



Juha-Matti Vaara

ELEMENTTILIITTYMIEN KYLMÄSILTATARKASTELU

ELEMENTTILIITTYMIEN KYLMÄSILTATARKASTELU

Juha-Matti Vaara
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka, talonrakennuksen moduuli

Tekijä: Juha-Matti Vaara

Opinnäytetyön nimi: Elementtiliittymien kylmäsilta tarkastelu

Työn ohjaaja: Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: K2012 Sivumäärä: 51 + 7

Työn aiheena on 1.7.2012 voimaan tulevien energiamääräysten mukainen kylmäsilta tarkastelu ulkoseinäelementtien liittymiin. Tavoitteena oli selvittää elementtiliittymien aiheuttamien kylmäsiltojen lisäkonduktanssit ja saatuja tuloksia verrattiin Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa annettuihin ohjearvoihin. Tarkastelussa olivat mukana ulkoseinän ja alapohjan, ulkoseinän ja yläpohjan väliset liitokset. Lisäksi tarkasteltiin ulkoseinäelementtien väliset liitokset nurkissa ja seinän suoralla osalla sekä ikkunoiden ja ovien liittymät elementtiin.

Työssä käytettiin Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisia menetelmiä määrittämään rakenteiden U-arvot ja Ympäristöministeriön Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa esitettyjä menetelmiä rakenteiden kylmäsiltojen aiheuttamien lisäkonduktanssien laskemiseen. Tarvittavat rakenteiden lämpövirrat saatiin Comsol Multiphysics –laskentaohjelmasta, minkä jälkeen saatiin laskettua liitoksen ja liittyvien rakenteiden kytkentäkerroin. Kytkentäkerroimen avulla saatiin selvitettyä rakenteiden liitoksen lisäkonduktanssi, joka voidaan lisätä rakennuksen kokonaislämpöhäviöön johtumislämpöhäviön kautta.

Projektia aloitettaessa oletettiin Rakentamismääräyskokoelman viivamaisten lisäkonduktanssien ohjearvojen olevan suurempia kuin tutkimuksen kohteena olleiden kylmäsiltojen lisäkonduktanssit. Tutkimuksissa ohjearvot osoittautuivat suuremmiksi ulkoseinän ja yläpohjan välisessä liitoksessa sekä ikkunoiden ja ovien liittymissä. Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksessa sekä ikkunoiden ja ovien liittymissä ohjearvo oli suurempi kuin tutkittu lisäkonduktanssi. Nurkkaan sijoituissa ulkoseinäelementtien välisissä liitoksissa ohjearvot osoittautuivat pienemmiksi kuin tutkittujen rakenteiden arvot. Suuremmat arvot johtuivat elementtien kiinnitysten vaatimista rakenteista, joita on vaikea muuttaa tarvittavan tuen säilyttämiseksi. Rakenteiden kylmäsilta tarkastelu kannatti, sillä rakennuksen johtumislämpöhäviötä laskettaessa voidaan valita käytettäväksi pienempiä viivamaisten lisäkonduktanssien arvoja.

Asiasanat: kylmäsilta tarkastelu, lisäkonduktanssi, rakentamismääräykset, energiamääräykset, adiabaatti, kytkentäkerroin

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
SANASTO	5
1 JOHDANTO	6
2 LÄMMÖN JOHTUMINEN KYLMÄSILLOISSA	8
2.1 Kylmäsilta	9
2.2 Lisäkonduktanssien laskenta	11
2.3 Laskentaohjelmat	12
3 KYLMÄSILTOJEN TARKASTELU	16
3.1 U-arvojen laskentamenetelmä	17
3.2 Lisäkonduktanssien laskentamenetelmä	21
4 RAKENTEIDEN SIMULOINTI	23
4.1 Elementin liitos perustuksiin	26
4.2 Elementin liitos yläpohjaan	29
4.3 Ulkoseinien liitos nurkassa	32
4.4 Ulkoseinäelementtien liitos seinän suoralla osalla	37
4.5 Ikkunan ja oven liitos	39
5 KYLMÄSILTATARKASTELUN TULOKSET JA ARVIOINTI	44
6 YHTEENVETO	47
LÄHTEET	49
LIITTEET	51

SANASTO

Adiabaattireunaehto	Täydellinen lämmöneristys, joka ei ota huomioon, miten rakenneosat liittyvät muihin rakenteisiin.
Kylmäsilta	Rakenteessa oleva rakennusosa, joka on tehty viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta materiaalista.
Kytkenäkerto	Tarkasteltavan rakenteen läpäisevä lämpövirta, joka aiheutuu rakenteen eri puolilla vallitsevien olosuhteiden lämpötilaerosta.
Lisäkonduktanssi	Ilmoittaa rakennusosassa olevan kylmäsilan aiheuttaman lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi johtuvaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eripuolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.

1 JOHDANTO

Ympäristöministeriö julkaisee uudet, heinäkuun ensimmäisenä päivänä 2012 voimaantulevat energiamääräykset, joissa kylmäsiltojen tarkastelu on osa rakennuksen lämpöhäviöiden laskentaa. Uudet energiamääräykset ovat kiristyneet edellisistä noin 20 %. Rakenteiden U-arvot pysyvät ennallaan, mutta niihin vaikuttavien kylmäsiltojen aiheuttama lisäys on otettava huomioon. Energian hinnan nousu on eräs perustekijä, joka kannustaa rakentamaan energiatehokkaasti. (1, s. 6.)

Työn tavoitteena on selvittää rakenteiden välisten liitosten kylmäsiltojen aiheuttamat lisäkonduktanssit ja verrata niitä Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa annettuihin ohjearvoihin. Työssä tutkitaan Vieskan Elementti Oy:n valmistamien seinäelementtien liitosrakenteita, jotka ovat samanlaiset jokaisessa vuoden 2010 energiamääräykset täyttävässä talomallissa. Uusien talojen kokonaislämpöhäviöitä laskettaessa voidaan käyttää kylmäsiltojen aiheuttamille lisäkonduktansseille joko Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa annettuja ohjearvoja tai tässä työssä laskettuja arvoja.

Rakentamismääräyskokoelman uudistamisen on tarkoitus vähentää Suomen rakennuskannan kuluttamaa energiaa. Uusi määräyskokoelma ei koske korjausrakentamista, vaan ainoastaan uudisrakentamista. Tarkoituksena on siirtyä rakennuksen lämpöhäviöille perustuvasta tarkastelusta rakennuksen kokonaisenergiatarkasteluun. Tämä tarkastelumuoto ottaa huomioon eri energiamuodot niille määrätyillä primäärienergiakertoimilla. Nykyään rakennettavien rakennusten vaikutukset energiankulutukseen ja päästöihin kestävät vuosikymmeniä, koska rakennukset suunnitellaan pitkäikäisiksi. Vuoden 2012 jälkeen rakennetut rakennukset käsittävät puolet koko rakennuskannasta vuonna 2050. (1, s. 22; 2, s. 1.)

Uusien energiamääräysten tarkoituksena on vauhdittaa energiatehokkaampaa rakentamista Suomessa. Matalaenergiarakentaminen on jo hyvässä vauhdissa, koska energiankulutuksen pienentäminen onnistuu helposti pelkästään vaipan eristävyuden parantamisella. Paksumpien eristeiden vuoksi rakenteen kosteus-

tekniset ominaisuudet voivat muuttua. Passiivirakentamisessa energiansäästö perustuu rakennuksen vaipan hyvään lämmöneristävyyteen ja tiiveyteen sekä ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon. Vaipan lämpöhäviöiden pienentäminen yksistään lämmöneristykseen parantamisella ei ole kustannustehokasta, vaan lisäksi ilmanpitävyyttä on syytä parantaa. (1, s. 6.)

Rakennusten suunnittelussa tulisi välttää turhia kulmia ja nurkkia ulkoseinissä, sillä ne lisäävät kylmäsiltojen aiheuttamaa lämpöhäviötä. Kylmäsiltojen suhteellinen osuus kasvaa, kun rakennuksen vaipan U-arvot paranevat. Ilmeisimmät kylmäsiltojen paikat ovat ala- ja yläpohjan liitokset, ulkoseinien nurkat sekä ikkuna- ja oviliitokset. Rakennuksen vaipan lävistävien läpivientien määttä tulisi minimoida pistemäisten kylmäsiltojen välttämiseksi. Rakentamismääräyksissä on aiemmin otettu huomioon vain säännölliset kylmäsilat, kuten runkotolpat, tiili-muurauksen sidelangat, ansaat sekä kannakset, jotka sisältyvät rakennusosan lämmönläpäisykertoimeen. (1, s. 11–12; 3, s. 4.)

Ikkunoiden osalta kylmäsilta-vaikutus kohdistuu pääasiassa karmeihin ja asenusvaran tiivistämiseen. Lasiosa täyttää helposti vaadittavan U-arvon, mutta ikkunan karmit ovat käytännössä rakennuksen vaipan lävistäviä puurakenteita ilman mitään eristeitä. Karmien kylmäsilta-vaikutusta voisi helposti vähentää katkaisemalla karmi esimerkiksi polyuretaanieristeellä. (1, s. 15.)

2 LÄMMÖN JOHTUMINEN KYLMÄSILLOISSA

Lämmön olemuksen kuuluu, että lämpötilat pyrkivät tasoittumaan. Lämpövirran suunta on siis lämpimämmästä kylmempään. Lämpö siirtyy paikasta toiseen kolmella tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Kylmäsiltojen osalta kyseessä oleva siirtymismuoto on johtuminen, jossa lämpöenergia siirtyy molekyylistä toisiin molekyyliin. (4, s. 12.)

Lämmön johtuminen tapahtuu materiaaleissa eri tavoin, mikä riippuu sekä lämpötilasta että kosteudesta. Lämmön johtumisessa voidaan puhua lämmön virtauksesta, koska molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen. Kiinteissä aineissa ja nesteissä esiintyy lämmön johtumista ja virtaussuunta on lämpimästä kylmempään. (5, s. 15; 6, s. 3.)

Johtumisessa molekyylien liike-energian siirtymistä välittäviä energian muotoja ovat atomien ja molekyylien etenevä liike, jota sanotaan translaatioksi kaasuisissa ja nesteissä, värähtely kiinteissä aineissa sekä vapaat elektronit johteissa. Aineen kykyä tehdä työtä sisäisen energiansa perusteella kutsutaan lämmöksi. Tämä sisäinen energia siirtyy paikasta toiseen johtumisen vuoksi ja voidaan puhua lämmön virtauksesta, vaikka mitään virtausta ei todellisuudessa olekaan. (7, s. 42.)

Tiheämmässä materiaaleissa lämpö johtuu paremmin kuin paljon ilmaa sisältävissä materiaaleissa. Koska ilma eristää hyvin lämpöä, lämmöneristeiden eristyskyky perustuu ilman paikallaan pysymiseen. Rakenteissa olevia, ympäröivää rakennetta paremmin lämpöä johtavaa rakennusosaa kutsutaan kylmäsiltsiksi, kun taas Suomen ulkopuolella käytetään termiä 'lämpösilta'.

Rakennusaineen huokosissa oleva kosteus lisää lämmönsiirtoa, koska veden lämmönjohtavuus on noin 20-kertainen ilmaan verrattuna. Aineen kosteuspiitoisuuden noustessa vesi korvaa osan ilmasta huokosissa ja siten parantaa lämmönjohtavuutta. Jo pienenkin diffuusiovirran vaikutus on suuri veden suuren höyrystymislämmön takia. (7, s. 51–52.)

2.1 Kylmäsilta

Kylmäsilta tarkoittaa rakenteessa olevaa rakennusosaa, joka on tehty viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta materiaalista. Kylmäsilan muodostavan rakennusosan kohdalla pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa suurempi verrattuna viereiseen alueeseen. Viivamainen kylmäsilta tarkoittaa rakenteen pinnan suunnassa samanlaisena jatkuvaa kylmäsiltaa. (8, s. 5.)

Rakenteeseen syntyy kylmäsilta silloin, kun rakennusosan lämmöneristystä joudutaan paikallisesti ohentamaan lujuus- tai muista syistä. Kylmäsilta voi syntyä myös, jos lämmöneristyskerroksen läpäisee jokin hyvin lämpöä johtava rakenne, kuten esimerkiksi teräsranka. Tavallisimpia kylmäsiltojen esiintymispaikkoja ovat mm. sellaiset rakennusosien liittymät, joissa lämmöneriste on paikallisesti ohut tai se joudutaan läpäisemään laatalla, palkilla tai muulla sellaisella. (7, s. 76.)

Kylmäsilan kohdalla rakennusosan lämpötila on poikkeava ympäröivään rakenteeseen verrattuna. Seurauksena voi olla paikallinen lämpöolojen heikkeneminen, pinnan likaantuminen ja pahimmillaan kosteuden kerääntyminen rakenteisiin. Rakenteiden suunnittelussa on pyrittävä estämään kosteushaittojen esiintyminen ja oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan Suomen Rakentamismääräyskoelman osan D2 mukaiset lämpötilat. (6, s. 12.)

Yleensä kylmäsilat muodostavat vain pienen osan rakennusosien kokonaispinta-alasta. Paremmasta lämmönjohtavuudesta johtuen sisäpintojen lämpötila on matalampi kuin rakennusosan muissa kohdissa, joissa on pienempi lämmönjohtavuus. Joissakin huonosti suunnitelluissa tai toteutetuissa tapauksissa lämpötila voi laskea niin alhaiseksi, että vesihöyryä alkaa tiivistyä kylmäsilan sisäpintaan. (4, s. 20.)

Paljon lämpöenergiaa johtava kylmäsilta voi aiheuttaa rakennuksen vaipan sisäpinnalle kosteuden tiivistymistä, likaantumista ja homekasvustoa. Koska kylmäsilan kohdalla rakennusvaipan sisäpinnan lämpötila on alhaisempi, kylmäsilan läheisyydessä ilman suhteellinen kosteus on korkeampi kuin muualla sisätilas-

sa. Eristekerroksen kasvaessa kylmäsillan kautta johtuvan lämpöenergian vaikutus lisääntyy. (9, s. 943.)

Naulat, tiiliseet tai muut vastaavat lämmöneristekerroksen lävistävät pistemäiset rakennusosat muodostavat pistemäisiä kylmäsiltoja. Viivamaisia kylmäsiltoja muodostavat rakennusosat, joiden poikkileikkaus jatkuu samanlaisena rakenteen pinnan suuntaisesti, esimerkiksi ala- ja yläjuoksut. Myös ikkunoissa käytettävien lasielementtien välissä olevat listat aiheuttavat lineaarisen lisäkonduktanssin rakenteeseen.

Rakenteellisella kylmäsillalla tarkoitetaan rakenteen kohtaa, jossa materiaalin lämmönjohtavuus tai rakenteen paksuus muuttuu. Tällaisia tyypillisiä kylmäsiltoja ovat muun muassa ikkunoiden ja ovien liitokset seinään, perustuksen ja ulkoseinän liitos sekä välipohjan ja ulkoseinän liitos. Kun rakenne vaihtaa suuntaa, puhutaan geometrisistä kylmäsiltoista. Ulkoseinien nurkat, ala- ja yläpohjan liitokset ulkoseiniin ovat yleisimpiä geometrisiä kylmäsiltoja. (1, s. 29.)

Kylmäsiltoja, jotka ulottuvat höyrynsulun rajapintaan asti, aiheuttavat kyseisen rajapinnan viilenemistä ja siten mahdollisen riskikohdan kosteuden tiivistymisen kannalta. Matalampaan lämpötilaan mahtuu vähemmän kosteutta, joten kosteus saattaa alkaa tiivistyä höyrynsulun rajapintaan. Kosteuden tiivistyminen aiheuttaa ongelmia kylmäsiltojen rakenteissa ja niiden läheisyydessä, jos rakenteen lämpötila laskee liian alhaiseksi. Kastepisteen muodostuminen on suurempi ongelma rakenteiden sisällä kuin rakenteen pinnoilla. Jos pinnan tai rakenteen suhteellinen kosteus nousee korkeaksi, on lämpötilan laskiessa homeriski ilmeinen. (1, s. 29–38.)

Eristeen lämmönjohtavuuden kasvaessa lisäkonduktanssi lisääntyy. Sandwich-tyyppisissä betoniulkoseinissä sisäkuoren paksuntaminen ei juuri vähennä ulkonurkan lämpöhäviötä, vaan pienentää seinän sisäpinta-alaa. Tästä syystä seinän lämmönläpäisykertoimilla laskettava vertailulämpöhäviö pienenee, mutta viivamainen lisäkonduktanssi kasvaa. Jos kahdella rakenteella on sama U-arvo mutta erilainen eristepaksuus, on ohuemmalla rakenteella pienempi lisäkonduktanssi. (3, s. 17.)

Rakenneosien väliset liittymät, kuten ulkoseinän ja alapohjan liitokset, ovat epäsäännöllisiä kylmäsiltoja, jotka huomioidaan liitosten viivamaisten lisäkonduktanssin avulla. Epäsäännölliset kylmäsiltoja pitää huomioida Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan johtumislämpöhäviön avulla. Rakennusosien välisten liitosten ja niiden epäsäännöllisten kylmäsiltojen aiheuttama lämpöhäviö otetaan huomioon lisäkonduktanssilla. Lisäkonduktanssilla kuvataan normirakenteen ja tutkittavan rakenteen välistä ero lineaarisessa lämmönjohtumisessa. (1, s. 43.)

Kylmäsiltoja voidaan kuvata lämpökameralla rakennusvaiheen aikana tai valmiissa rakennuksessa jopa käyttövaiheen aikana. Lämpökuvaukset suoritetaan normaalissa käyttöpaineessa, jolloin rakennuksen epätiivetyshäviöt eivät korostu, kuten tiiveysmittausten ensimmäisessä vaiheessa on tarkoituksena. (10.)

Rakenteet tulee suunnitella siten, ettei rakenteisiin muodostu kylmäsiltoja, jotka laskevat pintojen lämpötilaa viihtyvyyden kannalta liian matalaksi. Ulkoseinissä, alapohjassa ja perustuksessa lämmöneristys sijoitetaan niin, ettei rakenteisiin muodostu haitallisia kylmäsiltoja toisiinsa nähden. (11, s. 18.)

2.2 Lisäkonduktanssien laskenta

Käytännön suunnittelutyötä varten tarvitaan mahdollisimman nopeita ja tarkkoja laskentamenetelmiä korjattujen lämmönjohtavuuksien laskemiseksi. Yksi tällainen menetelmä on käyttää lisäkonduktansseja. Lisäkonduktanssi Ψ kuvaa ylimääräistä lämpövirtaa, joka siirtyy kylmäsiltojen aiheuttamana rakenteen läpi. Lisäkonduktanssit ilmaistaan samalla tavoin kuin kylmäsiltojenkin, joko pistemäisinä (W/K) tai jatkuvina (W/mK). (4, s. 20.)

Rakennusvaipan lämpöhäviöt lasketaan sisämittojen mukaan. Kylmäsiltojen merkitystä halutaan korostaa, jotta liitokset suunniteltaisiin yksityiskohtaisemmin mahdollisten kosteusvaurioiden ennaltaehkäisemiseksi. Kylmäsiltojen laskentaa joudutaan yleensä käsittelemään 2- tai 3-ulotteiseen lämmönsiirtymistapahtumaan sopivalla numeerisella menetelmällä. (12, s. 20; 7, s. 76.)

Rakennusosan kokonaislämmönvastusta ei voida määrittää ylä- ja alalikiarvoja laskemalla, jos rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvon

suhde on suurempi kuin 1,5 tai rakenteessa on metallirakenteista aiheutuneita säännöllisiä kylmäsiltoja. Rakennusosan kylmäsiltoja on tällöin huomioitava tarkemmalla laskentamenetelmällä. (11, s. 6.)

Ellei kylmäsiltoja voida laskea standardin SFS-EN-ISO 10211 mukaan, pitää se laskea standardin SFS-EN-ISO 13370 mukaan. Kylmäsiltoja voidaan laskea myös ympäristöministeriön laskentaohjeen tai edellä mainittujen standardien mukaan. Standardien mukaan laskettaessa on käytettävä muiden kaavojen mukaisia lämmönläpäisykertoimien ja pinta-alojen määritelmiä tai on muuten varmistuttava, että rakennusvaipan johtumislämpöhäviö vastaa käytettävää kaavaa. (13, s. 18; 9, s. 985.)

2.3 Laskentaohjelmat

Kylmäsiltojen simulointiin on käytettävissä monentasoisia ohjelmia, jotkut ovat jopa ilmaisia. Ohjelmissa on oltava vähintään kaksiulotteinen lämpökentän laskentamahdollisuus jatkuvuustilassa. Yleiskäyttöiset laskentaohjelmat soveltuvat monenlaisiin tehtäviin ja niiden toimivuus on testattu huolellisesti. Suppeammat johtumislämmönsiirron ohjelmat ovat helppokäyttöisempiä ja saattavat laskea jopa lineaarisen lisäkonduktanssin ψ suoraan. (14, s. 13.)

Ohjelmista suurin osa on validoitu laskemalla standardin EN ISO-10211 neljä esimerkkiä, mikä antaa jonkinlaisen käsityksen ohjelmien laadusta. Tällä ei vielä voida taata ohjelmien toimivuutta muunlaisissa tehtävissä. Standardien testaus-esimerkit koskevat ainoastaan suorakulmaista laskentageometriaa, eivätkä esimerkit ota huomioon muun muassa maaperän lämmönsiirtoa. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty joitakin kylmäsiltojen laskentaan käytettäviä ohjelmia. (14, s. 13.)

TAULUKKO 1. Yleiskäyttöisiä laskentaohjelmia, joilla voidaan laskea myös joh-
tumislämmönsiirtoa (14, s. 14)

Ohjelman nimi	3D	Transientti	Vapaa verk- ko	ψ - laskenta	Lisenssi	Validointi
Ansys Multiphysics	x	x	x		Kaupallinen	
Ansus CFX	x	x	x		Kaupallinen	
Ansys Fluent	x	x	x		Kaupallinen	
Phoenics	x	x	x		Kaupallinen	
Comsol Multiphysics	x	x	x		Kaupallinen	EN ISO 10211: 2007
SAMCEF Thermal	x	x	x		Kaupallinen	
Abaqus FEA	x	x	x		Kaupallinen	

TAULUKKO 2. Johtumislämmönsiirron laskentaohjelmia (14, s. 14)

Ohjelman nimi	3 D	Transientti	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: 2008
KOBRU86		x		x	Kaupallinen	EN ISO 10211: 2009
RadTherm	x	x	x		Kaupallinen	
Solido	x		x		Kaupallinen	EN ISO 10211: 2009
TAS ambiens		x			Kaupallinen	
Therm			x		Ilmainen	
Trisco/Voltra	x	x		x	Kaupallinen	EN ISO 10211: 2009
Unorm	x			x	Ilmainen	EN ISO 10211: 2007 EN ISO 1077-2: 2003
WUFI 2D		x			Kaupallinen	EN ISO 10211: 2009

FEM-laskenta

FEM- tai FEA-laskenta on numeerinen menetelmä, jolla etsitään likimääräisiä ratkaisuja osittaisdifferentiaaliyhtälöille sekä integraaliyhtälöille variaatiomenetelmällä. FEM on kehittynyt korvaamattomaksi avainteknologiaksi kehittyneiden teknisten järjestelmien simuloinnissa ja mallintamisessa. (15, s. 1–2.)

Laskentamenetelmä kehitettiin, kun maa- ja vesirakennus- sekä ilmailutekniikan piti ratkaista monimutkaisia elastisuus- ja rakenneanalyysiongelmia. Lopullisen menetelmän kehitti Olgierd Zienkiewicz vuonna 1947 Alexander Hrennikoffin ja Richard Courantin töiden pohjalta. (16.)

3 KYLMÄSILTOJEN TARKASTELU

Ympäristöministeriön uusien 1.7.2012 voimaan tulevien energiamääräysten mukaan rakennuksen lämpöhäviöt lasketaan rakennuksen vaipan sisämittojen perusteella. Lämpöhäviölaskuissa pitää ottaa huomioon rakenteissa ja niiden liitoksissa olevat kylmäsilat. Lievennyksenä sanotaan, ettei rakennusvaipan yksittäisiä kylmäsiltoja tarvitse huomioida. (17, s. 23.)

Ympäristöministeriön uusissa energiamääräyksissä esitetään kylmäsiltojen tarkastelussa mahdollisuus käyttää lisäkonduktansseille annettuja ohjearvoja. Taulukoiden 3, 4 ja 5 ohjearvot ovat hyvin yleispiirteisiä, joita voidaan käyttää, kun suunnitteluarvoja ei ole käytettävissä. Ohjearvoja ei voida käyttää, jos liitoksia ei ole toteutettu hyvän rakennustavan mukaisesti tai ei ole pyritty minimoimaan liitokseen syntyviä kylmäsiltoja. Rakenteiden toteutus vaikuttaa suuresti lämmön johtumiseen. (13, s. 17.)

TAULUKKO 3. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsilan aiheuttamalle lisäkonduktanssille (ψ_k) ulkoseinän ja alapohjan, ulkoseinän ja välipohjan sekä ulkoseinän ja yläpohjan välisissä liitoksissa joillakin runkomateriaaleilla (13, s. 18)

	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	0,08			0,06
hirsi			0,04			0,00	0,11			0,09

TAULUKKO 4. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsiilan aiheuttamalle lisäkonduktanssille (ψ_k) ulkoseinien välisissä nurkkaliitoksissa sekä ovi- ja ikkunaliitoksissa joillakin runkomateriaaleilla (13, s. 18)

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

Taulukossa 5 olevat lisäkonduktanssien ohjearvot on asetettu reilusti varmalle puolelle. Suurin osa todellisista lisäkonduktansseista on vain murto-osa esitetyistä.

TAULUKKO 5. Ohjearvot viivamaiselle lisäkonduktanssille (ψ_k) liitoksissa, joissa ei ole annettu erillistä arvoa taulukoissa (13, s. 18)

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

Tarkasteltavana on alapohjan ja ulkoseinän välinen liitos, yläpohjan ja ulkoseinän välinen liitos, ulkoseinien välinen liitos sisä- ja ulkonurkassa. Lisäksi tutkittiin ulkoseinäelementtien välinen liitos suoralla seinän osuudella sekä oven ja ikkunan liitos elementtiin.

3.1 U-arvojen laskentamenetelmä

Rakenteen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 1 (11, s. 6).

$$U = 1 / R_T$$

KAAVA 1

U = rakenteen lämmönläpäisykerroin (W/m^2K)

R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus (m^2K/W)

Jos rakenne on epätasa-aineinen, esimerkiksi puurunkoinen ulkoseinä, joka on eristetty mineraalivillalla runkotolppien välistä, lasketaan rakenteen kokonaislämmönvastukselle ylä- ja alalikiarvot. Kokonaislämmönvastus R_T saadaan näiden keskiarvosta. Rakennusosan kokonaislämmönvastus lasketaan kaavalla 2. (11, s. 7.)

$$R_T = (R_T' + R_T'')/2$$

KAAVA 2

R_T' = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo (m^2K/W)

R_T'' = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo (m^2K/W)

Epätasa-aineisen rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo lasketaan kaavalla 3 (11, s. 6).

$$1/R_T' = f_a / R_{Ta} + f_b / R_{Tb} + \dots + f_n / R_{Tn}$$

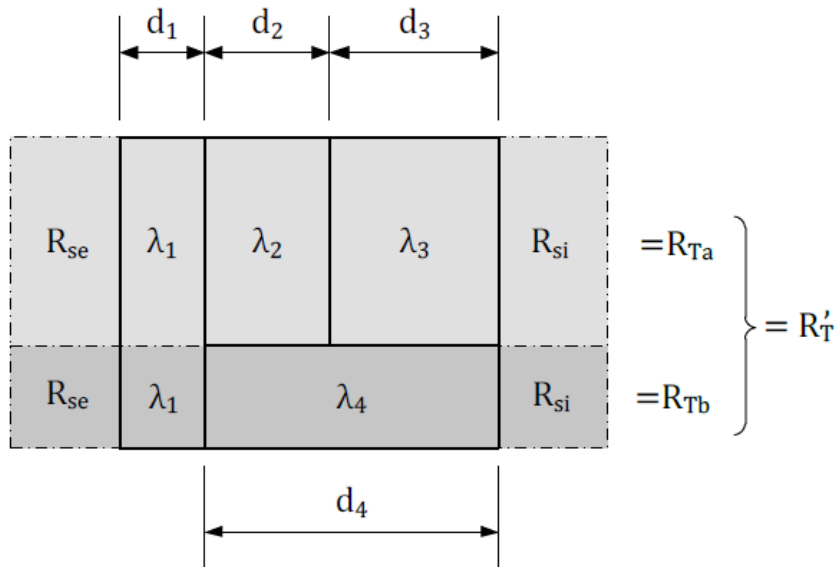
KAAVA 3

R_T' = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo (m^2K/W)

f_a, f_b, \dots, f_n = lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan kohtisuorasta pinta-alasta

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tn}$ = lohkojen a, b, ..., n kokonaislämmönvastukset (m^2K/W)

Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvoa laskettaessa on hyvä huomioida käytettävä lohkojako, joka esitetään kuvassa 1. Lohkojako eroaa hieman rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvoa laskettaessa käytävästä jaosta.



KUVA 1. Esimerkki rakennusosan lämmönvastuksen yläikiarvoa laskettaessa käytettävistä lohkoista (11, s. 9)

Epätasa-aineisen rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo laskeaan kaavalla 4 (11, s. 6).

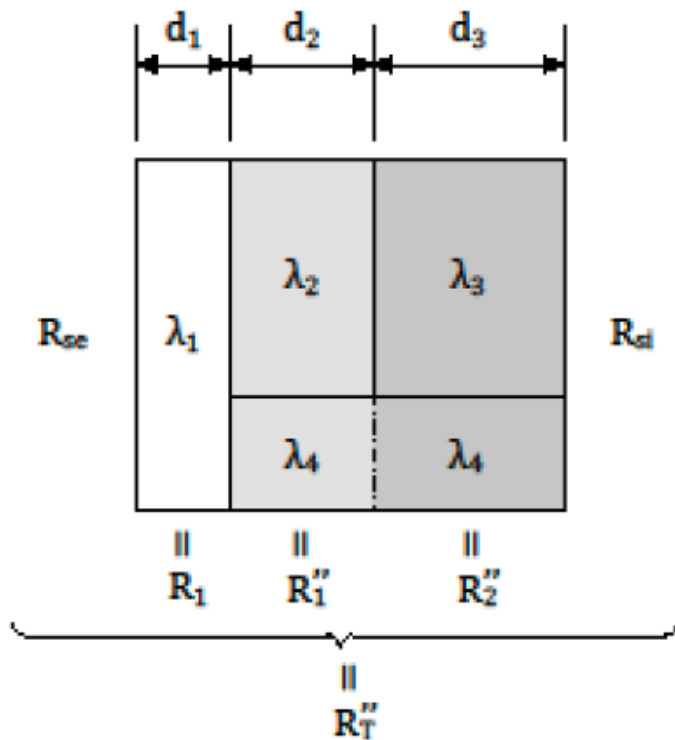
$$1/R_j'' = f_a / R_{ja} + f_b / R_{jb} + \dots + f_n / R_{jn} \quad \text{KAAVA 4}$$

R_j'' = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n yhteenlaskettu lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

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

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

Kuvassa 2 on esitetty lohkojako, jota käytetään kun lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvoa.



KUVA 2. Esimerkki rakennusosan lämmönvastuksen alalikiarvoa laskettaessa käytettävistä kerroksista (11, s. 9)

Lämmönjohtavuudeltaan erilaisten rinnakkaisten lohkojen lämmönvastuksen yhdistämisen jälkeen rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo lasketaan kaavalla 5 (11, s. 8).

$$R_T'' = R_{si} + (R_1'' + R_2'' + \dots + R_j'') + (R_1 + R_2 + \dots + R_k) + R_{se} \quad \text{KAAVA 5}$$

R_T'' = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{si} = sisäpuolen pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_{se} = ulkopuolen pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

$R_1'', R_2'', \dots, R_j''$ = rakennusosan kerroksissa a, b, ..., j olevien rinnakkaisten lohkojen yhdistetyt lämmönvastukset ($\text{m}^2\text{K/W}$)

R_1, R_2, \dots, R_k = rakennusosan tasa-aineisista ja tasapaksuisista ainekerroksista muodostuvien kerrosten 1, 2, ..., k lämmönvastukset ($\text{m}^2\text{K/W}$)

Rakennusosan korjattu lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 6 (11, s. 9).

$$U_c = U + \Delta U \quad \text{KAAVA 6}$$

U_c = rakennusosan korjattu lämmönläpäisykerroin (W/m²K)

U = rakennusosan lämmönläpäisykerroin (W/m²K)

ΔU = lämmönläpäisykerroimen korjaustermi (W/m²K)

Lämmönläpäisykerroimen korjaustermi lasketaan kaavalla 7 (11, s. 10).

$$\Delta U = \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r \quad \text{KAAVA 7}$$

ΔU = lämmönläpäisykerroimen korjaustermi (W/m²K)

ΔU_f = mekaanisista kiinnikkeistä aiheutuva korjaustekijä (W/m²K)

ΔU_g = ilmaraoista aiheutuva korjaustekijä (W/m²K)

ΔU_g = käännytyistä katoista aiheutuva korjaustekijä (W/m²K)

ΔU_ψ = viivamaisista kylmäsilloista aiheutuva korjaustekijä (W/m²K)

3.2 Lisäkonduktanssien laskentamenetelmä

Epäsäännöllisten kylmäsiltojen vaikutus lisätään koko rakennuksen lämpöhäviöön johtumishäviön avulla, joka lasketaan kaavalla 8 (14, s. 7).

$$H_{\text{joht}} = \sum U_{\text{ulkoseinä}} * A_{\text{ulkoseinä}} + \sum U_{\text{yläpohja}} * A_{\text{yläpohja}} + \sum U_{\text{alapohja}} * A_{\text{alapohja}} + \sum U_{\text{ikkuna}} * A_{\text{ikkuna}} + \sum U_{\text{ovi}} * A_{\text{ovi}} + \sum_k l_k * \Psi_k + \sum_j X_j \quad \text{KAAVA 8}$$

H_{joht} = johtumislämpöhäviö (W/K)

U = rakennusosan lämmönläpäisykerroin (Wm²/K)

A = rakennusosan pinta-ala (m²)

l_k = rakennusosien välisten liitosten aiheuttaman viivamaisen kylmäsilan pituus (m)

Ψ_k = rakennusosien välisten liitosten aiheuttaman viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssi (W/mK)

X_j = rakennusosan lämmönläpäisykerroin (W/K)

Käyttämällä kaavaa 9 saadaan lisäkonduktanssille Ψ oikea arvo (14, s. 13). Kaavassa verrataan simuloimalla saatua liitoksen kytkentäkerrointa käsin laskettuun U-arvoon.

$$\Psi = L_{2D} - \sum U_j * l_j$$

KAAVA 9

Ψ = viivamainen lisäkonduktanssi (W/m²K)

L_{2D} = kaksiulotteisella laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekniinen kyt-
kentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakenteille (W/mK)

l_j = mallissa kuvatun rakenneosan j pituus (m) , jolla lämmönläpäisykerrointa U_j
voidaan soveltaa

U_j = liittyvän rakenneosan lämmönläpäisykerroin (W/m²K)

KytKentäkerroin L_{2D} lasketaan kaavalla 10 (14, s. 35).

$$L_{2D} = (\Phi_n + \Phi_m) / (\theta_i - \theta_e)$$

KAAVA 10

Φ_n, Φ_m = rakenneosan n, m lämpövirta (W/m)

θ_i = sisälämpötila (K)

θ_e = ulkolämpötila (K)

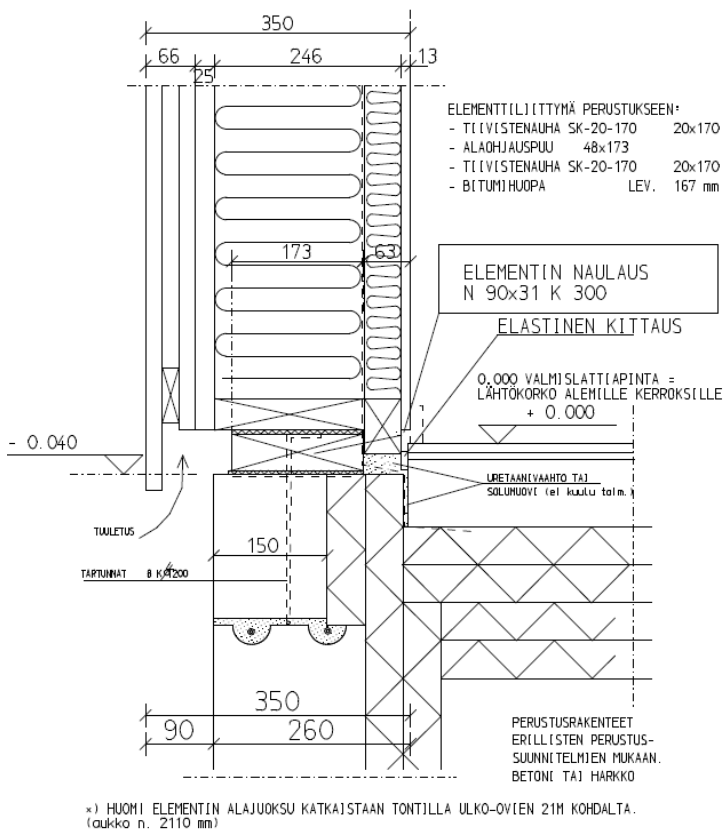
4 RAKENTEIDEN SIMULOINTI

Laskenta aloitettiin piirtämällä rakennedetailit yksinkertaisempaan muotoon Autocad-ohjelmalla. Therm- ja Comsol Multiphysics -ohjelmien käytön vuoksi piirustuksista poistettiin materiaalimerkinnot. Ulkoseinän U-arvon käsinlaskennassa käytettiin ylä- ja alalikiarvomenetelmää, koska uudet energiamääräykset niin vaativat. Saadut U-arvot tarkistettiin DOF-Lämpö-ohjelmalla ja tulokset vastasivat toisiaan.

Ulkoseinän (kuva 3) vuoden 2010 energiamääräykset täyttävä rakenne on sisällepäin lukien seuraava:

- kipsilevy EK 13 mm
- pystykoolaus 48x50 mm + välissä mineraalivilla 50 mm
- höyrynsulkumuovi 0,2 mm
- puurunko 42x200 mm + välissä mineraalivilla 200 mm
- tuulensuojalevy 25 mm
- ulkoverhous koolausrakenteineen.

OHJEELLINEN ALAPOHJALITTYMÄ (runko 42x198 +48x48 PYSTYKODLAUS)



KUVA 3. Ulkoseinäelementin rakenne

Rakenteita laskettaessa materiaaleille pitää olla joko valmistajan tai Suomen Rakentamismääräyskokoelman määrittelemä lämmönjohtavuus (λ_U) sekä pintavastukset. Höyrynsulkumuovia ei otettu huomioon missään laskelmissa, mutta muille rakennusmateriaaleille käytettiin seuraavia lämmönjohtavuuksia:

- puu 0,12 W/mK
- mineraalivilla 0,037 W/mK
- tuulensuojalevy 0,050 W/mK
- kipsilevy EK13 0,15 W/mK.

Taulukossa 6 esitetään Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa C4 annetut pintavastusten arvot. Rakenteiden kokonaislämpövirtoja Comsol Multiphysics -ohjelmalla laskettaessa yläpohjan sisäpintavastuksena käytettiin arvoa 0,10 m²K/W ja seinien sisäpintavastuksena arvoa 0,13 m²K/W. Yläpohjan kylmäsiltoja laskettaessa ullakkotilassa ulkopintavastuksena käytettiin arvoa 0,20

m^2K/W taulukon 7 mukaan. Comsol Multiphysics -ohjelmaa käytettäessä ulko- lämpötilana käytettiin $0\text{ }^\circ\text{C}$ ja sisälämpötilana $1\text{ }^\circ\text{C}$ lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan. Lämpövirtakuvia Therm-laskentaohjelmalla simuloitaessa käytettiin ohjelmassa ennalta määritetyjä lämpötiloja, jotka ovat ulkona $-18\text{ }^\circ\text{C}$ ja sisällä $21\text{ }^\circ\text{C}$.

TAULUKKO 6. Rakenneosan sisä- ja ulkopuolen pintavastukset (11, s. 22)

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

Taulukossa 7 on esitetty ullakkotilassa olevalle ilmatilalle käytettäviä eri lämmönvastuksia, jotka riippuvat katon katemateriaalista sekä aluskatteesta (11, s. 24).

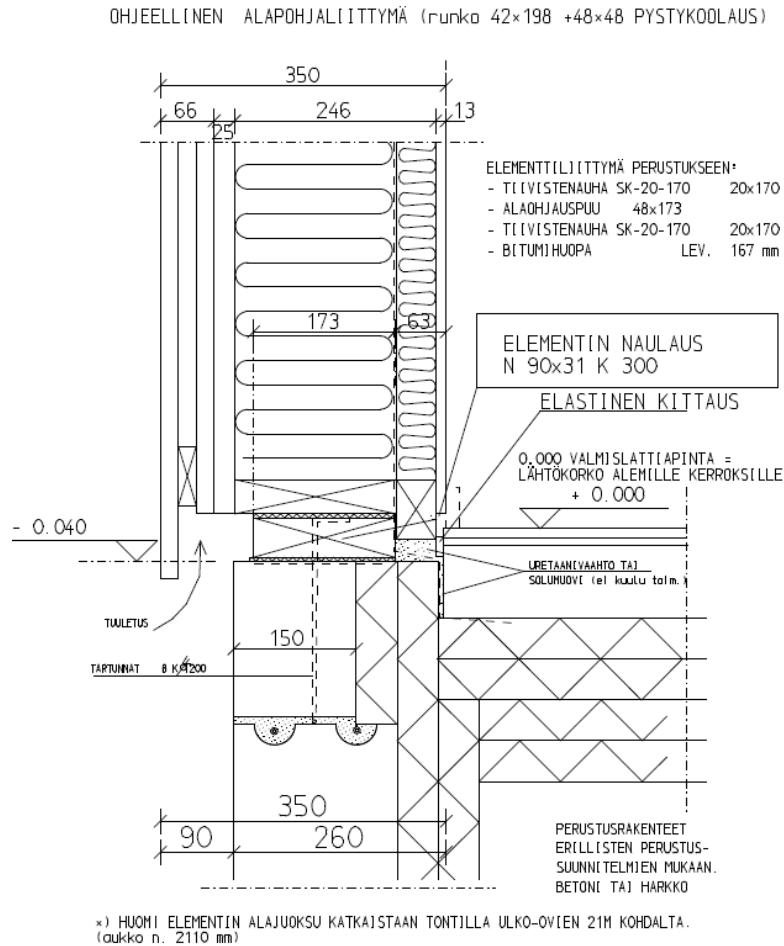
TAULUKKO 7. Katon ilmatilan lämmönvastus (11, s. 24)

Katon rakennetyyppi	Lämmönvastus R_u m^2K/W
Kate ilman aluskatetta	0,06
Tiilikatto, peltikatto tai muu vastaava vesikate aluskatteella tai sitä vastaavalla ainekerroksella	0,20
Kuten edellinen, mutta matalaemissiviteettipinta (esimerkiksi alumiinipinnoite) aluskatteen alapinnassa	0,30
Yhtenäinen kermikate aluskatteineen tai vastaava raoton vesikate	0,60

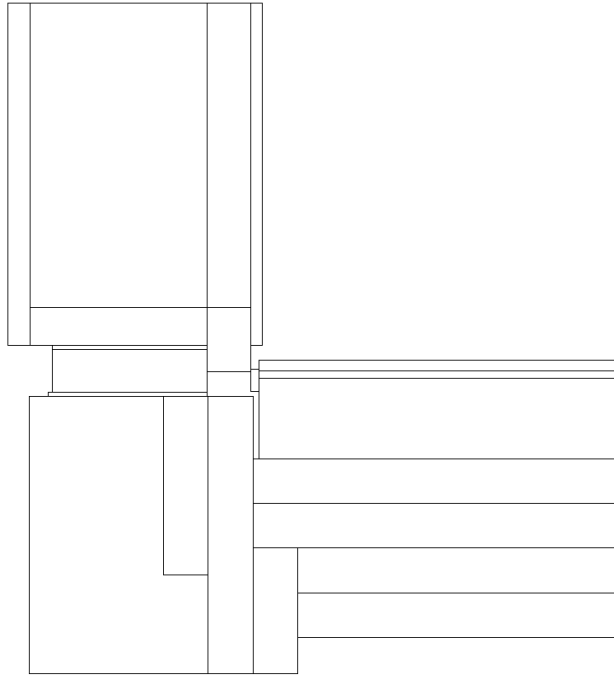
Liittyvien rakenteiden lämpövirrat saatiin Comsol Multiphysics -laskentaohjelmasta, jossa saadut arvot käsiteltiin suoraan kytkentäkertoimen muotoon. Laskennassa käytettävillä lämpötiloilla ei ole merkitystä, koska ohjelman antama lämpövirta jaetaan ulko- ja sisälämpötilojen erolla. Ympäristöministeriön laskentaoppaassa käytetään lämpötilaerona yhtä $K:iä$, mutta laskennassa voidaan käyttää suurempaakin lämpötilaeroa, koska lämpövirta kasvaa samassa suhteessa lämpötilaeron kanssa.

4.1 Elementin liitos perustuksiin

Seinäelementti liitetään perustukseen alaohjauspuulla, joka toimii kiinnitysalustana. Rakenteeseen muodostuu kylmäsilta elementin alajuoksun ja perustuksen alaohjauspuun kohdalle. Kuvassa 4 on esitetty rakennedetalji liitoksesta ja kuvassa 5 yksinkertaistettu rakenne laskentaohjelmia varten.

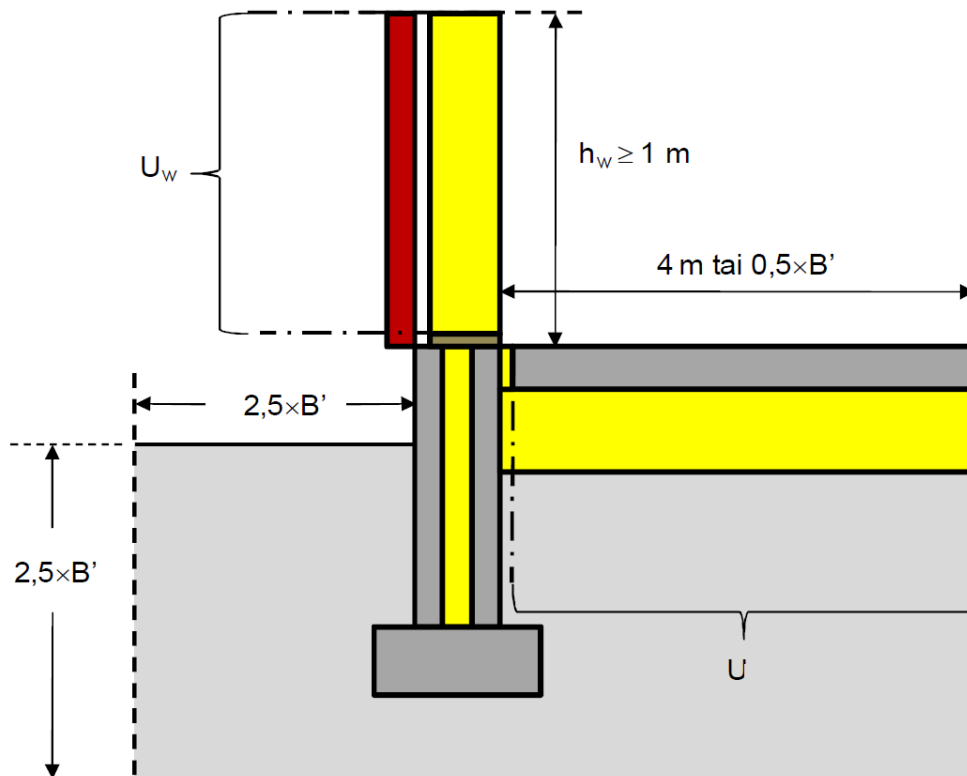


KUVA 4. Ulkoseinän ja perustuksen liitos



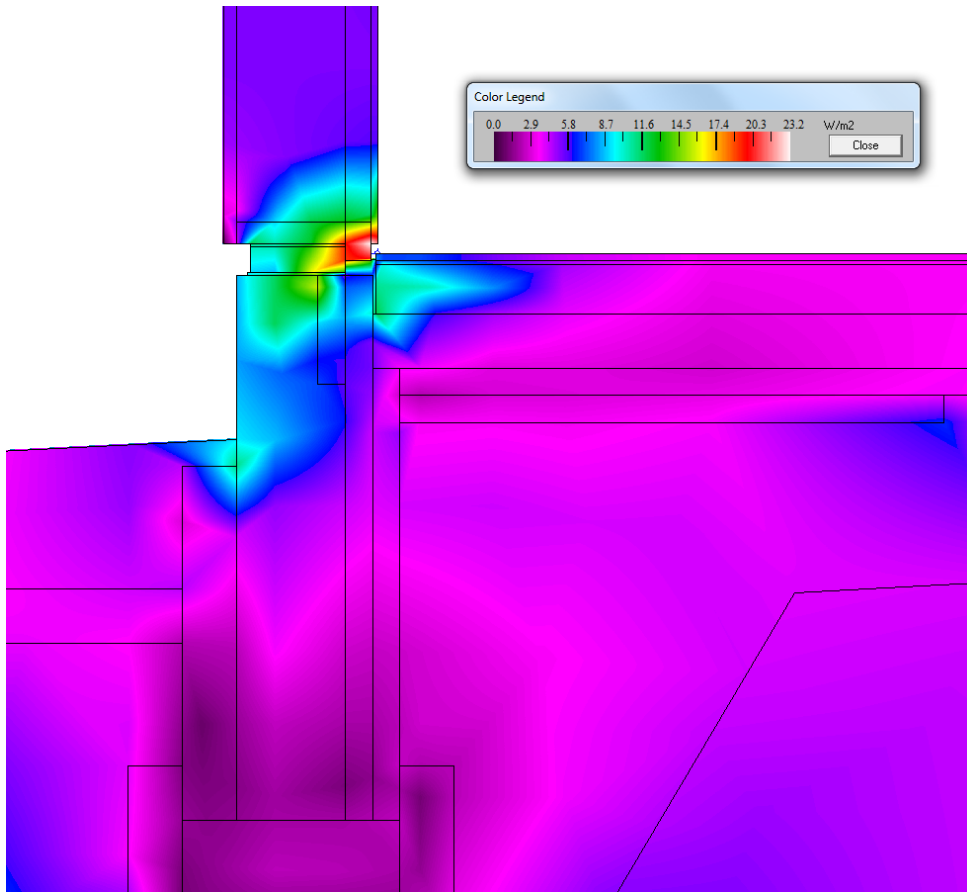
KUVA 5. Yksinkertaistettu liitosdetalji

Maanvaraisen alapohjan ja ulkoseinän liitosta laskettaessa otetaan seinää mukaan vähintään yhden metrin korkeudelta. Alapohjarakenteita laskettaessa otetaan huomioon puolet rakennuksen karakteristisesta leveydestä, kuitenkin vähintään neljä metriä. Rakenteen ulkopuolisia maamassoja otetaan huomioon vähintään 2,5 kertaa rakennuksen karakteristisen leveyden verran rakennuksen ulkopuolelle sekä alapuolelle. Kuvassa 6 on esitetty laskettavien rakenteiden ja maamassojen mitat. (14, s. 16.)



KUVA 6. Ulkoseinän, sokkelin ja maanvastaisen alapohjan välisen liitoksen kylmäsiltoja laskettaessa käytettävät vähimmäismitat (14, s. 16)

Kuvassa 7 nähdään lämpövirran olevan suurin alaohjauspuun ja elementin alajuoksun kohdalla. Elementin kiinnityspuun kohdalla lämpövirta kasvaa moninkertaiseksi seinään verrattuna, mutta rakennetta on hyvin vaikea muuttaa, koska elementti naulataan kiinni perustuksiin kiinnityspuusta.

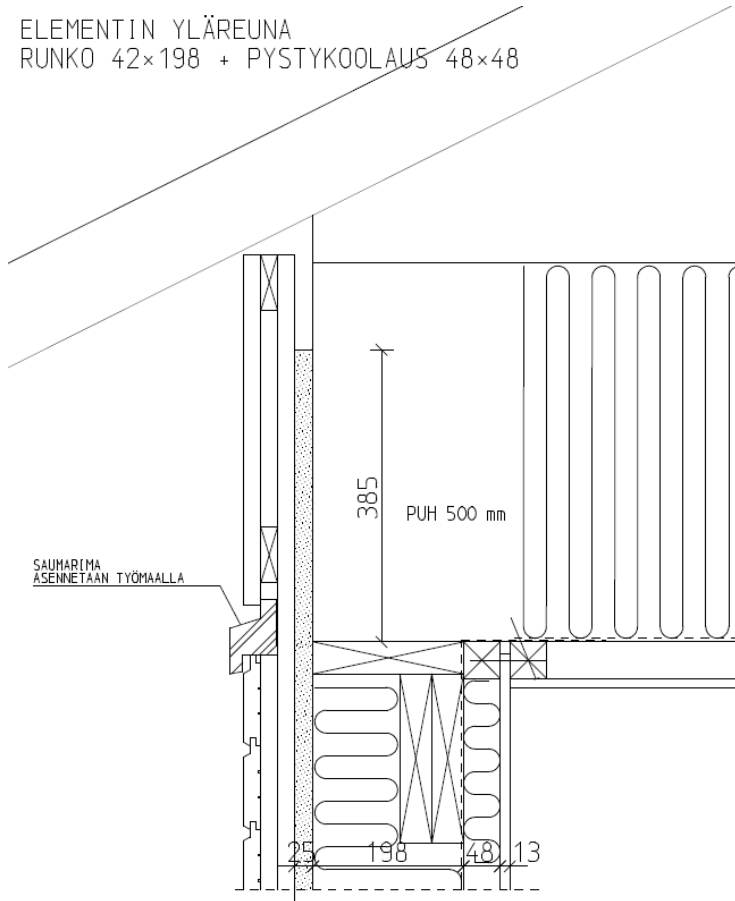


KUVA 7. Lämpövirta ulkoseinän ja perustuksen liitoksessa

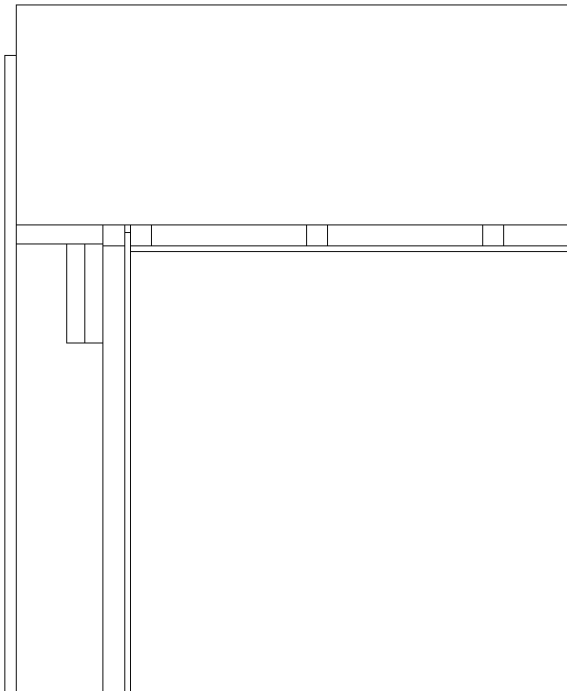
4.2 Elementin liitos yläpohjaan

Seinäelementin ja yläpohjan liitos on toteutettu yläohjauspuun ja kahden syrjälään olevan yläjuoksun avulla. Elementin yläreunassa muodostuu kylmäsilta lappeellaan olevan yläohjauspuun kohdalle. Kuvasta 8 nähdään, miten seinäelementissä vaakasuorassa oleva koolauspuu muodostaa katkon eristekerrokseen yläohjauspuun kanssa. Kuvassa 9 on yksinkertaistettu rakenne, jota käytetään lisäkonduktanssin laskennassa. Liitteessä 1 on käsitelty yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen lisäkonduktanssin laskenta yksityiskohtaisesti.

ELEMENTIN YLÄREUNA
RUNKO 42×198 + PYSTYKOO LAUS 48×48



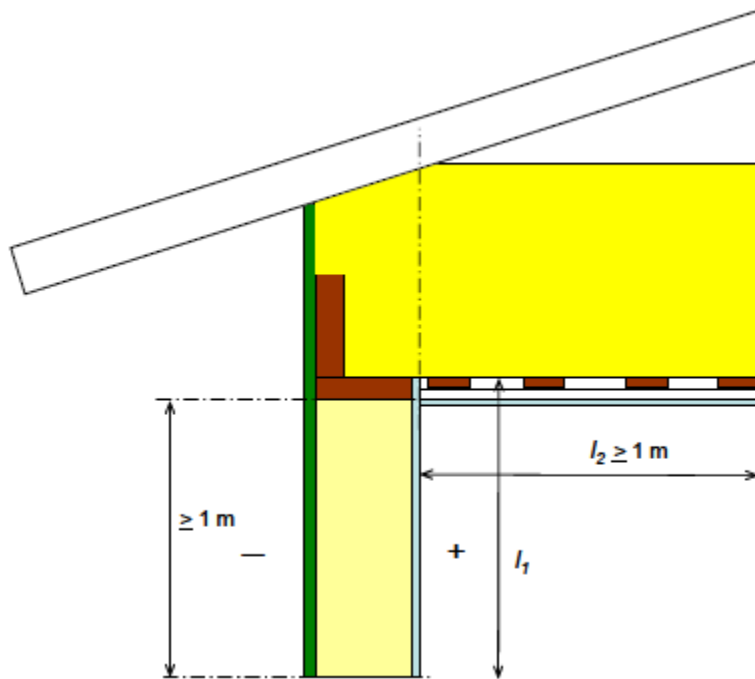
KUVA 8. Ulkoseinän ja yläpohjan liitos



KUVA 9. Yksinkertaistettu rakenne

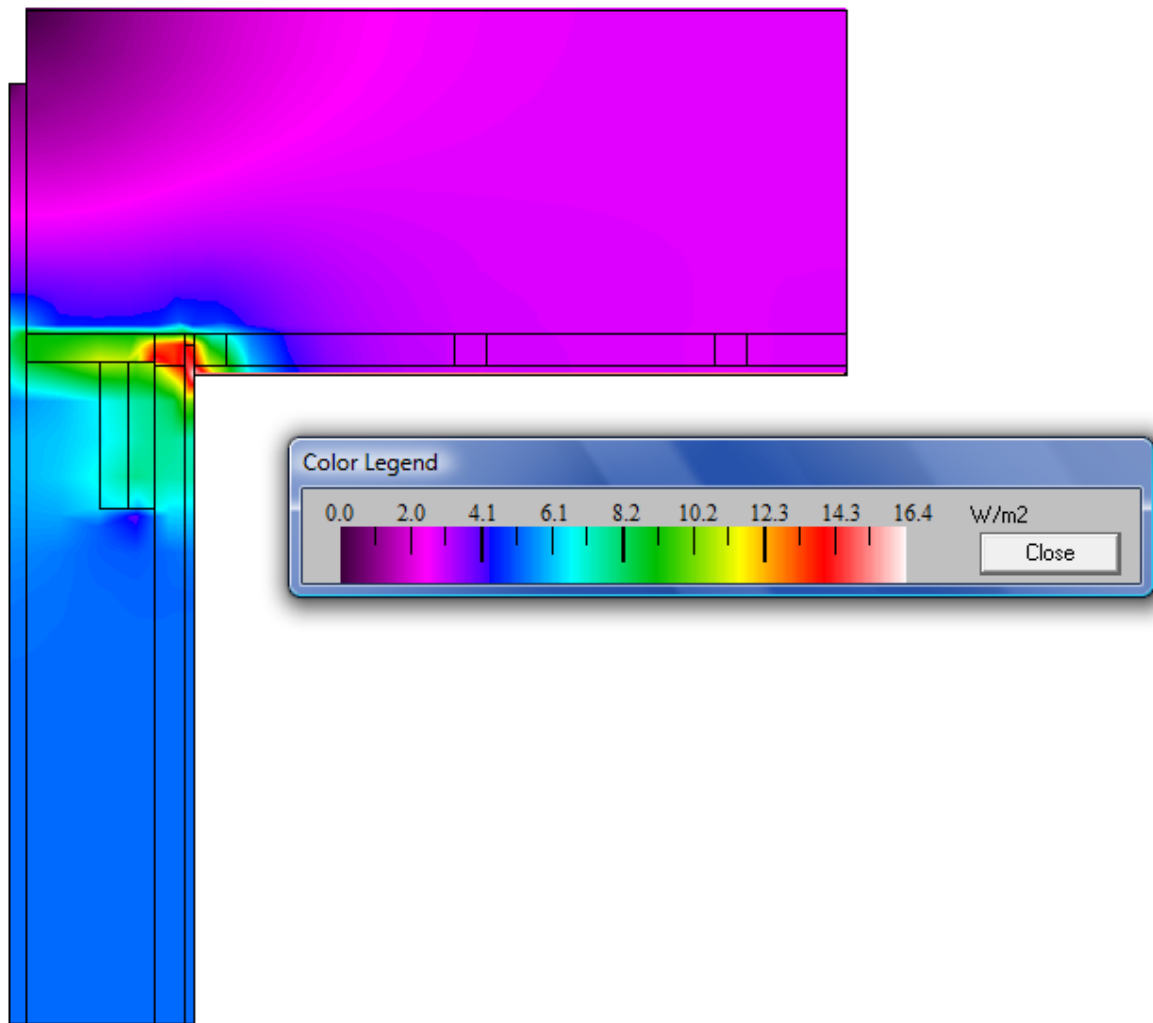
Elementin yläreunaan muodostuvaa kylmäsiltaavaikutusta voidaan vähentää käyttämällä kainaloristikoita, jolloin elementin yläreunan rakenteet nousevat ylemmäs. Yläohjauspuun ja yläjuoksujen aiheuttama kylmäsilta siirtyy näin kylmempään osaan rakennetta eikä lämmönjohtuminen ole niin suurta.

Kuvassa 10 on esitetty selventävä piirros käytettävistä mitoista. Seinän ja yläpohjan U-arvot lasketaan katkoviivojen välisten rakenteiden perusteella vähintään metrin pituudelta. Vertailutilanteessa koko liitoksen U-arvo lasketaan mittojen l_1 ja l_2 mukaan. Koko liitoksen U-arvosta vähennetään katkoviivojen osoittamalta alueelta seinän ja yläpohjan U-arvot.



KUVA 10. Ulkoseinän ja yläpohjan liitoksen kylmäsiltoja laskettaessa käytettävät vähimmäismitat (14, s. 23)

Kuvasta 11 nähdään lämpövirran olevan suurin juuri seinän ja katon rajakohdassa. Myös syrjällä olevien yläjuoksujen kohdalla lämpövirta kasvaa reilusti muuhun seinään verrattuna.

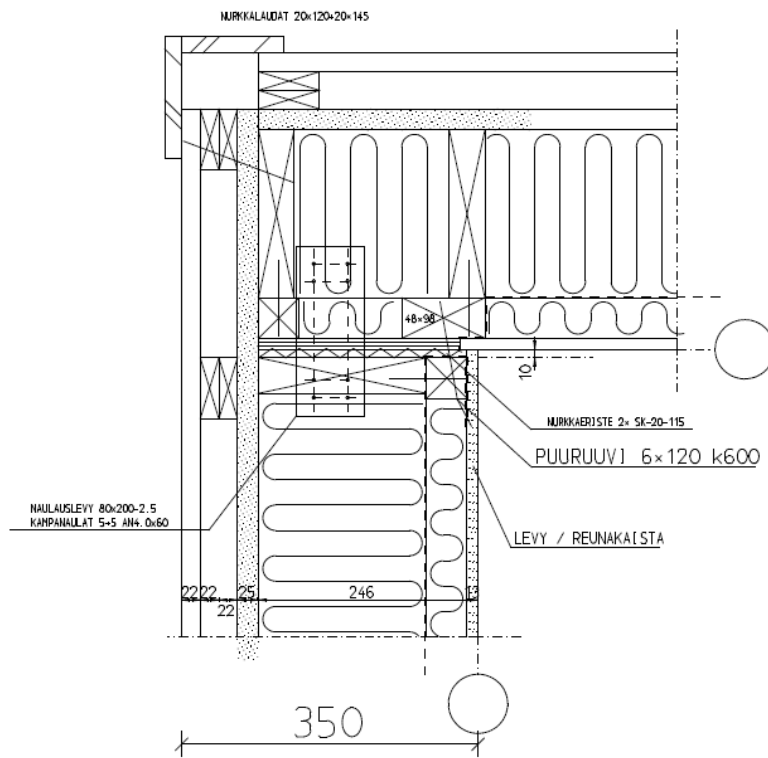


KUVA 11. Lämpövirta ulkoseinän ja yläpohjan liitoksessa

4.3 Ulkoseinien liitos nurkassa

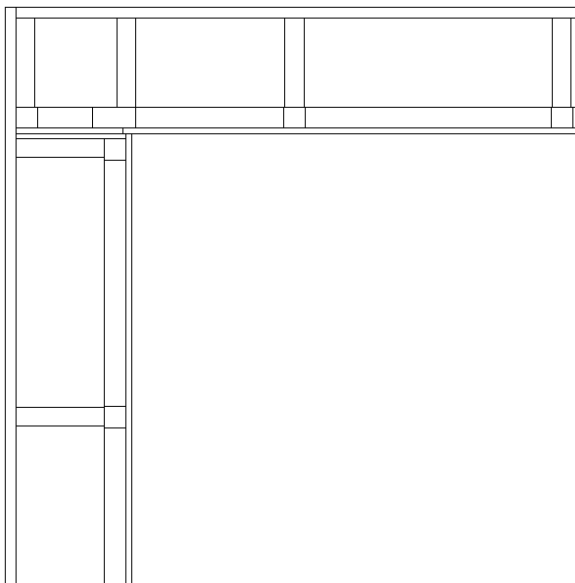
Ulkoseinien liitokseen muodostuu kylmäsilta seinärakenteiden runkotolppien kohdalle. Elementtien kiinnityksen vuoksi runkotolppien paikkaa ei voida muuttaa eikä kylmäsilta vaikutusta voida pienentää rakenneosien sijoittelulla. Kuvassa 12 on esitetty detaljipiirros ulkonurkan rakenteesta ja kuvassa 13 on lisäkonduktanssin laskennassa käytetty yksinkertaisempi rakenne.

ULKONURKKA DET. 1.1
 RUNKO 42×198 + PYSTYKOO LAUS 48×48



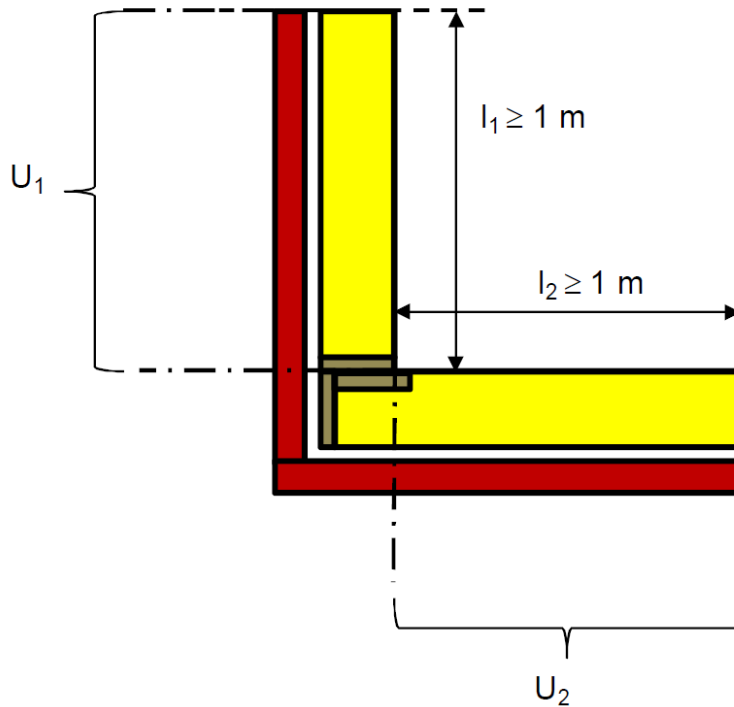
- ELEMENTIN REUNALEVYKÄSTÄ KIIINNETTY TEHTAALLA "HEFTI"IN
- JRRJOTETAAN HÖYRYNSULUN LIIITTYKSEN JA ELEMENTIEN KIIINNETYKSEN AJAKSI

KUVA 12. Ulkoseinien liitos ulkonurkassa



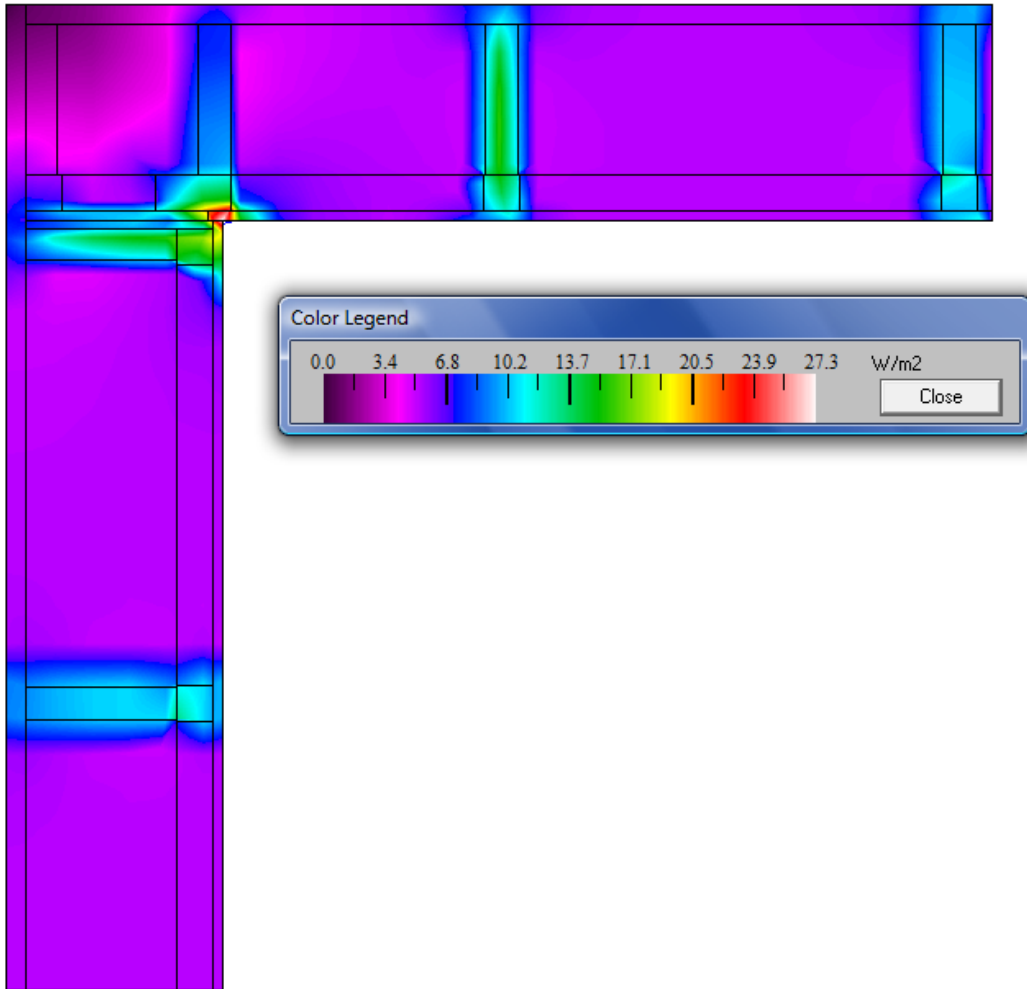
KUVA 13. Yksinkertaistettu rakenne

Ulkoseinien nurkkia laskettaessa rakenteen U-arvo lasketaan katkoviivojen väliseltä alueelta, jonka pituus on vähintään yksi metri. Vertailutilanteessa koko liitoksen U-arvo lasketaan laskentaohjelmalla mittojen l_1 ja l_2 mukaan ja tuloksesta vähennetään seinän U-arvo (kuva 14).



KUVA 14. Ulkoseinien nurkan kylmäsiltoja laskettaessa käytettävien mittojen vähimmäispituudet (14, s. 29)

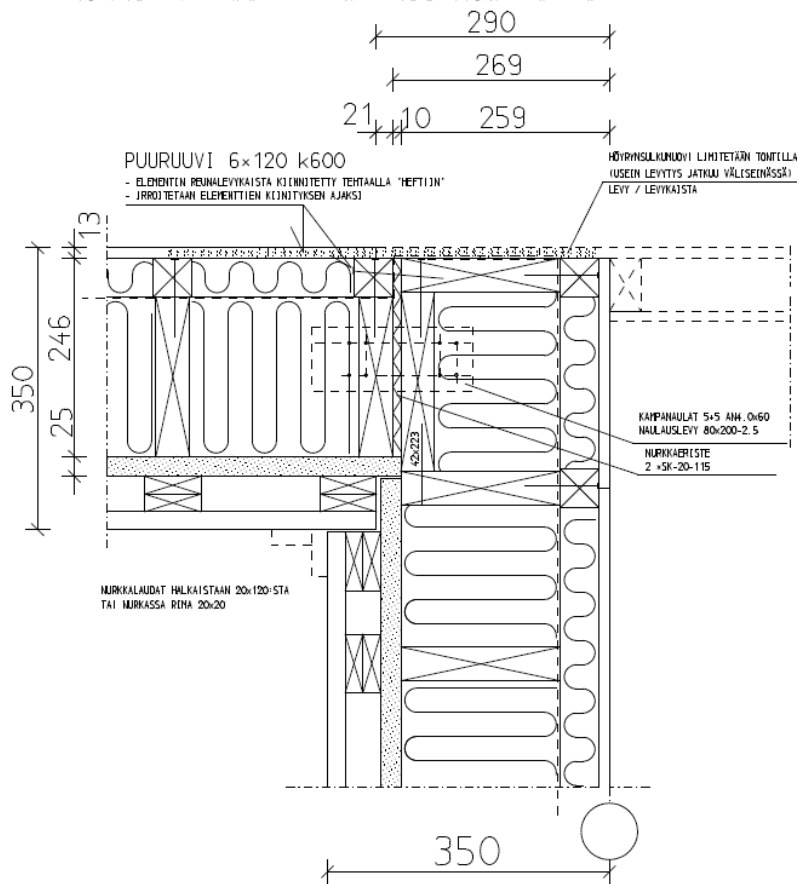
Kuvassa 15 nähdään lämpövirran suuruus ulkonurkassa, mutta myös keskellä seinää runkotolppien kohdalla. Nurkassa lämpöä johtuu eniten runkotolpan ja koolauspuun läpi, jonka syrjä on kokonaan nurkan sisäpuolella.



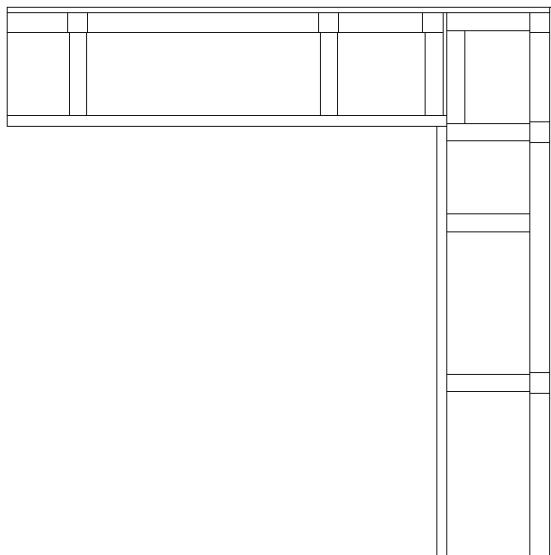
KUVA 15. Lämpövirta ulkonurkassa

Sisänurkan liitoksessa elementtien saumassa on molemmin puolin runkotolpat, joten niiden kohdalle muodostuu kylmäsilta. Kuvassa 16 esitetään sisänurkan liitosdetalji ja kuvassa 17 yksinkertaisempi laskentarakenne. Sisänurkan ominaisuutena on negatiivinen lisäkonduktanssi, joka vähentää lämpöhäviötä rakenteessa. Kylmäsiltoja laskettaessa käytetään samoja vähimmäismittoja kuin kuvassa 14 on esitetty.

SISÄNURKKA DET. 2.1
 RUNKO 42×198 + PYSTYKOO LAUS 48×48

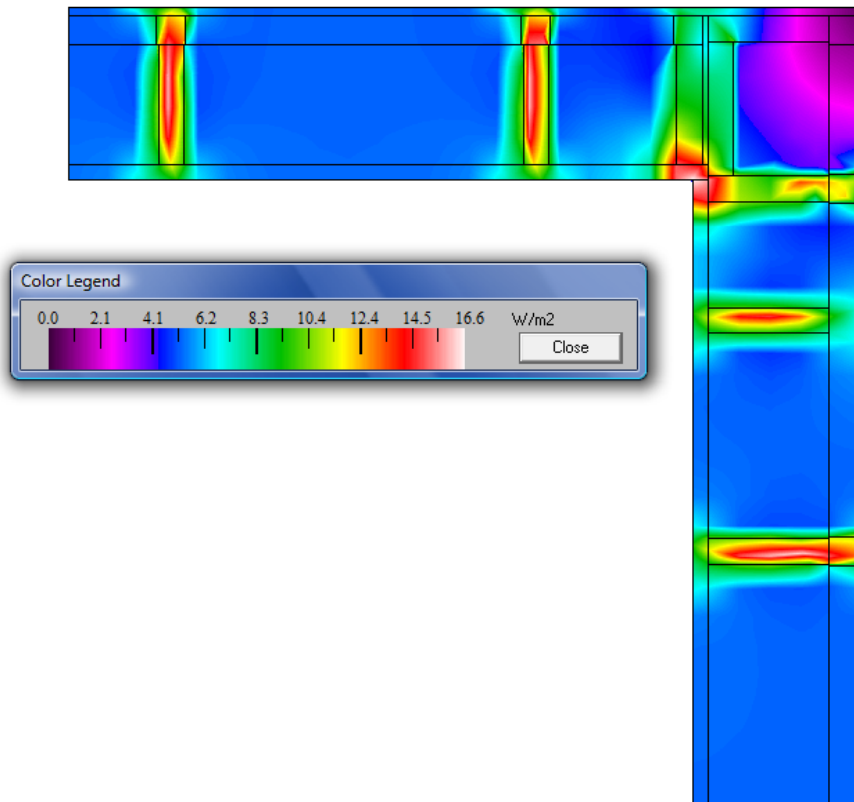


KUVA 16. Ulkoseini en liitos sisänurkassa



KUVA 17. Yksinkertaistettu rakenne

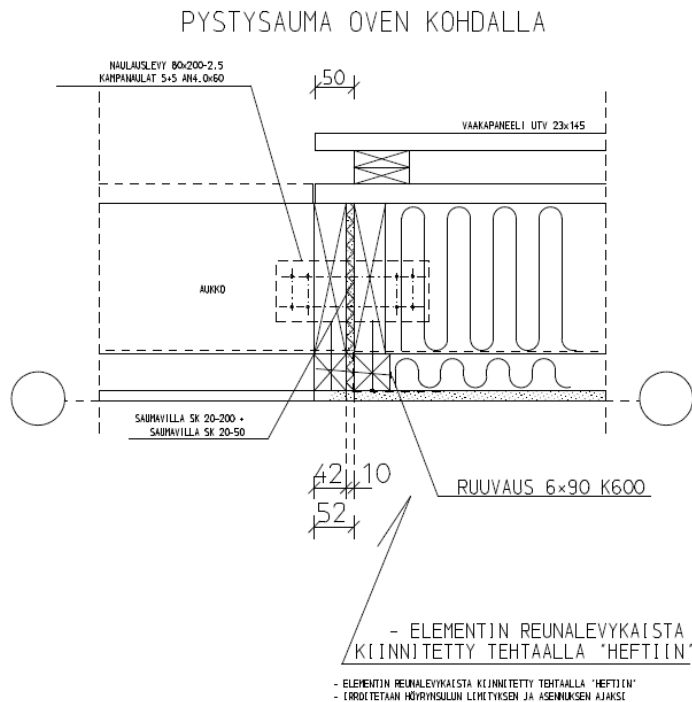
Kuvassa 18 on esitetty lämpövirran suuruus sisänurkassa. Lämpövirran suuruus on jopa suurempi runkotolppien kohdalla kuin elementtien liitoksessa. Sisänurkan aiheuttama negatiivinen lisäkonduktanssi johtuu seinän suuremmasta sisämitasta verrattuna seinän ulkomittaan.



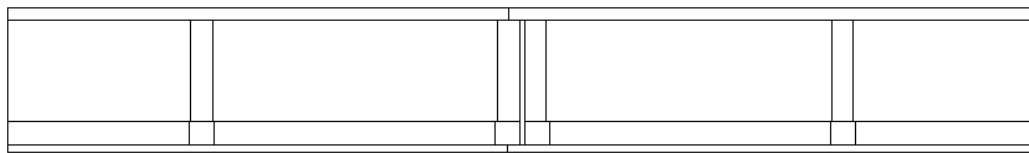
KUVA 18. Lämpövirta sisänurkassa

4.4 Ulkoseinäelementtien liitos seinän suoralla osalla

Seinäelementtien välinen liitos suoralla seinällä muodostaa hyvin pienen kylmäsilan, joten sitä ei tarvitse ottaa huomioon rakennuksen lämpöhäviöitä laskettaessa. Kuvassa 19 nähdään seinäelementtien liitos, jossa toisessa elementissä on ovi sauman vieressä. Elementtien välisen liitoksen kylmäsiltoja laskettaessa sovelletaan samaa menetelmää ja samoja mittoja kuin edellä käsitellyissä nurkissa. Kuvassa 20 on yksinkertaistettu laskentarakenne.

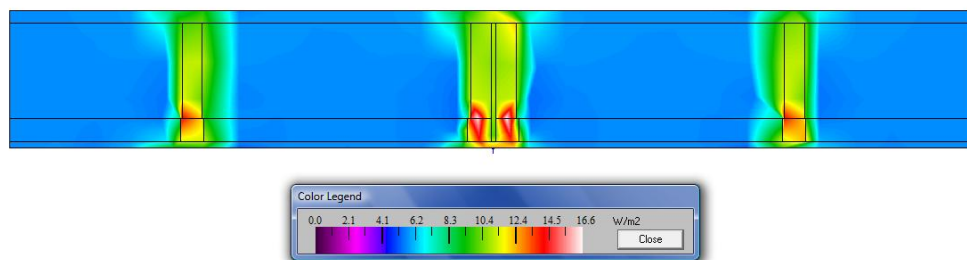


KUVA 19. Ulkoseinäelementtien liitos oven vieressä



KUVA 20. Yksinkertaistettu rakenne

Elementin pystysauman lämpövirta ei ole merkittävästi suurempi verrattuna yksittäisiin runkotolppiin. Kuvassa 21 nähdään vain vähäistä kasvua lämpövirran suuruudessa. Liitoksen simuloinnissa ei ole huomioitu mahdollista ovea heti liitoksen vieressä.



KUVA 21. Lämpövirta ulkoseinäelementtien liitoksessa

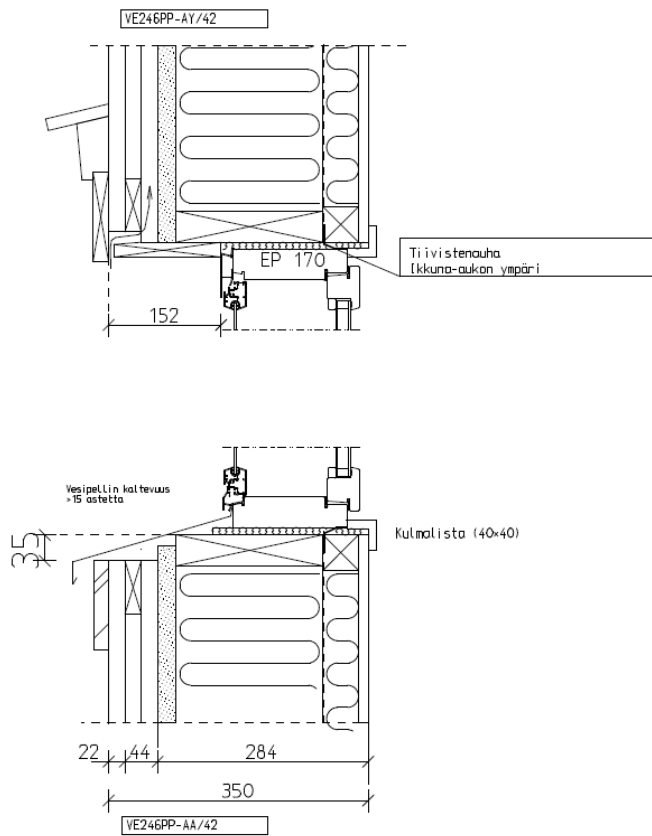
4.5 Ikkunan ja oven liitos

Ikkunoiden ja ovien aiheuttamia kylmäsiltoja tarkasteltaessa ikkunat ja ovet korvattiin adiabaattireunaehdolla. Adiabaattireunaehto olettaa reunan olevan täydellisesti lämpöeristetty. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan reunaehto käytettäessä ikkunan karmia on kavennettava ulkoapäin ja ikkuna on kiinnitettävä massiiviseen rakenteeseen tai apukarmiin. Tämä laskennallinen karmisyvyys riippuu karmin todellisesta syvyydestä ja käytettävästä ikkunatyypistä. Taulukossa 8 on esitetty laskennallinen karmisyvyyden määrittämiseen käytettävät kertoimet, jotka koskevat puu- ja vastaavia puu-alumiini-ikkunoita. Näissä laskelmissa oletettiin ikkunoiden olevan MS3E-tyyppiä.

TAULUKKO 8. Laskennallinen karmisyvyys, kun laskennassa käytetään adiabaattireunaehto (14, s. 28)

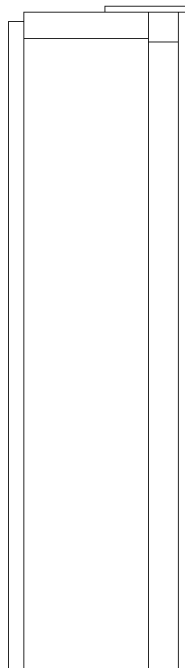
Ikkunatyyppe	Laskennallinen karmisyvyys
SEK, MS2E	0,7 x karmisyvyys
MSE, MS3E	0,6 x karmisyvyys
MEK, SE	Pienempi luvuista: 0,95 x karmisyvyys tai 100mm

Ikkunaliitoksessa käytetään hyvän rakennustavan mukaista ikkunapenkki-rakennetta, jossa jätetään 10 mm:n asennusvara ikkunan jokaiselle sivulle. Kuvassa 22 nähdään detaljipiirros ikkunan liittymisestä elementtiin. Rakenteeseen muodostuu kylmäsilta ikkunapenkki-kohtalle. Ikkunoiden ja ovien kylmäsiltoja laskettaessa seinää otetaan huomioon vähintään yhden metrin verran liitoksen molemmin puolin. Kuvassa 23 on esitetty yksinkertaisempi rakennepiirros, jossa ikkunan asennusvaran tiivistävää lämmöneristettä on kavennettu adiabaattireunaehdon vuoksi.



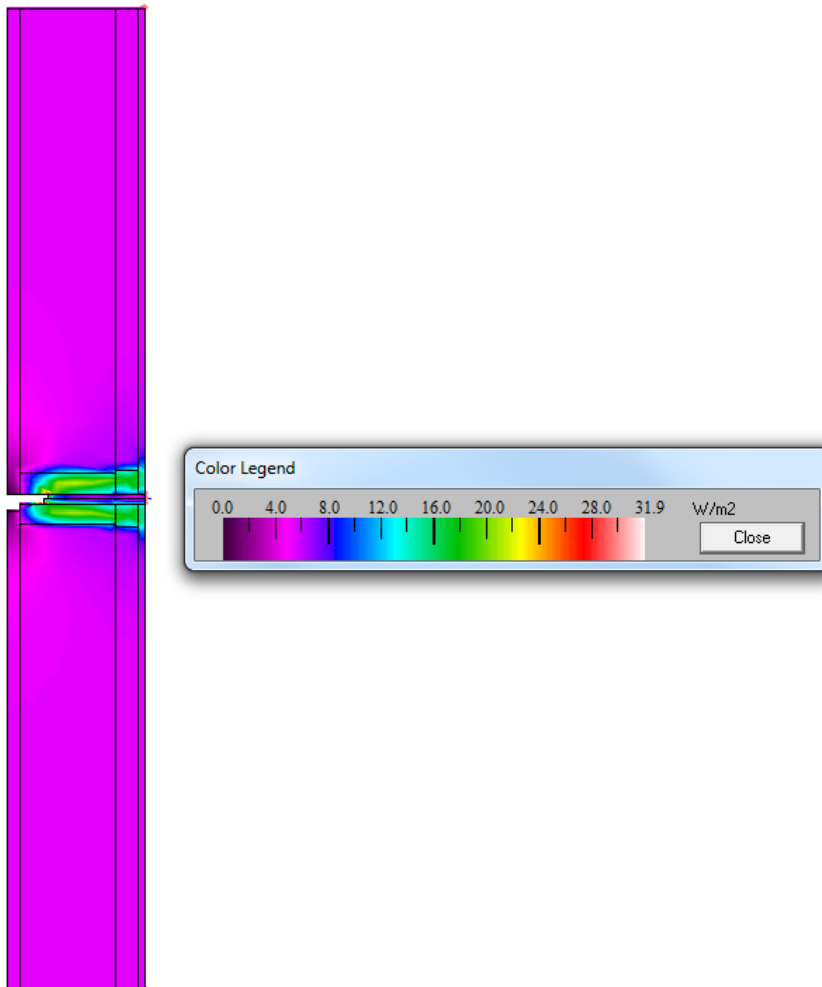
REUNAT / RUNKO 198 +48 koolaus sisäpuolelta/ IKKUNA/REU_11

KUVA 22. Ikkunan liitos elementtiin

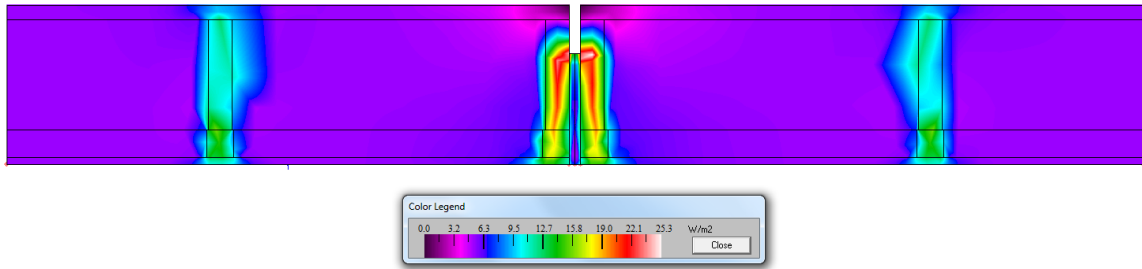


KUVA 23. Yksinkertaistettu ikkunan alareunarakenne

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty lämpövirta ikkunaliitoksissa. Simulaatioissa ei ole otettu huomioon itse ikkunaa, koska tarkastelu kohdistuu vain ikkunoiden liitosrakenteisiin. Kylmäsiirtavaikutusta muodostuu ikkunapenkkiin rakenteisiin sekä ikkunan viereen sijoitettuihin runkotolppiin. Kylmäsiirtavaikutusta pienentävät hieman ikkunoiden pielilaudat, joita ei ole otettu huomioon tarkastelussa. Ikkuna on korvattu adiabaattireunaehdolla.

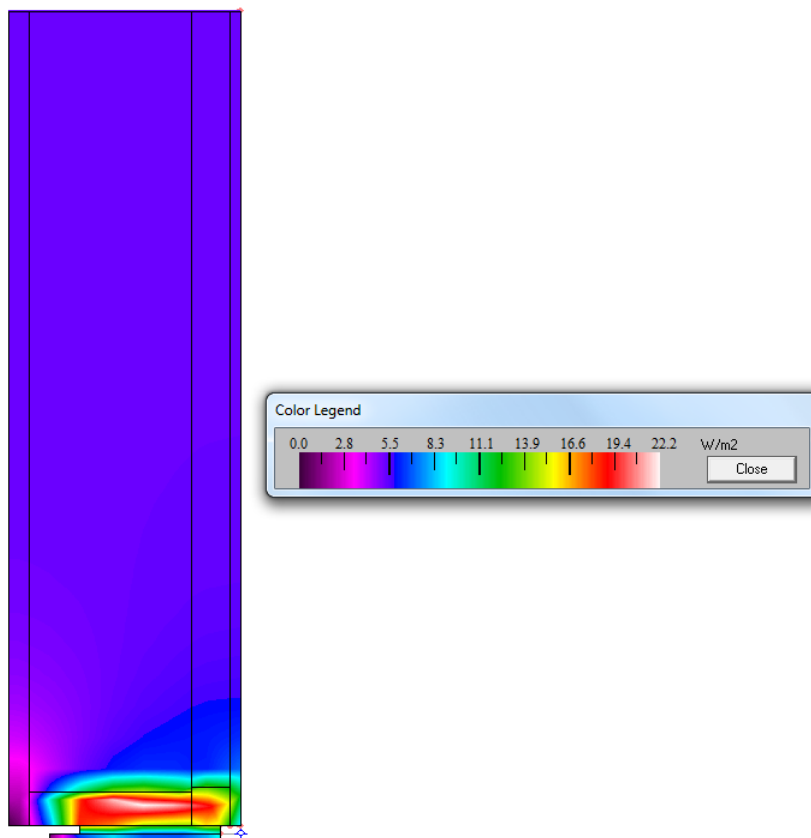


KUVA 24. Lämpövirta ikkunan ylä- ja alareunassa

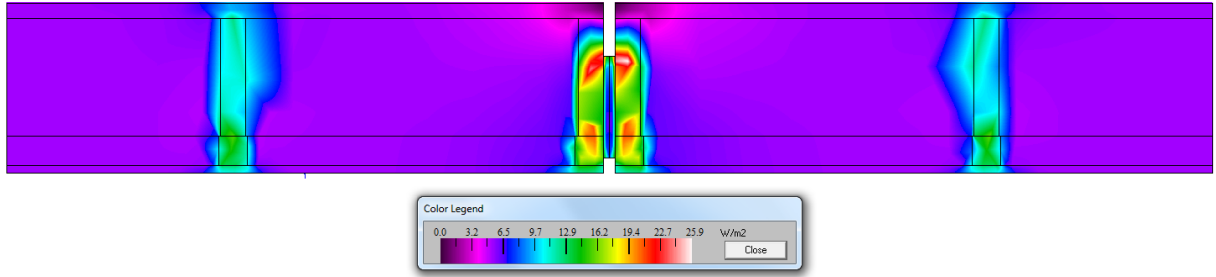


KUVA 25. Lämpövirta ikkunan sivuilla

Kuvissa 26 ja 27 nähdään lämpövirtojen suuruus oven yläreunassa ja sivuilla. Oven aiheuttamaan lisäkonduktanssiin ei ole huomioitu ulkoseinän ja perustuksen liitoksesta aiheutuvaa lisäkonduktanssia, vaan ainoastaan oven tiivistämi- seen käytettävä lämmöneriste kynnyksen alapuolella. Oven kohdalla pitää las- kea myös ulkoseinän ja alapohjan liitoksen aiheuttama lisäkonduktanssi. Ovea ei ole huomioitu simulaatioissa, vaan se on korvattu adiabaattireunaehdolla.



KUVA 26. Lämpövirta oven ylä- ja alareunassa



KUVA 27. Lämpövirta oven sivuilla

5 KYLMÄSILTATARKASTELUN TULOKSET JA ARVIOINTI

Nykyisillä kylmäsiltatarkastelussa käytettävillä menetelmillä lisäkonduktanssien käsinlaskentaa on erittäin vaikea suorittaa puuttuvien ohjeiden ja kaavojen vuoksi. Parhaaksi menetelmäksi osoittautui tietokonesimuloinnin ja käsinlaskennan yhdistäminen. Sokkeliliittymän simulointi tuotti erityisiä vaikeuksia, koska liitokseen piti määritellä sisä- ja ulkotilojen termisten olosuhteiden lisäksi vielä alapohjan alapuolella olevat olosuhteet.

Tarkasteluissa Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa annetuista lisäkonduktanssien ohjearvoista osa osoittautui suuremmiksi kuin tutkittujen rakenteiden kylmäsilttojen aiheuttamat lisäkonduktanssit. Taulukossa 9 on esitetty lisäkonduktanssien ohjearvot ja Ympäristöministeriön laskentaoppaan mukaan tutkitut arvot.

TAULUKKO 9. Lineaaristen lisäkonduktanssien ohje- ja tutkimusarvo

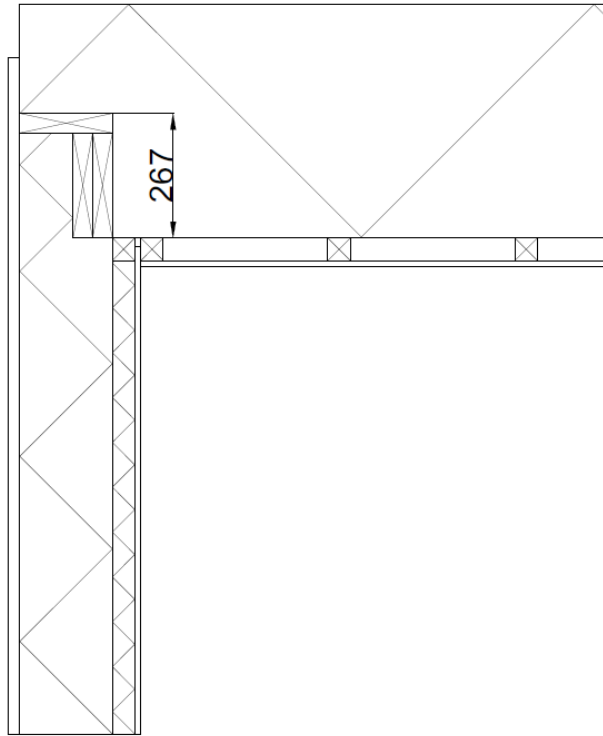
KYLMÄSILLAT	Ohje ψ [W/mK]	Tutkittu ψ [W/mK]	Ero [%]
Ulkoseinä – alapohja, perustus	0,08	-	-
Ulkoseinä - yläpohja	0,05	0,034	-32,0
Ulkoseinä - ulkoseinä, ulkonurkka	0,04	0,053	32,5
Ulkoseinä - ulkoseinä, sisänurkka	-0,04	-0,025	37,5
Ulkoseinä - ulkoseinä, suoralla osalla	-	0,013	-
Ikkunaliitos, ikkunan sivut	0,04	0,033	-17,5
Ikkunaliitos, ikkunan ylä- ja alareuna	0,04	0,022	-45,0
Oviliitos, oven sivut	0,04	0,033	-17,5
Oviliitos, oven yläreuna	0,04	0,022	-45,0

Ulkoseinän, alapohjan ja sokkelin liitoksesta ei saatu tuloksia, jotka olisi voitu todentaa oikeiksi. Luultavasti liitoksen kylmäsillan aiheuttama lisäkonduktanssi on samaa suuruusluokkaa kuin ohjearvo. Liitoksen U-arvoa voitaisiin ehkä pienentää käyttämällä sokkelin ulkopuolista eristettä, joka jatkuisi alaohjauspuun ulkopuolella aina elementin tuulensuojalevyyn asti.

Ulko- ja sisänurkissa olevat elementtien liitokset tekevät kylmäsiltojen aiheuttamista lisäkonduktansseista ohjearvoja suurempia. Sisänurkassa olevan ulkoseinien liitoksen kylmäsiltojen aiheuttama negatiivinen arvo vähentää rakennuksen kylmäsiltojen kautta johtuvaa kokonaislämpöhäviötä. Suoralla seinän osalla olevalle elementtien liitokselle ei ole annettu ohjearvoa. Liitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi on kuitenkin hyvin pieni eikä lisää merkittävästi rakennuksen kokonaislämpöhäviötä.

Yläpohjan ja ulkoseinän liitoksesta aiheutuva lisäkonduktanssi on huomattavasti pienempi kuin Rakentamismääräyskokoelmassa annettu ohjearvo. Myös ikkunoista ja ovista aiheutuva lisäkonduktanssi on pienempi. Oven alareunan kylmäsiltille ei saatu lisäkonduktanssin arvoa, koska ulkoseinän ja alapohjan liittymästä ei pystytty laskemaan todennetusti oikeita arvoja.

Ulkoseinän ja yläpohjan rakennetta voitaisiin parantaa käyttämällä kainalorisikoita, jolloin yläjuoksut ja yläohjauspuu nousisivat ylöspäin 267 mm kattoristikoiden alapäärteen kanssa samalle tasolle. Tällöin liitoksen kylmäsiltojen aiheuttama lisäkonduktanssi pienenesi arvosta 0,034 W/mK arvoon 0,024 W/mK. Toisaalta valmistuskustannukset kasvaisivat, koska seinäelementtien korkeus kasvaisi. Kuvassa 28 on esitetty muutettu rakenne yksinkertaistettuna piirroksena.



KUVA 28. Muutettu seinäelementin yläreuna

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä 1.7.2012 voimaan astuvien energiamääräysten mukainen kylmäsilvatarkastelu Vieskan Elementti Oy:n käyttämiin rakenneratkaisuihin ulkoseinäelementtien liitoksissa. Kylmäsilvatarkastelu tehtiin Ympäristöministeriön laskentaohjeen mukaan ja tuloksia verrattiin Suomen Rakentamismääräyskokoelman antamiin lisäkonduktanssien ohjearvoihin. Työn sisältö kohdistui tarkasti kylmäsiltoihin ja niiden aiheuttamien lisäkonduktanssien laskentaan. Laskennat suoritettiin Suomen Rakentamismääräyskokoelman ja Ympäristöministeriön Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan.

Työssä käytettiin Excel-taulukoita ja DOF-Lämpö-ohjelmaa rakenteiden U-arvojen laskemiseen sekä Therm- ja Comsol Multiphysics -laskentaohjelmia rakenteiden mallintamiseen ja lämpövirtojen laskentaan. Lopulliset lisäkonduktanssit laskettiin Excel-taulukossa kylmäsiltojen laskentaohjeen mukaan.

Työn suurimpana haasteena oli virallisen laskentaohjeen julkaisu vasta opinnäytetyöprosessin viime hetkillä. Kylmäsiltojen teoriasta on hyvin niukasti tietoa saatavilla ja suurimmassa osassa julkaisuista on käsitelty samoja asioita keskenään. Työssä esitettiin uusien energiamääräysten mukaiset menetelmät U-arvojen laskentaan sekä tarvittavat kaavat kylmäsiltojen laskentaan.

Kylmäsilvatarkastelu onnistuttiin tekemään lähes kaikista kohteena olleista rakenteiden liitoksista. Ainoastaan seinän, sokkelin ja alapohjan liitoksesta ei saatu lisäkonduktanssille varmennettua arvoa. Tätä liittymää ei ole käsitelty tarvittavan tarkasti Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaassa, koska liitoksessa on otettava huomioon sisä- ja ulkolämpötilojen lisäksi rakennuksen alla olevien maamassojen lämpötilat ja lämmönjohtavuudet. Jos rakenteissa olisi käytetty ulkoilmaan rajoittuvaa alapohjarakennetta, olisi ulkoseinän ja alapohjan välisen liitoksen tarkastelu ollut mahdollista.

Tarkastelun kohteena olleista Vieskan Elementti Oy:n elementtien liitoksista ulkoseinän ja yläpohjan välisen liitoksen sekä ikkunoiden ja ovien liitosten aiheuttamien kylmäsiltojen lisäkonduktanssit olivat pienempiä kuin Rakentamismää-

räyskokoelmassa annetut ohjearvot. Ulkoseinien väliset liitokset rakennuksen nurkissa olivat suurempia kuin ohjearvot, joten rakennuksen kokonaislämpöhäviöitä laskettaessa suositellaan käytettäväksi ohjearvoja. Suoralla seinän osalla olevalle seinäelementtien liitokselle ei ole annettu ohjearvoa, mutta liitoksen aiheuttama lisäkonduktanssi oli hyvin pieni. Yläpohjan ja ulkoseinän väliseen liitokseen esitettiin rakenneratkaisu, joka pienentäisi liitoksen lisäkonduktanssia noin 29 % mutta nostaisi valmistuskustannuksia.

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin, vaikka yhden rakenneliitoksen tarkastelu epäonnistui ja virallinen laskentaopas oli käytössä vain opinnäytetyöprosessin viime hetkillä. Uusien energiamääräysten vaatimat kylmäsiilatarkastelut suoritettiin ja työn tilaaja sai ennakkotietoa käytettävien rakenneratkaisujen aiheuttamista kylmäsiiloista ja lisäkonduktansseista.

LÄHTEET

1. Kurtti, Veli-Matti – Paukkeri, Ilkka 2011. Kylmäsiltojen vaikutus rakennusvaipan lämpöhäviöihin vuoden 2012 energiamääräysten mukaan. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. Opinnäytetyö.
2. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. 2011. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3 perustelumuuisto 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö.
3. Betonielementtirakenteisen rakennuksen vaipan kylmäsiltojen tarkastelut. 2011. VTT. Saatavissa:
http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=viivamainen%20kylm%C3%A4silta&source=web&cd=7&ved=0CEsQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.elementtisuunnittelu.fi%2FDownload%2F23732%2FTutkimusraportti%2520VTT-R-07901-11.pdf&ei=6wC9Tu_oCO74QTWyfGIBA&usg=AFQjCNGaChvCAuVF1A2KU50Ql5MF97d2-w Hakupäivä 11.11.2011.
4. Björkholtz, Dick 1987. Lämpö ja kosteus. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy.
5. Hagentoft, Carl-Eric 2001. Introduction to Building Physics. Lund: Studentlitteratur AB.
6. Alitalo, Sanna – Lehtoviita, Timo – Ylihärsilä, Heikki 2004. Rafnet-oppimateriaalin teoriaosan osio L (lämpö). Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Lämpö. Rafnet-ryhmä.
7. RIL 155-1984. Lämmön ja kosteudeneristys. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
8. Lämmöneristys. 2010. Suomen Rakentamismääräyskokoelma C4. Helsinki: Ympäristöministeriö.

9. Vinha, Juha – Piironen, Jarkko – Salminen, Kati 2011. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics: NSB 2011: Volume 3 Tampere, 29 May- 2 June 2011. Tampere: Tampere University of Technology.
10. Illikainen, Kimmo 2011. T523315 Korjausrakentamisen kuntotutkimukset 1 5 op. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2011. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
11. Lämmöneristys. 2012. Suomen Rakentamismääräyskokoelma C4. Luonnos 27.10.2011. Helsinki: Ympäristöministeriö.
12. Tekninen liite muistioon: Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. 2011. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3 muistion tekninen liite 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö.
13. Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D5. Luonnos 27.10.2011. Helsinki: Ympäristöministeriö.
14. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012. Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan. 20.9.2011. Helsinki: Ympäristöministeriö.
15. Fedorik, Filip 2012. FEM – Finite Element Method. FEA – Finite Element Analysis. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu tekniikan yksikkö.
16. Wikipedia. 2012. Vapaa tietosanakirja. Finite Element Method. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method. Hakupäivä 2.5.2012.
17. Rakennusten energiatehokkuus. 2012. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3. Helsinki: Ympäristöministeriö.

LIITTEET

Liite 1 Yläpohjaliitoksen lisäkonduktanssin laskenta

Laskennan lähtötietoina on rakennedetalji yläpohjan ja ulkoseinän välisestä liitoksesta (kuva 7), sekä materiaalimerkinnot. Aluksi lasketaan ulkoseinärakenteelle ominainen U-arvo Rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan käyttäen ylä- ja alalikiarvomenetelmää.

KOKONAISLÄMMÖNVASTUKSEN YLÄLIKIARVO R_T'

Alue	Alueen mitat		f	
	[m]	[m]		
Alue a	0,05	0,60	0,08	Puut
Alue b	0,55	0,60	0,92	Villa
Koko alue	0,60	0,60	1,00	

Ainekerros	d [m]	λ_n [W/mK]	Puut	Villa
			R_{Ta} [m ² K/W]	R_{Tb} [m ² K/W]
R_{si}			0,13	0,13
Kipsilevy	0,013	0,15	0,087	0,087
Pystykoolaus	0,050	0,12	0,400	
Min.villa	0,050	0,037		1,297
Runko	0,200	0,12	1,650	
Min.villa	0,200	0,037		5,351
TS-levy	0,025	0,050	0,500	0,100
R_{se}			0,04	0,04
			2,8400	7,1134

	f	R_{Tn}	
f_a/R_{Ta}	0,08	2,8400	0,0282
f_b/R_{Tb}	0,92	7,1134	0,1293
$1/R_T$			0,1575
R_T'			6,3491

KOKONAISLÄMMÖNVASTUKSEN ALALIKIARVO R_T''

Alue	Alueen mitat		f	d	λ_n	R	f/R	
	[m]	[m]						
Pystyrunko								
Alue a	0,042	0,600	0,07	0,200	0,12	1,6667	0,0420	Puu
Alue b	0,558	0,600	0,93	0,200	0,037	5,4054	0,1721	Villa
Koko alue	0,600	0,600	1,00					
$1/R_3$							0,2141	
R_3							4,6718	
Pystykoolaus								
Alue a	0,048	0,600	0,08	0,050	0,12	0,4167	0,1920	Puu
Alue b	0,552	0,600	0,92	0,050	0,037	1,3514	0,6808	Villa
Koko alue	0,600	0,600	1,00					
$1/R_4$							0,8728	
R_4							1,1457	

Ainekerros	d	λ_n	R
	[m]	[W/mK]	[m ² K/W]
R_{si}			0,13
Kipsilevy	0,013	0,15	0,0867
Koolaus + eriste	0,048	0,12/0,037	1,0999
Runko + eriste	0,198	0,12/0,037	4,6251
TS-levy	0,025	0,050	0,5000
R_{se}			0,04

R_T'' **6,5742**

ULKOSEINÄN U-ARVO

R_T'	6,3491
R_T''	6,5742
R_T	6,4617

U-arvo **0,154**

Seuraavaksi lasketaan yläpohjalle ominainen U-arvo Rakentamismääräyskoelman osan C4 mukaan.

YLÄPOHJAN U-ARVO

Rakenne	d [m]	λ [W/m ² K]	R (=d/λ) [m ² K/W]		
Sisäpintavastus			0,10		
Kipsilevy	0,013	0,21	0,062	r ₁	ISOVER Puhallusvilla yläpohjassa
Koolaus + ilmaväli	0,048		0,309		
Puhallusvilla	0,500	0,042	11,905		
Ulkopintavastus			0,04		
	0,561		12,416	R _T	
			0,081	U	

Vierekkäisten aineiden lämmönjohtavuudet

λ_{puu}	0,12
$\lambda_{\text{ilmaväli}}$	0,16

Lämmönjohtavuuksien suhde

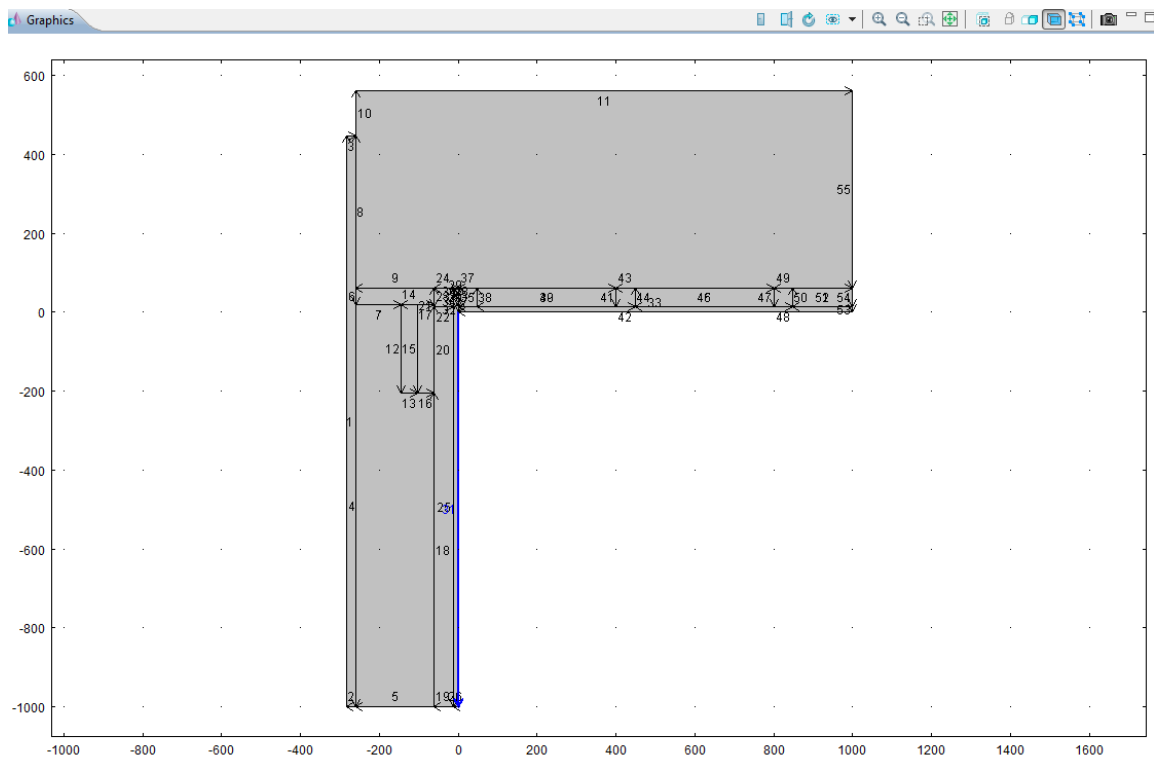
0,75 → RakMk C4 2.2.5: Voi käyttää kaavaa 3 (alalikiarvo)

Tarkasteltava alue: Alue: → [m] ↑[m]
0,400 0,400

r ₁	Alue	Alueen mitat		f	d [m]	λ [W/m ² K]	= d / λ		
		→ [m]	↑ [m]				r _j [m ² K/W]	f / r _j [W/m ² K]	
Koolaus + ilmaväli	Ilmaväli	Alue A	0,352	0,400	0,88	0,048	0,16	0,30	2,933
	Puu	Alue B	0,048	0,400	0,12	0,048	0,12	0,40	0,300
Tarkistussumma				1,00					
								1/r₁	3,233
								r ₁	0,309

Seuraavaksi lasketaan Comsol Multiphysics –ohjelmalla rakenteiden sisäpinnan lämpövirta. Rakenne pitää tallentaa jollakin piirto-ohjelmalla (esimerkiksi Auto-Cad) yksinkertaisempaan muotoon, missä on ainoastaan rakennekerrosten ulkoreunat (kuva 1). Kuva tallennetaan dxf-muotoon, jotta se voidaan tuoda Com-

sol Multiphysics -ohjelmaan. Laskenta suoritetaan kaksiulotteisena jatkuvuus-tilassa.



KUVA 1. Rakenne Comsol Multiphysics –ohjelmaan tuotuna

Seuraavaksi määritetään vallitsevien lämpötilojen ja pintavastusten arvot (kuva 2). Lämpötilaerona käytetään Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan 1°C :ta. Seinän ulkopuolinen pintavastus on $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja sisäpuolinen pintavastus $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Yläpohjan sisäpuolisena pintavastuksena käytetään arvoa $0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$, sekä ullakkotilan pintavastuksena arvoa $0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Variables

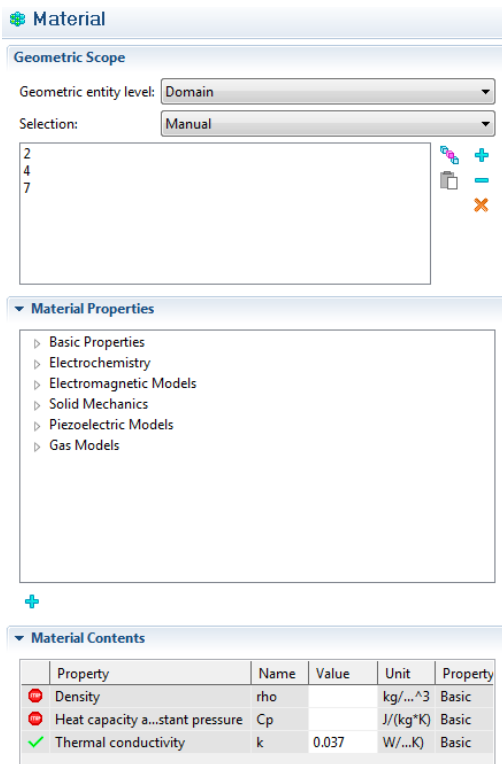
Variables

Name	Expression	Unit	Description
T_out	0[degC]	K	
T_in	1[degC]	K	
Alpha_out	1/0.04		Ulkopintavastus
Alpha_in	1/0.13		Sisäpintavastus
Alpha_up	1/0.10		Sisäpintavastus ylös
Alpha_roof	1/0.20		



KUVA 2. Vallitsevat lämpötilat ja pintavastukset

Määritellään materiaalit ja niiden lämmönjohtavuus λ_U . Kuvassa 3 esitetään materiaalin lämmönjohtavuus ja valitut elementit (kuva 1). Tässä tapauksessa on 0,037 W/mK materiaalille 'mineraalivilla'.



Material

Geometric Scope

Geometric entity level: Domain

Selection: Manual

2
4
7

Material Properties

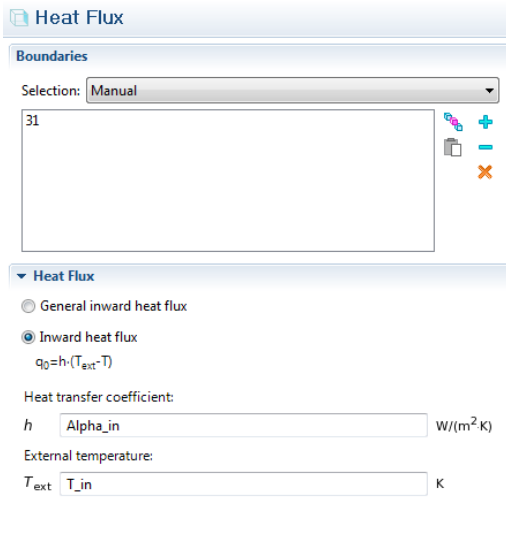
- ▷ Basic Properties
- ▷ Electrochemistry
- ▷ Electromagnetic Models
- ▷ Solid Mechanics
- ▷ Piezoelectric Models
- ▷ Gas Models

Material Contents

Property	Name	Value	Unit	Property
Density	rho		kg/m ³	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp		J/(kg*K)	Basic
Thermal conductivity	k	0.037	W/(m*K)	Basic

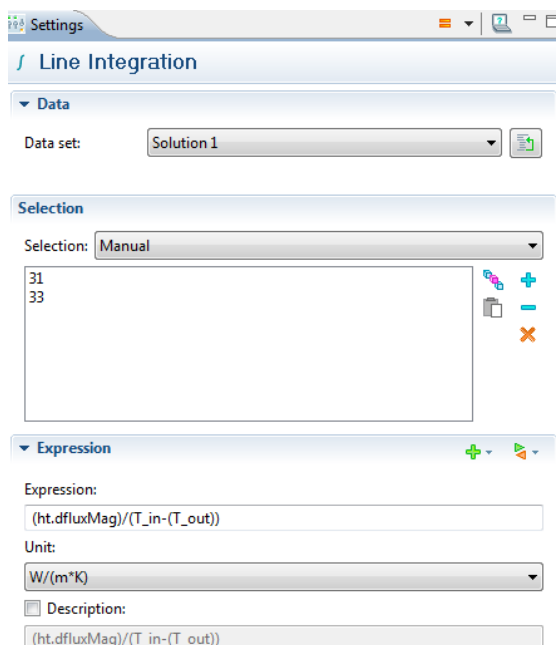
KUVA 3. Materiaalien ominaisuudet ja elementit

Pinnoille määritetään 'Heat flux' –työkalulla vallitsevat olosuhteet (kuva 4). Pintavastukseksi ja lämpötilaksi asetetaan aiemmin määritetyt arvot ja valitaan rajapinta, jota vallitsevat arvot koskevat. Laskentaa varten tarvittavat lähtöarvot on nyt asetettu ja ohjelma voi suorittaa laskennan.



KUVA 4. Rajapintojen vallitsevat olosuhteet

Kun ohjelma on suorittanut rakenteen simuloinnin, tuloksista saadaan 'Line Integration' -toiminnolla rakenteen lämpövirta (kuvat 5). Toiminnon matemaattiseksi kaavaksi on määritetty pinnan läpi johtuva lämpövirta, joka jaetaan ulko- ja sisälämpötilojen erolla. Laskettaviksi rajapinnoiksi valitaan rakenteen koko sisäpuolinen rajapinta. Tuloksena on rakenteen lämpövirta yhden Celsius-asteen suhteen (kuva 6).



KUVA 5. Rajapinnan läpi virtaavan lämpövirran määrittäminen

Messages	Progress	Results
(ht.dfluxMag)/(T_in-(T_out)) (W/(m*K))		
0.2591		

KUVA 6. Rakenteen lämpövirta

Kuvassa 6 esitetty lämpövirta on liitokseen liittyvien rakenteiden kytkentäkerroin L_{2D} . Liitoksen aiheuttaman kylmäsilan viivamainen lisäkonduktanssi saadaan, kun kytkentäkertoimesta vähennetään rakenneosien U-arvot kerrottuna laskennassa käytettävien rakenneosien pituudella.

L_{2D} [W/mK]	Ulkoseinä		Yläpohja	
	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]	U-arvo [W/m ² K]	Pituus [m]
0,2591	0,158	1,00	0,081	1,00

$$\psi = L_{2D} - U_{\text{seinä}} * l_{\text{seinä}} - U_{\text{yläpohja}} * l_{\text{yläpohja}}$$

$$\psi = 0,2709 \text{ W/mK} - 0,158 \text{ W/m}^2\text{K} * 1,00 \text{ m} - 0,081 \text{ W/m}^2\text{K} * 1,00 \text{ m}$$

$$\psi = 0,032 \text{ W/mK}$$

Lisäkonduktanssi ψ lisätään rakennuksen kokonaislämpöhäviöön johtumislämpöhäviön kautta.