

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas

Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamais-
ten lisäkonduktanssien laskentaan

27.4.2012

Esipuhe

Tämä opas käsittelee rakennusosien välisiä epäsäännöllisiä kylmäsiltoja, jotka uutena asiana otetaan huomioon rakennuksen energiatehokkuuden laskennassa vuoden 2012 rakentamismääräyskokoelman osissa D3/2012, C4/2012 ja D5/2012. Oppaassa käsitellään rakennusosien liitoksiin muodostuvien viivamaisten lisäkonduktanssien laskennan periaate ja esitetään esimerkkejä eri rakennetyyppien kylmäsilloista ja niihin liittyvien lisäkonduktanssien laskennasta.

Oppaan esimerkkejä, laskentamenetelmiä ja ohjeita noudattamalla voidaan laskea mitä erilaisempien rakennetyyppien lisäkonduktansseja. Oppaan tarkoituksena on helpottaa kylmäsiltojen laskentaa ja selventää määräysten ja ohjeiden tulkintaa. Oppaassa esitetty ei sellaisenaan ole rakentamismääräyskokoelman määräysten tai ohjeiden tasoinen kannanotto, joka sitoisi suunnittelua ja rakentamista.

Oppaan ovat laatineet Sitran Energiaohjelman ja ympäristöministeriön toimeksiannosta erikoistutkija Jorma Heikkinen VTT:ltä ja vanhempi tutkija Jukka Rantala sekä tutkija Virpi Leivo Tampereen teknillisestä yliopistosta. VTT:llä työhön ovat osallistuneet myös erikoistutkijat Ilpo Kouhia ja Kari Hemmilä.

Työtä ovat valvoneet ja ohjanneet Sitran puolesta johtava asiantuntija Jarek Kurnitski sekä ympäristöministeriön puolesta yli-insinöörit Pekka Kalliomäki ja Maarit Haakana.

Sisältö

Esipuhe.....	2
1 Johdanto	5
2 Määritelmiä ja käsitteitä	6
3 Kylmäsillat rakennuksen johtumislämpöhäviössä	7
3.1 Rakennuksen johtumislämpöhäviö.....	7
3.2 Rakennusosien välinen viivamainen lisäkonduktanssi.....	8
3.3 Lisäkonduktanssin lukuarvot eri maissa	10
4 Viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen	11
4.1 Menetelmän valinta	11
4.2 Standardit	12
4.3 Kylmäsiirtojen numeerinen laskenta.....	12
4.3.1 Laskentaperiaate	12
4.3.2 Laskentaohjelmat.....	13
4.3.1 Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentakaava.....	13
4.3.2 Laskenta-alueen rajaaminen	13
4.3.3 Pintavastukset	15
4.3.4 Materiaalien lämmönjohtavuudet	15
5 Laskentaperiaatteet eri liitostyypeille	16
5.1 Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos	16
5.2 Ryömintätilaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos	18
5.3 Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	23
5.4 Ulkoseinän ja välipohjan liitos	24
5.5 Ikkunan ja seinän liitos	26
5.5.1 Menettely apukarmin kuullessa seinän U-arvoon.....	27
5.5.2 Yksinkertaistettu menettely ikkunaliitoksen kylmäsillalle	27
5.6 Ulkoseinien välinen liitos	29
6 Esimerkkilaskelmat	31
6.1 Puurankainen ulkoseinä	31
6.1.1 Puurankainen ulkoseinä ja maanvastaisen alapohja	31
6.1.2 Puurankainen ulkoseinä ja puurankainen ryömintätilainen alapohja	37
6.1.3 Puurankaisten ulkoseinien väliset liitokset	40
6.1.4 Puurankaisten ulkoseinän ja puuyläpohjan liitos.....	42
6.1.5 Puurankaisten ulkoseinän ja välipohjan liitos	47
6.1.6 Puurankaisten ulkoseinän ja ikkunan liitos	51
6.2 Eristetty kiviseinä	59
6.2.1 Eristetty kiviseinä ja maanvastainen alapohja	59
6.2.2 Eristetty kiviseinä ja ryömintätilainen alapohja	62
6.2.3 Eristettyjen kiviseinien väliset liitokset	70
6.2.4 Kiviseinän ja yläpohjan liitos	72
6.2.5 Kiviseinän ja välipohjan liitos	75
6.2.6 Kiviseinän ja ikkunan liitos.....	76
6.3 Eristetty tiiliseinä.....	80
6.3.1 Eristetty tiiliseinä ja maanvastainen alapohja	80
6.3.2 Eristetty tiiliseinä ja ryömintätilainen alapohja.....	83
6.3.3 Tiiliseinien väliset liitokset	87

6.3.4	Tiiliseinän ja puuyläpohjan liitos	88
6.3.5	Tiiliseinän ja betonivälipohjan liitos.....	90
6.3.6	Tiiliseinän ja ikkunan liitos	91
6.4	Massiivinen kevytbetoniseinä	91
6.4.1	Massiivinen kevytbetoniseinä ja maanvastainen alapohja.....	92
6.4.2	Massiivinen kevytbetoniseinä ja ryömintätilainen alapohja	94
6.4.3	Kevytbetoniseinien väliset liitokset.....	98
6.4.4	Kevytbetoniseinän ja puuyläpohjan liitos	98
6.4.5	Kevytbetoniseinän ja välipohjan liitos.....	101
6.4.6	Ikkunan ja kevytbetoniseinän liitos	102
Kirjallisuutta		106

1 Johdanto

Rakennuksen lämpöhäviöiden pienetessä kylmäsiltojen merkitys johtumislämpöhäviöissä kasvaa, mikäli suunnittelussa ei kiinnitetä riittävästi huomiota kylmäsiltoja aiheuttaviin rakennedetaljeihin. Rakentamismääräyksissä on tähän asti otettu huomioon vain rakennusosassa olevat säännölliset kylmäsiltoja, jotka sisältyvät rakennusosan lämmönläpäisykertoimeen (U-arvoon). Säännöllisiä kylmäsiltoja ovat muun muassa siteet, kannakset sekä tuki- ja runkorakenteet, jotka ovat rakenteelle tyypillisiä koko sen edustamalla vaipan alueella.

Vuonna 2012 voimaan tulevissa rakentamismääräyksissä on otettu uutena mukaan rakennusosien välisten liitosten kylmäsiltoja. Tämä opas koskee näiden kylmäsiltojen laskentaa.

Luku 3 käsittelee kylmäsiltojen roolia rakennuksen johtumislämpöhäviössä, luku 4 rakenteiden välisen liitoksen lisäkonduktanssin määrittäytapoja ja luku 5 laskentaperiaatteita erilaisille rakenteiden välisille liitoksille. Luvussa 6 on laskentaesimerkkejä erilaisille liitostyypeille ja runkorakenteille.

Tämä opas ei käsittele säännöllisiä kylmäsiltoja, jotka jo sisältyvät rakennusosan lämmönläpäisykertoimeen. Kylmäsiltoja aiheuttavat rakenteisiin ympäristöään poikkeavia lämpötiloja, joiden seurauksena voi olla lämpöolojen heikkeneminen paikallisesti, pinnan likaantuminen ja kosteuden tiivistyminen rakenteeseen. Tässä oppaassa ei tarkastella myöskään näitä seikkoja.

Kylmäsiltoja käsitellään seuraavissa Suomen rakentamismääräyskokoelman osissa

- D3 Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012
- C4 Lämmöneristys. Ohjeet 2012
- D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012

2 Määritelmiä ja käsitteitä

Ilmoitettu lämmönjohtavuus λ_D (W/(mK)) tarkoittaa arvoa, joka on voimassa olevan SFS-EN-standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaisesti määritetty ja joka perustuu yleensä 10 °C keskilämpötilassa suoritettuihin lämmönjohtavuuden mittauksiin sekä mittaustulosten tilastolliseen käsittelyyn. Ilmoitettua lämmönjohtavuutta käytetään lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon lähtötietona.

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ_U (W/(mK)) tarkoittaa arvoa, joka on SFS-EN-standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan määritetty lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, SFS-EN-standardissa esitetty taulukoitu lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, näissä ohjeissa annettu lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo tai muulla tavalla määritetty, rakennusosalle soveltuva lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (esimerkiksi tyyppihyväksytty arvo), jota käytetään rakenteiden lämpöteknisissä laskelmissa.

Lämmönläpäisykerroin U (W/(m²K)) ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien tilojen välillä on yksikön suuruinen (RakMK osa C4).

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.

Lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} , ja L_{3D} (W/(mK))

Tarkasteltavan rakenteen läpäisevä lämpövirta, jonka aiheuttaa rakenteen eri puolilla vallitsevien olosuhteiden välinen lämpötilaero.

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

Ilmoittaa rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen.

Pistemäinen kylmäsilta

Kylmäsilta, joka on rakenteessa paikallinen ja jolla ei ole rakenteen pinnan suunnassa jatkuvaa samanlaisena pysyvää poikkileikkausta.

Pistemäinen lisäkonduktanssi X (W/K)

Pistemäinen lisäkonduktanssi ilmoittaa pistemäisestä kylmäsilta (esim. terässide) aiheutuvan lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.

Viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/(mK))

Viivamainen lisäkonduktanssi ilmoittaa rakennusosassa olevan, pituusyksikön mittaisen viivamaisen kylmäsilan (esim. seinän ala- ja yläohjauspuu) aiheuttaman lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.

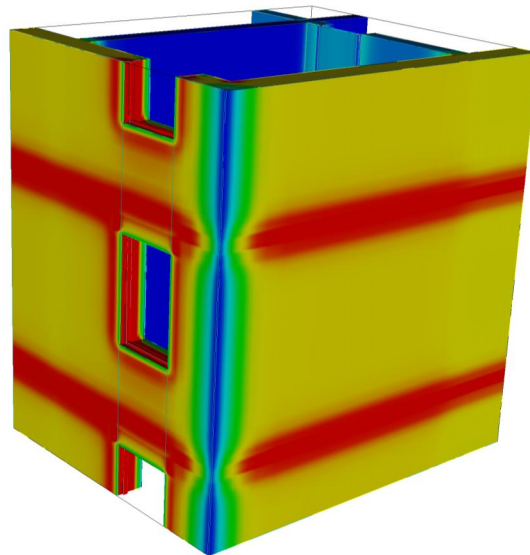
Viivamainen kylmäsilta

Kylmäsilta, jonka poikkileikkaus on rakenteen pinnan suuntaan jatkuvana samanlainen.

3 Kylmäsillat rakennuksen johtumislämpöhäviössä

3.1 Rakennuksen johtumislämpöhäviö

Rakennuksen ulkovaipan johtumislämpöhäviö voidaan periaatteessa laskea kolmiulotteisella numeerisella laskentamallilla, jolloin kylmäsiltoja ei tarvitse erikseen ottaa huomioon (kuva 1).



Kuva 1. Esimerkki rakennusvaipan kolmiulotteisen lämpötilakentän laskennasta. Lähde: www.kornicki.com/antherm/EN.

Käytännössä rakennusta ei voida laskea kokonaisuutena vaan sitä tarkastellaan erillisinä rakennusosina, joita ovat esimerkiksi seinät, ikkunat ja yläpohjat. Näille määritetään lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan.

Lämmönläpäisykertoimet lasketaan tai mitataan kullekin rakennusosalle erikseen, ottamatta huomioon miten ne liittyvät muihin rakennusosiin. Toisin sanoen rakennusosan reunalla oletetaan adiabaattireunaehto eli täydellinen lämpöeristys. Tämän oletuksen epätarkkuus korjataan kun lasketaan koko rakennuksen tai huonetilan johtumislämpöhäviötä rakentamismääräyskokoelman osan D5 kaavalla. Korjauksessa käytetään rakennusosien välisten liitosten viivamaisia lisäkonduktansseja. Liitosten lisäkonduktanssit näkyvät rakennuksen johtumislämpöhäviön kaavassa (1) lisäterminä:

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

missä

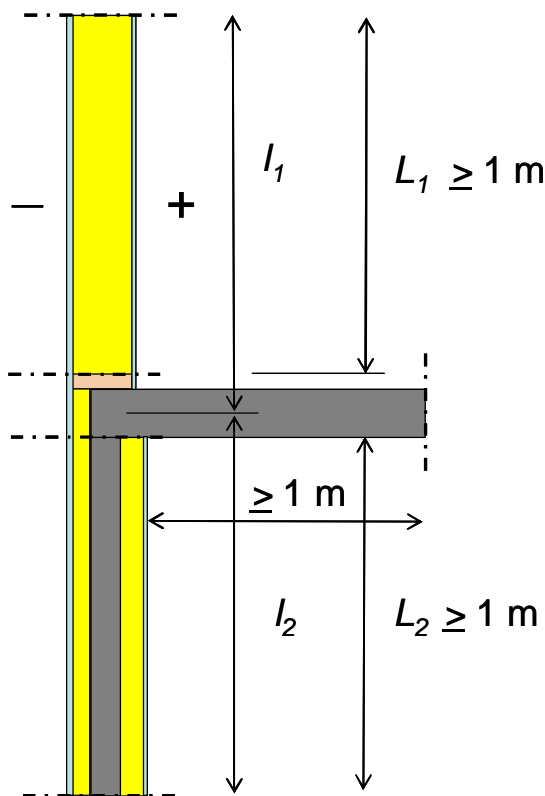
H_{joht}	on	rakennusosien ja niiden liitosten yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö, W/K
U		rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/(m ² K)
A		rakennusosan pinta-ala, m ²
Ψ_k		kahden rakennusosan välisen liitoksen k viivamainen lisäkonduktanssi, W/(m K)
l_k		kahden rakennusosan välisen liitoksen k pituus, m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

Tässä oppaassa on ohjeita miten rakennusosien välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ lasketaan. Kaavan (1) viimeinen termi X ottaa huomioon yksittäiset kylmäsillat kuten parvekekiinnitykset, joita ei käsitellä tässä oppaassa.

On syytä vielä korostaa, että kaavan (1) lisäkonduktanssit koskevat RakMK D5:n mukaisia epä-säännöllisiä kylmäsilloja eivätkä säännöllisiä kylmäsilloja, jotka jo sisältyvät kaavassa (1) oleviin lämmönläpäisykertoimiin (U -arvoihin). Säännöllisten kylmäsillojen laskentaan on annettu ohjeita rakentamismääräyskokoelman osassa C4.

3.2 Rakennusosien välinen viivamainen lisäkonduktanssi

Seuraava esimerkki havainnollistaa viivamaista lisäkonduktanssia ja miten se voidaan määrittää. Tarkastellaan kuvan 2 mukaista kahden seinän ja välipohjan välistä liitosta, johon muodostuu kylmäsilta. Seinää ja välipohjaa otetaan tarkastelugeometriaan riittävän laajalti, että liitoksen vaikutus ei enää näy rakenteen lämpötiloissa. Rakenteen pituus kuvatasoa kohtisuorassa suunnassa oletetaan suureksi muihin mittoihin verrattuna.



Kuva 2. Esimerkki alemman ja ylemmän kerroksen seinien ja välipohjan liitoksen kylmäsillasta. Tarkastelugeometria rajataan pistekatkoviivojen kohdalta. Kuvan periaate on lähteestä Gustavsen et al. 2008.

Kaavasta (1) saadaan johtumislämpöhäviöksi kuvan 2 rajaamalle alueelle

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

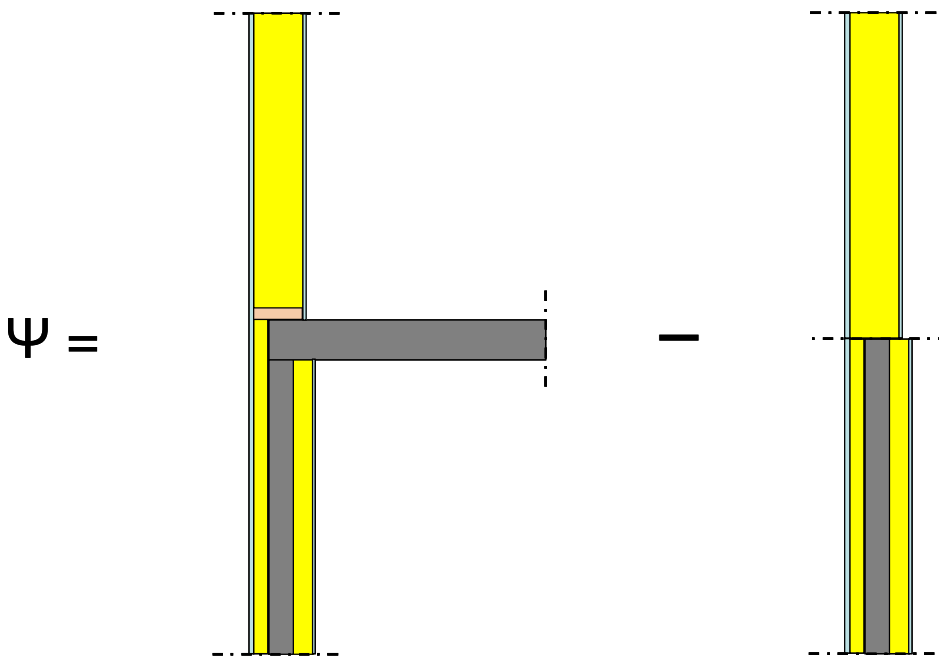
missä

H_{joht}	on	rakennusosien 1 ja 2 ja niiden liitoksen yhteenlaskettu johtumislämpöhäviö, W/K
Ψ		seinien 1 ja 2 välisen liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi, W/(m K)
l		seinien 1 ja 2 välisen liitoksen pituus (kohtisuoraan kuvatasoa vastaan), m
U_1		seinän 1 lämmönläpäisykerroin, W/(m ² K)
A_1		rakennusosan 1 pinta-ala = $l l_1$, m ²
U_2		seinän 2 lämmönläpäisykerroin, W/(m ² K)
A_2		rakennusosan 2 pinta-ala = $l l_2$, m ²

Kun viivamainen lisäkonduktanssi Ψ ratkaistaan yhtälöstä (2) saadaan kaava

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

Lisäkonduktanssi on siten laskenta-alueen todellisen lämpövirran ja lämmönläpäisykertoimilla lasketun lämpövirran erotus. Sama asia on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Liitoksen lisäkonduktanssi Ψ on todellisen rakenteen (vasemmalla) lämpövirran ja vertailurakenteen (oikealla) lämpövirran erotus. Pistekatkoviivojen kohdalla oletetaan lämpövirta laskennassa nolaksi. Vertailutilanteen mitat ja U -arvot määritellään rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti.

3.3 Lisäkonduktanssin lukuarvot eri maissa

Kaavasta (3) nähdään, että viivamaisen lisäkonduktanssin Ψ lukuarvo riippuu mitoista l_1 ja l_2 sekä lämmönläpäisykertoimista U_1 ja U_2 . Nämä määritellään eri maiden rakentamismääräyksissä eri tavoin ja siten saman rakenteen Ψ -arvo ei ole enää sama vaikka rakenteen kokonaislämpöhäviö H_{joht} onkin sama. Tämä on syytä huomata jos haluaa käyttää muissa maissa kuin Suomessa määritettyjä Ψ -arvoja.

Standardissa SFS-EN ISO 14683 tämä seikka on otettu huomioon siten, että Ψ :n taulukkoarvot annetaan erikseen kolmelle eri mittajärjestelmälle. Esimerkiksi Saksassa ja Belgiassa johtumislämpöhäviöiden laskennassa käytetään ulkomittoja, jotka ovat Suomessa käytettäviä sisämittoja suurempia. Siksi U-arvoilla saadaan usein liian suuri johtumislämpöhäviö ja korjauksena tarvittavista Ψ -arvoista tulee helposti negatiivisia.

Kuvan 2 mitat l_1 ja l_2 ovat Suomen rakentamismääräysten mukaan määritellyjä. Lähes sama mittojen määrittely on käytössä Norjassa. Ruotsissa välipohja ei kuulu ulkoseinään ja siitä syystä välipohjaliitoksen Ψ on suomalaista arvoa suurempi.

U-arvotkaan eivät ole välttämättä samalla tavalla määritellyjä kuin Suomessa. Ruotsissa ja Norjassa puurankaseinän alasidepuun vaikutus on jo mukana seinän U-arvossa ja siksi sen vaikutus vähennetään liitoksen Ψ -arvosta. Ikkunan apukarmit ovat mukana seinän U-arvossa Norjassa mutta eivät Ruotsissa ja Suomessa joten norjalainen ikkunaliitoksen Ψ -arvo poikkeaa suomalaisesta ja ruotsalaisesta arvosta.

4 Viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen

4.1 Menetelmän valinta

Viivamaisen lisäkonduktanssin Ψ määrittämiseen on tarkkuudeltaan erilaisia menetelmiä. Menetelmän valinnassa on syytä ottaa huomioon kyseisen kylmäsiilan merkitys koko rakennuksen tai huone-tilan johtumislämpöhäviössä. Standardissa SFS-EN ISO 14683 on esitetty tarkkuudet neljälle vaihtoehdoiselle menetelmälle. Nämä ovat

- numeerinen laskenta (tyypillinen tarkkuus $\pm 5 \%$),
- tyyppirakenteille laskettujen arvojen käyttö ($\pm 20 \%$),
- käsinlaskenta ($\pm 20 \%$) ja
- ohjearvotaulukot (0 % - 50 %).

Ohjearvotaulukoista esimerkkinä on taulukossa 1 rakentamismääräyskokoelman osan RakMK D5 taulukko jossa liitosten viivamainen konduktanssi on taulukoitu runkomateriaalin mukaan.

Taulukko 1. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsiilan lisäkonduktanssille, joka ottaa huomioon rakennusosien välisten liitosten ja niiden epäsäännöllisten kylmäsiltojen aiheuttaman lisälämpöhäviön (RaMK D5 2012).

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

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

Ylä- väli- ja alapohjan liitos ulkoseinään

Ulkoseinän runkomateriaali	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(mK)									
	Yläpohjan runkomateriaali			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

Tämä opas koskee viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäystä numeerisella menetelmällä.

4.2 Standardit

Lisäkonduktanssin arvoihin ja laskentaan liittyvät suomalaiset ja eurooppalaiset standardit ovat seuraavat:

- SFS-EN ISO 14683 (2008). Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values
- SFS-EN ISO 10211 (2008). Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations
- SFS-EN ISO 13370 (2008). Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods
- SFS-EN ISO 6946 (2008). Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method
- SFS-EN ISO 10456 (2007). Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values
- SFS-EN ISO 10077-2 (2007). Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames

Kylmäsiltoihin liittyvät Suomen rakentamismääräyskokoelman osat ovat:

- D3 Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012
- C4 Lämmöneristys. Ohjeet 2012
- D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012

4.3 Kylmäsiltojen numeerinen laskenta

4.3.1 Laskentaperiaate

Lämmön johtumista materiaalissa kuvaa Fourierin lämmönjohtumisyhtälö $\vec{q} = -\lambda \nabla T$, jonka yksiulotteisella muodolla voi laskea lämmönläpäisykertoimen kerrokselliselle seinälle suoraan. Kaksi- ja kolmiulotteisessa geometriassa päädytään jatkuvuustilassa differentiaaliyhtälöön $\nabla(\lambda \nabla T) = 0$, jonka ratkaisuun tarvitaan käytännössä numeerisia menetelmiä. Periaatteena on jakaa laskenta-alue riittävän moneen laskentaelementtiin ja ratkaista elementeissä vallitsevien lämpötilojen yhtälöryhmä. Tuloksena saatava lämpötilakenttä lähenee differentiaaliyhtälön tarkkaa ratkaisua kun laskentaverkko tihenee. Lämpötiloista voidaan sitten laskea lämpövirrat pinnoilla. Laskenta-alueen reunoilla laskentaan tarvitaan reunaehdot. Tavallisimmat reunaehtotyypit ovat ympäröivä lämpötila ja pintavastus sekä lämpöeristetty reuna (adiabaatti).

Differentiaaliyhtälön ratkaisumatematiikka voi perustua differenssimenetelmään (finite difference method), tilavuusalkiomenetelmään (finite volume method) tai elementtimenetelmään (finite element method). Laskentaohjelman käyttäjän kannalta menetelmällä ei ole juuri väliä. Tärkeintä on varmistua siitä, että laskentaverkko on kussakin tapauksessa riittävän tiheä. Parhaiten asia selviää tarkkailemalla tuloslämpövirtojen muutosta kun verkkoa tihennetään. Tulos on riittävän tarkka kun lämpövirrat eivät enää muutu verkkoa tihennettäessä.

4.3.2 Laskentaohjelmat

Kylmäsiltojen laskentaan on valittavissa monentasoisia ohjelmia. Vähimmäisvaatimuksena on kaksikulotteisen lämpötilakentän laskentamahdollisuus jatkuvuustilassa. Yleiskäyttöisten laskentaohjelmien (taulukko 2) etuna on soveltuvuus monenlaisiin tehtäviin ja huolellisesti testattu toimivuus. Suppeammat johtumislämmönsiirron ohjelmat (taulukko 3) ovat yleensä helppokäyttöisempiä ja laskevat jopa lineaarisen lisäkonduktanssin Ψ suoraan. Osa ohjelmista on ilmaisia. Suurin osa näistä ohjelmista on validoitu laskemalla standardin EN ISO 10211 neljä laskentaesimerkkiä. Se antaa jonkinlaisen käsityksen ohjelman laadusta mutta ei ole tae toimivuudesta muunlaisissa tehtävissä (Erhorn ym. 2010). Standardin testiesimerkit koskevat nimittäin vain suorakulmaista laskentageometriaa eikä esimerkeissä ole mukana muun muassa maaperän lämmönsiirtoa.

4.3.1 Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentakaava

Standardissa SFS-EN ISO 10211 kirjoitetaan edellä esillä ollut kaksikulotteisen lisäkonduktanssin kaava (3) muodossa

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (4)$$

missä

L_{2D}	on kaksikulotteisella (2D) laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekkinen kytkentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille, W/(mK)
U_j	liittyvän rakenneosan j lämmönläpäisykerroin, W/(m ² K)
l_j	mallissa kuvatun rakenneosan j pituus (m), jolla läpäisykerrointa U_j voidaan soveltaa.

Tässä oppaassa käytetään kaavan 4 lämmönläpäisykertoimelle U_j ja pituudelle l_j rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisia määritelmiä. Näin saadaan lisäkonduktanssille Ψ arvo, joka johtaa oikeaan rakennuksen johtumislämpöhäviöön kaavassa (1) ja rakentamismääräyskokoelman osassa D5.

4.3.2 Laskenta-alueen rajaus

Standardin SFS-EN 10211 mukaan malli voidaan rajata seuraavasti:

- rakenteiden symmetriatasoilta, joiden kummallakin puolella rakenteet ja kylmäsilat ovat identtiset,
- vähintään d_{min} etäisyydeltä tarkasteltavasta liitoksesta tai kylmäsilasta, missä d_{min} on vähintään 1 m tai kolme kertaa liitokseen liittyvän rakenneosan paksuus,
- rakennusta ympäröivä pohjamaa on otettava huomioon riittävältä etäisyydeltä tarkasteltavista rakenteista (taulukko 4).

Kaikki mallin reunat ja rajaukset käsitellään adiabaattisina rajoina.

Taulukko 2. Yleiskäyttöisiä laskentaohjelmia, joilla voi laskea myös johtumislämmönsiirtoa ((Erhorn ym. 2010)). Abaqus FEA-ohjelma on lisätty alkuperäiseen raporttiin verrattuna.

Ohjelman nimi	3D	Tran- sientti	Vapaa verkko	Ψ - laskenta	Lisenssi	Validointi
Ansys mul- tiphysics	x	x	x		Kaupallinen	
Ansys CFX	x	x	x		Kaupallinen	
Ansys Fluent	x	x	x		Kaupallinen	
Phoenics	x	x	x		Kaupallinen	
Comsol mul- tiphysics	x	x	x		Kaupallinen	EN ISO 10211:2007
SAMCEF ther- mal	x	x	x		Kaupallinen	
Abaqus FEA	x	x	x		Kaupallinen	

Taulukko 3. Johtumislämmönsiirron laskentaohjelmia (Erhorn ym 2010).

Ohjelman nimi	3D	Tran- si-entti	Vapaa verkko	Ψ - laskenta	Lisenssi	Validointi
AnTherm	x			x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007 EN ISO 1077-2:2003
Argos			x	x	Kaupallinen	
Bisco/Bisra		x	x	x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007 EN ISO 1077-2:2003
Chambes		x		x	Ilmainen	EN ISO 10211:2007
David32	x				Ilmainen	EN ISO 10211:2007
Delphin		x			Kaupallinen	EN ISO 10211:2007 HAMSTAD 1-5 EN 15206:2007
Flixo			x	x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007 EN ISO 1077-2:2003
FramePlus					Kaupallinen	
HAMLab	x	x	x			
Heat2		x		x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007 EN ISO 1077-2:2003
Heat3	x	x		x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007
KOBRA v3.0w	x			x	Ilmainen	EN ISO 10211:2007
KOBRU86		x		x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007
RadTherm	x	x	x		Kaupallinen	
Solido	x		x		Kaupallinen	EN ISO 10211:2007
TAS ambiens		x	x		Kaupallinen	
Therm			x		Ilmainen	
Trisco/Voltra	x	x		x	Kaupallinen	EN ISO 10211:2007
Unorm	x			x	Ilmainen	EN ISO 10211:2007 EN ISO 1077-2:2003
WUFI 2D		x			Kaupallinen	EN ISO 10211:2007

Taulukko 4. Mallin ulottumat pohjamaassa tarkasteltavan liitoksen ympärillä (SFS-EN 10211, Taulukko 1).

Suunta	Etäisyys tarkasteltavasta liitoksesta
Vaakasuunnassa rakennuksen sisäpuolella	$0,5 \times \text{lattian leveys}$
Vaakasuunnassa rakennuksen ulkopuolella	$2,5 \times \text{lattian leveys}$
Pystysuunnassa maanpinnan alapuolella	$2,5 \times \text{lattian leveys}$
Pystysuunnassa lattian pinnan alapuolella (mikäli lattiataso on yli 2 metriä maanpinnan tason alapuolella)	$2,5 \times \text{lattian leveys}$

Mikäli tarkasteltavan rakennuksen pohja ei ole säännöllinen suorakaide, sitä voidaan tarkastella kaksiulotteisena tapauksena, jonka alapohjan karakteristinen leveys on $B' = A/(0,5 \times P)$, missä A on rakennuksen pohjan ala (m^2) ja P rakennuksen ulkoseinien muodostaman piirin kokonaispituus (m). Tällöin taulukossa 4 'lattian leveys' = B' .

Tarkemmat ohjeet mallin ulottumista on esitetty laskentatapausten yhteydessä.

4.3.3 Pintavastukset

Lämpövirtalaskennoissa rakenneosien pintavastukset annetaan rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti ottaen huomioon käytännön tilanteessa toteutuva lämpövirran suunta. Käytettävät pintavastuksen arvot on annettu taulukossa 5.

Taulukko 5. Pintavastukset (RakMK C4 ja SFS-EN ISO 6946:2007).

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

Pintalämpötilojen ja pinnan kondenssitarkastelujen suhteen on kuitenkin syytä huomata, että siinä yhteydessä on käytettävä taulukosta 5 poikkeavia sisäpinnan vastuksia. Ne ovat ikkunoille $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja muille sisäpinnoille $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ (SFS-EN ISO 13788).

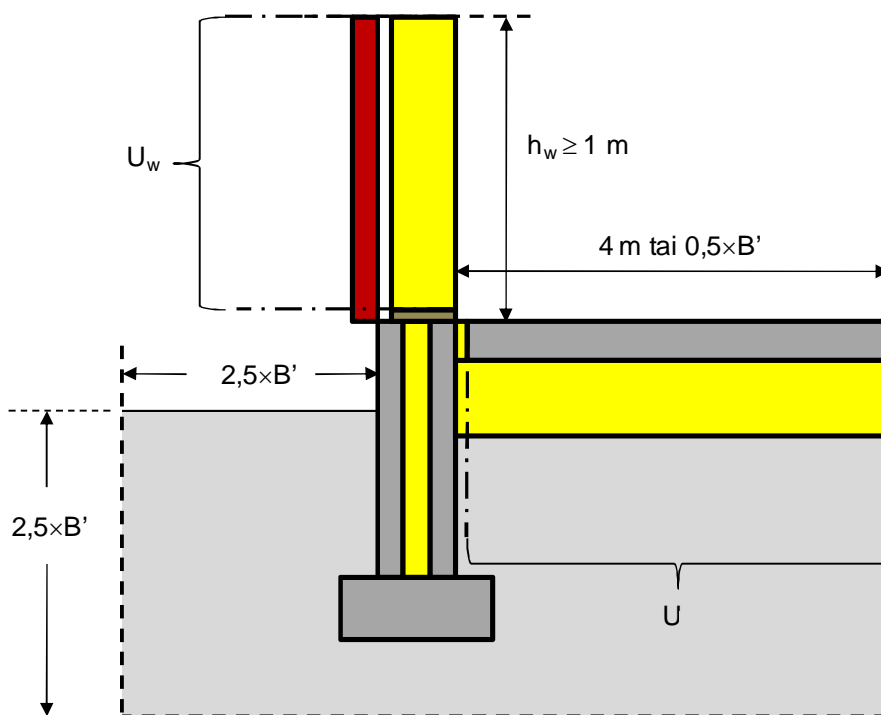
4.3.4 Materiaalien lämmönjohtavuudet

Materiaalien lämmönjohtavuudet määritetään standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisesti tai käytettävä samassa standardissa tai rakentamismääräyskokoelman osassa C4 annettuja taulukoituja lämmönjohtavuuksien suunnitteluarvoja. Pohjamaan lämmönjohtavuutena voidaan käyttää arvoa $\lambda_U = 2,0 \text{ W/(mK)}$ (SFS-EN ISO 10211).

5 Laskentaperiaatteet eri liitostyypeille

5.1 Maanvastaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos

Kuvassa 4 on esimerkki ulkoseinän, maanvastaisen alapohjan ja sokkelirakenteen liitoksesta, johon muodostuu kylmäsilta.



Kuva 4. Esimerkki ulkoseinän, maanvastaisen alapohjan ja sokkelin välisen liitoksen kylmäsilloista.

Kylmäsilan lisäkonduktanssin laskentaperiaate on seuraava:

1. Lasketaan lämpövirta rakenteen läpi sisältä ulos yhden asteen lämpötilaerolla metriä kohti (yksikkö W/mK) numeerisesti. Rakenteeseen otetaan mukaan vähintään 1 metrin korkeudelta seinää ja $0,5 \times B'$ metriä alapohjaa, jossa B' on rakennuksen karakteristinen leveys (kuva 4). Jos laskenta suoritetaan leveydelle $0,5 \times B' = 4 \text{ m}$ (eli $B' = 8 \text{ m}$), voidaan laskennan tuloksia soveltaa kaikille alapohjille, joiden karakteristinen mitta $B' \geq 8 \text{ m}$. Rakenteen ulkopuolisia maamassoja otetaan mukaan 2,5 kertaa rakennuksen karakteristisen leveyden verran sekä rakennuksen sivulla että alapuolella (kuva 4). Etenkin liitoksen lähellä olevat rakenteen yksityiskohdat otetaan mukaan niin hyvin kuin mahdollista. Eristeiden lämmönjohtavuudet määritetään niin, että U -arvoista tulee samat kuin kohdassa 2.
2. Lasketaan seinän ja alapohjan U -arvot (U_w ja U) kuvan 4 pistekatkoviivojen rajaamalla alueella rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. U -arvoon otetaan mukaan alueella olevat säännölliset kylmäsilat, esimerkiksi siteet, kannakset ja koolaukset. Toinen vaihtoehto on laskea U -arvot numeerisesti käyttäen pistekatkoviivan kohdalla adiabaattireunaehdot.

3. Lasketaan U-arvojen avulla koko seinäosan ja alapohjan lämpövirrat astetta ja metriä kohti (yksikkö W/mK). Seinän korkeus h_w otetaan alapohjan yläpintaan asti ja alapohjan leveys $0,5 \times B'$ seinän sisäpintaan asti kuvan 4 mukaisesti.
4. Vähennetään todellisesta lämpövirrasta (kohta 1) seinän ja alapohjan U-arvoilla laskettu lämpövirta (kohta 3). Tuloksena saadaan ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjalaatan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ . Kaavan muodossa menettely on ilmaistavissa seuraavasti

$$\Psi = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U \quad (5)$$

missä

L_{2D}	on numeerisesti määritetty lämpövirta koko rakenteelle, W/(mK)
U_w	liittyvän ulkoseinärakenteen lämmönläpäisykerroin, W/m ² K
h_w	seinärakenteen korkeus käytetyssä mallissa ($h_w \geq 1$ m), m
U	alapohjarakenteen RakMK C4 mukainen lämmönläpäisykerroin, W/m ² K
B'	alapohjan karakteristinen mitta, m

Seinän lämmönläpäisykerroin lasketaan rakennekerrosten lämmönvastusten avulla RakMK osan C4 mukaisesti (C4, kaava 2) on

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

missä d on rakennekerroksen paksuus (m) ja λ (W/mK) kerroksen materiaaliin liittyvä lämmönjohtavuus, joka määritetään RakMK C4:n mukaisesti tai saman ohjeen antamana taulukkoarvona.

Useista materiaalikerroksista koostuvan seinän kokonaislämmönvastus on (RakMK C4, kaava 3)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{se} \quad (7)$$

missä R_{si} ja R_{se} (m²K/W) ovat rakenteen sisä- ja ulkopintojen lämmönvastukset (taulukon 5 mukaisesti) ja R_1, R_2, \dots, R_n seinärakenteen rakennekerrosten 1...n lämmönvastukset. Ulkoseinärakenteissa, joissa rakennekerrosten välissä on hyvin tuulettuva ilmakerros, ei sen eikä ilmakerroksen ulkopuolisen rakenteen osan lämmönvastusta saa ottaa huomioon laskettaessa rakenteen kokonaislämmönvastusta. Tällöin kuitenkin sisäpuolisen rakenteen osan ilmakerrokseen rajoittuvan pinnan pintavastuksena voidaan käyttää taulukon 5 mukaisia sisäpuolisen pintavastuksen (R_{si}) arvoja.

Seinän lämmönläpäisykerroin saadaan kokonaislämmönvastuksesta (C4, kaava 1):

$$U_w = \frac{1}{R_T} \quad (8)$$

Maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin U saadaan rakentamismääräyskokoelman osan C4 kaavan 20 tai 21 mukaan riippuen siitä miten hyvin alapohja on lämpöeristetty. Tämän oppaan esimerkeissä alapohja on hyvin lämpöeristetty, jolloin lämmönläpäisykertoimen kaava on

$$U = \frac{\lambda}{0,457 \times B' + d_i} + \frac{\Psi_{ge}}{B'} \quad (9)$$

missä

λ	on pohjamaan lämmönjohtavuus, W/mK
B'	alapohjalaatan karakteristinen mitta, m
d_t	rakenteen ekvivalentti paksuus (m), joka lasketaan kaavalla (C4, kaava 19)

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (10)$$

missä

w	on seinärakenteen paksuus (kuva 4)
λ	pohjamaan lämmönjohtavuus, W/mK
R_f	lattiarakenteen lämmönvastus, m ² K/W
R_{si}, R_{se}	alapohjan sisäpinnan ja ulkopuolisen maanpinnan pintavastukset
Ψ_{ge}	perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristykseen tai lattiarakenteen reuna-alueella olevan vaakasuuntaisen lisälämmöneristykseen viivamainen lisäkonduktanssi, W/mK

Tämän oppaan esimerkeissä lattiarakenteen reunaosilla ei ole lisälämmöneristystä, jolloin Ψ_{ge} lasketaan perusmuurin seinärakenteen viivamaisen lisäkonduktanssin Ψ_{gev} kaavalla (RakMK C4, kaava 23):

$$\Psi_{ge} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 D_v}{d_t + d'_v} + 1 \right) \right] \quad (11)$$

missä

D_v	perusmuurin lämmöneristeen korkeus maanpinnan alapuolella, m
d'_v	perusmuurin lämmöneristeen ekvivalentti paksuus (m) (RakMK C4, kaava 25)

$$d'_v = \lambda \left(R_{nv} - \frac{d_{nv}}{\lambda} \right) \quad (12)$$

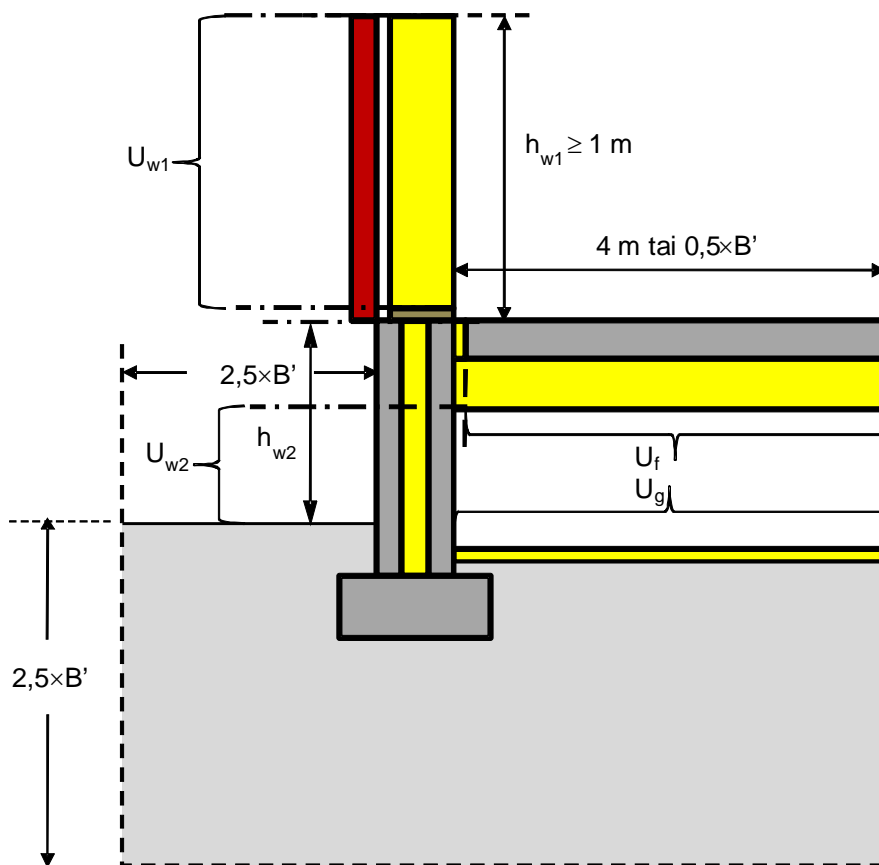
missä

R_{nv}	perusmuurin lämmönvastus, W/mK
d_{nv}	perusmuurin paksuus, m

Liitokseen numeerisessa laskennassa otetaan huomioon lämpövirrat koko rakenteen kautta, tässä tapauksessa myös seinärakenteen alajuoksun sekä sokkeli- ja anturarakenteiden kautta (kuva 4). Laskentamallissa on otettava huomioon myös lämpöhäviötä vähentävät liitokseen liittyvät materiaalit ja rakenteet, kuten laatan ja sokkelin tai seinärakenteen ja sokkelin väliset lämpökatkot. Kuvan 4 mallissa ei ole otettu huomioon perustusten routasuojasta. Routasuojaus voidaan ottaa mukaan käytettyyn malliin, jolloin se pienentää rakenneliitoksen laskennallista lisäkonduktanssia.

5.2 Ryömintätilaisen alapohjan, ulkoseinän ja sokkelin liitos

Kuvassa 5 on esimerkki ulkoseinän, ryömintätilaisen alapohjan ja sokkelirakenteen liitoksesta, johon muodostuu kylmäsilta.



Kuva 5. Esimerkki ulkoseinän, ryömintätilaisen alapohjan ja sokkelin välisen liitoksen kylmäsilloista.

Liitoksen muodostaman kylmäsilan lisäkonduktanssin laskentaperiaate on seuraava:

1. Lasketaan rakenteen kokonaislämpöhäviö sisältä ulos yhden asteen lämpötilaerolla metriä kohti (yksikkö W/mK) numeerisesti. Laskenta on tehtävä vaiheittain jäljempänä esitettävällä tavalla koska ryömintätilan lämpötilaa ei aluksi tunneta. Rakenteeseen otetaan mukaan vähintään 1 metrin korkeudelta seinää ja $0,5 \times B'$ metriä alapohjaa, jossa B' on rakennuksen karakteristinen leveys (kuva 5). Jos laskenta suoritetaan leveydelle $0,5 \times B' = 4 \text{ m}$ (eli $B' = 8 \text{ m}$), voidaan laskennan tuloksia soveltaa kaikille alapohjille, joiden karakteristinen mitta $B' \geq 8 \text{ m}$. Rakenteen ulkopuolisia maamassoja otetaan mukaan 2,5 kertaa rakennuksen karakteristisen leveyden verran sekä rakennuksen sivulla, että alapuolella (kuva 5). Etenkin liitoksen lähellä olevat rakenteen yksityiskohdat otetaan mukaan niin hyvin kuin mahdollista. Eristeiden lämmönjohtavuudet määritetään niin, että seinien U-arvoista tulee samat kuin kohdassa 2.
2. Lasketaan seinän lämmönläpäisykerroin U_{w1} kuvan 5 pistekatkoviivojen rajaamilla alueilla rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. Se voidaan laskea myös numeerisesti käyttäen pistekatkoviivan kohdalla adiabaattireunaehdot. Lasketaan lattiarakenteen, sokkelirakenteen ja pohjamaan lämmönläpäisykertoimet (U_f , U_{w2} ja U_g) kuvan 5 osoittamilla alueilla rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. Näistä lasketaan koko alapohjan lämmönläpäisykerroin U ottamalla vielä huomioon ryömintätilan ilman vaihtuessa tapahtuva lämpöhäviö.

3. Lasketaan U-arvojen avulla koko seinäosan ja alapohjan lämpövirrat astetta ja metriä kohti (yksikkö W/mK). Seinän korkeudet h_{w1} ja h_{w2} otetaan alapohjan yläpintaan asti ja alapohjan leveys $0,5 \times B'$ seinän sisäpintaan asti kuvan 5 mukaisesti.
4. Vähennetään todellisesta lämpövirrasta (kohta 1) seinän ja alapohjarakenteen U-arvoilla laskettu lämpövirta (kohta 3). Tuloksena saadaan ulkoseinän ja alapohjan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ . Kaavan muodossa menettely on

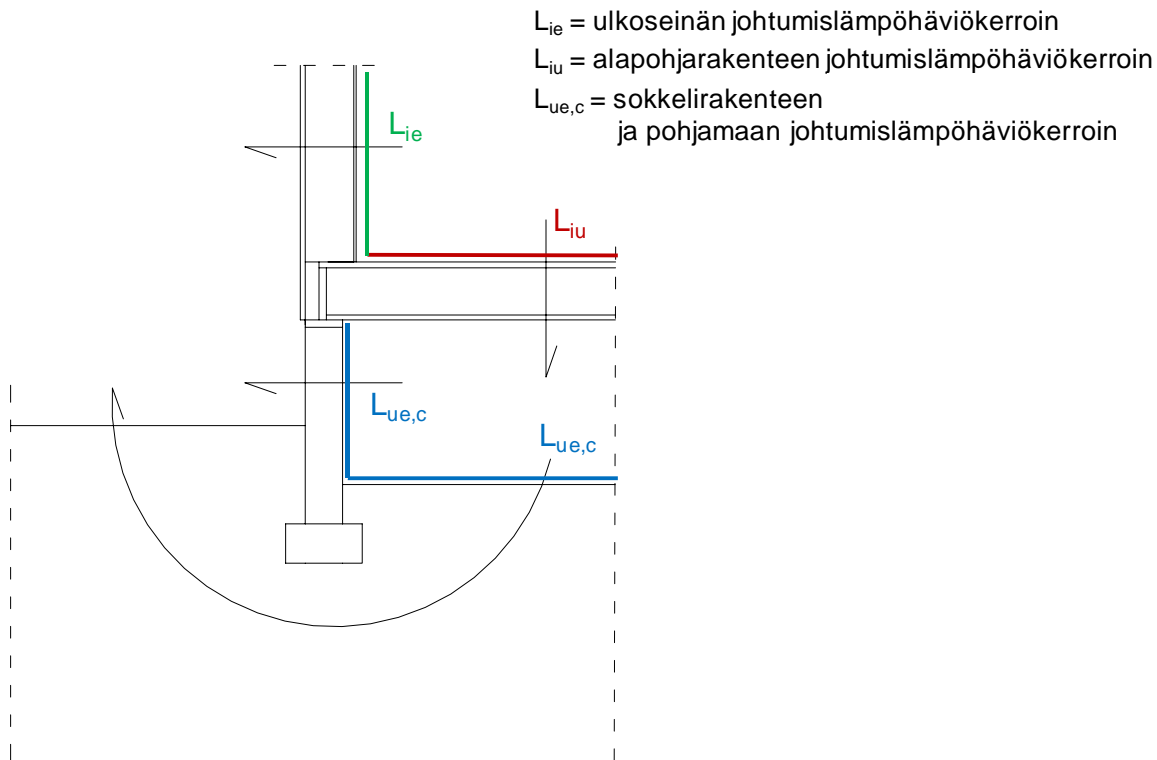
$$\Psi = L_{2D} - h_{w1} U_{w1} - 0,5 \times B' U \quad (13)$$

Kaavassa kokonaislämpöhäviötä L_{2D} ei voida laskea numeerisesti suoraan koska ryömintätilan lämpötilaa ei edeltä tunneta. Ryömintätilan huonetilaa alempi lämpötila otetaan huomioon kaavalla (SFS-EN ISO 10211, kaava C.10)

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right) \quad (14)$$

missä

L_{ie} ulkoseinän johtumislämpöhäviökerroin, W/mK
 L_{iu} on sisäilman ja ryömintätilan välinen johtumislämpöhäviökerroin, W/mK
 L_{ue} on ryömintätilan ja ulkoilman välinen johtumislämpöhäviökerroin, W/mK



Kuva 6. Ryömintätilallisen alapohjarakenteen ja ulkoseinän liitoksen lisäkonduktanssin määrittämisessä tarvittavat johtumislämpöhäviökertoimet L_{ie} , L_{iu} ja $L_{ue,c}$.

Nämä kolme tarvittavaa johtumislämpöhäviökerrointa (kuva 6) saadaan selville laskemalla kolme taulukon 6 tapausta, joissa kunkin tilan lämpötila asetetaan vuorollaan ykköseksi ja muiden tilojen lämpötila nollassi. Ryömintätilan ilmanvaihtoa ei tarvitse vielä tässä vaiheessa ottaa huomioon.

Taulukko 6. Kolme ryömintätilaisen alapohjan laskentatapausta.

Laskentatapausta	Sisälämpötila θ_i	Ulkolämpötila θ_e	R-tilan lämpötila θ_u	Tulos
1	1	0	0	$L_1 = L_{ie} + L_{iu}$
2	0	1	0	$L_2 = L_{ie} + L_{ue,c}$
3	0	0	1	$L_3 = L_{iu} + L_{ue,c}$

Kolme laskentatapauksen lämpövirroista voidaan laskea tarvittavat lämpöhäviökertoimet kaavoilla (SFS-EN 10211, kaavat C.2-C.5):

$$\begin{aligned}
 L_{iu} &= 0,5 \times (L_1 - L_2 + L_3) \\
 L_{ie} &= 0,5 \times (L_1 + L_2 - L_3) \\
 L_{ue,c} &= 0,5 \times (L_2 + L_3 - L_1) \\
 L_{ue} &= L_{ue,c} + L_{ue,v}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Ryömintätilan lämpöhäviökertoimessa L_{ue} on nyt sokkelin seinämän ja pohjamaan läpi johtuvan lämpövirran ($L_{ue,c}$) lisäksi ryömintätilan ilmanvaihdosta aiheutuva lämpöhäviö ($L_{ue,v}$):

$$L_{ue,v} = \frac{\rho c_p \dot{V}}{P} \tag{16}$$

missä

ρ	on ilman tiheys ($\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$ lämpötilassa 10°C ja paineessa 100 kPa)
c_p	ilman ominaislämpökapasiteetti ($c_p = 1000 \text{ J/(kgK)}$)
\dot{V}	ilmanvaihdon ilmavirta, m^3/s
P	lattiarakenteen piiri, m

Painovoimaisesti tuuletetun ryömintätilan ilmanvaihdon ilmavirran laskentakaava on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa C4.

Alapohjan lämmönläpäisykerroin U lasketaan rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti kaavalla

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \tag{17}$$

missä

U_f	on lattiarakenteen lämmönläpäisykerroin, $\text{W/m}^2\text{K}$
U_g	on ryömintätilan pohjalla olevan lämmöneristeen ja ryömintätilaa ympäröivän maan yhdistetty lämmönläpäisykerroin, $\text{W/m}^2\text{K}$
U_x	on ryömintätilan ekvivalentti lämmönläpäisykerroin, jossa otetaan huomioon maan pinnan yläpuolella olevan perusmuurin lämmönvastus ja ryömintätilan ilmanvaihto ($\text{W/m}^2\text{K}$). Se lasketaan kaavalla

$$U_x = 2 \frac{h_{w2} U_{w2}}{B'} + \frac{\dot{V} c_p \rho}{A} \quad (18)$$

missä

h_{w2}	maan pinnan yläpuolella oleva sokkelin korkeus, m
U_{w2}	maan pinnan yläpuolella olevan perusmuurin lämmönläpäisykerroin, W/m ² K
B'	suhteellinen lattiamitta = $A/(0,5 P)$, m
A	lattiarakenteen pinta-ala, m ²

Lämmönläpäisykertoimen U_g laskentaan on rakentamismääräyskokoelman osassa C4 useita vaihtoehtoja riippuen ryömintätilan syvyydestä ja lämmöneristyksestä. Jos ryömintätilan pohja on keskimäärin syvimmillään 0,5 m ympäröivää maanpintaa alempana se lasketaan kaavalla

$$U_g = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_g} \ln \left(\frac{\pi B'}{d_g} + 1 \right) \quad (19)$$

missä d_g on ekvivalentti kokonaispaksuus, jossa pohjamaan lämpövirtaan liittyvät rakenteelliset tekijät (seinän paksuus w (m)) ja lisäeristävyydet (pintavastukset R_{si} ja R_{se}) sekä mahdolliset pohjamaan pinnan eristekerrokset (R_{gf}) lasketaan mukaan pohjamaan kerrospaksuuteen

$$d_g = w + \lambda (R_{si} + R_{gf} + R_{se}) \quad (20)$$

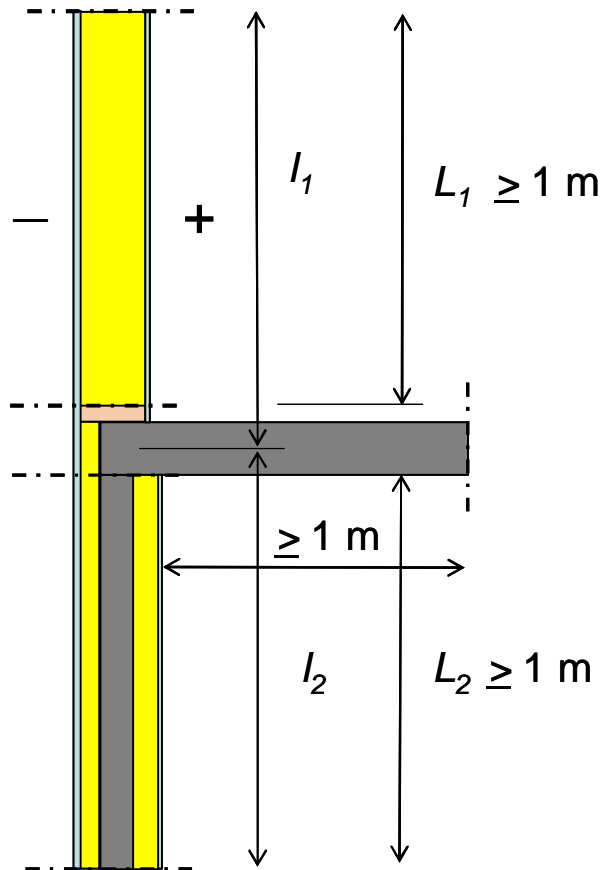
3. Vähennetään todellisesta lämpövirrasta (kohta 1) seinien U-arvoilla laskettu lämpövirta (kohta 3). Tuloksena saadaan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ . Kaavan muodossa menettely on ilmaistavissa kaavalla (4):

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (4)$$

missä lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} on kohdassa 1 laskettu lämpövirta.

5.4 Ulkoseinän ja välipohjan liitos

Kuvassa 8 on esimerkki kahden erityyppisen ulkoseinän ja betonivälipohjan liitoksesta, johon muodostuu kylmäsilta.



Kuva 8. Esimerkki ulkoseinän ja välipohjan liitoksen kylmäsilasta. Seinien U-arvot lasketaan katkoviivojen välisen rakenteen perusteella. Vertailutilanteen lämpövirta lasketaan seinien U-arvojen ja mittojen l_1 ja l_2 mukaan.

Kylmäsilan lisäkonduktanssin laskentaperiaate on seuraava:

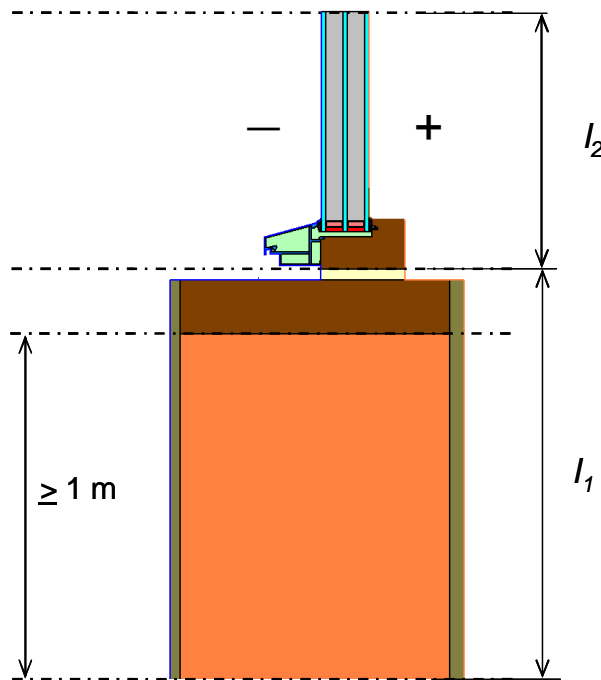
1. Lasketaan lämpövirta rakenteen läpi sisältä ulos yhden asteen lämpötilaerolla metriä kohti (yksikkö W/mK) numeerisesti. Rakenteeseen otetaan mukaan yleensä vähintään 1 metrin matka seinää ja välipohjaa (tarkemmin määriteltynä luvun 4.3.2 mukaan). Etenkin liitoksen lähellä olevat rakenteen yksityiskohdat otetaan mukaan niin hyvin kuin mahdollista. Eristeiden lämmönjohtavuudet määritetään niin, että seinien U-arvoista tulee samat kuin kohdassa 2.
2. Lasketaan seinien U-arvot kuvan 8 pistekatkoviivojen rajaamalla alueilla rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. U-arvoon otetaan mukaan alueella olevat säännölliset kylmäsillat, esimerkiksi siteet, kannakset ja koolaukset. Toinen vaihtoehto on laskea U-arvot numeerisesti käyttäen pistekatkoviivan kohdalla adiabaattireunaehdot.
3. Lasketaan U-arvojen avulla koko seinäosan lämpövirta astetta ja metriä kohti (yksikkö W/mK). Seinien korkeudet l_1 ja l_2 otetaan välipohjan puoliväliin asti kuvan 8 mukaisesti.
4. Vähennetään todellisesta lämpövirrasta (kohta 1) seinien U-arvoilla laskettu lämpövirta (kohta 3). Tuloksena saadaan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ . Kaavan muodossa menettely on ilmaistavissa kaavalla (4):

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (4)$$

missä lämpötekninen kytkentäkerroin L_{2D} on kohdassa 1 laskettu lämpövirta.

5.5 Ikkunan ja seinän liitos

Kuvassa 9 on esimerkki ulkoseinän ja ikkunan liitoksesta, johon muodostuu kylmäsilta.



Kuva 9. Esimerkki ulkoseinän ja ikkunan liitoksen kylmäsilasta. Seinän ja ikkunan U -arvot lasketaan katkoviivojen välisen rakenteen perusteella. Vertailutilanteen lämpövirta lasketaan seinän ja ikkunan U -arvojen ja mittojen l_1 ja l_2 mukaan.

Kylmäsilan lisäkonduktanssin laskennassa on seuraavat vaiheet:

1. Lasketaan lämpövirta sisältä ulos seinän ja ikkunan muodostaman yhdistelmärakenteen läpi yhden asteen lämpötilaerolla (yksikkö W/mK) numeerisesti. Rakenteeseen otetaan mukaan yleensä vähintään 1 metrin matka seinää (tarkemmin määriteltynä luvun 4.3.2 mukaan). Ikkunan lasiosan korkeus otetaan ikkunan lämmönläpäisyyden liittyvän standardin SFS-EN ISO 10077 mukaan. Rakenteiden yksityiskohdat otetaan mukaan niin hyvin kuin mahdollista.
2. Lasketaan seinän ja ikkunan U -arvot kuvan 9 pistekatkoviivan rajaamilla alueilla rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. Seinän U -arvoon otetaan mukaan alueella olevat säännölliset kylmäsilat, esimerkiksi siteet, kannakset ja koolaukset. Seinän U -arvo voidaan laskea myös numeerisesti käyttäen pistekatkoviivan kohdalla adiabaattireunaehdot.
3. Lasketaan seinä- ja ikkunaosan lämpövirta (yksikkö W/mK) pelkkien U -arvojen avulla. On huomattava, että seinän korkeus l_1 otetaan ikkunan kehän ulkoreunaan saakka kuvan 9 mukaisesti.
4. Vähennetään todellisesta lämpövirrasta (kohta 1) U -arvoilla laskettu lämpövirta (kohta 3). Tuloksena saadaan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ . Kaavan muodossa menettely on ilmaistavissa kaavalla (4)

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (4)$$

missä lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} on kohdassa 1 laskettu lämpövirta.

5.5.1 Menettely apukarmin kuullessa seinän U-arvoon

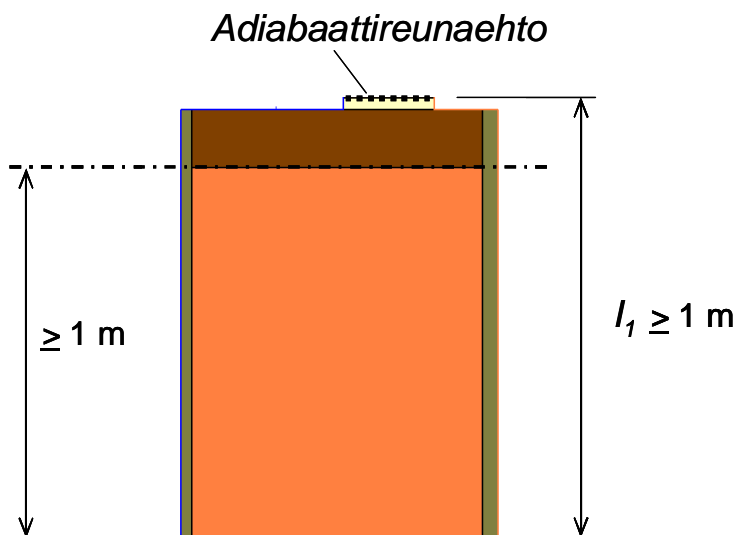
Ikkunan sivukarmi voidaan joskus kiinnittää seinässä jo muutenkin olevaan pystytolppaan, joka siten kuuluu seinän U-arvoon. Edellä on oletettu, että ikkuna on kiinnitetty apukarmiin, joka ei ole mukana seinän U-arvossa. Jos kylmäsillan laskentageometria sisältää rakenteen, joka on RakMK C4:n mukainen U-arvoon kuuluva säännöllinen rakennusosan kylmäsilta, voidaan sen vaikutus vähentää liitoksen lisäkonduktanssista. Tällöin edellä esitetty kaava (4) muuttuu muotoon

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j - \Psi_{\text{apukarmi}} \quad (21)$$

missä apukarmin vaikutus Ψ_{apukarmi} lasketaan RakMK C4:n mukaan joko numeerisesti tai käyttäen ylä- ja alalikiarvomenetelmää.

5.5.2 Yksinkertaistettu menettely ikkunaliitoksen kylmäsillalle

Edellä esitetty ikkunaliitoksen kylmäsillan laskentamenettely on varsin työläs koska ikkunan U-arvon laskenta on sinänsä hyvin vaativaa. Menettelyä on luontevinta käyttää samalla kun ikkunan U-arvoa muutenkin lasketaan. Laskentaa voidaan yksinkertaistaa tarkkuuden kustannuksella jättämällä ikkuna kokonaan pois laskenta-alueesta ja asettamalla ikkunan karmin paikalle adiabaattireunaehto (täydellinen lämpöeristys) kuvan 10 mukaisesti. Muilta osin laskenta tapahtuu samalla tavalla kuin edellä esitettiin. Menettely soveltuu silloin kun ikkuna on kiinnitetty apukarmiin tai massiiviseen seinään, esimerkiksi kevytbetoniseinään.



Kuva 10. Yksinkertaistettu menettely ikkunan liitoksen kylmäsilan laskentaan. Ikkuna korvataan adiabaattireunaehdolla ja karmen syvyytenä käytetään laskennallista karmisyvyyttä. Seinän U-arvo lasketaan pistekatkoviivojen välisen rakenteen perusteella. Vertailutilanteen lämpövirta lasketaan seinän mitan l_1 mukaan.

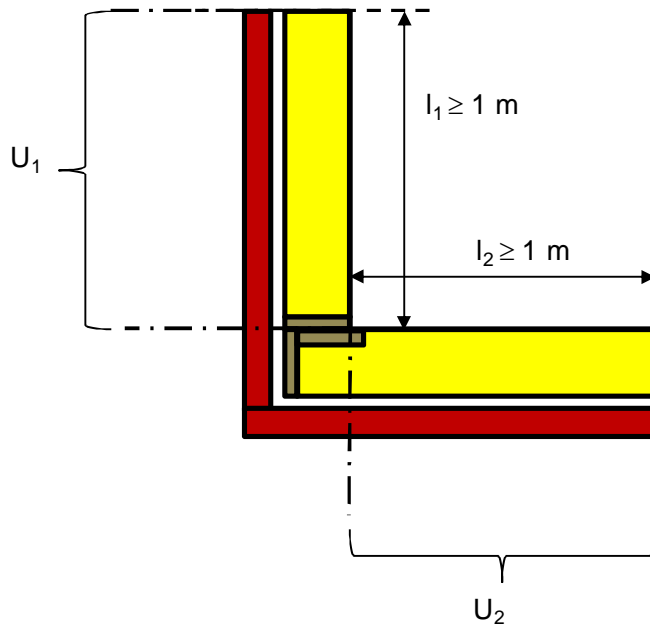
Adiabaattireunaehdon yhteydessä karmia on kavennettava. Tämä laskennallinen karmisyvyys riippuu todellisesta karmisyvyydestä ja ikkunatyypistä taulukon 7 mukaan. Karmia kavennetaan laskennassa ulkopuolelta (kuva 34 sivulla 54).

Taulukko 7. Laskennallinen karmisyvyys kun laskennassa käytetään adiabaattireunaehto. Koskee puuikkunoita ja vastaavia puu-alumiini-ikkunoita, jotka kiinnitetään apukarmiin tai massiivisen seinään.

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

5.6 Ulkoseinien välinen liitos

Kuvassa 14 on esimerkki ulkoseinien väliseen liitokseen muodostuvasta kylmäsillasta.



Kuva 11. Esimerkki ulkoseinien välisen liitoksen kylmäsilloista.

Kylmäsillan lisäkonduktanssin laskentaperiaate on seuraava:

1. Lasketaan lämpövirta rakenteen läpi sisältä ulos yhden asteen lämpötilaerolla metriä kohti (yksikkö W/mK) numeerisesti. Rakenteeseen otetaan mukaan yleensä vähintään 1 metrin matka liittyvistä seinistä. Etenkin liitoksen lähellä olevat rakenteen yksityiskohdat otetaan mukaan niin hyvin kuin mahdollista. Eristeiden lämmönjohtavuudet määritetään niin, että seinien U-arvoista tulee samat kuin kohdassa 2.
2. Lasketaan seinien U-arvot kuvan 11 pistekatkoviivojen rajaamalla alueilla rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. U-arvoon otetaan mukaan alueella olevat säännölliset kylmäsillat, esimerkiksi siteet, kannakset ja koolaukset. Toinen vaihtoehto on laskea U-arvot numeerisesti käyttäen pistekatkoviivan kohdalla adiabaattireunaehdot.
3. Lasketaan U-arvojen avulla koko seinäosan lämpövirta astetta ja metriä kohti (yksikkö W/mK). Seinien leveydet l_1 ja l_2 otetaan liittyvien seinien sisäpintojen mukaisesti kuvassa 11 esitetyllä tavalla.
4. Vähennetään todellisesta lämpövirrasta (kohta 1) seinien U-arvoilla laskettu lämpövirta (kohta 3). Tuloksena saadaan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ . Kaavan muodossa menettely on ilmaistavissa kaavalla (4)

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (4)$$

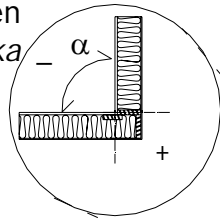
missä lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} on kohdassa 1 laskettu lämpövirta.

Osa rakennuksen kulmassa olevista rakenteista voi kuulua seinän säännöllisiin kylmäsiltoihin, esimerkiksi seinässä tasajaolla oleviin runkotoilppiin. Nämä rakenteet on jo laskettu seinän U-arvoon, jolloin seinien liitoksen lisäkonduktanssista voidaan vähentää säännöllisten kylmäsiltojen osuus ($\Psi_{\text{säännöllinen}}$):

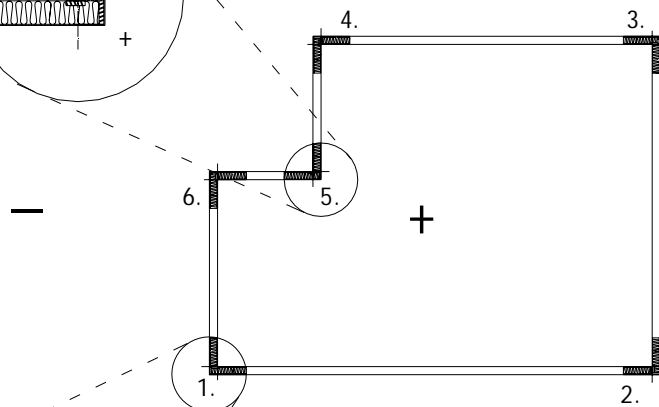
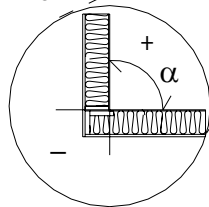
$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j - \Psi_{\text{säännöllinen}} \quad (22)$$

Rakennuksen ulkoseinien piirillä on yleensä sekä ulko- että sisänurkkia (kuva 12). Vaikka ulkoseinien välinen liitos ei välttämättä muodosta 90 asteen kulmaa, voidaan kaikki ulkoseinien välisten liitosten aiheuttamat lisäkonduktanssit laskea tämän ohjeen mukaisesti. Teoriassa liitoksen lisäkonduktanssi pienenee nurkan asteluvun kasvaessa ($\alpha \rightarrow 180^\circ$, $\Psi \rightarrow 0 \text{ W/mK}$). Käytännössä kulmalii-
toksessa tarvittavat tukirakenteet voivat vaikuttaa lisäkonduktanssin arvoon kulman geometriaa enemmän.

Ulkoseinien välinen
sisänurkka



Ulkoseinien välinen
ulkonurkka



Kuva 12. Kuvan rakennuksen yksi nurkka on sisänurkka.

6 Esimerkkilaskelmat

6.1 Puurankainen ulkoseinä

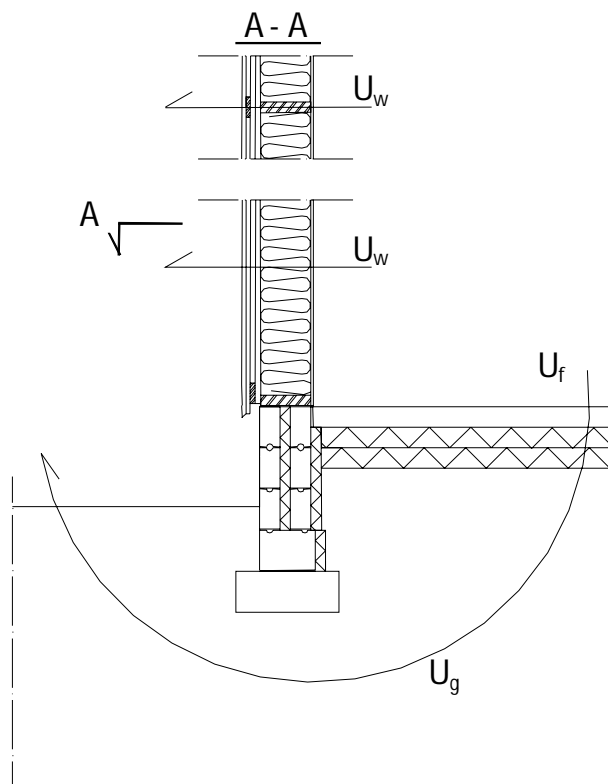
Tarkasteltavan rankarakenteisen seinän eristyspaksuus oli 245 mm. Sisäpinnassa oli 12 mm kipsilevy ja ulkopinnassa 25 mm tuulensuojalevy. Tuulensuojalevyn ulkopuolista tuuletusrakoa ja lauta-verhousta ei otettu laskennoissa huomioon, koska tuuletusraon oletetaan olevan hyvin tuulettuva. Tässä tapauksessa tuulensuojalevyn ulkopinnan pintavastuksena käytettiin arvoa $R_{se} = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ (taulukko 5). Lämmöneristeen lämmönvastukseen on laskettu mukaan kaikki eristekerroksen läpäisevät säännölliset runkotolpat ja jäykisteet. Seinän kokonaislämmönläpäisykertoimeksi on näin saatu $U_w = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ (taulukko 8).

Taulukko 8. Seinärakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit..

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)
Pintavastus (R_{si})			0,13
Kipsilevy	12	0,15	0,08
Mineraalivilla+ koo- laus	245	0,047	5,21
Tuulensuojalevy	25	0,06	0,42
Pintavastus (R_{se})			0,04
Σ			5,879
$U_1 = 1/\Sigma R$			0,170 $\text{W/m}^2\text{K}$

6.1.1 Puurankainen ulkoseinä ja maanvastaisen alapohja

Kuvassa 13 on esitetty seinän ja harkkoperustuksen liittyminen maanvastaiseen alapohjaan. Liitoksessa olevan solumuovikaistan lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa $\lambda_U = 0,02 \text{ W/mK}$ ja ulkoseinän alaohjauspuun lämmönjohtavuutena $\lambda_U = 0,18 \text{ W/mK}$. Taulukossa 8 on esitetty seinärakenteen mallinnetut rakennekerrokset ja niihin liittyvät parametrit, taulukossa 9 alapohjalaatan rakennekerrokset ($U_f = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$) ja taulukossa 10 halkaistun sokkelirakenteen vastaavat arvot.



$$U_w = 1/\sum R = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$$

	R (m ² K/W)
Pintavastus (R _{si})	0,13
Kipsilevy (12 mm)	0,08
Min. villa +	
koolaus (245 mm)	5,21
Tuulensuojal. (25 mm)	0,42
Pintavastus (R _{se})	0,04
Σ	5,88

$$U_f = 1/\sum R = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

	R (m ² K/W)
Betonilaatta (100 mm)	0,05
EPS-eriste (200 mm)	5,56
Σ	5,61

Kuva 13. Puurakenteisen ulkoseinän ja harkkoperustuksen liittyminen maanvastaiseen paikalla valettuun alapohjaan.

Kuvan 13 liitosdetalji on yksinkertaistettu kuvan 14 mukaiseksi rakennemalliksi, joka on mallinnettu numeerisesti kaksiulotteisella elementtimenetelmällä. Rakenteiden sisä- ja ulkopintojen pintavastukset on annettu mallissa taulukon 5 mukaisesti.

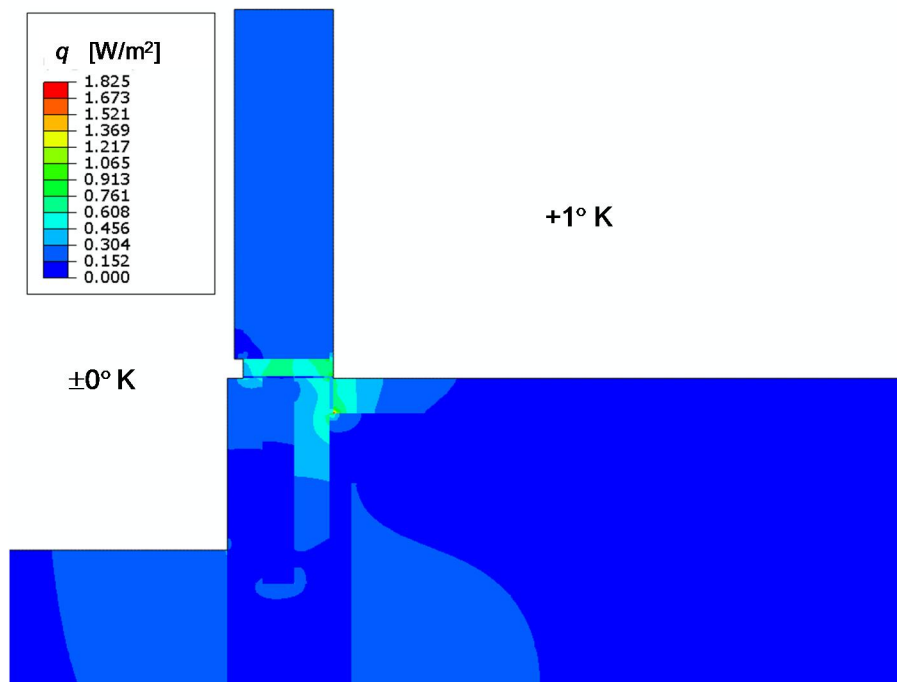
Taulukko 9. Lattiarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Betonilaatta	100	2,0	0,050
EPS eriste	200	0,036	5,556
Σ			5,606
$U_2 = 1/\Sigma R$			0,18 W/m ² K

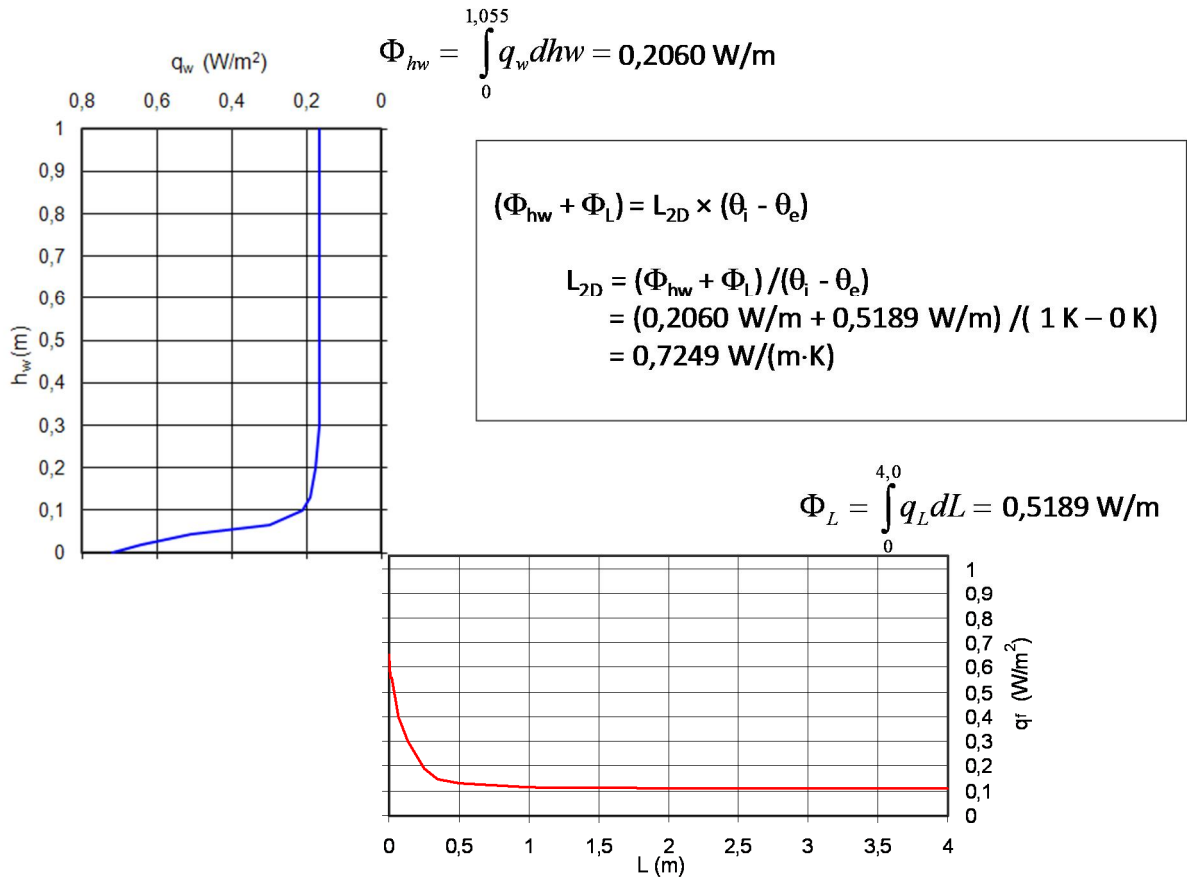
Taulukko 10. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Harkko	100	0,3	0,333
EPS eriste	50	0,036	1,389
Harkko	100	0,3	0,333
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			2,095
$U_3 = 1/\Sigma R$			0,48 W/m ² K

Kuvassa 15 on esitetty elementtimenetelmällä laskettu rakenteen lämpövirtajakauma seinän ja maanvastaisen alapohjan liitoksessa, kun lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä on $\Delta T = 1$ K. Alaohjauspuusta muodostuu kylmäsilta, jonka vaikutusta lämpökatko puun ja sokkelin välissä pienentää. Samoin lämpökatko laatan reunan ja sokkelin välissä vähentää lämpövirtaa laatan reunasta sokkeliin ja edelleen pohjamaahan. Mallista määritetyt seinä- ja lattiarakenteen sisäpintojen lämpövirtajakaumat on esitetty kuvassa 16.



Kuva 15. 2-ulotteinen lämpövirtajakauma (q , [W/m²]) tutkitussa rakenneliitoksessa läpi, kun lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä on $\Delta T = 1\text{ K}$.



Kuva 16. Numeerisesti kaksikulotteisella elementtimenetelmällä määritetyt rakenteen sisäpintojen lämpövirtajakaumat (q_f = lattiat ja q_w = seinä) ja rakenneosien yhteenlasketut lämpövirrat (Φ_{hw} ja Φ_L), sekä lämpöteknisen kytkentäkertoimen (L_{2D}) määrittäminen.

Numeerisesti määritetty liitoksen lämpötekninen kytkentäkerroin sisä- ja ulkoilman välillä on $L_{2D} = 0,7249 \text{ W/(mK)}$ (kuva 16).

Esimerkeissä alapohja on hyvin eristetty, jolloin sen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavasta (9):

$$U = \frac{\lambda}{0,457 \times B' + d_t} + \frac{\Psi_{ge}}{B'} = \frac{2}{0,457 \times 8 + 11,914} - \frac{0,0100}{8} = 0,1272 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

missä

λ on pohjamaan lämmönjohtavuus = 2 W/mK
 B' alapohjalaatan karakteristinen mitta = 8 m
 d_t rakenteen ekvivalentti paksuus, m

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,282 + 2(0,17 + 5,606 + 0,04) = 11,914 \text{ m}$$

missä

$R_f = 5,606 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (laatta, lämmöneriste, kuva 13)
 $R_{si} = 0,17 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (lattian sisäpinnan pintavastus, taulukko 5)
 $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (pohjamaan ulkopinnan pintavastus, taulukko 5)

$w = 0,282 \text{ m}$ (seinärakenteen leveys, kuva 14)

Perusmuurin viivamainen lisäkonduktanssi Ψ_{ge} saadaan kaavalla

$$\Psi_{ge} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 D_v}{d_t + d'_v} + 1 \right) \right] = -0,0100 \text{ W / mK}$$

missä $D_v = 0,4 \text{ m}$ (perusmuurin lämmöneristeen korkeus maanpinnan alapuolella) ja

$$d'_v = \lambda \left(R_{nv} - \frac{d_{nv}}{\lambda} \right) = 3,94 \text{ m}$$

missä

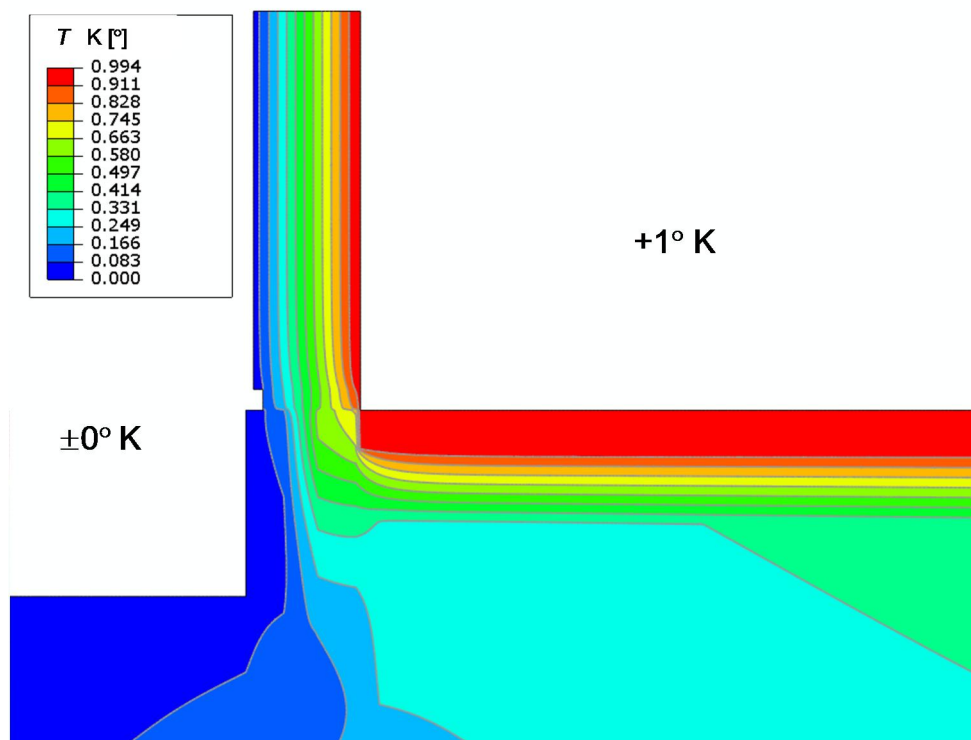
$R_{nv} = 2,095 \text{ W/m}^2\text{K}$ (perusmuurin lämmönvastus, taulukko 10)

$d_{nv} = 0,25 \text{ m}$ (perusmuurin paksuus, eriste ja runkorakenne)

Tarkasteltavan liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ saadaan kaavasta (5):

$$\begin{aligned} \Psi &= L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B'U = \\ &= 0,7249 \text{ W/mK} - 1,0 \text{ m} \times 0,17 \text{ W/m}^2\text{K} - 0,5 \times 8,0 \text{ m} \times 0,1272 \text{ W/m}^2\text{K} = \\ &= 0,7249 - 0,6788 = \underline{\underline{0,0461 \text{ W/mK}}}. \end{aligned}$$

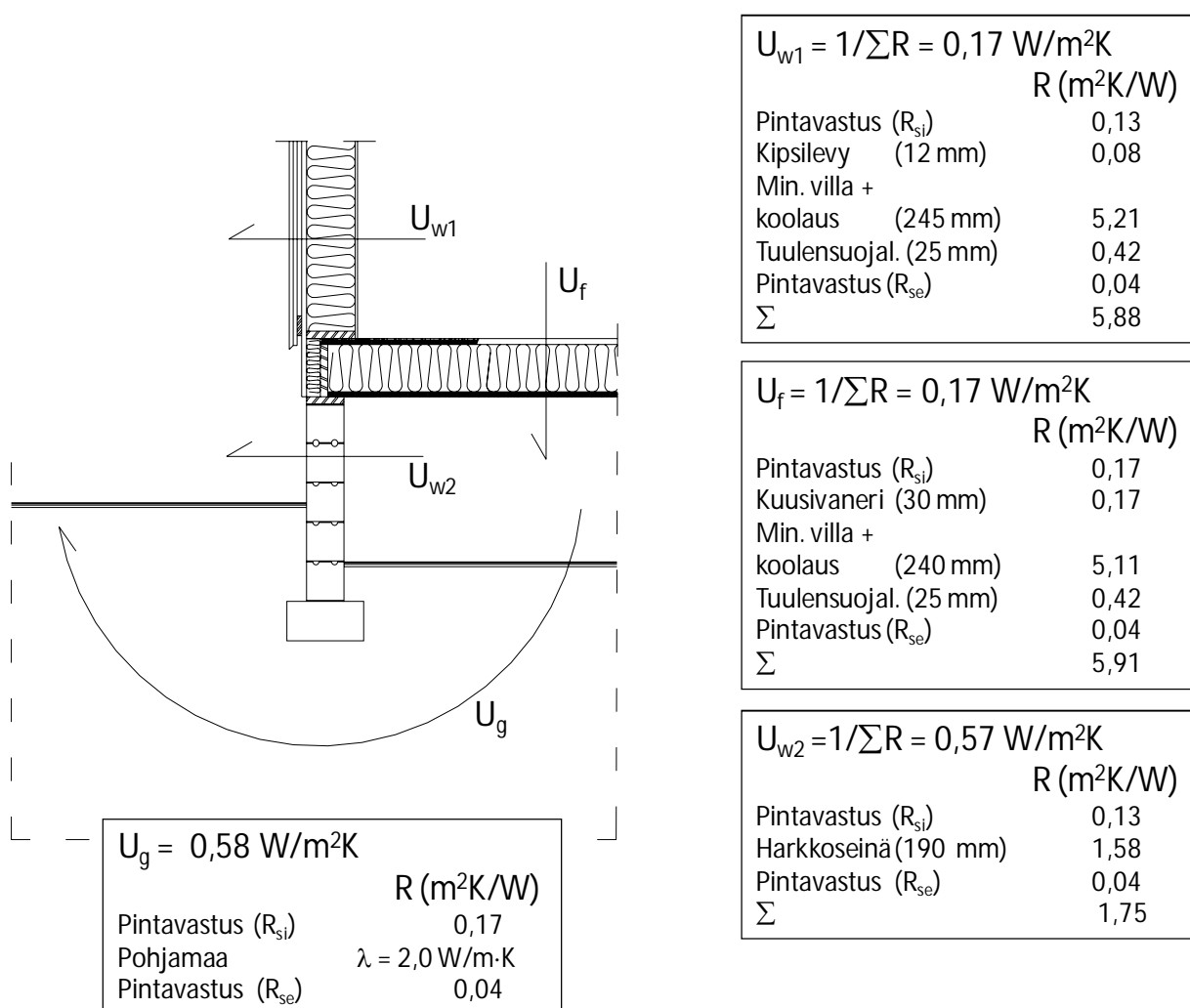
Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,10 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).



Kuva 17. Lämpötilajakauma puurankaseinän ja maanvastaisen betonialapohjan liitoksessa.

6.1.2 Puurankainen ulkoseinä ja puurankainen ryömintätilainen alapohja

Kuvassa 18 on esitetty puurakenteisen ryömintätilaisen alapohjan, ulkoseinän ja harkkoperustuksen liitos. Ulkoseinärakenteen lämmöneristeen lämmönvastukseen on laskettu mukaan kaikki eristekerroksen läpäisevät säännölliset runkotolpat ja jäykisteet. Seinän kokonaislämmönläpäisykertoimeksi on saatu $U_w = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tuuletusraon ulkopuolisia rakennekerroksia ei ole otettu laskennassa huomioon. Lisäksi ulkoseinän alaohjauspuun lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa $\lambda_U = 0,18 \text{ W/m K}$. Taulukossa 8 on esitetty seinärakenteen mallinnetut rakennekerrokset ja niihin liittyvät parametrit, taulukossa 11 alapohjan rakennekerrokset ($U_f = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$) ja taulukossa 12 sokkelirakenteen vastaavat arvot.



Kuva 18. Puurankaisen ulkoseinän, ryömintätilaisen alapohjan ja sokkelin välinen liitosdetalji.

Taulukko 11. Puurakenteisen lattiarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,17
Kuusivaneri	30	0,18	0,17
Mineraalivilla +koolaus	240	0,047	5,11
Tuulensuojalevy	25	0,06	0,42
Pintavastus (R_{se})			0,04
Σ			5,91
$U_f = 1/\Sigma R$			0,169 W/m ² K

Taulukko 12. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,13
Harkko	190	0,3	1,58
Pintavastus (R_{se})			0,04
Σ			1,75
$U_{w2} = 1/\Sigma R$			0,571 W/m ² K

Taulukossa 13 on esitetty kolmesta laskettavasta tapauksesta määritetyt apusuureiden arvot L_1 , L_2 ja L_3 .

Taulukko 13. Kolmen laskentatapauksen tulokset L_1 , L_2 tai L_3 .

Laskentatapa	L_{ie} (W/mK)	L_{iu} (W/mK)	$L_{ue,c,sokkeli}$ (W/mK)	$L_{ue,c,pohjamaa}$ (W/mK)	$\Sigma L_{ue,c}$ (W/mK)	L_i (W/mK)
1 (L_1)	0,2080	0,7037	-	-	-	0,9117
2 (L_2)	0,2006	-	0,5881	1,7819	2,3700	2,5706
3 (L_3)	-	0,6638	0,6095	1,7844	2,3939	3,0577

Tulosten perusteella voidaan laskea arvot kolmelle johtumislämmönläpäisykertoimelle sisäilman, ulkoilman ja ryömintätilan välille (L_{ie} , L_{ui} ja $L_{ue,c}$, kuva 6):

$$L_{iu} = 0,5 \times (L_1 - L_2 + L_3) = 0,5 \times (0,9117 \text{ W/mK} - 2,5706 \text{ W/mK} + 3,0577 \text{ W/mK}) = 0,6994 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ie} = 0,5 \times (L_1 + L_2 - L_3) = 0,5 \times (0,9117 \text{ W/mK} + 2,5706 \text{ W/mK} - 3,0577 \text{ W/mK}) = 0,2123 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue,c} = 0,5 \times (L_2 + L_3 - L_1) = 0,5 \times (2,5706 \text{ W/mK} + 3,0577 \text{ W/mK} - 0,9117 \text{ W/mK}) = 2,3583 \text{ W/(mK)}$$

Lasketaan tapaus, jossa ryömintätilan ilma vaihtuu koneellisesti 0,5 kertaa tunnissa ($n = 0,5$):

$$\dot{V} = n \times V / 3600 \text{ s} = 0,5(0,8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}) / 3600 \text{ s} = 0,000444 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_{ue,v} = \rho c_p \dot{V} / P = 1,23 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ J/(kgK)} \times 0,000444 \text{ m}^3/\text{s} / 1 \text{ m} = 0,5467 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} = 2,3583 \text{ W/mK} + 0,5467 \text{ W/mK} = 2,9050 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu} L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right) = (0,6994 \text{ W/mK} \times 2,9050 \text{ W/mK}) / (0,6994 \text{ W/mK} + 2,9050 \text{ W/mK}) + 0,2123 \text{ W/mK} = 0,7760 \text{ W/(mK)}.$$

Vertailuarvot saadaan liittyvien rakenneosien, seinän ja alapohjan, laskennallisista lämmönläpäisykertoimista (U_w ja U), jolloin tarkastellun liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ on kaavasta (13):

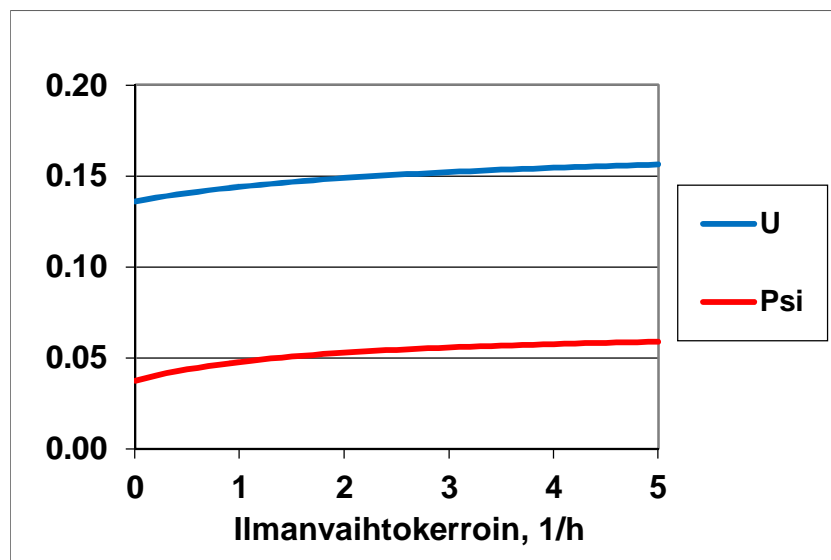
$$\Psi = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = 0,7760 \text{ W/(mK)} - 1 \text{ m} \times 0,1701 \text{ W/(m}^2\text{K)} - 4 \text{ m} \times 0,1406 \text{ W/(m}^2\text{K)} = \underline{\underline{0,0436 \text{ W/(mK)}}}$$

missä alapohjan lämmönläpäisykerroin U on määritetty kaavalla 17:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + 2 \frac{h_{w2} U_{w2}}{B'} + \frac{\dot{V}_{c,p} \rho}{A}} = \frac{1}{0,1692} + \frac{1}{0,58 + 2 \frac{0,8 \cdot 0,571}{8} + \frac{0,5467}{4}}$$

josta $U = 0,1406 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Kuvassa 19 on esitetty ryömintätilan ilmanvaihdon vaikutus liitoksen laskennalliseen lisäkonduktanssiin. Ilmanvaihdon lähestyessä ääretöntä lisäkonduktanssi lähestyy arvoa $0,0648 \text{ W/(mK)}$.



Kuva 19. Ryömintätilan ilmanvaihtokertoimen (vaihtoa tunnissa) vaikutus alapohjan lämmönläpäisykertoimeen U ja liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin Ψ .

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja ryömintätilaisen alapohjan liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille on $0,06 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

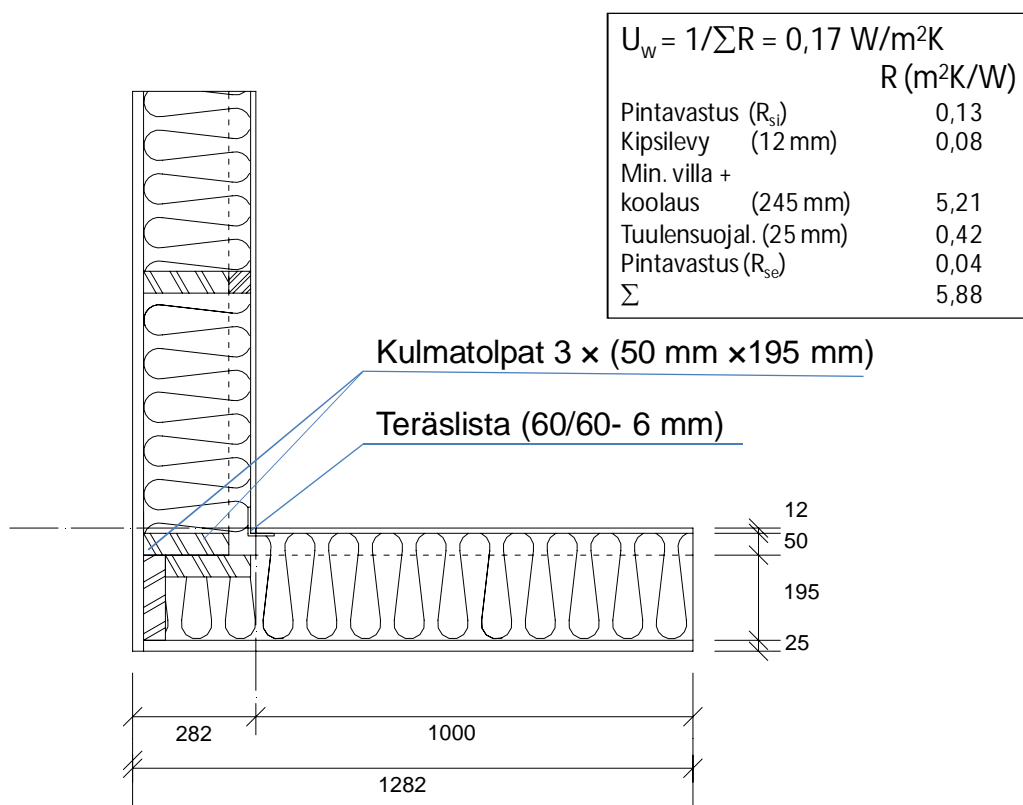
6.1.3 Puurankaisten ulkoseinien väliset liitokset

Kuvassa 20 on esitetty puurankaisten ulkoseinien ulkonurkka ja kuvassa 21 laskennassa käytetty malli. Kaikki liitokseen liittyvät rakenteet seinän sisällä (kulmatolpat ja sisälevytyksen tukena oleva teräslista) on mallinnettu. Seinärakenteen säännölliset kylmäsillat (koolaus) kuuluvat seinän U-arvoon ja ovat mukana eristeen tehollisessa lämmönjohtavuudessa. Taulukossa 14 on esitetty seinärakenteen lämmönläpäisykertoimen muodostuminen.

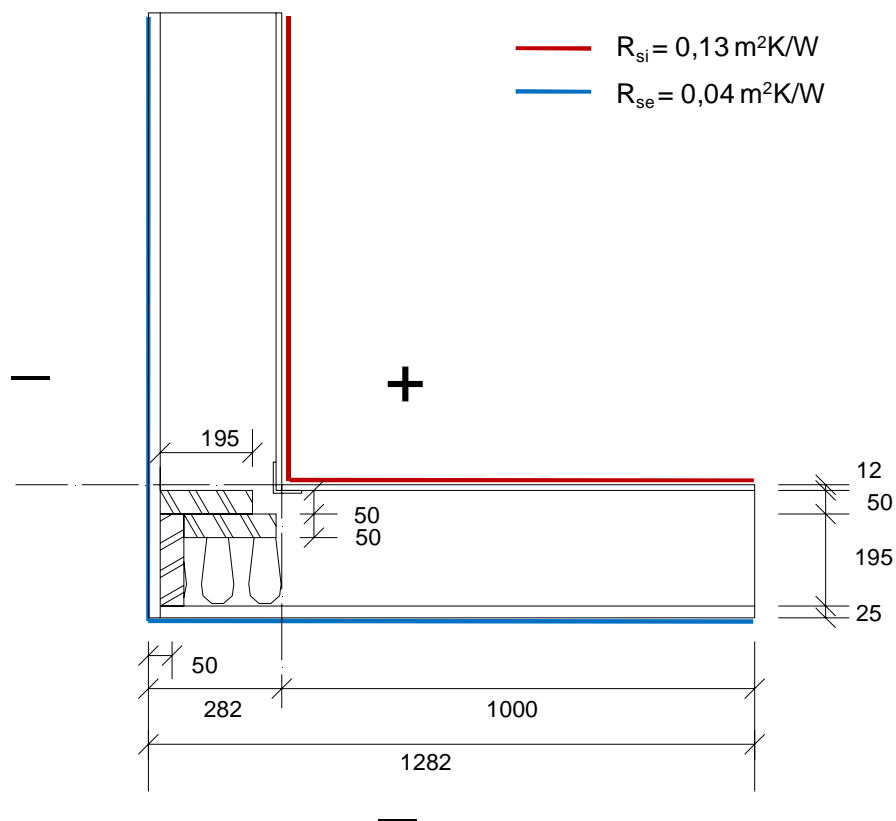
Taulukko 14. Seinärakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit..

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ_U (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K/W)
Pintavastus (R_{si})			0,13
Kipsilevy	12	0,15	0,08
Mineraalivilla+ koolaus	245	0,047	5,21
Tuulensuojalevy	25	0,06	0,42
Pintavastus (R_{se})			0,04
Σ			5,88
$U_1 = 1/\Sigma R$			0,170 W/m ² K

Teräslistan (60/60 – 6 mm) lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa $\lambda_{teräs} = 50$ W/mK



Kuva 20. Mallinnettava kahden puurankaisten ulkoseinien muodostama ulkokulma.



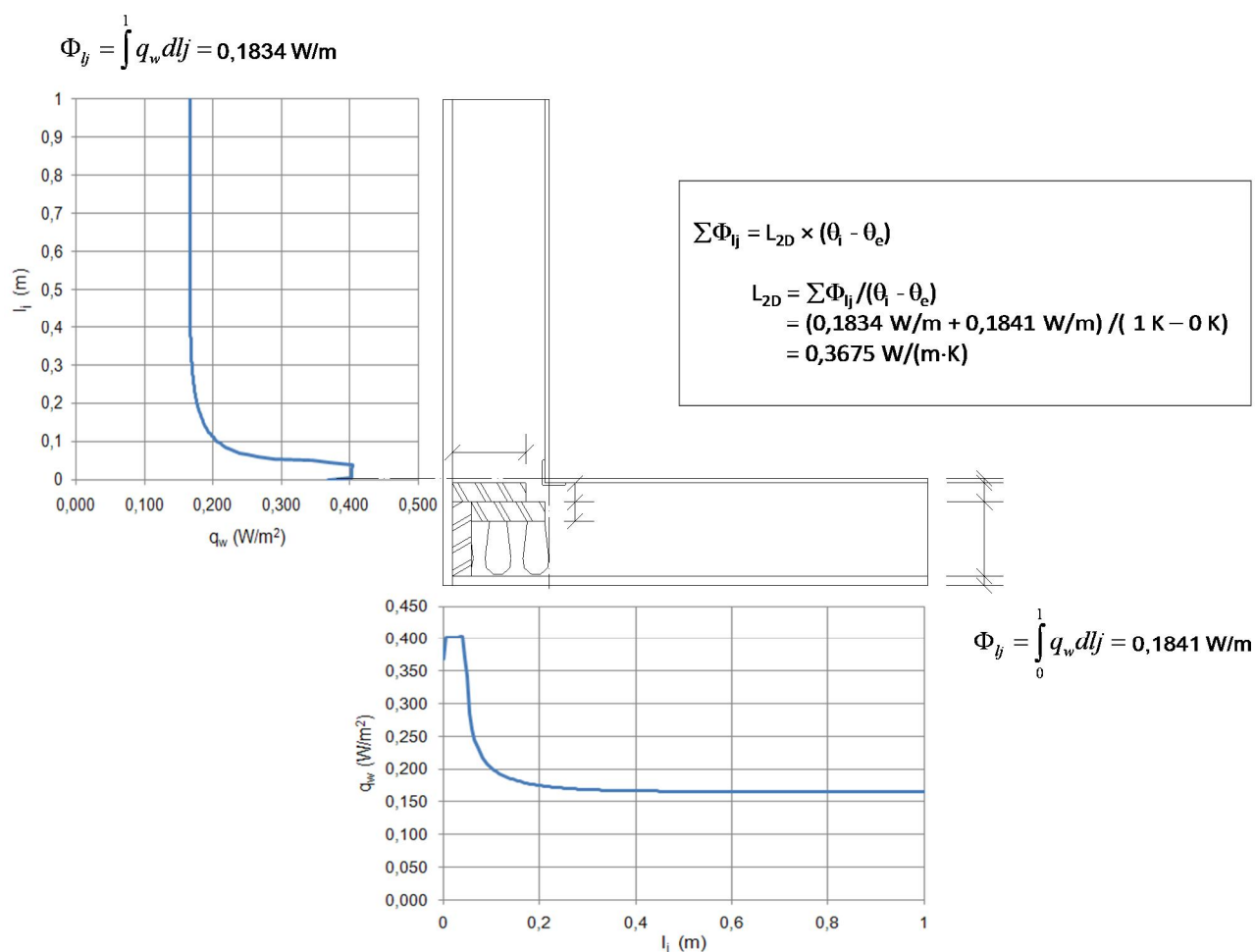
Kuva 21. Kuvan 20 detaljista yksinkertaistettu laskentamalli ja mallin pintavastukset.

Kuvassa 22 on esitetty seinien sisäpintojen lämpövirtajakauumat ja niistä laskettu liitoksen lämpötekninen kytkentäkerroin. Sen arvo on $L_{2D} = 0,3675 \text{ W/(mK)}$

Kaavasta (4) saadaan kulman viivamaisen lisäkonduktanssin arvo:

$$\Psi = L_{2D} - 2 \times (U_w \times l_j) = 0,3675 \text{ W/(mK)} - 2 \times (0,1701 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1 \text{ m}) = \underline{\underline{0,027 \text{ W/(mK)}}}.$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisten ulkoseinien välisen ulkonurkan lisäkonduktanssille on $0,04 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).



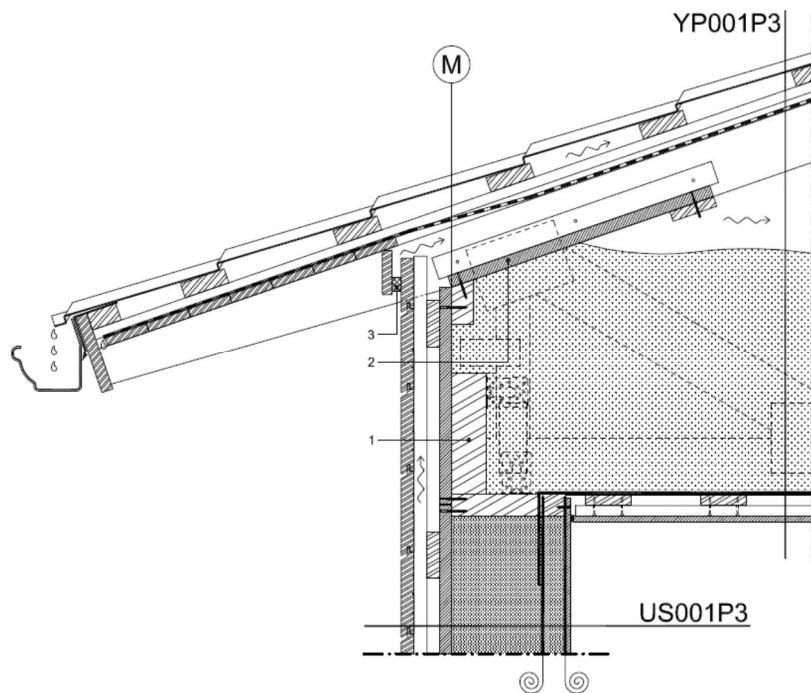
Kuva 22. Puurankaisten ulkoseinien sisäkulman lämpöteknisen kytkentäkertoimen L_{2D} määrittäminen.

6.1.4 Puurankaisten ulkoseinien ja puuyläpohjan liitos

Kuvassa 23 on esimerkki kantavan ulkoseinän ja naularistikkoyläpohjan liitoksesta. Seinärakenne on tässäkin kylmäsilän laskentaesimerkissä sama kuin edellä taulukossa 14, jossa seinän lämmönläpäisykerroin on $U = 0,170 \text{ W/m}^2\text{K}$. Yläpohjan lämmönläpäisykerroin on $0,088 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja se muodostuu taulukon 15 mukaisesti.

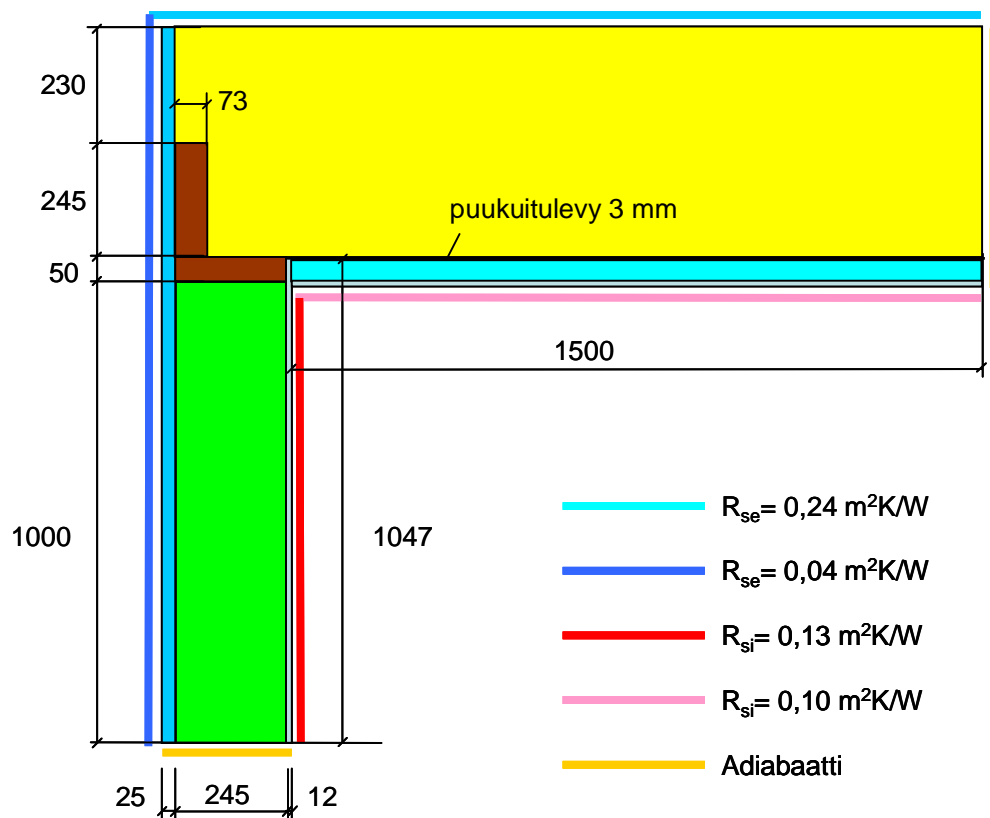
Taulukko 15. Yläpohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros alhaalta ylös	Kerros- paksuus mm	Lämmön- johtavuus W/mK	Lämmönvastus R ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)
Pintavastus R_{si}			0,10
Sisäverhouslevy	12	0,15	0,08
Tuulettumaton ilmarako (RakMK C4)	47	0,294	0,16
Puukuitulevy	3	0,17	0,018
Mineraalivilla + koolaus	475	0,0442	10,75
Katon ilmatilan lämmönvastus R_u (C4)			0,2
Pintavastus R_{se}			0,04
ΣR			11,35
$U = 1/\Sigma R$			0,0881 $\text{W/m}^2\text{K}$



Kuva 23. Esimerkki kantavan ulkoseinän ja naularistikkoylepohjan liitoksesta (Puuinfo).

Kuvassa 24 on yksinkertaistettu geometria kylmäsilan laskentaa varten. Rakenne on laskettu kaksikulotteisena, jolloin seinän pystykoolausten ja katon naularistikoiden vaikutus liitoksen lämpövirtaan jää huomiotta. Siten saatava lisäkonduktanssi on hieman todellista pienempi. Laskentaseinän korkeudeksi on valittu 1 m vaakakoolauksen alareunasta ja katon leveydeksi 1,5 m sisäseinästä lukien. Puun lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa 0,13 W/mK.

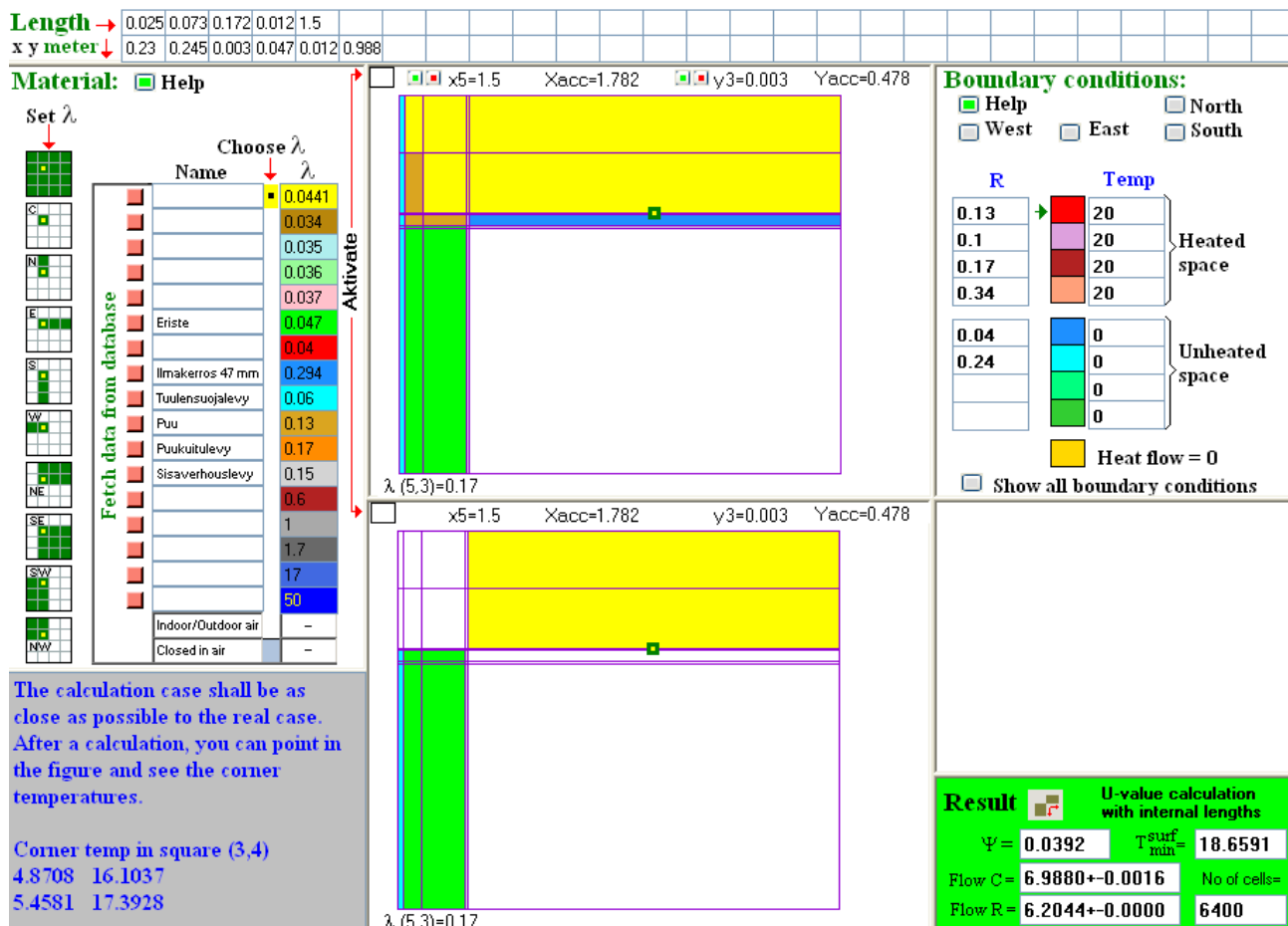


Kuva 24. Kuvan 23 detaljista yksinkertaistettu laskentamalli ja mallin pintavastukset. Seinän vertailulämpövirran laskennassa seinän korkeus (1047 mm) otetaan kattoeristeen alapuolella olevan 3 mm puukuitulevyn alapintaan.

Kun mitat, lämmönjohtavuudet ja reunaehdot asetetaan kylmäsiltojen laskentaohjelmaan, siitä saadaan kuvan 25 mukainen tulostus. Tämä ohjelma laskee paitsi kylmäsiltojen lisäksi vertailutapauksen (ilman kylmäsiltaa) ja niiden avulla suoraan liitoksen lineaariseen lisäkonduktanssiin $\Psi = 0,0392 \text{ W/mK}$. Lähes sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 25 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

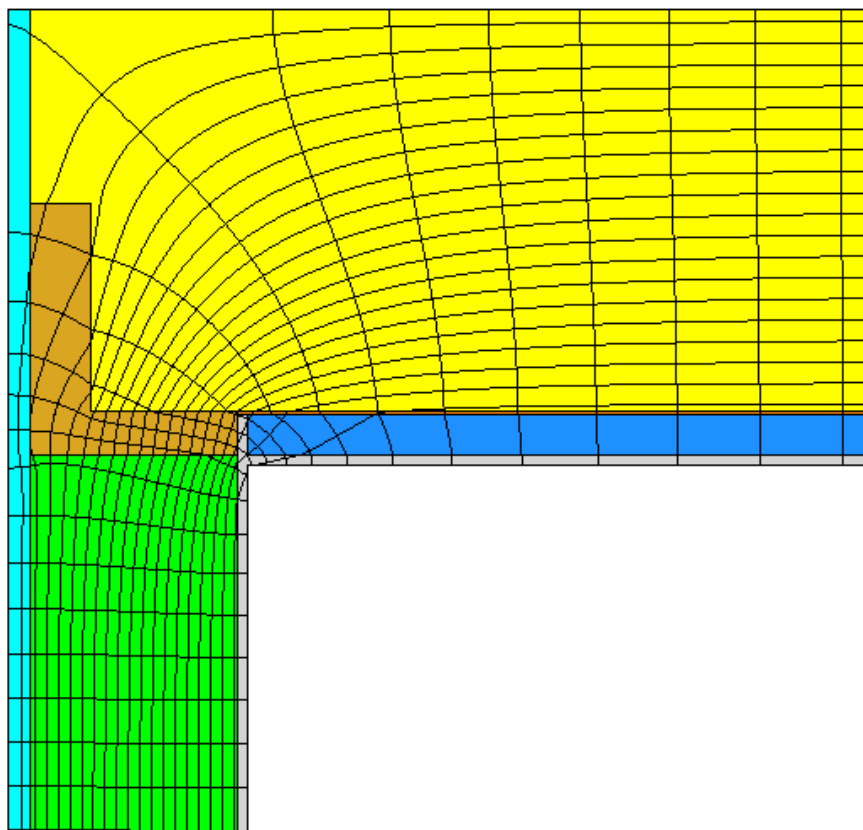
$$\Psi = L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 6,988/20 \text{ W/mK} - 0,1701 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,047 \text{ m} - 0,0881 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,5 \text{ m} = 0,3494 - 0,3101 = \underline{\underline{0,0392 \text{ W/mK}}}.$$

Tulos on siten kolmen numeron tarkkuudella sama kuin suoraan ohjelmasta saatu kun seinän U -arvossa käytettiin neljää numeroa ($U = 0,1701 \text{ W/m}^2\text{K}$). Yleensäkin on syytä käyttää kaavassa (4) pyöristämättömiä lukuarvoja, jotta vältetään pyöristysvirheet kahden lähes yhtä suuren luvun vähennyslaskussa.



Kuva 25. Kuvan 24 tilanteen laskenta Unorm-ohjelmalla. Varsinainen laskentatapaus on ylemmänä, alempana on vertailutapaus. Näiden tilanteiden lämpövirrat 20 asteen lämpötilaerolla (W/m) sekä erotus Ψ (W/Km) ovat tulosruudussa oikealla.

Kuvassa 26 on tilanteen lämpötila- ja lämpövirtakenttä, josta nähdään, että alimmat pintalämpötilat ja suurimmat lämpövirrat ovat seinän ja katon liittymäkohdassa. Pintalämpötilojen ja pinnan kondensitarkastelun suhteen on kuitenkin syytä huomata, että tarkkaan ottaen siinä yhteydessä on käytettävä suurempia pintavastuksia kuin näissä lämpöhäviölaskelmissa (luku 4.3.3). Laskennan yhteydessä on hyvä ottaa tavaksi tarkastella lämpötilakenttiä, koska ne paljastavat kokemuksen mukaan ainakin karkeimmat lähtötietojen syöttövirheet.



Kuva 26. Kuvan 24 tilanteen lämpötilojen tasa-arvokäyrät 1 asteen välein sekä niitä vastaan kohtisuorassa olevat lämpövirran virtaviivat. Kaikista virtaviivojen väleistä virtaa sama lämpövirta eli mitä tiheämmässä virtaviivat ovat sitä suurempi on lämpövirta. Ulkolämpötila on 0 °C ja sisälämpötila 20 °C.

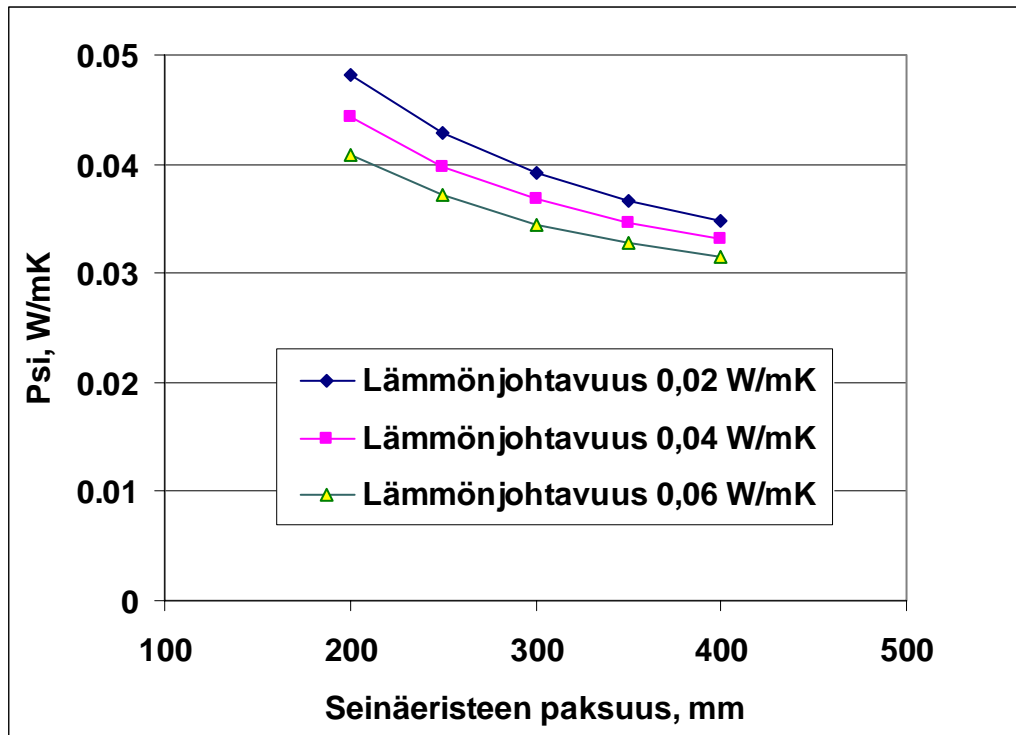
Jos katon alapuolella oleva ilmarako on hyvin tuulettuva jätetään sen ja sisäverhouslevyn lämmönvastukset huomiotta. Tällöin saadaan liitoksen lineaariselle lisäkonduktanssille 11 % suurempi arvo (vertaa tilanteita 1 ja 2 taulukossa 16).

Taulukko 16. Seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssi eri tapauksissa.

Tilanne		Lisäkonduktanssi Ψ , W/mK
1	Katon ilmarako ja 3 mm puukuitulevy mukana (perustilanne)	0,0392
2	Ei katon ilmarakoa, 3 mm puukuitulevy mukana	0,0436
3	Ei ilmarakoa eikä puukuitulevyä mukana	0,0432
4	Tuulensuojalevy 50mm, muuten kuten tilanne 1	0,0373
5	Tuulensuojalevy 100mm, muuten kuten tilanne 1	0,0347
6	Ei tuulensuojalevyä, muuten kuten tilanne 1	0,0418
7	Yläpohjan eriste 575 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0413
8	Yläpohjan eriste 675 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0434

Taulukossa 16 on esitetty myös tilanne, jossa seinän lämmönläpäisykerrointa parannetaan paksumalla tuulensuojalevyllä. Samalla liitoskohdan lineaarinen lisäkonduktanssi pienenee. Jos taas U-arvoa parannetaan seinäeristeen lämmönjohtavuutta parantamalla liitoksen lisäkonduktanssi hieman

kasvaa. Tämä näkyy kuvasta 27, jossa esimerkiksi lämmönjohtavuuden muutos 0,04 -> 0,02 W/m²K pienentää U-arvon lähes puoleen. Syynä lisäkonduktanssin kasvuun on, että hyvin lämpöä johtava runkopuu korvaa vertailuseinän huonosti lämpöä johtavan eristeen ja mitä pienempi eristeen lämmönjohtavuus on sitä suuremmaksi ero vertailuseinään muodostuu ja samalla lisäkonduktanssi kasvaa. U-arvon parantaminen rungon paksuutta lisäämällä sitä vastoin pienentää liitoksen lisäkonduktanssia koska sekä runkopuun että eriste-osan lämpöhäviö pienenevät. Yläpohjan eristekerroksen paksuntaminen sitä vastoin suurentaa lisäkonduktanssia (taulukon 16 tilanteet 7 ja 8).

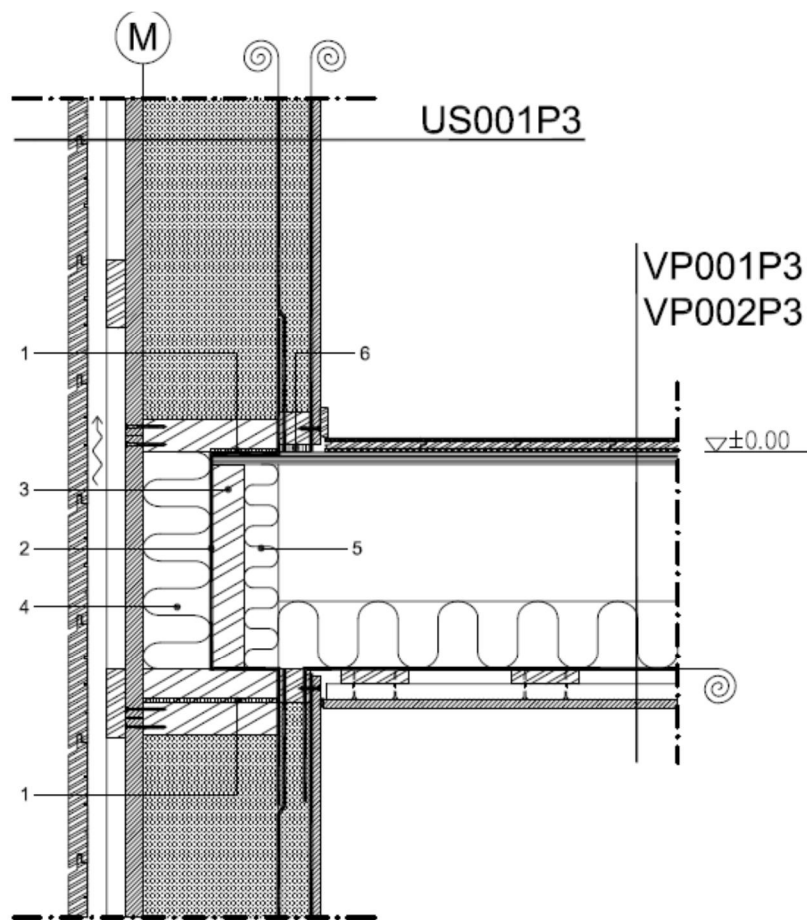


Kuva 27. Seinän eristyspaksuuden (rungon paksuuden) sekä lämmönjohtavuuden vaikutus seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssiin. Muuten tilanne on sama kuin tilanne 1 taulukossa 16.

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja yläpohjan liitokselle on 0,05 W/(mK) (taulukko 1).

6.1.5 Puurankaisen ulkoseinän ja välipohjan liitos

Kuvassa 28 on esimerkki ulkoseinän ja palkkivälipohjan liitoksesta. Välipohjan runkona ovat 300 mm korkeat palkit, joiden jako on 400 mm. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 14 ja sen lämmönläpäisykerroin on $U = 0,170 \text{ W/m}^2\text{K}$.



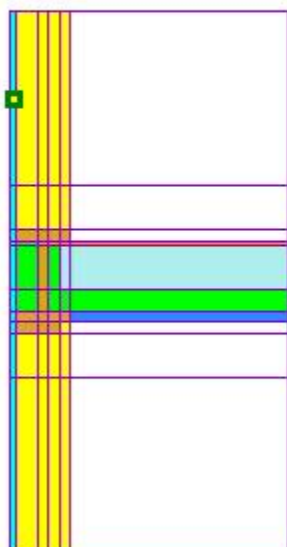
NRO	MITTA / TYYPI
1	RAK mukaan
2	RAK mukaan
3	RAK mukaan
4	t=100 mm
5	t=50 mm
6	RAK mukaan

RAKENNEOSA
EPDM-solukumitiiviste tai polyuretaanivaaho
Ilmansulkukangas
Kehäpalkki (tarvittaessa kaksi vierekkäin)
Levyvilla
Levyvilla
Elastinen polyuretaanivaaho

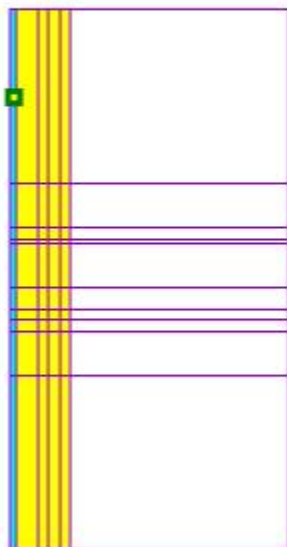
Kuva 28. Esimerkki ulkoseinän ja massiivipalkkivälipohjan liitoksesta (Puuinfo).

Palkkirakenteen vuoksi kylmäsilta lasketaan kolmiulotteisena palkkien osalta. Seinän lämmönsiirto lasketaan kuitenkin kaksiulotteisena. Symmetrian takia laskenta-alueen pituus kuvan 28 tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa on puolet palkkijaosta eli 200 mm. Kuvassa 29 on hieman yksinkertaistettu laskentamalli liitoksesta. Geometria on kuvattu erikseen sekä palkkivälien kohdalle että palkkiväleihin. Käytetyn laskentamallin rajoitusten takia polyuretaanisaumat (kuvassa 28 numerot 1 ja 6) on jätetty huomiotta samoin kuin sisäverhouslevyt. Sisäverhouslevyn lämmönvastus 0,08 Km^2/W on sen vuoksi lisätty pintavastukseen.

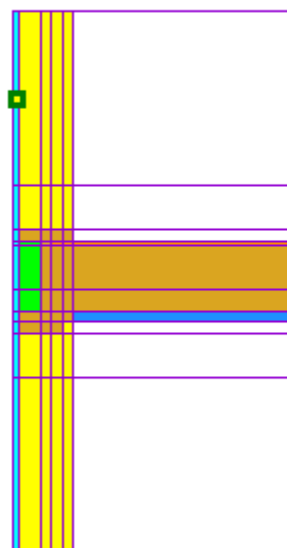
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Length →	0.025	0.1	0.05	0.045	0.05	1				
x y z ↓	0.8	0.2	0.05	0.02	0.2	0.1	0.05	0.05	0.2	0.8
meter ↗	0.175	0.025								



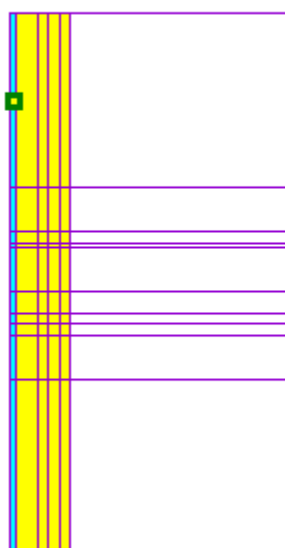
Laskentatapaus



Vertailutapaus



Laskentatapaus



Vertailutapaus

Name	λ
Seinan eriste	0.047
	0.033
Ilma 200 mm	1.25
	0.036
	0.037
Levyvilla	0.04
	0.04
Ilma 50 mm	0.313
Tuulensuojalevy	0.06
Puu	0.13
Lattiavaneri	0.18
	0.25
	0.6
	1
	1.7
	17
	50
Indoor/Outdoor air	-

Kuva 29. Laskentamalli ja sen vertailutapaus. Alakuva on palkkien kohdalta ja yläkuva palkkivälien kohdalta. Eri materiaalialueiden mitat sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

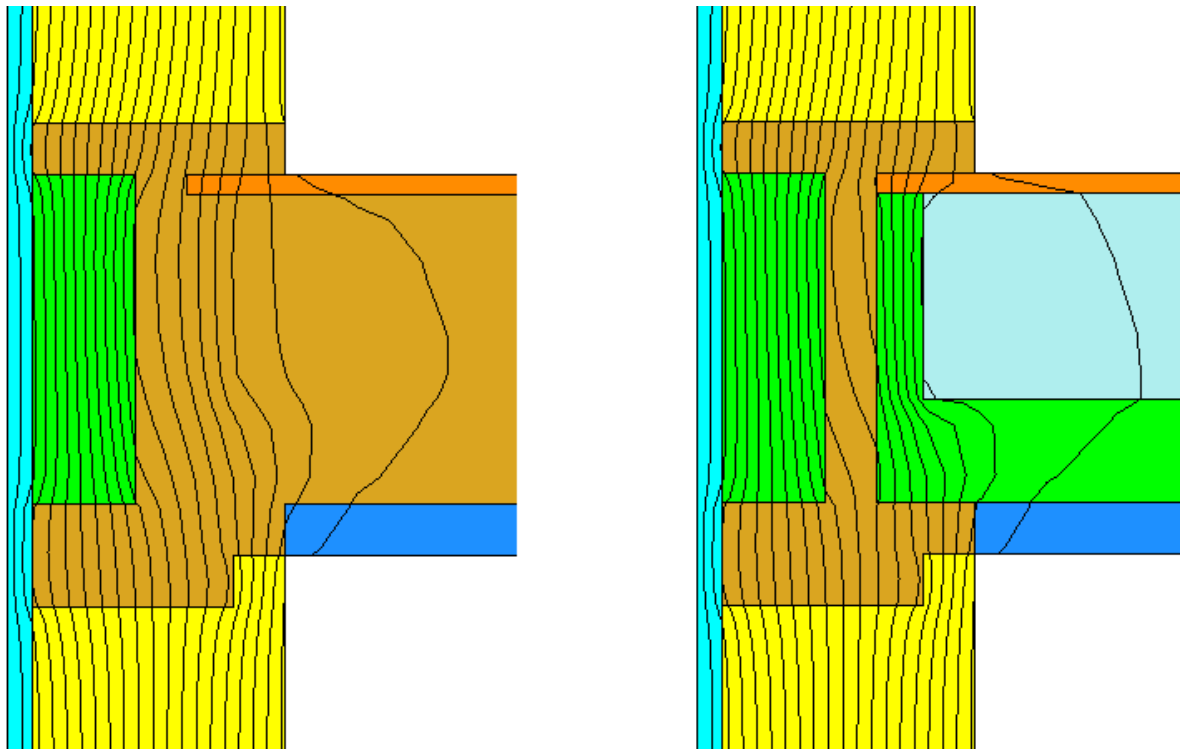
Laskentaohjelmasta saadaan ulkoseinän lämpövirraksi laskentatapauksessa 1,8679 W ja vertailutapauksessa 1,6804 W. Kun laskennassa sisä- ja ulkolämpötilan ero on 20 °C ja seinän pituus 0,2 m saadaan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi kaavasta (3):

$$\Psi = (1,8679 \text{ W} - 1,6804 \text{ W}) / 20 \text{ }^{\circ}\text{C} / 0,2 \text{ m} = \underline{\underline{0,0469 \text{ W/mK}}}.$$

Lähes sama tulos saadaan myös kaavasta (4):

$$\begin{aligned} \Psi &= L_{3D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 1,8679 / 20 / 0,2 \text{ W/mK} - 0,1701 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,47 \text{ m} \\ &= 0,46698 - 0,42015 = \underline{\underline{0,0468 \text{ W/mK}}}. \end{aligned}$$

Kuvassa 30 on tilanteen lämpötilakenttä, josta nähdään, että lämpötilat ovat hyvin samanlaisia sekä palkin kohdalla että palkkivälissä. Alimmillaan pintalämpötila on seinän ja katon liittymäkohdassa 18,5 °C.



Kuva 30. Kuvan 29 tilanteen lämpötilojen tasa-arvokäyrät 1 asteen välein palkin keskellä (vasemmalla) ja palkkivälin keskellä (oikealla). Ulkolämpötila on 0 °C ja sisälämpötila 20 °C.

Taulukkoon 17 on laskettu tuulensuojalevyn sekä palkkijaon vaikutusta liitoksen lisäkonduktanssiin. Paksumpi tuulensuoja muodostaa katkon kylmäsillalle ja pienentää siten lisäkonduktanssia. Pienempi palkkijako kasvattaa hieman lisäkonduktanssia mutta ei kovin paljon. Tämä tarkoittaa sitä, että liitoksen lisäkonduktanssi aiheutuu pääosin seinän lisärakenteista ja vain pieneltä osin välipohjan palkeista. Samasta syystä kaksiulotteinen laskenta antaisi tässä tilanteessa lähes saman tuloksen kuin kolmiulotteinen laskenta.

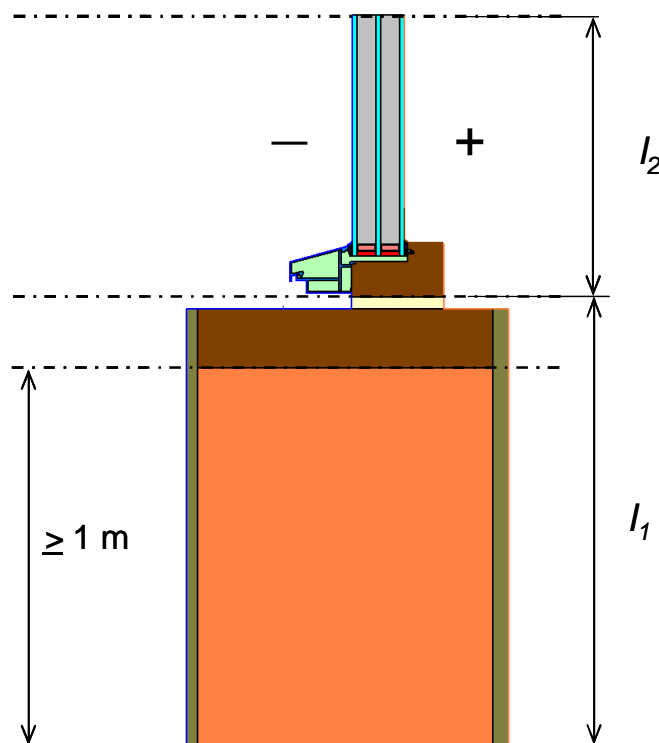
Taulukko 17. Seinän ja välipohjan liitoksen lisäkonduktanssi eri tilanteissa.

Tilanne		Seinän U-arvo, W/m^2K	Lisäkonduktanssi Ψ , W/mK
1	Kuvan 29 tilanne (perustilanne)	0,170	0,0469
2	Tuulensuojalevy 50 mm, muuten kuten tilanne 1	0,159	0,0395
3	Tuulensuojalevy 100 mm, muuten kuten tilanne 1	0,140	0,0295
4	Tuulensuojalevy 100 mm, $\lambda = 0,03 W/mK$, muuten kuten tilanne 1	0,114	0,0182
5	Palkkijako 300 mm, muuten kuten tilanne 1	0,170	0,0475

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja välipohjan liitokselle on 0,05 $W/(mK)$ (taulukko 1).

6.1.6 Puurankaisen ulkoseinän ja ikkunan liitos

Kuvassa 31 on kiinteä kolmilasinen alumiinilla päällystetty eristyslasi-ikkuna (MEKA) kiinnitettynä hieman epäkeskisesti apukarmiin. Ikkunan karmisyyvyys on 78 mm ja seinän eristyspaksuus 250 mm. Seinän ominaisuudet on tarkemmin kuvattu taulukossa 18. Apukarmin paksuus on 50 mm ja karmirako on 10 mm. Apukarmin ja karmiraon lämmönjohtavuutena on käytetty arvoja 0,13 W/Km ja 0,05 W/Km .



Kuva 31. Kiinteän kolmilasisen puu-alumiini-ikkunan kiinnitys puurankaseinään.

Taulukko 18. Seinän rakennekerrokset ja lämmönläpäisykerroin.

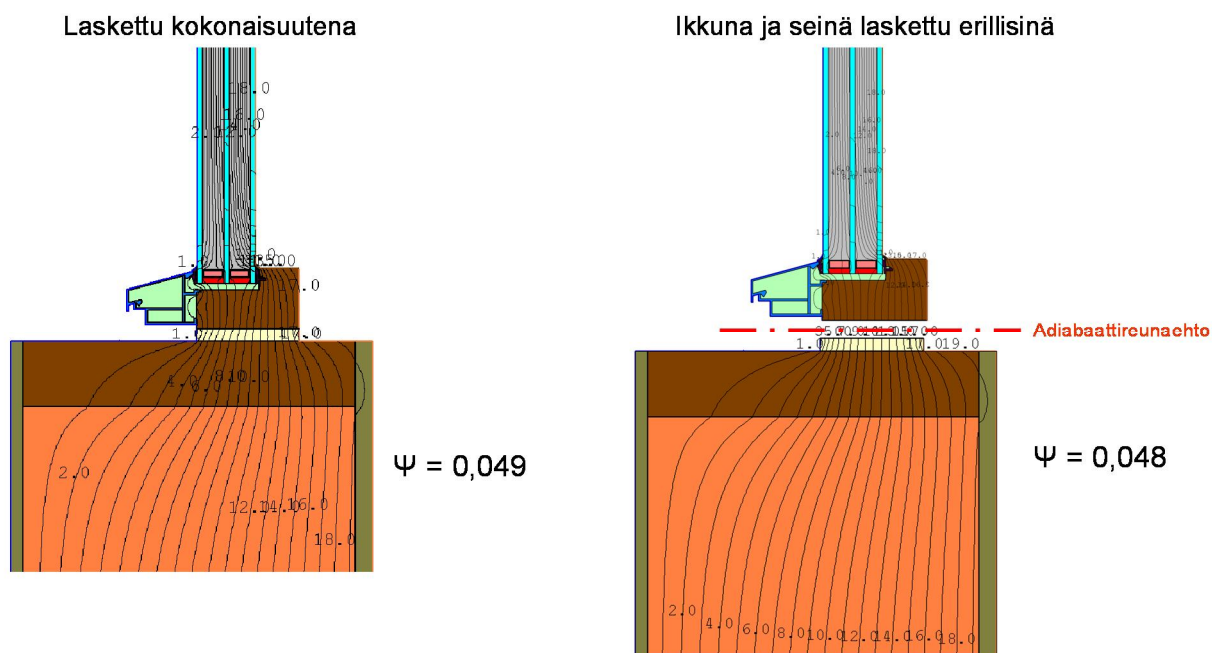
Rakennekerros sisältä ulospäin	Kerros- paksuus mm	Lämmön- johtavuus W/mK	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus R_{si}			0,13
Sisäverhouslevy	13	0,22	0,059
Mineraalivilla + koolaus	250	0,037	6,757
Ulkoverhouslevy	9	0,22	0,041
Pintavastus R_{se}			0,04
ΣR			7,027
$U = 1/\Sigma R$			0,1423 W/m ² K

Laskennassa käytettiin Therm-ohjelmaa, joka on tarkoitettu erityisesti ikkunoiden U-arvojen laskentaan. Ensin laskettiin ikkunan lämmönläpäisykerroin standardin SFS-EN ISO 10077 mukaan ja tulokseksi saatiin 1,105 W/m²K. Sitten laskettiin kuvan 31 kokonaisrakenteen lämpövirta, jolle saatiin arvo 0,4639 W/mK. Kuvan mitat olivat $l_1 = 1,06$ m ja $l_2 = 0,239$ m. Kaavaa (4) käyttäen saadaan nyt liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi:

$$\Psi = L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 0,4639 \text{ W/mK} - 0,1423 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,06 \text{ m} - 1,105 \text{ W/m}^2\text{K} \times 0,239 \text{ m} \\ = 0,4639 - 0,4149 = \underline{\underline{0,0490 \text{ W/mK}}}.$$

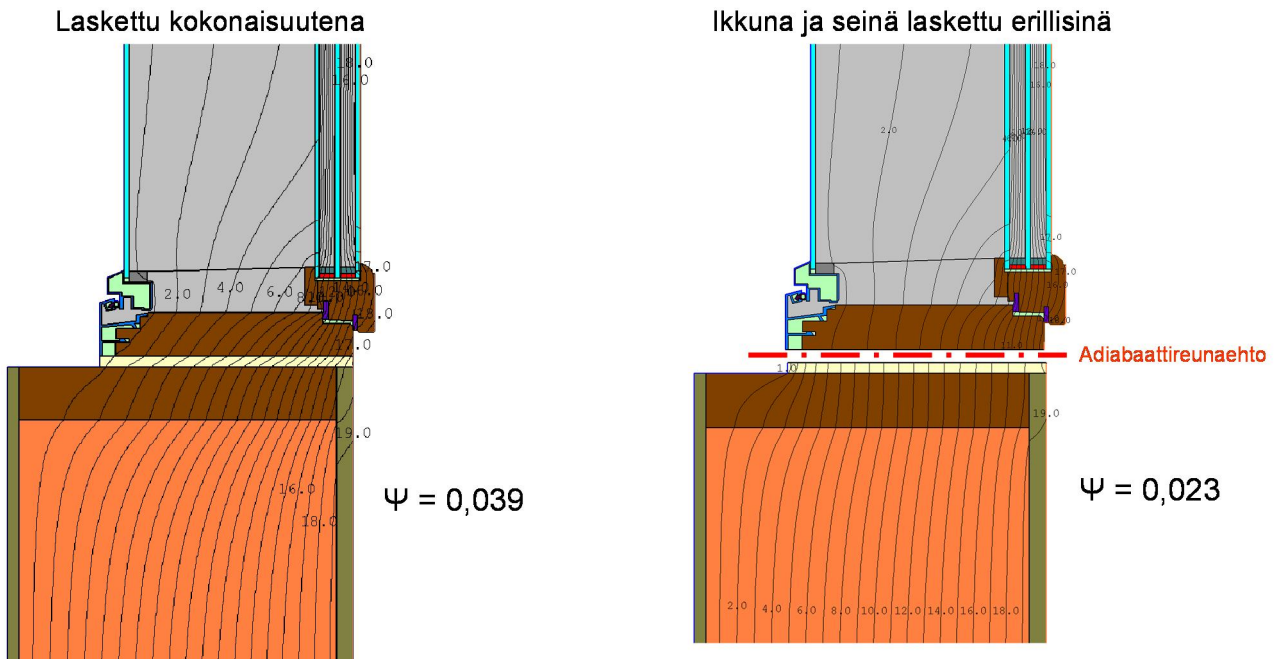
Kuvassa 32 on rakenteen lämpötilakenttä. Samassa kuvassa on esitetty lämpötilakenttä ja Ψ -arvo myös tilanteelle, jossa tilkeraon yläpintaan on asetettu adiabaattireunaehto luvussa 5.5.2 esitetyllä tavalla mutta käyttäen todellista karmin syvyyttä. Todetaan, että tämän ikkunarakenteen viivamainen lisäkonduktanssi saadaan hyvällä tarkkuudella adiabaattireunaehdolla, jolloin vältetään hankalalta ikkunan yksityiskohtaiselta laskennalta.

Sama laskelma adiabaattireunaehdolla tehtiin myös laskentaohjelmilla Comsol Multiphysics 3.5a sekä Unorm 2010-1. Viivamaisen lisäkonduktanssin arvot olivat kolmella ohjelmalla 0,1 % tarkkuudella samoja.



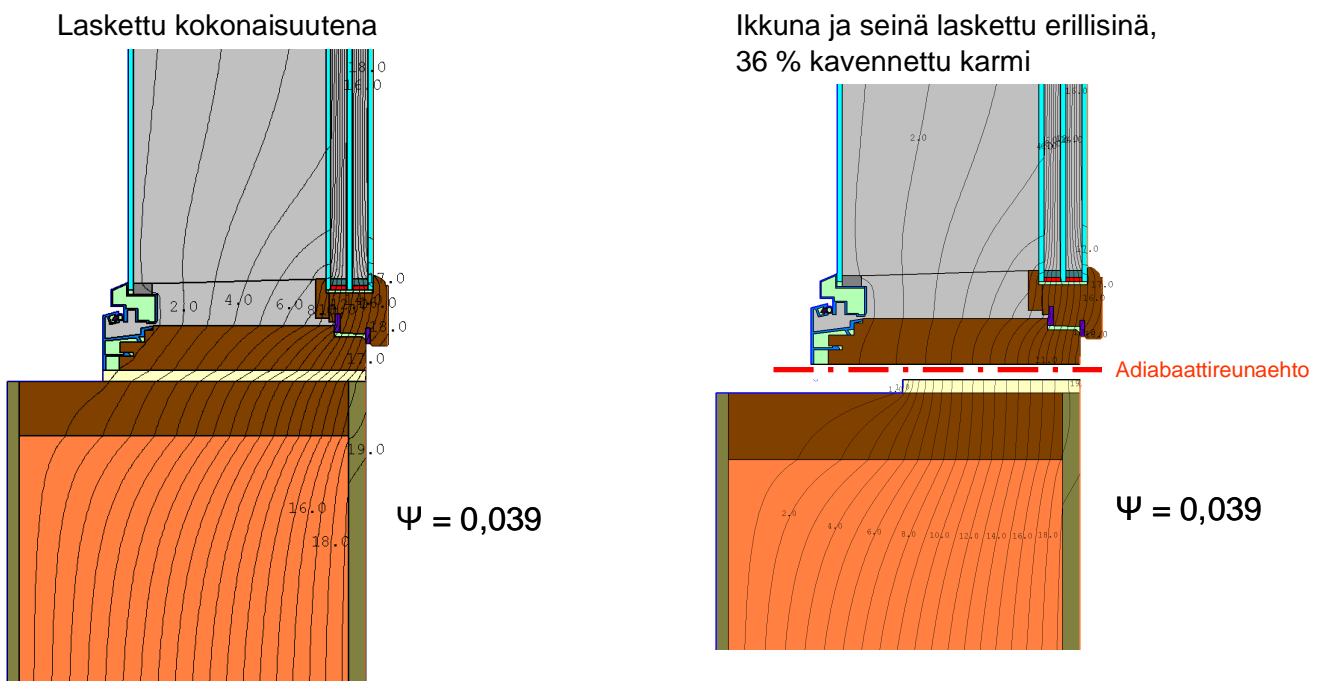
Kuva 32. Ikkunarakenne (MEKA), jolla yksinkertaistettu laskentamenetelmä antaa riittävän tarkkuuden.

Vastaavanlainen vertailu ikkunan yksityiskohtaisen laskennan ja adiabaattireunaehdon välillä tehtiin myös kuvan 33 kaksipuitteiselle kolmilasisella eristyslasilla varustetulle ikkunalle. Todellinen ikkunaliitoksen lisäkonduktanssi Ψ on 62 % suurempi kuin yksinkertaistetulla menettelyllä laskettu arvo. Adiabaattireunaehto ikkunan ulkokehällä ei vastaa tässä tapauksessa todellisuutta sillä lämpövirta ikkunan karmin läpi uloimpaaan, kylmään lasiväliin on huomattava. Lämpötila uloimmassa lasivälissä on matala koska tässä ikkunarakenteessa pääasiallinen lämmönvastus keskittyy sisäpuitteen kohdalle.



Kuva 33. Yksinkertaistettu laskentamenetelmä antaa liian pienen lisäkonduktanssin kun ikkunarakenteen (MS3E) lämpövastus on voimakkaasti keskittynyt sisäpuiteeseen.

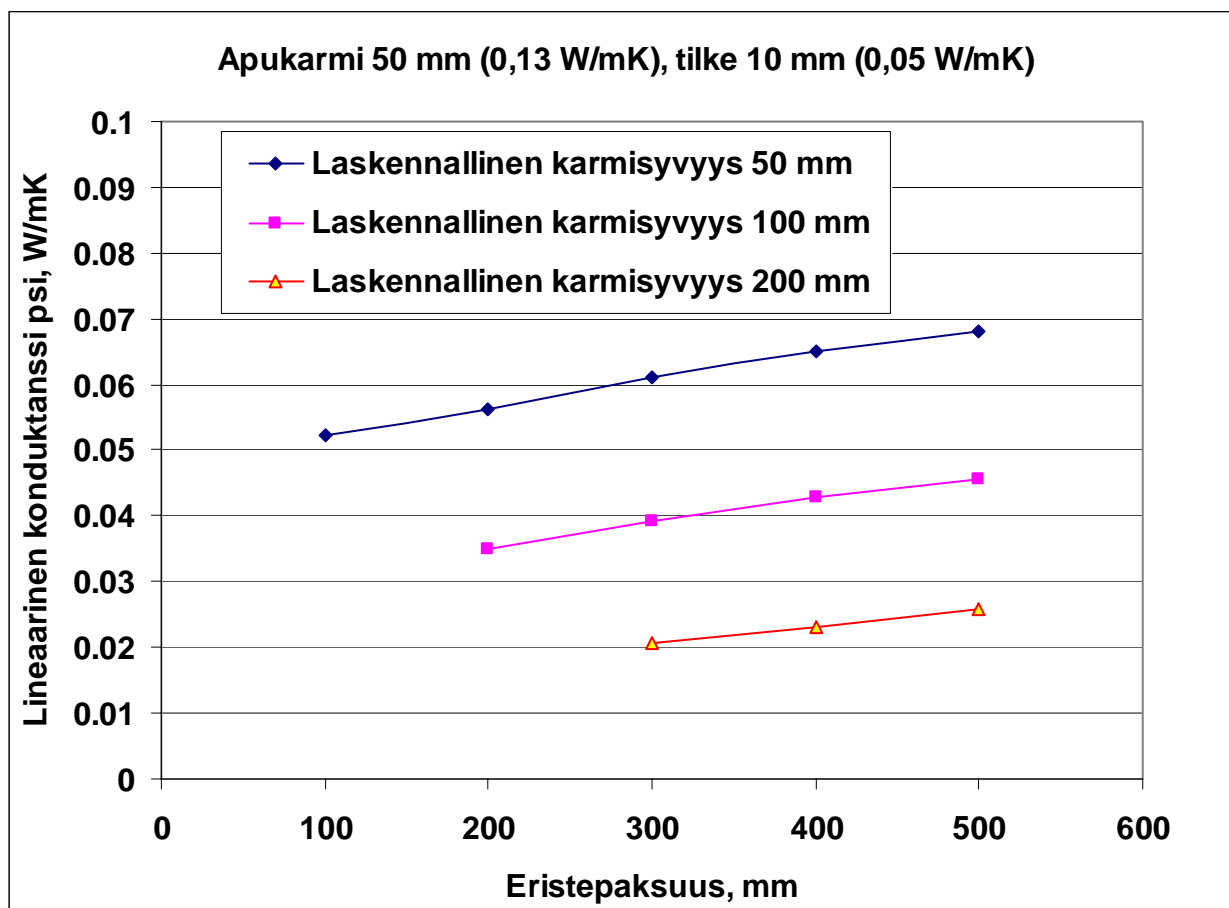
Adiabaattireunaehto antaa oikean tuloksen, jos karmin syvyyttä pienennetään tämän tapauksen laskennassa 36 % (kuva 34).



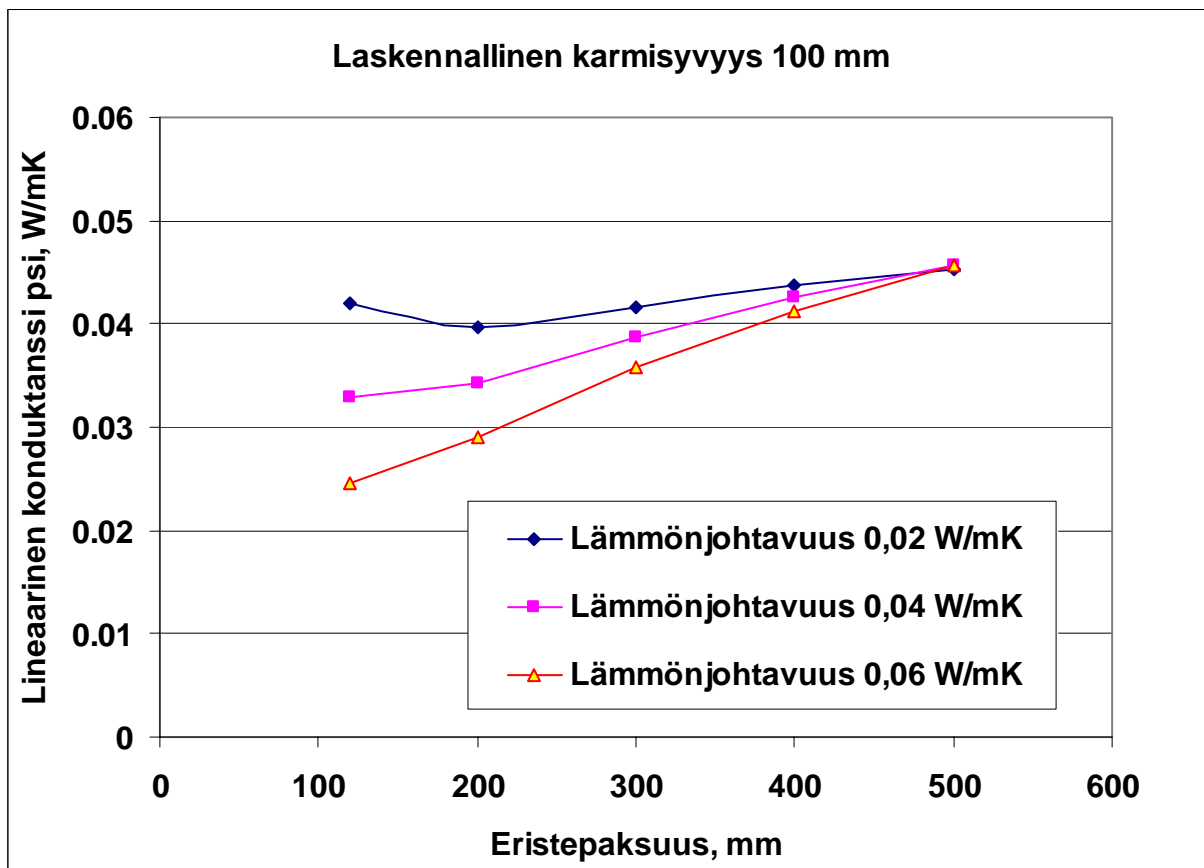
Kuva 34. Ikkunan MS3E laskennallinen karmisyvyys on 36 % todellista karmisyvyyttä pienempi kun käytetään adiabaattireunaehto.

Adiabaattireunaehdot käyttäessä on karmia siten kavennettava. Taulukossa 7 sivulla 28 on annettu eri ikkunatyypeille laskennallisen karmisyyden laskentaohjeet.

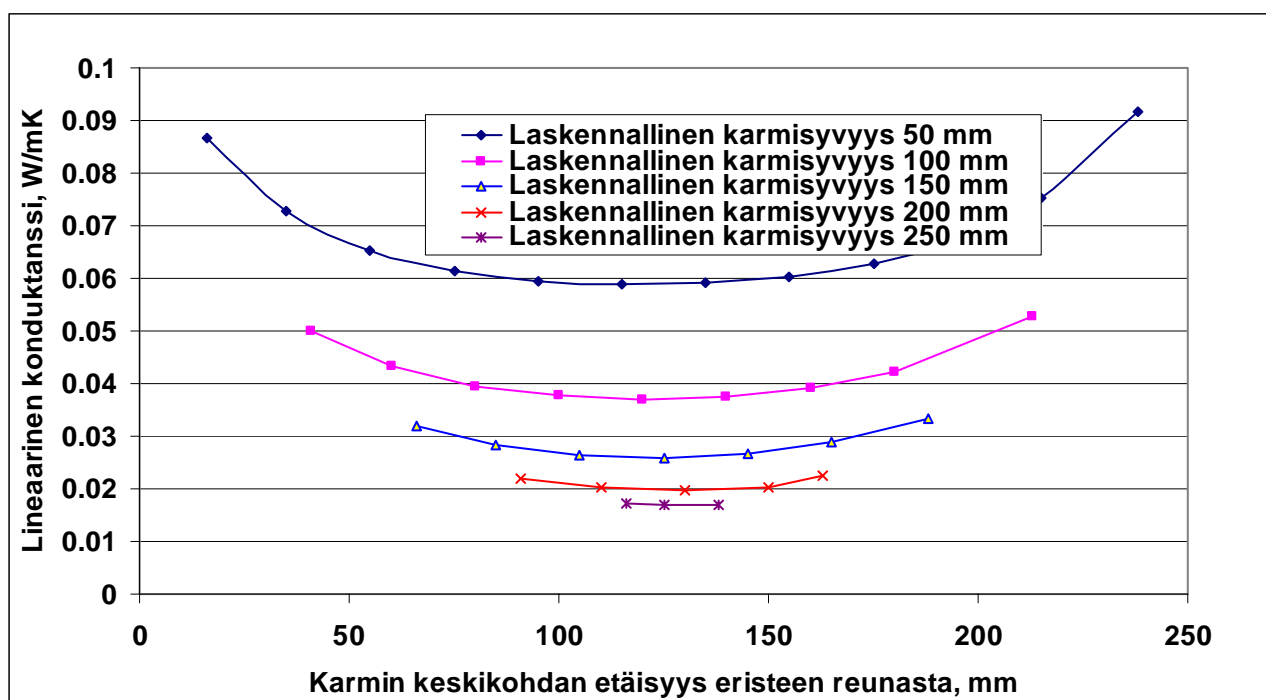
Laskennallisen karmisyyden käsite tekee mahdolliseksi tarkastella yleisemmin miten ikkunaliitoksen lisäkonduktanssi riippuu eri tekijöistä. Kuvien 35 - 38 tulokset on laskettu Unorm-ohjelmalla. Esimerkki laskennan suorituksesta on kuvissa 39 ja 40.



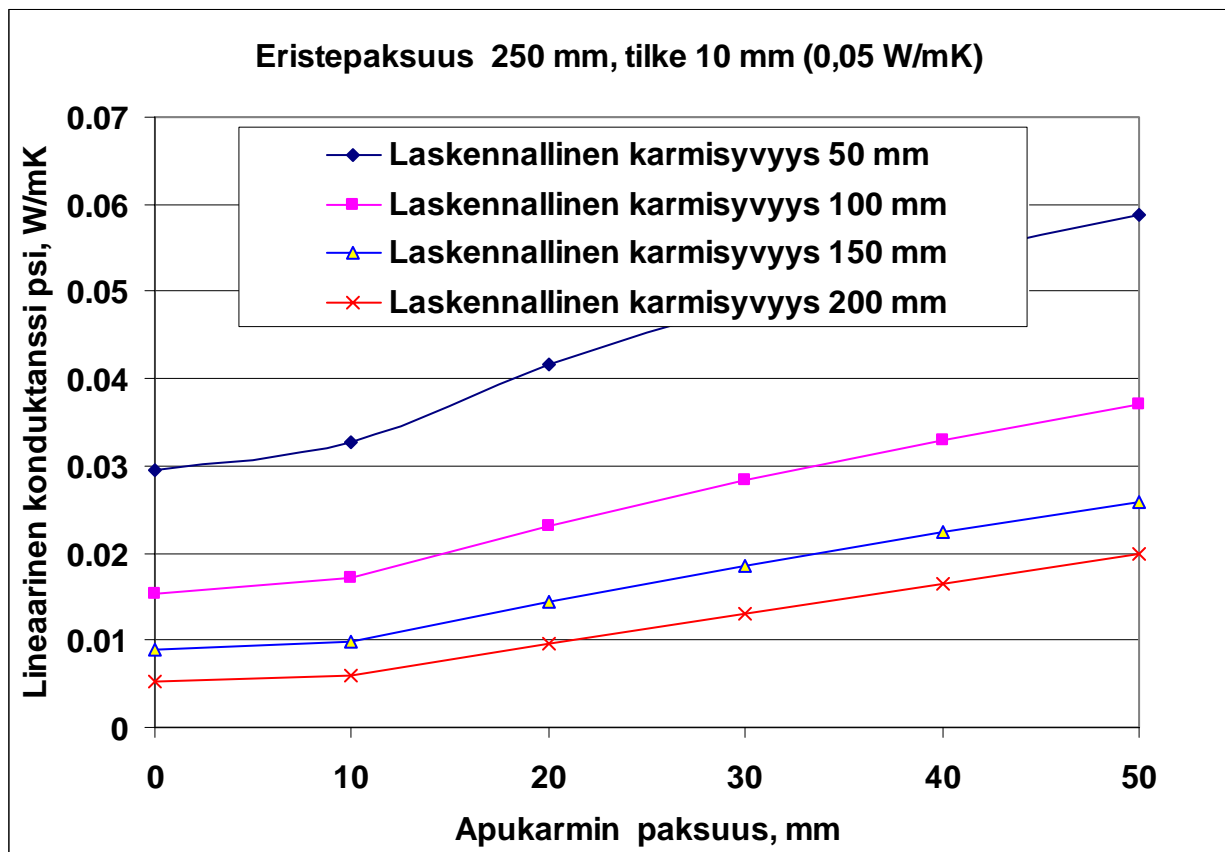
Kuva 35. Seinän eristepaksuuden ja laskennallisen karmisyyden vaikutus ikkunan ja seinän liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin. Ikkuna sijaitsee eristeen keskellä. Apukarmin ja tilkeraon paksuudet ja lämmönjohtavuudet ilmenevät kuvasta. Eristeen lämmönjohtavuus on 0,037 W/mK.



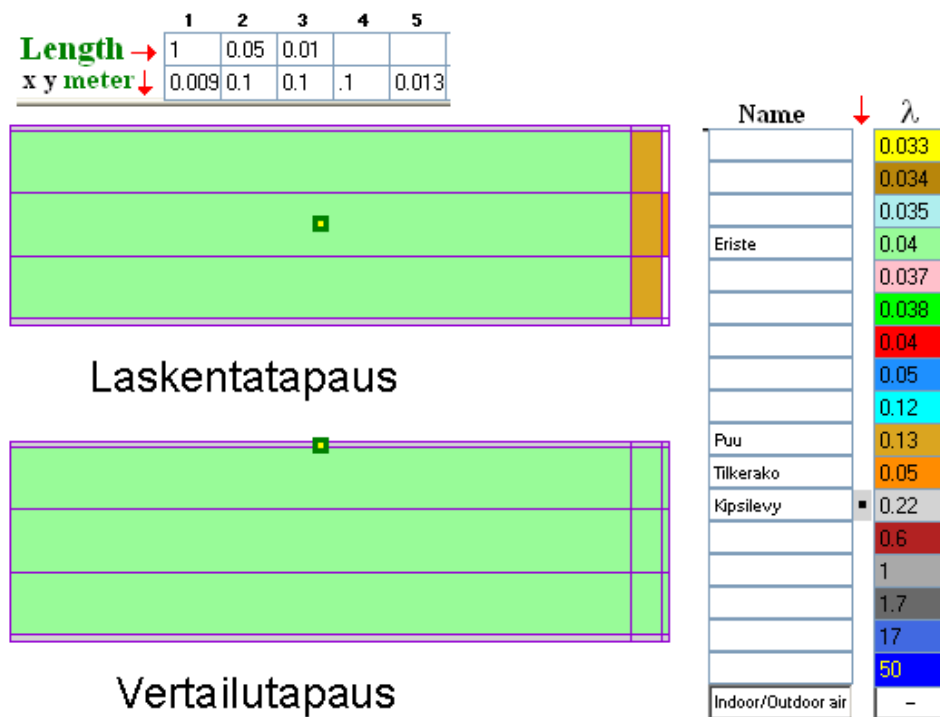
Kuva 36. Seinän eristepaksuuden ja eristeen lämmönjohtavuuden vaikutus ikkunan ja seinän liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin. Ikkunan laskennallinen karmisyvyys on 100 mm ja se sijaitsee eristeen keskellä. Apukarmin ja tilkeraon paksuudet ja lämmönjohtavuudet ilmenevät kuvasta 35.



Kuva 37. Ikkunan sijainnin vaikutus ikkunan ja seinän liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin. Eristepaksuus on 250 mm ja eristeen lämmönjohtavuus on 0,037 W/mK. Apukarmin ja tilkeraon paksuudet ja lämmönjohtavuudet ilmenevät kuvasta 35.



Kuva 38. Apukarmin paksuuden ja laskennallinen karmisyvyyden vaikutus ikkunan ja seinän liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin. Ikkuna sijaitsee eristeen keskellä. Muut tiedot ovat samat kuin kuvassa 35.

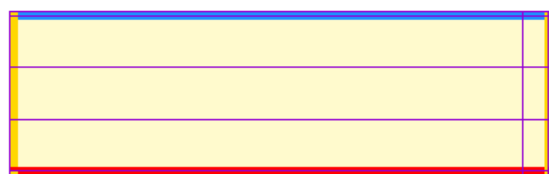


Kuva 39. Kuvan 36 erään tilanteen määrittäminen Unorm-ohjelmassa. Tässä eristepaksuus on 300 mm ja eristeen lämmönjohtavuus 0,04 W/mK.

Result			
U-value calculation with internal lengths			
$\Psi =$	0.03868	$T_{surf, min} =$	16.98253
Flow C =	3.50212+-0.0039	No of cells =	
Flow R =	2.72844+-0.0000	3200	












Laskentatapaus



Vertailutapaus

Boundary conditions:

☒ Help ☐ West ☐ East ☐ North ☐ South

R		Temp		
0.13	→		20	} Heated space
0.1			20	
0.17			20	
				
0.04			0	} Unheated space
0.13		0		
		0		
		0		
		0		
		Heat flow = 0		

Kuva 40. Kuvan 39 tilanteen reunaehdot ja laskentatulokset.

Rakentamismääräysten taulukkoarvo puurakenteisen ulkoseinän ja ikkunan liitokselle on 0,04 W/(mK) (taulukko 1) mikäli karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

6.2 Eristetty kiviseinä

Eristettyjen kiviseinien tapauksena tarkasteltiin betonielementtirakennetta, jossa sisä- ja ulkokuoren välissä oli 120 mm...160 mm lämmöneriste. Kerrosten välissä ei ollut tuuletusrakoa. Taulukossa 19 on esitetty kiviseinän materiaalikerrokset ja lämpöparametrit.

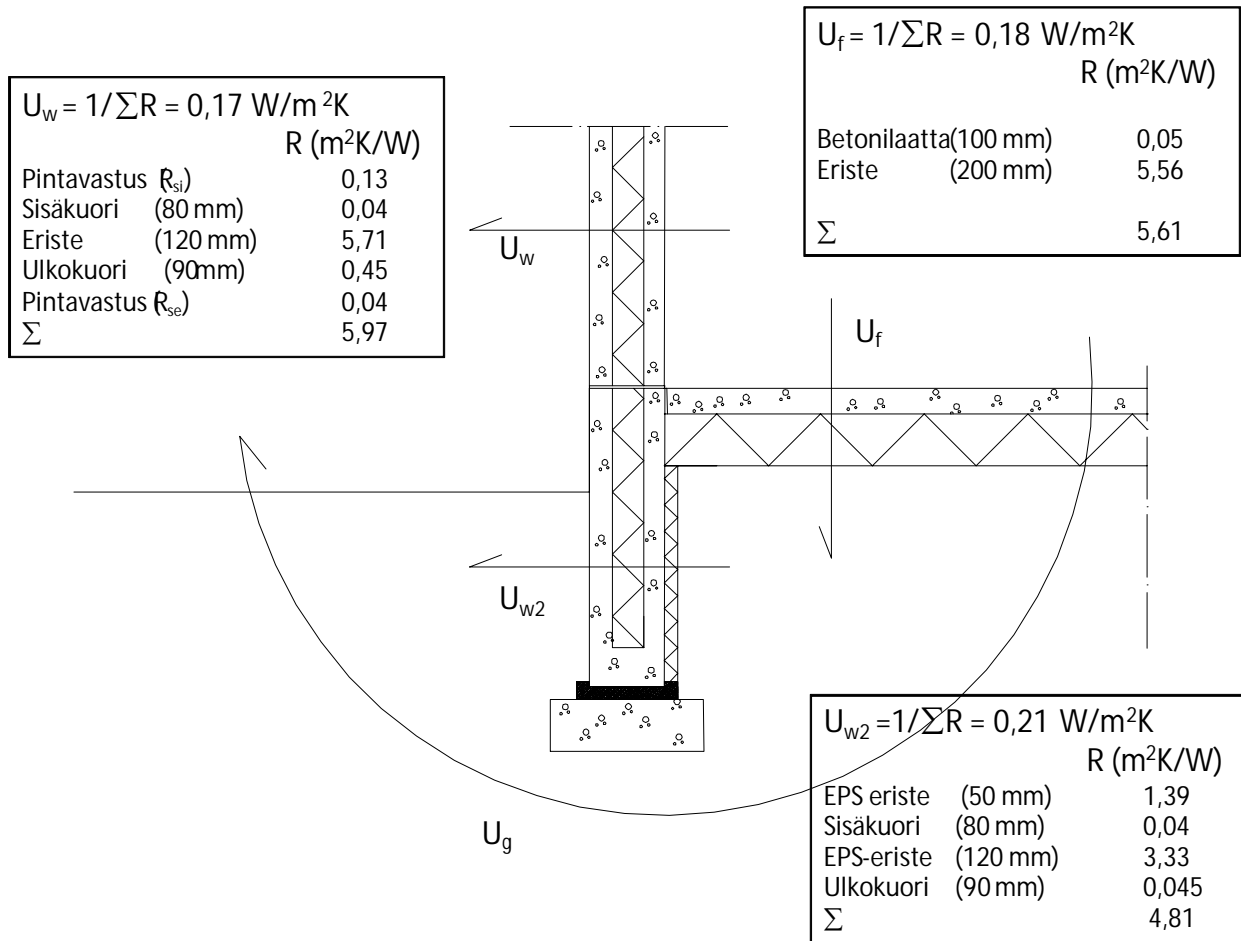
Taulukko 19. Eristetyn kiviseinärakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,130
Sisäkuori (betoni)	80	2,0	0,040
Lämmöneriste	120	0,021	5,714
Ulkokuori (betoni)	90	2,0	0,045
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			5,969
$U_1 = 1/\Sigma R$			0,1675 W/m ² K

6.2.1 Eristetty kiviseinä ja maanvastainen alapohja

Viivamainen lisäkonduktanssi määritettiin rakenteelle, jossa eristetty kiviseinä liittyy paikalla valettuun maanvastaiseen alapohjalaattaan ja halkaistuun betonielementtisokkeliin (kuva 41). Eristetty

kiviseinä käsiteltiin elementtirakenteena, jonka lämmönläpäisykerroin oli $U_w = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Rakennuksen alapohjan lämmönläpäisykerroin oli $U_f = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (kuva 41) ja sokkelirakenteen $U_{w2} = 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ (taulukko 20). Kuvan 41 detaljista yksinkertaistettiin malli, jonka dimensioid ja pintavastukset on esitetty kuvassa 42. Malliin sisällytettiin alapohjalaatan ja seinäelementin välinen solumuovikaista (10 mm, kuva 42).

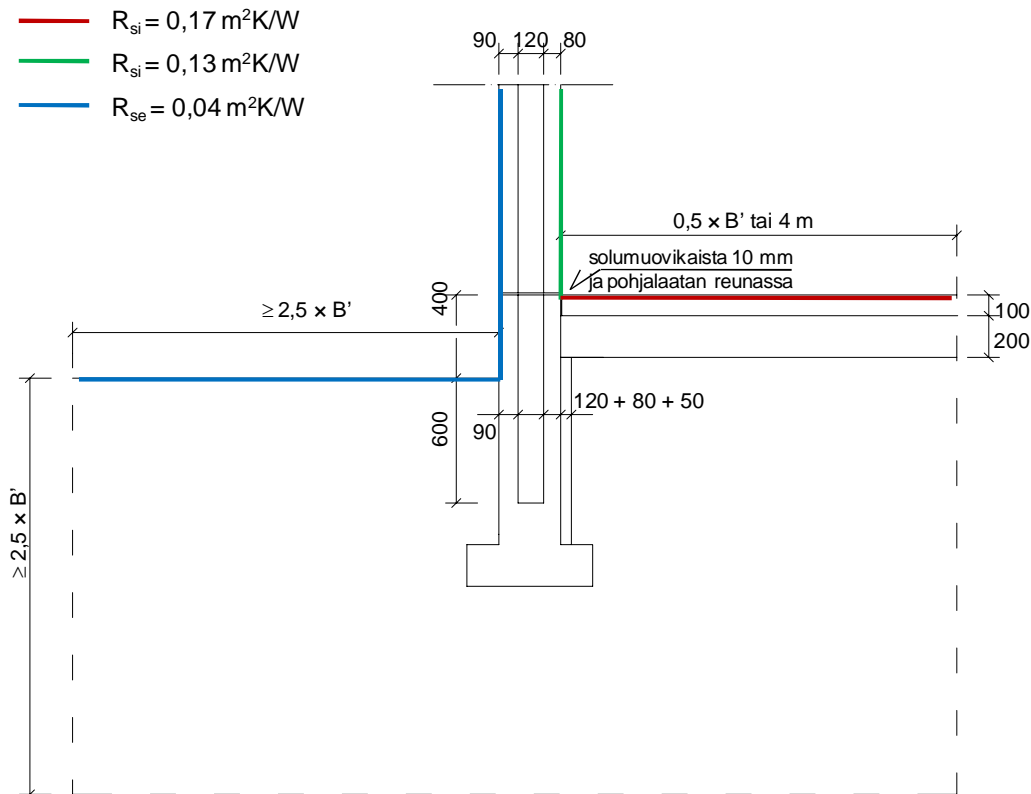


Kuva 41. Eristetyn kiviseinän ja maanvastaisen alapohjan liitos.

Taulukko 20. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus $d \text{ (mm)}$	Lämmönjohtavuus $\lambda \text{ (W/mK)}$	Lämmönvastus $R \text{ (m}^2\text{K)/W}$
EPS eriste	50	0,036	1,389
Sisäkuori (betoni)	80	2,0	0,040
EPS eriste	120	0,036	3,333
Ulkokuori (betoni)	90	2,0	0,045
Σ			4,807
$U_{w2} = 1/\Sigma R$			0,21 $\text{W/m}^2\text{K}$

Lisäksi solumuovin lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa $\lambda = 0,02 \text{ W/mK}$.



Kuva 42. Kuvan 41 detaljista yksinkertaistettu malli ja pintavastusten arvot. Perustapauksessa laatan reunan solumuovikaistan leveys oli $d = 10$ mm.

Numeerisesti määritetty kuvan 42 liitoksen lämpövirta on $L_{2D} = 0,8579$ W/mK, kun alapohjalaatan laidan solumuovikaistan leveys on $d = 10$ mm ($R_{solum} = 0,5$ m²K/W).

Esimerkeissä alapohja on hyvin eristetty, jolloin sen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavasta (9):

$$U = \frac{\lambda}{0,457 \times B' + d_t} + \frac{\Psi_{ge}}{B'} = \frac{2}{0,457 \times 8 + 11,93} - \frac{0,02596}{8} = 0,1251 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

missä

λ on pohjamaan lämmönjohtavuus = 2 W/mK
 B' alapohjalaatan karakteristinen mitta = 8 m
 d_t rakenteen ekvivalentti paksuus, m

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,29 + 2(0,17 + 5,61 + 0,04) = 11,93 \text{ m}$$

missä

$R_f = 5,61$ (m²K)/W (laatta, lämmöneriste, kuva 41)
 $R_{si} = 0,17$ (m²K)/W (lattian sisäpinnan pintavastus, taulukko 5)
 $R_{se} = 0,04$ (m²K)/W (pohjamaan ulkopinnan pintavastus, taulukko 5)
 $w = 0,29$ m (seinärakenteen leveys, kuva 42)

Perusmuurin viivamainen lisäkonduktanssi Ψ_{ge} saadaan kaavalla

$$\Psi_{ge} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 D_v}{d_t + d'_v} + 1 \right) \right] = -0,02596 \text{ W / mK}$$

missä $D_v = 0,6$ m (perusmuurin lämmöneristeen korkeus maanpinnan alapuolella) ja

$$d'_v = \lambda \left(R_{nv} - \frac{d_{nv}}{\lambda} \right) = 9,27 \text{ m}$$

missä

$R_{nv} = 4,807 \text{ W/m}^2\text{K}$ (perusmuurin lämmönvastus, taulukko 20)

$d_{nv} = 0,34$ m (perusmuurin paksuus, eriste ja runkorakenne)

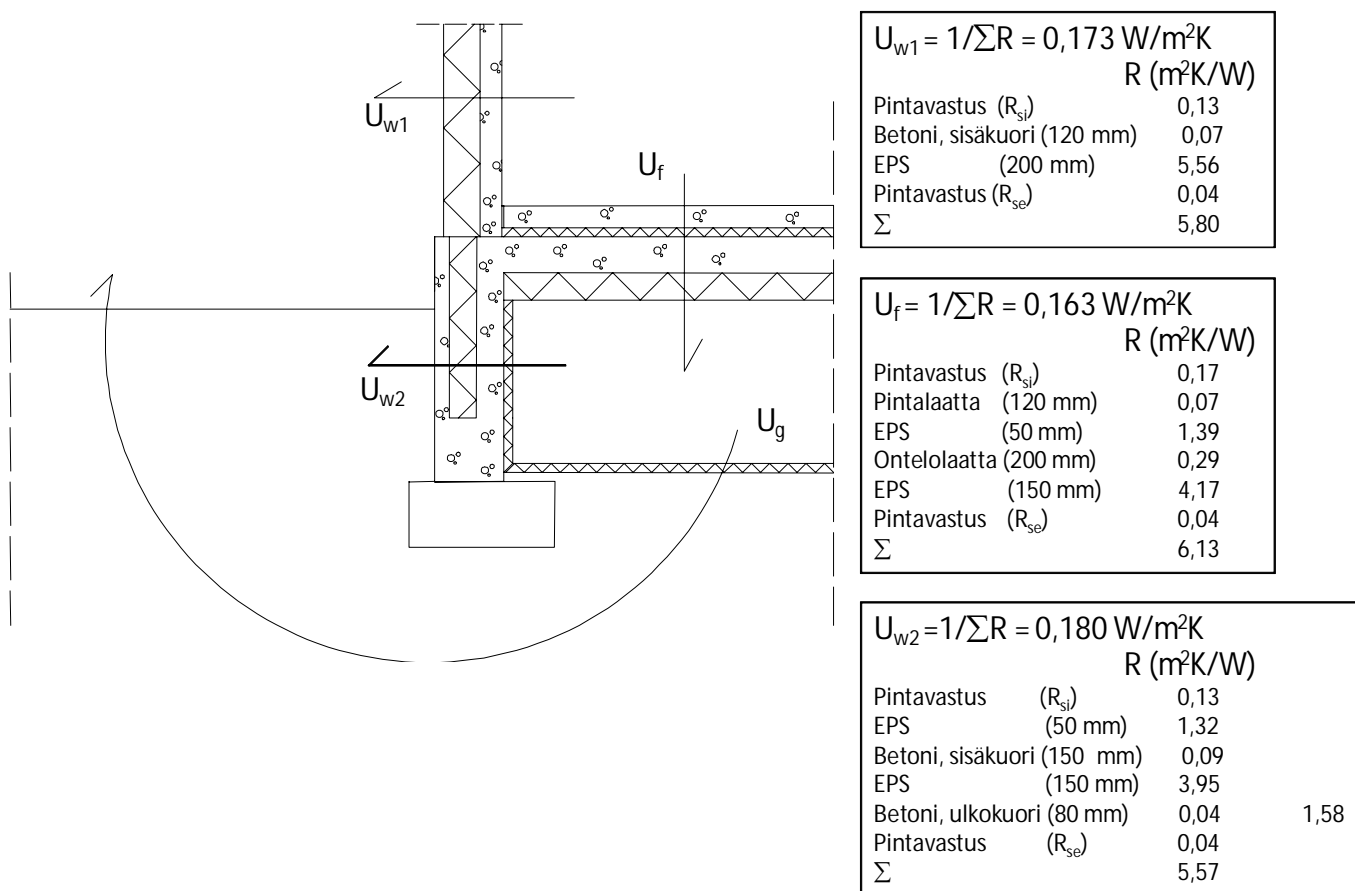
Tarkasteltavan liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ saadaan kaavasta (5):

$$\begin{aligned} \Psi &= L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = \\ &= 0,8579 \text{ W/mK} - 1,0 \text{ m} \times 0,1675 \text{ W/m}^2\text{K} - 0,5 \times 8,0 \text{ m} \times 0,1251 \text{ W/m}^2\text{K} = \\ &= 0,8579 - 0,6679 = \underline{\underline{0,190 \text{ W/mK}}}. \end{aligned}$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo kivirunkoisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,24 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

6.2.2 Eristetty kiviseinä ja ryömintätilainen alapohja

Kuvassa 43 on esitetty toinen tyypillinen eristetyn kiviseinän ja ryömintätilaisen alapohjan liitos, jossa kantavan ontelolaatan päällä on lämpöeristetty pintalaatta. Lisäksi ryömintätilan pohjalla on $d = 50$ mm paksu lämmöneristekerros. Seuraavassa tarkastellaan rakennetta sekä ns. normaalirakenteena että passiiviratkaisuna, jossa sekä ulkoseinän että kantavan alapohjan lämmönläpäisykertoimia on pienennetty normaalitasosta seinän osalta noin 20 % ja alapohjan noin 40 %.



Kuva 43. Ryömintätilaisen alapohjan, eristetyin kiviseinän ja eristetyin pintalaatan liitos normaali-rakenteena.

Taulukoissa 21 - 23 on esitetty ns. normaalitalon rakenneosien materiaalikerrokset ja lämmönvasto-

Taulukko 21. Eristetyin kiviseinärakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,130
Betoni, sisäkuori	120	1,7	0,071
Lämmöneriste, EPS	200	0,036	5,556
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			5,797
$U_{w1} = 1/\Sigma R$			0,1725 W/m ² K

Taulukko 22. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ²)/W
Pintavastus (R_{si})	-	-	0,130
EPS eriste	50	0,038	1,316
Sisäkuori (betoni)	150	1,7	0,088
EPS eriste	150	0,038	3,947
Betoni, ulkokuori	80	1,7	0,047
Pintavastus (R_{se})	-	-	0,040
Σ			5,568
$U_{w2} = 1/\Sigma R$			0,180 W/m ² K

Taulukko 23. Kantavan alapohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,170
Betoni, pintalaatta	120	1,7	0,071
EPS eriste	50	0,036	1,389
Ontelolaatta	200		0,290
EPS eriste	150	0,036	4,167
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			6,127
$U_f = 1/\Sigma R$			0,163 W/m ² K

Pohjamaan lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa $\lambda_U = 2,0$ W/mK. Ryömintätilan pohjalla olevan 50 mm paksun lämmöneristekerroksen lämmönvastus oli $R = 0,05 \text{ m} / 0,041 \text{ W/mK} = 1,219 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Viivamaisen lisäkonduktanssin lämpöteknisen kytkentäkertoimen perusarvoksi (ryömintätilan ilmanvaihtuvuus $n = 0,5$ 1/h) saadaan kolmen laskentatapauksen (taulukko 24) jälkeen kaavojen (15) ja (16) avulla:

Taulukko 24. Eristetyn kiviseinän ja ryömintätilallisen alapohjan liitoksen kolmen laskentatapauksen tulokset L_1 , L_2 tai L_3 normaalirakenteena.

Laskentatapa	L_{ie} (W/mK)	L_{iu} (W/mK)	$L_{ue,c,sokkeli}$ (W/mK)	$L_{ue,c,pohjamaa}$ (W/mK)	$\Sigma L_{ue,c}$ (W/mK)	L_i (W/mK)
1 (L_1)	0,4048	0,7060	-	-	-	1,1108
2 (L_2)	0,2672	-	0,1889	0,9600	1,1490	1,4162
3 (L_3)	-	0,6428	0,2906	1,0025	1,2931	1,9359

$$L_{iu} = 0,5 \times (L_1 - L_2 + L_3) = 0,5 \times (1,1108 \text{ W/mK} - 1,4162 \text{ W/mK} + 1,9359 \text{ W/mK}) = 0,8153 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ie} = 0,5 \times (L_1 + L_2 - L_3) = 0,5 \times (1,1108 \text{ W/mK} + 1,4162 \text{ W/mK} - 1,9359 \text{ W/mK}) = 0,2956 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue,c} = 0,5 \times (L_2 + L_3 - L_1) = 0,5 \times (1,4162 \text{ W/mK} + 1,9359 \text{ W/mK} - 1,1108 \text{ W/mK}) = 1,1206 \text{ W/(mK)}$$

Ilmanvaihdon aiheuttama lisälämpöhäviö ($n = 0,5$ 1/h):

$$\dot{V} = n \times V / 3600 \text{ s} = 0,5(0,8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}) / 3600 \text{ s} = 0,000444 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_{ue,v} = \rho c_p \dot{V} / P = 1,23 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ J/(kgK)} \times 0,000444 \text{ m}^3/\text{s} / 1 \text{ m} = 0,5467 \text{ W/(mK)}$$

ja edelleen ryömintätilan ja ulkoilman välinen kokonaislämpövirta:

$$L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} = 1,1206 \text{ W/mK} + 0,5467 \text{ W/mK} = 1,6673 \text{ W/mK}.$$

Terminen riippuvuuskerroin sisäilman ja ympäristön välillä kuvan 43 liitokselle on nyt:

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right)$$

$$= (0,8153 \text{ W/mK} \times 1,5573 \text{ W/mK}) / (0,8153 \text{ W/mK} + 1,6673 \text{ W/mK}) + 0,2956 \text{ W/mK} \\ = 0,8431 \text{ W/(mK)}.$$

Ryömintätilan pohjalla olevan lämmöneristeen ja ryömintätilaa ympäröivän maan yhdistetty lämmönläpäisykerroin U_g lasketaan RakMK osan C4 kaavoilla 33, 34 ja 36 (kun ryömintätilan pohja on keskimäärin yli 0,5 m syvyydellä maanpinnasta, $z = 0,8 \text{ m}$)

$$U_{gf} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_g + 0,5 \cdot z_g} \ln \left(\frac{\pi \cdot B'}{d_g + 0,5 \cdot z_g} + 1 \right) = \frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 8 + 3,098 + 0,5 \cdot 0,8} \ln \left(\frac{\pi \cdot 8}{3,098 + 0,5 \cdot 0,8} + 1 \right) = 0,29371 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$U_{gw} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z_g} \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_g}{d_g + z_g} \right) \ln \left(\frac{z_g}{d_{gw}} + 1 \right) = \frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 0,8} \left(1 + \frac{0,5 \cdot 3,098}{3,098 + 0,8} \right) \ln \left(\frac{0,8}{11,140} \right) = 0,1542 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$U_g = U_{gf} + \frac{z_g P U_{gw}}{A} = 0,29371 + \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 0,1542}{4} = 0,3089 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

Alapohjan vertailulämmönläpäisykertoimeksi saadaan kaavasta 17, ($B' = 8 \text{ m}$):

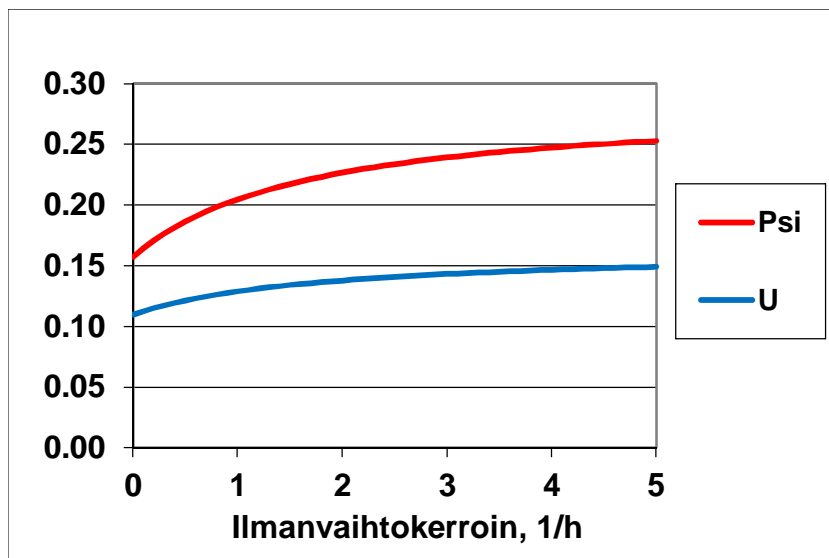
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + 2h_{w2}U_{w2}/B' + \dot{V}c_p\rho/A} = \frac{1}{0,163} + \frac{1}{0,3089 + 2 \frac{0,52 \cdot 0,18}{8} + \frac{0,5467}{4}}$$

josta $U = 0,1211 \text{ W/m}^2\text{K}$. Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi saadaan kaavasta (13)

$$\Psi = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = \\ = 0,8432 \text{ W/mK} - 1 \text{ m} \times 0,1725 \text{ W/m}^2\text{K} - 0,5 \times 8 \text{ m} \times 0,1211 \text{ W/m}^2\text{K} = \underline{\underline{0,186 \text{ W/(mK)}}}.$$

Kuvassa 44 on esitetty ryömintätilan ilmanvaihdon vaikutus lisäkonduktanssiin. Ilmanvaihdon kasvassa lisäkonduktanssin arvo lähestyy raja-arvoa 0,285 W/(mK).

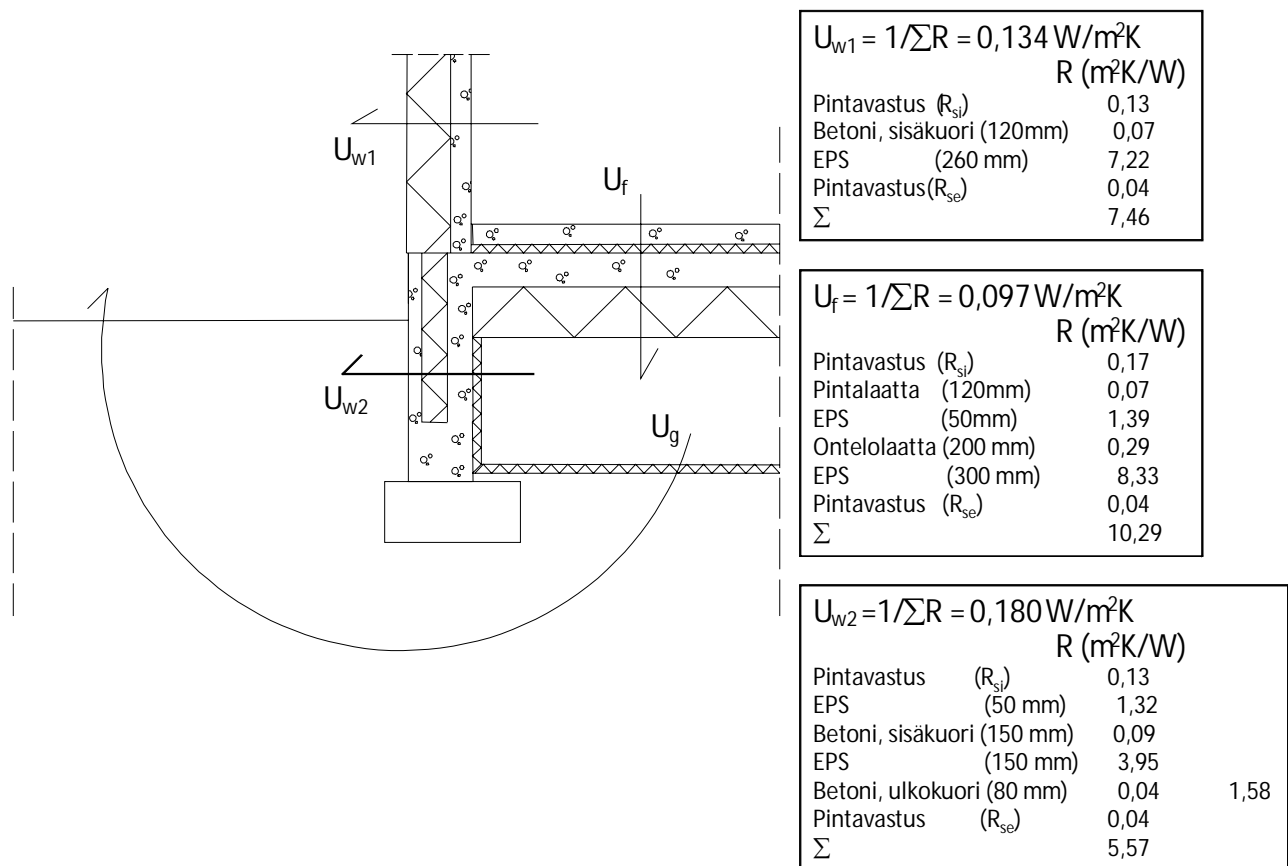
Rakentamismääräysten taulukkoarvo kivirunkoisen ulkoseinän ja ryömintätilaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,28 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).



Kuva 44. Ryömintätilan ilmanvaihtokertoimen (vaihtoa tunnissa) vaikutus alapohjan lämmönläpäisykerroimeen U ja liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin Ψ .

Passiivirakenne

Seuraavassa lasketaan sama ryömintätilainen alapohjaliitos kuvan 45 mukaisena passiivirakenteena, jossa alapohjan ontelolaatan alapuolinen eristekerroksen paksuus on $d = 300$ mm ($R = 8,33$ m²K/W) ja alapohjan lämmönläpäisykerroin $U_f = 0,097$ mW/m²K. Ulkoseinän eristekerroksen paksuus on 260 mm ($R = 7,22$ m²K/W) ja seinärakenteen lämmönläpäisykerroin $U_{wl} = 0,134$ W/m²K. Muilta osin rakenne vastaa edellistä tapausta.



Kuva 45. Ryömintätilaisen alapohjan, eristetyin kiviseinän ja eristetyin pintalaatan liitos. Alapohjan ja ulkoseinän lämmönläpäisykertoimet $U_{w1} = 0,134 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja $U_f = 0,097 \text{ W/m}^2\text{K}$ vastaavat ns. passiivitalon arvoja.

Viivamaisen lisäkonduktanssin termisen kertoimen perusarvoksi (ryömintätilan ilmanvaihtuvuus $n = 0,5 \text{ 1/h}$) saadaan kolmen laskentatapauksen (taulukko 25) jälkeen kaavojen (15) ja (16) avulla:

Taulukko 25. Eristetyin kiviseinän ja ryömintätilallisen alapohjan liitoksen kolmen laskentatapauksen tulokset L_1 , L_2 tai L_3 passiivirakenteena.

Laskentatapaus	L_{ie} (W/mK)	L_{iu} (W/mK)	$L_{ue,c,sokkeli}$ (W/mK)	$L_{ue,c,pohjamaa}$ (W/mK)	$\Sigma L_{ue,c}$ (W/mK)	L_i (W/mK)
1 (L_1)	0,3451	0,4722	-	-	-	0,8173
2 (L_2)	0,2534	-	0,1749	0,9257	1,1006	1,3540
3 (L_3)	-	0,4049	0,2512	0,9703	1,2215	1,6264

$$L_{iu} = 0,5 \times (L_1 - L_2 + L_3) = 0,5 \times (0,8173 \text{ W/mK} - 1,3540 \text{ W/mK} + 1,6264 \text{ W/mK}) = 0,5449 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ie} = 0,5 \times (L_1 + L_2 - L_3) = 0,5 \times (0,8173 \text{ W/mK} + 1,3540 \text{ W/mK} - 1,6264 \text{ W/mK}) = 0,2725 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue,c} = 0,5 \times (L_2 + L_3 - L_1) = 0,5 \times (1,3540 \text{ W/mK} + 1,6264 \text{ W/mK} - 0,8173 \text{ W/mK}) = 1,0816 \text{ W/(mK)}$$

Ilmanvaihdon aiheuttama lisälämpöhäviö ($n = 0,5 \text{ 1/h}$):

$$\text{Ilmavirta } \dot{V} = n \times V / 3600 \text{ s} = 0,5(0,8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}) / 3600 \text{ s} = 0,000444 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_{ue,v} = \rho c_p \dot{V} / P = 1,23 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ J/(kgK)} \times 0,000444 \text{ m}^3/\text{s} / 1 \text{ m} = 0,5467 \text{ W/(mK)}$$

ja edelleen ryömintätilan ja ulkoilman välinen kokonaislämpövirta:

$$L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} = 1,0816 \text{ W/mK} + 0,5467 \text{ W/mK} = 1,6283 \text{ W/mK}.$$

Terminen riippuvuuskerroin sisäilman ja ympäristön välillä kuvan 45 liitokselle on nyt:

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right)$$

$$= (0,5449 \text{ W/mK} \times 1,6283 \text{ W/mK}) / (0,5449 \text{ W/mK} + 1,6283 \text{ W/mK}) + 0,2725 \text{ W/mK}$$

$$= 0,6808 \text{ W/(mK)}.$$

Ryömintätilan pohjalla olevan lämmöneristeen ja ryömintätilaa ympäröivän maan yhdistetty lämmönläpäisykerroin U_g lasketaan RakMK osan C4 kaavoilla 33, 35 ja 37 (kun ryömintätilan pohja on keskimäärin yli 0,5 m syvyydellä maanpinnasta, $z_g = 0,8 \text{ m}$ ja ryömintätilan pohja on hyvin lämpöeristetty, $d_g + 0,5 \cdot z_g > B'$ ja $d_{gw} < d_g$)

$$U_{gf} = \frac{2 \cdot \lambda}{0,457 \cdot B' + d_g + 0,5 \cdot z_g} = \frac{2 \cdot 2}{0,457 \cdot 8 + 17,72 + 0,5 \cdot 0,8} = 0,1869 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$U_{gw} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z_g} \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_{gw}}{d_{gw} + z_g} \right) \ln \left(\frac{z_g}{d_{gw}} + 1 \right) = \frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 0,8} \left(1 + \frac{0,5 \cdot 11,140}{11,140 + 0,8} \right) \ln \left(\frac{0,8}{11,140} + 1 \right) = 0,1619 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

$$U_g = U_{gf} + \frac{z_g P U_{gw}}{A} = 0,1869 + \frac{0,8 \cdot 1 \cdot 0,1619}{4} = 0,2161 \text{ m}^2 \text{K/W}$$

Alapohjan vertailulämmönläpäisykertoimeksi saadaan kaavalla 17:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + 2h_{w2}U_{w2}/B' + \dot{V}c_p\rho/A} = \frac{1}{0,097} + \frac{1}{0,2161 + 2 \frac{0,6 \cdot 0,18}{8} + \frac{0,5467}{4}}$$

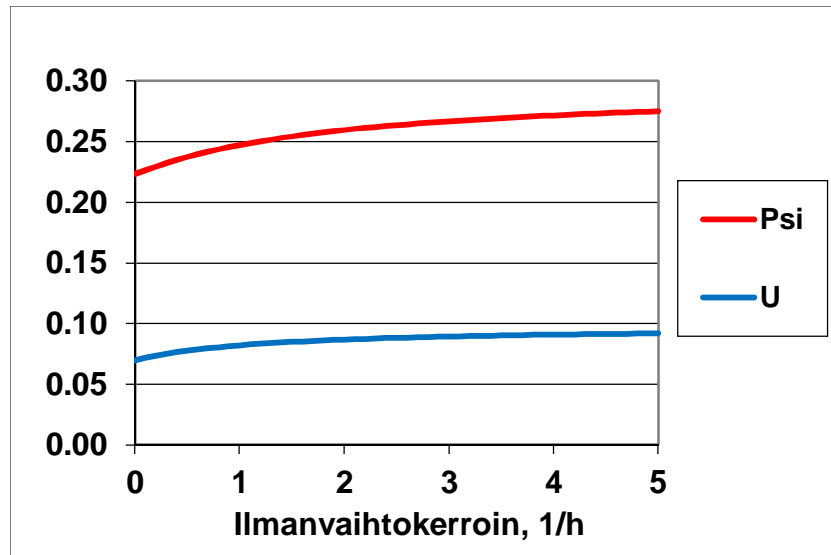
josta $U = 0,0774 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi saadaan kaavalla (13):

$$\Psi = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = 0,6808 \text{ W/mK} - (1 \text{ m} \times 0,1340 \text{ W/m}^2\text{K}) - (4 \text{ m} \times 0,0774 \text{ W/m}^2\text{K})$$

$$= \underline{\underline{0,237 \text{ W/(mK)}}}.$$

Kuvassa 46 on esitetty ryömintätilan ilmanvaihdon vaikutus lisäkonduktanssiin. Ilmanvaihdon kasvaessa lisäkonduktanssin arvo lähestyy raja-arvoa 0,295 W/(mK). Rakentamismääräysten taulukko-arvo kivirunkoisen ulkoseinän ja ryömintätilaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,28 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

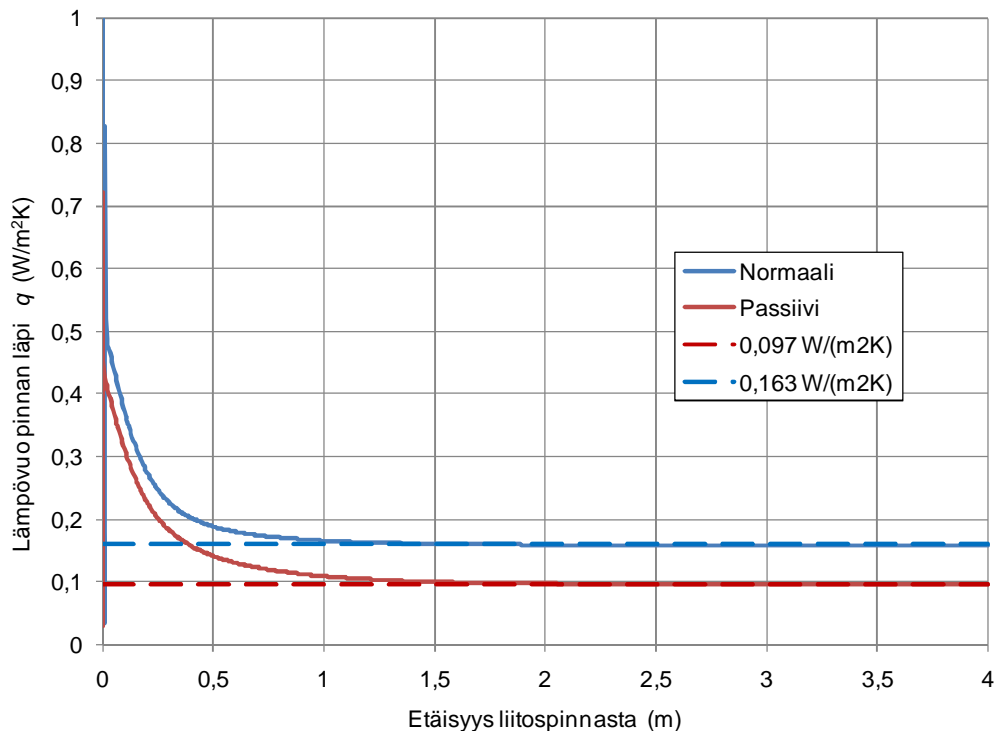


Kuva 46. Ryömintätilan ilmanvaihtokertoimen (vaihtoa tunnissa) vaikutus alapohjan lämmönläpäisykertoimeen U ja liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin Ψ .

Taulukossa 26 on vertailtu eristetyn kiviseinän ja ryömintätilaisen alapohjan liitoksen rakenneosien lämmönläpäisykertoimia sekä muodostuvia viivamaisia lisäkonduktansseja normaali- ja passiivirakenteissa. Numeerisesti määritetty lämpötekkinen kytkentäkerroin L_{2D} kuvaa parhaiten seinän läpäisevän lämpövirran muutosta sisä- ja ulkoilmaolosuhteiden välillä rakenneosien lämmönvastusten kasvaessa. Kokonaislämpöhäviö pienenee 19 %, kun ulkoseinän lämmönläpäisykerroin pienenee 22 % ja kantavan alapohjan samaan aikaan 40 %. Sen sijaan itse liitokseen liittyvät rakenteet eivät kahden tutkitun tapauksen välillä juurikaan muutu. Tästä syystä lämpövirta seinän ja lattian nurkan ja ulkoilman välillä pienenee suhteellisesti vähemmän kuin yksiulotteiset lämpövirrat rakenneosien läpi kauempana liitoksesta. Tämä näkyy etenkin alapohjan pinnan läpäisevästä lämpövirrasta L_{iu} , jonka vertailu sekä normaali- että passiivirakenteen tapauksessa on esitetty kuvassa 47. Kokonaislämpöhäviö rakenteen läpi (L_{2D}) pienenee vähemmän kuin yksittäisten rakennusosien yksiulotteiset lämmönläpäisykertoimet (U_f), jolloin liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin jää suurempi osuus kokonaislämpövirrasta ja sen arvo nousee, tässä tapauksessa 27 % (taulukko 26).

Taulukko 26. Normaali- ja passiivirakenteen välinen vertailu.

Rakenne	Ulkoseinän lämmönläpäisykerroin U_{w1} (W/m ² K)	Sokkelin lämmönläpäisykerroin U_{w2} (W/m ² K)	Kantavan alapohjan lämmönläpäisykerroin U_f (W/m ² K)	Alapohjan lämmönläpäisykerroin U (W/m ² K)	Lämpötekkinen kytkentäkerroin ($n = 0,5$ l/h) L_{2D} (W/mK)	Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi ($n = 0,5$ l/h) Ψ (W/mK)
<i>normaali</i>	0,173	0,180	0,163	0,1211	0,8431	0,186
<i>passiivi</i>	0,134	0,180	0,097	0,0774	0,6808	0,237
<i>muutos</i>	-22 %	±0 %	-40 %	-36 %	-19 %	+27 %

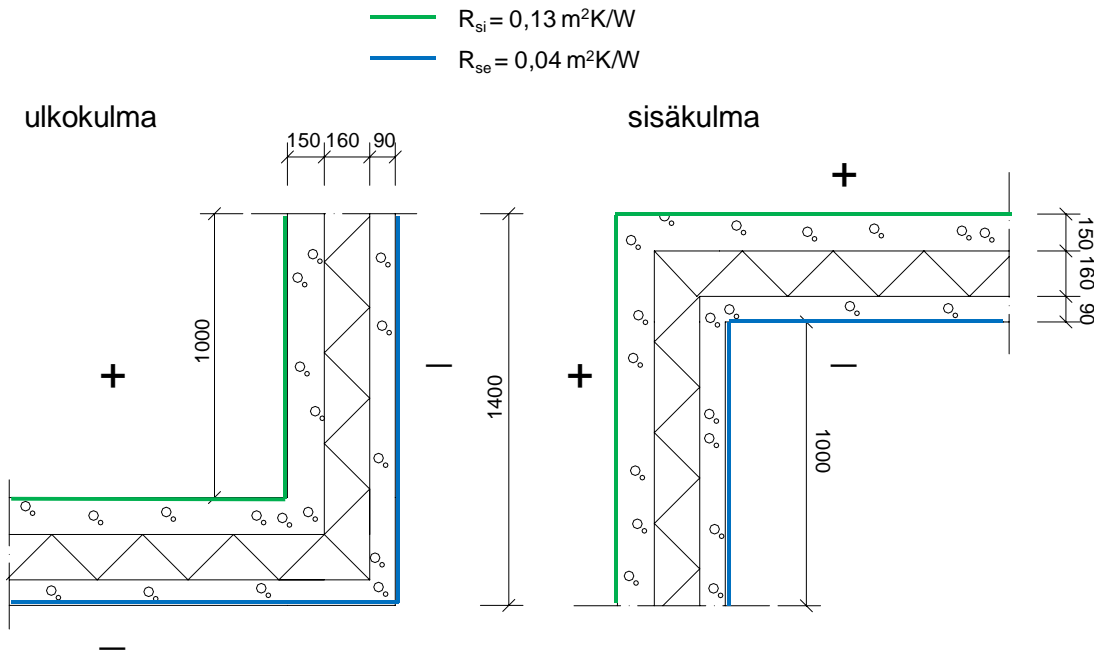


Kuva 47. Alapohjan yläpinnan läpäisevä lämpövirta normaali- ja passiivirakenteessa laskentatapauksessa 1 ($T_{sisä} = +1\text{ K}$, $T_{ulko} = T_{ryömintätila} = \pm 0\text{ K}$).

Edellä esimerkkeinä olevien normaali- ja passiiviratkaisujen lisäkonduktanssien vertailu osoittaa selvästi, että pelkkien rakenneosien (seinien, lattioiden jne.) U-arvojen parantaminen ei merkitse automaattisesti niiden välisten liitosten lisäkonduktanssien pienenemistä – päinvastoin. Liitosten rakenteisiin ja lämpötekniikkaan on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota rakenneosien U-arvovaatimusten tiukentuessa. Muutoin rakenneosien liitoksiin muodostuvien kylmäsiltojen osuus rakennusvaipan lämpöhukasta voi kasvaa merkittävästi. Tämä pitää erityisesti paikkansa ulkoseini- ja alapohjien välisissä liitoksissa, joissa liitosten laskennallisten lisäkonduktanssien arvot ovat usein suurimmillaan.

6.2.3 Eristettyjen kiviseinien väliset liitokset

Kuvassa 48 on yksinkertainen eristettyjen kiviseinien välinen ulko- ja sisänurkkaliitos. Seinämateriaalien kerrospaksuudet ja lämpöparametrit on esitetty taulukossa 27. Kummassakaan nurkassa ei ole erityisiä liitokseen liittyviä kylmäsiltoja, joten mallinnus voidaan tehdä suoraan kuvan 48 mukaisina homogeenisina rakennekerroksina.



Kuva 48. Ulkoseinien ulkokulmien liitokset, lämpöeristetyt kiviseinät.

Taulukko 27. Eristetyn kiviseinärakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,130
Sisäkuori (betoni)	150	2,0	0,0750
Lämmöneriste	160	0,0286	5,594
Ulkokuori (betoni)	90	2,0	0,0450
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			5,884
$U_1 = 1/\Sigma R$			0,1700 W/m ² K

Ulkonurkan lämpötekniiseksi kytkentäkertoimeksi saadaan $L_{2D} = 0,3977 \text{ W/mK}$, ja edelleen liitoksen lisäkonduktanssiksi (kaava (4), $l_j = 1 \text{ m}$):

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = 0,3977 \text{ W/mK} - 2 \times (0,1700 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1 \text{ m}) = \underline{\underline{0,058 \text{ W/(mK)}}}.$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo betonirunkoisten ulkoseinien välisen ulkonurkan lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,06 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

Sisänurkan lämpötekniinen kytkentäkerroin on $L_{2D} = 0,379 \text{ W/mK}$ ja viivamainen lisäkonduktanssi (kaava (4), $l_j = 1,4 \text{ m}$):

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = 0,379 \text{ W/mK} - 2 \times (0,17 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,4 \text{ m}) = \underline{\underline{-0,097 \text{ W/(mK)}}}.$$

RakMK C4 (2012) antaa sisänurkkien lisäkonduktansseiksi ulkonurkkien käänteisluvun, betoniseinien tapauksessa $\Psi_{sisä} = -\Psi_{ulko} = -0,06 \text{ W/(mK)}$.

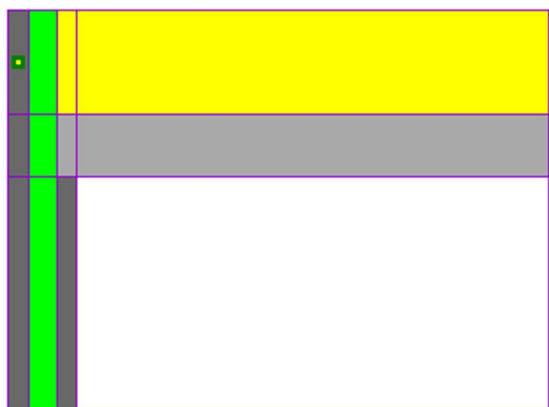
6.2.4 Kiviseinän ja yläpohjan liitos

Kuvassa 49 on esimerkki betoniulkoseinän ja yläpohjan liitoksen laskentamallista. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 19, jossa seinän lämmönläpäisykerroin on $U = 0,1675 \text{ W/m}^2\text{K}$. Yläpohjassa on 240 mm betonilaatta ja 440 mm lämmöneristys. Lämmönläpäisykerroin on $0,0887 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja se muodostuu taulukon 28 mukaisesti.

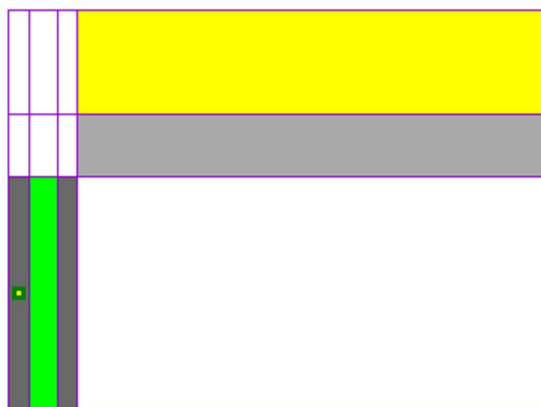
Taulukko 28. Yläpohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros alhaalta ylös	Kerros- paksuus mm	Lämmön- johtavuus W/mK	Lämmönvastus $R \text{ (m}^2\text{K)/W}$
Pintavastus R_{si}			0,10
Betoni	265	2,0	0,1325
Eriste	440	0,04	11,00
Pintavastus R_{se}			0,04
ΣR			11,275
$U = 1/\Sigma R$			0,08871 $\text{W/m}^2\text{K}$

	1	2	3	4
Length →	0.09	0.12	0.08	2
x y meter ↓	0.44	0.265	1	



Laskentatapaus



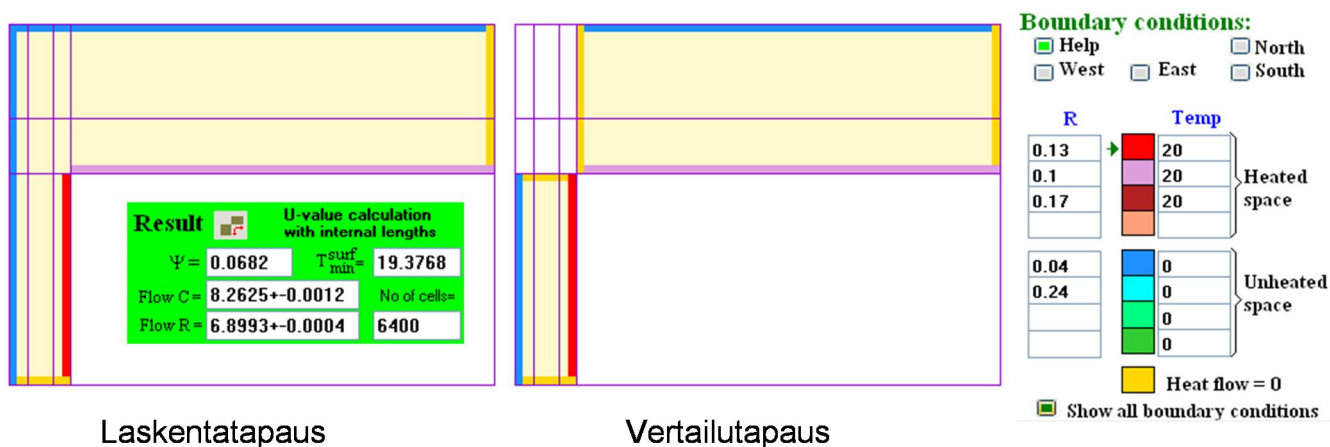
Vertailutapaus

Name	↓	λ
Katon eriste		0.04
		0.034
		0.035
		0.04
		0.037
Seinän eriste		0.021
		0.04
		0.25
		0.04
		0.13
		0.18
		0.25
		0.6
Katon betoni		2
Seinän betoni		2
		10
		50
Indoor/Outdoor air		-

Kuva 49. Laskentamalli ja sen vertailutapaus kiviseinän ja yläpohjan liitoksesta. Seinän eristepaksuus on 120 mm ja katon 440 mm. Mitat vaaka- ja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

Kun mitat, lämmönjohtavuudet ja reunaehdot asetetaan kylmäsiltojen laskentaohjelmaan, siitä saadaan kuvan 50 mukainen tulostus. Tämä ohjelma laskee paitsi kylmäsiltojen tapauksen myös vertailutapauksen (ilman kylmäsiltaa) ja niiden avulla suoraan liitoksen lineaariseen lisäkonduktanssin $\Psi = 0,0682 \text{ W/mK}$. Sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 50 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

$$\Psi = L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 8,2625/20 \text{ W/mK} - 0,1675 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,0 \text{ m} - 0,08871 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,0 \text{ m} = 0,4124 - 0,3449 = \underline{\underline{0,0682 \text{ W/mK}}}.$$

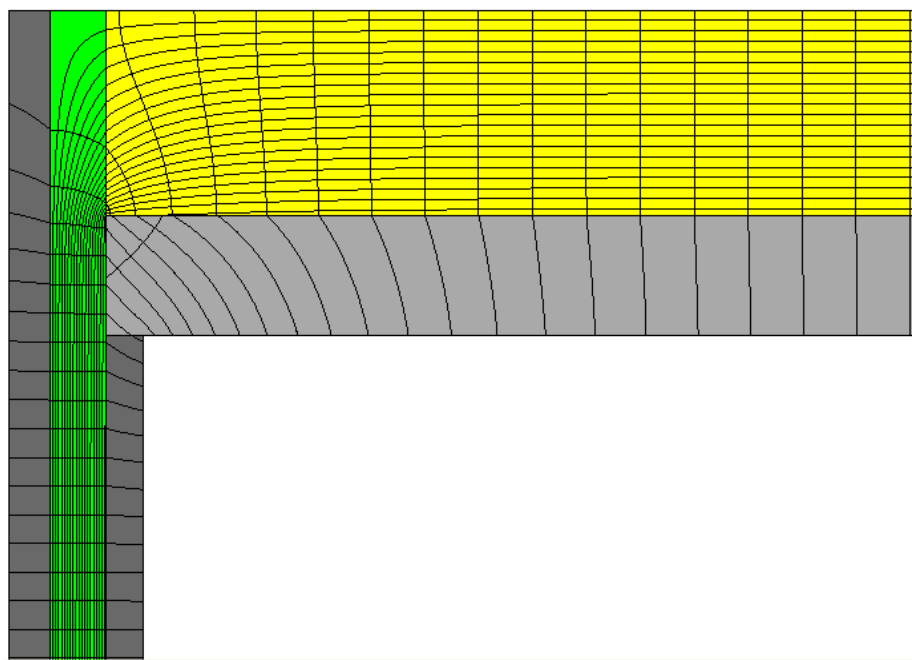


Laskentatapaus

Vertailutapaus

Kuva 50. Lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ sekä lämpövirrat laskenta- ja vertailutapauksissa (Flow C ja Flow R). Kuvasta näkyy myös käytetyt pintavastusten arvot (R).

Kuvassa 26 on tilanteen lämpötila- ja lämpövirtakenttä. Alin sisäpinnan lämpötila on $19,70^\circ\text{C}$ seinän ja katon liittymäkohdassa.



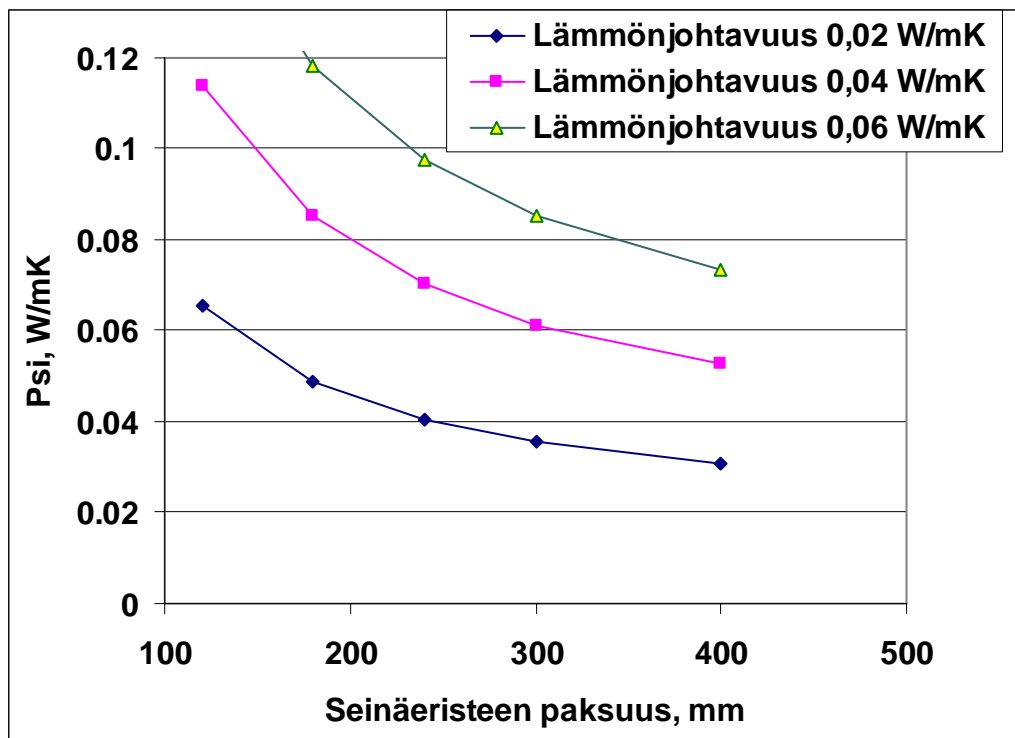
Kuva 51. Kuvan 49 tilanteen lämpötilojen tasa-arvokäyrät 1 asteen välein sekä niitä vastaan kohtisuorassa olevat lämpövirran virtaviivat. Kaikista virtaviivojen väleistä virtaa sama lämpövirta eli mitä tiheämmässä virtaviivat ovat sitä suurempi on lämpövirta. Ulkolämpötila on 0°C ja sisälämpötila 20°C .

Taulukkoon 29 on laskettu esimerkkejä siitä miten katon tai seinän paksuus ja lämmönjohtavuus vaikuttavat liitoksen lisäkonduktanssiin.

Taulukko 29. Seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssi eri tapauksissa.

Tilanne		Lisäkonduktanssi Ψ , W/mK
1	Kuvan 49 tilanne	0,0682
2	Katon betonin paksuus 175 mm, muuten kuten 1	0,0542
3	Katon betonin lämmönjohtavuus 1 W/mK, muuten kuten 1	0,0659
4	Sisäkuori 150 mm, muuten kuten 1	0,0736
5	Seinän eristepaksuus 240mm, $\lambda=0,042$ W/mK, muuten kuten 1	0,0732
6	Yläpohjan eriste 660 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0718

Kuvassa 52 on esitetty miten liitoksen lisäkonduktanssi muuttuu kun seinän eristepaksuus ja eristeen tehollinen lämmönjohtavuus (sisältää kiinnikkeiden vaikutuksen) muuttuvat. Todetaan, että lämmönjohtavuuden pienetessä lisäkonduktanssi selvästi pienenee. Myös eristepaksuuden lisäys pienentää liitoksen lisäkonduktanssia. Yläpohjan eristekerroksen paksuntaminen sitä vastoin suurentaa lisäkonduktanssia, mikä käy ilmi vertaamalla tilanteita 6 ja 1 taulukossa 29.

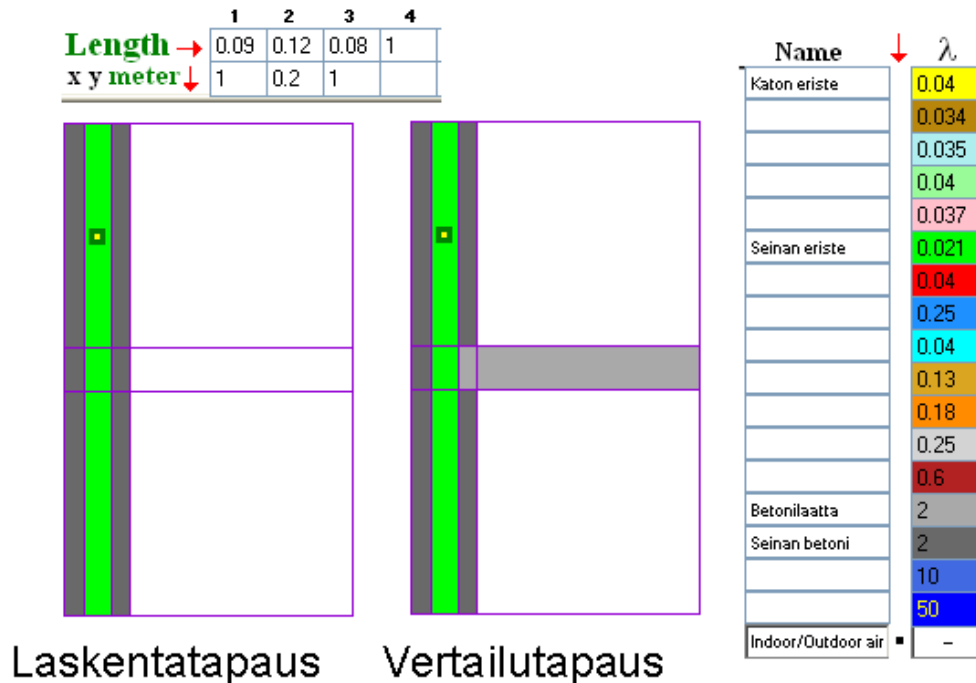


Kuva 52. Seinän eristyspaksuuden sekä lämmönjohtavuuden vaikutus seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssiin. Muuten tilanne on sama kuin tilanne 1 taulukossa 29.

Rakentamismääräysten taulukkoarvo betonirakenteisen ulkoseinän ja yläpohjan liitokselle on 0,08 W/(mK) (taulukko 1).

6.2.5 Kiviseinän ja välipohjan liitos

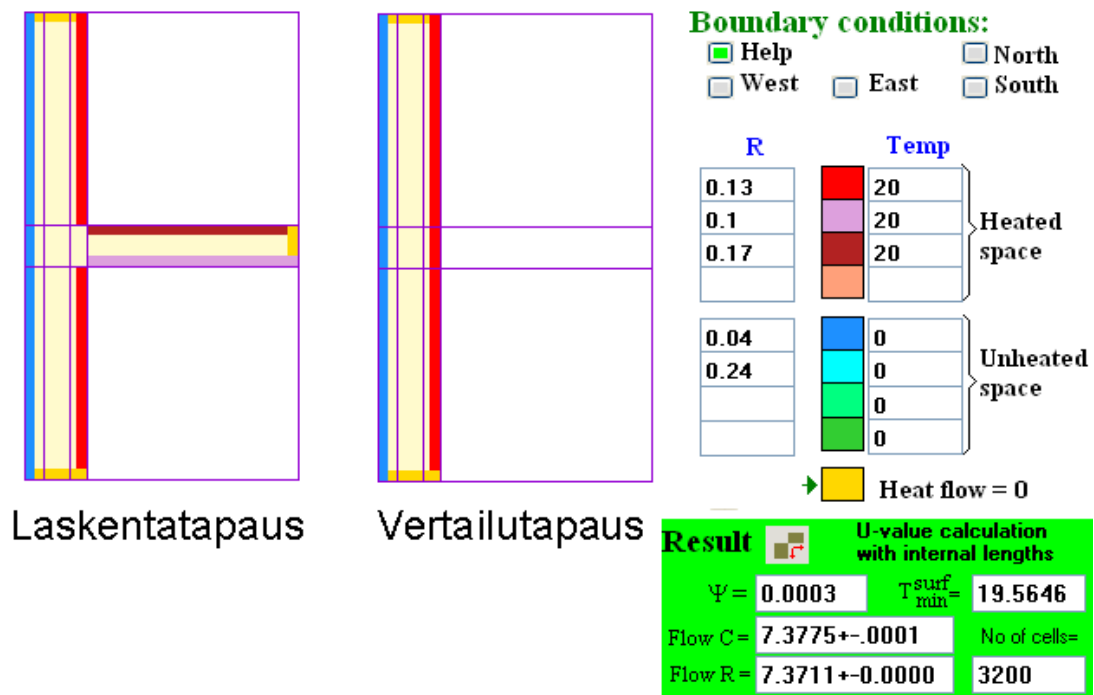
Kuvassa 53 on esimerkki betoniulkoseinän ja välipohjan liitoksen laskentamallista. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 19, jossa seinän lämmönläpäisykerroin on $U = 0,1675 \text{ W/m}^2\text{K}$. Välipohjana on 200 mm betonilaatta.



Kuva 53. Laskentamalli ja sen vertailutapaus kiviseinän ja välipohjan liitoksesta. Seinän eristepaksuus on 120 mm. Mitat vaaka- ja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

Kun mitat, lämmönjohtavuudet ja reunaehdot asetetaan kylmäsiltojen laskentaohjelmaan, siitä saadaan kuvan 54 mukainen tulostus. Tämä ohjelma laskee paitsi kylmäsiltojen lisäksi vertailutapauksen (ilman kylmäsiltaa) ja niiden avulla suoraan liitoksen lineaariseen lisäkonduktanssin $\Psi = 0,0003 \text{ W/mK}$. Lähes sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 54 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

$$\begin{aligned} \Psi &= L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 7,3775/20 \text{ W/mK} - 0,1675 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,2 \text{ m} \\ &= 0,368875 - 0,3685 = \underline{\underline{0,0004 \text{ W/mK}}} \end{aligned}$$

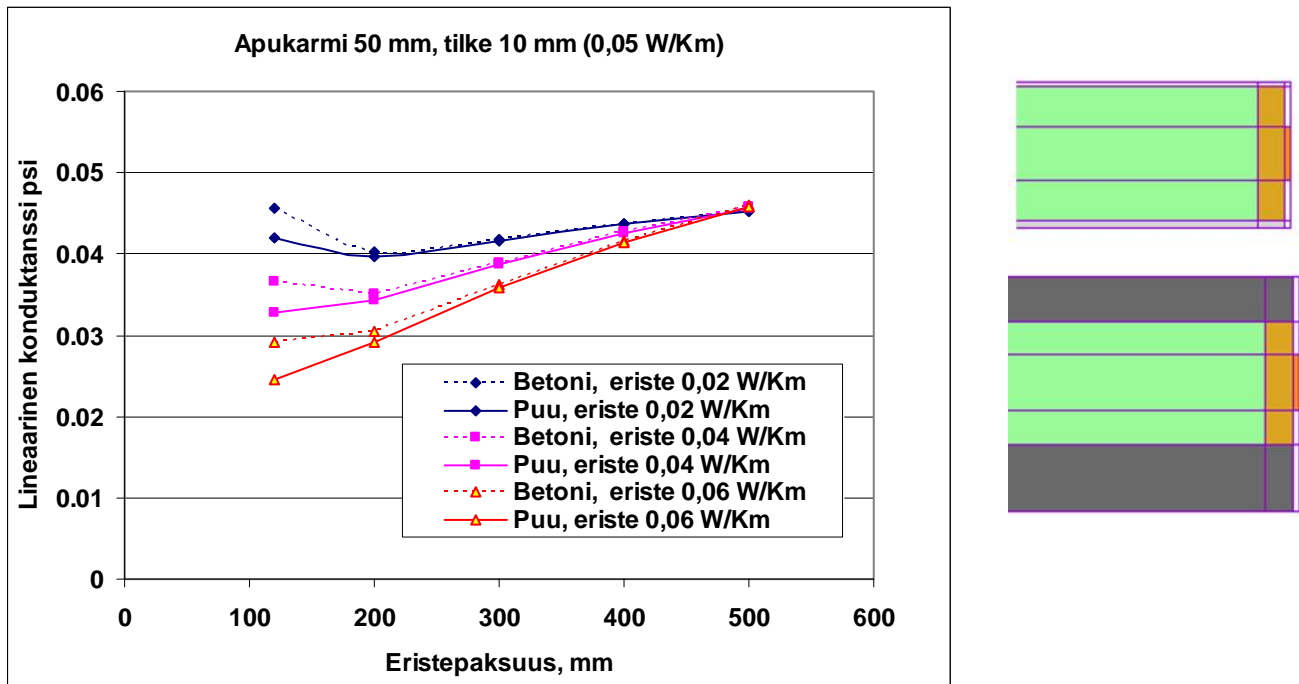


Kuva 54. Lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ sekä lämpövirrat laskenta- ja vertailutapauksissa (Flow C ja Flow R). Kuvasta näkyy myös käytetyt pintavastusten arvot (R).

Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi on siis hyvin pieni. Rakentamismääräysten taulukkoarvo betonirakenteisen ulkoseinän ja välipohjan liitokselle on 0,00 W/(mK) (taulukko 1).

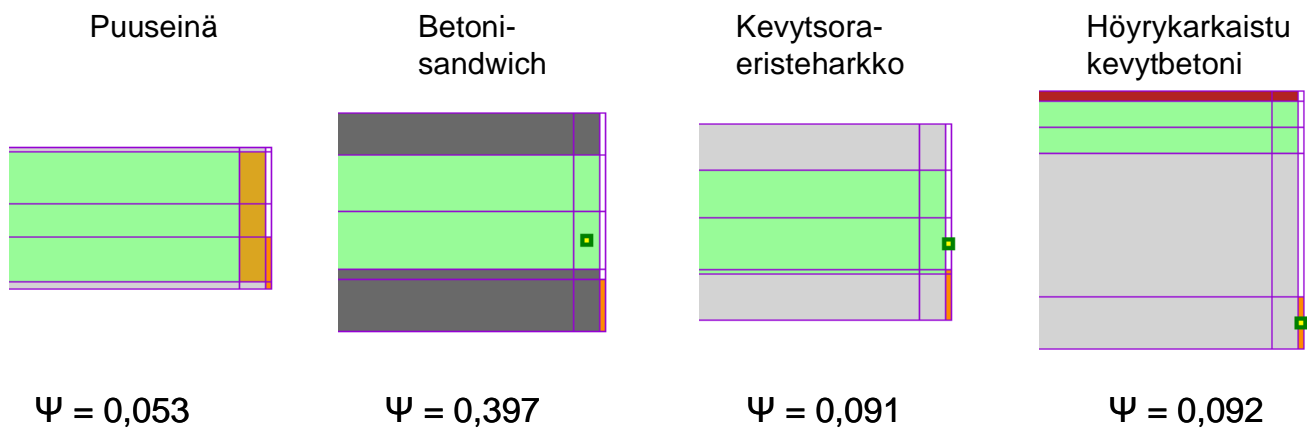
6.2.6 Kiviseinän ja ikkunan liitos

Mikäli ikkuna liitetään kiviseinään apukarmin avulla ei liitoksen laskenta poikkea puurakenteisen seinän laskennasta. Myös lineaarisen lisäkonduktanssin arvot ovat lähellä samoja, jos ikkuna sijaitsee eristeessä keskitetysti, kuva 55.



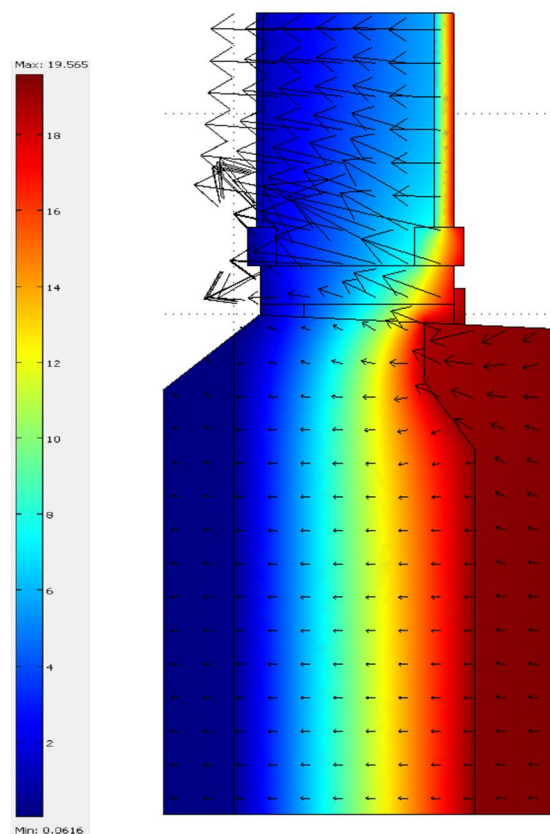
Kuva 55. Ikkunaliitoksen viivamainen lisäkonduktanssi puu- ja betoniseinälle kun käytetään apukarmia. Laskennallinen karmisyvyys on 100 mm. Muut tiedot ovat samat kuin kuvassa 36.

Jos ikkuna sijaitsee epäkeskisesti tulee runkorakenteiden välille eroja. Kuvassa 56 on esitetty konduktansseja eri runkorakenteille kun ikkuna on sisäseinän tasossa.

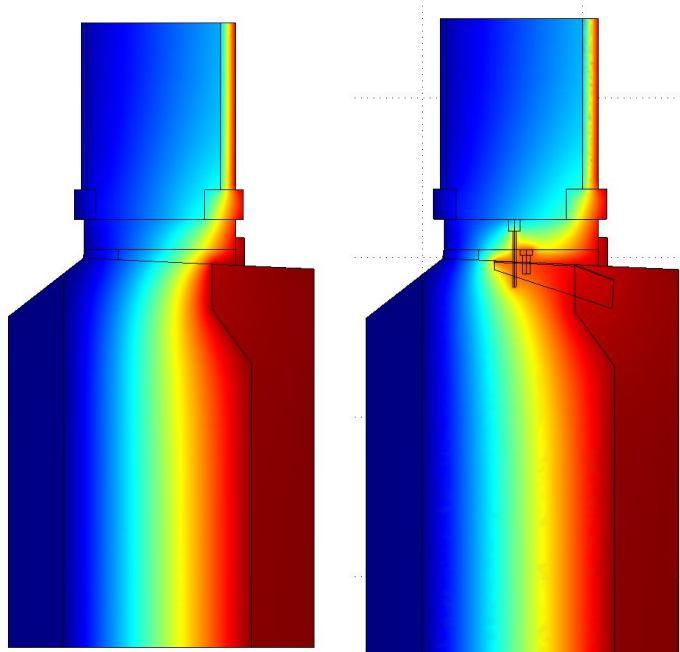


Kuva 56. Sisäseinän tasolle asennetun ikkunan viivamainen lisäkonduktanssi eri runkomateriaaleilla. Laskennallinen karmisyvyys on 100 mm. Seinien U-arvot ovat likimain samat.

Nykyään (2011) apukarmirakenne on jäämässä pois betonielementtiseinistä. Sen sijaan käytetään ikkunan karmikenkäkiinnitystä, kuva 57. Metallisia karmikenkiä käytetään noin kaksi kappaletta karmimetriä kohti. Lämmön johtumisen kannalta karmikenkäliitos on siten kolmiulotteinen. Laskelmat tehtiin Comsol Multiphysics 3.5a-ohjelmalla. Tuloksia on taulukossa 30.

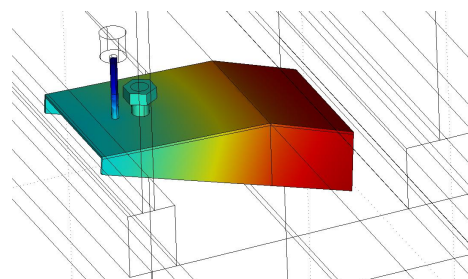


Kuva 58. Lämpötilat ja lämpövirtavektorit ilman karmikenkää taulukon 30 tilanteessa 2. Kaksiulotteinen laskenta.



Leikkaus
karmikenkien väliltä

Leikkaus
karmikengän kohdalta



Lämpötilat
karmikengässä

Kuva 59. Lämpötila ikkunan karmikenkäkiinnityksessä. Kolmiulotteinen laskenta.

Rakentamismääräysten taulukkoarvo betonirakenteisen ulkoseinän ja ikkunan liitokselle on 0,04 W/(mK) (taulukko 1) mikäli karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

6.3 Eristetty tiiliseinä

Eristetty tiiliseinä käsiteltiin tapauksena, jossa kantavan tiilirakenteisen sisäkuoren (130 mm) ulkopuolella on 175 mm mineraalivillaeriste ja 30 mm tuulensuojalevy. Seinärakenteen lämmönvastukseen ei laskettu mukaan julkisivumuurausta ja tuuletusrakoa. Taulukossa 31 on esitetty seinärakenteen laskennassa huomioon otetut rakennekerrokset ja niiden lämpöparametrit.

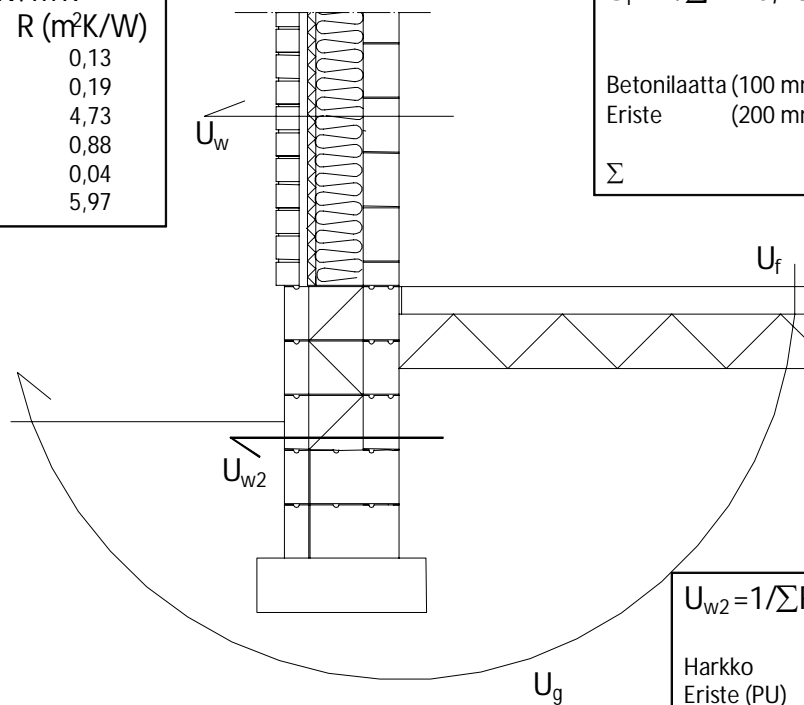
Taulukko 31. Eristetyn tiiliseinärakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,130
Kantava tiiliseinä	130	0,7	0,186
Lämmöneriste UNS	175	0,037	4,730
Tuulensuojalevy WPS	30	0,034	0,882
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			5,968
$U_1 = 1/\Sigma R$			0,1676 W/m ² K

6.3.1 Eristetty tiiliseinä ja maanvastainen alapohja

Kuvassa 60 on esitetty maanvastaisen laatan ja tiiliseinän välinen liitos. Sokkelirakenteena on halkaistu harkkosokkeli, jonka lämmönläpäisykerroin on erittäin pieni, $U_{w2} = 0,127$ W/m²K. Tuuletusraon pinnan pintavastuksena käytettiin arvoa $R_{se} = 0,04$ m²K/W. Seinärakenteen, alapohjan ja sokkelin materiaalikerrokset ja lämpöparametrit on esitetty taulukoissa 31, 32 ja 33.

$U_w = 1/\sum R = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$	
	$R \text{ (m}^2\text{K/W)}$
Pintavastus (R_{si})	0,13
Kantava tiili (130 mm)	0,19
Eriste UNS (175 mm)	4,73
Eriste WPS (30 mm)	0,88
Pintavastus (R_{se})	0,04
Σ	5,97



$U_f = 1/\sum R = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$	
	$R \text{ (m}^2\text{K/W)}$
Betonilaatta (100 mm)	0,05
Eriste (200 mm)	5,56
Σ	5,61

$U_{w2} = 1/\sum R = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$	
	$R \text{ (m}^2\text{K/W)}$
Harkko (130 mm)	0,54
Eriste (PU) (200 mm)	7,14
Harkko (90 mm)	0,38
Ulkokuori (90 mm)	0,045
Σ	8,06

Kuva 60. Eristetyn tiiliseinän ja maanvastaisen alapohjan liitos.

Taulukko 32. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K/W)
Sisäkuori (harkko))	130	0,3	0,433
PU eriste	200	0,028	7,143
kuori (harkko)	90	0,3	0,300
Σ			7,876
$U_{w2} = 1/\sum R$			0,127 W/m ² K

Taulukko 33. Alapohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K/W)
Betonilaatta	100	2,0	0,050
EPS eriste	200	0,036	5,556
Σ			5,606
$U_2 = 1/\sum R$			0,178 W/m ² K

Laatan ja sokkelin sisäkuoren välissä oli 10 mm solumuovikaista ($R_{solu} = 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$). Sen sijaan kantavan tiiliseinän ja sokkelin sisäkuoren väliin ei mallinnettu eristettä. Tästä aiheutuu suhteellinen kylmäsilta sisäkuoren ja täytön välille. Laskettu lämpötekninen kytkentäkerroin kuvan 61 yksinkertaistetulle liitokselle oli $L_{2D} = 0,7994 \text{ W/mK}$.

Esimerkissä alapohja on hyvin eristetty, jolloin sen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavasta (9):

$$U = \frac{\lambda}{0,457 \times B' + d_t} + \frac{\Psi_{ge}}{B'} = \frac{2}{0,457 \times 8 + 12,05} - \frac{0,0331}{8} = 0,1232 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

missä

λ on pohjamaan lämmönjohtavuus = 2 W/mK

B' alapohjalaatan karakteristinen mitta = 8 m

d_t rakenteen ekvivalentti paksuus, m

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,42 + 2(0,17 + 5,606 + 0,04) = 12,05 \text{ m}$$

missä

$R_f = 5,606 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (laatta, lämmöneriste)

$R_{si} = 0,17 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (lattian sisäpinnan pintavastus, taulukko 5)

$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (pohjamaan ulkopinnan pintavastus, taulukko 5)

$w = 0,42 \text{ m}$ (seinärakenteen leveys)

Perusmuurin viivamainen lisäkonduktanssi Ψ_{ge} saadaan kaavalla

$$\Psi_{ge} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 D_v}{d_t + d'_v} + 1 \right) \right] = -0,0331 \text{ W / mK}$$

missä $D_v = 0,6 \text{ m}$ (perusmuurin lämmöneristeen korkeus maanpinnan alapuolella) ja

$$d'_v = \lambda \left(R_{nv} - \frac{d_{nv}}{\lambda} \right) = 15,33 \text{ m}$$

missä

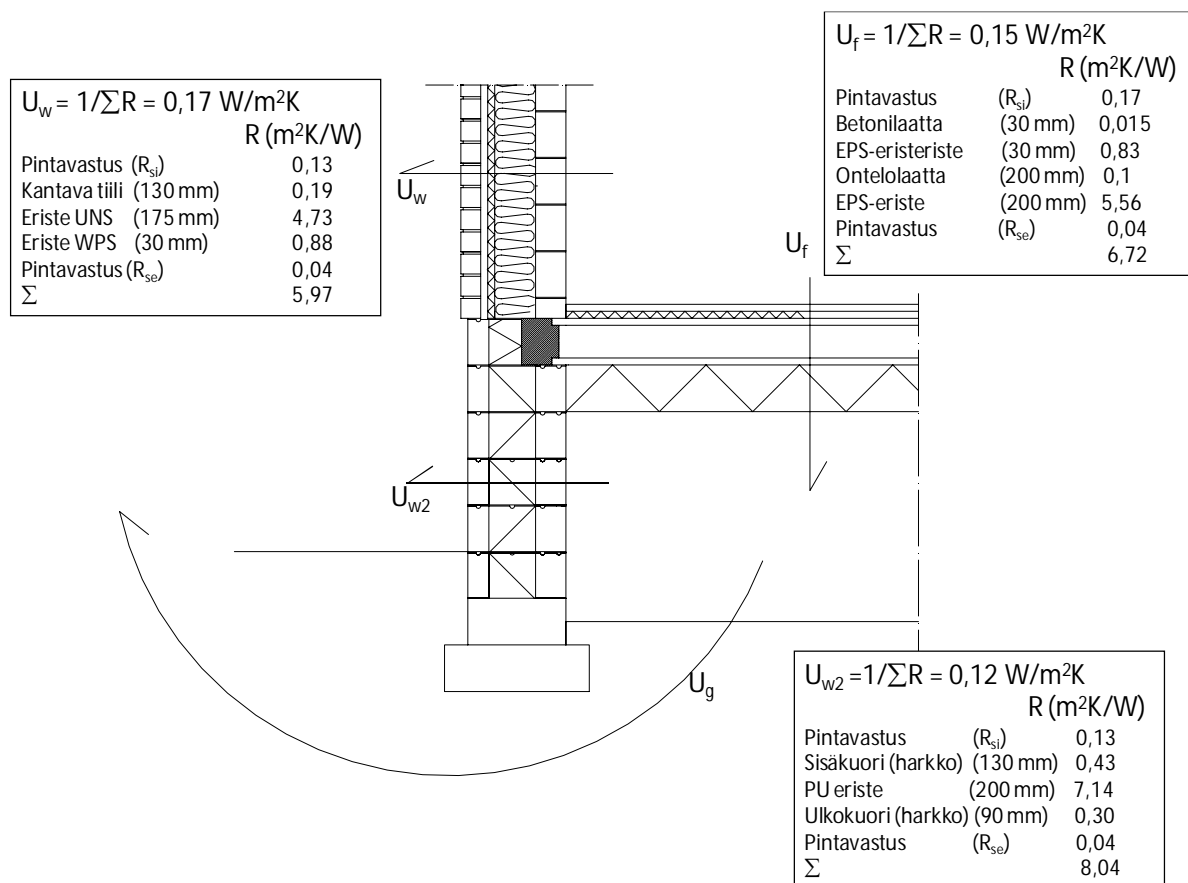
$R_{nv} = 7,876 \text{ W/m}^2\text{K}$ (perusmuurin lämmönvastus)

$d_{nv} = 0,42 \text{ m}$ (perusmuurin paksuus, eriste ja runkorakenne)

Tarkasteltavan liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ saadaan kaavasta (5):

$$\begin{aligned} \Psi &= L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = \\ &= 0,7994 \text{ W/mK} - 1,0 \text{ m} \times 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} - 0,5 \times 8,0 \text{ m} \times 0,1232 \text{ W/m}^2\text{K} = \\ &= 0,7994 - 0,6603 = \underline{\underline{0,1391 \text{ W/mK}}} \end{aligned}$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo tiilirunkoisen ulkoseinän ja maanvastaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,17 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

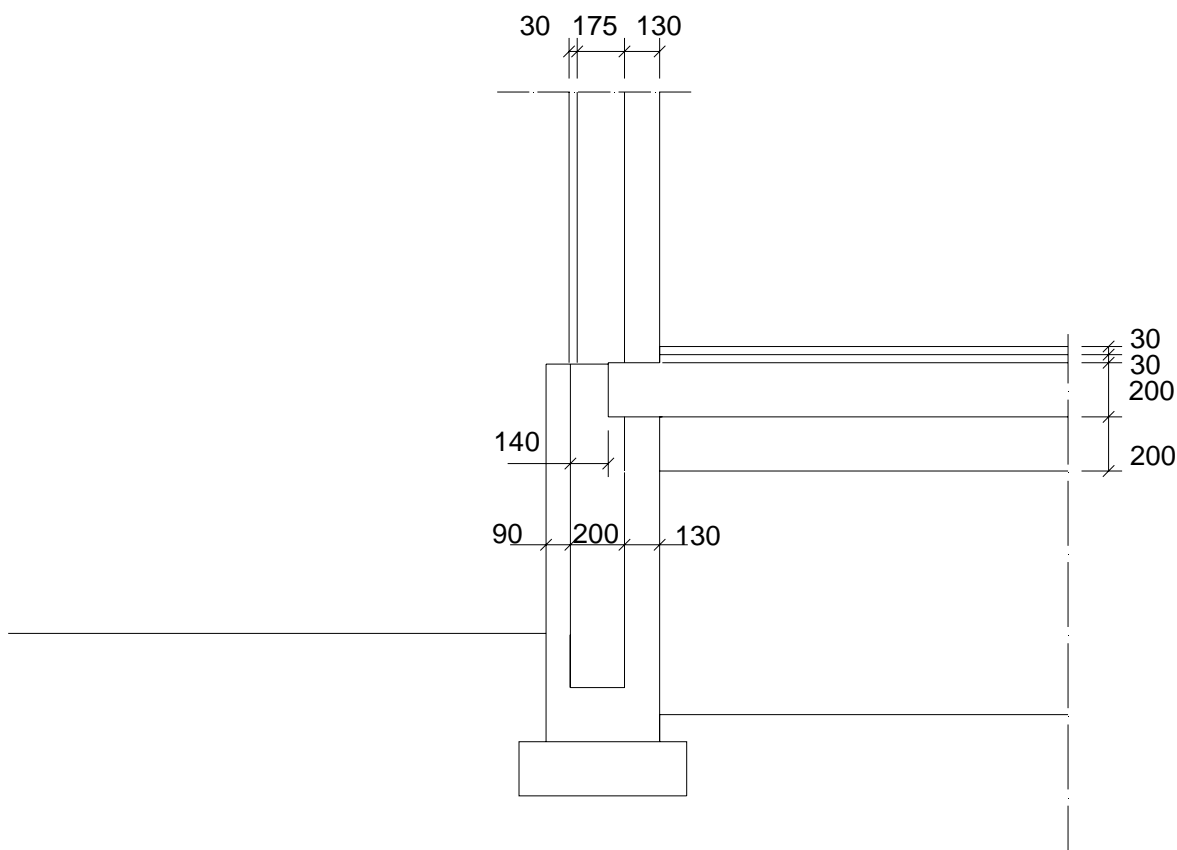


Kuva 62. Eristetyn tiiliseinän ja ryömintätillaisen alapohjan liitosdetalji.

Taulukko 35. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus <i>d</i> (mm)	Lämmönjohtavuus <i>λ</i> (W/mK)	Lämmönvastus <i>R</i> (m²K)/W
Pintavastus (R _{si})			0,130
Sisäkuori (harkko))	130	0,3	0,433
PU eriste	200	0,028	7,143
Ulkokuori (harkko)	90	0,3	0,300
Pintavastus (R _{se})			0,040
Σ			8,046
U _{w2} = 1/ΣR			0,124 W/m²K

Kuvassa 63 on esitetty liitosdetaljin yksinkertaistettu malli ja käytetyt kerrospaksuudet.



Kuva 63. Eristetyn tiiliseinän ja ryömintätilaisen alapohjan välisen liitoksen yksinkertaistettu laskentamalli.

Taulukko 36. Eristetyn tiiliseinän ja ryömintätilallisen alapohjan liitoksen kolmen laskentatapauksen tulokset L_1 , L_2 ja L_3 .

Laskentatapaus	L_{ie} (W/mK)	L_{iu} (W/mK)	$L_{ue,c,sokkeli}$ (W/mK)	$L_{ue,c,pohjamaa}$ (W/mK)	$\sum L_{ue,c}$ (W/mK)	L_i (W/mK)
1 (L_1)	0,1308	0,7202	-	-	-	0,8510
2 (L_2)	0,1212	-	0,2524	1,8285	2,0809	2,2021
3 (L_3)	-	0,6561	0,2997	1,7336	2,0333	2,6894

Taulukon 36 tulosten (L_1 , L_2 ja L_3) perusteella saadaan rakenneosien johtumislämpökertoimet kaavoilla (15) ja (16):

$$L_{iu} = 0,5 \times (L_1 - L_2 + L_3) = 0,5 \times (0,8510 \text{ W/mK} - 2,2021 \text{ W/mK} + 2,6894 \text{ W/mK}) = 0,6692 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ie} = 0,5 \times (L_1 + L_2 - L_3) = 0,5 \times (0,8510 \text{ W/mK} + 2,2021 \text{ W/mK} - 2,6894 \text{ W/mK}) = 0,1818 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue,c} = 0,5 \times (L_2 + L_3 - L_1) = 0,5 \times (2,2021 \text{ W/mK} + 2,6894 \text{ W/mK} - 0,8510 \text{ W/mK}) = 2,0202 \text{ W/(mK)}$$

Ilmanvaihdon aiheuttama lisälämpöhäviö ($n = 0,5$ 1/h):

$$\text{Ilmavirta } \dot{V} = n \times V / 3600 \text{ s} = 0,5(0,8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}) / 3600 \text{ s} = 0,000444 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_{ue,v} = \rho c_p \dot{V} / P = 1,23 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ J/(kgK)} \times 0,000444 \text{ m}^3/\text{s} / 1 \text{ m} = 0,5467 \text{ W/(mK)}$$

ja $L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} = 2,0202 \text{ W/mK} + 0,5467 \text{ W/mK} = 2,5669 \text{ W/mK}$.

Liitoksen lämpötekninen kytkentäkerroin on nyt:

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right) \\ = (0,6692 \text{ W/mK} \times 2,5669 \text{ W/mK}) / (0,6692 \text{ W/mK} + 2,5669 \text{ W/mK}) + 0,1818 \text{ W/mK} \\ = 0,7126 \text{ W/mK}.$$

Alapohjan lämmönläpäisykertoimeksi saadaan kaavalla 17:

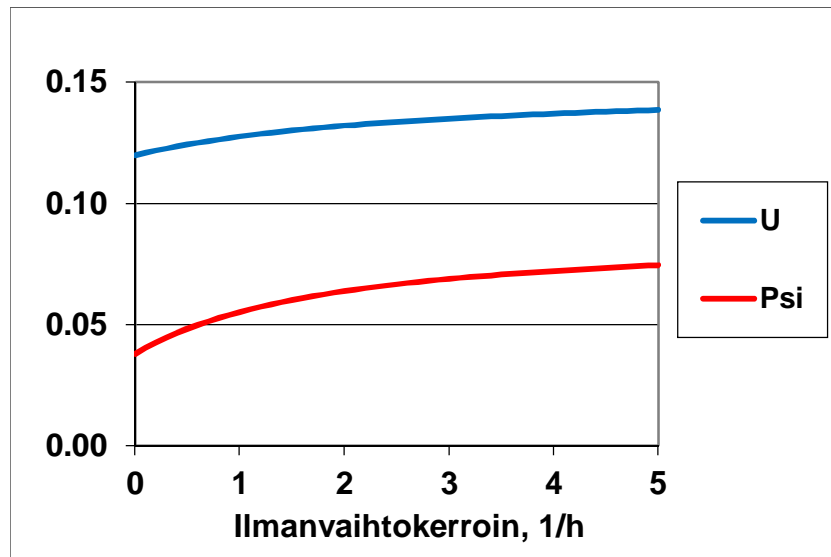
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + 2h_{w2}U_{w2}/B' + \dot{V}c_p\rho/A} = \frac{1}{0,15} + \frac{1}{0,58 + 2 \frac{1,0 \cdot 0,124}{8} + \frac{0,5467}{4}}$$

josta $U = 0,1242 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi saadaan kaavalla (13):

$$\Psi = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = 0,7126 \text{ W/mK} - (1 \text{ m} \times 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K}) - (4 \text{ m} \times 0,1242 \text{ W/m}^2\text{K}) \\ = \underline{\underline{0,048 \text{ W/(mK)}}}.$$

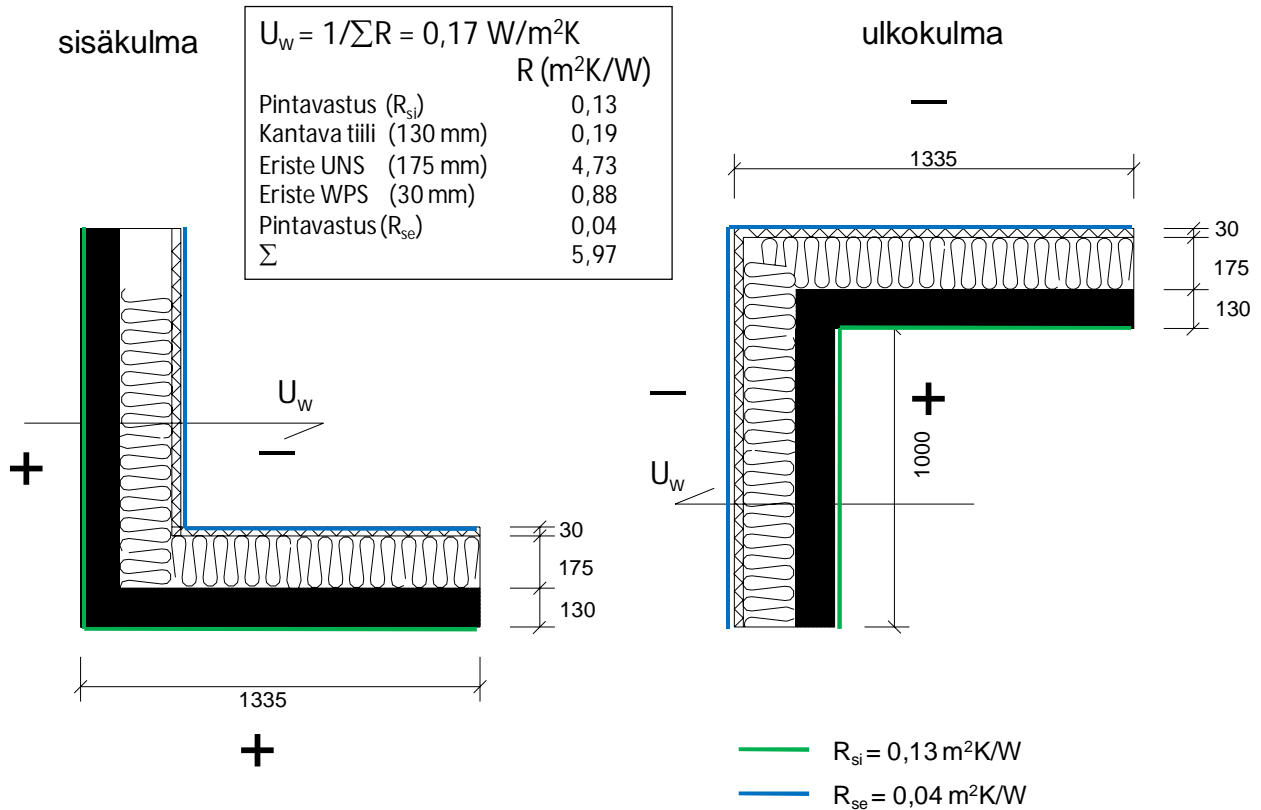
Kuvassa 64 on esitetty ryömintätilan ilmanvaihdon vaikutus lisäkonduktanssiin. Ilmanvaihdon lisääntyessä lisäkonduktanssin arvo lähestyy raja-arvoa 0,088 W/(mK). Rakentamismääräysten taulukkoarvo eristetyn tiiliseinän ja ryömintätilaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,06 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).



Kuva 64. Ryömintätilan ilmanvaihtokerroimen (vaihtoa tunnissa) vaikutus alapohjan lämmönläpäisykertoimeen U ja liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin Ψ .

6.3.3 Tiiliseinien väliset liitokset

Kuvassa 65 on esitetty eristettyjen tiiliseinien ulko- ja sisäkulmat. Molemmissa tapauksissa seinänosien materiaalikerrokset ja parametrit vastaavat taulukon 31 arvoja. Kulmarakenteisiin ei liity ylimääräisiä kylmäsiltoja ja rakenteen geometria voidaan mallintaa yhtenäisinä jatkuvina materiaali-kerroksia.



Kuva 65. Eristettyjen tiiliseinien välinen ulko- ja sisäkulma.

Ulkokulman lämpötekkinen kytkentäkerroin oli $L_{2D} = 0,3874 \text{ W/mK}$, ja viivamainen lisäkonduktanssi:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = 0,3874 \text{ W/mK} - (2 \times 1,0 \text{ m} \times 0,167 \text{ W/m}^2\text{K}) = \underline{\underline{0,0534 \text{ W/(mK)}}}.$$

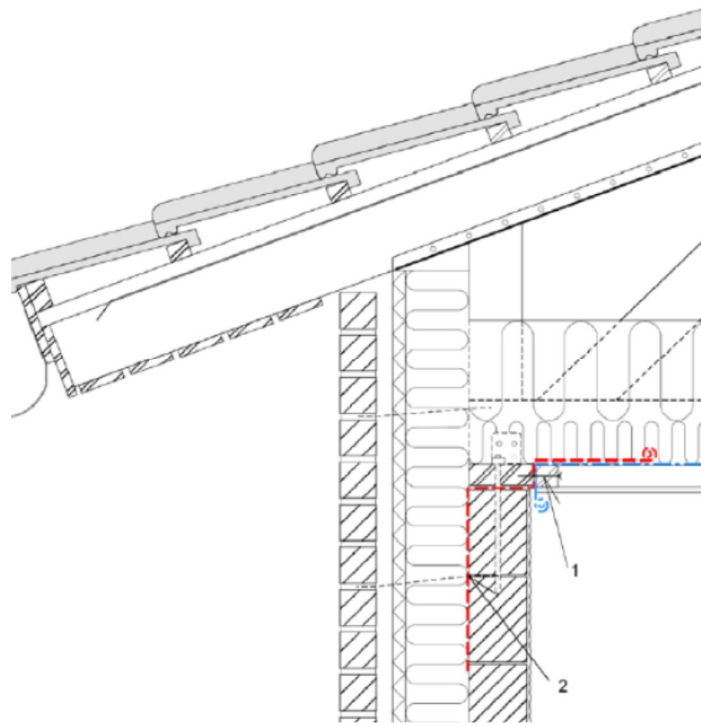
Rakentamismääräysten taulukkoarvo eristettyjen tiiliseinien välisen ulkonurkan lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,05 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

Sisäkulman lämpötekkinen kerroin oli $L_{2D} = 0,347 \text{ W/mK}$, ja edelleen kulman viivamainen lisäkonduktanssi:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = 0,347 \text{ W/mK} - (2 \times 1,335 \text{ m} \times 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}) = \underline{\underline{-0,107 \text{ W/(mK)}}}.$$

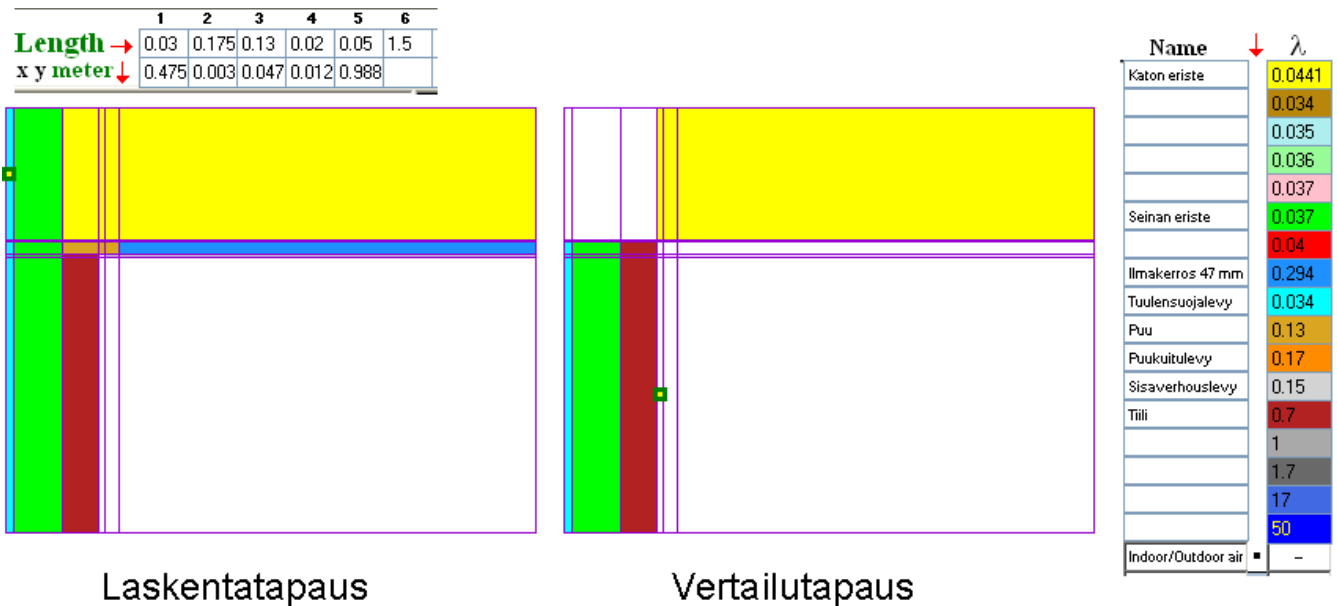
6.3.4 Tiiliseinän ja puuyläpohjan liitos

Kuvassa 66 on esimerkki tiiliranteisen ulkoseinän ja puuyläpohjan liitoksesta. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 31, jossa seinän lämmönläpäisykerroin on $U = 0,168 \text{ W/m}^2\text{K}$. Yläpohjarakenne on sama kuin puurakenteisen ulkoseinän yhteydessä taulukossa 15. Sen lämmönläpäisykerroin on $U = 0,088 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Kuva 66. Esimerkki tiilirakenteisen ulkoseinän ja puupohjan liitoksesta.

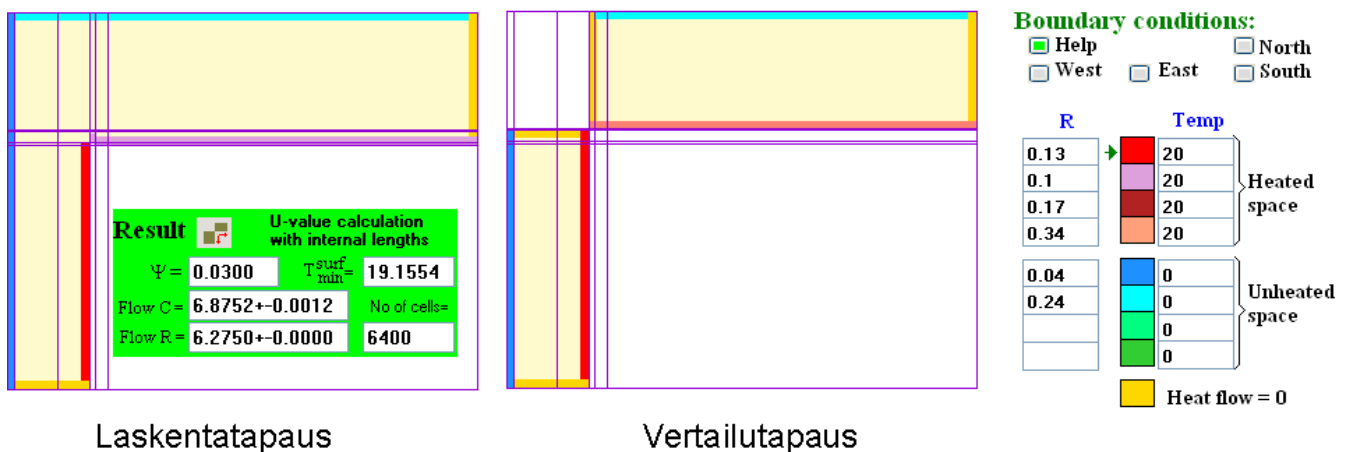
Kuvassa 67 on yksinkertaistettu geometria kylmäsilan laskentaa varten. Tiiliseinän korkeudeksi on valittu 1 m ja katon leveydeksi 1,57 m sisäseinästä lukien. Puun lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa $0,13 \text{ W/mK}$.



Kuva 67. Laskentamalli ja sen vertailutapaus tiiliseinän ja yläpohjan liitoksesta. Mitat vaaka- ja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta. Huomaa, että vertailutapauksen seinä ulottuu katon ilmaraon yläpinnan tasolle.

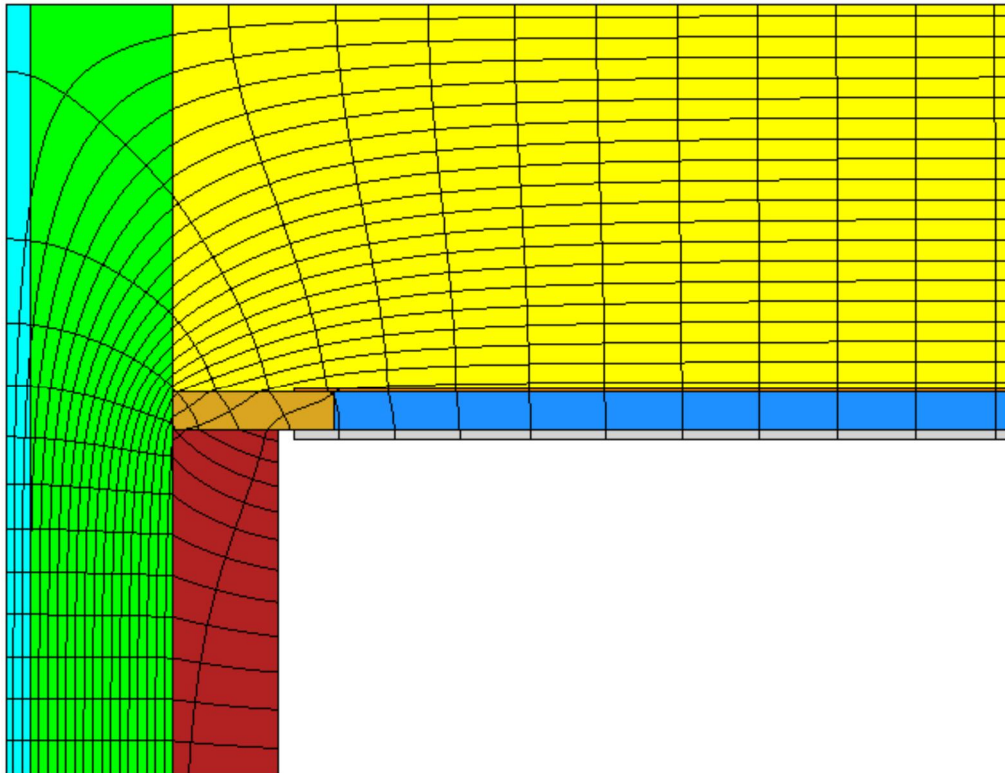
Kun mitat, lämmönjohtavuudet ja reunaehdot asetetaan kylmäsiltojen laskentaohjelmaan, siitä saadaan kuvan 68 mukainen tulostus. Tämä ohjelma laskee paitsi kylmäsiltojen lisäksi vertailutapauksen (ilman kylmäsiltaa) ja niiden avulla suoraan liitoksen lineaariseen lisäkonduktanssiin $\Psi = 0,0300 \text{ W/mK}$. Sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 68 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

$$\Psi = L_{2D} - \sum U_j \times l_j = 6,8752/20 \text{ W/mK} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,047 \text{ m} - 0,0881 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,57 \text{ m} = 0,3438 - 0,3138 = \underline{\underline{0,0300 \text{ W/mK}}}.$$



Kuva 68. Lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ sekä lämpövirrat laskenta- ja vertailutapauksissa (Flow C ja Flow R). Kuvasta näkyy myös käytetyt pintavastusten arvot (R). Vertailutapauksessa katon sisäpuolen pintavastukseen on lisätty ilmaraon ja sisustuslevyn vastukset.

Kuvassa 69 on tilanteen lämpötila- ja lämpövirtakenttä. Alin sisäpinnan lämpötila on 19,18 °C seinän ja katon liittymäkohdassa.

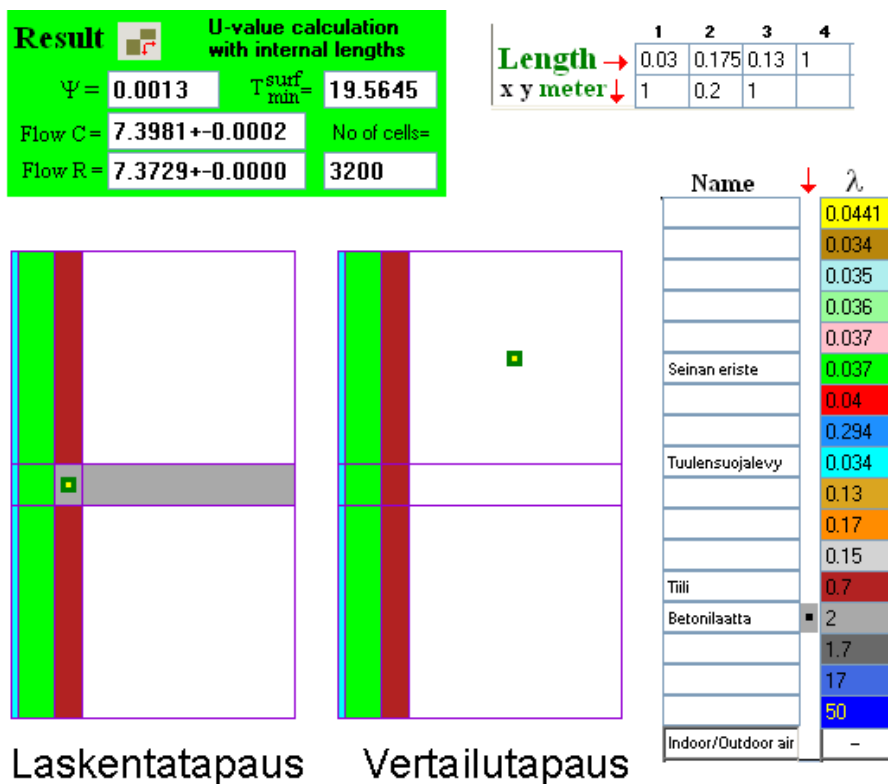


Kuva 69. Kuvan 67 tilanteen lämpötilojen tasa-arvokäyrät 1 asteen välein sekä niitä vastaan kohtisuorassa olevat lämpövirran virtaviivat. Kaikista virtaviivojen väleistä virtaa sama lämpövirta eli mitä tiheämmässä virtaviivat ovat sitä suurempi on lämpövirta. Ulkolämpötila on 0 °C ja sisälämpötila 20 °C.

Rakentamismääräysten taulukkoarvo tiilirakenteisen ulkoseinän ja puuyläpohjan liitokselle on 0,04 W/(mK) (taulukko 1).

6.3.5 Tiiliseinän ja betonivälipohjan liitos

Kuvassa 70 on esimerkki tiiliseinän ja betonivälipohjan liitoksen laskentamallista. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 31. Välipohjana on 200 mm betonilaatta.



Kuva 70. Laskentamalli ja sen vertailutapaus tiiliseinän ja betonivälipohjan liitoksesta. Seinän eriste-paksuus on 120 mm. Mitat vaaka- ja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

Reunaehdot ovat samat kuin betoniseinän tapauksessa luvussa 0. Kuvasta 70 näkyy suoraan liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi $\Psi = 0,0013 \text{ W/mK}$. Lähes sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 54 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

$$\Psi = L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 7,3981/20 \text{ W/mK} - 0,1676 \text{ W/m}^2\text{K} \times 2,2 \text{ m} \\ = 0,369905 - 0,36872 = \underline{\underline{0,0012 \text{ W/mK}}}.$$

Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi on siis hyvin pieni. Rakentamismääräysten taulukkoarvo tiiliseinän ja betonivälipohjan liitokselle on 0,00 W/(mK) (taulukko 1).

6.3.6 Tiiliseinän ja ikkunan liitos

Mikäli ikkuna liitetään tiiliseinän eristeen kohdalle apukarmin avulla ei liitoksen laskenta poikkea puurakenteisen seinän laskennasta. Myös lineaarisen lisäkonduktanssin arvot ovat lähellä samoja kuin kuvassa 55 puu- ja betoniseinälle.

6.4 Massiivinen kevytbetoniseinä

Massiivisen kevytbetoniseinän tapauksessa tarkasteltiin 500 mm paksua täyskiviseinää. Alapohjarakenteena oli joko paikalla valettu betonilaatta ($d = 100 \text{ mm} + 200 \text{ mm}$ lämmöneriste, kuva 73) tai

ryömintätilainen ratkaisu, jossa oli 60 mm betoninen pintalaatta, 150 mm lämmöneristekerros ja 250 mm kevytbetonilaatta (taulukko 37).

Taulukko 37. Massiivisen kevytbetoniseinän rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus (R_{si})			0,130
Kevytbetoniharkko	500	0,11	4,545
Pintavastus (R_{se})			0,040
Σ			4,715
$U_1 = 1/\Sigma R$			0,212 W/m ² K

6.4.1 Massiivinen kevytbetoniseinä ja maanvastainen alapohja

Kuvassa 71 on esitetty 500 mm kevytbetoniseinän liittyminen maanvastaiseen paikalla valettuun alapohjaan. Laatan reunassa kiersi 10 mm kaista solumuovia, joka otettiin mukaan yksinkertaistettuun laskentamalliin. Liittyvien rakenteiden: kevytbetoniseinän, maanvastaisen alapohjan ja sokkelin lämmönläpäisykertoimet sekä materiaalikerrosten lämmönvastukset on esitetty kuvassa 71. Taulukoissa 37 - 39 on esitetty liitoksen rakenneosien materiaalit, kerrospaksuudet ja laskennoissa käytetyt lämpöparametrit.

Taulukko 38. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
EPS eriste	50	0,036	1,389
Harkko	420	0,3	1,400
Σ			2,789
$U_{w2} = 1/\Sigma R$			0,359 W/m ² K

Taulukko 39. Alapohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus d (mm)	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Betonilaatta	100	2,0	0,05
EPS eriste	200	0,036	5,556
Σ			5,606
$U_2 = 1/\Sigma R$			0,178 W/m ² K

Laatan ja sokkelin sisäkuoren välissä oli $d = 10$ mm solumuovikaista ($R_{solu} = 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$). Lämpötekninen kytkentäkerroin kuvan 72 yksinkertaistetulle liitokselle oli $L_{2D} = 0,7602 \text{ W/(mK)}$.

Esimerkissä alapohja on hyvin lämpöeristetty, jolloin sen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavasta (9):

$$U = \frac{\lambda}{0,457 \times B' + d_t} + \frac{\Psi_{ge}}{B'} = \frac{2}{0,457 \times 8 + 12,13} - \frac{0,01733}{8} = 0,1245 \text{ W/m}^2\text{K}$$

missä

λ on pohjamaan lämmönjohtavuus = 2 W/mK
 B' alapohjalaatan karakteristinen mitta = 8 m
 d_t rakenteen ekvivalentti paksuus, m

$$d_t = w + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,5 + 2(0,17 + 5,606 + 0,04) = 12,13 \text{ m}$$

missä

$R_f = 5,606 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (laatta, lämmöneriste, taulukko 39)
 $R_{si} = 0,17 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (lattian sisäpinnan pintavastus, taulukko 5)
 $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (pohjamaan ulkopinnan pintavastus, taulukko 5)
 $w = 0,5 \text{ m}$ (seinärakenteen leveys, kuva 71).

Perusmuurin viivamainen lisäkonduktanssi Ψ_{ge} saadaan kaavalla

$$\Psi_{ge} = -\frac{\lambda}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2 D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 D_v}{d_t + d'_v} + 1 \right) \right] = -0,01733 \text{ W/mK}$$

missä $D_v = 0,6 \text{ m}$ (perusmuurin lämmöneristeen korkeus maanpinnan alapuolella) ja

$$d'_v = \lambda \left(R_{nv} - \frac{d_{nv}}{\lambda} \right) = 5,158 \text{ m}$$

missä

$R_{nv} = 2,789 \text{ W/m}^2\text{K}$ (perusmuurin lämmönvastus, taulukko 38)
 $d_{nv} = 0,47 \text{ m}$ (perusmuurin paksuus, eriste ja runkorakenne)

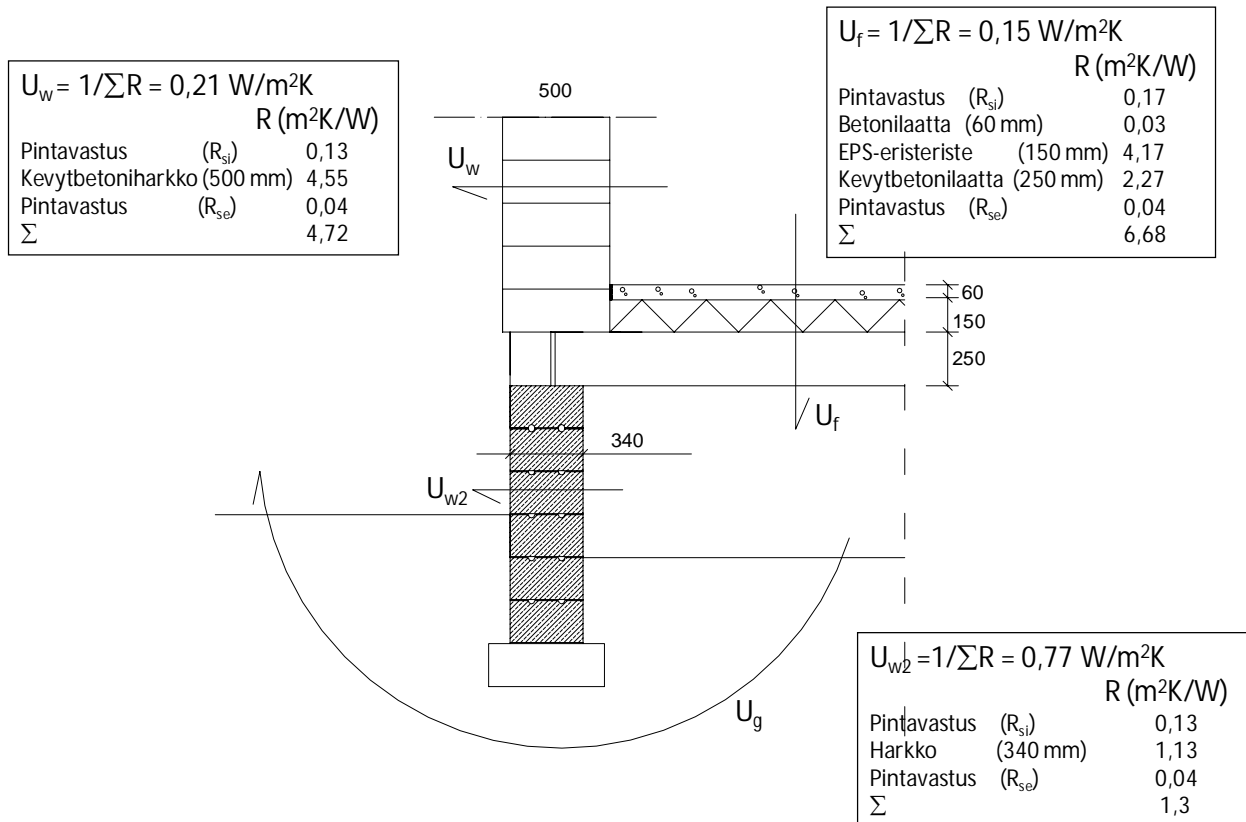
Tarkasteltavan liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ saadaan kaavasta (5):

$$\begin{aligned} \Psi &= L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = \\ &= 0,7602 \text{ W/mK} - 1,0 \text{ m} \times 0,2121 \text{ W/m}^2\text{K} - 0,5 \times 8,0 \text{ m} \times 0,1245 \text{ W/m}^2\text{K} = \\ &= 0,7602 - 0,7101 = \underline{\underline{0,050 \text{ W/mK}}}. \end{aligned}$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo massiivisen kevytbetoniseinän ja maanvastaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi_g = 0,09 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

6.4.2 Massiivinen kevytbetoniseinä ja ryömintätilainen alapohja

Kuvassa 73 on esitetty 500 mm paksun kevytbetoniseinän liittyminen ryömintätilaiseen alapohjaan. Laatan reunassa kiertää 10 mm kaistale solumuovia, joka otettiin mukaan liitoksen yksinkertaistettuun malliin. Liittyvien rakenteiden: kevytbetoniseinän, -alapohjan ja sokkelin lämmönläpäisykerroimet sekä materiaalikerrosten lämmönvastukset on esitetty kuvassa 73.



Kuva 73. Kevytbetonisen kiviseinän ja ryömintätilaisen alapohjan liittymä.

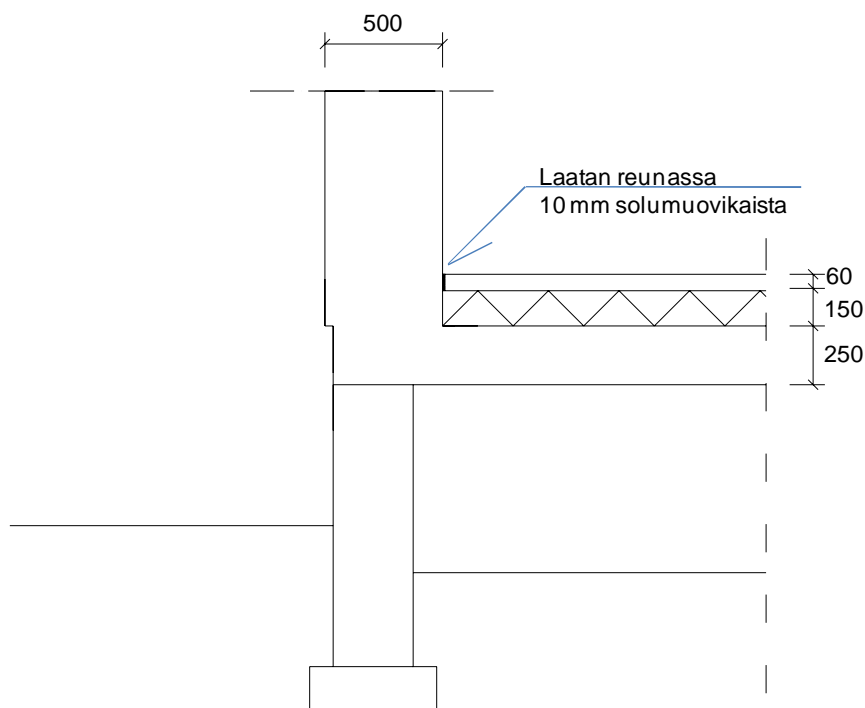
Detaljin yksinkertaistettu malli pintavastuksineen on esitetty kuvassa 74. Taulukossa 42 on esitetty kolmen laskentatapauksen tulokset ja niistä määritetyt termiset riippuvuuskerroimet.

Taulukko 40. Sokkelirakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus <i>d</i> (mm)	Lämmönjohtavuus <i>λ</i> (W/mK)	Lämmönvastus <i>R</i> (m²K)/W
Pintavastus (R _{si})	-	-	0,130
Harkko	340	0,3	1,133
Pintavastus (R _{se})	-	-	0,040
Σ			1,303
U _{w2} = 1/ΣR			0,767 W/m²K

Taulukko 41. Alapohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros	Kerrospaksuus <i>d</i> (mm)	Lämmönjohtavuus <i>λ</i> (W/mK)	Lämmönvastus <i>R</i> (m²K)/W
Pintavastus (R _{si})			0,170
Betonilaatta	60	2,0	0,030
EPS eriste	150	0,036	4,167
Kevytbetonilaatta	250	0,11	2,273
Pintavastus (R _{se})	-	-	0,040
Σ			6,680
U ₂ = 1/ΣR			0,150 W/m²K



Kuva 74. Kevytbetoniseinän, ryömintätilaisen alapohjan ja harkkosokkelin yksinkertaistettu laskentamalli.

Taulukko 42. Massiivisen kevytbetoniseinän ja ryömintätilaisen alapohjan liitoksen kolmen laskentatapauksen tulokset L_1 , L_2 ja L_3 .

Laskentatapaus	L_{ie} (W/mK)	L_{iu} (W/mK)	$L_{ue,c,sokkeli}$ (W/mK)	$L_{ue,c,pohjamaa}$ (W/mK)	$\sum L_{ue,c}$ (W/mK)	L_i (W/mK)
1 (L_1)	0,2554	0,6593	-	-	-	0,9147
2 (L_2)	0,2210	-	0,6496	0,9902	1,5298	1,8610
3 (L_3)	-	0,6303	0,5573	1,2224	1,7798	2,4101

Taulukon 42 tulosten (L_1 , L_2 ja L_3) perusteella saadaan rakenneosien johtumislämpöhäviökertoimet kaavoilla (15) ja (16):

$$L_{iu} = 0,5 \times (L_1 - L_2 + L_3) = 0,5 \times (0,9147 \text{ W/mK} - 1,8610 \text{ W/mK} + 2,4101 \text{ W/mK}) = 0,7319 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ie} = 0,5 \times (L_1 + L_2 - L_3) = 0,5 \times (0,9147 \text{ W/mK} + 1,8610 \text{ W/mK} - 2,4101 \text{ W/mK}) = 0,1829 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue,c} = 0,5 \times (L_2 + L_3 - L_1) = 0,5 \times (1,8610 \text{ W/mK} + 2,4101 \text{ W/mK} - 0,9147 \text{ W/mK}) = 1,6782 \text{ W/(mK)}$$

Ilmanvaihdon aiheuttama lisälämpöhäviö ($n = 0,5 \text{ 1/h}$):

$$\text{Ilmavirta } \dot{V} = n \times V / 3600 \text{ s} = 0,5(0,8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}) / 3600 \text{ s} = 0,000444 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_{ue,v} = \rho c_p \dot{V} / P = 1,23 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ J/(kgK)} \times 0,000444 \text{ m}^3/\text{s} / 1 \text{ m} = 0,5467 \text{ W/(mK)}$$

$$\text{ja } L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} = 1,6782 \text{ W/mK} + 0,5467 \text{ W/mK} = 2,2249 \text{ W/mK}.$$

Liitoksen lämpötekkinen kytkentäkerroin on nyt:

$$L_{2D} = \left(\frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right)$$

$$= (0,7391 \text{ W/mK} \times 2,2249 \text{ W/mK}) / (0,7391 \text{ W/mK} + 2,2249 \text{ W/mK}) + 0,1829 \text{ W/mK} \\ = 0,7336 \text{ W/mK}.$$

Alapohjan vertailulämpövirraksi saadaan kaavalla 17:

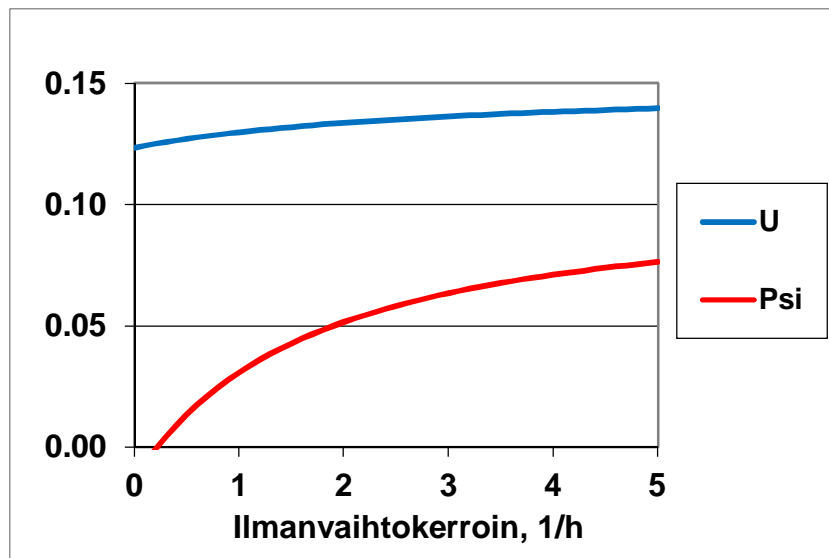
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + 2h_{w2}U_{w2} / B' + \dot{V}c_p \rho / A} = \frac{1}{0,150} + \frac{1}{0,51 + 2 \frac{1,0 \cdot 0,7675}{8} + \frac{0,5467}{4}}$$

josta $U = 0,1270 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi saadaan kaavalla (13):

$$\Psi_g = L_{2D} - h_w U_w - 0,5 \times B' U = 0,7336 \text{ W/mK} - (1 \text{ m} \times 0,2121 \text{ W/m}^2\text{K}) - (4 \text{ m} \times 0,1270 \text{ W/m}^2\text{K}) \\ = \underline{\underline{0,0127 \text{ W/(mK)}}}.$$

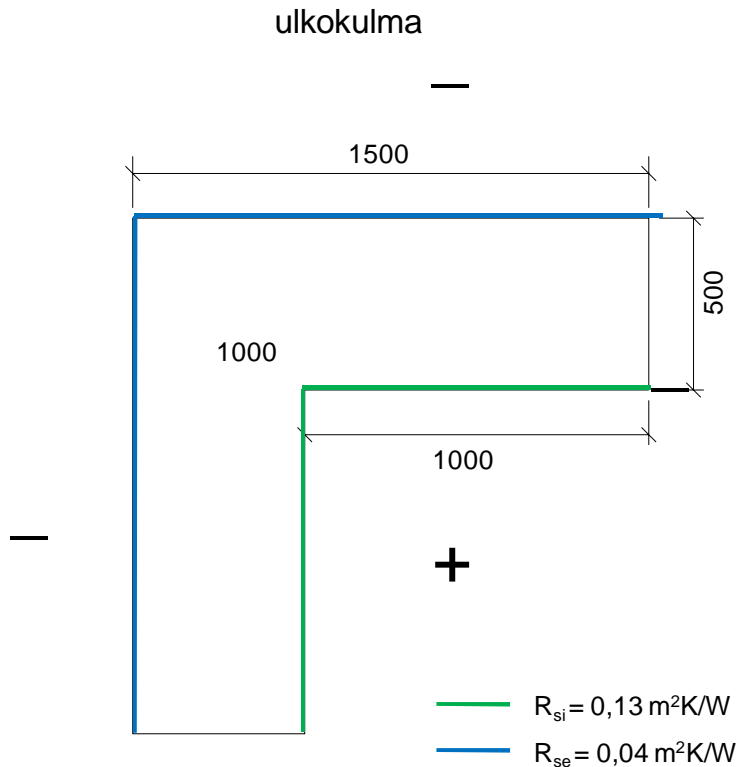
Kuvassa 75 on esitetty ryömintätilan ilmanvaihdon vaikutus lisäkonduktanssiin. Ilmanvaihdon lisääntyessä lisäkonduktanssin arvo lähestyy raja-arvoa 0,104 W/(mK). Rakentamismääräysten taulukkoarvo massiivisen kevytbetoniseinän ja ryömintätilaisen alapohjan välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,03 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).



Kuva 75. Ryömintätilan ilmanvaihtokertoimen (vaihtoa tunnissa) vaikutus alapohjan lämmönläpäisykertoimeen U ja liitoksen viivamaiseen lisäkonduktanssiin Ψ .

6.4.3 Kevytbetoniseinien väliset liitokset

Kuvassa 76 on esitetty kevytbetoniseinien välinen ulkonurkka. Massiivisen $d = 500$ mm paksun kevytbetoniseinän lämmönläpäisykerroin on $U_w = 0,212 \text{ W/m}^2\text{K}$ (taulukko 37).



Kuva 76. Massiivisen kevytbetoniseinän ($d = 500$ mm) ulkonurkka.

Ulkonurkan lämpötekkinen kytkentäkerroin oli $L_{2D} = 0,4694 \text{ W/mK}$ ja viivamainen lisäkonduktanssi:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j = 0,4694 \text{ W/mK} - (2 \times 1,0 \text{ m} \times 0,212 \text{ W/m}^2\text{K}) = \underline{\underline{0,0454 \text{ W/(mK)}}}.$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo massiivisten kevytbetoniseinien välisen liitoksen lisäkonduktanssille on $\Psi = 0,05 \text{ W/(mK)}$ (taulukko 1).

6.4.4 Kevytbetoniseinän ja puuyläpohjan liitos

Kuvassa 77 on esimerkki kevytbetoniseinän ja puuyläpohjan liitoksesta. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 37, jossa seinän lämmönläpäisykerroin on $U = 0,212 \text{ W/m}^2\text{K}$. Yläpohjan lämmönläpäisykerroin on 0,082 ja se muodostuu taulukon 43 mukaisesti.

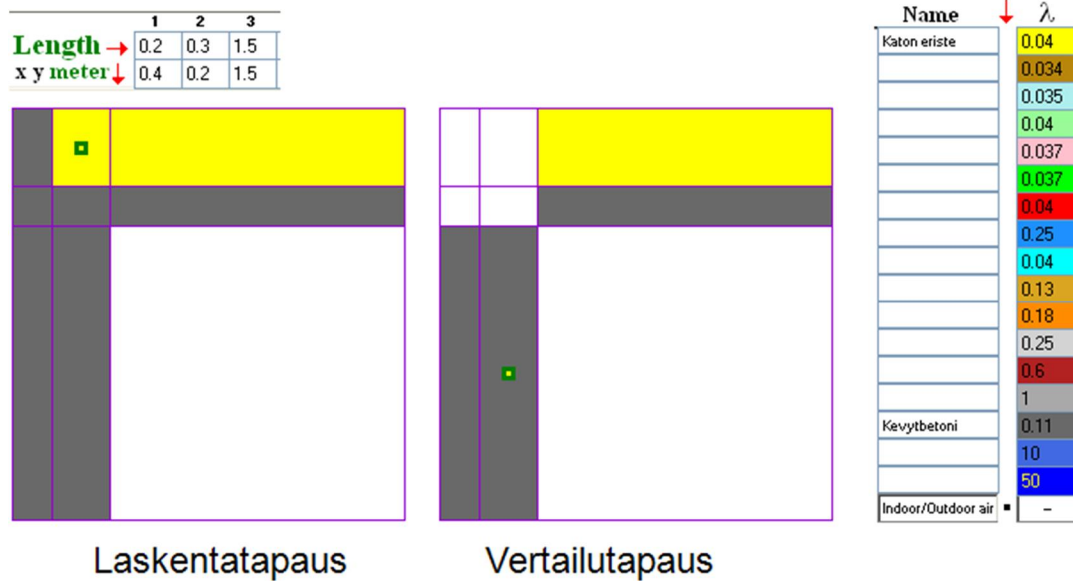


Kuva 77. Esimerkki massiivisesta kevytbetonirakenteesta. Lähde www.hplush.fi.

Taulukko 43. Yläpohjarakenteen rakennekerrokset ja lämpöparametrit.

Rakennekerros alhaalta ylös	Kerros- paksuus mm	Lämmön- johtavuus W/mK	Lämmönvastus R (m ² K)/W
Pintavastus R_{si}			0,10
Kevytbetoni	200	0,11	1,818
Yläpohjan eriste	400	0,0442	10,00
Katon ilmatilan lämmönvastus R_u (C4)			0,2
Pintavastus R_{se}			0,04
ΣR			12,158
$U = 1/\Sigma R$			0,08225 W/m ² K

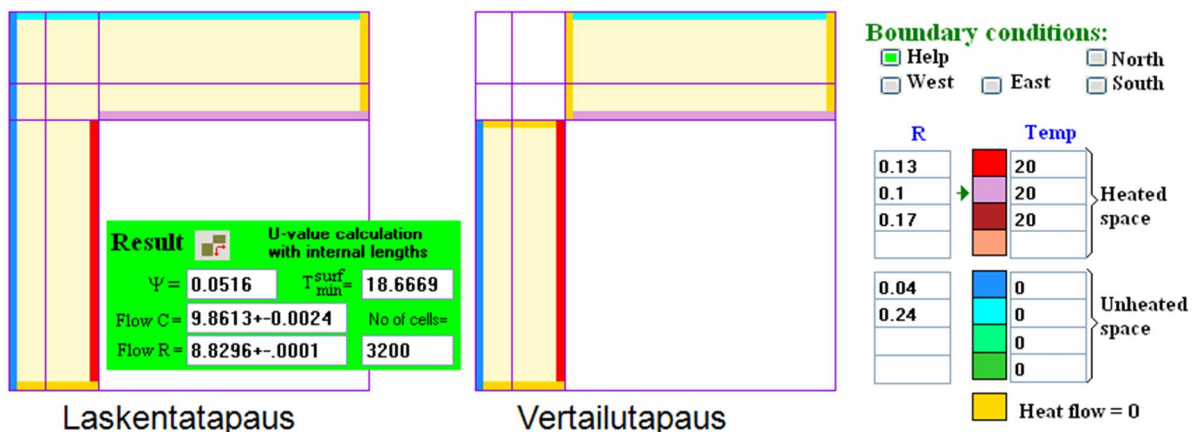
Kuvassa 78 on yksinkertaistettu geometria kylmäsilan laskentaa varten. Laskentaseinän korkeudeksi on valittu 1,5 m katon alapinnasta ja laskentakaton leveydeksi 1,5 m sisäseinästä lukien.



Kuva 78. Laskentamalli ja sen vertailutapaus kevytbetoniseinän ja yläpohjan liitoksesta. Mitat vaakaja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

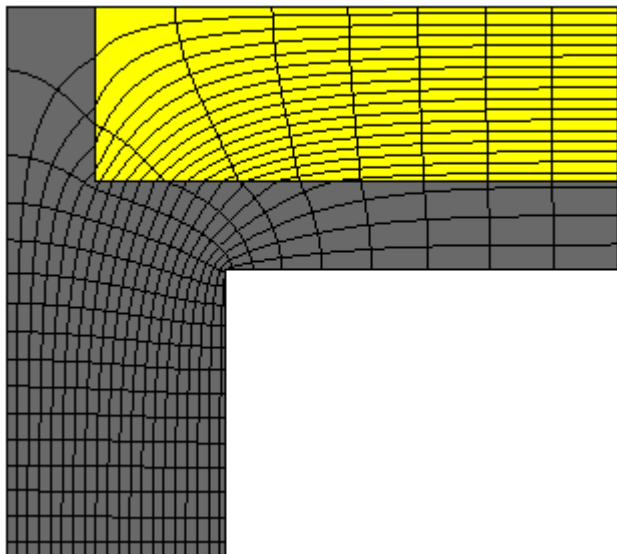
Kun mitat, lämmönjohtavuudet ja reunaehdot asetetaan kylmäsiltojen laskentaohjelmaan, siitä saadaan kuvan 79 mukainen tulostus. Tämä ohjelma laskee paitsi kylmäsiltojen lisäksi vertailutapauksen (ilman kylmäsiltaa) ja niiden avulla suoraan liitoksen lineaariseen lisäkonduktanssiin $\Psi = 0,0516 \text{ W/mK}$. Sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 79 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

$$\Psi = L_{2D} - \sum U_j \times l_j = 9,8613/20 \text{ W/mK} - 0,21207 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,5 \text{ m} - 0,08225 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,5 \text{ m} = 0,49306 - 0,44148 = \underline{\underline{0,0516 \text{ W/mK}}}.$$



Kuva 79. Lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ sekä lämpövirrat laskenta- ja vertailutapauksissa (Flow C ja Flow R). Kuvasta näkyy myös käytetyt pintavastusten arvot (R).

Kuvassa 80 on tilanteen lämpötila- ja lämpövirtakenttä. Alin sisäpinnan lämpötila on 18,51 °C seinän ja katon liittymäkohdassa.



Kuva 80. Kuvan 27 tilanteen lämpötilojen tasa-arvokäyrät 1 asteen välein sekä niitä vastaan kohtisuorassa olevat lämpövirran virtaviivat. Kaikista virtaviivojen väleistä virtaa sama lämpövirta eli mitä tiheämmässä virtaviivat ovat sitä suurempi on lämpövirta. Ulkolämpötila on 0 °C ja sisälämpötila 20 °C.

Taulukosta 44 ilmenee, että yläpohjan eristekerroksen paksuntaminen suurentaa jonkin verran lisäkonduktanssia. Lisäkonduktanssi suurenee myös jos yläpohjan kevytbetoni laatta tulee paksummaksi tai ulkoseinä tulee paksummaksi.

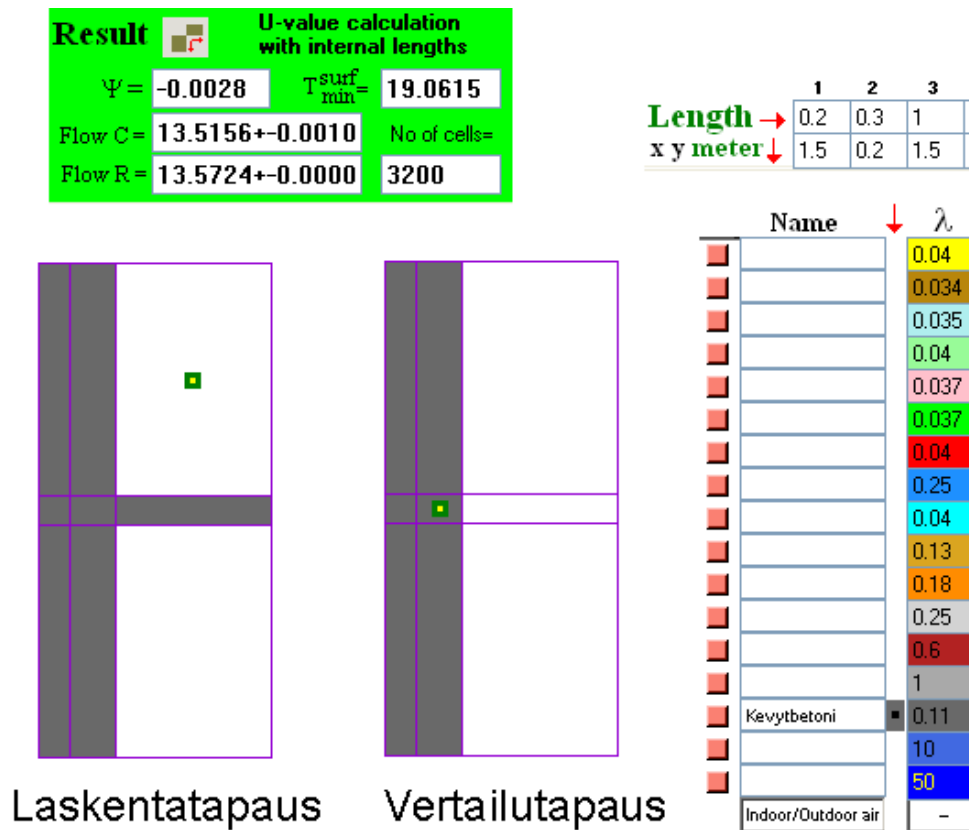
Taulukko 44. Seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssi eri laskentatilanteissa.

Tilanne		Lisäkonduktanssi Ψ , W/mK
1	Kuvan 78 tilanne	0,0516
2	Yläpohjan eriste 500 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0527
3	Yläpohjan eriste 600 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0540
4	Yläpohjan kevytbetoni 150 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0469
5	Yläpohjan kevytbetoni 300 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0593
6	Seinän paksuus 600 mm, muuten kuten tilanne 1	0,0501

Rakentamismääräysten taulukkoarvo kevytbetonirakenteisen ulkoseinän ja kevytbetoniyläpohjan liitokselle on 0,06 W/(mK) (taulukko 1).

6.4.5 Kevytbetoniseinän ja välipohjan liitos

Kuvassa 81 on esimerkki kevytbetonivälipohjan liitoksen laskentamallista. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 37. Välipohjana on 200 mm kevytbetoni laatta.



Kuva 81. Laskentamalli ja sen vertailutapaus massiivisen kevytbetoniseinän ja välipohjan liitoksesta. Seinän eristepaksuus on 120 mm. Mitat vaaka- ja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

Reunaehdot ovat samat kuin betoniseinän tapauksessa luvussa 0. Kuvasta 81 näkyy suoraan liitoksen lineaariseen lisäkonduktanssi $\Psi = -0,0028 \text{ W/mK}$. Lisäkonduktanssi on negatiivinen koska heikosti lämpöä johtava välipohja toimii paremminkin eristeenä kuin kylmäsilta. Sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 81 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

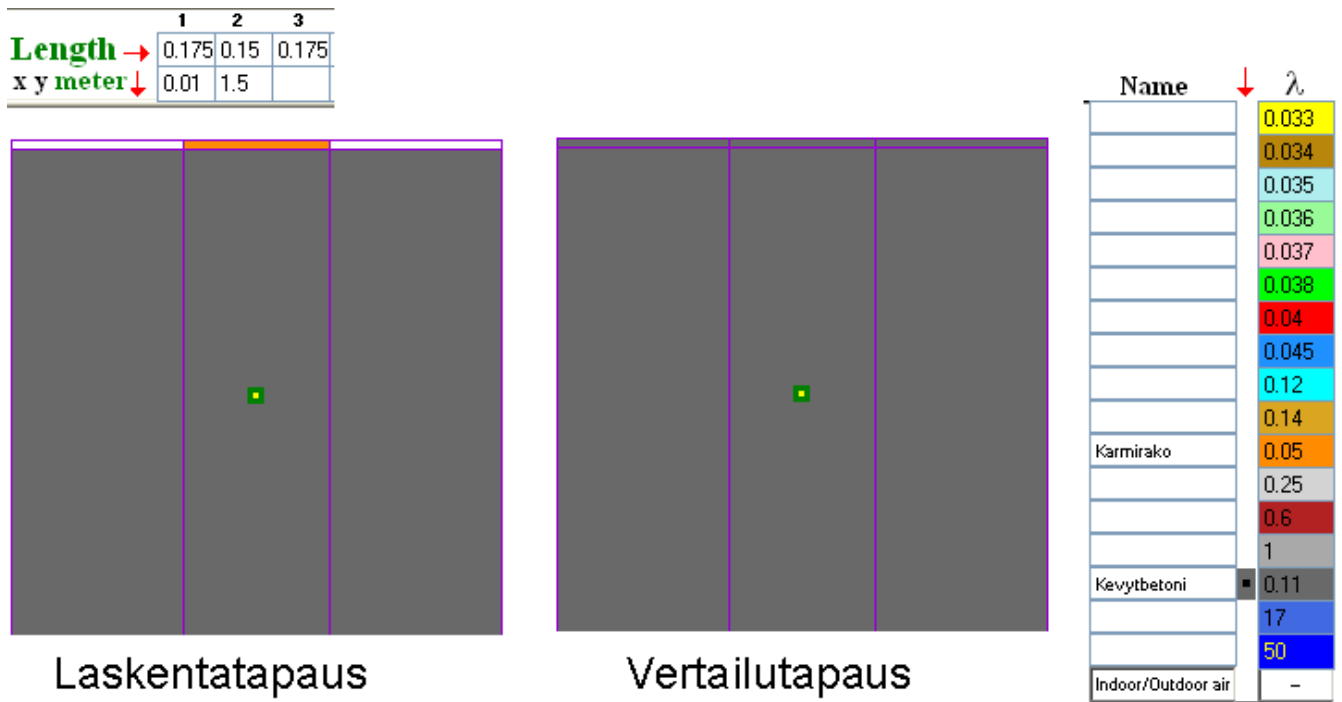
$$\Psi = L_{2D} - U_1 \times l_1 - U_2 \times l_2 = 13,5156/20 \text{ W/mK} - 0,21207 \text{ W/m}^2\text{K} \times 3,2 \text{ m}$$

$$= 0,67578 - 0,678624 = \underline{\underline{-0,0028 \text{ W/mK}}}.$$

Rakentamismääräysten taulukkoarvo kevytbetonirakenteisen ulkoseinän ja välipohjan liitokselle on 0,00 W/(mK) (taulukko 1).

6.4.6 Ikkunan ja kevytbetoniseinän liitos

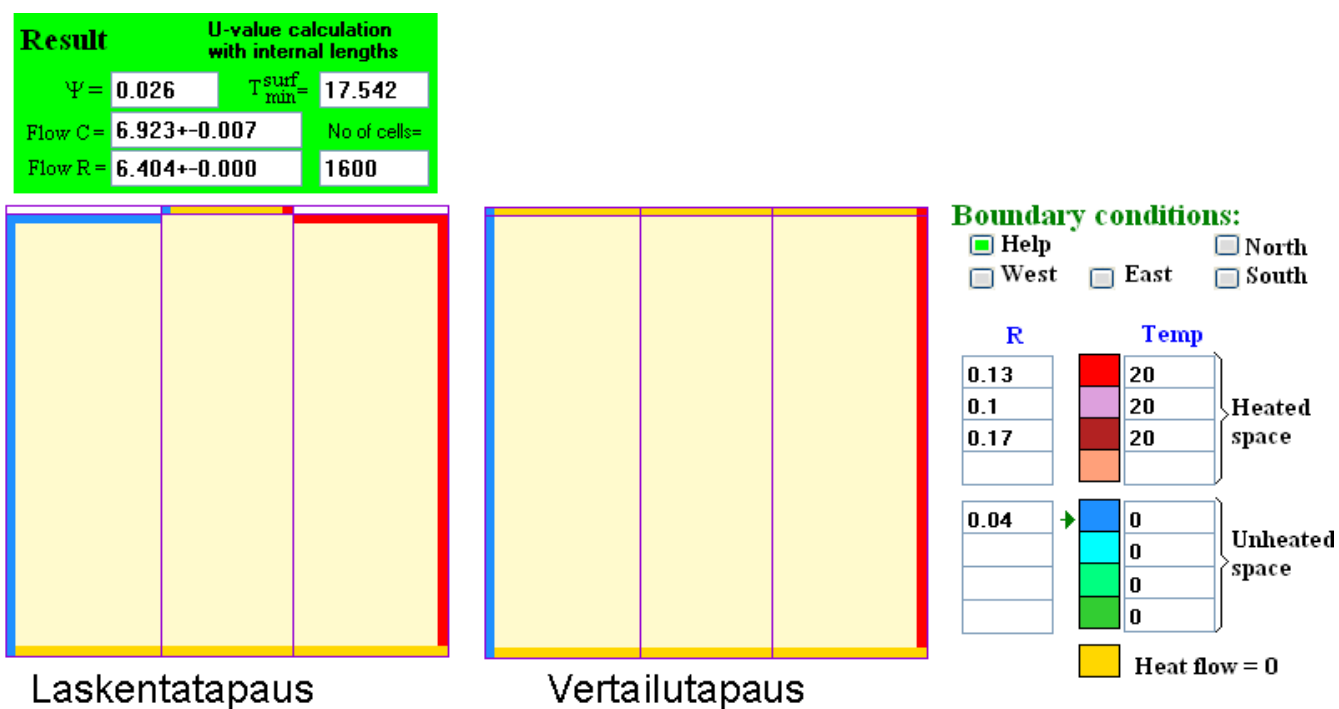
Kuvassa 82 on esimerkki ikkunan liitoksesta massiiviseen kevytbetoniseinään. Seinärakenne on sama kuin edellä taulukossa 37, jossa seinän lämmönläpäisykerroin on $U = 0,212 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ikkuna sijaitsee seinän keskellä ja sen laskennallinen karmisvyvyys on 150 mm.



Kuva 82. Laskentamalli ja sen vertailutapaus ikkunan liitoksesta massiiviseen kevytbetoniseinään. Mitat vaaka- ja pystysuuntaan sekä materiaalien lämmönjohtavuudet käyvät ilmi kuvasta.

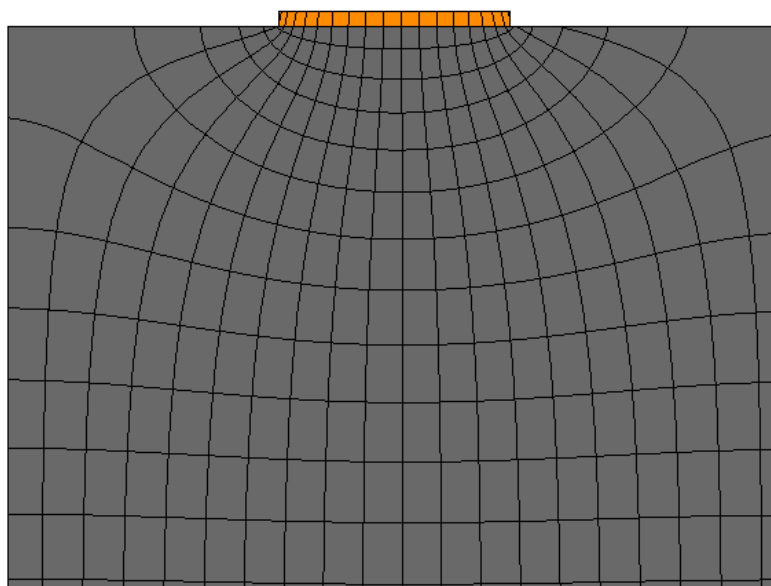
Reunaehdot ja laskentatulokset käyvät ilmi kuvasta 83. Liitoksen lineaarinen lisäkonduktanssi $\Psi = 0,026 \text{ W/mK}$ saadaan suoraan kuvasta. Sama tulos saadaan myös kaavasta (4), kun käytetään kuvasta 79 saatavaa lämpövirtaa ja otetaan huomioon, että se vastaa 20 asteen lämpötilaeroa:

$$\Psi = L_{2D} - \sum U_j \times l_j = 6,923/20 \text{ W/mK} - 0,21207 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,51 \text{ m} = 0,34615 - 0,3202 = \underline{\underline{0,026 \text{ W/mK}}}.$$



Kuva 83. Lineaarinen lisäkonduktanssi Ψ sekä lämpövirrat laskenta- ja vertailutapauksissa (Flow C ja Flow R). Kuvasta näkyy myös käytetyt pintavastusten arvot (R).

Kuvassa on tilanteen lämpötila- ja lämpövirtakenttä.



Kuva 84. Kuvan 82 tilanteen lämpötilojen tasa-arvokäyrät 1 asteen välein sekä niitä vastaan kohtisuorassa olevat lämpövirran virtaviivat. Ulkolämpötila on 0°C ja sisälämpötila 20°C .

Taulukosta 45 ilmenee, että karmisyvyyden pienentäminen ja ikkunan epäkeskinen sijainti kasvattavat lisäkonduktanssia.

Taulukko 45. Ikkunan ja massiivisen kevytbetoniseinän liitoksen lisäkonduktanssi eri tapauksissa.

Tilanne		Lisäkonduktanssi Ψ , W/mK
1	Kuvan 82 tilanne	0,026
2	Karmin laskennallinen syvyys 100 mm, muuten kuten tilanne 1	0,039
3	Karmi sisäpinnan tasossa, muuten kuten tilanne 1	0,051
4	Karmi ulkopinnan tasossa, muuten kuten tilanne 1	0,050

Rakentamismääräysten taulukkoarvo kevytbetonirakenteisen ulkoseinän ja ikkunan liitokselle on 0,04 W/(mK) (taulukko 1), mikäli karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

Kirjallisuutta

Erhorn, H, Erhorn-Kluttig, H. et al. 2010. An effective Handling of Thermal Bridges in the EPBD Context. Final Report of the IEE ASIEPI Work on Thermal Bridges. 2010. <http://www.buildup.eu/publications/7728>.

Gustavsen, A.; Thue, J.V. et al. 2008. Kuldebroer – Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk". Prosjektrapport nr. 25. Oslo, SINTEF Buildings & Infrastructure, ISBN 978-82-536-1037-5.

SFS-EN ISO 14683 (2008). Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values

SFS-EN ISO 10211 (2008). Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations

SFS-EN ISO 13370 (2008). Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods

SFS-EN ISO 6946 (2008). Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method

SFS-EN ISO 10456 (2007). Building materials and products - Hygrothermal properties -Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values

SFS-EN ISO 10077-2 (2007). Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames

D3 Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012

C4 Lämmöneristys. Ohjeet 2012

D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012