

Niina Raistakka

Sandwich-elementtiseinän rakennusfysikaalinen toiminta

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri AMK
Rakennustekniikka
Opinnäytetyö
20.4.2011

Tekijä Otsikko	Niina Raistakka Sandwich-elementtirakenteen rakennusfysikaalinen toiminta
Sivumäärä Aika	40 sivua + 2 liitettä 20.4.2011
Tutkinto	Insinööri AMK
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Suunnittelupäällikkö Päivi Ihalmo Lehtori Kari Suvanto
<p>Työ tehtiin Optiplan Oy:lle, joka on NCC-yhtiöihin kuuluva kokonaissuunnittelutoimisto. Yksityiskohtien suunnittelu korostuu yhä kiristyvien määräysten myötä ja tieto, miten rakenne toimii fysikaalisesti, on tärkeää. Optiplan halusi testata COMSOL Multiphysics -ohjelmaa ja saada tietoa ohjelman soveltuvuudesta rakennesuunnittelijan työvälineenä.</p> <p>Työssä keskityttiin tarkastelemaan kantavan sandwich-elementtirakenteisen seinän U-arvoa eri eristepaksuuksilla. Tutkittiin myös parvekkeen liitoskohtaa ja kuinka kylmäsilta siinä vaikuttaa rakenteen U-arvoon. Lisäksi tutkittiin kantavan ja ei-kantavan sandwich-elementtirakenteisen seinän nurkkakohtaa. Yksi työn osa oli myös tuottaa käyttöohje COMSOL Multiphysics -ohjelmasta Optiplan Oy:n käyttöön.</p> <p>Tutkimus tehtiin käyttämällä hyväksi kirjallista aineistoa sekä mallintamalla ja tutkimalla erilaisia rakenteita COMSOL Multiphysics -ohjelmalla.</p> <p>Lopputuloksena saatiin parempia U-arvoja sellaisilla eristepaksuuksilla kuin tällä hetkellä julkistetuissa tuloksissa on käytetty. Työssä päästiin eristepaksuudella 240 mm tulokseen $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Esimerkiksi VTT on tutkinut ja hyväksynyt samaiselle rakenteelle U-arvon $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Työssä tutkituissa rakenteissa ei otettu huomioon ilmaraossa virtaavaa ilmaa, joka huonontaisi hieman U-arvoa. Tulokset ovat kuitenkin realistisia ja tulevaisuudessa työssä käytettyjä malleja voisi vielä viimeistellä lisäämällä virtaavan ilman ilmarakoihin.</p>	
Avainsanat	COMSOL Multiphysics, U-arvo, sandwich-elementti

Author(s) Title	Niina Raistakka Function of Sandwich Structure in Building Physics
Number of Pages Date	40 pages + 2 appendices 8 April 2011
Degree	Bachelor of Engineer
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Päivi Ihalmo, Design Manager Kari Suvanto, Senior Lecturer
<p>This graduate study was done for Optiplan Oy which is owned by NCC Group. Optiplan offers all construction design services under the same roof. Designing all small details is very important especially when regulations are tightened. It is also important to know how the structure is functioning under different kinds of situations. Optiplan wanted to test COMSOL Multiphysics simulation and modeling software in order to see if it could be used as a beneficial design tool.</p> <p>This study focused on investigating sandwich structure as a supporting structure and the influence of the thickness of the isolation layer on the physical feature of the structures. This was done with four 3D wall models of which each one had different thickness of isolation layer. After that the study focused on examining the type of wall model where a balcony with steel support is included. The effect of a corner was also explored. One part of the study was also to make instructions on how to use COMSOL Multiphysics software.</p> <p>The study was done with the help of literature. Other major part of the study was done by modelling the structures with the software and investigating them.</p> <p>As a result, structures were determined which needed less isolation than structures which are commonly used today in construction. For example sandwich structure with 240 mm isolation is commonly known as a U value of $0.16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ when in this study the same structure gave value $0.14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ as a result. The fault in that result is that in the model structures air flow in the air flaw was not considered, which would in fact worsen the U value. The results are still realistic and in the future the models can be used after complementing them with the air flow.</p>	
Keywords	COMSOL Multiphysics, U-value, sandwich structure

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Lämmön siirtyminen	3
2.1	Lämmön konvektio	4
2.2	Lämpösäteily	4
2.3	Lämmön johtuminen	4
2.4	Lämmön siirtyminen monikerroksisen seinämän läpi	5
2.4.1	U-arvon laskentaesimerkki	6
2.4.2	Lämmönjohtavuuden valinta	7
2.5	Rakenteen lämpötekkinen toiminta	7
3	Kosteus	8
3.1	Sade	10
3.2	Veden kapillaarinen siirtyminen	10
3.3	Vesihöyryn siirtyminen	10
3.4	Kondensoituminen	11
3.5	Betonirakenteen kosteustekkinen toiminta	12
3.5.1	Kosteuden kulku ulkoseinän läpi	13
3.5.2	Rakenteen kuivuminen	15
4	Elementtirakenne	16
4.1	Elementtirakenteen rakenteellinen toiminta	18
4.1.1	Kosteusmuodonmuutokset	18
4.1.2	Lämpötilarasitukset	19
4.1.3	Lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutus	19
4.1.4	Pakkovoimat	19
4.2	Sandwich-elementin raudoitus	21
4.3	Kylmäsillat	21
4.3.1	Kylmäsillan vaikutus U-arvoon	22
5	COMSOL Multiphysics	23
5.1	Kantava sandwich-elementtirakenne	23
5.2	Seinärakenne 1	24
5.3	Seinärakenteet 2, 3, 4 ja 5	26

5.3.1	Seinärakenteiden vertailu	27
5.4	Parvekeliitos	28
5.4.1	Parvekeliitoksen tulosten tarkastelua	29
5.4.2	Ajasta riippuva parvekeliitosmalli	31
5.5	Kantavan ja ei-kantavan sandwich-elementin kohtaaminen nurkassa	33
5.6	COMSOL Multiphysics -ohjelman soveltuvuus rakennesuunnittelijalle	35
6	WUFI	36
6.1	Tutkitut rakenteet	36
6.2	Tulokset	36
7	Lopputulokset	37
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1. COMSOL Multiphysics 3.5a: käyttöohje	
	Liite 2. WUFI-ohjelmalla tuotetut rakenteiden kosteuskäyrät	

1 Johdanto

Työ tehdään Optiplan Oy:lle, joka on rakennussuunnittelun kokonaissuunnittelutoimisto. Optiplanin toimialat ovat asuminen, toimitilat ja korjausrakentamispalvelu. Optiplan Oy:n omistaa kokonaisuudessaan NCC Rakennus Oy. Optiplan Oy on suunnittelutoimisto, joka tuottaa kaikki rakentamisen palvelut.

Työn lähtökohtana oli opetella COMSOL-ohjelmaa ja sen hyötyä Optiplanille mallintamalla ja tutkimalla sandwich-elementin eristepaksuuden vaikutusta rakenteen U-arvoon. Erityisesti halutaan selvittää, miten kiristyvien lämmöneristysmääräysten mukaiset sandwich-elementit toimivat rakennusfysikaalisesti. Lisäksi tehtävänä on luoda lyhyt käyttöohje COMSOL Multiphysics -ohjelmasta, jolla pystytään saamaan rakenteen U-arvo selville.

Rakenteessa esiintyviä fysikaalisia ilmiöitä ovat muun muassa lämmön ja kosteuden siirtyminen rakenteessa ja rakenteesta pois. Jos kosteutta kertyy rakenteeseen, rakenne saattaa homehtua. Home tuottaa ilmaan haitallisia itiöitä, jotka voivat haitata ihmisten terveyttä. Lisäksi home voi vaurioittaa rakennetta ja siten heikentää sen toimintaa.

Tutkimus keskittyy betonipintaisen sandwich-elementin rakennusfysikaaliseen toimintaan. Työssä tutkitaan elementtirakenteen rakennusfysikaalisia ominaisuuksia pääosin rakenteessa esiintyvien lämmön ja kosteuden siirtymisen osalta.

Uudisrakentamisessa sandwich-elementtiseinä on yksi yleisimpiä rakenneratkaisuja. Nykyään rakennuksista halutaan saada mahdollisimman ekologinen ja energiaa säästävä. Jotta energiahäviöt saataisiin mahdollisimman pieniksi, on rakennuksista tehtävä tiiviitä ja lämpöhäviöitä on minimoitava. Tätä säädellään kiristyvillä U-arvomääräyksillä sekä tarkemmilla energialuvun laskelmilla.

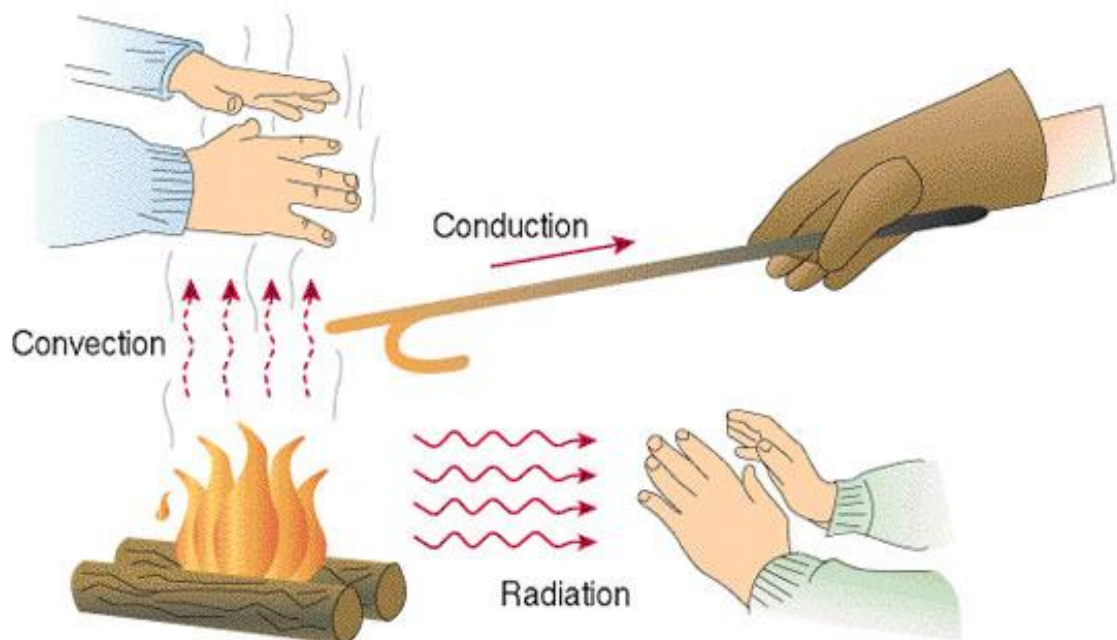
Työ rajataan käsittelemään tavallista sandwich-elementtirakennetta eri eristepaksuuksilla. Lisäksi tarkastellaan sandwich-rakenteisen ulkoseinän, parvekkeen ja välipohjan liitosta. Tutkimuksessa mallinnetaan myös sandwich-elementeistä koostuva ulkonurkka, josta selvitetään nurkan tiiveys ja miten nurkka vaikuttaa rakenteen U-arvoon.

Tutkimuksessa ei oteta huomioon ikkunan tai oven kohtaa, vaan keskitytään parvekelii-
toksessa kylmäsillan eli parvekkeen kiinnikkeen vaikutukseen rakenteessa.

Tutkimus tehdään käyttämällä kirjallista aineistoa hyväksi, tutkimalla rakennetta sekä
COMSOL- että WUFI-ohjelmalla ja vertailemalla näistä saatuja tuloksia käsinlaskennalla
saatuihin tuloksiin.

2 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtyminen rakenteen läpi aiheutuu siitä, että lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Lämpö siirtyy siis aina lämpimämmästä tilasta kylmempään. Lämmönsiirtymistapoja ovat konvektio, johtuminen ja säteily. Lämmön konvektiolla eli kuljetuksella tarkoitetaan lämmön siirtymistä liikkuvan aineen mukana. Tätä tapahtuu eniten nesteissä ja kaasuissa, koska ne voivat virrata. Kun energiaa siirtyy aineen rakenneosien välillä, puhutaan lämmön johtumisesta. Lämmön johtuminen voi tapahtua vain jos kappaleet koskettavat toisiaan, siksi johtuminen on tärkeä kiinteissä aineissa. Lämpösäteilyssä lämpö siirtyy sähkömagneettisen aallon avulla, eli se ei vaadi väliainetta. [1, s. 449-451.]



Kuvio 1. Lämmön siirtyminen konvektiolla, johtumalla ja säteilemällä. [10]

Kuviossa 1 on havainnollistettu kaikki lämmön siirtymismuodot. *Convection* on lämmön konvektiota. Kuvassa lämpö siirtyy käsiin ilmapvirran mukana. *Conduction* tarkoittaa lämmön johtumista. Johtuminen tapahtuu kuvassa lämmittämällä esimerkiksi rautaesinettä: kun esine kuumenee se johtaa lämmön eteenpäin. *Radiation* tarkoittaa lämmön säteilemistä. Säteily lämmittää lähellä olevia pintoja.

2.1 Lämmön konvektio

Lämpöpatteri on esimerkki pakotetusta konvektiosta, jossa lämpöä kuljetetaan virtaavan veden mukana. Pakotetussa konvektiossa neste tai kaasu liikkuu jonkin ulkoisen voiman, kuten pumpun, vaikutuksesta [2, s. 37]. Lämpöpatterissa lämpö kuljetetaan virtaavan veden mukana patterin sisään, jossa veden koskettaessa patteria, lämpöä johtuu metallirakenteen läpi patterin ulkopinnalle. Veden ominaislämpökapasiteetti on suuri, joten se soveltuu hyvin lämmön kuljettajaksi. [1, s. 453.]

Lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero saa aikaan liikkeen, jota sanotaan luonnolliseksi tai vapaaksi konvektioksi [2, s. 38]. Lämmön vapaata konvektiota kuvaavan mallin kehittäminen on vaikeaa, koska mitään tiettyä, ennalta tunnettua virtauskanavaa ei välttämättä ole [1, s. 453]. Rakennustekniikassa luonnollista konvektiota kutsutaan savu-piippuilmioiksi.

2.2 Lämpösäteily

Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Rakennustekniikassa säteilylämpö esiintyy lyhytaaltoisena auringonsäteilynä ja pitkäaaltoisena kappaleiden säteilemänä infrapunäsäteilynä. [2, s. 37.] Lämpöpatteri, joka kuljettaa lämpöä asuutiloihin konvektiolla, lähettää myös lämpösäteilyä. Kun pinnan lämpötila kohoaa, säteilemisvoimakkuus kasvaa. Riittävän korkeissa lämpötiloissa muut pinnan ja sen ympäristön väliset lämmönsiirtymismuodot menettävät merkityksensä. Kaikki pinnat lähettävät lämpösäteilyä, olipa niiden lämpötila kuinka alhainen tahansa. [1, s. 451.]

2.3 Lämmön johtuminen

Lämmön johtumista tarkastellaan hieman lähemmin, koska tämä on yleisin lämmönsiirtymismuoto rakenteen läpi.

Lämpövirta ilmaisee energian siirtymisnopeuden, eli sitä voidaan kutsua myös lämpötehoksi. Lämpövirta on siirtynyt energia aikayksikköä kohti. Seinämän läpäisevä lämpövirta on suoraan verrannollinen pintojen väliseen lämpötilaeroon ja seinämän pinta-alaan, sekä kääntäen verrannollinen seinämän paksuuteen. [1, s.455.]

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on lämpövirran tiheyden suhde sisäpuolisen ja ulkopuolisen lämpötilan eroon. Lämmönläpäisykerroin kuvaa siis, miten paljon tehoa tarvitaan pinta-alaa kohti, jotta saavutettaisiin tietty lämpötilaero eristerakenteen yli.

Rakennuksen lämpimän tilan rakennusosien lämmönläpäisykerroina U käytetään seuraavia vertailuarvoja: seinässä 0,17 W/(m²•K), yläpohjassa tai ulkoilmaan rajoittuvassa alapohjassa 0,09 W/(m²•K), ryömintätilaan rajoittuvassa alapohjassa 0,17 W/(m²•K), ikkunassa, kattoikkunassa tai ovesa 1,0 W/(m²•K) ja hirsiseinässä 0,40 W/(m²•K). [3, s. 5.] Nämä arvot ovat suosituksia, joita rakenteen ei tulisi ylittää. Jos arvot kuitenkin ylitetään, niin silloin ylitys täytyy kompensoida jollakin muulla tavoin esimerkiksi tehokkaammalla ilmanvaihtokoneistolla.

2.4 Lämmön siirtyminen monikerroksisen seinämän läpi

Seuraavassa tarkastellaan lämmön siirtymistä monikerroksisen seinämän läpi. Lämmönsiirtymiskerroin kuvaa tietyn tyyppisen materiaalikerroksen lämmönsiirtokykyä. Se ilmaisee materiaalikerroksen läpi siirtyvän lämpötehon pinta-alayksikköä ja rajapintojen välistä asteen lämpötilaeroa kohti. Kerroksen lämmönvastus kuvaa puolestaan kerroksen lämmöneristyskykyä. Se on lämmönsiirtymiskertoimen käänteisarvo. [1, s. 457.] Kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja sekä tasa-aineisia ja lämpö siirtyy ainekerrokseen nähden kohtisuoraan, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus R_t kaavalla (1) [8, s. 5].

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (1)$$

Tässä kaavassa R_{si} on sisäpuolinen pintavastus ja R_{se} ulkopuolinen pintavastus. Niiden arvot vaihtelevat sen mukaan mihin suuntaan lämpövirta kulkee. Taulukossa 1 on esitetty sisä- ja ulkopuolisten pintavastusten arvot, kun lämpö siirtyy vaakasuoraan, ylöspäin tai alaspäin.

Taulukko 1. Sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset

Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus R_{si} ja R_{se}					
Sisäpuolinen pintavastus, R_{si} [(m ² •K)/W]			Ulkopuolinen pintavastus, R_{se} [(m ² •K)/W]		
Lämpövirran suunta					
Vaakasuora	Ylöspäin	Alaspäin	Vaakasuora	Ylöspäin	Alaspäin
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Esimerkiksi seinärakenteessa sisäpuolisen pintavastuksen arvo on 0,13 (m²•K)/W, koska siinä lämpövirran suunta on vaakasuoraan. Yläpohjarakenteessa lämpövirran suunta

tyypillisesti on ylöspäin ja niin ollen sisäpuolinen pintavastus on $0,10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$. Alapohjassa lämpövirran suunta on yleensä alaspäin ja täten sisäpuolinen pintavastus on $0,17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$.

Kaavassa (1) olevat $R_1, R_2 \dots R_n$ ovat rakenteessa olevien ainekerrosten lämmönvastukset. Ainekerroksen lämmönvastus saadaan yhtälöstä (2).

$$R_1 = d_1/\lambda_1, \quad (2)$$

jossa

d_1 on ainekerroksen paksuus

λ_1 on ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, esimerkiksi normaalin lämmönjohtavuus. Normaaliset lämmönjohtavuusarvot pätevät yleensä $10 \text{ }^\circ\text{C}$ keskilämpötilassa ja koskevat tuotteita, joilla ei ole voimassaolevaa λ_n -arvon tyyppihyväksyntää.

Rakenteen lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on rakenteen kokonaislämmönvastuksen R_t käänteisarvo, (3)

$$U = 1/ R_t \quad (3)$$

2.4.1 U-arvon laskentaesimerkki

Lasketaan kolmesta ainekerroksesta koostuvan rakenteen U-arvo. Rakenteessa on kaksi betoniosaa, joiden välissä on eriste. Eristeen paksuudeksi valitaan 230 mm. Elementin ulkokuoren paksuus on 70 mm ja sisäkuoren 150 mm. Pintavastukset ovat $R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ ja $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$. Betonin lämmönjohtavuus eli λ - arvo on $1,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, kun betonin kuivatiheys on 2000 kg/m^3 [8, s.14]. Eristeen lämmönjohtavuus vaihtelee eristeen ja valmistajan mukaan, mutta esimerkkinä otetaan Parocin sandwich-eristeen arvo $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Lasketaan ensin seinämän lämmönvastus:

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se}$$

$$R_t = R_{si} + (d_1/\lambda_1) + (d_2/\lambda_2) + (d_3/\lambda_3) + R_{se}$$

$$R_t = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} + (0,150/1,2) \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} + (0,230/0,035) \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} + (0,070/1,2) \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} + 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

$$R_t = 6,92476 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Rakenteen U- arvo on tällöin

$$U = 1/ R_t = 1/ 6,92476 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} = 0,1444 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)},$$

Pyöristäen $U = 0,14 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Tämä on karkeasti laskettu seinärakenteen U-arvo. Kuitenkin todellisessa sandwich-elementissä on ilmaurat ja ansaat, jotka otetaan laskennassa huomioon huonontavana tekijänä. Eli oikeasti U-arvo on suurempi.

2.4.2 Lämmönjohtavuuden valinta

Kun lämmöneriste on varustettu CE-merkinnällä, käytetään EN-standardien mukaan määritettyä lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvoa (λ_d). Muiden eristeiden suunnittelu-arvona käytetään normaalin lämmönjohtavuuden (λ_n) arvoa, joka asennus- ja suojaustapakuvauksensa perusteella soveltuu tarkastelun kohteena olevalle rakenteelle. [8, s.7.] Yleisemmin käytetään λ_d -arvoa, koska eristevalmistajat ovat ottaneet tuotteilensa CE-merkinnän.

2.5 Rakenteen lämpötekniinen toiminta

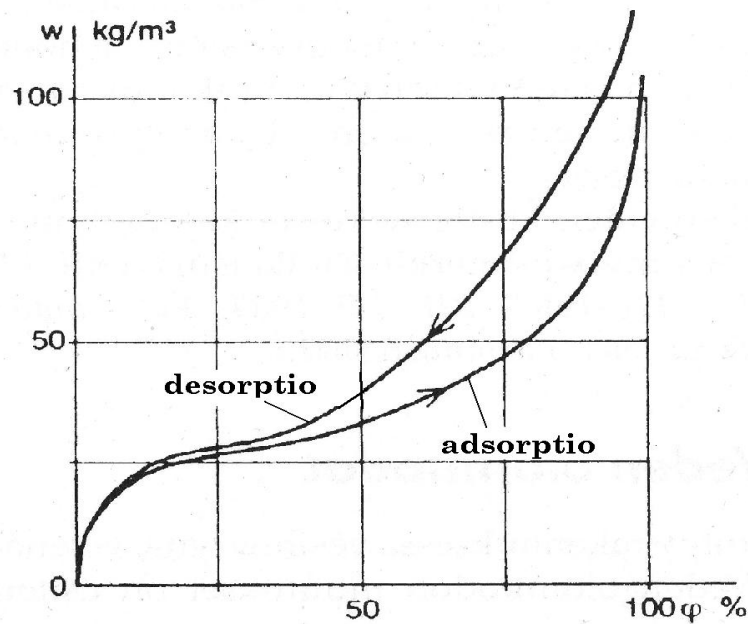
Ulkoseinän lämpötekniiseen toimintaan vaikuttavat sekä rakenteen sisäiset että ulkoiset tekijät. Sisäisiä tekijöitä ovat materiaalien ominaisuudet, kuten mm. käytettyjen rakennusaineiden lämmönjohtavuus, vesihöyryn- ja ilmanläpäisevyys. Lisäksi sisäisiä tekijöitä ovat rakenteelliset ratkaisut. Ulkoisia tekijöitä ovat mm. lämpötila-, kosteus- ja tuuliolosuhteet. Ulkoseinärakenteen suunnittelussa lämmön kannalta tarkasteltavia asioita ovat lämmönläpäisykertoimen eli U-arvon laskeminen, rakenteen ilmatiivyyden varmistaminen, rakenteen lämpötilajakauman selvittäminen, kylmäsiltojen sekä kosteuden kondensoitumisen estäminen ja lämmöneristeen tuulensuojaus. [4, s.41.] Lämpötilajakaumaa tarvitaan, kun arvioidaan suhteellista kosteutta rakenteen eri osissa.

Ilmatiiviyden varmistaminen on tärkeää rakenteessa myös kosteusteknisten ominaisuuksien takia. Kun rakennus on ilmatiivis, ei rakennuksen sisäilma pääse virtaamaan rakenteisiin ja toisaalta, kylmä ulkoilma ei jäähdytä rakenteita, jolloin pienennetään materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin syntyvää haitallista kosteuden tiivistymisriskiä.[6.]

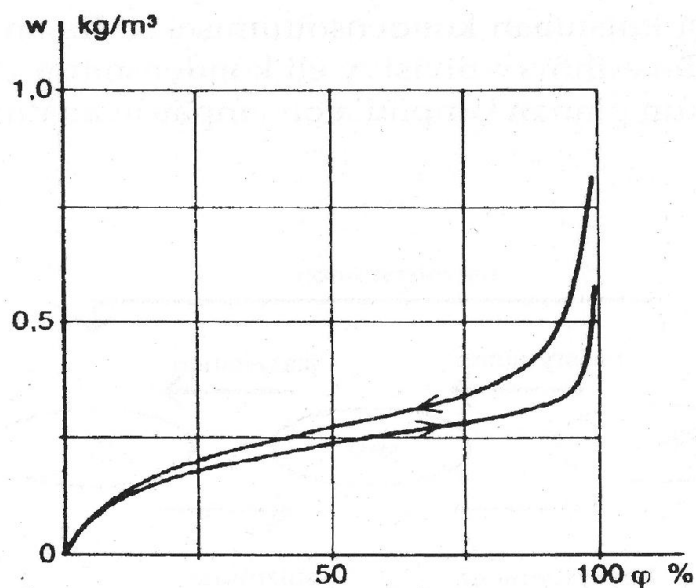
3 Kosteus

Ilma ja huokoiset rakennusmateriaalit sisältävät kosteutta. Kosteuden määrään vaikuttavat ympäröivän ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä materiaalin ominaisuudet. Rakenteisiin voi joutua ylimääräistä kosteutta myös rakentamisen ja käytön yhteydessä. [2, s. 51.] Esimerkiksi rakentamisen yhteydessä rakenteisiin joutuu kosteutta sadevetenä tai lumena ennen kuin rakennukseen saadaan vesikatto päälle. Käytön yhteydessä rakennus voi joutua erilaisten vuotojen kohteeksi, kuten esimerkkinä vesiputken hajoaminen.

Kosteus esiintyy rakennuksissa ja rakenteissa joko näkyvänä vetenä, näkymättömänä vesihöyryinä tai rakenteisiin sitoutuneena kosteutena. Rakenteisiin vaikuttavia kosteuslähteitä on monia. Sade on näistä yleisin rakennukseen kohdistuva rasitus, joka voi esiintyä vetenä, räntänä tai lumena. Tämän lisäksi vahinkoa rakenteisiin voi aiheuttaa pohjavesi sekä erinäiset vuodot ja maasta kapillaarisesti siirtyvä vesi. Myös ilman kosteus, jolla tarkoitetaan yleensä vesihöyryä, on otettava huomioon suunniteltaessa rakenteita. [2][1, s.436.] Liiallinen ilman kosteus tiivistyy rakenteiden pinnoille aiheuttaen hometta ja niin ollen rakenteen vaurioitumista sekä sisäilman laadun heikkenemistä.



Kuvio 2. Betonin K25 eli C20/25 tasapainokosteuskäyrä, kun lämpötila on 20°C.



Kuvio 3. Mineraalivillan, tiheys 18 kg/m³, tasapainokosteuskäyrä, kun lämpötila on 20°C. [17]

Kuviossa 2 on esitetty betonin K25 eli C20/25 tasapainokosteuskäyrä, kun lämpötila on 20°C. Tässä vaaka-akselilla on esitetty huokosilman suhteellinen kosteus prosentteina ja pystyakselilla on vesipitoisuus kg/m³. Adsorptiokäyrää luetaan, kun rakenne on kastumassa ja desorptio viittaa rakenteen kuivumiseen. Esimerkiksi, kun betonin suhteellinen kosteus rakenteen kastuessa on 50 %, on siinä olevan veden määrä noin 30 kg

/m³. Samoin luetaan kuvion 3 käyriä. Nämä ovat kuitenkin mineraalivillan käyrät ja ero betonin käyriin havaitaan vesipitoisuudessa sekä käyrien jyrkkyyksissä.

3.1 Sade

Yleisin sadetyyppi Suomessa on pystysade, joka rasittaa lähinnä vaakasuoria ja vinoja pintoja. Voimakas tuuli aiheuttaa viistosateen, joka rasittaa rakennuksen vaippaa ja saattaa aiheuttaa siihen kosteusvaurioita. [2, s.52.]

Lumen suurimpia haittavaikutuksia ovat siitä katoille aiheutuva kuormitus sekä lisäksi tuulen mukana tuuletusraoista rakenteisiin kulkeutuva lumi [2, s.52].

Sateen aiheuttamia haittoja voidaan vähentää riittävän leveillä räystäillä, jotka suojaavat seinien yläosia ja yläpohjarakenteita sateelta. Ulkoseinän alaosa ja perustusten maanpäällistä osaa suojataan tarpeeksi korkealla sokkelilla ja maanpinnan kallistuksilla. [2, s.52.] Maahan satanut vesi ohjataan maanpinnan kallistuksilla pois päin rakennuksesta.

3.2 Veden kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarinen vedenliike on toinen haittatekijä, jolla kosteus siirtyy rakenteessa. Sillä tarkoitetaan kosteuden siirtymistä rakenteen huokosissa nesteinä ja sen aiheuttaa kapillaarivoima, joka johtuu vesimolekyylien ja kiinteän aineen välisestä vetovoimasta. [5.] Kapillaarista siirtymistä tapahtuu, jos rakennusmateriaali on kosketuksissa nestemäiseen veteen, esimerkiksi sade, pohjavesi tai jos vesijohto vuotaa. Veden kapillaarinen siirtyminen on tehokkain tapa, jolla kosteus voi siirtyä.

Kapillaarinen vedenliike estetään esimerkiksi kapillaarisuuden katkaisevalla kermillä, muovilla, bitumisivelyllä tai riittävän tiiviillä pintakerroksella [2, s.53]. Myös salaojitusjärjestelmä on yksi merkittävä kapillaarisen vedenliikkeen katkaisija.

3.3 Vesihöyryn siirtyminen

Vesihöyry voi siirtyä rakenteissa joko diffuusiolla tai konvektiolla. Diffuusio tarkoittaa sitä, kun rakenteen eri puolilla on erilainen vesihöyryn osapaine, joka pyrkii tasaantu-

maan höyryn kulkeutumisella rakennekerrosten läpi. Konvektiossa vesihöyry kulkeutuu ilmavirtausten mukana. [2, s.56.]

Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kylmempään, mutta se voi olla myös toiseen suuntaan jos kylmemmän tilan höyrynpaine on suurempi kuin lämpimän.

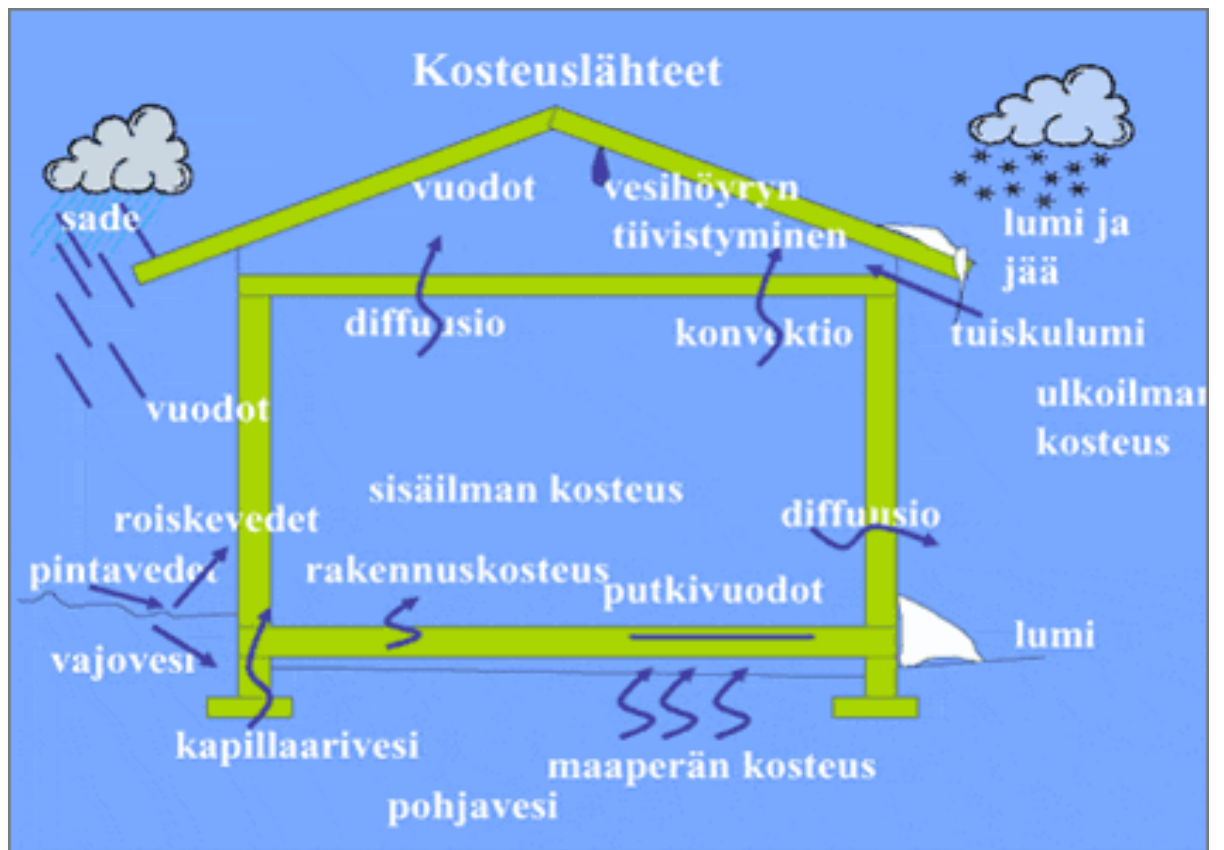
Rakenne on suunniteltava siten, että lämmöneristeen ja lämpimän sisätilan väliin tulee riittävän vesihöyrytiivis kerros ja seinämärakenteen vesihöyryvastus pienenee kylmään tilaan päin mentäessä. Toisin sanoen höyrynpaine rakenteen kylmällä puolella saadaan pienemmäksi ja näin estetään vesihöyryn liiallinen tunkeutuminen rakenteisiin. [2, s.56.]

3.4 Kondensoituminen

Kondensoitumisessa vesihöyry tiivistyy vedeksi. Kun vesihöyryn maksimikosteus ylittyy, vesihöyry tiivistyy rakenteessa ympäröivää ilmaa kylmemmälle, kovalle pinnalle.

Tavallisimpia tiivistynyttä kosteutta aiheuttavia tekijöitä ovat

- kylmäsillat
- höyrynsulun puutteellisuus tai väärä sijainti
- liian kylmä lämpimään huonetilaan rajautuva rakenteen sisäpinta [2, s. 57.]



Kuvio 4. Kosteuslähteet [11]

Kuviossa 4 on esitetty rakennusta rasittavia kosteuslähteitä. Rakennuksen jokainen pinta on alttiina kosteudelle. Siksi onkin tärkeää tietää, miten eri kosteuslähteet vaikuttavat ja miten suunnittelulla voidaan ehkäistä kosteudesta aiheutuvia haittoja.

3.5 Betonirakenteen kosteustekninen toiminta

Betoniin sitoutuu vettä ilman vesihöyrystä, eli se on hygroskooppinen aine. Betonissa vesi sitoutuu sen huokosiin, joten betonin kosteustekniset ominaisuudet määräytyvät pääasiassa huokosjakautuman ja kokonaishuokoisuuden perusteella. Kokonaishuokoisuus tarkoittaa betonissa olevien huokosten tilavuutta suhteessa betonimassan tilavuuteen. Vesi-sementtisuhte betonissa vaikuttaa sen huokosrakenteeseen ja siten myös tiiveyteen. Julkisivubetonin vesi-sementtisuhte on hyvin alhainen, jolloin sadevesi ei juurikaan imeydy kapillaarisesti ulkoseinän ulkokuoren läpi. [4, s. 31- 32.]

Betonin vesihöyrynläpäisevyys riippuu huokosrakenteesta, kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta. Vesihöyrynläpäisevyys ilmoittaa vesimäärän, joka läpäisee aikayksikössä

pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen höyrynpaineiden ero on yksikön suuruinen. Betonirakenteen läpi kulkeva kosteus on diffuusion ja kapillaarisen liikkeen yhdistelmä, jossa virtaus tapahtuu veden vuorotellen höyrystyessä ja tiivistyessä. [4, s. 32.]

Julkisivurakenteen kosteusrasituksia esiintyy sekä rakennus- että käyttö- ja kunnossapitovaiheessa. Elementtien valmistuksessa kosteuslähteitä ovat betonissa oleva hydratoitumaton vesi sekä esimerkiksi pinnan pesuun käytetty vesi. Lämmöneristeeseen imeytyvä kosteus on kuitenkin vähäistä. [4, s. 32.]

Rakennustyön aikana rakenteeseen kulkeutuu sadevettä suojaamattoman elementin yläpäästä sekä avoimien saumojen kautta. Suuret vesimäärät voivat valua elementissä eristekerroksessa alaspäin. Kun rakennusta aletaan lämmittää, sisäkuoreen ja lämmöneristeeseen sitoutunut kosteus alkavat kulkeutua seinärakenteen ulko-osia kohti. [4, s.32] Tämä johtuu rakenteen yli vaikuttavasta höyrynpaine-erosta, joka pyrkii taasaantumaan.

3.5.1 Kosteuden kulku ulkoseinän läpi

Diffuusiosta aiheutuva vesihöyryn kulkeutuminen seinärakenteen läpi voi aiheuttaa vesihöyryn tiivistymistä talvikautena ulkokuoren sisäpintaan muodostaen vesi- ja jääkerroksen. Osa tiivistyneestä kosteudesta imeytyy kapillaarisesti ulkokuoren huokosverkostoon ja osa kulkeutuu sisäpintaa pitkin alaspäin. Ulkokuoreen kertynyt kosteus poistuu joko kulkeutumalla diffuusion avulla ulkokuoren läpi tai haihtumalla tuuletuskoon tai -uriin. Täten onkin tärkeää, että villakerroksen ulkopinnassa on kunnolliset tuuletusurat ja että rakenteen ulkopinta läpäisee hyvin vesihöyryä. [4, s. 33- 34.]



Kuvio 5. Vesihöyryn siirtyminen kesällä ja talvella. [18]

Kosteutta voi kulkeutua seinärakenteiden läpi myös ilmavirtausten mukana. Jos esimerkiksi saumoissa on ilmavuotoja, saattaa rakenteeseen tulla kosteuskertymiä. Muita tällaisia paikkoja ovat epäjatkuvuuskohdat, kuten liittymät muihin rakenteisiin. Vesi kerääntyy seinien alaosiin ja sokkeleihin sekä ikkunoiden päälle painovoiman kuljettamana. Näistä paikoista veden poistaminen on otettava suunnittelussa huomioon. Muilta osin betonikuorien ilmanläpäisevyys on pieni. [4, s.34.]

Rakenteesta pyritään tekemään mahdollisimman tiivis ja saumakohtien tiiveyteen onkin kiinnitetty suurta huomiota. Elementtien sauma tiivistetään ulkopinnasta saumanauhan ja elastisen kitin avulla. Ikkunoiden kohdalla vesi ohjataan pois pellityksellä. Sokkeleiden päälle asennetaan aluskermi, joka johtaa rakenteessa valuneen kosteuden pois rakenteesta ja estää kosteuden kulkeutumisen sokkeliin.

3.5.2 Rakenteen kuivuminen

Kosteus voi poistua tuulettumattomissa ulkoseinärakenteissa diffuusiolla ulkokuoren ja mahdollisen pinnoitteen läpi. Jos rakenne on tuuletettu, kosteus poistuu diffuusion lisäksi ilmavirtausten mukana tuuletusraon tai ilmavirtauskanavien ja tuuletusaukkojen kautta. [4, s.34.]

Sandwich-ulkoseinässä rakennuskosteuden poistuminen on kuivumisen kannalta merkittävin tekijä. Siksi rakenne onkin usein tuulettuva. Tuuletuksen järjestämiseksi lämmöneristekerroksessa käytetään uritusta ulkokuoren sisäpintaa vasten. Urituksen toimivuuden edellytyksenä on, että ilma pääsee esteettä kulkemaan koko urajärjestelmässä. [4, s.34.]

Rakenteen sisään tuleva ulkoilma sitoo itseensä kosteutta. Kun ilma poistuu ulos lämmöneristetilasta, rakenteen kosteus pienenee. Tuuletusilma pystyy sitomaan sitä enemmän kosteutta, mitä enemmän se lämmöneristetilassa lämpenee. Tuuletuksen tehokkuuteen vaikuttavat kosteuden siirtyminen tuuletusilmaan, tulo- ja poistoilma-aukkojen sekä tuuletuskanaviston mitat ja sijoitus. Tuuletusilmavirtaukset johtuvat tuulen ja savupiippuilmion aiheuttamista ilmanpaine-eroista. [4, s.34.]

Betonielementistä valun jälkeen poistuva kosteusmäärä on noin 80 kg betonikuutiometriä kohti. Kuivumisaikaa pidentää rakenteeseen kulkeutuva vesi rakentamisen aikana sekä sisäkuoren liian aikainen tiivis pinnoittaminen. Rakennuskosteuden kuivumista voidaan nopeuttaa mm. lisäämällä tuuletusta sekä lämmittämällä ja kuivattamalla rakennusta. [4, s.35- 36.]

4 Elementtirakenne

Betonia on käytetty rakentamisen materiaalina jo pitkään. Rooman Pantheon on tunnetuin varhainen betonirakenne. Portland-sementin keksimisen jälkeen 1800-luvulla alettiin betonia käyttää uudelleen. Muottiin valettava kivi, johon lisättiin raudoitusta, avasi uudet mahdollisuudet suunnitella rakennuksiin avaria tiloja ja rakentaa siltoja. [16.]

Elementtitekniikkaa tutkittiin maailmalla jo ennen toista maailmansotaa. Sodan tuhojen korjaaminen toi kysyntää mahdollisimman tehokkaasta ja taloudellisesta rakentamisesta, johon elementtirakentaminen toi ratkaisun. Suomessa betoniteollisuutta alettiin kehittää elementtitekniologian avulla 1940- ja 1950-lukujen vaihteessa. [16.]

Vuosina 1968-1970 kehitettiin Suomessa asuinrakentamista varten avoin BES-järjestelmä. Se perustui kantaviin pääty- ja väliseiniin, ei-kantaviin sandwich-ulkoseiniin ja välipohjina käytettäviin pitkäläattoihin. Parvekkeet olivat yleensä vapaasti perustuksilla seisovia torneja. BES-järjestelmässä standardoitiin betonielementit ja niiden liitosdetaljit, jolloin urakoitsijat pystyivät hankkimaan valmisosia samaan rakennukseen useilta toimittajilta. Ilman tätä järjestelmää ei 1970-luvun alun ennätysmäinen asuntotuotanto olisi ollut mahdollista. [16.]

1980-luvulla laadittiin RunkoBES-aineisto, jossa pilari-palkkirungolle koottiin mittajärjestelmä, rakenneosien mitta- ja tyyppisuositukset sekä liitosdetaljit. 1980-luvulta lähtien alkoi lisääntyä myös ns. tuotesakauppa, jossa elementtiteollisuus otti aiempaa suuremman toimitusvastuun. Tuotesakauppaan sisältyy tyypillisesti elementtien suunnittelu, valmistus, asennus ja juotosvalut. [16.]

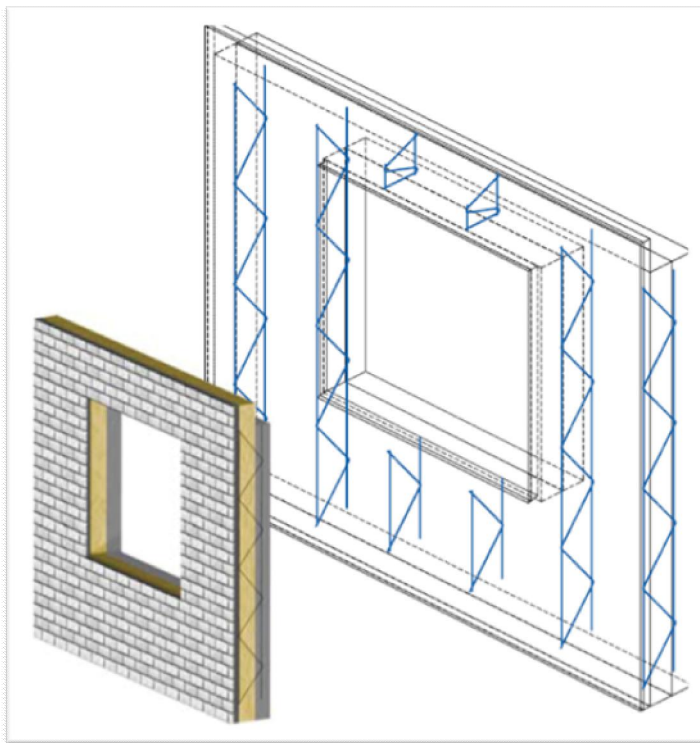
Nykyään tieto monista betonin kestävyysvaikuttavista tekijöistä, kuten raudoitteiden ruostumisesta ja pakkasen vaikutuksesta betoniin, ovat tuoneet parempia ratkaisuja elementtiteollisuuteen. [16.]

Suomessa yleisin tapa toteuttaa monikerroksisten rakennusten rungot on tehdä ne betonielementeistä. Niistä tehdään noin neljännes julkisivuista. Elementtirakentamisella pyritään nopeaan ja taloudelliseen kokonaistoteutukseen. Näin ollen elementtien vii-

meistely viedään yhä pidemmälle tehtaassa, jolloin työmäärä vähenee työmaalla. [7, s. 441.]

Sandwich-elementtejä on kahta perustyyppiä: normaalirauhoitettu sandwich-elementti ja esijännitetty onteloseinäelementti. Jo elementtien valmistuksessa saadaan etuja, koska tehdasolosuhteissa hallitaan paremmin betonin valmistus ja valuprosessi. Ulkona työmaalla sääolosuhteet asettavat rajoituksia, joita tehtaassa ei ole. Lisäetu on myös useammat valmistusmenetelmät, jotka ovat käytössä tehtaassa, toisin kuin työmaalla. [7, s. 455.]

Betoninen sandwich-elementti koostuu sisäkuoresta, lämmöneristeestä ja ulkokuoresta, jotka on jo tehtaalla liitetty toisiinsa. Kantavan ja ei-kantavan elementin erottaa sisäkuoren paksuudesta. Kantavassa rakenteessa sisäkuori on yleisimmin 150 mm paksu, kun ei-kantavassa se on 80 mm. Yksi sandwich-elementin tärkeä osa on siderauhoitukset eli ansaat, jotka liittävät elementin betonikuoret toisiinsa. Niiden tehtävänä on ripustaa ulkokuori sisäkuoren varaan, välittää ulkokuoreen kohdistuvat painekuormat sisäkuorelle ja estää kuorien liian suuri kaareutuminen. [4, s. 77.]



Kuvio 6. Sandwich-elementtirakenne, jossa näkyy ansaat. [14]

4.1 Elementtirakenteen rakenteellinen toiminta

Ulkokuoren oma paino aiheuttaa jännityksiä ansaisiin. Nämä jännitykset riippuvat ripustuspisteiden määrästä ja sijainnista siten, että jos ripustuspisteitä on tasaisesti koko matkalla, ovat jännitykset hyvin pieniä. Jos ripustus on kuoren alareunasta, syntyy ulkokuoreen puristusjännityksiä ja jos ripustus on yläreunasta, syntyy vetojännityksiä. Yleensä vetojännitys on alle 5 % betonin vetolujuudesta, joten ulkokuoren halkeiluriski on mitätön. [4, s. 77- 78.]

Kosteus- ja lämpötilamuodonmuutokset ulkokuoressa aiheuttavat suuria rasituksia sekä ulkokuorelle että ansaille. Rasitukset voivat olla niin suuria, että ulkokuori halkeilee ja ansaiden jännitykset yltyvät materiaalin myötörajalalle. [4, s. 78.]

4.1.1 Kosteusmuodonmuutokset

Kosteusmuodonmuutokset julkisivussa ovat suurimmillaan silloin, kun ulkokuori alkaa kuivua suorassa auringon paisteessa. Nopea kuivuminen ja kutistuminen alkavat tällöin ulkokuoren ulkopinnasta sisäpinnan pysyessä vielä lähes kutistumattomana. Kutistumaan vaikuttavat betonin ominaisuudet ja ympäristöolot, joihin betonirakenne joutuu. Betonin materiaaliominaisuuksista vesi- ja sementtimäärä vaikuttavat eniten kutistumaan. Ympäristöolosuhteista vaikuttavat eniten ilman suhteellinen kosteus ja rakenteen lämpötila. [4, s. 79.]

Ulkokuori on kosteimmillaan talvella. Keväisin ja kesäisin se kuivuu auringon säteilyyn, ympäristön lämpötilan kohoamisen ja suhteellisen kosteuden alenemisen vaikutuksesta. Sisäkuoren kosteuspitoisuus vaihtelee myös, mutta ei niin paljon kuin ulkokuoressa. Ulkokuori kuitenkin kuivuu noin kahdessa vuodessa ympäristön kosteutta vastaavalle tasolle, jonka jälkeen sen suhteellinen kosteus vaihtelee 40- 60 % välillä. [4, s.80.]

Ulkokuori kuivuu aluksi pinnasta ulkoilman kosteutta vastaavalle tasolle, mutta ulkokuoren sisäpinta on vielä ulkokuoren ulkopintaa kosteampi. Näin muodostuu ulko- ja sisäpinnan välille muodonmuutosero. Tämä ero voi olla suurimmillaan jo muutaman viikon kuluttua elementin valmistuksesta. Muodonmuutoseron eli kutistumagradientin suuruus on riippuvainen betonin kuivumiskutistumasta ja eristeen kuivumisesta ulkoilmaan. Kutistumagradiattia voidaan vähentää, kun ulkokuori voi kuivua eristeen kautta

eli tuuletetussa rakenteessa. Tällöin kuori kuivuu tasaisemmin molemmista pinnoista. [4, s.80.]

4.1.2 Lämpötilarasitukset

Lämpötilarasitukseen vaikuttavat betonin pituuden lämpötilakerroin ja julkisivupinnan lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin. Absorptiokerroin vaihtelee lähinnä julkisivun pinnan värin mukaan. Tumma pinta absorboi auringon säteilyä vaaleaa pintaa enemmän.

Julkisivun lämpötila voi nousta kuumana tuulettomana päivänä tummalla julkisivupinnalla lähelle 50°C, kun taas kovilla pakkasilla lämpötila voi laskea alimmillaan -30°C:een. Lämpötilaero ulkokuoren ulko- ja sisäpinnan välillä voi olla 70 mm vahvuudessa kuoressa minimissään -12°C ja maksimissaan +5°C.

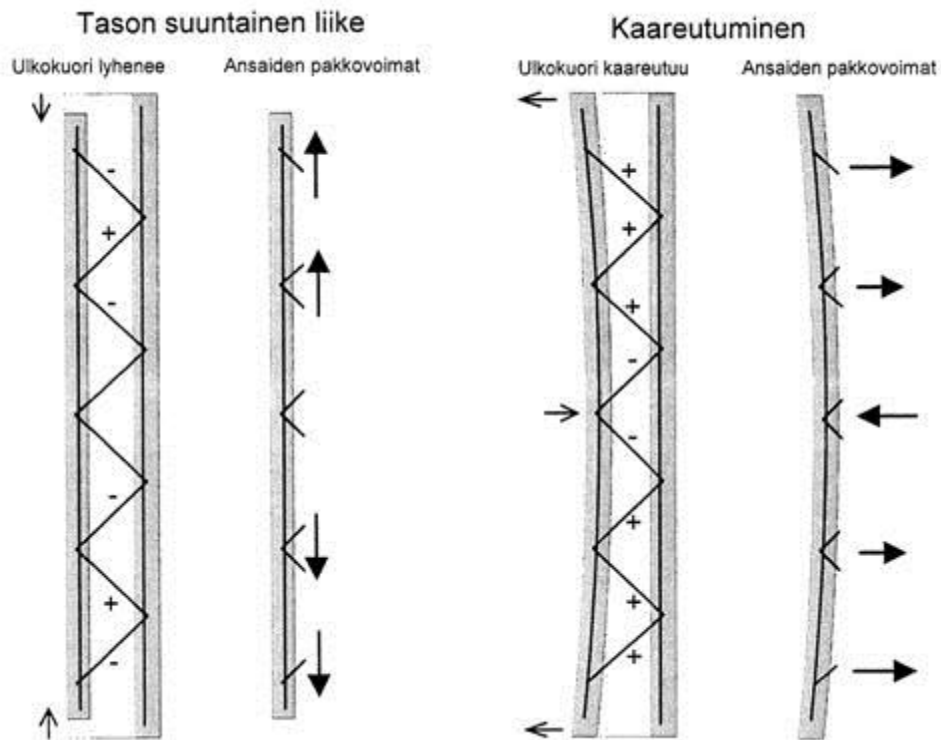
4.1.3 Lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutus

Lämpötila- ja kosteusrasituksia on syytä tarkastella yhdessä, sillä näille rasituksille on ominaista, etteivät ne vaikuta suurimmillaan samaan suuntaan. Esimerkiksi, kun kesällä lämpötilarasitukset aiheuttavat ulkokuoren suurimman pitenemän, alhainen kosteus kumoaa lämpötilarasituksen vaikutusta. [4, s.81.]

Kosteus- ja lämpötilarasitusten vaikutukset voidaan jakaa ulkokuoren tason suuntaiseen liikkeeseen, jossa muodonmuutos tapahtuu tasaisesti kuoressa, sekä ulkokuoren kaareutumiseen, jossa toinen pinta kutistuu enemmän. Ulkokuoren kaareutumisesta aiheutuu suurin rasitus. Ulkokuori kaareutuu epätasaisen kutistuman ja pintojen lämpötilaeron vuoksi. Kutistumasta aiheutuva käyristymä on suurempi kuin lämpötilasta johdettu, joten käytännössä voidaan tarkastella ainoastaan kutistuman aiheuttamaa muodonmuutoseroa. Näin voidaan todeta, että ulkokuori kaareutuu ulospäin, koska ulkopinta kutistuu sisäpintaa enemmän. [4, s.82.]

4.1.4 Pakkovoimat

Kosteuden ja lämpötilan aiheuttamista muodonmuutoksista seuraa, että rakenteeseen syntyy pakkovoimia. Pakkovoimat syntyvät siitä, että ansaat betonikuorien välillä pyrkivät estämään ulkokuoren liikkeitä. [4, s.83.]



Kuvio 7. Pakkovoimat sandwich-elementissä. [15]

Kuviossa 7 näkyy pakkovoimien aiheuttamat rasitukset elementissä. Kun ulkokuori lyhenee, ansaissa olevat pakkovoimat ovat suuntautuneet ylös- ja alaspäin. Kun taas ulkokuori kaareutuu, ansaissa olevat voimat suuntautuvat ala- ja yläpäässä sisäänpäin ja keskellä ulospäin.

Pakkorasitustapauksessa (lämpötila, kutistuma jne.) rakenteen jännitykset riippuvat rakenteen jäykkyydestä ja tuennasta. Rakenteen jännitykset ovat sitä suurempia mitä suurempi rakenteen jäykkyys on, mutta ainoastaan staattisesti määräämättömään rakenteeseen syntyy jännityksiä muodonmuutoskuormituksesta. Jos muodonmuutoksista aiheutuva jännitys saavuttaa rakenteen vetolujuuden, niin rakenne alkaa halkeilla ja jäykkyys pienentyä. Jäykkyyden pienentyessä myös jännitykset pienenevät ja lopulta saavutetaan tasapainotila, missä rakenteen jännitykset vastaavat sen jäykkyyttä. [4, s. 83-84.]

4.2 Sandwich-elementin raudoitus

Sandwich-elementissä ansasraudoitus varmistaa betonikuorien välisen yhteistoiminnan. Betonirauδοitusta tarvitaan rakenteellisena raudoituksena sisäkuoressa, joka kantaa rakennuksen pystykuormia tai osallistuu rakennuksen jäykistykseen.

Ansaiden toimivuus julkisivun muodonmuutoksissa riippuu niiden jäykkyydestä. Diagonaaliinsaatt on yleisin sandwich-elementeissä käytettävä ansastyypimpi. Niillä on suurin ulkokuoren tason suuntainen jäykkyys elementin pystysuunnassa. Tämän takia diagonaaliinsailla kuoreen syntyy pakkovoimia tason suuntaisesta liikkeistä. Jos elementti on korkeintaan 3000 mm korkea, nämä pakkovoimat eivät ole merkittäviä. [4, s. 84.]

Ansasjako ei saa olla liian harva, jotta taivutusrasitukset kuoren leveysuunnassa eivät kasva liian suuriksi. Ansasjako saa olla enintään 1200 mm, mutta yleisesti käytetään jakoväliä 600 mm. Lisäksi villatilan läpi sijoitettujen raudoitteiden tulee olla ruostumattomasta teräksestä valmistettuja, ruostumisen ehkäisemiseksi. [4, s. 85.]

Ulkokuoren tehtävänä on rakenteellisessa mielessä kantaa kuoren oma paino ja välittää tuulikuormat sisäkuorelle. Tästä syystä raudoitustarve ulkokuoressa on vähäinen. Ulkokuoren suurimmat rasitukset syntyvät lämpötilan ja kosteuden muutoksista. Yleensä ulkokuoressa käytetään verkkoraudoitusta, joka tuo tarvittavaa sitkeyttä ja estää mahdollisten kappaleiden irtoamisen ulkokuoresta. [4, s. 86.]

4.3 Kylmäsillat

Kylmäsillan kautta kulkeutuu enemmän lämpöä ulos kuin sen ympärillä olevan rakennusosan kautta. Toisin sanoen kylmäsillat ovat rakennuksen vaipan paikallisia rakennosia, joissa syntyy korkea lämpöhäviö. Kylmäsilloja ovat mm. julkisivuverhousten ja ulkokuoren kiinnitysjärjestelmät sekä parvekkeiden kiinnitysjärjestelmät.

Tarpeettomia kylmäsilloja halutaan tietenkin aina välttää. Tästä syystä rakenne on suositeltavampi lämpötekniisesti silloin, kun siinä on vähemmän lämmöneristekerrosten läpi meneviä kiinnitysosia ja kiinnitysosat ovat mahdollisimman pieniä.

Kylmäsillan alueella paikallisesti kohonnut lämpöhäviö johtaa sisäpintojen lämpötilan laskuun. Kun lämpötila laskee riittävästi, voi rakennukseen muodostua hometta. Kylmäsillat voivat myös lisätä julkisivurakenteeseen kerääntyvää kosteutta, sillä kastepisteen esiintyminen eristekerroksen läpi menevän kiinnikkeen pinnalla on tavallinen ilmiö. [4, s.45.][9.]

Kylmäsiltojen vaikutukset ovat siis

- homesienen muodostumisen vaara, josta voi aiheutua terveydellisiä haittoja
- kosteuden tiivistymisen vaara
- kohonnut lämmitysenergian tarve.

Miten kylmäsiltoja voisi sitten vähentää? Suurimpia kylmäsiltoja ovat parvekkeiden kiinnitykset. Näiltä kylmäsiltoilta ei voi välttyä muuten kuin rakentamalla parvekkeista täysin oma, irrallinen kokonaisuus. Kuitenkin tämä pitäisi jollakin tapaa kiinnittää rakennukseen. Lisäksi tämä rajoittaa julkisivun vaihtelevuutta.

4.3.1 Kylmäsillan vaikutus U-arvoon

Kylmäsillat heikentävät U-arvoa. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan, kun kylmäsillan aineen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo poikkeaa viereisen aineen vastaavasta suunnitteluarvosta enemmän kuin 5-kertaisesti, lasketaan kylmäsiltoista aiheutuva rakennusosan lämmönläpäisykertoimen lisäys niin sanottujen lisäkonduktanssien avulla.

Rakennusosan lämmönläpäisykertoimen U voidaan otaksua kasvavan määrällä 0,006 W/(m²•K) käytettäessä läpimitaltaan 4 mm ruostumattomia terässiteitä 4 kpl/m² ja määrällä 0,05 W/(m²•K) käytettäessä läpimitaltaan 4 mm kuparisiteitä 4 kpl/m². [8, s. 6.]

Uudessa, luonnosvaiheessa olevassa rakentamismääräyskokoelman lämmöneristysohjeessa (2012) annetaan vielä tarkemmat ohjeet viivamaisten säännöllisten kylmäsiltojen sekä pistemäisten säännöllisten kylmäsiltojen aiheuttaman lämmönläpäisykertoimen lisäyksen laskentaan. Tämän lisäksi uudessa ohjeessa on myös laskukaava rakennuksen epäsäännöllisten kylmäsiltojen käsittelyyn. Tällaisia kylmäsiltoja ovat rakennus-

osien väliset liitokset kuten esimerkiksi alapohjan liitos ulkoseinään. Näitä tarkempia tuloksia tarvitaan uusissa energiatehokkuuslaskelmissa. Myös rakennuksen energiatehokkuusmääräykset ja -ohjeet (2012) ovat vielä luonnosvaiheessa. [12][13.]

Entistä tarkemmat ohjeet tuovat suunnittelijoille tarkemmat puitteet, joiden mukaan rakenteen U-arvo lasketaan. Tämä on toisaalta hyvä asia, koska näin rakenteiden U-arvolaskennassa päästään tarkempiin tuloksiin. Rakenteet ovat usein monimuotoisia ja niissä on erilaisia rakennusmateriaaleja. Tämä pyritään paremmin ottamaan huomioon uusissa määräyksissä.

5 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics on fysikaalinen mallinnusohjelma, jolla voi tarkastella muun muassa rakenteiden fysikaalista toimintaa. Rakenteet voi piirtää itse ohjelman omilla työkaluilla. Vaihtoehtoisesti voidaan hyödyntää esimerkiksi AutoCAD-ohjelmalla tehtyjä rakenteita.

Kun rakenne on mallinnettu, ohjelmalla voidaan katsoa lämmön siirtymistä rakenteen läpi, lämpövirran kulkua, pintojen lämpötilaeroja sekä voidaan ottaa tarkempia lämpötilan jakautumia esimerkiksi rakenteen pinnalla.

5.1 Kantava sandwich-elementtirakenne

Tässä insinööriyössä keskitytään tarkastelemaan kantavan sandwich-elementtiseinän eristepaksuuden vaikutusta rakenteen U-arvoon. Työssä mallinnettiin neljä eri seinärakennetta, joissa eristepaksuus vaihteli.

Lisäksi työssä tarkasteltiin lähemmin myös sandwich-elementtiseinän sekä parvekkeen välipohjan liitosta. Parvekeliitos on tyypillisin kylmäsilta rakenteessa ja tässä työssä haluttiin tarkemmin tutkia kylmäsiltojen vaikutusta U-arvoon. Normien yhä kiristyessä rakenteet pyritään suunnittelemaan vastaamaan pienempiä U-arvoja. Tämä johtaa väistämättä eristepaksuuden kasvamiseen, mutta myös kylmäsiltoilla on vaikutusta U-arvoon. Kylmäsiltojen heikentävät U-arvoa, jolloin tulevaisuudessa myös niiden suunnitteluun panostetaan enemmän.

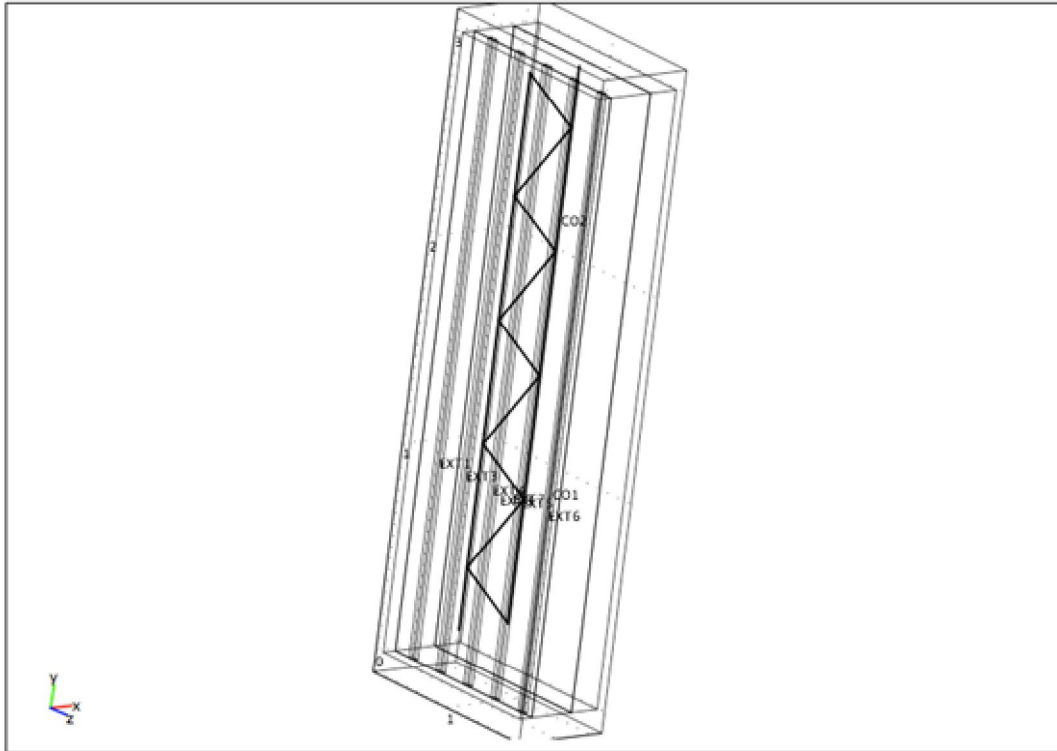
Tutkittiin myös nurkkakohta, jossa kaksi sandwich-elementtiä kohtaa. Tässä haluttiin selvittää, mikä vaikutus nurkalla on tiiveyteen ja lämmönjohtavuuteen.

Ensin mallinnettiin neljä eri paksuista sandwich-elementtirakennetta. Tässä tutkittiin, minkä paksuisilla eristeillä päästään U-arvoihin $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Mallinnuksessa keskityttiin kantavaan rakenteeseen, koska kantavan ja ei-kantavan rakenteen ero on vain sisäkuoren paksuudessa. Ei-kantavassa rakenteessa sisäkuoren paksuus on 80 mm, kun se kantavassa on 150 mm. Betonilla on huono lämmön-eristävyyys verrattuna eristeeseen, joten tämä 70 mm ero näissä rakenteissa ei tuo merkittävää eroa U-arvoon.

Työssä mallinnettiin rakenne COMSOL-ohjelmalla ensin 2D-muotoon. Tämän jälkeen rakenne käännettiin 3D-malliksi siten, että pystyttiin mallintamaan ilmaraot ja ansaat. Mallin korkeudeksi valittiin 3 metriä, joka on normaalisti asuinkerrostalon kerroskorkeus. Leveydeksi valittiin 1 metri. Ansaat ovat yleensä 600 millimetrin jaolla, joten malliin laitettiin yksi viipale ansaita noin rakenteen keskikohtaan.

5.2 Seinärakenne 1

Ensimmäiseksi mallinnettiin seinärakenne, jonka eristepaksuus on 230 mm. Tämä on tällä hetkellä yleisin Optiplanin suunnitelmissa käytetyistä eristepaksuuksista. Seinärakenteen kokonaispaksuudeksi tuli näin ollen siis 450 mm.

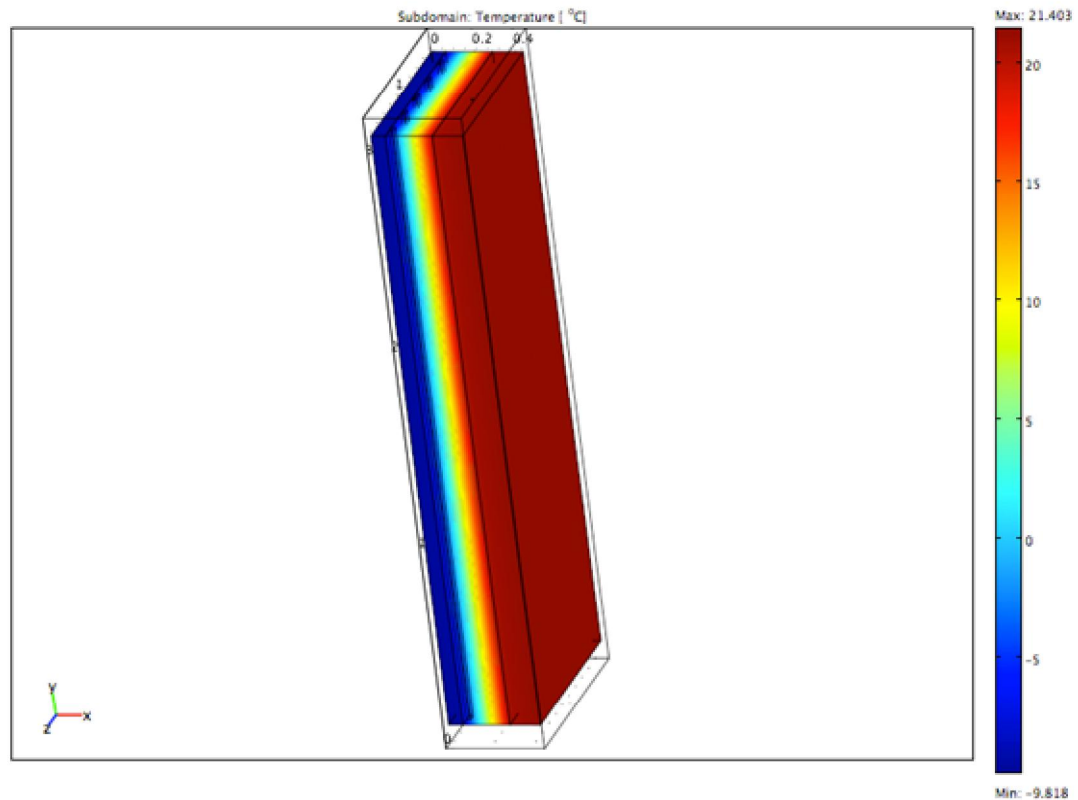


Kuvio 8. Sandwich-elementtirakenne 3D-mallina.

Betonin λ_d on 1,2 W/mK, eristeen λ_d on 0,035 W/mK, ilmaraossa kulkevan ilman λ_d on 0,023 W/mK ja ansaiden λ_d on 17 W/mK. Betonin ja ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuudet on otettu Suomen rakentamismääräyskokoelmasta. Eristeen lämmönjohtavuutena käytetään Parocin ilmoittamaa sandwich-elementin eristeen lämmönjohtavuutta. Näiden lisäksi tarvittiin ulko- ja sisäpinnan pintavastukset, jotka ovat 0,04 (m²K)/W ja 0,13 (m²K)/W. Oikeasti ilma virtaa ilmaraoissa, mutta mallia yksinkertaistettiin siten, että ilmaraot otettiin huomioon vain laittamalla niihin ilman λ_d -arvo ja jätettiin ilman virtaus huomioimatta. Tämä parantaa hieman U-arvoa. Näiden lisäksi ohjelmaan syötettiin sisälämpötilaksi 22°C ja ulkolämpötilaksi -10°C.

Tuloksena saatiin rakenteelle pinnan lämpövirran tiheydeksi $q = 4,66 \text{ W/m}^2$, josta saadaan U-arvo jakamalla lämpötilojen erolla. U-arvo on näin ollen 0,15 W/(m²•K). Vertaamalla käsinlaskuun, tämä on 12 % parempi tulos. Käsin laskettaessa tämän rakenteen U-arvo on 0,17 W/(m²•K).

U-arvo $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ei ole kuitenkaan haluttu arvo, mutta työssä tutkittiin tämä siksi, koska myöhemmin parvekeliitoksissa ja nurkkaliitoksessa on käytetty tätä samaa lämmöneristepaksuutta. Näin voidaan vertailla näiden kolmen rakenteen eroa.



Kuvio 9. Sandwich-elementtirakenne ratkaistuna.

5.3 Seinärakenteet 2, 3, 4 ja 5

Seinärakenteet 2, 3, 4 ja 5 mallinnettiin samalla periaatteella kuin seinärakenne 1. Eristepaksuudet vain vaihtelivat siten, että mallissa 2 eristepaksuudeksi valittiin 200 mm. Mallissa 3 eristepaksuus on 240 mm, mallissa 4 se on 280 mm ja mallissa 5 eristepaksuus nousi 330 mm:iin.

Huonoin haluttu U-arvo oli $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ja tämä saadaan mallintamalla rakenne, jossa on 200 mm eristettä. Tällöin rakenteen pinnan lämpövirran tiheydeksi q saadaan $5,32 \text{ W}/\text{m}^2$.

U-arvoon $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ päästään COMSOL-ohjelman mukaan eristepaksuudella 240 mm. Tässä rakenteessa $q = 4,48 \text{ W}/\text{m}^2$.

Kun haluttu U-arvo on $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, pitää tällöin lämmöneristettä olla 280 mm. Tällä hetkellä käyttäen käsinlaskentaa ja DOF-lämpöohjelmaa, tuottaa 280 mm eriste U-arvoksi $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Päästäkseen U-arvoon $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, pitää eristettä olla jo 330 mm. Tämä eristemäärä tuo jo ansaisiinkin mahdollisia muutoksia. Malli kuitenkin tehtiin käyttämällä tässä samanlaisia ansaita, kuin kaikissa muissakin rakenteissa, jotta niitä voidaan paremmin vertailla. Kuitenkin eristepaksuus menee tässä jo sen verran suuremmaksi, että ansaiden rakenteellinen toimivuus täytyisi tarkastella erikseen.

5.3.1 Seinärakenteiden vertailu

COMSOLilla mallinnettaessa saadaan mallirakenteesta hyvin tarkasti sennäköinen, kun rakenne oikeastikin on. Työssä käytetyissä rakennemalleista puuttuu vain ilmaraoissa virtaava ilma, mutta senkin pystyy COMSOLilla rakenteeseen mallintamaan.

Vaihtelut laskennallisiin tuloksiin voivat johtua käsin laskennassa käytettävistä oletuksista ja arvioista. Ilmaraot otetaan käsin laskussa huomioon erillisellä pintavastuksen arvolla ja ansaat otetaan huomioon huonontamalla U-arvoa Suomen rakentamismääräyskokoelmassa olevalla arvolla $0,006 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Lisäksi laskennassa voidaan käyttää eri lämmönjohtavuuden arvoja sekä betonille että eristeelle. Nämä tuovat myös hieman eroa tuloksiin.

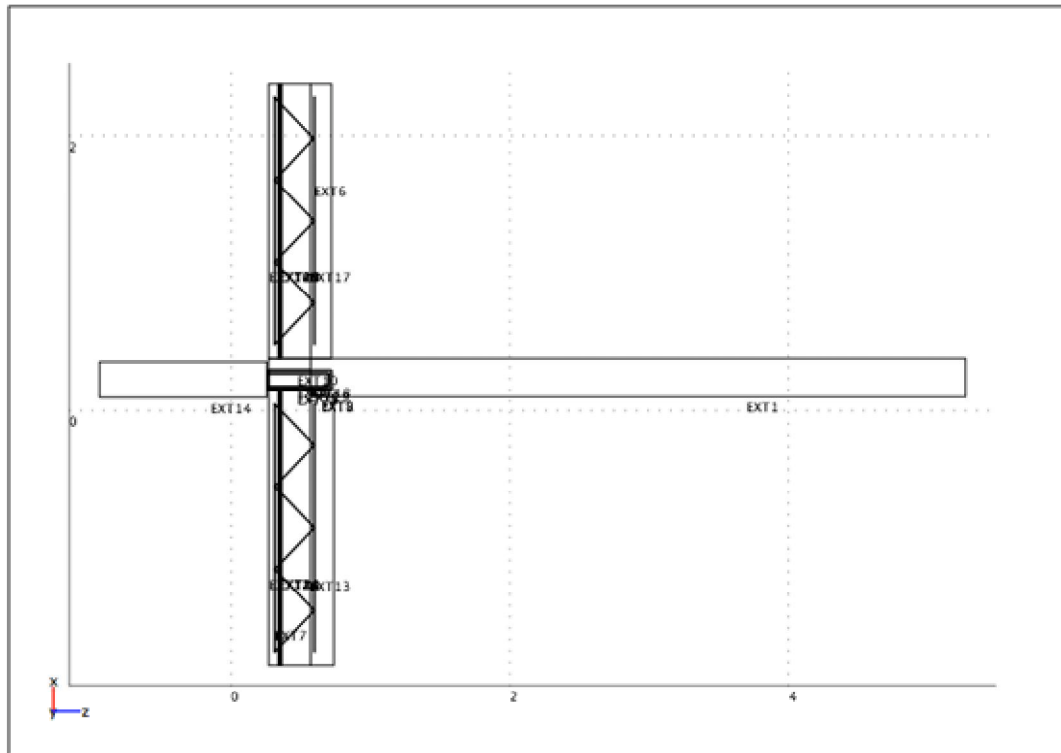
Malleissa ansaille ja ilmaraoille annettiin oma λ_d -arvo ja niiden vaikutus otettiin näin huomioon. Ilmaraoissa virtaavaa ilmaa ei tässä työssä huomioitu, mikä oikeasti hieman huonontaa saatuja U-arvoja. Malleista on kuitenkin selkeästi havaittavissa, että eristepaksuuden kasvatus parantaa rakenteen U-arvoa. Tulevaisuudessa malleista voisi tutkia vielä, kuinka paljon ansaat ja ilmaraot yksistään vaikuttavat U-arvoon.

5.4 Parvekeliitos

Parveke liittyy ulkoseinään ruostumattomilla teräsputkiprofileilla, joiden sisässä on eristettyä. Ruostumattomalla teräksellä on suhteellisen suuri lämmönjohtavuuden arvo eli se ei ole hyvä lämmöneriste. Näin ollen se jakaa saamansa lämmön tai kylmyyden helposti eteenpäin. Yleisesti sisällä oleva lämmin ilma pääsee helpommin kulkeutumaan rakenteesta pois päin teräsputkea pitkin. Näin se viilentää rakennetta ja huonontaa samalla sen lämmöneristävyttä.

Ensimmäisessä parvekemallissa keskityttiin saamaan rakenteen U-arvo selville. Tästä johtuen pyrittiin tekemään mallista niin tarkasti oikeaa vastaava kuin mahdollista. Mallinnettiin parveke, joka kiinnittyy välipohjaan. Välipohja on paikalla valettu betonivälipohja. Seiniä mallinnettiin noin 2 metriä parvekkeen ylä- ja alapuolelle.

Kuva mallinnettiin ensin 2D-muotoon ja sitten käännettiin 3D-muotoon, jotta saatiin parvekekannatin oikeanlaiseksi ja sille oikeankokoiset mitat. 3D-mallissa pystyttiin myös huomioimaan ilmaraot ja ansaat mukaan. 3D-malliin syötettiin joka osalle oma lämmönjohtavuuden arvo ja lisäksi laitettiin pinnoille pintavastukset. Tässä käytettiin samoja lämmönjohtavuuden arvoja kuin seinäelementtien malleissa. Parvekkeen kannatin on myös ruostumatonta terästä, joten sille annettiin sama λ -arvo kuin ansaille. Parvekkeen kannattimen sisällä on lämmöneristettä ja myös sen ulkopinnalla on lämmöneristettä. Näin on pyritty saamaan kylmäsillasta mahdollisimman heikosti kylmää ilmaa eteenpäin vievä rakennusosa.



5.4.1 Parvekeliitoksen tulosten tarkastelua

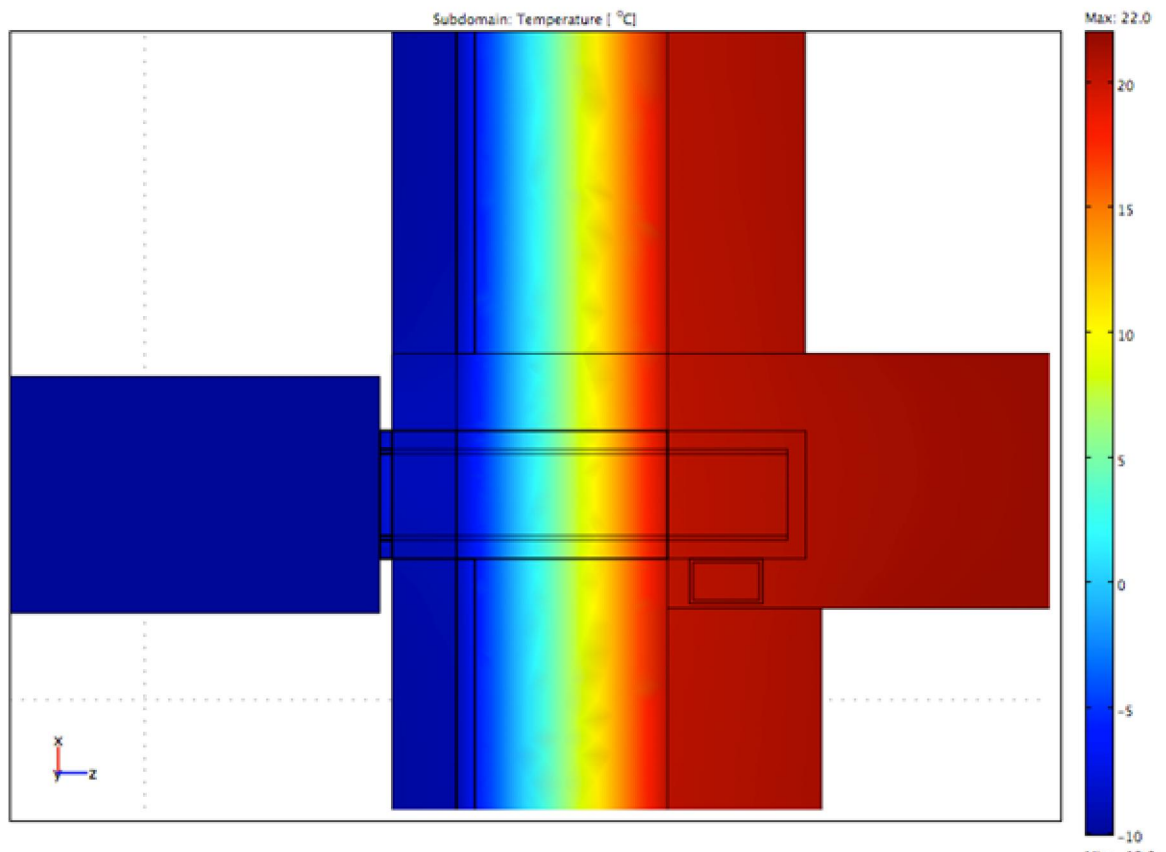
Parvekeliitoksessa mielenkiintoisin kohta on parvekkeen kannatinosa, joka toimii rakenteessa kylmäsiirtana. Työssä haluttiin tutkia, kuinka suuri vaikutus parvekkeen kannatinosalla on rakenteen kokonaislämmönläpäisevyyteen. Mallirakenteesta pyrittiin saamaan mahdollisimman tarkasti samanlainen kuin se todellisuudessa on. Näin mallista tuli myös hyvin moninainen. Koska mallirakenteessa on hyvin monta osaa, on oltava todella tarkka, että eri osien lämmönjohtavuudet tulevat oikeaan kohtaan. Lisäksi pintavastukset täytyy laittaa tarkasti kohdilleen.

Tällaisen mallirakenteen luominen, jossa on todella monta osaa, on hyvin haastavaa ja virheen mahdollisuus suurenee. Tuloksena saatiin ulkopinnan mukaan laskettuna U-arvoksi $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Kun U-arvo laskettiin mallin välipohjan yläpuolisen sisäpinnan mukaan, saatiin tulokseksi $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Tämä tulos on sama kuin seinärakennemalli 1:n U-arvoksi saatu tulos.

Tämän mallirakenteen tulosten tarkastelussa täytyy olla paljon kriittisempi. Tässäkään mallissa ei otettu huomioon ilmaraoissa virtaavaa, joka heikentää U-arvoa. Lisäksi virheen mahdollisuus tässä mallirakenteessa on suurempi kuin yksinkertaisemmassa

sandwich-elementtiseinärakenteessa. 3D-mallissa on paljon hankalampi erottaa, mikä osa on kyseessä, jotta sille saadaan oikeat arvot, joten se voi tuottaa virhettä lopputulokseen.

Parvekekannattimessa on eristettä sisäpuolella ja ulkopuolella, jotta siitä on saatu mahdollisimman vähän lämpöä johtava rakennusosa. Silti sen vaikutuksen luulisi olevan suurempi. Tulevaisuudessa olisi hyvä tarkentaa tuota mallirakennetta lisäämällä ilmavirtauksen ilmarakoihin. Näin tuloksia voisi vertailla ja tutkia, kuinka suuri vaikutus ilmaraoissa virtaavalla ilmalla on rakenteen U-arvoon. Lisäksi mielenkiintoa herättää U-arvojen eroavaisuus rakenteen ulko- ja sisäpinnan mukaan. Jos lämpöä pääsee poistumaan rakenteesta muuta kautta kuin kohtisuoraan rakenteen läpi, se vaikuttaa myös U-arvoon.



Kuvio 11. Parvekkeen liitoskohta lähikuvassa.

5.4.2 Ajasta riippuva parvekeliitosmalli

Parvekeliitoksen mallista tehtiin vielä toinen malli, jossa on ajanskaalaustekijä mukana. Tästä mallista ei saa U-arvoa ulos, kuten tuosta ensimmäisestä parvekemallista, joten oli parempi tehdä tämä erikseen. Ajanskaalaustekijällä varustettu malli on oiva tapa nähdä, mitä rakenteelle tapahtuu lämmönsiirtymisen suhteen eri vuodenaikoina.

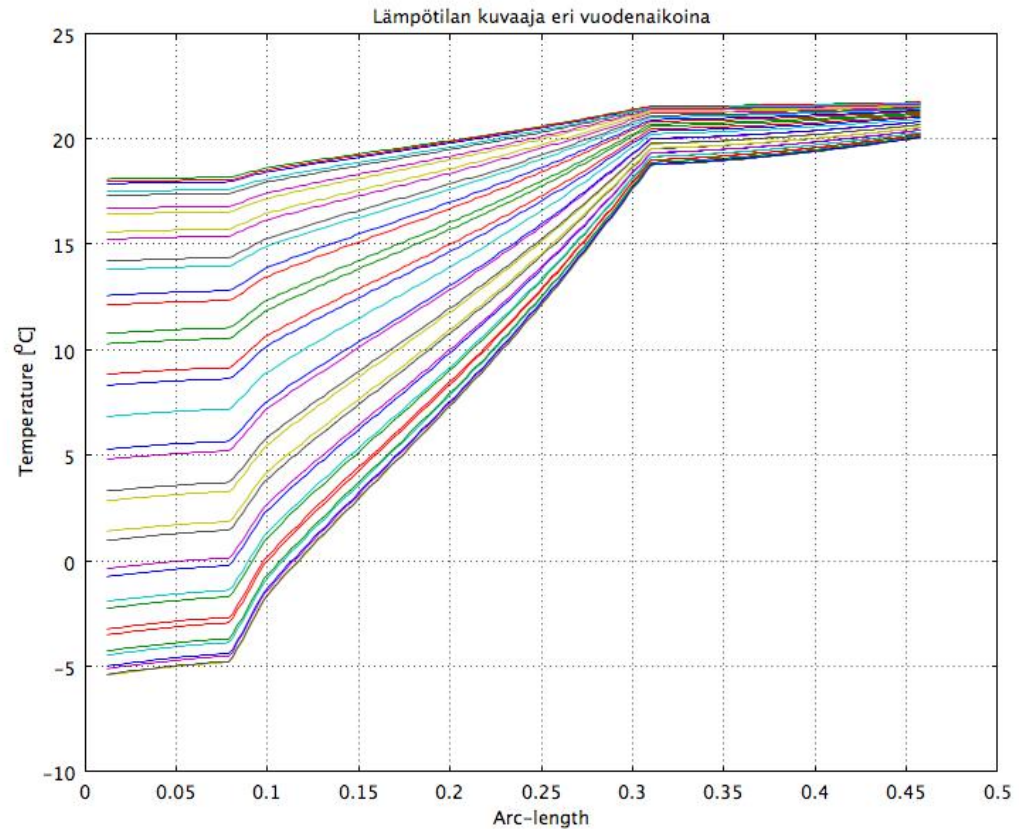
Lämpötila vaihtelee eri vuodenaikoina ja lämpötilaero ulko- ja sisäilman välillä voi kasvaa hyvin suureksi. Mallista saadaan ratkaisun kautta ulos esimerkiksi pinnan lämpötilan vaihtelu vuodenajan mukaan.

Lähtötietoina ovat lämmönjohtavuuksille samat arvot kuin ensimmäisessä parvekeliitostapauksessakin. Tässä mallissa lisätään vielä jokaiselle materiaalille ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden arvot.

Taulukko 2. Parvekeliitos-mallissa käytetyt lähtöarvot

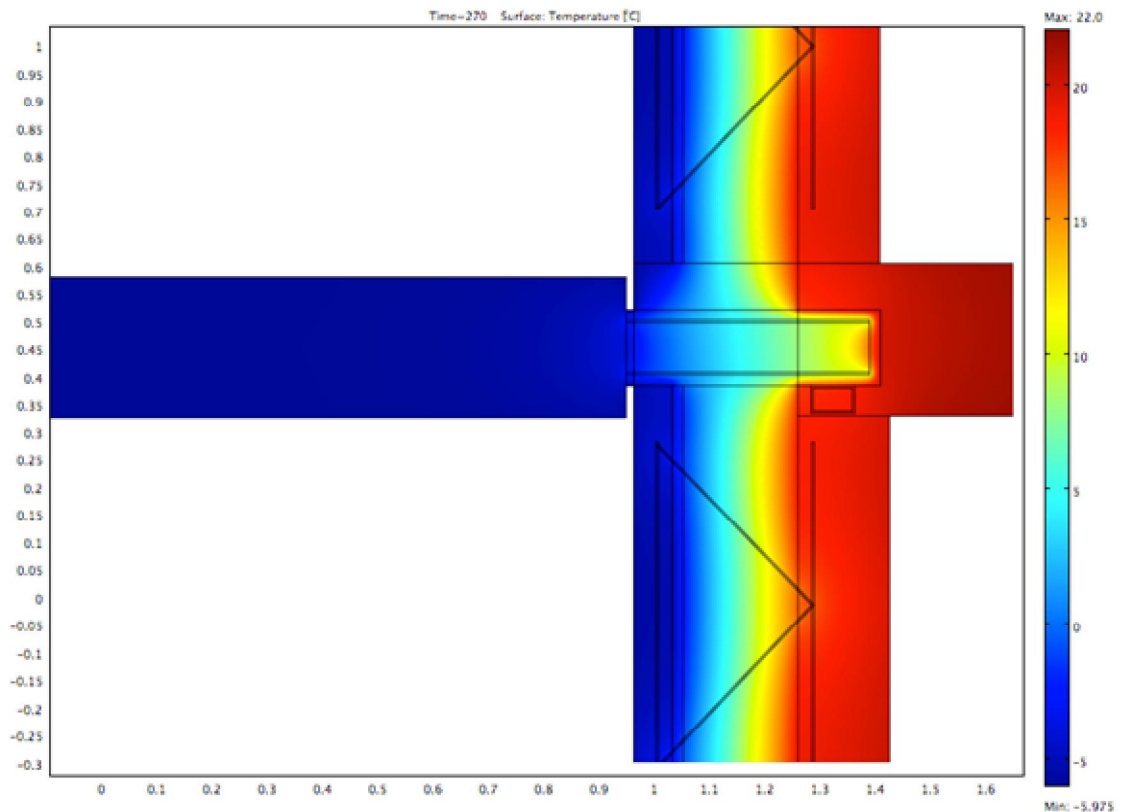
	Betoni	Lämmöneriste	Ruostumaton teräs	Ilma
Lämmönjohtavuus, λ , [W/mK]	1,2	0,035	17	0,023
Ominaislämpökapasiteetti, [J/kgK]	840	840	500	1010
Tiheys, [kg/m ³]	2000	75	7900	1,293

Taulukossa on annettu kaikki lähtöarvot, jotka ohjelmaan syötettiin. Lisäksi jokaiselle aineelle annettiin ajanskaalaustekijä (*time-scaling coefficient*) 1/86400. Tämä ilmaisee vuorokauden sekunteina. Rakenteelle määrättiin sisälämpötila 22 °C, sekä vuoden keskimääräinen lämpötila Helsingissä (6 °C) ja amplitudi 12. Ulkolämpötilaksi määritettiin sinimuotoinen lauseke $Tek + Teamp1 * \sin(2 * \pi * t / 365)$, jossa Tek on vuoden keskimääräinen lämpötila Helsingissä ja Teamp1 on amplitudi.



Kuvio 12. Lämpötilan kuvaaja eri rakennekerroksissa eri vuodenaikoina.

Näin saatiin mallinnettua ajasta riippuva rakenne. Mallista voi näin ollen katsoa filmin, joka näyttää, kuinka lämpötila muuttuu eri vuodenaikojen mukaan. Tästä mallista voidaan ottaa myös esimerkiksi seinämän poikki menevä lämpötilakäyrä eri vuodenaikoina (kuvio 12). Lämpötilakäyrästä nähdään kuinka lämpötila vaihtelee eri rakennekerroksissa eri vuodenaikojen mukaan. Kuvaajassa vasemmalla on ulkopinta, jossa lämpötila eri vuodenaikoina vaihtelee suuresti. Ylin käyrä kuvaa aikaa kesällä ja alin talvella. Ulkopinnan lämpötila vaihtelee -5°C - $+17^{\circ}\text{C}$ välillä eri vuodenaikoina. Pisteessä 0,07 käyrästä tekee terävemmän kulman, joka johtuu betonin ja eristeen rajapinnasta. Eriste pyrkii tasoittamaan lämpötilaeroja ja eristekerroksen toisessa reunassa lämpötilakäyrästä onkin jo pienemmällä alueella eri vuodenaikoina. Eristekerroksen toisessa reunassa eli pisteessä 0.3 huomataan, että lämpötila vaihtelee enää $+17^{\circ}\text{C}$ - $+22^{\circ}\text{C}$ välillä. Lämpötilavaihtelu pienenee vielä vähän sisäkuoren sisäpintaan päin mentäessä.



Kuvio 13. Ajasta riippuva parvekkeen liitosmalli lähikuvassa.

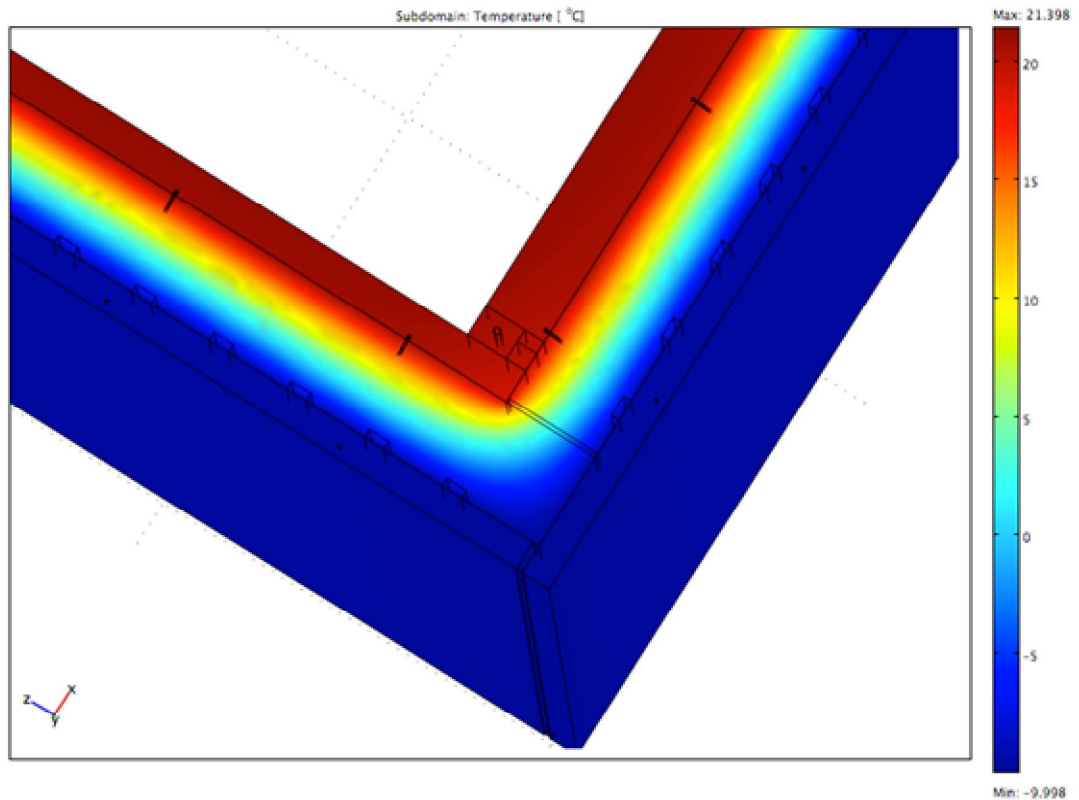
Parvekeliitosmallia ei tehty 3D-mallina, joten se on ikään kuin leikkaus parvekkeenliitospohdasta. Tästä johtuu, että lämpötilan jakautuminen on myös erilainen. Kuviosta 13 nähdään kuinka parvekkeen teräskannatin johtaa paremmin lämpöä rakenteesta pois päin.

5.5 Kantavan ja ei-kantavan sandwich-elementin kohtaaminen nurkassa

Nurkat ovat myös yksi mahdollinen vuotokohta rakenteessa. Nurkista pääsee helpommin kylmä ilma rakenteen sisään ja sitä kautta sisätiloihin. Tästä syystä myös nurkkaliitosten suunnittelussa on oltava huolellinen.

Kun kaksi elementtiä kohtaa nurkassa, laitetaan niiden väliin eristeen kohdalle villakais-ta ja ulkonurkan betonien välinen tila tiivistetään alusnauhalla ja elastisella kitillä. Sisänurkassa on vaijerilenkit, jotka jäävät jälkivaluun ja näin nurkasta saadaan mahdollisimman tiivis ja hyvä rakenne.

Työssä mallinnettiin ulkonurkka, jossa kantava ja ei-kantava rakenne kohtaavat. Seinät mallinnettiin 3 metriä pitkiksi ja 3 metriä korkeiksi. Eristeen paksuus on 230 mm ja eristeosa on uritettu, eli siellä on ilmaurat 200 mm jaolla. Lisäksi ansaat ovat 600 mm jaolla.



Kuvio 14. Nurkkaliitoksen lähikuva.

Tämä malli on sen verran suuri, että ratkaisu vie jo jonkin verran aikaa. Ratkaisun jälkeen mallista nähdään, kuinka nurkka vaikuttaa lämmön kulkeutumiseen. Ratkaisusta otetaan myös pinnan integraali, jolloin saadaan rakenteen pinnan lämmönsiirtyminen selville. Rakenteesta saatiin $q = 4,49 \text{ W/m}^2$ ja tällöin U -arvo on $0,14 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Tässä mallissa rakenteen integraali pinnan suhteen jaettiin 18 [m] , koska pinta on molempiin suuntiin 3 metriä pitkä ja lisäksi se on 3 metriä korkea. Integraali pitää jakaa pinta-alalla eli 18 m^2 :llä, joka on siis ulkopintojen pinta-alojen summa.

Tulos on siis sama, kuin aiemmin saadussa seinärakenteessa, jossa on eristettä 240 mm. Tuloksen voisi ajatella olevan jopa hieman tarkempi kuin rakennemallin, jossa on yhden metrin pituinen kaistale seinää, koska tässä on enemmän ansaita ja ilmarakoja mukana, joten niiden vaikutus saadaan suuremmalta alalta. Tosin tässäkin mallissa

ilmaraot on otettu huomioon vain ilman lämmönjohtavuusarvolla kuin rakenne olisi tuulettumaton, kun todellisuudessa ilmaraoissa virtaa ilma, joka hieman heikentää U-arvoa. Koska tässä mallissa on enemmän ilmarakoja, joissa ei ole otettu ilmavirtausta huomioon, voi tulos olla siksi vielä parempi kuin seinärakennemalli 1:ssä.

5.6 COMSOL Multiphysics -ohjelman soveltuvuus rakennesuunnittelijalle

Tutkimuksessa käsiteltiin monia muitakin malleja, joita tässä työssä ei esiinny. Näin vertailtiin miten mikäkin asia vaikuttaa rakenteessa. Tutkimus osoittaa, että ohjelma on hyvin monipuolinen ja käytännöllinen selvittämään erilaisia fysikaalisia ilmiöitä rakenteessa. Ohjelma on kuitenkin sen verran monipuolinen, että tutkimuksessa ehdittiin käyttää vain murto-osaa sen kapasiteetista.

Ohjelmalla voidaan laatia yksityiskohtaisia malleja, jolloin saadaan oleellisesti tarkempia tuloksia kuin perinteisellä käsinlaskennalla. Koska määräykset kiristyvät kaiken aikaa, täytyy myös suunnittelijan pysyä ajan tasalla, mitä rakenteilta vaaditaan. Ohjelma olisi hyödyllinen tutkittaessa esimerkiksi rakenteen U-arvoja ja ohjelmalla saadaan aikaiseksi vieläkin tarkempia malleja, kuin mitä tutkimuksessa käytettiin. Tämä vaatii kuitenkin enemmän tutustumista ohjelmaan ja syventymällä vielä enemmän rakennusfysiikkaan. Ohjelmassa pitää ymmärtää, mitä se tekee ja minkä suhteen se laskee, jotta tulokset olisivat verrattavissa. Pitää itse myös ymmärtää, kuinka rakenne oikeasti toimii.

Ohjelma on selkeä käyttää ja sillä saa helposti ja nopeasti aikaan yksinkertaisen mallin. Tällä hetkellä ohjelmasta on tullut jo uudempikin versio, jota tässä työssä ei käytetty. Uudemmassa versiossa on tiettyjä asioita yksinkertaistettu ja helpotettu, mutta periaate on sama kuin vanhemmassakin versiossa.

Lopputuloksena voisi sanoa, että COMSOL Multiphysics -ohjelmasta on hyötyä suunnittelutoimistolle, joka haluaa olla ajan tasalla määräysten vaikutuksista rakenteisiin. Ohjelmalla voidaan luoda hyvin monimuotoinen malli, jolloin rakenteesta saadaan juuri oikeanlainen. Tämä tuo tarkkuutta laskentaan.

6 WUFI

WUFI:lla (*Wärme und Feuchte instationär – Transient Heat and Moisture*) voidaan simuloida rakenneleikkauksen lämmön ja kosteudensiirtoa. Siinä on käytössä monen paikan säätiedot sekä laaja materiaalikirjasto.

Työssä tutkittiin sandwich-elementtirakenteisen seinän kosteusteknistä toimintaa WUFI-ohjelmalla. Ohjelman rajoituksista johtuen rakenteet mallinnettiin ja tutkittiin tuuletumattomina. Kosteusteknisesti tällainen rakenne on huonompi, koska oikeasti rakenteessa olevien tuuletusurien kautta rakenteeseen joutunut kosteus pääsee kuivumaan. Tämä tarkoittaa sitä, että tulokset ovat varmalla puolella. Jos rakenne toimii näin, kun se on niin sanotusti huonompi kuin todellinen, se toimii myös todellisuudessa.

6.1 Tutkitut rakenteet

WUFI:lla tutkittiin sandwich-elementtirakennetta neljällä eri eristepaksuudella. Otettiin samat neljä eri eristepaksuutta, joilla päästiin COMSOL-ohjelmalla eri U-arvoihin. Sisä- ja ulkopinnan betonin paksuus säilyi kaikissa samana eli sisäpinnan paksuus 150 mm ja ulkopinnan 70 mm. Kaikissa tapauksissa pidettiin myös betonin ominaisuus samana eli käytettiin betonia w/c 0,5, joka on suoraan WUFI:n materiaalikirjastosta. Myös mineraalivillan ominaisuus pidettiin samana kaikissa tapauksissa eli se otettiin suoraan materiaalikirjastosta, ainoastaan paksuus vaihteli.

Komponentin muut ominaisuudet eli ilmansuunta, pinnan siirtokertoimet ja alkuolosuhteet säilytettiin myös samana joka tapauksessa. Ilmansuuntana oli etelä, pinnan lämmönvastukset olivat ulkopinnalle $0.0588 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja sisäpinnalle $0.125 \text{ m}^2\text{K/W}$, jotka ohjelma määrittelee suoraan, kun valitaan että rakenne on ulkoseinä. Alkuolosuhteiksi valittiin alkutilanteen suhteelliseksi kosteudeksi 80 % ja komponentin lämpötilaksi 20 astetta. Laskentajaksoksi määriteltiin 3 vuotta ja ilmastoksi valittiin Espoon säätiedosto.

6.2 Tulokset

Tuloksista voidaan havaita, että villaeristeiden paksuuden kasvattaminen ei juuri muuta rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä. Tämä johtuu esimerkiksi siitä, että eriste on mineraalivillaa, joka päästää kosteutta kulkemaan läpi. Koska mallit eivät ole tuulettuvia, kuten ne käytännössä ovat, antavat rakennemallit niin sanotusti huonomman tilan-

teen kosteuskäyttäytymisen osalta. Koska tuloksena saatiin, että rakenne toimii vaikka siinä ei ole ilmauria, se toimii silloin myös käytännössä. Ilmaurien kautta rakenteeseen imeytynyt kosteus pääsee pois, eikä kerry aiheuttaen rakenteessa vahinkoa.

Tulokset on esitelty myös liitteessä 2. Niistä löytyy jokaisen mallirakenteen suhteellisen kosteuden käyrä sekä lämpötila, joka sillä hetkellä vallitsee. Mittapiste on rakenteen sisemmän betonikuoren ja eristeen rajapinnassa. Näitä käyriä vertailemalla voidaan havaita, että suhteellinen kosteus pysyy hyvin lähellä samoja lukemia, vaikka eristepaksuus kasvaa.

7 Lopputulokset

Työssä tutkittiin sandwich-elementin rakennusfysikaalisia ominaisuuksia. Lähinnä keskityttiin vertailemaan eristepaksuuden vaikutusta U-arvoon ja lisäksi tutkittiin parvekkeen liitosta.

Tuloksista voidaan sanoa, että suurin vaikutus U-arvoon on eristepaksuudella. Eristepaksuutta kasvattamalla päästään parempiin U-arvoihin. Muita vaikutuksia U-arvoon on myös ainekerroksen lämmönjohtavuudella ja kylmäsilloilla.

COMSOL Multiphysics -ohjelmalla tutkituista sandwich-elementtirakenteista saatiin parempia tuloksia kuin mitä tällä hetkellä yleisesti käytössä oleville rakenteille on annettu. Sandwich-elementin, jossa on eristettä 240 mm, U-arvoksi COMSOLilla saatiin $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Esimerkiksi VTT on tarkistanut tällaisen rakenteen U-arvoksi $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Tuloksissa voi olla eroa juuri tuuletusurien takia. Tässä työssä mallirakenteissa tuuletusurat otettiin huomioon vain ilman lämmönjohtavuuden avulla, kun käytännössä niissä virtaava ilma huonontaa U-arvoa.

COMSOL Multiphysics -ohjelman käyttö tutkittaessa rakenteita on hyvä apuväline. Sillä saadaan aikaan tarkkoja rakennemalleja, joilla päästään vertailukelpoisiin lopputuloksiin. Kuitenkin ohjelman käyttäjän on oltava hyvin tietoinen rakenteen oikeasta fysikaalisesta käyttäytymisestä ja tiedostettava, mitä mikäkin ohjelman funktio tekee. Ei riitä, että piirtää rakenteen, määrittelee sille oikeat lämmönjohtavuudet ja pintavastukset ja painaa kuvaketta. On tiedettävä, miten ohjelma laskee ja minkä mukaan se laskee.

Esimerkiksi, laskeeko ohjelma pinta-alan vai pituuden suhteen. Tässä kohtaa käyttäjän on itse määritettävä, mitä tehdään ja jos ei ole tarpeeksi tietoa, saadaan vääriä tuloksia.

Työssä tärkeintä oli tuottaa mallirakenteet, joiden U-arvoja voidaan verrata yleisesti käytössä oleviin samanlaisen rakenteen U-arvoihin. Nämä yleisesti käytössä olevat U-arvot ovat joko käsin laskettu tai osittain käsin ja osittain jollakin ohjelmalla tuotettuja tuloksia. Lisäksi tärkeää oli oppia käyttämään COMSOL Multiphysics -ohjelmaa ja tehdä siitä lyhyt käyttöohje Optiplan Oy:lle.

Rakennusfysiikka on yksi tulevaisuuden aloista. Rakennusfysiikan tuntemusta tullaan tarvitsemaan, kun määräyksiä kiristetään ja rakenteita tullaan tekemään uusien määräysten mukaan. Tällöin on hyvin tärkeää tiedostaa, miten rakenne toimii ja kuinka siitä saadaan edelleen hyvä ja kestävä kokonaisuus.

Tulevaisuudessa voisi COMSOL Multiphysics -ohjelma olla suuremmassakin määrin rakennesuunnittelijan työvälineenä. Sillä voi tutkia monimuotoisempia rakenteita ja niiden fysikaalisia ominaisuuksia. Kun ohjelmaa osaa käyttää ja ymmärtää mitä se tekee, saadaan aikaan tarkkoja mallirakenteita, jolloin niitä voidaan tarkemmin myös tutkia.

Lähteet

- 1 Suvanto Kari, Tekniikan fysiikka 1, 2005, Edita Publishing Oy, Helsinki
- 2 Siikanen Unto, Rakennusfysiikka perusteet ja sovellukset, 1996, Rakennustieto Oy, Helsinki
- 3 Rakentamismääräyskokoelma, C3 (2010), [verkkodokumentti], <http://www.finlex.fi/data/normit/34163-C3-2010_suomi_221208.pdf>, luettu 17.10.2010
- 4 Rakennustuoteteollisuus RTT ry, Uudet betonijulkisivurakenteet, 1998, Suomen Betonitieto Oy, Jyväskylä
- 5 Betoniteollisuus ry, [verkkodokumentti], <http://www.betoni.com/iloa_opetukseen/default.asp?paa=13&ala1=50>, luettu 17.10.2010
- 6 RT-kortisto, RT-80-10974
- 7 Suomen betoniyhdistys, Betonitekniikan oppikirja BY201, 2004, Suomen betonitieto Oy, Jyväskylä
- 8 Rakentamismääräyskokoelma, C4 (2003), [verkkodokumentti], <<http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>>, luettu 17.10.2010
- 9 Schöck, Innovatiiviset Rakenneratkaisut, [verkkodokumentti], <<http://www.schoeck.fi/fi/tuotteet/laempoeeristys-2>>, luettu 23.12.2010
- 10 kuva1: Beodom, [verkkodokumentti], <<http://www.beodom.com/en/education/entries/principles-of-thermal-insulation-heat-transfer-via-conduction-convection-and-radiation>>, luettu 21.12.2010
- 11 kuva2: Kestävä Kivitalo, [verkkodokumentti], <<http://www.kivitalo.fi/Kosteudenhallinta/kosteudenhallinta-suunnittelussa.html>>, luettu 21.12.2010
- 12 Rakentamismääräyskokoelma, C4 (2012), [verkkodokumentti], <<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=121173&lan=fi>>, luettu 17.2.2011
- 13 Rakentamismääräyskokoelma D3 (2012), [verkkodokumentti], <<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=121170&lan=fi>>, luettu 17.2.2011
- 14 Kuva5: Peikko Group, [verkkodokumentti], <<http://trinity.siteadmin.fi/File.aspx?id=560416&ext=pdf&routing=419671&webid=...?ref=Guzels.TV>>, luettu 18.2.2011

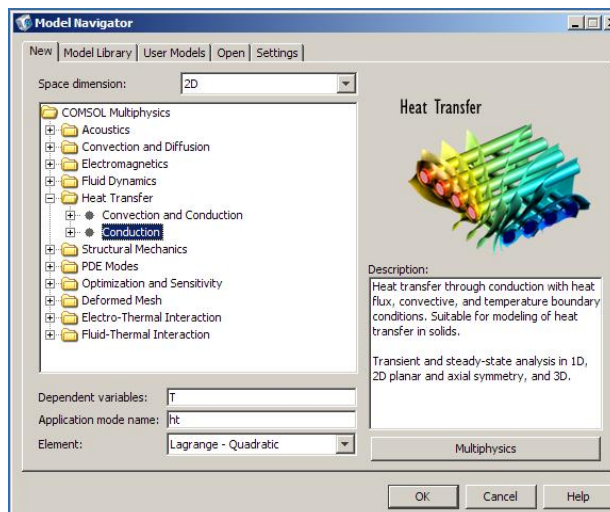
- 15 Kuva6: elementtisuunnittelu.fi, [verkkodokumentti],
<<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/julkisivujarjestelmat/sandwichjulkisivut>>, luettu 18.2.2011
- 16 Betoniteollisuus ry, [verkkodokumentti],
<<http://www.betoni.com/fi/Elementtirakentaminen/Historia/>>, luettu 4.10.2010
- 17 Rakennusfysiikan simuloinnit -kurssin aineisto
- 18 Kuva 5: Tiivistalo.fi, [verkkodokumentti],
<<http://www.tiivistalo.fi/tiedostot/default.asp?sivu=kosteusvauriot%20ja%20niiden%20torjuminen&otsikko=1.4%20konvektio&tunnus=332>>, luettu 18.4.2011

COMSOL 3.5a: käyttöohje

Tämä käyttöohje on tarkoitettu lähinnä Heat Transfer -modulia käytettäessä. Tässä on kerrottu, kuinka ohjelmalla luodaan malli ja mitä siihen pitää määrittää. Lopuksi kerrotaan mitä tällä modulilla voi mallista tarkastella. Tärkein seikka on U-arvon laskenta, jonka pystyy tämän ohjeen mukaan suorittamaan rakenteelle.

Tutkittaessa COMSOL-ohjelmalla lämmön siirtymistä rakenteessa käytetään siitä Heat Transfer -modulia.

1. Avaa COMSOL 3.5a ja valitse Applications mode -valikosta COMSOL Multiphysics ja sieltä Heat Transfer. Alavalikosta tulee vielä kaksi vaihtoehtoa, joista valitaan Conduction.

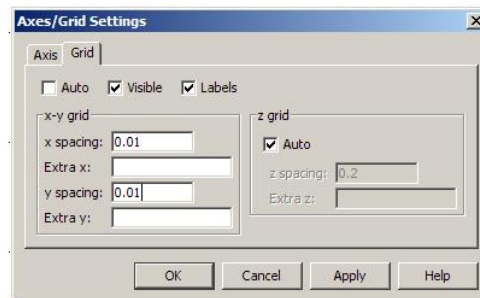


2. Seuraavaksi voit piirtää rakenteen käyttämällä vasemmassa yläkulmassa olevia piirtotyökaluja.

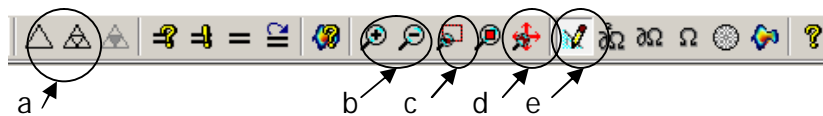


- a. Voit muuttaa Grid- ja Axes-arvoja Options-välilehdellä. (Options->Axes/Grid Settings) Oletusarvoisesti Grid-asetus on Auto 0,2 m ruudu-

kolla. Muuttaaksesi tätä tulee valinta kohdasta Auto ottaa pois ja kirjoittaa tarvittavat arvot.



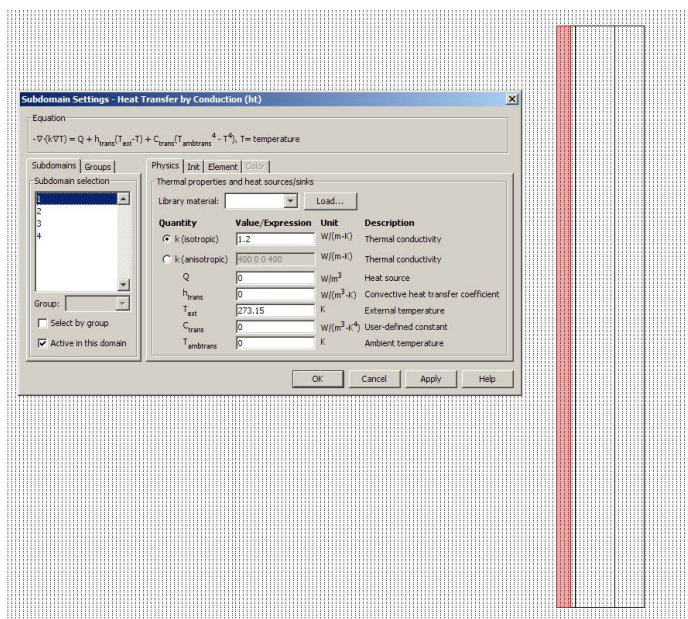
3. Muita hyödyllisiä toimintoja



- a) Verkon / hilan luominen malliin. Oikeanpuoleinen tihentää hilaa eli malli saadaan ratkaistua tarkemmin. Jos hilasta tulee liian tiheä, sitä voi väljentää vasemmanpuoleisella nappulalla. Hila on liian tiheä silloin, kun koneen kapasiteetti ei riitä mallirakenteen ratkaisuun. Hila laitetaan juuri ennen ratkaisua, kun rakenne on muuten valmis.
- b) Lähentäjä ja loitontaja -kuvakkeet.
- c) Lähentää rajatun alueen.
- d) Loitontaa siten, että koko rakennemalli tulee näkyviin.
- e) Mallin ratkaisun jälkeen tästä pääsee takaisin piirtotilaan.

4. Kun rakenne on piirretty, annetaan jokaiselle rakenteen osalle lämmönjohtavuudet.

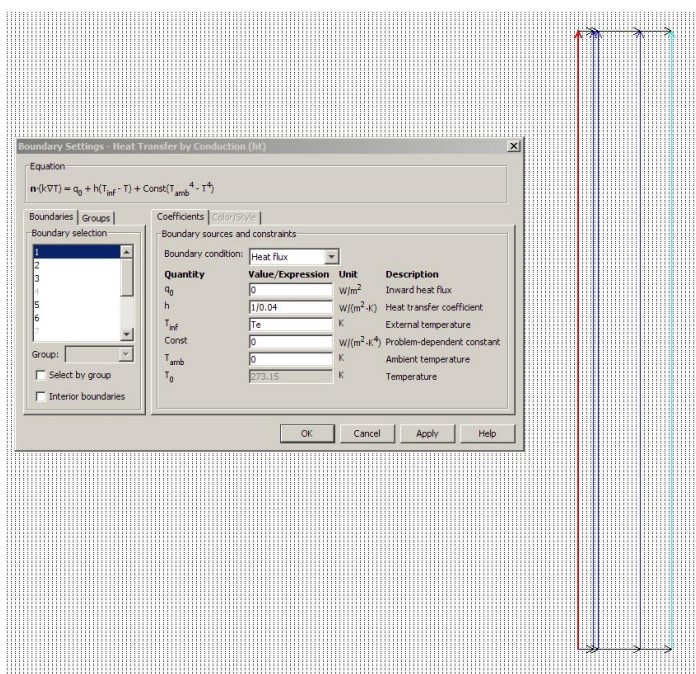
- a. Mene kohtaan Physics-> Subdomain settings, josta avautuu seuraava näkymä.



b. Laita λ -arvot kohtaan k(isotropic). Laita arvot jokaiselle rakenteen osalle ja paina lopuksi OK.

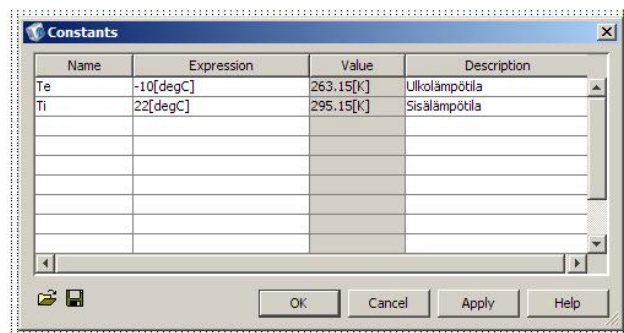
5. Lisäksi annetaan rakenteelle ulkopuolinen ja sisäpuolinen pinnanvastus sekä määrätään ulko- ja sisälämpötila.

a. Mene kohtaan Physics-> Boundary settings, josta avautuu seuraava näkymä.

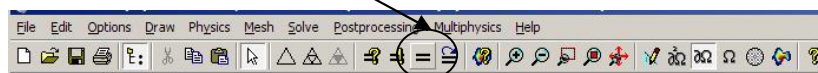


b. Jokaiselle rajapinnalle, joka on kosketuksissa ilman kanssa, tulee laittaa pinnan lämmönvastus.

- c. Valitse rajapinta, valitse sen jälkeen Boundary condition kohdasta Heat flux.
- d. Laita esim. ulkopuolinen pinnan vastus kohtaan h. Ohjelma vaatii sen muodossa 1/0.04.
- e. Kirjoita lisäksi ulkolämpötila kohtaan T_{inf} tai laita tähän vain tunnus esim. T_e .
 - i. T_e voidaan erikseen määritellä kohdassa Options -> Constants.. Tässä taulukon ensimmäiseen sarakkeeseen tulee tunnus, toiseen arvo, esim. lämpötila. Jos ilmaiset lämpötilan celsiusina, laita lämpötilan perään hakasuluissa degC.



- ii. Description-kohdassa voi kertoa, mikä suure on kyseessä.
6. Kun arvot on saatu kohdilleen, voidaan malli ajaa läpi eli ratkaista.
 7. Paina Solve- kuvaketta.



Mallin pohjalta tehtävät tarkastelut

Mallista voidaan tarkastella erilaisia asioita. Yleisin on lämmön siirtyminen, jonka ohjelma antaa heti, kun malli on ratkaistu. *Postprocessing*-kohdasta *Plot parameters* voidaan valita mitä mallista halutaan tarkastella. *Subdomain* antaa näyttää lämmönjakautumisen ilman näkyviä rajoja. Siinä lämpötila eri osissa erottuu eri värein. *Arrow* kuvaa nuolilla lämmönsiirtymisen suuntaa. Sen omalla välilehdellä voidaan antaa nuolille väri ja kuinka tiheästi nuolia näkyy kuvassa.

Draw Line for Cross section Line Plot -työkalulla voit piirtää viivan esimerkiksi ulkopintaan, jolloin ohjelma antaa ulkopinnan lämpötilan kuvaajan viivan kohdasta.

U-arvon saaminen ulos mallista

Postprocessing valikon *boundary integration* kohdasta voi tietyn rajapinnan normaalin lämmönjohtavuuden saada integroitua. Valitaan rajapinta, jonka jälkeen valitaan *pre-defined quantities* kohdasta *normal heat flux*. Tämän jälkeen ohjelma antaa expression kohtaan *nflux_ht*, joka pitää jakaa vielä pinnan pituudella, jotta saataisiin yksikön suuruinen arvo rakenteen lämmönjohtavuudelle. Lämmönjohtavuus jaettuna rakenteen eri puolilla vallitsevilla lämpötilojen erolla, saadaan tulokseksi rakenteen U-arvo. Jos mallista on tehty 3D-malli, täytyy *nflux_ht* jakaa pinta-alalla. Esimerkiksi jos seinämän pinta-ala on mallissa 20 m^2 , merkitään se näin: *nflux_ht/20[m]*.

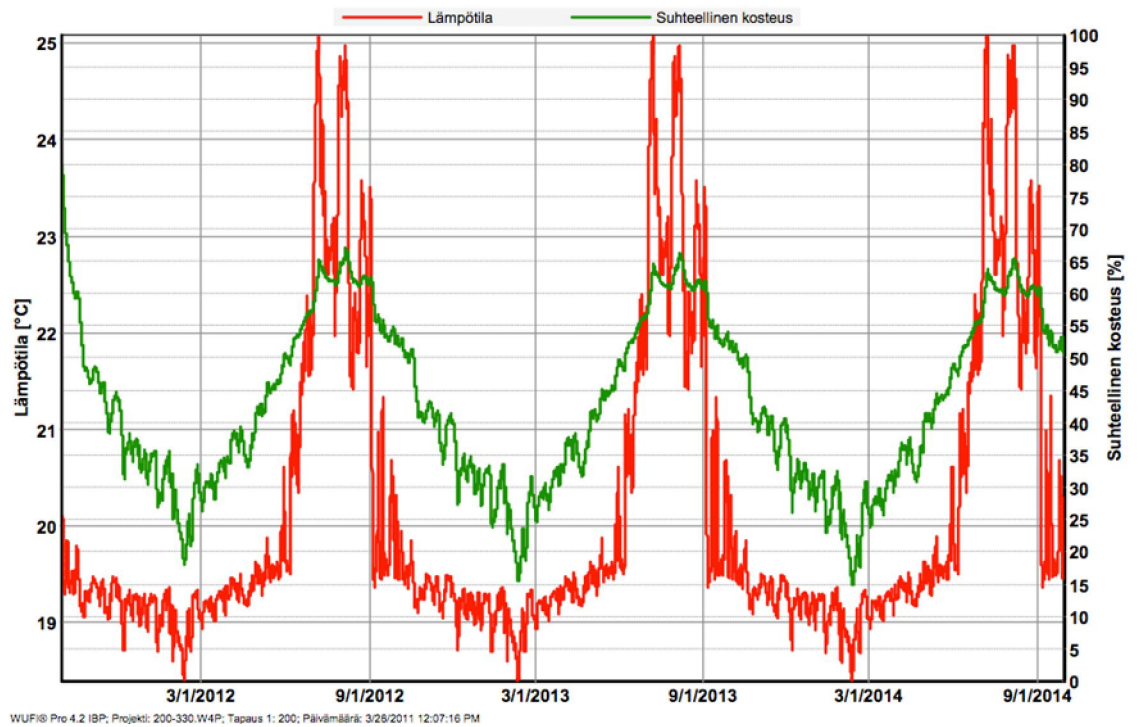
2D-mallista 3D-malli

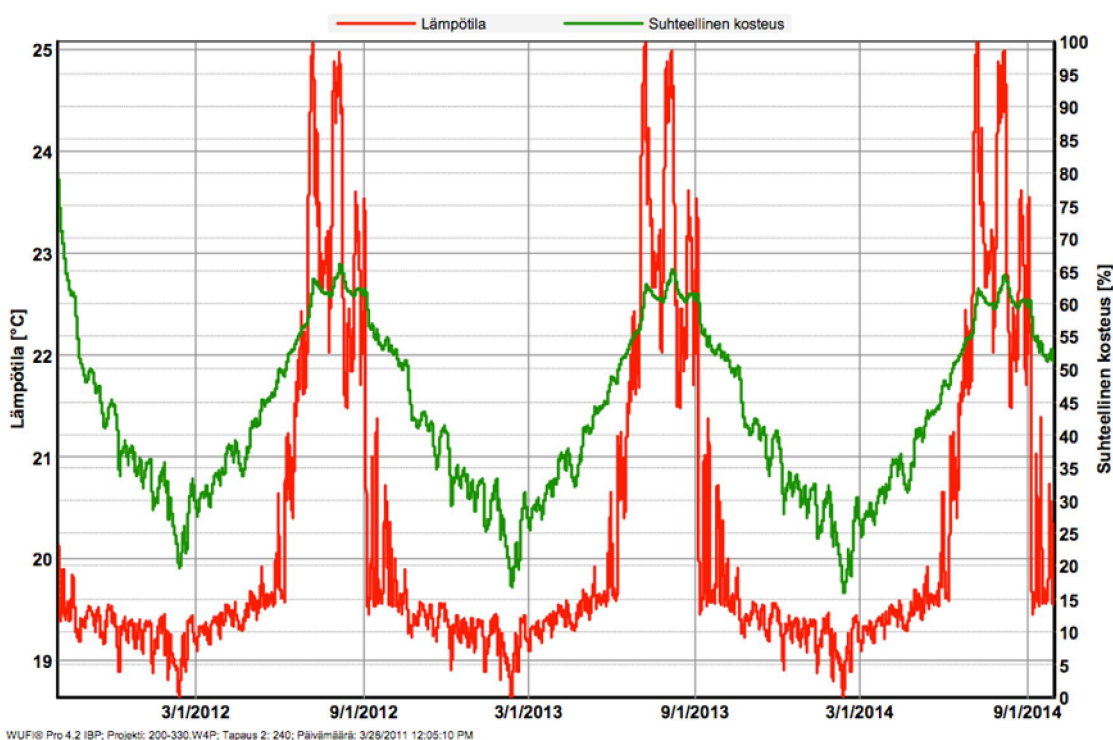
3D-mallin luominen 2D-mallista ei ole aivan yksinkertaista, jos rakenne on monimuotoinen. COMSOLilla on parikin eri tapaa tehdä tuo 3D-malli ja kokeilun kautta löydettiin ehkä selkein, helpoin ja kätevin tapa. 2D-mallista luodaan ensin 3D-malli pelkistä sandwich-elementin betoni- ja eristeosista. Tässä ei oteta vielä ilmarakoja eikä ansaita huomioon.

Tämän jälkeen otetaan tietty työtaso 3D-mallissa, johon halutaan esimerkiksi ansaat sijoittaa. Se valitaan Draw-valikon Work-Plane settings valinnalla. Tästä valitaan oikea työtaso johon halutaan kyseinen asia asettaa ja työtasolle oikea kohta. Tämän jälkeen ohjelma avaa suoraan oikeasta kohdasta 2D-näkymän, johon mallin voi tässä vaiheessa vielä piirtää tai jos rakenteen on piirtänyt jo valmiiksi, valitaan haluttu rakenne ja *extrude*-komennolla "pursotetaan" rakenne oikean kokoiseksi syvyysuunnassa. Samalla periaatteella muutetaan ilmaraot 2D-mallista 3D-muotoon ja näin saadaan mallista järkevän kokoinen, eikä 3D-mallissa tule silloin niin paljon eri osia, joille määritykset on tehtävä.

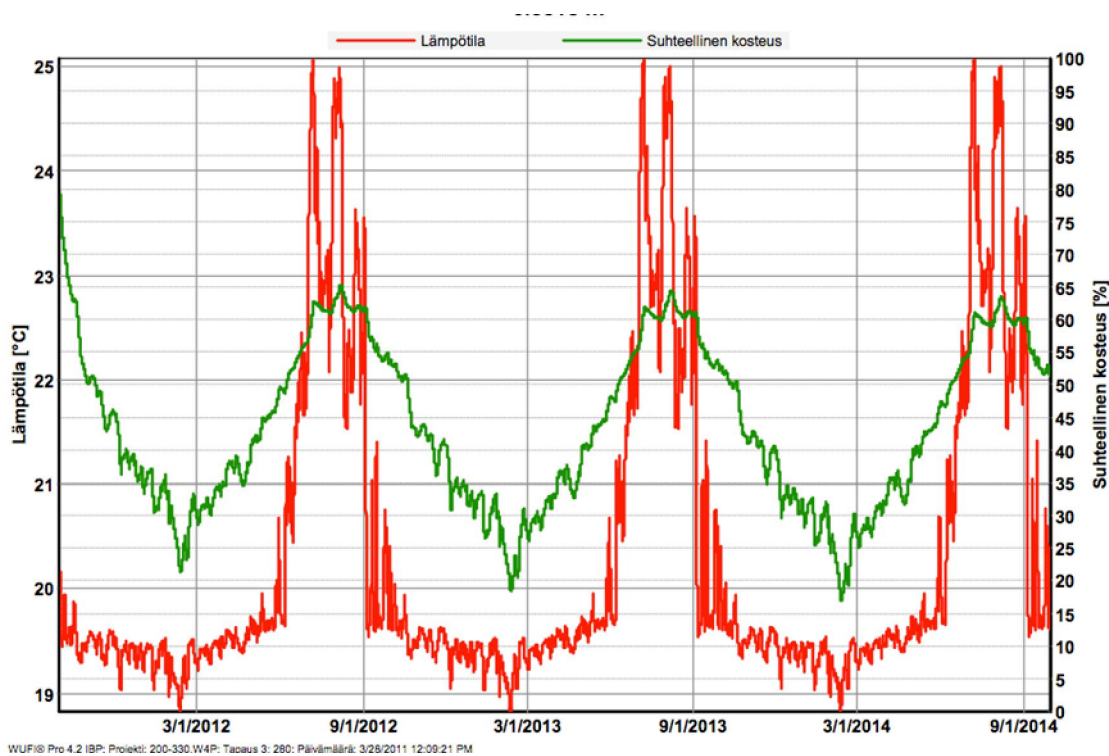
WUFI-ohjelmalla tuotetut rakenteiden kosteuskäyrät

Ensimmäisessä kuvaajassa on rakennemalli, jossa on 200 mm eristettä. Mittauspiste on kaikissa kuvaajissa samassa kohdassa eli sisäkuoren ja eristeen rajapinnassa.





Ylemmässä kuvaajassa on rakennemalli, jonka eristepaksuus on 240 mm ja alemmassa eristepaksuus on 280 mm.



Viimeisessä kuvaajassa on rakennemalli, jonka eristepaksuus on 330 mm.

