissä rakennus A:n laskuissa. Puisen apukarmin lämmönjohtavuus on C4:n mukaan 0,12 W/mK ja karmiraossa olevan uretaanin 0,25 W/mK. Alakarmin laskentamalli on esitetty alla olevassa kuvassa 20.



KUVA 20. Ikkunan laskentamalli

Laskentaan tulee ottaa vähintään 1 m seinärakennetta. Comsol-ohjelmalla laskettu lämpövirta on 0,16324 W/mK ja lisäkonduktanssin arvo Ψ on laskettu alla molemmista karmeista.

Alakarmi:

$$\Psi = 0,1632 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0580 \text{ m} = 0,0532 \text{ W/mK}$$

Yläkarmi:

$$\Psi = 0,0693 \text{ W/mK}$$

4.2 Rakennus B

Rakennus B on myös puurakenteinen omakotitalo. Laskenta on tällöin suoritettu samalla tavalla kuin rakennus A:n kohdalla. Vaikka päärakennusmateriaali onkin sama, on rakennuksilla paljon rakenteellisia eroja. Rakennusosien

rakenneleikkaukset ja niissä käytetyt materiaalit sekä liitosratkaisut poikkeat toisistaan jonkin verran.

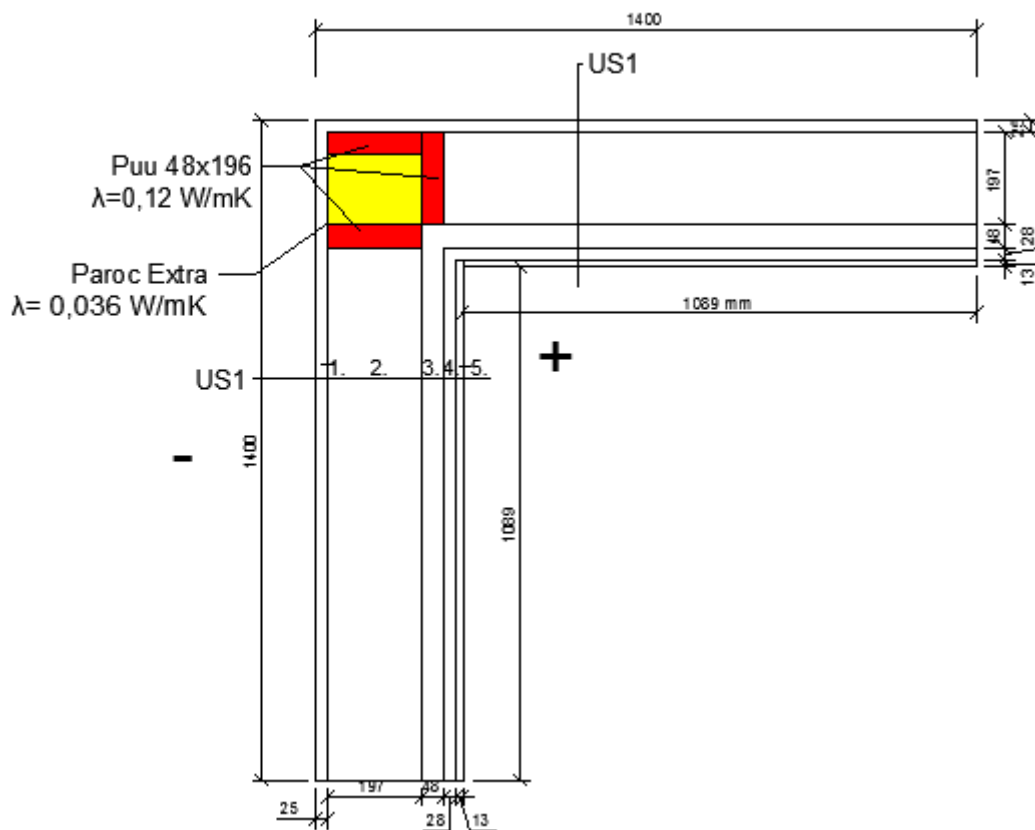
4.2.1 Ulkoseinän ulkonurkkaliitos

Rakennus B:n ulkoseinän päärankana toimii rakennus A:n tapaan puurunkotolpat, joiden mitat ovat 48 x 197 mm. Muuten rakenne poikkeaa hieman rakennus A:n vastaavasta. Rakennus B:n ulkoseinärakenteen rakennekerrokset ja U-arvon muodostuminen on esitetty alla olevassa taulukossa 5. Materiaalien ja rakennekerrosten lämpöparametrien tiedot on saatu materiaalin valmistajilta ja rakennusmääräyskokoelman osasta C4 (2).

TAULUKKO 5. Ulkoseinän rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_U [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Runkoleijona	0,025	0,0550	0,4545
2.	Puurunko 48x197 mm k600 + Mineraalivilla Paroc ExTra	0,197	0,12 + 0,036 = 0,04272	4,6114
3.	Vaakakoolaus 48x48 mm k600 + Mineraalivilla Paroc ExTra	0,048	0,12 + 0,036 = 0,04272	1,1236
4.	Vaakakoolaus 28x100 mm k600 + Tuulettumaton ilmarako	0,028	0,12 + 0,165	0,1778
5.	Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1300
	ΣR			6,5993
	U-arvo [W/m²K]			0,1515

Rakenteesta on jätetty pois ulkoverhouslauta, koska sen takana on hyvin tuulettuva ilmarako. Ulkoseinän U-arvo jää hieman rakennus A:n vastaavaa huonommaksi. Tämä johtuu yksinkertaisesti pienemmästä poikkileikkauspinta-alasta ja käytettyjen rakennusmateriaalien eroavaisuuksista. Kuvassa 21 on vaakaleikkaus rakennuksen seinien välisestä ulkonurkkauksesta.



KUVA 21. Yksinkertaistettu laskentamallikuva nurkkaliitoksesta

Yllä olevasta kuvasta luotiin laskentamalli Comsoliiin käyttäen samoja kuvan 7 (s. 17) lähtöparametreja kuin rakennuksen A laskentamalleissa. Ulkoseinän rakenteiden parametreina käytettiin taulukon 5 mukaisia arvoja.

Alla olevassa yhtälöstä käy ilmi laskennasta saatu todellinen lämpövirta ja liitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi Ψ .

$$\Psi = 0,3718 \text{ W/mK} - 2 \times (0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,09 \text{ m}) = \mathbf{0,0418 \text{ W/mK}}$$

4.2.2 Ulkoseinän ja yläpohjan liitos

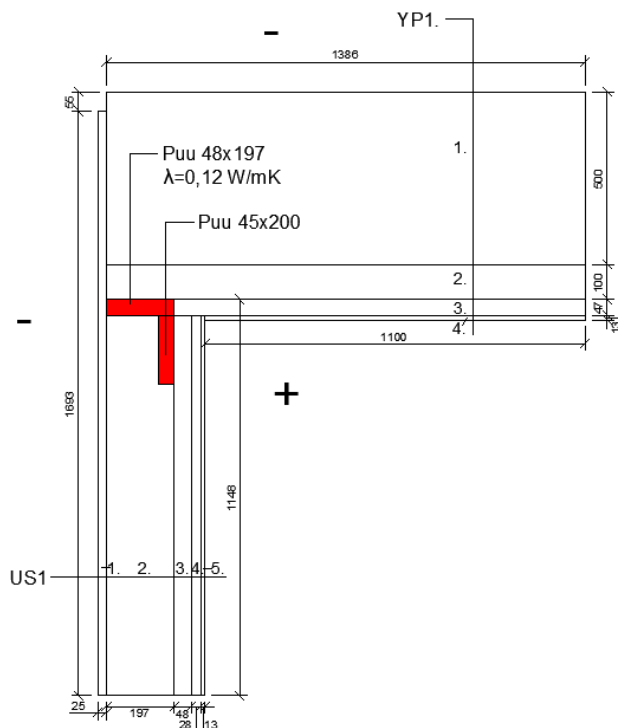
Yläpohja rakentuu rakennus A:n tapaan puisista naulalevyristikoista. Ristikot on asennettu seinärungon yläjuoksupuun päälle, joka puolestaan lepää seinän pystytolppien päällä. Yläpohja on eristetty mineraali- ja puhallusvillalla. Rakenteen U-arvon muodostuminen käy ilmi alla olevasta taulukosta 6.

TAULUKKO 6. Yläpohjan rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

#	Rakennekerros	Kerros­paksuus [m]	Lämmön­johtavuus λ_U [W/mK]	Lämmön­vastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
	Katon ilmatilan lämmön­vastus R_U			0,2000
1.	Puhallusvilla, Ekovilla	0,500	0,0390	12,8205
2.	Mineraalivilla, Paroc ExTra + Puuristikon alapaarre 125x50 mm k900	0,100	0,036 + 0,12 = 0,040667	2,4591
3.	Tuulettumaton ilmarako + Koolaus 47x47 mm k400	0,047	0,294 + 0,12 = 0,274	0,1715
4.	Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1000
	ΣR			15,8530
	U-arvo [W/m²K]			0,0631

Ulkoseinän rakenne ja parametrit ovat samat kuin edellisessä laskussa.

Vesikattorakenteet on jätetty pois laskentamallista, koska niiden alla on hyvin tuulettuva ilmatila, jolle on määritely oma lämmön­vastus. Alla olevassa kuvassa 22 on yksinkertaistettu laskentamalli rakennus B:n ulkoseinän ja yläpohjan liitoksesta.



KUVA 22. Yksinkertaistettu laskentamalli ulkoseinän ja yläpohjan liitoksesta

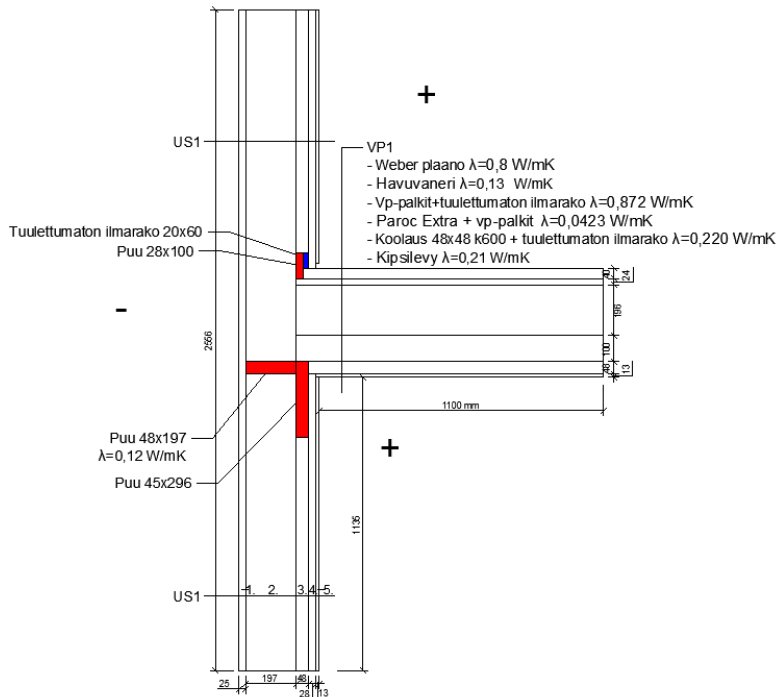
Seinän korkeus on laskennassa määritelty koolauksen yläpintaan. Laskenta suoritetaan kaksiulotteisesti, joten kattoristikoiden vaikutusta ei oteta huomioon. Tästä syystä laskennasta saatu lisäkonduktanssin arvo on hieman todellisuutta pienempi. Kylmäsillat tässä liitoksessa syntyvät pystyrungon päässä näkyvän yläjuoksupuun ja sen alla olevan vaakajäkisteen vaikutuksesta.

Kun seinän ja yläpohjan mitat, lämmönjohtavuudet ja muut parametrit asetetaan Comsoliiin, siitä saadaan alla olevan yhtälön mukainen tulos.

$$\Psi = 0,2887 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,1480 \text{ m} - 0,0631 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,1000 \text{ m} = \mathbf{0,0453 \text{ W/mK}}$$

4.2.3 Ulkoseinän ja välipohjan liitos

Välipohjan kantavana rakenteena toimii rakennus A:n tavoin kertopuupalkisto. Palkit on kannatettu toisella kertopuupalkilla, joka on kiinnitetty runkotolppiin. Palkiston päällä on ensin havuvaneri, jonka jälkeen on valettu sementtipohjainen tasoite. Alapuolella on höyrynsulkumuovi, koolaus ja kipsilevy. Höyrynsulkumuovin päällä on 100 mm mineraalivillaa. Alla olevassa kuvassa 23 on esitetty liitoksen yksinkertaistettu laskentamalli.



KUVA 23. Yksinkertaistettu laskentamalli liitoksesta

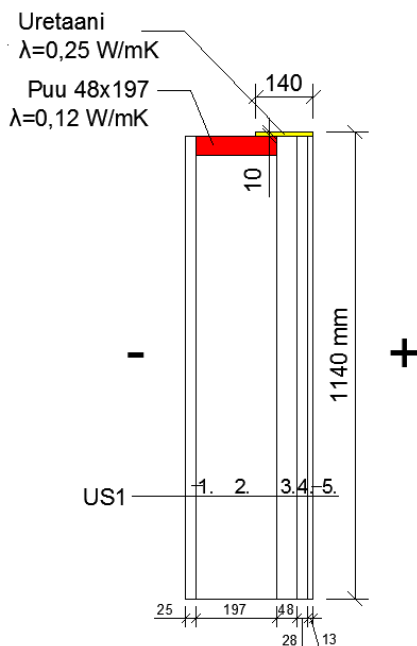
Laskentaperiaatteet ja lähtöparametrit ovat samat kuin mitä rakennus A:n välipohjaliitoksessa käytettiin. Seinärakenne on sama kuin aikaisemmissa rakennus B:n laskuissa. Liitosrakenteen heikkona kohtana voidaan pitää rungon katkaisujuoksupuuta ja sen yhteydessä olevaa kertopuupalkkia. Laskennasta saadaan alla olevan yhtälön mukaisia tuloksia.

$$\Psi = 0,4267 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,5560 \text{ m} = \mathbf{0,0395 \text{ W/mK}}$$

4.2.4 Ikkunaliitokset

Rakennus B:ssä on käytetty energiaikkunoita, joissa on kaksipuitteinen, nelilasinen rakenne. Tämä ikkunatyyppeä tunnetaan myös lyhenteenä MS2E. Ikkunoiden karmisyyvyys on 200 mm.

Laskenta on tehty käyttäen samoja periaatteita kuin rakennus A:n ikkunaliitosten kohdalla. Käytetään siis yksinkertaistettua laskumenetelmää, jossa ikkuna korvataan adiabaattireunaehdolla ja käytetään laskennallista karmisyyvyttä (taulukko 3). Liitosperiaate on samanlainen ylä- ja alakarmissa, joten laskentaan voidaan käyttää samaa laskentamallia. Kuvassa 24 on esitetty tämä laskentamalli.



KUVA 24. Ikkunaliitoksen laskentamalli, jossa karmen sisäpinta on kiinni ulkoseinän sisäpinnassa

Vertailun vuoksi tehtiin toinen laskentamalli, jossa on karmin sisäpinta siirretty 89 mm ulospäin, eli keskelle puista apukarmia. Molemmat laskentamallit asetettiin Comsoliiin. Alla on laskettu liitoksista aiheutuva lisäkonduktanssi.

Versio 1:

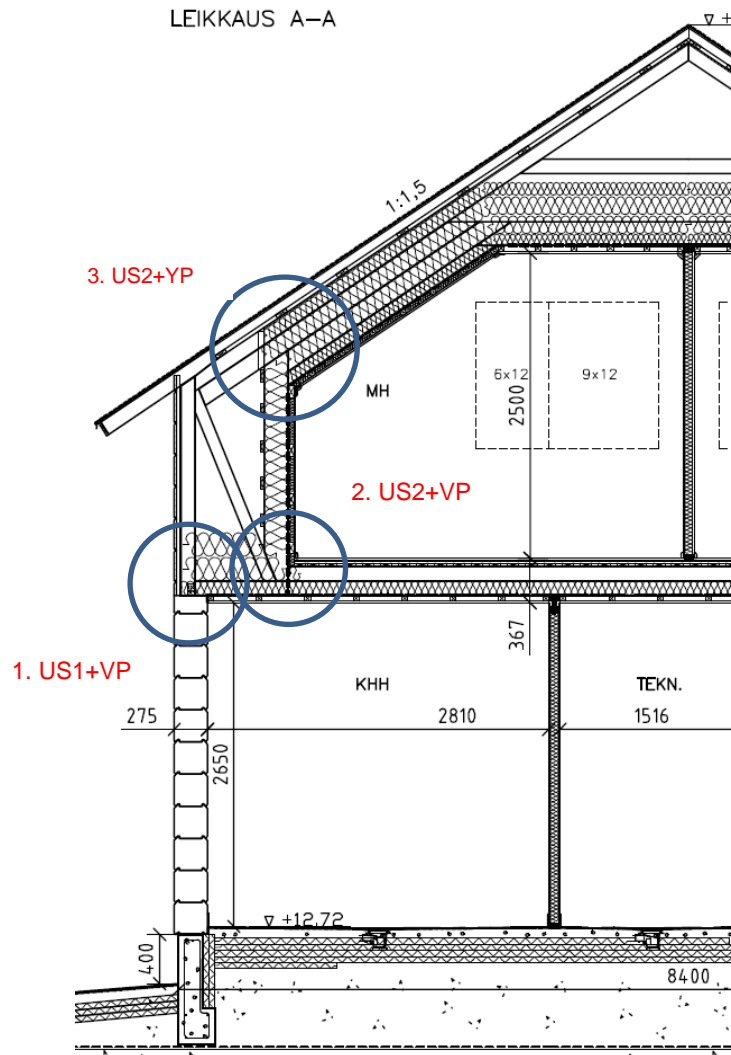
$$\Psi = 0,2159 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,14 \text{ m} = 0,0432 \text{ W/mK}$$

Versio 2:

$$\Psi = 0,2067 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,14 \text{ m} = 0,0340 \text{ W/mK}$$

4.3 Rakennus C

Tämä rakennus on yhdistelmä hirsi- ja puurunkorakentamista. Kyseessä on puolitoistakerroksinen omakotitalo, jonka 1. kerroksen ulkoseinä on rakennettu 275 mm paksusta lamellihirrestä. Hirsikehikon päällä on puiset kehäristikot, joiden sisään rakentuu niin sanottu ullakkokerros. Ullakkokerroksen rajaamat seinärakenteet on voimakkaasti eristetty puhallusvillalla. 1. kerroksen ulkovaipassa ei sen sijaan ole lisäeristystä hirren lisäksi. Tästä syystä U-arvo on ”vain” 0,4 W/m²K. Tämä täyttää kuitenkin asumiskäyttöön tarkoitetun hirsirakennuksen ulkoseinän U-arvovaatimukset. Poikkeuksellisen rakenteen vuoksi tarkasteltavat liitokset ovat erityyppisiä kuin rakennuksissa A ja B. Alla olevaan kuvaan 25 on merkitty tarkasteltavat liitoskohdat.



KUVA 25. Tarkasteltavien liitosten sijainti talon C pystyleikkauskuvassa

Kuvassa näkyvien liitosten lisäksi kohteesta tarkastellaan myös hirsikehikon nurkkaliitos ja muutama ikkunaliitostyyppi.

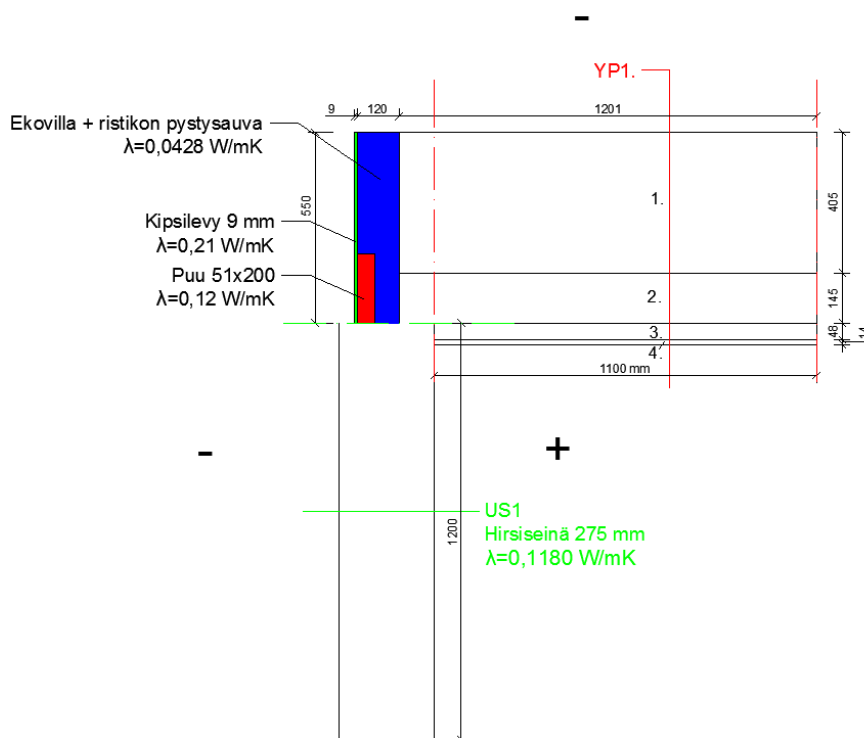
4.3.1 US1 + VP

Ensimmäinen laskettava kohde on hirsiseinän ja kehäristikon välinen liitos. Liitos on tyypiltään ehkä lähempänä ulkoseinän ja yläpohjan liitosta, koska rakennuksen ylänurkassa näkyvä välitila on kylmä tila. Alla olevassa taulukossa 7 on esitetty välipohjan kylmään tilaan rajautuvan osan rakennekerrokset ja U-arvon muodostuminen.

TAULUKKO 7. Välipohjan kylmään osaan rajautuvan tilan rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
	Katon ilmatilan lämmönvastus R_u			0,2000
1.	Puhallusvilla - Ekovilla	0,405	0,0390	10,3846
2.	Puhallusvilla - Ekovilla + Ristikön alapaarre 42x145 k900	0,145	0,039 + 0,12 = 0,0428	3,3894
3.	Koolaus 48x48 k400 + tuulettumaton ilmarako	0,048	0,12 + 0,2784 = 0,2784	0,1724
4.	Puupaneeli	0,014	0,1200	0,1167
	Sisäpintavastus			0,1000
	ΣR			14,4031
	U-arvo [W/m²K]			0,0694

Laskentamalli tehdään samoilla periaatteilla kuin edellisissä laskennoissa. Hirsiseinää ja välipohjaa tulee ottaa laskentaan vähintään 1 metri. Välipohjan kylmään tilaan rajoittuva osa ei oikeasti ole niinkään pitkä, mutta laskentaa varten sitä jatketaan riittävän mittaiseksi. Kuvassa 26 on esitetty yksinkertaistettu laskentamalli liitoksesta.



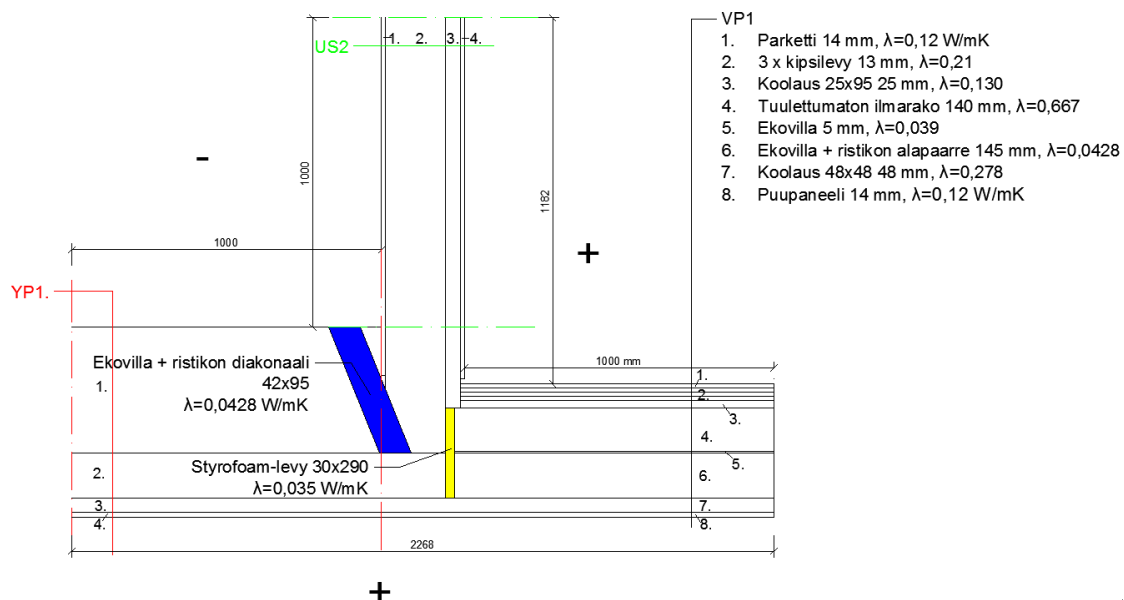
KUVA 26. Yksinkertaistettu laskentamalli liitoksesta

Hirsiseinän yläpuolella olevasta seinärakenteesta on jätetty pois pintaverhouslauta ja koolaus, koska välissä on tuulettuva ilmarako. Hirsiseinä mallinnetaan homogeenisena eli yhtenäisenä rakenteena, jonka lämmönjohtavuudeksi määritellään $0,1180 \text{ W/mK}$. Tällöin seinän U-arvoksi tulee $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$. Lähtöparametrit syötetään Comsoliin, josta saadaan lämpövirran todellinen arvo liitoksessa. Tästä arvosta kun vähennetään hirsiseinän ja välipohjan U-arvoilla laskettu lämpövirta saadaan lisäkonduktanssin arvo liitoksessa. Yhtälö näkyy alla.

$$\Psi = 0,5908 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,200 \text{ m} - 0,0694 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,100 \text{ m} = \mathbf{0,0347 \text{ W/mK}}$$

4.3.2 US2 + VP

Liitoksen mallinnusta ja laskentaa vaikeuttaa se, että puolet välipohjan yläpinnasta rajautuu ulkoilmaan ja puolet sisäilmaan. Tämä vaatii pientä soveltamista pintavastuksien asettelun kanssa. Oletetaan, että lämpövirran suunta kääntyy seinärakenteen keskilinjalla, jolloin pintavastuksetkin muuttuvat. Alla olevassa kuvassa 27 on esitetty laskentamalli liitoksesta.



KUVA 27. Liitoksen laskentamalli

Vasemman puoleinen välipohjarakenne on sama kuin edellisessä liitoksessa. Keskellä olevan seinän (US2) pääkannattaja on samalla kehäristikon

pystysauva. Sauvojen väli on eristetty puhallusvillalla, jonka lisäksi sisäpuolella on 48 mm mineraalivillaa. Välipohjaa kannattaa ristikon alapaarten naulalevyt. Alla olevassa taulukossa 8 on esitetty US2:n rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit.

TAULUKKO 8. US2:n rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_U [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Puukuitulevy, huokoinen	0,0120	0,0550	0,2182
2.	Puhallusvilla - Ekovilla + Ristikon pystysauva 42x195 k900	0,1950	0,039 + 0,12 = 0,04278	4,5582
3.	Mineraalivilla - Isover KL33 + koolaus 48x98 k500	0,0480	0,033 + 0,12 = 0,5005	0,9590
4.	Kipsilevy	0,0130	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1300
	ΣR			5,9673
	U-arvo [W/m²K]			0,1676

Laskennasta saadaan alla olevan yhtälön mukainen tulos. Ulkoseinän korkeus laskua varten on otettu välipohjan kylmältä puolelta (1 metri).

$$\Psi = 0,26754 \text{ W/mK} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,000 \text{ m} - 0,0694 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,000 \text{ m} = \mathbf{0,0305 \text{ W/mK}}$$

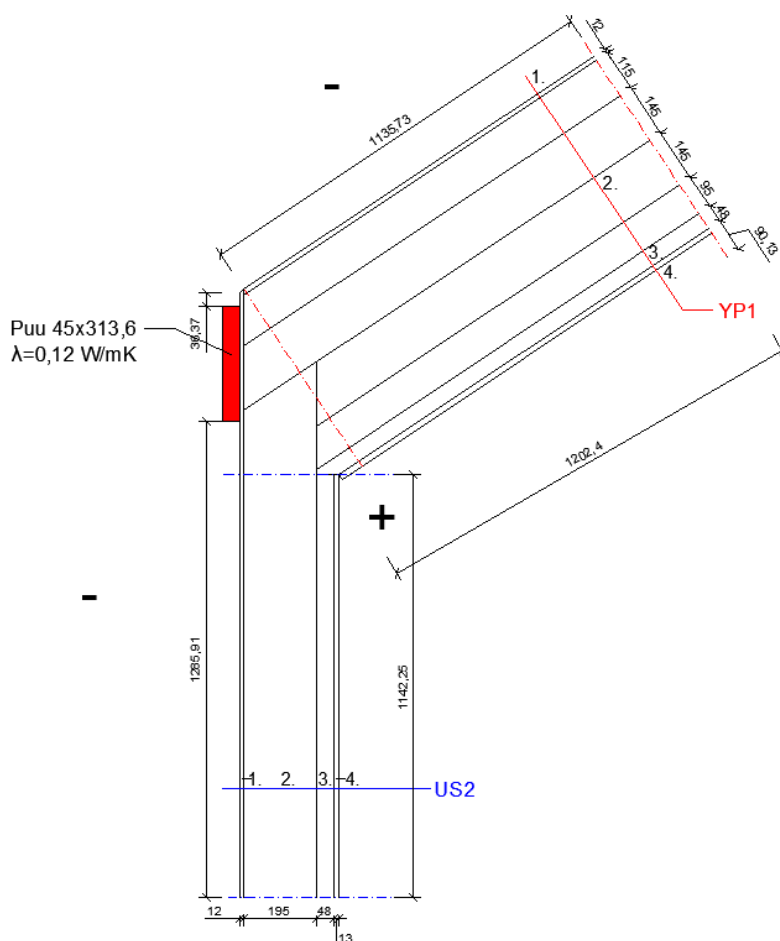
4.3.3 US2 + YP

Liitos on ullakon seinän (US2) ja vinokaton (YP1) yhtymiskohta, jossa kylmäsiltaa aiheuttavat lähinnä kehäristikon puurakenteet. Yläpohjan rakenne on lähes sama kuin US2:ssa, mutta runkoväli ja eristemäärä ovat 195 mm:n sijasta 500 mm. U-arvoksi kattorakenteelle saadaan 0,0760 W/m²K. Taulukossa 9 on esitetty yläpohjarakenteen lämpötilaparametrit ja rakennekerrokset.

TAULUKKO 9. YP1:n rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_U [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Puukuitulevy, huokoinen	0,0120	0,0550	0,2182
2.	Puhallusvilla - Ekovilla + Ristikon Yläpaarteet k900	0,5000	0,039 + 0,12 = 0,04278	11,6877
3.	Mineraalivilla - Isover KL33 + koolaus 48x48 k300	0,0480	0,033 + 0,12	1,0230
4.	Puupaneeli	0,0140	0,1200	0,1167
	Sisäpintavastus			0,1000
	ΣR			13,1855
	U-arvo [W/m²K]			0,0758

Yläpohjarakenteen laskentamallista on poistettu vesikaterakenteet, koska rakenteiden välissä on tuulettuva ilmarako. Kuvassa 28 on esitetty US2:n ja YP1:n välisestä liitoksesta muokattu laskentamalli.



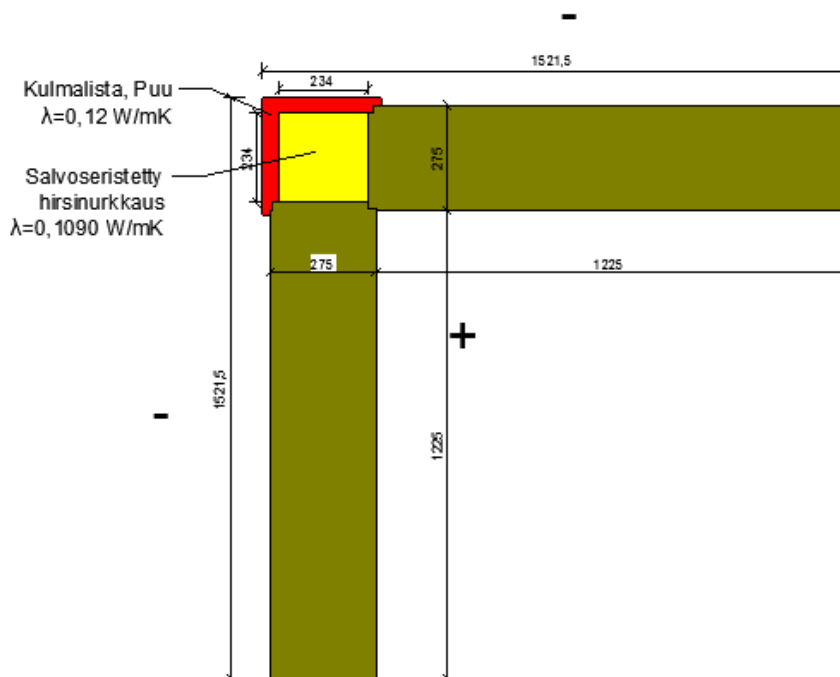
KUVA 28. Laskentamalli liitoksesta

Comsol antaa laskentamallista todellisen lämpövirran arvoksi $L_{2D} = 0,3068$ W/mK. Tästä arvosta vähennetään kuvan 28 pistekatkoviivojen alueelta seinän ja yläpohja U-arvoilla lasketut lämpövirrat.

$$\Psi = 0,3072 \text{ W/mK} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,1423 \text{ m} - 0,0760 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,136 \text{ m} \\ = \mathbf{0,0295 \text{ W/mK}}$$

4.3.4 Ulkoseinän nurkkaliitos

Tarkastellaan hirsinurkkaliitoksen lämpövirtapitävyyttä sisä- ja ulkonurkkauksissa sekä yläkerran pääty- ja sivuseinän välisessä liitoksessa. Hirret ovat tyypiltään lamellihirsiä, eli valmistamiseen on käytetty useampaa puuta, jotka on liimattu yhteen ja höylätty sen jälkeen haluttuun muotoon. Hirren lämmönjohtavuutena käytetään arvoa $0,118 \text{ W/mK}$. Kuvassa 29 on esitetty yksinkertaistettu laskentamalli ja sen tärkeimmät tiedot laskentaa varten.



KUVA 29. Laskentamalli hirsikehikon nurkkauksesta

Yhdellä laskentamallilla voidaan laskea sekä ulko- että sisänurkkaus. Ulkonurkkauksessa pintavastukset määritellään siten, että sisäpintavastus tulee kuvasta katsottuna sisäpuolelle ja ulkopintavastus vastaavasti toiselle puolelle.

Laskentamittoina käytetään seinän sisämittoja. Alla on laskettu lisäkonduktanssi hirsiseinän ulkonurkkauksesta.

$$\Psi = 1,03415 \text{ W/mK} - 2 \times (0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,2250 \text{ m}) = \mathbf{0,05415 \text{ W/mK}}$$

Sisänurkkaa laskettaessa pintavastukset sijoitetaan päinvastoin kuin edellisessä laskussa ja laskentamittoina käytetään seinämällin ulkomittoja.

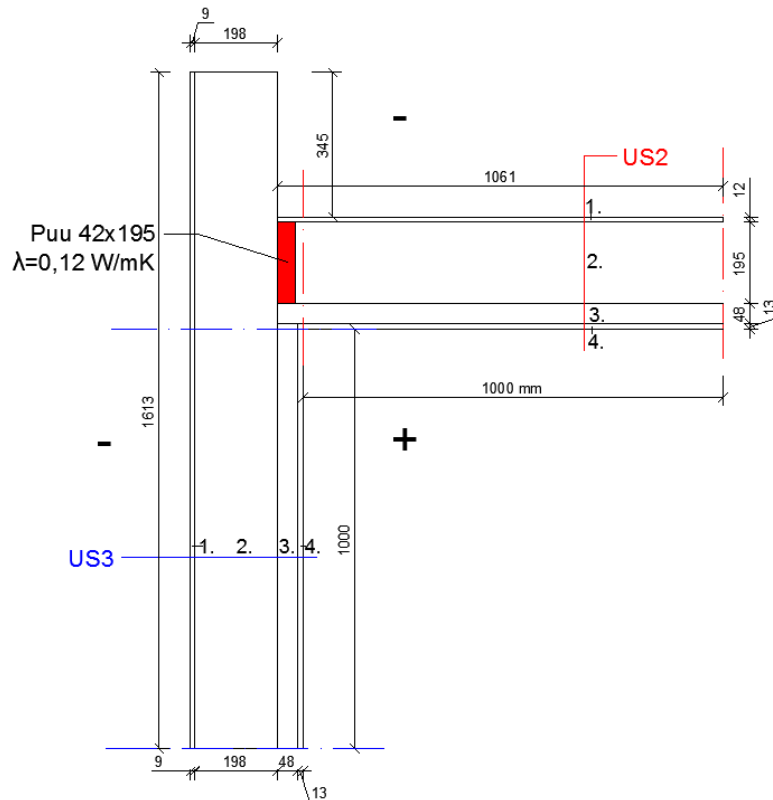
$$\Psi = 1,0410 \text{ W/mK} - 2 \times (0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,5215 \text{ m}) = \mathbf{- 0,1762 \text{ W/mK}}$$

Ullakkokerros rakentuu kehäristikoiden ja rakennuksen päätyseinien sisälle. Päätyseinä (US3) on puurankaseinä, jossa pystytolppien välit on eristetty tällä kertaa mineraalivillalla. US3:n rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit on esitetty alla olevassa taulukossa 10.

TAULUKKO 10. US3:n rakennekerrokset

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_{ij} [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Kipsilevy	0,0090	0,2100	0,0429
2.	Mineraalivilla - Isover KL33 + 48x198 k600 pystyrunko	0,1980	0,033 + 0,12 = 0,03996	4,9550
3.	Mineraalivilla - Isover KL33 + koolaus 48x48 k600	0,0480	0,033 + 0,12 = 0,03997	1,2012
4.	Kipsilevy	0,0130	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1300
	ΣR			6,4310
	U-arvo [W/m²K]			0,1555

Tuulensuojakipsilevyn (9 mm) jälkeen tulevat koolaus ja ulkoverhous on jätetty laskennasta pois, koska koolauksen välissä on hyvin tuulettuva ilmarako. Kuvassa 30 on esitetty yksinkertaistettu laskentamalli kehäristikon pystysauvoihin tukeutuvan US2:n liitos päätyseinä US3:een.



KUVA 30. Yksinkertaistettu laskentamalli liitoksesta

Päätyseinä (US3) jatkuu kuvan 30 mukaisesti yli seinien liittymiskohdan, joten liitosgeometria aiheuttama lisäkonduktanssi jää luultavasti pieneksi.

Laskennassa käytetään taulukoiden 8 ja 10 mukaisia lämpötilaparametreja. Tulokset näkyvät alla olevassa yhtälössä.

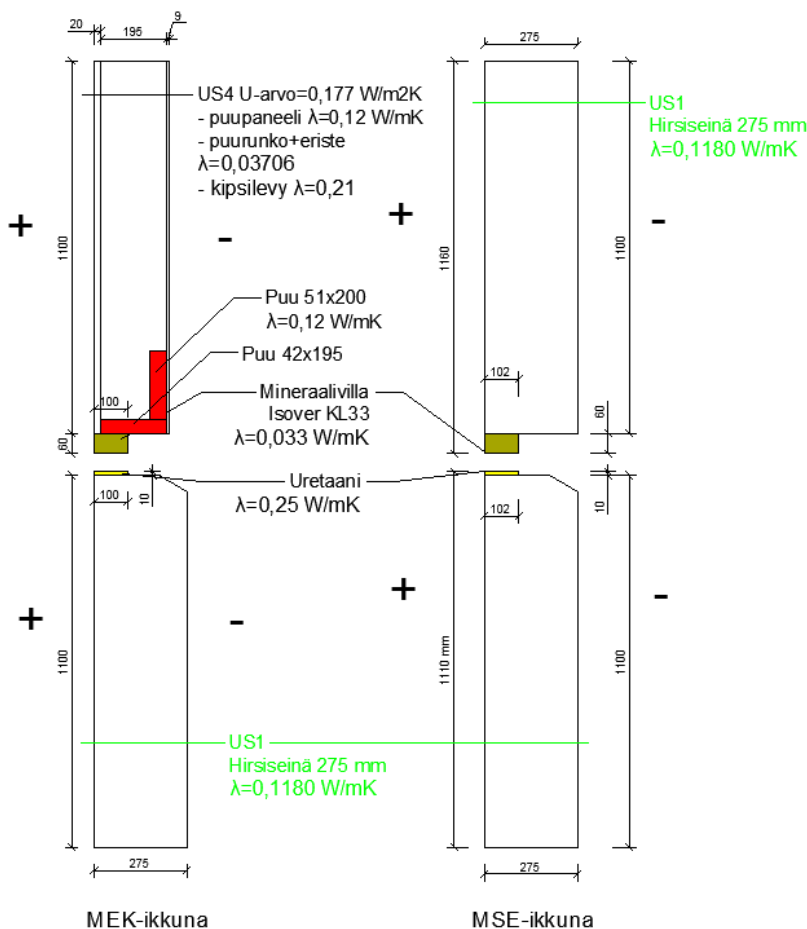
$$\Psi = 0,3573 \text{ W/mK} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0000 \text{ m} - 0,1555 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0000 \text{ m} = \mathbf{0,0342 \text{ W/mK}}$$

4.3.5 Ikkunaliitokset

Hirsirakenteinen seinä elää vuosien saatossa jonkin verran. Rakenteessa tapahtuu painumista, joka pitää ottaa huomioon myös ikkunaliittymissä. Yläkarmeihin jätetään painumavara, joka tiivistetään tarkoitukseen sopivalla eristeellä. Rakennus C:n hirsiseinässä olevien ikkunoiden yläkarmin ja seinän väliin jätetään 60 mm painumavara, joka tiivistetään mineraalivillalla. Ala- ja sivukarmit sekä ullakon pystyrunkoon sijoitetut ikkunat tiivistetään perinteisellä uretaanilla.

Tarkastelluun otettiin pari erilaista ikkunatyyppiä, jotka sijaitsevat joko kokonaan tai osin hirsikehikon sisällä. Pystyrunkoon sijoitettuja ikkunoita ei rakennus C:n osalta oteta tarkasteluun, koska niitä on tarkasteltu jo kahdessa puurunkoisessa rakennuksessa (rakennukset A ja B).

Ensimmäinen ikkuna on kokonaan hirsikehikon sisällä. Tyypiltään ikkuna on MSE eli aukeaa sisäänpäin, koostuu kahdesta puitteesta ja kolmesta lasista. Toinen ikkuna on tyypiltään MEK eli kiinteä kolmilasinen umpioelementti. Sen alakarmi on kiinni hirsiseinässä, kun taas yläkarmi on kiinni puurunkoseinässä (US4). Seinän rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit on esitetty kuvassa 31. Laskennassa käytetään yksinkertaistettua laskentamenetelmää, kuten aikaisemminkin on tehty. Molempien ikkunoiden karmisyvyys on rakennekuvien mukaan 170 mm, jotka kavennetaan taulukon 3 (s. 30) mukaisesti. Kuvassa 31 on esitetty ylä- ja alakarmien laskentamallit molemmista ikkunoista.



KUVA 31. Yksinkertaistetut laskentamallit rakennus C ikkunaliitoksista

Karmi on rakennekuvissa kiinni seinärakenteen sisäpinnassa. Vertailun vuoksi karmin paikkaa siirrettiin laskentamallissa keskelle seinää ja toisessa tapauksessa kiinni seinän ulkopintaan. Tarkoituksena oli katsoa miten karmin sijainti vaikuttaa liitoksesta aiheutuvan lisäkonduktanssin arvoon. Laskentamallit ja lähtöparametrit syötettiin Comsoliin ja alla olevassa taulukossa 11 on yhteenveto saaduista tuloksista. Tähdellä merkitty karmin sijainti on tyyppirakenteen mukainen.

TAULUKKO 11. Ikkunakarmin sijainnin merkitys lisäkonduktanssin määrään

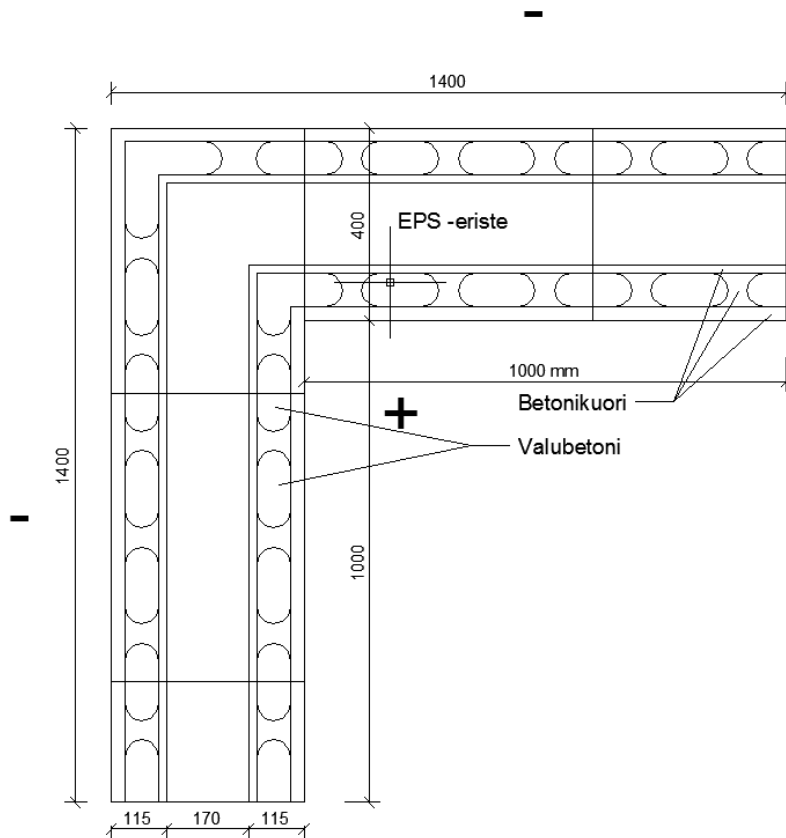
Karmin sijainti rungossa	Lisäkonduktanssi [W/mK]			
	MSE-ikk.		MEK-ikk.	
	Alakarmi	Yläkarmi	Alakarmi	Yläkarmi
Sisäpinnassa ^(*)	0,05423	0,03374	0,05563	0,05209
Keskellä	0,04368	0,01964	0,04465	0,04856
Ulkopinnassa	0,02268	0,01518	0,04207	0,04586

4.4 Rakennus D

Rakennus D on kivitalo, jonka ulkoseinät on kasattu eristetyistä kuoribetoniharkoista. Harkon betonikuorien välissä oleva eriste on paisutettua polystyreeniä eli EPS:ää, jolla on hyvä lämmöneristyskyky. Rakennuksessa on niin sanottu pulpettikatto, joka on rakennettu puisten naulalevyristikoiden varaan. Näin ollen on syytä ottaa ottaa kaksi liitostyyppiä tarkasteluun ulkoseinän ja yläpohjan välillä. Toinen otetaan korkealta sivulta ja toinen matalalta sivulta. Näiden lisäksi tarkastellaan ulkoseinien välinen nurkkaliitos, välipohjaliitos ja ikkunaliitos.

4.4.1 Ulkoseinän nurkkaliitos

Seinärakenteessa otetaan näissä laskuissa mukaan vain 400 mm leveistä elementtiharkoista muurattu seinä. Seinän U-arvo on pintavastuksineen 0,1711 W/m²K. Pois on jätetty mahdolliset sisä- ja ulkoverhousmateriaalit sekä seinärakenteeseen muurauksvaiheessa asennetut terästangot. Kuvassa 32 on esitetty yksinkertaistettu laskentamalli nurkkaliitoksesta.



KUVA 32. Yksinkertaistettu laskentamalli nurkkaliitoksesta

Kuvan vaakaleikkauksesta käy ilmi harkkojen rakenne, materiaalit ja tärkeimmät laskennassa käytettävät mitat. Laskenta tehtiin edellä olleen hirsinurkkauksen tapaan sisä- ja ulkonurkkauksille. Molempien betoniosien lämmönjohtavuuden arvot ovat 1,2 W/mK ja EPS-eristeen 0,032 W/mK. Lämpövirta rakenteen läpi ratkaistiin Comsolilla ja alla on määritelty lisäkonduktanssi ulko- ja sisänurkkauksissa.

Ulkonurkkaus:

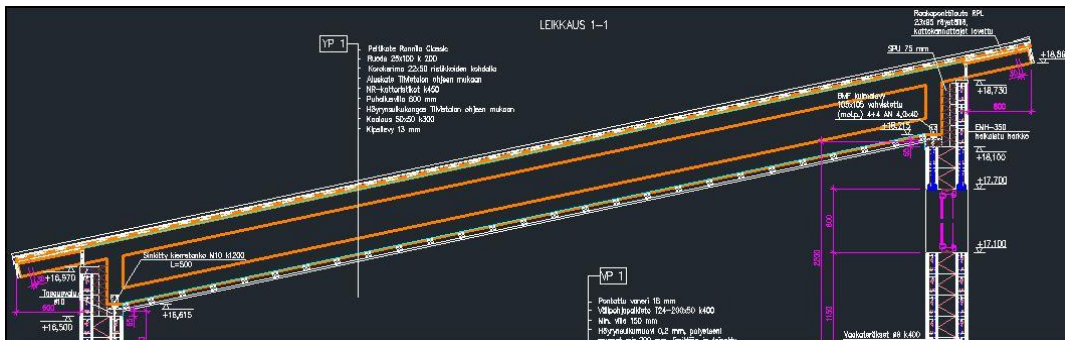
$$\Psi = 0,4041 \text{ W/mK} - 2 \times (0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,000 \text{ m}) = \mathbf{0,06198 \text{ W/mK}}$$

Sisänurkkaus:

$$\Psi = 0,4047 \text{ W/mK} - 2 \times (0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,400 \text{ m}) = \mathbf{-0,0743 \text{ W/mK}}$$

4.4.2 Ulkoseinän yläpohjan liitos

Yläpohjaa kannattavat puiset ristikot, joiden väli on eristetty puhallusvillaalla (600 mm). Alla olevasta kuvasta nähdään, että katto on tyypiltään pulpettikatto, joka laskee vain yhden sivun suuntaan. Liitos tarkasteltiin molemmista päistä kattoa. Vaikka liitosten rakenne on suurin piirtein samanlainen, on ne syytä tarkastella erikseen, sillä liitosrakenteiden välinen kulma vaikuttaa jonkin verran lisäkonduktanssin määrään. Kuvassa 33 on esitetty yläpohjan ja seinän pystyleikkaus.



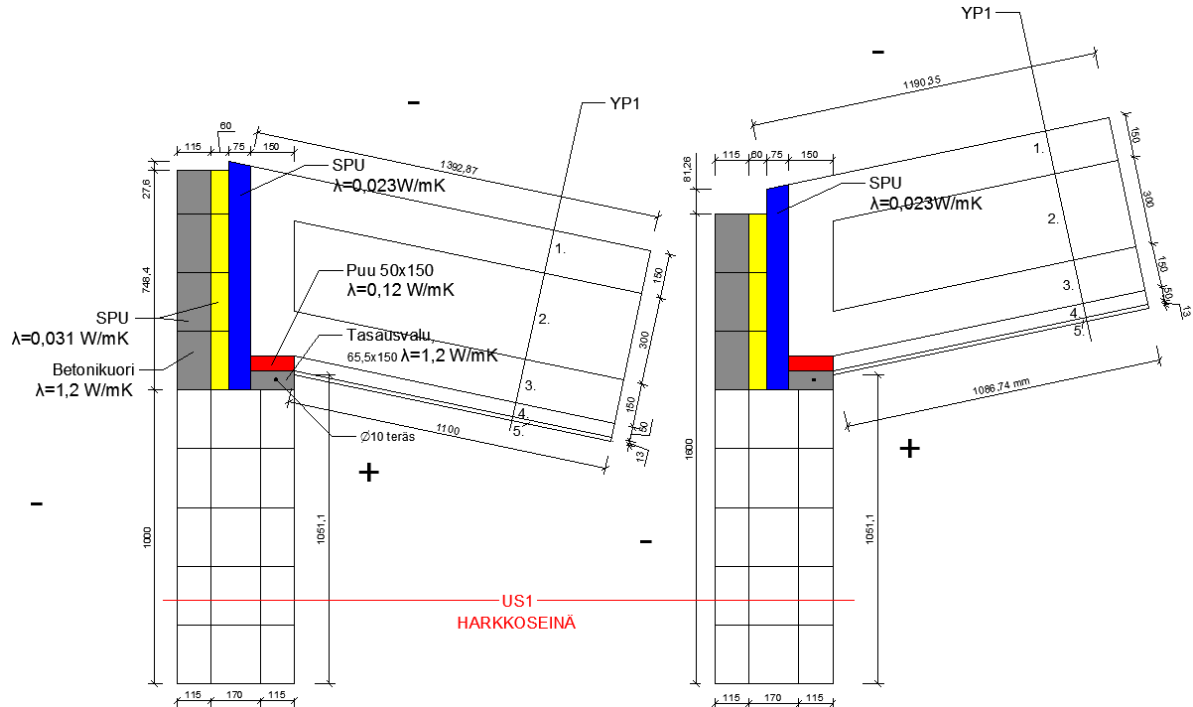
KUVA 33. Rakennus D:n yläpohjan pystyleikkauskuva

Yläpohjan rakenne ja lämpötilaparametrit on määritelty alla olevassa taulukossa 12. U-arvon laskennasta on jätetty pois vesikaterakteet, koska niiden välissä on hyvin tuulettuva ilmakerros.

TAULUKKO 12. Yläpohjan rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,04
1.	Puhallusvilla, Ekovilla + Puuristikon yläpaarre 50x150 k450	0,1500	0,039 + 0,12 = 0,048	3,1250
2.	Puhallusvilla, Ekovilla	0,3000	0,0390	7,6923
3.	Puhallusvilla, Ekovilla + Puuristikon alapaarre 50x150 k450	0,1500	0,039 + 0,12 = 0,048	3,1250
4.	Tuulettumaton ilmarako + Koolaus 50x50 mm k300	0,0500	0,3125 + 0,12 = 0,2804	0,1783
5.	Kipsilevy	0,0130	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1000
	ΣR			14,3225
	U-arvo [W/m²K]			0,0698

Laskennassa käytettiin samaa seinärakennetta ja lämpötilaparametreja kuin ulkoseinien nurkkaliitoksen laskennassa. Kuvassa 34 on esitetty yksinkertaistetut laskentamallikuvat yläpohjan ja ulkoseinän liitoksista.



KUVA 34. Yläpohjaliitosten laskentamallikuvat

Halkaistulla harkolla on samat lämpötilaparametrit kuin täysikokoisella harkolla. Mallit asetetaan Comsoliin ja ratkaistaan niiden läpi kulkeva lämpövirta. Tuloksesta vähennetään seinän ja yläpohjan U-arvoilla lasketut lämpövirrat ja saadaan näin liitosten lisäkonduktanssiarvot.

Ylänurkkaus:

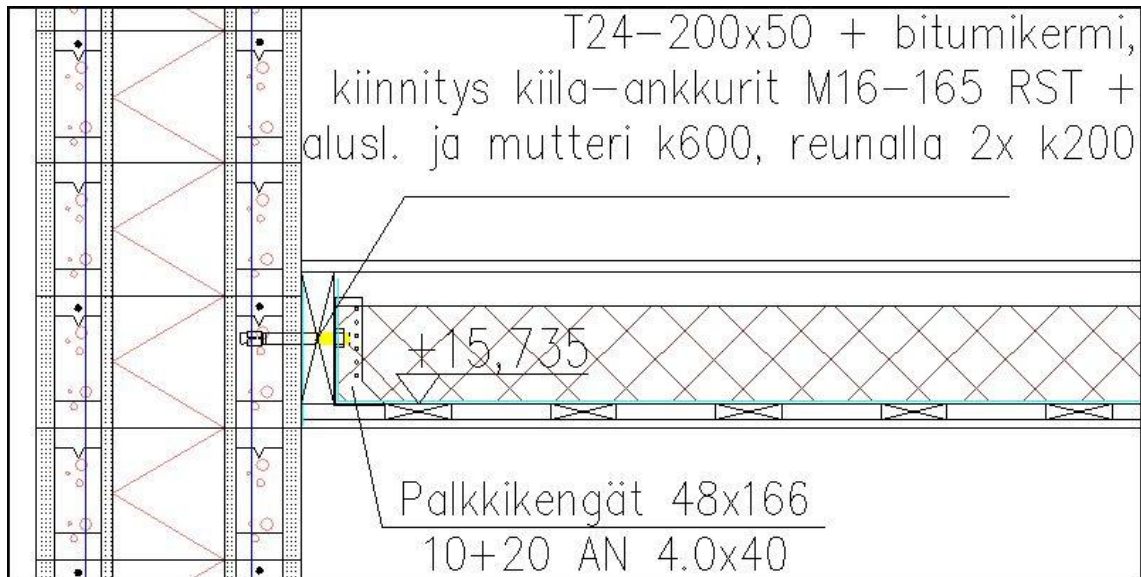
$$\Psi = 0,3101 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0511 \text{ m} - 0,0698 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,1000 \text{ m} = \mathbf{0,0535 \text{ W/mK}}$$

Alanurkkaus:

$$\Psi = 0,3025 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0511 \text{ m} - 0,0698 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0867 \text{ m} = \mathbf{0,0468 \text{ W/mK}}$$

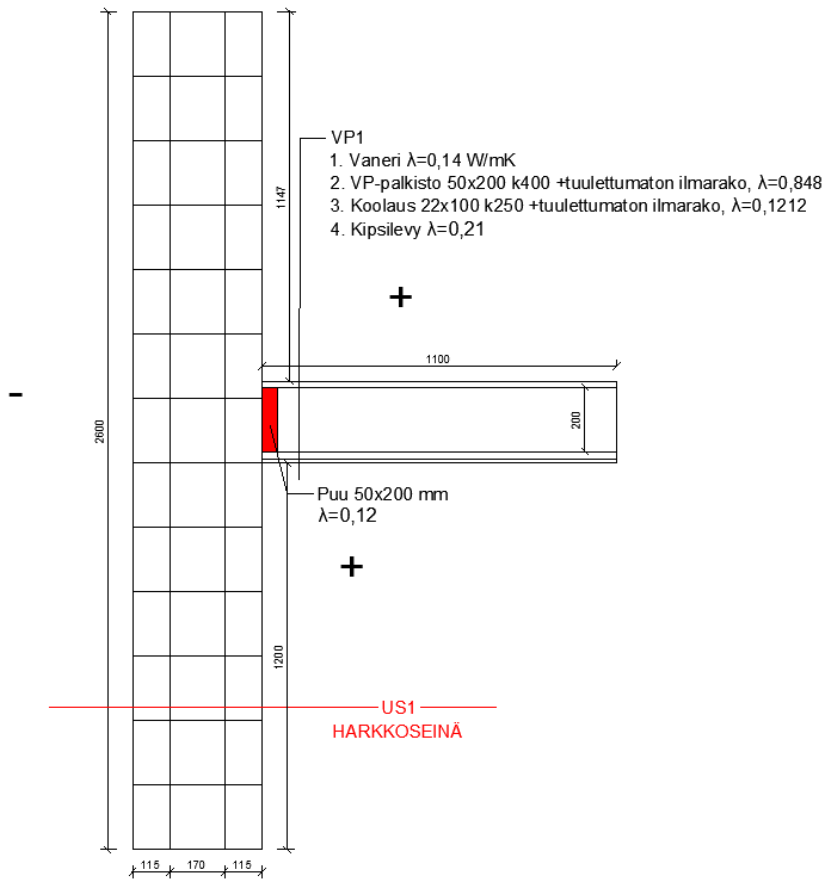
4.4.3 Ulkoseinän ja välipohjan liitos

Välipohja on kannateltu puupalkeilla (50 x 200 mm), jotka lepäävät palkkikenkien päällä. Palkkikengät on kiinnitetty seinärunkoihin kiila-ankkureilla. Näin ollen välipohjan liitoksessa ei periaattessa ole viivamaista lisäkonduktanssia aiheuttavaa viivamaista kylmäsiltaa. Kuva 35 on pystyleikkaus kyseisestä liitoksesta.



KUVA 35. Rakennus D:n välipohjan liitosdetalji

Palkkikenkä ja kiila-ankkuri ovat tässä tapauksessa pistemäisiä kylmäsiltoja, joten niitä ei tässä työssä huomioida. Välipohjassa ei ole lämmöneristystä, vaikka kuvasta voisi päätellä toisin. Kuva 36 on detaljista muokattu laskentamalli.



KUVA 36. Välipohjaliitoksen laskentamalli

Kuva parametreineen viedään Comsoliin ja lasketaan lämpövirta rakenteen läpi. Tästä vähennetään harkkoseinän U-arvolla ($0,1711$ W/m²K) laskettu lämpövirta.

$$\Psi = 0,4492 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,6000 \text{ m} = \mathbf{0,00432 \text{ W/mK}}$$

4.4.4 Ikkunaliitokset

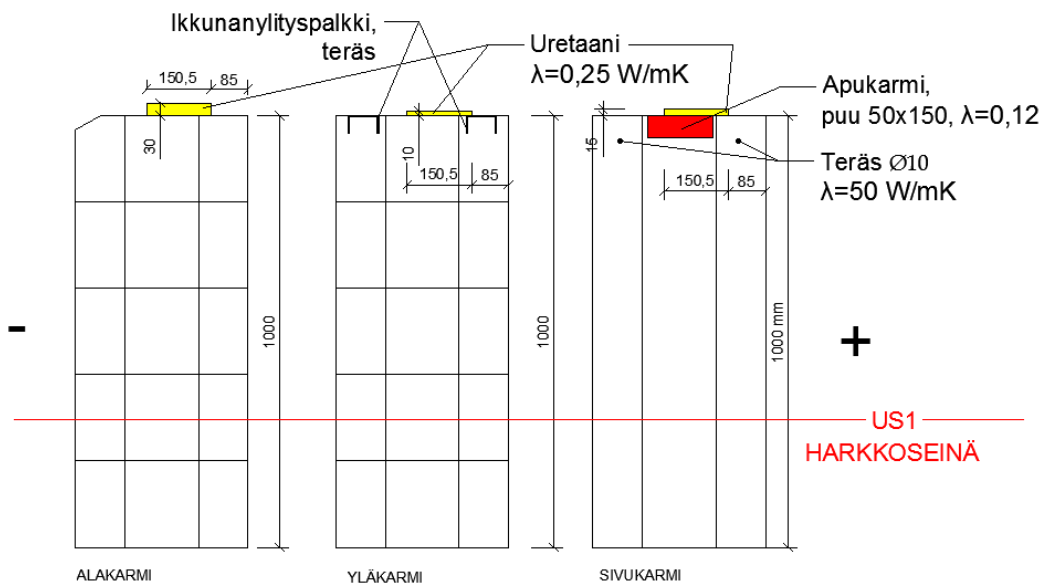
Rakennus D:n ikkunat ovat samaa tyyppiä kuin rakennus B:ssä, eli MS2E.

Ikkunat on kiinnitetty ylä- ja alakarmien osalta suoraan seinärunkoon.

Sivukarmit on kiinnitetty puiseen apukarmiin, joka on upotettu seinärunkoon.

Tästä syystä sivukarmin liitos tarkastellaan erikseen. Lisäksi katsotaan miten karmien sijainti vaikuttaa liitoksen aiheuttaman lisäkonduktanssin määrään.

Laskennassa sovelletaan samaa yksinkertaistettua laskentamenetelmää, mitä muidenkin rakennusten ikkunaliitoksissa. Kuvassa 37 on esitetty laskentamallit karmiliitoksista.



KUVA 37. Ikkunaliitosten laskentamallit

Seinärakenne ja sen lämpötilaparametrit pysyvät samoina kuin edellisissä laskuissa on käytetty. Alla olevassa taulukossa 13 on esitetty laskennasta saadut tulokset rakennus D:n ikkunaliitoksista.

TAULUKKO 13. Rakennus D:n ikkunaliitosten tulosityhteenveto

	Lisäkonduktanssi ψ [W/mK]		
	Karmin sijainti rungossa		
	Oletus	Sisäpinnassa	Ulkopinnassa
Alakarmi	0,0701	0,1308	0,0560
Yläkarmi	0,2575	0,0719	0,0918
Yläkarmi (ei ylituspalkkeja)	0,0324		
Sivukarmi	0,0712	0,1267	0,0627

4.5 Rakennus E

Ritaharjun energiakortteliin suunnitellaan myös passiivitalolle määritellyt rajat täyttävää puurunkotaloa. Perinteisen mineraalivillan lisäksi vaipan eristämiseen on suunniteltu käytettäväksi SPU-eristelevyjä. Levyt on valmistettu polyuretaanista ja niillä on erittäin hyvä lämmöneristävyyskyky suhteessa rakennepaksuuteen. Taulukossa 14 on esitetty ulkoseinän rakennekerrokset ja U-arvon muodostuminen.

TAULUKKO 14. US1:n rakennekerrokset ja lämpötilaparametrit

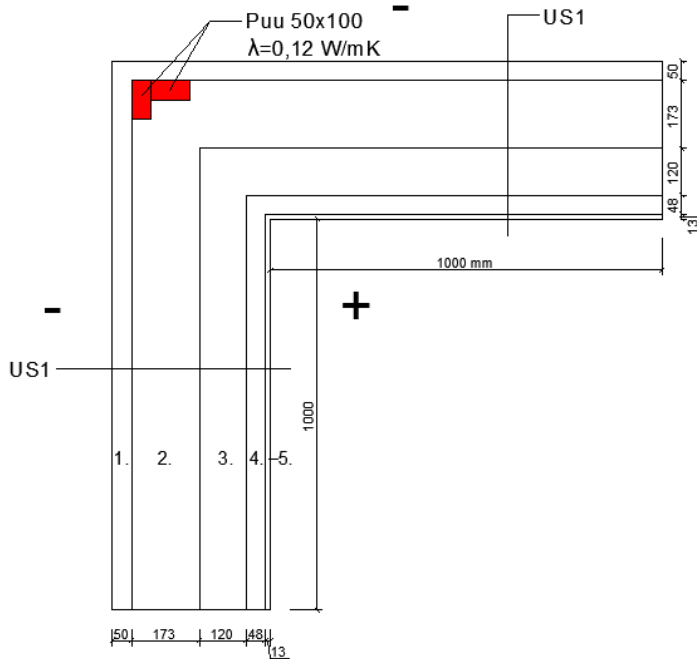
#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_U [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Tuulensuojavilla, WPS 3n	0,050	0,0320	1,5625
2.	Mineraalivilla, Paroc Extra plus + Pystyrunko 50x173 k600	0,173	0,034 + 0,12	4,2024
3.	SPU + Koolaus 48x120 k600	0,120	0,023 + 0,12 = 0,03076	3,9012
4.	Mineraalivilla, Paroc Extra plus + Koolaus 48x48 k600	0,048	0,034 + 0,12 = 0,04088	1,1742
5.	Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1300
	ΣR			11,0722
	U-arvo [W/m²K]			0,0903

Rakenteesta on poistettu ulkoverhouslauta ja koolaus, koska niiden välissä on hyvin tuulettuva ilmarako. Seinärakenteen U-arvo on erittäin hyvä verrattuna esimerkiksi rakennus D:n vastaavaan. Seinävaipan paksuus on molemmissa lähes sama, mutta silti rakennus E:n U-arvo on lähes puolet pienempi.

Alustavista rakennekuvista tarkastellaan ulkoseinän nurkkaliitos, yläpohjaliitos sekä ikkunaliitos.

4.5.1 Ulkoseinän nurkkaliitos

Passiivirakenteiden tiiveys on ensisijaisen tärkeää. Liitoksista aiheutuva lämpöhäviö pyritään tästä syystä ajamaan minimiin. Kuvassa 38 on esitetty ulkoseinien nurkkaliitoksesta muokattu laskentamalli.



KUVA 38. Yksinkertaistettu laskentamalli seinien liitosrakenteesta

Nurkkaliitos on saatu tehtyä lisäämällä vain kaksi pystytolppaa lähelle ulkopintaa. On siis syytä olettaa, että nurkkaliitos ei aiheuta merkittävää lisäkonduktanssia ulkovaipalle. Laskentamalli ja parametrit asetettiin Comsoliiin, kuten aikaisemmissa laskentatapauksissa. Alla on laskentaohjelmasta saadusta koko rakenteen lämpövirrasta vähennetty seinän U-arvoilla laskettu lämpövirta.

$$\Psi = 0,2040 \text{ W/mK} - 2 \times (0,0903 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1 \text{ m}) = \mathbf{0,02340 \text{ W/mK}}$$

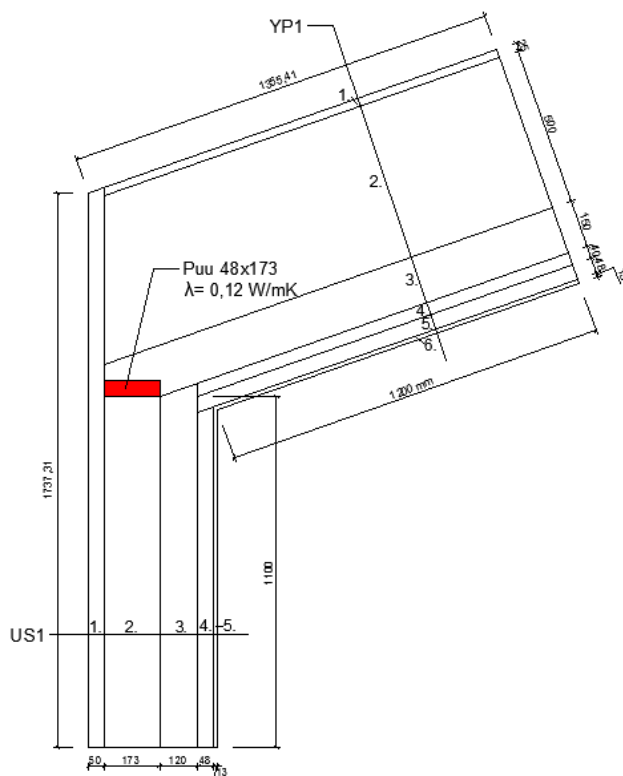
4.5.2 Yläpohjaliitos

Yläpohja rakentuu puuristikoiden varaan. Ristikot on asennettu perinteiseen tapaan puurunkoseinän yläjuoksun päälle. Tarkkaa rakennekuvaa ei ristikoista ollut vielä tämän työn suoritushetkellä tarjolla, joten tarvittavat mitat jouduttiin itse määrittelemään yläpohjan tehollista U-arvoa laskettaessa. Ristikoiden jakoluvuksi oletettiin 900 mm ja paksuudeksi 50 mm. Myös yläpohjan eristämiseen on käytetty SPU:ta perinteisen mineraalivillan lisäksi. Taulukossa 15 on esitetty yläpohjan U-arvon muodostuminen ja lämpötilaparametrit.

TAULUKKO 15. YP1:n rakennekerrokset, lämpötilaparametrit ja koko rakenteen U-arvo

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_U [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Tuulensuojalevy - Runkoleijona	0,025	0,0560	0,4464
2.	Puhallusvilla, Ekovilla + ristikko 50x500 k900	0,500	0,039 + 0,12 = 0,0435	11,4943
3.	Mineraalivilla, Paroc Extra plus +50x150 ristikko k900	0,150	0,034 + 0,12 = 0,03878	3,8680
4.	SPU	0,040	0,0230	1,7391
5.	Tuulettumaton ilmarako + Koolaus 48x48 k400	0,048	0,300 + 0,12 = 0,2784	0,1727
6.	Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1000
	ΣR			17,922
	U-arvo [W/m²K]			0,0558

Yläpohjan ja ulkoseinän välisestä liitosrakennekuvasta muokattu laskentamallikuva on esitetty alla olevassa kuvassa 39.



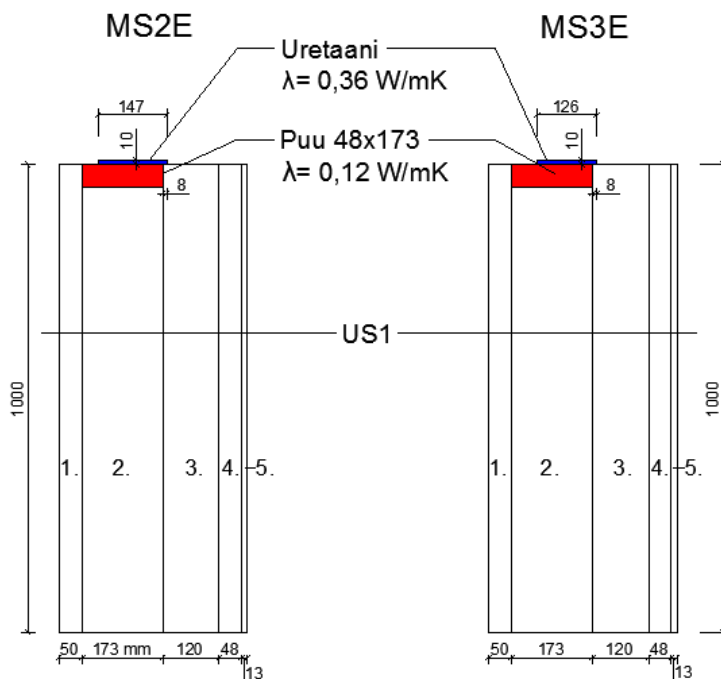
KUVA 39. Yksinkertaistettu laskentamalli seinän ja yläpohjan liitosrakenteesta

Malli asetetaan laskentaohjelmaan, minkä jälkeen lasketusta todellisesta lämpövirrasta vähennetään yläpohjan ja seinän U-arvoilla laskettu lämpövirta. Alla on laskennasta saatu tulos.

$$\Psi = 0,1905 \text{ W/mK} - 0,0903 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,1 \text{ m} - 0,0558 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,2000 \text{ m} \\ = \mathbf{0,02421 \text{ W/mK}}$$

4.5.3 Ikkunaliitokset

Passiivirakennus vaatii myös ikkunoilta parempaa U-arvoa. Kohteen ikkunat olivat vielä tämän työn teko hetkellä kehitteillä, mutta liitoksesta oli jo joitain valmiita versioita tarjolla. Tarkastelu suoritettiin kahdella eri ikkunatyypillä ja laskennallisella karmisyyvyydellä. Molemmista tehtiin lisäksi kolme eri versiota riippuen karmin sijainnista. Oli syytä olettaa, että käytettävä ikkunatyyppi olisi joko MS2E tai MS3E, koska näillä tyypeillä päästään yleensä muita parempiin U-arvoihin. Karmisyyvyys oli alustavien liitoskuvien mukaan 210 mm, joten laskennallinen karmisyyvyys on MS2E-ikkunalle 147 mm ja MS3E-ikkunalle 126 mm. Kuvassa 40 on esitetty laskentamalli ikkunaliitoksista.



KUVA 40. Ikkunaliitosten laskentamallikuvat

Laskentamenetelmä on sama yksinkertaistettu menetelmä, jota on käytetty tässä työssä muidenkin rakennusten ikkunaliitosten laskennassa. Ikkuna korvataan adiabaattireunaehdolla ja karmisyvyytenä käytetään laskennallista karmisyvyyttä (taulukko 4, s. 30), joka riippuu käytetystä ikkunatyypistä. Todellinen lämpövirtaus (L_{2D}) lasketaan Comsolilla käyttäen US1:n (taulukko 14, s. 55) ja kuvan 40 mukaisia lämpötilaparametreja. Todellisesta lämpövirrasta vähentämällä seinän U-arvolla laskettu lämpövirta saadaan liitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi. Alla olevassa taulukossa 16 on esitetty laskennasta saadut tulokset.

TAULUKKO 16. Rakennus E:n ikkunaliitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi riippuen ikkunatyypistä ja karmin sijainnista

ikkunatyyppe	Karmin etunurkan etäisyys apukarmin etunurkasta	Lämpötekkninen kytkentäkerroin L_{2D} [W/mK] (COMSOL)	Lisäkonduktanssi Ψ [W/mK]
MS2E	8 mm (kts. kuva 30.)	0,1308	0,0396
MS2E vers. 2.	120 mm	0,1259	0,0347
MS2E vers. 3.	181 mm	0,1307	0,0395
MS3E	8 mm (kts. kuva 30.)	0,1354	0,0442
MS3E vers. 2.	120 mm	0,1298	0,0386
MS3E vers. 3.	181 mm	0,1372	0,0460

5 TULOKSIEN VERTAILU

Kuten jo edellä todettiin, voi liitosten välisiä lisäkonduktansseja laskea monella eri menetelmällä. Yksi mahdollisuus on käyttää erilaisia ohjeartavotaulukoita. Alla olevassa taulukossa 17 liitoksista aiheutuva lisäkonduktanssi on taulukoitu runkomateriaalin mukaan. Taulukko löytyy vuoden 2012 rakennusmääräyskokoelman osasta D5 sekä Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaasta. Ohjeartavotaulukoiden käyttäminen laskettaessa rakennuksen energiatehokkuutta on kuitenkin hieman kyseenalaista, sillä niille määritelty tyypillinen tarkkuus on 0 % – 50 %. (1, s. 11.)

TAULUKKO 17. Ohjeartavotaulukko viivamaisten kylmäsiltojen lisäkonduktanssille

Liitos	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(mK)					
	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.

Ylä- väli- ja alapohjan liitos ulkoseinään

Ulkoseinän runkomateriaali	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(mK)									
	Yläpohjan runkomateriaali			Väli- ja alapohjan 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

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa esitetyissä esimerkkilaskuissa käytettiin numeerista laskentamenetelmää, jonka tarkkuudeksi on määritelty ± 5 % standardin SFS-EN ISO 14683 mukaan (1, s. 11). Samaa menetelmää käytettiin myös tässä työssä. Laskentaoppaassa selvisi, että lähes kaikissa lasketuissa esimerkeissä numeerisella menetelmällä

laskettu lisäkonduktanssin määrä oli pienempi kuin vastaavilla runkomateriaaleilla toteutetun liitoksen ohjeartaulukon antama lisäkonduktanssin määrä. Tämä käy järkeen, sillä taulukkoarvot on varmastikin tarkoituksella määritelty hieman yläkanttiin, eli varmalle puolelle.

Tämän työn yksi tavoitteista oli tutkia pysyvätkö numeerisella laskentamenetelmällä lasketut lisäkonduktanssit taulukkoarvojen alapuolella myös uusien rakennusmääräysten mukaan rakennetuissa matalaenergia- ja passiivirakennuksissa. Tuloksia verrataan kaikissa seuraavien osioiden taulukoissa ohjeartoihin (taulukko 17) laskemalla niiden välinen erotus. Laskennan tuloksista vähennetään ohjeartvo. Erotus tulisi olla negatiivinen (punainen luku), jotta ohjeartvoille määritelty tarkkuus (0% - 50 %) pitäisi paikkansa.

5.1 Rakennus A:n tulokset

Talon on kokonaan puurakenteinen. Alla on taulukoitu yhteenveto rakennus A:n liitosrakenteista lasketuista lisäkonduktanssin arvoista. (Taulukko 18.)

TAULUKKO 18. Rakennus A:n laskentatuloksien vertailua ohjeartvoihin

	Lisäkonduktanssi [W/mK]	Ohjeartaulukko D5 2012 [W/mK]	Erotus [W/mK]	Huom.
Rakennus A				
US-nurk	0,0353	0,0400	-0,0047	
US-YP	0,0301	0,0500	-0,0199	
US-VP	0,0084	0,0500	-0,0416	
Alakarmi 1.	0,0532	0,0400	0,0132	
Alakarmi 2.	0,0633	0,0400	0,0233	Karmi siir. kiinni sisäpintaan
Alakarmi 3.	0,0586	0,0400	0,0186	Karmi siir. ulospäin
Yläkarmi 1.	0,0693	0,0400	0,0293	
Yläkarmi 2.	0,0827	0,0400	0,0427	Karmi siir. kiinni sisäpintaan
Yläkarmi 3.	0,0712	0,0400	0,0312	Karmi siir. ulospäin

Taulukosta nähdään, että rakennus A:n laskentatulokset ovat hieman kaksijakoiset. Ala- ja yläkarmien ensimmäiset versiot ikkunaliitoksissa ovat rakennekuvien mukaiset versiot ja muut vertailutapauksia. Tämän tutkimuksen

perusteella karmen ja seinän välinen liitos on parhaimmillaan, kun se on rakennekuvien mukainen. Siirrettäessä karmia ulos- tai sisäänpäin alkaa lisäkonduktanssi laskennassa nousta, eli liitos huononee. Ikkunaliitoksien tulokset ovat kauttaaltaan yli ohjearvotaulukoon asetetun arvon puurunkoseinän ja ikkunan väliselle liitokselle, kun karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta. Ikkunaliitokset on laskettu käyttäen yksinkertaistettua laskentamenetelmää, joka hieman heikentää laskennan tarkkuutta.

Ulkoseinään liittyvien muiden rakennusosien liitoksista lasketut lisäkonduktanssit jäävät ohjearvojen alle. Ylä- ja välipohjassa jopa melko reilusti. Yksi syy tähän voi olla ulkoseinärakenteessa käytetty poikkeuksellisen paksu (100 mm) ja hyvin lämpöä eristävä tuulensuojalevy. Päätelmän voi tehdä, kun vertaa rakennus A:n ja B:n tuloksia ja rakenteita toisiinsa. Rakennus B:n tuulensuojalevy on 25 mm paksu ja lämmöneristävyyskin on huonompi.

5.2 Rakennus B:n tulokset

Kyseessä on A:n tapaan puurakenteinen talo. Rakennusten välillä suurin ero on ulkoseinän U-arvossa, mikä on A:ssa selkeästi parempi. Liitosrakenteissa on myös hieman eroavaisuuksia. Alla on taulukoitu kooste rakennus B:n liitosten laskennasta saaduista tuloksista ja vertailua ohjearvotaulukon arvoihin. (Taulukko 19.)

TAULUKKO 19. Rakennus B:n laskentatuloksien vertailua ohjearvoihin

	Lisäkonduktanssi [W/mK]	Ohjearvotaulukko D5 2012 [W/mK]	Erotus [W/mK]	Huom.
Rakennus B				
US-nurk.	0,0418	0,0400	0,0018	
US-YP	0,0453	0,0500	-0,0047	
US-VP	0,0394	0,0500	-0,0106	
Ikkunaliitos 1.	0,0432	0,0400	0,0032	Karmi siir. kiinni sisäpintaan
Ikkunaliitos 2.	0,0340	0,0400	-0,0060	Karmi siir. 89 mm ulospäin
Ikkunaliitos 3.	0,0380	0,0400	-0,0020	Karmi siir. 170 mm ulospäin

Tässäkin tapauksessa karmille paras sijoituspaikka kylmäsiltoja ajatellen on keskellä seinärunkoa. Lisäkonduktanssin arvo on jopa alle ohjearvotaulukon

antaman arvon. Tulokset ovat parempia ikkunoiden osalta kuin rakennus A:ssa johtuen erilaisesta ikkunatyypistä ja sitä kautta erilaisesta laskennallisesta karmisyvyydestä. Paras paikka karmille näiden tulosten pohjalta näyttäisi olevan noin 10 cm:n päässä seinän sisäpinnasta. Siirryttäessä enemmän ulospäin lisäkonduktanssin määrä kääntyy nousuun.

Nurkkaliitoksen arvo on hieman yli ohjearvon, mutta ylä- ja välipohjan arvot taas hieman alle. Liitosgeometriat ovat A:lla ja B:llä hyvin samankaltaiset, joten ero lisäkonduktanssien välillä syntyy pääasiassa rakenteiden U-arvoeroista.

5.3 Rakennus C:n tulokset

Lähtökohdiltaan rakennus C on sen verran poikkeava kaikilta osin kahteen ensimmäiseen verrattuna, että keskenäistä vertailua ei juurikaan pystytä tekemään. Osa liitosrakenteista oli sen verran erikoisia, että vertailevaa arvoa ei löytynyt edes ohjearvotaulukosta. Alla on taulukoitu kooste rakennus C:n liitosten laskennasta saaduista tuloksista ja vertailua ohjearvotaulukon arvoihin. (Taulukko 20.)

TAULUKKO 20. Rakennus C:n laskentatuloksien vertailua ohjearvoihin

	Lisäkonduktanssi [W/mK]	Ohjearvotaulukko D5 2012 [W/mK]	Erotus [W/mK]	Huom.
Rakennus C				
US-nurk. Ulko	0,0541	0,0500	0,0041	Hirsiseinä
US-nurk. Sisä	-0,1762	-0,0500	-0,1262	Hirsiseinä
US2-US3 ulkonurkka	0,0342	0,0400	-0,0058	Pystyrunkoseinät
US1-YP1	0,0345	0,0400	-0,0055	
US2-YP1/VP	0,0305	?	?	
US2-YP2	0,0295	0,0500	-0,0205	
Alakarmi 1.	0,0542	0,0700	-0,0158	MSE, karmi kiinni sisäpinn.
2.	0,0437	0,0700	-0,0263	MSE, " keskellä hirttä
3	0,0227	0,0700	-0,0473	MSE, " kiinni ulkopinnassa
Yläkarmi 1.	0,0337	0,0700	-0,0363	MSE, " kiinni sisäpinn.
2.	0,0196	0,0700	-0,0504	MSE, " keskellä hirttä
3.	0,0152	0,0700	-0,0548	MSE, " kiinni ulkopinnassa
Alakarmi 1.	0,0556	0,0700	-0,0144	MEK, karmi kiinni sisäpinn.
2.	0,0446	0,0700	-0,0254	MEK, " keskellä hirttä
3	0,0421	0,0700	-0,0279	MEK, " kiinni ulkopinnassa
Yläkarmi 1.	0,0521	0,0400	0,0121	MEK, " kiinni sisäpinn.
2.	0,0486	0,0400	0,0086	MEK, " keskellä hirttä
3.	0,0459	0,0400	0,0059	MEK, " kiinni ulkopinnassa

Hirsikehikon nurkkaliitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi saatiin todella lähelle ohjearvotaulukon antamaa arvoa. Muuten tulokset ovat hyvin johdon mukaisesti alle ohjearvotaulukon antamien arvojen.

5.4 Rakennus D:n tulokset

Ladottavista betoniharkoista rakennettu rakennus D:n ulkoseinän U-arvo on laskentakohteista heikoin heti hirsiseinän jälkeen. Tulokset laskennasta jäävät lähes kautta linjan ohjearvotaulukon arvojen alle. Alla olevassa taulukossa on verrattu rakennus D:n laskentatuloksia ohjearvoihin. (Taulukko 21.)

TAULUKKO 21. Rakennus D:n laskentatuloksien vertailua ohjearvoihin

	Lisäkonduktanssi [W/mK]	Ohjearvotaulukko D5 2012 [W/mK]	Erotus [W/mK]	Huom.
Rakennus D				
US-nurk. Ulko	0,0620	0,0600	0,0020	
US-nurk. Sisä	-0,0743	-0,0600	-0,0143	
US-YP, alanurk.	0,0468	0,0400	0,0068	
US-YP, ylänurk.	0,0535	0,0400	0,0135	
US-VP	0,0043	?	?	
Ikkuna - alakarmi	0,0701	0,0400	0,0301	
Alakarmi v2.	0,1308	0,0400	0,0908	Karmi sisäpinnassa
Alakarmi v3.	0,0560	0,0400	0,0160	Karmi ulkopinnassa
Yläkarmi 1.	0,2575	0,0400	0,2175	
Yläkarmi 1. v.2	0,0719	0,0400	0,0319	Karmi sisäpinnassa
Yläkarmi 1. v.3	0,0918	0,0400	0,0518	Karmi ulkopinnassa
Yläkarmi 2.	0,0324	0,0400	-0,0076	Ilman aukkopalkkia
Sivukarmi	0,0712	0,0400	0,0312	
Sivukarmi v.2	0,1267	0,0400	0,0867	Karmi sisäpinnassa
Sivukarmi v.3	0,0627	0,0400	0,0227	Karmi ulkopinnassa

Puurakenteisen yläpohjan ja betoniharkkoseinän liitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi on molemmissa laskentatapauksissa yli ohjearvojen. Laskentatulokset jäävät ohjearvojen alle, vaikka niistä vähennettäisiin numeerisen laskennan virhemarginaali (5 %). Sama tilanne on ikkunaliitoksissa.

Ikkunalle paras paikka näyttäisi näiden laskujen perusteella olevan lähempänä seinän ulkopintaa. Sisäänpäin mentäessä taas lisäkonduktanssin määrä kasvaa kaikissa muissa tapauksissa paitsi yläkarmissa, jossa on mukana ikkunanylityspalkit.

5.5 Rakennus E:n tulokset

Kyseessä on suunnitteilla oleva puurankatalo, jonka on valmistuessaan tarkoitus täyttää passiivitalon vaatimukset. Tästä syystä oli mielekästä ottaa kolmas puurankatalo tähän työhön. Tuloksista voidaan katsoa paljonko vaipan U-arvon parantaminen ja sitä kautta sen poikkipinta-alan kasvatus vaikuttaa tarkastelussa olevien liitostyyppien viivamaiseen lisäkonduktanssiin.

Taulukossa 22 on esitetty rakennus E:n kootut tulokset, joita on vertailtu muiden tulosten tapaan vastaaviin ohjearvoihin.

TAULUKKO 22. Rakennus E:n laskentatuloksien vertailua ohjearvoihin

	Lisäkonduktanssi [W/mK]	Ohjearvotaulukko D5 2012 [W/mK]	Erotus [W/mK]	Huom.
Rakennus E				
US-nurk. Ulko	0,0234	0,0400	-0,0166	
US-YP, alanurk.	0,0242	0,0500	-0,0258	
US-YP, ylänurk.		0,0400		
Ikkuna MS2E vers.1	0,0396	0,0400	-0,0004	Rakennekuvan mukainen
Ikkuna MS2E vers.2	0,0347	0,0400	-0,0053	Karmia siirretty +112 mm
Ikkuna MS2E vers.3	0,0395	0,0400	-0,0005	Karmia siirretty +173 mm
Ikkuna MS3E vers.1	0,0442	0,0400	0,0042	Rakennekuvan mukainen
Ikkuna MS3E vers.2	0,0386	0,0400	-0,0014	Karmia siirretty +112 mm
Ikkuna MS3E vers.3	0,0460	0,0400	0,0060	Karmia siirretty +173 mm

Tuloksista voidaan nähdä, että ulkoseinien nurkkaliitos on selvästi muita tässä työssä tarkasteltuja puurunkoratkaisuja parempi. Sama voidaan sanoa yläpohjan ja seinärungon välisestä liitoksesta sekä ikkunaliitoksista. Eroja voidaan selittää seinän U-arvolla, mikä on rakennus E:llä selvästi paras. Lisäksi erityisesti ulkoseinien nurkkaliitoksessa on syytä miettiä liitoksen geometrian vaikutusta syntyvään lisäkonduktanssiin.

Ikkunaliitosten tuloksista voidaan jälleen kerran huomata, että karmin sijoituksella on hieman merkitystä lisäkonduktanssin määrään. Paras paikka karmille tässä kohteessa näyttäisi olevan ikkunatyypistä riippumatta noin 10 cm sisempänä mitä rakennekuvissa on määrätty. Siirryttäessä tästä enemmän sisäpintaa kohti näyttäisi lisäkonduktanssi kääntyvän nousuun. Kaiken kaikkiaan ikkunaliitoksista saadut tulokset ovat kaikki hyvin lähellä ohjearvoja.

Ikkunaliitoksissa tilkeaineena käytetään yleensä uretaania. Rakennus E:n ikkunaliitoksissa on uretaanin lämmönjohtavuuden arvona käytetty 0,36 W/mK ja muissa kohteissa 0,25 W/mK. Jos rakennus E:n ikkunaliitokseen vaihdetaan tilkkeen lämmönjohtavuudeksi 0,25, niin lisäkonduktanssi tipahtaa reilut 10 %.

6 POHDINTA

Lisäkonduktansseja laskettaessa on syytä muistaa, että lähes kaikissa tuloksissa puhutaan tuhannesosaluvuista. Tästä syystä laskenta on erittäin pikkutarkkaa työtä. Pienikin muutos tai virhe rakenteen geometriassa tai käytettävissä parametreissa saattaa heilauttaa tulosta toista kymmentä prosenttia. Tämä kannattaa ottaa huomioon, kun esimerkiksi tämän työn tuloksia ja niiden oikeellisuutta arvioidaan.

Uudisrakentamisen energiatehokkuusvaatimukset ovat kasvaneet viime vuosina merkittävästi ja tulevat sitä tekemään myös tulevaisuudessa. Vuonna 2020 tavoitellaan jo nollaenergiatasoa kaikessa uudisrakentamisessa. Näihin tavoitteisiin pääseminen edellyttää jatkuvia ponnisteluja suunnittelun ja toteutuksen kehittämiseksi. Ennen kaikkea puhutaan hienosäädöistä monessakin suhteessa, myös rakenteiden osalta. Tämän työn tavoite oli palvella tätä tarkoitusta omalta osaltaan talonrakennusfirmojen ja suunnittelijoiden suuntaan.

Ohjearvotaulukoista saatavissa lisäkonduktanssiarvoissa on tämän työn tulosten perusteella hieman tarkistamisen varaa. Esimerkiksi tässä työssä tarkasteltuun betonirunkorakennukseen olisi saanut paremmat lisäkonduktanssiarvot Rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvotaulukosta kuin lähtökohtaisesti tarkemmalla numeerisella laskennalla. Näin sen ei kuitenkaan pitäisi mennä käsikirjoituksen mukaan. Erityisesti huomiota herättää rakennus D:n ulkoseinänurkkaus (kuva 32, s. 49), koska periaatteessa kyseessä on ihanteellinen rakenne kylmäsiltoja tarkasteltaessa. Tästä huolimatta numeerinen laskenta antaa liitokselle 15 % ohjearvoa suuremman arvon.

Toisaalta puurankarakennuksista saadut tulokset olivat lähes kautta linjan johdonmukaisia verrattuihin ohjearvoihin nähden. Lisäksi puurankarakenteita voi aina parantaa käyttämällä enemmän ja paremmin lämpöä pitäviä eristeitä ja suunnittelemalla vähemmän kylmäsiltoja aiheuttavia liitosrakenteita.

Ikkunaliitoksista saadut tulokset ovat melko kaksijakoiset.

Puurankarakennuksien ikkunaliitoksista saadut lisäkonduktanssien arvot olivat lähes kaikki yli ohjearvojen. Syytä tähän on vaikea arvioida, kun tarkkaa tietoa ohjearvojen määritysten perusteista ei ole saatavilla. Toisaalta tämän työn ikkunaliitokset tarkasteltiin yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä, joka on lähtökohtaisesti hieman huonompi tarkkuuden suhteen. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa lasketut esimerkit saatiin kyllä alle ohjearvojen, mutta esimerkiksi karmitilkkeen lämmönjohtavuuden arvona käytettiin paljo parempaa arvoa, mitä tämän työn laskuissa käytettiin. Niinkin pienillä asioilla saattaa näissä laskuissa olla merkitystä. Ikkunaliitosten laskentatuloksista saatiin kuitenkin hyödyllistä palautetta karmin sijainnin merkityksestä lisäkonduktanssin määrään. Näyttää siltä, että paras paikka karmille riippuu tapauskohtaisesta runkoratkaisusta.

LÄHTEET

1. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=141421&lan=fi> . Hakupäivä 18.2.2013. Helsinki: Ympäristöministeriö.
2. Lämmöneristys. 2003. Suomen Rakennusmääräyskokoelma C4. Helsinki: Ympäristöministeriö.
3. RIL 155. 1984. Lämmön- ja kosteuden eristys. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Esimerkki

Rakennus A, US1.

#	Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/mK]	Lämmönvastus R [(m ² K)/W]
	Ulkopintavastus			0,0400
1.	Tuulensuoja Isover RKL-31 Facade	0,100	0,0310	3,2258
2.	Kipsilevy	0,009	0,2100	0,0429
3.	Puurunko 48x197 mm k600 + Mineraalivilla Isover KL-33	0,197	0,12 + 0,033 = 0,03996	4,9299
4.	Vaakakoolaus 47x47 mm k600 + Mineraalivilla Isover KL-33	0,047	0,12 + 0,033 = 0,039815	1,1805
5.	Kipsilevy	0,013	0,2100	0,0619
	Sisäpintavastus			0,1300
	ΣR			9,6110
	U-arvo [W/m²K]			0,1040

Lämmönvastus on laskettu jokaisesta rivistä jakamalla kerrospaksuus lämmönjohtavuudella.
esim. kerros #1. $0,1 \text{ m} / 0,0310 \text{ W/mK} = 3,2258 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

Toiseksi viimeisellä rivillä taulukossa on laskettu yhteen kaikkien kerrosten lämmönvastukset (ΣR).

U-arvo on laskettu jakamalla luku 1 yhteenlasketulla lämmönvastuksen luvulla, $U = 1/\Sigma R$.

Epätasa-aineisen rakennusosan lämmönvastuksen laskenta (2, s. 5)

Lasketaan niille rakennusosille, joilla on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia osa-alueita.

Nämä rakennusosat näkyvät kaikissa taulukossa vihreällä väripohjalla.

$$1/R_j = f_a/R_{aj} + f_b/R_{bj}$$

f_a, f_b = epätasa-aineisessa ainekerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen a ja b suhteellinen osuus ainekerroksen kokonaispinta-alasta

R_{aj}, R_{bj} = epätasa-aineisessa kerroksessa j olevan tasa-aineisen osa-alueen a ja b lämmönvastus

Kerros #3.	λ_U [W/mK]
Runkotolpat 48x197 mm k600	0,12
Mineraalivilla Isover KL-33	0,033

$f_a = 48 \text{ mm}/600 \text{ mm} =$	0,08
$R_{aj} = 197 \text{ mm}/1000/0,12 \text{ W/mK} =$	1,641667 (m ² K)/W
$f_b = 552 \text{ mm}/600 \text{ mm} =$	0,92
$R_{bj} = 197 \text{ mm}/1000/0,033 \text{ W/mK} =$	5,969697 (m ² K)/W

$$1/R_j = f_a/R_{aj} + f_b/R_{bj} = 0,20284264 \quad 1/(m^2K)/W$$

$$R_j = 1/0,20284264 = 4,92992993 \quad (m^2K)/W$$

$$\lambda_j = 197 \text{ mm}/1000/R_j = 0,03996 \quad [W/mK]$$

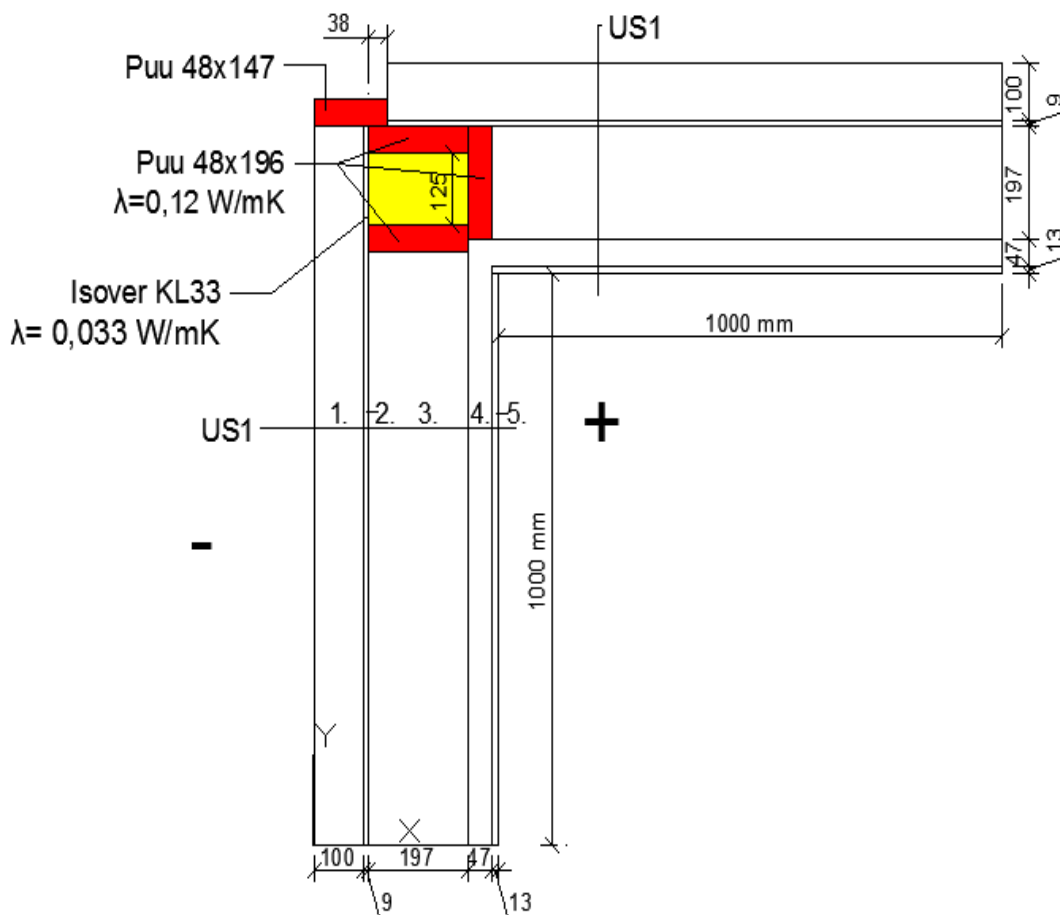
Ilmakerroksen lämmönvastus (2, s. 16 - 17)

Suljettujen ilmapäliin muodostamien ainekerrosten lämmönvastuksen arvot on saatu C4:sta (Taulukko 3.) Lämmönjohtavuus valitaan taulukosta lämpövirran suunnan ja ilmapäliin paksuuden perusteella. Jos ainekerroksessa on myös puukoolaus, niin kuin yleensä on, niin silloin ainekerroksen lämmönvastus lasketaan yllä olevan epätasa-aineisen rakennusosan lämmönvastuksen laskentamenetelmällä.

Ilmapäliin paksuus määritellään taulukossa lämihämmän arvon mukaan.

Lisäkonduktanssin laskenta

Rakennus A, US-nurkk.



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,24332 \text{ W/(mK)}.$$

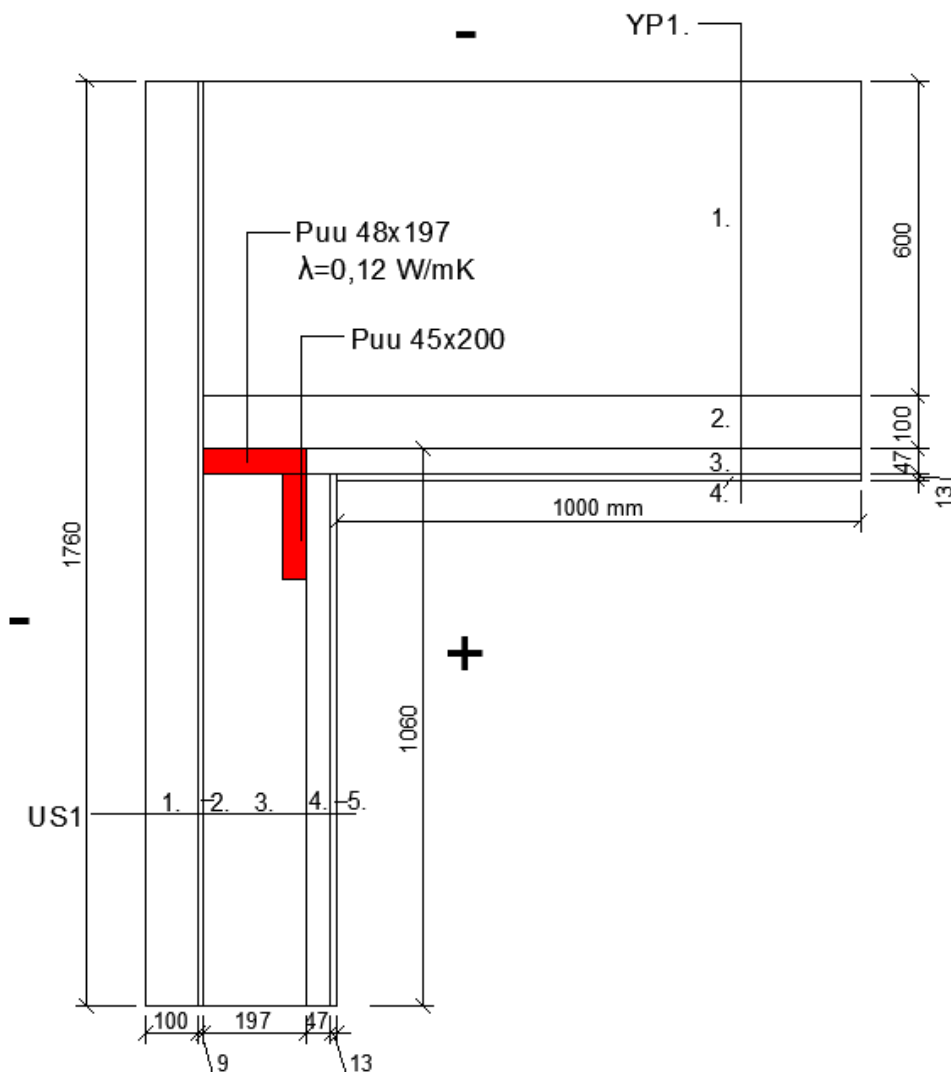
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,24332	0,1040	1,00

$$\psi = L_{2D} - 2 \times (U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}})$$

$$\psi = 0,24332 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1 \text{ m}) = \mathbf{0,03532 \text{ W/(mK)}}$$

Yläpohjaliitos



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$L_{2D} = 0,1941 \text{ W/(mK)}$.

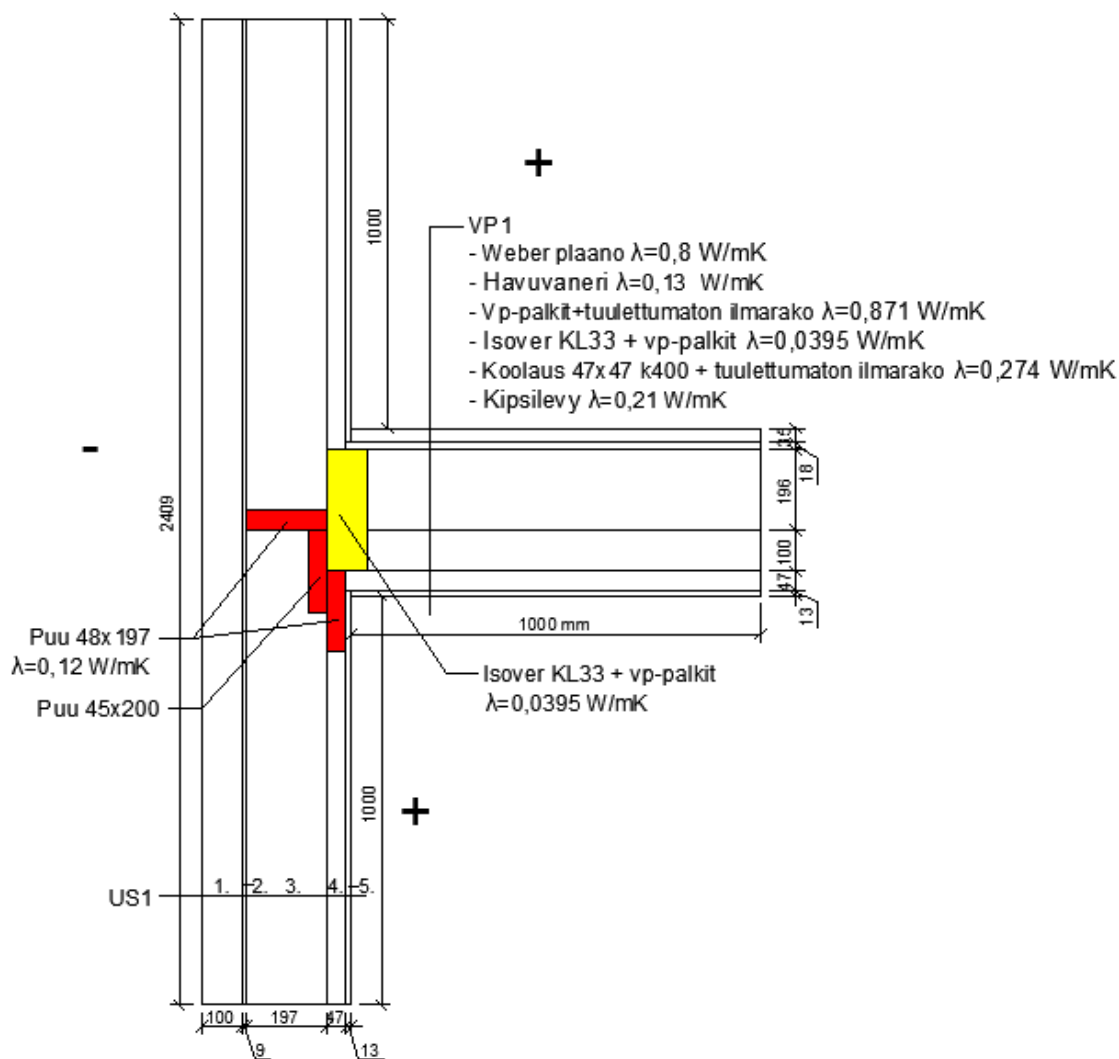
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä		Yläpohja	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,24332	0,1040	1,06	0,0538	1,00

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,1941 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,06 \text{ m} - 0,0538 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m} = \mathbf{0,03006 \text{ W/mK}}$$

Välipohjaliitos



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniiseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,25896 \text{ W}/(\text{mK}).$$

Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

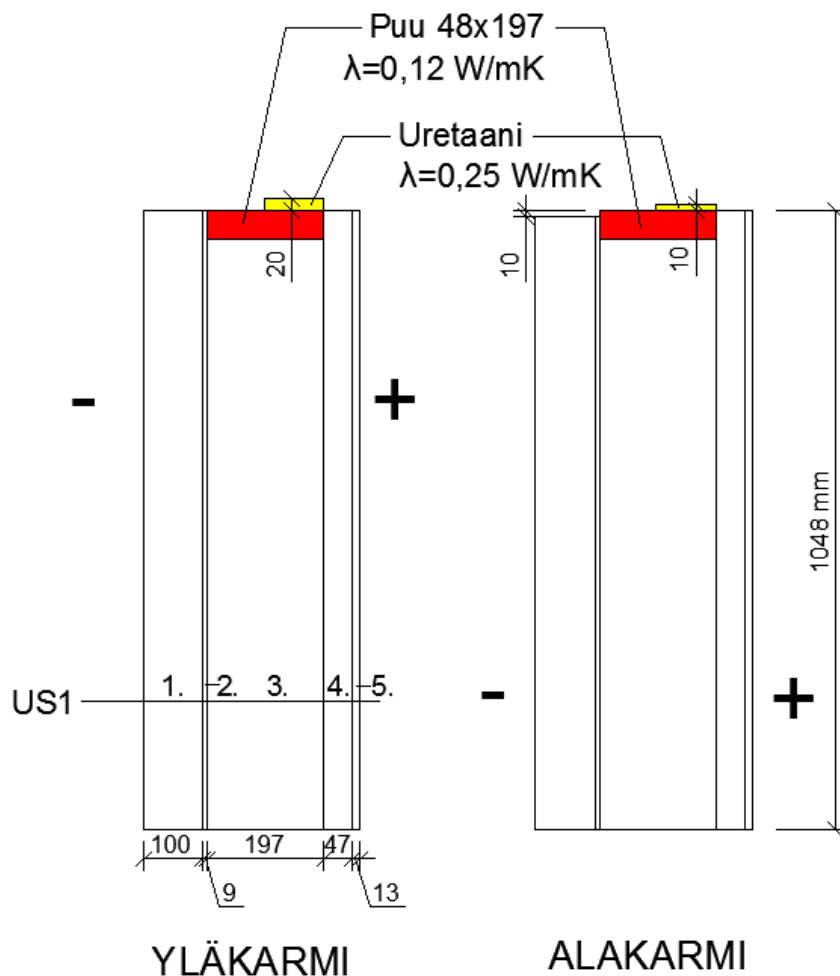
L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,25896	0,1040	2,41

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

$$= 0,25896 \text{ W}/\text{mK} - 0,1040 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 2,41 \text{ m} = \mathbf{0,0084 \text{ W}/\text{mK}}$$

Ikkunaliitos

Vers. 1.



Ikkunoiden laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

L _{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,16324	0,1040	1,058

Yläkarmi

L _{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,18036	0,1040	1,068

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

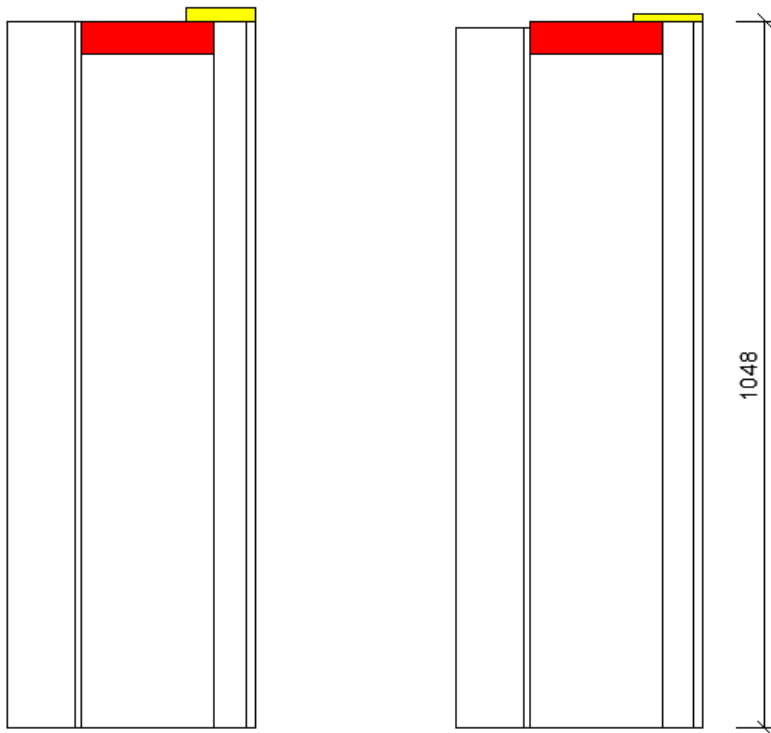
Alakarmi

$$= 0,16324 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,058 \text{ m} = \mathbf{0,05321 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,18036 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,068 \text{ m} = \mathbf{0,05321 \text{ W/mK}}$$

Vers. 2



YLÄKARMI

ALAKARMI

Laskentamalli on muuttunut vain karmin sijainnin osalta, joka tässä tapauksessa on kiinni ulkoseinän sisäpinnassa.

Ikkunoiden laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

L _{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,17336	0,1040	1,058

Yläkarmi

L _{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,19374	0,1040	1,068

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

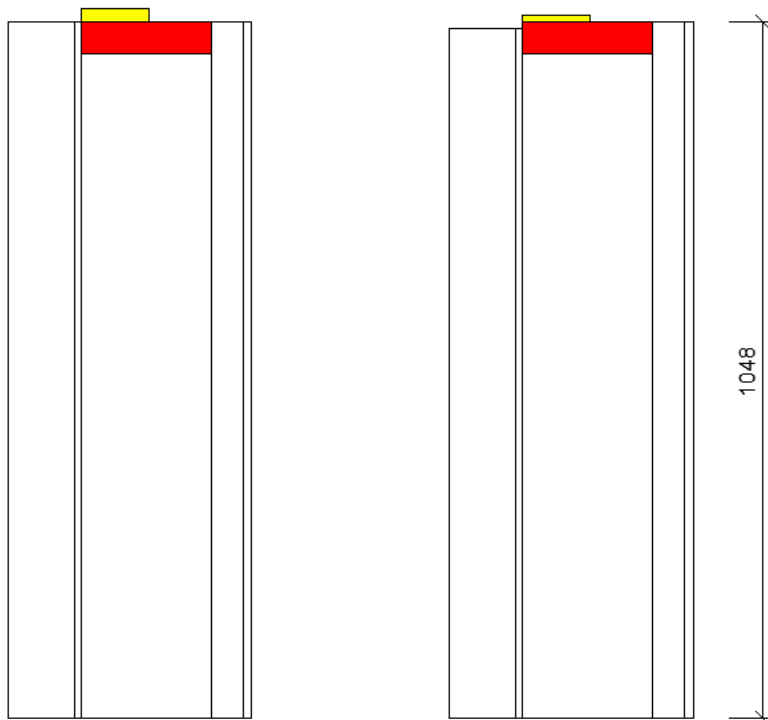
Alakarmi

$$= 0,17366 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,058 \text{ m} = \mathbf{0,063328 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,19374 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,068 \text{ m} = \mathbf{0,082668 \text{ W/mK}}$$

Vers. 3.



YLÄKARMI

ALAKARMI

Laskentamallissa muuttunut taas vain karmin sijainti, joka on tällä kertaa puurungon ulkoreunassa.

Ikkunoiden laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

L _{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,16859	0,1040	1,058

Yläkarmi

L _{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,18225	0,1040	1,068

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

Alakarmi

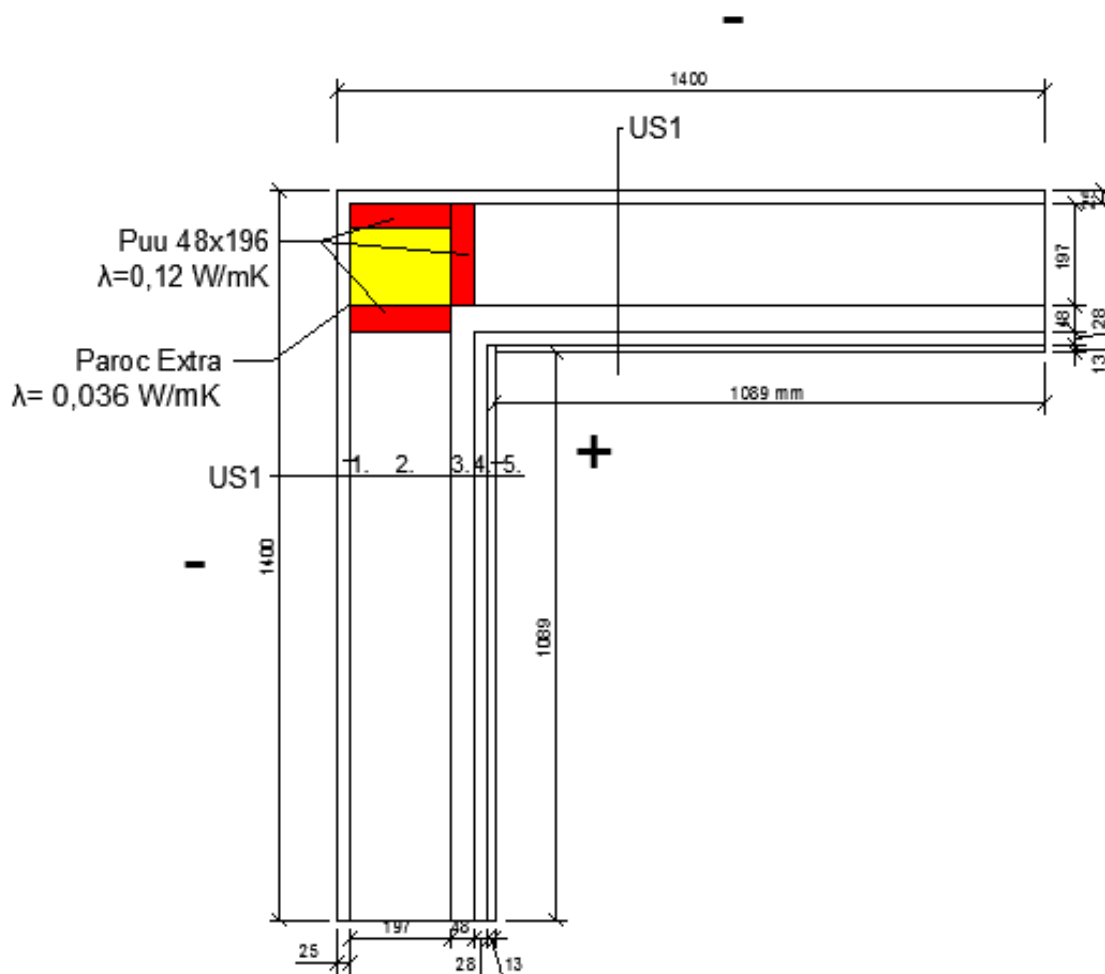
$$= 0,16859 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,058 \text{ m} = \mathbf{0,058558 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,18225 \text{ W/mK} - 0,1040 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,068 \text{ m} = \mathbf{0,071178 \text{ W/mK}}$$

RAKENNUS B.

US-nurkk.



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniiseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,3718 \text{ W}/(\text{mK}).$$

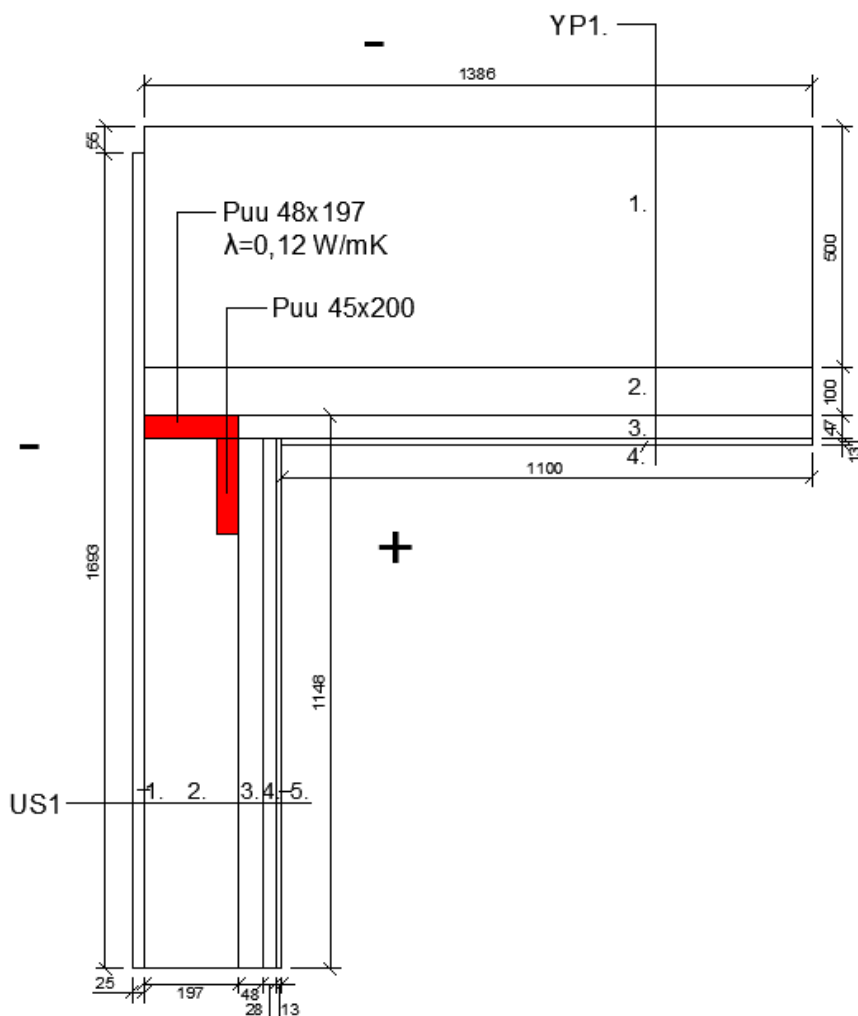
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,3718	0,1515	1,09

$$\psi = L_{2D} - 2 \times (U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}})$$

$$\psi = 0,3718 \text{ W}/(\text{mK}) - 2 \times (0,1515 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 1,09 \text{ m}) = \mathbf{0,041833 \text{ W}/(\text{mK})}$$

Yläpohjaliitos



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$L_{2D} = 0,2887 \text{ W/(mK)}$.

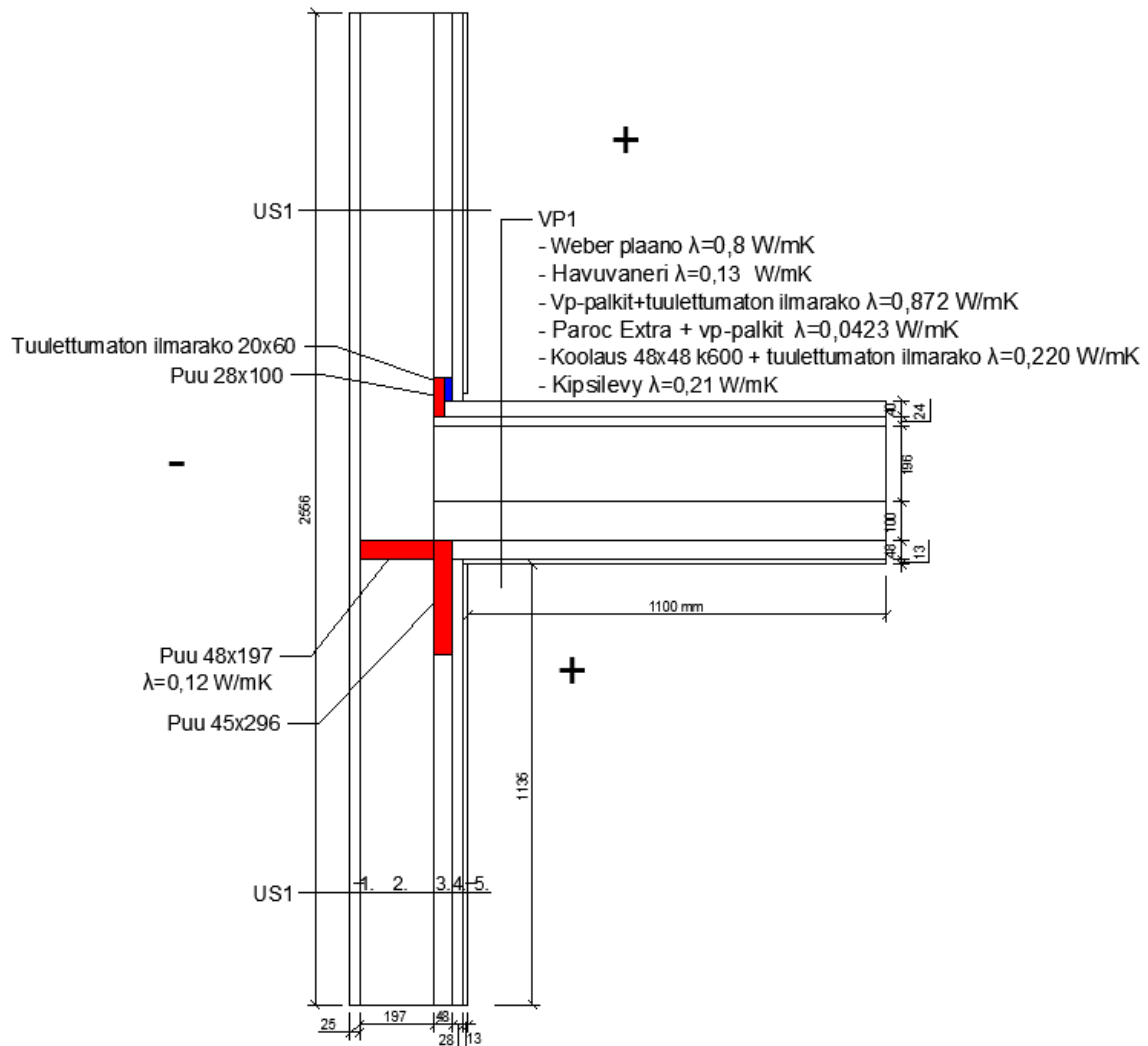
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä		Yläpohja	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,2887	0,1515	1,148	0,0631	1,10

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,2887 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,148 \text{ m} - 0,0631 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,10 \text{ m} = \mathbf{0,045318 \text{ W/mK}}$$

Välipohjaliitos



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,42668 \text{ W}/(\text{mK}).$$

Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

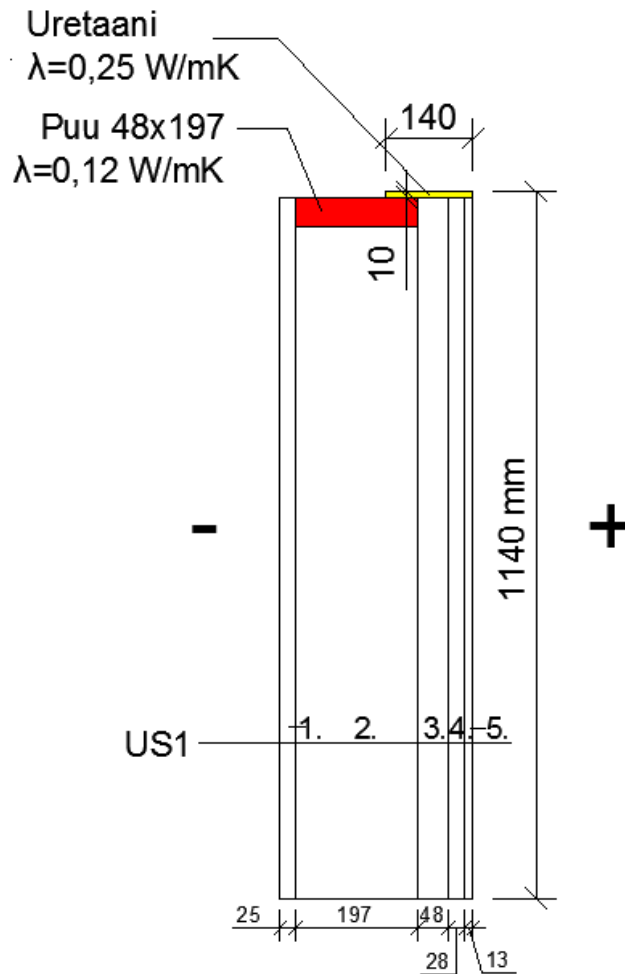
L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,42668	0,1515	2,56

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

$$= 0,42668 \text{ W}/\text{mK} - 0,1515 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 2,560 \text{ m} = \mathbf{0,039446 \text{ W}/\text{mK}}$$

Ikkunaliitos

Vers. 1.



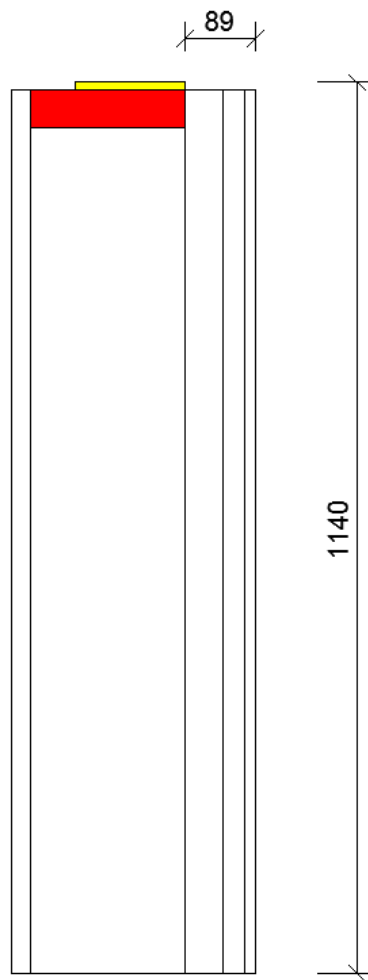
Ikkunoiden laskennan lähtökohdat näkyvät alla. Tässä tapauksessa ylä- ja alakarmi on yksi ja sama tapaus.

L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,21591	0,1515	1,140

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

$$= 0,21591 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,140 \text{ m} = \mathbf{0,04320 \text{ W/mK}}$$

Vers. 2.



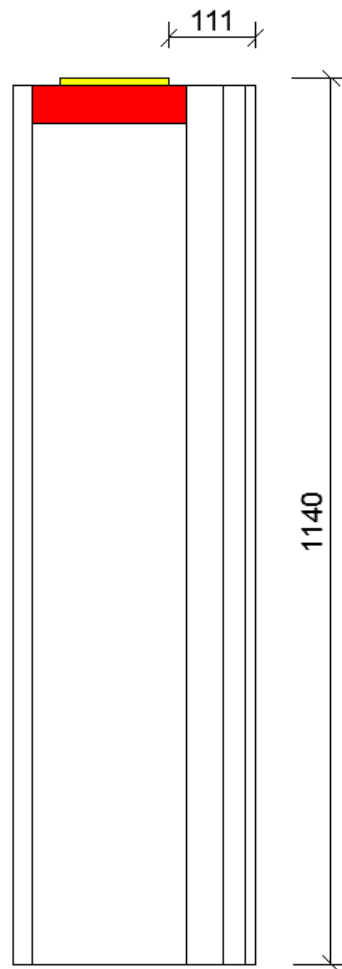
Malli on muuten sama mitä v. 1, paitsi että karmia on siirretty 89 mm ulospäin.

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,20669	0,1515	1,140

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

$$= 0,20669 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,140 \text{ m} = \mathbf{0,03398 \text{ W/mK}}$$

Vers. 3.



Malli on muuten sama mitä v. 1, paitsi että karmia on siirretty 111 mm ulospäin.

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,21071	0,1515	1,140

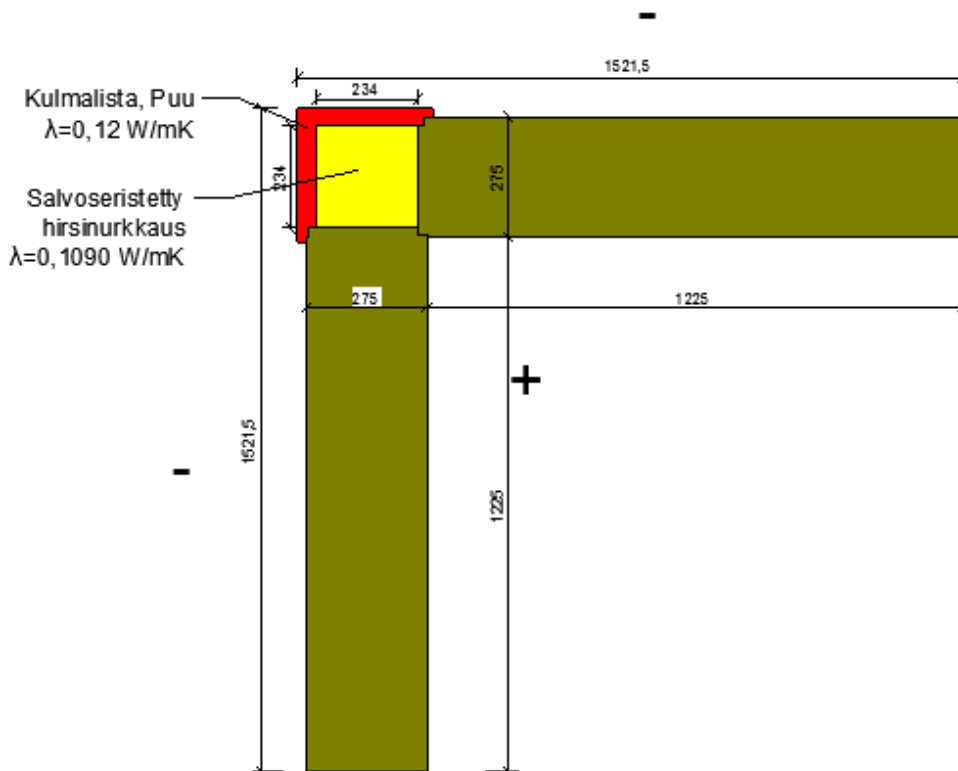
$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

$$= 0,21071 \text{ W/mK} - 0,1515 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,140 \text{ m} = \mathbf{0,03800 \text{ W/mK}}$$

RAKENNUS C.

US-nurkk.

Hirsiseinä



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi ulkonurkassa:

$$L_{2D} = 1,03415 \text{ W/(mK)}.$$

,ja sisänurkkassa

$$L_{2D} = 1,04098 \text{ W/(mK)}.$$

Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

	L _{2D} [W/mK]	Hirsiseinä	
		U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
Ulkonurk.	1,03415	0,4000	1,2250
Sisänurk.	1,04098	0,4000	1,5215

$$\psi = L_{2D} - 2 \times (U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}})$$

Ulkonurk.

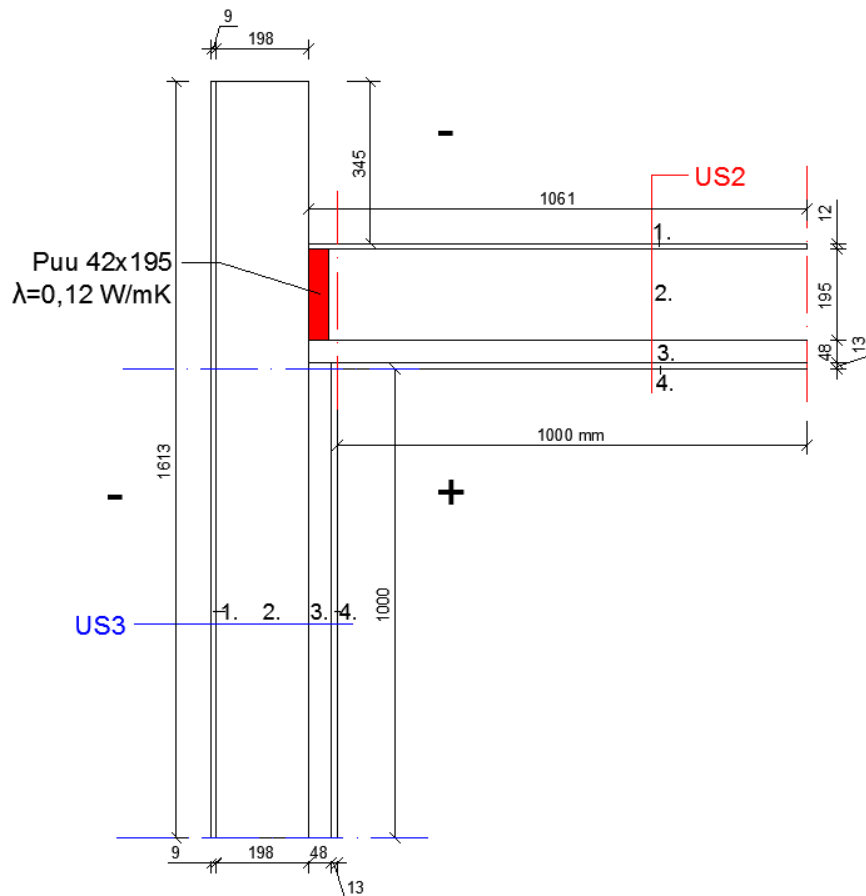
$$\psi = 1,03415 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,225 \text{ m}) = \mathbf{0,05415 \text{ W/(mK)}}$$

Sisänurk.

$$\psi = 1,04098 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,5215 \text{ m}) = \mathbf{-0,17622 \text{ W/(mK)}}$$

US-nurkk.

US3-US2



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,35729 \text{ W/(mK)}.$$

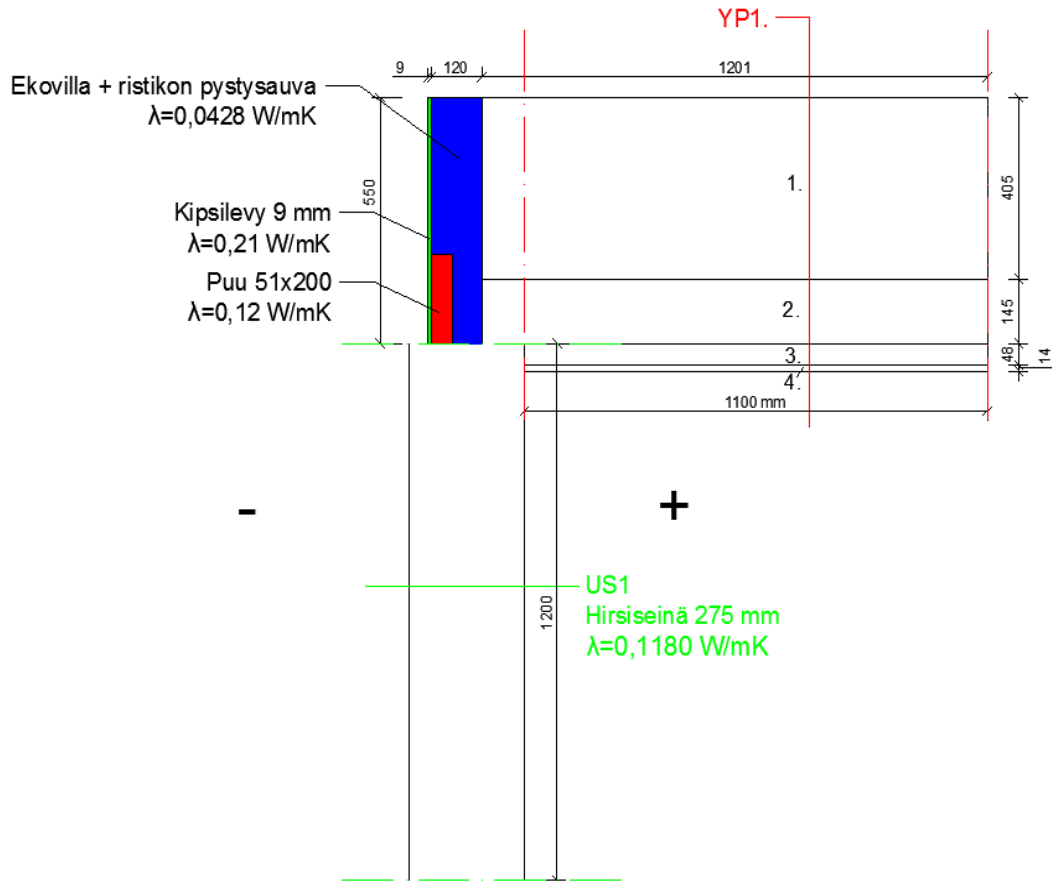
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	US2		US3	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,35729	0,1676	1,00	0,1555	1,00

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{seinä2}} \times l_{\text{seinä2}}$$

$$\psi = 0,3718 \text{ W/(mK)} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m} - 0,1555 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m} = \mathbf{0,03419 \text{ W/(mK)}}$$

Välipohjaliitos



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,59081 \text{ W}/(\text{mK}).$$

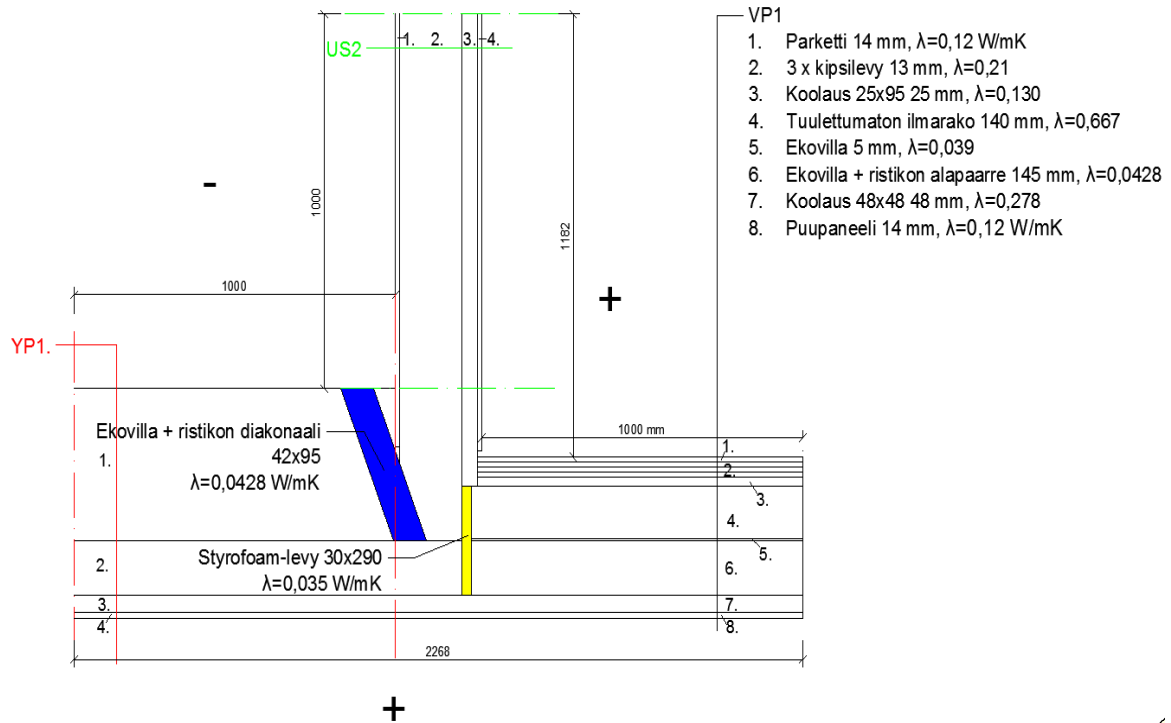
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	US1		YP1	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,59081	0,4000	1,200	0,0694	1,10

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,59081 \text{ W}/\text{mK} - 0,4000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 1,200 \text{ m} - 0,0694 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 1,10 \text{ m} = \mathbf{0,034470 \text{ W}/\text{mK}}$$

US2 + YP1



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,26754 \text{ W}/(\text{mK}).$$

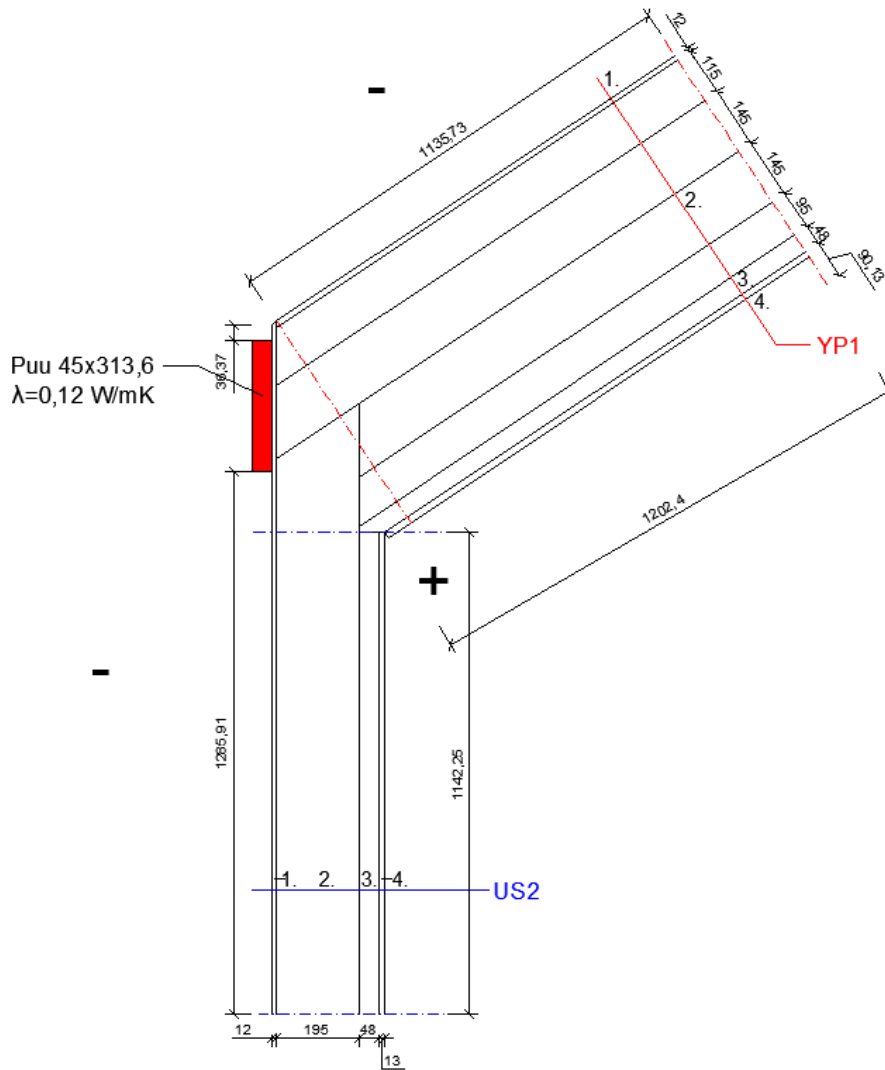
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	US2		YP1	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,26754	0,1676	1,00	0,0694	1,00

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,26754 \text{ W}/\text{mK} - 0,1676 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m} - 0,0694 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m} = \mathbf{0,03054 \text{ W}/\text{mK}}$$

US2 + YP2



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,30724 \text{ W}/(\text{mK}).$$

Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L _{2D} [W/mK]	US2		YP2	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,30724	0,1676	1,142	0,0760	1,136

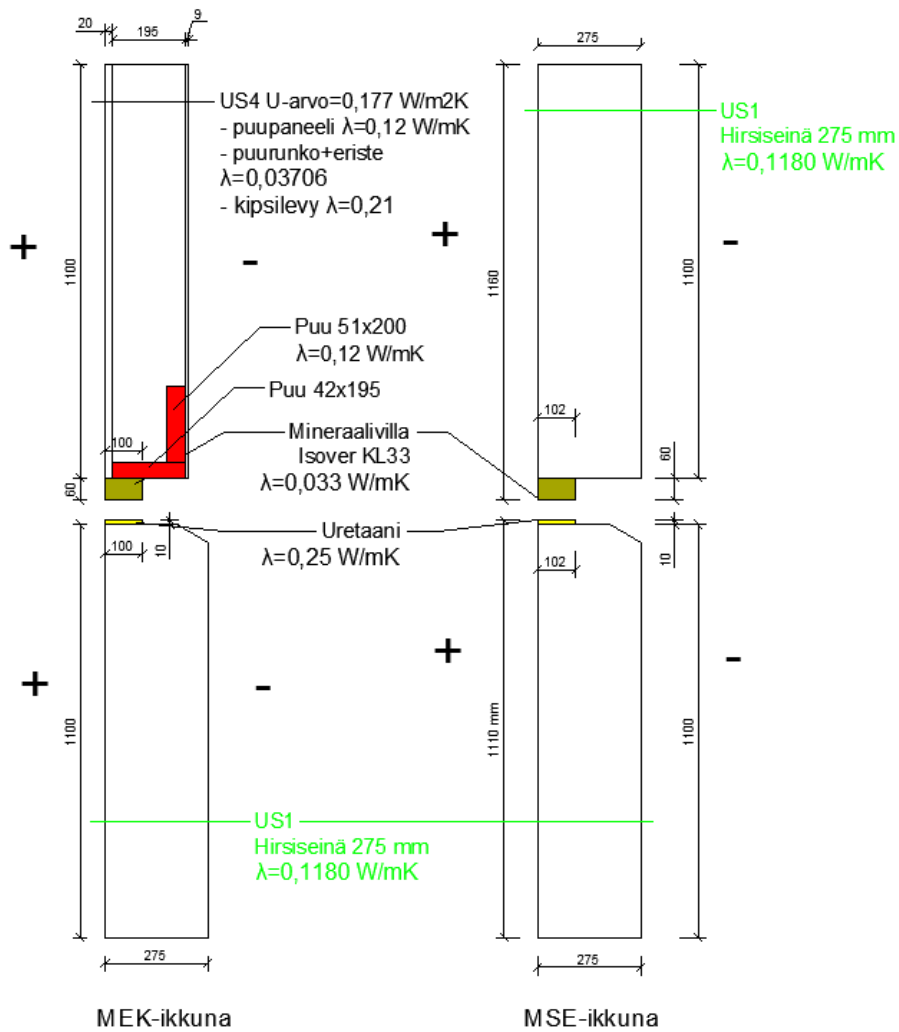
$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,30724 \text{ W/mK} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,142 \text{ m} - 0,0760 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,136 \text{ m}$$

0,029478 W/mK

=

Vers. 1.



MEK-ikkunan laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

	L _{2D}	Hirsiseinä	
		U-arvo	Pituus
	[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
MEK	0,49963	0,4000	1,110
MSE	0,49823	0,4000	1,110

Yläkarmi

	L _{2D}	US4/Hirsiseinä	
		U-arvo	Pituus
	[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
MEK	0,25741	0,1770	1,160
MSE	0,49774	0,4000	1,160

$$\psi = L_{2D} - U_{seinä} \times l_{seinä}$$

MEK

Alakarmi

$$= 0,49963 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,110 \text{ m} = \mathbf{0,05563 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

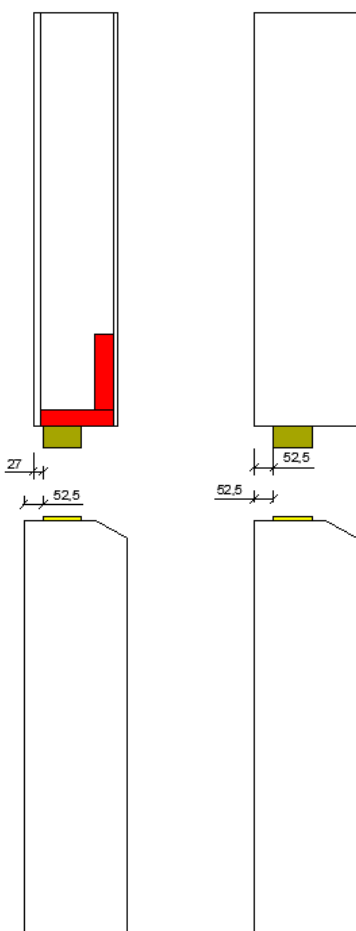
$$= 0,25741 \text{ W/mK} - 0,1770 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,160 \text{ m} = \mathbf{0,05209 \text{ W/mK}}$$

MSE

Alakarmi
 = 0,49823 W/mK – 0,4000 W/m²K x 1,110 m = **0,05423 W/mK**

Yläkarmi
 = 0,49774 W/mK – 0,4000 W/m²K x 1,160 m = **0,03374 W/mK**

Vers. 2.



MEK-ikkuna

MSE-ikkuna

Laskentamallien kuvissa on muutettu vain karmien paikka keskelle runkoa, kuvan mittojen mukaan.

MEK-ikkunan laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

	L _{2D} [W/mK]	Hirsiseinä	
		U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
MEK	0,48865	0,4000	1,110
MSE	0,48768	0,4000	1,110

Yläkarmi

	L _{2D} [W/mK]	US4/Hirsiseinä	
		U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
MEK	0,25388	0,1770	1,160
MSE	0,48364	0,4000	1,160

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

MEK

Alakarmi

$$= 0,48865 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,110 \text{ m} = \mathbf{0,04465 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,25388 \text{ W/mK} - 0,1770 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,160 \text{ m} = \mathbf{0,04856 \text{ W/mK}}$$

MSE

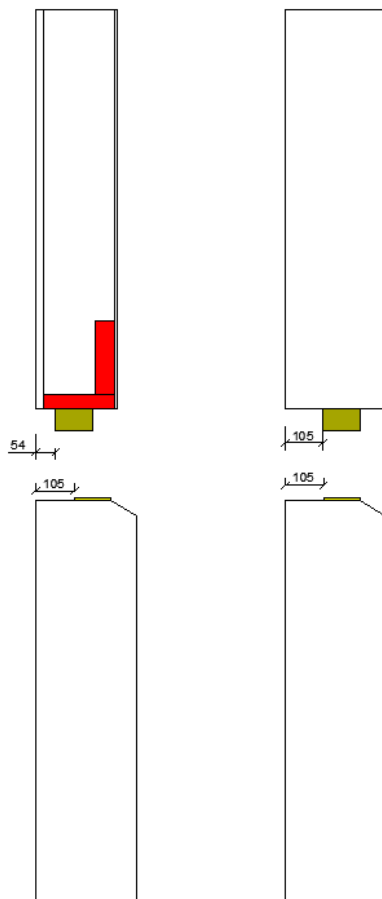
Alakarmi

$$= 0,48768 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,110 \text{ m} = \mathbf{0,043680 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,48364 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,160 \text{ m} = \mathbf{0,019640 \text{ W/mK}}$$

Vers. 2.



MEK-ikkuna

MSE-ikkuna

Laskentamallien kuvissa on muutettu vain karmin paikka rungon ulkopintaan kiinni, kuvan mittojen mukaan.

MEK-ikkunan laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

	L _{2D} [W/mK]	Hirsiseinä	
		U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
MEK	0,48607	0,4000	1,110
MSE	0,46668	0,4000	1,110

Yläkarmi

	L _{2D} [W/mK]	US4/Hirsiseinä	
		U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
MEK	0,25118	0,1770	1,160
MSE	0,47918	0,4000	1,160

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

MEK

Alakarmi

$$= 0,48607 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,110 \text{ m} = \mathbf{0,04207 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,25118 \text{ W/mK} - 0,1770 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,160 \text{ m} = \mathbf{0,04586 \text{ W/mK}}$$

MSE

Alakarmi

$$= 0,46668 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,110 \text{ m} = \mathbf{0,02268 \text{ W/mK}}$$

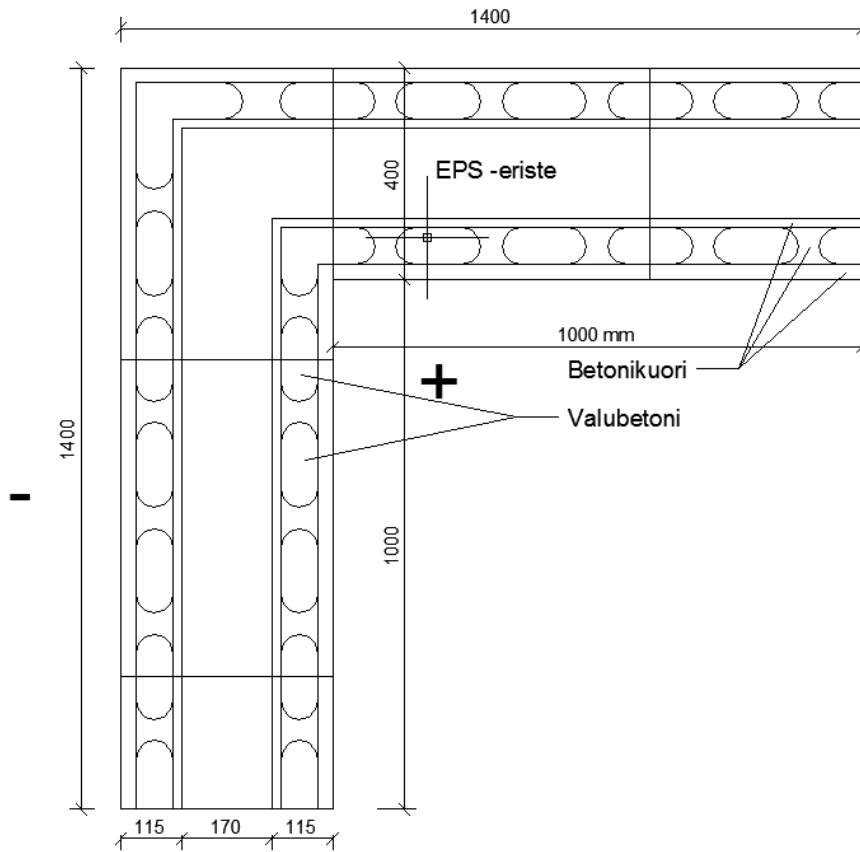
Yläkarmi

$$= 0,47918 \text{ W/mK} - 0,4000 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,160 \text{ m} = \mathbf{0,01518 \text{ W/mK}}$$

RAKENNUS C.

US-nurkk.

Hirsiseinä



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi ulkonurkassa:

$$L_{2D} = 0,40412 \text{ W/(mK)}.$$

ja sisänurkassa

$$L_{2D} = 0,40471 \text{ W/(mK)}.$$

Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

	L_{2D} [W/mK]	Hirsiseinä	
		U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
Ulkonurk.	0,40412	0,1711	1,00
Sisänurk.	0,40471	0,1711	1,40

$$\psi = L_{2D} - 2 \times (U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}})$$

Ulkonurk.

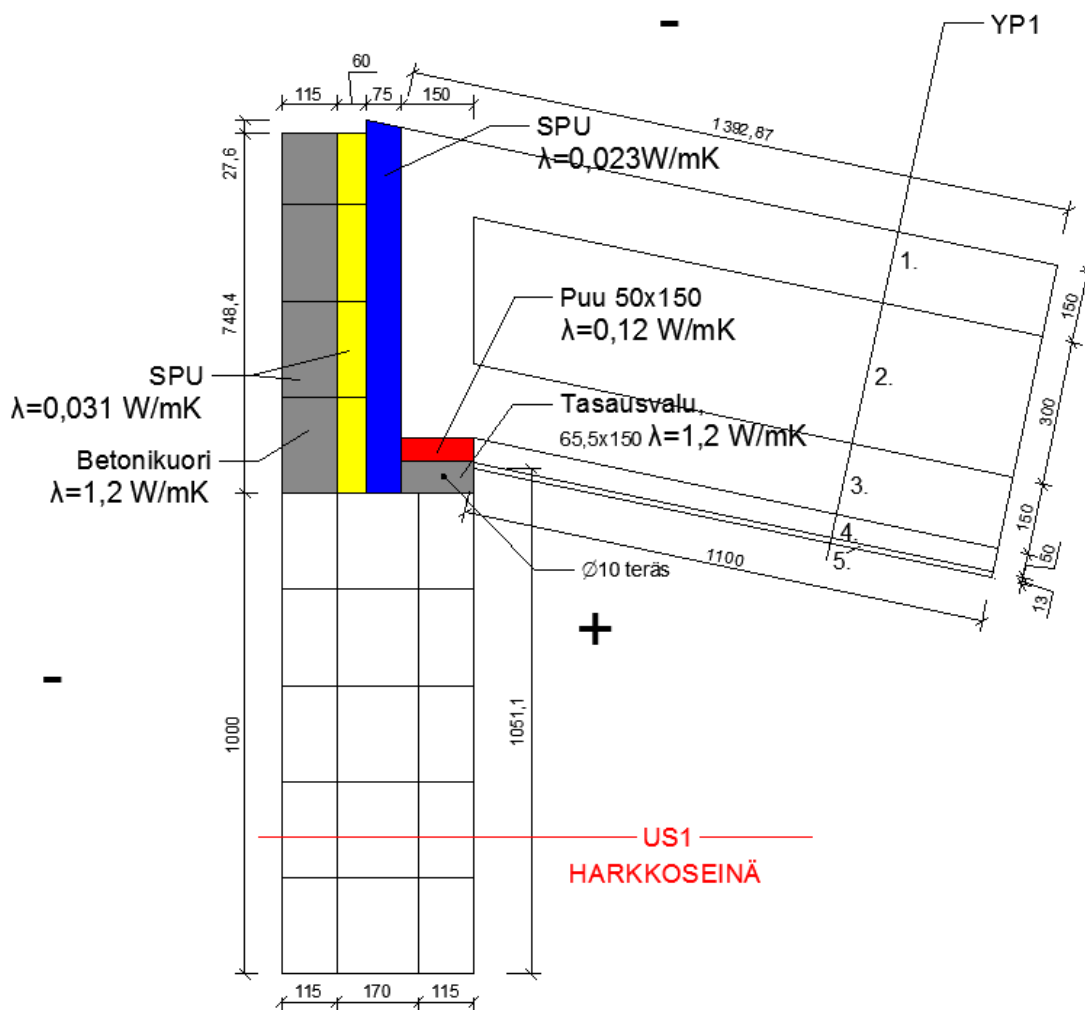
$$\psi = 0,40412 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,00 \text{ m}) = \mathbf{0,06198 \text{ W/(mK)}}$$

Sisänurk.

$$\psi = 0,40471 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,400 \text{ m}) = \mathbf{-0,07429 \text{ W/(mK)}}$$

Yläpohjaliitos

Korkeapääty



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,3101 \text{ W/(mK)}.$$

Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

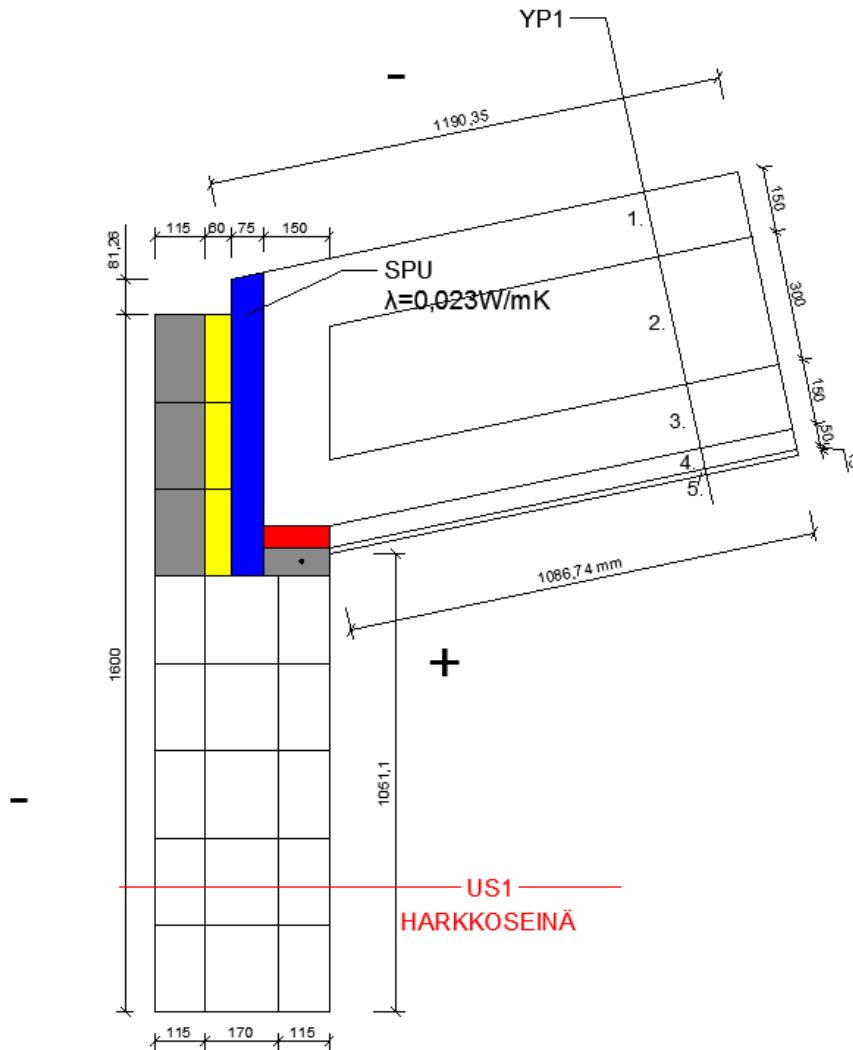
L _{2D} [W/mK]	Ulkoseinä		Yläpohja	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,3101	0,1711	1,0511	0,0698	1,1000

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,3101 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0511 \text{ m} - 0,0698 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,100 \text{ m} = \mathbf{0,05352 \text{ W/mK}}$$

Yläpohjaliitos

Matalapäätty



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi:

$$L_{2D} = 0,3025 \text{ W/(mK)}.$$

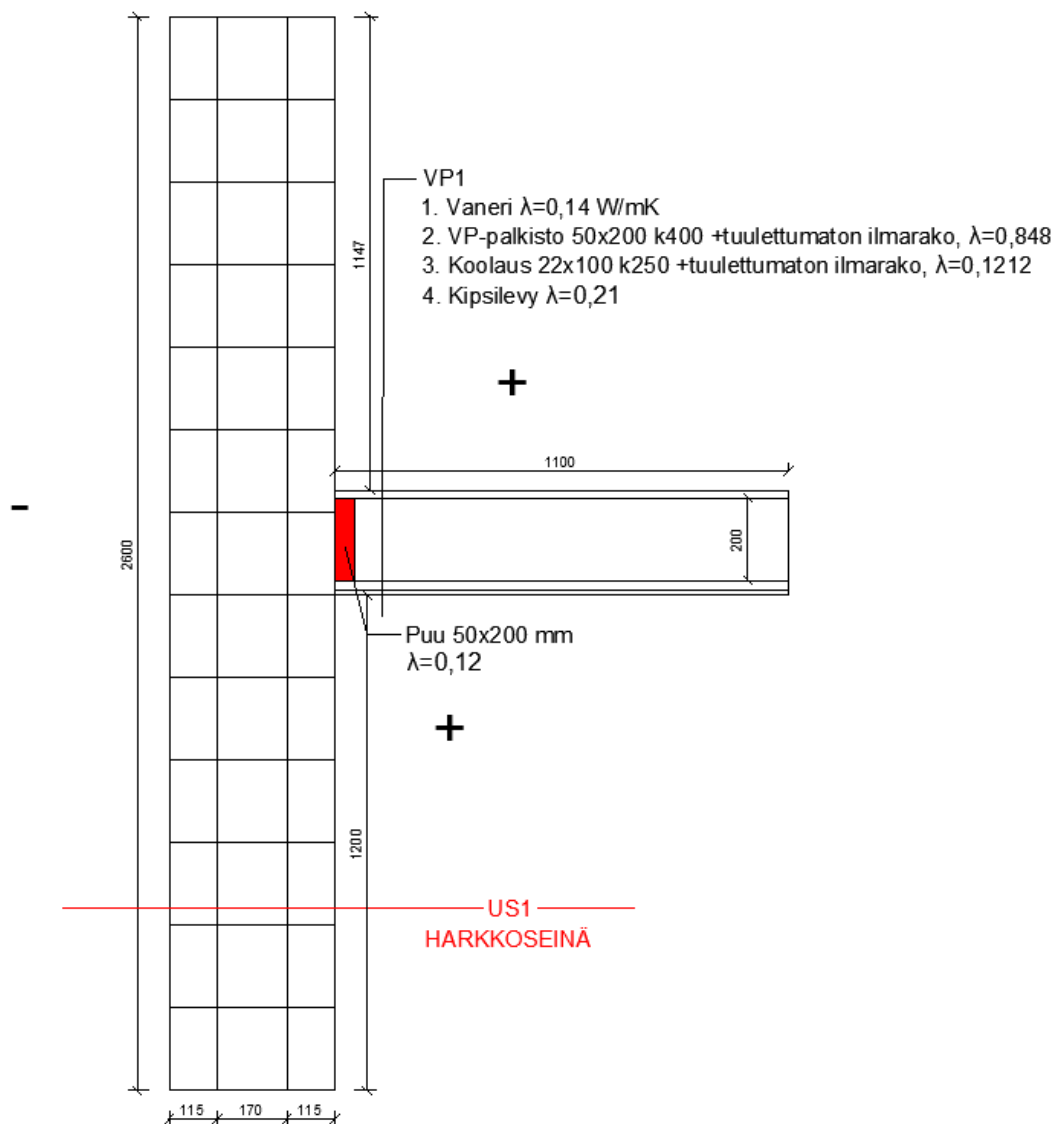
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä		Yläpohja	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,3025	0,1711	1,0511	0,0698	1,0867

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}} - U_{\text{katto}} \times l_{\text{katto}}$$

$$= 0,3025 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0511 \text{ m} - 0,0698 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0867 \text{ m} = \mathbf{0,0468 \text{ W/mK}}$$

Välipohjaliitos



Kuvan mukainen laskentamallilla saadaan Comsol-ohjelmalla lämpötekniiseksi kytkentäkertoimeksi:

$L_{2D} = 0,44918 \text{ W}/(\text{mK})$.

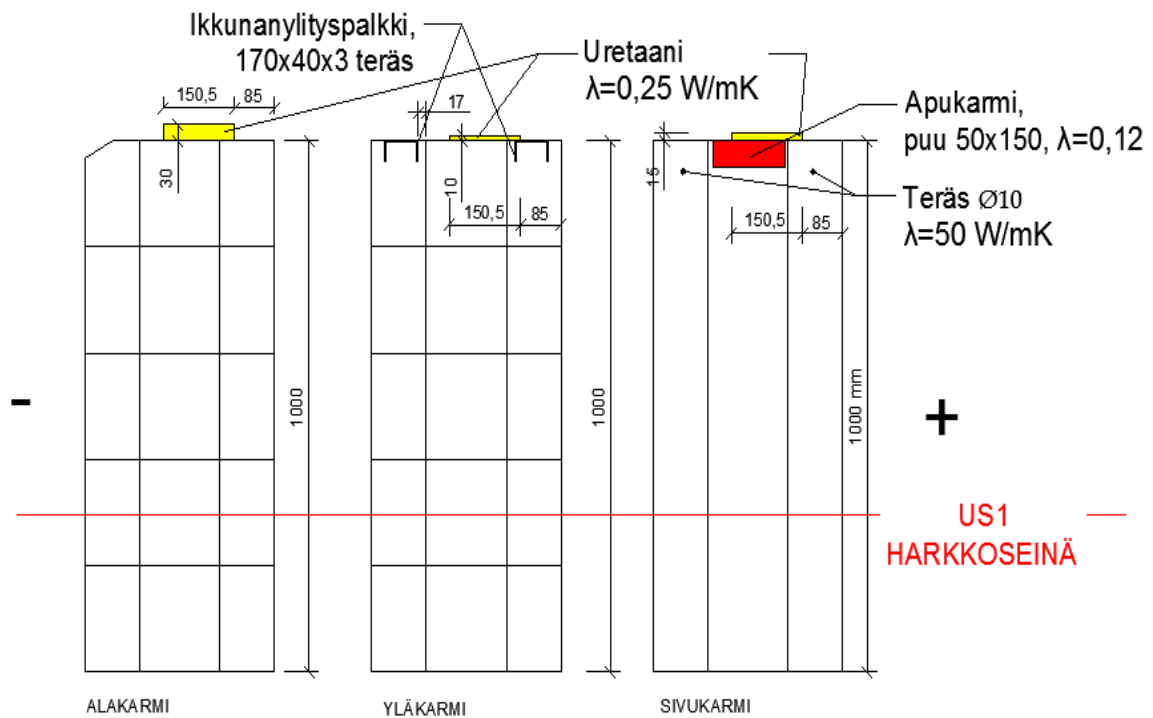
Tästä vähennetään teorian mukainen seinän osuus lämpövirrasta:

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,44918	0,1711	2,60

$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$

$= 0,44918 \text{ W}/\text{mK} - 0,1711 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \times 2,60 \text{ m} = \mathbf{0,00432 \text{ W}/\text{mK}}$

Ikkunaliitos



Ikkunoiden laskennan lähtökohdat näkyvät alla.

Alakarmi

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,24629	0,1711	1,030

Yläkarmi

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,43035	0,1711	1,010

Sivukarmi

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,24485	0,1711	1,020

Yläkarmi ilman ikkunanylityspalkkeja

L_{2D}	Ulkoseinä	
	U-arvo	Pituus
[W/mK]	[W/m ² K]	[m]
0,20523	0,1711	1,010

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} \times l_{\text{seinä}}$$

Alakarmi

$$= 0,24629 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,030 \text{ m} = \mathbf{0,070057 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi

$$= 0,43035 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,010 \text{ m} = \mathbf{0,25754 \text{ W/mK}}$$

Yläkarmi, ilman ikk.ylityspalkkeja

$$= 0,20523 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,010 \text{ m} = \mathbf{0,032419 \text{ W/mK}}$$

Sivukarmi

$$= 0,24485 \text{ W/mK} - 0,1711 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,020 \text{ m} = \mathbf{0,0711835 \text{ W/mK}}$$