

Pauli-Pekka Österberg

**VIIVAMAISEN LISÄKONDUKTANSSIN TARKASTELU PUURA-
KENTEISESSÄ PIENTALOSSA**

VIIVAMAISEN LISÄKONDUKTANSSIN TARKASTELU PUURAKENTEISESSA PIENTALOSSA

Pauli-Pekka Österberg
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka, talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Pauli-Pekka Österberg

Opinnäytetyön nimi: Viivamaisen lisäkonduktanssin tarkastelu puurakenteisessa pientalossa

Työn ohjaaja: Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2015

Sivumäärä: 47

Energiatehokkaan rakentamisen myötä rakennusvaipan eristepaksuuksia kasvatetaan. Kasvavien seinä- ja vaipparakenteiden myötä viivamaisten kylmäsiltojen merkitys rakennusten lämpöhäviöissä korostuu. Viivamainen kylmäsilta tarkoittaa rakenteessa olevaa rakenneosaa, joka on viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtava ja jonka poikkileikkaus on pinnan suuntaan samanlainen.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää omakotitalon rakenteiden liittymistä aiheutuvien viivamaisen lisäkonduktanssin arvot ja laskea rakennuksen johtumislämpöhäviöt. Kohteena oli vuonna 2015 rakennettava 1,5-kerroksinen puurakenteinen pientalo. Tuloksia verrattiin Suomen rakennusmääräyskokoelman D5 ohjearvoihin.

Työssä selvitettiin Haapajärvelle rakennettavan pientalon rakennusosien väliset viivamaiset lisäkonduktanssit numeerisesti. Laskennan simulointi tehtiin Comsol Multiphysics 4.4 –ohjelmalla. Mallinnukset suoritettiin Ympäristöministeriön julkaiseman Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan. Ensiksi selvitettiin rakennusosissa käytetyt materiaalit ja niiden lämmönjohtavuudet sekä laskettiin rakenteiden lämmönläpäisykerroimet. Sen jälkeen luotiin mallinnettavasta liittymästä kaksiulotteinen detalji Autocad–ohjelmalla. Detalji siirrettiin simulointiohjelmaan, jonka avulla ratkaistiin koko rakenteen lämpötekninen kytkentäkerroin L_{2D} . Liittymien viivamaiset lisäkonduktanssit ratkaistiin käsin sijoittamalla L_{2D} -arvo viivamaisen lisäkonduktanssin kaavaan. Lopuksi saatuja lisäkonduktanssin arvoja verrattiin Suomen rakennusmääräyskokoelman ohjearvoihin ja rakennusvaipan johtumislämpöhäviöön.

Kohteen viivamaiset lisäkonduktanssin arvot alittivat rakennusosien liittymien ohjearvot lukuun ottamatta yläpohjaa, jonka lisäkonduktanssi oli tarkalleen sama ohjearvon kanssa. Suurin ero saatiin alapohjan liittymän viivamaisen lisäkonduktanssin laskennassa. Alapohjan lisäkonduktanssin laskettu arvo oli vertailuarvoon nähden 58 % parempi. Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöksi saatiin 70,10 (W/K), josta liittymien kylmäsiltojen osuus oli noin 10 %. Laskelmat suoritettiin jatkuvuustilassa yhden asteen lämpötilaerolla.

Asiasanat: Comsol, kylmäsilta, lämmönläpäisykerroin, viivamainen lisäkonduktanssi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building Engineering

Author: Pauli-Pekka Österberg

Title of thesis: Linear Thermal Transmittance in Joints of Wooden House

Supervisor: Kimmo Illikainen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2015

Pages: 47

In order to get energy efficient construction to a building, the thickness of the shell has to be increased. With thicker wall structures, the importance of the joints of linear thermal bridges will increase.

The aim of this study was to solve the values of the linear thermal transmittance and to calculate the heat conductive transfer of a house. The house in question was constructed in 2015. The results were compared with the ones in the National Building Code of Finland, Part D5.

The idea of this thesis was to solve the linear thermal transmittances numerically of a detached house in Haapajärvi. The calculations were made manually and by using the Comsol Multiphysics 4.4 software. The modeling was done according to the Finnish linear thermal transmittance accounting guide 2012. First the thermal conductive values were set up and the heat transfer coefficients (U-values) were solved. Then the thermal coupling coefficient (L_{2D}) was solved on the simulation program. This refers to the total heat flow of the structure. Finally, the results were compared with the reference values of the National Building Code of Finland, Part D5 and conductive heat transfer of the house shell.

The linear thermal transmittances were below the reference values with the exception of the roof. The greatest deviation in values was in the joint between the external wall and the basement. The calculated value of the linear thermal transmittance of the basement was 58 % better than the reference values.

Keywords: Comsol, thermal bridge, thermal transmittance, the heat transfer coefficient

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 RAKENTAMISTA KOSKEVAT OHJEET JA MÄÄRÄYKSET	8
3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN	9
3.1 Kylmäsillat	10
3.2 Lämmönjohtavuus ja lämmönvastus	10
3.3 Rakennuksen johtumislämpöhäviöt	11
4 VIIVAMAINEN LISÄKONDUKTANSSI JA LÄMMÖNLÄPÄISYKERROIN	12
4.1 Lämmönläpäisykerroin, U-arvo	12
4.2 Viivamaisten lisäkonduktanssien määrittäminen	16
4.2.1 Viivamaisen lisäkonduktanssin numeerinen laskenta	16
4.2.2 Comsol Multiphysics –simulointiohjelma	17
5 KOHTEEN VIIVAMAISTEN LISÄKONDUKTANSSIEN MALLINNUS	19
5.1 Rakenteiden mallintamisen kulku	20
5.2 Ulkoseinäliittymän lisäkonduktanssi	22
5.3 Maanvastaisen alapohjaliittymän lisäkonduktanssi	26
5.3.1 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen	27
5.3.2 Alapohjaliittymän viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen	29
5.4 Yläpohjaliittymän lisäkonduktanssi	30
5.5 Aukkorakenteiden lisäkonduktanssi	34
6 RAKENNUKSEN JOHTUMISLÄMPÖHÄVIÖT	38
6.1 Lämpöhäviöiden laskenta	38
6.2 Lisäkonduktanssien vertaaminen ohjearvoihin	42
7 YHTEENVETO	44
LÄHTEET	46

SANASTO

- Adiabaattireunaehto rajapinnan ulkopuolella oleva täydellinen lämmöneristys. (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas 2012, 7).
- Lämmönläpäisykerroin U-arvo, ilmoittaa rakennusosan läpi kulkevaa lämpövirran tiheyttä, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien tilojen välillä on yksikön suuruinen (Rakennusten lämmöneristys. 2008).
- Lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} simuloitavan mallin lämpövirta, jonka aiheuttaa mallin eri puolilla oleva lämpötilaero (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 6).
- Stationääritila jatkuvuustila, ajasta riippumaton tila (Illikainen 2015).
- Viivamainen kylmäsilta kylmäsilta, jonka poikkileikkaus on rakenteen pinnan suuntaan jatkuvana samanlainen (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 6).
- Viivamainen lisäkonduktanssi viivamaisen kylmäsilan aiheuttama lisäys jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla on yksikön suuruinen (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 6).

1 JOHDANTO

Tiukentuneiden energiamääräysten johdosta pientalo- ja julkisrakentamisessa joudutaan kiinnittämään yhä enempi huomiota energiatehokkaaseen suunnitteluun ja rakentamiseen. Elokuussa 2014 ympäristöministeriön julkaisema asetus velvoittaa vuoden 2020 loppuun mennessä noudattamaan uusissa rakennuksissa lähes nollaenergiarakentamista. Ympäristöministeriö julkaisi energiamääräykset heinäkuussa 2012, jolloin otettiin rakennusten lämpöhäviöiden laskentaan mukaan kylmäsiltojen tarkastelu. Kylmäsiltoilla tarkoitetaan sellaista rakennososaa, joka on viereisiin aineisiin nähden hyvin lämpöä johtava. Rakennuksessa viivamaisia kylmäsiltoja muodostuu rakennusosien liittymistä, jolloin kylmäsiltojen tarkastelussa otetaan huomioon liittymistä koituvat johtumislämpöhäviön lisäykset, eli lisäkonduktanssit.

Kylmäsiltoista johtuvat lämpöhäviöt voidaan ottaa huomioon neljällä eri menetelmällä, joiden laskentatarkkuus vaihtelee. Nämä menetelmät ovat ohjearvotaulukoiden käyttö, käsin laskenta, tyyppirakenteille laskettujen arvojen käyttö sekä numeerinen laskenta. Näistä tarkin menetelmä on numeerinen laskenta.

Rakennuksen fysikaalisten ominaisuuksien mallintaminen erilaisilla mallinnusohjelmilla numeerisesti on tullut tarpeelliseksi, jotta voidaan selvittää tarkemmin rakennusten lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä. Energiämääräyksiin vastaaminen vaatii, että rakennusten lämmöneristävyyden ohella kiinnitetään huomiota myös kylmäsiltojen vaikutusten minimoimiseen.

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus perehtyä rakennusten liittymien johtumislämpöhäviöihin, viivamaisiin kylmäsiltoihin. Työn tarkoituksena on selvittää 1,5-kerroksisen omakotitalon avulla, kuinka merkittävistä lämpöhäviöistä on kyse pienrakentamisessa. Viivamaisia lisäkonduktanssin arvoja verrattiin rakennusvaipan johtumislämpöhäviöihin sekä Rakennusmääräyskokoelman ohjearvoihin. Liittymien rakennusosat mallinnettiin kaksiulotteisesti Autocad-ohjelmalla ja ne avattiin Comsol Multiphysics 4.4 -ohjelmassa, jolla saatiin määritettyä liittymien lämpötekninen kytkentäkerroin. Haapajärvelle keväällä 2015 valmistuvan puurakenteisen pientalon viivamaiset lisäkonduktanssit ratkaistiin käsin.

2 RAKENTAMISTA KOSKEVAT OHJEET JA MÄÄRÄYKSET

Rakentamista koskevat olennaiset tekniset vaatimukset ja yleiset edellytykset määrittelee maankäyttö- ja rakentamislaki. Lisäksi laissa määritellään lupamennettely sekä viranomaisvalvonta. Rakentamista koskevat tarkemmat säännökset ja ohjeet on koottu Suomen rakentamismääräyskokoelmaan. Rakentamismääräyskokoelman rakentamista koskevat säännökset ovat velvoittavia. Ympäristöministeriön julkaisemat ohjeet sen sijaan eivät ole velvoittavia. (Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2015.)

Lisäkonduktanssin tarkasteluun liittyviä määräyksiä käsittelevät Suomen rakennusmääräyskokoelman osat C4 (lämmöneristys), D3 (rakennuksen energiatehokkuus) ja D5 (rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystarpeen laskenta). Rakentamismääräyskokoelman määräykset koskevat tavanomaisesti uudisrakentamista. Korjausrakentamisessa määräyksiä sovelletaan toimenpiteen laatu ja laajuus huomioon ottaen sekä rakennuksen tai sen osan muutettavan käyttötavan edellyttämällä tavalla. (Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2015.)

Ympäristöministeriö on myös julkaissut rakennusosien välisten Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan, jonka ohjeiden mukaan tämän opinnäytetyön laskennat tehtiin. (Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2015.)

3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämmölle on ominaista, että se pyrkii tasoittumaan. Lämmön siirtymisen muodot paikasta toiseen ovat johtuminen, säteileminen ja konvektio. (Björkholtz 1987, 12.) Johtumisessa (konduktio) liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen molekyyliin, jolloin tapahtuu lämmön virtaamista. Virtaaminen tapahtuu lämpimästä kylmempään päin, kun lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa. Johtumista tapahtuu nesteissä ja kiinteissä aineissa. (Siikanen 2014, 40.) Lämpö on aineen kyky tehdä työtä sisäisen molekyylien liike-energian perusteella. Johtuminen siirtää tätä energiaa paikasta toiseen, minkä vuoksi voidaan puhua lämmön virtauksesta. Todellisuudessa mitään virtausta ei ole, vaan lämpö on siirtymässä olevaa sisäenergiaa. (RIL 155-1984. 1984, 42.)

Säteilyssä (emissio) energia siirtyy valonnopeudella sähkömagneettisen aalto liikkeen välityksellä. Säteilystä lähettävät kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Rakennustekniikassa esiintyvää säteilyä on lyhytaaltainen auringonsäteily ja pitkäaaltoinen kappaleiden säteilemä lämpö. Esimerkiksi ikkunan lämmönläpäisyä tarkasteltaessa säteilyn aallonpituudella on merkitystä. Ikkunan lasi läpäisee huonosti sisältä ulospäin pyrkivää pitkäaaltoista lämpösäteilyä, mutta hyvin auringon lähettämää lyhytaaltoista säteilyä. (Siikanen 2014, 40.)

Konvektiossa (virtaus) lämpö liikkuu kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Se voi olla joko luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa liikkeen saa aikaan lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero. Puhtaasti luonnollista konvektiota esiintyy vain harvoin. Pakotettu konvektio tarkoittaa tilannetta, jossa kaasu tai neste liikkuu ulkopuolisen voiman, esimerkiksi tuulen vaikutuksesta. (Siikanen 2014, 40.)

Lisäksi lämpöä siirtyy myös olomuodon muutoksissa, jota kutsutaan sulamis- ja höyrystymislämmöksi. Tätä muotoa kutsutaan lateniksi eli piileväksi, jolloin lämpötila ei muutu siirtymisessä. (Siikanen 2014, 40.)

3.1 Kylmäsiljat

Kylmäsilta tarkoittaa rakenteessa olevaa rakenneosaa, joka on viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtava. Tämän rakenneosan kohdalla rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa suurempi viereiseen alueeseen verrattuna. Pistemäinen kylmäsilta tarkoittaa rakenteessa paikallisena olevaa kylmäsiltaa, jolla ei ole rakenteen pinnan suunnassa jatkuvaa ja samanlaisena pysyvää poikkileikkausta. Viivamainen kylmäsilta muodostuu rakenteeseen, jonka poikkileikkaus on pinnan suuntaan samanlainen. (Lämmöneristys. 2003, 3.)

Kylmäsiltoja syntyy, kun rakennusosan lämmöneristystä joudutaan paikallisesti ohentamaan esimerkiksi lujuus- tai muista syistä. Myös silloin, kun lämmöneristykseen läpäisee eristeeseen verrattuna hyvin lämpöä johtava rakennusaine, kylmäsilta muodostuu. Tavallisimpia kylmäsiltoja ovat esimerkiksi runkorakenteet, rakennusosien liittymät, joissa lämmöneristys on paikallisesti ohut tai jokin läpäisee eristyksen. Lämmönhukan lisäksi kylmäsilan kohdalla sisäpuolinen pintalämpötila on matalampi kuin rakennusosan muissa kohdissa. Kylmäsilan kohdalla pintamateriaali voi myös tummua tai likaantua tai jopa vesihöyryä voi tiivistyä sen pintaan. (RIL 155–1984. 1984, 20, 76.)

3.2 Lämmönjohtavuus ja lämmönvastus

Lämpövirran tiheyttä kuvaa lämmönjohtavuus (λ). Se tarkoittaa sitä, kuinka paljon lämpövirtaa kulkeutuu pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen. Lämmönjohtavuuden yksikkö on W/mK. (Lämmöneristys. 2003, 3.)

Lämmityslaitteiden mitoittamiseen tarvitaan tietoa muun muassa rakennuksen vaipan läpi menevistä lämpövirroista. Mitä suurempia lämpövirrat ovat, sitä tehokkaampia lämmityslaitteita tarvitaan. Myös ulos vaipan läpi menevien energiamäärien arviointi mahdollistuu lämpövirtojen tuntemisella. (Björkholtzs 1987, 14.)

Lämmönvastus R saadaan jakamalla rakennepaksuus d lämmönjohtavuudella λ . Kun kyseessä on sisältä ulos pyrkivä lämpövirta, lämmönvastusten summaan

R_T sisältyvät myös pintavastukset R_{si} ja R_{se} (taulukko 1). Tätä kutsutaan kokonaislämmönvastukseksi. (Björkholtzs 1987, 14.)

TAULUKKO 1. Rakenteiden pintavastukset (Lämmöneristys. 2012, 22)

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

3.3 Rakennuksen johtumislämpöhäviöt

Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöitä tapahtuu alapohjan, ulkoseinien ja yläpohjan osissa. Lisäksi siihen vaikuttavat ikkunoiden ja ovien lämpöhäviöt sekä kylmäsiilat. Lämpöhäviötä voi tapahtua myös rakennusta ympäröiviin puolilämpimiin tiloihin. Johtumislämpöhäviön suuruuteen vaikuttavat rakenteiden pak-suudet ja niiden kyky vastustaa johtumista. (Energiatodistusopas. 2013, 19.)

Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt lasketaan kaavalla 1 (Viivamaisten lisä-konduktanssien laskentaopas. 2012, 7).

$$\Sigma H_{\text{joht}} = \Sigma (U_{\text{ulkoseinä}} A_{\text{ulkoseinä}}) + \Sigma (U_{\text{yläpohja}} A_{\text{yläpohja}}) + \Sigma (U_{\text{alapohja}} A_{\text{alapohja}}) + \Sigma (U_{\text{ikkuna}} A_{\text{ikkuna}}) + \Sigma (U_{\text{ovi}} A_{\text{ovi}}) + \Sigma_k \psi_k l_k + \Sigma_j X_j \quad \text{KAAVA 1}$$

jossa

ΣH_{joht} = rakennusosista koitua yhteenlaskettu lämpöhäviö [W/K]

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

A = rakennusosan pinta-ala [m^2]

ψ_k = rakennusosien liitoksen k viivamainen lisäkonduktanssi [W/mK]

l_k = rakennusosien välisen liitoksen k pituus [m]

X_j =pistemäisen kylmäsiilan j aiheuttama lisäkonduktanssi [W/K]

4 VIIVAMAINEN LISÄKONDUKTANSSI JA LÄMMÖNLÄPÄISYKERROIN

Lämpövirran ja pintalämpötilojen laskeminen kylmäsillalla olisi vaivalloista tavallisia laskentamenetelmiä käyttäen. Käytännön suunnittelutyössä tarvitaan nopeita, yksinkertaisia ja tarkkoja menetelmiä U-arvon arvioimiseksi. Lisäkonduktanssien käyttö on yksi keino kylmäsiltojen määrittämiseen. Lisäkonduktanssi kuvaa kylmäsiltojen aiheuttamaa lisäystä rakenteen lämpövirtaan. (Björkholtz 1987, 20.)

Pistemäinen lisäkonduktanssi (X), W/K kertoo pistemäisestä kylmäsilta johtuvan lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla on yksikön suuruinen. Viivamainen lisäkonduktanssi (ψ), W/mK ilmoittaa rakennusosassa olevan viivamaisesta kylmäsilta aiheutuvan lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla on yksikön suuruinen. (Lämmöneristys. 2003, 3.)

4.1 Lämmönläpäisykerroin, U-arvo

Lämmönläpäisykerroin U [W/(m²K)] ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevissa ympäristöissä on yksikön suuruinen. Lämmönläpäisykerroimen korjaustermi ΔU [W/(m²K)] tarkoittaa tarvittaessa lämmönläpäisykerroimeen lisättävää termiä, joka käsittää lämmöneristeen ilmarakojen korjaustekijän, mekaanisten kiinnikkeiden ja muiden säännöllisten pistemäisten kylmäsiltojen korjaustekijän sekä käännettyjen kattojen korjaustekijän. Korjattu lämmönläpäisykerroin U_c on rakennusosan lopullinen lämmönläpäisykerroin. Sitä käytetään osoitettaessa rakennusten määräystenmukaisuutta sekä rakennusten energiankulutuslaskelmissa. (Siikanen 2014, 50.)

Lisäkonduktanssin ratkaisemiseen täytyy laskea liittyvien rakenteiden U-arvot. Läpäisykerroimet määritetään Rakennusmääräyskokoelma C4 mukaan. U-arvo lasketaan kaavalla 2. (Lämmöneristys. 2012, 6.)

$$U = 1 / R_T$$

KAAVA 2

U = lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]

R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus [(m²K)/W]

Lämpö voi johtua usean ainekerroksen läpi rakennusosan sisällä. Ainekerroksien vahvuus ja lämmönjohtavuus voivat poiketa. Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus lasketaan käyttäen ainekerroksen vahvuutta ja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa λ_u kaavasta 3. (Lämmöneristys. 2012, 7.)

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

KAAVA 3

R = ainekerroksen lämmönvastus [(m²K)/W]

d = ainekerroksen vahvuus [m]

λ_u = ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [W/(mK)]

Rakennusosan lämmönjohtavuudeltaan erilaiset ainekerrokset voivat olla lämpövirran suuntaan nähden joko rinnan tai peräkkäin. Peräkkäisistä ainekerroksista muodostuvan rakennusosan kokonaislämmönvastus saadaan kaavasta 4. (Lämmöneristys 2012, 6.)

$$R_T = R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se}$$

KAAVA 4

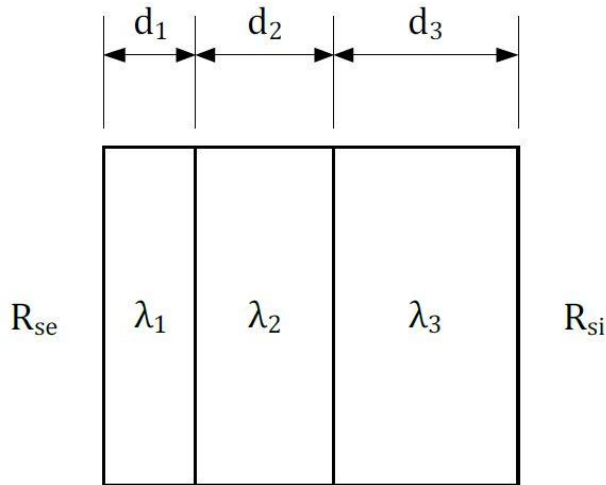
R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus [(m²K)/W]

R_{Si} = sisäpuolen pintavastus (m²K/W)

R_1, R_2, \dots, R_n = rakennusosan ainekerrosten 1,2,...,n lämmönvastukset [(m²K)/W]

R_{Se} = ulkopuolen pintavastus [(m²K)/W]

Peräkkäisten ainekerrosten lämmönvastukset lasketaan käyttäen ainekerroksen vahvuutta ja lämmönjohtavuutta (kuva 1) kaavasta 2 ja sijoitetaan kaavaan 3 (Lämmöneristys. 2012, 7).



KUVA 1. Peräkkäiset ainekerrokset lämpövirran suuntaan nähden (Lämmöneristys. 2012, 9)

Epähomogeenisten rakennekerrosten lämmönvastusten laskennassa otetaan huomioon materiaalien laskentasuunnan pinta-alan osuus rakennusosan pinta-alasta kaavalla 5 (Lämmöneristys. 2012, 8).

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{ja}} + \frac{f_b}{R_{jn}} + \dots + \frac{f_n}{R_{jn}}$$

KAAVA 5

R_j = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten materiaalien a, b, \dots, n yhteenlaskettu lämmönvastus [$(m^2 K)/W$]

f_a, f_b, \dots, f_n = yhdistettävien rinnakkaisten materiaalien a, b, \dots, n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta

$R_{ja}, R_{jb}, \dots, R_{jn}$ = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten materiaalien a, b, \dots, n lämmönvastukset [$(m^2 K)/W$].

Maanvastaisen alapohjarakenteen lämmönläpäisykerroin

Hyvin lämmöneristettyjen alapohjien lämmönläpäisykerroin U_f lasketaan kaavalla 6 (Lämmöneristys. 2012, 28).

$$U_f = \frac{\lambda_s}{0,457B' + dt} + \frac{2\psi g e}{B'}$$

KAAVA 6

U_f = maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin	[W/(m ² K)]
λ_s = maaperän lämmönjohtavuus	[W/(mK)]
B' = rakennuksen karakteristinen lattiamitta	[m]
d_f = maanvastaisen alapohjarakenteen ekvivalentti paksuus, kaava 7	[m]
ψ_{ge} = lattiarakenteen reuna-alueilla olevan lisälämmöneristeen tai perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristykseen huomioiva lisäkonduktanssi	[W/(mK)]

Kaavassa 6 käytetty alapohjan ekvivalentti paksuus lasketaan kaavalla 7 (Lämmöneristys. 2012, 27).

$$d_f = w + \lambda_s (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad \text{KAAVA 7}$$

w = maanvastaisen seinärakenteen paksuus liittymässä [m]

λ_s = maaperän lämmönjohtavuus [W/(mK)]

R_{si} = rakenteen sisäpuolen pintavastus [m²K/W]

R_f = alapohjan lämmönvastus [m²K/W], lasketaan kaavan 1 mukaan

R_{se} = ulkopuolisen maan pintavastus [m²K/W]

Lattiarakenteen pystysuuntaisen lämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus määritetään kaavalla 8 (Lämmöneristys. 2012, 30).

$$d'_v = \lambda_s \left(R_{nv} \frac{dn_v}{\lambda_s} \right) \quad \text{KAAVA 8}$$

d'_v = lattiarakenteen pystysuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalenttipaksuus reuna-alueella [m]

R_{nv} = perusmuurin lämmönvastus [m²K/W]

λ_s = maaperän lämmönjohtavuus [W/(mK)]

d_{nv} = perusmuurin paksuus [m]

Perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristykseen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi (ψ_{gev}) lasketaan kaavalla 9 (Lämmöneristys. 2012, 29).

$$\psi_{gev} = \frac{\lambda_s}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2Dv}{dt} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2Dv}{dt+d'_v} + 1 \right) \right] \quad \text{KAAVA 9}$$

ψ_{gev} = lattiarakenteen perusmuurin pystysuuntaisen lisälämmöneristeen huomi-
oon ottava viivamainen lisäkonduktanssi alapohjan reuna-alueella [W/(mK)]

λ_s = maaperän lämmönjohtavuus [W/(mK)]

d_f = maanvastaisen alapohjan ekvivalentti paksuus, kaava 7 [m]

D_v = lattiarakenteen reuna-alueella olevan pystysuuntaisen lisälämmöneristeen
ekvivalentti lisäpaksuus, [m]

d'_v = lattiarakenteen pystysuuntaisen lisälämmöneristeen ekvivalenttipaksuus
reuna-alueella, kaava 8 [m]

4.2 Viivamaisten lisäkonduktanssien määrittäminen

Viivamaisen lisäkonduktanssin ψ määrittämiseen on erilaisia menetelmiä, joi-
den tarkkuus vaihtelee. Menetelmää valittaessa täytyy huomioida kyseisen kyl-
mäsillan merkitys rakennuksen tai huonetilan johtumislämpöhäviössä. SFS-EN
ISO 14683 -standardi määrittelee tarkkuudet neljälle vaihtoehdoiselle menetel-
mälle, joita ovat

- numeerinen laskenta, tarkkuus $\pm 5 \%$
- tyyppirakenteille laskettujen arvojen käyttö, tarkkuus $\pm 20 \%$
- käsinlaskenta, tarkkuus $\pm 20 \%$
- ohjearvotaulukot, tarkkuus 0% - 50% . (Viivamaisten lisäkonduktanssien
laskentaopas. 2012, 11.)

4.2.1 Viivamaisen lisäkonduktanssin numeerinen laskenta

Viivamaisten kylmäsiltojen laskentaan on tarjolla monenlaisia ohjelmia. Ohjel-
man vähimmäisvaatimus on, että sillä voidaan laskea kaksiulotteisia lämpötila-
kenttiä jatkuvuustilassa. Joillakin ohjelmilla voidaan määrittää lisäkonduktanssi
suoraan mallinnusohjelmasta, mutta tässä opinnäytetyössä se ratkaistiin käsin
ohjelmasta lämpöteknisen kytkentäkertoimen (L_{2D}) sekä liittymän rakennusosien
U-arvojen avulla. Viivamaisten lisäkonduktanssin (ψ) numeerisen laskennan
ideana on selvittää rakennemallin kokonaislämpövirta ja vähentää siitä raken-
nusosista aiheutuva lämpövirta kertomalla liittyvien rakenteiden U-arvot niiden

pituuksilla kaavan 10 mukaisesti. Tällöin jäljelle jää liittymästä aiheutuva lämpövirran lisäys, eli lisäkonduktanssi. (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 13.)

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

KAAVA 10

L_{2D} = numeerisesti kaksiulotteisella laskentatavalla määritetty lämpötekkinen kytkentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille [W/(m²K)]

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

l_j = mallissa kuvatun rakenneosan j pituus [m], jolla lämmönläpäisykerrointa U_j voidaan soveltaa.

Maanvastaisen alapohjan viivamainen lisäkonduktanssi laskennassa sovelletaan kaavaa 11 (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 13).

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

KAAVA 11

L_{2D} = numeerisesti määritetty lämpövirta koko rakenteelle [W/(mK)]

h_w = liittymän seinärakenteen korkeus mallissa [m]

U_w = ulkoseinäliittymän lämmönläpäisykerroin [W/(m²K)]

B' = alapohjan karakteristinen mitta [m]

U = alapohjarakenteen lämmönläpäisykerroin [W/m²K]

4.2.2 Comsol Multiphysics –simulointiohjelma

Comsol Multiphysics on yleiskäyttöinen ohjelmistoalusta, jolla voidaan ratkaista erilaisia malleja numeerisin menetelmin. Simulointiohjelman numeerisessa laskennassa käytetään hyödyksi osittaisdifferentiaalinen matemaattisia malleja fyysikaalisia ongelmia ratkaistaessa. Mallit ratkaistaan elementtianalyysin keinoin FEM/FEA laskennalla (Finite Element Method/ Finite Element Analysis). (Comsol Multiphysics. 2015.)

Comsol Multiphysics -ohjelmaan on laaja valikoima fysiikan ja kemian eri liittämisenäisosa, joilla mallinnusohjelmaa voidaan parantaa omien käyttötarkoitusten

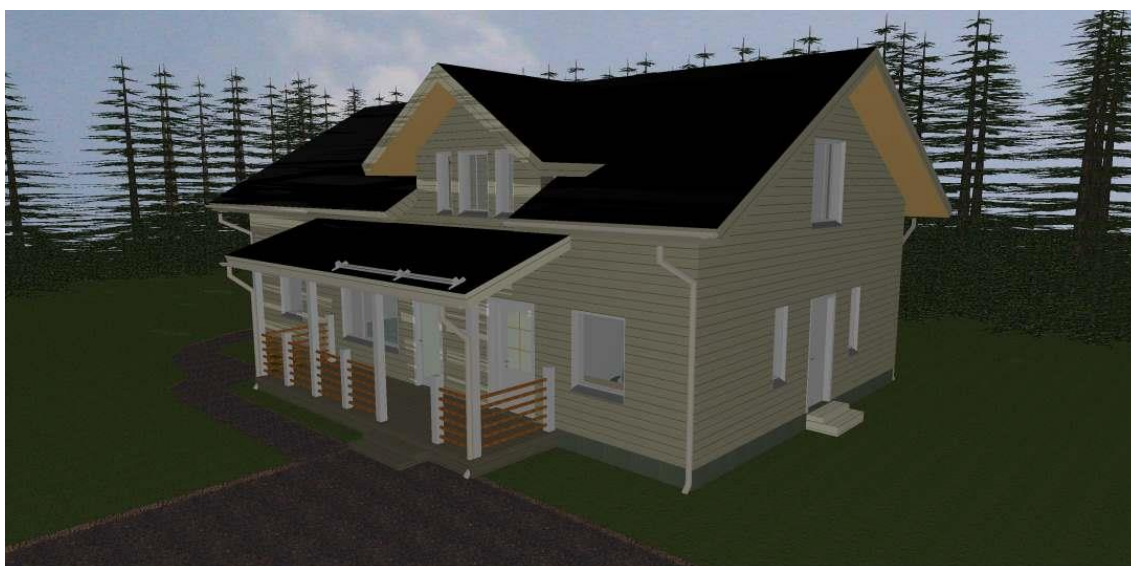
mukaiseksi. Simulointiohjelmaan on luotu myös rajapinnat eri sovelluksille siten, että ne toimivat keskenään vaivattomasti. Tästä esimerkkejä ovat taulukkolaskennat (muun muassa Excel) sekä CAD- ja ECAD-ohjelmistot. (Comsol Multiphysics. 2015.)

5 KOHTEEN VIIVAMAISTEN LISÄKONDUKTANSSIEN MALLIN- NUS

Opinnäytetyön kylmäsilta tarkastelut tehtiin 129 m² puurakenteisen omakotitalon (kuva 2) rakenteiden viivamaisille liittymille. Rakennus on 1,5-kerroksinen asuinrakennus, jossa on yläkertavaraus. Kohde Koivikko sijaitsee Haapajärvellä haja-asutusalueella.

Talon pääpiirustukset ja rakennuslupahakemus toimitettiin Haapajärven rakennusvalvontaan elokuun lopussa 2014. Rakennuslupa astui voimaan jo seuraavan kuukauden alussa, jolloin myös varsinainen rakentaminen aloitettiin.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin vain viivamaisia lisäkonduktansseja (jatkossa viivamaisia lisäkonduktansseja käsitellään lisäkonduktanssi-termillä). Lisäkonduktanssien numeerisessa laskemisessa käytettiin todellisia, toteutuvia rakenteita. Rakenteiden materiaaleille määritettiin valmistajan antamat lämmönjohtavuuden arvot. Luvuissa 5.2–5.6 on käyty rakennusosittain läpi mallinnettavan kohteen lisäkonduktanssien laskeminen.

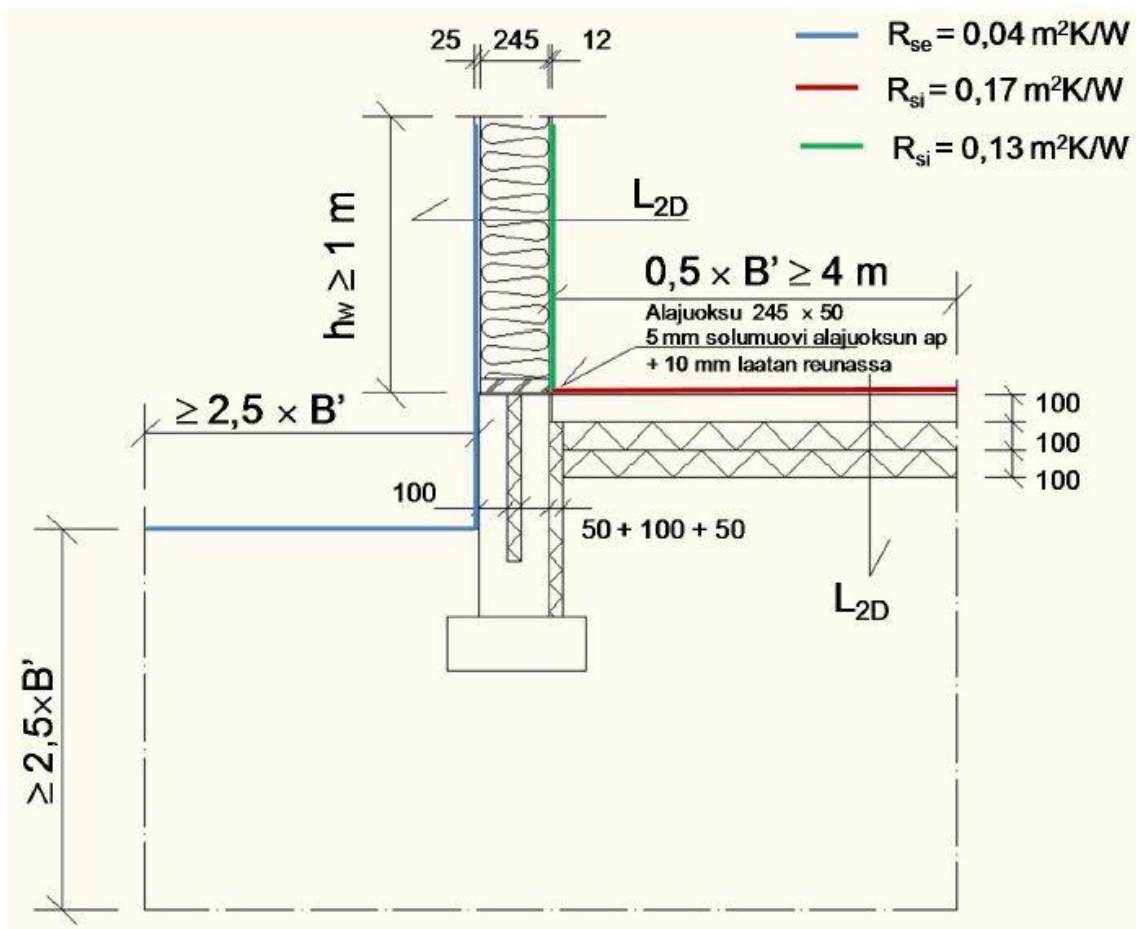


KUVA 2. Kohde Koivikko on suorakaiteen muotoinen 1,5-kerroksinen puurakenteinen pientalo

5.1 Rakenteiden mallintamisen kulku

Käytännön mallinnustyössä käytettiin varsinaisen simulointiohjelman lisäksi useita avustavia ohjelmia viivamaisen lisäkonduktanssin määrittämiseksi. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu mallinnusprosessin eteneminen pohjautuen Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaaseen.

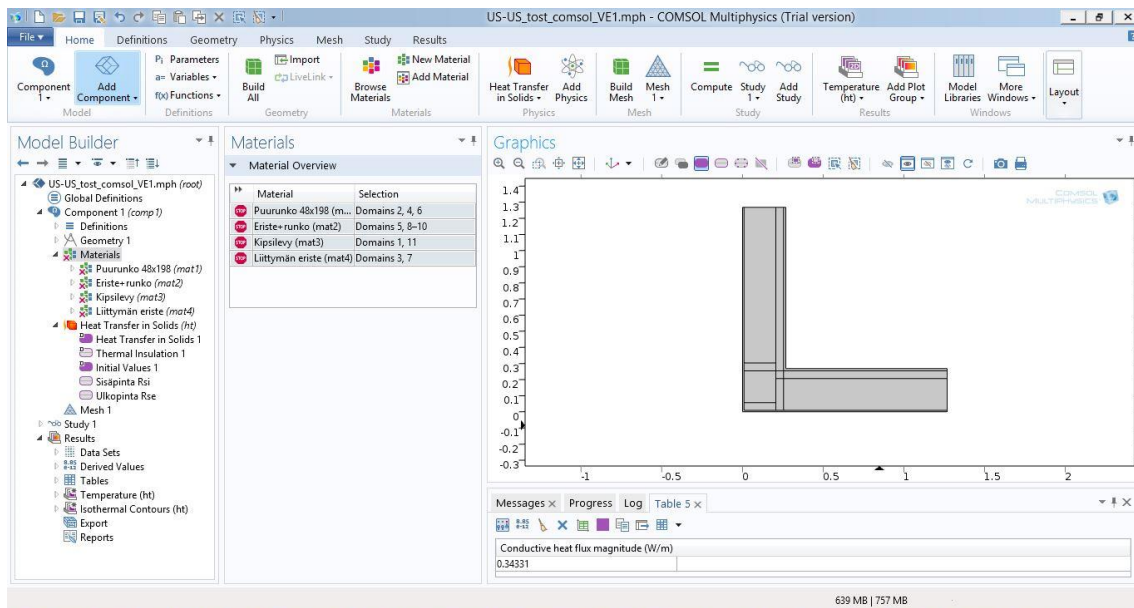
Ensin mallinnettavasta liittymästä luotiin 2-ulotteinen rakennedetalji Autocad-ohjelmalla. Viivapiirtämisellä luotiin mahdollisimman todenmukainen ja toteutuvaa kohdetta vastaava rakenneleikkaus. Malliin ei lisätty ylimääräisiä tietoja, kuten mittoja tai tekstejä. Tarkoituksena oli saada pelkillä viivoilla muodostettua yhtenäinen rakenne. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas määrittelee mallinnettavan liittymän vaadittavat mitat mallinnusta varten (kuva 3). Rakennesosan leikattavien kohtien reunat (pistekatkoviivalla merkitty) määritettiin adiabaattisina reunaehtoina, jolloin kuviteltiin, että reunoilla on täydellinen lämmöneristys. Näin mallinnusohjelma osasi lopettaa laskemisen oikeaan kohtaan eikä huomioinut tietoja mallinnettavan rakenteen ulkopuolelta. (Illikainen 2015.)



KUVA 3. Esimerkki mallinnettavan liittymän mitoista ja pintavastuksista (Viivamaisen lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 33)

Autocadilla tehty mallinnettava liittymädetalji avattiin simulointiohjelmassa. Mallin rakennekerrokset näkyivät mallinnusohjelmassa omina elementteinä (kuva 4). Jokaiselle kerrosolementille asetettiin kyseistä materiaalia vastaavat ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuudet. Epähomogeenisille rakennekerroksille (esimerkiksi runkorakenne, jossa samassa rakennekerroksessa on sekä puuta että villaa) määritettiin keksiarvoinen lämmönjohtavuus Excel-taulukkolaskennalla.

Viivamaisen lisäkonduktanssin numeerisessa laskennassa selvitetään lämpötekninen kytkentäkerroin L_{2D} . Tällä tarkoitetaan koko mallinnettavan rakenteen lämpövirtaa. Tässä työssä L_{2D} ratkaistiin Comsol Multiphysics 4.4 –simulointiohjelmalla. Mallinnus tapahtui stationääritilassa (=jatkuvuustilassa) yhden asteen lämpötilaerolla, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia Suomen rakennusmääräyskokoelma D5-ohjearvojen kanssa.



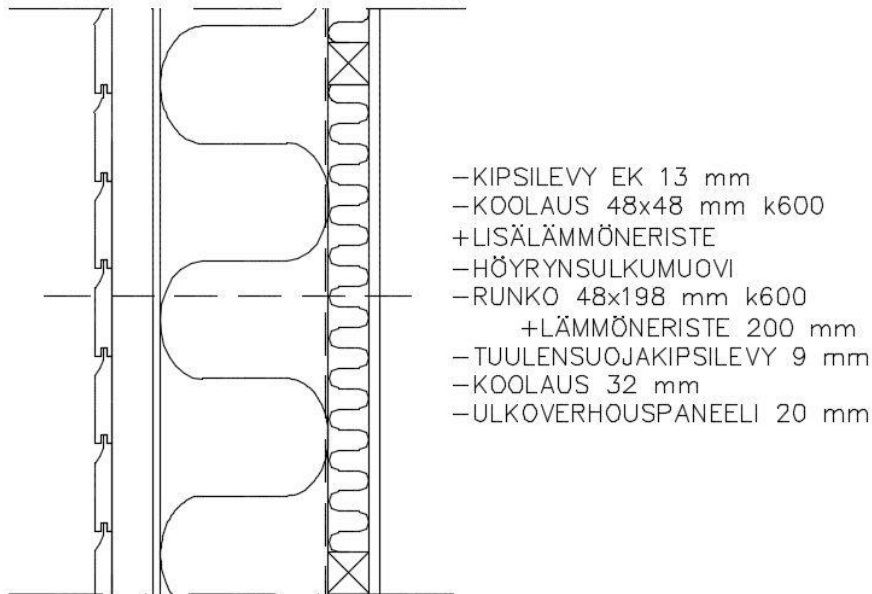
KUVA 4. Comsol-simulointiohjelman työskentelytila

Comsol-ohjelmassa asetettiin malinnettavalle rakenteelle sisä- ja ulkopuolen pintavastukset R_{si} ja R_{se} . Samalla määritettiin rakenteen sisäpuolelle 1 °C :n lämpötila ja ulkopuolelle 0 °C . Simuloidusta mallista saatiin koko rakenteen lämpövirta selvitettyä valitsemalla liittymän lämpimän puolen sisäpinnat ja käyttämällä viivamainen integraatio -toimintoa. Toiminto mittasi pinnan läpi sisältä ulospäin pyrkivää johtumislämpöä.

Liittymän viivamainen lisäkonduktanssi ratkaistiin vähentämällä koko rakenteen lämpövirrasta (L_{2D}) U-arvot kerrottuna rakennusosien laskentapituuksilla. Käytetty simulointiohjelma ei laske lisäkonduktanssin arvoa suoraan, vaan se ratkaistiin käsin Excel-taulukkolaskennalla / Mathcad-ohjelmalla käyttäen kaavaa 10 (sivulla 17).

5.2 Ulkoseinäliittymän lisäkonduktanssi

Kohde Koivikon pohjan geometria oli suorakaiteen muotoinen ja ulkoseinät toteutettiin puurankarunkoisena (kuva 5). Kantavana rakenteena oli $198 \times 48\text{ mm}$:n pystyrunko K600-jaolla, lisälämmöneristeenä oli $48 \times 48\text{ mm}$:n vaakakoolaus K600-jaolla. Ulkoseinärakenteen tarkemmat rakennekerrokset on esitetty taulukossa 2.

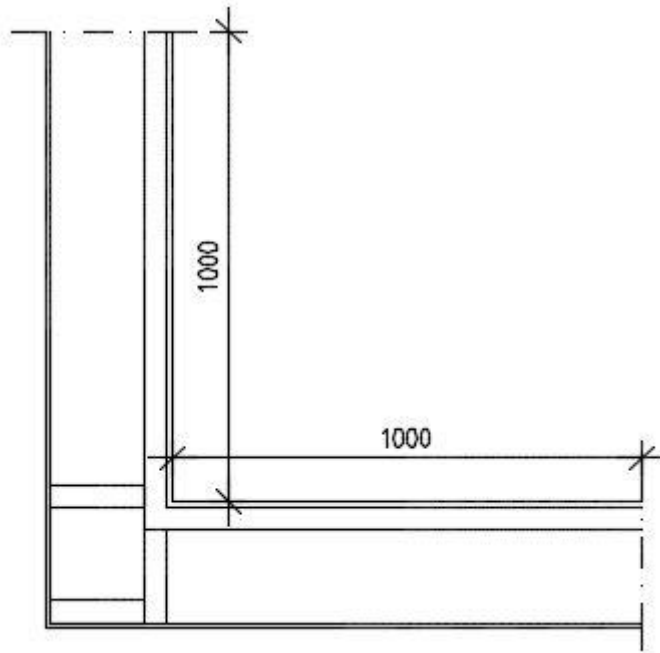


KUVA 5. Ulkoseinän rakenneleikkaus

TAULUKKO 2. Ulkoseinärakenteen lämpöparametrit ja U-arvo

ULKOSEINÄRAKENNE			
Rakennekerros	Kerrospaksuus d (m)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Sisäpintavastus (R _{si})			0,130
Kipsilevy	0,013	0,21	0,062
Runko+koolaus	0,246	0,04	6,156
Tuulensuoja	0,009	0,21	0,043
Ulkopintavastus R _{se}			0,130
Laskennallinen seinä- vahvuus w	0,268	Kokonaislämmön- vastus R_T	6,521
Lämmönläpäisykerroin U_c W/(m ² K)			0,153

Ulkoseinän viivamaiset kylmäsilat muodostuvat ulkonurkkien pystyliitoksista. Runkorakenteen nurkkia suunniteltaessa kiinnitettiin erityistä huomiota vaaka-koolausten vaivattomaan asentamiseen. Lisäksi ulkonurkissa puurankojen väliin oli helppo sijoittaa lämmöneriste vähentämään nurkkaliitosten lämpöhäviöitä. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan valittiin mallinnettavan liittymän molempia ulkoseiniä metrin verran laskentaan mukaan. Näin saatiin kuva 6 mukainen malli rakenteen simuloimista ja lämpöteknisen kytkentäkertoimen ratkaisemista varten.



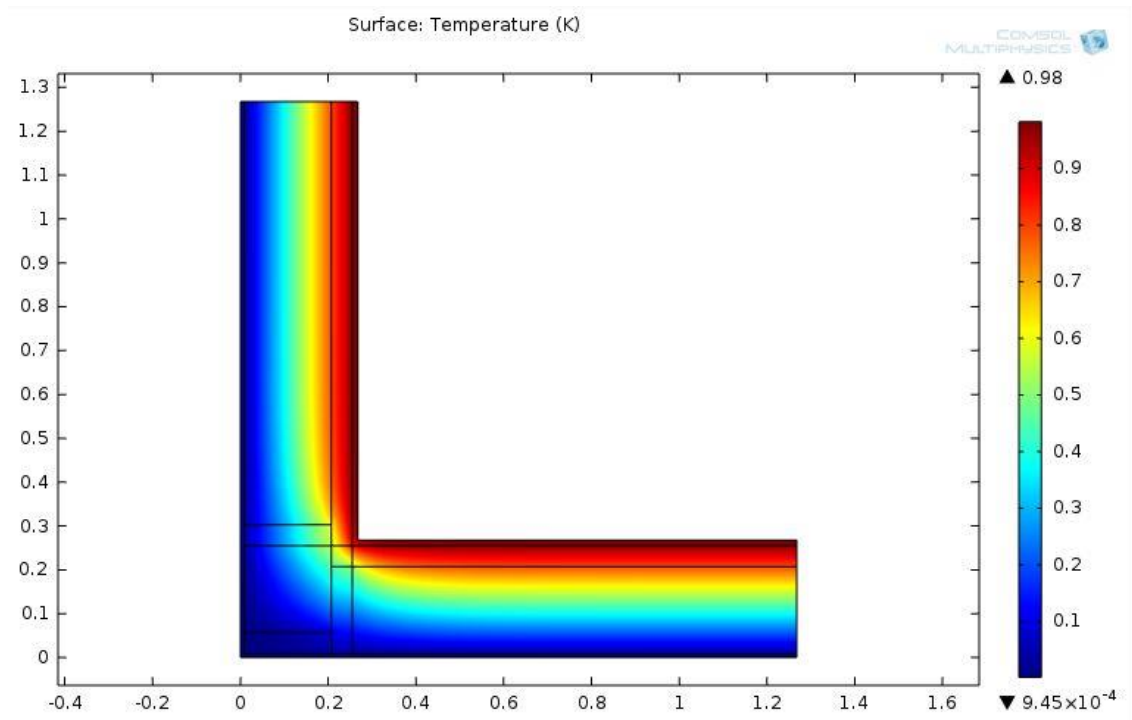
KUVA 6. Ulkoseinäliittymän yksinkertaistettu malli ja mittatiedot (mm)

U-arvon laskennassa ulkoseinärakenteen hyvin tuulettuva ilmarako ja ulkoverhouslauta jätettiin huomioimatta C4-ohjeiden mukaisesti, jolloin ulkopuolen pintavastuksena käytettiin sisäpuolen pintavastuksen arvoa (ks. Lämmöneristys. 2012, 24). Ulkoseinän pintavastukset olivat $R_{si}=R_{se} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$. Tällöin ulkoseinän laskentavahvuudeksi saatiin $w = 0,268 \text{ m}$ ja lämmönläpäisykertoimeksi saatiin $U_c = 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (taulukko 2).

Ulkoseinärakenteen säännölliset kylmäsilat otettiin huomioon U-arvoa laskeessa. Säännöllisiä kylmäsiltoja olivat pystyrunko ja vaakakoolaus. Kyseisille epähomogeenisille rakennekerroksille määritettiin keskiarvoiset lämmönjohtavuuden arvot, minkä vuoksi säännöllisellä runkojaolla olevat puurangat voitiin jättää simuloitavasta detaljista pois kuvan 6 mukaisesti.

Mallinnettavan ulkoseinärakenteen rakennekerroksille annettiin materiaaleja vastaavat (valmistajan antamat) lämmönjohtavuuden λ -arvot Comsol-simulointiohjelmassa. Tässä vaiheessa asetettiin myös sisä- ja ulkopintavastukset R_{si} ja R_{se} . Samalla määritettiin rakenteen ulkopuolelle $0 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötila ja sisäpuolelle $1 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötila. Kun seinärakenteen katkaistuille kohdille ei määritetty pintavastuksia, tunnisti simulointiohjelma ne automattisesti adiabaattisena reunana.

Tämän jälkeen voitiin ratkaista rakenteen lämpötilajakauma (kuva 7).



KUVA 7. Ulkoseinäliittymän lämpötilajakauma

Viivamaisen lisäkonduktanssin numeerisessa laskennassa täytyi selvittää lämpötekninen kytkentäkerroin L_{2D} , eli koko rakenteen lämpövirta. Mallin lämpövirta ratkaistiin Comsol Multiphysics 4.4 –simulointiohjelmalla. Lämpövirran numeerisessa laskennassa käytettiin ohjelman osittaisdifferentiaalia hyödyksi valitsemalla viivamainen integraatio -toiminto. Tällöin osoitettiin seinärakenteen sisäpuolen kipsilevyn sisäpinnat ja ratkaistiin pintojen läpi sisältä ulospäin pyrkivä johtumislämpövirta. Rakenteen lämpötekninen kytkentäkerroin oli $L_{2D} = 0,3433$ W/mK.

Ulkoseinäliittymän viivamainen lisäkonduktanssi ratkaistiin vähentämällä koko rakenteen lämpövirrasta ulkoseinien U-arvot kerrottuna seinien laskentapituuksilla (kaava 10 sivulla 17).

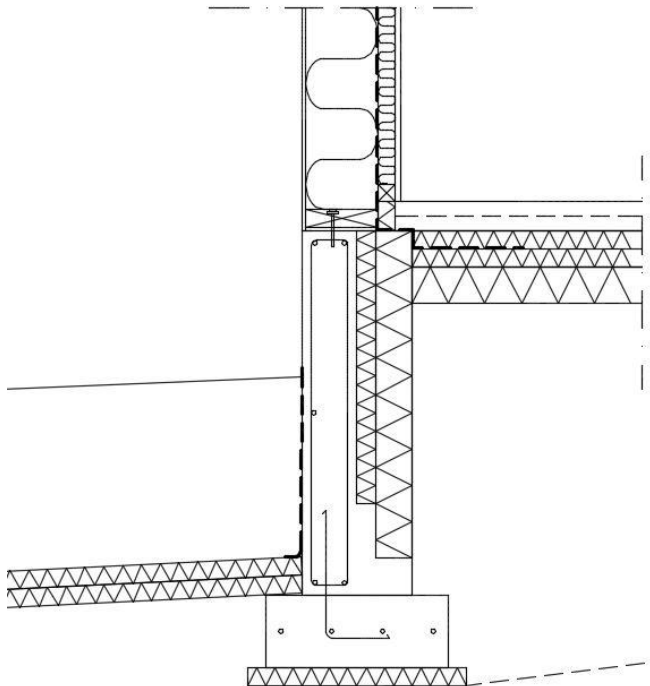
$$\psi = L_{2D} \cdot \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = L_{2D} \cdot U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 0,3433 \cdot 0,15 \times 1 - 0,15 \times 1 = 0,0366$$

Ulkoseinäliittymän viivamaiseksi lisäkonduktanssiksi saatiin 0,0366 W/mK.

5.3 Maanvastaisen alapohjaliittymän lisäkonduktanssi

Kohteen Koivikko alapohja suunniteltiin maanvaraisena alapohjana (kuva 8). Alapohjan, ulkoseinän ja perusmuurin lämmönläpäisykertoimet laskettiin käsin. Alapohjaliittymän liittyvien rakennusosien tarkemmat rakennekerrokset on esitetty taulukoissa 2,3 ja 4. Maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin voitaisiin laskea yksinkertaistetusti kertomalla lattiarakenteen U-arvo 0,9:llä. Kerroin 0,9 huomioi maan lämmön vastuksen, mutta ei ota huomioon alapohjan geometriaa. Tässä työssä alapohjan ja maanvastaisen seinän lämmönläpäisykerroin määritettiin tarkemmalla laskentatavalla (alapohjan geometria huomioiden) lämmöneristysohjeiden C4 mukaan. Maa-aineksen lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa 2,0 W/(mK). (Lämmöneristys. 2012, 24,26.)

Tässä työssä käsiteltiin alapohjan osalta vain ulkoseinien kohdalla aiheutuvia lisäkonduktansseja. Todellisuudessa kohteessa muodostuu viivamaisia kylmäsiltoja myös alapohjan ja kantavien seinien liittymiin. Nämä jätettiin kuitenkin huomioimatta, koska Rakennusmääräyskokoelma ei ota kantaa alapohjan osalta muihin viivamaisiin kylmäsiltoihin kuin ulkoseinän ja alapohjan väliseen liittymään.



KUVA 8. Kohde Koivikon perustusleikkaus

5.3.1 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen

Alapohjassa käytettiin rakennusmateriaalien valmistajien antamia lämmönjohtavuuden arvoja, joiden perusteella lämmönläpäisykertoimet määritettiin. Betonin lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa 2,0 (W/mK). Ulkoseinän ja perusmuurin lämmönläpäisykerroin laskettiin kaavalla 2 (sivulla 12). Perusmuurin laskennallinen paksuus d_{nv} oli 0,3 m ja lämmönläpäisykerroin U_c oli 0,25 W/(m²K) (taulukko 3). Perusmuurin ulkopuolella vaakasuuntaisena routaeristeenä käytettiin EPS-levyjä ($\lambda = 0,041$ (W/mK)), joiden paksuus yhteensä $d = (50+50)$ mm. Alempi eristelevy oli leveydeltään 1,2 m ja ylempi levy 1,0 m. Lisäksi anturan alapuolella oli XPS-eristelevy ($\lambda = 0,033$ (W/mK)), jonka $d = 30$ mm ja leveys 0,6 m.

TAULUKKO 3. Perusmuurirakenteen lämpöparametrit ja U-arvo

PERUSMUURIRAKENNE			
Rakennekerros	Kerrospaksuus d (m)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
EPS	0,15	0,038	3,947
Betoni	0,15	2	0,075
Ulkopintavastus R _{se}			0,040
Laskennallinen seinäpaksuus d_{nv}	0,3	Kokonaislämmönvastus R_{nv}	4,062
Lämmönläpäisykerroin U_c W/(m ² K)			0,246

Alapohjan lämmönläpäisykertoimen määrittäminen tehtiin C4-ohjeiden mukaan tarkemmalla menetelmällä.

Aluksi selvitettiin mallinnettavan rakennuksen pohjan pituus ja leveys sisämittojen mukaan. Näitä olivat $L = 14,43$ m ja $B = 8,13$ m. Näin saatiin lattian pinta-alaksi $A = 117,3$ m² ja lattian piiriksi $P = 45,1$ m. Kohteen mittatietojen perusteella voitiin selvittää rakennuksen karakteristinen mitta B' , joka laskettiin

$$B' = \frac{A}{0,5P} = 5,198 \text{ m. Alapohjan leveydeksi valittiin suurempi arvoista } 0,5 \times B' =$$

2,599 tai 4 m. Leveydeksi valittiin tällöin 4 m. Alapohjan lattiarakenteen rakennekerrokset ja lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Lattiarakenteen lämpöparatmetrit

LATTIARAKENNE			
Rakennekerros	Kerrospaksuus d (m)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Betonilaatta	0,08	2	0,040
Lattiaeriste, EPS	0,2	0,036	5,556
		Lämmönvastus R_f	5,596

Perusmuurin lämmöneristeen korkeus D_v maan pinnan alapuolella on 0,46 m. Alapohjan ekvivalentti paksuuden laskemiseen käytettiin kaavaa 7 (sivulla 15).

$$d_t = w + \lambda_s (R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,268 + 2 (0,17 + 5,606 + 0,04) = 11,9 \text{ m}$$

Alapohjarakenteen reuna-alueella oleva pystysuuntainen lämmöneristeen ekvivalentti lisäpaksuus laskettiin kaavalla 8 (sivulla 15).

$$d'_v = \lambda_s \left(R_{nv} \cdot \frac{dnv}{\lambda_s} \right) = 2 \left(4,062 \cdot \frac{0,25}{2} \right) = 7,87 \text{ m}$$

Kohde Koivikon alapohjan reuna-alueilla ei ollut vaakasuuntaista lisälämmöneristettä, joten siitä aiheutuvaa lisäkonduktanssia ψ_{geh} ei laskettu. Perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristeen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi ψ_{gev} laskettiin kaavalla 9 (sivulla 15).

$$\begin{aligned} \psi_{gev} &= -\frac{\lambda_s}{\pi} + \left[\ln \left(\frac{2Dv}{dt} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2Dv}{dt+d'_v} + 1 \right) \right] \\ &= -\frac{2}{\pi} + \left[\ln \left(\frac{0,46}{11,9} + 1 \right) - \ln \left(\frac{0,46}{11,9+7,87} + 1 \right) \right] = -0,011 \text{ W/(mK)} \end{aligned}$$

Alapohjarakenteen lämmönläpäisykerroin määritettiin kaavalla 6 (sivulla 14). Perusmaan lämmönjohtavuutena λ_s käytettiin arvoa 2,0 W/(mK).

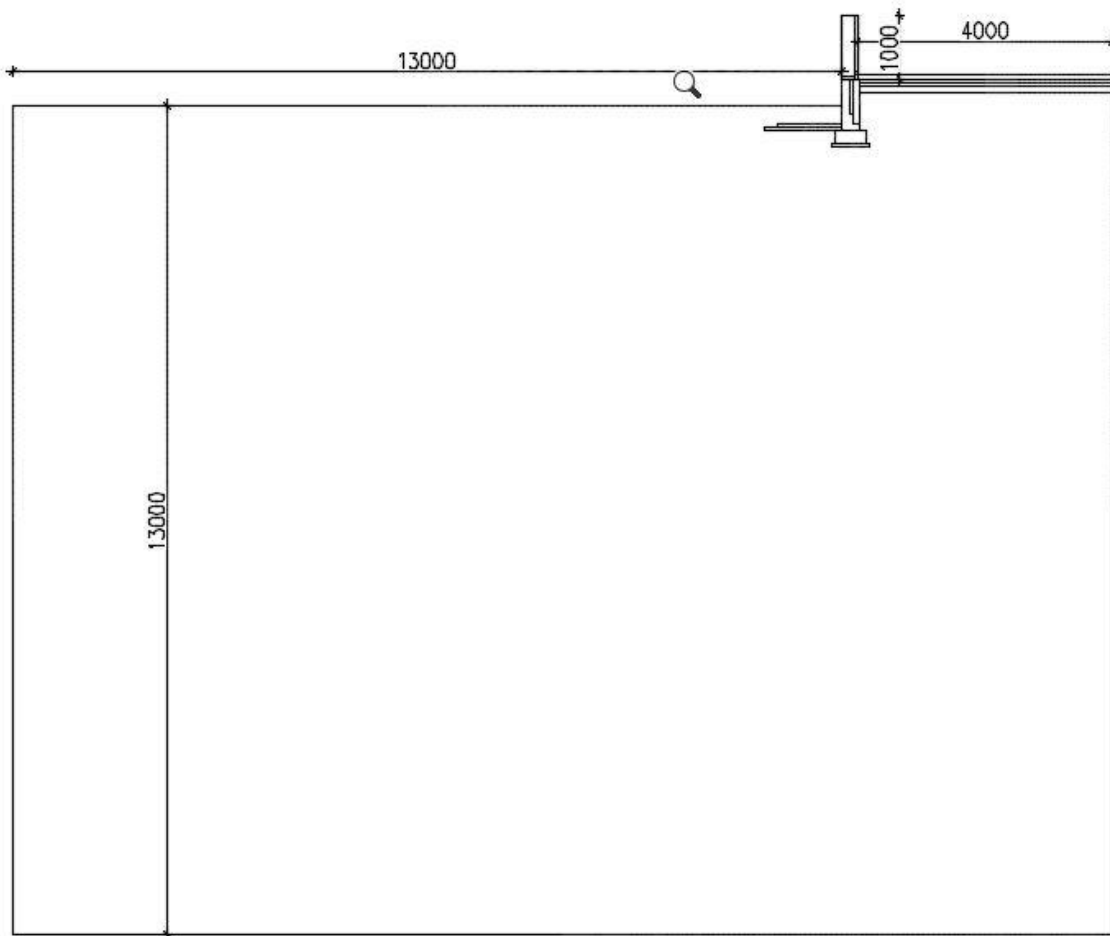
$$U_f = \frac{\lambda_s}{0,457B' + dt} + \frac{2\psi_{gev}}{B'} = \frac{2}{0,457 \cdot 5,198 + 11,9} + \frac{2 \cdot -0,01}{5,198}$$

$$U_f = 0,133$$

Alapohjarakenteen lämmönläpäisykertoimeksi saatiin $0,133 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

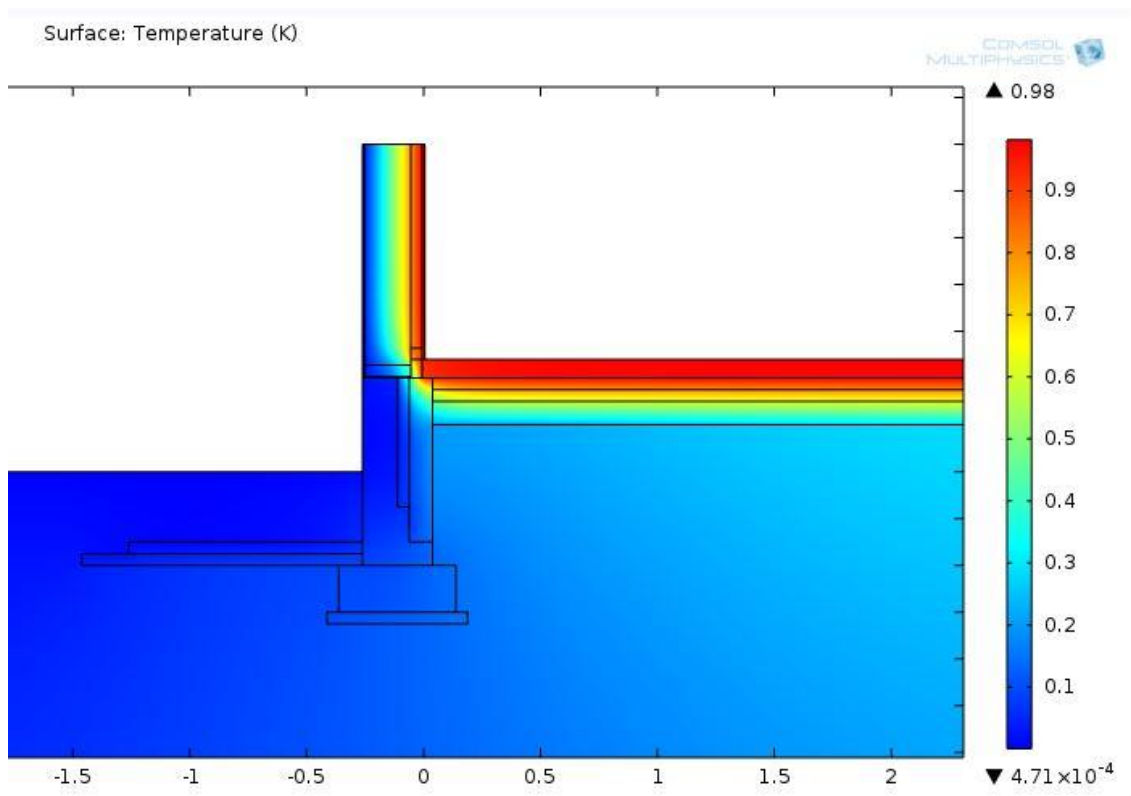
5.3.2 Alapohjaliittymän viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen

Alapohjan lämpövirran simulointia varten selvitettiin, kuinka paljon kutakin liittymän rakenneosaa täytyi ottaa mukaan mallinnettavaan detaljiin. Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaan ohjeiden mukaan (kuva 3, sivulla 21) saatiin kuvan 9 mukaiset mitat.



KUVA 9. Alapohjaliittymän simuloinnissa käytetty malli päämittoineen (mm)

Liittymän lämpövirran numeerinen laskenta suoritettiin Comsolilla luvun 5.2 mukaisesti. Ohjelmassa asetettiin rakenteiden materiaalit ja niiden lämmönjohtavuudet. Malliin lisättiin lattiapinnan sisäpintavastus $R_{si} = 0,17 \text{ (m}^2\text{K)/W}$, ulkoseinän sisä- ja ulkopintavastukset $R_{si} = R_{se} = 0,13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ sekä perusmuurin ja alapohjan ulkopintavastus $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$. Rakenteen lämpötilajakauma ratkaistiin ajasta riippumattomassa tilassa yhden asteen lämpötilaerolla (kuva 10).



KUVA 10. Alapohjaliittymän lämpötilajakauma

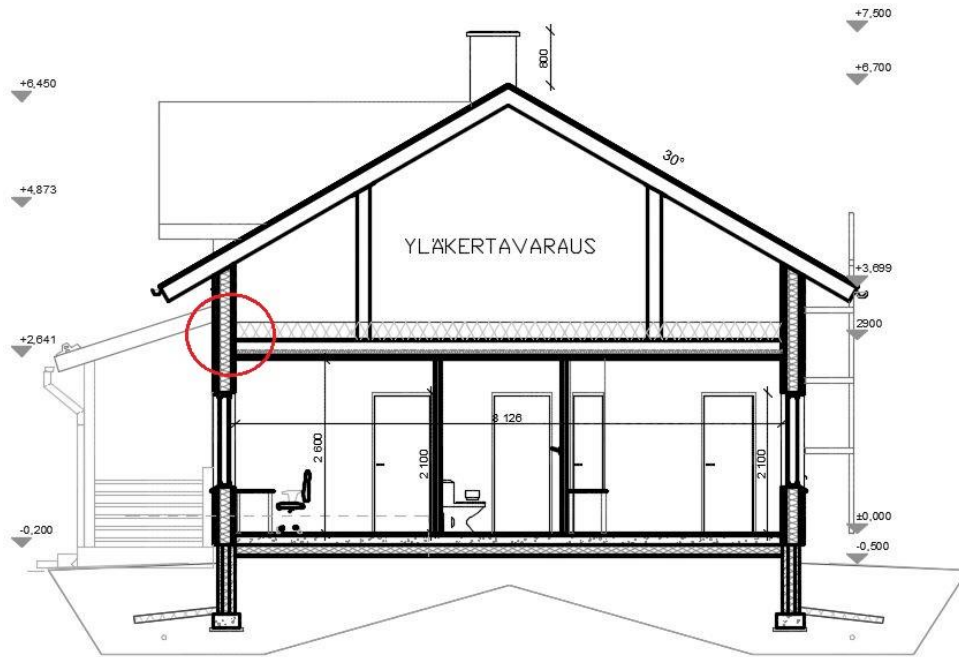
Koko mallin lämpötekninen kytkentäkerroin L_{2D} oli 0,7445 W/mK. Alapohjan kylmäsilasta aiheutuva lisäkonduktanssi määritettiin kaavalla 11 (sivulla 17). Kaavassa 11 käytetty $0,5 \times B'$ korvattiin alapohjan leveydellä 4 (m) kuvan 10 mukaisesti.

$$\psi = L_{2D} - h_w U_w - 4 \times B' U = 0,7445 - 1 \times 0,156 - 4 \times 0,136 = 0,042$$

Alapohjan viivamaisen lisäkonduktanssin arvoksi saatiin 0,042 W/(mK).

5.4 Yläpohjaliittymän lisäkonduktanssi

Koivikko suunniteltiin yläkertavarauksella olevana 1,5-kerroksisena omakotitalona, joten yläpohja toteutettiin kehäristikoilla. Yläpohjassa tarkasteltiin ulkoseinän ja yläpohjan välistä liittymää (kuva 11). Toteutuvan kohteen yläkerta ei vielä rakennettu, joten siitä mahdollisia myöhemmin aiheutuvia kylmäsiltoja ei tarkastelussa huomioitu.



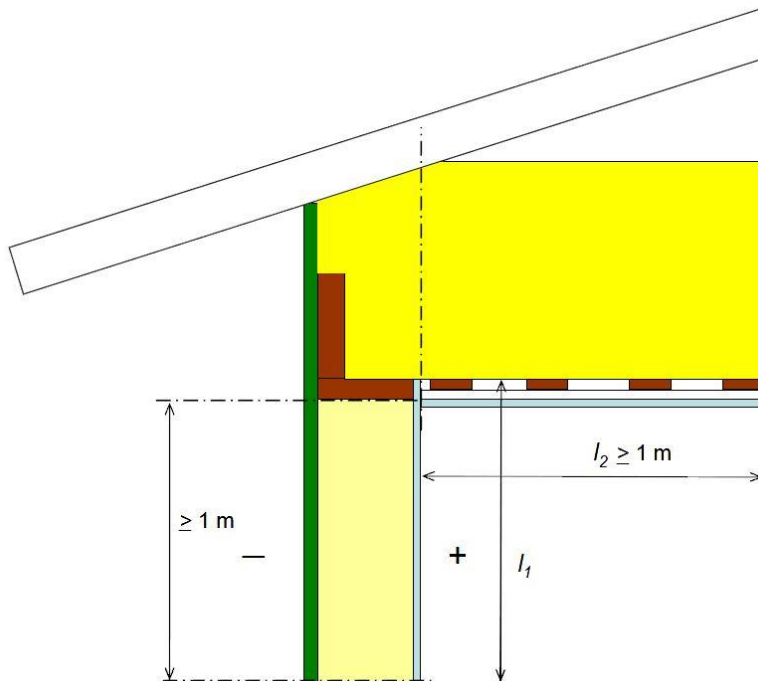
KUVA 11. Yläpohjan tarkasteltava liittymä

Yläpohjarakenteen kokonaisvahvuus (alapaarteella) oli 561 mm. Yläpohja suunniteltiin hyvin eristäväksi, jolloin eristeen kokonaisvahvuus oli 500 mm. Lämmönläpäisykerroimeksi määrittyi tällöin 0,076 W/(m²K). Taulukossa 5 on esitetty tarkemmin yläpohjan U-arvon laskemiseen vaadittavat tiedot.

TAULUKKO 5. Yläpohjarakenne YP1

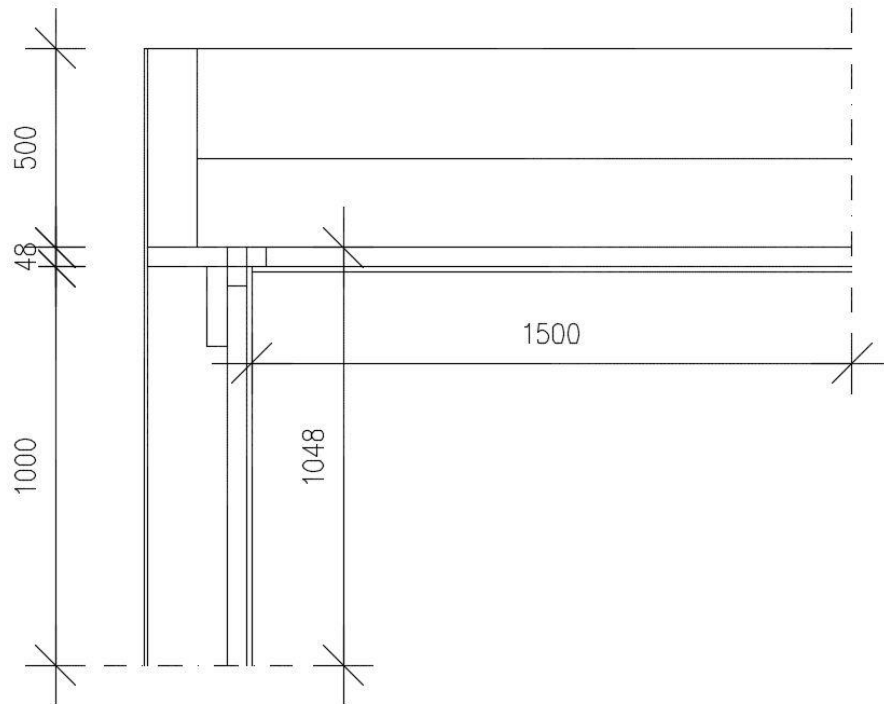
YLÄPOHJARAKENNE			
Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_u (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Sisäpuolen pintavastus R_{si}			0,100
Kipsilevy	0,013	0,21	0,062
Tuulettumaton ilmarako ja koolaus	0,048	0,057	0,842
Ilmansulku			0,020
Puhallusvilla ja alapaarre	0,223	0,047	4,745
Puhallusvilla	0,277	0,039	7,103
Ulkopintavastus R_{se}			0,240
Kokonaislämmönvastus R_T			13,111
Lämmönläpäisykerroin U_c W/(m ² K)			0,076

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan määritettiin mallinnettavan rakennusosien mitat (kuva 12). Hyvin lämmöneristetyin yläpohjan mallinnettavan osan pituus $l_2 \geq 1$ m tai 3 kertaa lämmöneristeen vahvuus (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 13). Kohteen yläpohjan lämmöneristekerroksen vahvuus oli 500 mm, jolloin l_2 mittana käytettiin suurempaa arvoa 3×500 mm = 1 500 mm (kuva 13).



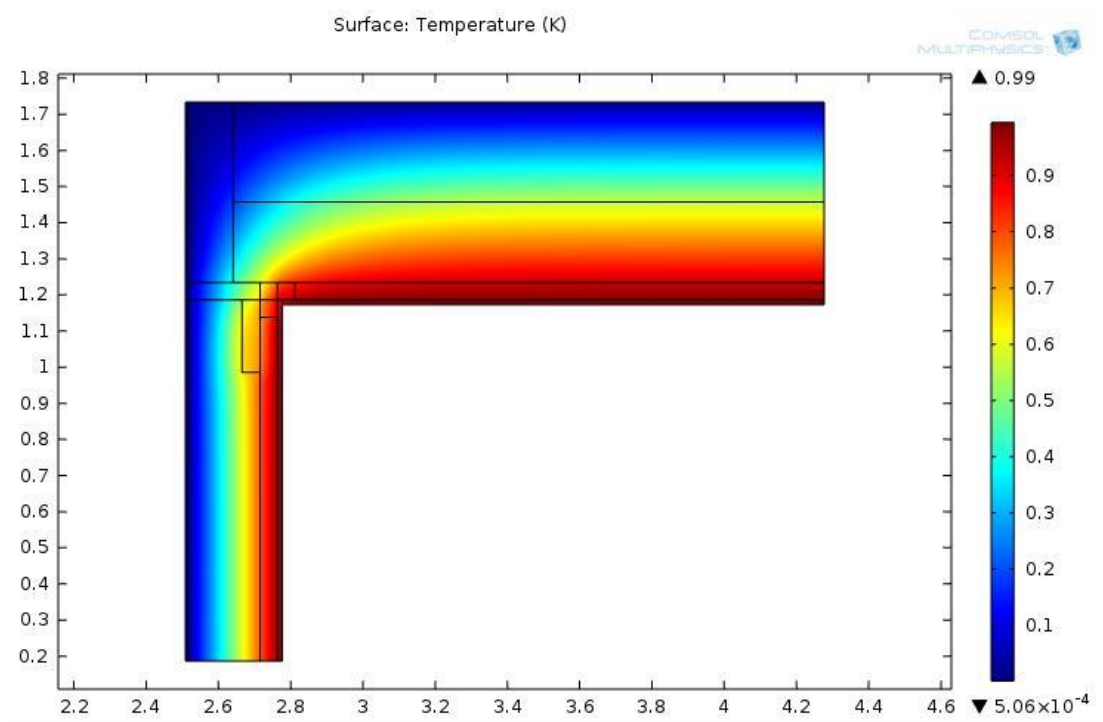
KUVA 12. Havainnekuva yläpohjaliittymän simulointiin vaadituista rakennusosien mitoista (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 23)

Ristikoiden alapaarten ja tuella olevien pystysauvojen kohdalla käytettiin ristikomateriaalin ja lämmöneristeen keskiarvoista lämmönjohtavuuden arvoa. Samoin alakaton tuulettumattoman ilmaraon ja koolauksen rakennekerros laskettiin keskiarvoisen lämmönjohtavuuden mukaan. Siitä syystä täytyi epähomogeeniset rakennekerrokset myös piirtää omiksi elementeiksi, jotta simulointiohjelmassa voitiin myöhemmin syöttää oikeat lämmönjohtavuuden arvot rakennekerroksille. Runkorakenteen ja alakaton sisänurkkaan suunniteltiin 48 x 48 (mm) villasoiro ($\lambda = 0,033$ W/(mK)) lämmöneristeeksi.



KUVA 13. Simulointimalli yläpohjaliittymästä mittatietoineen (mm)

Yläpohjan sisäpintavastuksena R_{si} käytettiin arvoa $0,1 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ ja ulkopintavastuksena R_{se} arvoa $0,24 \text{ (m}^2\text{K)/W}$. Rakenteen lämpötilajakauma ratkaistiin Comsolilla ajasta riippumattomassa tilassa yhden asteen lämpötilaerolla (kuva 14).



KUVA 14. Yläpohjaliittymän lämpötilajakauma

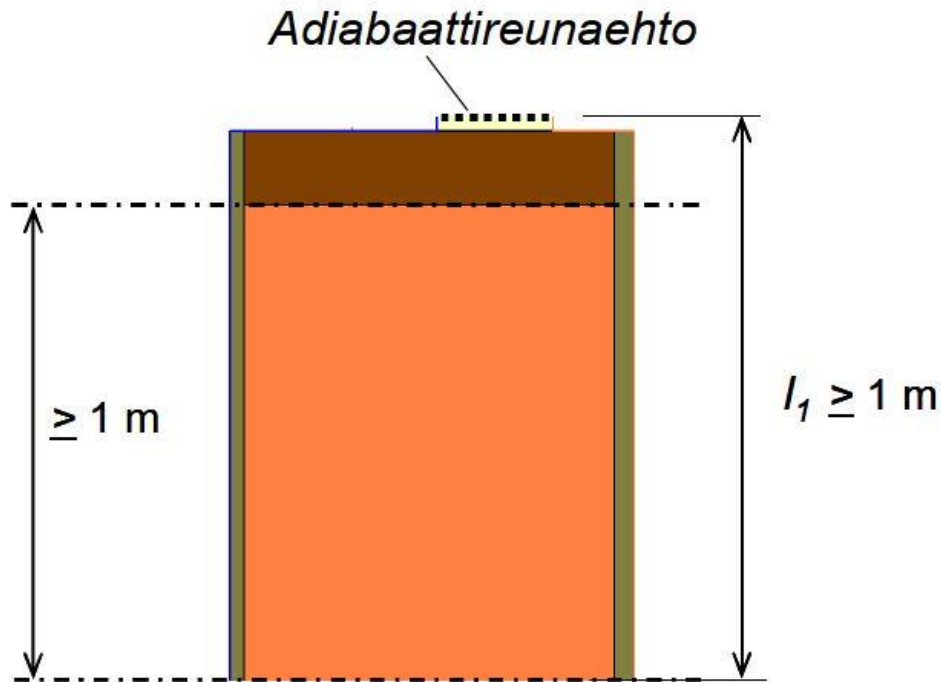
Mallinnettavan liittymän lämpötekkinen kytkentäkerroin oli $L_{2D} = 0,3225 \text{ W/(mK)}$. Yläpohjan viivamainen lisäkonduktanssi laskettiin vähentämällä kokonaislämpövirrasta ulkoseinän ja yläpohjan U-arvot kerrottuna niiden laskentapituuksilla (kaava 10 sivulla 17).

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 0,3225 - 0,15 \times 1,048 - 0,076 \times 1,5 = 0,050$$

Yläpohjan viivamaisen lisäkonduktanssin arvoksi saatiin $0,050 \text{ W/(mK)}$.

5.5 Aukkorakenteiden lisäkonduktanssi

Rakennuksen viivamaisia kylmäsiltoja tarkastellessa tuli huomioida myös aukkojen liittymäkohdista aiheutuvat lisäkonduktanssit. Kohteen aukkorakenteita olivat ikkuna- ja oviliittymät. Kyseisten liittymien lisäkonduktanssin arvoon vaikuttaa olennaisesti aukkorakenteen tyyppi. Lisäksi siihen vaikuttavat rakennusosien U-arvot ja liittyvän seinärakenteen paksuus. Tässä työssä aukkojen lisäkonduktanssit laskettiin yksinkertaistetulla menetelmällä, jolloin jätettiin ikkunoiden ja ovien lämmönläpäisykertoimet huomioimatta. Yksinkertaistetussa mallissa aukkorakenteen karmin tilalle asetettiin adiabaattireunaehto kuvan 15 mukaisesti, jolloin seinään liittyvän rakennusosan ominaisuudet jätettiin huomioimatta karmisyvyyttä lukuun ottamatta.



KUVA 15. Ikkunaliittymän yksinkertaistetun laskentamenetelmän havainnekuva (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 28)

Yksinkertaistettu laskentamenettely vähensi mallinnettavien liitosten laskentatarkkuutta, jota korjattiin ikkunatyypistä riippuvalla kertoimella. Ikkunan U-arvojen tarkempi laskeminen on erittäin monimutkaista. Ikkunaliittymän lisäkonduktanssin tarkempi laskenta olisi siinä tapauksessa mielekästä, kun olisi tarve laskea muutenkin ikkunarakenteen lämmönläpäisykerroin materiaalien lämmönjohtavuuksien mukaan. (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 27.)

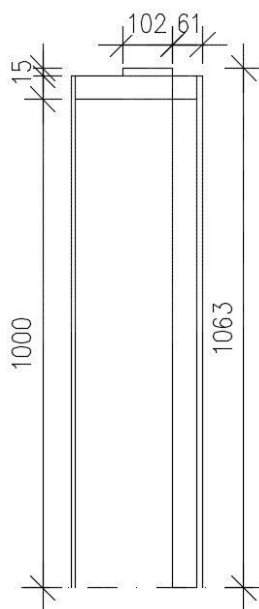
Kohteen Koivikko ikkunatyypistä vastasi MSE-ikkunatyypistä. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas määrittelee eri ikkunatyypeille omat karmien laskentasyvyydet. Taulukossa 6 on esitetty eri ikkunatyypeille käytettävät kertoimet laskentasyvyyden määrittämiseksi. Näillä kertoimilla pyrittiin vähentämään yksinkertaistetun menetelmän laskentaepätarkkuutta ja saada laskenta-arvot vastaamaan todellisia arvoja. Mallintamisessa käytettiin MSE-ikkunatyypille soveltuvaa 0,6-kerrointa. Koivikon ikkunoiden karmisyvyys oli 170 mm, jolloin laskentasyvyudeksi saatiin $0,6 \times 170 \text{ mm} = 102 \text{ mm}$. Laskentasyvyyttä tarvittiin simulointi mallissa liittymän eristeen leveyden määrittämiseen.

TAULUKKO 6. Ikkunatyypin karmien laskentasyvyyden korjauskertoimet (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 27)

Ikkunatyypin	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

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas ei ota erikseen kantaa oviliittymien laskentaan, joten oviliittymien laskennassa käytettiin ikkunaliittymän lisäkonduktanssin arvoja. Tämä oli mahdollista myös siksi, koska ovikarmien pakkaus oli ikkunakarmien kanssa yhtä suuri (170 mm).

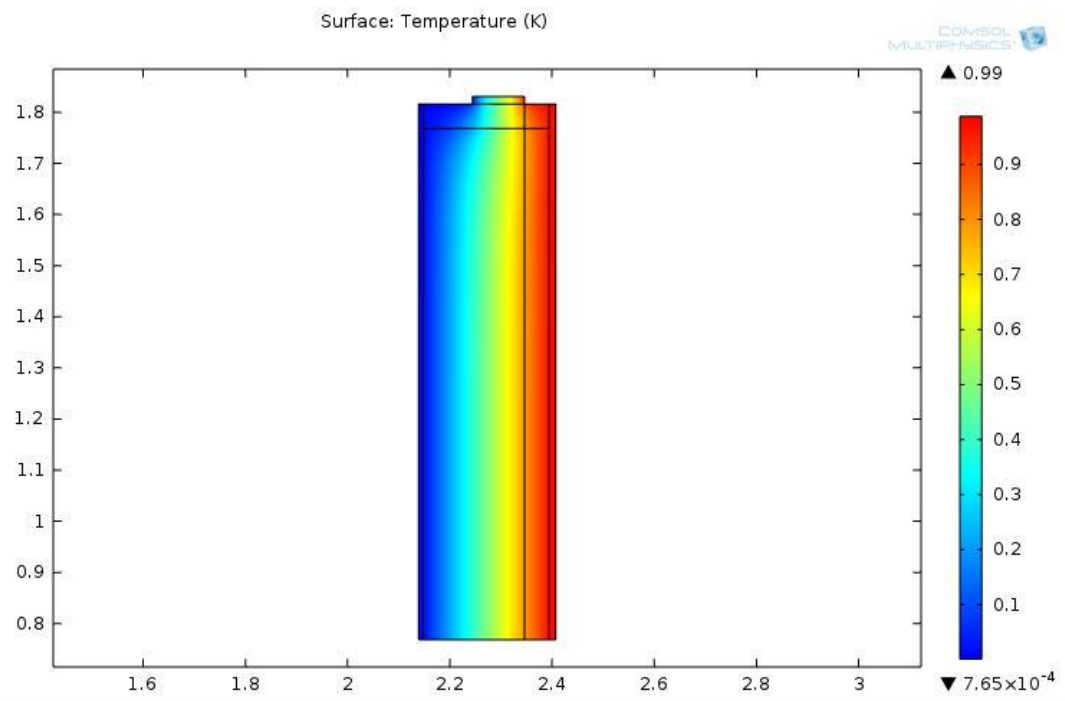
Aukkorakenteen ja seinän välissä käytettiin eristekerroksena polyuretaanivaahtoa, jonka vahvuus $d = 15$ mm ja lämmönjohtavuus $\lambda = 0,023$ W/(mK). Ikkuna- ja ovikarmit sijoitettiin 61 mm seinärakenteen sisäpinnasta ulospäin, mikä vähensi kylmäsilan vaikutusta liittymässä. Eristekerros sijoittui karmien laskentasyvyyden mukaan simuloitavaan rakenteeseen (kuva 16). Eristekerroksen yläpinta sekä seinärakenteen katkaistu linja määritettiin adiabaattisina reunaehtoina.



KUVA 16. Ikkunaliittymän simuloinnissa käytetty rakennemalli ja mitat

Mallin lämpötilajakauma on esitetty kuvassa 17. Rakenteen lämpötekniseksi kytkentäkertoimeksi L_{2D} saatiin 0,198 W/(mK). Simuloitaessa käytettiin seinän

pintavastuksina samoja arvoja kuin edellisissä mallinuksissa ($R_s = R_{se} = 0,13$ (m^2K)/ W). Huomioitavaa oli kuitenkin se, että seinän pintavastukset määritettiin yhtenäisenä rajapintana adibaattireunaehtoihin saakka, tässä tapauksessa mallin seinän alapinnasta polyuretaanivaahdon yläpintaan asti.



KUVA 17. Ikkunaliittymän lämpötilajakauma

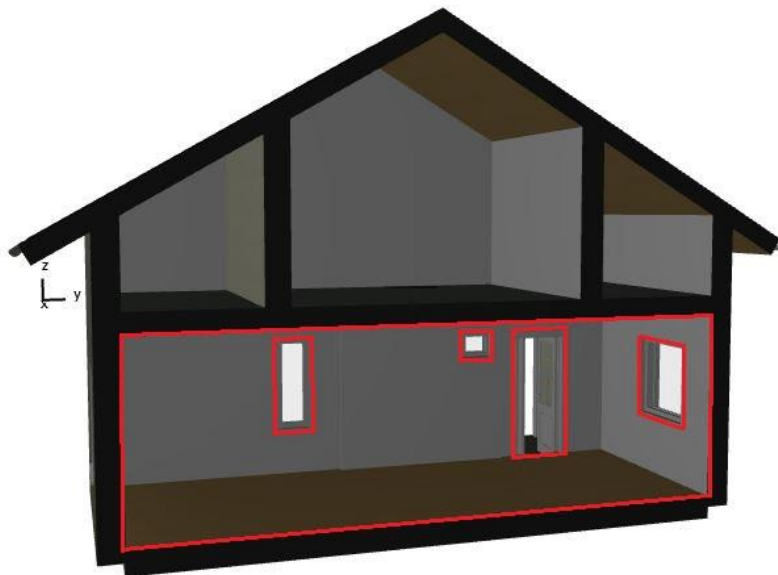
Aukkorakenteen kylmäsillasta aiheutuvan lisäkonduktanssin laskemiseen sovellettiin kaavaa 10 (sivulla 17). Kyseisen liittymän kokonaislämpövirrasta vähennettiin vain seinärakenteen U -arvo kerrottuna sen laskentapituudella, koska ikkunoiden ja ovien lämpöparametreja ei laskennassa huomioitu.

$$\psi = L_{2D} \cdot \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = L_{2D} \cdot U_1 \times l_1 = 0,198 - 0,156 \times 1,063 = 0,032$$

Aukkoliittymän viivamaisen lisäkonduktanssin arvoksi saatiin $0,032$ $W/(mK)$.

6 RAKENNUKSEN JOHTUMISLÄMPÖHÄVIÖT

Rakennuksen kokonaislämpöhäviö muodostuu useasta eri tekijästä, kuten ilmatiiveydestä, ilmanvaihdosta ja vaipparakenteen johtumislämpöhäviöstä. Tässä työssä käsiteltiin kuitenkin vain rakennusosien kautta tapahtuvia johtumislämpöhäviöitä. Rakennusosia ovat alapohja, ulkoseinät, ikkunat, ovet ja yläpohja. Rakennusosista koostuvaa kokonaisuutta kutsutaan vaipparakenteeksi, kun rakennusosat erottavat lämpimän tilan ulkoilmasta (C3. 2010). Kohteen Koivikko vaipparakenteen rakennusosat on esitetty punaisilla viivoilla kuvassa 19. Mahdollisesti myöhemmin rakennettavaa yläkertaa ja sen rakennusosia ei huomioitu tämänhetkissä rakennusvaipan johtumislämpöhäviöissä.



KUVA 19. Kohteen vaipparakenne (ikkunat ja ovet sisältyvät rakennusvaippaan)

6.1 Lämpöhäviöiden laskenta

Rakennusvaipan lämpöhäviöt laskettiin kaavan 1 (sivulla 11) mukaisesti kertomalla rakennusosien pinta-alat niiden lämmönläpäisykertoimilla sekä lisäämällä kylmäsilloista aiheutuvat viivamaiset lisäkonduktanssit kertomalla liittymien pituuksilla. Tässä työssä ei otettu huomioon pistemäisistä kylmäsilloista aiheutuvia pistemäisiä lisäkonduktansseja.

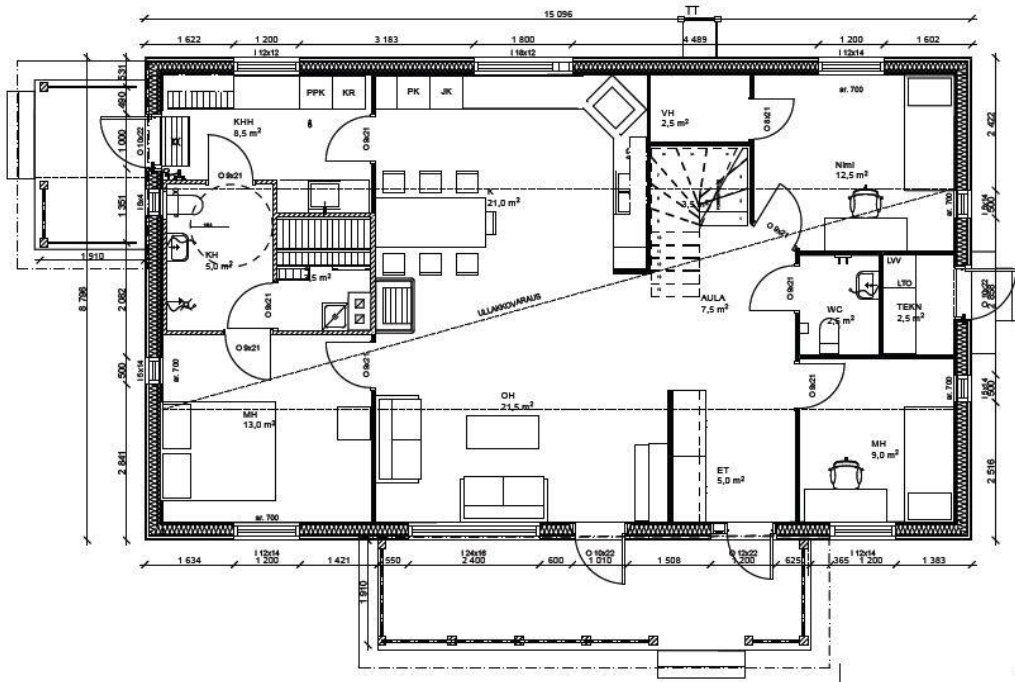
Rakennuksen lämpöhäviöiden laskeminen on tarpeellista, kun mitoitetaan kiinteistön lämmitystarvetta tai todennetaan rakennuksen määräystenmukaisuutta esimerkiksi E-luvun laskennassa (Siikanen 2014, 50). Koivikon energiatodistus tehtiin rakennuslupavaiheessa epätarkoilla arvoilla, joten rakennusosien johtumislämpöhäviöt energiatodistuksessa ovat tässä työssä esitettyjä laskelmia suurempia. Sillä on suuri vaikutus myös kylmäsiltojen laskentaan. Mitä suuremmat rakennusosien johtumislämpöhäviöt ovat, sitä pienempiä ovat kylmäsiltojen viivamaiset lisäkonduktanssit. Taulukossa 7 on esitetty Rakennusmääräyskoelman D3 tasauslaskelmassa olevat U-arvojen vertailuarvot sekä toteutuneen kohteen rakennusosien U-arvot.

TAULUKKO 7. Kohteen rakennusosien U-arvot ja RakMk D3:n vertailuarvot

Rakennusosa	U-arvot RakMk, D3 W/(m ² K)	U-arvot Koivikko W/(m ² K)	Ero %
Ulkoseinä	0,17	0,15	12
Yläpohja	0,09	0,08	11
Maanvastainen alapohja	0,16	0,13	19
Ikkuna	1	0,8	20
Ovi UO1	1	1	0
Ovi UO2	1	0,83	17

Ikkunoiden ja ovien lämpöhäviöt

Aukkorakenteiden lämpöhäviöiden laskemisessa täytyi selvittää ikkuna- ja oviaukkojen pinta-alat sekä niiden lämmönläpäisykertoimet. Kohteen ikkunoiden ja ovien mitat vastasivat rakennussuunnitelmia (kuva 20), jolloin saatiin ikkuna-pinta-alaksi yhteensä 14,8 m² ja ovipinta-alaksi 9,2 m² (taulukot 8 ja 9).



KUVA 20. Koivikon rakennussuunnitelmien mukainen pohjapiirros

Taulukoissa olevien aukkojen leveydet ja korkeudet on annettu modulimittoina [dm]. Ikkunat ja ovet tilattiin Tiivituote Oy:ltä. Aukkorakenteiden lämpöhäviöiden laskemisessa käytettiin valmistajan antamia U-arvoja, jotka olivat ikkunoille 0,8 W/(m²K), oville UO1 1,0 W/(m²K) ja UO2 0,83 W/(m²K).

TAULUKKO 8. Kohteen ikkunoiden mittatiedot

Ikkunan ilmansuunta	Ikkunan leveys [dm]	Ikkunan korkeus [dm]	Piiri [m]	Σ Piiri [m]	Pinta-ala [m²]	Σ Pinta- ala [m²]
Pohjoinen	5	14	3,8	7,6	0,7	1,4
	5	14	3,8		0,7	
Itä	12	14	5,2	18,4	1,68	7,2
	24	16	8		3,84	
	12	14	5,2		1,68	
Etelä	5	14	3,8	5,6	0,7	0,9
	5	4	1,8		0,2	
Länsi	12	12	4,8	16	1,44	5,28
	18	12	6		2,16	
	12	14	5,2		1,68	
Σikkuna				47,6		14,78

TAULUKKO 9. Kohteen ovien mittatiedot

Ovet	Oven leveys [dm]	Oven korkeus [dm]	Oven piiri [m]	Oven pinta-ala [m ²]
UO1	10	22	6,4	2,2
UO1	12	22	6,8	2,64
UO1	10	22	6,4	2,2
UO2	10	22	6,4	2,2
Σ _{ovi}			26	9,24

Koivikon ikkunoiden lämpöhäviöt olivat seuraavat:

$$14,78 \text{ m}^2 \times 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 11,82 \text{ (W/K)}$$

Koivikon ovien lämpöhäviöt olivat seuraavat:

$$7,04 \text{ m}^2 \times 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) + 2,2 \text{ m}^2 \times 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 13,27 \text{ (W/K)}.$$

Rakennusvaipan lämpöhäviö

Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöissä huomioitiin rakennusmääräyskokoelman D5:n mukaiset kylmäsillat. Kohteen liittymien kylmäsilloista aiheutuvat viivamaiset lisäkonduktanssit laskettiin numeerisesti. Tällöin voitiin käyttää liittymien lämpöhäviöiden laskennassa suunniteltujen rakenteiden tarkkoja lisäkonduktanssin arvoja. Rakennusosien liittymistä aiheutuneet lämpöhäviöt laskettiin kertomalla liittymän pituus sen lisäkonduktanssin arvolla, jolloin saatiin lämpöhäviön yksiköksi W/K (taulukko 10).

TAULUKKO 10. Kohteen liittymien viivamaiset lisäkonduktanssit ja lämpöhäviöt

VIIVAMAINEN LISÄKONDUKTANSSI				
Rakennusosa	Lisäkonduktanssi [W/mK]	Liittymän pituus [m]	Lämpöhäviö [W/K]	Suhteessa vaipan lämpöhäviöön [%]
Ikkunat ja ovet	0,032	73,6	2,36	3,36
Ulkoseinä	0,037	10,4	0,38	0,54
Alapohja	0,042	45,12	1,90	2,70
Yläpohja	0,050	45,12	2,26	3,21
Σlämpöhäviö			6,89	9,82

Rakennusvaipan rakennusosien pinta-alojen laskennassa käytetyt mitat määritettiin talon sisämittojen mukaan. Kohteen sisätilan korkeus oli 2,6 m, leveys 8,13 m ja pituus 14,43 m. Rakennusosien pinta-aloja laskettaessa vähennettiin seinärakenteista aukkojen pinta-alat. Kun kaikkien rakennusosien pinta-alat oli laskettu, kerrottiin rakennusosat niiden U-arvoilla, jolloin saatiin kunkin rakennusosan lämpöhäviö muodossa W/K (taulukko 11).

TAULUKKO 11. Kohteen johtumislämpöhäviöt

RAKENNUSVAIPAN LÄMPÖHÄVIÖT			
Rakennusosa	Yhteensä [m ²]	U-arvo W/(m ² K)	Lämpöhäviö (W/K)
Ikkunat	14,8	0,8	11,82
Ulko-ovi UO1	11,4	1	11,44
Ulko-ovi UO2	2,2	0,8	1,83
Ulkoseinä	88,9	0,153	13,60
Alapohja	117,3	0,133	15,60
Yläpohja	117,3	0,076	8,92
Lisäkonduktanssit			6,89
Σvaippa			70,10

Rakennusosista aiheutuva johtumislämpöhäviöiden summa oli 63,21 W/K ja liittymien kylmäsilloista aiheutuva johtumislämpöhäviö oli 6,89 W/K. Näin saatiin rakennusvaipan kokonaislämpöhäviöksi 70,10 W/K.

6.2 Lisäkonduktanssien vertaaminen ohjearvoihin

Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D5 määrittelee rakennusosien liittymille omat lisäkonduktanssin ohjearvot. Tavallisesti etenkin pientalojen lämpöhäviöitä tarkastellessa käytetään kyseisiä ohjearvoja. Tämän työn yhtenä tarkoituksena oli verrata kohteen toteutuneita lisäkonduktanssin arvoja ohjearvoihin.

Opinnäytetyön mallikohde oli rakenteiltaan hyvin tavanomainen pientalo, jonka rakenteiden suunnittelussa keskityttiin kustannustehokkaaseen ja vaivattomaan toteutukseen. Vaikka kohteen suunnittelussa ei kiinnitetty erityistä huomioitu energiatehokkuuteen, saavutettiin tarkalla laskennalla parempia tuloksia ohjear-

voihin nähden. Poikkeavin viivamaisen lisäkonduktanssin arvo saatiin alapohjan liittymässä. Kyseisen liittymän vertailuarvo on 0,1 W/(mK), kun numeerisella laskennalla saatiin 0,042 W/(mK). Tällöin laskennallinen arvo oli 58 % vertailuarvoa pienempi. Tämän laskelman perusteella voitiin todeta, että Koivikon alapohjaliittymän kylmäsillan muodostuminen oli hyvin huomioitu rakenteessa.

Lähimpänä ohjearvoa edusti yläpohjan lisäkonduktanssi täsmälleen yhtä suurella arvolla ohjearvon kanssa. Muissa liittymissä laskennalliset arvot olivat ohjearvoja pienempiä: ulkoseinä 8,5 %, ikkuna- ja oviliitos 20 %. Lisäkonduktanssien tarkemmat vertailut on esitetty taulukossa 12.

TAULUKKO 12. Viivamaisten lisäkonduktanssien vertaaminen ohjearvoihin

VIIVAMAISTEN LISÄKONDUKTANSSIEN VERTAILU			
Rakennusosa	Lisäkonduktanssi (RakMk D5) W/mK	Lisäkonduktanssi (Koivikko) W/mK	Ohjearvoa parempi tulos [%]
Alapohja	0,1	0,042	58
Ulkoseinä	0,04	0,0366	8,5
Yläpohja	0,05	0,05	0
Aukkoliitokset	0,04	0,032	20

Vertailuarvoja käyttämällä kohteen kylmäsilloista olisi aiheutunut 10,13 W/K lämpöhäviö. Kun lukuarvoa verrataan numeerisesti laskettuun arvoon 6,89 W/K, saadaan tarkkoja laskennallisia arvoja käyttämällä noin 32 % parempi tulos kylmäsillojen osuudesta. Pientalossa sillä saavutetaan vain noin neljä prosenttiyksikköä parempi tulos rakennuksen kokonaisjohtumislämpöhäviöön nähden.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön ideana oli perehtyä rakennuksen liittymien kylmäsiltoihin ja niiden viivamaisten lisäkonduktanssien laskemiseen. Tarkoituksena oli selvittää 1,5-kerroksisen omakotitalon avulla, kuinka merkittävistä lämpöhäviöistä on kyse pienrakentamisessa. Kyseisestä omakotitalosta laskettuja viivamaisen lisäkonduktanssin arvoja verrattiin myös Suomen rakennusmääräyskokoelman ohjearvoihin.

Työssä selvitettiin rakennusosissa käytetyt materiaalit ja niiden lämmönjohtavuudet sekä laskettiin rakenteiden U-arvot. Seuraavaksi luotiin simuloitavasta liittymästä kaksiulotteinen detalji, josta ratkaistiin simulointiohjelmalla koko rakenteen lämpötekniinen kytkentäkerroin L_{2D} . Liittymien viivamaiset lisäkonduktanssit ratkaistiin käsin sijoittamalla L_{2D} -arvo viivamaisen lisäkonduktanssin kaavaan.

Tutkimustuloksissa oli mielenkiintoista huomata, kuinka numeerisella laskennalla saavutetaan huomattavia eroja Rakennusmääräyskokoelman ohjearvoihin verrattuna. Alapohjaliittymän numeerisesti ratkaistu arvo oli 58 % pienempi ohjearvoon nähden. Tämän pohjalta voidaan todeta, että varsinkin suurissa rakennuskohteissa alapohja liittymien lämpöhäviöiden laskennalla voidaan saavuttaa merkittävä hyöty esimerkiksi energialuvun (E-luku) laskennassa.

Viivamaisten lisäkonduktanssien yksityiskohtaisella laskennalla voidaan vaikuttaa esimerkiksi kiinteistön energialuokkaan. Samalla täytyy kuitenkin muistaa, että mallikohteen muiden etenkin seinä- ja yläpohjaliittymän arvot poikkesivat melko vähän, joten pientalon kokonaislämpöhäviötä laskiessa ei saavutettu tarkalla laskennalla kovin merkittävää etua. On huomattava myös, että kyseiset viivamaisten lisäkonduktanssin arvot ovat teoreettisia laskenta-arvoja, joten niitä ei voida käyttää suoraan rakennuksen vaaditun lämmitysenergian tarpeen määrittämiseen.

Simuloitavat mallit olivat yksinkertaistettuja, eikä niissä otettu huomioon rakennuskohteen ilmastoa ja lämpöolosuhteita. Lisäksi mallinnukset tehtiin ajasta riip-

pumattomassa tilassa. Lisäkonduktanssit ratkaistiin Ympäristöministeriön julkaiseman Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaisesti, jolloin tulokset olivat kuitenkin hyvin vertailukelpoisia ohjearvojen kanssa.

Opinnäytetyötä tehdessä tietämykseni lämmön siirtymisestä kasvoi huomattavasti. Erityisesti ymmärrys viivamaisista kylmäsilloista vahvistui ja lisäkonduktanssien laskeminen selkiintyi. Samalla tutuksi tulivat rakennusmääräyskokoelman eri osat ja Comsolin käyttäminen, vaikka itselle vieraan simulointiohjelman opetteleminen oli haastavaa. Monimutkaisinta oli laskea alapohjaliittymän lämmönläpäisykerroin tarkalla menetelmällä.

Tässä insinööriyössä ei kiinnitetty kosteusteknisiin seikkoihin lainkaan huomiota. Lämmön siirtymisen ohella olisi tärkeää selvittää liittymistä aiheutuvat kosteuden siirtyminen rakenteen toimivuuden kannalta. Tästä aiheesta olisikin hyvä jatkaa ja selvittää esimerkiksi mihin kohtaan rakennetta kastepiste muodostuu eri rakenteiden liittymissä. Liittymärakenteille voisi samalla tehdä dynaaminen simulointi, joka ottaisi huomioon rakennuskohteen erityispiirteet mukaan lukien ilmaolosuhteet ja simulointiaika. Näin saataisiin määritettyä rakenteen todellisuutta vastaava rakennusfysikaalinen käyttäytyminen.

LÄHTEET

Björkholtz, Dick 1987. Lämpö ja kosteus. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy.

Comsol Multiphysics. 2015. Saatavissa <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>. Hakupäivä 4.3.2015.

Energiatodistusopas. 2013. Rakennuksen energiatodistus ja kokonaisenergiankulutus. Ohjeet. Helsingin. Ympäristöministeriö. Saatavissa: http://energiatodistus.motiva.fi/midcom-serveattachmentguid-1e2ca07f997c7e6ca0711e2b74d41d877a892269226/uudispientalon_energiatodistus_2013.pdf. Hakupäivä 27.2.2015.

Illikainen, Kimmo 2015. T523206 Rakennusfysiikan sovellukset, 6 op. Opintojakson oppimateriaali kevät 2015. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

Lämmöneristys. 2003. Ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Saatavissa <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. Hakupäivä 17.2.2015.

Lämmöneristys. 2012. Ohjeet. Luonnos 16.3.2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Saatavissa <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. Hakupäivä 17.2.2015.

Rakennusten energiatehokkuus. 2012. Ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. Saatavissa http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf. Hakupäivä 5.3.2015.

Rakennusten lämmöneristys. 2008. Ohjeet. Suomen rakentamismääräyskokoelma C3. Saatavissa:
http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ym.fi%2Fdownload%2Fno-name%2F%257B7BF051A7-6436-4724-A1FD-7688A56FB09B%257D%2F102966&ei=pD0EVZCaBqnXyQPtvI-DADw&usq=AFQjCNGanDB2C5PdIwvKnJkd_a9ZRIWQCg&sig2=COvHdqZLije2Uef0FI0QAQ&bvm=bv.88198703,d.bGQ&cad=rja. Hakupäivä 2.3.2015.

RIL 155-1984. 1984. Lämmön- ja kosteudeneristys. Suunnitteluohjeet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Siikanen, Unto 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Tampere: Rakennustieto Oy.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2015. Ympäristöministeriö. Saatavissa: http://www.ymp.fi/rakentamismaaraykset_6.2.2015. Hakupäivä 18.2.2015.

