



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tomi Honkala

PARVEKEKANNATTIMEN AIHEUT- TAMA KYLMÄSILTA

Lämpö- ja kosteustekniset vaikutukset

Tekniikka ja Liikenne
2013

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tomi Honkala
Opinnäytetyön nimi	Parvekekannattimen aiheuttama kylmäsilta
Vuosi	2013
Kieli	suomi
Sivumäärä	44
Ohjaaja	Tapani Hahtokari

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Comsol multiphysics 4.3 -ohjelmaa käyttäen kerrostalojen parvekkeiden kannattamiseen käytetyn teräsputki-profiilin aiheuttamaa kylmäsiltaa ja sen lämpö- ja kosteusteknisiä vaikutuksia rakenteessa. Työn taustalla on Vaasan Suvilahteen rakennetut matalaenergiakerrostalot ja niihin liittyvät tutkimushankkeet.

Talon rakenteen läpäisevä kylmäsilta voi sopivissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa aiheuttaa riskin kosteuden tiivistymisestä rakenteeseen. Lisäksi kylmäsiltaa kautta ulospäin johtuva lämpö lisää rakennuksen energiankulutusta ja se voi myös aiheuttaa muutoksia lämpöolosuhteisiin rakennuksen oleskeluvyöhykkeellä. Tässä opinnäytetyössä mallinnetaan parvekkeen kannatinteräs ja sitä ympäröivät seinä- ja välipohjarakenteet. Mallin pohjalta suoritettavan laskennan perusteella saadaan selvitettyä lämpötilan muutokset rakenteessa. Tulosten perusteella on mahdollista arvioida kylmäsiltaa aiheuttamia lämpö- ja kosteusteknisiä vaikutuksia rakennukselle.

Tässä työssä saatujen tulosten perusteella parvekkeiden kannattamisessa käytetty teräsputki-profiili aiheuttaa rakennuksen vaipan läpi ulottuvan kylmäsiltaa, laskien samalla sitä ympäröivien rakenteiden lämpötilaa. Teräksen lämpötila laskee huomattavasti muuta ympäröivää rakennetta alhaisemmaksi ulkoilman lämpötilasta riippuen. Alhaisesta teräksen lämpötilasta huolimatta, riski kosteuden tiivistymiselle teräksen pintaan ja sitä kautta ympäröivään rakenteeseen on pieni. Yksittäisen teräksen kautta ulos rakennuksesta johtuva lämpömäärä on noin 2 kWh kuukaudessa. Rakennuksen oleskeluvyöhykkeellä kannatinteräksen läheisyydessä lattian pintalämpötila laskee kylmäsiltaa vaikutuksesta asetettuja ohjeita pie-nemmäksi.

Avainsanat	kylmäsilta, kondensoituminen, lämpöhäviö, Comsol multiphysics
------------	---

ABSTRACT

Author	Tomi Honkala
Title	Thermal Bridge Caused by Balcony Supporter
Year	2013
Language	Finnish
Pages	44
Name of Supervisor	Tapani Hahtokari

In this thesis a model is built with Comsol multiphysics software to research the steel tube profile used to support balconies of multi-storey apartment houses. In focus is the thermal bridge caused by the steel profile and its implications to the energy efficiency and humidity of the structure. The main motivation for the study to take form is the low-energy apartment houses built in Suvilahti, Vaasa, and the research projects related to these buildings

Thermal bridge penetrating the insulation layer can in certain conditions cause a risk of humidity condensing in the structure. Moreover, conduction of the heat through the thermal bridge may increase energy consumption and cause changes in temperature inside the building. In this paper a model is developed of the supporting steel structure and other structures surrounding it. Based on this model it is possible to calculate the changes in the temperature of the structure and further evaluate the effects on humidity and thermal conditions of the buildings.

Results of this study indicate that the steel tube profile used for supporting balconies causes a thermal bridge penetrating through the insulating layers, which decreases the temperature of surrounding structures. The temperature of the steel is dependent on outdoor temperature and therefore significantly lower than that of the surrounding materials. Despite the lower temperature of the steel profile the risk of humidity condensation in the structure is low. Energy loss through a single steel tube profile is approximately 2 kWh per month. Due to the thermal bridge the floor surface temperature close to the supporting structure decreases below the reference value.

Keywords	Thermal bridge, condensation, heat loss, Comsol multiphysics
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	LÄMMÖN SIIRTYMINEN RAKENTEESSA	10
	2.1 Konvektio.....	12
	2.2 Johtuminen.....	13
	2.3 Lämpösäteily.....	13
	2.4 Kylmäsillat.....	14
3	KOSTEUS	16
	3.1 Sade.....	16
	3.2 Ilman kosteus	16
	3.3 Diffuusio	18
	3.4 Kondensoituminen	19
4	RAKENNUKSEN SISÄILMASTO JA VIIHTYISYYS	20
	4.1 Oleskeluvyöhyke.....	20
	4.2 Lämpöviihtyisyys.....	20
	4.3 Lämpötilaerot.....	20
5	TUTKITTAVAT RAKENNETYYYPIT	22
	5.1 Kantavat ulkoseinärakenteet	22
	5.2 Ei-kantavat ulkoseinärakenteet	23
	5.3 Välipohja.....	24
	5.4 Comsol-mallinnus	26
6	TULOKSET	31
	6.1 Kannatinteräksen lämpötila	31
	6.2 Lämpövirta ulos	33
	6.3 Pintalaatan lämpötila.....	37
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	39
	7.1 Kondensioriski rakenteessa.....	39
	7.2 Lämpövirta ulos	40
	7.3 Sisäilmasto ja viihtyisyys.....	41
	7.4 Vaihtoehtoinen kannatusjärjestelmä?	42

8	YHTEENVETO	43
	LÄHTEET.....	44

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1.	Lämpötilan muuttuminen eri rakennusainekerroksista koostuvan seinän sisällä	s. 12
Kuvio 2.	Leikkaus kantavasta ulkoseinärakenteesta	s. 24
Kuvio 3.	Leikkaus ei-kantavasta ulkoseinärakenteesta	s. 25
Kuvio 4.	Leikkaus välipohjarakenteesta	s. 26
Kuvio 5.	Comsolilla mallinnettu B-talon kantava ulkoseinärakenne ja siihen liittyvä välipohja	s. 27
Kuvio 6.	Eri rakenneosille annetut dimensiot	s. 28
Kuvio 7.	Rakennusmateriaalien fysikaaliset parametrit	s. 29
Kuvio 8.	Kannatinteräksen ympärille rakennettu elementtiverkko	s. 30
Kuvio 9.	Kantavan rakenteen lämpötila ulkolämpötilan ollessa -10 °C ja sisälämpötilan 21 °C	s. 31
Kuvio 10.	Kannatinteräksen lämpötila kantavan seinärakenteen sisällä mittauspisteissä talossa A, ulkolämpötilan ollessa -25 °C	s. 32
Kuvio 11.	Kannatinteräksen lämpötila kantavan seinärakenteen sisällä mittauspisteissä talossa B, ulkolämpötilan ollessa -25 °C	s. 33
Kuvio 12.	Ontelolaatan ulkoreunalta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus	s. 35
Kuvio 13.	Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa A	s. 36
Kuvio 14.	Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa B	s. 36

Kuvio 15.	Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa B	s. 37
Kuvio 16.	Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa B	s. 38
Kuvio 17.	Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei-kantavan seinärakenteen kohdalla ilman kannatinterästä	s. 39
Kuvio 18.	Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei-kantavan seinärakenteen kohdalla ilman kannatinterästä	s. 40
Taulukko 1.	Rakenteen sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen suuruus riippuen lämmönsiirtymisen suunnasta	s. 13
Taulukko 2.	Ilman ominaisuuksia normaali ilmakehän paineessa	s. 19
Taulukko 3.	Lattian optimilämpötila paljaalle jalalle ja enimmäisvaihteluväli, jolla tyytymättömien osuus olisi alle 15 %.	s. 22
Taulukko 4.	Kannatinteräksen lämpötilan muutos ulkoilman vaikutuksesta kantavan seinärakenteen alueella ja välipohjan sisällä.	s. 34
Taulukko 5.	Kannatinteräksen lämpötilan muutos ulkoilman vaikutuksesta ei-kantavan seinärakenteen alueella ja välipohjan sisällä.	s. 34
Taulukko 6.	Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä kantavan seinärakenteen kohdalla.	s. 38
Taulukko 7.	Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei-kantavan seinärakenteen kohdalla.	s. 39

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana ovat Vaasan Suvilahdessa toteutetut kerrostalohankkeet nimeltään ”Matalaenergiarakentamisen edistäminen kerrostalotuotannossa” ja ”Maa- ja aurinkoenergian hyödyntäminen matalaenergiakerrostalorakentamisessa”. Ensimmäisessä hankkeessa kerätään tietoa vuoden 2007 Rakentamismääräyskokoelman C3 ohjeiden mukaisesti rakennetusta talosta ja toisessa vuonna 2010 muuttuneiden ohjeiden mukaan rakennetusta talosta. Vuoden 2010 Rakentamismääräyskokoelman C3 mukaan rakennuksen energiatehokkuus kasvaa noin 30 – 40 prosenttia. /11/ Käytännössä tämä tarkoittaa rakennuksen lämmöneristyspaksuuksien kasvamista.

Suvilahden kerrostalohankkeiden tavoitteena on ollut selvittää maa- ja aurinkoenergian toimivuus ja taloudellisuus kerrostalojen energiantuotannossa sekä myös tässä opinnäytetyössä tutkittaviin lämmöneristystason kasvun vaikutuksiin rakennuksen energiatehokkuuteen ja rakennusfysikaaliseen toimintaan. Koska matalaenergiarakentamisen eristyspaksuuksien vaatimusten vaikutuksista ei ole tarpeeksi tietoa, on Suvilahden kerrostaloihin asennettu mittalaitteita, jotka mittaavat rakennusten vaipan lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta. Mittaustulosten ja rakennusfysikaalisen mallinnuksen avulla, voidaan arvioida matalaenergiarakentamisen rakennetyyppien toimivuutta ja turvallisuutta.

Tässä opinnäytetyössä on tehty Comsol Multiphysics 4.3 -ohjelmistolla rakennusfysikaalinen malli Suvilahden kerrostaloissa parvekelaatan kannatukseen käytetystä rakenneratkaisusta. Kannattimena on käytetty ruostumattomasta teräksestä valmistettua putkiprofiilia, joka läpäisee ulkoseinärakenteen kiinnittyen välipohjan ontelolaattaan. Tämä rakenneratkaisu luo rakennuksen vaipan läpäisevän kylmäsillan, joka puolestaan aiheuttaa riskin kosteuden tiivistymisestä eristekerrokseen. Opinnäytetyössä tutkitaan, minkälaisissa ulkoilman olosuhteissa kosteuden tiivistymistä rakenteeseen saattaa tapahtua ja aiheutuuko kylmäsillasta muita haittavaikutuksia. Kylmäsilta voi esimerkiksi vaikuttaa lämpöviihtyisyyteen parvekkeen läheisyydessä sijaitsevien huoneiden oleskeluvyöhykkeellä, aiheuttamalla

lattian pintalämpötilan laskemista. Jos pintalämpötila laskee riittävän alas, saattaa olla myös riski sisäilman kosteuden tiivistymiseen betonin pintaan. Lisäksi tässä työssä tutkitaan kylmäsillan kautta ulospäin johtuvan lämmön määrää. Talojen energiavaatimukset ovat kiristyneet viimevuosina, joten parvekekannattimen aiheuttaman hukkalämmön määrän selvittäminen on mielenkiintoista ja perusteltua.

2 LÄMMÖN SIIRTYMINEN RAKENTEESSA

Kahden eri lämpötilaisen kappaleen koskettaessa toisiansa, niiden lämpötilat pyrkivät tasautumaan ja hakeutumaan kohti termistä tasapainoa, jossa kappaleiden lämpötilat ovat yhtä suuret. /1, 401/

Tämän vuoksi lämmönsiirtymistä tapahtuu kaikkialla, myös esimerkiksi rakennuksen seinärakenteiden läpi. Jonkin pinta-alan läpi siirtyvä lämpövirta q on suuruudeltaan siirtyneen lämpöenergian Q ja siihen kuluneen ajan Δt osamäärä. Lämpövirran yksikkö on Watti. Siirtyvää lämpövirtaa yhtä pinta-alayksikköä kohden voidaan kutsua lämpövirran tiheydeksi ja sen yksiköksi saadaan W/m^2 . /1, 449/

Rakentamisessa pyritään yleensä siihen, että lämpöä ei pääsisi siirtymään rakennuksen rakenteiden välillä. Talvella sisätilan lämpö ei saisi siirtyä ulos, eikä puolestaan kesällä kuumen ulkoilman tulisi häiritsevästi päästä sisätiloihin. Rakennuksen rakenteet tulisi pystyä mitoittamaan edellä mainittuja seikkoja silmälläpitäen. Mitoitusta varten on tiedettävä lämmön siirtymistapa eri tilanteissa ja lämpövirran suuruuteen vaikuttavat tekijät. /1, 450/

Jos rakennuksen seinä koostuu ainoastaan yhdestä materiaalista, sen lävitse kulkeva lämpövirta lasketaan kaavalla 1. /8, 1/

$$q = \lambda * \frac{T_2 - T_1}{d} \text{ (W/m}^2 \text{)}, \text{ missä} \quad \text{Kaava 1.}$$

q on lämpövirta (W/m^2),

λ on materiaalin lämmönjohtavuus ($W/m \cdot ^\circ C$),

d on materiaalin paksuus (m) ja

$T_2 - T_1$ on lämpötilaero seinämän yli.

Mikäli seinä rakentuu useammasta erilaisesta lämmönjohtavuuden ominaisuudet omaavasta materiaalikerroksesta, saadaan sen läpäisevä lämpövirta ratkaistua

kaavasta 2. Lämpötilan muuttumista tällaisessa rakenteessa havainnollistaa kuvio 1. /8, 3/

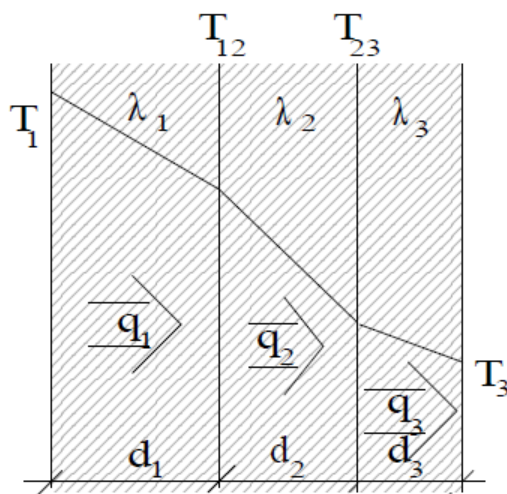
$$q = \frac{T_1 - T_3}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} \quad (\text{W/m}^2) \quad , \text{ missä } \quad \text{Kaava 2.}$$

q on lämpövirta (W/m^2),

λ on materiaalin lämmönjohtavuus ($\text{W/m}^\circ\text{C}$),

d on materiaalikerroksen paksuus (m) ja

$T_3 - T_1$ on lämpötilaero seinämän yli.



Kuvio 1. Lämpötilan muuttuminen eri rakennusainekerroksista koostuvan seinän sisällä. /8, 2/

Rakennusmateriaalikerroksen paksuuden d ja materiaalin lämmönjohtavuuden λ välistä suhdetta R , kutsutaan rakennusmateriaalin lämmönvastukseksi. Näin ollen kaava 2 voidaan edelleen uudelleen kirjoittaa muotoon: /8, 3/

$$q = \frac{T_1 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_1 - T_3}{\sum R} = \frac{T_1 - T_3}{R_T} \quad , \text{ missä } \quad \text{Kaava 3.}$$

R_T on koko seinärakenteen kokonaislämmönvastus.

Lämpövirran suuruuteen vaikuttaa lisäksi rakenteen pintavastus. Lämmön siirtyessä seinärakenteen läpi täytyy sen ensin tunkeutua seinäpinnan läpi ja lopuksi ulos seinästä. Näitä sisä- ja ulkopuolen pintavastuksia merkitään laskelmissa R_{si} sekä R_{se} ja niille annetaan arvot alla olevan taulukon 1 mukaisesti. /8, 4/

Taulukko 1. Rakenteen sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen suuruus riippuen lämmönsiirtymisen suunnasta. /8, 4/

Sisäpuolinen pintavastus R_{si}			Ulkopuolinen pintavastus R_{se}		
Lämpö siirtyy			Lämpö siirtyy		
vaakasuoraan	alaspäin	ylöspäin	vaakasuoraan	alaspäin	ylöspäin
0,13	0,17	0,1	0,04	0,04	0,04

Väliarvot 0 ... 90 °C saadaan lineaarisesti interpoloimalla.

Tämän mukaisesti lämpövirta seinärakenteen läpi huomioiden sisä- ja ulkopuolisen pintavastus saadaan kaavasta 4.

$$q = \frac{T_1 - T_3}{R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se}} \quad (\text{W/m}^2)$$

Kaava 4.

Rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo kuvaa sitä lämpömäärää, joka siirtyy 1 m² kokoisen rakenteen alueen läpi lämpötilaeron ollessa 1 °C. U-arvo on rakenteen kokonaislämmönvastuksen käänteisluku. Mitä pienempi U-arvo on, sitä paremmin rakennusmateriaali eristää lämpöä. Suomen rakentamismääräyskokoelmasssa C3 on annettu määräykset eri rakennuksen osien U-arvon minimivaatimuksesta. /8, 6/

$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_T} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

Kaava 5.

2.1 Konvektio

Lämmön konvektiolla eli virtauksella tarkoitetaan lämmön kulkeutumista kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voi tapahtua pakotetusti tai luonnollisesti. Pakotetussa konvektiossa lämpöä kuljettava neste tai kaasu on saatu liikkumaan jonkin ulkopuolisen voimanlähteen avulla. Hyvänä esimerkkinä pakotetusta

konvektiosta voidaan pitää vesikiertoista lattialämmitystä, jossa lämmin vesi laiteaan virtaamaan pumpun avulla. Luonnollinen ja vapaa konvektio puolestaan saa alkunsa ilman lämpötilaeroista ja sen aiheuttamista poikkeamista ilman tiheydestä. /2, 37/

2.2 Johtuminen

Jos kupissa kuumaa kahvia on metallinen lusikka, sen toinenkin pää lämpenee, vaikka se ei olekaan kosketuksissa kahvin kanssa. Lämpö kiihdyttää molekyylien liikettä, jolloin liike-energiaa siirtyy molekyylisestä toiseen niiden törmäillessä. Tätä ilmiötä kutsutaan lämmön johtumiseksi. Johtumiseen ei liity minkäänlaista aineen siirtymistä, joten se on ominainen lämmön siirtymisen muoto varsinkin kiinteissä aineissa. Yleisesti ottaen hyvin sähköä johtavat aineet ovat myös hyviä lämmönjohteita. /1, 450 – 451/

Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuden arvo λ vaihtelee suuresti eri rakennusmateriaalien välillä. Rakennusteknisesti ajatellen on edullista käyttää huonosti lämpöä johtavia rakennusaineita, joiden lämmönjohtavuuden arvo on pieni, rakenteiden läpi johtumalla siirtyvän lämmön määrän minimoimiseksi. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi eristeinä käytettävät polystyreenit, jonka suljetussa solurakenteessa ilma ei pääse virtaamaan ja konvektiota ei pääse tapahtumaan. Seiso-va ilma sen sijaan eristää hyvin lämpöä. /1, 450 – 451/

2.3 Lämpösäteily

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan sähkömagneettisen aallon mukana siirtyvää energiaa. Lämmönsiirtymistapana säteily poikkeaa muista siirtymismuodoista siten, että se ei tarvitse väliainetta tapahtuakseen. Rakentamisessa huomioonotettavia säteilymuotoja ovat lyhytaaltainen auringonsäteily sekä pitkäaaltoinen eri kappaleiden lämpösäteily. Siirtyvän lämpöenergian määrään vaikuttaa eri pintojen välinen lämpötilaero sekä eri pintojen kyky vastaanottaa ja lähettää takaisin pinnalle tulleita säteilyä. Tähän liittyvä rakentamisen sovellutus on esimerkiksi selektiivi-ikkuna. Se päästää lävitseen auringonsäteilyn, mutta heijastaa takaisin pitkäaaltoisen lämpösäteilyn, minimoiden näin lämmön säteilemisen ulos sisätiloista. Tämä

ominaisuus ei kuitenkaan estä lämmön siirtymistä ikkunan kautta johtumalla tai konvektiolla. Lämpösäteilyä tapahtuu myös rakennuksen sisällä. Perinteisesti lämmityksessä käytetyt lämpöpatterit siirtävät lämpöenergiaa sisäilmaan säteilemällä./2, 37/

2.4 Kylmäsillat

Kylmäsillaksi kutsutaan rakenteen sisällä olevaa osaa, jonka lämmönjohtavuus ja johtumalla kulkeutuvan lämpövirran tiheys on ympäröivää rakennetta suurempi. Tyypillisiä rakenteissa sijaitsevia kylmäsilloja ovat esimerkiksi erilaiset siteet, kannattimet sekä tuki- että runkorakenteet. Rakenteita suunniteltaessa on laskelmissa otettava huomioon säännöllisesti toistuvat kylmäsillat. Sen sijaan yksittäisiä kylmäsilloja, kuten parvekkeiden kannattimia, ei tarvitse ottaa huomioon rakenteiden lämmönläpäisykertoimia laskettaessa. /5, 4/

Rakentamismääräyskokoelman D5 mukaan lasketaan rakennuksen energiankulutus ja lämmitystehontarve. Kylmäsilloista aiheutuvan lämmitystehontarpeen D5 huomioi osassa, jossa lasketaan rakennuksen vaipan johtumislämpöhäviöitä. Sen mukaan rakennusosien välisistä liitoksista aiheutuvat lämpöhäviöt lasketaan kaavalla 6. Viivamaisen kylmäsillan aiheuttaman lisäkonduktanssin arvoja eri tilanteissa löytyy D5 taulukoista. /10, 18 – 19/

$$Q_{\text{kylmäsillat}} = \sum l_k \cdot \Psi_k (T_s - T_u) \Delta T / 1000, \text{ missä } \quad \text{Kaava 6.}$$

$Q_{\text{kylmäsillat}}$ Johtumislämpöhäviö kylmäsillojen läpi, kWh

l_k viivamaisen kylmäsillan pituus, m

Ψ_k viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssi, W/(m*K)

T_s sisälämpötila, °C

T_u ulkolämpötila, °C

ΔT ajanjakson pituus, h

Rakenteiden kaikki kylmäsillat tulisi suunnitella sekä lämpötila- että kosteusteknisesti toimiviksi. Kylmäsillasta johtuen rakenteen lämpötila voi laskea paikallisesti. Sen seurauksena saattaa rakenne alkaa tummua alhaisemman pintalämpötilan alu-

eelta Alhainen lämpötila voi aiheuttaa myös riskin kosteuden tiivistymisestä rakenteen pintaan ja sitä kautta mahdollisesti suotuiset olosuhteet homeiden kasvuun. Lämpötilan lasku ei saa johtaa siihen, etteivät lämpöolot oleskeluvyöhykkeellä täytä rakentamismääräyskokoelman D2 vaatimuksia. Edellä mainittujen asioiden lisäksi kylmäsiltojen kautta ulos johtuva lämpö lisää rakennuksen energiakustannuksia. /5, 5 ; 6, 19 – 20/

3 KOSTEUS

Kosteus tarkoittaa, jossakin aineessa olevan veden määrää. Ilman kosteudella tarkoitetaan näin ollen ilmassa olevan veden määrää. Ilmassa oleva vesi voi esiintyä kolmena eri olomuotona, jotka ovat höyry, nestemäinen sumu ja jääkiteet. Veden olomuodonmuutokset sitovat tai vapauttavat aina lämpöenergiaa. Ilman kosteudella on merkittävä rooli rakentamisessa, sillä se vaikuttaa osaltaan eri materiaalien kuivumisaikoihin sekä saattaa olla yhtenä osatekijänä vaurioittamassa talon rakenteita. Suuri sisäilman kosteus hidastaa esimerkiksi betonin kuivumista, kun taas alhainen ilman kosteus ärsyttää ihmisten hengitysteitä. /1, 436/

3.1 Sade

Sade on suurin kosteusrasitusta rakennukseen aiheuttava tekijä. Vesi voi sataa taivaalta vetenä, räntänä tai lumena. Näistä kolmesta olomuodosta suurimman kosteuskuorman aiheuttaa räntä, joka saattaa jäädä pitkäksikin ajaksi kiinni loiviin tai vaakasuoriin rakenteisiin. Sadetyypeistä Suomessa on yleisin pystysade, joka kasotelee yleensä vaakasuoria ja vinoja pintoja. Myös pystysuorien rakenteiden kasutuminen on mahdollista pystysateen aikana, jos talossa ei ole riittävän pitkiä räystäitä. Voimakkaaseen tuuleen liittyvä viistosade aiheuttaa rakennuksen ulkoverhoukselle ja ikkunoille erityisen suuria vaatimuksia, koska se on tärkein rakennuksen vaippaan kohdistuva kosteusrasitustekijä. /2, 52/

3.2 Ilman kosteus

Kuiva ilma ei sisällä lainkaan vettä. Käytännössä esimerkiksi rakennuksen sisäilma ei ole koskaan kuivaa, vaan ilmaan haihtuu aina jonkin verran kosteutta. Ilmassa oleva kosteus voidaan ilmaista vesihöyrymääränä eli absoluuttisena kosteutenä. Absoluuttinen kosteus kertoo, kuinka paljon vesihöyryä on jossakin tilavuudessa ilmaa ja sen yksikkö on g/m^3 . Ilmaan mahtuvan kosteuden määrä on riippuvainen ilman lämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila, sitä enemmän kosteutta il-

maan mahtuu. Maksimikosteus on jossakin lämpötilassa ilmaan mahtuvan veden suurin arvo ja sitä kutsutaan myös vesihöyryn kyllästyskosteudeksi. /3, 395 – 397/

Ilman suhteellinen kosteus on absoluuttinen kosteus jaettuna maksimikosteudella ja se on rakennustekniikassa ilman kosteudesta yleisimmin käytetty tieto. Suhteellinen kosteus saadaan prosentteina, eikä se voi ikinä ylittää 100 prosenttia. Rakennuksen sisäilman suhteellinen kosteus lämmityskaudella on kuivassa huonetilassa noin 20 – 40 prosenttia, kun se ulkona on keskimäärin 85 – 90 prosenttia. Korkeasta suhteellisesta kosteudesta huolimatta, on kosteuden määrä ilmassa talvella silti vähäinen. Sisäilman suhteelliseen kosteuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi sisätilojen eri lähteistä haihtuva kosteus sekä ilmanvaihdon tehokkuus. /2, 55/

Lämpötilan laskiessa ilmassa oleva vesihöyry saavuttaa kyllästyskosteuden ja alkaa sen jälkeen tiivistyä eli kondensoitua vedeksi. Lämpötilaa, jossa kondensoituminen alkaa tapahtua, kutsutaan kastepisteeksi. Tällöin ilman suhteellinen kosteus on 100 prosenttia. Taulukosta 2 on nähtävissä normaali ilmanpaineessa, tietyssä lämpötilassa olevan ilman kyllästyskosteuden arvo v_k . Mikäli ilman lämpötila alkaa hetkellisesti laskea ja ilman absoluuttinen kosteus säilyy samana, voi tästä seurata tilanne, jossa vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi pinnoille. Ilman absoluuttinen vesihöyrypitoisuus ei voi koskaan olla suurempi kuin ilman kyllästyskosteuden arvo. /2, 55/

Taulukko 2. Ilman ominaisuuksia normaali-ilmakehän paineessa.

t [°C]	v _k [g/m ³]	p _k [Pa]	t [°C]	v _k [g/m ³]	p _k [Pa]	t [°C]	v _k [g/m ³]	p _k [Pa]
-20	0,88	102	15	12,86	1708	50	83,14	12390
-19	0,95	111	16	13,65	1820	51	87,10	13020
-18	1,04	122	17	14,49	1939	52	91,21	13677
-17	1,14	135	18	15,37	2064	53	95,48	14362
-16	1,25	149	19	16,30	2197	54	99,92	15075
-15	1,38	164	20	17,28	2337	55	104,52	15818
-14	1,52	181	21	18,31	2484	56	109,30	16592
-13	1,67	200	22	19,40	2640	57	114,25	17397
-12	1,83	221	23	20,54	2805	58	119,39	18234
-11	2,01	243	24	21,74	2979	59	124,72	19105
-10	2,20	266	25	23,00	3162	60	130,24	20010
-9	2,40	292	26	24,32	3355	61	135,95	20951
-8	2,61	319	27	25,71	3559	62	141,87	21928
-7	2,84	348	28	27,17	3773	63	147,99	22943
-6	3,08	379	29	28,70	3999	64	154,33	23997
-5	3,33	412	30	30,31	4237	65	160,88	25090
-4	3,60	447	31	31,99	4487	66	167,66	26224
-3	3,89	485	32	33,75	4750	67	174,67	27401
-2	4,19	524	33	35,60	5027	68	181,90	28620
-1	4,51	566	34	37,54	5317	69	189,38	29884
0	4,85	611	35	39,56	5622	70	197,11	31194
1	5,21	658	36	41,68	5943	71	205,08	32551
2	5,58	708	37	43,90	6279	72	213,31	33956
3	5,98	762	38	46,21	6631	73	221,80	35410
4	6,40	818	39	48,63	7001	74	230,56	36915
5	6,84	878	40	51,16	7388	75	239,60	38472
6	7,31	941	41	53,79	7793	76	248,91	40082
7	7,80	1008	42	56,54	8218	77	258,51	41747
8	8,32	1079	43	59,41	8663	78	268,40	43468
9	8,87	1154	44	62,40	9128	79	278,59	45247
10	9,45	1234	45	65,52	9614	80	289,08	47084
11	10,06	1318	46	68,77	10122			
12	10,71	1408	47	72,15	10653			
13	11,39	1502	48	75,67	11207			
14	12,10	1603	49	79,33	11786			

3.3 Diffuusio

Vesihöyryn osapaine-ero saa aikaan huone- tai ulkoilman kosteuden siirtymisen talon rakenteisiin. Tätä tapahtumaa kutsutaan diffuusioksi ja sen suunta on suuremmasta osapaineesta pienempään. Yleensä tämä tilanne tarkoittaa kosteuden siirtymistä lämpimämmästä tilasta kylmempään, mutta diffuusion on mahdollista tapahtua myös toisinpäin, mikäli kylmemmän tilan kosteuspitoisuus on suurempi kuin lämpimän. Melkein jokainen rakenne läpäisee jonkinlaisen määrän vesihöyryä. Kosteusteknisesti toimivaa seinärakennetta suunniteltaessa tulee lämpi-

män sisätilan ja lämmöneristeen väliin tulla mahdollisimman tiivis, vesihöyryä läpäisemätön kalvo. Lisäksi rakenteen vesihöyrynvastuksen tulee pienentyä sisältä ulospäin, muuten kosteusvirta voi hidastua rakenteen keskellä, ja kosteudenker-
tyminen rakenteeseen käynnistyy. /2, 56/

3.4 Kondensoituminen

Vesihöyryn tiivistyessä vedeksi on kyseessä kondensoituminen. Kondensoitumi-
nen voi tapahtua, kun ilman suhteellinen kosteus on 100 prosenttia ja sitä esiintyy
sekä rakenteen sisällä että sen pinnalla. Tiivistyminen tapahtuu rakenteissa aina
pinnalle, joka on ympäröivää ilmaa kylmempi. Kondensoitumisen edellytyksenä
on myös vesihöyryn kyllästymiskosteuden ylittyminen. Vesihöyryn tiivistymisen
kannalta kriittisiä paikkoja ovat esimerkiksi rakenteissa sijaitsevat kylmäsillat. /2,
57/

4 RAKENNUKSEN SISÄILMASTO JA VIIHTYISYYS

4.1 Oleskeluvyöhyke

Oleskeluvyöhykkeellä tarkoitetaan niitä rakennuksen osia, joilla sisäilmaston vaatimukset on suunniteltu saavutettaviksi. Oleskeluvyöhyke rajoittuu yleensä lattiaan ja on vähintään jonkin huonetilan osa. Sen yläpinta sijaitsee 1,8 metrin korkeudella lattiapinnasta ja sivupinnat vähintään 0,6 metrin etäisyydellä seinistä tai muista vastaavanlaisista rakenneosista. /4, 2/

4.2 Lämpöviihtyisyys

Rakennus tulee suunnitella ja rakentaa siten, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan sopiva lämpötila. Tätä lämpötilaa on pystyttävä ylläpitämään ilman tarpeetonta energian käyttöä. Lämmityskauden aikana huoneen lämpötilan suunnitteluarvona käytetään 21 °C ja kesän aikana lämpötilaa 23 °C. Lämpötila saa poiketa suunnitteluarvosta lämmityskauden aikana oleskeluvyöhykkeellä 1,1 metrin korkeudessa huoneen keskellä ± 1 °C. Poikkeuksellisesti joidenkin tilojen suunnitteluarvo voi poiketa edellä mainituista arvoista. /4, 3/

4.3 Lämpötilaerot

Huoneen sisällä eri pintojen tai alueiden välillä vaihtelevat lämpötilat voivat vaikuttaa negatiivisesti oleskelukokemukseen huoneessa. Erot lämpötiloissa voivat johtua eri tavalla lämpöä säteilevistä rakenteista, lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmästä. Lämpötilaerot huoneessa voivat olla sekä vaaka- että pystysuuntaisia. Vaikka lämpöolot olisivatkin keskimääräisesti likipitään ihanteellisesti, voi oleskelu jonkin yksittäisen rakenneosan, esimerkiksi kylmää säteilevän ikkunan, läheisyydessä aiheuttaa tuntemuksen kylmästä. Lisäksi kosteus voi tiivistyä kylmiin pintoihin. Sosiaali- ja terveysministeriön sisäilmaohjeen suosituksen mukaan, yksittäisen rakenneosan alin sallittu pistemäinen lämpötila on 9 °C. /2, 175/

Ihmisen jalat ovat herkkiä aistimaan lämpötilaa ja niiden aistimukset vaikuttavatkin oleellisesti henkilön aivoissaan muodostamaan kuvaan koko huoneen lämpötilasta. Lattiasta saatavaan lämpöaistimukseen vaikuttaa oleellisesti jalkineiden tai

sukkien käyttö ja lattian pintamateriaali. Vaikka puu- ja kivipintaisen lattian pintalämpötila olisi täysin sama, ihminen tuntee kivilattian kylmempänä. Kivilattia johtaa lämpöä puulattiaa paremmin, joten sen pintalämpötilan tulisi siis olla jonkin verran korkeampi saman lämpöaistimuksen saavuttamiseksi. /2, 176 /

Taulukko 3. Lattian optimilämpötila paljaalle jalalle ja enimmäisvaihteluväli, jolla tyytymättömien osuus olisi alle 15 %. /

Lattiapäällyste (alusta betonia)	Optimaalinen lämpötila °C	Pintalämpötilan vaihteluväli °C
Puu	25,5	23 – 28
Betoni	27,0	26 – 28,5
Kokolattiamatto	24,5	21 – 28
Huopamatto	25,0	22 – 28
Betoni + mosaikkilaatta, 5 mm	27,5	26,5 – 28

5 TUTKITTAVAT RAKENNETYYYPIT

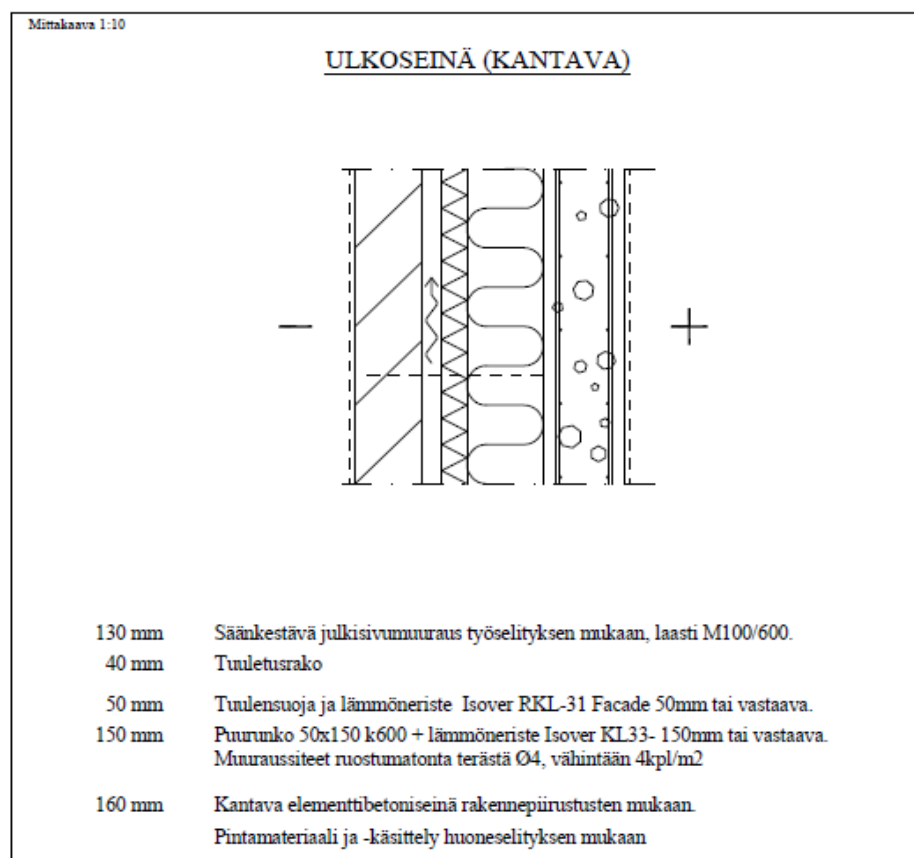
Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ja mallinnetaan Comsol multiphysics 4.3 -ohjelmalla kahden eri kerrostalon ulkoseinärakenteen ja välipohjan liitosta. Vuoden 2007 rakentamismääräyskokoelman mukaan rakennetusta talosta käytetään tässä työssä nimitystä ”A-talo” ja vuoden 2010 säännösten mukaan rakennetusta ”B-talo”. Kerrostalojen välillä ei käytetyissä eri ulkoseinärakenteissa ole muita eroja kuin, että myöhemmin rakennetussa B-talossa lämmöneristyksen paksuus on suurempi. Lisäksi B-talon lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden λ -arvo on pienempi. Tutkittavaksi kohteeksi on valittu rakennuksen osat, joissa parvekkeiden betonilaatan kannattamiseen käytettävä teräsputki läpäisee ulkoseinän, ja on kiinnitetty rakennuksen välipohjarakenteeseen. Taloissa on käytetty useita erilaisia seinä- ja välipohjaratkaisuja, mutta tässä työssä niistä tutkitaan neljää ulkoseinärakennetta, kun taas välipohjaratkaisu on kaikissa laskentamalleissa sama. Seinärakenteet ovat joko kantavia tai ei-kantavia.

5.1 Kantavat ulkoseinärakenteet

Kantavat ulkoseinärakenteet on molemmissa kerrostaloissa toteutettu kantavalla 160 millimetriä paksulla betonisella elementtiseinällä. Näiden kahden seinän rakenteellisessa tai rakennusfysikaalisessa toiminnassa ei ole merkittäviä eroja, vaan ainoastaan valmistustapa ja -paikka ovat keskenään erilaiset. Molempien seinien sisä- ja ulkopinnoissa on teräsverkko, jota ei ole kuitenkaan otettu huomioon rakennetta mallinnettaessa.

A-talon lämmöneristys on toteutettu siten, että betoniseen sisäseinään on kiinnitetty 50 x 125 mitoiltaan oleva puurunko 600 mm välein. Näiden puurunkojen väliin on asetettu 125 mm paksu lämmöneriste ja sen jälkeen sekä runko että villat on peitetty 50 mm paksulla tuulensuojavillalla. Näin ollen eristeen yhteispaksuudeksi tulee 175 mm. Tuulensuojavillan ja säänkestävän ulkoseinämuurauksen välissä on 40 millimetrin tuuletusrako. B-talossa puolestaan lämmöneristys on tehty samalla periaatteella, mutta 25 mm paksummaksi. Lisäksi B-talon lämmöneristeen läm-

mönjohtavuuden arvo λ on 0.033 ja lisäeristeen 0.031 W/(m² K), kun A-talossa molempien eristeiden arvo on 0.036 W/(m² K). Puurungon paksuus on näin ollen kasvanut 50 x 150 mm, runkojaon pysyessä 600 mm. Puurunkojen väliin tuleva lämmöneriste on 150 mm paksu ja tuulensuojavillan kanssa yhteispaksuudeksi tulee 200 mm. Tiiliverhous ja tuuletusrako ovat kuten A-talossa.

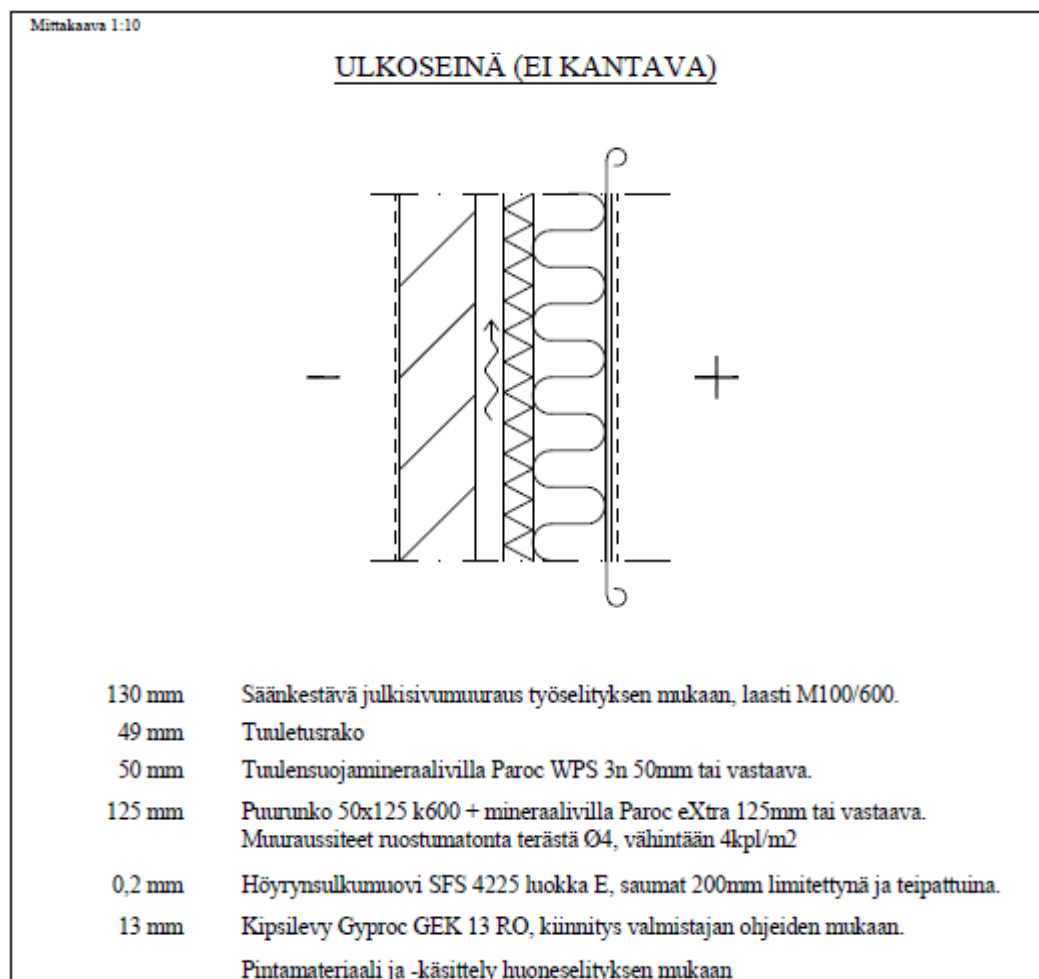


Kuvio 2. Leikkaus kantavasta ulkoseinärakenteesta.

5.2 Ei-kantavat ulkoseinärakenteet

Sekä A- että B-talon ei-kantavat seinärakenteet on toteutettu kokonaan puurunkoisina. Molempien talojen sisäseinäpinta on identtinen. Pintana on 13 mm kipsilevy ja välittömästi sen takana höyrynsulkumuovi. Pintarakenteen jälkeisestä toteutuksesta löytyy eroja talojen välillä. A-talon puurunko on mitoiltaan 50 x 125 mm, kun taas B-talon vastaava on 50 x 150 mm. Runkojako on identtinen eli 600 mm. Puurungon paksuuden mukaisesti määräytyvät myös käytettyjen lämmöneristeiden paksuudet. Rungon ja mineraalivillan päälle on kiinnitetty tuulensuojavilla,

joka on 50 mm paksu. A-talon lämmöneristysten paksuus on yhteensä 175 mm ja B-talon 200 mm. Julkisivu on 130 mm paksu tiilimuuraus, muurauksen ja tuulen-suojevillan väliin on jätetty 49 mm tuuletusrako.

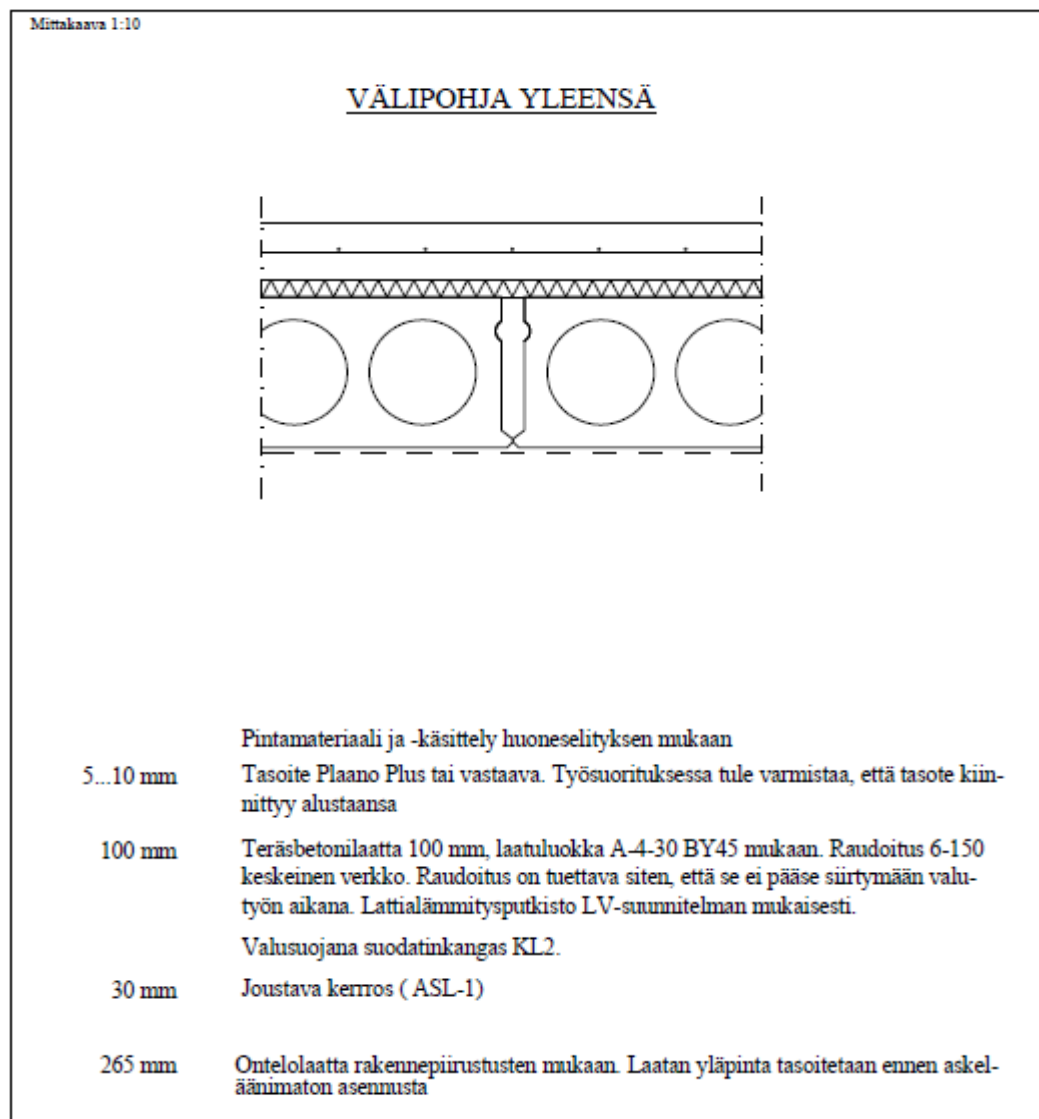


Kuvio 3. Leikkaus ei-kantavasta ulkoseinärakenteesta.

5.3 Välipohja

Molempien kerrostalojen välipohjat on toteutettu yleisesti 265 mm korkeiden ontelolaattojen avulla, poikkeaviakin rakenteita löytyy esimerkiksi märkätilojen kohdalla. Ontelolaatat tukeutuvat ja siirtävät kuormia pitkittäisessä suunnassa kantaville seinille. Ontelolaattojen päälle on asennettu 30 mm paksu joustava kerros, joka toimii askeläänien eristeenä. Joustavan kerroksen päälle on valettu 100 mm paksu pintalaatta, jonka sisällä on 6 mm teräksestä 150 mm jaolla oleva betoniteräsverkko. Lisäksi laatan sisälle on ennen valua kiinnitetty rauditusverkkoa

hyväksikäyttäen lattialämmityspotkisto. Lopuksi pintalaatta on tasoitettu yläpinnasta 5-10 mm tasoitekerroksella ennen pintamateriaalin asennusta. Välipohjaan tukeutuva ja seinänvaipan puhkaiseva parvekkeen kiinnittämiseen rakennuksen runkoon käytettävä kylmämuokattu teräsputki on mitoiltaan 80 x 80 x 4 mm ja 730 mm pitkä. Putkea ei ole eristetty sisältä. Näitä teräsputkia on yhden parvekkeen kannattamisessa käytetty kaksi kappaletta.

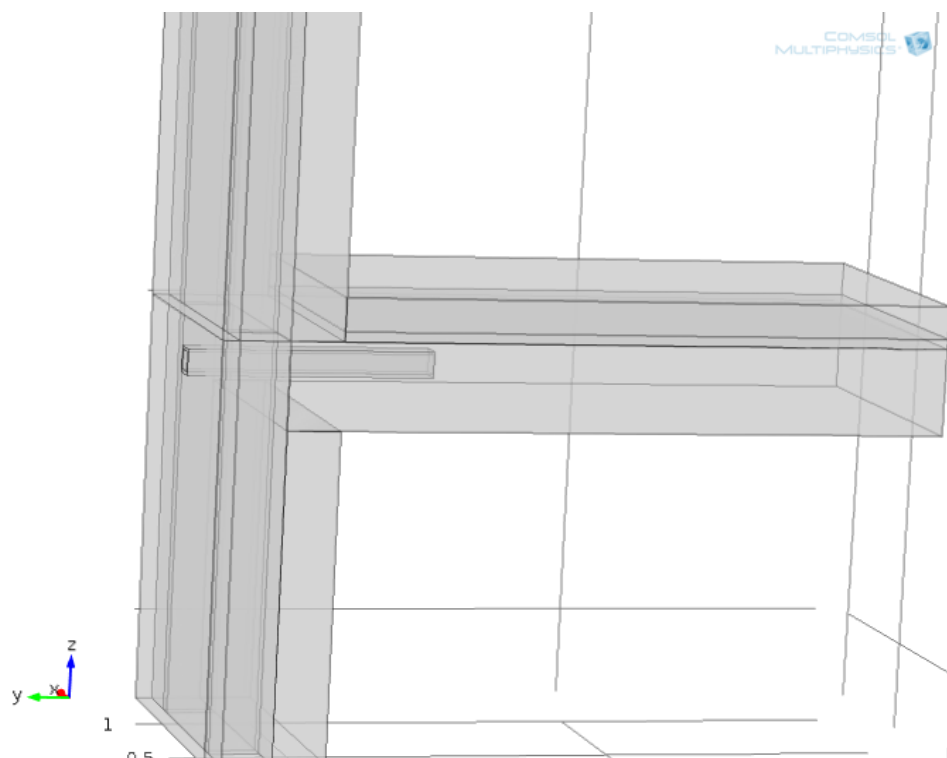


Kuvio 4. Leikkaus välipohjarakenteesta.

5.4 Comsol-mallinnus

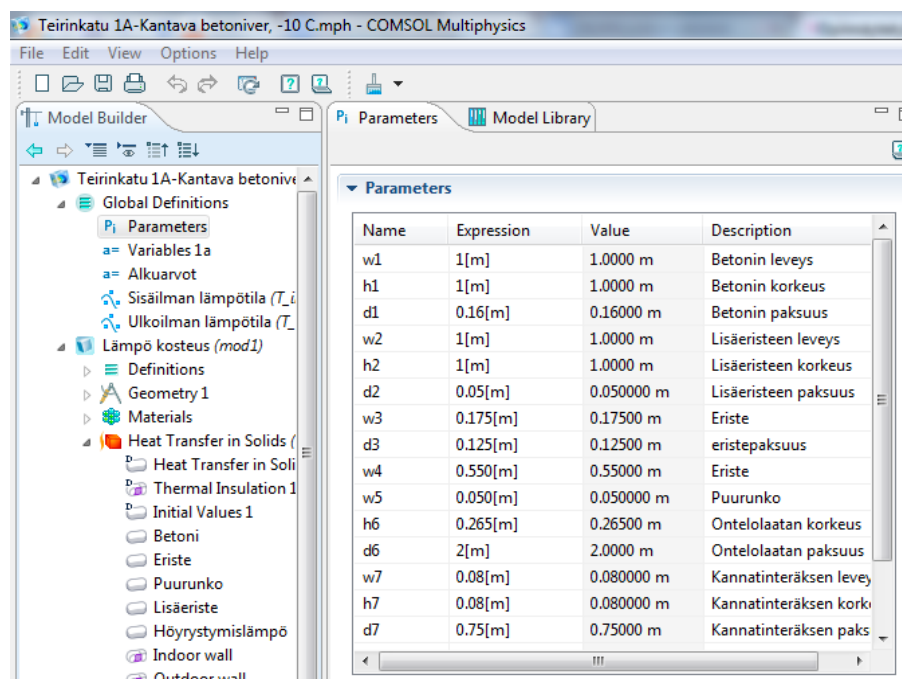
Comsol Multiphysics on monialaisesti erilaisia fysikaalisia ilmiöitä mallintava, elementtimenetelmään (finite elementh method) perustuva osittaisdifferentiaaliyh-tälöiden numeeriseen ratkaisuun tarkoitettu ohjelmisto. Ohjelmaan on sisäänra-kennettu fysiikan sovelluksia mm. nesteen virtaus, lämmön siirtyminen rakenteis-sa ja sähköstatiikka. Tämän opinnäytetyön mallit on rakennettu ja ratkaistu läm-pö- ja kosteus moduulin heat transfer in solids -osaa hyväksikäyttäen.

Tässä työssä päätettiin mallintaa 1 metrin leveä ja 2 metriä korkea osa ulkoseinä-rakenteista, siihen liittyvine välipohjineen. Parvekkeen kannatinteräs sijaitsee mallinnetun rakenteen leveyden keskellä. Kuviossa 5 on nähtävissä Suvilahden B-talon kantavasta ulkoseinä-rakenteesta ja siihen liittyvästä välipohjasta tehty 3D-malli. Rakenne on mallinnettu tuuletusrakoon asti, huomioonottamatta tiilivuora-usta, koska ilman lämpötila ja kosteus on tuuletusraossa sama kuin rakenteen ul-kopuolisessa ilmassa. Kannatinteräksen pää rajoittuu ulkoilmaa vasten.



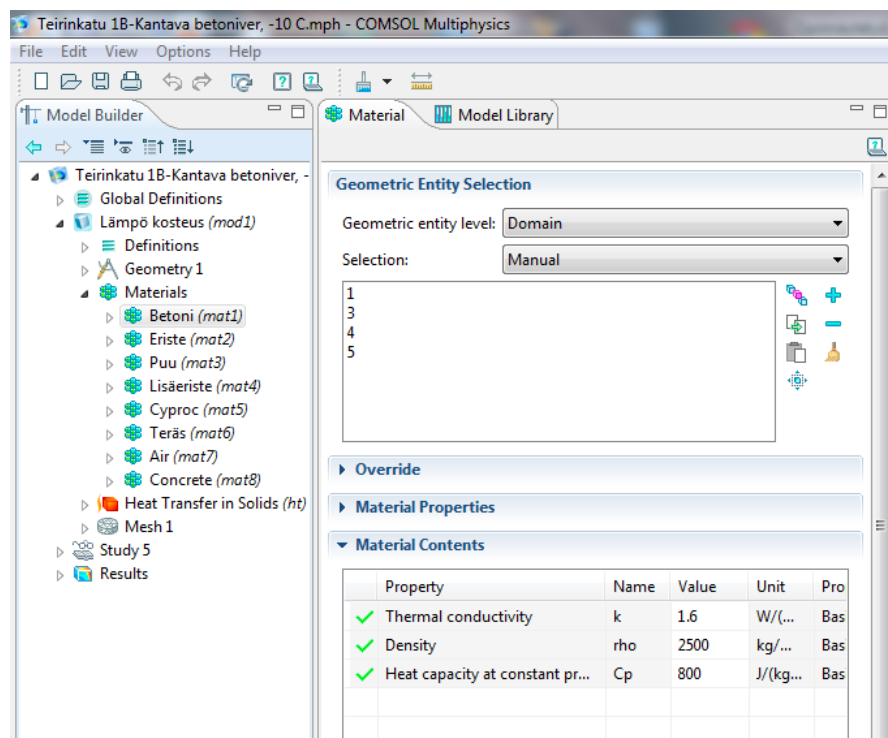
Kuvio 5. Comsolilla mallinnettu B-talon kantava ulkoseinä-rakenne ja siihen liit-tyvä välipohja.

Rakennemallit voi ohjelmaan tehdä joko käyttämällä CAD-ohjelmalla tehtyjä 2D-malleja tai käyttämällä Comsolin omaa 3D-mallinnus vaihtoehtoa, kuten tässä työssä tehtiin. Mallintaminen aloitetaan antamalla lähtötiedot mallinnettavalle tilanteelle (variables). Tarvittavien tietojen määrä riippuu käytetystä fysikaalisesta moduulista, mutta tässä työssä tällaisia tietoja ovat esimerkiksi ilman lämpötila sisällä ja ulkona.



Kuvio 6. Eri rakenneosille annetut dimensiot.

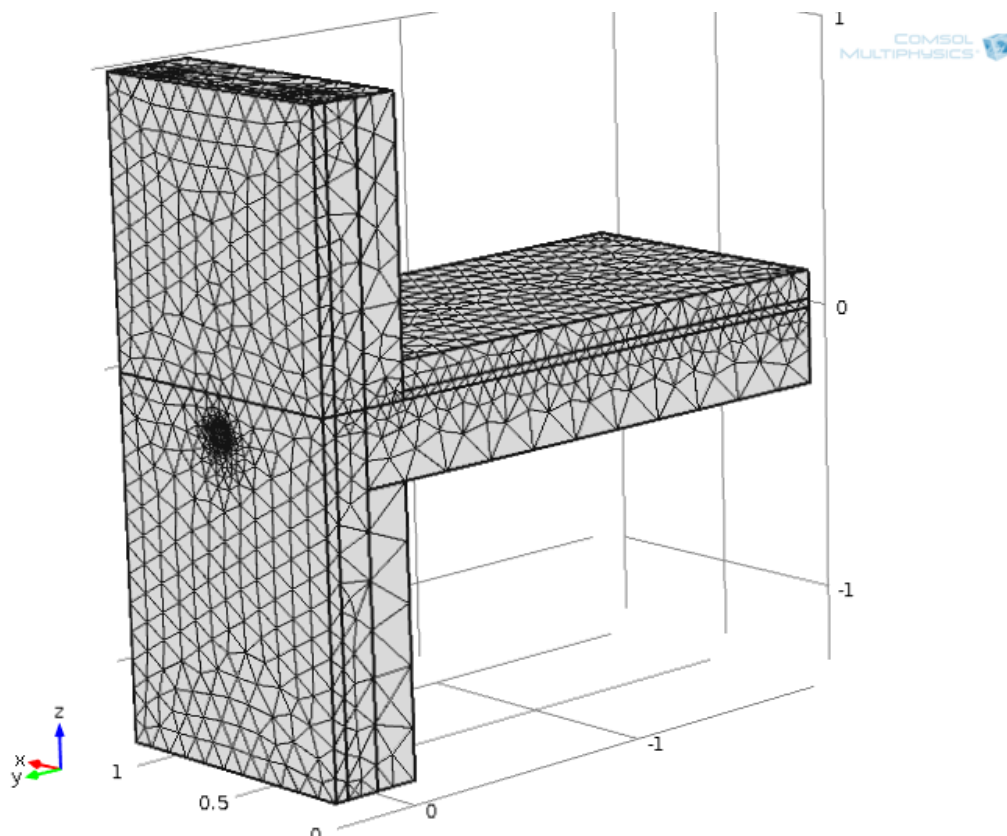
Tämän jälkeen määritetään rakenteen eri rakennekerroksille mitat ja sijainti x-, y- ja z-koordinaatiston tasoissa (kuvio 6.), jonka jälkeen ohjelma rakentaa halutunlaisen rakenneosan määrättyyn pisteeseen. Kun kaikki rakennetyypin kerrokset on saatu mallinnettua, tulee kullekin rakennusosalle antaa fysikaaliset parametrit (kuvio 7.). Nämä tiedot, kuten esimerkiksi aineen ominaislämpökapasiteetti, voi hakea Comsolin tarjoamasta materiaalikirjastosta tai syöttää lukuarvot itse.



Kuvio 7. Rakennusmateriaalien fysikaaliset parametrit.

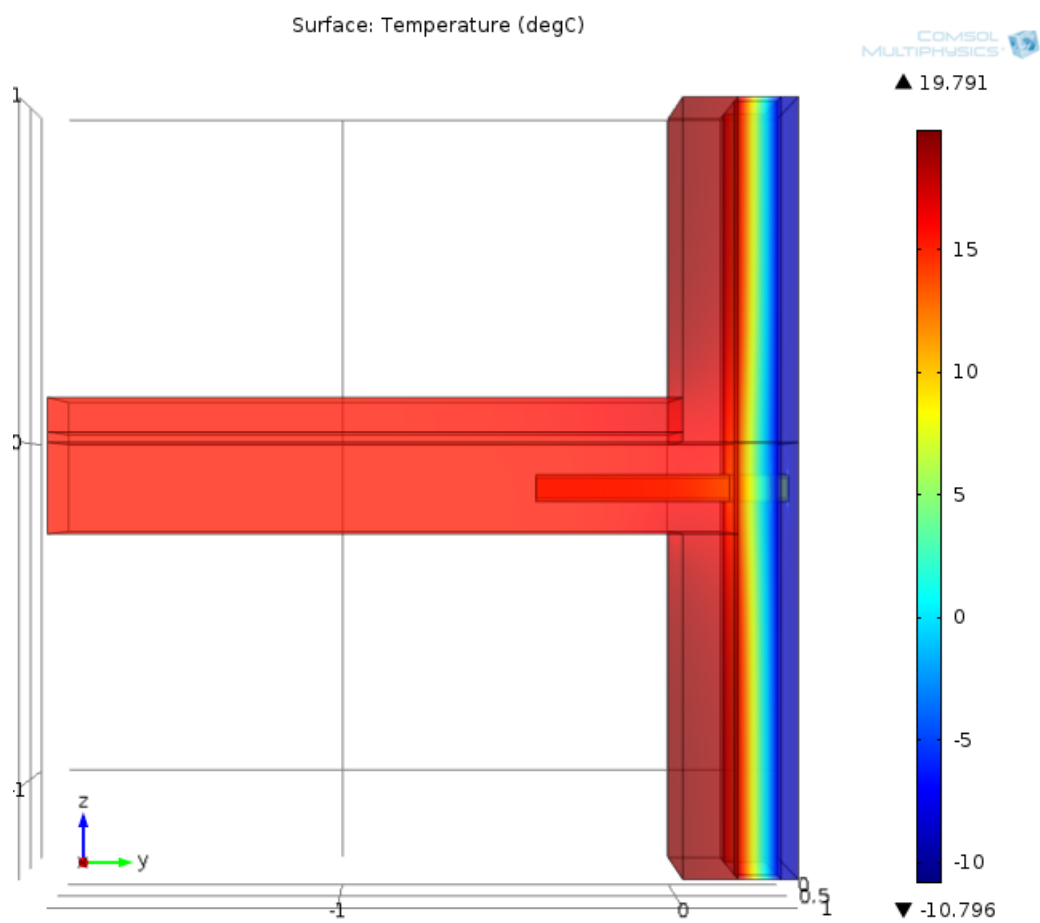
Heat transfer in solids -osassa määritellään, mitä tekijöitä kullekin rakennekerrokselle otetaan huomioon laskennassa ja mitä laskukaavaa käytetään lämpövirtaa laskettaessa. Esimerkiksi annetaan ohjelmalle tieto, että se poimii käyttöön aikaisemmin rakennusosatyypeille annetut materiaaliarvot. Lisäksi on osoitettava rakenteesta ulko- ja sisäpinta, joiden välisen lämpötilaeron vaikutuksesta lämpövirtauus rakenteessa tapahtuu.

Kun kaikki laskennan kannalta tarpeelliset lähtötiedot on annettu ja rakenne on saatu mallinnetuksi, tulee koko rakenteesta tehdä elementtiverkko (mesh). Verkotuksen tarkoituksena on jakaa rakenne pienempiin elementteihin, joiden kautta suoritettava laskenta tapahtuu. Elementtien tiheyden ja tavan voi valita valikosta, tässä tapauksessa se tehtiin parvekkeen kannatinteräksen ympärille. Kuvista 7 voidaan nähdä, että verkotuksen tiheys on suurin alueella, jossa teräsputki sijaitsee ja näin ollen tältä alueelta saadaan myös kaikista tärkein laskentatulokset.



Kuvio 8. Kannatinteräksen ympärille rakennettu elementtiverkko.

Tässä vaiheessa kaiken tulisi olla valmista laskentaa varten, joka tapahtuu studyvälilehden alta. Laskentamuotoja on erilaisia, ja tähän työhön valittiin käytettäväksi ajastariippuvainen Time dependent -solver. Siinä voidaan etukäteen määrittellä kokonaisaika, jolta laskenta halutaan suorittaa ja mittaustiheys annetun ajanjakson sisällä. Esimerkiksi tässä työssä kokonaisajanjaksoksi valittiin 30 vuorokautta, jonka aikana laskenta on suoritettu 4 tunnin välein. Jos laskenta onnistuu ilman virheilmoituksia, voidaan tuloksia tarkastella Results-välilehdeltä. Tuloksia on mahdollista saada ulos monessa eri muodossa. Tämän työn kannalta oleelliset tiedot ovat lämpötilan muutos rakenteen sisällä halutuissa pisteissä sekä kannatinteräksen kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus. Mittauspisteet sijaitsevat eri rakennekerrosten rajakohdissa, sekä huoneen sisällä aina oleskeluvyöhykkeen rajalle saakka. Näistä tiedoista on piirretty erilaisia kuvaajia havainnollistamaan tuloksia. Kuviosta 8 on nähtävissä Comsolin laskennan perusteella piirtämä 3D-malli lämpötilasta rakenteen eri osissa ulkolämpötilan ollessa -10 astetta ja sisälämpötilan 21 astetta.

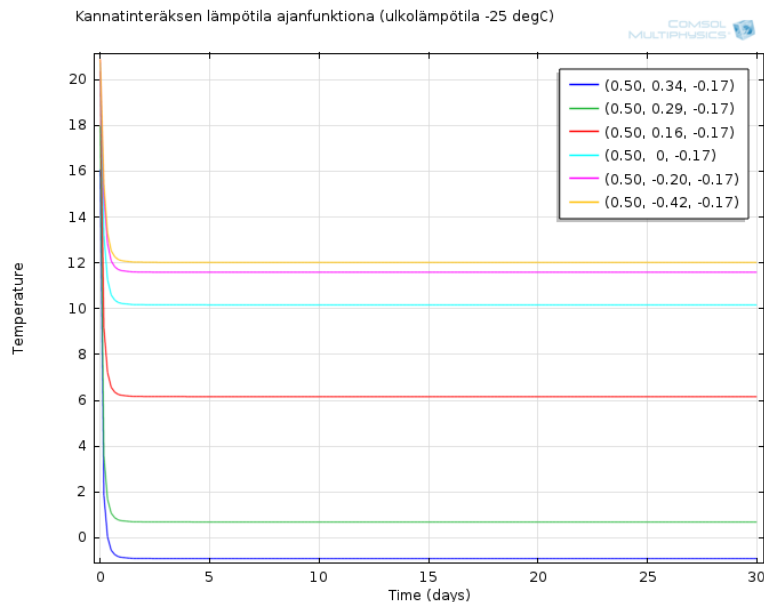


Kuvio 9. Kantavan rakenteen lämpötila ulkolämpötilan ollessa -10°C ja sisälämpötilan 21°C .

6 TULOKSET

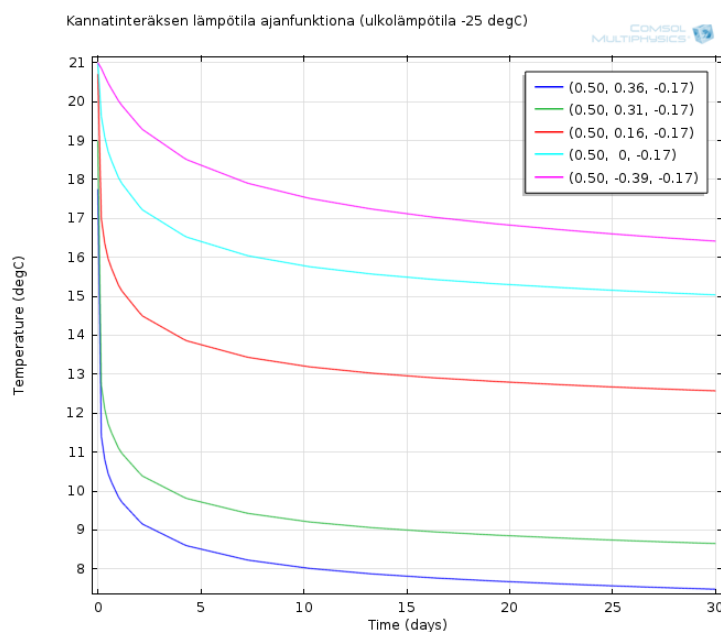
6.1 Kannatinteräksen lämpötila

Comsolista saatujen tulosten, ja niiden perusteella piirrettyjen kuvaajien mukaan voidaan päätellä, että seinärakenteen ja ontelolaatan sisällä sijaitsevan kannatinteräksen lämpötila laskee ympäröivää rakennetta alhaisemmaksi. Tämä ilmiö tapahtuu sekä A- että B- talossa. Kuvio 10 havainnollistaa kannatinteräksen lämpötilaa talossa A eri pisteissä, ulkolämpötilan ollessa $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuviosta on nähtävissä, että aivan kannatinteräksen ulkoilman puoleisessa päässä sen lämpötila laskee noin yhden asteen pakkasen puolelle. Lisäeristeen ja varsinaisen eristeen rajapinnassa teräksen lämpötila on noussut hieman yli yhden asteen positiiviselle puolelle. Betoniseinän ulkopinnan kohdalla lämpötila teräksessä on noin 6 astetta ja seinän sisäpinnan tasolla hieman yli 10 astetta. Kannatinteräksen päässä, 0.415 metriä huoneen sisäpuolella, teräksen lämpötila on noin 12 astetta. Kuviosta on lisäksi nähtävissä, että lämpötilojen lasku kannattimessa tapahtuu noin yhden vuorokauden kuluessa.



Kuvio 10. Kannatinteräksen lämpötila kantavan seinärakenteen sisällä mittauspisteissä talossa A, ulkolämpötilan ollessa $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kuvio 11 esittää samoja asioita kuin kuvio 10, mutta se on piirretty talon B laskentatuloksista. Alimmilleen kannatinteräksen lämpötila laskee teräksen ulkopuolisessa päässä, jossa se on noin 7,5 °C. Lisäeristeen ja eristeen rajassa lämpötila on vähän alle 9 astetta, sisäseinän pinnan tasossa 10 astetta ja kantavan betoniseinän ulkopinnassa noin 12.8 astetta. Teräksen päässä, välipohjan sisällä, lämpötila on 16.5 astetta. B-talossa lämpötilojen laskeminen likipitään alimpaan arvoonsa tahtuu 7-9 päivän aikana.



Kuvio 11. Kannatinteräksen lämpötila kantavan seinärakenteen sisällä mittauspisteissä talossa B, ulkolämpötilan ollessa -25 °C.

Loput kannatinteräksen lämpötilaa käsittelevät laskentatulokset on kerätty taulukoihin 4 ja 5. Taulukossa 4 olevat lämpötilat ovat kantavan ja taulukossa 5 olevat lämpötilat ei-kantavan seinärakenteen kohdalla saatuja tuloksia. Taulukoista löytyvät lämpötilat on laskettu samoissa pisteissä kuin kuvioissa 10 ja 11. Tuloksista voidaan todeta, että teräsputken ulkopuolisessa päässä lämpötila laskee alimpaan arvoonsa talossa A kantavan seinärakenteen kohdalla, kun lämpötila säilyy pitemmän aikaa -25 asteessa. Välipohjarakenteen sisällä sijaitseva kannattimen sisempi pää kylmenee eniten talossa A, ei-kantavan seinärakenteen alueella. Tällöin lämpötila putken päässä laskee noin 10 asteeseen ulkolämpötilan ollessa tässäkin

tapauksessa -25 astetta. Teräksen lämpötila laskee myös huomattavasti jo ulkoilman -10 asteen vaikutuksesta.

Taulukko 4. Kannatinteräksen lämpötilan muutos ulkoilman vaikutuksesta kantavan seinärakenteen alueella ja välipohjan sisällä.

Kannatinteräksen lämpötila kantavan sienärakenteen ja välipohjan sisällä

	Ulkoilman lämpötila (°C)	Lisäeristeen ulkopinta (°C)	Eristeiden välinen rajapinta (°C)	Betonirungon ulkopinta (°C)	Seinän sisäpinnan taso (°C)	Kannatinteräksen pää (°C)
Talo A	-10	6	7,5	11	14	15
Talo B	-10	12	12,5	15,5	17	18
Talo A	-25	-1	1	6	10	12
Talo B	-25	7,5	9	10	13	16,5

Taulukko 5. Kannatinteräksen lämpötilan muutos ulkoilman vaikutuksesta ei-kantavan seinärakenteen alueella ja välipohjan sisällä.

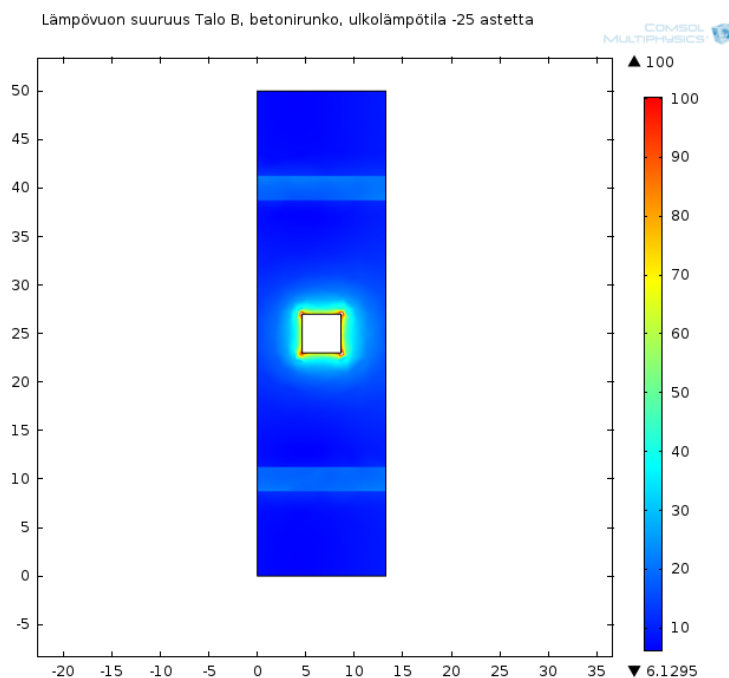
Kannatinteräksen lämpötila ei kantavan sienärakenteen ja välipohjan sisällä

	Ulkoilman lämpötila (°C)	Lisäeristeen ulkopinta (°C)	Eristeiden välinen rajapinta (°C)	Ontelolaatan ulkoreuna (°C)	Kannatinteräksen pää (°C)
Talo A	-10	7,5	8,5	9,5	13,5
Talo B	-10	7,5	8,5	10	14
Talo A	-25	1	2,5	4	10
Talo B	-25	2	3,5	5	10

6.2 Lämpövirta ulos

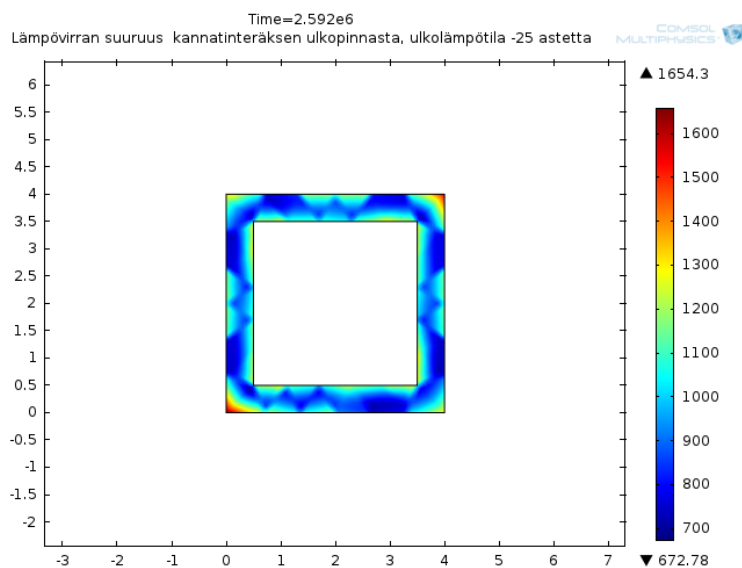
Kuvio 12 kuvaa välipohjan ontelolaatan reunalta ulospäin suuntautuvan lämpövuon suuruutta. Kuviossa ei ole mukana kannatinterästä, vaan sitä ympäröivä rakenne. Lämpövuon suuruuden yksikkönä on W / m^2 . Kuvioista voidaan nähdä, että ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus on keskimäärin $15 W / m^2$. Kannatinteräksen ympärillä ulospäin vuotava lämpömäärä on noin neljä kertaa suurempi, kuin muualta välipohjarakenteen kohdalta eli noin $40 W / m^2$, mutta vastaavasti myös vaikuttava pinta-ala on huomattavasti pienempi. Lisäksi kuvioista näkee, että betoniseinän ulkopintaan rajoittuvien runkotolppien kautta ulospäin virtaa hieman enemmän lämpöä, kuin muualta rakenteesta. Arvioimalla koko vä-

lipohjan liitoksen keskimääräiseksi lämpövirran suuruudeksi noin $25 \text{ W} / \text{m}^2$ ja kertomalla se poikkileikkauksen pinta-alalla $0,26 \text{ m}^2$, saadaan lämpövirran arvoksi noin $6,5 \text{ W}$. Kun tämä tulos kerrotaan kuukauden tarkasteluajalla, tulee lämpöhäviön arvoksi välipohjan kautta $4,7 \text{ kWh}$.

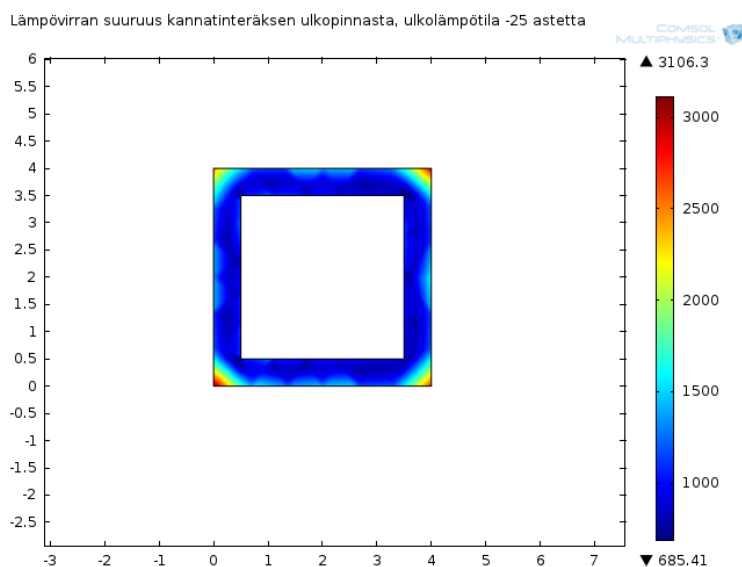


Kuvio 12. Ontelolaatan ulkoreunalta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus.

Kuviot 13 puolestaan esittää parvekkeen kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruutta, kun ulkoilman lämpötila on -25 astetta. Kyseinen kuvio on talojen A ja B teräksistä, ei-kantavan ulkoseinärakenteen kohdalta. Kuvioden mukaan lämpövirta ulos on suurin teräsputken ulkonurkista, mutta keskiarvoisesti koko putkenpään pinta-alalta ulospäin suuntautuva lämpövirta on noin $1000 - 1200 \text{ W} / \text{m}^2$. Tämä arvo kerrottuna putken pinta-alalla $0,0028 \text{ m}^2$ antaa lämpövirraksi putken päästä $2,8\text{-}3,4 \text{ W}$, talon B lukeman ollessa hieman taloa A pienempi. Tarkasteltavan ajanjakson ollessa 30 vuorokautta, johtuu kylmäsillan kautta ulos lämpöä $2\text{-}2,5 \text{ kWh}$.



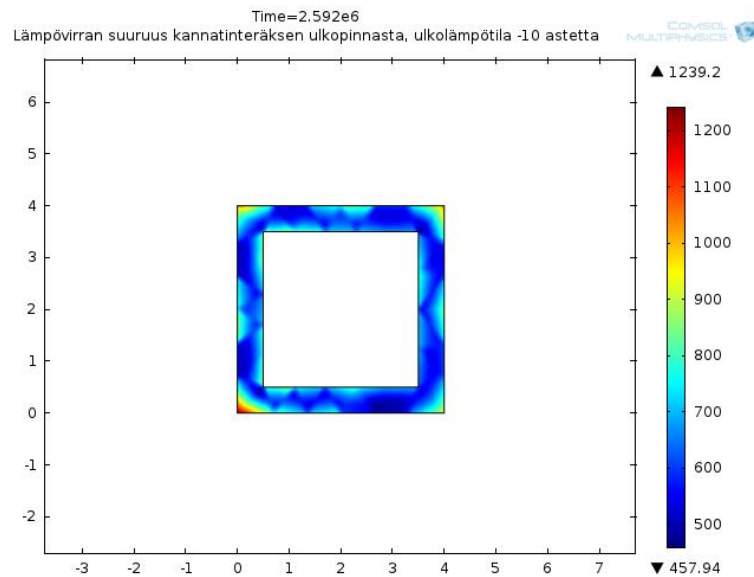
Kuvio 13. Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa A



Kuvio 14. Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa B.

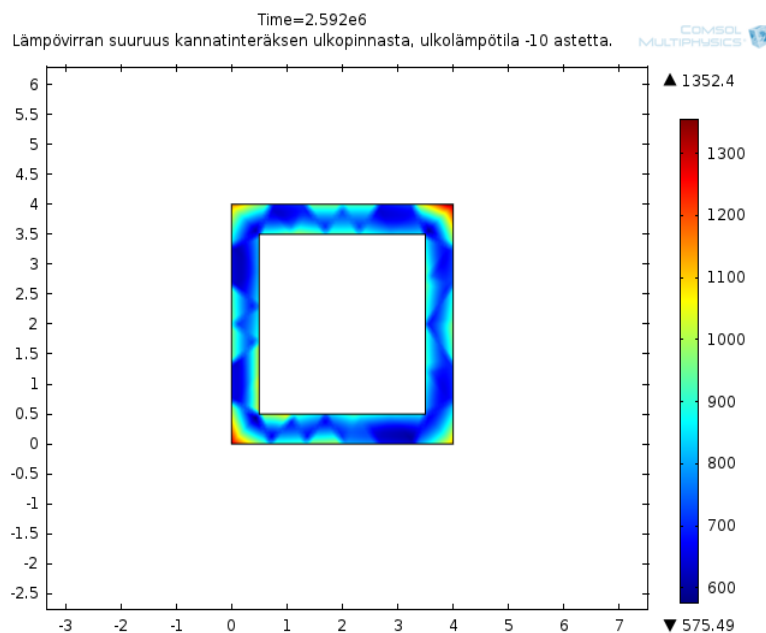
Ulkolämpötilan vaikutus ulospäin virtaavan lämmön suuruuteen käy ilmi kuviosta 14. Verrattaessa kuvioon 15 nähdään, että -10 asteen lämpötilassa lämpövirta on pienentynyt noin $600 - 700 \text{ W} / \text{m}^2$, joka tarkoittaa 1,2-1,4 kWh kuukaudessa. Lisäksi kuvioista 15 ja 16 voidaan todeta kantavan ja ei-kantavan seinärakenteen erot kannatinteräksen kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran määrään samassa ulkolämpötilassa. Ulkolämpötilan ollessa -10 astetta, kantavan seinärakenteen

kohdalla olevan kannatinteräksen kautta virtaa lämpöä ulos likimääräisesti saman verran kuin ei-kantavan seinärakenteenkin kohdalta.



Kuvio 15. Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuvan lämpövirran suuruus talossa B.

lämpövir-



Kuvio 16. Kannatinteräksen pään kautta ulospäin suuntautuva lämpövirran suuruus talossa B.

6.3 Pintalaatan lämpötila

Taulukoissa 6 ja 7 on kerätty yhteen Comsolin antamat laskenta tulokset välipohjan pintalaatan yläpinnan lämpötilasta kannatinteräksen kohdalla. Taulukon 6 tulokset ovat kohdalta, jossa parvekkeen kannatus on tehty kantavan seinärakenteen kohdalta ja taulukon 7 tiedot puolestaan ei-kantavan seinärakenteen kohdalta. Laskentapistet sijaitsevat sisäseinän ja pintalaatan yhtymäkohdassa sekä 0.2 metrin ja 0.6 metrin etäisyydellä seinästä huoneen sisälle päin. Taulukosta löytyvät tulokset A- ja B-talolle ja lisäksi ulkolämpötilan arvoille -10 ja -25 astetta.

Taulukko 6. Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä kantavan seinärakenteen kohdalla.

Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä kantavan seinärakenteen kohdalla

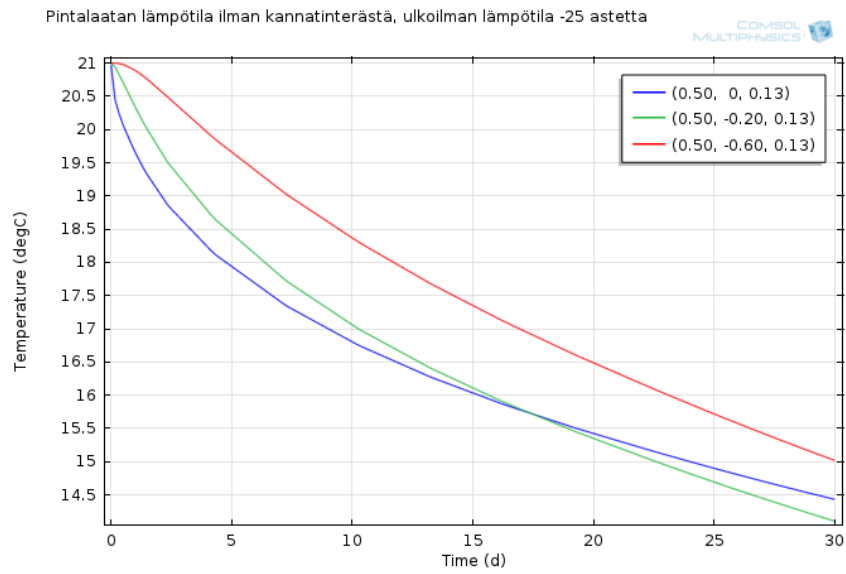
	Ulkoilman lämpötila (°C)	Seinän sisäpinnan taso (°C)	0.2 metriä seinästä (°C)	0.6 m seinästä (°C)
Talo A	-10	16,8	15,8	16,5
Talo B	-10	18,6	18,4	18,6
Talo A	-25	14,5	12,8	13,2
Talo B	-25	17,6	17	17,6

Taulukko 7. Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei-kantavan seinärakenteen kohdalla.

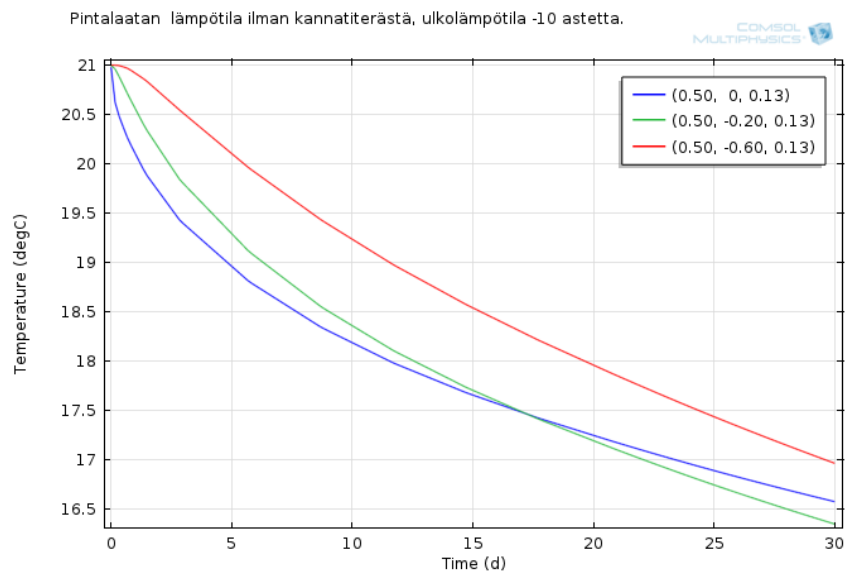
Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei kantavan sienärakenteen kohdalla

	Ulkoilman lämpötila (°C)	Seinän sisäpinnan taso (°C)	0.2 metriä seinästä (°C)	0.6 m seinästä (°C)
Talo A	-10	14,3	13,5	14,3
Talo B	-10	14,8	14,3	14,8
Talo A	-25	11	10	11
Talo B	-25	11,8	10,8	11,8

Vertailun vuoksi tehtiin laskelma A-talon ei-kantavasta seinärakenteesta kokonaan ilman kannatinterästä sekä -10 että -25 asteen ulkolämpötilassa. Laskentatulokset näistä malleista ovat nähtävissä kuvioista 17 ja 18. Sininen käyrä vastaa lämpötilan kehitystä seinän ja pintalaatan rajapinnassa, vihreä käyrä 0.2 metrin ja punainen 0.6 metrin päässä seinästä huoneeseen päin. Näiden laskelmien perusteella kannatinteräksen vaikutus laatan pintalämpötilan laskuun on noin 3-4 astetta.



Kuvio 17. Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei-kantavan seinärakenteen kohdalla ilman kannatinterästä



Kuvio 18. Pintalaatan lämpötila laskentapisteissä ei-kantavan seinärakenteen kohdalla ilman kannatinterästä

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Kondensioriski rakenteessa

Comsolilla suoritettujen laskennan tulosten perusteella voidaan havaita, että parveketta kannattavan teräsputken lämpötila laskee määrätyissä olosuhteissa paljon sitä ympäröivää rakennetta alhaisemmaksi. Tämä saattaa ulkoilman olosuhteissa aiheuttaa riskin kosteuden tiivistymisestä teräsputken pinnalle ja siitä edelleen muihin rakenteisiin. Seinärakenteen kriittisimmät paikat kosteuden tiivistymisen kannalta ovat kahden eristeen välinen rajapinta sekä eristeen ja ontelolaatan sekä eristeen ja betonirungon ulkopinnan välinen rajapinta, joissa kosteus todennäköisesti imeytyisi eristeisiin.

Tulosten perusteella kosteuden tiivistymistä tapahtuu todennäköisimmin ei-kantavan seinärakenteen kohdalla olevassa parvekkeen kannattimessa, koska sen lämpötila eri laskentapisteissä on kaikista alhaisin. Vaikka teräksen lämpötila onkin laskenut huomattavasti ympäröivää rakennetta alemmaksi, tulisi ulkoilman olosuhteiden muuttua varsin dramaattisesti lyhyellä aikavälillä, jotta kondensoitumista tapahtuisi. Esimerkiksi talon A ei-kantavan seinärakenteen kohdalla sijaitsevan kannattimen lämpötila ulkoilman lämpötilassa -25 astetta on eristeiden välisessä rajapinnassa + 1 aste. Näin ollen ulkoilman lämpötilan tulisi nousta vähintään + 1 asteeseen ja ilman suhteellisen kosteuden tulisi olla 100 %, jotta kondensoitumisen riski olisi olemassa. Tällainen ulkoilman olosuhteiden äkillinen muutos ei ole kovin todennäköinen, varsinkaan kovin lyhyen ajan kuluessa, jolloin kannatinteräksen lämpötila ei ehtisi nousta ulkoilman lämpötilan muuttumisen seurauksena.

Jos ulkoilman olosuhteiden muuttuisivat siten, että lämpötila nousisi äkillisesti -25 asteesta esimerkiksi + 4 asteeseen, saattaisi se tarkoittaa kondensoitumisen tapahtumista kannatinteräksen pintaan. Tässä tapauksessa kosteutta alkaisi mahdollisesti imeytyä terästä ympäröiviin eristeisiin, mutta kosteusvaikutus jäisi suhteellisen pieneksi teräksen pienen pinta-alan ja ulkolämpötilan muutoksesta johtuvan kan-

natinteräksen oman lämpötilan nousun vuoksi. Tämä mahdollisesti rakenteisiin imeytynyt kosteus tulisi siirtymään, ulkoilmassa jatkossa vallitsevista olosuhteista riippuen, takaisin ulkoilmaan, koska rakenteen vesihöyryn vastus pienenee ulospäin.

Loppujen lopuksi voidaan siis todeta, että kosteuden tiivistymisen riskin todennäköisyys parvekkeen kannatinteräksen lämpötilan laskun seurauksena rakenteisiin on suhteellisen pieni. Jos kondensoitumista pääsee tapahtumaan, se ei aiheuta merkittävää kosteusrasitusta rakenteille, vaan rakenne pääsee kuivumaan ajan kuluessa. Lisäksi talven aikana vallitsevat olosuhteet eivät mahdollista homeiden tai muiden haitallisten lahottajien kasvua kostuneessa rakenteessa.

7.2 Lämpövirta ulos

Rakentamismääräyskokoelman D5 mukaan rakennuksen lämmitysenergiantarvetta laskettaessa ei tarvitse ottaa huomioon yksittäisen kylmäsillan, kuten parvekkeen kannattimen aiheuttamaa lämpöhäviötä. Tässä työssä tätä lämpöhäviötä on kuitenkin tarkasteltu ja niinpä onkin perusteltua verrata sitä hieman D5 ohjearvojen perusteella ja kaavaa 6 käyttämällä suoritettavaan kylmäsillan lämpöhäviön laskentaan.

Käyttämällä kaavaa 6 ja D5 taulukosta saatavaa lisäkonduktanssin arvoa yleisesti välipohjan ja ulkoseinän väliselle liitokselle, saadaan ulkoseinään liittyvän välipohjan aiheuttaman kylmäsillan lämpöhäviön arvoksi noin 6,6 kWh kuukauden aikana. Kun taas tarkastellaan Comsolin antamia tuloksia kyseisestä tilanteesta, saatiin vastaavan tilanteen arvoksi noin 4,7 kWh. Näitä tuloksia vertailtaessa on mahdollista sanoa, että ainakin kylmäsillan aiheuttaman lämpöhäviön laskenta D5 mukaisilla kaavoilla on riittävä. Toisaalta on todettava, että tulkittaessa D5-ohjeita täysin tarkasti, esimerkiksi tämän työn mukaisissa betoniseinän ja betonisen välipohjan liitoksissa lisäkonduktanssin arvoksi on annettu 0. Siispä laskennallisesti kylmäsiltaa ei huomioitaisi syntyväksi.

Yksittäisen parvekkeen kannatinteräksen aiheuttama lämpöhäviö on Comsolin laskentatulosten mukaan n. 1,2-2,5 kWh kuukaudessa, rakennetyypistä ja ulko-

lämpötilasta riippuen. Luku ei kuulosta kovin suurelta, mutta ottaen huomioon, että näitä kannattimen muodostamia kylmäsiltoja on rakenteessa huomattava määrä, syntyy niistä talven aikana koko rakennusta ajatellen jonkin asteinen lämpöhäviö.

7.3 Sisäilmasto ja viihtyisyys

Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan rakennus on toteutettava siten, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto. Tässä työssä tutkittiin parvekkeen kannatinteräksen mahdollista vaikutusta lattian pintalämpötilaan oleskeluvyöhykkeellä. Mahdollinen pintalämpötilan lasku aiheuttaa epävihtyisän olon huoneessa oleskelijalle.

Laskentatulosten perusteella voidaan päätellä, että kannatinteräksen aiheuttama kylmäsilta aiheuttaa pintalämpötilan laskemisen myös sen yläpuolella sijaitsevaan pintalaattaan. Kun oleskeluvyöhykkeen lämpötilan ohjearvona lämmityskauden aikana pidetään 21 astetta, laskee se laskentatulosten perusteella enimmillään 10 astetta tämän ohjearvon alapuolelle. Lämpötila on alimmillaan ei-kantavan seinärakenteen kohdalla, mutta se laskee selvästi myös kantavan seinärakenteen alueella. Comsolilla suoritettussa mallinnuksessa ei ole otettu huomioon pintalaatassa toimivaa lattialämmitystä, joka tietenkin nostaa laatan lämpötilan lähtökohtaisesti paljon 21 astetta korkeammaksi. Näin ollen lattian pintalämpötila ei todellisuudessa laske yhtä dramaattisesti kuin tulokset antavat ymmärtää. Vertailtaessa laskelmia teräksen kanssa ja ilman terästä, voitaisiin arvioida todellisen lämpötilan laskun olevan noin 4 asteen luokkaa. Laskentatulosten perusteella on kuitenkin perusteltua sanoa, että kannatinteräksen läheisyydessä ulospäin suuntautuva lämpövirta aiheuttaa paikallista lämpötilan laskemista myös pintalaatassa, lattialämmityksestä huolimatta. Tätä laskentatulosta tukee lisäksi erään asunnon asukkaan havainnot lattian pinnan kylmenemisestä juurikin kyseisellä parvekkeen kohdalla sijaitsevalla huoneen sivulla.

Lattialämmityksen puuttuminen Comsol laskentamallista jättää lattian pinnan todellisen lämpötilan arvoitukseksi, mutta silti voidaan todeta sitä jossakin määrin tapahtuvan. Erityisesti pidemmän kovan pakkasjakson aikana, lattian pinnan läm-

pötilä kannatinterästen läheisyydessä todennäköisesti laskee huomattavasti 21 astetta alemmaksi. Tämä vaikuttaa negatiivisesti asukkaan kokemukseen asumisviihtyisyydestä, koska erityisesti ihmisen jalat aistivat hyvin lämpötilojen muutoksia. Lattian pintalämpötilan tulisikin olla mieluummin suunnitteluarvoja korkeampi, eikä matalampi, kuten tässä tutkitussa tapauksessa on käynyt.

7.4 Vaihtoehtoinen kannatusjärjestelmä?

Nykyisin on saatavilla monia erilaisia ratkaisuja suunniteltaessa parvekelaattojen liittämistä rakennuksen välipohjaan. Kiristyneiden energiamääräysten vuoksi näissäkin tuotteissa on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota kylmäsillan katkaisemisen mahdollisuuteen ja näin ulos suuntautuvan lämpövirran määrän pienentämiseen. Uudet ratkaisut eivät ole teräsosiensa järeydeltä tässä opinnäytetyössä tutkittujen teräsputkiprofiilien kokoluokkaa, vaan ne koostuvat useammasta pienemmästä teräsosasta. Lisäksi uudet ratkaisut sisältävät talon seinän eristekerroksen kanssa samaan linjaan tulevan eristekerroksen. Tässä työssä ei kuitenkaan mallinnettu tällaista kannatusratkaisua ja näin ollen sen parempaan lämpötekniseen toimivuuteen ei voida ottaa sen kummemmin kantaa. Tästä aiheesta olisi mahdollista halutessaan suorittaa jatkotutkimusta ja vertailua.

8 YHTEENVETO

Parvekekannattimena käytetty teräsputki aiheuttaa rakennuksen vaipan läpi ulottuvan kylmäsillan, jonka lämpötila laskee huomattavasti ympäröivää rakennetta alhaisemmaksi ulkolämpötilan ollessa pakkasen puolella. Lämpötilan laskeminen voi aiheuttaa sopivissa olosuhteissa riskin kosteuden kondensoitumisesta rakenteeseen, mutta se ei ole kovin todennäköistä, eikä kosteusrasitus rakenteelle muodostuisi näin tapahtuessa kovinkaan suureksi. Kondensoitumisen aiheuttaman homevaurion riski ei ole suuri.

Kylmäsillan kautta pääsee johtumaan lämpöä ulos rakenteesta. Lämpövirran ulospäin suuntautuva määrä ei yksittäistä parvekekannatinta tarkasteltaessa ole kovin suuri, mutta koko rakennusta ajatellen hukkalämpöä syntyy kohtalainen määrä. Jos kannattimen aiheuttama kylmäsilta huomioidaan rakennuksen energiankulutuksen laskennassa, laskennallisesti saatava tulos hukkalämmöstä kannattimen kautta ulos näyttäisi tämän työn mukaan olevan todellisen tilanteen peittävä.

Kannatinteräksen aiheuttama kylmäsilta ja sen kautta ulospäin johtuva lämpövirta laskevat myös kannatinta ympäröivän rakenteen lämpötilaa. Tässä työssä saadut tulokset ja käyttäjäkokemukset teräksen yläpuolella sijaitsevan lattianpinnan lämpötilasta osoittavat, että sopivissa ulkolämpötilan olosuhteissa kylmäsilta aiheuttaa tilanteen, jossa lattian pintalämpötila ei täytä rakennuksen oleskeluvyöhykkeelle annettuja ohjearvoja.

LÄHTEET

- /1/ Suvanto, K. 2003. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki. Edita Prisma Oy.
- /2/ Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka: perusteet ja sovellutukset. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- /3/ Inkinen, P., Tuohi, J. 1999. Momentti 1: Insinöörifysiikka. 4-6 painos. Helsinki. Otava.
- /4/ Rakentamismääräyskokoelma D2. 2011. Ympäristöministeriö. Viitattu 18.3.2013. http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf
- /5/ Rakentamismääräyskokoelma C4. 2002. Ympäristöministeriö. Viitattu 18.3.2013. <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>
- /6/ Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- /7/ Asumisterveysohje. 2003. Sosiaali- ja terveysministeriö. Viitattu 20.3.2013. http://www.finlex.fi/pdf/normit/14951-asumisterveysohje_pdf.pdf
- /8/ Hahtokari, T. Rakennusfysiikka – opetusmateriaali.
- /9/ Comsol multiphysics 4.3, Ohjelman omat käyttöohjeet.
- /10/ Rakentamismääräyskokoelma D5. 2012. Ympäristöministeriö. Viitattu 5.4.2013. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135289&lan=sv>
- /11/ Rakentamismääräyskokoelma C3. 2010. Ympäristöministeriö. Viitattu 5.4.2013. http://www.finlex.fi/data/normit/34163-C3-2010_suomi_221208.pdf