

Teuvo Juuma

PIENTALON ENERGIA- JA KOSTEUSTARKASTELU

PIENTALON ENERGIA- JA KOSTEUSTARKASTELU

Teuvo Juuma
Opinnäytetyö
Syksy 2021
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, Talonrakennustekniikan suuntautumisvaihto

Tekijä: Teuvo Juuma
Opinnäytetyön nimi: Pientalon energia- ja kosteustarkastelu
Työn ohjaaja: Pekka Harju
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syyskuu 2021 Sivumäärä: 98 + 3 liitettä

Opinnäytetyössä tarkasteltiin vuonna 1982 rakennetun pientalon energiankulutusta ja kosteusteknistä toimivuutta. Pientalo on rakennettu 1980-luvun määräysten mukaisesti, joten rakenteissa on riskirakenteita. Alapohjan kosteustekninen toimivuus on kyseenalainen sekä yläpohjaan on laitettu eristeeksi sahanpurua. Tavoitteena on suunnitella korjaustoimenpiteet rakenteille.

Energia- ja kosteustarkastelut tehtiin Laskentapalvelu-ohjelman avulla ja mallintamalla rakenteet Comsol Multiphysics 5.5 ja 5.6 -ohjelmalla. Laskentapalvelu-ohjelman tuloksena saatiin eri rakenteiden vaikutus energiakulutukseen, rakenteiden U-arvot ja kosteustekninen toiminta. Ohjelmalla simuloitiin eri energiavaihtoehtojen vaikutusta. Comsol-ohjelmalla mallinnettiin rakenteiden lämpötila- ja lämpövirtajakautumia. Lämmönsiirtymisen laskenta perustui standardiin SFS-EN ISO 6946.

Lisäksi määritettiin viivamaiset lisäkonduktanssit rakenteille käyttäen Comsol-ohjelmaa ja Ympäristöministeriön ohjeen mukaisesti. Konduktanssiarvoja verrattiin Suomen rakentamismääräyskoelman ohjearvoihin (Ympäristöministeriö 2018, 18). Mallinnoista voitiin päätellä kosteuden kertymistä rakenteisiin. Mallinnukset tehtiin vertailun vuoksi vanhoihin ja uusiin rakenteisiin. Laskentapalvelut- ja Comsol-ohjelmien antamat tulokset olivat yhteneväisiä. Comsol-ohjelma on käyttökelpoinen tutkimuksessa, mutta sen käyttäminen vaatii ohjelmaan perehtymistä. Laskentapalvelut-ohjelma on myös käyttökelpoinen tutkittaessa eri energiaratkaisuja.

Piirustusten perusteella opinnäytetyön kohteena olevan rakennuksen alapohjassa on riskirakenne, joka tuli esille myös Laskentapalvelut- ja Comsol-laskennassa. Yläpohjan eristyksenä on sahanpurua, joka tulisi vaihtaa mineraalivillaan eristyksen parantamiseksi. Alapohja on syytä tarkistaa avaamalla sitä, jotta eristeiden kunto saadaan selville. Tulosten perusteella päätetään alapohjan jatko-toimista. Ainakin yläpohjan sahanpuru vaihdetaan mineraalivillaan. Ikkunat todettiin mallinnusten mukaan vielä toimiviksi.

Talossa on sähkökattila, joka lämmittää vesikiertoisia lämmityspattereita ja käyttövettä. Lisäksi taloa lämmitetään leivinuunilla. Sähkökulutuksen alentamiseksi haettiin keinoja Laskentapalvelut-ohjelmalla. Päädyttiin vesi-ilmalämpöpumpun asentamiseen käyttöveden lämmittämiseksi ja entinen sähkökattila hoitaa muun lämmityksen. Työn laajuuden vuoksi märkätilojen kosteustarkastelut jätettiin opinnäytetyön ulkopuolelle, mutta märkätilojen saneeraus on tehtävä kuitenkin.

Asiasanat: korjausrakentaminen, energiansäästö, lämmöneristys, kosteudenhallinta, lämpötilaja-kauma, lämpövirta, lisäkonduktanssi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering, Option of House Building Engineering

Author: Teuvo Juuma
Title of thesis: Energy review and humidity analysis of a detached house
Supervisor: Pekka Harju
Term and year when the thesis was submitted: September 2021
Number of pages: 98 + 3 appendices

The thesis examined the energy consumption and moisture-technical functionality of a detached house built in 1982. The detached house was built in accordance with the Finnish regulations of the 1980s, so the aim is to draw up repair measures for the structures.

Energy and humidity analyses were performed using the Calculation Service program and modeling the structures with Comsol Multiphysics 5.5 and 5.6 -software. The calculation service program resulted in the effect of different structures on energy consumption, the heat transfer coefficient of the structures and the moisture engineering performance. The program simulated the effect of different energy options. The Comsol-program was used to model the temperature and heat flux distributions of the structures. In addition, additional linear conductances were determined for the structures using the Comsol-program. Moisture accumulation in the structures could be deduced from the modeling. The Comsol-program is useful in research, but its use requires familiarity with the program. The Computing Services program is also useful for researching different energy solutions.

Based on the drawings, the sub-base has a risk structure that emerged in the Accounting Services- and Comsol-calculations. The insulation of the upper sole is sawdust, which should be replaced with mineral wool to improve the insulation. The lower base should be checked by opening it to find out the condition of the insulation. Based on the results, it will be decided on the next steps of the sub-base. According to the modeling, the windows were still found to be functional.

The house has an electric boiler that heats water circulating radiators and hot water. In addition, the house is heated by a baking oven. In order to reduce electricity consumption, means were sought through the Calculation Services-program. It was decided to install a water-to-air heat pump to heat the hot water and the former electric boiler will take care of the rest of the heating. Due to the scope of the work, the humidity examinations of the wet rooms were excluded from the thesis, but the renovation of the wet rooms must be done.

Keywords: renovation, energy saving, thermal insulation, moisture management, temperature distribution, heat flow, additional conductance

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISIÄ PERUSKÄSITTEITÄ.....	10
3	LÄMPÖ JA KOSTEUS.....	19
3.1	Lämmön siirtyminen	19
3.1.1	Johtuminen	19
3.1.2	Säteily	20
3.1.3	Konvektio	20
3.2	Kosteuden siirtyminen	21
3.2.1	Veden kapillaarinen siirtyminen	21
3.2.2	Veden painovoimainen siirtyminen	21
3.2.3	Tuulenpaineen aiheuttama veden siirtyminen.....	22
3.2.4	Vesihöyryn diffuusio.....	22
3.2.5	Vesihöyryn konvektio	22
3.3	Materiaalien kosteuskäyttäytyminen.....	23
4	U-ARVON MÄÄRITYS.....	24
5	VIIVAMAISTEN LISÄKONDUKTANSSIEN MÄÄRITTÄMINEN	26
6	PIENTALON RAKENTEET	27
6.1	Rakentamisen ohjeita ja määräyksiä.....	27
6.2	Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos.....	27
6.2.1	Alapohja.....	29
6.2.2	Sokkeli	30
6.2.3	Ulkoseinä	30
6.3	Yläpohjan ja ulkoseinän liitos	31
6.4	Ikkunan ja ulkoseinän liitos.....	33
6.5	Ulkoseinien välisen nurkan liitos.....	34
7	PIENTALON KORJAUSVAIHTOEHDOT	35
7.1	Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos.....	35
7.1.1	Routasuojaus	37
7.1.2	Alapohja.....	39
7.1.3	Sokkeli	40
7.2	Valesokkelin korjaus.....	41
7.2.1	Kevytsoraharkko	41

7.2.2	Termokenkä ja -palkki.....	42
7.3	Yläpohjan ja ulkoseinän liitos	44
8	PIENTALON RAKENTEIDEN MALLINNUS.....	45
8.1	Comsol Multiphysics -ohjelma	45
8.2	Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos	45
8.2.1	Rakennuksen karakteristinen leveys.....	47
8.2.2	Lämpötilajakauma	48
8.2.3	Lämpövirtajakauma.....	51
8.2.4	Lämpövirtakäyrä	52
8.2.5	Viivamainen lisäkonduktanssi	52
8.3	Yläpohjan ja ulkoseinän liitos	55
8.3.1	Lämpötilajakauma	57
8.3.2	Lämpövirtajakauma.....	58
8.3.3	Lämpövirtakäyrä	59
8.3.4	Viivamainen lisäkonduktanssi	60
8.4	Ikkunan ja ulkoseinän liitos.....	61
8.4.1	Lämpötilajakauma	63
8.4.2	Lämpövirtajakauma.....	64
8.4.3	Lämpövirtakäyrä	65
8.4.4	Viivamainen lisäkonduktanssi	66
8.5	Ulkoseinien välinen liitos	67
8.5.1	Lämpötilajakauma	68
8.5.2	Lämpövirtajakauma.....	69
8.5.3	Lämpövirtakäyrä	70
8.5.4	Viivamainen lisäkonduktanssi	71
9	PIENTALON KORJAUSVAIHTOEHTOJEN TARKASTELU	73
9.1	Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos	73
9.1.1	Lämpötilajakauma	73
9.1.2	Lämpövirtajakauma.....	73
9.1.3	Lämpövirtakäyrä	74
9.1.4	Viivamainen lisäkonduktanssi	75
9.2	Valesokkelirakenteen korjaus.....	76
9.2.1	Lämpötilajakauma	76
9.2.2	Lämpövirtajakauma.....	77

9.2.3	Lämpövirtakäyrä	79
9.2.4	Viivamainen lisäkonduktanssi	81
10	PIENTALON KOSTEUSTARKASTELUT	83
10.1	Alapohja	83
10.2	Ulkoseinä.....	84
10.3	Yläpohja	85
11	PIENTALON ENERGIATARKASTELU	87
11.1	Alkuperäinen rakennus ja lämmitys	87
11.2	Yläpohjan korjaus.....	89
11.3	Ilma-vesilämpöpumppu	90
11.4	Maalämpöpumppu.....	91
12	OPINNÄYTETYÖN TULOKSET	92
13	POHDINTA	94
	LÄHTEET	95
	Liite 1 Rakennuksen pohjapiirustus	
	Liite 2 Seinä- ja alapohjarakenteet	
	Liite 3 Katto- ja yläpohjarakenteet	

1 JOHDANTO

Rakennusratkaisut 1980-luvulla olivat erilaisia tähän päivään verrattuna. Opinnäytetyössä tarkastelun kohteena oleva talo on rakennettu 1982, joten odotettavissa oli rakenteissa riskirakenteita. Tuohon aikaan pientalojen vauriokohteet löytyvät alapohjista, kattorakenteista ja märkätiloista. Tuolloin rakennustavat, ohjeet ja käytänteet muuttuivat tiuhaan, jolloin rakenneratkaisuja ja materiaaleja ei testattu (Laurinen 2011, 11).

1980-luvulla käytettiin veden- ja kosteudeneristyksen tekemisessä ohjeita, jotka ovat epämääräisiä ja virheellisiä alapohjarakenteen osalta (Sisäasiainministeriö 1976, 3). Kosteuden ja vedeneristyksen uudet määräykset ja ohjeet vuodelta 2018 antavat selkeämpiä ohjeita, jotka ovat nykyisin käytössä (Outinen 2018, 11).

Tutkittavassa talossa on laitettu höyrynsulkumuovit seiniin ja yläpohjaan. 1980-luvun taloissa riskirakenteet esiintyvät alapohjassa ja märkätiloissa. Höyrynsulkumuovit otettiin käyttöön 1970-luvulla estämään rakennuksen sisäilman kosteuden tunkeutumista rakenteisiin (Häkkinen 2013, 11). 1980-luvulla ei märkätilojen lattiaa ja seiniä vesieristetty, eikä sitä ole tehty tässäkään talossa.

Alapohjan betonilaatan eristäminen alapuolelta tuli käyttöön 1970-luvulla (Häkkinen 2013, 11), mutta tämän talon betonilaatta on eristetty enemmän yläpuolelta ja alapuolelle on laitettu kosteuseristys. Rakenne on selvä riskirakenne. Yläpohjan eristeenä oleva sahanpuru tulisi korvata eristevillalla.

Opinnäytetyössä tutkitaan edellä mainitut riskirakenteet ja suunnitellaan korjaustoimenpiteet. Korjaustoimenpiteitä ei tehdä, vaan esitetään korjausvaihtoehtoja tarvittaviin rakenteisiin. Alapohjan korjaaminen vaatisi betonin purkamista, joten ratkaisuksi etsitään myös kevyempi vaihtoehto. Lämmitys tapahtuu sähkökattilalla, joka lämmittää lämmityspattereissa kiertävää vettä ja käyttövettä. Sähkön kulutuksen vähentämiseksi taloa lämmitetään myös leivinuunilla polttamalla puuta. Opinnäytetyössä etsitään keinoja energiakulutuksen alentamiseksi. Energian vuotokohtien etsimiseen käytetään Laskentapalvelut- ja Comsol-ohjelmia. Tutkitaan myös kosteuden kannalta riskirakenteet käyttäen hyväksi samoja ohjelmia sekä viranomaisten ja ammattilaisten ohjeita. Märkätilojen sa-

neeraus jätetään myöhemmin tehtäväksi, koska opinnäytetyön laajuus kasvaa suureksi. Energia-
tehokkuutta parantavat toimenpiteet kannattaa tehdä muiden korjaustoimenpiteiden yhteydessä,
koska toimivaa ja ehjää rakennetta ei ole kustannustehokasta korjata.

2 LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISIÄ PERUSKÄSITTEITÄ

Höyrynsulku

Höyrynsulku on rakennuksen ainekerros, joka estää haittaa aiheuttavan vesihöyryn diffuusion rakenteeseen tai rakenteessa (Ympäristöministeriö 2017, 1).

Ilmansulku

Ilmansululla tarkoitetaan rakennusosan ainekerrosta, joka estää ilmavirtauksen rakennusosan läpi puolelta toiselle (Ylihärsilä 2004a, 8.)

Kylmäsilta

Kylmäsilaksi kutsutaan rakennusosassa olevaa, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehtyä rakenneosaa, jonka kohdalla lämpötilaeron vallitessa rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi (Ylihärsilä 2004a, 8).

Kylmäsilan kohdalla sisäpuolinen pintalämpötila on alempi kuin pintalämpötilat muualla rakenteessa. Seurauksena voi olla vesihöyryn tiivistyminen pintaan sekä sisäpinta tummuu ja likaantuu nopeammin. (Björkholtz 1997, 20.)

Viivamainen kylmäsilta

Kylmäsiltaa, jonka poikkileikkaus on rakenteen pinnan suuntaan jatkuvana samanlainen, kutsutaan viivamaiseksi kylmäsilaksi (Ympäristöministeriö 2012, 6).

Jatkuvuustila

Jatkuvuustilassa olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Jatkuvuustilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa. (Ylihärsilä 2004a, 8.)

Adiabaattireunaehto

Adiabaattireunaehto tarkoittaa rajapinnan ulkopuolella olevaa täydellistä lämmöneristystä. Rajapinnassa ei tapahdu energian siirtymistä.

Lämmönsiirtyminen

Lämmönsiirtyminen tarkoittaa energian siirtymistä lämmönjohtumisen, -konvektion, -säteilyn tai näiden yhdistelmien muodossa (Ylihärsilä 2004a, 8).

Lämpövirta, Φ [W]

Rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta Φ on lämpömäärä (Q) jaettuna ajalla (t), joka esitetään kaavalla 1 (Ylihärsilä 2004a, 9).

KAAVA 1. Lämpövirran laskentakaava

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

$$\Phi = q \cdot A \quad \text{lämpövirta [W]}$$

$$q = \frac{d\Phi}{dA} \quad \text{lämpövirran tiheys [W/m}^2\text{]}$$

$$A = \text{pinta-ala [m}^2\text{]}$$

$$t = \text{aika [s]}$$

$$dQ = \text{lämpömäärän differentiaali}$$

$$dt = \text{ajan differentiaali}$$

$$d\Phi = \text{lämpövirran differentiaali}$$

dA = pinta-alan differentiaali

d = derivoinnin symboli

Viivamainen lämpövirta, q_l [W/m]

Viivamainen lämpövirta (q_l) on lämpövirta (Φ) jaettuna pituudella (l), joka esitetään kaavalla 2 (Ylihärtilä 2004a, 9).

KAAVA 2. Viivamaisen lämpövirran laskentakaava

$$q_l = \frac{d\Phi}{dl}$$

l = pituus [m]

dl =pituuden differentiaali

Lämmönjohtavuus, λ [W/(mK)]

Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa lämpötilan alenemissuuntaan aineen kohdassa, jossa lämpötilan muutos on pituusyksikköä kohti yksikön suuruinen. (Ylihärtilä 2004a, 9).

Määritelmä perustuu lämmönjohtumisen yleiseen lausekkeeseen (Fourier'n lämmönjohtumislaki). Johtumalla siirtyvä lämpövirran tiheys homogeenisessa ja isotrooppisessa ainekerroksessa esitetään kaavalla 3 (Vinha 2010, 2).

KAAVA 3. Lämmönjohtumisen laskentakaava

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } T = -\lambda \cdot \nabla T$$

\vec{q} on lämpövirran tiheys vektorisuureena

$\text{grad } T$ on 3-dimensioinen lämpötilagradientti:

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

T = lämpötila [K]

x, y, z ovat lämpövirran suuntakoordinaatit

∂ = osittaisderivoinnin symboli

Lämpövirran tiheys yksidimensioisessa tapauksessa esitetään kaavalla 4 (Ylihärtilä 2004a, 9).

KAAVA 4. Lämpövirran tiheyden laskentakaava

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

x = pituus [m]

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, λ_u [W/(mK)]

SFS-standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan määritelty lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, SFS-EN-standardissa esitetty taulukoitu lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo tai muulla tavalla määritelty rakennusosalle soveltuva lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, jota käytetään rakenteiden lämpötekisissä laskelmissa. (Siikanen 2014, 41.)

Lämmönvastus, R [(m²K)/W]

Termisessä jatkuvuustilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastus ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen (Ympäristöministeriö 2012, 5).

Lämmönvastus esitetään kaavalla 5 (Ylihärtilä 2004a, 9).

KAAVA 5. Lämmönvastuksen laskentakaava

$$R = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q}$$

q = lämpövirran tiheys [W/m²]

T_{s1} ja T_{s2} = tasomaisen ja tasapaksun ainekerroksen isothermisten pintojen 1 ja 2 lämpötilat ($T_{s1} > T_{s2}$) [K]

Kun rakennusosan ainekerros on tasapaksu ja tasa-aineinen sekä lämpö siirtyy ainekerrokseen nähden kohtisuoraan, esitetään ainekerroksen lämmönvastus kaavalla 6 (Ylihärtilä 2004a, 10).

KAAVA 6. Tasapaksun ja tasa-aineisen lämmönvastuksen laskentakaava

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

d = ainekerroksen paksuus [m]

Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus, R_{si} ja R_{se} [(m²K)/W]

Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus ilmoittaa rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen (Ylihärtilä 2004, 10).

Rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastus esitetään kaavoilla 7 ja 8 (Ylihärtilä 2004, 10).

KAAVA 7. Rakennusosan pinnan ja sisäpuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen laskentakaava

$$R_{si} = \frac{T_i - T_{si}}{q}$$

KAAVA 8. Rakennusosan pinnan ja ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen laskentakaava

$$R_{se} = \frac{T_{se} - T_e}{q}$$

T_i ja T_e = pinnan lämpimällä ja kylmällä puolella olevan ympäristön lämpötilat, joissa on otettu huomioon sekä konvektio- että säteilyreunaehdot [K].

T_{si} ja T_{se} = lämpimällä ja kylmällä puolella olevan pinnan lämpötilat [K]

q = pinnan läpi kulkevan lämpövirran tiheys [W/m²]

Lämmönläpäisykerroin, U [W/(m²K)]

Lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen (Ylihärsilä 2004a, 10).

Lämmönläpäisykerroin esitetään kaavalla 9 (Ylihärsilä 2004a, 10).

KAAVA 9. Lämmönläpäisykerroimen laskentakaava

$$U = \frac{\phi}{(T_i - T_e) \cdot A}$$

ϕ = lämpövirta jatkuvuustilassa rakennusosan läpi [W]

A = rakennusosan pinta-ala [m²]

T_i ja T_e = pinnan lämpimällä ja kylmällä puolella olevan ympäristön lämpötilat [K]

Määritelmä pätee vain, jos rakennusosan pinnat lämpimällä ja kylmällä puolella ovat kohdakkain sekä yhtä suuret ja että sama lämpövirta kulkee kummankin pinnan läpi eikä lämpöä siirry sivusuunnassa rakennusosasta toiseen (adiabaattinen reunaehto) (Ylihärsilä 2004a, 10).

Viivamainen lisäkonduktanssi, Ψ [W/(mK)]

Viivamainen lisäkonduktanssi ilmoittaa rakennusosassa olevan, pituusyksikön mittaisen viivamaisen kylmäsilan (esim. palkki) aiheuttaman lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen (Ylihärsilä 2004a, 10).

Viivamainen lisäkonduktanssi esitetään kaavalla 10 (Ylihärsilä 2004a, 10).

KAAVA 10. Viivamaisen lisäkonduktansin laskentakaava

$$\Psi = \frac{\Delta\Phi}{l \cdot (T_e - T_i)}$$

$\Delta\Phi$ = rakennusosan läpi kulkeva lämpövirta [W]

l = jatkuvan kylmäsilan pituus [m]

T_i ja T_e = pinnan lämpimällä ja kylmällä puolella olevan ympäristön lämpötilat [K]

Lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} [W/(mK)]

Lämpötekkinen kytkentäkerroin on tarkasteltavan rakenteen läpäisevä lämpövirta, jonka aiheuttaa rakenteen eri puolilla vallitsevien olosuhteiden välinen lämpötilaero (Ympäristöministeriö 2012, 6).

Absoluuttinen kosteus [g/m³]

Absoluuttinen kosteus ilmoittaa vesihöyryn määrän grammoina ilmakeuutiometriä kohti. Ilman lämmetessä ilma voi sisältää enemmän vesihöyryä (Siikanen 2014, 68).

Suhteellinen kosteus, RH [%]

Suhteellinen kosteus on ilman sisältämä vesihöyrypitoisuuden v [g/m³] suhde kyllästymiskosteuteen v_k [g/m³].

Suhteellinen kosteus esitetään kaavalla 11 (Ylihärsila 2004b, 3).

KAAVA 11. Suhteellisen kosteuden laskentakaava

$$RH = \frac{v}{v_k} 100\%$$

v = vesihöyrypitoisuus [g/m³]

v_k = kyllästymiskosteus [g/m³]

Suhteellisen kosteuden saavuttaessa arvon 100 % alkaa kosteuden tiivistyminen. Kylmä ilma pysyy sitomaan vähemmän kosteutta kuin lämmin ilma eli kylmän ilman vesipitoisuus on pieni. (RIL 250-2011, 60.)

Tasapainokosteus [%]

Tasapainokosteus on aineen sitoma kosteusmäärä tietyssä ympäristön kosteusrasitusolosuhteissa ja lämpötilassa. Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa aineen kosteutta lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Esimerkiksi puu varastoi 23 painoprosenttia kosteutta 20°C lämpötilassa, kun suhteellinen kosteus on 90 %. (Siikanen 2014, 77.)

Kyllästymiskosteus [g/m³]

Kyllästymiskosteus on tila, jossa ilma sisältää enimmäismäärän vesihöyryä, jolloin suhteellinen kosteus on 100 %. Mitä lämpimämpää ilma on, sitä enemmän se voi sisältää kosteutta. (Siikanen 2014, 70.)

Rakennuskosteus [kg/m³]

Rakennuskosteus tarkoittaa rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusmateriaaleihin joutunutta rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka on poistuttava (Ympäristöministeriö 2017, 1).

Hygroskooppisuus

Hygroskooppisuus tarkoittaa materiaalin kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa kosteutta ilmaan (Ylihärsilä 2004, 23). Puuperäisten tuotteiden kyvyllä imeä ja luovuttaa kosteutta on suuri merkitys rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta. (Siikanen 2014, 79.)

Kondensoituminen

Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä vedeksi rakenteen pinnassa tai sen sisällä, kun ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Vesihöyry tiivistyy aina rakenteen ympäröivää ilmaa kylmemmälle ja kovalle pinnalle, jos vesihöyryn kyllästymiskosteus (kastepiste) ylittyy. (Siikanen 2014, 72.)

Vesihöyrynvastus [$\text{m}^2\text{sPa/kg}$]

Vesihöyrynvastus on aineen vesihöyryn virtausta kuvaava ominaisuus, joka on käänteinen suure vesihöyrynläpäisevyydelle (Siikanen 2014, 73).

3 LÄMPÖ JA KOSTEUS

3.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö siirtyy johtumalla, säteilemällä tai konvektiona. Opinnäytetyössä tarkasteltiin lämmön siirtymistä pääasiassa johtumalla. Aineen olomuodon muutoksissa siirtyy lämpöä lämpötilan pysyessä vakiona, jolloin käytetään hyväksi aineen sulamis- höyrystymislämpöä (latenttilämpö). (Ylihärsilä 2004a, 14.)

3.1.1 Johtuminen

Molekyyliliikkeen energiaa siirtyy värähtelemällä molekyylisestä toiseen, jolloin lämpö virtaa johtumalla. Virtaaminen tapahtuu lämpimästä kylmempään päin lämmön tasaantuessa väliaineessa, joka voi olla kiinteää tai nestettä. Lämpövirta eli tasoittumisnopeus lasketaan kaavoilla 12 ja 13. (Ylihärsilä 2004a, 12.)

Lämpövirran tiheys lasketaan kaavalla 12 yksidimensionaalisessa stationääritilassa, kun rakenne on yksikerrosrakenne (Ylihärsilä 2004a, 12).

KAAVA 12. Stationääritilaisen yksidimensionaalisen yksikerrosrakenteen lämpövirran tiheyden laskentakaava

$$q_{cd} = \lambda \cdot \frac{T_{s1} - T_{s2}}{d} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{R}$$

λ = lämmönjohtavuus [W/(mK)]

d = ainepaksuus [m]

T_{s1} ja T_{s2} = tasomaisen ja tasapaksun ainekerroksen isothermistien pintojen 1 ja 2 lämpötilat ($T_{s1} > T_{s2}$) [K tai °C].

$R = d / \lambda$ materiaalin lämmönvastus [(m²K)/W]

Lämpövirran tiheys lasketaan kaavalla 13 yksidimensionaalisessa stationääritilassa, kun rakenne on monikerrosrakenne (Ylihärsilä 2004a, 12).

KAAVA 13. Stationääritilaisen yksidimensionaalisen monikerrosrakenteen lämpövirran tiheyden laskentakaava

$$q_{cd} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{R_T}$$

R_T = kokonaislämmönvastus [(m²K)/W] (kaava 15)

Aineen lämmönjohtavuus eli aineen kyky johtaa lämpöä vaikuttaa lämpömäärän siirtymiseen joltumalla. Esimerkiksi lämmöneriste, puu, betoni ja teräs johtavat lämpöä suhteessa 1:4:60:1600 (RIL 250-2011, 73).

3.1.2 Säteily

Sähkömagneettinen aaltoliike siirtää energiaa valon nopeudella, jolloin lämpö siirtyy säteilemällä (emissio). Säteilystä lähettävät (emittio) kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Musta kappale emittoi eniten säteilyä. Rakennuksissa säteilylämpö tapahtuu lyhytaaltoisena auringonsäteilynä ja pitkäaaltoisena kappaleiden säteilylämpönä. Ikkunalasin lämmönläpäisy on riippuvainen säteilyn aallonpituudesta. Auringon lyhytaaltainen lämpösäteily läpäisee ikkunalasin hyvin, mutta pitkäaaltoinen sisältä ulos lähtevä säteily huonosti, jolloin kyseessä on ns. kasvihuoneilmiö. (Ylihärsilä 2004a, 13.)

Lämpö siirtyy sisällä säteilemällä, kuten lämmityslaitteiden pinnoista lähirakenteisiin ja väliseiniin. Pintojen lämpötilaero ja pintaominaisuudet vaikuttavat siirtävään energiamäärään. Tumma ja matta pinta vastaanottaa tehokkaammin lämpösäteilyä kuin vaalea ja kiiltävä. (RIL 250-2011, 73.)

3.1.3 Konvektio

Lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana konvektiossa (virtaus). Konvektio tapahtuu pakotettuna tai luonnollisena (paksussa eristetilassa). Ulkopuolinen voima saa aikaan kaasun tai nesteen pakotetussa konvektiossa, kuten ilmanvaihdossa ja tuulussa. Lämpötilaerojen aiheuttama

tiheysero väliaineessa aiheuttaa kaasun tai nesteen virtauksen luonnollisessa konvektiossa. (Ylihärsilä 2004a, 14.)

Ilmavirtaukset rakenteiden pinnoilla vaikuttavat pintojen lämpötilaan. Lämpötila ja lämpötilajakauma ovat riippuvaisia rakenteiden sisällä virtaavasta ilmavirtauksesta. (RIL 250-2011, 73.)

3.2 Kosteuden siirtyminen

Kosteus siirtyy kiinteänä lumena, nesteenä, vesihöyrynä tai samanaikaisesti vetenä ja vesihöyrynä. Lumena kosteus siirtyy ilmavirtausten mukana kaikissa suunnissa tai painovoimaisesti alaspäin. Nesteenä kosteus siirtyy tuulenpaineen vaikutuksessa kaikissa suunnissa, painovoiman vaikutuksesta alaspäin ja vetenä kapillaarisesti. Vesihöyrynä kosteus siirtyy konvektiovirtausten mukana tai diffuusion vaikutuksesta. (Ylihärsilä 2004a, 14.)

3.2.1 Veden kapillaarinen siirtyminen

Vesi imeytyy kapillaarisesti huokoiseen materiaaliin, jos se on kosketuksissa vapaaseen veteen tai materiaaliin, jonka huokosissa on vettä. Kapillaarinen siirtyminen johtuu kapillaaristen voimien aiheuttamasta huokosalipaineesta, jonka suuruus riippuu huokosen koosta siten, että mitä pienempi huokonen on, sitä suurempi on huokosalipaine. (Ylihärsilä 2004b, 14.)

Kapillaarisesti vesi siirtyy myös ylöspäin ja kosteusmäärä voi olla melkoinen. Maanvastaisessa rakenteessa kapillaarisen nousun katkaiseva kerros tehdään karkealla sepelillä ($d=6\text{...}32$ mm) korkeudeltaan 300 mm. Tiivis lämmöneristyskerros maavaraisen laatan alla parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa. (RIL 250-2011, 71.)

3.2.2 Veden painovoimainen siirtyminen

Vesi pyrkii alaspäin rakennuksen ja rakenteiden pystysuorilla ja kaltevilla pinnoilla sekä maan pinnalla rakennuksen ympärillä painovoiman vaikutuksesta. Vesi ei saa päästä tunkeutumaan haitallisesti rakenteisiin, joten valuva vesi on otettava huomioon rakenteiden suunnittelussa. Valuvat vesimäärät ovat sikäli suuria, että ne aiheuttavat vakavia kosteusvauriota rakenteisiin. Painovoiman

avulla tapahtuu veden hallittu poisjohtaminen rakenteiden pinnoilta ja viereltä. Salaojituksella voidaan kuivattaa rakenteita painovoiman avulla. (Ylihärsilä 2004b, 17.)

3.2.3 Tuulenpaineen aiheuttama veden siirtyminen

Vesi voi siirtyä vaipan pinnoilta rakojen kautta sisälle rakenteisiin vaakasuunnassa tai ylöspäin viistosateen tai tuulen paineen vaikutuksesta. Veden tunkeutumista rakenteisiin estetään suojaPELLITYKSILLÄ, RÄYSTÄILLÄ, TIIVIILLÄ SAUMOILLA, VERHOUKSILLA JA TUULETUSVÄLEILLÄ. Tuuletusväleistä vesi on johdettava pois. Pellitysten kiinnitykset tulee varmistaa, jottei tuuli pääse niitä nostamaan ja aiheuttamaan veden tunkeutumisen rakenteisiin. (Ylihärsilä 2004b, 17.)

3.2.4 Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio syntyy vesihöyrypitoisuuksien erosta rakenteen eri puolilla, jolloin vesihöyrypitoisuudet pyrkivät tasoittumaan rakenteen läpi. Virtauksen nopeus riippuu vesihöyrypitoisuuksien erosta ja rakenteen vesihöyryvastuksesta. Seurauksena on kosteusvaurio, jos rakenteen sisäpuolelta vesihöyryä diffusoituu enemmän rakenteisiin kuin rakenteesta poistuu ja ajan kuluessa rakenteen kosteuspitoisuus nousee. (RIL 250-2011, 72.)

3.2.5 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksen tai jonkun muun kaasuvirtauksen mukana. Jotta vesihöyryn konvektiota voitaisiin arvioida, on kyettävä arvioimaan ilmavirtauksien määrää ja siihen vaikuttavia tekijöitä. (Ylihärsilä 2004b, 20.)

Vesihöyryn konvektiovirtausriski muodostuu rakenteeseen, jos sisätilassa on ylipaine verrattuna ulkoilmaan, yläpohjaan tai ryömintätilaan. Rakenteiden epäjatkuvuuskohdat, kuten saumat, raot, reiät ja läpiviennit toimivat ilman virtausreitteinä. Rakenteiden ilmatiiveys varmistetaan ilmansululla, jos varsinainen rakenne ei ole riittävän ilmatiivis. Rakennuksen tyyppillisten painesuhteiden perusteella erityisesti yläpohjarakenteet voivat olla ylipaineisia esimerkiksi lämmityskaudella, ja siksi ne ovat alttiita kosteuskonvektiolle. Rakennuksen kuivatuksessa ja tuuletuksessa hyödynnetään vesihöyryn siirtymistä konvektion mukana. (Ylihärsilä 2004b, 20.)

Kylmänä vuodenaikana kosteaa sisäilmaa virtaa rakenteisiin ja ilman sisältämä kosteus tiivistyy rakenteisiin, jolloin kosteusvaurion riski on suurempi (RIL 250-2011, 70).

3.3 Materiaalien kosteuskäyttäytyminen

Kosteus vuorovaikuttaa lähes kaikkien materiaalien kanssa. Materiaaliin voi tulla muutoksia ja häiriöitä pelkästään ympäröivän ilman kosteuden vaihtelusta. Teräkset ja muut metallit ovat alttiita korroosiolle liiallisen kosteuden vuoksi. Kosteuden vaikutuksesta rakenteissa esiintyy mikrobien tuho vaikutuksia, josta tulee mätänemistä, hajua ja mekaanista heikentymistä. Kosteuden vuoksi materiaalien kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat, voi esiintyä lisäominaisuuksia tai hävitä alkuperäisiä ominaisuuksia. Kosteuden imeytyminen materiaaliin on riippuvainen materiaalista. Kosteuden imeytyminen ja poistuminen sekä imeytymis- ja poistumisnopeus vaihtelevat materiaalin mukaan. Jotta materiaali säilyttää ominaisuutensa, on tärkeää tuntea materiaalin kosteuskäyttäytyminen. (Ylihärsilä 2004b, 21.)

Rakennusaine, varastointi, kuljetukset ja rakenteen suojaus vaikuttavat rakenteessa valitsevaan vesimääräänsä ja sen vaihteluun rakentamisvaiheessa. Rakenteet tulee suunnitella kosteusteknisesti oikein, rakenteet ja rakennus tuuletettava ja kuivattava ennen rakennuksen käyttöönottoa kosteusvaurioiden välttämiseksi. Oikea varastointi, sateelta ja maan kosteudelta suojaaminen sekä oikea-aikainen tarvikkeiden toimittaminen rakennustyömaalle ovat keinoja, joilla rakentamisen aikaista rakennuskosteuden kertyminen vältetään. (Ylihärsilä 2004b, 27.)

4 U-ARVON MÄÄRITYS

Lämmönläpäisykerroin kuvaa rakenteen keskimääräistä kykyä vastustaa lämmön siirtymistä koko rakenteen käyttöajan, joten suure kuvaa pitkäaikaista toimintaa (Björkholtz 1987, 14). U-arvo määritetään laskennallisesti, jolloin käytetään rakennusaineiden lämmönjohtavuuksien suunnitteluarvoja λ_u (SFS-EN ISO 6946:2017, 16).

U-arvo [W/m²K] lasketaan kaavalla 14 (Ylihärsilä 2004a, 15).

KAAVA 14. U-arvon laskentakaava

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

R_T = kokonaislämmönvastus (sisältäen pintavastukset) [(m²K)/W] (kaava 15)

Lämmönläpäisykertoimeen tehdään tarvittaessa esim. kylmäsilloista johtuvat korjaukset. Jos kokonaiskorjaus on vähemmän kuin 3 % U:sta, korjauksia ei huomioida (SFS-EN ISO 6946:2017, 14). U-arvon lopputulos pyöristetään kahteen merkitsevään numeroon (Ylihärsilä 2004a, 15).

Lämpövirtaan nähden kohtisuoraan olevista tasapaksuista ainekerroksista ja lämpöteknisesti tasa-aineisista muodostuvan tasomaisen rakennusosan kokonaislämmönvastus lasketaan kaavalla 15 (Ylihärsilä 2004a, 15).

KAAVA 15. Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen laskentakaava

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{se}$$

R_{si} = sisäpuolinen pintavastus [(m²K)/W]

R_1, R_2, \dots = tasa-aineisen ainekerroksen 1, 2, ... lämmönvastus [(m²K)/W]

Tasa-aineisen ainekerroksen lämmönvastus lasketaan kaavalla 16 (SFS-EN ISO 6946:2017, 16).

KAAVA 16. Ainekerroksen lämmönvastuksen laskentakaava

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_{ui}}$$

d_1, d_2, \dots = ainekerroksen 1, 2, ... paksuus [m]

$\lambda_{u1}, \lambda_{u2}, \dots$ = ainekerroksen 1, 2, ... lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [(m²K)/W] (SFS-EN ISO 6946:2017, 16)

R_g = rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus [(m²K)/W]

R_b = maan lämmönvastus [(m²K)/W]

R_{q1}, R_{q2}, \dots = ohuen ainekerroksen 1, 2, ... lämmönvastus [(m²K)/W]

R_{se} = ulkopuolinen pintavastus [(m²K)/W]

5 VIIVAMAISTEN LISÄKONDUKTANSSIEN MÄÄRITTÄMINEN

Viivamainen lisäkonduktanssi ψ voidaan määrittää tarkkuudeltaan erilaisilla menetelmillä. Kylmäsil-
lan merkitys koko rakennuksen tai huonetilan johtumislämpöhäviöissä vaikuttaa valintaan. Kyl-
mäsilan ohjearvoja lisäkonduktanssille, joka ottaa huomioon rakennusosien välisten liitosten ja nii-
den epäsäännöllisten kylmäsiltojen aiheuttaman lisälämpöhäviön, on esitetty Suomen rakentamis-
määräyskokoelmassa (Ympäristöministeriö 2012, 11).

Kylmäsiltojen laskenta voidaan suorittaa erilaisilla ohjelmilla, ja vähimmäisvaatimuksena on kaksi-
ulotteisen lämpötilakentän laskenta jatkuvuustilassa. Eräät ohjelmat laskevat lineaarisen lisäkon-
duktanssin suoraan. Opinnäytetyössä käytettiin Comsol Multiphysics 5.5 -ohjelmaa kylmäsiltojen
laskentaan.

Kaksiulotteinen lisäkonduktanssi lasketaan kaavalla 17 [W/mK] (SFS-EN ISO 10211:2017, 34).

KAAVA 17. Kaksiulotteisen lisäkonduktanssin laskentakaava

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

L_{2D} = kaksiulotteisella (2D) laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekninen kytkentäkerroin tar-
kasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille [W/(mK)] (Ympäristöministeriö 2012, 16). Numee-
risesti määritetty lämpövirta koko rakenteelle, joka saatiin opinnäytetyössä Comsol-ohjelmalla.

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

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

Kaavan käyttöä on avattu enemmän luvussa 8.2.5, jossa laskettiin lisäkonduktanssi numeerisesti
Comsol-ohjelmalla.

6 PIENTALON RAKENTEET

6.1 Rakentamisen ohjeita ja määräyksiä

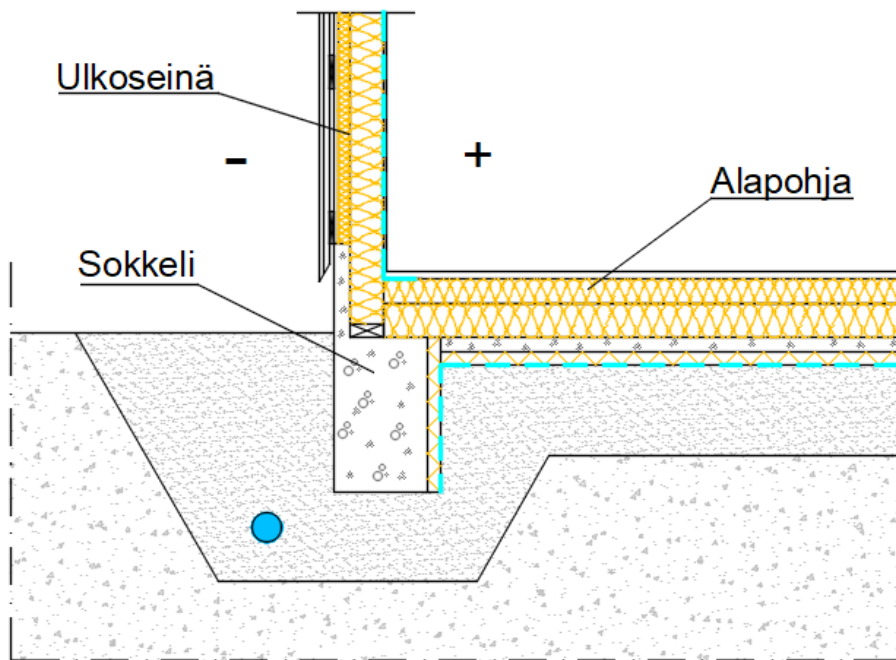
Perinteisesti rakentamismääräyskokoelman määräykset koskevat uusia rakennuksia. Korjaus- ja muutostöissä määräyksiä on sovellettu, mikäli korjaustoimenpide tai rakennuksen käyttötapa edellyttävät. Määräysten soveltamisessa on huomioitu joustavasti rakennuksen ominaisuudet ja erityispiirteet. Rakentamismääräyskokoelmaa uudistettaessa asetuksissa ilmoitetaan, onko kysymyksessä uudisrakennus vai korjaus- ja muutostyö. (Ympäristöministeriö 2017, 1.)

Opinnäytetyössä käytettiin uudistetun Suomen rakentamismääräyskokoelman ja SFS-standardin ohjeita ja määräyksiä koskien lähinnä energiatehokkuutta ja kosteudenhallintaa (Ympäristöministeriö 2018, SFS-EN ISO 6946:2017). Työssä viitattiin muutamiin kumottuihin asetuksiin, koska rakennus on tehty niiden mukaan aikanaan.

6.2 Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos

Rakennuksen alkuperäiset piirustukset esitetään liitteissä 1, 2 ja 3. Alapohjan lattiarakenne on toteutettu laudoituksella eikä muovimatolla, kuten vanhoissa piirustuksissa esitetään. Rakennus sijaitsee mäkirinteessä.

Kuvassa 1 on esitetty alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin rakenne sekä käytetyt materiaalit. Kuvan yhteydessä esitetään alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin materiaalit paksuustietoineen. Lisäksi materiaalitietoja on esitetty taulukoissa 1, 2, ja 3.



Ulkoseinä (materiaalit sisältäpäin lukien)

Sisäverhouslevy 12 mm
 Kosteussulku (ei materiaalitietoa)
 Mineraalivilla 125 mm, runko 50x125 k600
 Mineraalivilla 50 mm, koolaus 50x50 k600
 Tuulensuojalevy 12 mm
 Ilmarako 20 mm, vaakakoolaus 15x100 k600
 Lomalaudoitus 20 mm

Alapohja (materiaalit sisältäpäin lukien)

Laudoitus 28 mm
 Mineraalivilla 100 mm, koolaus 50x100 k600
 Mineraalivilla 125 mm, koolaus 50x125 k600
 Betoni 60 mm
 Styrox 50 mm
 Kosteuseristys (ei materiaalitietoa)
 Sora 350 mm

Sokkeli (materiaalit sisältäpäin lukien)

Sora 350 mm
 Kosteuseristys (ei materiaalitietoa)
 Styrox 50 mm
 Betoni 360 mm

KUVA 1. Alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin rakenteet

Rakennusvalvonnasta saadut piirustukset poikkeavat hieman toteutetusta rakenteesta. Nämä rakenteet on esitetty toteutuksen mukaan. Rakenteet on tehty 1980-luvun malliin. Mallinnusten mukaan perustuksissa on kosteusriski, koska kosteuseristys ja betoni ovat lattiarakenteen alaosassa

lähellä maata. Puurungon alasidepuu on suoraan betonia vasten lähellä maata vailla vesieristettä, jolloin alasidepuu ja pystyrunko voivat homehtua ja lahota. Valesokkeliin on vaarana muodostua kosteutta, koska vesi pääsee nousemaan kapillaarisesti perusmuurin kautta runkoon.

Styrox (50 mm) on betonin alla ja mineraalivillat betonin päällä, jonka päällä puulattia. Rakenteessa on puukoolaus, jolloin vaarana on kosteus- ja mikrobikasvusto. Kosteuseristys on laitettu sorastuksen päälle, jolloin se voi kerätä kosteutta rakenteeseen ollen täten riskirakenne. Kosteuseristyksen materiaalia ei tiedetä, mutta korjaustoimenpiteissä tämä on otettu huomioon (luku 7). Kosteuseristyksen termit on otettu suoraan vanhoista piirustuksista, eikä niiden materiaalista ei ole merkintää (Liite 2). Vanhoissa piirustuksissa kosteussulku tarkoittaa ulkoseinän ja yläpohjan höyrünsulkua, kun taas kosteuseristys tarkoittaa alapohjan kosteuden eristämistä (liitteet 1, 2, 3).

Yleisin syy vaurioille on kapillaarinen vedennousu, joka johtuu salaojien puuttumisesta tai kapillaarikatkerroksen vajavaisuudesta. Kosteus siirtyy myös vesihöyrynä maavaraisessa alapohjarakenteessa. Vesihöyry tiivistyy kastepistelämpötilaa kylmemmille pinnoille, joka on seurausta puutteellisesta lämmöneristyksestä maavaraisen laatan alla. Laatan alla on sopiva lämpötila, kosteutta ja ravinteita mikrobikasvustolle. (Laurinen 2017, 26.)

Mikrobivaurio voi esiintyä betonilaatan ja eristeen rajapinnassa, koska lämpötila- ja kosteusolosuhteet ovat otolliset. Kun maanvaraisessa lattiarakenteessa kosteuseristys (muovikalvo) on betonilaatan ja eristekerroksen alla, niin vesivahinkotapauksessa tilanne vain pahenee (Laurinen 2017, 26). Muovikalvo heikentää laatan kuivumista alaspäin, josta seuraa rakennusajan piteneminen. Kun vesi pääsee muovikalvon päälle, seurauksena on vaurion syntyminen (Sisäilmäyhdistys 2021).

Rakenteessa havaittiin valesokkeli, jossa perusmuurin ulkokuori on ulkoseinän rungon alapäätä ylempänä. Lattianpinta on kuitenkin ylempänä ympäröivä maanpintaa. Talon on mäkirinteessä, joten sadevesi pääsee valumaan pois päin etelän puolelta, mutta pohjoispuolelta vesi on johdettava pois.

6.2.1 Alapohja

Alapohjan materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä tiedot rakenteesta on esitetty taulukossa 1. Materiaalitiedot on esitetty myös kuvassa 1.

TAULUKKO 1. Alapohjan rakennekerrokset sisältäpäin lukien ja niiden lämmönjohtavuudet (SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]	Tiedot
Laudoitus	28	0,14	
Mineraalivilla	100	0,04	Vaakajuoksu 50x100 k600
Mineraalivilla	125	0,04	Vaakajuoksu 50x125 k600
Betoni	60	1,7	
Styrox	50	0,04	
Kosteuseristys	1,5	0,23	Materiaalista ei tietoa
Sora	350	2,0	

6.2.2 Sokkeli

Sokkelin materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä tiedot rakenteesta on esitetty taulukossa 2. Materiaalitiedot on esitetty myös kuvassa 1.

TAULUKKO 2. Sokkelin rakennekerrokset sisältäpäin lukien ja niiden lämmönjohtavuudet (SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]	Tiedot
Sora	350	2,0	
Kosteuseristys	1,5	0,23	Materiaalista ei tietoa
Styrox	50	0,04	
Betoni	360	1,7	

6.2.3 Ulkoseinä

Ulkoseinän materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä tiedot rakenteesta on esitetty taulukossa 3. Materiaalitiedot on esitetty myös kuvassa 1.

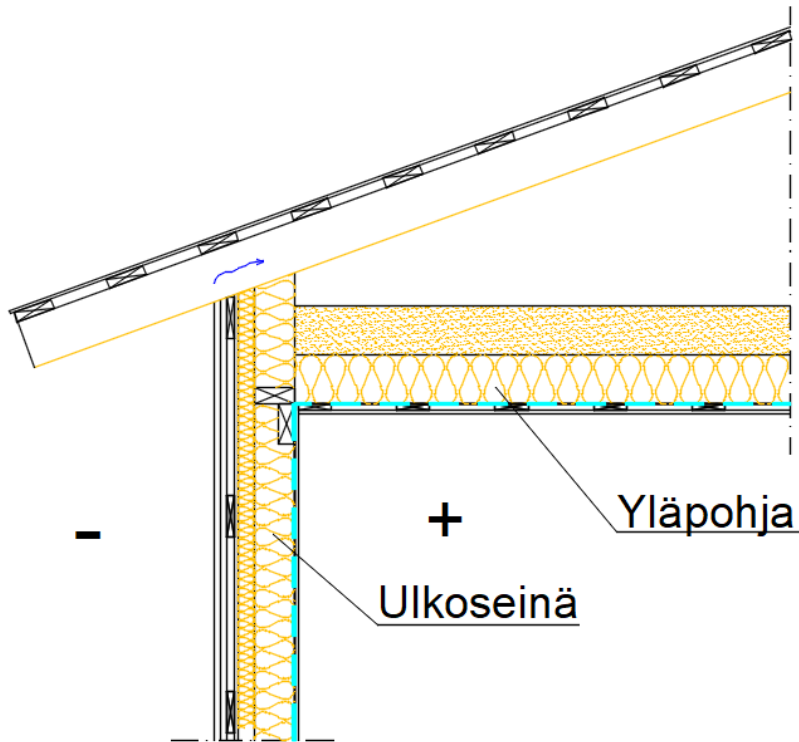
TAULUKKO 3. Ulkoseinän rakennekerrokset sisältäpäin lukien ja niiden lämmönjohtavuudet (SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]	Koolaus
Sisäverhouslevy	12	0,12	
Kosteussulku	0,3	10	Polyeteeni
Mineraalivilla	125	0,04	Runko 50x125 k600
Mineraalivilla	50	0,04	Vaakakoolaus 50x50 k600
Tuulensuojalevy	12	0,06	Bituliitti
Ilmarako	20	0,125	Vaakalaudat 15 x 100 mm k600
Lomalaudoitus	20	0,14	(RT 82-10829. Ohjetiedosto 2004, s. 4)

6.3 Yläpohjan ja ulkoseinän liitos

Kuvassa 2 on esitetty yläpohjan ja ulkoseinän rakenne. Ulkoseinän rakennekerrokset ja lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 3.

Yläpohjassa eristeenä on sahanpurua ja mineraalivillaa, yläpohjan ja seinien sisäpuolella on kosteussulut, jotka toimivat myös höyrynsulkuina. Saumat on hyvin tiivistetty, rakennusaikaan puhuttiin "pullorakenteesta". Piirustuksissa ei ole merkintää tarkemmasta tiivistysmenetelmästä ja kosteussulun materiaalista, mutta todennäköisesti se on polyeteeniä. Yläpohja ja seinät toimivat kosteusteknisesti hyvin. (Kuvat 41 ja 42.)



KUVA 2. Yläpohjan ja ulkoseinän rakenteet

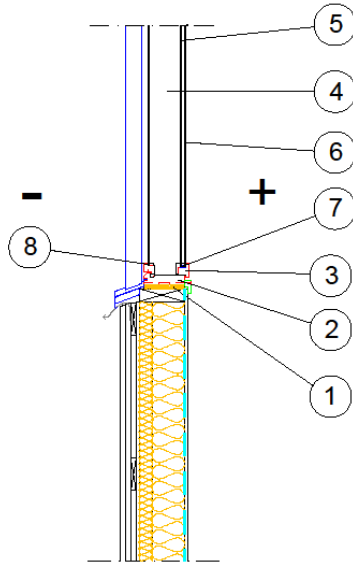
Yläpohjan materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä tiedot rakenteesta on esitetty taulukossa 4. Ulkoseinän rakennekerrosten materiaalit on esitetty taulukossa 3 ja kuvassa 1.

TAULUKKO 4. Yläpohjan rakennekerrokset sisältäpäin lukien ja niiden lämmönjohtavuudet (SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]	Koolaus
Sisäverhouslevy	12	0,12	
Harva laudoitus	18	0,14	10x100 k 300
Kosteussulku	0,25	10	Polyeteeni
Mineraalivilla	150	0,04	Runko 100x175 k600
Sahanpuru	150	0,12	
Kattokannattajat		0,14	50x150 k600
Harvalaudoitus		0,14	25x120 k300
Pelti	0,6	50	

6.4 Ikkunan ja ulkoseinän liitos

Ikkunat ovat 3-lasiset, MSE-ikkuna 1980-luvun malliin (kuva 3) (Häkkinen 2013, 13). Liitokset on tiivistetty hyvin kumitiivistein. Ulkoseinän rakennekerrokset ja lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 3.



KUVA 3. Ikkunan ja ulkoseinän rakenteet

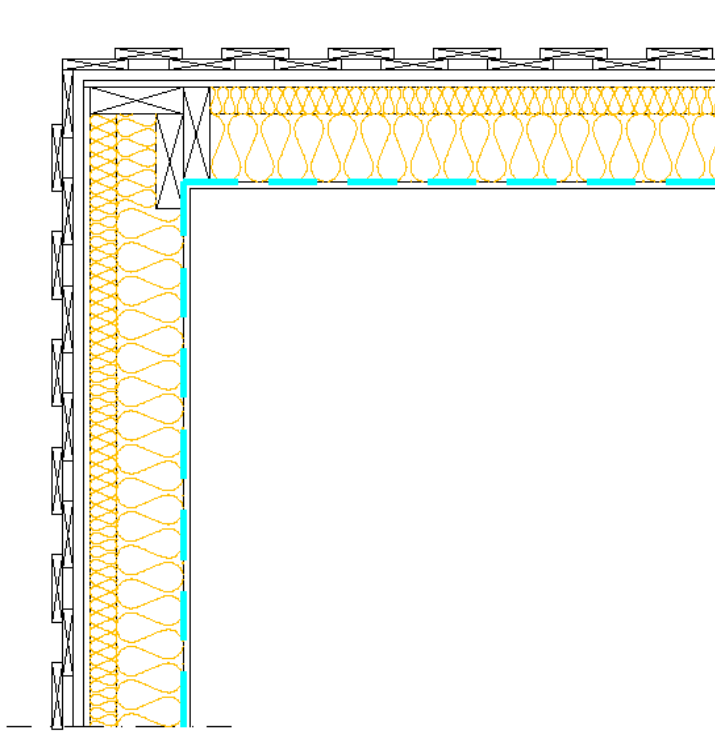
Ikkunan materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Ikkunan rakennekerrokset ja lämmönjohtavuudet (SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

Numero	Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]
1	Eriste	155	0,05
2	Karmi, puu	155	0,13
3	Puitteet, puu	2x50	0,13
4	Ilma	121	0,150
5	Ilma	10	0,034
6	Lasi	3x4	1,0
7	TPS	10	0,315
8	Tiiviste	2	0,13

6.5 Ulkoseinien välisen nurkan liitos

Kuvassa 4 on esitetty seinien ulkonurkan rakenne. Ulkoseinän rakennekerrokset ja lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 3.



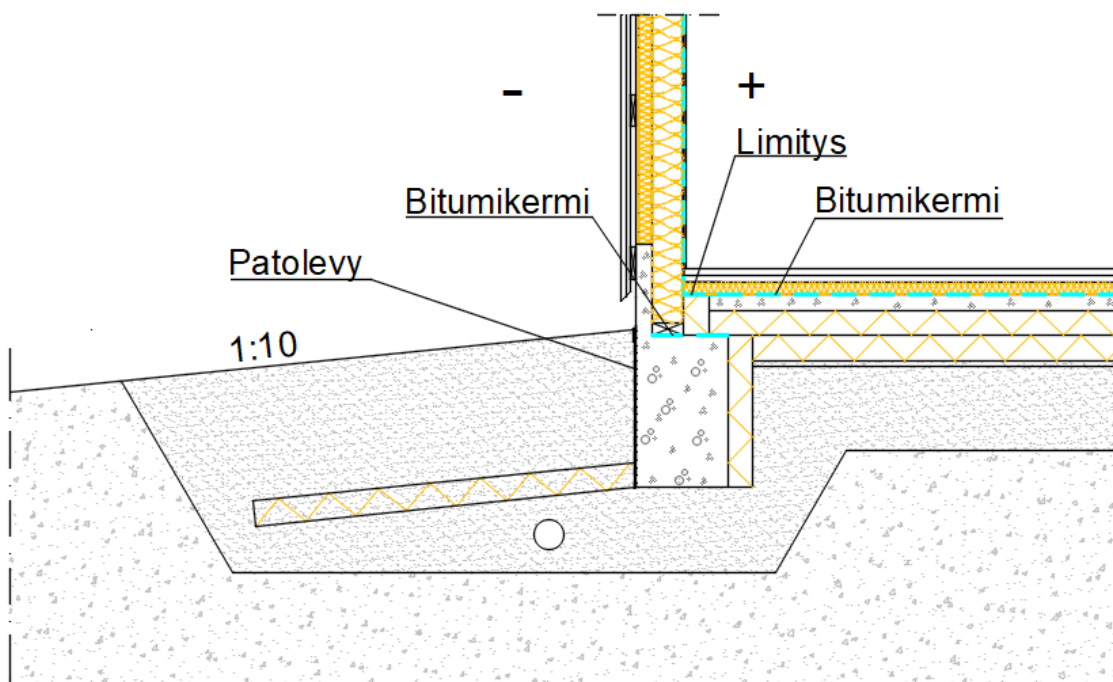
KUVA 4. Seinien ulkonurkan rakenne

7 PIENTALON KORJAUSVAIHTOEHDOT

7.1 Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos

Kuvassa 5 on esitetty vaihtoehto alapohjan ja sokkelin korjatulle rakenteelle. Tässä korjausvaihtoehdossa uusitaan vain alapohjan rakenteet ja laitetaan routasuojaus. Ulkoseinien vierustalla maanpintaa kallistetaan 1:10. Nykyinen kallistusohje on kuitenkin 1:20 perusmuurista ulospäin 3 metrin matkalla. Koska rakennus sijaitsee mäkirinteessä, hulevesien ohjaus rinteessä tehdään niskaojan avulla rakennuksen ohi (Ympäristöministeriö 2020, 25).

Maavaraisen alapohjan lattian tulee olla vähintään 0,3 m rakennuksen ulkopuolella maanpinnan yläpuolella, jotta alapohjan reuna-alueille ja ulkoseinien alaosiin ei pääse kosteutta (Ympäristöministeriö 2020, 30).



Ulkoseinä (sisältäpäin lukien)

Sisäverhouslevy 12 mm
Höyrynsulkusulku, PE-muovikalvo
Mineraalivilla 125 mm, runko 50x125 k600
Mineraalivilla 50 mm, koolaus 50x50 k600
Tuulensuojalevy 12 mm
Ilmarako 20 mm, vaakakoolaus 15x100 k600
Lomalaudoitus 20 mm

Alapohja (sisältäpäin lukien)

Laudoitus 28 mm
Ilmarako 25 mm
Mineraalivilla 50 mm, koolaus 50x75 k600
Bitumikermi
Betoni 60 mm
Styrofoam-eriste 100 mm
Styrofoam-eriste 100 mm
Tasaushiekka 20 mm
Suodatinkangas
Sora 350 mm

Sokkeli (sisältäpäin lukien)

Sora 350 mm
Styrofoam-eriste 100 mm
Betoni 360 mm
Ilmaväli 8 mm
Patolevy 0.5 mm

KUVA 5. Korjausvaihtoehto alapohjan ja sokkelin rakenteelle

Kun perusmuurin ulkokuori on nostettu ulkoseinän rungon alapäätä ylemmäs, kyseessä on valesokkelirakenne. Vaarana on ulkoseinä alaosan kosteusvaurio, koska valesokkeli estää seinään tulevan kosteuden kuivumisen ulospäin. Sade- ja sulamisvedet voivat päästä imeytymään perusmuurin läpi puurunkoon, joka lisää kosteuskuormitusta valesokkelin takana. Rakenne on riskialttiimpi, jos maanvaraisen alapohjarakenteen eristekerros on kokonaan betonilaatan päällä. (Laurinen 2011, 27.)

Betoninen lattialaatta puretaan, uudet lämmöneristeet asennetaan ja valetaan uusi betonilaatta. Betonilaatan alla käytetään polystyreeni-eristettä, jolla on pieni vedenimukyky ja suuri vesihöyrynvastus. Betonin yläpuolinen eristys vaihdetaan ohuempaan ja alapuolelle vaihdetaan paksumpi Styrofoam-eriste, joka parantaa kosteusteknistä toimintaa. Seinän ja lattian liittymiskohta tiivistetään, jottei ilmavuotoja esiinny. Kosteus- ja homealkoot sivustolla esitetty puulattian riskirakenne esittää tapausta, jossa betoni on suoraan kapillaarikatkerroksen päällä ilman eristettä betonin alapuolella. Rakennekerrokset on esitetty myös taulukossa 7 sivulla 40. Rakenne on suunniteltu RT-kortin mukaan (RT 83-11009, 22).

Sorakerroksen päällä oleva kosteuseristys poistetaan ja tilalle laitetaan suodatinkangas, jolloin rakenne toimii kosteusteknisesti oikein. Suodatinkangas estää rakennekerrosten sekoittumista pohjamaahan, mutta vesi läpäisee suodatinkankaan, joten se toimii suodattavana materiaalina. Riippuen soran rakeisuudesta, voidaan joutua vaihtamaan sora sepeliin (Sisäilmäyhdistys 2021).

Kesällä vesihöyryvirta on sisältä maan suuntaan, joten erillisiä höyrynsulkumuoveja ei laiteta maanvaraisen laatan rakenteiden väliin, sillä ne heikentävät rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Vesihöyryn virtausten hillitsemiseksi polystyreeni-lämmöneristeellä on suuri vesihöyrynvastus. RT-kortin mukaan mineraalivillan ja betonin väliin laitetaan bitumikermi (RT 83-11009, 22).

Korjaustoimenpiteet ovat suuria, joten käytännössä ne tuskin ovat realistisia. Kosteutta on voinut kertyä maaperästä betonin päällä oleviin eristeisiin. Niistä voi ottaa näytteitä ja päättää sitten toimenpiteistä. Vanhassa rakenteessa puulattia läpäisee kosteutta, joten kosteusvauriota on tuskin muodostunut. Lattia on huomattavasti maan pintaa korkeammalla, joten riski kosteusvauriolla pienenee, mutta se selviäisi tutkimalla tarkemmin.

7.1.1 Routasuojaus

Opinnäytetyössä määritettiin routasuojauksen leveys ja eristepaksuus ohjeen RIL 261-2013 Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet mukaisesti (Kallio 2019, 1). Aluksi määritetään routasuojauksen leveys B. Alapohjan lämmönvastus laskettiin kaavalla 18 (Kallio 2019, 23).

KAAVA 18. Alapohjan lämmönvastuksen laskentakaava

$$R_A = 0,9 \cdot \frac{1}{U_A}$$

Alapohjan lämmönjohtavuus U_A saadaan Comsol-ohjelmasta.

$$U_A = 0,0858 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_A = 0,9 \cdot \frac{1}{0,0858} \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_A = 10,49 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Mitoituspakkasmäärä F_{50} katsotaan Kuusamon korkeudelta $F_{50} = 60000 \text{ Kh}$ (Kallio 2019, 5).

Routaeristeen leveys ja lisäleveys saatiin taulukosta 6 alapohjan lämmönvastuksen R_A ja mitoituspakkasmäärän F_{50} mukaan (Kallio, 30) seuraavasti:

- routaeristeen leveys seinien kohdalla B = 1,5 m

- lisäleveys nurkkien kohdalla $\Delta B = 0,5 \text{ m}$.

TAULUKKO 6. Lämpimien rakennusten routasuojauksen leveys (RIL 261-2013, 93)

Alapohjan tyyppi	Alapohjan lämmönvastus R_A [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Mitoituspakkasmäärä F_{50} [Kh]	Routaeristeen leveys B [m]	Routaeristeen lisäleveys ΔB [m]
Maavarainen alapohjarakenne	$< 7,5$	35 000...55 000	1,0	
	$< 7,5$	55 000...75 000	1,2	
	$7,5 \dots < 10,0$	35 000...55 000	1,2	
	$7,5 \dots < 10,0$	55 000...75 000	1,5	
	$10,0 \dots 14,0$	35 000...40 000	1,0	0,5
	$10,0 \dots 14,0$	40 000...60 000	1,5	0,5
	$10,0 \dots 14,0$	60 000...75 000	2,0	0,5
Ryömintätila-tilainen alapohjarakenne	$\leq 6,25$	35 000...55 000	1,2	
	$\leq 6,25$	55 000...75 000	1,5	
	$> 6,25 \dots < 10,0$	35 000...55 000	1,2	
	$> 6,25 \dots < 10,0$	55 000...75 000	1,2	

Routasuojauksen paksuus (D_e) lasketaan kaavalla 19 (Kallio 2019, 12).

KAAVA 19. Routasuojauksen paksuuden laskentakaava

$$D_e = m_r \lambda$$

Routaeristeen lämmönvastus saatiin ohjeesta $m_r = 2,7 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Kallio 2019, 33).

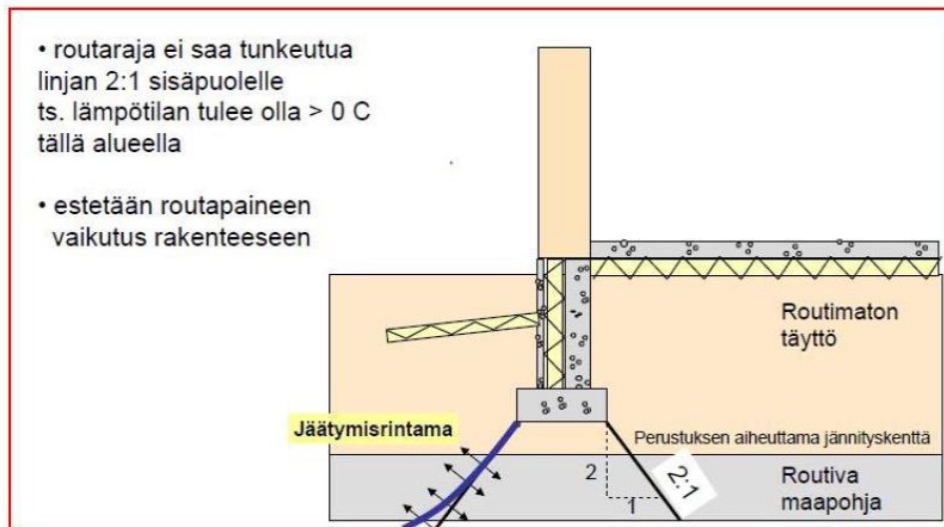
Lämmönjohtavuus $\lambda = 0,037 \text{ W/Km}$

$$D_e = 2,7 \text{ m}^2\text{K/W} \cdot 0,037 \text{ W/Km}$$

$$D_e = 100 \text{ mm}$$

Routaeristeet asennetaan rakennuksesta ulospäin n. 1:10 kaltevuuteen (Harju, 18). Routasuojauksen tarkoituksena on pitää lämpötila yli $0 \text{ }^\circ\text{C}$ rakennuksen alla maaperässä. (Kuva 6.)

Jos alapohjan lämmöneristys on tehokas, ei lämpöä siirry rakenteiden alle. Mahdollisesti tarvitaan tehokkaampi routaeristys. Tilannetta tarkasteltiin myöhemmin Comsol-ohjelmalla.



KUVA 6. Riittävä routasuojaus estää routapaineen vaikutuksen rakenteeseen (Kallio 2019, 36)

7.1.2 Alapohja

Alapohjan materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä tiedot rakenteesta on esitetty taulukossa 7. Rakennekerrosten materiaalitiedot on esitetty myös kuvassa 5.

TAULUKKO 7. Alapohjan rakennekerrokset sisältäpäin lukien ja niiden lämmönjohtavuudet (RT 83-11009. RT AP 419, 22; SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]	Tiedot
Laudoitus	28	0,14	
Ilmarako	25	0,10	
Mineraalivilla	50	0,037	Koolaus 50x75 k600
Bitumikermi	1	0,23	
Betoni	60	1,35	
Eriste	100	0,037	Styrofoam
Eriste	100	0,037	Styrofoam
Tasaushiekka	20	2,0	
Suodatinkangas			Käyttöluokka N2
Sora	350	2,0	

7.1.3 Sokkeli

Perustuksen vierustalle laitetaan routaeristys ja sokkelin viereen patolevy. Patolevyn tehtävä on poistaa kosteutta talon perustuksista. Nystyrämäinen levy asennetaan sokkelin kylkeen. Levyn materiaali on yleensä polypropeeni. Lämpimästä sokkelista tullut vesihöyry kondensoituu patolevyyn, jolloin se valuu salaojiin. Patolevy ohjaa veden seinustalta ja vesi ohjautuu pois perustuksista.

Patolevyn yläreuna jätetään 50 mm maanpinnan alle ja suojataan patolevylistalla, joka asennetaan sokkelilevyn ja sokkelin väliin. Näin estetään maa-aineksen siirtymisen nystyröiden väliin sokkelin ja patolevyn väliin.

Sokkelin materiaalit, paksuudet ja lämmönjohtavuudet sekä tiedot rakenteesta on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Sokkelin rakennekerrokset sisältäpäin lukien ja niiden lämmönjohtavuudet (SFS-EN ISO 10456+AC 2008, 13)

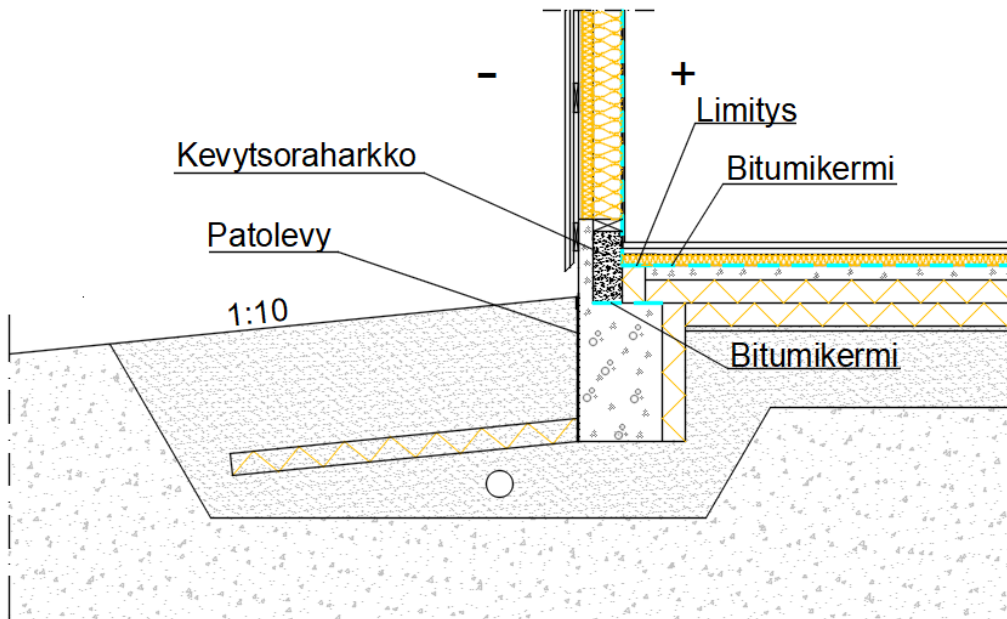
Materiaali	Paksuus [mm]	Lämmönjohtavuus λ_u [W/(mK)]	Tiedot
Sora	350	2,0	
Eriste	100	0,037	Styrofoam
Betoni	360	1,7	
Ilmaväli	8	0,056	
Patolevy	0,5	0,50	Polyeteeni

Ulkoseinän rakenteet pidetään entisellään.

7.2 Valesokkelin korjaus

7.2.1 Kevytsojaraharkko

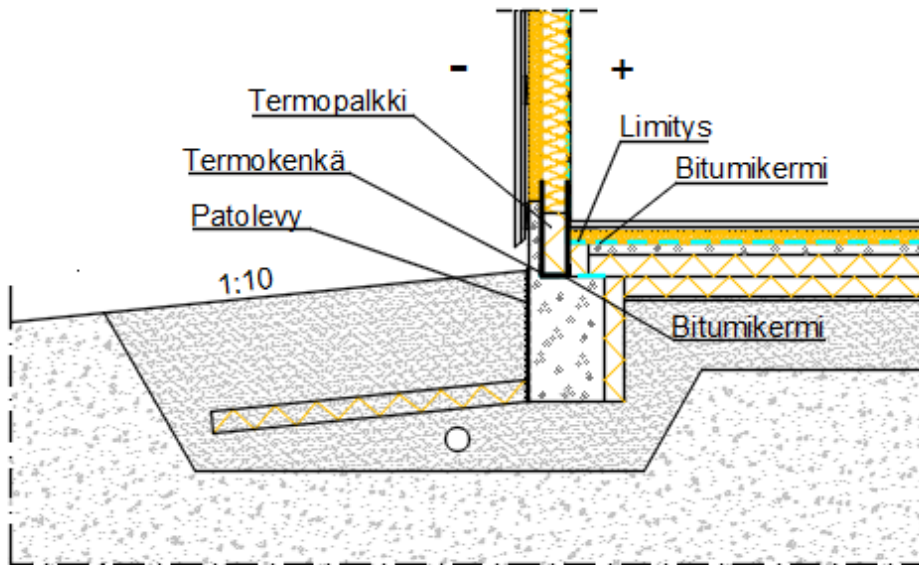
Jos valesokkelin riski on toteutunut, joudutaan sokkelin kostunut ja vaurioitunut lämmöneriste poistamaan. Vaurioituneet puurakenteet poistetaan katkaisemalla pystytolpat ja asentamalla kevytsojaraharkot tilalle, joiden päälle ulkoseinän alaosa tuetaan. (Kuva 7.)



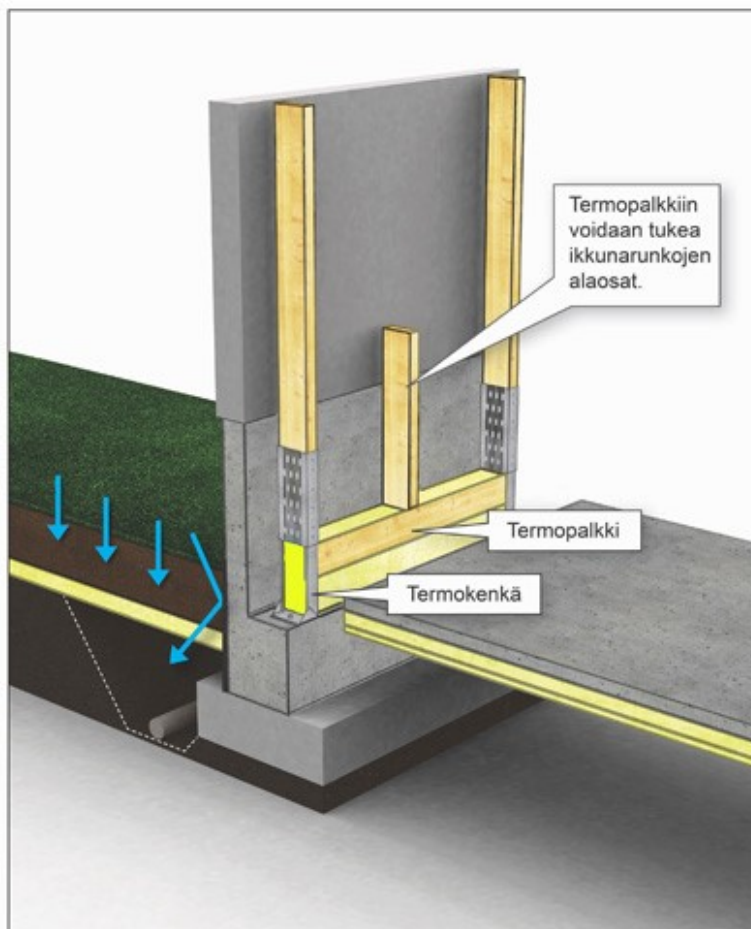
KUVA 7. Valesokkelirakenteen korjaaminen asentamalla kevytsoraharkko

7.2.2 Termokenkä ja -palkki

Toisena vaihtoehtona on korjata valesokkelirakenne käyttämällä termokenkää ja -palkkia (kuvat 8 ja 9). Menetelmässä lämmöneristyskyky paranee vaihtamalla kevytsoraharkko Finnfoam-lämmöneristeeseen. Korjaustyö tulee edullisemmaksi, koska asennustyöaika lyhenee. Rakenne ei tarvitse erillistä höyrynsulkua ja tuulensuojalevyä ja rakenteen on todettu olevan homehtumaton VTT:n hometestissä (Finnfoam 2021). Samalla voidaan vaihtaa seinän alaosan eristeet ja laittaa lisäeristettä. Kuvassa 8 esitetään suunniteltu korjausvaihtoehto.



KUVA 8. Valesokkelirakenteen korjaaminen käyttämällä termokenkää ja -palkkia

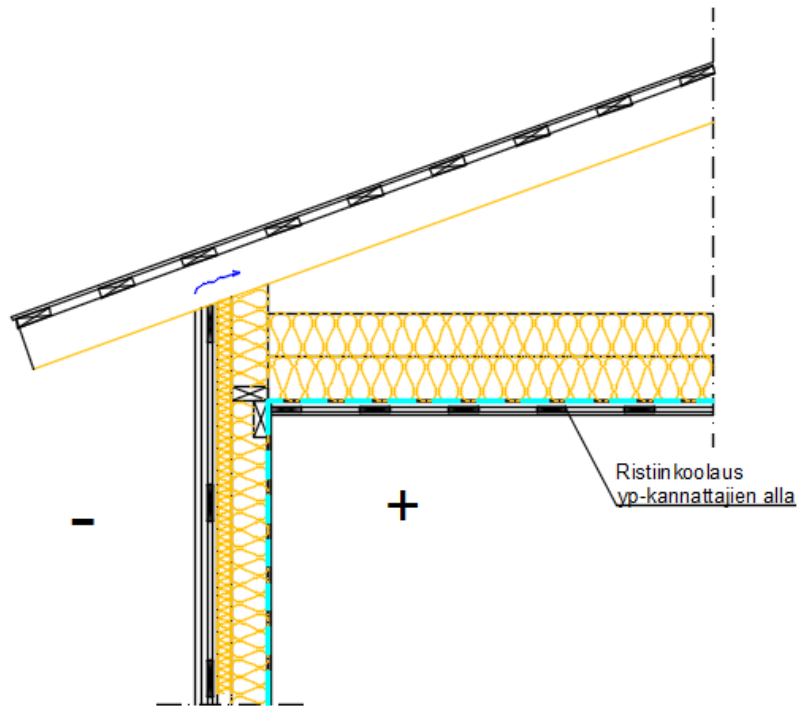


KUVA 9. Termokenkä ja -palkki rakenteen periaate (Finnfoam 2021)

Korjausvaihtoehtojen vertailu tehtiin Comsol-ohjelmalla (luku 9).

7.3 Yläpohjan ja ulkoseinän liitos

Kuvassa 10 on esitetty yläpohjan ja ulkoseinän rakenne.



KUVA 10. Yläpohjan ja ulkoseinän rakenteet

Yläpohjan sahanpuru vaihdetaan mineraalivillaan, jolloin U-arvo pienenee. Tämä korjaustoimenpide on toteutettavissa kohtuudella. Ulkoseinän rakenteet pidettiin entisellään.

8 PIENTALON RAKENTEIDEN MALLINNUS

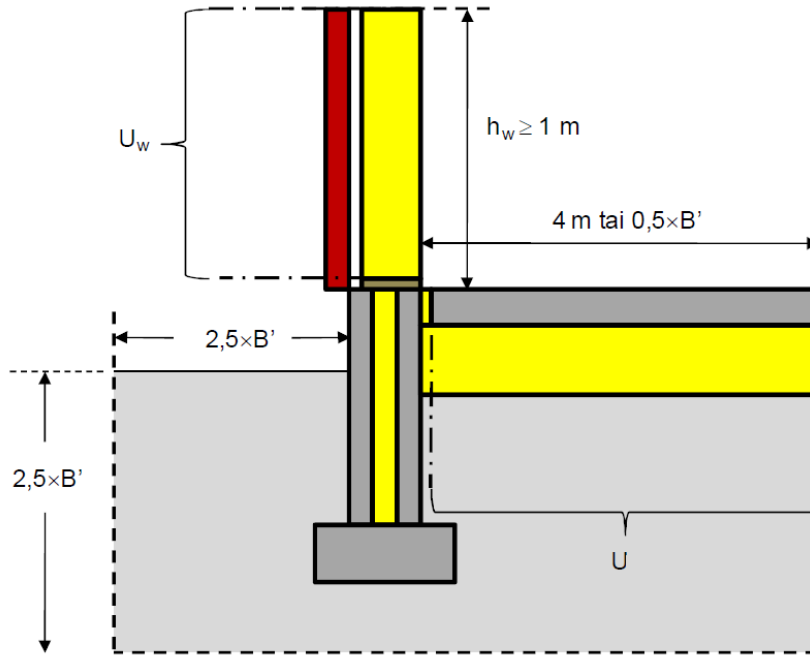
8.1 Comsol Multiphysics -ohjelma

Comsol Multiphysics -ohjelma sopii ratkaisemaan tieteellisiä ja teknisiä ongelmia numeerisin menetelmin. Numeerinen laskenta perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden matemaattisiin malleihin (PDE). Mallit lasketaan elementtimenetelmän (FEM) avulla muodostamalla laskentaverkkoja (Multiphysics). Rakenteesta tehtiin CAD-ohjelmalla leikkauskuva, johon malli muodostettiin.

Opinnäytetyössä laskettiin rakenteiden lämpötila- ja lämpövirtajakaumat sekä viivamaiset lisäkonduktanssit. Tulosten perusteella tehtiin vertailu vanhojen rakenteiden ja korjausvaihtoehtojen kesken. Vertailu tehtiin myös Laskentaohjelmat-palvelun avulla saatuihin tuloksiin.

8.2 Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos

Kuvassa 11 on esitetty mallin mitoitus Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan ja SFS-standardin mukaan (Ympäristöministeriö 2012, 16; SFS-EN ISO 10211:2017).



KUVA 11. Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin välisen liitoksen kylmäsilan mallinnuksen periaate (Ympäristöministeriö 2012, 16)

Rakenteen läpi kulkeva lämpövirta laskettiin yhden asteen lämpötilaerolla metriä kohden, kun määritettiin lisäkonduktanssia. Opinnäytetyössä lämpövirta saatiin Comsol-ohjelmalla. Seinän osuus on vähintään 1 metrin matka ja alapohjan $0,5 \times B'$ tai 4 m, jossa B' on rakennuksen karakteristinen leveys. Maamassoja otettiin mukaan $2,5 \times B'$ rakennuksen sivulla ja alapuolella.

Seinän ja alapohjan U-arvot määritettiin numeerisesti Comsol-ohjelmalla, jolloin katkoviivan kohdalla käytettiin adiabaattireunaehtoa (kuva 11).

Määritettiin seinäosan ja alapohjan lämpövirrat astetta ja metriä kohden. Laskennassa käytettiin saatuja U-arvoja sekä mittoja h_w ja $0,5 \times B'$ kuvan 11 mukaisesti.

Comsol-ohjelmalla saadusta todellisesta lämpövirrasta vähennettiin U-arvoilla lasketut seinän ja alapohjan osuudet. Tulokseksi saatiin ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjalaatan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi. (Kaava 17 sivulla 26.)

8.2.1 Rakennuksen karakteristinen leveys

Rakennuksen karakteristinen leveys B' laskettiin kaavalla 20.

KAAVA 20. Rakennuksen karakteristisen leveyden laskentakaava

$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P}$$

A = rakennuksen pohjan pinta-ala

P = rakennuksen pohjan piiri

$$B' = \frac{91,8\text{m}^2}{0,5 \cdot 38,4\text{m}} = 4,78 \text{ m}$$

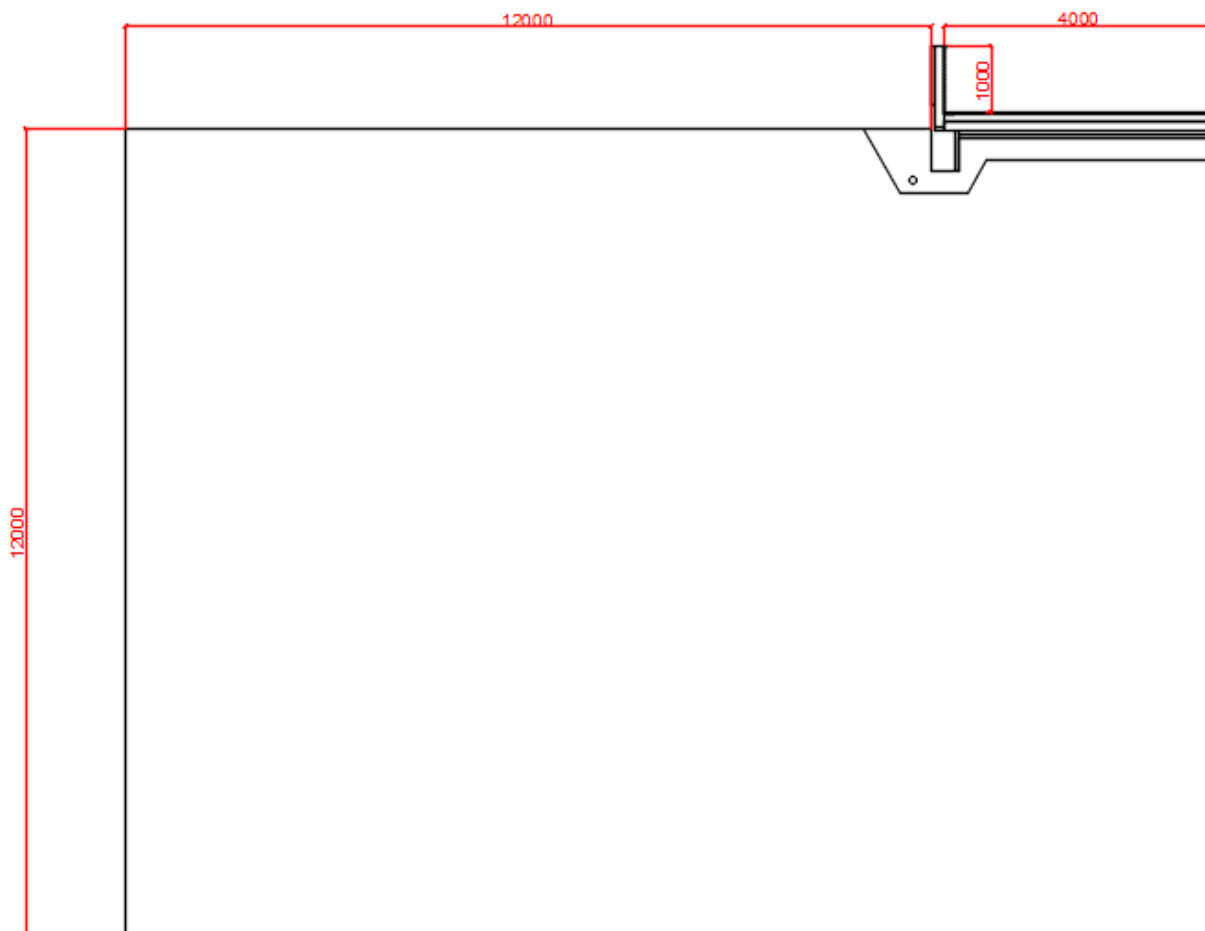
Rakenteiden osuudet laskettiin kuvan 11 mukaisesti.

Rakenteiden osuudet mallissa ovat seuraavat (kuva 12):

- ulkoseinä 1 m
- alapohja 4 m
- maamassat $2,5 \cdot B' = 2,5 \cdot 4,78 \text{ m} = 12 \text{ m}$.

Kuvassa 12 on esitetty CAD-ohjelmalla tehty alapohjarakenteen malli Comsol-ohjelmaa varten.

Mittoja ja muuta tietoa ei laiteta malliin.



KUVA 12. Comsol-ohjelmalle luotu malli alapohjarakenteesta

8.2.2 Lämpötilajakauma

Opinnäytetyössä lämpötilajakauma laskettiin suuremmalla lämpötilaerolla kuin laskettaessa liitoksen lisäkonduktanssia. Comsol-ohjelmaan tuotiin CAD-ohjelmalla tehty kuva, johon mallinnus tehtiin. AutoCADin kuva pitää tuoda DXF-formaatissa. Seuraavaksi syötettiin rakenteen materiaalit ja niiden lämmönjohtavuudet. Tässä vaiheessa annettiin lämpötilat seinien sisä- ja ulkopinnoille, lattian sisäpinnalle, maanpinnalle ja maan lämpötilalle 12 metrin syvyydessä. Sen jälkeen lisättiin adiabaattireunaehdot muille rakenteen rajoittaville osille.

Mallinnuksessa käytettiin seuraavia lämpötiloja:

- seinän sisäpinta 20 °C
- seinän ulkopinta -5 °C
- lattia 20 °C

- maan pinta $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- maan sisäosa $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Maan sisäosan lämpötila on laskettavissa kaavalla 21 (Auvinen 2012, 10).

KAAVA 21. Maan sisäosan lämpötilan laskentakaava

$$T_{maa} = 0,71 \cdot T_{ilma} + 2,93\text{ }^{\circ}\text{C}$$

T_{ilma} = paikkakunnan vuosittainen keskilämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Kuusamossa $T_{ilma} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Auvinen 2012, 11)

$$T_{maa} = 0,71 \cdot 0\text{ }^{\circ}\text{C} + 2,93\text{ }^{\circ}\text{C} = 2,93\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Adiabaattireunaehdot olivat seuraavat (kuva 12):

- malla rajoittaville osille on täydellinen lämmöneristys
- maan sisäosan lämpötila 12 m: n syvyydessä on $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kaava 21)

Rakenneosien pintavastukset on esitetty taulukossa 9 (Ympäristöministeriö 2012, 15).

TAULUKKO 9. Rakenneosien pintavastukset (Ympäristöministeriö 2012, 15)

Pintavastus $\text{m}^2\text{K/W}$	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
Sisäpinta R_{si}	0,10	0,13	0,17
Ulkopinta R_{se}	0,04	0,04	0,04

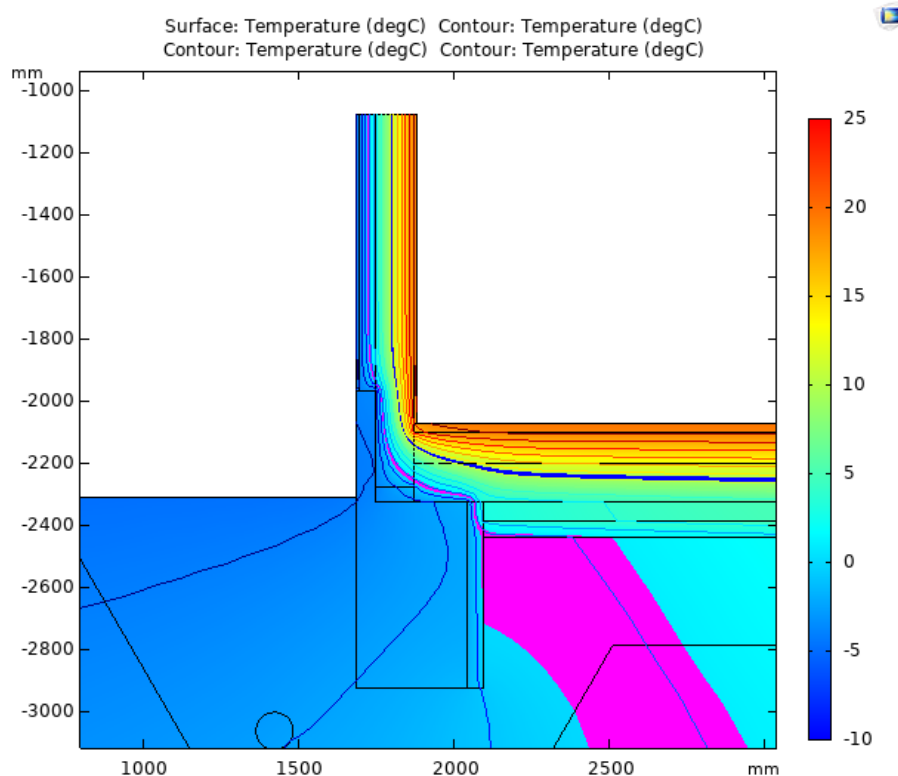
Pintavastukset asetettiin Comsol-ohjelmassa seuraavasti (taulukko 9):

- seinän sisäpinta $0,13\text{ m}^2\text{K/W}$
- seinän ulkopinta $0,13\text{ m}^2\text{K/W}$
- lattia $0,17\text{ m}^2\text{K/W}$
- maan pinta $0,04\text{ m}^2\text{K/W}$.

Ulkoseinärakenteessa on hyvin tuulettuva ilmapäli, jolloin kokonaislämmönvastuksessa jätetään huomioimatta tuulettuva ilmakerros ja ilmakerroksen ulkopuoliset rakenneosat. Tällöin kuitenkin rakenteen ilmapäliin rajoittuvan osan ulkopuolisena pintavastuksena käytetään taulukon 9 mukaisia sisäpuolisen pintavastuksen (R_{si}) arvoja (Ylihärsilä 2004a, 29).

Laskennan tuloksena saatiin kuvan 13 lämpötilajakauma. Merkitään myös 0-1 °C:n lämpötilavyöhyke, jota sanotaan jäätymisvyöhykkeeksi. Tämä on merkitty magentaraidalla, joka sijaitsee seinän eristeen ulkolaidalla ja levenee sorakerroksessa. Comsol-mallinnus tehtiin ottamatta lumen vaikutusta mukaan. Valinnalla on jotain vaikutusta lämpötilajakaumaan.

Jos sisäilma ajautuu rakenteeseen, seurauksena on veden tiivistyminen 9-10 °C:n lämpötilassa. Tämän lämpötilavyöhyke merkittiin lämpötilajakauman malliin. Kyseessä on siis kastepistevyöhyke. Tässä lämpötilassa mikrobien kasvustoa esiintyy 80-100 prosentin suhteellisessa kosteudessa. Lämpötila-alue on merkitty sininen raidalla, joka kulkee seinän ja alapohjan mineraalivillieristeen kohdalla (kuva 13).



KUVA 13. Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin lämpötilajakauma

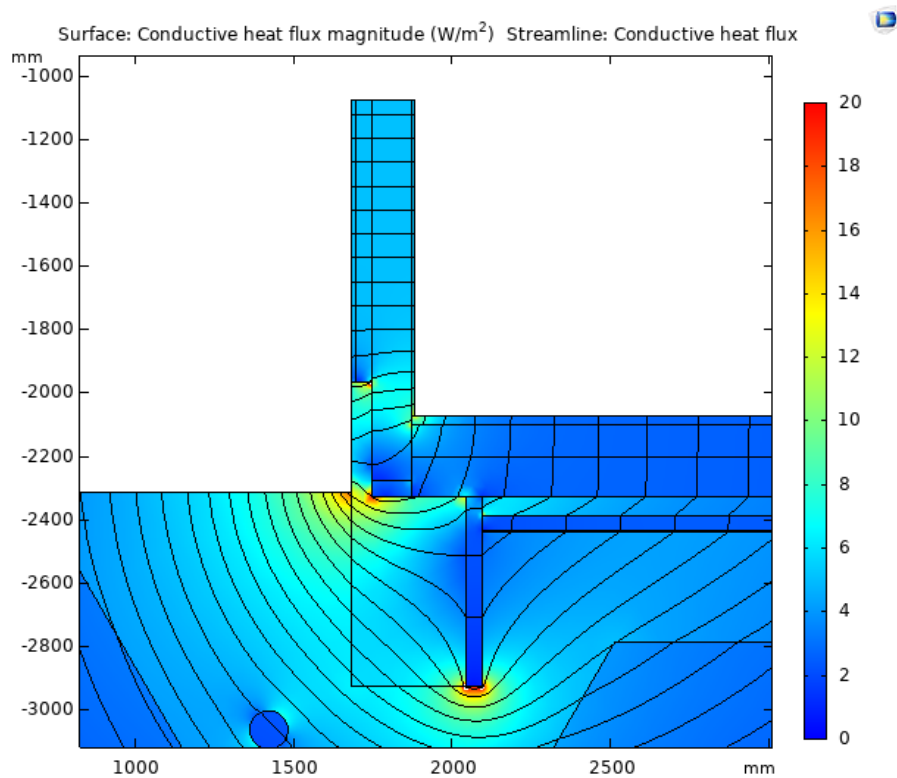
8.2.3 Lämpövirtajakauma

Opinnäytetyössä lämpövirtajakauma laskettiin suuremmalla lämpötilaerolla kuin laskettaessa liitoksen lisäkonduktanssia. Lämpötilaerot ja pintavastukset olivat samoja kuin lämpötilajakauman laskelmissa.

Kuvassa 14 esitetään rakenteen lämpövirtajakauma. Seinärakenteen lämpövirta on suurempi kuin alapohjan. Comsol-ohjelmasta saatiin lämpövirtojen numeeriset arvot

- seinärakenne $5,07 \text{ W/m}^2$
- alapohja $2,28 \text{ W/m}^2$.

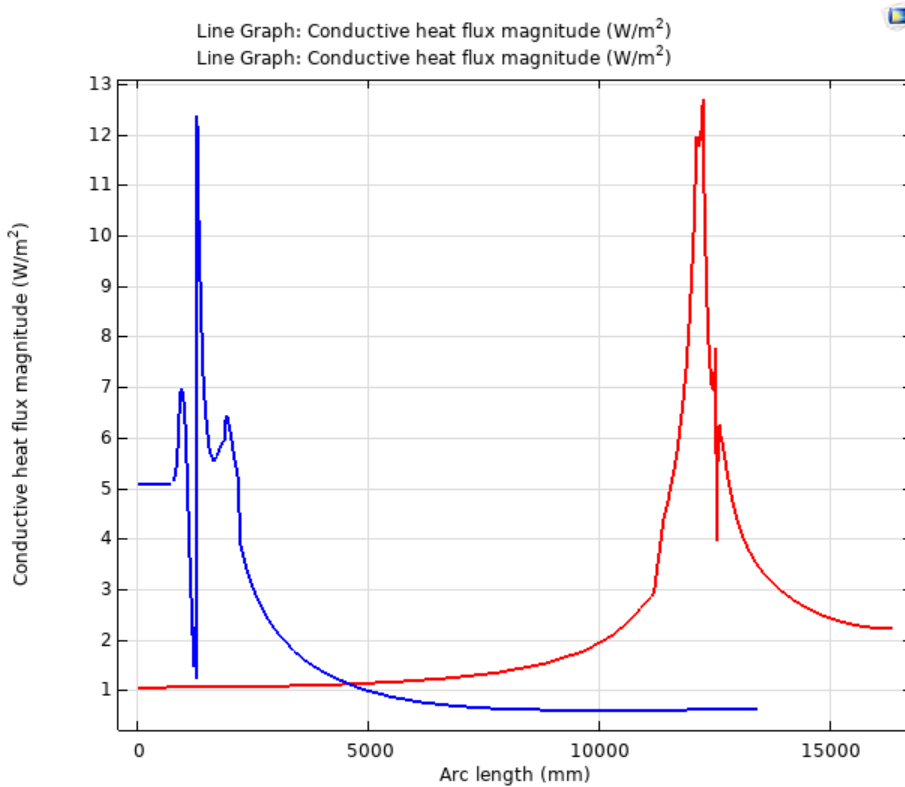
Seinän ulkolaidan eriste loppuu ennen maan pintaa, mikä näkyy kuvassa suurentuneena lämpövirtana. Routa-eristeen puuttumisen vaikutus on myös havaittavissa selvästi. (Kuva 14.)



KUVA 14. Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin lämpövirtajakauma

8.2.4 Lämpövirtakäyrä

Kuvassa 15 esitetään lämpövirran määrä rakenteen läpi. Sininen käyrä kuvaa lämpövirtaa vaakasuunnassa (seinä ja sokkeli) ja punainen pystysuunnassa (maa ja alapohja). Sininen lämpövirtapiikki osuu ulkoseinän alaosan puurakenteen kohdalle. Punaisen käyrän maksimi on ulkoseinän ja maanpinnan liittymäkohdassa. (Kuva 15.)



KUVA 15. Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin lämpövirtakäyrät

8.2.5 Viivamainen lisäkonduktanssi

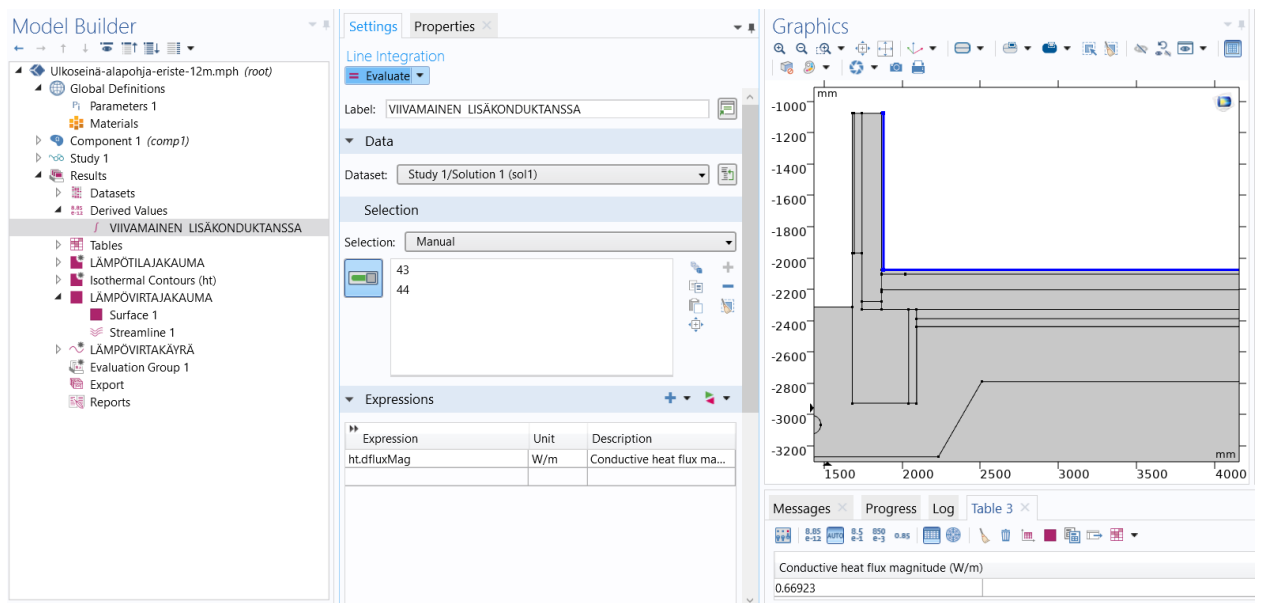
Viivamainen lisäkonduktanssi määritettiin yhden asteen lämpötilaerolla, jolloin käytetyt lämpötilat olivat

- seinän sisäpinnassa 1 °C
- seinän ulkopinnassa 0 °C
- lattiassa 1° C
- maan pinnassa 0 °C.

Adiabaattireunaehdot asetettiin katkoviivoilla merkityille osille (kuva 11). Pintavastukset asetettiin Comsol-ohjelmassa seuraavasti (taulukko 9):

- seinän sisäpinta 0,13 m²K/W
- seinän ulkopinta 0,13 m²K/W
- lattia 0,17 m²K/W
- maan pinta 0,04 m²K/W.

Valikosta valittiin viivamainen integraali (kuva 16) ja napsautettiin ulkoseinän ja alapohjan sisäpintoja, jolloin saatiin kaavassa 17 mainittu L_{2D} , joka esittää rakenteen läpi kulkevaa lämpövirtaa metriä kohti [W/(mK)]. Rakenneosan U-arvo saatiin suoraan napsauttamalla kyseistä rakennetta, kun lämpötilaero on 1 K. Todellisesta lämpövirrasta (L_{2D}) vähennettiin U-arvoilla ja rakenneosien pitoisuuksilla lasketut seinän ja lattian osuudet, jolloin jäännös esittää lisäkonduktanssia.



KUVA 16. Maanvastaisen alapohjarakenteen viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen Comsol-ohjelmalla

Seinäosan ja lattiaosan yhteenlaskettu lämpövirta (L_{2d}) on 0,66923 W/(mK) (kuva 16).

Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla (17).

$$\psi = L_{2D} - U_1 \cdot l_1 - U_2 \cdot l_2$$

$L_{2D} = 0,66923$ W/(mK) (kuvassa 15 sinisellä merkityt viivat)

$U_1 = 0,20263$ W/(m²K) ulkoseinän U-arvo (saadaan Comsol-mallista napsauttamalla hiirellä rakenneosaa)

$U_2 = 0,1015 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ alapohjan U-arvo (saadaan Comsol-mallista napsauttamalla hiirellä rakeneosaa)

$l_1 = 1 \text{ m}$ ulkoseinäosan pituus (kuva 11)

$l_2 = 4 \text{ m}$ alapohjaosan pituus (kuva 11)

$$\psi = 0,66923 \text{ W}/(\text{mK}) - 0,20263 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot 1 \text{ m} - 0,1015 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot 4 \text{ m}$$

$$\psi = 0,0606 \text{ W}/(\text{mK})$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,10 \text{ W}/(\text{mK})$. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssille, joka huomio rakennusosien välisten liitosten ja niiden epäsäännöllisten kylmäsiltojen aiheuttaman lisälämpöhäviön, on esitetty taulukossa 10 (Ympäristöministeriö 2012, 11).

TAULUKKO 10. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssille (Ympäristöministeriö 2012, 11)

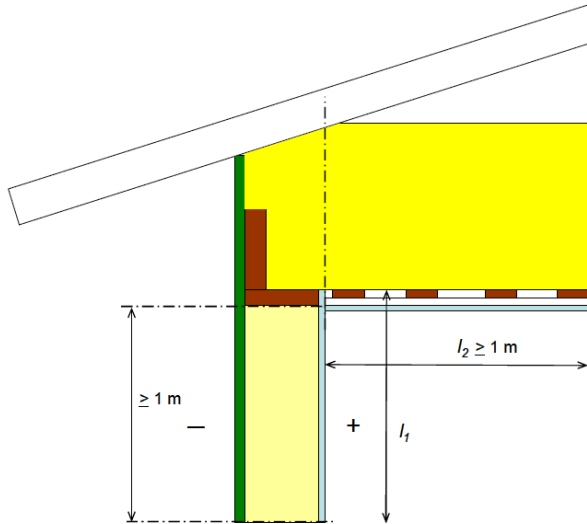
Liitos	Lisäkonduktanssi ψ [W/(mK)]					
	Ulkoseinän runkomateriaali					
	betoni	kevyt- betoni	kevyt- sora- betoni	tiili	puu	hirsi
Ulkoseinien välinen liitos ulkonurkka	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
Ulkoseinien välinen liitos sisänurkka	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
Ikkuna- ja oviliitos lämmöneristeen kohdalla	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ikkuna- ja oviliitos muussa tapauksessa	0,17	0,07	0,10	0,10	0,07	0,07

Ylä-, väli- ja alapohjan liitos ulkoseinään

Ulkoseinän runkomateriaali	Lisäkonduktanssi ψ [W/(mK)]									
	Yläpohjan runkomateriaali			Välipohjan runkomateriaali			Alapohjan runkomateriaali			
	betoni	kevyt- betoni	puu	betoni	kevyt- betoni	puu	betoni maan- vast.	betoni ryöm. tila	kevyt- betoni ryöm. tila	puu ryöm. tila
betoni	0,08		0,04	0,00			0,24	0,28		
kevytbetoni	0,18	0,06	0,04	0,10	0,00		0,09	0,08	0,03	
kevytsorabetoni	0,13		0,04	0,07			0,15	0,11		
tiili	0,08		0,04	0,00			0,17	0,06		
puu			0,05			0,05	0,10			0,06
hirsi			0,04			0,00	0,11			0,09

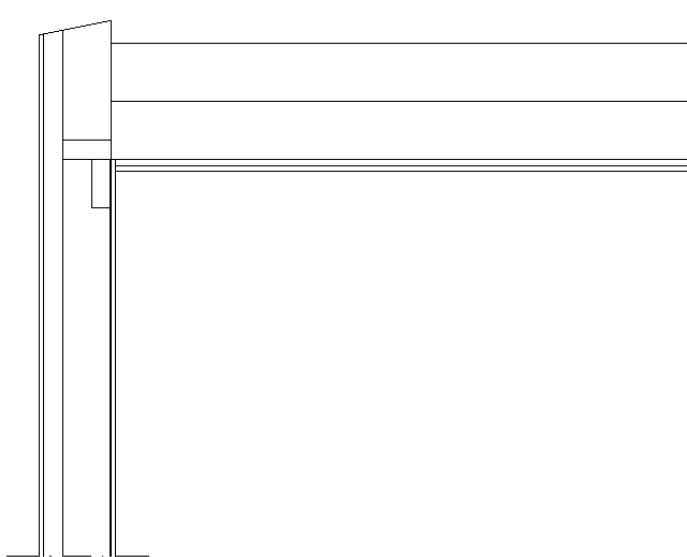
8.3 Yläpohjan ja ulkoseinän liitos

Kuvassa 17 on esitetty mallin mitoitukset Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan (Ympäristöministeriö 2012, 23).



KUVA 17. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen kylmäsilan mallinnus (Ympäristöministeriö 2012, 23)

Kuvassa 18 on esitetty CAD-ohjelmalla tehty yläpohjarakenteen malli Comsol-ohjelmaa varten. Mittoja ja muuta tietoa ei laiteta malliin.



KUVA 18. Comsol-ohjelmalle luotu malli yläpohjarakenteesta

Rakenteen mallinnus tehtiin samalla periaatteella kuin maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin välisen liitoksen kylmäsilan tapauksessa (luku 8.2).

Rakenteiden osuudet mallissa olivat seuraavat (kuva 17):

- ulkoseinä $l_1 = 1$ m
- yläpohja $l_2 = 1,5$ m.

8.3.1 Lämpötilajakauma

Lisättiin adiabaattireunaehdot malliin rakenteiden rajoittaville osille.

Mallissa käytetyt lämpötilat olivat

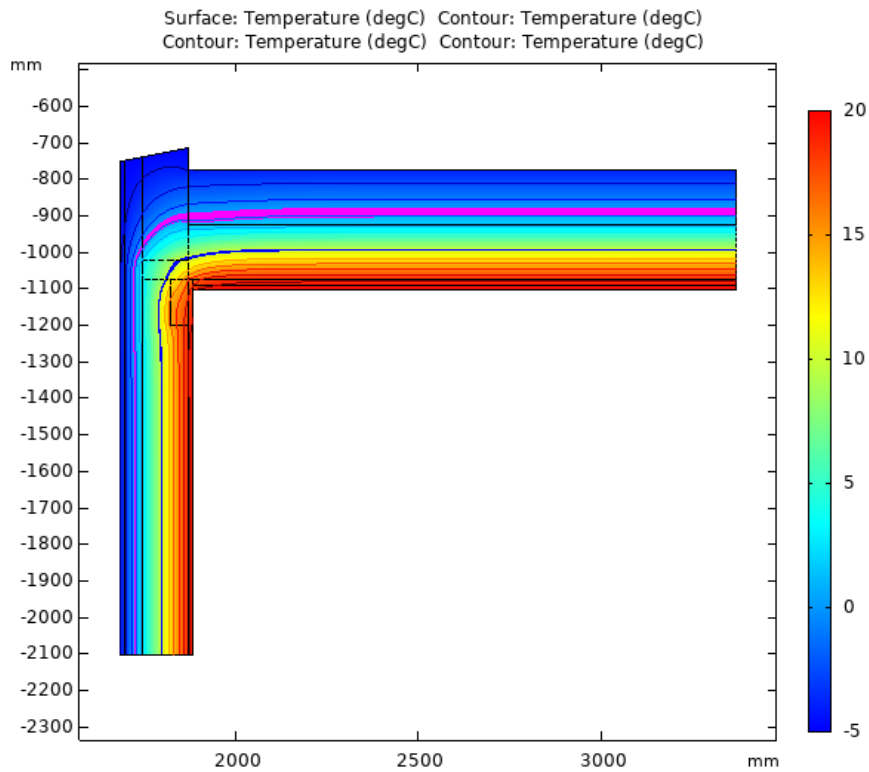
- seinän sisäpinnassa 20 °C
- seinän ulkopinnassa -5 °C
- yläpohjan sisäpinnassa 20 °C
- yläpohjan ulkopinnassa -5 °C.

Pintavastukset asetettiin Comsol-ohjelmassa seuraavasti (taulukko 9):

- seinän sisäpinta $0,13$ m²K/W
- seinän ulkopinta $0,13$ m²K/W
- katon sisäpinta $0,10$ m²K/W
- katon ulkopinta $0,04$ m²K/W
- katon ilmatila $0,2$ m²K/W.

Katon ilmatila otettiin huomioon seuraavasti (Ympäristöministeriö 2012, 42): Mallissa käytettiin yläpohjan ulkopinnalla pintavastuksena arvoa $0,04$ m²K/W $+0,2$ m²K/W = $0,24$ m²K/W.

Kuvassa 19 esitetään rakenteen lämpötilajakauma, jossa näkyy $0-1$ °C:n lämpötilavyöhyke magentavärillä ja $9-10$ °C:n lämpötilavyöhyke sinisellä värillä.



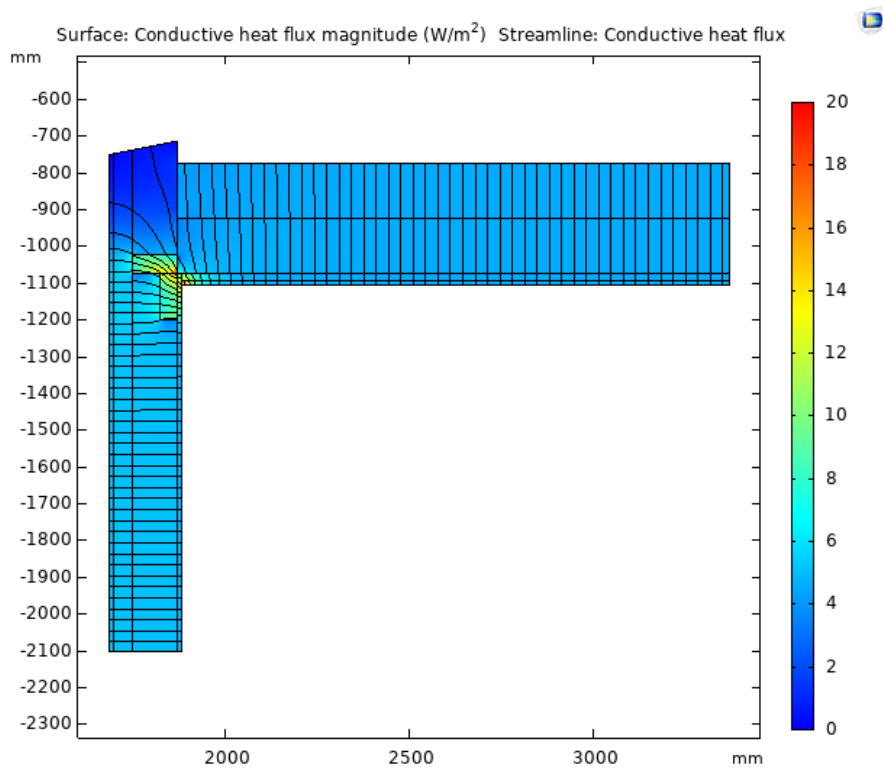
KUVA 19. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen lämpötilajakauma

8.3.2 Lämpövirtajakauma

Kuvassa 20 esitetään rakenteen lämpövirtajakauma. Ulkoseinän lämpövirta on hieman suurempi kuin yläpohjarakenteen. Comsol-ohjelmasta saatiin seuraavat lämpövirtojen numeeriset arvot:

- ulkoseinät 5,07 W/m²
- yläpohja 4,53 W/m².

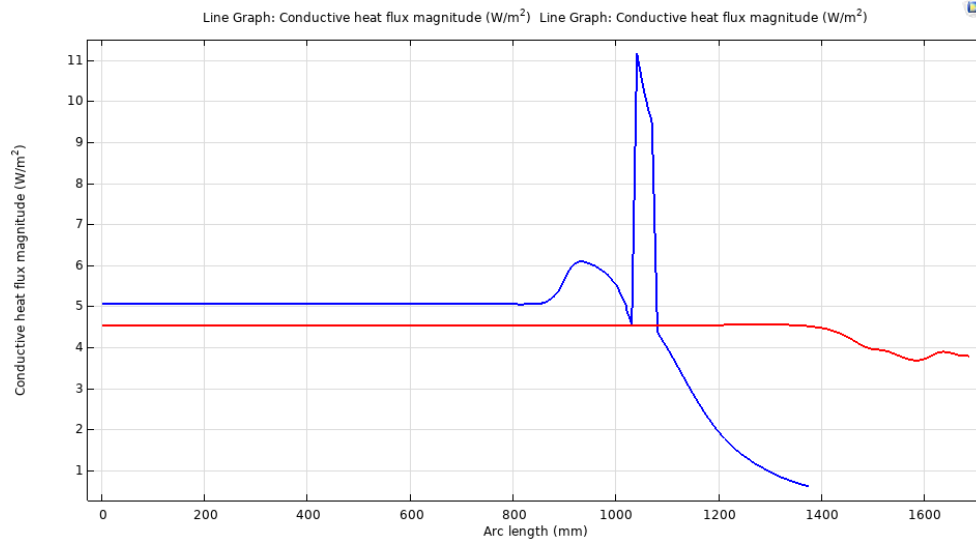
Lämpövuotoa esiintyy runkorakenteen kohdalla nurkkaliitoksen kohdalla.



KUVA 20. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen lämpövirtajakauma

8.3.3 Lämpövirtäkäyrä

Kuvassa 21 esitetään lämpövirran määrä rakenteen läpi. Punainen käyrä kuvaa lämpövirtaa pystysuunnassa (yläpohja) ja sininen vaakasuunnassa (seinä). Punainen lämpövirtäkäyrä on melko tasainen, kun taas sinisen käyrän maksimi on ulkoseinän puiseen runkorakenteen kohdalla. Mallinus tehtiin Comsol 5.6 -versiolla.



KUVA 21. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen lämpövirtakäyrät

8.3.4 Viivamainen lisäkonduktanssi

Viivamainen lisäkonduktanssi määritettiin 1 °C:n lämpötilaerolla, jolloin käytetyt lämpötilat olivat:

- seinän sisäpinnassa 1 °C
- seinän ulkopinnassa 0 °C
- lattiassa 1 °C
- maan pinnassa 0 °C.

Adiabaattireunaehdot ja pintavastukset pysyvät samoina kuin lämpötila- ja lämpövirtajakauman laskennassa.

Seinäosan ja yläpohjaosan yhteenlaskettu lämpövirta on 0,52702 W/(mK).

Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 17.

$$\psi = L_{2D} - U_1 \cdot l_1 - U_2 \cdot l_2$$

$$L_{2D} = 0,52702 \text{ W/(mK)}$$

$$U_1 = 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ulkoseinän } U\text{-arvo}$$

$$U_2 = 0,18106 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ yläpohjan } U\text{-arvo}$$

$$l_1 = 1 \text{ m ulkoseinäosan pituus (kuva 17)}$$

$l_2 = 1,5 \text{ m}$ yläpohjaosan pituus (kuva 17)

$$\psi = 0,52702 \text{ W/mK} - 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1 \text{ m} - 0,18106 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1,5 \text{ m}$$

$$\psi = 0,0528 \text{ W/mK}$$

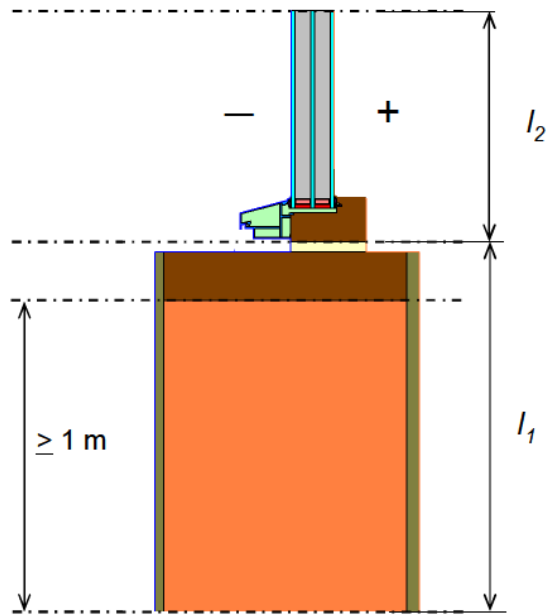
Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja puurakenteisen yläpohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,05 \text{ W/(mK)}$ (taulukko10). Merkillepantavaa on, että yläpohjan U-arvo on suurempi kuin alapohjan, mutta lämpövirta on toisinpäin. Tämä johtuu suuremmasta lämpötilaerosta yläpohjarakenteessa kuin alapohjassa.

8.4 Ikkunan ja ulkoseinän liitos

Yleensä lämpöä siirtyy sisältä ulos, mutta auringonsäteily taas luovuttaa lämpöä sisäilmaan. Ikkunarakenteessa lämmön siirtyminen tapahtuu johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla sekä lämpöä siirtyy ilmavuotona (Siikanen 2014, 40). Opinnäytetyössä tarkasteltiin lämmön siirtymistä johtamalla.

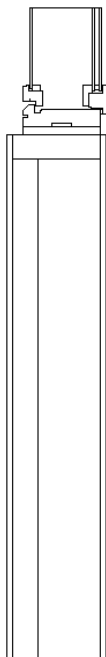
Ikkunan lämmönläpäisykerroin lasketaan standardin SFS-EN ISO 10077 mukaan, kun kyseessä on 3-lasinen ikkuna (SFS-EN ISO 10077-1:2017, 21). Ilmavälin lämmönvastus riippuu ilmavälin paksuudesta ja lasikerrosten lukumäärästä (Björkholtz 1987, 23). Lähteen mukaan leveämmän välin lämmönvastus on $0,175 \text{ m}^2\text{K/W}$, kuten myös standardin SFS-EN ISO 10077 mukaan (SFS-EN ISO 10077-1:2017, 33). Kapeammalle välille annetaan lämmönvastukseksi $0,160 \text{ m}^2\text{K/W}$. Ihanteellinen lasiväli on 30-50 mm ja lasivälin kasvaessa vielä suuremmaksi lisääntyy ilmankierto eli luonnollinen konvektio, joka johtuu ilman tiheyseroista. Ikkunan lämmöneristävyys tällöin jopa heikenee (Siikanen 2014, 57).

Kuvassa 22 on esitetty mallin mitoitus Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan (Ympäristöministeriö 2012, 26).



KUVA 22. Ikkunan ja ulkoseinän liitoksen kylmäsilän mallinnus (Ympäristöministeriö 2012, 26)

Kuvassa 23 on esitetty CAD-ohjelmalla tehty ikkunaliittymän malli Comsol-ohjelmaa varten. Mittoja ja muuta tietoa ei laiteta malliin.



KUVA 23. Comsol-ohjelmalle luotu malli ikkunan ja ulkoseinän liitoksesta

Rakenteen mallinnus tehtiin samalla periaatteella kuin edellisissä rakenteissa.

Rakenteiden osuudet mallissa olivat seuraavat (kuva 22) (Ympäristöministeriö 2012, 52):

- ulkoseinä $l_1 = 1,065$ m
- ikkuna $l_2 = 0,239$ m.

8.4.1 Lämpötilajakauma

Lisättiin adiabaattireunaehdot malliin rakenteiden rajoittaville osille.

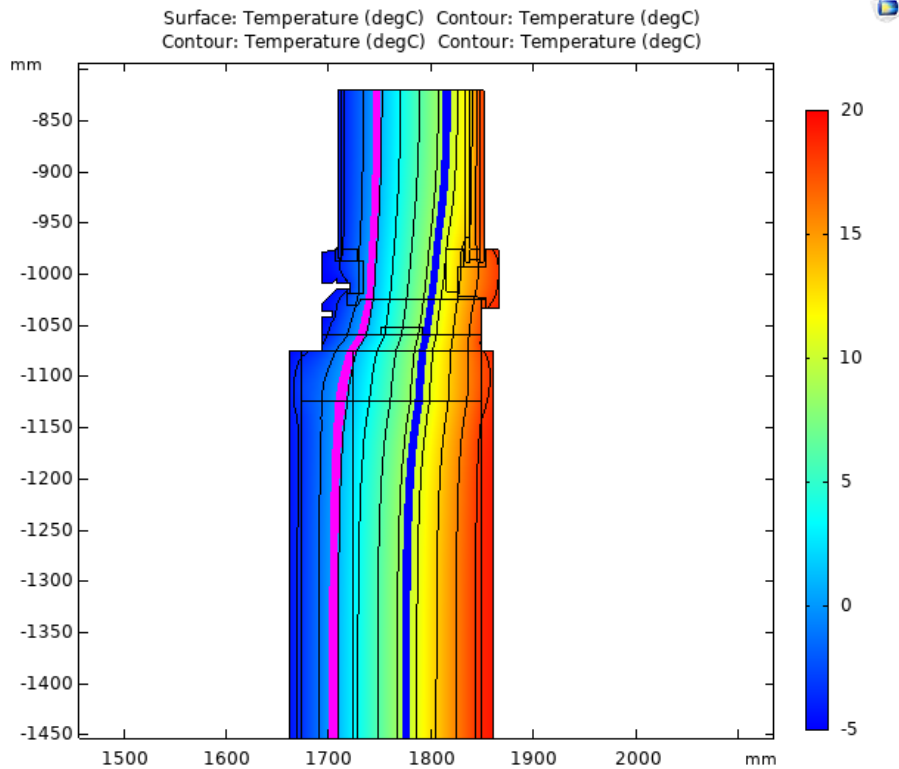
Mallissa käytetyt lämpötilat olivat

- seinän sisäpinnassa 20 °C
- seinän ulkopinnassa -5 °C
- ikkunan sisäpinnassa 20 °C
- ikkunan ulkopinnassa -5 °C.

Pintavastukset asetettiin Comsol-ohjelmassa seuraavasti (taulukko 9):

- seinän sisäpinta $0,13$ m²K/W
- seinän ulkopinta $0,13$ m²K/W
- ikkunan sisäpinta $0,13$ m²K/W
- ikkunan ulkopinta $0,04$ m²K/W.

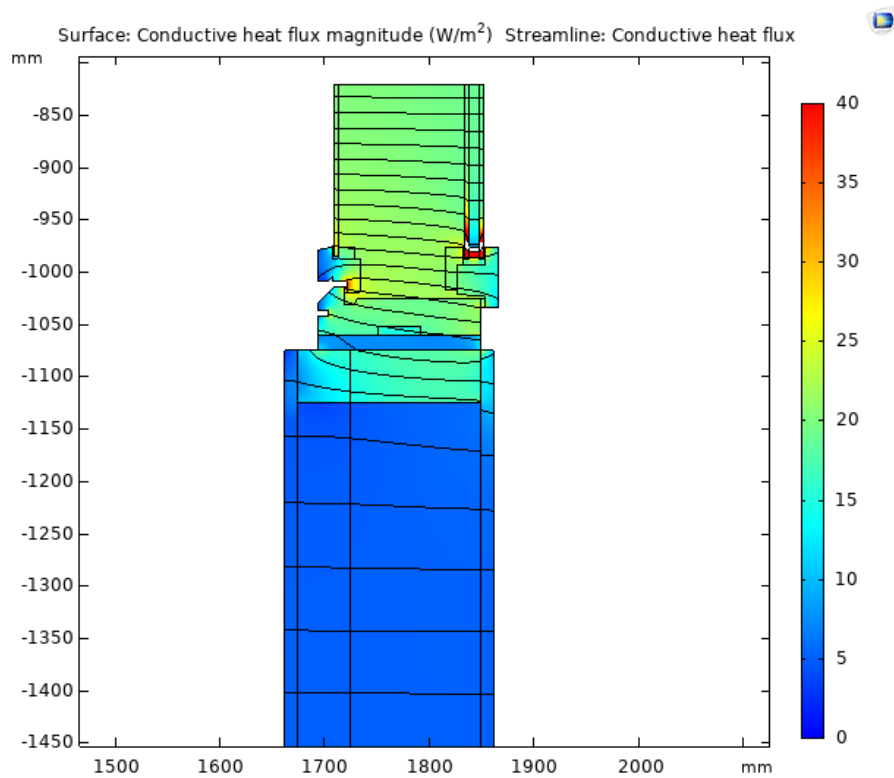
Kuvassa 24 esitetään rakenteen lämpötilajakauma, jossa näkyy $0-1$ °C:n lämpötilavyöhyke magentavärillä ja $9-10$ °C:n lämpötilavyöhyke sinisellä värillä. Molemmat vyöhykkeet asettuvat ikkunan leveämmän ilmatilan kohdalle ja seinärakenteessa eristeeseen.



KUVA 24. Ikkunan ja ulkoseinän liitoksen lämpötilajakauma

8.4.2 Lämpövirtajakauma

Kuvassa 25 esitetään rakenteen lämpövirtajakauma. Karmin kohdalla käyrästä tihenee, mikä merkitsee suurempaa lämpövirtaa. Siihen voidaan vaikuttaa valitsemalla eristävämpi karmimateriaali tai lisäämällä eristystä karmin kohdalle. Ikkunaosan lämpövirta on suurempi kuin seinärakenteen eli ikkunoilla on vaipan heikoin lämmöneristys (Björkholtz 1987, 23).



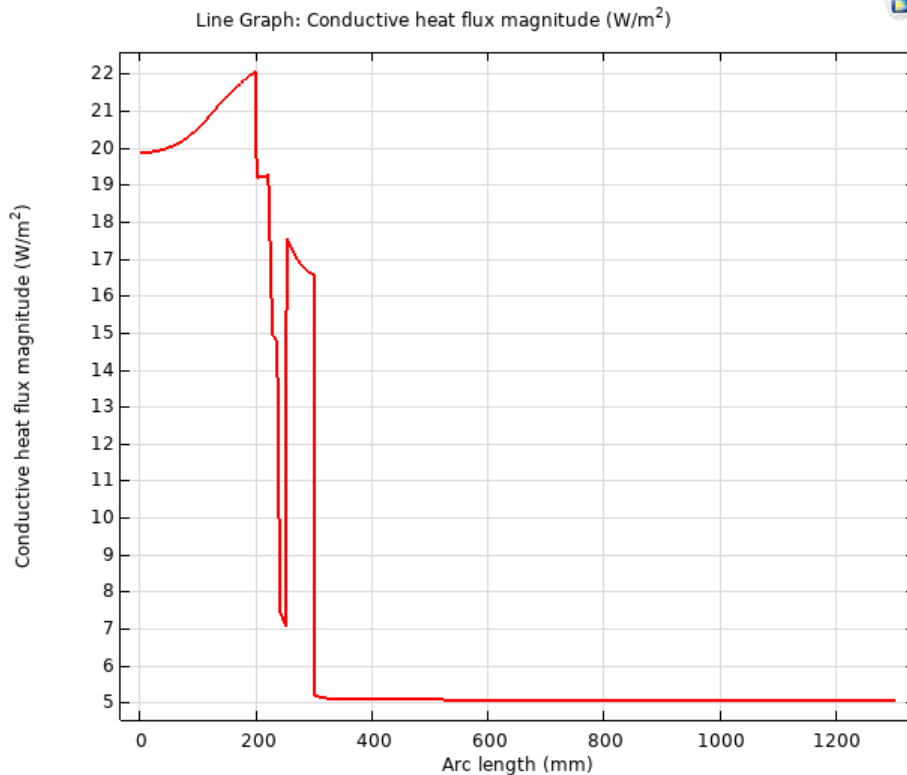
KUVA 25. Ikkunan ja ulkoseinän liitoksen lämpövirtajakauma

Comsol-ohjelmasta saatiin seuraavat lämpövirtojen numeeriset arvot:

- seinärakenne $5,07 \text{ W/m}^2$
- ikkunarakenne $26,78 \text{ W/m}^2$
- karmiosa $20,79 \text{ W/m}^2$.

8.4.3 Lämpövirtakäyrä

Kuvassa 26 esitetään lämpövirran määrä rakenteen läpi. Ikkunan ja karmion osuudet erottuvat selvästi suurempina arvoina.



KUVA 26. Ikkunan ja ulkoseinän liitoksen lämpövirtäkäyrä

8.4.4 Viivamainen lisäkonduktanssi

Viivamainen lisäkonduktanssi määritettiin yhden 1 °C:n lämpötilaerolla, jolloin käytetyt lämpötilat olivat

- seinän sisäpinnassa 1 °C
- seinän ulkopinnassa 0 °C
- ikkunan sisäpinnassa 1 °C
- ikkunan ulkopinnassa 0 °C.

Adiabaattireunaehdot ja pintavastukset pysyvät samoina kuin lämpötila- ja lämpövirtajakauman laskennassa.

Seinäosan ja ikkunaosan yhteenlaskettu lämpövirta on 0,46987 W/(mK).

Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 17.

$$\psi = L_{2D} - U_1 \cdot l_1 - U_2 \cdot l_2$$

$$L_{2D} = 0,6987 \text{ W/(mK)}$$

$$U_1 = 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ulkoseinän U-arvo}$$

$$U_2 = 0,7920 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ikkunan U-arvo}$$

$$l_1 = 1,065 \text{ m ulkoseinäosan pituus (kuva 22)}$$

$$l_2 = 0,239 \text{ m ikkunaosan pituus (kuva 22)}$$

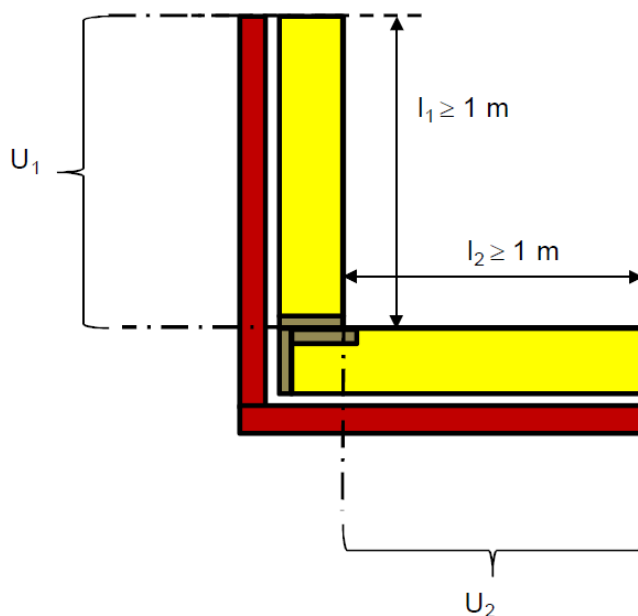
$$\psi = 0,46987 \text{ W/(mK)} - 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1,065 \text{ m} - 0,7920 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 0,239 \text{ m}$$

$$\psi = 0,065 \text{ W/(mK)}$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja ikkunan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,07 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 10).

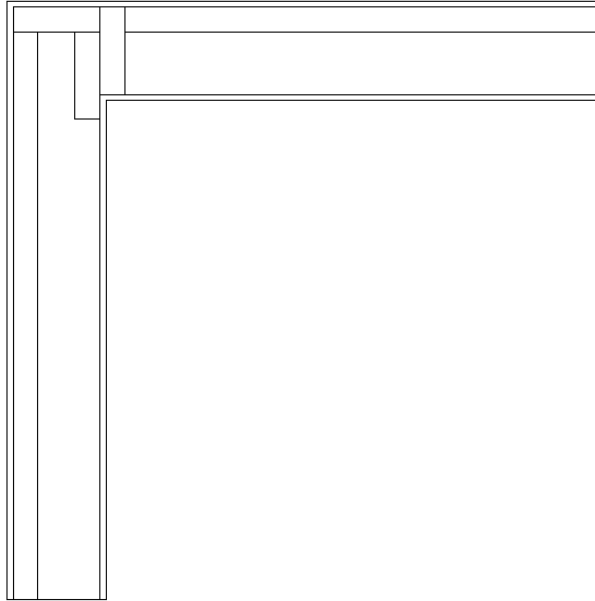
8.5 Ulkoseinien välinen liitos

Kuvassa 27 on esitetty mallin mitoitukset Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan (Ympäristöministeriö 2012, 29).



KUVA 27. Ulkoseinien välisen liitoksen kylmäsilän mallinnus (Ympäristöministeriö 2012, 29)

Kuvassa 28 on esitetty CAD-ohjelmalla tehty ulkoseinien liitoksen malli Comsol-ohjelmaa varten.



KUVA 28. Comsol-ohjelmalle luotu malli ulkoseinien välisestä liitoksesta

Rakenteen mallinnus tehtiin samalla periaatteella kuin edellisissä rakenteissa.

Rakenteiden osuudet asetettiin mallissa seuraavasti (Ympäristöministeriö 2012, 41): Ulkoseinä $l_1 = l_2 = 1,0$ m (kuva 27, molemmat ulkoseinät).

8.5.1 Lämpötilajakauma

Asetettiin adiabaattireunaehdot malliin rakenteiden rajoittaville osille.

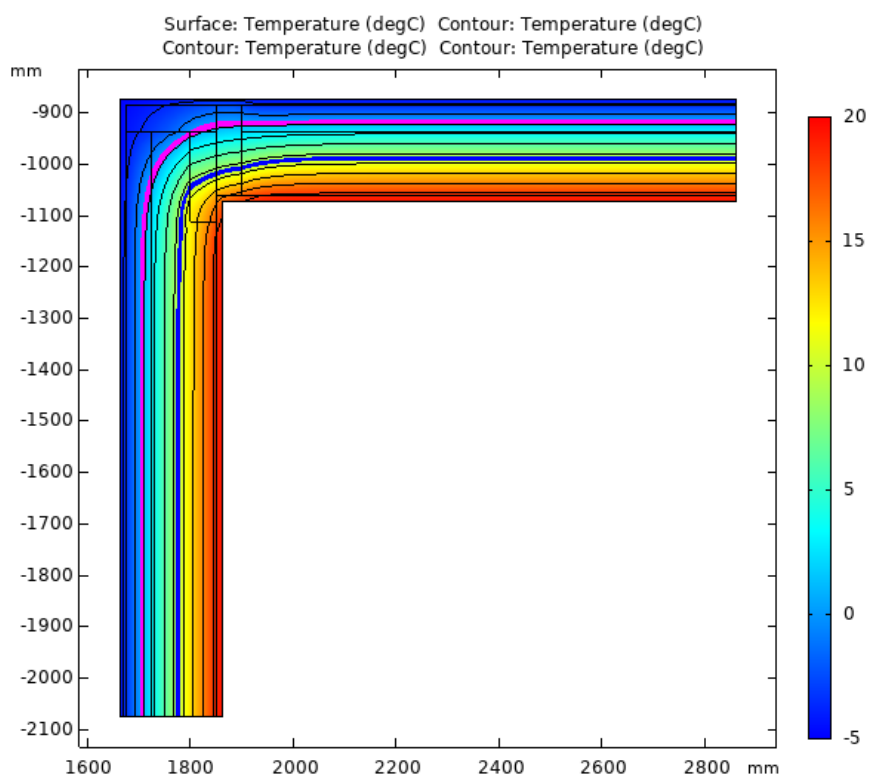
Mallinnuksessa käytetyt lämpötilat olivat

- seinän sisäpinnassa 20 °C
- seinän ulkopinnassa -5 °C.

Pintavastukset asetettiin Comsol-ohjelmassa seuraavasti (taulukko 9):

- seinän sisäpinta $0,13$ m²K/W
- seinän ulkopinta $0,13$ m²K/W.

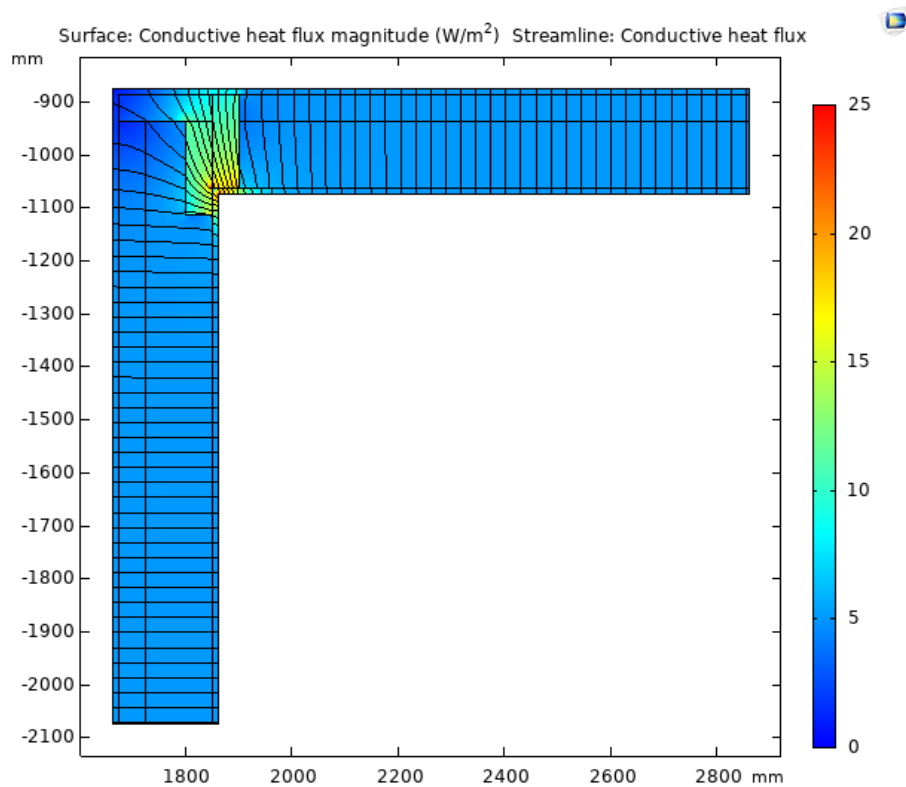
Rakenteen lämpötilajakauma esitetään kuvassa 29. 0-1 °C:n lämpötilavyöhyke näkyy magentavärillä ja 9-10 °C:n lämpötilavyöhyke sinisellä värillä. Molemmat vyöhykkeet asettuvat seinärakenteessa eristeeseen.



KUVA 29. Ulkoseinien välisen liitoksen lämpötilajakauma

8.5.2 Lämpövirtajakauma

Rakenteen lämpövirtajakauma esitetään kuvassa 30. Lämpövuotoa esiintyy seinien nurkassa runkotolppien kohdalla.



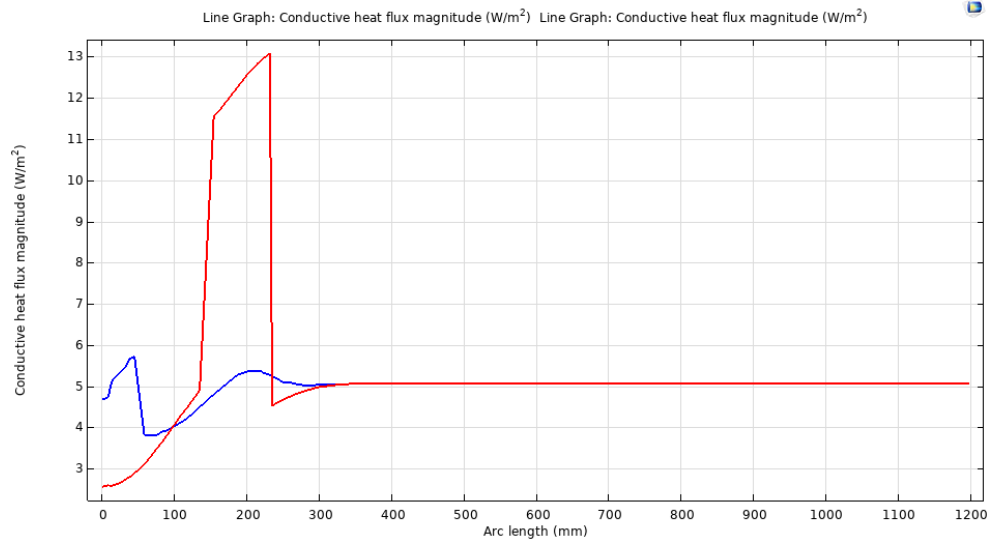
KUVA 30. Ulkoseinien välisen liitoksen lämpövirtajakauma

Comsol-ohjelmasta saatiin seuraavat lämpövirtojen numeeriset arvot:

- seinärakenne $5,07 \text{ W/m}^2$
- runkotolppa $14,8 \text{ W/m}^2$.

8.5.3 Lämpövirtakäyrä

Kuvassa 31 esitetään lämpövirran määrä rakenteen läpi. Punainen käyrä esittää lämpövirtaa pystysuunnassa, jolloin runkotolpan kohta näkyy selvästi. Sininen käyrä esittää lämpövirtaa vaakasuunnassa. Mallinnus tehtiin Comsol 5.6 -versiolla.



KUVA 31. Ulkoseinien välisen liitoksen lämpövirtäkäyrä

8.5.4 Viivamainen lisäkonduktanssi

Viivamainen lisäkonduktanssi määritettiin yhden 1 °C:n lämpötilaerolla, jolloin käytetyt lämpötilat olivat

- seinän sisäpinnassa 1 °C
- seinän ulkopinnassa 0 °C.

Adiabaattireunaehdot ja pintavastukset pysyvät samoina kuin lämpötila- ja lämpövirtajakauman laskennassa.

Seinäosien yhteenlaskettu lämpövirta on 0,46559 W/(mK). Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 17.

$$\psi = L_{2D} - 2 \cdot U_1 \cdot l_1$$

$$L_{2D} = 0,46559 \text{ W/(mK)}$$

$$U_1 = 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ulkoseinän } U\text{-arvo}$$

$$l_1 = 1,0 \text{ m ulkoseinäosan pituus (kuva 27)}$$

$$\psi = 0,46559 \text{ W/(mK)} - 2 \cdot 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1,0 \text{ m}$$

$$\psi = 0,0603 \text{ W/(mK)}$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinien välisen liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,04 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 10).

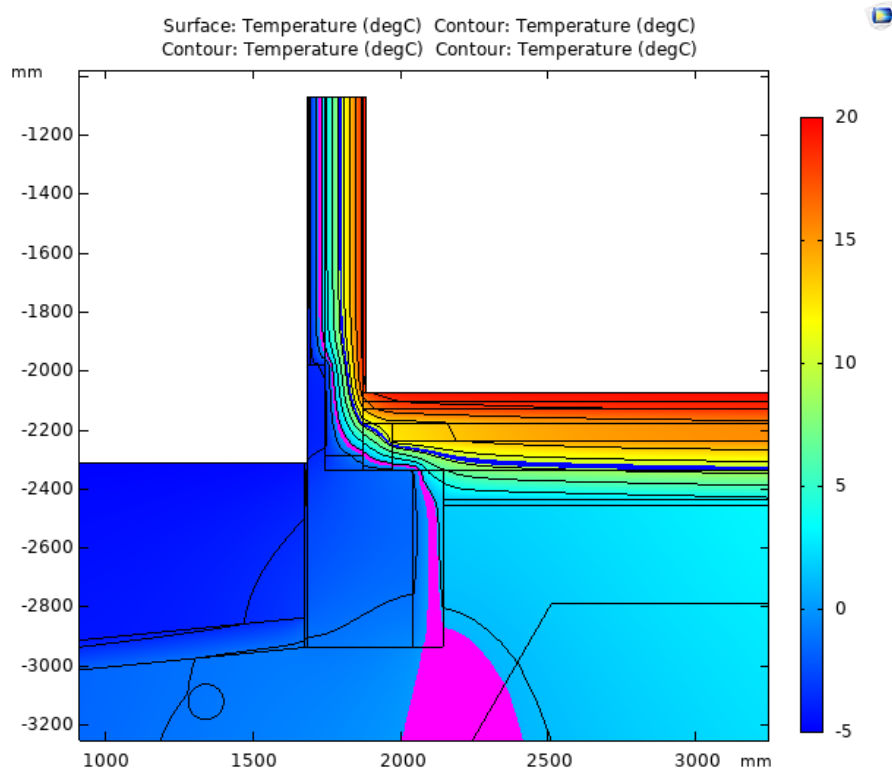
9 PIENTALON KORJAUSVAIHTOEHTOJEN TARKASTELU

9.1 Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos

9.1.1 Lämpötilajakauma

Alapohjan uusiminen ja routasuojaus

Kuvassa 32 esitetään alapohjan korjausvaihtoehdon (luku 7.1) lämpötilajakauma. Lämpötilavyöhyke 0-1 °C (magentaväri) on siirtynyt alapohjan alta perusmuurin sisäpintaan, mikä oli tarkoituskin.



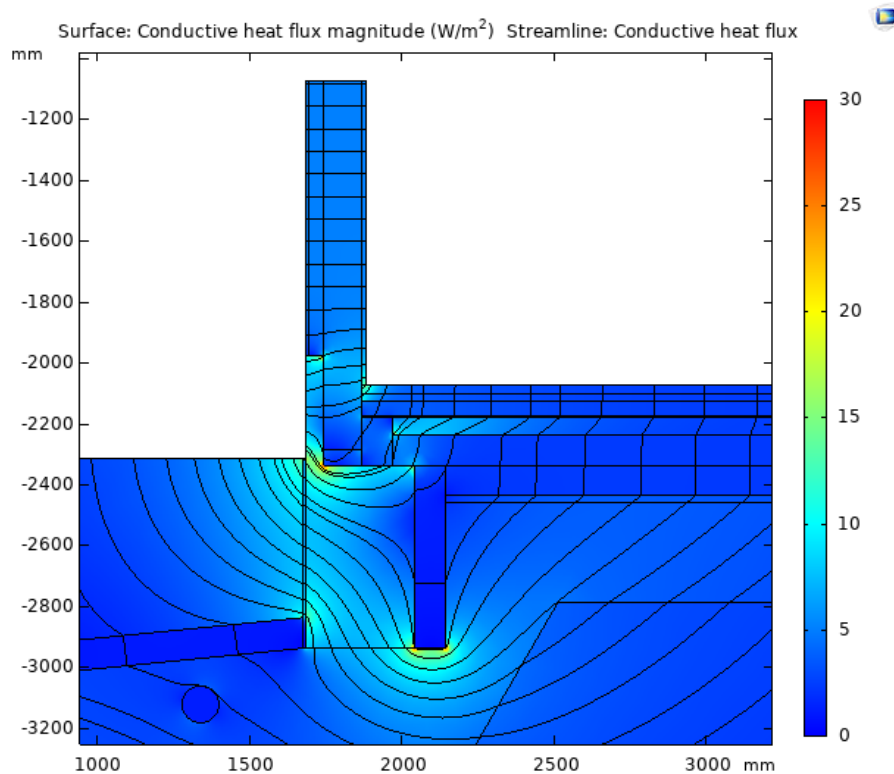
KUVA 32. Korjausvaihtoehdon alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin lämpötilajakauma

9.1.2 Lämpövirtajakauma

Rakenteen lämpövirtajakauma esitetään kuvassa 33. Comsol-ohjelmasta saatiin lämpövirtojen seuraavat numeeriset arvot:

- seinärakenne 5,07 W/m²
- alapohja 2,30 W/m².

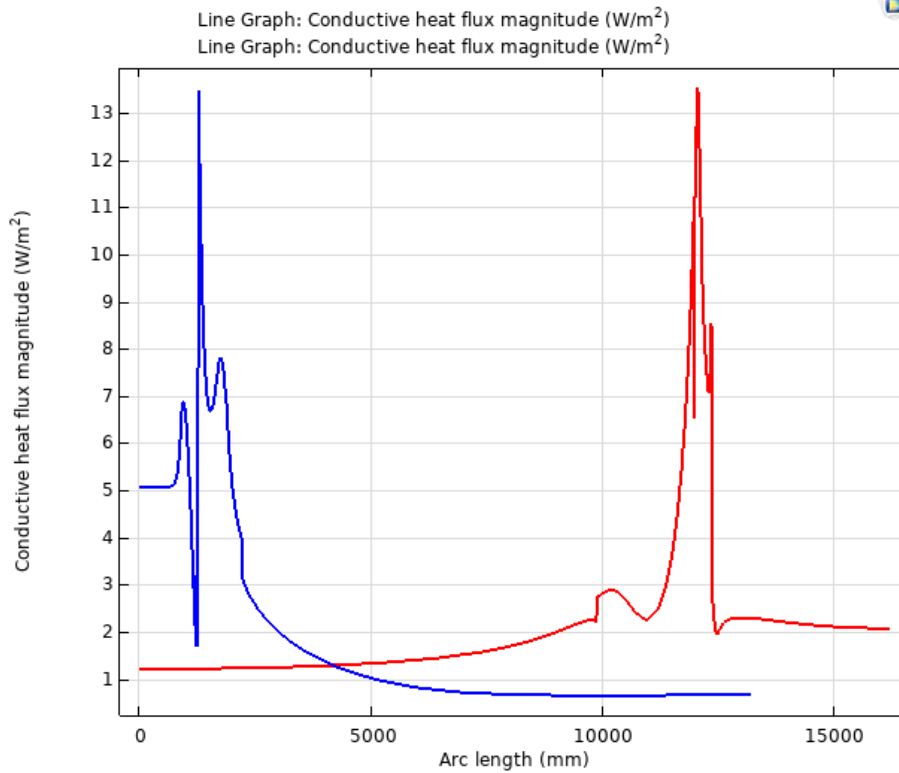
Alapohjan lämpövirta on hieman pienentynyt vanhaan rakenteeseen verrattuna. Muutos on vähäinen, mutta kosteusteknisesti rakenne toimii paremmin.



KUVA 33. Korjausvaihtoehdon alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin lämpövirtajakauma

9.1.3 Lämpövirtäkäyrä

Kuvassa 34 esitetään lämpövirran määrä rakenteen läpi. Sininen käyrä kuvaa lämpövirtaa vaakasuunnassa (seinä ja sokkeli) ja punainen pystysuunnassa (maa ja alapohja). Molempien käyrien maksimi-arvot ovat suurempia verrattuna vanhan rakenteeseen. Vanhassa rakenteessa alapohjan mineraalivillakerrokset osuvat kylmäsiilan korkeudelle, mikä vähentää lämpövirtapiikkiä. Siinä suhteessa vanha rakenne on parempi, mutta kokonaisuuden kannalta uusi rakenne toimii paremmin.



KUVA 34. Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin lämpövirtäkäyrät korjausvaihtoehdolle

9.1.4 Viivamainen lisäkonduktanssi

Comsol-ohjelma laskee seinäosan ja lattiaosan yhteenlasketuksi lämpövirraksi (L_{2d}) 0,46618 W/(mK).

Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 17.

$$\psi = L_{2D} - U_1 \cdot l_1 - U_2 \cdot l_2$$

$$L_{2D} = 0,46618 \text{ W/(mK)}$$

$$U_1 = 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ulkoseinän U-arvo}$$

$$U_2 = 0,04880 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ alapohjan U-arvo}$$

$$l_1 = 1 \text{ m ulkoseinäosan pituus}$$

$$l_2 = 4 \text{ m alapohjaosan pituus}$$

$$\psi = 0,46618 \text{ W/(mK)} - 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1 \text{ m} - 0,04880 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 4 \text{ m}$$

$$\psi = 0,068 \text{ W/(mK)}$$

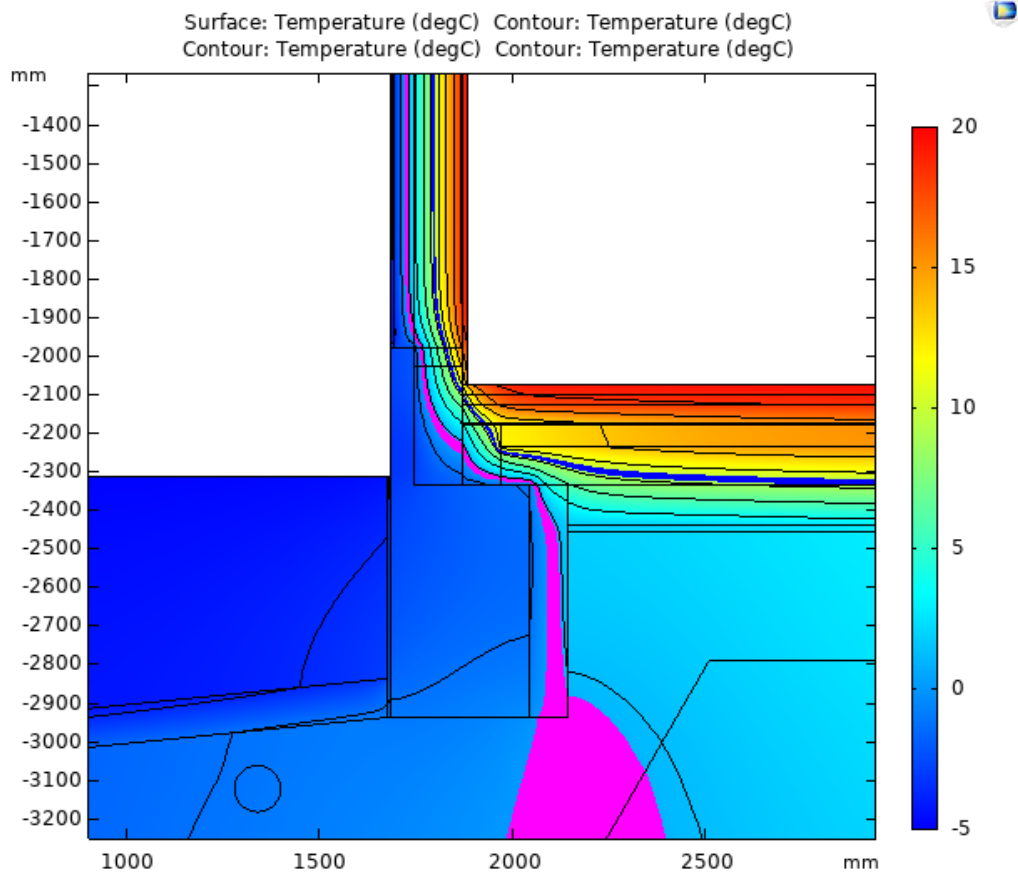
Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,10 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 10).

9.2 Valesokkelirakenteen korjaus

9.2.1 Lämpötilajakauma

Kevytsoraharkko

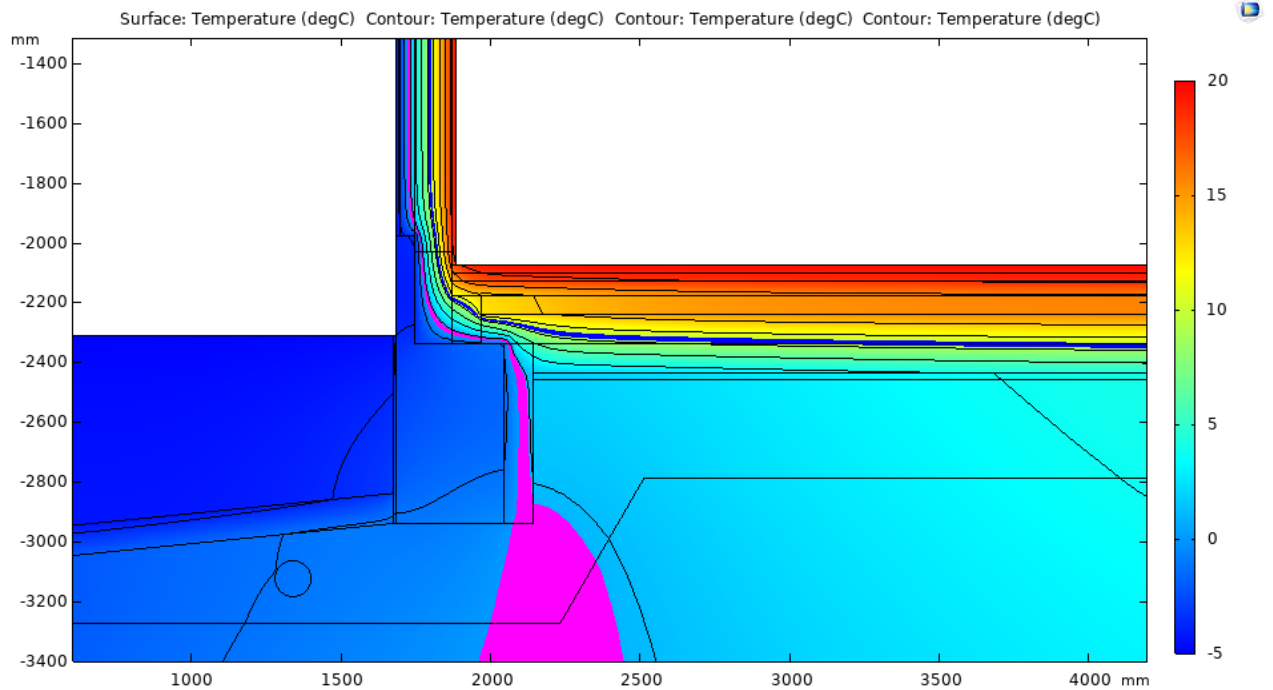
Rakennetta korjataan valesokkelin osalta käyttämällä kevytsoraharkkoa, kuten luvussa 7.2 on mainittu. Kuvassa 35 esitetään rakenteen lämpötilajakauma. Lämpötilavyöhyke 0-1 °C (magentaväri) on siirtynyt hieman seinän sisäpuolelle kevytsoraharkon kohdalla, mikä on haitallista.



KUVA 35. Kevytsoraharkolla korjatun valesokkelirakenteen lämpötilajakauma

Termokenkä ja -palkki

Kuvassa 36 esitetään lämpötilajakauma käyttämällä termokenkää valesokkelin korjaukseen. Jäätymisvyöhyke on siirtynyt ulommas korjauksen kohdalla (magentaväri). Mallinnus tehtiin Comsol 5.6 -versiolla.

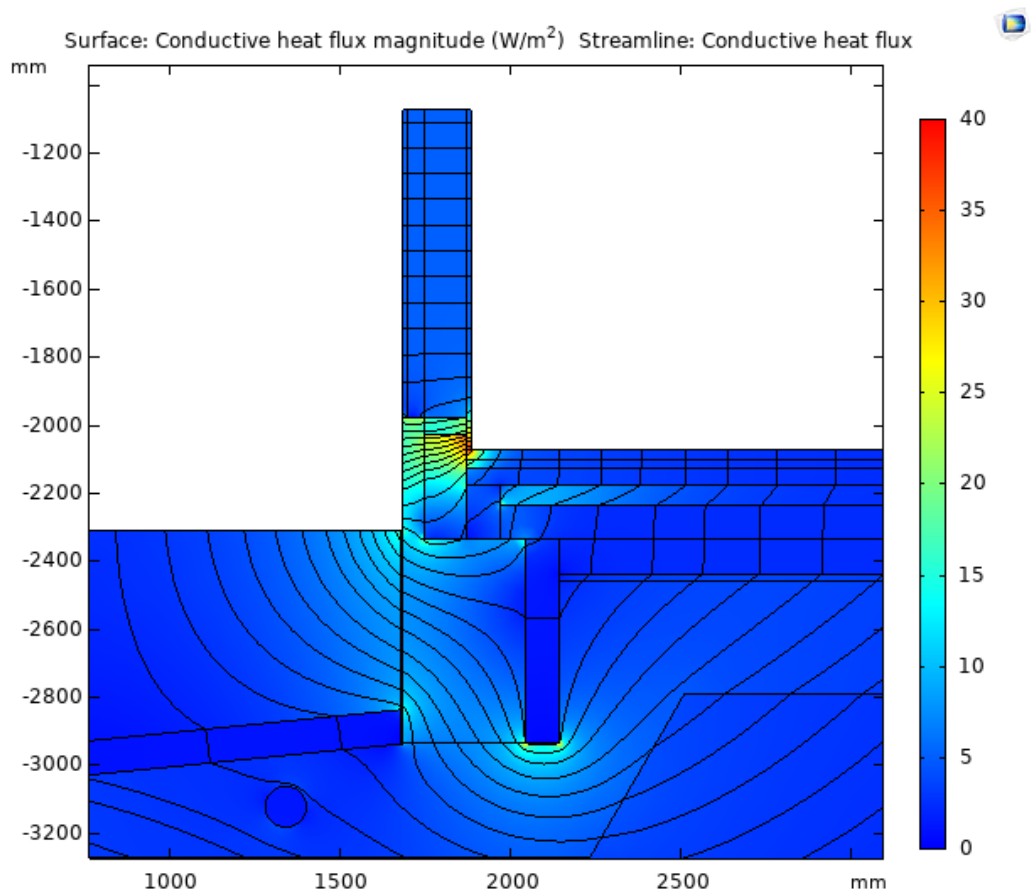


KUVA 36. Korjatun valesokkelirakenteen lämpötilajakauma käytettäessä termokenkää

9.2.2 Lämpövirtajakauma

Kevytsoraharkko

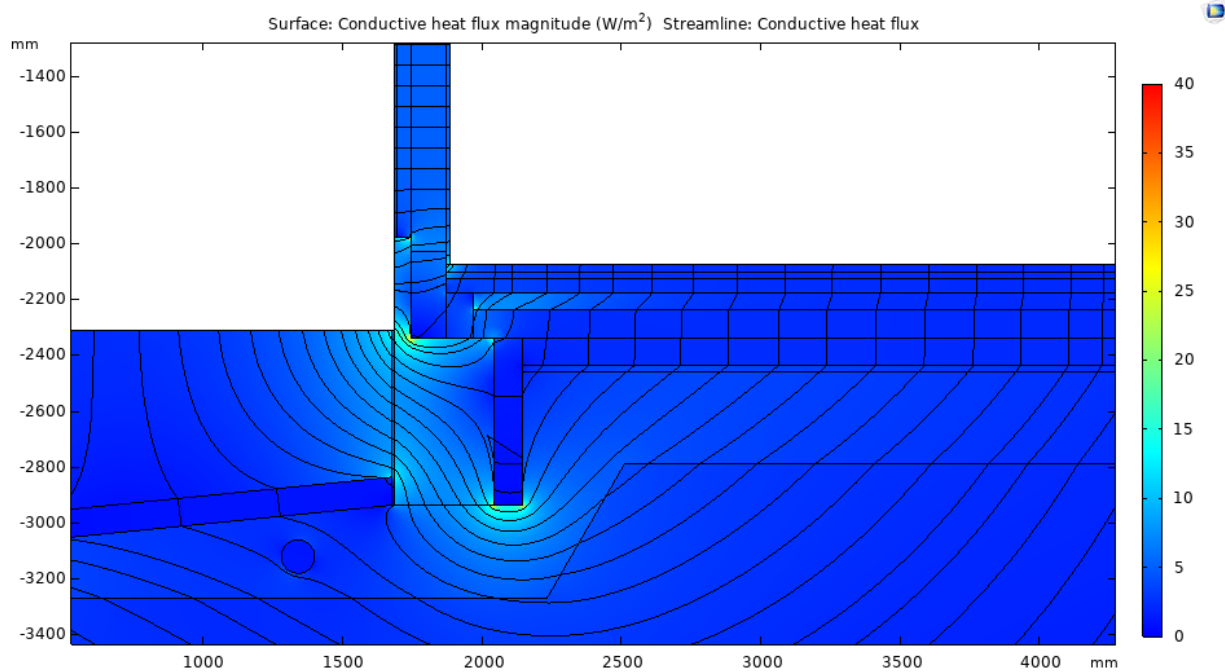
Kevytsoraharkolla korjatun rakenteen lämpövirtajakauma esitetään kuvassa 37. Ulkoseinän alaosaan laitettu kevytsoraharkko aiheuttaa suurentuneen lämpövirran liitoksen nurkkaan.



KUVA 37. Korjatun valesokkelirakenteen lämpövirtajakauma käytettäessä kevytsoraharkkoa

Termokenkä ja -palkki

Kuvassa 38 esitetään lämpövirtajakauma käytettäessä termokenkää korjaukseen. Lämpövirta on pienentynyt seinän ja alapohjan liitoksessa selvästi.

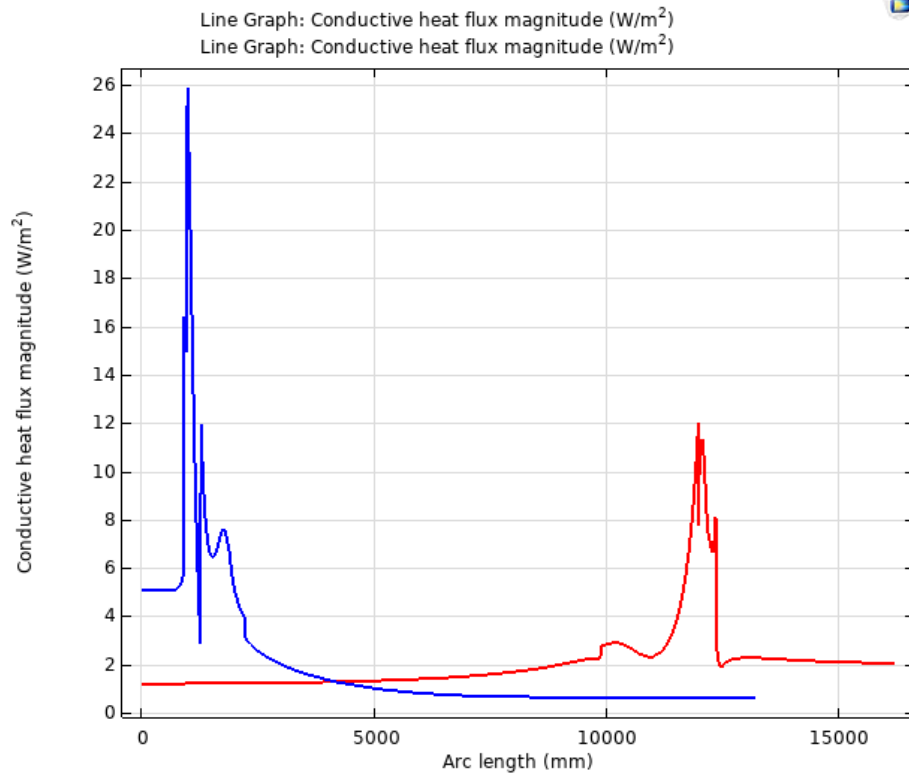


KUVA 38. Korjatun valesokkelirakenteen lämpövirtajakauma, kun korjaus on tehty termokengällä

9.2.3 Lämpövirtäkäyrä

Kevytsoraharkko

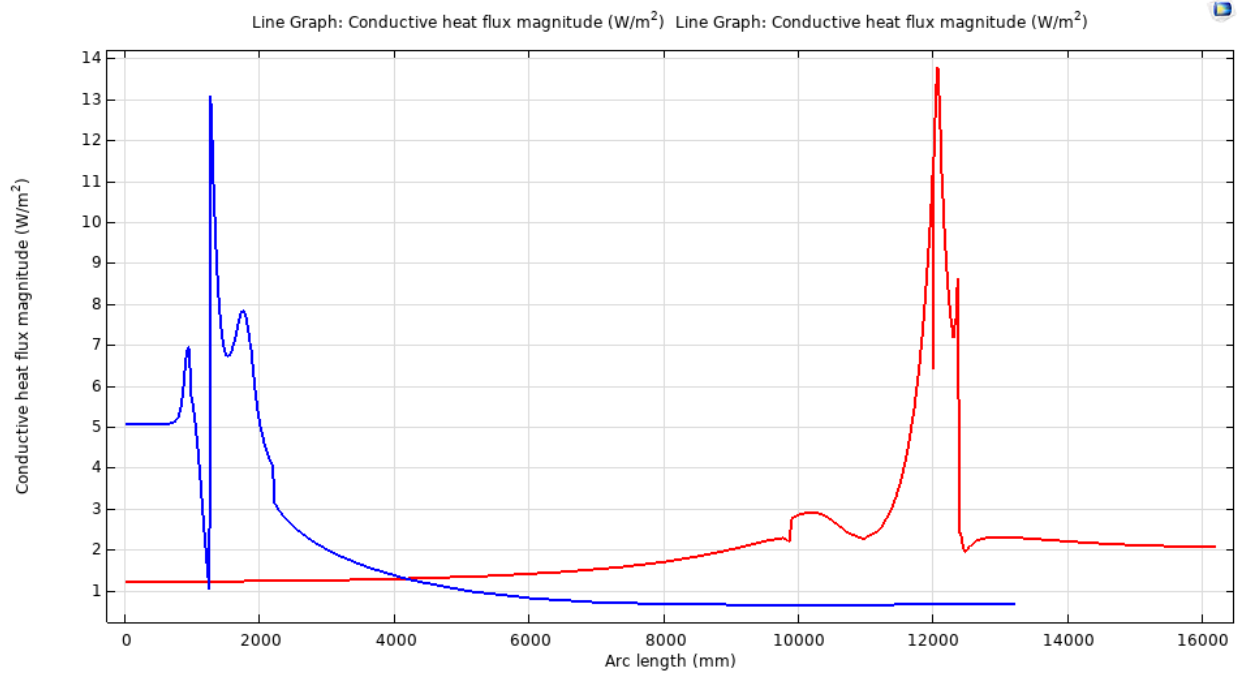
Kuvassa 39 esitetään rakenteen lämpövirtäkäyrä, jossa havaittiin selvä lämpövirtäpiikki vaakasuunnassa (sininen väri) kevytsoraharkon kohdalla.



KUVA 39. Korjatun valesokkelirakenteen lämpövirtäkäyrä, kun korjaus on tehty kevytsoraharkolla

Termokenkä ja -palkki

Kuvassa 40 esitetään lämpövirtäkäyrä termokenkää käytettäessä. Havaittiin selvä lämpövirtäpiikin aleneminen vaakasuunnassa (sininen väri) termokengän kohdalla verrattuna edelliseen käyrään.



KUVA 40. Korjatun valesokkelirakenteen lämpövirtäkäyrä, kun korjaus on tehty termokengällä

9.2.4 Viivamainen lisäkonduktanssi

Kevytsoharkko

Comsol-ohjelma laskee seinäosan ja lattiaosan yhteenlasketuksi lämpövirraksi (L_{2d}) 0,76900 W/(mK).

Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla 17.

$$\psi = L_{2D} - U_1 \cdot l_1 - U_2 \cdot l_2$$

$$L_{2D} = 0,76900 \text{ W/(mK)}$$

$$U_1 = 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ulkoseinän U-arvo}$$

$$U_2 = 0,1000 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ alapohjan U-arvo}$$

$$l_1 = 1 \text{ m ulkoseinäosan pituus}$$

$$l_2 = 4 \text{ m alapohjaosan pituus}$$

$$\psi = 0,76900 \text{ W/(mK)} - 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1 \text{ m} - 0,1000 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 4 \text{ m}$$

$$\psi = 0,1627 \text{ W/(mK)}$$

Lisäkonduktanssi suurenee huomattavasti kevytsoraharkon takia. Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,10 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 10).

Termokenkä ja -palkki

Comsol-ohjelma laskee seinäosan ja lattiaosan yhteenlasketuksi lämpövirraksi (L_{2d}) $0,63048 \text{ W/(mK)}$.

Lisäkonduktanssi laskettiin kaavalla (17).

$$\psi = L_{2D} - U_1 \cdot l_1 - U_2 \cdot l_2$$

$$L_{2D} = 0,63048 \text{ W/(mK)}$$

$$U_1 = 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ ulkoseinän U-arvo}$$

$$U_2 = 0,1000 \text{ W/(m}^2\text{K)} \text{ alapohjan U-arvo}$$

$$l_1 = 1 \text{ m ulkoseinäosan pituus}$$

$$l_2 = 4 \text{ m alapohjaosan pituus}$$

$$\psi = 0,63048 \text{ W/(mK)} - 0,20263 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 1 \text{ m} - 0,1000 \text{ W/(m}^2\text{K)} \cdot 4 \text{ m}$$

$$\psi = 0,0242 \text{ W/(mK)}$$

Lisäkonduktanssi pienenee huomattavasti käytettäessä termokenkää verrattuna kevytsoraharkkoon. Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,10 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 10).

10 PIENTALON KOSTEUSTARKASTELUT

Ilman vesihöyry pyrkii tiivistymään nesteeksi rakennusosan pinnalle tai sen sisään ilmahuokosiin, kun ilman kosteus ylittää ilman kyllästymiskosteuden. Huoneilma sisältää yleensä enemmän vesihöyryä kuin kylmempi ulkoilma, jolloin vesihöyryn diffuusio suuntautuu sisältä ulos suuremman osapaineen johdosta. Höyrynsulun tehtävänä on rajoittaa huoneilman kosteuden siirtymistä ulkoseinään ja yläpohjaan. Rakenteen vesihöyrynvastuksen tulee pienetä edettäessä huoneilmasta ulospäin. (RT 05-10710, 2.) Rakenteiden kosteustarkastelut tehtiin Laskentapalvelu-ohjelman avulla ulkoseinälle ja yläpohjalle.

10.1 Alapohja

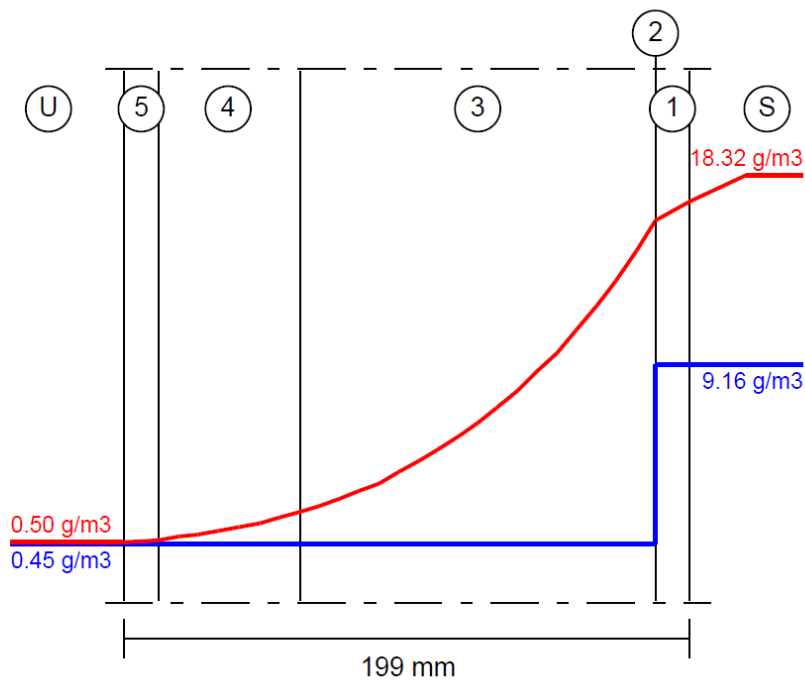
Vanhassa rakenteessa on laitettu kosteuseristys sorakerrosta vasten, joka kerää kosteutta alapohjan alaosaan. Korjausvaihtoehtona voidaan käyttää lämmöneristettä, jolla on suuri vesihöyrynvastus. Betonin yläpuolelle eristevillan alle laitetaan bitumikermi (RT 83-11009, 22). Puulattia rakoi- neen toimii kosteutta läpäisevänä pintana, jolloin kuivuminen on mahdollista.

Veden jäätymisvyöhyke (0-1°C) asettuu ulkoseinän alaosassa eristeen ulkopuoliselle osalle ja sokkelin kohdalla alapohjan puolelle maarakenteeseen nykyisessä rakenteessa (kuva 13). Alapohjan korjatussa rakenteessa vyöhyke on seinäosan kohdalla samassa kohtaa, mutta sokkelin kohdalla se siirtyy ulommas pois maarakenteesta (kuva 32). Veden kondensoitumisvyöhyke on korjatussa rakenteessa hieman turvallisemmalla puolella (kuva 6).

Valesokkelin korjatussa rakenteessa kondensoitumisvyöhyke sijaitsee kevytsoraharkon kohdalla seinän alaosassa (kuva 35), kun korjaus on tehty kevytsoraharkolla. Eristeen kannalta tilanne on parempi. Termokengällä korjatussa rakenteessa jäätymisvyöhyke on siirtynyt lähemmäs seinän ulkopintaa, mikä on toivottavaa (kuva 36).

10.2 Ulkoseinä

Rakenteen kosteuskuvaaja on esitetty kuvassa 41. Rakenne pysyy kuivana, koska sininen käyrä pysyttelee punaisen alapuolella. Sininen käyrä kuvaa vesihöyryn pitoisuuskäyrää ja punainen vesihöyryn kyllästyspitoisuuskäyrää. Jos vesihöyryn pitoisuuskäyrä ylittää kyllästyspitoisuuskäyrän, muodostuu rakenteeseen kondenssialue. U-arvoksi tulee 0,22 W/m²K (taulukko 11) ja mitoitusilanteen lämpötilat olivat: $T_s = 21\text{ °C}$ ja $T_u = -26\text{ °C}$. Rakenne toimii kosteusteknisesti oikein.



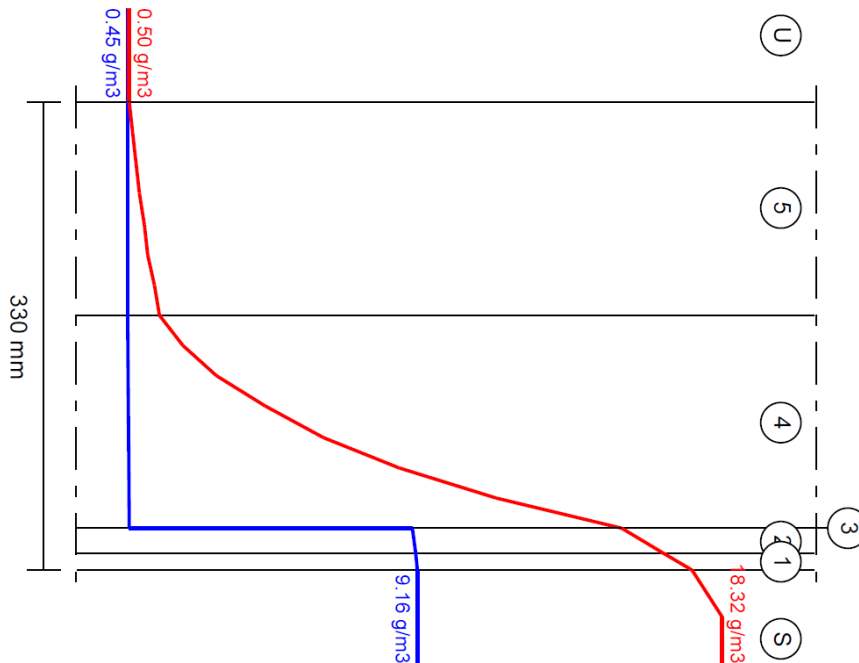
KUVA 41. Ulkoseinän kosteuskuvaaja

TAULUKKO 11. Ulkoseinän U-arvon laskenta

U-arvon laskentatulokset	
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo:	4.612 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alikiiarvo:	4.364 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastus:	4.488 m ² K/W
U-arvo (ilman korjaustermiä)	0.223 W/m ² K
Laskettu/annettu korjaustermi:	0.000 W/m ² K
U-arvo (korjaustermi huomioiden):	0.223 W/m ² K
U-arvo (pyöristetty arvo):	0.22 W/m ² K
Uudiskohteen vertailuarvo:	0.17 W/m ² K

10.3 Yläpohja

Rakenteen kosteuskuvaaja on esitetty kuvassa 42. Rakenne pysyy kuivana, koska sininen käyrä pysyttelee punaisen vasemmalla puolella. U-arvoksi tulee 0,19 W/m²K (taulukko 12) ja mitoitustilanteen lämpötilat olivat: $T_s = 21\text{ °C}$ ja $T_u = -26\text{ °C}$. Rakenne toimii kosteusteknisesti oikein. Sahanpurun vaihtaminen mineraalivillaan ei muuta kosteuskuvaajaa, mutta lämmöneristys paranee.



KUVA 42. Yläpohjan kosteuskuvaaja

TAULUKKO 12. Yläpohjan U-arvon laskenta

U-arvon laskentatulokset	
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo:	5.390 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alakiiarvo:	5.390 m ² K/W
Rakennusosan kokonaislämmönvastus:	5.390 m ² K/W
U-arvo (ilman korjaustermiä)	0.186 W/m ² K
Laskettu/annettu korjaustermi:	0.000 W/m ² K
U-arvo (korjaustermi huomioiden):	0.186 W/m ² K
U-arvo (pyöristetty arvo):	0.19 W/m ² K
Uudiskohteen vertailuarvo:	0.09 W/m ² K

Yläpohjan U-arvot muuttuvat seuraavasti:

- eristeenä sahanpuru $U = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$
- eristeenä PAROC eXtra $U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Sahanpuru on altis kosteuden vaikutukselle, joten se kannattaa vaihtaa.

11 PIENTALON ENERGIATARKASTELU

Rakennuksen lämmitys hoidetaan puulämmityksellä ja sähkökattilalla, joka lämmittää lämmityspattereissa kiertävää vettä ja käyttövettä. Opinnäytetyössä etsittiin keinoja sähkönkulutuksen alentamiseksi. Vaihtoehtoja tarkasteltiin Laskentapalvelut-ohjelmalla.

Rakenteiden U-arvot saatiin Laskentapalvelu- ja Comsol-ohjelmalla, joten niitä voitiin verrata toisiinsa. Energiatarkastelut tehtiin alkuperäiselle rakennukselle nykyisellä lämmityksellä, korjatulle yläpohjalle, ilma-vesilämpöpumpulle ja maalämpöpumpulle. Laskentapalvelu-ohjelmalla saatiin määritettyä rakennuksen energialuokka ja E-luku, joka kertoo rakennuksen laskennallisen osatoenergian kulutuksen neliometriä kohden vuodessa. Uusille lämmitysvaihtoehdoille laskettiin lopuksi takaisinmaksuaika.

11.1 Alkuperäinen rakennus ja lämmitys

Rakennuksen nykyisillä rakenneratkaisuilla ja lämmitysjärjestelmällä saatiin seuraavat tunnusluvut (taulukko 13):

- E-luku = 274 kWE/(m²vuosi)
- vaatimustaso 145 kWE/(m²vuosi)
- sähkönkulutus 19 390 kWh/vuosi.

TAULUKKO 13. Alkuperäisen rakennuksen E-luku ja energiankulutus

Kohde: , Rytiaho, Pohjasperäntie 15 A 93600 (PRT=)

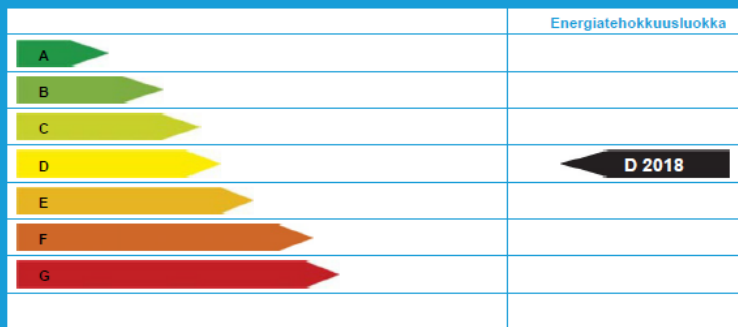
E-LUVUN LASKENNAN TULOKSET (2018 säädöksen mukaisesti)				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka	Yhden asunnon talot (Erilliset pientalot)			
Rakennuksen valmistumisvuosi	1982			
Lämmitetty nettoala, m ²	91.8			
E-luku, kWhE/(m²vuosi)	274 (> vaatimustaso=145)			
E-luvun erittely				
Käytettävät energiamuodot	Laskettu ostoenergia kWh/vuosi	Energiamuodon Kerroin -	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus	
			kWhE/vuosi	kWhE/(m ² vuosi)
Sähkö	19390	1.20	23268	253.5
Uusiutuva polttoaine (Puu)	3750	0.50	1875	20.4
YHTEENSÄ	23140		25143	273.9

Energiatodistuksen mukaan rakennus kuuluu luokkaan D (kuva 43). Parannettavaa olisi vaatimustason nähden.

ENERGIATODISTUS 2018

LUONNOSVERSIO - virallinen todistus ARA:n valvontajärjestelmästä

Rakennuksen nimi ja osoite:	Rytiäho Pohjasperäntie 15 A 93600
Pysyvä rakennustunnus:	
Rakennuksen valmistumisvuosi:	1982
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka:	
Yhden asunnon talot	
Todistustunnus:	
Energiatodistus on laadittu:	
Olemassa olevalle rakennukselle, havainnointikäynnin päivänäärä:	02.10.2020



Rakennuksen laskennallinen energiatodistusluokan vertailuluku eli E-luku	kWh _E /m ² vuosi
Uuden rakennuksen E-luvun vaatimus	274
(Huom! Ylläoleva on 2018 säädöksiin vaatimustaso mahdolliset helpotukset huomioiden)	145

KUVA 43. Nykyisen rakennuksen energiatodistus

11.2 Yläpohjan korjaus

Laskettiin tunnusluvut rakennukselle, kun yläpohjan sahanpuru korvataan eristevillalla. Lämmitystapaa ei vielä muutettu. Saatiin seuraavat tunnusluvut:

- E-luku = 259 kWh/(m²vuosi)
- vaatimustaso 145 kWh/(m²vuosi)
- sähkönkulutus 18 187 kWh/vuosi.

Toimenpiteen vuoksi yläpohjan U-arvo muuttui arvosta 0,19 arvoon 0,11 Wm²/K. Tällä ei näytä olevan merkittävää vaikutusta energiakulutukseen.

11.3 Ilma-vesilämpöpumppu

Sähkökattilan lisäksi asennetaan rakennukseen ilma-vesilämpöpumppu, jolloin arvot muuttuivat enemmän. Laskennassa oli mukana yläpohjan korjaus. Saatiin seuraavat tunnusluvut:

- E-luku = 197 kWE/(m²vuosi)
- vaatimustaso 145 kWE/(m²vuosi)
- sähkönkulutus 13 494 kWh/vuosi.

Ilma-vesilämpöpumpun asennus alentaa jo merkittävästi sähkönkulutusta, mutta energialuokka pysyy samana.

Ilma-vesilämpöpumppu lämmittelee talon käyttöveden ja sähkökattila hoitaa edelleen rakennuksen lämmityksen. Kylmillä ilmoilla ilma-vesilämpöpumppu tarvitsee toisen järjestelmän, joten sähkökattila saa olla mukana. Ilma-vesilämpöpumpun lämpötilan toiminta-alue on yli -25 °C, jonka jälkeen ulkoilmasta ei saada enää lämpöä. Lämmin käyttövesi voidaan lämmittelee enintään 50 °C:een, jonka ylityttyä tarvitaan lisälämmönlähde (Simola 2020, 24).

Käyttöveden lämmitys 55-60 °C:een aiheuttaa hyötysuhteen alenemisen, joten tehdään käyttöveden esilämmitys 30-40 °C:een. Tämän jälkeen vesi lämmitetään 60 °C:een sähkövastuksien avulla. (Energiatehokas koti, 2.)

Laskettiin investoinnin takaisinmaksuaika (T).

- arvioitujen investointikustannukset 5 000 €
- sähkön hinta 0,12 €/kWh
- vuosikorko 0 %.

Vuotuiset säästöt laskettiin seuraavasti:

$$0,12 \text{ €/kWh} \cdot (18\,187 \text{ kWh/vuosi} - 13\,494 \text{ kWh/vuosi}) = 563 \text{ €/vuosi}$$

Takaisinmaksuaika (T) koko investoinnille on

$$T = \frac{5\,000 \text{ €}}{563 \text{ €/v}} = 8,9 \text{ v}$$

Investointi kannattaa, jos rakennuksen käyttöikä on vielä 20 vuotta.

11.4 Maalämpöpumppu

Sähkökattilalämmitys korvataan maalämpöpumpulla, mutta varaajassa on vielä varalta sähkövastukset. Laskennassa oli mukana yläpohjan korjaus. Tunnusluvut muuttuivat seuraavasti:

- E-luku = 120 kWE/(m²vuosi)
- vaatimustaso 145 kWE/(m²vuosi)
- sähkönkulutus 7 557 kWh/vuosi.

Energialuokka asettuu luokkaan B ja vuosittainen sähkönkulutus alenee oleellisesti.

Maalämpöpumppua varten joudutaan tekemään maalämpökaivoja, joista lämpöä siirretään rakennukseen. Tämä lisää investointikustannuksia.

Kovimmilla pakkasilla käytetään varaajaan lisättyjä sähkövastuksia lämmitykseen. Lämpöpumppu mitoitetaan täten osateholle, koska huipputehon tarve vuodessa on vähäinen. Lämpimän käyttöveden lämpötila on nostettava ajoittain yli 55:een, jotta legionella bakteeria ei pääse kertymään (Si-mola 2020, 20). Enempää teknisiin yksityiskohtiin ei tässä puututtu työn laajuuden vuoksi.

Laskettiin investoinnin takaisinmaksuaika (T).

- arvioidut investointikustannukset 15 000 €
- sähkön hinta 0,12 €/kWh
- vuosikorko 0 %.

Vuotuiset säästöt laskettiin seuraavasti:

$$0,12 \text{ €/kWh} \cdot (1\ 8187 \text{ kWh/vuosi} - 7\ 557 \text{ kWh/vuosi}) = 1\ 276 \text{ €/vuosi}$$

Takaisinmaksuaika (T) koko investoinnille on

$$T = \frac{15\ 000 \text{ €}}{1\ 276 \text{ €/v}} = 11,8 \text{ v}$$

Rakennuksen käyttöikä on vielä 20 vuotta, joten korjausinvestoinnit kannattavat. Toisaalta sähkökattila on laitettu muutama vuosi sitten, joten sen poistaminen ei ole järkevää. Ilma-vesilämpöpumppu olisi täten suositeltavampi vaihtoehto, koska sähkökattilaa voidaan vielä käyttää.

12 OPINNÄYTETYÖN TULOKSET

Tarkastelemalla pientalon energiakulutusta ja kosteuskäyttäytymistä Comsol- ja Laskentapalveluohjelmalla pyrittiin löytämään tarvittavat korjauskohteet. Koska rakennus on tehty vuonna 1982, odotettavissa oli parannettavaa energiakulutuksen ja kosteuden hallinnan osalta. Myös silmämääräisesti tarkasteltuna puutteita löytyi, kuten valesokkelirakenne.

Rakennuksen energiatarkestelun perusteella suurin lämpövuoto tapahtuu ulkoseinien kautta. Nykyisessä rakennuksessa ulkoseinien kautta lämpöä menee ulos 26 %. Prosentuaalinen osuus kasvaa, jos lämmitysmuotona käytetään maalämpöpumppua. Tämän perusteella seiniin voisi lisätä eristystä. Seinien U-arvo on 0,22 W/(m²K) ja suunnitteluarvo on 0,17 W/(m²K) (taulukko 11). Rakennuksella on jo ikää lähes 40 vuotta, joten tämä korjaustoimenpide ei ole todennäköinen.

Yläpohjan U-arvo nykyisessä rakenteessa on 0,19 W/(m²K) ja vertailuarvo 0,09 W/(m²K) (taulukko 12). Vaihtamalla yläpohjan sahanpurueristeet mineraalivillaan U-arvoksi tulee 0,11 W/(m²K), joten sahanpuru vaihdetaan.

Ulkoseinien ja yläpohjan kosteuskäyttäytyminen on vaatimusten mukaista. Alapohjassa veden jäätymisvyöhyke (0-1 °C) siirtyy alapohjan korjatussa rakenteessa pois alapohjan alta, joten se on turvallisemmalla puolella. (Kuvat 13 ja 32.) Valesokkelin termokengällä korjatussa rakenteessa jäätymisvyöhyke asettuu korjauksen kohdalla ulommas seinän alaosassa (kuva 36), joka on kosteuden kannalta parempi.

Ikkunoiden lämmöneristävyys on riittävä, koska U-arvoksi saadaan 0,8 W/(m²K). Tämän päivän vaatimukset edellyttävät U-arvoksi enintään 1,0 W/(m²K) (Ikkunawiki 2021). Lämpövirta on huomattavasti suurempi ikkunan kuin seinien kohdalla. (Kuvat 25 ja 26.) Tämä puoltaisi niiden uusimista, mutta se tuskin on taloudellisesti kannattava.

Alapohjan korjaaminen vaatisi betonin poistamista, joten alapohjarakenteita ei uusittane. Valesokkelirakenne kuitenkin tutkitaan tarkemmin avaamalla rakennetta. Tarvittavat toimenpiteet tehdään tulosten perusteella. (Luku 7.1.) Routasuojauksen lisääminen on perusteltua, koska jäätymisvyöhyke 0-1 °C on siirtynyt pois alapohjan alta.

Viivamainen lisäkonduktanssi ylittyy ulkoseinien välisen liitoksen osalta. Sen arvo on 0,06 W/(mK) ja rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinien välisen liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille $\psi = 0,04$ W/(mK). (Taulukko 10.) Tämän merkitys kokonaisenergiakulutukseen on pieni. Alapohjan ja ulkoseinän välinen viivamainen lisäkonduktanssi pysyy taulukkoarvon alapuolella vanhassa ja korjatussa rakenteessa, paitsi kevytsoraharkon tapauksessa. Valesokkelirakenteen korjaamiseen käytetyn kevytsoraharkon todettiin nostavan huomattavasti viivamaista lisäkonduktanssia. Korvaaminen kevytsoraharkko termokengällä saatiin viivamainen lisäkonduktanssi laskemaan.

Valesokkelirakenteen korjaaminen termokenkä ja -palkkirakenteella on lämpötekniisesti ja kosteuden kannalta paras vaihtoehto. Rakenteessa on parempi lämmöneristys ja se on edullisempi toteuttaa.

Märkätilojen tarkastelua ei tässä työssä tehty, mutta niiden saneeraus on kuitenkin tehtävä. Lopulta päädyttiin vain yläpohjan sahanpurujen vaihtamiseen. Harkinnassa on ilma-vesilämpöpumpun laittaminen sähkökattilan lisälämmönlähteeksi.

13 POHDINTA

Opinnäytetyön alkuosassa käytiin läpi lämpö- ja kosteusteknisiä peruskäsitteitä. Lisäksi käsiteltiin lämmön ja kosteuden siirtyminen, U-arvon määrittäminen ja viivamaisen lisäkonduktanssin laskeminen. Sen jälkeen esitettiin tutkittavan rakennuksen rakenteet ja korjauskohteet. Rakenteiden lämpötila- ja lämpövirtajakaumien mallintaminen sekä viivamaisten lisäkonduktanssien laskenta Comsol-ohjelmalla oli vaativin osuus työstä. Kosteuskäyttäytymisen tutkiminen ja energiatarkastelu Laskentapalvelut-ohjelmalla olikin ennestään tuttua tekemistä.

Opinnäytetyö oli monipuolinen ja opettavainen erityisesti pientalon rakenteiden kosteuskäyttäytymisen ja Comsol-ohjelman soveltamisen osalta. Työn edetessä Comsol-ohjelman käyttö kehittyi lämpötila- ja lämpövirtojen tutkimisessa, mutta opittavaa vielä riittää. Laskentapalvelut-ohjelma on käyttökelpoinen kosteus- ja energiatarkasteluun. Lisäksi työstä sai myös ohjeita käytännön korjaustoimenpiteisiin perehtymällä lähteisiin. Valesokkeliranteen korjaustoimenpiteisiin tutustuminen oli opettavaista. Lähdeluettelosta olisi kertynyt laajempikin, koska aineistoa oli hyvin saatavilla.

Lämpötila- ja lämpövirtojen sekä viivamaisen lisäkonduktanssin määrittämisen luotettavuus Comsol-ohjelmalla on riippuvainen mallin oikeellisuudesta. Rakenteiden lämmönjohtavuuden arvot voivat vaihdella olosuhteiden ja käytetyn materiaalin mukaan. Myös mallin reunaehtojen valinnalla on myös vaikutusta. Tässä työssä ei tutkittu tarkemmin mallien luotettavuutta muuten kuin vertaamalla U-arvoja Laskentapalvelut-ohjelmalla saatuihin tuloksiin, joissa oli havaittavissa pieniä eroja.

Seinien ja yläpohjan kosteuskäyttäytyminen saatiin selvitettyä luotettavasti Laskentapalvelut-ohjelmalla. Alapohjan osalta kosteuskäyttäytyminen pääteltiin lämpötilajakaumien avulla Comsol-ohjelmalla, mutta tarkempi tutkimus olisi aiheellinen, mikä tarkoittaisi rakenteen avaamista.

Rakennuksen riskirakenteet tulivat esille ja niille esitettiin korjaustoimenpiteet. Sähkönkulutusta voidaan alentaa esitetyillä toimilla, jotka ovat kannattavia ja ilmastoystävällisiä.

LÄHTEET

Auvinen, Miska 2012. Matalaperustusten kylmäsilta- ja lämpövirtatarkastelu Comsol Multiphysics-ohjelmalla. Oulun Seudun Ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 14.5.2021. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48533/Auvinen_Miska.pdf;jsessionid=36137B47DA1D6A8DBDF47B7B09B5FCB8?sequence=1.

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

Comsol Multiphysics User's Guide. Hakupäivä 20.4.2021. [COMSOL Multiphysics User's Guide \(csc.fi\)](https://www.csc.fi/comsol-multiphysics-user-s-guide).

Energiatehokas koti. Tutkittua säästöä ilma-vesilämpöpumpulla. Hakupäivä 8.6.2021. https://www.energiatehokaskoti.fi/files/384/Tutkittua_saastoa_ilma-vesilampopumpulla.pdf.

Finnfoam 2021. Valesokkelin korjaus. Hakupäivä 13.8.2021. <https://www.finnfoam.fi/kayttokohteet/seinat/valesokkelin-korjaus>.
https://youtu.be/i9l_VIAPD0c.

Harju, Pekka 2017. Talonrakennuksen perusteet. Luentomoniste. Oulun ammattikorkeakoulu.

Häkkinen, Sanna 2013. Tyypillisimpien 1970- ja 1980-luvuilla rakennettujen pientalojen energiatehokkuuden parantaminen. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 28.4.2021. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60305/Hakkinen_Sanna.pdf?sequence=1.

Ikkunawiki 2021. Talous ja ympäristö. Asunon energiatalous. Hakupäivä 6.6.2021. <https://www.ikkunawiki.fi/talous-ja-ymparisto/u-arvo/>.

Kallio, Vesa 2019. Pohjarakennuksen perusosaaminen. Routasuojaus. Luentomoniste. Oulun ammattikorkeakoulu.

Kosteus- ja homealkoot. Ohjeita kosteusvaurioiden kartoitukseen. Tunnista ja tutki riskirakenne. Opetusmateriaali. Pientalojen riskirakenteet. Hakupäivä 11.8.2021. <https://hometalkoot.fi>.

Laurinen, Minna 2011. 1980-luvun pientalojen rakenneratkaisut. Niiden yleisimmät ongelmakohtat ja korjausehdotukset. Aducate Reports and Books 10/2011. Kuopio: Koulutus- ja kehittämispalvelu Aducate. Itä-Suomen yliopisto. Hakupäivä 28.4.2021. <https://docplayer.fi/750369-1980-luvun-pientalojen-rakenneratkaisut.html>.

Outinen, Katja 2018. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen kosteusteknisestä toimivuudesta. Hakupäivä 16.8.20121. <https://www.ril.fi/media/2018/jasenyys/tekniikkaryhmat/2.-outinen-ym.pdf>.

RIL 250-2011. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Saarijärvi. Saarijärven Offset Oy.

RIL 261-2013. Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki. Tammerprint Oy.

RT 05-10710. Kosteus rakennuksissa. Ohjetiedosto marraskuu 1999. Rakennustietosäätiön toimikunta TK 205 Kosteusvauriot.

RT 82-10829. Puujulkisivut. Ohjetiedosto syyskuu 2004. Rakennustietosäätiön toimikunta TK 170 Puurakenteet. Hakupäivä 12.5.2021. https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fWAYBtNT/VawO8zYsd/RT82-10829_Puujulkisivut.pdf.

RT 83-11009. RT AP 419. Alapohjarakenteita. Ohjeet lokakuu 2010. Rakennustietosäätiö RTS:n toimikunta TK 224 Rakennetyypit.

SFS-EN ISO 10456+AC 2008. Rakennusaineet ja tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 10077-1:2017. Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 1: General (ISO 10077-1:2017). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. (ISO 10211:2017). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 6946:2017. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO 6946:2017). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

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

Simola, Johannes 2020. Energia- ja kustannustehokas lämmitysjärjestelmä. Turun ammattikorkeakoulu. LVI-tekniikka. Opinnäytetyö. Hakupäivä 4.6.2021. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020121127738>

Sisäasiainministeriö 1976. C2. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Veden ja kosteuden eristys. Määräykset 1976. Hakupäivä 28.4.2021. https://www.ouka.fi/documents/486338/20585871/C2_1976_Veden_ja_kosteudeneristys.pdf/37867f67-62de-4e43-ad69-eb2d9c90db96.

Sisäilmayhdistys. Puolueetonta tietoa sisäilmasta. Hakupäivä 30.8.2021. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Maanvastainen-betonilaatta>.

Vinha, Juha 2010. Lämpö ja lämmön siirtyminen. RIL 255-2010. Hakupäivä 25.8.2021. <https://docplayer.fi/3499888-4-lampo-ja-lammon-siirtyminen.html>.

Ylihärtilä, Heikki 2004a. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille. Lämpö. Rafnet-oppimateriaalin teoriaosan osio: L (Lämpö). Copyright Rafnet-ryhmä. Hakupäivä 1.5.2021. <http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/lampoosio27092004.pdf>.

Ylihärsilä, Heikki 2004b. Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille. Kosteus. Rafnet-oppimateriaalin teoriaosan osio: K (Kosteus). Copyright Rafnet-ryhmä. Hakupäivä 1.5.2021. http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf.

Ympäristöministeriö 2012. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan. Hakupäivä 3.5.2021. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Viivamaisten-lisakonduktanssien-laskentaopas-0708E7A2_7EE5_4DA5_AEF2_2801630E2300-30996.pdf/895973ff-752c-fb4c-8496-4f13b954d6c9/Viivamaisten-lisakonduktanssien-laskentaopas-0708E7A2_7EE5_4DA5_AEF2_2801630E2300-30996.pdf?t=1603260205020.

Ympäristöministeriö 2015. Suomen rakentamismääräyskokoelma 2015. Hakupäivä 30.4.2021. <https://em..fi/rakentamismääräykset>.

Ympäristöministeriö 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 782/2017. Hakupäivä 4.5.2021. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782#Pidp445901824>.

Ympäristöministeriö 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Energiatehokkuus. Rakenteiden energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Hakupäivä 11.8.2021. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20122017-vain-korostukset-DFC56F1D_7C3A_404A_8E4F_4A77DE4C04F7-133701.pdf/8d81bc5c-67a0-183a-981f-01b78be8a2d5/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20122017-vain-korostukset-DFC56F1D_7C3A_404A_8E4F_4A77DE4C04F7-133701.pdf?t=1603260198444.

Ympäristöministeriö 2020. Rakennusten kosteustekninen toimivuus. Ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Hakupäivä 30.8.2021. [Rakennusten kosteustekninen toimivuus - Ymparisto.fi](https://www.ymparisto.fi/Fi/Ohje/1603260198444).

