

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Ville Vikström

VIIVAMAINEN LISÄKONDUKTANSSI: NUMEERISEN LASKENNAN
HYÖTY RAKENNUKSEN E-LUKUUN

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2014



OPINNÄYETYÖ
Kesäkuu 2014
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU

Tekijä
Ville Vikström

Nimeke
Viivamainen lisäkonduktanssi: Numeerisen laskennan hyöty rakennuksen E-lukuun

Toimeksiantaja
Energiakodit Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyön aiheena oli tarkastella viivamaisen lisäkonduktanssin numeerisen laskennan hyötyä verrattuna rakennusmääräyskokoelman osan D5/2012 ohjearvoihin sekä vaikutusta uudisrakennuksen E-lukuun. Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Energiakodit Oy:lle ja työn kohteena oli valmisteilla oleva omakotitalo. Tarkasteltavia rakenteita työssä olivat Energiakotien passiivitalorakenne sekä vertailukohteena RT-korteista löytyvä puurunkorakenne. Työssä käytettiin 27.4.2012 ilmestyneen ympäristöministeriön viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopasta apuna lisäkonduktanssien selvittämiseen.

Rakennusosien välisten liitosten lämpövirrat selvitettiin Comsol multiphysics -laskentaohjelmalla, jonka jälkeen viivamaiset lisäkonduktanssit saatiin laskettua numeerisesti. E-luvun laskemiseen uudisrakennukselle käytettiin laskentapalvelujen E-lukulaskuria.

Tutkimuksessa lisäkonduktanssien arvot olivat huomattavasti ohjearvoja pienempiä passiivitalorakenteessa. Vertailukohteessa lisäkonduktanssien arvot olivat myös yleensä ohjearvoja pienempiä, mutta erot ohjearvoihin olivat vähäiset. Passiivitalorakenteen E-lukua saatiin lasketuilla lisäkonduktanssin arvoilla pudotettua noin 4 %, Vertailukohteen lasketuilla arvoilla vaikutus E-lukuun oli mitätön. Numeerisen laskenta viivamaiselle lisäkonduktanssille todettiin hyödylliseksi rakenteissa, joiden lämmönläpäisykerroin alittaa selvästi nykypäivän ohjearvot.

Kieli
Suomi

Sivuja 52
Liitteet 3
Liitesivumäärä 15

Asiasanat

viivamainen lisäkonduktanssi, kylmäsilta, e-luku, comsol multiphysics, lämpövirta



THESIS
June 2014
Degree Programme in civil engineering
Karjalankatu 3
FI 80200 JOENSUU
FINLAND

Author(s)
Ville Vikström

Title
Linear thermal transmittance: Benefits of numerical calculations in building's overall energy consumption

Commissioned by Energiakodit Oy

Abstract in English

In this thesis the benefits of numerical calculations in linear thermal transmittance were compared to standard values given in the national building code of Finland, part D5/2012. The benefits of calculations were also compared to the overall energy consumption of the buildings. The thesis was commissioned by Energiakodit Oy. The examined structures in the thesis were passive house structure by the commissioner and the timber-framed structure founded in RT standard sheets of Finland. The calculation guide to linear thermal transmittance provided by the Ministry of the Environment and published in 2012 was utilised to solve the linear thermal transmittances.

Heat flows in the building elements were solved with Comsol multiphysics -software, after which it was possible to solve the linear thermal transmittances by using numerical calculations. The overall energy consumptions (E-factor) were solved by using E-factor calculator.

The linear thermal transmittances were distinctly lower than the standard values (D5/2012) when studying passive house structures. Differences between the standard values and the structure founded in RT standard sheets were not nearly as great. E-factor dropped nearly 4 % by using numerically calculated thermal transmittances in passive house structure. The effect in the E-factor when using numerically calculated values in structure founded in RT standard sheets, were negligible.

Language
Finnish

Pages 52
Appendices 3
Pages of Appendices 15

Keywords

linear thermal transmittance, heat bridge, e-factor, comsol multiphysics, heat flow

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Tausta.....	5
1.2	Tavoitteet.....	5
1.3	Rajaus	6
2	Rakennuksen johtumislämpöhäviö	6
3	Viivamainen lisäkonduktanssi	7
3.1	Lämmönläpäisykerroin.....	10
3.2	Lämmönläpäisykerroimen laskeminen.....	10
3.3	Viivamaisen lisäkonduktanssin laskeminen	11
3.4	Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentakaava	13
3.5	Comsol multiphysics -ohjelma	13
4	Rakenteiden mallintaminen.....	14
4.1	Vertailurakenne	14
4.1.1	Ulkoseinä, US 701	15
4.1.2	Yläpohja, YP 1	16
4.1.3	Alapohja, AP 417	17
4.2	Passiivitalorakenne, Energiakodit.....	18
4.2.1	Ulkoseinä	19
4.2.2	Yläpohja.....	19
4.2.3	Alapohja.....	20
4.3	Ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos	20
4.3.1	Ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos, suoralta seinän osalta.....	21
4.3.2	Ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos, ulkonurkan osalta	24
4.4	Ulkoseinien välisen nurkan liitos	26
4.4.1	Ulkonurkka.....	27
4.4.2	Sisänurkka	30
4.5	Ikkunan liitos.....	32
4.6	Oven liitos.....	38
5	E-luku.....	42
6	Tulokset	43
6.1	Viivamaiset lisäkonduktanssit	44
6.2	E-luku	46
7	Tulosten analysointi	47
8	Pohdinta.....	48
	Lähteet.....	51

Liitteet

Liite 1	Yläpohjan ja ulkoseinän rakenneliitoksen laskeminen
Liite 2	Energiatodistuksen lähtötiedot
Liite 3	Energiatodistus

1 Johdanto

1.1 Tausta

27.4.2012 valmistunut ympäristöministeriön ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan käsittelee rakennusosien välisiä epäsäännöllisiä kylmäsiltoja. Epäsäännölliset kylmäsiltoja on otettu uutena asiana huomioon rakennusten energiatehokkuutta laskettaessa rakentamismääräyskokoelman osissa D3/2012, C4/2012 sekä D5/2012.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Energiakodit Oy. Energiakodit Oy on Ylämyllyltä kotoisin oleva passiivitalorakentamiseen erikoistunut yritys. Opinnäytetyö tehtiin valmisteilla olevaan omakotitaloon Nuotionkadulle Marjalaan, rakennuksen lupanumero: 2013-629. Laskennassa käytettiin todellisia Energiakodit Oy:n liitos- sekä rakennekuvia.

1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää viivamaisen lisäkonduktanssin numeerisen laskennan hyöty verrattuna rakennusmääräyskokoelman osan D5/2012 ohjearvoihin. Työssä perehdyttiin viivamaisen lisäkonduktanssin vaikutukseen riippuen rakenteiden lämmönläpäisykertoimista sekä sen vaikutukseen E-luvussa.

Opinnäytetyössä vertailtiin Energiakotien passiivitalorakenteen sekä lämmönläpäisykertoimiltaan heikompien rakenneratkaisujen eroja viivamaisen lisäkonduktanssin suuruuden kannalta. Vertailurakenteeksi valittiin RT-korteista löytyviä rakenteita joiden lämmönläpäisykertoimet alittavat rakennusmääräyskokoelman osan D3/2012 vaatimukset [6 s.13].

1.3 Rajaus

Opinnäytetyössä tarkasteltiin tarkemmin vain 27.4.2012 valmistunutta viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopasta [1], joka ottaa kantaa vain epä-säännöllisiin kylmäsiltoihin rakenteessa. Opinnäytetyössä käytettiin apuna Comsol Multiphysics -ohjelmaa rakenteen lämpövirran selvittämiseen. Rakennemallit tuotiin Autocad -ohjelmasta.

Rakennuksen E-lukua ja energiatodistusta laskettaessa käytettiin apuna laskentapalvelujen E-lukulaskuria. Opinnäytetyössä käytettiin Energiakodeilta saatuja rakenteiden lämmönläpäisykertoimia. Vertailurakenteen lämmönläpäisykertoimina käytettiin RT-korteista löytyviä arvoja.

Työssä vertailtiin eri rakenteiden viivamaisia lisäkonduktansseja sekä energiatehokkuutta. Opinnäytetyössä ei oteta kantaa rakenteiden välisiin kustannuseroihin. Energiakotien leikkauskuvat haluttiin pitää salaisena tietona eikä niitä esitetä opinnäytetyössä. Viivamaista lisäkonduktanssia maanvaraisen alapohjan ja ulkoseinän välillä ei pystytty varmentamaan oikeaksi, joten se jätettiin työstä pois.

2 Rakennuksen johtumislämpöhäviö

Rakennusten kylmäsiltoja tarkasteltaessa lämpö siirtyy lämmön johtumisena. Lämpöä voi siirtyä myös säteilemällä ja konvektiolla. Lämmön johtuminen riippuu rakenteiden materiaaleista, lämpötilasta ja kosteudesta. Lämmönjohtuminen on lämmön siirtymistä aineen sisällä. Lämpö voi siirtyä myös johtumalla aineesta toiseen, jos aineet ovat kosketuksissa toisiinsa [7.].

Rakennuksen johtumislämpöhäviötä mitataan watteina yhtä lämpöeroastetta kohti. Johtumislämpöhäviötä laskettaessa joudutaan laskemaan tai mittaamaan lämmönläpäisykertoimet jokaiselle rakennusosalle erikseen. Rakenteiden liitoksiin ajatellaan adiabaattireunaehto eli rakennusosan liittymistä muihin rakentei-

siin ei oteta huomioon, vaan se ajatellaan täydellisenä lämmöneristyksenä. Rakennuksen johtumislämpöhäviön laskeminen on esitetty kaavassa 1 [1 s. 7].

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

missä

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/(m K)
l_k	kahden rakennusosan välisen liitoksen k pituus, m
X_j	pistemäisen kylmäsiilan j aiheuttama lisäkonduktanssi, W/K

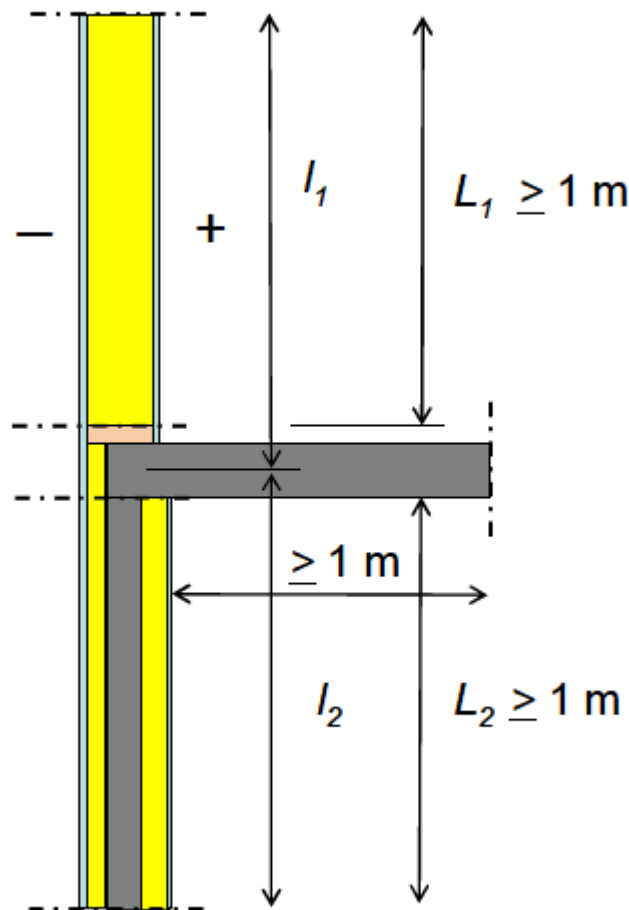
Kylmäsiillalla tarkoitetaan rakennusosassa olevaa viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehtyä rakenneosaa, jonka kohdalla lämpövirran tiheys on viereiseen alueeseen verrattuna suurempi. Puurakenteisissa ulkoseinissä tällaisia rakenneosia ovat eristekerroksessa olevat puurungot [2 s. 4].

3 Viivamainen lisäkonduktanssi

Viivamainen lisäkonduktanssi ilmoittaa rakennusosassa olevan viivamaisen kylmäsiilan, kuten seinän ala- ja yläohjauspuun aiheuttaman lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosien eri puolilla on yksikön suuruinen [1 s.6].

Viivamainen lisäkonduktanssi lasketaan siis epäsäännöllisille kylmäsiilloille. Säännölliset kylmäsiilat, kuten koolaus, tulee ottaa huomioon laskettaessa ra-

kenteiden lämmönläpäisykertoimia. Kuvassa 1 on esitetty kahden ulkoseinän ja välipohjan liitos, johon muodostuu kylmäsilta. Seinää sekä välipohjaa otetaan rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaisesti riittävän laajalta alueelta. Tällä tavoin minimoidaan liitoksen vaikutus rakenteen lämpötiloissa. Rakenteen pituus kuvatasoa kohtisuorassa suunnassa oletetaan suureksi muihin mittoihin verrattuna [1 s. 8].



Kuva 1. Kahden ulkoseinän ja välipohjan liitos [1 s. 8]

Johtumislämpöhäviöksi saadaan kaavan 1 avulla:

$$H_{\text{joht}} = U_1 A_1 + U_2 A_2 + \psi l \quad (2)$$

missä

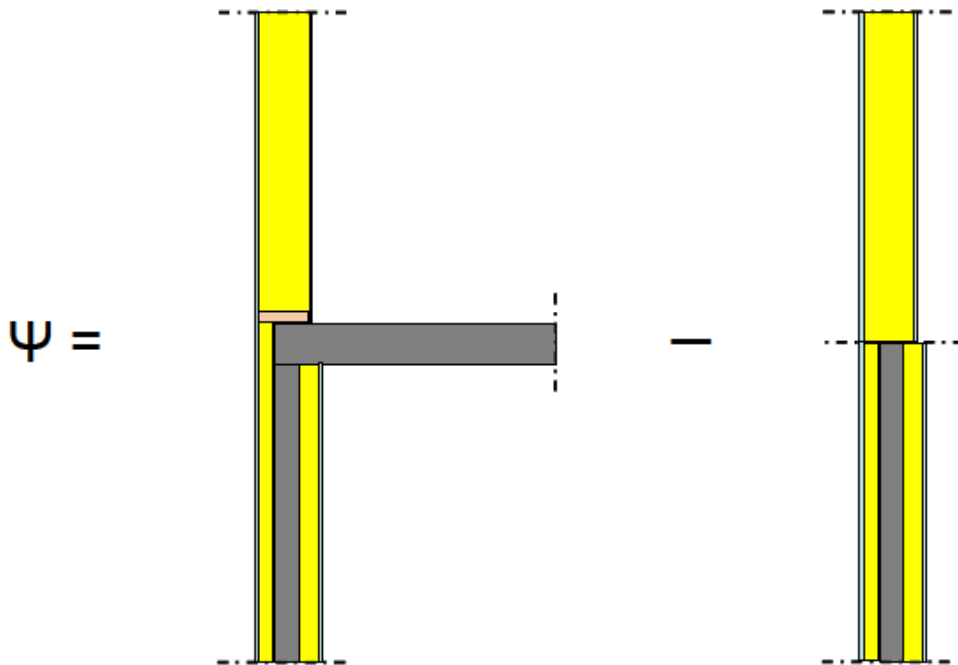
H_{joht} rakennusosien 1 ja 2 ja niiden liitosten yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö, W/K

U_1	seinän 1 lämmönläpäisykerroin, $W/(m^2K)$
U_2	seinän 2 lämmönläpäisykerroin, $W/(m^2K)$
A_1	rakennusosan 1 pinta-ala, $l * l_1, m^2$
A_2	rakennusosan 2 pinta-ala, $l * l_2, m^2$
l	seinien 1 ja 2 välisen liitoksen pituus (kohtisuoraan kuvatasoa vastaan), m
ψ	seinien 1 ja 2 välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi, $W/(m K)$

Ratkaistaan kaavasta 3 viivamainen lisäkonduktanssi:

$$\psi = \frac{H_{joht}}{l} - U_1 l_1 - U_2 l_2 \quad (3)$$

Lisäkonduktanssi on siis laskenta-alueen todellisen lämpövirran ja lämmönläpäisykertoimilla lasketun lämpövirran erotus. Rakenteen lämpövirta lasketaan siis koko liitosrakenteelle, josta vähennetään kuvan mukaisesti esitettyjen alueiden lämpövirta [1 s. 9]. Lisäkonduktanssin laskentaperiaate esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Viivamainen lisäkonduktanssi on todellisen rakenteen ja vertailurakenteen lämpövirran erotus [1 s.9]

3.1 Lämmönläpäisykerroin

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero on yksikön suuruinen. Lämmönläpäisykerroimeen vaikuttavat rakenteen materiaalien lämmönjohtavuudet, materiaalien paksuudet sekä pintavastukset [1 s.6].

3.2 Lämmönläpäisykerroimen laskeminen

Rakenteen U-arvoa eli lämmönläpäisykerrointa laskettaessa tarvitaan rakenteessa olevien ainekerrosten paksuudet, lämmönjohtavuudet (λ), sekä sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset. Rakenneseosien lämmönjohtavuuksina voidaan käyttää suunnitteluarvoja (λ_u) [2 s.5].

Rakennusosan lämmönläpäisykerroin on rakennusosan kokonaislämmönvastuksen (R_t) käänteisluku. Lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavan 4 avulla. [2 s.6]

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (4)$$

missä

U rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/(m²K)

R_t rakennusosan kokonaislämmönvastus, m² K/W

Kokonaislämmönvastus R_t sisältää rakennusosan eri ainekerroksien lämmönvastukset sekä rakennusosan molempien puolien pintavastukset. Lämmönvastuksen laskeminen on esitetty kaavassa 5 [2 s.6]

$$R = \frac{d}{\lambda_u} \quad (5)$$

missä

R ainekerroksen lämmönvastus, m² K/W

d ainekerroksen paksuus, m

λ_u ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, W/(m K)

Rakennusosan lämmönjohtavuudeltaan erilaiset ainekerrokset voivat olla lämpövirran suuntaan nähden peräkkäin tai rinnan. Lämpövirran suuntaan nähden peräkkäisistä ainekerroksista muodostuvan rakennusosan kokonaislämmönvastus (R_t) voidaan laskea kaavalla 6 [2 s.7.].

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (6)$$

missä

R_t	rakennusosan kokonaislämmönvastus, m ² K/W
R_{si}	sisäpuolen pintavastus, m ² K/W
R_1, R_2, R_n	rakennusosien ainekerrosten 1, 2, ... , n lämmönvastukset, m ² K/W
R_{se}	ulkopuolen pintavastus, m ² K/W

3.3 Viivamaisen lisäkonduktanssin laskeminen

Viivamaisen lisäkonduktanssin määrittämiseen on olemassa erilaisia menetelmiä. Menetelmän valinnassa kannattaa ottaa huomioon kylmäsillan merkitys koko rakennuksen johtumislämpöhäviössä. [1 s.11]

Rakennusmääräyskokoelman osassa D5/2012 on esitetty ohjetaulukoita viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaan. Taulukoissa ei oteta kantaa muuhun kuin rakennusosan materiaaleihin, joten ohjearvojen tyypillisen tarkkuuden on arvioitu olevan 0-50 % [3 s.18 -19].

Negatiiviset lisäkonduktanssin arvot ulkoseinien välisen sisänurkan liitoksessa vaikuttavat siis positiivisesti rakennuksen johtumislämpöhäviöön. Negatiivinen arvo johtuu sisäseinien suhteellisesti suuremmasta pinta-alasta ulkoseiniin nähden. Sisänurkan ohjearvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 1. Rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvoja viivamaiselle lisäkonduktanssille. Ulkoseinän liittyminen yläpohjaan, välipohjaan ja alapohjaan [3 s.19]

	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(m K)									
	Yläpohjan (ulkonurkka) runkomateriaali			Välipohjan runkomateriaali			Alapohjan runkomateriaali			
	betoni	kevyt-betoni	puu	betoni	kevyt-betoni	puu	betoni, maan-vast.	betoni, ryöm. tila	kevyt-betoni, ryöm. tila	puu, ryöm. tila
betoni	0,08		0,04	0,0			0,24	0,28		
kevytbetoni	0,18	0,06	0,04	0,1	0,0		0,09	0,08	0,03	
kevytsorabetoni	0,13		0,04	0,07			0,15	0,11		
tiili	0,08		0,04	0,0			0,17	0,06		
puu			0,05			0,05	0,10			0,06
hirsi			0,04			0,0	0,11			0,09

Taulukko 2. Rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvoja viivamaiselle lisäkonduktanssille. Ulkoseinien väliset liitokset, ikkuna- sekä oviliitokset [3 s.19]

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

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

Taulukko 3. Rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvoja viivamaiselle lisäkonduktanssille. Liitokset, joille ei ole annettu erillisiä arvoja taulukoissa 1 ja 2 [3 s.19]

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

Laskutavoista tarkimpana pidetään numeerista ratkaisumenetelmää. Tyypillinen tarkkuus tällä menetelmällä on $\pm 5\%$. Numeerinen ratkaisumenetelmä perustuu differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen ja valitun laskenta-alueen jakamiseen riittävän moneen laskentaelementtiin. Mitä tiheämmin laskenta-alue jaetaan, sitä tarkempi tulos saavutetaan. Opinnäytetyössä käytettiin Comsol multiphysics -ohjelmaa näiden yhtälöiden ratkaisemiseen [1 s.13].

3.4 Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentakaava

Standardissa SFS-EN ISO 10211 on esitetty laskentakaava kaksiulotteiselle viivamaiselle lisäkonduktanssille [5 s.22].

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (7)$$

missä

ψ	viivamainen lisäkonduktanssi, W/(m K)
L_{2D}	kaksiulotteiselle (2D) laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekninen kytkentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille, W/(m K)
U_j	liittyvän rakennusosan j lämmönläpäisykerroin, W/(m ² K)
l_j	mallissa kuvatun rakennusosan j pituus (m), jolla läpäisykerrointa U_j voidaan soveltaa.

Lämmönläpäisykerroin U_j ja pituudelle l_j käytetään rakentamismääräyskoelman osassa C4 mukaisia määritelmiä.

3.5 Comsol multiphysics -ohjelma

Comsol multiphysics on elementtimenetelmään (FEM) perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) ratkaisemiseen käytettävä ohjelmisto. Ohjelmalla

voidaan mallintaa fysikaalisia ilmiöitä rakenteille. Opinnäytetyössä ohjelmaa tarvittiin lämpövirtojen ratkaisemiseen rakenteiden välisissä liitoksissa. Comsol multiphysics tukee dwg-piirrustuksia, eli rakenteet voitiin mallintaa Autocad -ohjelmalla ja tuoda ne kätevästi Comsoliin [16].

4 Rakenteiden mallintaminen

Rakenteiden mallintamiseen käytettiin Autocad- ja Comsol multiphysics -ohjelmia. Energiakodeilta saatuja sekä RT-korttien liitoskuvia piti yksinkertaistaa siirrettäessä ne Autocadista Comsoliin. Kaikki materiaalimerkinnot poistettiin kuvista ennen niiden siirtämistä.

Rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan hyvin tuulettuvan ilmaraon ulkopuoliset rakenteet voidaan jättää mallinnettaessa huomioimatta. Tällöin ulkopinnan pintavastuksena voidaan käyttää sisäpinnan pintavastusta (R_{si}) [2 s.24].

Energiakodeilta saatiin lämmönläpäisykertoimet heidän rakenteilleen. Vertailurakenteen lämmönläpäisykertoimet olivat lähellä rakennusmääräyskokoelman ohje-arvoja [6 s.13].

4.1 Vertailurakenne

Vertailurakenteeksi valittiin RT-korteista rakenne, jonka lämmönläpäisykertoimet olivat lähellä rakennusmääräyskokoelman osan D3/2012 ohje-arvoja. Taulukossa 4 on esitetty vertailurakenteen eri rakennusosien lämmönläpäisykertoimet.

Taulukko 4. Vertailurakenteen lämmönläpäisykertoimet

Vertailurakenne	
Rakennusosa	U-arvo (W/m ² K)
Ulkoseinä	0,16
Alapohja*	0,16
Yläpohja	0,11
Ikkunat	1,00
Ulko-ovi	1,00

*Reuna-alueella U-arvo 0,15 W/m²K

4.1.1 Ulkoseinä, US 701

Vertailurakenteen ulkoseinä on sisältäpäin lukien seuraava, suluissa esitetyt arvot ovat kyseisen materiaalin lämmönjohtavuuksia λ_u : [11]

Kipsilevy, Gyproc GN 13 mm (0,21 W/mK)

Höyrynsulkumuovi 0,2 mm (0,33 W/mK)

Lämmöneriste Isover KL37 223 mm (0,037 W/mK)

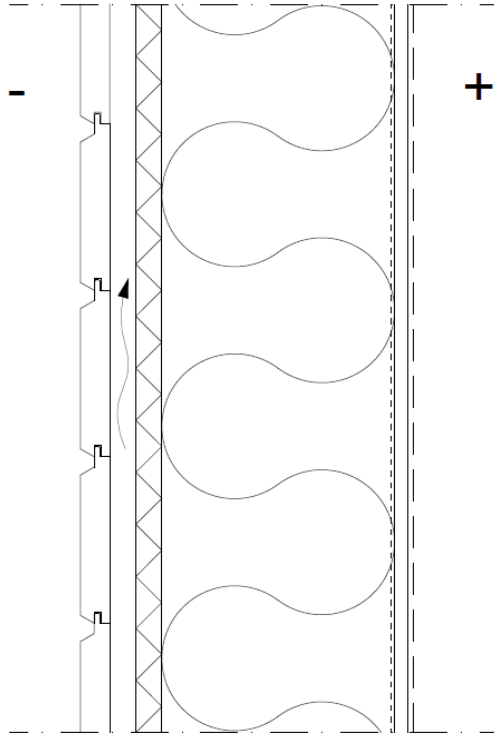
Puurunko 48 x 223 mm, k600 (0,12 W/mK)

Tuulensuojalevy, Runkoleijona 25 mm (0,052 W/mK)

Tuuletusrako 25 mm

Ulkoverhouspaneeli 28 mm

Pintakäsittely



Kuva 3. Vertailurakenne, ulkoseinä [11]

4.1.2 Yläpohja, YP 1

Vertailurakenteen yläpohja on sisältäpäin lukien seuraava, suluissa esitetyt arvot ovat kyseisen materiaalin lämmönjohtavuuksia λ_v : [12]

Kipsilevy, Gyproc GN 13 mm (0,21 W/mK)

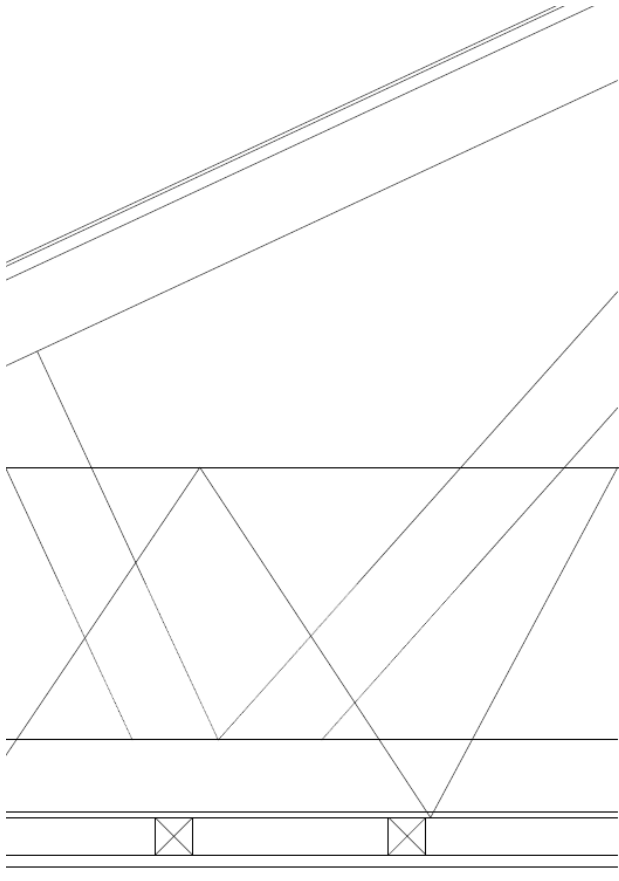
Poikittaiskoolausrimat 48x48 mm, k300 (0,12 W/mK)

Höyrynsulkupaperi 0,2 mm (0,33 W/mK)

Lämmöneriste, Isover puhallusvilla 450 mm (0,041 W/mK)

Havuvaneri 15 mm

Peltikate



Kuva 4. Vertailurakenne, yläpohja [12]

4.1.3 Alapohja, AP 417

Vertailurakenteen alapohja on sisältäpäin lukien seuraava, suluissa esitetyt arvot ovat kyseisen materiaalin lämmönjohtavuuksia λ_u : [10]

Pintamateriaali + alusrakenne

Teräsbetoni-laatta 80 mm (2,0 W/mK)

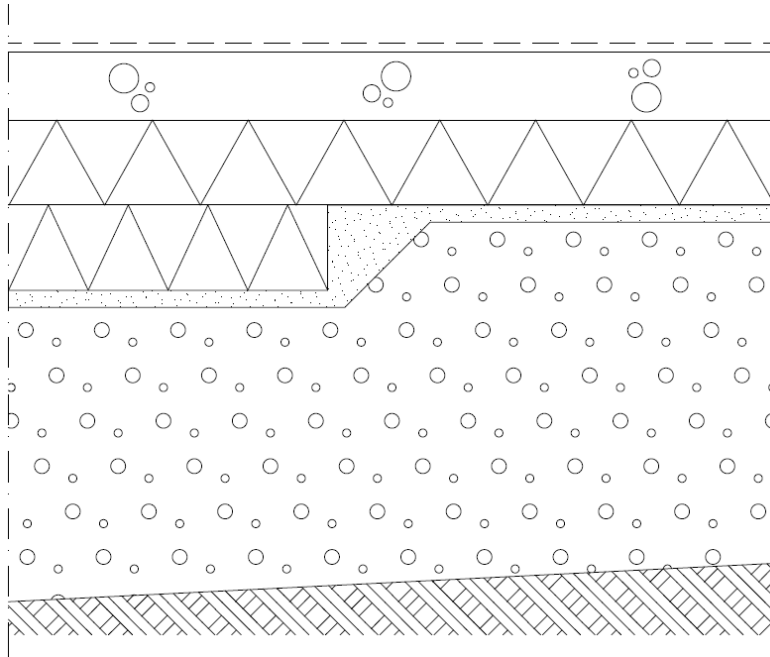
Polystyreeni 100 mm (0,037 W/mK), Reunassa 200mm

Tasaushiekka 20 mm

Suodatinkangas

Salaojituskerros >300 mm

Perusmaa



Kuva 5. Vertailurakenne, alapohja [10]

4.2 Passiivitalorakenne, Energiakodit

Passiivitaloksi voidaan suunnitella mikä tahansa rakennus. Passiivitalon määritelmä perustuu kolmeen eri arvoon: tilojen lämmitysenergiantarpeeseen, kokonaisprimäärienergiantarpeeseen ja mittaukseen perustuvaan ilmanvuotolukuun. Passiivitalon pieneen energiantarpeeseen päästään oikeilla materiaali-ratkaisuilla, sekä tehokkaalla ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla. Termillä passiivinen tarkoitetaan sitä, ettei energiansäästön pääpaino ole teknisissä laitteissa. Passiivitalon perusratkaisuja ovat hyvä lämmöneristys eri rakennusosissa, matala ilmanvuotoluku sekä varaavan massan ja ilmaislämmönlähteiden (aurinkoenergia, ihmiset) hyödyntäminen.

Energiakotien passiivitalorakenteessa on päästy huomattavasti pienempiin lämmönläpäisykertoimiin kuin vertailurakenteessa. Lämmönläpäisykertoimiin voidaan vaikuttaa parhaiten materiaaleilla joiden lämmönjohtavuus (λ_u) on pieni sekä materiaalien kerrospaksuuksilla.

Taulukko 5. Energiakotien rakennusosien lämmönläpäisykertoimet

Energiakodit	
Rakennusosa	U-arvo (W/m ² K)
Ulkoseinä	0,10
Alapohja	0,11
Yläpohja	0,06
Ikkunat	0,66
Ulko-ovi	0,63
Takaovi	0,67

4.2.1 Ulkoseinä

Passiivitalon ulkoseinä on sisältäpäin lukien seuraava:

Pintakäsittely
 Kipsilevy 13 mm
 Pystyrunko 39 x 66 mm, k600
 Lämmöneriste 66 mm
 Polyuretaani 100 mm
 Pystyrunko 48 x 148 mm, k600
 Lämmöneriste 150 mm
 Tuulensuojalevy 9 mm
 Tuuletusrima 22 x 50 mm, k600
 Ulkoverhouspaneeli 23 x 145 mm
 Pintakäsittely

4.2.2 Yläpohja

Passiivitalon yläpohja on sisältäpäin lukien seuraava:

Sisäkattopaneeli 15 mm
 Harvarimoitus 22 x 50 mm, k600
 Harvalaudoitus 22 x 100 mm, k600
 Polyuretaanilevy 30 mm, alumiinipinnalla
 Lämmöneriste 550 mm, puhallusvilla

Kattoristikot, k900

Aluskate

Tuuletusvälirimat 22 x 45 mm, k900

Ruodelaudoitus 22 x 100 mm, k350

Peltikate

4.2.3 Alapohja

Passiivitalon alapohja on sisältäpäin lukien seuraava:

Pintamateriaali + alusrakenne

Teräsbetoni-laatta 80 mm

Polystyreeni 300 mm

Tiivistetty sora

Suodatinkangas

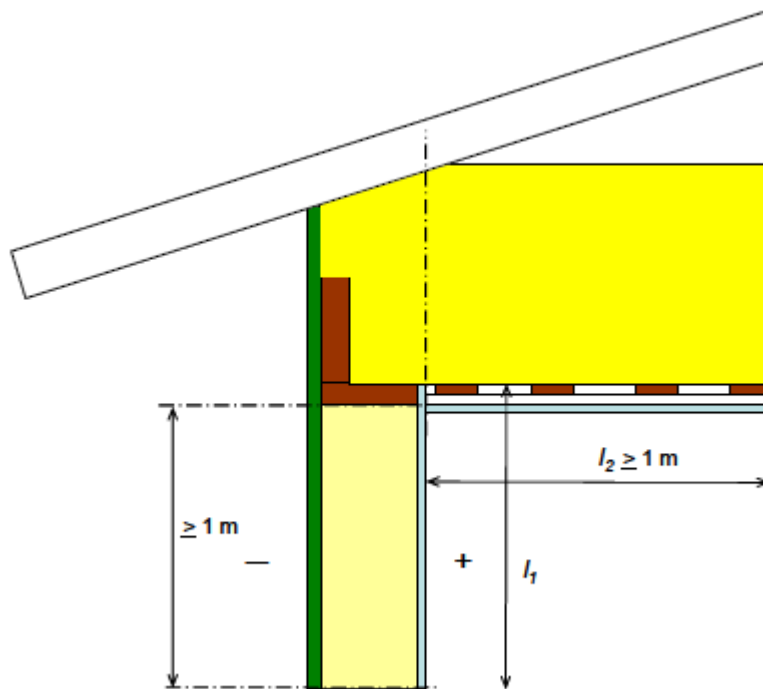
Kapillaarikatkokerros >200 mm

Suodatinkangas

Pohjamaa

4.3 Ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos

Ulkoseinän ja yläpohjan välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi laskettiin mallintamalla liitos Comsol multiphysics -ohjelmaan ja laskemalla rakenteen läpi virtaava lämpövirta sisältä ulos yhden asteen lämpötilaerolla metriä kohden. Saadusta lämpövirrasta vähennettiin pelkän seinäosan sekä pelkän yläpohjan lämpövirrat. Tulokseksi saatiin rakenteen liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi ψ [1 s.23 -24]. Liitteessä 1 on esitetty ulkoseinän ja yläpohjan välisen rakenneliitoksen viivamaisen lisäkonduktanssin laskenta. Kuvassa 6 on esitetty yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen vähimmäismitat.

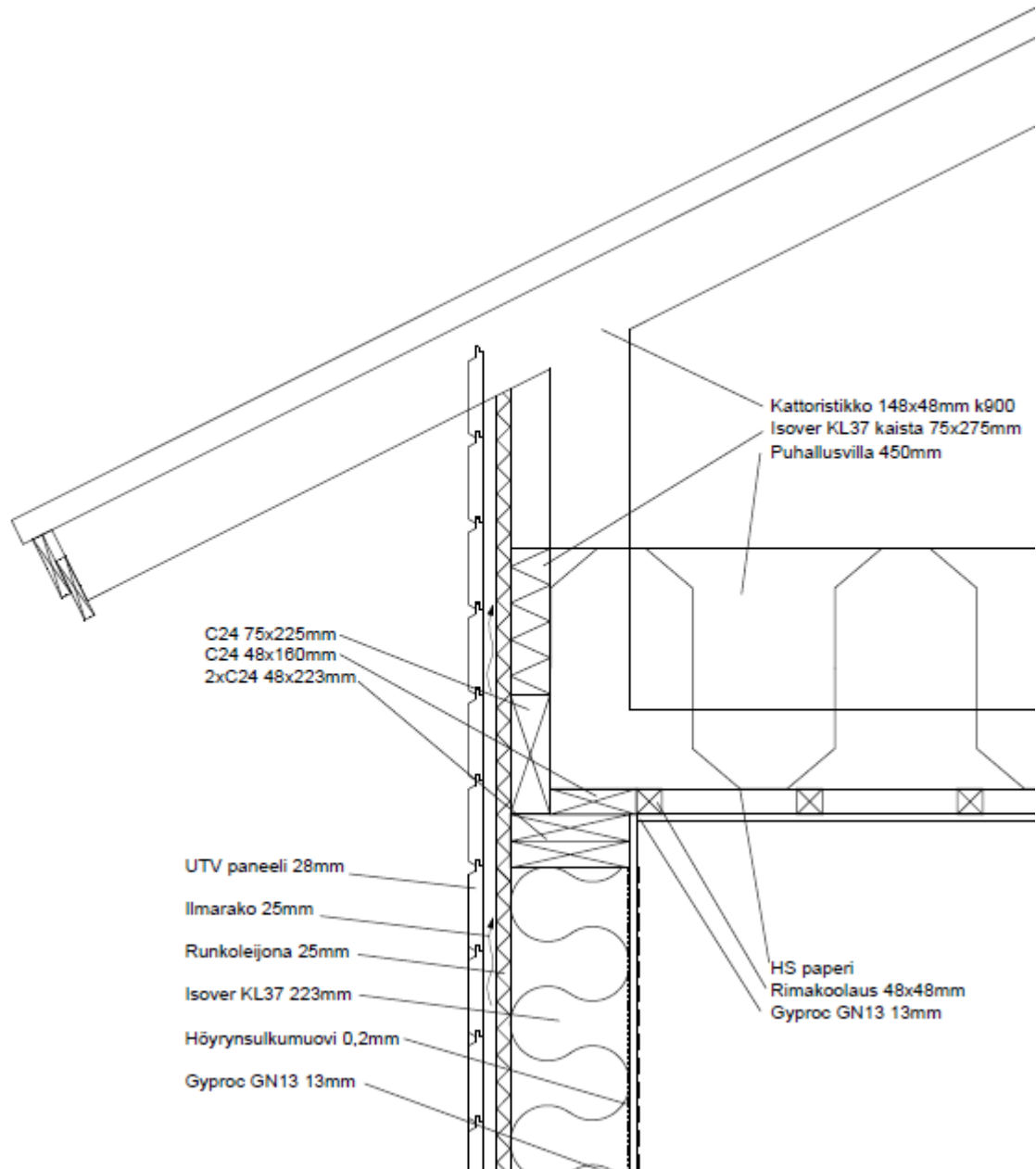


Kuva 6. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksessa käytettävät vähimmäismitat [1 s. 23]

Laskenta-alueen rajausta: vähintään d_{\min} etäisyydeltä tarkasteltavasta liitoksesta tai kylmäsilasta, missä d_{\min} on vähintään 1 m tai kolme kertaa liitokseen liittyvän rakenneosan pituus [1 s. 13]. Vertailurakenteen osalta ulkoseinän pituutena käytettiin 1 metriä ja yläpohjan pituutena 1,35 metriä.

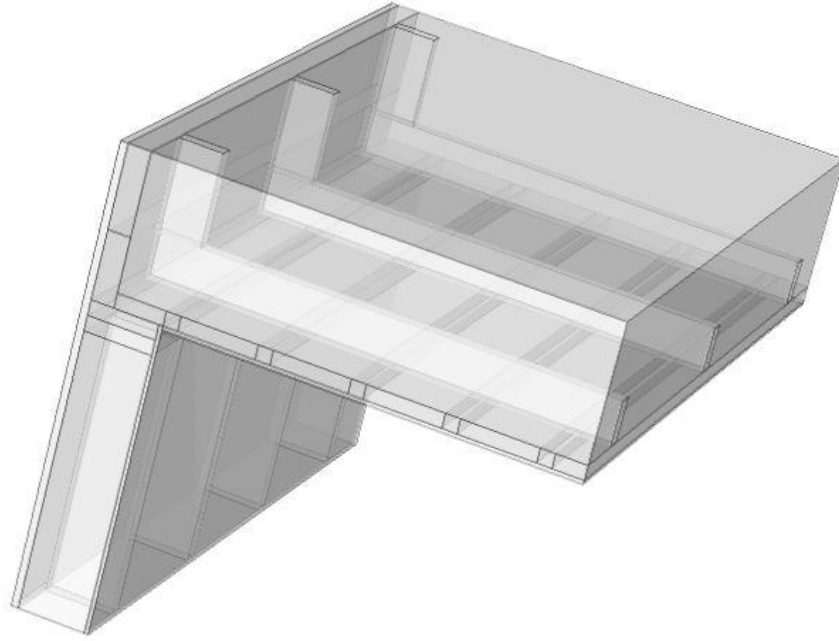
4.3.1 Ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos, suoralta seinän osalta

Yläpohjan ja ulkoseinän välinen liitos mallinnettiin Comsol multiphysics -ohjelmaan 3D-mallina. 3D-mallilla pystyttiin liitokseen mallintamaan ulkoseinän pystyrunko sekä yläpohjaan tulevat kattoristikot. Kuvasta 7 nähdään yläohjauspuiden katkaisevan koko ulkoseinän eristekerroksen, johon rakenteiden välinen kylmäsilta muodostuu.



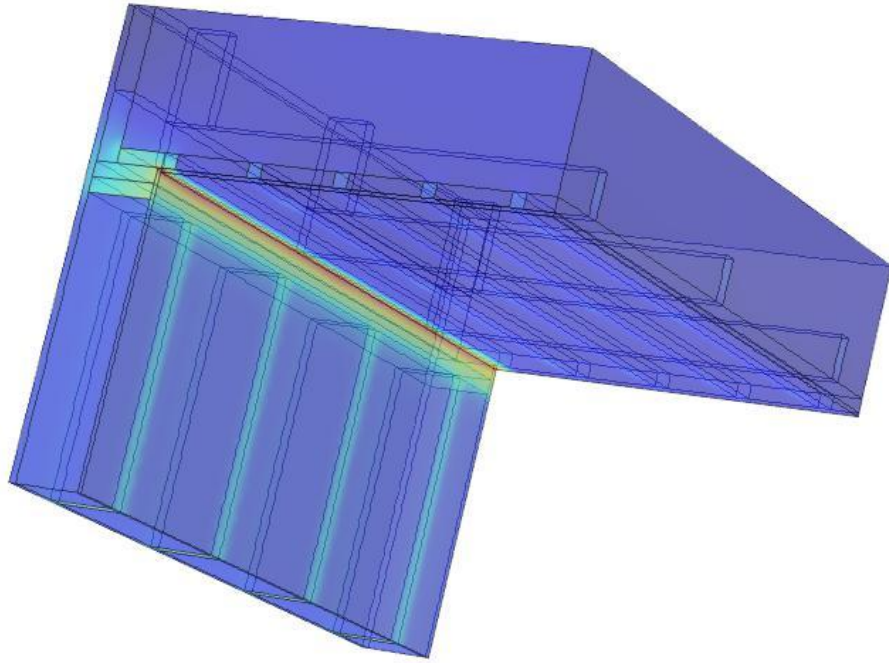
Kuva 7. Vertailurakenne. Yläpohjan ja ulkoseinän liitos

Vertailurakenteen liitoskuvasta poistettiin materiaalimerkinnät ja siitä luotiin 3D-malli, joka siirrettiin Comsol -ohjelmaan. Kuvasta poistettiin myös ulkoverhous-paneeli, hyvin tuulettuva ilmarako sekä pystykoolaus. Tuulensuojalevyn ulkopuolen pintavastus korvattiin sisäpintavastuksella. Kuvassa 8 nähdään 3D-malli yläpohjan ja ulkoseinän liitoksesta. [2 s.24]



Kuva 8. Vertailurakenne. 3D-malli yläpohjan ja ulkoseinän liitoksesta

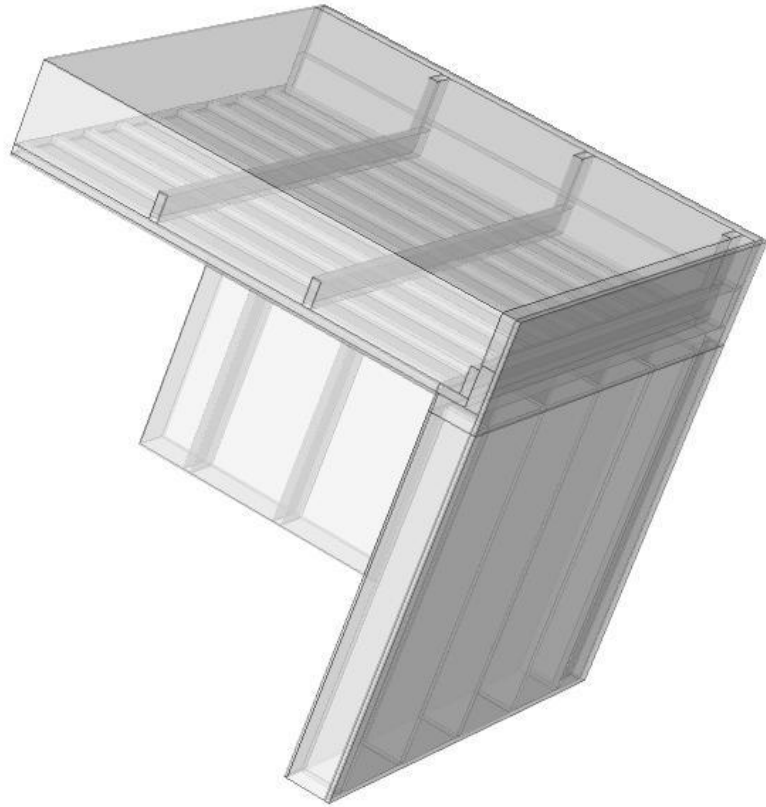
Kuvassa 9 nähdään rakenteen lämpövirran olevan suurimmillaan rakenteen seinän ja yläpohjan liitoksessa. Kylmäsiltoja muodostuu myös ulkoseinän pystyrungosta.



Kuva 9. Vertailurakenne. Yläpohjan ja ulkoseinän välinen liitos, lämpövirta

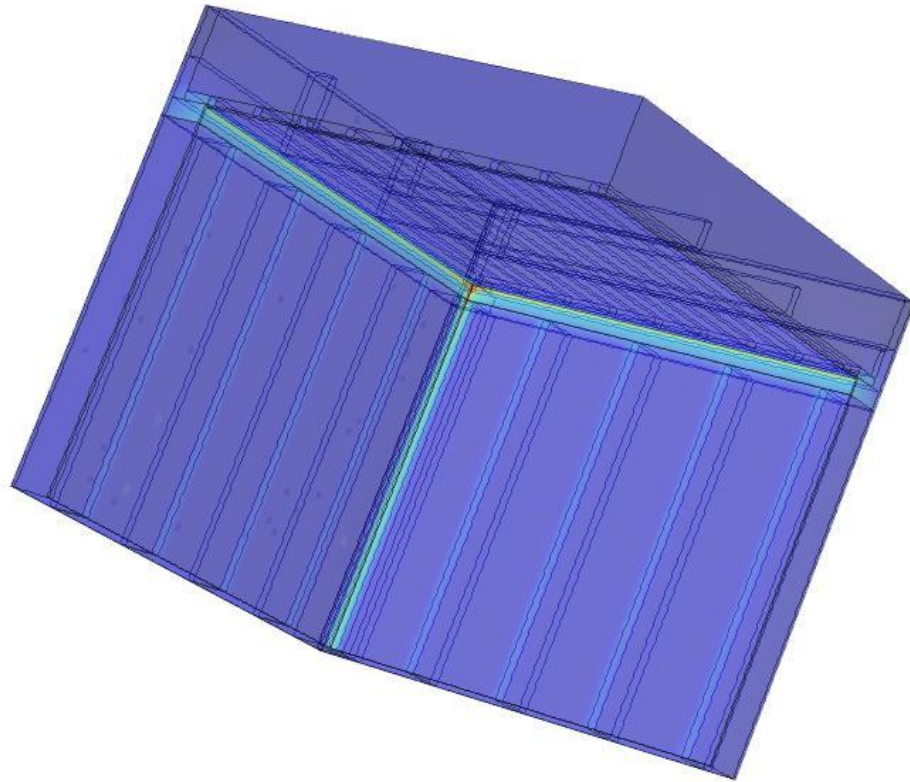
4.3.2 Ulkoseinän ja yläpohjan välinen liitos, ulkonurkan osalta

Ympäristöministeriön viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas käsittelee yläpohjan ja ulkoseinän kylmäsiltojen laskentaa vain suoralta seinän ja yläpohjan osalta (Kuva 8). Laskentaopas ei ota kantaa seinän nurkkaliitoksen ja yläpohjan välisen liitoksen aiheuttamiin pistemäisiin kylmäsiltoihin. Opinnäytetyöhön tehtiin lisäksi 3D-malli seinän nurkan ja yläpohjan välisestä liitoksesta. Kuvasssa 10 on esitetty 3D-malli ulkoseinien ulkonurkan ja yläpohjan välisestä liitosrakenteesta.



Kuva 10. Seinän ulkonurkan ja yläpohjan välinen liitos

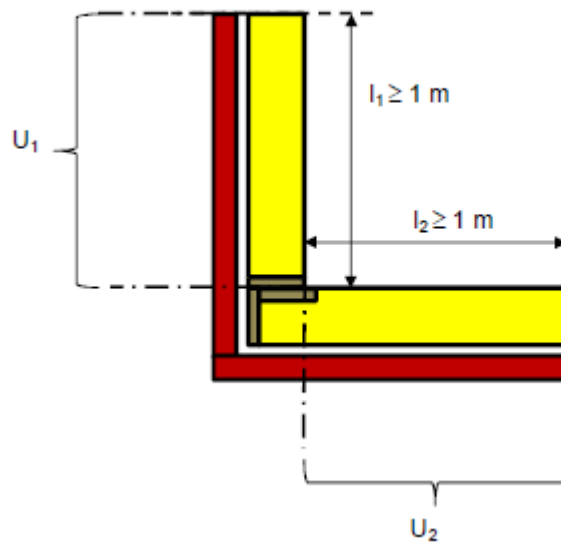
Kuvassa 11 on esitetty lämpövirta ulkonurkan ja yläpohjan liitoksessa. Pistemäinen kylmäsilta muodostuu sisäkaton ja sisänurkan liitokseen.



Kuva 11. Ulkonurkan ja yläpohjan välinen liitos, pistemäinen kylmäsilta seinien nurkan ja sisäkaton liitoksessa

4.4 Ulkoseinien välisen nurkan liitos

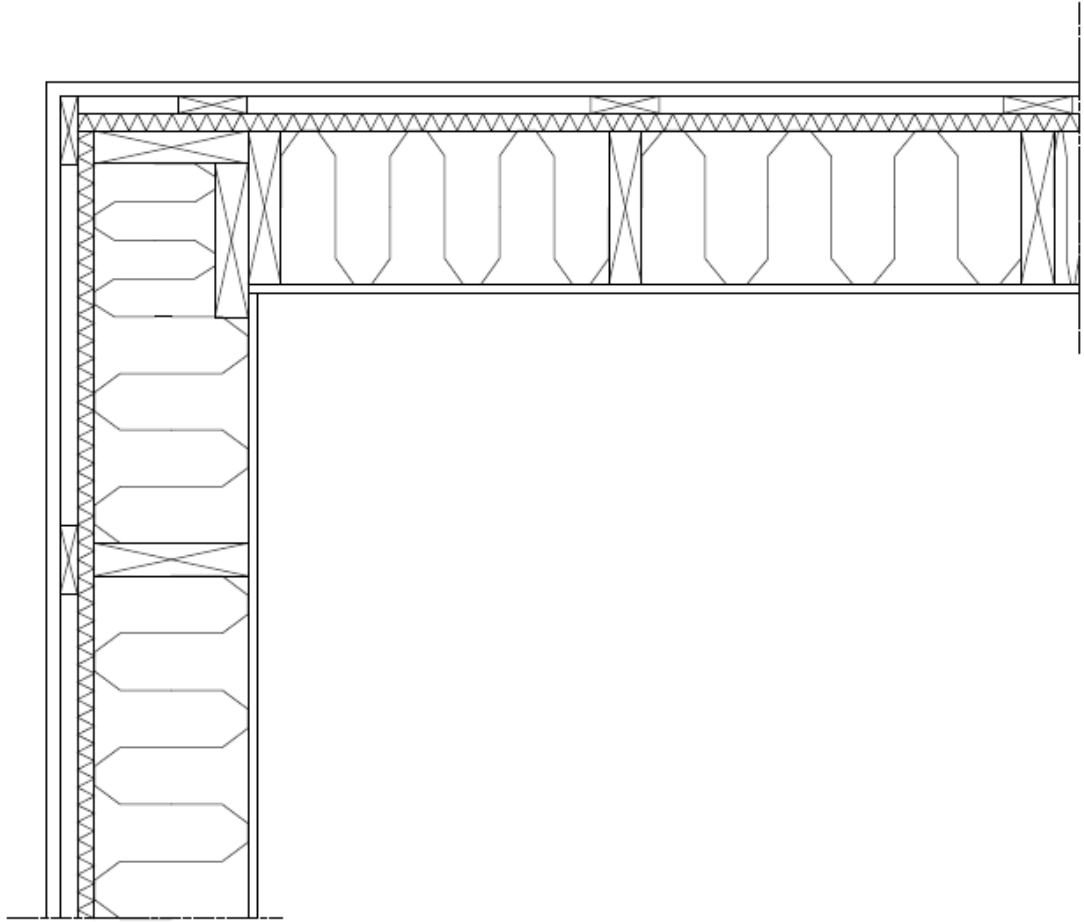
Ulko- ja sisänurkan osalta rakenteet pystyttiin mallintamaan 2-ulotteisina. Ulkoseinien nurkkaliitoksia laskettaessa todellisen rakenteen lämpövirrasta vähennetään seinien U-arvoilla laskettu lämpövirta. Tuloksena saadaan rakenteen viivamainen lisäkonduktanssi. Kuvassa 12 on esitetty nurkkaliitoksessa käytettävät vähimmäismitat. Mitat l_1 ja l_2 ovat ulkonurkan osalta 1 m. Sisänurkan osalta mitat l_1 ja l_2 ovat 1,261 m [1 s.29].



Kuva 12. Seinien nurkkaliitoksen vähimmäismitat [1 s. 29]

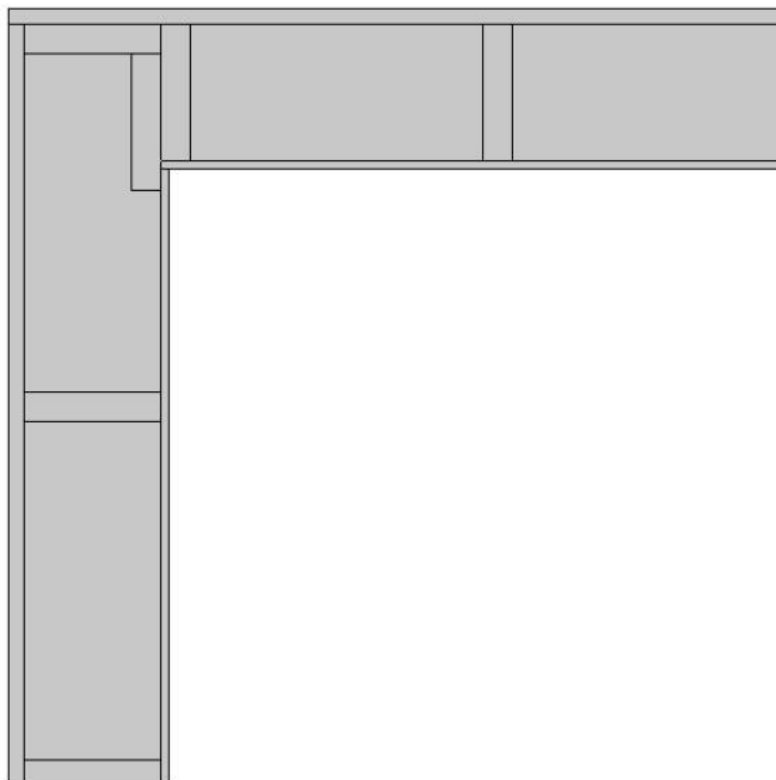
4.4.1 Ulkonurkka

Seinän ulkonurkkaan muodostuu kylmäsiltoja runkotolppien kohdalle. Runkotolpat kulkevat koko eristekerroksen läpi. Kuvassa 13 on esitetty ulkonurkan liitosdetalji.

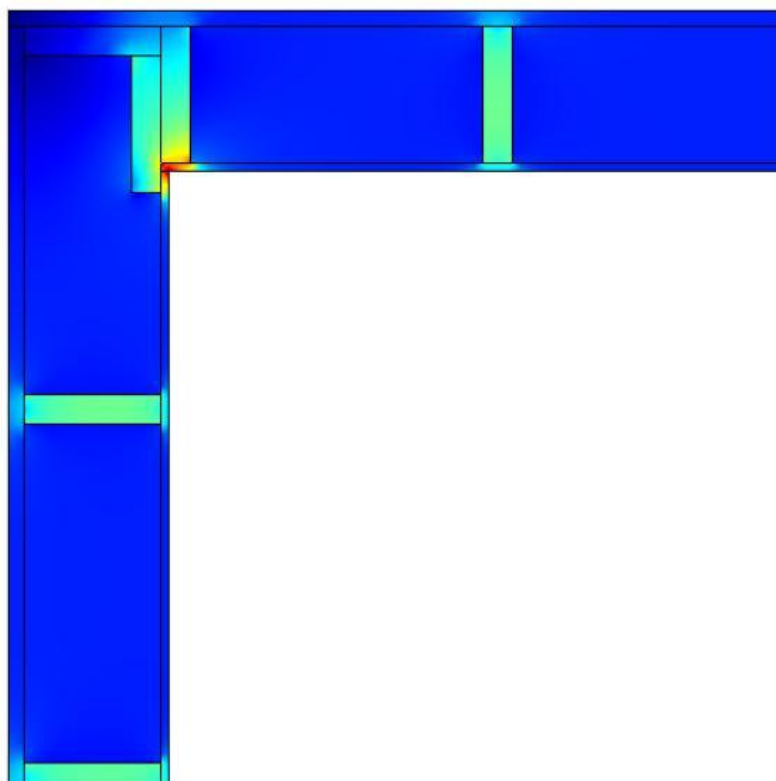


Kuva 13. Ulkonurkan liitosdetalji [9]

Ulkonurkan liitoskuvasta poistettiin ainemerkinnyt ja se siirrettiin Comsoliiin. Kuvassa 14 on esitetty yksinkertaistettu ulkonurkan rakenne ja kuvasta 15 näkyy ulkonurkan lämpövirta. Lämpövirta ulkonurkassa on suurimmillaan nurkan kahden vierekkäisen runkotolpan välissä. Kylmäsiltoja muodostuu myös suoran seinän osalla oleviin runkotolppiin. Yksinkertaistetussa kuvassa on ulkoverhouspaneeli, hyvin tuulettuva ilmarako ja pystykoolaus jätetty huomioimatta ja korvattu tuulensuojalevyn ulkopinnan pintavastus sisäpintavastuksella (R_{si}) [2 s.24].



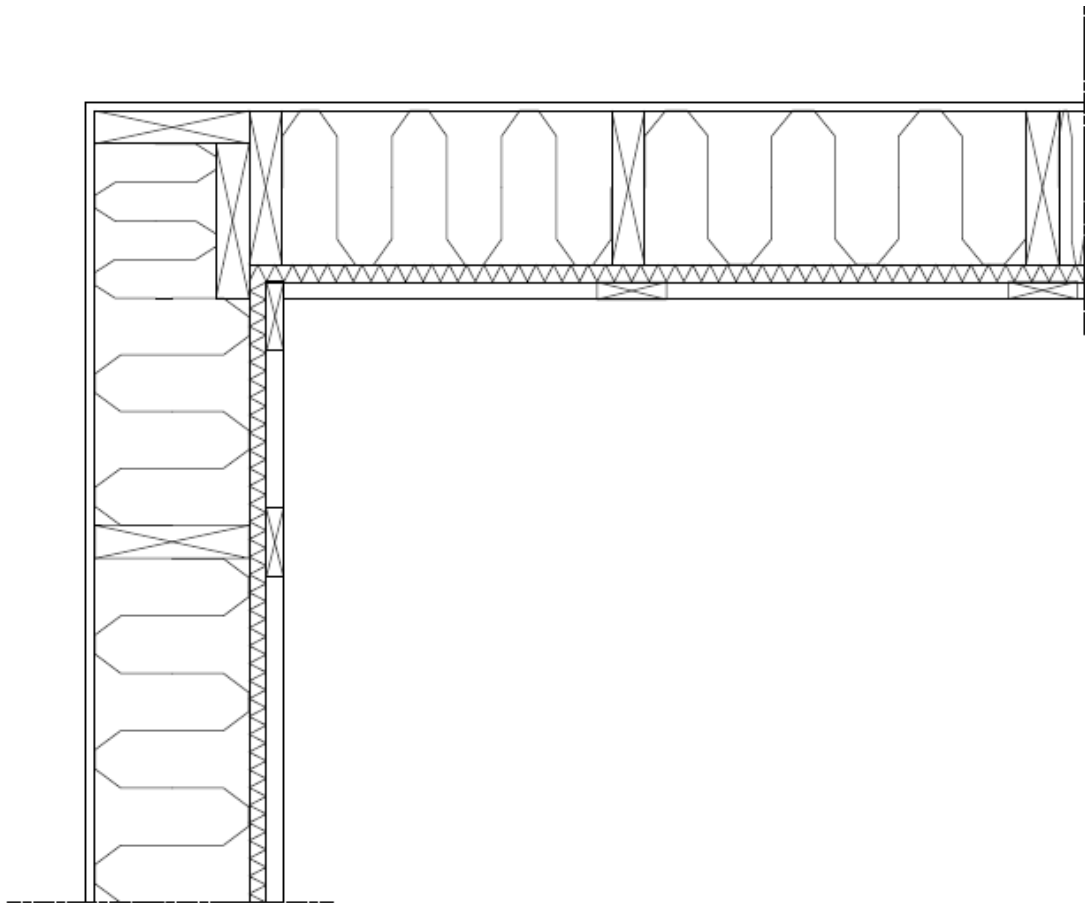
Kuva 14. Yksinkertaistettu rakenne



Kuva 15. Lämpövirta ulkonurkassa.

4.4.2 Sisänurkka

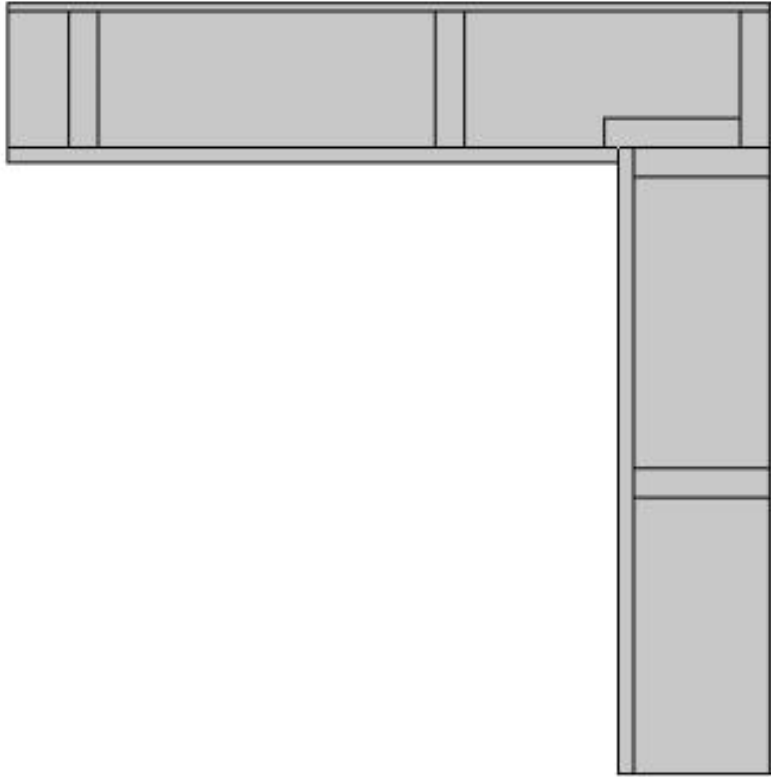
Sisänurkan viivamainen lisäkonduktanssi lasketaan samalla periaatteella kuin ulkonurkkakin. Sisänurkassa seinän sisäpinta-ala on suurempi kuin seinän ulkopinta-ala, jonka takia viivamainen lisäkonduktanssi sisänurkassa on negatiivista. Kuvassa 16 on esitetty sisänurkan liitosdetalji.



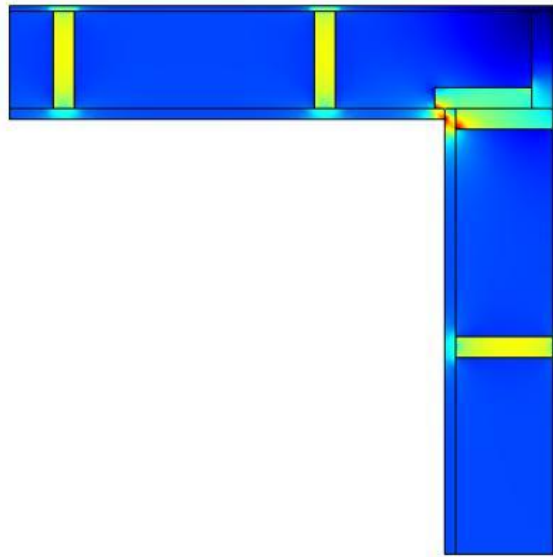
Kuva 16. Sisänurkan liitosdetalji [9]

Materiaalimerkinnät poistettiin ja malli siirrettiin Comsol multiphysics -ohjelmaan. Ulkoverhouspaneeli, hyvin tuulettuva ilmarako sekä pystykoolaus jätettiin mallissa huomiotta ja tuulensuojalevyn ulkopinnan pintavastus korvattiin sisäpintavastuksella (R_{si}). Kuvassa 17 on esitetty yksinkertaistettu sisänurkka ja kuvassa 18 näkyy sisänurkan lämpövirta. Kylmäsiltoja muodostuu nurkan run-

kotolppien ja suoran seinän osan runkotolppien kautta. Lämpövirta on suurimmillaan rakenteen nurkassa kahden vierekkäisen pystyrungon alueella [2 s.24].



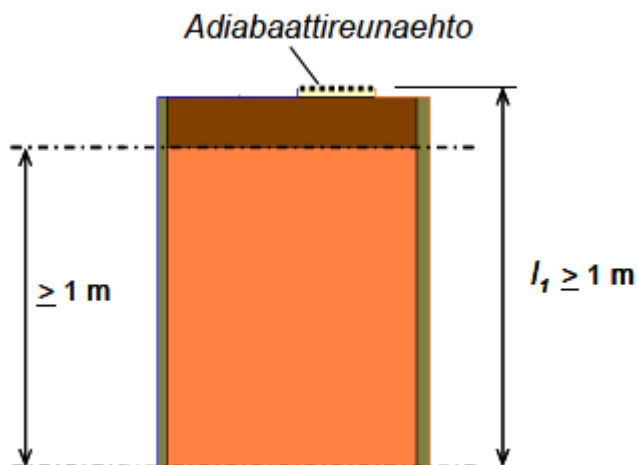
Kuva 17. Yksinkertaistettu sisänurkka



Kuva 18. Sisänurkan lämpövirta rakenteessa

4.5 Ikkunan liitos

Ikkunan ja oven viivamaisia lisäkonduktansseja tarkasteltaessa ikkunat ja ovet korvattiin adiabaattireunaehdolla, eli rakenne ajatellaan täysin lämpöeristetyksi mallin ylä- sekä alapinnassa kuvan 19 mukaisesti. Seinää otettiin huomioon 1 m verran. Viivamainen lisäkonduktanssi saatiin laskemalla rakenteen todellinen lämpövirta ja vähentämällä siitä seinän U-arvolla laskettu lämpövirta [1 s.27- 28].



Kuva 19. Ikkunaliitoksen yksinkertaistus. Ikkuna korvattu adiabaattireunaehdolla [1 s. 28]

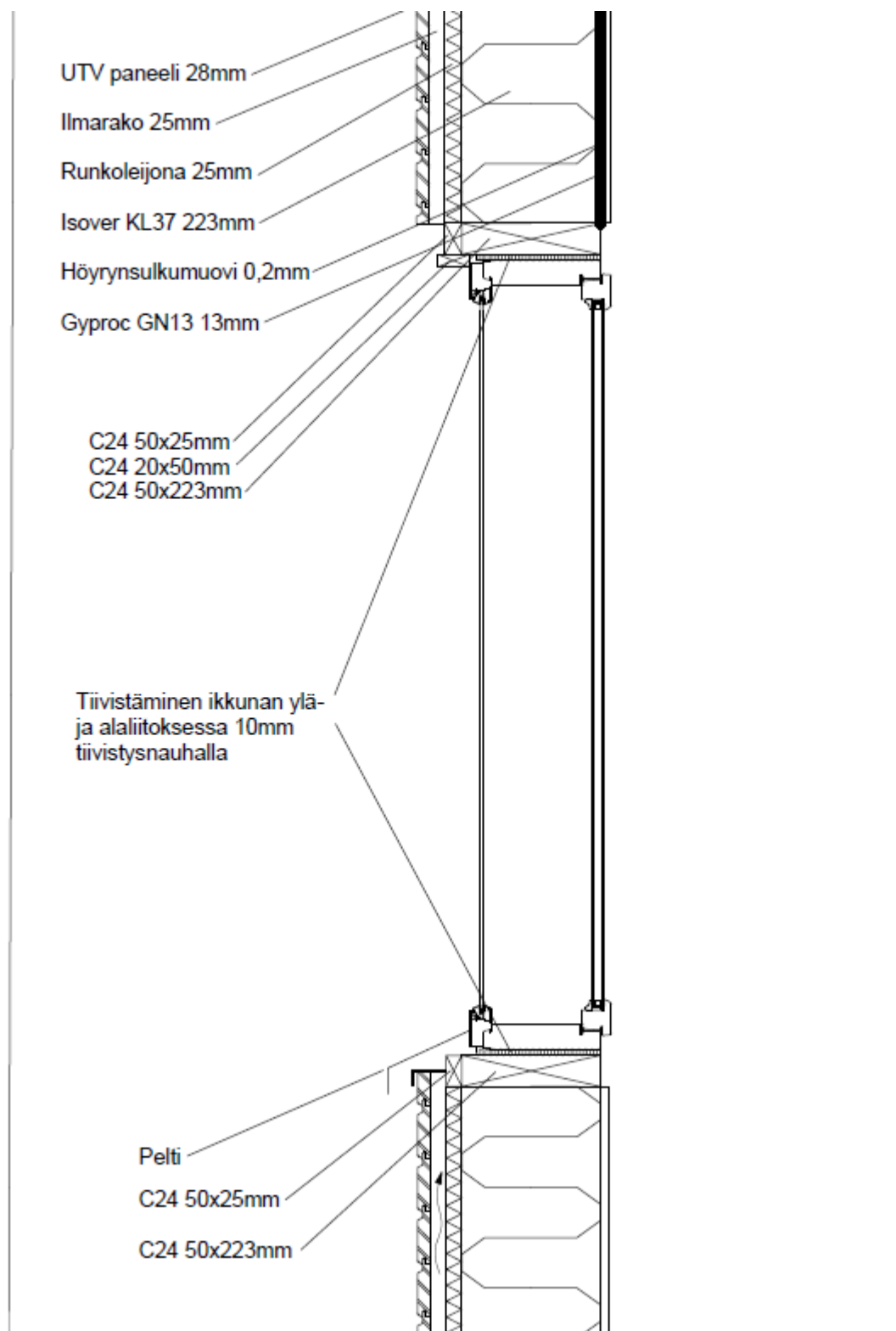
Adiabaattireunaehdon yhteydessä karmia on kavennettava laskennassa. Tämä laskennallinen karmisyvyys riippuu rakenteen todellisesta karmisyvyydestä ja ikkunatyypistä taulukon 6 mukaan. Karmia kavennetaan ulkopuolelta. [1 s. 28]

Vertailurakenteessa käytettyä kolmilasista ikkunaa piti kaventaa 60 %:iin todellisesta karmisyvyydestä ja energiakotien nelilasista ikkunaa puolestaan 70 %:iin todellisesta karmisyvyydestä. Vertailurakenteen ikkunatyyppejä oli MSE, Energiakotien ikkunatyyppejä oli puolestaan MS2E.

Taulukko 6. Karmisyvyyden kaventaminen [1 s. 28]

Ikkunatyyppejä	Karmien 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

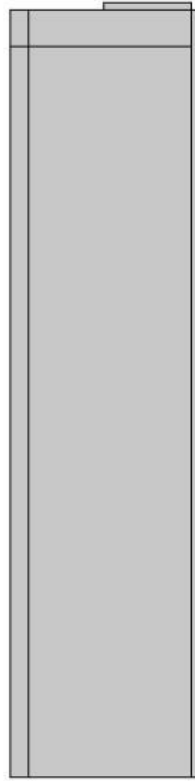
Ikkunaliitoksessa laskettiin erikseen ylä- sekä alaliitoksen viivamaiset lisäkonduktanssit. Kuvassa 20 on esitetty ikkunan detaljikuva.



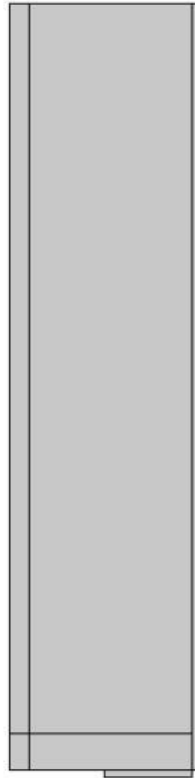
Kuva 20. Ikkunaliitos detaljokuva [13]

Detaljikuvasta poistettiin materiaalimerkinnät ennen sen siirtämistä Comsol ohjelmaan. Ikkunan ylä- ja alaliitos piti laskea erikseen. Comsol mallista poistettiin myös ulkoverhouspaneeli, tuuletusrako ja pystykoolaus. Tuulensuojalevyn ulko-

puolinen pintavastus korvattiin sisäpintavastuksena (R_{si}). Myös ikkuna poistettiin yksinkertaistetusta mallista pois. Kuvassa 21 on esitetty yksinkertaistettu ikkunan alaliitos ja kuvassa 22 näkyy yksinkertaistettu ikkunan yläliitos. Ikkunaliiitoksissa kylmäsilta muodostuu apukarmin ja tiivistysnauhan alueelle [2. s24].



Kuva 21. Ikkunan alaliitos. Yksinkertaistettu malli

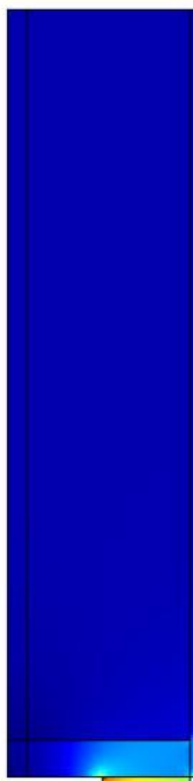


Kuva 22. Ikkunan yläliitos. Yksinkertaistettu malli

Kylmäsilta muodostuu ikkunapenkin ja tiivistysnauhan alueelle. Ikkuna- ja oviliitoksissa ei ole huomioitu seinän pystyrunkoa mukaan lisäkonduktanssin tarkasteluun vaan liitokset on mallinnettu kaksiulotteisina. Kuvassa 23 on esitetty ikkunan alaliitos lämpövirran osalta, kylmäsilta muodostuu ikkunapenkin päällä olevalle tiivistysnauhan alueelle. Kuvassa 24 on esitetty ikkunan yläliitoksessa vaikuttava lämpövirta. Lämpövirta suurimmillaan tiivistysnauhan alueella.



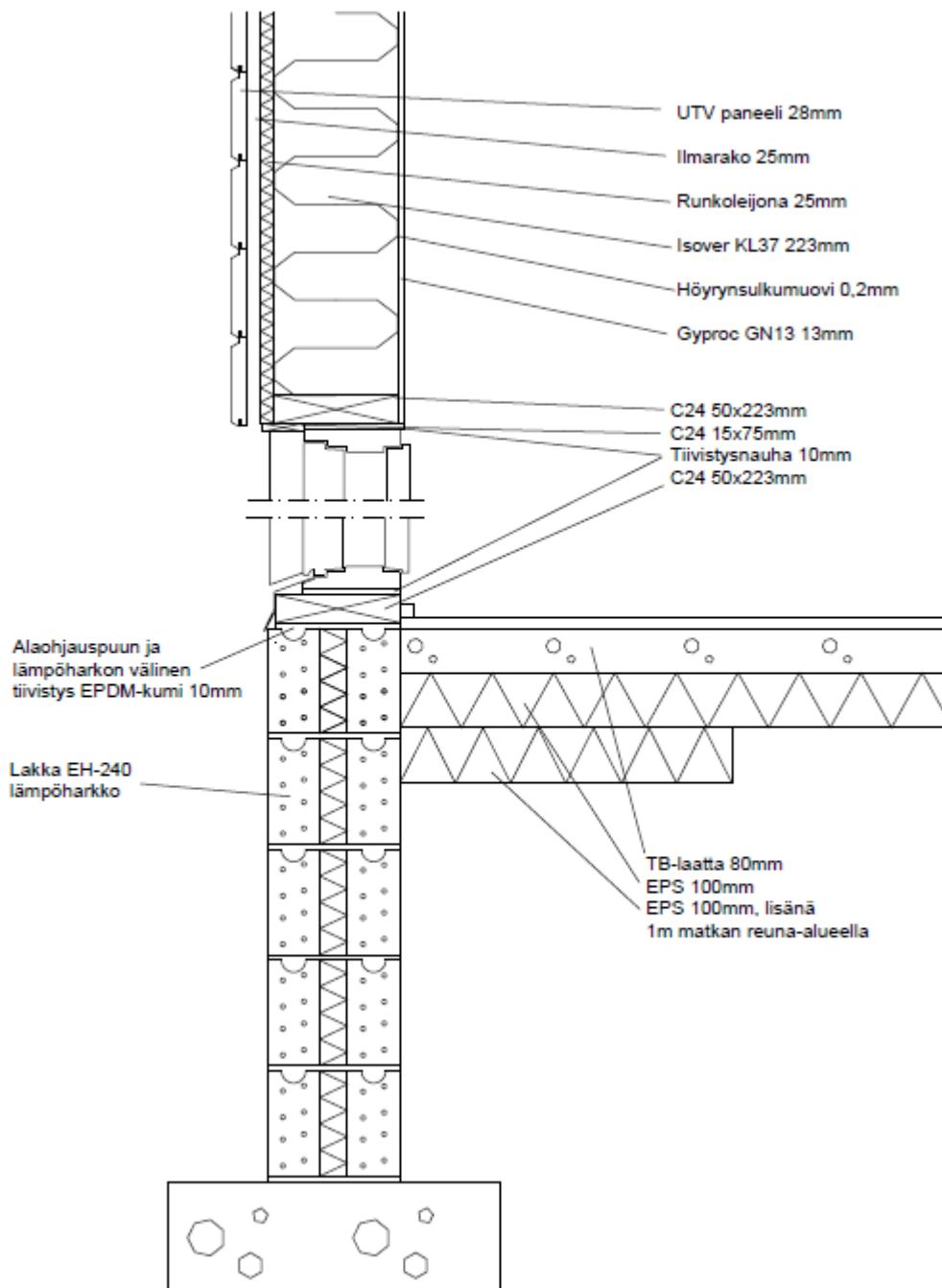
Kuva 23. Ikkunan alaliitos, lämpövirta



Kuva 24. Ikkunan yläliitos, lämpövirta

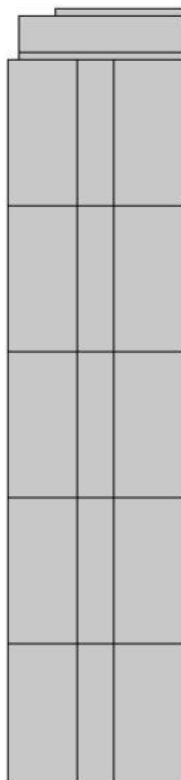
4.6 Oven liitos

Oven liitoksen viivamaisen lisäkonduktanssin laskennassa toimittiin samalla tavalla kuin ikkunaliitoksen kanssa. Ovi korvattiin adiabaattireunaehdolla. Oven alaliitoksessa viivamaiseen lisäkonduktanssiin vaikuttaa myös alapohjan ja ulkoseinän välinen lisäkonduktanssi. Kuvassa 25 on esitetty oven liitosdetalji.

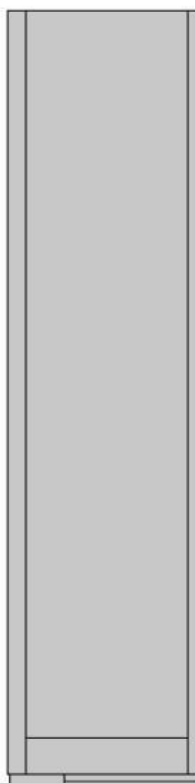


Kuva 25. Oven liitosdetalji

Kuvasta poistettiin materiaalimerkinnät ennen siirtämistä Comsol ohjelmaan. Ennen siirtämistä kuvasta poistettiin myös ulkoverhouspaneeli, ilmarako ja pysykoolaus. Oven alaliitoksesta poistettiin lisäksi alapohja. Kuvassa 26 on esitetty yksinkertaistettu rakenne oven alaliitoksesta. Alaliitoksessa Kuvassa 27 on esitetty yksinkertaistettu rakenne oven yläliitoksesta.



Kuva 26. Oven alaliitos, yksinkertaistettu malli



Kuva 27. Oven yläliitos, yksinkertaistettu malli

Kuvassa 28 on esitetty oven alaliitoksen lämpövirta. Kylmäsilta muodostuu aliohjauspuun ja tiivistysnauhan alueelle. Lämpöä siirtyy myös EPDM- kumin ja lämpöharkon välistä. Kuvassa 29 on esitetty oven yläliitoksen kylmäsilta aiheutuvat lämpövirrat. Lämpöä siirtyy tiivistysnauhan kautta rakenteen sisältä ulos.



Kuva 28. Oven alaliitoksen lämpövirta



Kuva 29. Oven yläliitoksen lämpövirta

5 E-luku

E-luku, eli rakennuksen kokonaisenergiakulutus on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus rakennustyyppin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. E-luku saadaan laskemalla yhteen ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain. [6 s.8]

Uudisrakennuksille on määrätty eri luokat, riippuen rakennuksen käyttötarkoituksesta. Jokaiselle eri luokalle ja rakennuksen käyttötarkoitukselle on määrätty omat raja-arvot, kuinka monta kilowattituntia neliometriä kohden rakennus saa vuodessa kuluttaa (kWh/m^2 vuosi). Jos samaa rakennusta käytetään moneen eri käyttötarkoitukseen, jaetaan rakennus käyttötarkoituksiltaan eriäviin osiin ja lasketaan rakennuksen kokonaisenergiankulutus jokaiselta osalta erikseen. Poikkeuksena, jos käyttötarkoitukseltaan erilainen rakennuksen osa on alle 10

% lämmitettävästä tilasta voidaan se laskea muihin aloihin kuuluvaksi [15 s.14 - 18].

E-lukua ei tarvitse laskea kaikkiin rakennuksiin. Poikkeuksia ovat esimerkiksi pinta-alaltaan alle 50 m² rakennukset tai loma-asunnot, joihin ei ole suunniteltu ympärivuotista lämmitysjärjestelmää [15 s.5 -6].

Rakennuksen E-luvun laskentaan käytetään rakennuksen pinta-alana ulkoseinien sisäpintojen määräämää aluetta. Vaihtoehtoisesti pinta-ala voidaan laskea lämmitetystä bruttoalasta, josta vähennetään ulkoseinien rakennusosa-ala. Olemassa olevaan rakennukseen johon ollaan laskemassa E-lukua, voidaan pinta-ala tarkistaa rakennuspiirustuksista. Mikäli rakennuspiirustuksia ei ole, tai asiakirjat eivät ole ajan tasalla, voidaan pinta-alaksi arvioida 90% lämmitetystä bruttoalasta [15 s.19].

6 Tulokset

Viivamaisen lisäkonduktanssinärkevimmäksi laskentatavaksi osoittautui laskentaohjelman ja numeerisen laskennan yhdistely. Passiivitalorakenteen viivamaiset lisäkonduktanssit osoittautuivat selvästi ohjearvoja pienemmiksi. Vertailurakenteessakin päästiin alle viivamaisten lisäkonduktanssien osalta alle ohjearvojen, mutta erot eivät olleet niin suuria.

Laskentapalvelujen E-lukulaskurilla tehtiin neljä erilaista laskua, Energiakotien rakenteilla lasketuille lisäkonduktansseille (sähkölämmityksenä ja kaukolämpönä), vertailuratkaisun rakenteilla lasketuille lisäkonduktansseille, Energiakotien rakenteilla ja viivamaisten lisäkonduktanssien ohjearvoilla laskettu E-luku. Kaikki E-luku laskut tehtiin Energiakotien pohjaratkaisuun [17].

6.1 Viivamaiset lisäkonduktanssit

Taulukossa 7 on esitetty Energiakotien kohteen viivamaiset lisäkonduktanssit verrattuna rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvoihin.

Taulukko 7. Energiakotien viivamaiset lisäkonduktanssit

Liitokset: Energiakodit OY	Tutkittu ψ (W/mK)	Ohjearvo ψ (W/mK)	Ero
Ulkoseinä - yläpohja	0,0231	0,05	46,20 %
Ulkoseinien ulkonurkka	0,0207	0,04	51,75 %
Ulkoseinien sisänurkka	-0,0419	-0,04	104,75 %
Ikkunan alaliitos	0,0210	0,04	52,50 %
Ikkunan yläliitos	0,0160	0,04	40,00 %
Oven alaliitos	0,0120	0,04	30,00 %
Oven yläliitos	0,0130	0,04	32,50 %

Pääasiallisesti Energiakotien rakenneratkaisuissa päästiin yli puolet parempiin tuloksiin kuin ohjearvoissa. Poikkeuksena ulkoseinien välinen sisänurkka, joka on ohjearvoa vain 4,75 % parempi. Sisänurkan kylmäsilta katkaisee rakenteessa polyuretaani eriste. Ulkonurkassa lisäkonduktanssi pienenee lähes puoleen ohjearvosta.

Yläpohjan ja ulkoseinän välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi pienenee yli puoleen ohjearvosta. Ikkunoiden ja ovien liitoksissa tiivistämiseen käytettävä uretaanivahto, jonka lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo on pieni verrattuna yleisemmin käytettävään tiivistysnauhaan, laskee lisäkonduktanssin arvo todella hyväksi.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin lisäksi seinänurkan ja yläpohjan rakenneliitoksen välistä pistemäistä kylmäsiltaa. Seinänurkalle ja yläpohjan rakenneliitokselle laskettiin pistemäiseksi arvoksi 0,0341 W/K. Taulukossa 7 ilmoitettu yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen lisäkonduktanssi (0,0231 W/mK) on laskettu suoralta seinän ja yläpohjan osalta, kuten ympäristöministeriön viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa on neuvottu.

Taulukossa 8 on esitetty vertailurakenteen viivamaiset lisäkonduktanssit verrattuna rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvoihin.

Taulukko 8. Vertailuratkaisun viivamaiset lisäkonduktanssit

Liitokset: Vertailurakenne	Tutkittu ψ (W/mK)	Ohjearvo ψ (W/mK)	Ero
Ulkoseinä - yläpohja	0,0473	0,05	94,60 %
Ulkoseinien ulkonurkka	0,0335	0,04	83,75 %
Ulkoseinien sisänurkka	-0,0600	-0,04	150,00 %
Ikkunan alaliitos	0,0520	0,04	130,00 %
Ikkunan yläliitos	0,0510	0,04	127,50 %
Oven alaliitos	0,0280	0,04	70,00 %
Oven yläliitos	0,0280	0,04	70,00 %

Vertailuratkaisun viivamaiset lisäkonduktanssit olivat pääasiallisesti ohjearvoja parempia, ainoastaan ikkunan liitokset olivat arvoltaan ohjearvoja huonompia. Vertailuratkaisussa ei kuitenkaan päästy lähellekään Energiakotien passiivitalorakenteen lisäkonduktanssien arvoja, ulkoseinien sisänurkkaa lukuun ottamatta.

Ulkoseinien välisen sisänurkan viivamainen lisäkonduktanssi oli kuitenkin yllättäen selvästi ohjearvoa sekä Energiakotien sisänurkan rakennetta parempi. Ulkonurkan osalta päästiin hieman parempiin tuloksiin, ulkoseinän ja yläpohjan liitoksessakin tutkittu lisäkonduktanssi alitti ohjearvon. Ovien liitoksissa päästiin alle ohjearvojen. Ovi- ja ikkunaliitoksissa tiivistämiseen käytettiin 10 mm tiivistysnauhaa.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin lisäksi seinänurkan ja yläpohjan rakenneliitoksen välistä pistemäistä kylmäsiltaa. Seinänurkalle ja yläpohjan rakenneliitokselle (Kuva 10 ja Kuva 11) laskettiin pistemäisen lisäkonduktanssin arvo 0,0585 W/K. Taulukossa 8 ilmoitettu yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen (Kuva 8 ja Kuva 9) viivamainen lisäkonduktanssi (0,0473 W/mK) on laskettu suoralta seinän ja

yläpohjan osalta, kuten ympäristöministeriön viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa on neuvottu.

6.2 E-luku

Energiakotien rakenteella ja rakennusmääräyskokoelman osan D5 ohjearvoilla E-luvuksi saatiin 164 kWh/m^2 , kun tämän kokoiselle kohteelle E-luvun raja-arvo on 170 kWh/m^2 . Tällä arvolla päästiin energiatehokkuusluokkaan C. Numeerisesti lasketuilla viivamaisilla lisäkonduktansseilla E-luku oli 158 kWh/m^2 , eli E-luvun arvo pieneni 3,7 %. Energiatehokkuusluokka pysyi kuitenkin luokassa C.

Vertailurakenteessa E-luku oli 193 kWh/m^2 , joka menee selvästi yli raja-arvon. Suuri nousu selittyy selkeästi suuremmista rakenteiden lämmönläpäisykertoimista.

Energiatehokkuusluokkaan A vaadittaisiin alle 82 kWh/m^2 kokonaisenergiankulutusta vuositasolla. Samoilla arvoilla oleva uudisrakennus, jossa sähkölämmityksen sijaan olisi ollut kaukolämpölämmitys, kokonaisenergiankulutus olisi laskenut 158 kWh/m^2 :stä 104 kWh/m^2 asti. Kokonaisenergiankulutuksella 104 kWh/m^2 olisi energiatehokkuusluokka ollut B ($83 - 132 \text{ kWh/m}^2$). Energiatodistus Energiakotien kohteesta, jossa lisäkonduktanssien arvoina on käytetty numeerisesti laskettuja arvoja, on esitetty liitteessä 2.

Taulukossa 9 on esitetty kokonaisenergiankulutukset ja energiatehokkuusluokat Energiakotien rakenteella ja ohjearvoilla, Energiakotien rakenteella ja sille numeerisesti lasketuilla lisäkonduktansseilla, vertailurakenteella ja sille numeerisesti lasketuilla lisäkonduktansseilla sekä Energiakotien rakenteella ja sille numeerisesti lasketuilla lisäkonduktansseilla, kun lämmitysmuotona on sähkölämmityksen sijaan kaukolämpö.

Taulukko 9. Kohteiden kokonaisenergiankulutus ja energiatehokkuusluokka

Kohde	Kokonaisenergiankulutus (kWhE/m ² vuosi), E-luku	Energiatehokkuus luokka
Energiakodit, ohjearvot	164	C
Energiakodit, numeerisesti lasketut lisäkonduktanssit	158	C
Vertailurakenne, numeerisesti lasketut lisäkonduktanssit	193	D
Energiakodit, kaukolämpö	104	B

7 Tulosten analysointi

Passiivitalorakenteessa, jossa rakenteiden lämmönläpäisykertoimet alittavat selkeästi nykypäivän ohjearvot on kannattavaa suorittaa lisäkonduktansseille tarkempi laskenta, eikä vain tyytyä rakennusmääräyskokoelman ohjearvoihin. Energiakotien osalla viivamaiset lisäkonduktanssit pienenevät noin puoleen ohjearvoista. E-lukua saatiin pudotettua noin neljä prosenttia, kun viivamaiset lisäkonduktanssit laskettiin numeerisesti.

Vertailurakenteessa ei puolestaan suuriin eroihin lisäkonduktanssin puolesta päästy. Viivamaisten lisäkonduktanssien selvittäminen on varsin työlästä, eikä sitä kannata suorittaa jos rakenteen U-arvot lähentelevät nykypäivän ohjearvoja. E-luvuksi vertailurakenteelle saatiin 193 kWh/m² ja tulos olisi ollut 192 kWh/m², jos viivamaisina lisäkonduktansseina olisi käytetty rakennusmääräyskokoelman ohjearvoja.

Suuri ero lisäkonduktanssien osalta on selitettävissä erilaisilla ulkoseinä rakenteilla. Energiakotien passiivitalorakenteet on suunniteltu todella energiatehokkaiksi ja niissä on käytetty huomattavasti enemmän eristäviä materiaaleja. Kylmäsiilat on pyritty katkaisemaan kaksirunkoisella seinärakenteella, joka vä-

hentää liitosten välistä lämpövirtaa. RT-kortin ulkoseinässä, jossa on yksiosainen pystyrunko ja eristekerros, kylmäsiltojen vaikutus on selkeästi suurempaa kuin Energiakotien passiivitalojen ulkoseinässä.

8 Pohdinta

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella viivamaisten lisäkonduktanssien eroja passiivitalorakenteiden sekä lähellä nykypäivän määräyksiä olevien rakenneratkaisuiden välillä ja sen laskemisen kannattavuutta. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös numeerisesti laskettujen viivamaisten lisäkonduktanssien vaikutusta uudisrakennuksen E-lukuun. Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Energiakodeille. Salassapitosuojan takia Energiakotien rakenteita, eikä leikkauskuvia esitetty opinnäytetyössä.

Työssä käytettiin apuna Autocad- sekä Comsol multiphysics -ohjelmia. Autocad-ohjelmalla tehtiin mallit liitoksista, jotka siirrettiin Comsol multiphysics -ohjelmaan. Comsolin avulla laskettiin rakenteille lämpövirrat. Lopulliset viivamaiset lisäkonduktanssit suoritettiin numeerisesti laskemalla.

Viivamaiset kylmäsilat saatiin laskettua kaikille muille tapauksille paitsi maanvaraisen alapohjan ja ulkoseinän liitokselle. Laskennan varmentamiseen olisi tarvittu tarkkoja lämpötilamittauksia rakennuksen alapohjan alta eri maakerroksille ja eri syvyyksille.

Viivamaisten kylmäsiltojen numeerisen laskun tarpeellisuus kasvaa mitä pienemmät lämmönläpäisykertoimet rakenteella on. Rakennusmääräyskokoelman ohjearvot viivamaisten lisäkonduktanssien osalta ovat hyvin suuntaa antavia, kun rakenteen lämmönläpäisykertoimet ovat lähellä nykyvaatimuksia. RT-kortin yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen lisäkonduktanssiksi saatiin 0,473 W/mK (U-arvo 0,09 W/m²K), kun taas Energiakotien vastaava arvo oli 0,0231 W/mK (U-arvo 0,06 W/m²K). Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksessa lämmönläpäisykerroimen oltua noin kaksi kolmasosaa nykypäivän vaatimuksesta (0,06 W/m²K) viivamainen lisäkonduktanssi putosi 46,2 %:iin ohjearvosta. Lämmönlä-

päisykertoimen ollessa lähellä nykypäivän ohjearvoa ($0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$) viivamainen lisäkonduktanssi oli ohjearvoon nähden 94,6 %. Tästä huomataan numeerisen laskennan kannattavuuden kasvavan huomasti, mitä pienempi rakenteen lämmönläpäisykerroin on.

3D-mallintamisella saadaan rakenteet mallinnettua huomattavasti tarkemmin kuin kaksiulotteisella menetelmällä, mutta työn määrä moninkertaistuu. Ainakin yläpohjan ja ulkoseinän liitoksessa on tärkeää saada mallinnettua kuvaan myös seinän runko, sekä kattoristikot, joka ei kaksiulotteisena onnistu. Kaksiulotteinen mallintaminen oli kuitenkin toimivaa pelkissä ulkoseinien välisissä nurkkaliitoksissa, sekä ikkuna- ja oviliitoksissa, joissa kaikki tarvittavat detaljit saatiin näkyviin myös kaksiulotteisena.

Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet täyttyivät, vaikkakin maanvastaisen alapohjan ja ulkoseinän liitos jäi mallintamatta. Lisäksi työssä lasketut pistemäiset kylmäsilat rakennuksen ulkonurkan ja yläpohjan liitoksessa havaittiin suuremmiksi kuin suoralta seinän ja yläpohjan osalta. Ulkonurkkien osuus rakennuksessa verrattuna suoralle seinän osalle on kuitenkin sen verran pieni, ettei kovin suurta muutosta lisäkonduktanssin arvolle saavutettaisi.

Itse lisäkonduktanssin laskentamenetelmä on varsin yksinkertainen. Ajankäytöllisesti työtä hidastaa osittaisdifferentiaaliyhtälöitä ratkaisevan laskentaohjelman käyttö lämpövirtojen selvittämiseen. Yksi malli laskettavasta rakenneliitoksesta ei riitä, vaan malleista on tehtävä myös vertailurakenteet. Esimerkkinä yläpohjan ja ulkoseinän viivamaisen lisäkonduktanssin laskennassa tulee tehdä omat 3D-mallit koko liitosrakenteesta, pelkästä yläpohjarakenteesta sekä pelkästä ulkoseinärakenteesta. Laskeminen itsessään vaatii hyvän tietopohjan energiatehokkuutta käsittelevistä rakennusmääräyskokoelmista (D3, D5 ja C4), Autocad -ohjelmasta sekä viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaasta. Lisäksi laskijan on osattava käyttää laskentaohjelmaa jonka vähimmäisvaatimuksena on kaksiulotteisen lämpötilakenttien laskentamahdollisuus jatkuvuus-tilassa [1 s. 13]. Kyseisessä työssä käytettiin Comsol multiphysics -ohjelmaa jolla pystytään mallintamaan myös kolmiulotteisia kappaleita. Aikaa vie myös jokaisen rakenteissa käytetyn materiaalin ja sen lämmönjohtavuuden arvon etsiminen. Comsoliin voi tallentaa materiaalikirjastoon tiedot käytetyistä mate-

riaaleista ja niiden lämmönjohtavuuksista, materiaalikirjaston käyttö nopeuttaa työtä jatkossa. Aikaa kannattaa varata kuitenkin useampi päivä, ainakin ensimmäisten mallien rakentamiseen, sekä laskentaoppaaseen perehtymiseen. Viivamaisten lisäkonduktanssien numeerisen laskentaan lähdetessä kannattaa miettiä laskettavan rakennuksen energiatehokkuutta jo etukäteen, alittavatko rakenteiden (ulkoseinä, alapohja, yläpohja) lämmönläpäisykertoimet selvästi nykypäivän ohjearvot vai ovatko lämmönläpäisykertoimet lähellä niitä. Rajatapauksissa on todennäköisesti järkevämpää käyttää suoraan rakennusmääräskokoelman osan D5 ohjearvoja. Kaikille matalaenergiatorakenteille laskennan tulisi olla kannattavaa ja näkyviä eroja rakennuksen E-lukuun saavutetaan laskemalla viivamaiset lisäkonduktanssit numeerisesti.

Lähteet

1. Ympäristöministeriö. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas: Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan. Laskentaopas 27.4.2012
2. Ympäristöministeriö. C4 Suomen rakennusmääräyskokoelma: Lämmöneristys. Ohjeet 16.3.2012
3. Ympäristöministeriö. D5 Suomen rakennusmääräyskokoelma: Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 14.3.2012
4. SFS-EN ISO 14683: Thermal bridges in building construction. Linear thermal transmittance. Simplified methods and default values. 21.1.2008
5. SFS-EN ISO 10211: Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. 11.2.2008
6. Ympäristöministeriö. D3 Suomen rakennusmääräyskokoelma: Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012
7. Fysiikan oppikirja. Lämpö. Lämmön siirtyminen 2014. [Viitattu 18.5.2014.] Saatavissa:
http://fi.wikibooks.org/wiki/Fysiikan_oppikirja/L%C3%A4mp%C3%B6#L.C3.A4mm.C3.B6n_siirtyminen
8. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. Liitosdetaljit 1,2 ja 3. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa:
https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/44/Kirjasto_tuotteet/4284.html.stx
9. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. Liitosdetalji 12. Esimerkki ulkoseinän (US1) kulmaratkaisusta. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa:
https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/44/Kirjasto_tuotteet/4289.html.stx
10. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. RT AP 417. Betonilaatta, maanvarainen. Alapuolinen lämmöneriste. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa:
https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/203/Kirjasto_tuotteet/5955.html.stx
11. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. RT US 701. Puurunkoinen seinä, mineraalivillaeriste, puuverhous. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa:
https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/204/Kirjasto_tuotteet/5990.html.stx
12. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. Puurakenteinen yläpohja 1. Leikkaus 1:10. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa:
https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/44/Kirjasto_tuotteet/4276.html.stx
13. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. Esimerkki ikkunan liittämisestä ulkoseinään. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa:
https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/34/Kirjasto_tuotteet/4048.html.stx

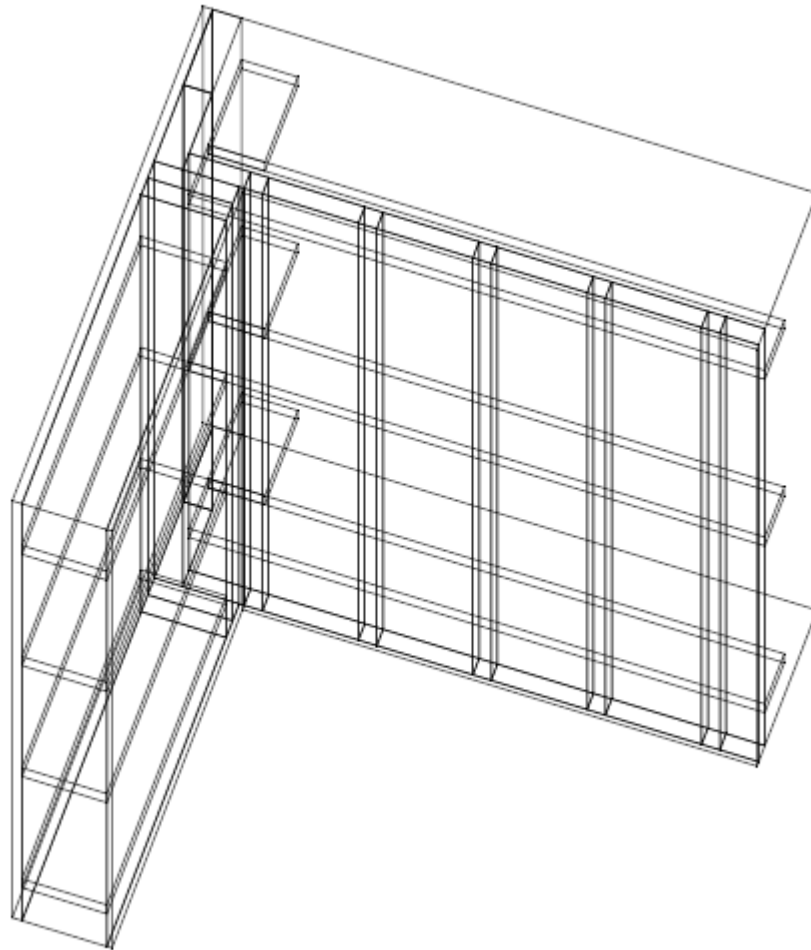
14. Rakennustieto Oy. RT-net. CAD-kirjastot. Esimerkki ulko-oven sovittamisesta ulkoseinään. [Viitattu 22.5.2014.] Saatavissa: https://www.rakennustieto.fi/kortistot/kirjastot/34/Kirjasto_tuotteet/4059.html.stx
15. Vuolle Mika. Rakennusten energiatodistus ja sen E-luvun laskenta 1.6.2013 alkaen. Equa Simulation Finland Oy. [Viitattu 23.5.2014.] Saatavissa: http://energiatodistus.motiva.fi/energiatodistustenlaatijat/tapahtumat/et_vuolle_verkkoon_19032013.pdf
16. Comsol inc. Comsol multiphysics 4.4 kotisivut, Multiphysics software product suite. [Viitattu 26.5.2014.] Saatavissa: <http://www.comsol.com/products>
17. Saint-Gobain rakennustuotteet Oy. E-lukulaskuri. [Viitattu 26.5.2014.] Saatavissa: <http://www.laskentapalvelut.fi/kirjauduttu.php>
18. Puuinfo Oy. Puurakenteen U-arvon määrittäminen 2012. Päivitetty 31.1.2012. [Viitattu 26.5.2014.] Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/mitoitusohjelmat/puurakenteen-u-arvon-maarittaminen>

Liitteet

Liite 1 Yläpohjan ja ulkoseinän rakenneliitoksen laskeminen

Rakenteen liitosdetalji saatiin RT-kortista, rakenteesta muokattiin ainoastaan puhallusvillan kerrospaksuutta vastaamaan nykypäivän vaatimuksia. RT-kortin liitosdetaljissa [8] puhallusvillan paksuutta kasvatettiin 450mm:iin, alkuperäisellä 300mm puhallusvillan kerrospaksuudella päästiin lämmönläpäisykertoimeen $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kasvattamalla puhallusvillan kerrospaksuutta 450mm, päästiin lämmönläpäisykertoimeen $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Lämmönläpäisykerroin laskettiin puuinfon U-arvon määrittämishjelmalla [18].

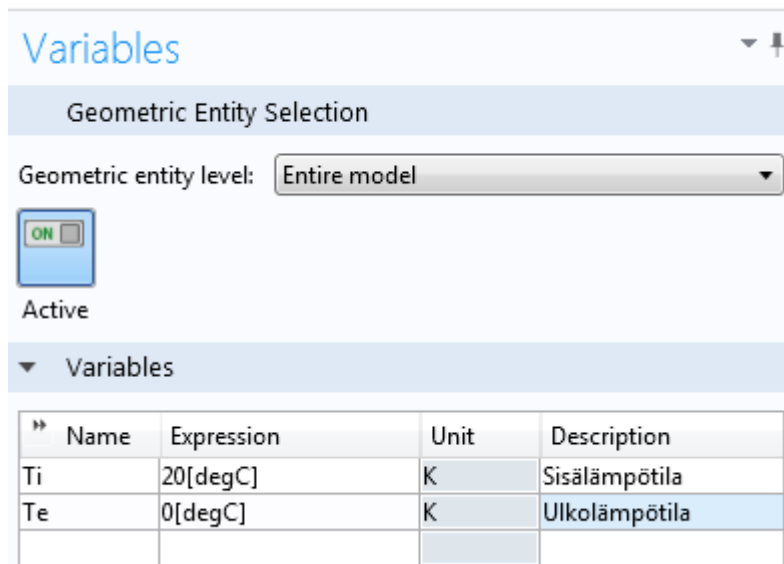
Rakenteesta tehtiin tämän jälkeen 3D-malli Autocad –ohjelmalla, tällä tavoin rakenteesta saatiin näkyviin ulkoseinän puurunko sekä yläpohjan kattoristikot. Kuvassa 1 on esitetty Autocadilla tehty 3D-malli, joka siirrettiin Comsol multiphysics ohjelmaan.



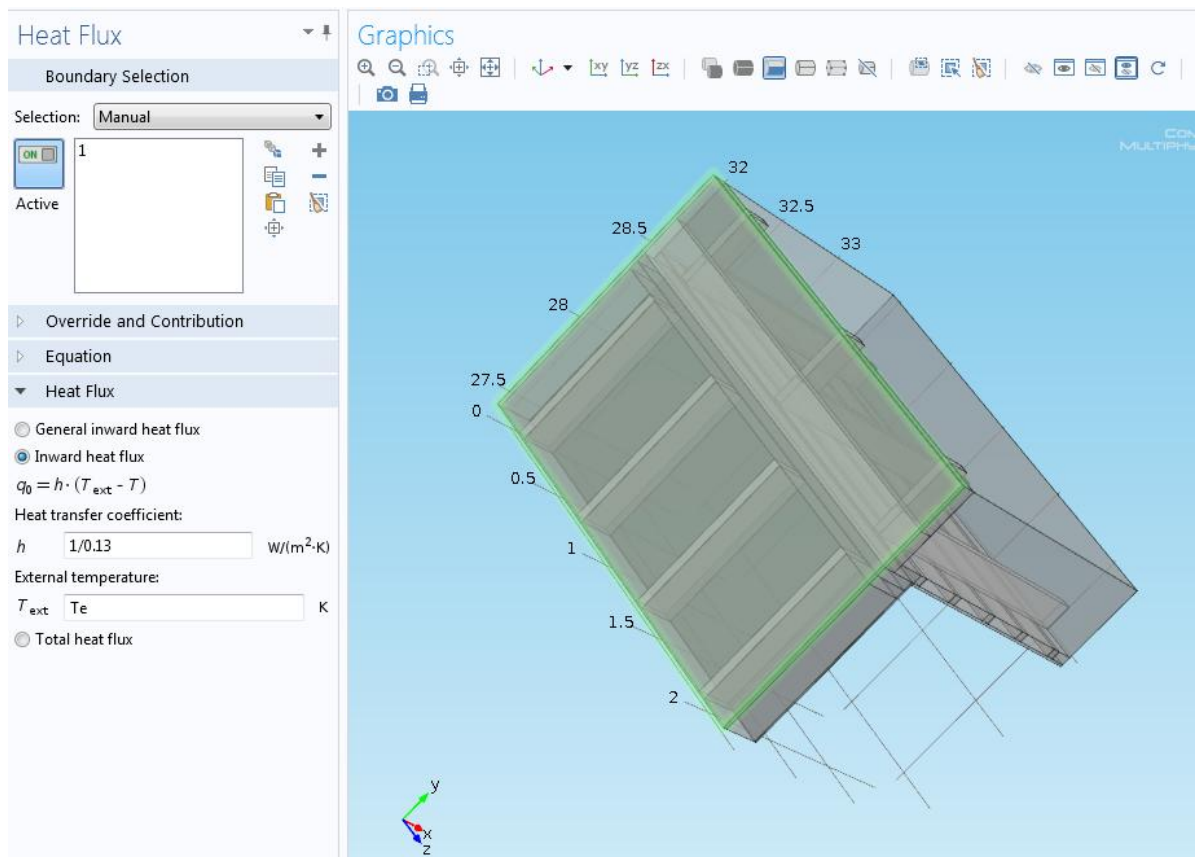
Kuva 1. 3D-malli yläpohjan ja ulkoseinän liitos

Comsol –ohjelmaan siirtämisen jälkeen ohjelmaan syötettiin vallitsevat ulko- ja sisälämpötilat. Sisälämpötila mallilla oli 20°C ja ulkolämpötila 0°C. Seuraavaksi mallille määritettiin vallitsevat pintavastukset. Ulkopintavastukseksi valittiin 0,13 m²K/W, koska 3D-mallin ulkopinnalta poistettiin ulkoverhouspaneeli, tuuletusra-ko ja pystykoolaus. Rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan, jos raken- nuksessa on hyvin tuulettuva ilmakerros, ei sen ulkopuolisia ainekerroksia tar- vitse ottaa huomioon lämmönläpäisykerrointa laskettaessa ja ulkopintavastuk- sen (R_{se}) voidaan korvata sisäpintavastuksella (R_{si}) [2 s.24]. Sisäpintavastukse- na käytettiin arvoa 0,13 m²K/W, katon ilmantilan pintavastuksena 0,2 m²K/W ja

sisäkaton pintavastuksena $0,1 \text{ m}^2\text{K/W}$ [2 s. 22 -24]. Pintavastukset määritettiin Comsol -ohjelmassa heat flux -työkalulla. Kuvassa 2 on esitetty lämpötilojen syöttäminen ohjelmaan. Lämpötilat syötettiin ohjelmassa variables -välilehdelle. Kuvassa 3 on esitetty ulkopintavastuksen määrittäminen ohjelmaan. Heat flux -työkalulla valitaan mallista pinnat joissa ulkopintavastus vallitsee ja annettiin sille oikea ulkopintavastuksen arvo, lisäksi valittiin pinnoilla valitseva lämpötila, tässä tapauksessa siis ulkolämpötila.

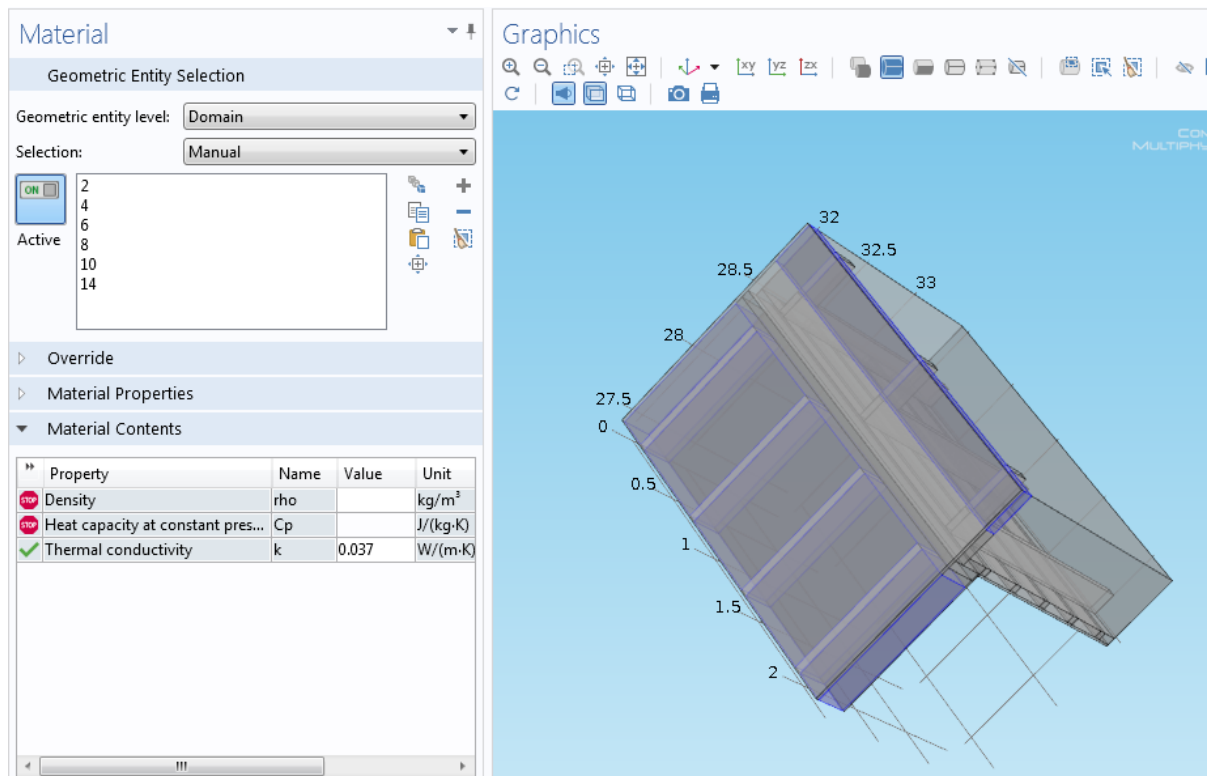


Kuva 2. Lämpötilan määrittäminen Comsoliin



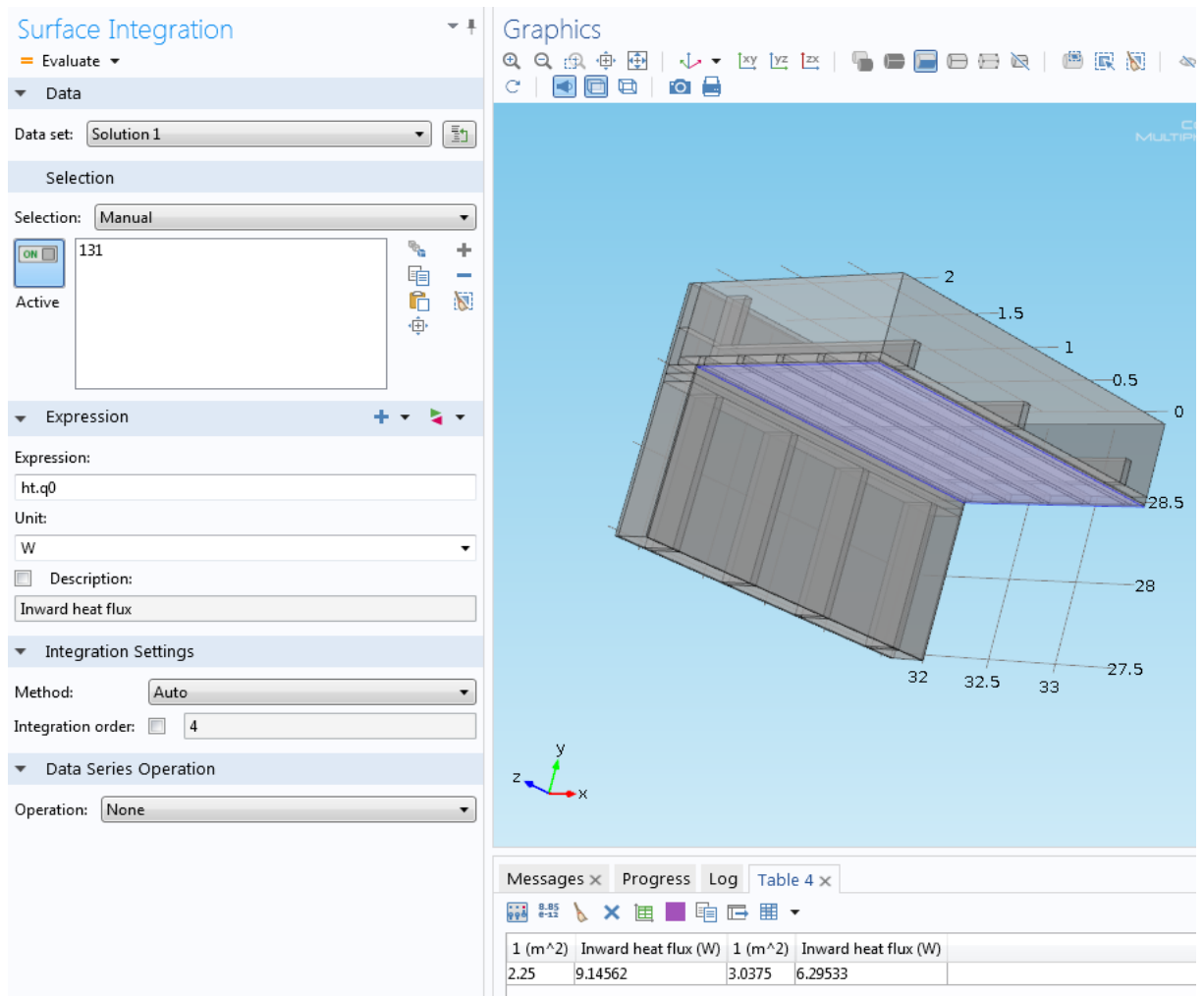
Kuva 3. Ulkopintavastuksen määrittäminen Comsoliin

Pintavastusten määrittämisen jälkeen 3D-malliin syötettiin oikeat materiaalit ja niiden lämmönjohtavuudet (λ). Lämmönjohtavuuksina käytettiin suunnitteluarvoja (λ_U), joita löytyi osin rakennusmääräyskokoelman osasta C4 [2 s. 17 -21] sekä valmistajien kotisivuilta. Kuvassa 4 on esitetty mineraalivillan Isover KL37 mallintaminen ohjelmaan. Mineraalivillan lämmönjohtavuus on 0,037 W/mK. Kuvassa sinisellä maalatut alueet ovat mineraalivillaa. Materiaalitiedot syötettiin ohjelmassa material –välilehdelle.



Kuva 4. Mineraalivillan Isover KL37 mallintaminen Comsoliiin

Materiaalien lisäyksen jälkeen pystyttiin käynnistämään rakenteen simulointi. Kuvassa 5 on esitetty lämpövirran suuruudet yläpohjan sisäpinnassa ja ulkoseinän sisäpinnassa. Lämpövirta saatiin ohjelmasta selville derived values – välilehdestä valittavasta surface integration –työkalulla. Muuttujaksi valittiin inward heat flux, jolla ohjelma laski kuinka monta wattia rakenteen sisältä ulos virtaa. Työkalulla valittiin pinta, mitä haluttiin tarkastella.



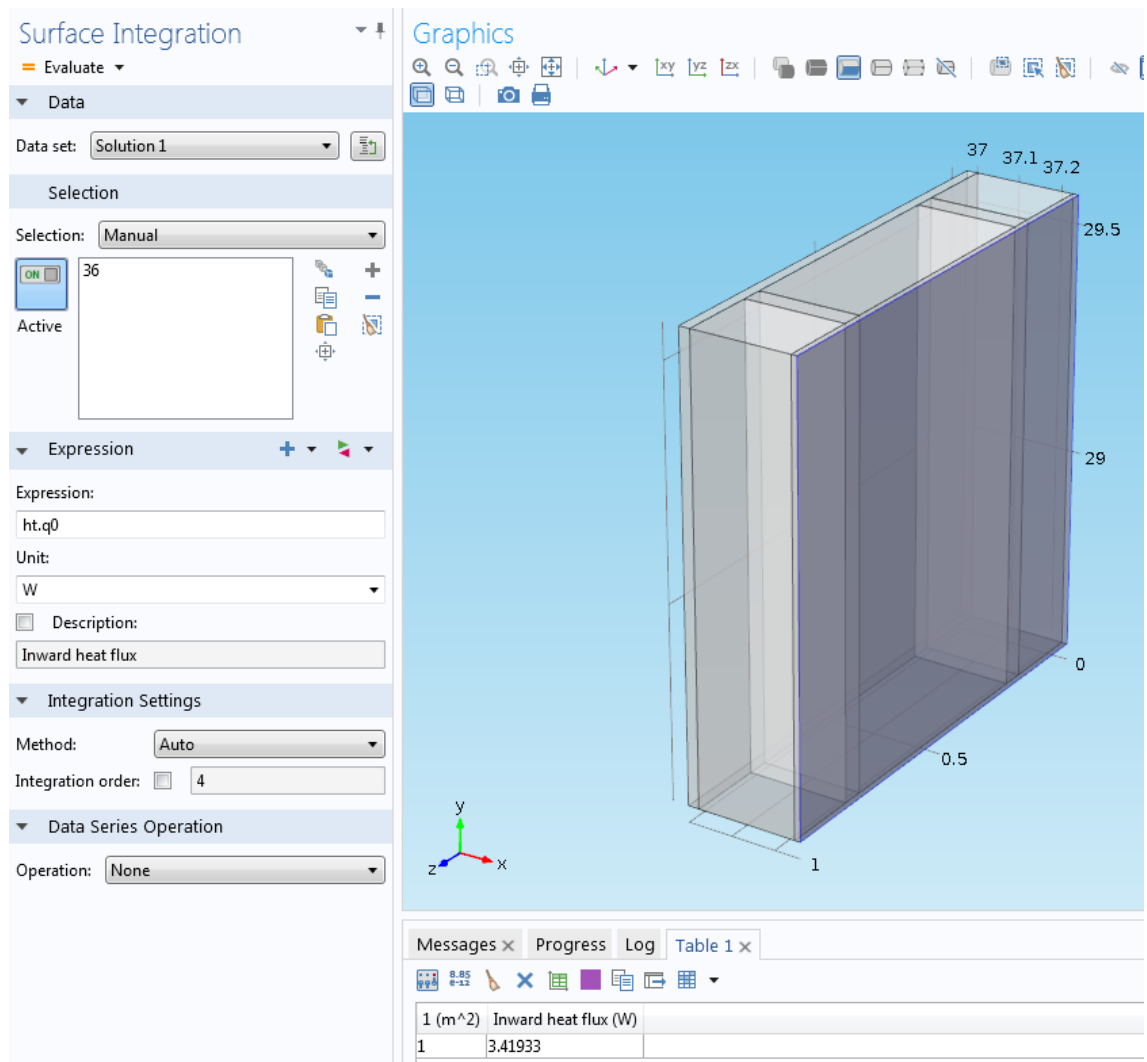
Kuva 5. 3D-mallin lämpövirta

Comsol –mallista saatiin ulkoseinälle lämpövirraksi 9,146 W, kun pinta-ala oli 2,25 m² ja lämpötilaero 20°C. Yläpohjan lämpövirraksi saatiin 6,295 W, kun pinta-ala oli 3,0375 m² ja lämpötilaero 20°C. Rakenteen liitoksen kytkentäkerroin L_{3D} on rakenteen yhteenlaskettu lämpövirta. Lämpövirta liitosrakenteessa laskettu kaavassa 1.

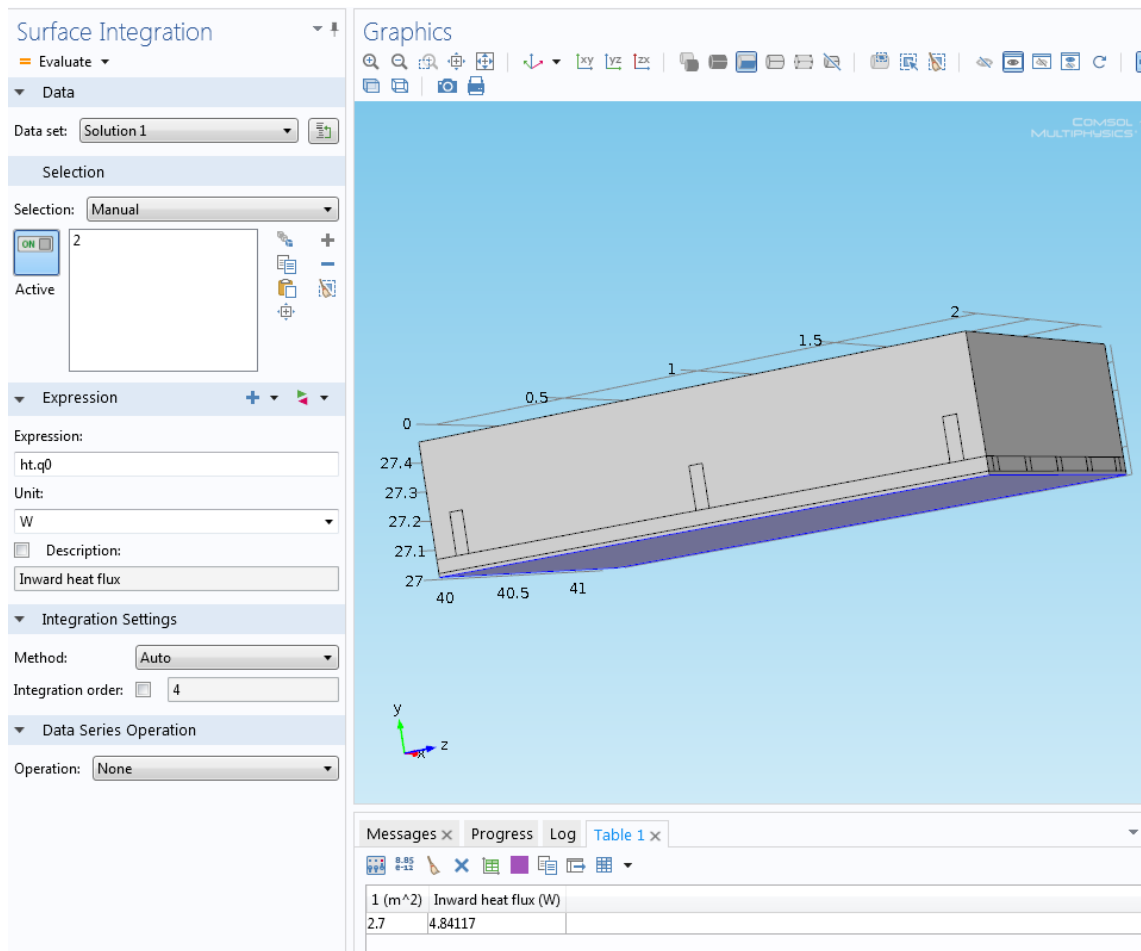
$$L_{3D} = \frac{9,146 \text{ W}}{2,25 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ K}} + \frac{6,295 \text{ W}}{3,0375 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ K}} = 0,307 \text{ W/mK} \quad (1)$$

Liitosrakenteen lämpövirraksi saatiin 0,307 W/mK. Viivamaisen lisäkonduktanssin selvittämiseksi liitosrakenteen lasketusta lämpövirrasta vähennetään seinän ja yläpohjan U-arvoilla laskettu lämpövirta [1 s.24]. Comsoliin luotiin 3D-mallit

myös pelkästä seinärakenteesta sekä pelkästä yläpohjarakenteesta. Kuvassa 6 on esitetty seinärakenteen 3D-malli ja sen lämpövirta. Kuvassa 7 on esitetty yläpohjarakenteen 3D-malli ja sen lämpövirta. Rakenteiden mallintaminen tehtiin samalla tavalla kuin ulkoseinän ja yläpohjan liitosrakenteessa.



Kuva 6. Ulkoseinän 3D-malli, lämpövirta rakenteessa



Kuva 7. Yläpohjan 3D-malli, lämpövirta rakenteessa

Pelkän seinärakenteen lämpövirta rakenteessa 3,419 W, kun pinta-ala oli 1m² ja lämpötilaero 20°C, rakenteen lämpövirta (ϕ) saadaan kaavasta 2.

$$\phi_{ulkoseinä} = \frac{3,419 \text{ W}}{1 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ K}} = 0,170 \text{ W/mK} \quad (2)$$

Pelkän yläpohjarakenteen lämpövirta rakenteessa 4,841 W, kun pinta-ala oli 2,7 m² ja lämpötilaero 20°C. rakenteen lämpövirta (ϕ) saadaan kaavasta 3.

$$\phi_{yläpohja} = \frac{4,841 \text{ W}}{2,7 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ K}} = 0,090 \text{ W/mK} \quad (3)$$

Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi on siis rakenteen todellinen lämpövirta vähennettynä seinän ja yläpohjan U-arvoilla lasketut lämpövirrat. Viivamainen lisäkonduktanssi laskettu kaavassa 4.

$$\psi_{\text{yläpohja-ulkoseinä}} = L_{3D} - (\phi_{\text{ulkoseinä}} + \phi_{\text{yläpohja}}) \quad (4)$$

$$\psi_{\text{yläpohja-ulkoseinä}} = 0,307 \frac{W}{mK} - \left(0,170 \frac{W}{mK} + 0,090 \frac{W}{mK} \right) = 0,047 \frac{W}{mK}$$

Liitoksen viivamaiseksi lisäkonduktanssiksi saatiin 0,047 W/mK. Rakennusmääräyskokoelman osan D5/2012 ohjearvo yläpohjan ja ulkoseinän välisen liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille on 0,05 W/mK [3 s.19].

Liite 2 Energiatodistuksen lähtötiedot

LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT				
Pää tiedot				
Rakennuskohde:	Energiakodit			
Osoite 1:	Nuotiokatu			
Osoite 2:				
Todistustunnus:				
Rakennustunnus:				
Rakennusluvan hakemisvuosi:	?			
Valmistumisvuosi:				
Rakennuksen käyttötarkoitus:	Pientalo			
Pääsuunnittelija:				
Laskelman tekijä:	Ville Vikström			
Yritys:				
Tilaja:	?			
Päiväys:	22.5.2014			
Sijainti/paikkakunta:	Joensuu=3			
Rakennusluokka:	1 Pientalo			
Kerroslukumäärä:	1			
Rakennustilavuus (m ³):	624			
Rakennuksen ilmatilavuus (m ³):	397			
Maanpäällinen kerrosala (m ²):	165.5			
Lämmitetty nettoala A _{netto} (m ²):	144.5			
Lämpökapasiteetti Crak omin (Wh/m ² K):	70			
Asuntojen lukumäärä:	1			
Laskentamallin tila:	Ei tiedossa			
Rakennuslupa hyväksytty (pvm):	-			
Käyttöönottotarkastus suoritettu (pvm):	-			
Rakenneseos				
rakenneseos:	Pinta-ala:	U-arvo:	g-arvo:	F_{verho} * F_{kehä}:
	m²	W/m²K		
Ulkoseinä ulkoilmaa vasten	111.3	0.10		
Yläpohja ulkoilmaa vasten	144.5	0.06		
Alapohja (maanvastainen)	144.5	0.10		
Ikkunat koilliseen	0.8	0.7	0.50	0.75
Ikkunat kaakkoon	8.72	0.7	0.50	0.75
Ikkunat lounaseen	1.8	0.7	0.50	0.75
Ikkunat luoteeseen	10.62	0.7	0.50	0.75
Ulko-ovet	8.4	0.7		
Alapohjan alapuolinen maa	Hiesu, moreeni, hieta, salaajittamaton hiekka/sora			
Kylmäsiilat				
Kylmäsiilat:	Pituus:	Lisäkonduktanssi:		
	m	W/mK		
US-US (ulkonurkka)	16.5	0.0207		
US-US (sisänurkka)	5.5	-0.0419		
US-YP	51.6	0.0231		
US-AP	51.6	0.1		
US-ikkunat	59	0.019		
US-ovet	18.8	0.012		
Ilmanvaihto				
Vaipan ilmanvuodot:				
Ilmanvuotoluku q50:	0.6			
Ilmanvaihto:				

LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT												
Kuvaus	?											
LTO %:	75											
Ominais sähköteho/SFP-luku (kW/m ² /s):	1											
Muu ilmanvaihtojärjestelmän sähköteho (W):	0											
Tuloilman lämpötilan asetusarvo:	18 astetta											
Jäteilman lämpötila mitoitusilanteessa:	5 astetta											
Poistoilmamäärän suunnitteluarvo (L/s):	57.6											
Poistoilmamäärän suunnitteluarvo ilman LTO-vaatimusta (L/s):	0											
Tuloilman suhde poistoilmavirtaan:	1											
Lämpötilan nousu puhaltimessa:	0.5 astetta											
IV-laitteessa automaattinen LTO:n poiskytkentä asetuslämpötilan ylityessä:	Ei											
LTO:n ja jälkilämmityspatterin kuukausipäälläolo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	x	x	x	x	x				x	x	x	x
Lämmitysjärjestelmä												
Käyttöveden lämmitys:												
Kuvaus	Sähkö											
Käyttöveden varasjahäviöt (kWh/vuosi):	650											
Käyttöveden kiertojohdon häviöt (kWh/vuosi):	0											
Käyttöveden siirron hyötysuhde:	0.92											
Käyttöveden mitoitusvirtaama (litra/s):	0.2											
Käyttöveden kiertojohdon ominaisteho (W/m ²):	0											
Sähkölämmityksen hyötysuhde (käyttövesi):	1											
Tilojen lämmitys:												
Kuvaus	Sähkö											
Lämmityksen varasjahäviöt (kWh/vuosi):	0											
Häviöt lämmittämättömään tilaan (kWh/vuosi):	0											
Lämmön jakelujärjestelmän hyötysuhde:	0.8											
Lämmön jakelujärjestelmän apulaitteet (kWh/m ²):	2.5											
Varaavien tulisijojen lukumäärä:	1											
Tulisijojen kokonaisvuosihyötysuhde:	0.6											
Ilmalämpöpumppujen lukumäärä:	0											
Sähkölämmityksen hyötysuhde (tilojen lämmitys):	1.0											
Märkätilojen sähköisen lattialämmityksen osuus tilojen lämmityksestä:	0											
Laskenta ja tulokset												
Lämmitystapa:	Sähkö ettilä											
Jäkilämmityspatteri:	Sähkö											
Oma sähköntuotanto (kWh/a):	0											

Liite 3 Energiatodistus

ENERGIATODISTUS																	
Rakennuksen nimi ja osoite:	Energiakodit Nuotiokatu																
Rakennustunnus:																	
Rakennuksen valmistusvuosi:																	
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka:	Pientalo (Erilliset pientalot)																
Todistustunnus:																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Energiatodistusluokka</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td style="text-align: center;">← C</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td></td> </tr> <tr> <td>E</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F</td> <td></td> </tr> <tr> <td>G</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Energiatodistusluokka	A		B		C	← C	D		E		F		G	
	Energiatodistusluokka																
A																	
B																	
C	← C																
D																	
E																	
F																	
G																	
<small>Uudisrakennusten määrittelytaso 2012</small>																	
Rakennuksen laskennallinen kokonaisenergiankulutus (E-luku)	158 kWh E/m ² vuosi																
Todistuksen laatija: Ville Vikström	Yritys:																
Allekirjoitus:																	
Todistuksen laatimispäivä: 22.5.2014	Viimeinen voimassaolopäivä: 01.01.2021																

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUDESTA													
Laskettu kokonaisenergiankulutus ja ostoenergiankulutus													
Lämmitetty nettoala, m ²	144.5												
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Sähkö												
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	?												
Käytettävä energiamuoto	Laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energia									
	kWh/a	kWh/(m ² vuosi)			kWhE/(m ² vuosi)								
Sähkö	12374	86	1.70	145.6									
Puu	3334	23	0.50	11.5									
Sähkön kulutukseen sisältyvä valaistus- ja kuluttajalaitesähkö	3292	22.8											
Kokonaisenergiankulutus (E-luku)				158									
Rakennuksen energiatehokkuusluokka													
Käytetty E-luvun luokittelusteikko	Erilliset pientalot												
Luokkien rajat asteikolla	<table border="1"> <tr> <td>A: ...82</td> <td>B: 83 ... 132</td> <td>C: 133 ... 169</td> </tr> <tr> <td>D: 170 ... 249</td> <td>E: 250 ... 379</td> <td>F: 380 ... 449</td> </tr> <tr> <td>G: 450 ...</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				A: ...82	B: 83 ... 132	C: 133 ... 169	D: 170 ... 249	E: 250 ... 379	F: 380 ... 449	G: 450 ...		
A: ...82	B: 83 ... 132	C: 133 ... 169											
D: 170 ... 249	E: 250 ... 379	F: 380 ... 449											
G: 450 ...													
Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka	C												
<p>E-luku perustuu rakennuksen laskennallisiin kulutuksiin ja energiamuotojen kerroimiin. Kulutus on laskettu standardikyttöä lämmitettyä nettoalaa kohti, jolloin eri rakennusten E-luvut ovat keskenään vertailukelpoisia. E-lukuun sisältyy rakennuksen lämmitys-, ilmanvaihto-, jäähdytysjärjestelmien sekä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiakulutus. Rakennuksen ulkopuoliset kulutukset kuten autolämmityspistokkeet, sulanapitoilmmitykset ja ulkoviilat eivät sisälly E-lukuun.</p>													
ENERGIATEHOKKUUTTA PARANTAVAT TOIMENPITEET													
Keskeiset suositukset rakennuksen energiatehokkuutta parantaviksi toimenpiteiksi													
Tämä osio ei koske uudisrakennuksia													
Suositukset on esitetty yksityiskohtaisemmin kohdassa "Toimenpide-ehdotukset energiatehokkuuden parantamiseksi".													

E-LUVUN LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka	Pientalo (Erilliset pientalot)			
Rakennuksen valmistumisvuosi	Lämmitetty nettoala		144.5	m ²
Rakennusvaippa				
Ilmanvuotoluku q50	0.6	m ³ /(h m ²)		
	A m ²	U W/(m ² K)	UxA W/K	Osuus lämpöhäviöstä %
Ulkoseinät	111.30	0.10	11.13	17.58
Yläpohja	144.50	0.06	8.67	13.70
Alapohja	144.50	0.10	14.45	22.83
Ikkunat	21.94	0.70	15.36	24.26
Ulko-ovet	8.40	0.70	5.88	9.29
Kylmäsiilat	-	-	7.81	12.34
Ikkunat ilmansuunnittain				
	A m ²	U W/(m ² K)	g_{kolmasosa} -arvo	
Koillinen	0.80	0.70	0.56	
Kaakko	8.72	0.70	0.56	
Lounas	1.80	0.70	0.56	
Luode	10.62	0.70	0.56	
Vaakatasa	-	-	-	
Vaakatasa (kattokupu)	-	-	-	
Ilmanvaihtojärjestelmä				
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus:	?			
	Ilmavirta tulo/poisto (m ³ /s) / (m ³ /s)	Järjestelmän SFP-luku kW/(m ³ /s)	LTO:n lämpötilasuhde	Jäätymisenesto
Pääilmanvaihtokoneet	0.058 / 0.058	1	> 75	C
Erillispoistot	-	-	-	-
Ilmanvaihtojärjestelmä	0.058 / 0.058	1	-	-
Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän LTO:n vuosihyötysuhde:		75 %		
Lämmitysjärjestelmä				
Lämmitysjärjestelmän kuvaus:	Sähkö			
	Tuoton hyötysuhde	Jaon ja luovutuksen hyötysuhde	Lämpökerroin (1)	Apulaitteiden sähkönkäyttö (2) kWh/(m ² vuosi)
Tilojen ja iv:n lämmitys	0.88	80 %		2.52
LKV:n valmistus	0.88	92 %		0.00
(1) vuoden keskimääräinen lämpökerroin lämpöpumpulle				
(2) lämpöpumppujärjestelmissä voi sisältyä lämpöpumpun vuoden keskimääräiseen lämpökerrotimeen				
	Määrä kpl	Tuotto kWh		
Varaava tulisija	1	2000		
Ilmalämpöpumppu				
Jäähdytysjärjestelmä				
	Jäähdytyskauden painotettu kylmäkerroin			
Jäähdytysjärjestelmä	-			
Lämmin käyttövesi				
	Ominaiskulutus dm ³ /(m ² vuosi)	Lämmitysenergian nettotarve kWh/(m ² vuosi)		
Lämmin käyttövesi	501.00	29		
Sisäiset lämpökuormat eri käyttöasteilla				
	Käyttöaste	Henkilöt W/m ²	Kuluttajalaitteet W/m ²	Valaistus W/m ²
Henkilöt ja kuluttajalaitteet	60 %	2.00	3.00	
Valaistus	10 %			8.00

E-LUVUN LASKENNAN TULOKSET				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka Pientalo (Erilliset pientalot)				
Rakennuksen valmistumisvuosi				
Lämmitetty nettobala, m ² 144.5				
E-luku, kWhE/(m ² vuosi) 158 (< raja=170)				
E-luvun erittely				
Käytettävät energiamuodot	Laskettu ostoenergia kWh/vuosi	Energiamuodon Kerroin -	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus kWhE/vuosi kWhE/(m²vuosi)	
Sähkö	12374	1.70	21035	145.6
Uusiutuva polttoaine (Puu)	3334	0.50	1667	11.5
YHTEENSA	15707		22702	157.1
Uusiutuva omavarainen energia, hyödyksikäytetty osuus				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Rakennuksen teknisten järjestelmien energiakulutus				
		Sähkö kWh/(m²vuosi)	Lämpö kWh/(m²vuosi)	Kaukojäähdytys kWh/(m²vuosi)
Lämmitysjärjestelmä				
Tilojen lämmitys (1)		2.5	10.0	
Tuloilman lämmitys		4.4		
Lämpimän käyttöveden valmistus			36.1	
Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiankulutus		3.5		
Jäähdytysjärjestelmä				
Kuluttajalaitteet ja valaistus		22.8		
YHTEENSA		33.2	46.1	0
<small>(1) Ilmanvaihdon tuloilman lämpeneminen tilassa ja korvausilman lämmitys kuuluu tilojen lämmitykseen</small>				
Energian nettotarve				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Tilojen lämmitys (2)		3158	22	
Ilmanvaihdon lämmitys (3)		640	4	
Lämpimän käyttöveden valmistus		4200	29	
Jäähdytys		0	0	
<small>(2) sisältää vuotolilman, korvausilman ja tuloilman lämpenemisen tilassa</small>				
<small>(3) laskettu lämmöntalteenoton kanssa</small>				
Lämpökuumat				
		kWh/a	kWh/(m ² a)	
Aurinko		4531	31.36	
Ihmiset		1519	10.51	
Kuluttajalaitteet		2278	15.76	
Valaistus		1013	7.01	
Lämpimän käyttöveden kierrosta ja varastoinnin häviöstä		325	2.25	
Laskentatyökalun nimi ja versio numero				
Laskentatyökalun nimi ja versio numero		www.laskentapalvelut.fi, versio 1.2 (15.12.2013)		