
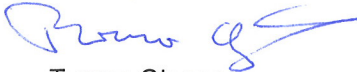



Betonielementtirakenteisen rakennuksen vaipan kylmäsilta tarkastelut

Kirjoittaja: Jorma Heikkinen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Betonielementtirakenteisen rakennuksen vaipan kylmäsilta tarkastelut	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot RAKENNUSTUOTETEOLLISUUS RTT RY Betoniteollisuus ry, Arto Suikka, PL 381, 00131 Helsinki	Asiakkaan viite Tilaus 17.8.2011/as
Projektin nimi Betonielementtien kylmäsilat	Projektin numero/lyhytnimi VTT-V-76657-11/BETKY
Raportin laatija(t) Jorma Heikkinen	Sivujen lukumäärä 33
Avainsanat Rakennukset, betoni, lämmöneristys, kylmäsilta	Raportin numero VTT-R-07901-11
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa on laskettu betonisandwich-elementtirakenteiden kylmäsiltoja Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden C4 ja D5 määrittelemällä tavalla käyttäen ympäristöministeriön opasta sekä asiaankuuluvia standardeja.</p> <p>Pistoansalle, diagonaaliensalle sekä sisäkuoresta ulkokuoreen menevälle nostolenkille voidaan käyttää rakentamismääräyskokoelman osan C4 laskentakaavaa lämmönläpäisykertoimen lisäykselle. Tässä tutkimuksessa on laskettu kaavassa tarvittava kerroin valituille rakenteille.</p> <p>Rakennusosien välisten liitosten viivamaiset lisäkonduktanssit ovat joko samoja tai pienempiä kuin rakentamismääräyskokoelman osassa D5 taulukoidut ohjearvot. Nämä lukuarvot koskevat tutkittua rakennetta perusmuodossaan. Raportissa on esitetty tuloksia myös muunnetuille rakenteille, joissa on esimerkiksi perusrakenteesta poikkeava lämmöneristys tai ikkunatyypit.</p> <p>Esimerkkirakennuksessa rakennusosien välisten liitosten lisäkonduktanssi oli 14 prosenttia itse rakennusosien johtumislämpöhäviöistä. Alapohjaliitoksella ja ikkunoiden liitoksilla oli suurin vaikutus kokonaislämpöhäviöön.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 7.11.2011	
 Jorma Heikkinen Erikoistutkija	 Tuomo Ojanen Erikoistutkija
	 Jari Shemeikka Tiimipäällikkö
VTT:n yhteystiedot Jorma Heikkinen, VTT, PL 1000 02044 VTT, puh. 020 722 4742, jorma.heikkinen@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Asiakas, alkuperäinen VTT, alkuperäinen	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	3
2	Betonielementtiseinä ja sen lämmönläpäisykerroin.....	3
3	Laskentamenetelmä.....	4
4	Materiaalien lämmönjohtavuudet ja pintavastukset.....	5
5	Pistoansas.....	6
6	Diagonaaliansas.....	9
7	Nostolenkki.....	11
8	Ulkonurkka.....	15
9	Sisänurkka.....	18
10	Seinän ja yläpohjan liittymä.....	21
11	Ryömintätilaisen alapohjan ja sokkelin liitos.....	25
12	Ikkunan karmikenkäliitos.....	29
13	Rakennusosaliitosten kylmäsiltojen merkitys.....	32
	Yhteenveto.....	33

1 Johdanto

Rakennuksen lämpöhäviöiden pienetessä kylmäsiltojen merkitys johtumislämpöhäviöissä kasvaa mikäli suunnittelussa ei kiinnitetä riittävästi huomiota kylmäsiltoja aiheuttaviin rakennedetaljeihin. Rakentamismääräyksissä on tähän asti on otettu huomioon vain rakennusosassa olevat säännölliset kylmäsilat, jotka sisältyvät rakennusosan lämmönläpäisykertoimeen (U -arvoon, W/m^2K). Säännöllisiä kylmäsiltoja ovat muun muassa ansaat, siteet, kannakset sekä tuki- ja runkorakenteet, jotka ovat rakenteelle tyypillisiä koko sen edustamalla vaipan alueella. Näiden määrittämistä käsitellään rakentamismääräysten osassa C4 [1].

Vuonna 2012 voimaan tulevissa rakentamismääräyksissä (RakMK D5, [2]) on otettu uutena mukaan rakennusosien välisten liitosten kylmäsilat, jotka ottavat huomioon rakennusosien toisiinsa liittämisen aiheuttuvan lämpöhäviön. Sen laskemiseen tarvitaan liitoksen pituus ja kyseisen rakenneliitoksen viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (psi, W/mK). Rakentamismääräyksissä on annettu viivamaisten lisäkonduktanssien ohjeelliset taulukkoarvot, joita voidaan käyttää kun tarkempia suunnittelu-arvoja ei ole käytettävissä.

Tässä tutkimuksessa laskettiin tilaajan valitsemille betonielementtirakenteille U -arvoihin vaikuttavia säännöllisiä kylmäsiltoja ja rakennusosien välisiä viivamaisia kylmäsiltoja.

Rakentamismääräyskokoelman osista C4 ja D5 [1,2] sekä kylmäsiltojen laskentaohjeesta [5] on tätä kirjoitettaessa saatavissa vain luonnosversiot, joihin tämä tutkimus perustuu. Muutokset lopullisissa versioissa voivat muuttaa esitettyjä tuloksia.

2 Betonielementtiseinä ja sen lämmönläpäisykerroin

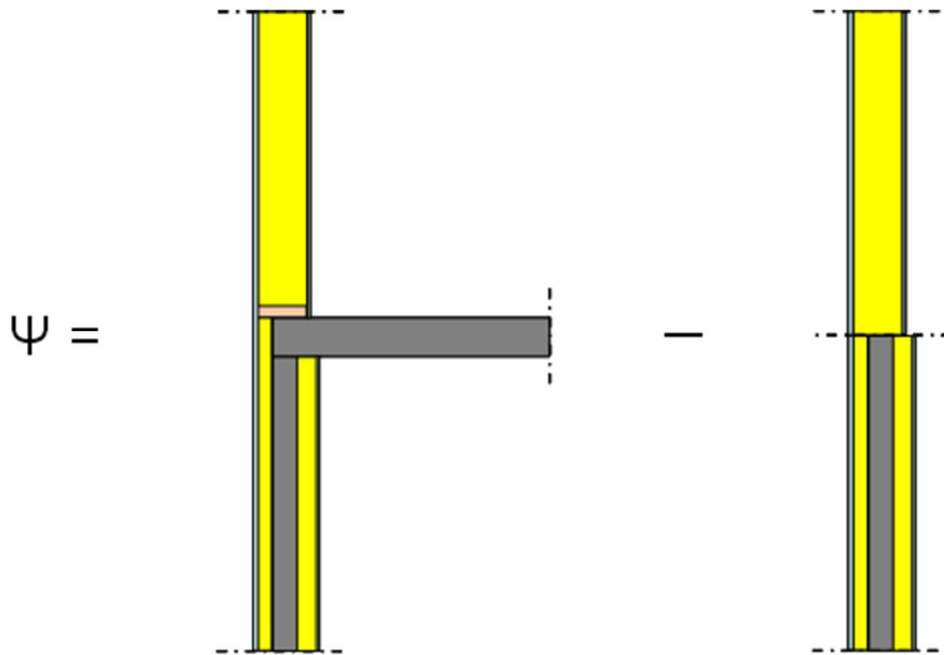
Tutkimus koskee pääosin betonisandwich-seinä-rakennetta, jossa eristeenä on 240 mm kerros mineraalivillaa. Sisäkuoren paksuus on 80 mm ja ulkokuoren 70 mm. Muunlaista rakennetta käytettäessä siitä on erikseen mainittu. Rakenteen lämmönläpäisykerroin ilman lisäyksiä on taulukon 1 mukaan $0,1447 W/m^2K$. Tässä käytetään lämmönläpäisykertoimelle neljää desimaalia, koska lämmönläpäisykertoimen pyöristys tehdään vasta ansaiden aiheuttamien lisäysten tai muiden rakentamismääräyksissä mainittujen lisäysten jälkeen.

Taulukko 1. Seinän lämmönläpäisykerroin ilman lisäyksiä sekä eri kerrosten lämpövastukset ja lämmönjohtavuudet.

Kerros	Paksuus mm	λ_U W/mK	R m^2K/W
Ulkopuolen pintavastus			0,04
Ulkokuori betonia	70	2	0,035
Mineraalivilla	240	0,036	6,667
Sisäkuori betonia	80	2	0,040
Sisäpuolen pintavastus			0,13
Kokonaislämpövastus R (Km^2/W)			6,912
Lämmönläpäisykerroin $U = 1/R$ (W/m^2K)			0,1447

3 Laskentamenetelmä

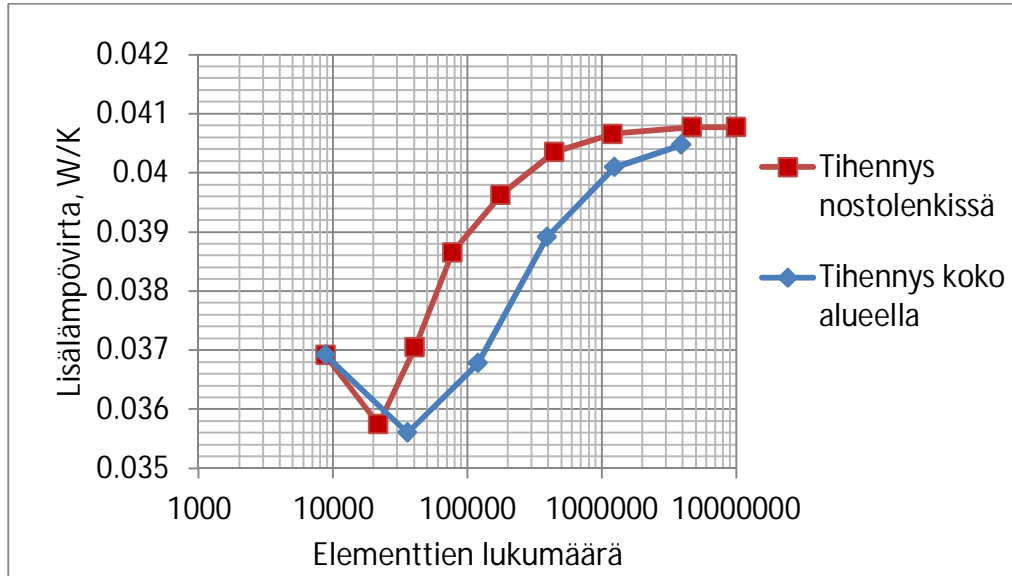
Kylmäsiltojen laskentamenettely perustuu standardeihin ([3], [4]), rakentamismääräysten osaan C4 [1] sekä ympäristöministeriön laskentaohjeeseen [5]. Periaatteena on laskea sama rakenne mahdollisimman tarkasti numeerisella menetelmällä sekä myös rakennusosien lämmönläpäisykertoimia käyttäen. Kylmäsilan numeroarvo saadaan näiden kahden laskentatapauksen erotuksena. Tätä on havainnollistettu kuvassa 1, jossa on seinän ja välipohjan liitos.



Kuva 1. Liitoksen lisäkonduktanssi Ψ on todellisen rakenteen (vasemmalla) lämpövirran ja vertailurakenteen (oikealla) lämpövirran erotus. Pistekatkoviivojen kohdalla oletetaan lämpövirta laskennassa nollassi. Vertailutilanteen mitat ja U -arvot määritellään rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisesti. Lähde [5].

Kylmäsiltojen numeeriseen laskentaan käytettiin Comsol Multiphysics 3.5a -laskentaohjelmaa, joka perustuu elementtimenetelmään. Laskentaelementtien määrän minimoimiseksi pyrittiin kuhunkin kylmäsiltaan liittyvä laskenta-alue rajaamaan mahdollisimman pieneksi mutta kuitenkin pitämään huolta siitä, että laskentatilanne säilyy käytäntöä vastaavana. Esimerkiksi symmetriset ansaslangat on halkaistu keskeltä ja asetettu symmetriatasolle reunaehdoksi nolalämpövirta.

Laskentaelementtien määrän ja siten laskentaverkon tiheyden vaikutuksesta on esimerkki kuvassa 2. Laskentatulokset vakiintuu tässä tapauksessa vasta kun laskentaelementtejä on viisi miljoonaa tai enemmän mikä vaatii runsaasti tietokoneen muistia ja laskenta-aikaa.



Kuva 2. Laskentatuloksen riippuvuus laskentaelementtien lukumäärästä nostolenkkitapauksessa kahdella eri laskentaverkon tihennystavalla. Tulos vakiintuu noin 5 miljoonan laskentaelementin kohdalla.

4 Materiaalien lämmönjohtavuudet ja pintavastukset

Käytettävien lämmöneristeiden lämmönjohtavuudet on valittu yhdessä tilaajan kanssa. Muiden materiaalien lämmönjohtavuuksina on käytetty rakentamismääräyskokoelman osan C4 taulukkoarvoja. Yleisimmät lämmönjohtavuudet ovat taulukossa 2.

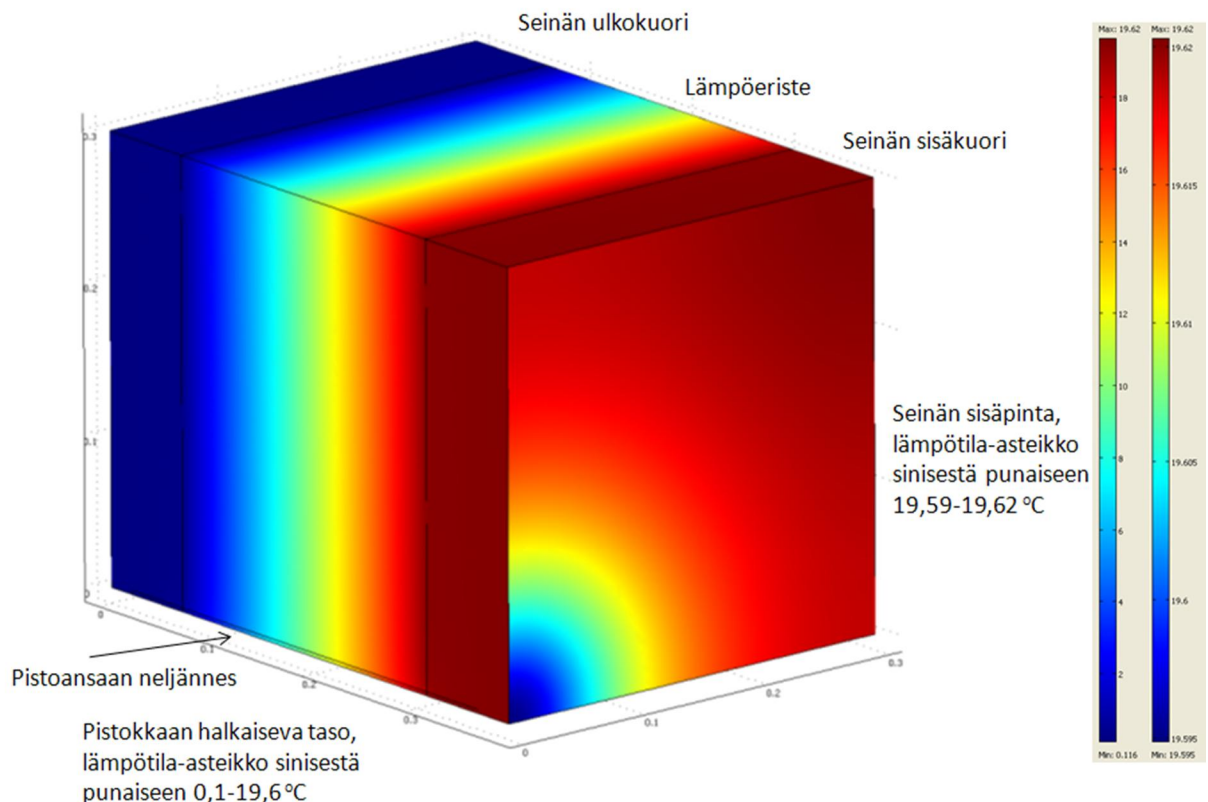
Taulukko 2. Käytetyt materiaalien lämmönjohtavuudet.

Materiaali	Lämmönjohtavuus W/mK
Betoni	2
Maa	2
Teräs	50
Ruostumaton teräs	17
Mineraalivilla	0,036
EPS (eri laatuja ja käyttö-olosuhteita)	0,036-0,041
10 mm ilmarako	0,067
15 mm ilmarako	0,088
Eristesauman vaahdotus tai saumanauha	0,05

Pintavastuksina käytettiin RakMK C4:n mukaisia arvoja. Ulkopuolella pintavastus on $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, seinien ja ikkunan sisäpinnalla $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, lattiasa $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja katossa $0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$. Ryömintätilan katossa ja lattiasa käytettiin pintavastuksen arvoa $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja seinässä arvoa $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Sisälämpötila oli $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkolämpötila $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

5 Pistoansas

Pistoansas on lämpötekniässä mielessä betonisandwich-seinän sisä- ja ulkokuoria yhdistävä suora lanka. Langan halkaisija oli laskelmissa 5 mm ja materiaali ruostumatonta terästä. Laskennassa ansas ulottui 50 mm sekä sisä- että ulkokuoren sisään. Tällöin lämpökontakti betoniin on niin hyvä, että tuloksia voidaan käyttää erilaisille päistään taivutetuille pistoansaille. Laskentaan otettiin symmetrian vuoksi vain neljännes ansaan poikkileikkauksesta ja samoin neljännes sitä ympäröivästä seinästä. Kuvasta 3 näkyy miten ansas alentaa sisäseinän pintalämpötilaa ja siten lisää lämpövirtaa huoneesta seinään 0,6 metrin ruutujaolla.

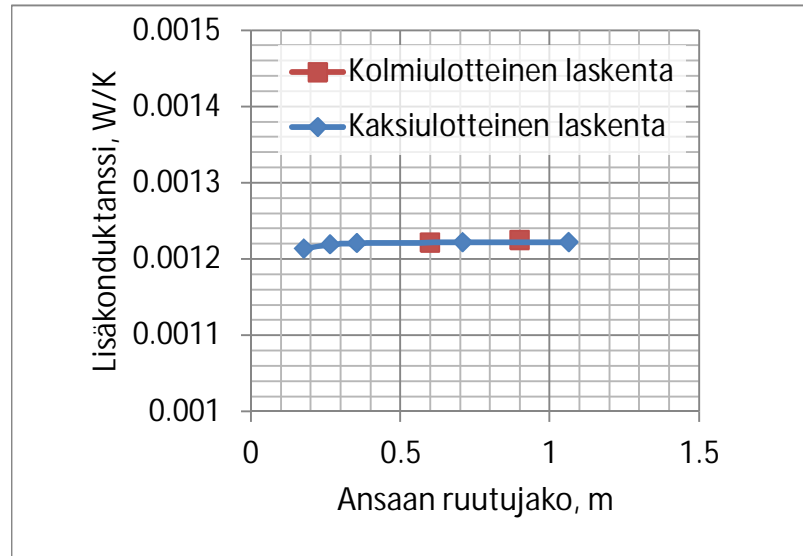


Kuva 3. Lämpötilat huoneen puoleisessa seinäpinnassa ja pistoansaan halkaisivissa tasoissa 0,6 m ansasjaolla. Laskentaan on otettu symmetrian takia vain neljännes 0,6 x 0,6 m seinäalueesta ja neljännes ansaasta. Huomaa, että eri tasoissa on eri lämpötila-asteikot. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0 °C ja 20 °C.

Huoneen puoleisen seinän pintalämpötila on kylmimmässä kohdassa 0,03 astetta alempi kuin se olisi ilman ansasta. Vastaava lisäys seinän lämpövirtaan on 0,00122 W ansasta ja lämpötilaeron astetta kohti. Toisin sanoen rakentamismääräyskokoelman C4 mukainen pistemäinen lisäkonduktanssi ansalle on $X = 0,00122 \text{ W/K}$.

Vastaava kolmiulotteinen laskenta 0,9 m ruutujaolla antoi kolmen numeron tarkkuudella saman tuloksen $X = 0,00122 \text{ W/K}$ kuin 0,6 m jaolla. Sama tulos saatiin myös kaksiulotteisilla laskelmilla, jotka kattoivat laajemman ansaiden etäisyysalueen (kuva 4). Kuvan 4 mukaan ansaat alkavat vaikuttaa toisiinsa vasta kun ruutujako on pienempi kuin 0,2 m, joten käytännössä kaikille ruutujaolle voidaan

käyttää samaa lisäkonduktanssin arvoa. Häiriötön etäisyys on suurempi, jos ansaslanka on paksumpi kuin 5 mm tai sen lämmönjohtavuus on suurempi kuin ruostumattomalla teräksellä.



Kuva 4. Pistoansaan ruutujaon vaikutus ansaan lisäkonduktanssiin. Koskee ruostumatonta 5 mm ansaslankaa. Kaksiulotteinen laskenta on tehty akselisymmetrisessä koordinaatistossa.

Vastaava seinän lämmönläpäisykertoimen lisäys ansaan johdosta saadaan rakentamismääräyskokoelman C4 kaavasta

$$\Delta U_f = X n_f \quad (1)$$

missä n_f on ansaiden lukumäärä neliometriä kohti (0,6 m ruutujaolla 1/0,36 m²). Taulukkoon 3 on laskettu kaavasta 1 ansaiden aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys ΔU_f eri ruutujaoilla. Taulukkoon on lisäksi laskettu taulukon 1 mukaiselle seinälle lämmönläpäisykertoimet ottamalla huomioon ansaiden vaikutus. Lopulliseen U-arvoon voi tulla vielä tapauksesta riippuen muitakin lisäyksiä.

Taulukko 3. Ruostumattoman 5 mm paksun pistoansaan aiheuttama lisäys ΔU_f betoni-sandwichseinän lämmönläpäisykertoimeen. Koskee eristepaksuutta 240 mm ja taulukon 1 seinärakennetta.

Ruutujako m	Ansaita/m ²	ΔU_f W/m ² K	U W/m ² K
0,3	11,1	0,0136	0,158
0,4	6,25	0,0076	0,152
0,5	4,00	0,0049	0,150
0,6	2,78	0,0034	0,148
0,7	2,04	0,0025	0,147
0,8	1,56	0,0019	0,147
0,9	1,23	0,0015	0,146
1,0	1,00	0,0012	0,146

Muilla ansaan paksuuksille, materiaaleille ja eristepaksuuksille voidaan ansaan aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys laskea rakentamismääräyskokoelman osan C4 kaavasta

$$\Delta U_f = \alpha \frac{\lambda_f A_f n_f}{d_o} \left(\frac{R_{f0}}{R_T} \right)^2 \quad (2)$$

missä

ΔU_f	mekaanisista kiinnikkeistä aiheutuva korjaustekijä, W/m^2K
α	kerroin, arvoja taulukossa 4
λ_f	kiinnikkeen lämmönjohtavuus, W/mK
A_f	yhden kiinnikkeen poikkipinta-ala, m^2
n_f	kiinnikkeiden lukumäärä neliometriä kohden, $1/m^2$
d_o	sen lämmöneristekerroksen kokonaispaksuus, johon kiinnike on asennettu, m
R_{f0}	sen lämmöneristekerroksen lämmönvastus, johon kiinnike on asennettu, W/m^2K
R_T	tarkasteltavan rakennusosa kokonaislämmönvastus ilman korjaustekijöiden ja kylmäsiltojen vaikutusta, W/m^2K

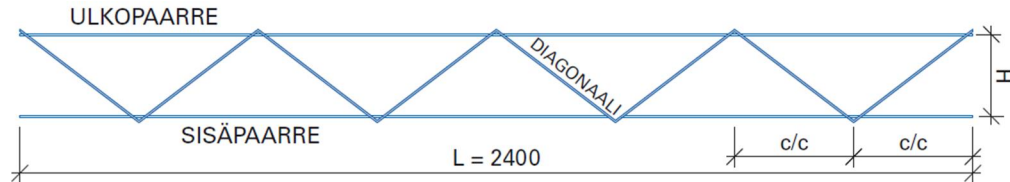
Taulukko 4. Kaavan 2 kertoimen α arvoja erilaisille pistoansaille ja eristepaksuuksille. Eristeen lämmönjohtavuudella ei ole vaikutusta kertoimen α arvoon.

Langan halkaisija mm	Materiaali	Eristepaksuus mm	α
5	RST	240	0,94
5	teräs	240	0,90
10	teräs	240	0,81
5	RST	150	0,91
5	teräs	100	0,79
5	RST	50	0,78
5	teräs	50	0,65
10	teräs	50	0,47

Taulukon 4 α -arvot on laskettu tässä tutkimuksessa. Rakentamismääräyskokoelman osa C4 antaa kaikille eristeen läpi kokonaan meneville metallisille kiinnikkeille likiarvon $\alpha = 0,8$. Kuten taulukosta 4 nähdään, likiarvo on joissakin tapauksissa liian suuri ja joissakin liian pieni. Kertoimen α yläraja on yksi ja se pienenee eristepaksuuden ohentuessa, langan paksuntuessa ja langan lämmönjohtavuuden kasvaessa. Fysikaalisesti α -arvon pieneminen ykköstä pienemmäksi liittyy siihen miten paljon ansas pienentää ansasta ympäröivän lämmöneristeen yli muodostuvaa lämpötilaeroa.

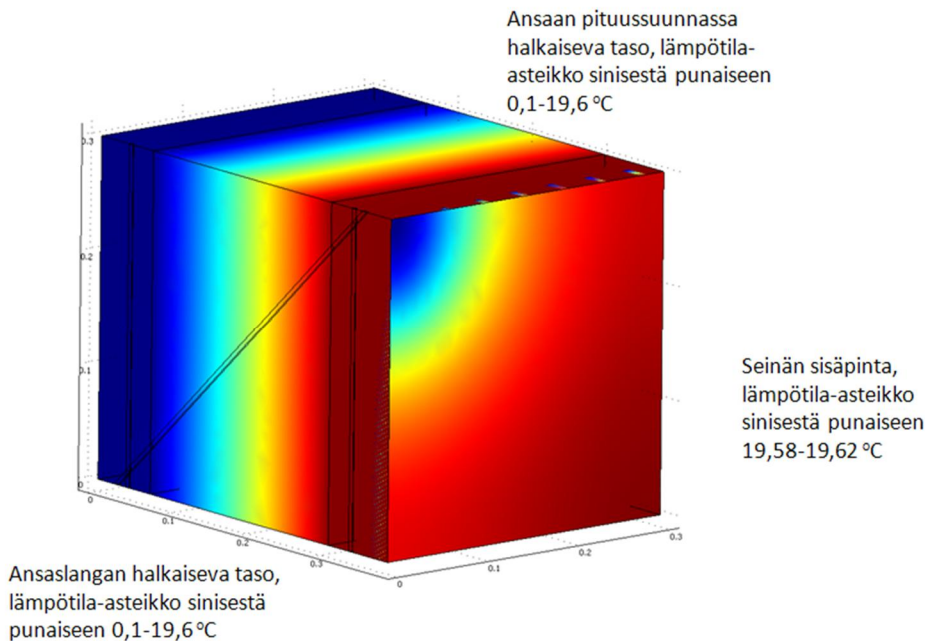
6 Diagonaaliانسas

Ruostumattoman ja halkaisijaltaan 5 mm diagonaaliinsaana vaikutusta seinän lämmönläpäisyyseen laskettiin 0,6 ja 1,2 metrin ansasjaolla. Symmetrian takia ansaasta (kuva 5) on otettu laskentaan vain yksi diagonaali ja sekin kahtia halkaistuna

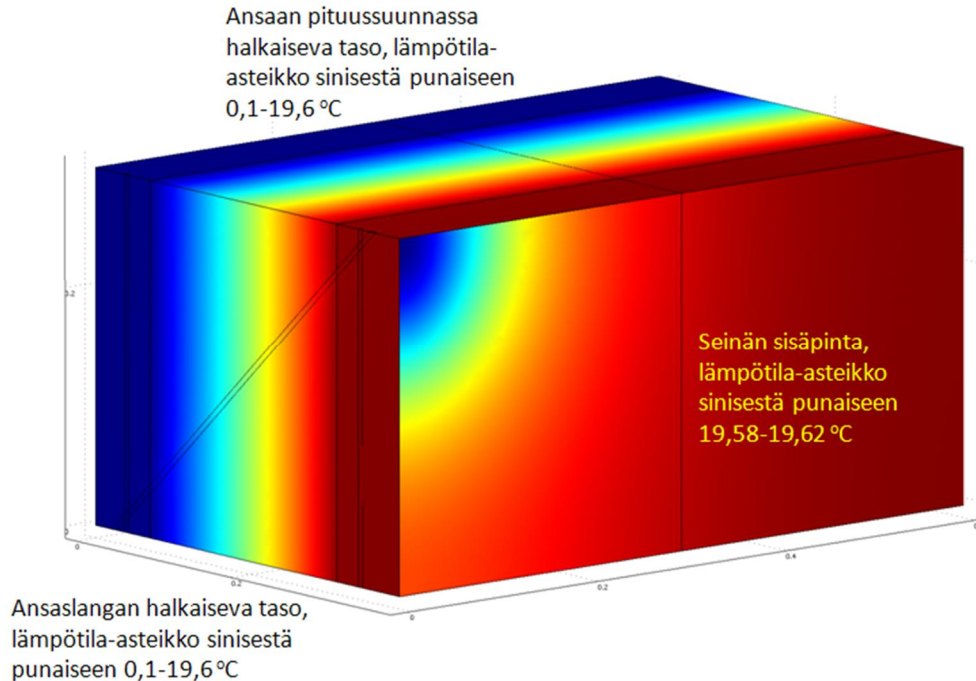


Kuva 5. Mallinnettu diagonaaliانسas (Peikko PD). Paarteiden välinen etäisyys H on 300 mm eristepaksuudella 240 mm. Laskentaan on otettu yksi diagonaali (diagonaalijako $c/c = 300$ mm).

Kuvasta 6 näkyy miten ansas alentaa sisäseinän pintalämpötilaa ansaan kärjen kohdalla ja siten lisää lämpövirtaa huoneesta seinään. Seinäpinnan kylmimmän ja lämpimimmän kohdan ero on kuitenkin vain $0,04$ °C. Sisäpinnan lämpötilasta näkyy, että seinäpinta on hieman kylmempi ansaan suunnassa (kuvassa alaspäin) kuin ansasta vastaan kohtisuorassa. Seinän sisällä ansaan vaikutus on niin pieni, että sitä on vaikea havaita kuvan lämpötila-asteikolla. 1,2 metrin ansasjaolla (kuva 7) sisäpinnan lämpötilajakautuma on hyvin samanlainen kuin 0,6 metrin ansasjaolla.



Kuva 6. Lämpötilat huoneen puoleisessa seinäpinnassa, ansalangan halkaisevassa tasossa sekä ansaan pituussuunnassa halkaisevassa tasossa 0,6 m ansasjaolla, Huomaa, että eri tasoissa on eri lämpötila-asteikot, Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0 °C ja 20 °C,



Kuva 7. Lämpötilat huoneen puoleisessa seinäpinnassa, ansaslangan halkaisevassa tasossa sekä ansaan pituussuunnassa halkaisevassa tasossa 1,2 m ansasjaolla, Huomaa, että eri tasoissa on eri lämpötila-asteikot. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0 °C ja 20 °C,

Lisäkonduktanssi yhdelle eristeen läpi menevälle ansanlangalle on $X = 0,00092$ W/K sekä 0,6 m että 1,2 m ansasjaolla. Lisäkonduktanssi on siten 75 % yhden vastaavanlaisen pistoansaan lisäkonduktanssista $X = 0,00122$ W/K (ks. kappale 5). Diagonaaliansaan konduktanssi on pistoansaan konduktanssia pienempi koska diagonaalin läpi menevä lämpövirta joutuu kulkemaan pidemmän matkan (0,32 m) kuin suoraan eristeen läpi menevässä pistoansaassa (0,24 m).

Vastaava seinän lämmönläpäisykertoimen lisäys ansaan johdosta on laskettu edellä olevasta kaavasta 1 taulukkoon 5 eri ansasjaolla. Taulukkoon on lisäksi laskettu lämmönläpäisykertoimet taulukon 1 mukaiselle seinälle lisäämällä ansaiden vaikutus.

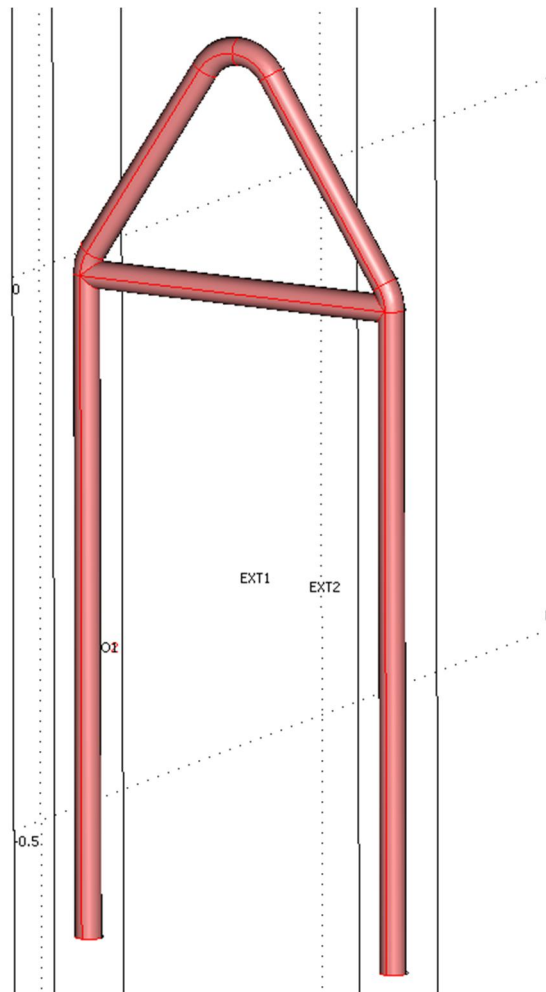
Taulukko 5. Ruostumattoman 5 mm paksun diagonaaliansaan aiheuttama lisäys ΔU_f betoni-sandwichseinän lämmönläpäisykertoimeen kun diagonaalien jako on 300 mm. Koskee eristepaksuutta 240 mm ja taulukon 1 seinärakennetta.

Ansasjako m	ΔU_f W/m ² K	U W/m ² K
0,4	0,0077	0,152
0,5	0,0061	0,151
0,6	0,0051	0,150
0,7	0,0044	0,149
0,8	0,0038	0,149
0,9	0,0034	0,148
1	0,0031	0,148
1,1	0,0028	0,147
1,2	0,0026	0,147

Muilla ansaan paksuuksille, materiaaleille ja eristepaksuuksille voidaan ansaan aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys laskea kohtuullisella tarkkuudella kaavasta 2 kertomalla taulukon 4 kertoimen α arvot luvulla 0,75.

7 Nostolenkki

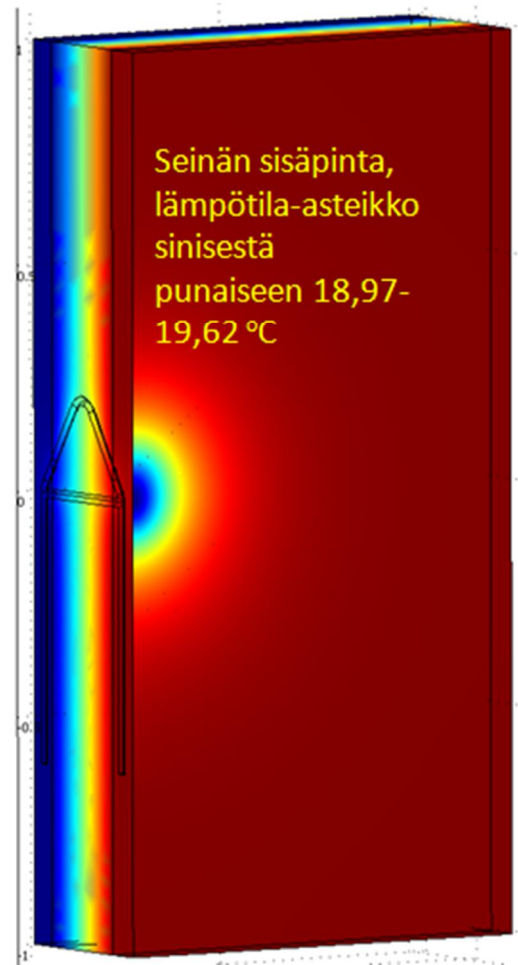
Laskentaan otettu sisä- ja ulkokuoren yhdistävä nostolenkki (kuva 8) on umpinaista ruostumatonta teräslankaa, langan paksuus oli 16, 20 tai 25 mm. Symmetrian takia nostolenkki on laskennassa (kuva 9) halkaistu kahtia.



Kuva 8. Mallinnettu nostolenkki (Pintos SCR). Eristepaksuus on 240 mm ja nostolenkin sisäleveys 285 mm. Kuvan laskentageometriasta on jätetty pois todellisen nostolenkin alapäiden koukut koska niillä ei ole lämpötekniistä merkitystä.

Kuvasta 9 näkyy miten 20 mm paksu nostolenkki alentaa sisäseinän pintalämpötilaa ja siten lisää lämpövirtaa huoneesta seinään. Seinäpinnan kylmimmän ja lämpimimmän kohdan ero on 0,65 °C.

Nostolenkin halkaiseva taso, lämpötila-asteikko sinisestä punaiseen 0,1-19,6 °C



Kuva 9. Lämpötilat huoneen puoleisessa seinäpinnassa sekä nostolenkin halkaisevassa tasossa. Langan halkaisija 20 mm. Huomaa, että eri tasoissa on eri lämpötila-asteikot. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0 °C ja 20 °C.

Lisäkonduktanssi yhdelle eristeen läpi menevälle nostolenkille on esitetty taulukossa 6.

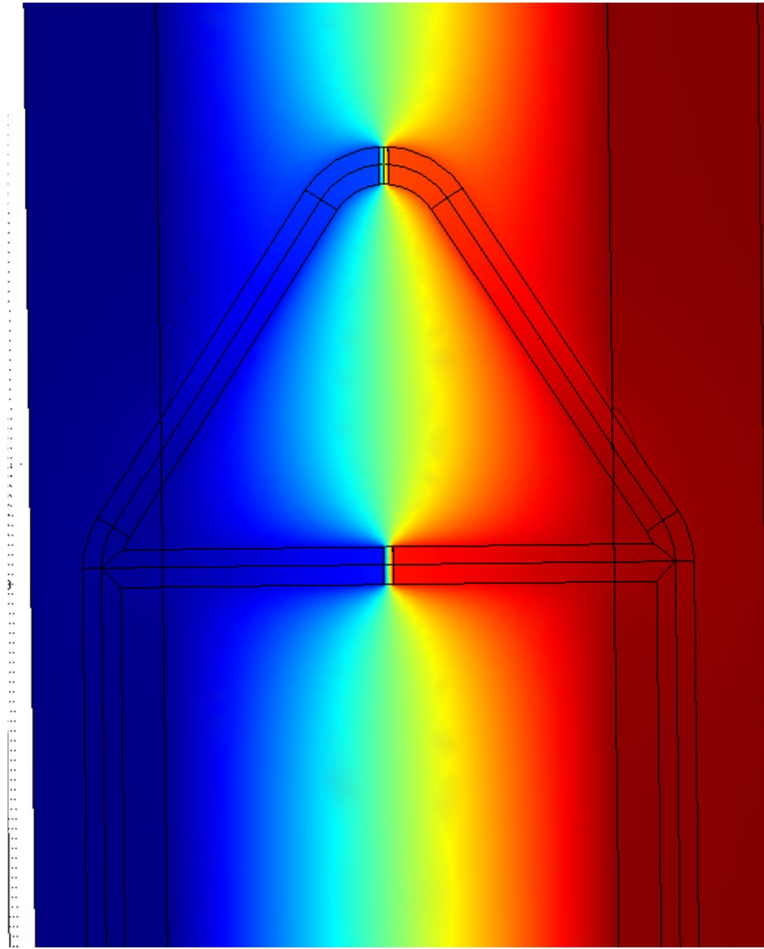
Taulukko 6. Ruostumattoman SCR-nostolenkin pistemäinen lisäkonduktanssi sekä kaavan 3 mukainen kerroin α . Koskee eristepaksuutta 240 mm.

Langan halkaisija mm	X W/K	α
16	0,018	0,69
20	0,027	0,66
25	0,041	0,63

Muille nostolenkin paksuuksille, materiaaleille ja eristepaksuuksille voidaan muodostaa seuraava laskentakaava kaavojen 1 ja 2 perusteella. Kaavassa 3 pinta-ala A_f tarkoittaa molempien lämmöneristeen lävistävien lankojen yhteistä pinta-alaa.

$$X = \alpha \frac{\lambda_f A_f}{d_o} \left(\frac{R_{fo}}{R_T} \right)^2 \quad (3)$$

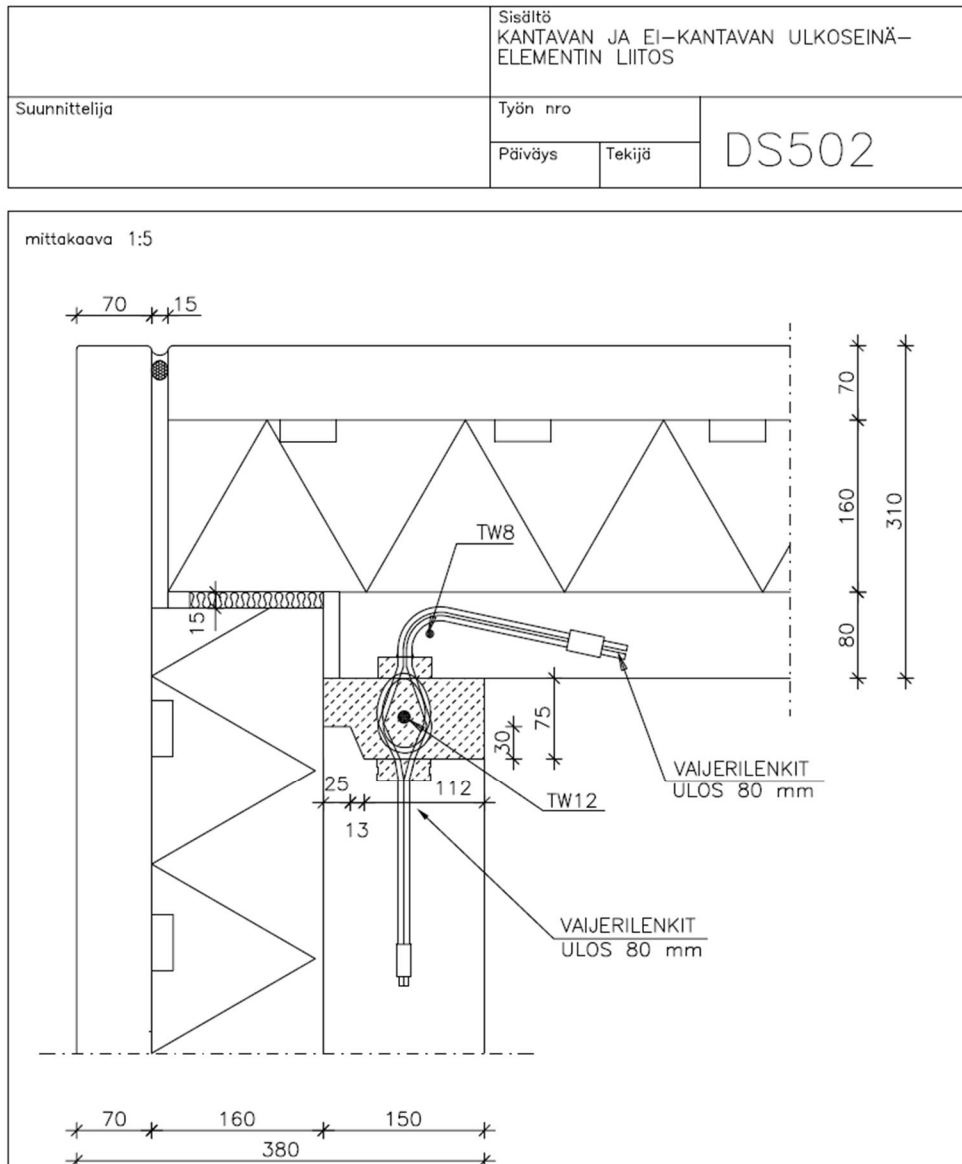
Lisäkonduktanssi pienenee jos nostolenkki katkaistaan (kuva 10). Kuvan tilanteessa molemmista 20 mm langoista on leikattu 5 mm pala pois ja palan tilalla on materiaalia, jonka lämmönjohtavuus on sama kuin seinäeristeellä (0,036 W/mK). Lisäkonduktanssi pienenee tässä tapauksessa 30 prosenttiin alkuperäisestä. Jos leikkauspalan leveys on 10 mm, on lisäkonduktanssi 24 prosenttia alkuperäisestä. Mikäli lankojen päiden väliin jää eristeen sijaan ilmarako, voi lisäkonduktanssi olla tätä hieman suurempi tai pienempi riippuen leikkauspinnan karkeudesta ja oksidoitumisesta.



Kuva 10. Lämpötilajakauma katkaistun nostolenkin läheisyydessä. Lämpötilat alemman langan leikkauskohdan vasemmalla ja oikealla puolella ovat 3°C ja 17°C kun ulko- ja sisälämpötilat ovat 0°C ja 20°C . Langan paksuus on 20 mm, leikkausvälin paksuus 5 mm ja välissä olevalla materiaalilla on sama lämmönjohtavuus kuin seinän lämpöeristeellä.

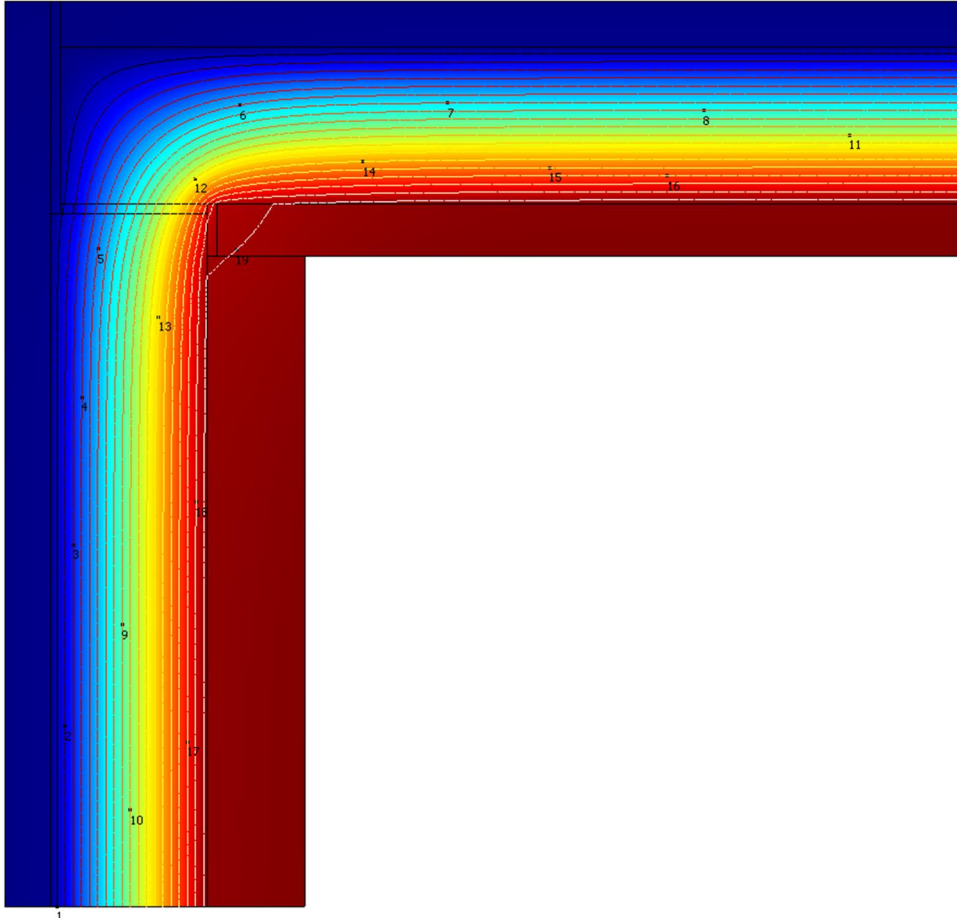
8 Ulkonurkka

Laskentaan otettu ulkonurkka on kuvassa 11. Kuvan eristepaksuuden 160 mm lisäksi nurkka laskettiin myös 240 mm eristepaksuudella. Kuvassa pystysuuntaisen kantavan sisäkuoren paksuus oli 150 mm mutta vaakasuuntaisen sisäkuoren paksuus oli joko 80 mm tai 150 mm.



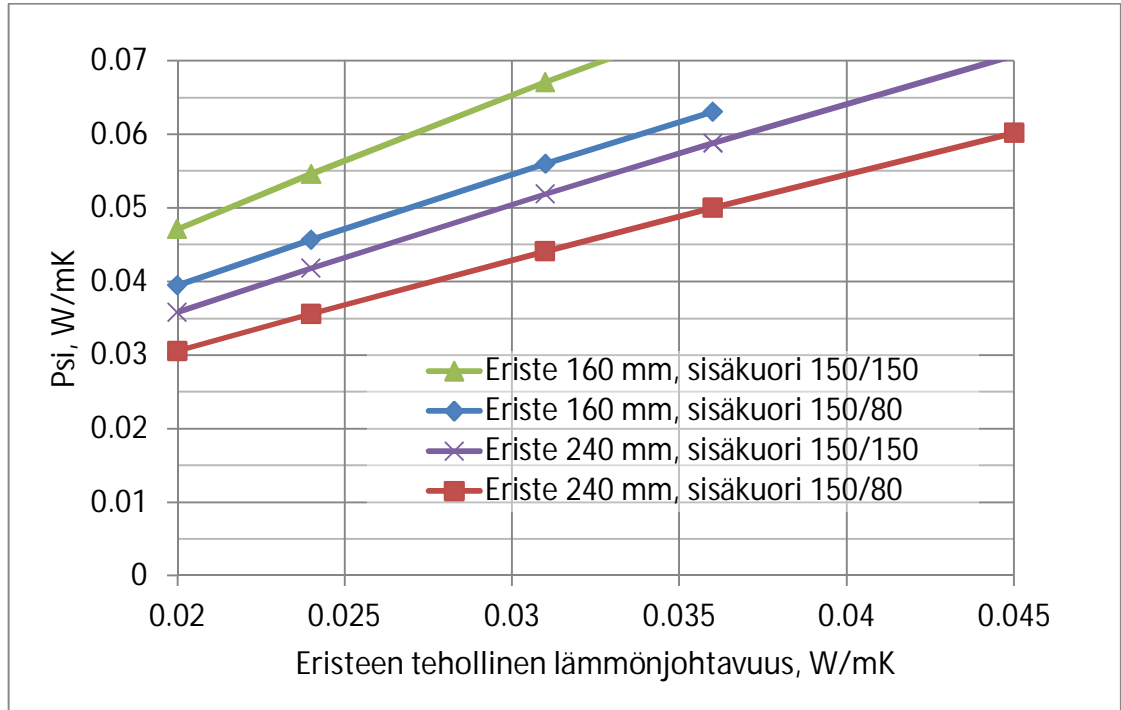
Kuva 11. Mallinnettu ulkonurkka (Betonikeskus ry).

Vaijerilenkkien vaikutusta tutkittiin kaksi- ja kolmiulotteisilla koelaskennoilla, joissa todettiin, että vaijerilenkeillä ei ole mainittavaa vaikutusta nurkan viivamaiseen lisäkonduktanssiin. Kuvasta 12 näkyy lämpötilat nurkan läheisyydessä kun eristepaksuus on 240 mm ja eristeen lämmönjohtavuus 0,036 W/mK.

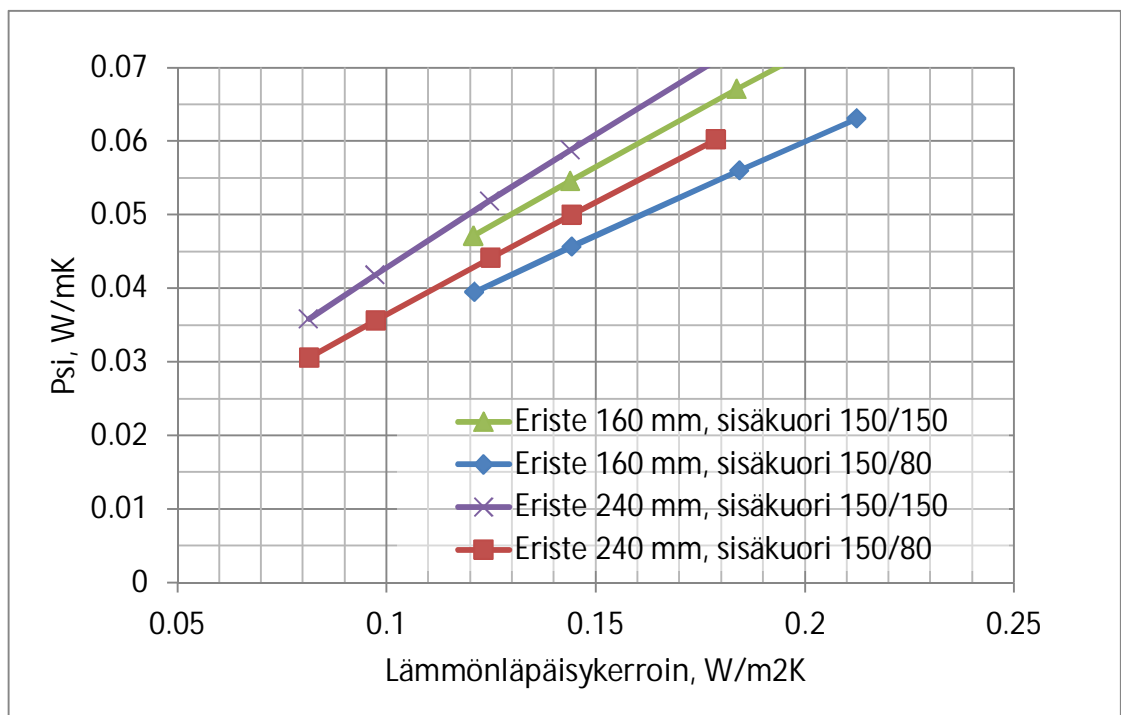


Kuva 12. Lämpötila (punainen 19,6 astetta, sininen 0,1 astetta) ja isotermit yhden asteen välein ulkonurkan läheisyydessä. Eristepaksuus 240 mm ja eristeen lämmönjohtavuus 0,036 W/mK. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0°C ja 20°C.

Ulkonurkan viivamainen lisäkonduktanssi eri laskentatapauksissa on esitetty kuvassa 13. Lisäkonduktanssi lisääntyy eristeen lämmönjohtavuuden kasvaessa. Myös sisäkuoren paksuntaminen kasvattaa lisäkonduktanssia, koska se ei juurikaan muuta nurkan lämpöhäviötä mutta pienentää seinän sisäpinta-alaa ja siten lämmönläpäisykertoimilla laskettavaa seinän vertailulämpöhäviötä. Kuvassa 14 on esitetty samat tulokset seinän lämmönläpäisykertoimen funktiona. Tästä näkyy, että jos kahdella rakenteella on sama U-arvo mutta erilainen eristepaksuus, on ohuemmallalla rakenteella hieman pienempi lisäkonduktanssi.



Kuva 13. Ulkonurkan viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/Km) erilaisilla eristeen lämmönjohtavuuksilla, eristepaksuuksilla ja sisäkuoren paksuuksilla. Tehollinen lämmönjohtavuus sisältää ansaiden vaikutuksen ja muut mahdolliset lisäykset.



Kuva 14. Ulkonurkan viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/Km) erilaisilla seinän lämmönläpäisykerroimilla, eristepaksuuksilla ja sisäkuoren paksuuksilla.

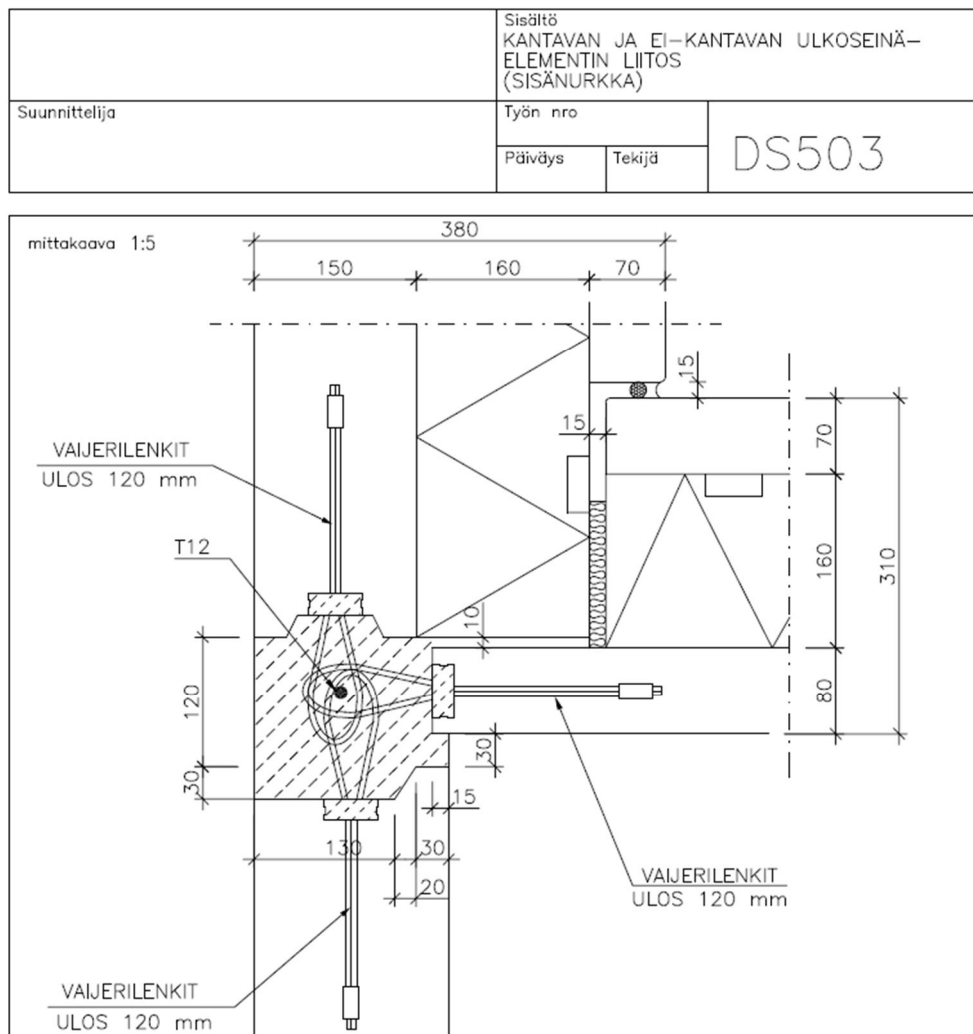
Kuvan 14 perusteella tulokset voidaan vielä yksinkertaistaa taulukon 7 muotoon. Rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukkoarvo betoniseinän ulkonurkan viivamaiselle konduktanssille on 0,06 W/mK.

Taulukko 7. Ulkonurkan lisäkonduktanssi erilaisilla seinän lämmöneristystasoilla. Koskee tutkittua rakennetta. Väliarvoja voi interpoloida.

Seinän lämmöneristystaso	Lämmönläpäisykerroin W/m^2K	Lisäkonduktanssi W/mK
Normaalitaso	0,17	0,06
Matalaenergiataso	0,13	0,05
Passiivitaso	0,10	0,04

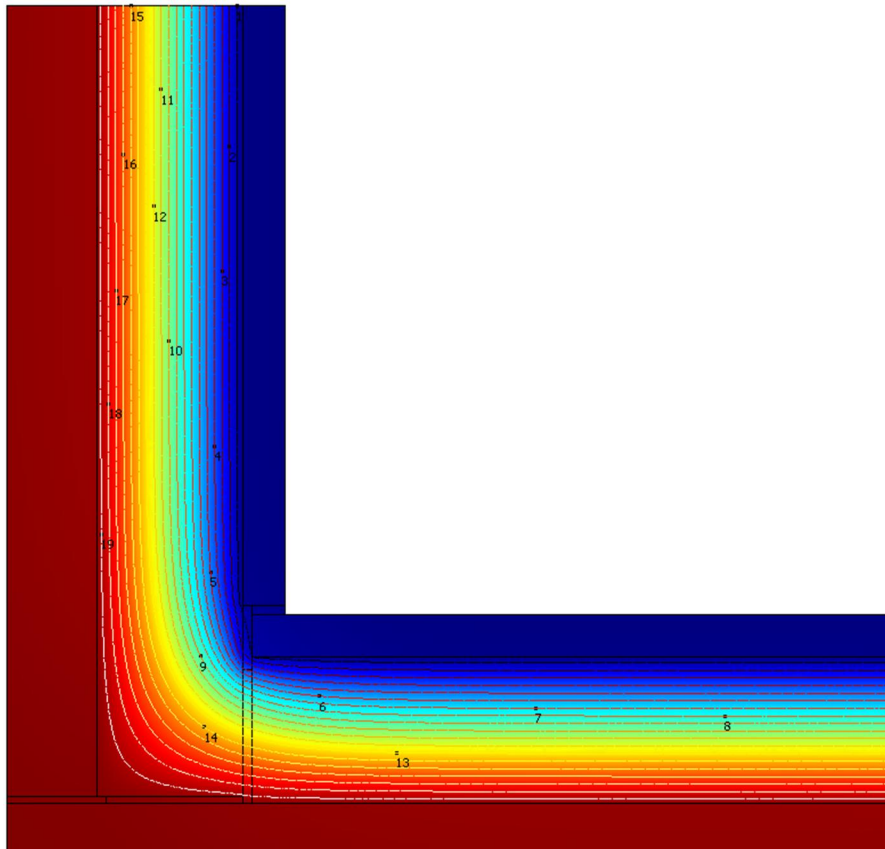
9 Sisänurkka

Laskentaan otettu sisänurkka on kuvassa 15. Kuvan eristepaksuuden 160 mm lisäksi nurkka laskettiin myös 240 mm eristepaksuudella. Kuvassa pystysuuntaisen sisäkuoren paksuus oli 150 mm mutta vaakasuuntaisen sisäkuoren paksuus oli joko 80 mm tai 150 mm.



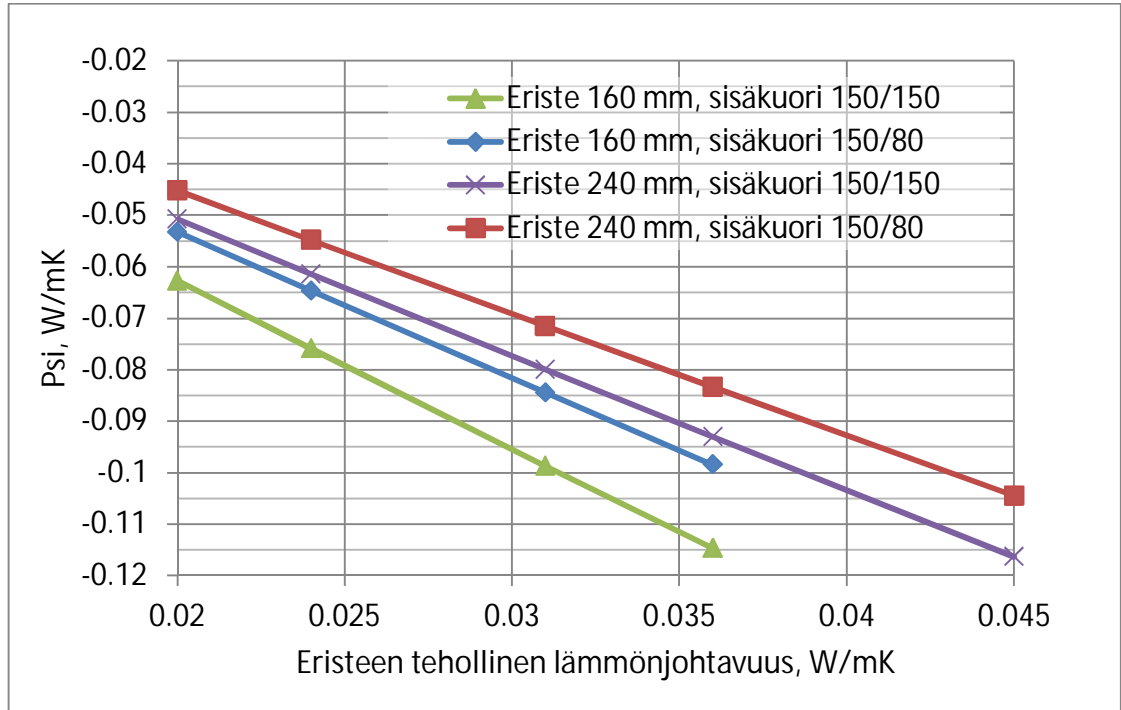
Kuva 15. Mallinnettu sisänurkka (Betonikeskus ry).

Vaijerilenkkien vaikutus jätettiin huomiotta samoin kuin kuvassa 15 alimpana näkyvä 180 mm paksu seinä kun koelaskennoilla todettiin, ettei niillä ole mainittavaa vaikutusta nurkan viivamaiseen lisäkonduktanssiin. Kuvasta 16 näkyy lämpötilat nurkan läheisyydessä kun eristepaksuus on 240 mm ja eristeen lämmönjohtavuus 0,036 W/mK.

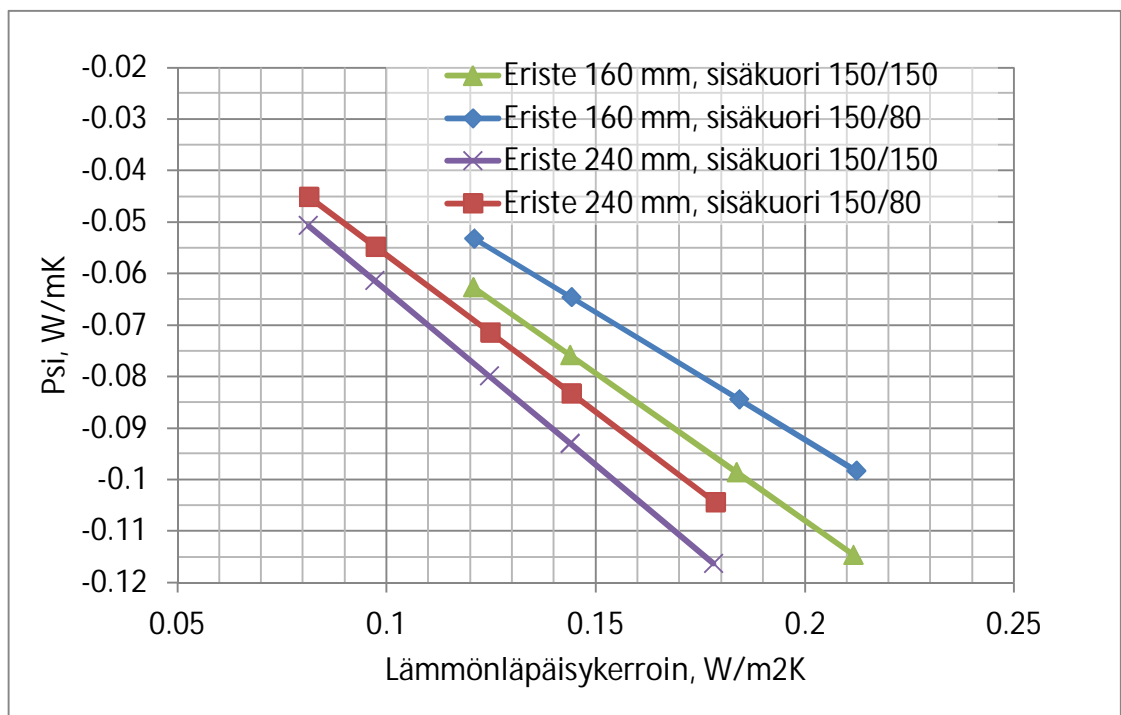


Kuva 16. Lämpötila (punainen 19,6 astetta, sininen 0,1 astetta) ja isotermit yhden asteen välein sisänurkan läheisyydessä. Eristepaksuus 240 mm ja eristeen lämmönjohtavuus 0,036 W/mK. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0°C ja 20°C.

Sisänurkan viivamainen lisäkonduktanssi eri laskentatapauksissa on esitetty kuvissa 17 ja 18. Lisäkonduktanssi on negatiivinen ja itseisarvoltaan 1,4 ... 1,6 –kertainen ulkonurkan konduktanssiin verrattuna, joten yksi sisänurkka kompensoi enemmän kuin yhden ulkonurkan rakennuksen johtumislämpöhäviössä.



Kuva 17. Sisänurkan viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/Km) erilaisilla eristeen lämmönjohtavuuksilla, eristepaksuuksilla ja sisäkuoren paksuuksilla. Tehollinen lämmönjohtavuus sisältää ansaiden vaikutuksen ja muut mahdolliset lisäykset.



Kuva 18. Sisänurkan viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/Km) erilaisilla seinän lämmönläpäisykerroimilla, eristepaksuuksilla ja sisäkuoren paksuuksilla.

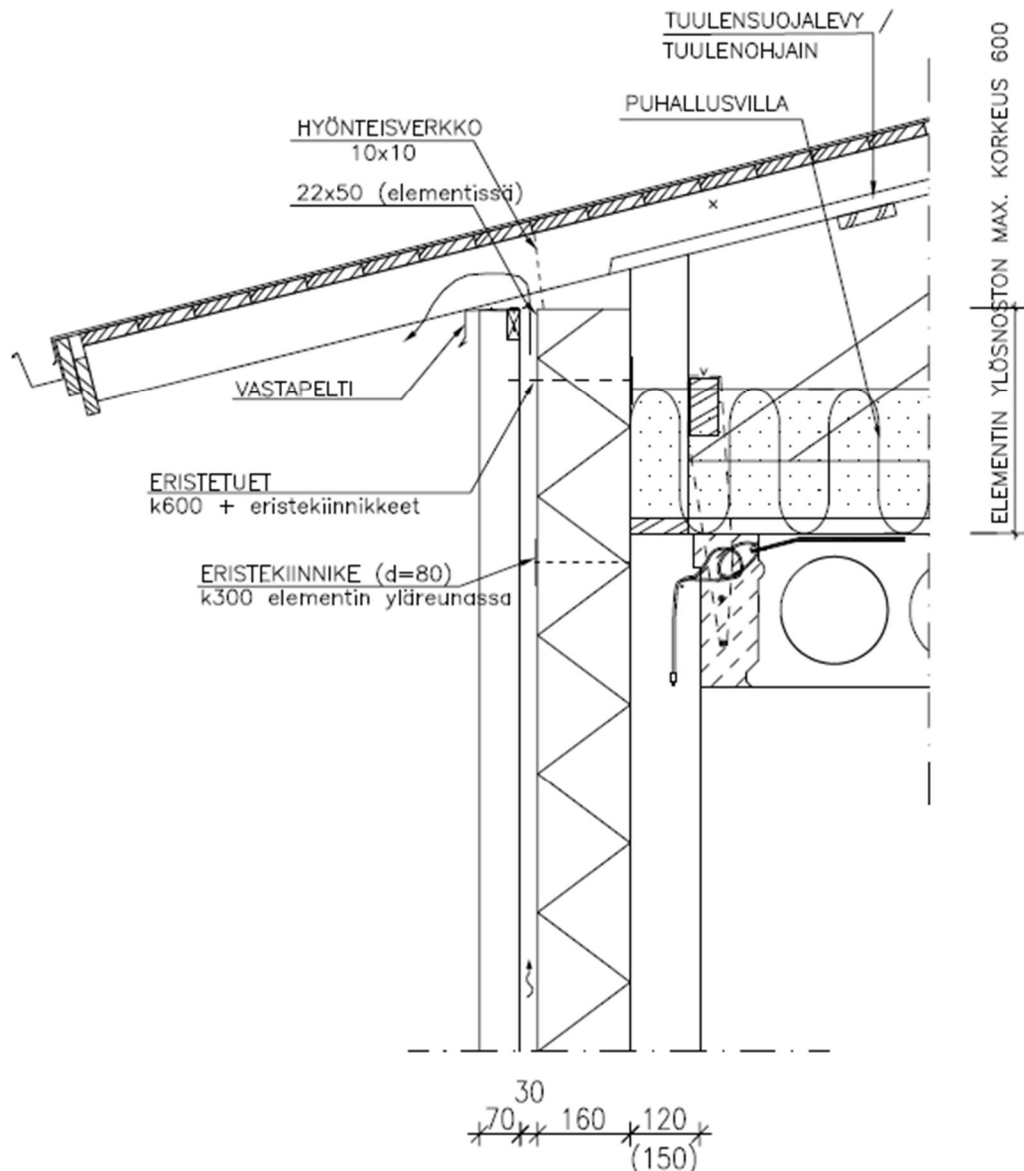
Rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukkoarvo betoniseinän sisänurkan viivamaiselle konduktanssille on -0,06 W/mK. Kuvan 18 perusteella tulokset voidaan vielä yksinkertaistaa taulukon 8 muotoon.

Taulukko 8. Sisänurkan lisäkonduktanssi erilaisilla seinän lämmöneristystasoilla. Koskee tutkittua rakennetta. Väliarvoja voi interpoloida.

Lämmönläpäisykerroin W/m ² K	Lisäkonduktanssi W/mK
0,17	-0,08
0,13	-0,06
0,10	-0,05

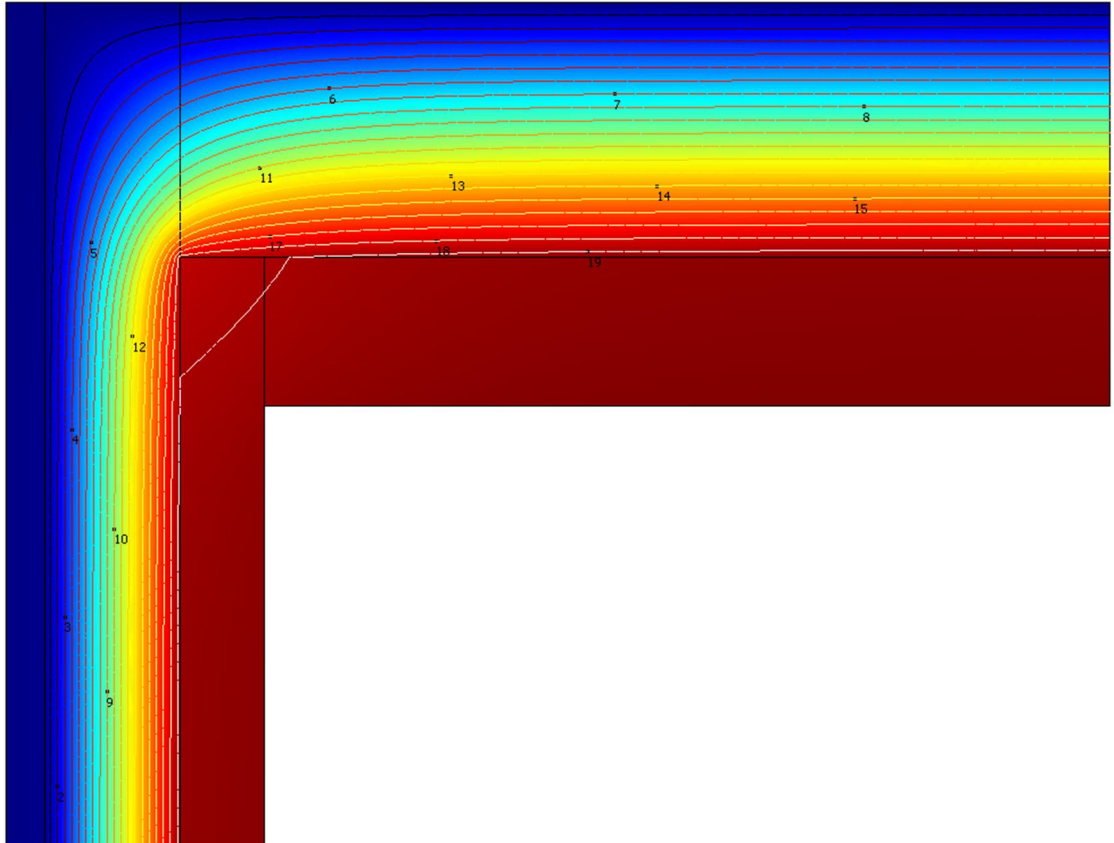
10 Seinän ja yläpohjan liittymä

Laskentaan otettu yläpohjaliitos on kuvassa 19. Eristepaksuus on laskennassa 160 mm tai 240 mm. Sisäkuoren paksuus on 150 mm tai 80 mm. Yläpohjan eristeenä on 450 mm puhallusvillaa ja sen lämmönläpäisykerroin on 0,09 W/m²K.



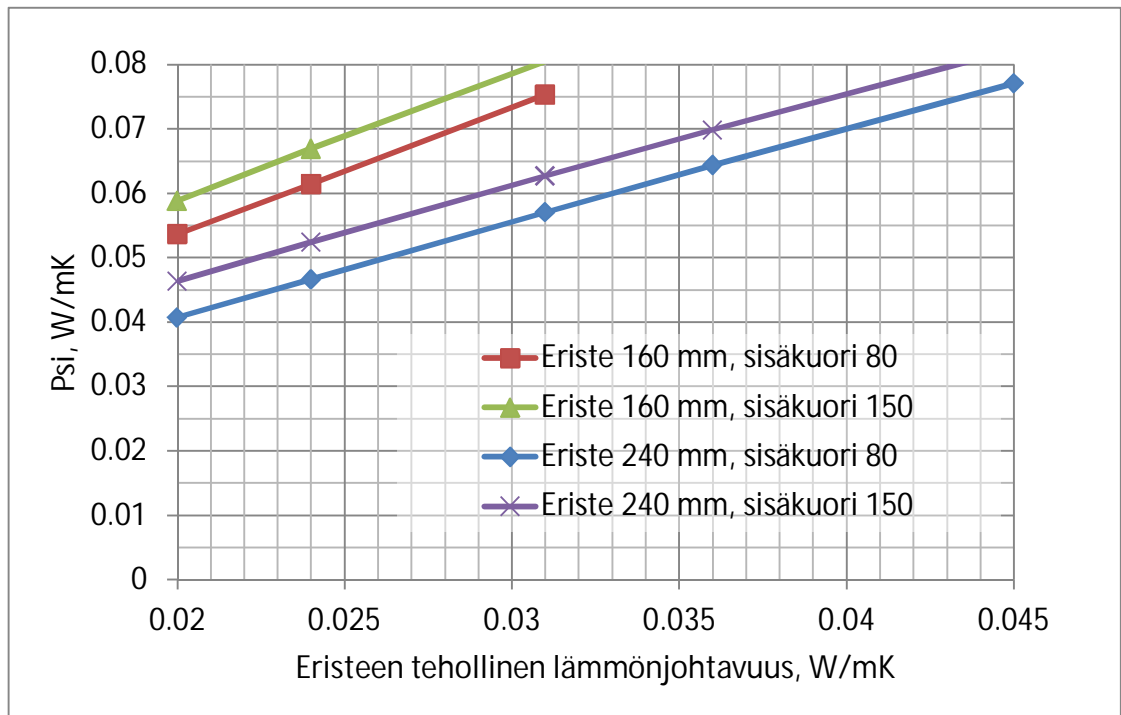
Kuva 19. Seinän ja yläpohjan liitos (Betonikeskus ry). Kuvasta poiketen mallinnettu rakenne on ilman ulkoseinän tuuletusrakoa ja eristepaksuus on 240 mm. Sisäkuoren paksuus on joko 150 tai 80 mm

Kuvasta 20 näkyy lämpötilat yläpohjaliittymän läheisyydessä kun eristepaksuus on 240 mm, eristeen lämmönjohtavuus 0,036 W/mK ja sisäkuoren paksuus 150 mm. Yläpohjaliitoksen viivamainen lisäkonduktanssi on kuvan tilanteessa 0,070 W/mK.

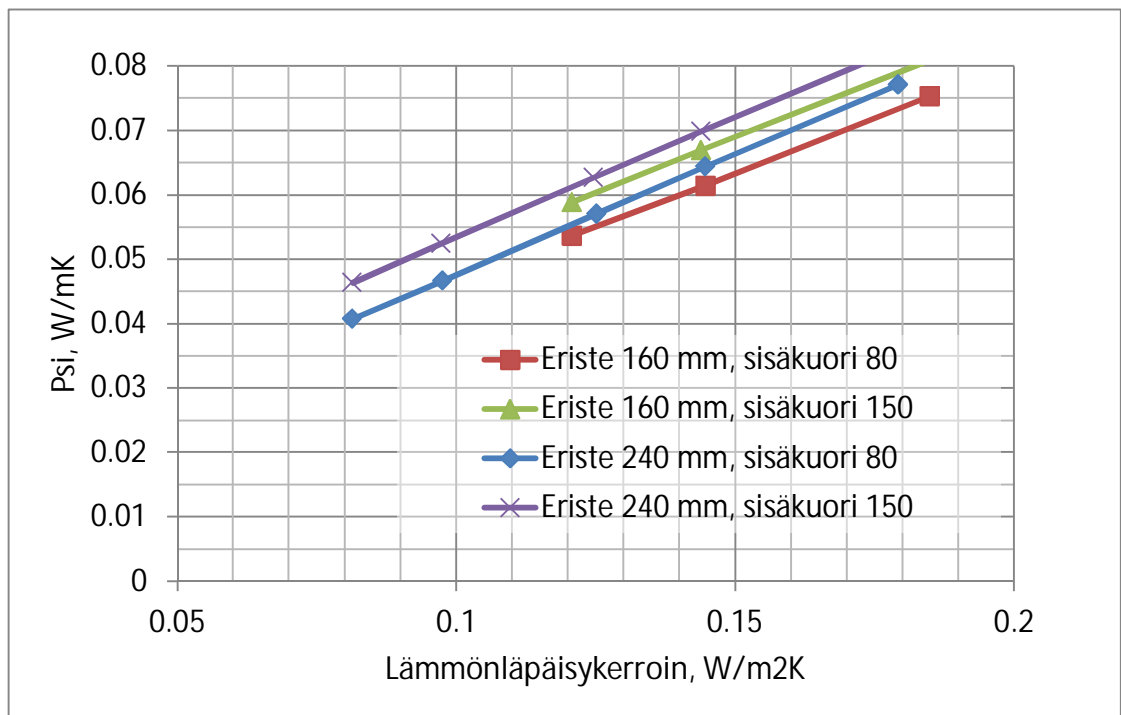


Kuva 20. Lämpötila (punainen 19,8 astetta, sininen 0,0 astetta) ja isotermit yhden asteen välein seinän ja yläpohjan liitoksen läheisyydessä. Sisäkuoren paksuus on 150 mm, eristeen paksuus 240 mm ja eristeen lämmönjohtavuus 0,036 W/mK. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0°C ja 20°C.

Jos yläpohjaeristeen paksuus on 450 mm sijaan 600 mm, liitoksen konduktanssi hieman lisääntyy mutta on kahden numeron tarkkuudella edelleen 0,070 W/mK. Kuvassa 21 on esitetty konduktanssin riippuvuus seinäeristeen lämmönjohtavuudesta ja sisäkuoren paksuudesta. Sisäkuoren ohentaminen pienentää lisäkonduktanssia koska lämpöhäviö ei muutoksen johdosta juuri muutu, mutta U-arvoilla laskettu vertailulämpövirta kasvaa katon pinta-alan suurentuessa. Kuvassa 22 on samat tulokset seinän lämmönläpäisykertoimen mukaan esitettynä.



Kuva 21. Ulkoseinän yläpohjaliittymän viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/Km) erilaisilla eristeen lämmönjohtavuuksilla, eristepaksuuksilla ja sisäkuoren paksuuksilla. Tehollinen lämmönjohtavuus sisältää ansaiden vaikutuksen ja muut mahdolliset lisäykset.



Kuva 22. Ulkoseinän yläpohjaliittymän viivamainen lisäkonduktanssi Ψ (W/Km) erilaisilla seinän lämmönläpäisykerroimilla, eristepaksuuksilla ja sisäkuoren paksuuksilla.

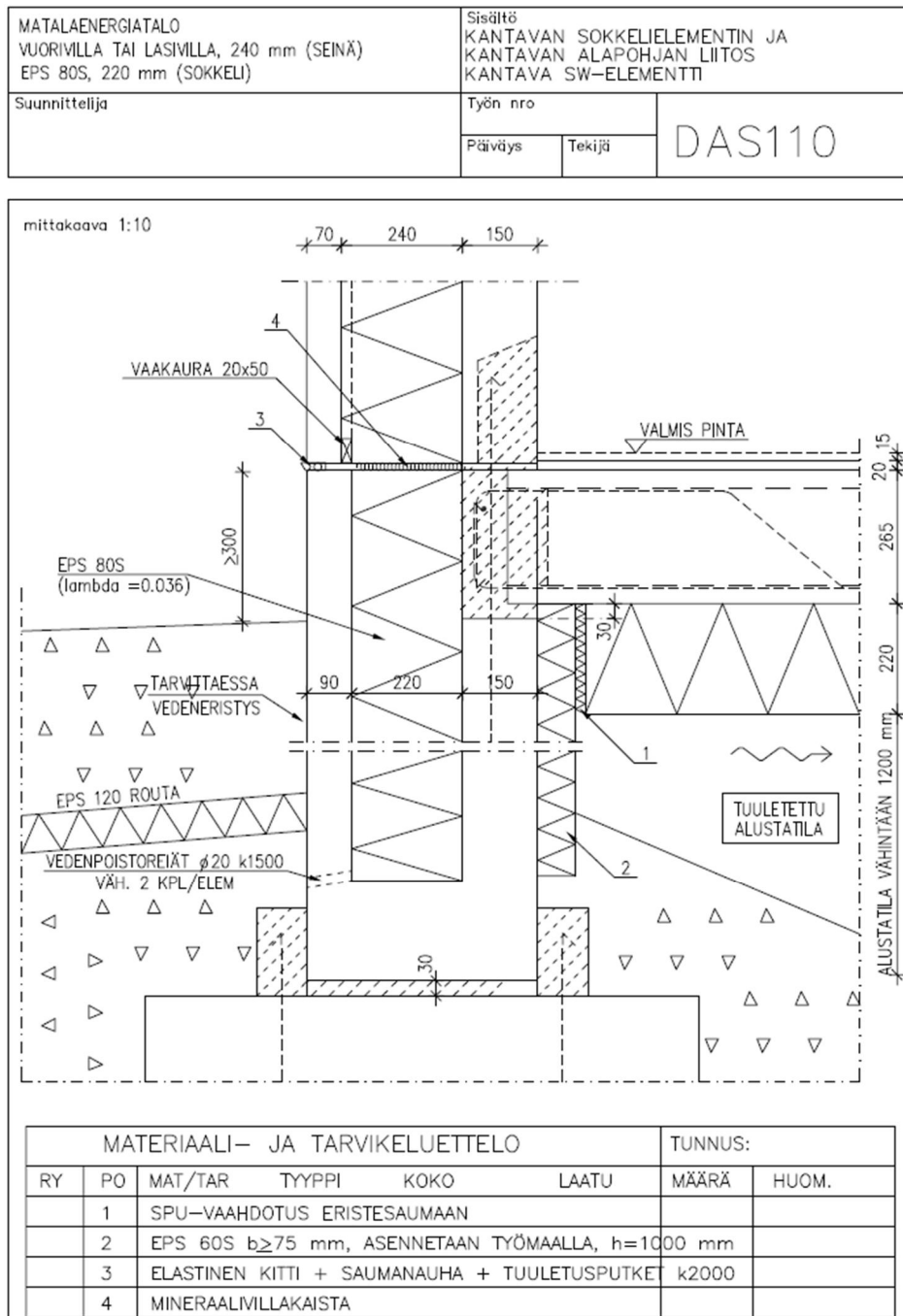
Kuvan 22 perusteella tulokset voidaan vielä yksinkertaistaa taulukon 9 muotoon. Rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukkoarvo betoniseinän ja betoniyläpohjan viivamaiselle konduktanssille on 0,08 W/mK.

Taulukko 9. Seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssi erilaisilla seinän lämmöneristystasoilla. Koskee tutkittua rakennetta. Väliarvoja voi interpoloida.

Lämmönläpäisykerroin W/m ² K	Lisäkonduktanssi W/mK
0,17	0,08
0,13	0,06
0,10	0,05

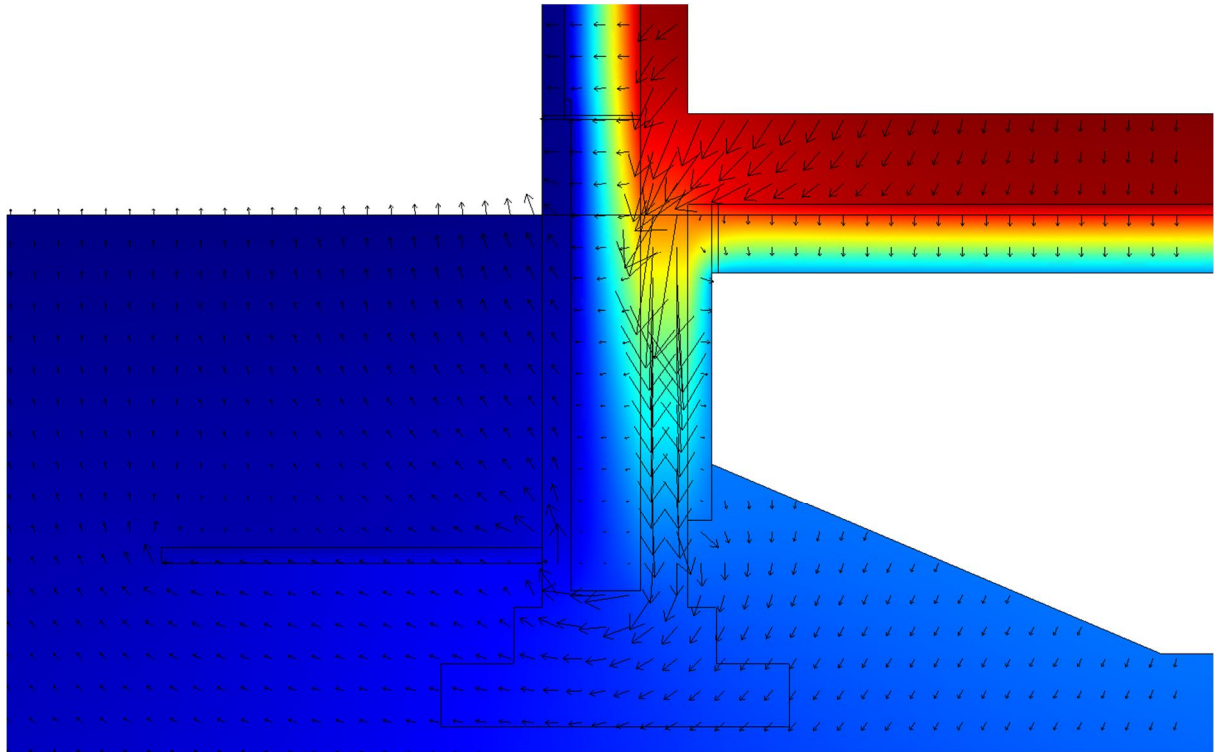
11 Ryömintätilaisen alapohjan ja sokkelin liitos

Laskentaan otettu alapohja- ja sokkelirakenne on kuvassa 23. Routalevy pientää alapohjaliitoksen liitoksen konduktanssia sitä enemmän mitä paksumpi routalevy on. Laskentaan valittiin eteläisimmässä Suomessa käytettävä 50 mm routalevy.



Kuva 23. Mallinnettu alapohjan ja seinän liittymä (Betonikeskus ry).

Kuvassa 24 näkyy lämpötila sekä lämpövirran suuntaa ja suuruutta osoittavat lämpövirtavektorit alapohjaliittymässä. Kuvan perusteella selviää, että merkittävin lämpövirta suuntautuu sokkelin sisäkuoren kautta maahan ja sitä kautta ulkoilmaan, sekä myös ryömintätilaan. Tämän lämpövirran katkaiseminen tavalla tai toisella pienentäisi liitoksen lisälämpöhäviötä.



Kuva 24. Lämpötilat ja lämpövirtavektorit ryömintätilaisen alapohjan läheisyydessä. Ulko- ja sisälämpötilat ovat $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ryömintätilan lämpötila $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastaa ryömintätilan ilmanvaihtokerrointa puoli vaihtoa tunnissa.

Edellä esitetyn rakenteen lisäksi laskettiin useita taulukon 10 mukaisia eristysvaihtoehtoja. Tulokset ovat taulukossa 11. Havaitaan, ettei sokkelin eristekerrosten lisäämisellä tai eristeitä parantamalla saada aikaan merkittävää lisäkonduktanssin parannusta.

Taulukkoon 11 on laskettu myös alapohjarakenteen lämmönläpäisykerroin (RakMK C4 2012 mukaan), koska lisäeristys muuttaa myös lämmönläpäisykerrointa. Näiden yhteisvaikutus perustilanteeseen verrattuna on laskettu taulukon 11 viimeiseen sarakkeeseen rakennukselle, jonka alapohjan pinta-ala on 5 m^2 sokkelimetriä kohti. Havaitaan, että lämpöhäviö pienenee merkittävästi lattiarakenteen eristystä lisäämällä (11 %, tilanne 4 ja 26 %, tilanne 5) sekä sokkelin sisä- ja ulkopuolista eristystä lisäämällä (4 %, tilanne 11).

Taulukon 11 U- ja Ψ -arvoista voidaan laskea, että sokkeliliitoksen kylmäsilta lisää alapohjan lämmönläpäisykertoimella laskettua lämpöhäviötä 30 – 60 %, jos alapohjan pinta-ala on 5 m^2 sokkelimetriä kohti.

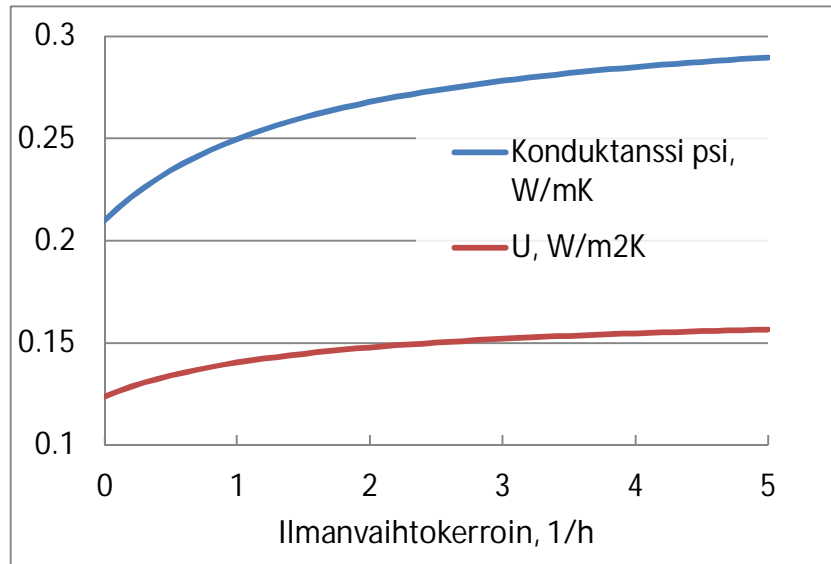
Taulukko 10. Ryömintätilaisen alapohjan eri laskentatapaukset. Tulokset ovat taulukossa 11.

Nro	Tilanne
1	Perustilanne kuvien 23 ja 24 mukaisesti.
2	Seinäeristeen lämmönjohtavuus 0,025 W/mK (perusarvo 0,036)
3	Seinäeristeen lämmönjohtavuus 0,043 W/mK (perusarvo 0,036)
4	Lattiaeristeen lämmönjohtavuus 0,031 W/mK (perusarvo 0,04)
5	Lattiaeristeen paksuus 400 mm (perusarvo 220 mm)
6	Ei routalevyä
7	Sokkelieristeen lämmönjohtavuus 0,037 W/mK (perusarvo 0,04)
8	Sokkelin ulkopuolella 50 mm lisäeriste (0,041 W/mK)
9	Sokkelin sisäpuolinen eriste ulottuu alas anturaan asti
10	Sama kuin edellä mutta eristepaksuus 150 mm
11	Edellisen lisäksi sokkelin ulkopuolella 100 mm eristys (0,041 W/mK)
12	Ei sokkelin sisäpuolista eristettä
13	Sokkelin halkaisueriste 160 mm, ulkokuoren paksuus 150 mm
14	Betonin lämmönjohtavuus 2,5 W/mK (perusarvo 2)
15	Betonin lämmönjohtavuus 1,35 W/mK (perusarvo 2)
16	Maan lämmönjohtavuus 1,5 W/mK (perusarvo 2)

Taulukko 11. Ryömintätilaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin (U), sokkeliliitoksen viivamainen lisäkonduktanssi (Ψ) sekä alapohjan ja sokkeliliitoksen yhteen lasketun lämpöhäviön lisääntyminen (%) perustilanteeseen verrattuna. Ryömintätilan ilmanvaihtokerroin on 0,5 vaihtoa tunnissa.

Nro	Tilanne	U W/m ² K	Ψ W/mK	Lisälämpöhäviö, %
1	Perustilanne	0,134	0,234	0,0
2	Seinäeriste 0,025 W/mK	0,134	0,236	0,1
3	Seinäeriste 0,043 W/mK	0,134	0,234	-0,1
4	Lattiaeriste 0,031 W/mK	0,110	0,250	-11,3
5	Lattiaeriste 400 mm	0,083	0,253	-26,0
6	Ei routalevyä	0,134	0,240	0,6
7	Sokkelieriste 0,037 W/mK	0,134	0,229	-0,6
8	Sokkelin ulkopuolella 50 mm eriste	0,134	0,229	-0,7
9	Sokkelin sisäeriste korkea	0,134	0,233	-0,2
10	Sokkelin sisäeriste korkea 150 mm	0,134	0,222	-1,5
11	Sokkelin sisä- ja ulkoeristys	0,133	0,203	-3,8
12	Sokkelin sisäeriste pois	0,134	0,293	6,7
13	Sokkelin halkaisueriste 160 mm	0,134	0,262	3,2
14	Betoni 2,5 W/mK	0,134	0,271	4,3
15	Betoni 1,35 W/mK	0,133	0,182	-6,4
16	Maa 1,5 W/mK	0,129	0,226	-3,4

Kuvassa 25 on esitetty ryömintätilan ilmanvaihtokertoimen vaikutus alapohjan lämmönläpäisykertoimeen sekä sokkeliliittymän lisäkonduktanssiin. Ilmanvaihdon lisääntyessä ryömintätilan lämpötila laskee ja siksi lämpöhäviöt lisääntyvät. Tyypillinen ryömintätilan mitoitusilmanvaihto on 0,5 vaihtoa tunnissa.

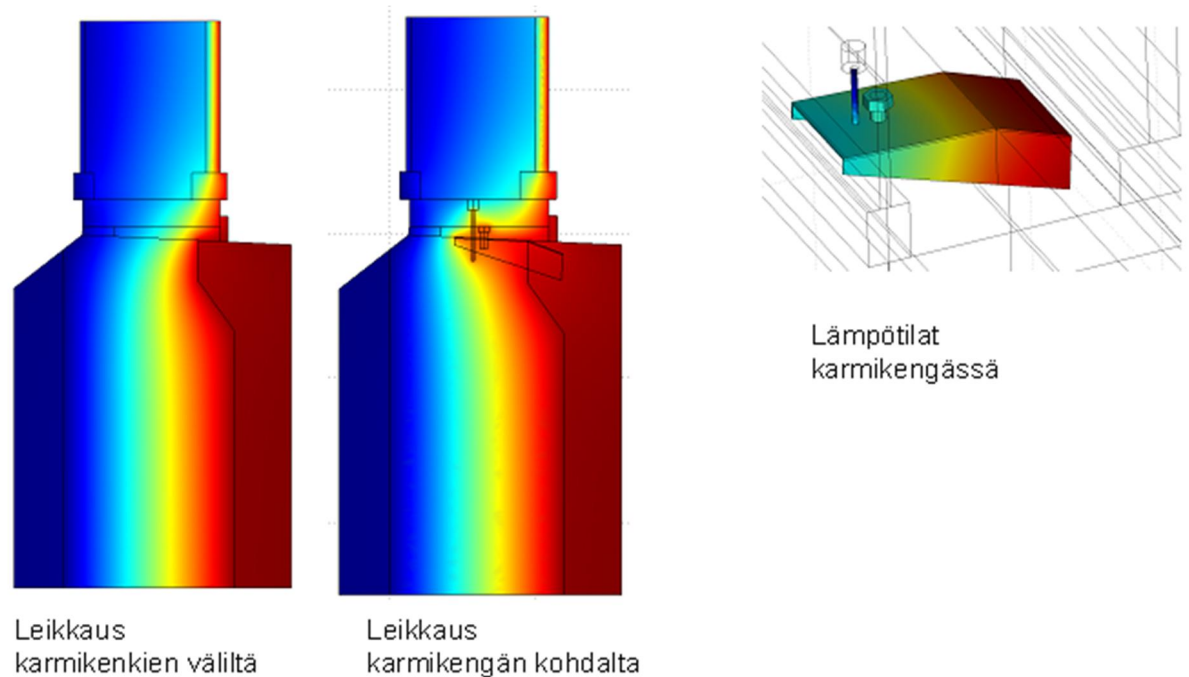


Kuva 25. Ryömintätilan tuuletusilmanvaihdon vaikutus alapohjan lämmönläpäisykertoimeen ja sokkeliliitoksen lineaariseen konduktanssiin taulukon 11 perustilanteessa.

Rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukkoarvo betoniseinän ja betonirunkoisen alapohjan liittymän viivamaiselle konduktanssille on $\Psi = 0,28 \text{ W/mK}$.

tanssissa (taulukko 12). MS2E-ikkunassa on taas kaksilasin eristyslasielementti molemmissa puitteissa ja siksi pienin lisäkonduktanssin arvo (taulukko 12).

Taulukosta 12 nähdään vielä, että ruostumattomasta teräksestä valmistetulla karmikengällä päästään hieman pienempään lisäkonduktanssiin.

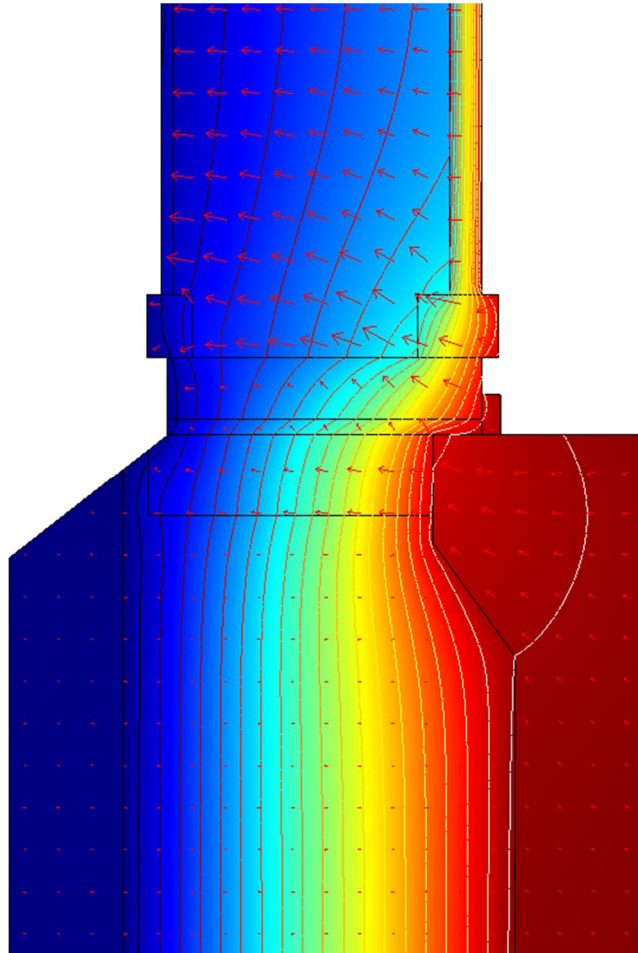


Kuva 27. Lämpötila ikkunan karmikenkäkiinnityksessä, ikkunatyyppejä MSE.

Taulukko 12. Ikkunan karmikenkäliitoksen viivamainen lisäkonduktanssi eri ikkunatyypeillä. Koskee kuvan 26 mukaista asennusta ja eristepaksuutta 240 mm.

Ikkunatyyppejä ja tilanne	Ψ W/Km
MSE (kolme lasia, sisäpuite kaksilasin)	0,039
MSE, karmikenkä ja ruuvit ruostumattomasta teräksestä	0,034
MS3E (neljä lasia, sisäpuite kolmelasin)	0,041
MS2E (neljä lasia, sisä- sekä ulkopuote kaksilasin)	0,026

Ikkunan kiinnittämiseen on aikaisemmin käytetty karmikengän sijaan apukarmia. Kuvassa 28 apukarmipuun mitat ovat 50 x 175 mm. Tämän liitoksen lisäkonduktanssi on MSE-ikkunalle 0,051 W/mK eli selvästi suurempi kuin karmikenkäkiinnityksessä.



Kuva 28. Lämpötilat asteen välein ja lämpövirtavektorit ikkunan apukarmikiinnityksessä, ikkunatyypin MSE. Ulko- ja sisälämpötilat ovat 0°C ja 20°C.

Rakentamismääräyskokoelman osan D5 taulukkoarvo ikkunan ja betoniseinän liitoksen viivamaiselle lisäkonduktanssille on 0,04 W/mK.

13 Rakennusosaliitosten kylmäsiltojen merkitys

Rakennuksen johtumislämpöhäviössä on mukana uusitun rakentamismääräyskoelman osan D5 mukaan myös rakennusosien liittämistä aiheuttavat kylmäsiltoja. Näiden merkitystä tarkastellaan seuraavassa käyttäen nelikerroksisen asuin-kerrostalon [6] mittoja ja tämän tutkimuksen rakenteita. Taulukossa 13 on rakennusosien lämmönläpäisykertoimilla lasketut lämpöhäviöt, jotka ovat yhteensä 590 W lämpötilaeron astetta kohti.

Taulukko 13. Rakennusosien johtumislämpöhäviöt nelikerroksissa asuin-kerrostalossa. Lämmönläpäisykertoimet koskevat likimain tämän tutkimuksen rakenteita.

	Ala A m ²	U W/m ² K	A*U W/K
Alapohja	703	0,13	91
Yläpohja	703	0,09	63
Ulkoseinät	1601	0,15	240
Ikkunat ja ovet	286	1	286
Rakennusosat yhteensä			590

Vastaavat rakennusosien välisten liitosten lisälämpöhäviöt ovat 82 W/K (taulukko 14). Liitosten lämpöhäviöt ovat tässä tapauksessa 14 prosenttia itse rakennusosien johtumislämpöhäviöistä. Alapohjaliitoksella ja ikkunoiden liitoksilla on suurin merkitys kun taas nurkkien merkitys on pieni.

Taulukko 14. Rakennusosien välisten liitosten johtumislämpöhäviöt nelikerroksissa asuin-kerrostalossa. Koskee tutkittua rakennetta.

	Pituus P m	Psi W/mK	P*Psi W/K
Ryömintätilainen alapohjaliitos	137	0,23	31
Yläpohjan ja seinän liitos	137	0,07	10
Ulkonurkka	72	0,06	4
Sisänurkka	24	-0,07	-2
Ikkuna- ja oviliitos	954	0,04	38
Rakenneliitokset yhteensä			82
Prosenttia U-arvoilla lasketusta			14

Yhteenveto

Tutkimuksessa on laskettu betonisandwich-elementtirakenteiden kylmäsiltoja Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden C4 ja D5 määrittelemällä tavalla käyttäen ympäristöministeriön opasta ja asiaankuuluvia standardeja.

Pistoansalle, diagonaaliensalle sekä sisäkuoresta ulkokuoreen menevälle nostolenkille voidaan käyttää rakentamismääräyskokoelman osan C4 laskentakaavaa lämmönläpäisykerroimen lisäykselle. Tässä tutkimuksessa on laskettu kaavassa tarvittava kerroin alfa (α) valituille rakenteille.

Rakennusosien välisten liitosten viivamaiselle lisäkonduktanssille saatiin taulukon 15 mukaiset arvot. Ne ovat joko samoja tai pienempiä kuin rakentamismääräyskokoelman osassa D5 taulukoidut ohjearvot. Nämä lukuarvot koskevat tutkittua rakennetta perusmuodossaan. Raportissa on esitetty tuloksia myös muunnetuille rakenteille, joissa on esimerkiksi perusrakenteesta poikkeava lämmöneristys tai ikkunatyyppejä.

Taulukko 15. Rakennusosien välisten liitoksen lisäkonduktanssi Ψ (W/mK). Koskee tutkittua rakennetta.

Liitos	RakMK D5	Tutkittu rakenne
Seinän ja ryömintätalaisen alapohjan liitos	0,28	0,23
Seinän ja yläpohjan liitos	0,08	0,08
Seinän ulkonurkka	0,06	0,06
Seinän sisänurkka	-0,06	-0,08
Ikkunan karmikenkäliitos	0,04	0,04

Esimerkkirakennuksessa rakennusosien välisten liitosten lisäkonduktanssi oli 14 prosenttia itse rakennusosien johtumislämpöhäviöistä. Alapohjaliitoksella ja ikkunoiden liitoksilla oli suurin vaikutus kokonaislämpöhäviöön.

Lähdeviitteet

1. C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristys. Ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, luonnos 27.10.2011.
2. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, luonnos 27.10.2011.
3. SFS-EN ISO 10211 (2008), Thermal bridges in building construction, Heat flows and surface temperatures, Detailed calculations.
4. SFS-EN ISO 6946 (2008), Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method.
5. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. Ympäristöministeriö, luonnos 20.9.2011.
6. Teikari, Minna. RET-malliasuinkeuhkon energiankulutuksen laskenta rakennuslupavaiheessa. Teknillinen korkeakoulu, LVI-laboratorio. 2005.