



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Santeri Tammi

Tietomallipohjaisen suunnittelun hyödyntäminen rakennusfysikaalisessa mallintamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

21.04.2020

Tekijä(t) Otsikko	Santeri Tammi Tietomallipohjaisen suunnittelun rakennusfysikaaliset tarkastelut
Sivumäärä Aika	38 sivua 21.4.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Osastopäällikkö Kim Vikki Projektipäällikkö, Klaus Viljanen Lehtori Jouni Ruotsalainen
<p>Insinööriyön tavoitteena oli selvittää, kuinka olemassa olevaa rakennesuunnittelun tietomallia voidaan hyödyntää laskentageometrian luomisessa rakennusfysikaalista mallintamista tehtäessä. Osa rakennusfysikaalisten ilmiöiden mallinnoista joudutaan toteuttamaan kolmiulotteisena simulointina, jolloin geometrian luominen on huomattava osa simulointiprosessia. Työn lopputuotteena haluttiin toimintaohje geometrian siirrolle valmiista tietomallista simulointiohjelmaan.</p> <p>Työn tavoitetta lähestyttiin jakamalla tutkimus kolmeen osa-alueeseen, joissa selvitettiin eroavatko siirretyllä ja simulointiohjelmassa luodulla geometrialla tehtyjen rakennusfysikaalisten simulointien tulokset keskenään, kuinka valmiista tietomallista geometrian siirto simulointiohjelmaan onnistuisi ilman suurempia ongelmia ja kuinka IFC-tiedoston sisältämä geometria siirretään simulointiohjelmaan. Työssä otettiin myös kantaa em. tapauksissa syntyviin ongelmiin.</p> <p>Jotta työn tavoitteeseen päästiin, tuli työntekijän opetella käyttämään kahta ennalta tuntematonta tietokoneohjelmaa Autodesk Revittiä ja Comsol Multiphysicsiä. Ohjelmien käyttöä harjoiteltiin insinööriyön sisältämän opiskelun lisäksi pienen projektin ja yrityksen sisäisen suunnittelua tukevan rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun yhteydessä.</p>	
Avainsanat	Rakennusfysiikka, tietomallit, Comsol Multiphysics, Autodesk Revit

Author Title	Santeri Tammi Physical Simulations of BIM Based Design
Number of Pages Date	38 pages 21.04.2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Department Manager, Kim Vikki Project Manager, Klaus Viljanen Senior Lecturer, Jouni Ruotsalainen
<p>The aim of this thesis was to investigate how an existing structural engineering BIM model can be used to create geometry for computational modelling of building physics. Some of the computational models of building physics phenomena has to be implemented as three-dimensional simulation and creating geometry is a significant part of the simulation process. The final product of the thesis was a procedure for transferring geometry from an existing BIM model to a simulation program.</p> <p>The aim of the thesis was approached by dividing the research into three sections, which investigated whether the results of building physics simulations performed with the transferred geometry and those created in the simulation program differ, how to transfer the geometry to the simulation program from an existing BIM model most easily and how to transfer the geometry contained in the IFC file to the simulation program. The paper also commented on the problems arising in the above cases.</p> <p>To achieve the goal of this work, the author of the thesis had to learn how to use two previously unfamiliar computer programs, Autodesk Revit and Comsol Multiphysics. In addition to this thesis, the programs were practiced in the context of a small project and an in-house calculation analysis of a building physics to support structural designing.</p>	
Keywords	Building physics, Building information models, Comsol Multiphysics, Autodesk Revit

Sisällys

1. Johdanto	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet	1
1.3 Työn rajaukset	2
2. Tietomallintaminen	3
2.1 Tietomallintaminen yleisesti	3
2.2 Yleiset tietomallivaatimukset	3
2.3 Tietomallintaminen Autodesk Revit ohjelmalla	5
3. Rakennusfysikaalinen mallintaminen	7
3.1 Lämmön ja kosteuden siirtymistavat	8
3.1.1 Lämmön johtuminen	8
3.1.2 Lämpösäteily	9
3.1.3 Konvektio	10
3.1.4 Vesihöyryn Diffuusio	11
3.1.5 Kapillaarinen siirtyminen	12
3.1.6 Kosteuskonvektio	14
3.1.7 Painovoimainen siirtyminen	15
3.2 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet	15
3.3 Materiaaliominaisuudet	18
4. Rakennusfysikaalinen mallintaminen Comsol Multiphysics ohjelmalla	19
4.1 Comsolin liitântä tuotteet	21
5. Geometrian luonti vs. geometrian siirto	22
5.1 Laskentatarkastelu siirretyllä- ja Comsolissa luodulla geometrialla	24
6. Geometrian siirto olemassa olevasta rakennesuunnittelun tietomallista	27
6.1 Laskentatarkastelu olemassa olevalla tietomallilla	28
7. IFC-tiedoston hyödyntäminen laskentageometrian luomisessa	30
8. Johtopäätös	33
9. Yhteenveto	35
Lähteet	37

Lyhenteet

<i>adheesio</i>	kahden eri aineen molekyylien välinen vetovoima
<i>IFC-tiedosto</i>	Industry Foundation Classes File, rakennusalalla standardin ISO/PAS 16739 mukainen tiedostomuoto oliopohjaisen tiedon siirtoon tietokonejärjestelmästä toiseen.
<i>isoterminen pinta</i>	pinta, jonka alalla lämpötila on vakio
<i>kineettinen energia</i>	liike-energia
<i>koheesio</i>	aineen sisäinen, molekyylien välillä vallitseva koossa pitävä voima
<i>musta kappale</i>	ideaalinen kappale, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn eikä heijasta sitä lainkaan
<i>stationääritila</i>	ajasta riippumaton tila, jolloin lämpötilat ja aineiden pitoisuudet ovat tasapainotilassa, eivätkä muutu ajan kuluessa

1. Johdanto

1.1 Tausta

Tämä insinööriö toteutetaan Ramboll Finland Oy:n tilauksesta korjausrakentaminen- ja tutkimukset yksikölle. Rambollilla rakentamisen tietomallintaminen on vallitseva toimintatapa rakennesuunnitteluprojekteissa lukuun ottamatta pienimpiä korjausrakentamisen kohteita. Tietomallintamisen Pääasiallisina työkaluina ovat Autodesk Revit ja Tekla structures. Rakenteiden kosteusteknisen suunnittelun yhtenä apuvälineenä toimii rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu. Laskentatarkastelun tarve korostuu, kun suunnitellaan rakenteita, jotka eroavat tunnetusta esim. materiaalivalintojen, käyttöolosuhteiden tai materiaaliyhdistelmien osalta. Ramboll Finland Oy:n työkaluina rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa toimivat Comsol Multiphysics ja Wufi simulointiohjelmistot. Rakennusfysikaalisia ilmiöitä voidaan mallintaa yksi-, kaksi- ja kolmiulotteisin mallein. Useasti kuitenkin mallinnettavien rakenteiden monimuotoisuuden vuoksi ilmiöitä on mallinnettava kolmiulotteisena tapahtumana, jolloin geometrian luominen on huomattava osa mallinnusprosessia. Yrityksessä huomattiin tarve kehitykselle, joka valjastaisi tietomallipohjaisen suunnittelun hyötyjä myös rakennusfysikaalisen suunnittelun pariin. Ja niin syntyi tämän insinööriöyön aihe.

1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on tutkia, voidaanko valmista tietomallia hyödyntää rakennusfysikaalisessa mallintamisessa laskentageometrian osalta, jolloin voitaisiin vähentää simulointiprosessiin kuluva aikaa geometrian luomisen osalta. Työssä tehtävät tarkastelut jakautuvat kolmeen seuraavaan geometrian siirtämistä tietomallista simulointiohjelmistoon käsittelevään osa-alueeseen.

Ensimmäisenä tavoitteena on selvittää yksinkertaisen rakenteen avulla vaikuttaako tietomallista siirretyn geometrian käyttö laskennassa tuloksiin. Tutkimusongelmaa lähestytään mallintamalla yksinkertainen rakenne Revitissä ja siirtämällä tämä Comsoliin. Vastaava kappale mallinnetaan myös Comsolin geometriatyökalulla. Molemmilla malleilla, Revitistä siirretyllä kuin Comsolissa luodulla simuloidaan lämmön ja kosteuden siirtymistä. Saatuja laskentatuloksia verrataan keskenään, jotta voidaan pois sulkea Revitistä tuodun geometrian virheellisyydestä johtuvat erot laskentatuloksissa.

Toisena tavoitteena on selvittää, voidaanko olemassa olevasta tietomallista siirtää las-
kentageometria Comsoliin ja simuloida sillä rakennusfysikaalisia ilmiöitä. Samalla poh-
ditaan, minkälaisia ongelmia prosessin yhteydessä syntyy. Tutkimus toteutetaan siirtä-
mällä olemassa olevasta rakennesuunnittelun tietomallista geometria Comsoliin ja simu-
loimalla lämmön siirtymistä. Tutkimuksen yhteydessä pohditaan myös kuinka olevan
mallin mallinnustarkkuus vaikuttaa rakennusfysikaalisen mallintamisen prosessiin.

Kolmantena tavoitteena on selvittää, kuinka IFC-tiedostomuodossa oleva geometria
saadaan siirrettyä Comsoliin, sekä kartoittaa prosessissa syntyviä ongelmia. Tutkimus-
ongelmaa lähestytään avaamalla IFC-tiedosto Revitillä kuin myös linkittämällä samainen
tiedosto. Molemmissa tapauksessa tietomalli pyritään synkronoimaan Comsolin kanssa.
Kolmannessa tapauksessa ei suoriteta simulointia vaan pyritään vain siirtämään geo-
metria.

Työn lopputuotteena tulee koostaa ohje, joka kuvaa kuinka valmiista tietomallista voi-
daan siirtää geometria simulointiohjelmistoon rakennusfysikaalista mallintamista varten.

1.3 Työn rajaukset

Työ rajataan niin, että käsitellään tietomallin geometrian hyödyntämistä rakennusfysi-
kaalisessa mallintamisessa. Työssä käytettävät ja tarkastelun kohteena olevat tietomallit
ovat rakennesuunnittelun tietomalleja. Muiden tekniikan alojen tietomalleja ei tässä
työssä tarkastella. Käytettävien ohjelmien osalta työ rajataan Revitin ja Comsol Multiphy-
sicsin käyttöön. Työssä tehdyt rakennusfysikaaliset tarkastelut rajoittuvat lämmön ja kos-
teuden siirtymiseen.

2. Tietomallintaminen

2.1 Tietomallintaminen yleisesti

Tietomallintamisesta puhuttaessa kuullaan usein käytettävän termiä BIM, joka on lyhenne sanoista building information modeling. Kyseinen määritelmä pohjautuu 2000-luvulla yleistyneeseen tapaan toteuttaa rakennuksen suunnittelu, jolloin rakennuksesta luodaan tarkka digitaalinen kopio. BIM termissä I (information) kuvastaa tapaa sisällyttää tietoa luodun mallin rakenneosille, osien muodon, mittojen ja sijainnin lisäksi. Mahdollista rakenneosien tietosisältöä ovat esim. valmistaja, rakennusmateriaali, lujuusominaisuudet ja U-arvo. [1, s. 2.] BIM määritelmän alle eivät kuitenkaan lukeudu 3D-mallit, joilla ei ole tietosisältöä. [2, s. 19.]

Tietomallipohjaisen suunnittelun tavoitteena on parantaa suunnittelun ja rakentamisen laatua, tehokkuutta sekä turvallisuutta. Näitä tavoitteita lähestytään perinteiseen viiva-
piirtämiseen verrattaessa esim. objektien tietosisältönä, määrälaskentana, sekä työmaan hallintana. Työmaan aikataulut ja ohjaus voidaan toteuttaa mallin avulla. Käytettävien nostolaitteiden sijainnit ja nostoalueet voidaan suunnitella, sekä muiden työko-
neiden ohjaus suorittaa mallin avulla. Myös eri suunnittelualojen yhdistäminen on tietomallin avulla mutkattomampaa. Mallit voidaan yhdistää yhdistelmämalliksi, ja suorittaa sillä törmäystarkastelut, jolloin havaitaan mallien väliset ristiriidat ajoissa. [3.]

2.2 Yleiset tietomallivaatimukset

Yleiset tietomallivaatimukset 2012 ovat 14-osainen julkaisusarja, jossa esitetään tietomallinnuksen ja mallien tietosisällön vähimmäisvaatimukset. Vähimmäisvaatimukset on tarkoitettu käytettäväksi kaikissa hankkeissa, joissa niitä halutaan käyttää. Sarja koostuu dokumenteista:

1. Yleinen osuus
2. Lähtötilanteen mallinnus
3. Arkkitehtisuunnittelu
4. Talotekninen suunnittelu
5. Rakennesuunnittelu

6. Laadunvarmistus
7. Määrälaskenta
8. Mallien käyttö havainnollistamisessa
9. Mallien käyttö talotekniikan analyyseissä
10. Energia-analyysit
11. Tietomallipohjaisen projektin johtaminen
12. Tietomallien hyödyntäminen rakennuksen käytön ja ylläpidon aikana
13. Tietomallien hyödyntäminen rakentamisessa
14. Tietomallien hyödyntäminen rakennusvalvonnassa.

Projektia johtavan henkilön on hallittava tietomallivaatimukset kokonaisuutena. Kaikkien hankkeen osapuolien tulisi kuitenkin perehtyä oman alansa lisäksi yleiseen osuuteen (osa 1) ja laadunvarmistuksen periaatteisiin (osa 2). Tällöin kaikki projektin osapuolet tietävät mitä muut mallintavat. Muita saavutettavia hyötyjä ovat ennalta määritelty tietomallin tarkkuus ja tietosisältö [4.]

Käytettäviltä mallinnusohjelmistoilta vaaditaan, että julkisten hankkeiden kohdalla niiden tulee olla vähintään IFC 2x3 sertifioituja. Mallien luovuttaminen hankkeen osapuolien välillä toteutetaan IFC-muodossa kuten myös ohjelmiston omassa tiedostomuodossa. Luovutettavan mallin mukana toimitetaan tietomalliseloste, josta selviää mallin käyttötarkoitus, mallinnustavat, tarkkuusaste ja valmiusaste. [4.]

Mallinnustarkkuudesta on sovittava hankkeeseen ryhdyttäessä hankkeen eri osapuolien kesken. Tietomallin yleinen sisältö ja käyttötarkoitus huomioidaan mallinnustarkkuutta valittaessa, esim. korjausrakentamisen lähtötilannetta dokumentoidessa ei päästä samoihin tarkkuuksiin kuin uudisrakennusta mallinnettaessa. Mallinnustarkkuutta voidaan hankkeen aikana muuttaa osapuolien yhteisellä päätöksellä ja tilaajan suostumuksella. [5.]

Yleiset tietomallivaatimukset -ohjeistuksella on selkeä päivitystarve, sillä tietomallintaminen on kehittynyt huomattavasti vuodesta 2012, jolloin ohjeistus on julkaistu. BuildingSMART Finland käynnisti 2019 syksyllä päivityksen tarveselvityksen, joka toteutettiin erilaisien työpajojen ja palautekyselyjen avulla. [26.]

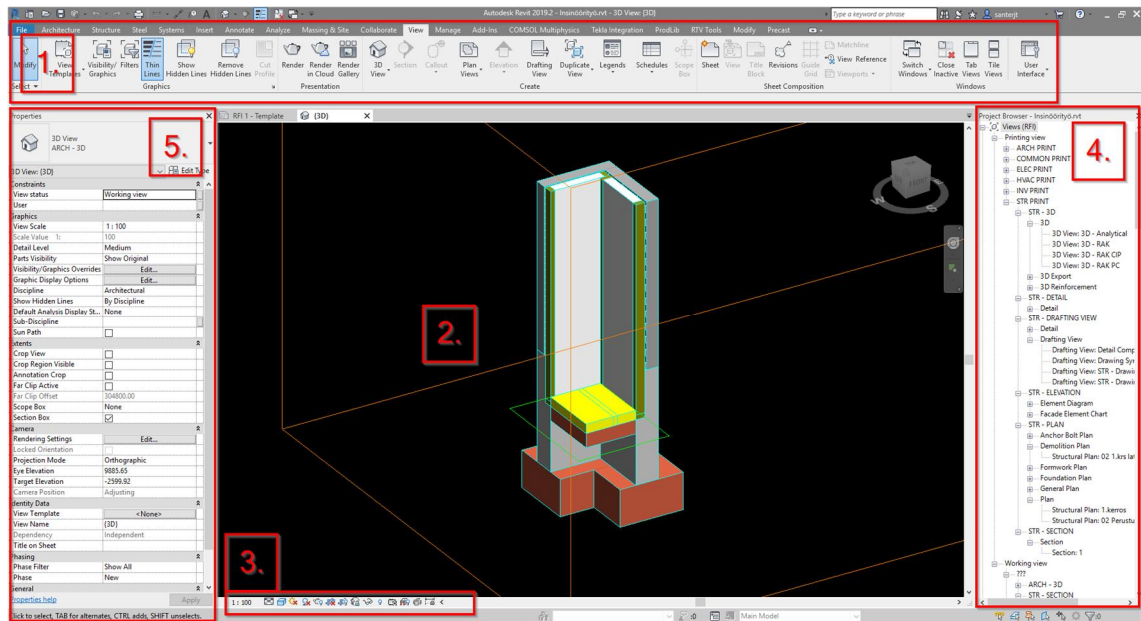
2.3 Tietomallintaminen Autodesk Revit ohjelmalla

Revit on kansainvälisen yhtiön Autodeskin tarjoama suunnittelu ja dokumentointialusta, joka tietomallintamisen avulla tukee suunnittelua, piirustusten tuottamista ja projektin aikataulutusta. Revit-mallissa jokainen näkymä (esim. piirrosarkki, 2D- ja 3D-näkymä sekä aikataulu) ovat esityksiä saman virtuaalimallin tietosisällöstä. Mallin näkymät, luettelot ja piirustukset ovat kaksisuuntaisesti assosiatiivisia, jolla tarkoitetaan, että ne ovat pelkästään ikkunoita malliin. Tämä mahdollistaa sen, että voidaan työskennellä missä tahansa näkymässä tai luettelossa ja päivittää tietomallia. Muutokset luonnollisesti näkyvät kaikissa näkymissä paitsi luonnosnäkymissä, jotka ovat ns. tietomallista erkaannutettuja näkymiä. Revit toimii rakennusprojektin eri osapuolien yhteisenä tietomallinnusalueena tarjoten valmiita tietomallinnustyökaluja rakenne-, arkkitehti- ja talotekniikkasuunnitteluun. [6.]

Revitissä näkymät jaetaan yhdeksään ryhmään, 3D-näkymä (3D view), luonnosnäkymä (Drafting view), tasonäkymä (Plan view), leikkausnäkymä (Section view), julkisivunäkymä (Elevation view), tulostusarkit (Sheets), osasuunnos (Callout), taulukkonäkymä (Schedules) ja selostenäkymä (Legends). Tässä opinnäytetyössä keskitytään siirtämään tietoa Revitistä Comsolliin vain 3D näkymillä. Tietomallin sisältö rakentuu projektipuuun, joka on jaettu seuraaviin ryhmiin: Views, Legends, Schedules, Sheets, Families, Groups ja Links. Jokaisen ryhmän alle luodaan kyseiseen ryhmään kuuluvat näkymät, esim. tasonäkymiin sijoitetaan rakennuksen kaikki tasokuvat. Kuvassa 1 on esitetty Revitin päänäkymä, joka koostuu komponenteista:

1. Suunnittelualoittain jaotellut mallinnustyökalut (päänäkymän yläreunassa)
2. Tietomallin näkymä (keskellä päänäkymää)
3. Näkymän hallintapalkki (päänäkymän alareunassa)
4. Projektiselain (päänäkymän oikeassa reunassa)

5. Ominaisuudet paletti (päänäkymän vasemmassa reunassa)



Kuvio 1. Päänäkymä, Autodesk Revit.

Revitissä mallinnettavat komponentit muodostavat ryhmiä, joille on määritelty yhteinen joukko parametreja sekä graafinen esitys. Yhden ryhmän komponenteilla voi olla erilaisia arvoja joillekin tai kaikille parametreille. Ryhmät kantavat nimeä family. Ryhmiä on ohjelmassa kolmea laatua:

- System Families
- Loadable Families
- In-Place Families.

System of Families sisältää perinteiset rakenne-elementit kuten seinät, katot ja lattiat, jotka ovat ennalta määritettyjä ohjelmiston sisäisiä elementtejä. Loadable Families pitää sisällään rakennusten valmisosaelementit kuten ikkunat, ovet, kalusteet, lämmityskattilat ja lämminvesivaraajat, jotka ostetaan perinteisesti ulkopuoliselta tavarantoimittajalta. Loadable Familyt luodaan ulkoisessa Autodesk Revit-tiedostossa, joka ladetaan projektin sisällä. In-Place Families sisältää tavanomaisista poikkeavat elementit, jotka luodaan itse projektin sisällä, kun tarvitaan yksilöllinen geometrialtaan poikkeava elementti. [7.]

3. Rakennusfysikaalinen mallintaminen

Rakennusfysikaalisella mallintamisella pyritään arvioimaan laskennallisesti rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Mallinnettavia ilmiöitä ovat lämmön-, kosteuden-, ja ilmansiirtyminen. Laskentatarkastelujen avulla pystytään optimoimaan rakenteiden toimintaa ja minimoimaan rakennusmateriaalien menekkiä, kuivumisaikoja tai energiankulutusta. Rakennusfysikaalinen laskentatarkastelu koostuu yleisesti seuraavista vaiheista:

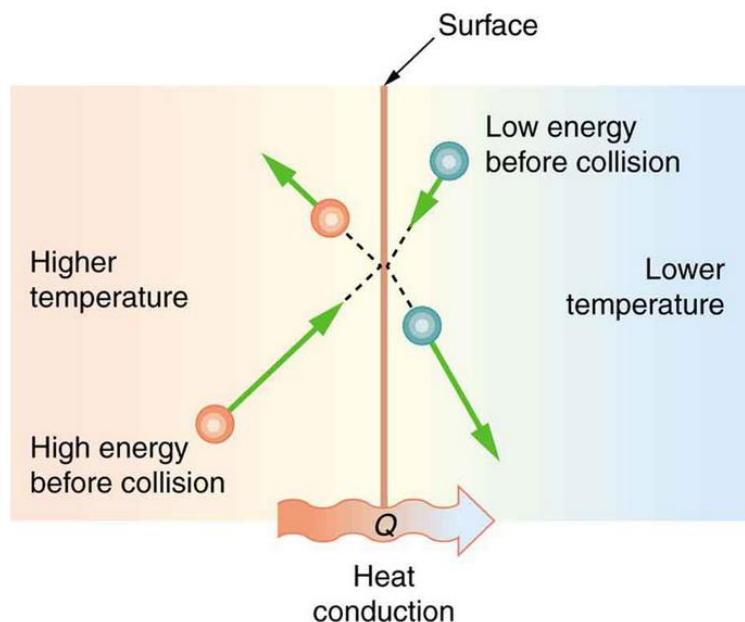
1. Määritetään laskentatehtävä ja tarkasteluperiaatteet, jolloin valitaan tarkasteltava rakenne ja mallinnettavat ilmiöt
2. Valitaan toimintakriteerit ja niihin liittyvät raja-arvot, esim. rakenteen toiminnan kannalta kriittisimmät tekijät, joita voivat olla U-arvo tai rakenteen kuivumiskyky
3. Määritetään ulko- ja sisäympäristön olosuhteet
4. Valitaan tarkasteluun sopiva laskentamenetelmä, jolloin päätetään, onko laskenta stationäärinen vai aikariippuvainen sekä valitaan laskentageometrian ulottuvuuksien määrä
5. Määritetään laskennassa tarvittavat materiaaliominaisuudet, joita voivat olla esim. lämmönjohtavuus ja vesihöyrynvastus
6. Mallinnetaan tarkasteltava rakenne tai rakennus
7. Ratkaistaan halutut suureet
8. Analysoidaan laskentatulokset. [23.]

Tässä työssä tarkastellaan Revitillä mallinnettujen rakenneosien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa stationäärisinä ja aikariippuvaisina tarkasteluina Comsol Multiphysics ohjelmalla.

3.1 Lämmön ja kosteuden siirtymistavat

3.1.1 Lämmön johtuminen

Lämmön johtuminen (konduktio) voidaan selittää molekyylien kineettisen energian siirtymisenä molekyylistä toiseen. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa lämpimästä viileämpään, jolloin määrällisesti suuren kineettisen energian omaava molekyyli törmää pienen kineettisen energian omaavaan molekyyliin luovuttaen törmäyksessä osan energiastaan. Nyt energiaa vastaanottanut molekyyli jatkaa matkaansa suuremmalla nopeudella ja luovuttanut pienemmällä kuin ennen törmäystä. [8.] Lämmön johtuminen on esitetty kuvassa 2.



Kuvio 2. Lämmön johtuminen molekyylitasolla. [9.]

Lämmön johtumista materiaalissa voidaan tarkastella käyttämällä Fourierin lakia, joka on esitetty kaavassa 1. [9.]

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (1)$$

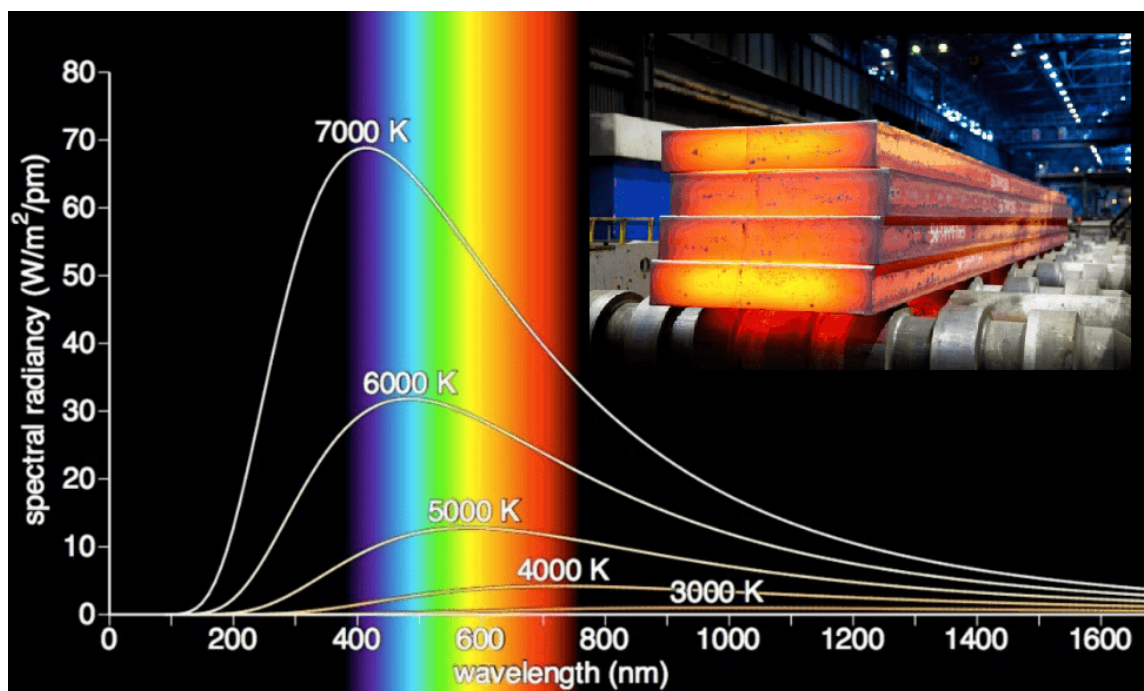
\vec{q} = paikallinen lämpövirran tiheys [W/m²]

k = väliaineen lämmönjohtavuus [W/mK]

∇T = lämpötilagradientti [K/m]

3.1.2 Lämpösäteily

Lämpösäteily on elektromagneettisen spektrin infrapuna-alueella sekä näkyvän valon alueella tapahtuvaa värähtelyä, joka syntyy materiaalin varattujen partikkelien lämpöliikkeestä. Erona muihin lämmönsiirtymismuotoihin lämpösäteily ei tarvitse väliainetta siirtyäkseen. Se on myös kaikista nopein lämmönsiirtymismuoto, sillä säteily etenee valonnopeudella. [11.] Kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nolapisteen yläpuolella emittoivat lämpösäteilyä. Aurinko emittoi enimmäkseen näkyvän valon ja infrapuna-alueen säteilyä, josta näkyvä valo on lyhytaaltoisempaa ja infrapunasäteily pitempiaaltoista. Huoneen lämpötilassa kappaleet emittoivat infrapunasäteilyä. [13.] Aallonpituuksilla on merkitystä, kun tarkastellaan rakenteita, jotka päästävät lyhytaaltoisemman säteilyn läpi mutta eivät pitempi aaltoista. Tällaisia rakenteita ovat esim. lasirakenteet. Materiaalipintojen emissiviteetistä puhuttaessa tarkoitetaan pintojen ominaisuutta vastaanottaa tuleva säteily absorboimalla osan siitä lämpöenergiaksi ja heijastaen osan pois. [8.] Kuvassa 3 on esitetty mustan kappaleen säteilytehon riippuvuus säteilevän kappaleen lämpötilasta ja aallonpituudesta. Kuvasta nähdään, kuinka matalassa lämpötilassa kappale tuottaa vain infrapuna-alueen säteilyä.



Kuvio 3. Mustan kappaleen säteilyn aallonpituusjakauma. [11.]

Kappaleen lämpösäteilyn tehoa voidaan tarkastella Stefanin ja Boltzmannin lain avulla (kaava 2), jonka mukaan kappaleen lämpösäteilyn teho on verrannollinen säteilevän pinnan absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin. [11.]

$$q = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2)$$

q = paikallinen lämpövirran tiheys [W/m^2]

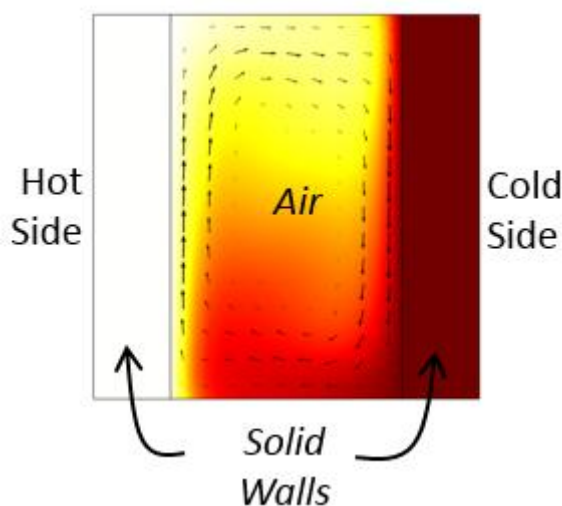
ε = pinnan emissiivisyys

σ = Stefan -Boltzmannin vakio [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^2$]

T = kappaleen pinnan ja ympäristön välinen lämpötilaero [K]

3.1.3 Konvektio

Konvektiolla (kuljettumisella) tarkoitetaan lämmön siirtymistä väliaineen virtauksen esim. kaasun tai nesteen mukana. Konvektio voi syntyä lämpötilaerojen aiheuttamasta tiheys-erosta, jolloin konvektion liikkeelle panevana voimana toimii noste. Konvektio voi tapahtua luonnollisena tai pakotettuna konvektiona. Luonnollisessa konvektiossa lämmin, harvempi aine nousee nosteen vaikutuksesta ylös ja kylmä, tiheämpi aine painuu alas. Pakotetussa konvektiossa jokin ulkoinen voima, kuten tuuli aiheuttaa väliaineen virtauksen. [8.] kuvassa 3 on esitetty esimerkki lämpötilaerojen aiheuttamasta luonnollisesta konvektiosta ulkoseinärakenteessa.



Kuvio 4. Luonnollinen konvektio. [10.]

Konvektiivinen lämmön siirtyminen riippuu vahvasti väliaineen fysikaalisista ominaisuuksista, kuten viskositeetista, tiheydestä, lämmönjohtavuudesta, ominaislämpökapasiteetista sekä väliaineen virtausnopeudesta. [11.] Ilmiön kompleksisuudesta huolimatta voidaan yksinkertaistettuja tarkasteluja suorittaa käyttäen Newtonin jäähtymislakia, joka esittää seuraavan väittämän:

”Kappaleen lämpöhäviön määrä on suoraan verrannollinen kappaleen ja sen ympäristön lämpötilaeroon, mikäli lämpötilaero on pieni ja säteilevän pinnan luonne pysyy samana”

Näin ollen paikallinen lämpövirran tiheys voidaan laskea kaavalla: [12.]

$$q = h\Delta T \quad (3)$$

q = paikallinen lämpövirran tiheys [W/m^2]

h = lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

ΔT = tarkasteltavan pinnan ja virtaavaan väliaineen välinen lämpötilaero

3.1.4 Vesihöyryn Diffuusio

Diffuusioksi kutsutaan ilmiötä, jossa epämääräisesti jakautuneen kaasuseoksen molekyylit pyrkivät liikkumaan niin, että syntyy tasaisesti jakautunut kaasuseos. Rakennustekniikassa diffuusion suunta on yleensä lämpimästä tilasta kohti kylmempää, jolloin suurimman osan vuodesta Suomen ilmastossa virtauksen suunta olisi rakennuksen sisältä ulospäin. Tärkein suuntaan vaikuttava tekijä on kuitenkin tilojen välillä vallitseva vesihöyryn pitoisuusero, jossa diffuusion suunta on suuremmasta vesihöyrynpitoisuudesta pienempään. Pitoisuuseron suuruus vaikuttaa diffuusiovirtauksen voimakkuuteen kasvattamalla sitä. [8.] Nesteen diffuusiota voidaan kuvata Fickin lakien avulla, joista ensimmäinen esittää toteaman:

”Yhdisteen diffuusionopeus väliaineessa on suoraan verrannollinen yhdisteen pitoisuusgradienttiin ja kääntäen verrannollinen elementtien väliseen etäisyyteen” [17.]

Fickin ensimmäinen laki kuvaa stationääritilan diffuusiota ja voidaan esittää matemaattisin termein seuraavasti: [17.]

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (4)$$

J = diffuusionopeus [mmol/s]

D = yhdisteelle ominainen diffuusiokerroin [cm^2/s]

$\frac{dc}{dx}$ = pitoisuusgradientti [$\text{mmol}/\text{cm}^3/\text{cm}$]

Fickin toinen laki, niin sanottu diffuusioyhtälö kuvaa ajasta riippuvaa diffuusiota ja voidaan esittää matemaattisin termein kaavan 5 mukaisesti:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (5)$$

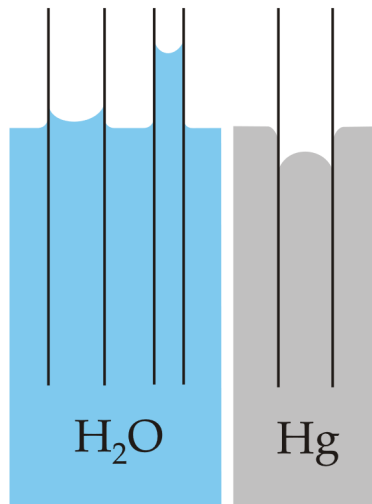
$\frac{\delta c}{\delta t}$ = pitoisuuden muutosnopeus [$\text{mmol}/\text{cm}^3/\text{s}$]

D = yhdisteelle ominainen diffuusiokerroin [cm^2/s]

$\frac{\delta^2 c}{\delta x^2}$ = pitoisuusgradientin derivaatta [$\text{mmol}/\text{cm}^4/\text{cm}$]

3.1.5 Kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarisessa veden siirtymisessä vesi siirtyy tarkasteltavassa huokoisessa materiaalissa huokoisalipaineen seurauksena. [8.] Ilmiön voi selittää myös adheesion ja koheesion tasapainotilana, jossa tarkasteltavan materiaalin huokosseinämät kohdistavat vesimolekyyleihin adheesiovoimia. Materiaalihuokoisen reuna-alueilla adheesiovoimat ovat huomattavasti suuremmat kuin vesimolekyylien väliset koheesiovoimat. Huokosseinämä vetää vesimolekyylejä voimakkaasti puoleensa, jolloin jokainen vesimolekyyli pyrkii mahdollisimman lähelle seinämää, minkä seurauksena osa molekyyleistä nousee korkeammalle. [14.] Nesteiden erilaista kapillaarista käyttäytymistä voidaan tarkastella vertailemalla vettä ja elohopeaa (kuva 5). Elohopean sisäiset koheesiovoimat ovat suuremmat kuin ulkoisen kiinteän aineen ja nesteen välillä vallitsevat adheesiovoimat, elohopea pyrkii pisaroitumaan. [16.]



Kuvio 5. Kapillaari-ilmiö vedellä ja elohopealla. [15.]

Rakentamisessa veden kapillaarinen nousu on kosteudenhallinnan kannalta keskeinen asia. Huokoiset rakennusmateriaalit kuljettavat vettä huokosissaan kastellen rakenteita, mikä rakenteiden suunnittelussa, sekä työmaan toteutuksessa tulee huomioida. Veden kapillaarista nousukorkeutta voidaan arvioida kaavan 4 avulla. [18.]

$$t = m \cdot x^2 \quad (4)$$

t = nousunopeus [m]

m = materiaalin kapillaarivastuskerroin [s/m^2]

x = nousukorkeus [m]

Kapillaarisesti materiaaliin imeytyvää vesimäärää voidaan arvioida kaavan 5 avulla.

$$G = B \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

G = vesimäärä [kg/m^2]

B = materiaalin kapillariteettikerroin [$\text{kg/m}^2/\sqrt{\text{s}}$]

t = aika [s]

Kapillaarista veden imeytymisvauhtia voidaan tarkastella kaavalla 6, joka saadaan derivoimalla imeytyvän vesimäärän (G) kaava ajan suhteen.

$$g = \frac{dG}{dt} = \frac{B}{2\sqrt{t}} \quad (6)$$

g = materiaalin kapillariteettikerroin [$\text{g}/\text{m}^2\text{s}$]

B = materiaalin kapillariteettikerroin [$\text{kg}/\text{m}^2/\sqrt{\text{s}}$]

t = aika [s]

3.1.6 Kosteuskonvektio

Kosteuskonvektiolla tarkoitetaan kosteuden siirtymistapaa, jossa kosteutta siirtyy vesihöyryn muodossa ilmapirran mukana. Kosteutta kuljettavan ilman liikkeen saa aikaan rakenteiden yli vaikuttavat kokonaispaine-erot. Konvektiivisen kosteuden siirtymisen kannalta merkittävää on kylmänä vuodenaikana rakenteissa sijaitsevien halkeamien ja reikien läpi ilmanpaine-erojen vaikutuksesta aiheutuva ilmavirta lämpimästä sisäilmasta kylmempään ulkoilmaan, jolloin runsaan kosteuden sisältämä lämmin sisäilma viilenee matkallaan rakenteen läpi ja mahdollisesti kastelee rakenteen. Samanlaisissa olosuhteissa tapahtuva ulkoa sisälle päin suuntautuva ilmavirtaus mahdollisesti kuivattaisi rakennetta, toisaalta aiheuttaen muita ongelmia tuomalla mukanaan epäpuhtauksia rakennuksen sisäilmaan. Kosteuskonvektiota on myös mahdollista tapahtua huokoisen materiaalin läpi. Konvektiivista kosteusvirtaa raon tai reiän läpi rakenteessa voidaan tarkastella kaavan 6 avulla. Reunaehtona kuitenkin, että virtaus on laminaarista. Kirjallisuudesta löytyy valmiiksi johdettuja kaavoja konvektiivisen kosteusvirran laskemiseen riippuen kulkureitin geometriasta, rakenteen dimensioista sekä virtauksen luonteesta. [18.]

$$g = v \cdot Q \quad (6)$$

g = kosteusvirta [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

v = ilman vesihöyrynpitoisuus [kg/m^3]

Q = läpi virtaava ilmamäärä [m^3/s]

Kosteusvirtaa homogeenisen huokoisen materiaalin läpi voidaan tarkastella kaavan 7 avulla. [18.]

$$g = v \cdot k_a \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (7)$$

g = kosteusvirta [kg/m²s]

v = sisä- ja ulkoilman kosteuspitoisuuksien ero [kg/m³]

k_a = materiaalin ilmanläpäisevyys [m²/sPa]

Δp = ilman paine-ero matkalla x [Pa]

Δx = ilman virtausmatka [m]

3.1.7 Painovoimainen siirtyminen

Painovoiman vaikutuksesta vesi siirtyä alaspäin. Kaltevat pinnat aiheuttavat siirtymiselle myös sivusuuntaisen komponentin. Rakennuksen kosteusteknisessä toiminnassa veden painovoimaisella siirtymisellä on suuri merkitys. Veden painovoimaisen siirtymisen toiminnassaan huomioivia rakennuksen osasia ovat esim. kaltevat vesikattorakenteet, ikkunapellitykset ja muut vesipellit, räystäskourut, vesi- ja viemäriputket, salaojaputket sekä kylpyhuoneen kaatavat lattiat. Kosteuden on myös mahdollista siirtyä epäedullisesti painovoiman vaikutuksesta esim. vesikaton vuotavat läpiviennit, halkeamat ja elementtisaumat saattavat mahdollistaa kosteuden pääsyn rakenteisiin. [19.]

3.2 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet

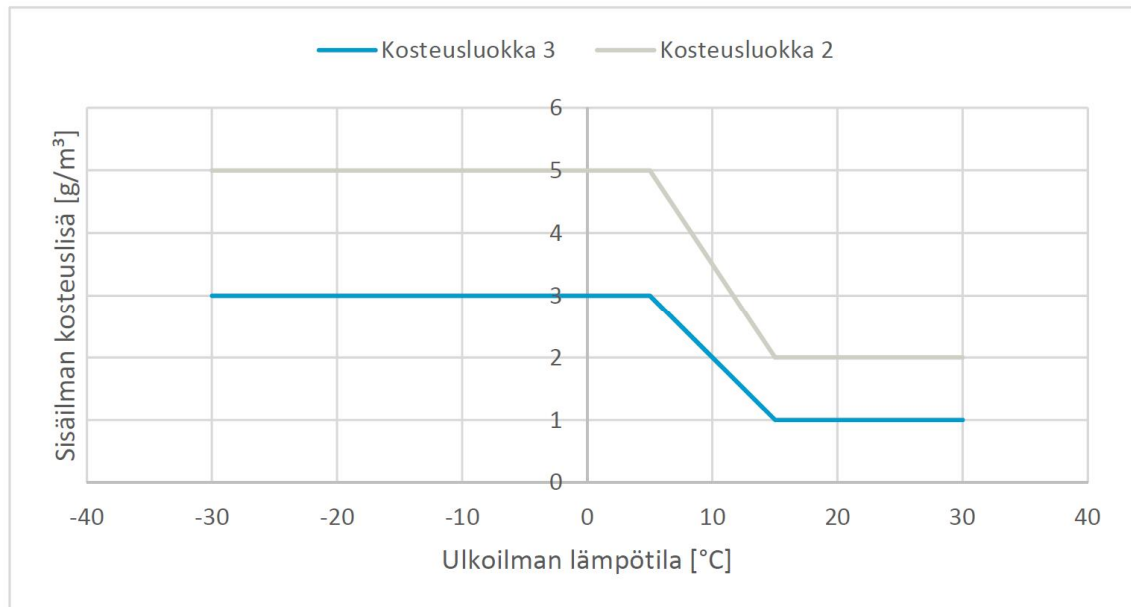
Rakennuksen vaipparakenteita tarkasteltaessa laskennallisesti on tärkeää huomioida sisäilman olosuhteet, joista vaipparakenteen toiminnan kannalta keskeisimmäksi nousevat sisäilman kosteuspitoisuus ja lämpötila sekä paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä. Sisäilman suhteellinen kosteus määräytyy ulkoilman suhteellisen kosteuden perusteella, mikä on seurausta pitoisuuksien jatkuvasta liikkeestä kohti tasapainotilaa. Rakennuksen käyttö ja sen käyttäjät tuottavat sisäilmaan kosteuskuormaa, josta puhutaan kosteuslisänä. Kosteuslisä ilmaisee, kuinka paljon suurempi on sisäilman vesihöyrynpitoisuus verraten ulkoilmaan. Rakennukset jaetaan rakennustyyppin ja rakennuksen käyttötavan mukaan kolmeen kosteusluokkaan, joiden perusteella kosteuslisän suuruus määräytyy. Kosteusluokat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Sisäilman kosteuslisän määräävä kosteusluokka. [23.]

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitusarvo talvella ($T \leq 5^{\circ}\text{C}$)	Rakennustyyppi
1	$> 5 \text{ g/m}^3$	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät ja kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

Kosteuslisän arvot kosteusluokittain voidaan esittää myös ulkolämpötilan funktiona niin, että ulkoilman lämpötilan ollessa alle 5°C on sisäilman kosteuslisä talven vakioarvoissa (> 5 , 5 ja 3 g/m^3), kun ulkolämpötila nousee yli 15°C on kosteuslisä kesän vakioarvoissa (> 2 , 2 ja 13 g/m^3). Lämpötilojen välillä kosteuslisä muuttuu lineaarisesti, kuten kuvassa 6 on esitetty.

Rakennuksissa, joissa sisäilman lämpötila pidetään normaalina huonelämpötilana ympäri vuoden, on rakenteiden laskennallisissa tarkasteluissa suositeltavaa käyttää vakioarvoa 21°C . Rakennuksissa, joissa ei ole kesäisin jäähdytystä ja sisälämpötila vaihtelee vuoden aikana, on laskennallisissa tarkasteluissa käytettävä lämpötila arvioitava tapauskohtaisesti. [23.] Laskentatarkastelujen nopeuttamiseksi tässä työssä käytettiin kuitenkin vakioarvoja sisäilman lämpötilalle kuin myös sisäilman kosteuspiitoisuudelle.



Kuvio 6. Sisäilman kosteuslisä ulkoilman lämpötilan funktiona. [23.]

Keskeisimpiä ulkoilman olosuhteita, jotka vaikuttavat laskennalliseen tarkasteluun ovat ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus, tuuli, sade, auringon säteily ja rakennuksen taivaalle emittoiva lämpösäteily. Ulkoilman olosuhteet huomioidaan laskennallisissa tarkasteluissa käyttämällä rakennusfysikaalisia testivuosia. Suomen ilmastossa mitoitettavia rakennusfysikaalisia testivuosia on määrittänyt Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmä ilmatieteenlaitoksen kanssa yhteistyössä FRAME-projektin yhteydessä. [20.] Projektin tuotoksena syntyi rakennusfysikaalisia tarkasteluja varten mm. testivuodet Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007, jotka muodostuivat vuosina 1980-2009 Vantaalla, Jokioisissa, Jyväskylässä ja Sodankylässä tehtyjen säähavaintojen pohjalta. Em. testivuosien aikana sääolosuhteet olivat erityisen suotuisat homeen kasvulle ja kosteuden tiivistymiselle rakenteissa. [21.] Tarkasteltaessa rakenteita, joissa sade vaikuttaa niiden kosteustekniseen toimintaan rakenteen sisäpuolella (mahdollisia vuotoja) voidaan laskennassa käyttää testivuotta Vantaa 2007. Mikäli tarkastelun kohteena olevan rakenteen sisäosat on suojattu sateen vaikutukselta, voidaan testivuodeksi valita Jokioinen 2004. Mikäli sade vaikuttaa jossain määrin tarkasteltavan vaipparakenteen toimintaan, tulee rakenteen toimintaa tutkia kummankin testivuoden avulla. [22.]

3.3 Materiaaliominaisuudet

Materiaaliominaisuudet ovat yksi rakennusfysikaalisen mallintamisen kulmakivistä. Jotta mallinnuksen tulokset vastaisivat riittäväällä tarkkuudella tarkasteltavan rakenteen todellista toimintaa, tulee materiaaliominaisuudet tuntea hyvin. Rakennusfysikaalisen mallintamisen kannalta tärkeimpiä materiaaliominaisuuksia ovat:

- ominaislämpökapasiteetti
- lämmönjohtavuus
- pinnan emissiivisyys
- ilmanläpäisevyys
- hygroskooppisuus
- vesihöyrynläpäisevyys
- kosteusdiffusiviteetti
- kapillariteetti
- homehtumisominaisuudet.

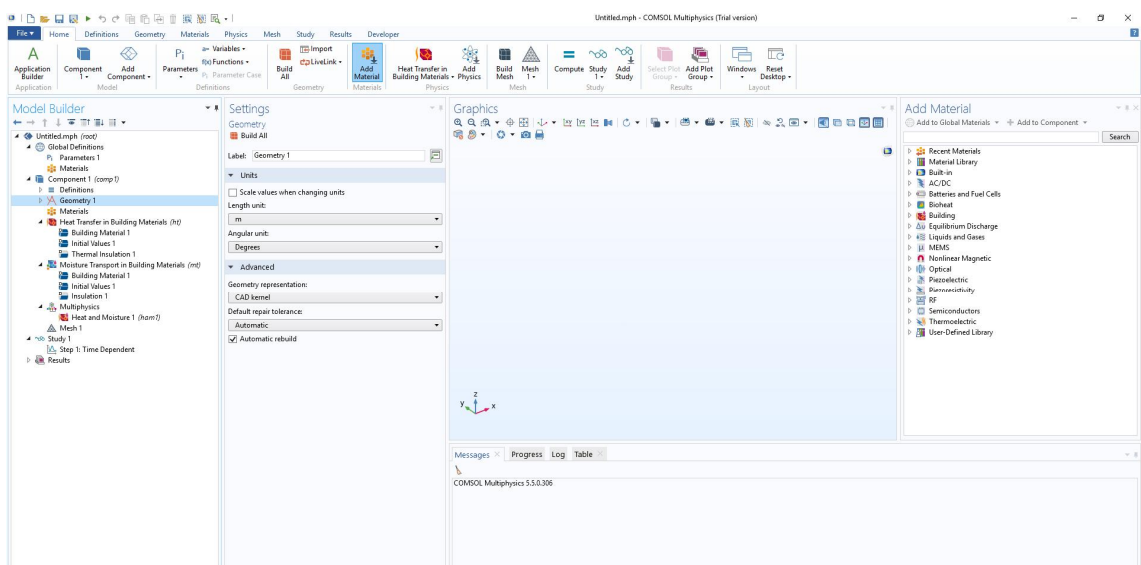
Osa materiaaliominaisuuksista on riippuvaisia vallitsevasta kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta. Rakennusfysikaalisessa mallintamisessa tämä huomioidaan käyttämällä vakion arvon sijaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona määritettyä arvoa. [23.]

Rakennusmateriaalien materiaaliominaisuudet vaihtelevat eri valmistajien välillä johtuen tuotteiden erilaisista valmistusprosesseista ja raaka-aineista. Vaihtelua syntyy myös tiheyden, lämpötilan suhteellisen kosteuden ja iän mukaan. Tarkempiin laskentatuloksiin pyrittäessä tulee käyttää materiaalivalmistajien antamia materiaaliominaisuuksien arvoja. Materiaaliominaisuuksien arvoja ei aina kuitenkaan ole materiaalivalmistajan toimesta tarjolla, jolloin voidaan laskennassa käyttää myös standardeista löytyviä arvoja, jotka ovat varmallalla puolella olevia vähemmän tarkkoja arvoja. [23.]

4. Rakennusfysikaalinen mallintaminen Comsol Multiphysics ohjelmalla

Comsol Multiphysics on ruotsalaisperusteisen Comsol-konsernin tuottama simulointiohjelma multifysikaalisten järjestelmien numeeriseen ratkaisemiseen. Ohjelman laskenta perustuu elementtimenetelmään (FEM), jolloin ratkaistava kappale jaetaan laskentahilan avulla elementteihin ja ratkaistaan halutut suureet numeerisesti elementtien kaikissa reunoissa. Ohjelman käyttäjäkunta koostuu ensisijaisesti insinööreistä, tutkijoista ja kouluttajista usealta eri tekniikanalalta. Ohjelman käyttöliittymä antaa käyttäjälle vapauden yhdistellä eri fysiikan ilmiöitä. Käyttäjän on mahdollista muokata mallinnusta omilla yhtälöillä. [10.]

Mallinnus aloitetaan valitsemalla, kuinka monessa ulottuvuudessa tarkastelu halutaan suorittaa (1D, 2D tai 3D), jonka jälkeen lisätään halutut fysikaaliset ilmiöt ja valitaan laskentamenetelmä stationääriseen ja epästationääriseen väliillä. Tässä työssä havainnollistettiin tietomallinnuksen etuja rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa, minkä vuoksi tarkasteltiin vain 3D malleja. Tarkasteltavat ilmiöt olivat lämmön ja kosteuden siirtyminen. Em. valintojen jälkeen aukeaa käyttöliittymän päänäkymä (kuva 7).



Kuvio 7. Comsol Multiphysics käyttöliittymä.

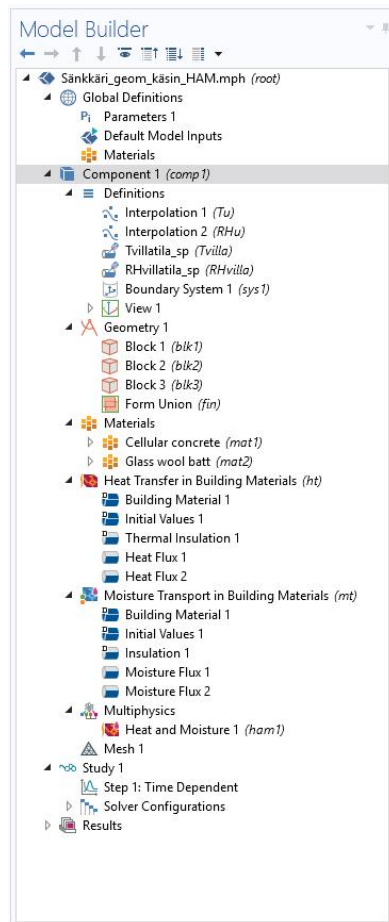
Käyttöliittymän yläreunassa sijaitsee kaikki mallinnukseen tarvittavat työkalut. Työkalut on jaettu kahdeksan kategorian alle, jotka ovat määrittelyt, geometria, materiaalit, fysiikat, laskentahila, tarkastelu, tulokset ja kehittäjä. Vasemmassa reunassa sijaitsee mallin rakentaja eli Model Builder. Mallinrakentaja esittää puujaon, joka sisältää mallinnuksen

vaiheet olosuhteiden määrittämisestä ja geometrian luonnista tulosten tarkasteluun. Käyttöliittymän keskellä sijaitsee grafiikkanäkymä, josta voidaan tarkastella mallin geometriaa ja mallinnettävien suureiden kuvaajia. [10.]

Mallinnusprosessi seuraa selkeän järjestelmällisesti Model Builderiä (kuva 8). Mallinnusprosessi etenee seuraavasti:

1. Määritetään laskennalle reunaehdot kuten ympäristön olosuhteet
2. Luodaan geometria
3. Määritetään materiaaliominaisuudet
4. Määritetään fysikaaliset ilmiöt
5. Luodaan laskentahila
6. Määritetään laskenta-aika (aikariippuvainen laskenta) ja suoritetaan laskenta
7. Tarkastellaan tuloksia ja muokataan ne haluttuun esitysmuotoon.

Monitorointipisteitä voidaan luoda missä tahansa vaiheessa mallinnusta ilman, että koko mallia tarvitsisi ratkaista uudelleen.



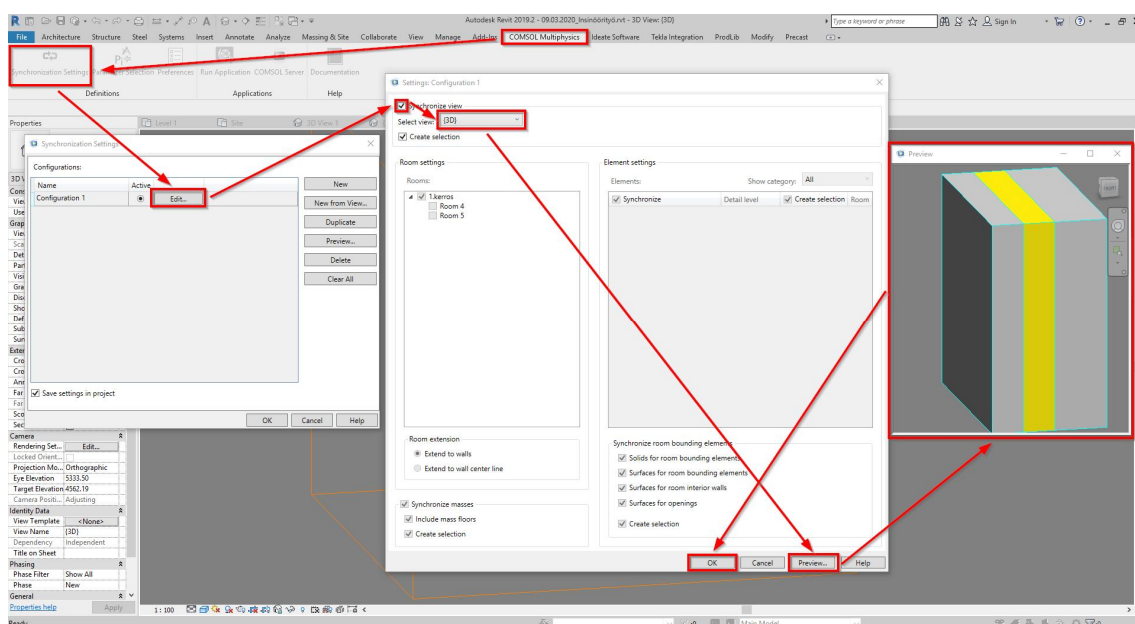
Kuvio 8. Model Builder, mallin puujako.

4.1 Comsolin liitântätuotteet

Osana Comsol-konsernin tuotetarjontaa on sarja liitântätuotteita, joilla Comsol Multiphysics voidaan yhdistää muiden laskenta-, mallinnus- ja tietomallinnusohjelmien kanssa. Tässä työssä käsiteltiin liitântätuotetta LiveLink™ Revitille, jonka avulla saatiin laskentamallin geometria siirrettyä valmiista tietomallista Comsoliin rakennusfysikaalisia tarkasteluja varten. Liitântätuotetta käytettäessä ohjelmat synkronoidaan keskenään, jolloin siirrettävä tieto (tässä työssä geometria) siirtyy ohjelmasta toiseen. Mikäli tarpeen, tietoa voidaan muokata jälkeinpäin ja suorittaa uudelleensynkronointi muutosten siirtämiseksi. Jo ennen geometrian muokkausta annetut mallin rajat ja fysiikat on mahdollista pitää muuttumattomina geometrian muokkauksesta huolimatta. Geometrian mukana on myös mahdollista synkronoida rakenneosien materiaaliominaisuudet Revitistä Comsoliin. [10.]

5. Geometrian luonti vs. geometrian siirto

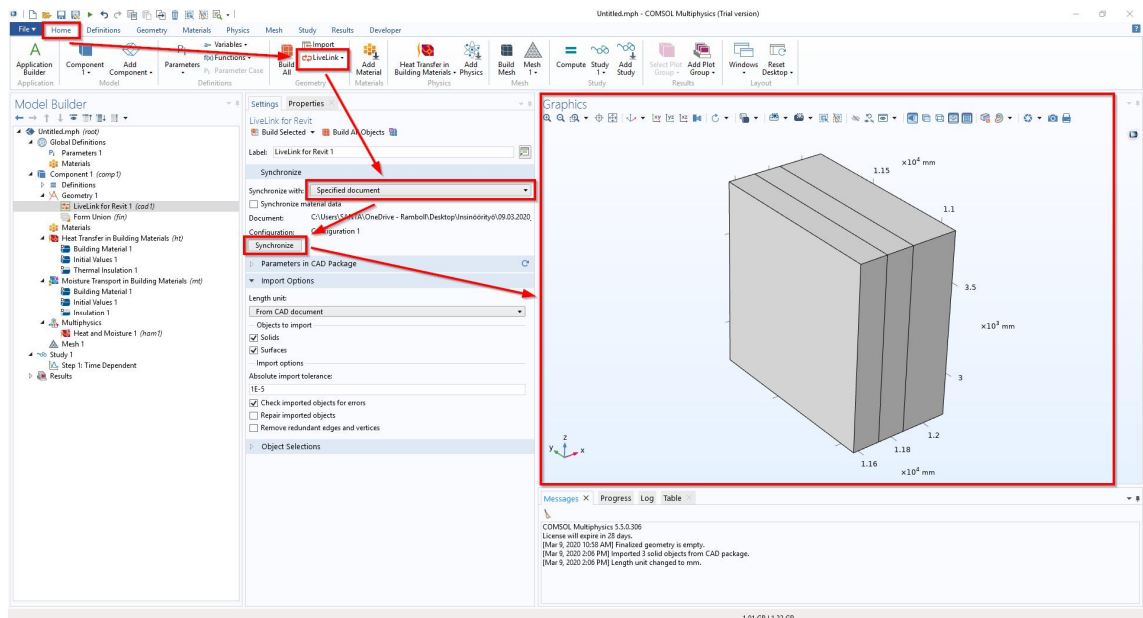
Geometrian tuomista Revitistä koestettiin mallintamalla yksinkertainen rakenne ja siirtämällä tämä Comsolin synkronoimalla näkymä. Sama geometria luotiin myös Comsolin geometriatyökalulla. Molemmilla malleilla simuloitiin lämmön ja kosteuden siirtymistä. Tuloksia vertailemalla pois suljettiin synkronoidun geometrian aiheuttamat virheet laskevatuloksista. Synkronointi alustettiin valitsemalla Revitin työkaluriviltä Comsol multiphysics välilehdeltä synchronization settings, josta valittiin aktiivinen konfiguraatio muokattavaksi. Muokkausvälilehdellä merkattiin valintaruutu synchronize view ja valittiin näkymälistasta haluttu näkymä. Ennen asetusten hyväksymistä avattiin esikatseluikkuna ja tarkastettiin, että kaikki mitä halutaan Revitistä siirtää Comsolin näkyvät esikatselussa. Mikäli esikatselun yhteydessä näkymässä ilmenee ylimääräisiä komponentteja, saadaan ne rajattua ulos siirrettävästä näkymästä Revitin section box työkalulla. Kuvassa 9 on esitetty synkronoinnin alustusprosessi.



Kuvio 9. Synkronoinnin alustus Revitissä.

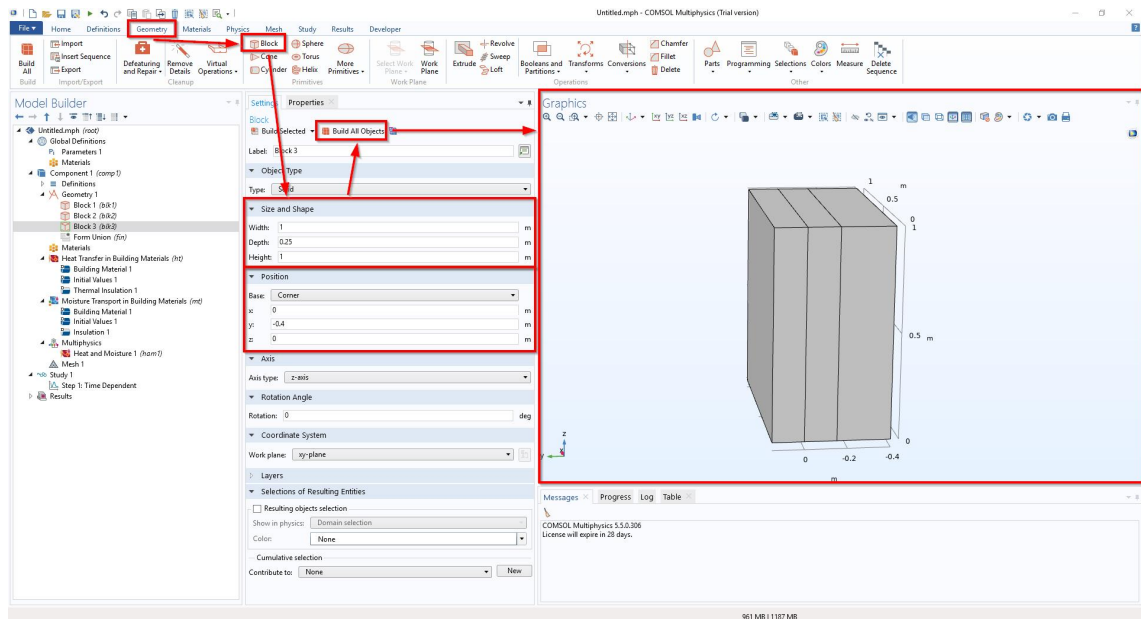
Synkronointi voitaisiin alustaa myös luomalla malliin huonejako, jolloin synkronoitavat elementit voitaisiin eritellä ei synkronoitavista kuvan 9 element settings listan avulla. Huonejaon luominen rakennesuunnittelumalliin on kuitenkin täysin ylimääräistä työtä, minkä takia sitä ei tässä työssä tehty.

Synkronoinnin suoritus toteutettiin Comsolin käyttöjärjestelmässä. Home välilehdeltä, liivelink vetovalikosta valittiin LiveLink™ Revitille. Asetuksista valittiin dokumentti, joka halettiin synkronoida. Mikäli kyseinen dokumentti on auki, voidaan valita aktiivinen dokumentti ja suorittaa synkronointi, jonka jälkeen geometria ilmestyy grafiikkanäkymään (kuva 10). Synkronoinnin jälkeen tarkastettiin siirretty geometria ja sen mitat.



Kuvio 10. Geometrian synkronointi Comsolissa.

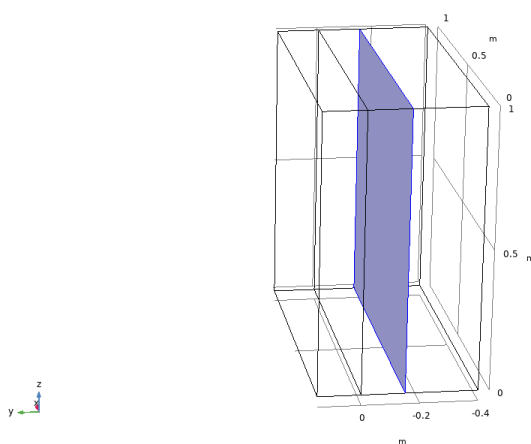
Vaihtoehtoisesti sama kappale luotiin comsolin geometriatyökalulla. Geometria luotiin valitsemalla geometria välilehdeltä block-työkalu ja syöttämällä kappaleelle koko, muoto ja sijainti, jonka jälkeen kappale valittiin build all objects (kuva 11). Tämä toistettiin, kunnes kolme rakenteen muodostamaa kappaletta oli luotu.



Kuvio 11. Geometrian luominen Comsolissa.

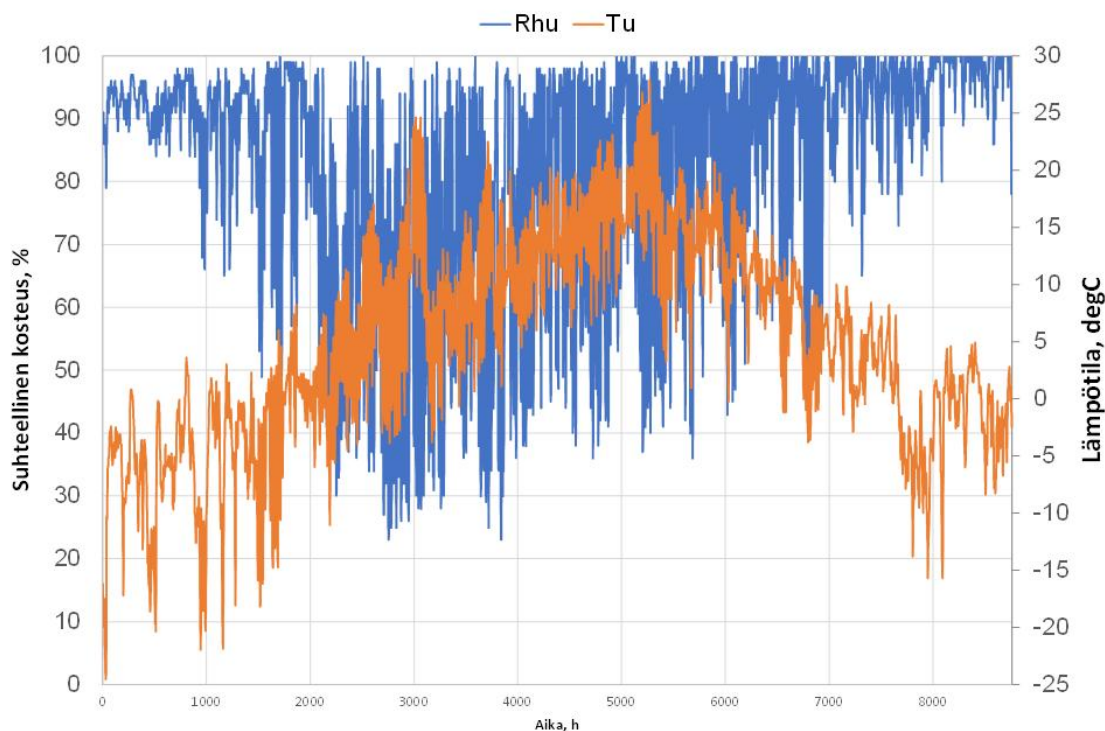
5.1 Laskentatarkastelu siirretyllä- ja Comsolissa luodulla geometrialla

Luoduille malleille annettiin comsolissa materiaaliominaisuudet ja määritettiin ympäristön olosuhteet. Molemmille malleille, Revitistä siirretylle ja Comsolissa geometriatyökalulla luodulle suoritettiin lämmön ja kosteuden siirtymisen vuoden pituinen aikariippuvainen laskentatarkastelu. Laskennassa käytettiin Tarkastelukohtana eristeen ja lämpimän tilan puoleisen kevytbetonin rajatilaa (kuva 12).



Kuvio 12. Tarkastelukohta

Ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoina käytettiin TTY:n ja Ilmatieteen laitoksen määrittämiä rakennusfysikaalisia testivuosia [21]. Käytössä oli Jokioisten 2004 nykyilmasto. Sisäilman lämpötilana käytettiin vakio lämpötilaa 20 °C ja suhteellisen kosteuden arvona 50 %. Käytetyt sääreunaehdot on esitetty kuvassa 13 ja materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 2. Pintojen lämmönsiirtokertoimina käytettiin rakenteen lämpimällä puolella arvoa 7,7 W/m²K ja kylmällä arvoa 25 W/m²K [25].



Kuvio 13. Laskennoissa käytetyt sääreunaehdot.

Taulukko 2. Käytetyt materiaaliominaisuudet.

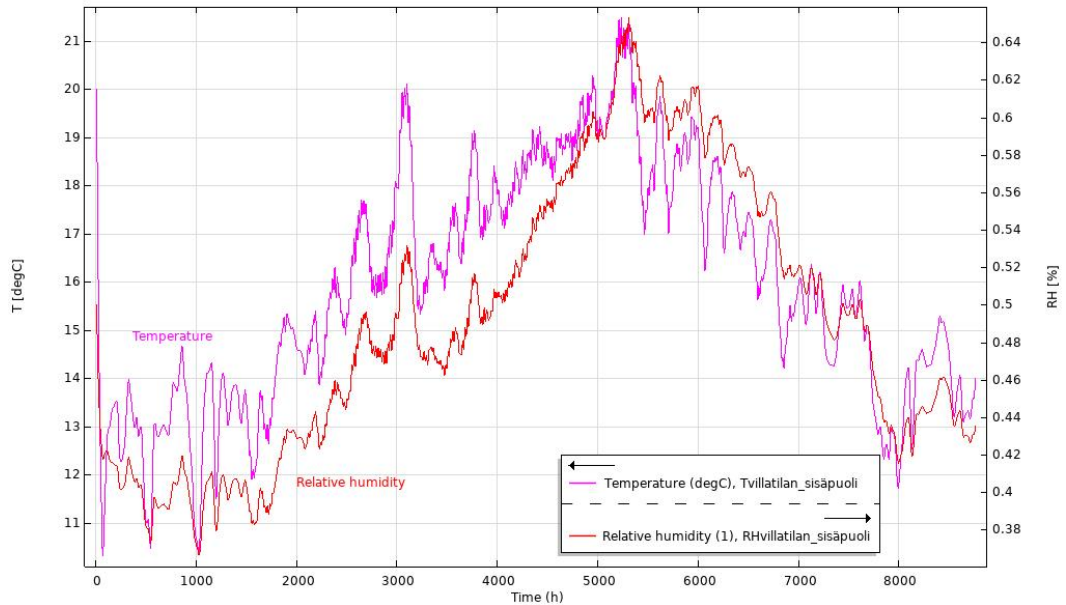
Materiaali	μ [-]	Tiheys [kg/m ³]	c [J/kg·K]	λ [W/m·K]
Kevytbetoni	8 ¹⁾	600 ¹⁾	850 ¹⁾	0.14-0.34 ¹⁾
Mineraalivilla	1.3 ²⁾	29.5 ²⁾	800 ²⁾	0.036 ²⁾

¹⁾ Comsol Multiphysics materiaalikirjasto

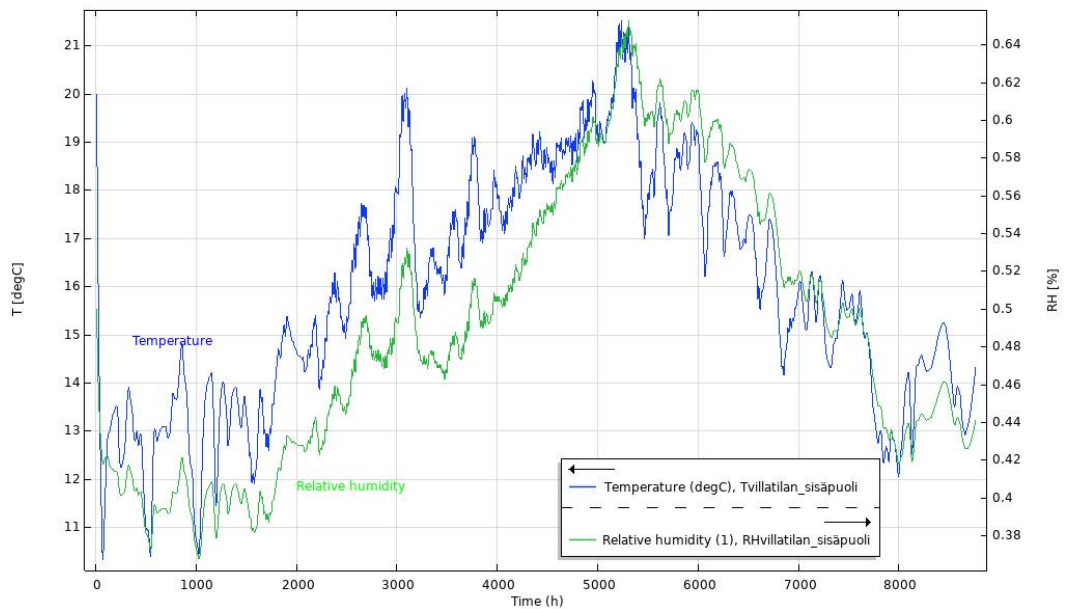
²⁾ Paroc Oy

Laskennan tuloksia verrattiin keskenään, jotta voitaisiin poissulkea geometrian siirrosta aiheutuvat virheet laskennassa. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty mallien monitorointipisteiden suhteellinen kosteus ja lämpötila vuoden pituiselta laskentajaksolta. Kuvista voidaan

todeta, että tietomallista siirretyllä ja Comsolissa luodulla geometrialla saadut laskentatulokset eivät eroa toisistaan. Näin ollen siirretty geometria toimii simuloinnissa samalla tavoin kuin alusta loppuun simulointiohjelmassa luotu malli.



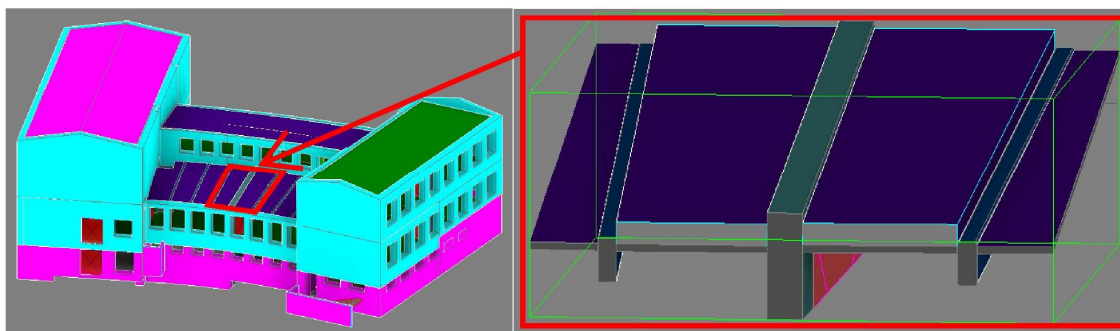
Kuvio 14. Synkronoidun geometrian suhteellinen kosteus ja lämpötila.



Kuvio 15. Comsolissa mallinnetun geometrian suhteellinen kosteus ja lämpötila.

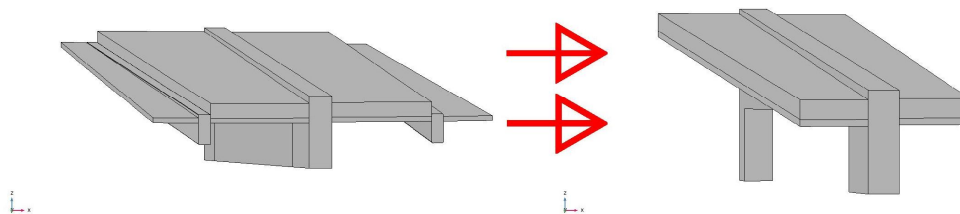
6. Geometrian siirto olemassa olevasta rakennesuunnittelun tietomallista

Olemassa olevan tietomallin hyödyntämistä laskentageometrian luonnissa koestettiin synkronoimalla valmiista mallista rakenne Comsoliin ja simuloimalla lämmönsiirtymistä rakenteessa. Kastepistelämpötilasta luotiin kolmiulotteiseen malliin isoterminen pinta. Laskentageometrian lähteenä käytettiin Espoon Tuomarilan koulun peruskorjaushankkeen yhteydessä luotua rakennesuunnittelun tietomallia. Laskentatarkastelu suoritettiin koulun yläpohjarakenteen ja teräsbetoniväliseinän liitokselle, jossa teräsbetoniseinä ulottui lämmöneristekerroksen kylmälle puolelle, toimien näin kylmäsiirtana (kuva 16). Tarkasteltava rakenne eroteltiin muusta tietomallista Section Box työkalulla ja synkronoitiin Comsoliin simuloitavaksi. Tarkasteltavat rakenteet oltiin rakennesuunnittelun tietomallissa mallinnettu tarkkuudella, joka sisälsi kantavat ja kantamattomat betonirakenteet mutta ei yläpohjan lämmöneristeitä. Puuttuvat lämmöneristeet mallinnettiin Revitissä laskennan vaatimalla laajuudella ennen tarkasteltavan rakenteen synkronoimista Comsoliin.



Kuvio 16. Tuomarilan koulun tarkasteltavat rakenteet.

Synkronoitua geometriaa muokattiin ja rajattiin Comsolissa poistamalla laskennan kannalta tarpeettomat rakenteet kuten ylimääräiset palkit, lämmöneristeet ja laatan osat. Geometriasta etsittiin ns. symmetria-akselit, joiden ulkopuolelle jäävät geometrian osat poistettiin (kuva 17).



Kuvio 17. Synkronoitu geometria ja Comsolissa laskentaa varten muokattu geometria.

Poistettavat geometrian osat erotettiin Comsolissa muusta geometriasta seuraavasti:

- näkymään luotiin uusi work plane, joka sijoitettiin symmetria-akselille akselin suuntaisesti jakamaan poistettavat ja ei-poistettavat osat toisistaan
- yhtenäiset geometrian osat jaettiin Partition Objects -työkalulla, käyttäen valintaa Partition with: Work plane
- samat Partition Objects työkalulla jaetut geometrian osat irrotettiin toisistaan Split -työkalulla, jonka jälkeen erotetut kappaleet toimivat omina objekteinaan
- ylimääräiset geometrian osat poistettiin.

6.1 Laskentatarkastelu olemassa olevalla tietomallilla

Geometrian valmistuttua jatkettiin simulointimallin rakentamista määrittämällä laskennan reunaehdot. Materiaaliominaisuuksien arvot on esitetty taulukossa 3 ja pintojen lämmönsiirtokertoimien arvot on esitetty taulukossa 4. Lämmönsiirtymistä mallinnettiin stationääritilassa, jolloin lämpövirtaa tapahtuu mutta ympäröivät olosuhteet ovat saavuttaneet tasapainotilan, jolloin ajan vaikutus voidaan jättää huomiotta. Tämä huomioiden lämpötilareunaehtoina laskennassa käytettiin vakioarvoja + 21 °C sisällä ja - 25 °C ulkona.

Taulukko 3. Käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	c [J/kg·K]	λ [W/m·K]
Betoni	2275 ¹⁾	850 ¹⁾	1.9 ²⁾
Mineraalivilla	29.5 ³⁾	800 ³⁾	0.036 ³⁾

¹⁾ Wufi materiaalikirjasto

²⁾ Laine, K. Diplomityö

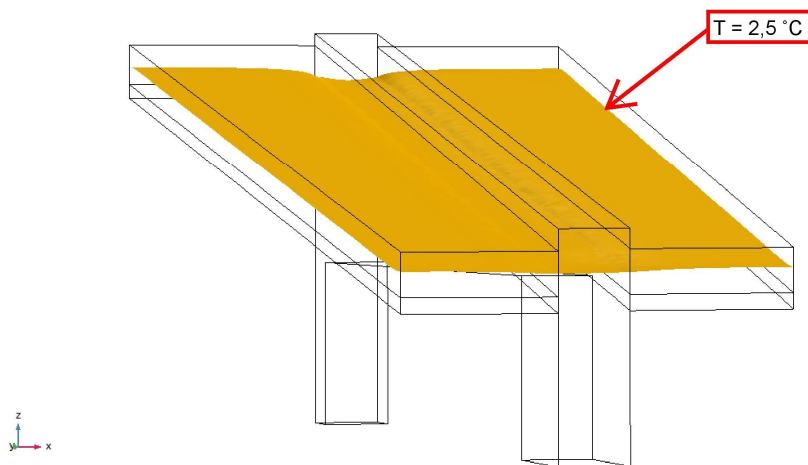
³⁾ Paroc Oy

Taulukko 4. Pintojen lämmönsiirtokerroimet lämpövirran suunnan mukaan [25].

Pinnan lämmönsiirtokerroin W/m ² K	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
Lämmin tila	10	7,7	5,9
Kylmä tila	25	25	25

Sisäilman kosteuslisänä käytettiin 5 g/m³ [24]. Sisäilman kosteuspiitoisuutena käytettiin 5,756 g/m³, joka muodostettiin vallitsevan ulkoilman lämpötilan (- 25 °C) mukaisen kyl-
lästysvesihöyrynpitoisuuden (0,756 g/m³) ja sisäilman kosteuslisän summana. Tätä kos-
teuspiitoisuutta vastaava kastepistelämpötila on 2,5 °C.

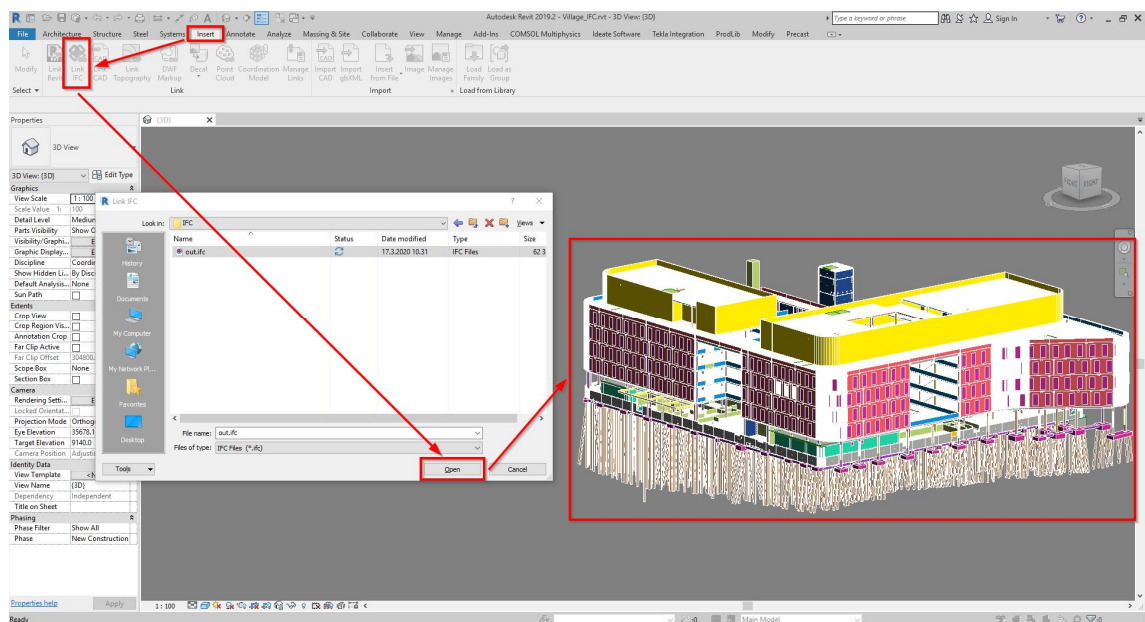
Laskentatuloksena saatiin kolmiulotteinen isoterminen kastepistepinta. Teräsbetonisei-
nän kylmäsilta-vaikutus aiheuttaa vähäistä vääristymää kastepistepintaan, joka siltikin jää
seinärakenteen ja lämmöneristekerroksen sisään kauas sisäpinoista (kuva 18).



Kuvio 18. Isoterminen kastepistepinta.

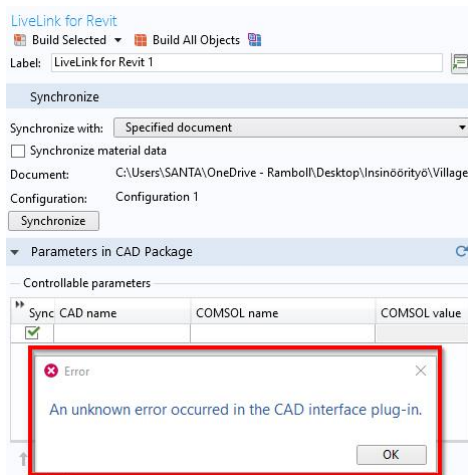
7. IFC-tiedoston hyödyntäminen laskentageometrian luomisessa

Rakennusfysikaalisia laskentatarkasteluja tehdessä voi tulla eteen tilanne, jossa tarkastettava kohde on mallinnettu ulkopuolisen suunnitteluyrityksen toimesta. Tällöin laskennan suorittajalla on mahdollisesti käytössään alkuperäisen mallin sijaan siitä tuotettu IFC-tiedosto. IFC-tiedoston hyödyntämistä mallinnuksen geometrian luomisessa koestettiin ensiksi luomalla Revitillä tyhjä projekti ja linkittämällä käytettävissä oleva IFC-tiedosto luodun projektin kanssa. IFC-tiedostona käytettiin Ramboll Finland Oy:n Espoon toimiston mallista tuotettua tiedostoa. Linkityksen prosessi on esitetty kuvassa 19.



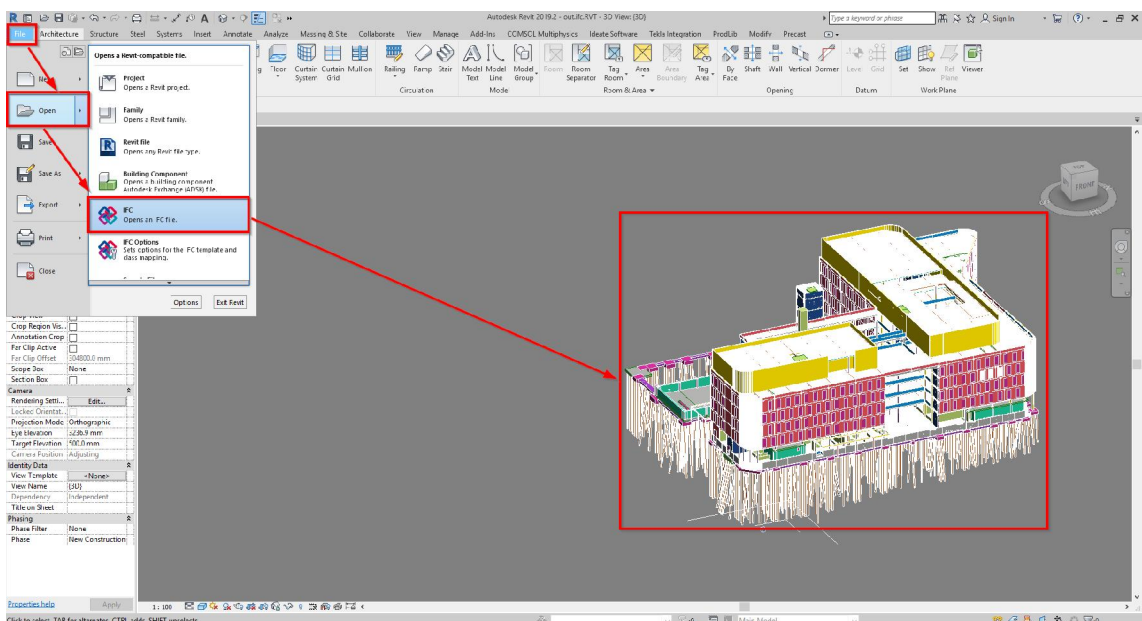
Kuvio 19. IFC-tiedoston linkitys.

IFC-tiedoston linkityksen hyödyt ovat samoja kuin Revitin ja Comsolin synkronoinnissa. Linkitettyyn tiedostoon tehdyt muutokset saadaan tuotua projektiin päivityksen kautta, jolloin ei tarvitse ladata kokonaan uutta IFC-tiedostoa tehtyjen muutosten seurauksena. Linkitetty IFC pyrittiin siirtämään Comsoliin synkronoimalla näkymä, jolloin vielä Revitin synkronointiasetusten esikatseluikkunassa voitiin siirrettävä geometria havaita. Synkronointi linkitetyn IFC-tiedoston ja Comsolin välillä ei kuitenkaan onnistunut (kuva 20).



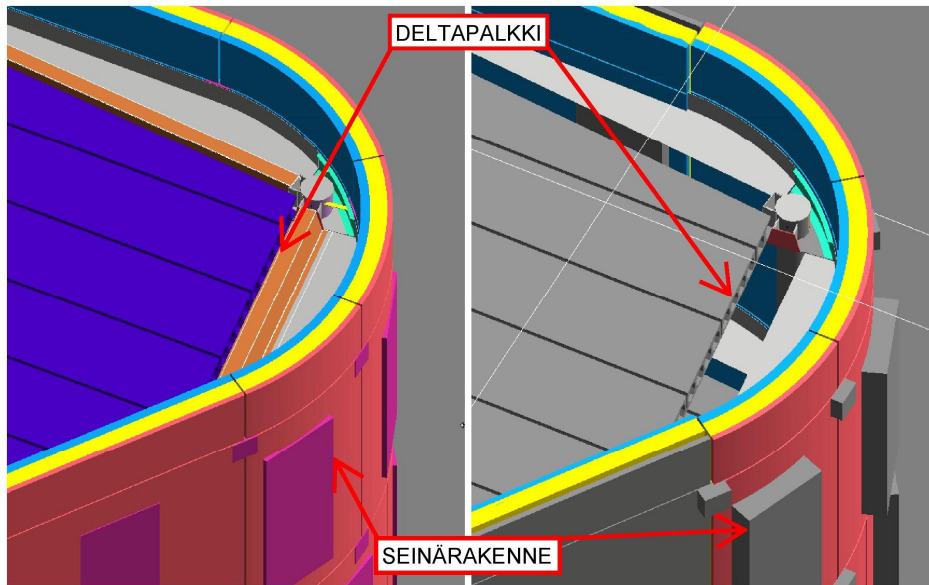
Kuvio 20. Tuntematon virhe synkronoinnissa.

Toinen koetus suoritettiin linkityksen sijaan avaamalla sama IFC-tiedosto ja synkronoimalla tämä Comsolin kanssa. Kuvassa 21 on esitetty IFC-tiedoston avaaminen. Näin toimimalla pystyttiin IFC-tiedosto tallentamaan Revit-tiedostona, jolloin synkronointi ohjelmien välillä saatiin suoritettua. Prosessissa Revit muuttaa jokaisen IFC-tiedoston sisältämän elementin natiiviksi Revit-objektiksi. Ennen IFC-tiedoston avaamista on mahdollista määrittää avaamista koskevat asetukset file-valikon kohdan open alta, kohdasta IFC Options. Asetuksien avulla valitaan mihin kategoriaan tiedoston sisältämät osat muutetaan. Voidaan siis valita, muutetaanko esim. kantavat palkit kategoriaan palkit tai vaikka seinät kategoriaan pilarit.



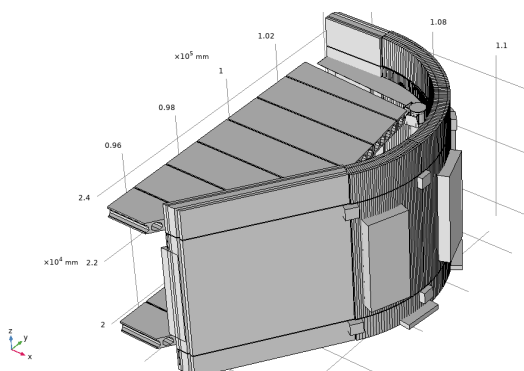
Kuvio 21. IFC-tiedoston avaaminen.

Muutettaessa IFC-tiedoston sisältöä Revit-objekteiksi on kuitenkin huomioitava, että muutosprosessissa malli menettää osan parametreistaan ja älykkyydestään, jolloin tuotettu malli saattaa poiketa myös geometrialtaan alkuperäisestä. Työssä Revit-tiedostoksi muutettu malli menetti esim. osan deltapalkeistaan ja ulkoseinien geometria poikkesi alkuperäisestä. Kuvassa 22 esitetty linkitetty IFC vasemmalla ja Revit-tiedostoksi muutettu oikealla, josta voi havaita hävinnän deltapalkin ja poikkeavan seinärakenteen.



Kuvio 22. Linkitetty IFC-tiedosto (vasemmalla) ja Revit-tiedostoksi muutettu.

Comsoliin siirrettävän tiedon määrän minimoimiseksi rajattiin mallista suurin osa pois Section Box työkalulla. Geometrian synkronointi Revitistä Comsoliin suoritettiin kuten aiemmin, synchronize view toiminnolla. Revit-tiedostoksi muutettu IFC saatiin synkronoitua Comsoliin (kuva 23).



Kuvio 23. Revit-tiedostoksi muutettu malli synkronoitu Comsoliin.

8. Johtopäätös

Geometria oli mahdollista synkronoida tietomallista simulointiohjelmaan kahdella tavalla, synkronoimalla näkymä tai synkronoimalla valintakokonaisuus. Valintakokonaisuutta hallinnoidaan huonejaon avulla synkronointiasetuksissa. Tällä tavoin geometriasta olisi mahdollista valita mitkä objektit synkronoitaisiin ja mitkä eivät mutta tämä vaatisi, että malli jaettaisiin huoneiksi Revitissä. Huonejaon toteuttamista olemassa olevaan tietomallin kokeiltiin insinööriyön alussa ja huomattiin, että rakennesuunnittelun tietomallin jakaminen huoneisiin toisi suuren määrän ylimääräistä työtä, jolloin hyöty valmiista laskenta-geometriasta häviää. Tämän seurauksena huoneisiin jakaminen rajattiin pois tästä insinööriyöstä ja keskityttiin siirtämään geometriaa synkronoimalla näkymä.

Johdanto kappaleessa esitettiin tutkimustavoitteet, jotka jaettiin kolmeen osa-alueeseen. Tarkastellaan jokaista tavoitetta erikseen. Ensimmäisessä mallinnettiin yksinkertainen betoni-villa-betoni sandwich-rakenne Revitissä. Mallinnettu geometria siirrettiin Comsoliin synkronoimalla näkymä. Sama rakenne luotiin Comsolin geometria työkalulla. Molemmilla geometrioilla simuloitiin lämmön ja kosteuden siirtymistä vuoden mittaisella aikariippuvaisella laskentatarkastelulla. Laskentatuloksista luotiin kuvaajat, jotka esittivät rakenteen lämpö- ja kosteusprofiilia lämpimän puolen betoniseinän ja villan välisellä rajapinnalla. Malleista saadut laskentatulokset vastasivat toisiaan, jolloin geometrian siirto ei aiheuttanut virheitä geometriaan. Tämä huomioiden voitiin seuraava laskentatarkastelu suorittaa käyttämällä vain valmiista tietomallista siirrettyä geometriaa. Kun molempien ohjelmien mallinnuksen kulkua verrattiin, huomattiin Revitin valmiista rakenneosa-työkaluista (esim. palkki-, pilari ja rankatyökalut) saatavan hyötyä. Valmiit Rakenneosa-työkalut nopeuttavat mallinnuksen kulkua monimutkaisemmissa geometrioissa huomattavasti.

Toisessa osa-alueessa tavoitteena oli siirtää laskentageometria Revitillä mallinnetusta olemassa olevasta rakennesuunnittelun tietomallista Comsoliin ja suorittaa siirretyllä geometrialla rakennusfysikaalinen laskentatarkastelu. Siirtäminen suoritettiin synkronoimalla näkymä. Valmiin tietomallin roolissa hyödynnettiin Espoon Tuomarilan koulun peruskorjaushankkeen yhteydessä luotua tietomallia. Tietomallin mallinnustarkkuus sisälsi kantavat ja kantamattomat betonirakenteet mutta ei lämmöneristeitä. Näin jouduttiin tilanteeseen, jossa olevan tietomallin tarkkuus oli riittämätön rakennusfysikaalisen mallinnuksen suorittamiseen. Mallia tarkennettiin mallintamalla puuttuvat lämmöneristeet. Tässä tapauksessa tietomallista siirretty geometria oli riittävän monimutkainen ja näin

ollen saavutettiin hyötyä valmiin mallin käytöstä laskentageometriana, vaikka mallia jouduttiinkin tarkentamaan. Tarkasteltava rakenne olisi voinut yhtä hyvin olla huomattavasti monimutkaisempi sisältäen pieniä yksityiskohtia, kuten termorangan ja usean koolauksen tai liitoksen. Tällöin siirrettävästä geometriasta saatava hyöty olisi huomattavasti suurempi. Tietomallien mallinnustarkkuus ei ole vakio vaan vaihtelee tekniikan alan ja hankkeen yhteydessä sovittujen toimintatapojen mukaan, jolloin myös geometriasta saatava hyötykin vaihtelee. Geometrian siirrosta saatava hyöty onkin rakennusfysikaalisen mallinnuksen suorittajan arvioitava. Arvioinnissa on huomioitava ainakin olevan mallin mallinnustarkkuus ja tarkasteltavan geometrian monimutkaisuus.

Kolmannen osa-alueen tavoitteena oli selvittää, kuinka IFC-tiedoston sisältämä geometria saataisiin siirrettyä Comsoliin. Em. toimintatapa tulee tarpeelliseksi tilanteessa, jossa tietomallinnuksen on suorittanut yrityksen ulkopuolinen toimija, jolloin rakennusfysikaalisten mallinnuksien tekijällä käytössä oleva tietomalli on IFC-tiedostomuodossa. IFC-tiedostona tutkimuksessa käytettiin Ramboll Finland Oy:n päätoimiston ”Ramboll Villagen” Tietomallia. Tutkimusongelmaa lähestyttiin avaamalla IFC-tiedosto Revitillä kuin myös linkittämällä samainen tiedosto. Molemmissa tapauksessa tietomalli pyrittiin synkronoimaan Comsolin kanssa. Revittiin linkitetyn IFC-tiedoston synkronoiminen Comsolin ei onnistunut. Linkitetty malli saatiin näkymään vielä synkronointiasetusten esikatseluikkunassa mutta synkronoinnin yhteydessä Comsol ilmoitti virheestä ja katkaisi synkronoinnin. Virheen syytä ei tässä työssä saatu selville. Revitillä avatun IFC-tiedoston siirtämisessä Comsoliin onnistuttiin kuitenkin paremmalla menestyksellä. Avattu tiedosto tallennettiin Revit-tiedostona, jolloin Revit muutti jokaisen IFC-tiedoston sisältämän elementin natiiviksi Revit-objektiksi. Revit-tiedostoksi muutettu IFC-tiedosto saatiin synkronoitua Comsoliin Synkronoi näkymä toiminnolla. Tiedostotyyppin muutosprosessin yhteydessä tietomalli kuitenkin menetti osan parametreistaan, jolloin tuotettu malli poikkesi myös geometrialtaan alkuperäisestä, esim. osa deltapalkeista hävisi ja ulkoseinien geometria poikkesi alkuperäisestä. IFC-tiedostoa voidaan näin ollen pitää laskentageometrian lähteenä, mutta on kuitenkin huomioitava tiedostotyyppin muutoksesta seuraavat muutokset mallissa. Tässä tapauksessa siirretyn geometrian hyöty kuihtuu entisestään, sillä rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun suorittajan on huomioitava myös em. geometrian muutokset mallinnustarkkuuden ja laskentageometrian monimutkaisuuden lisäksi.

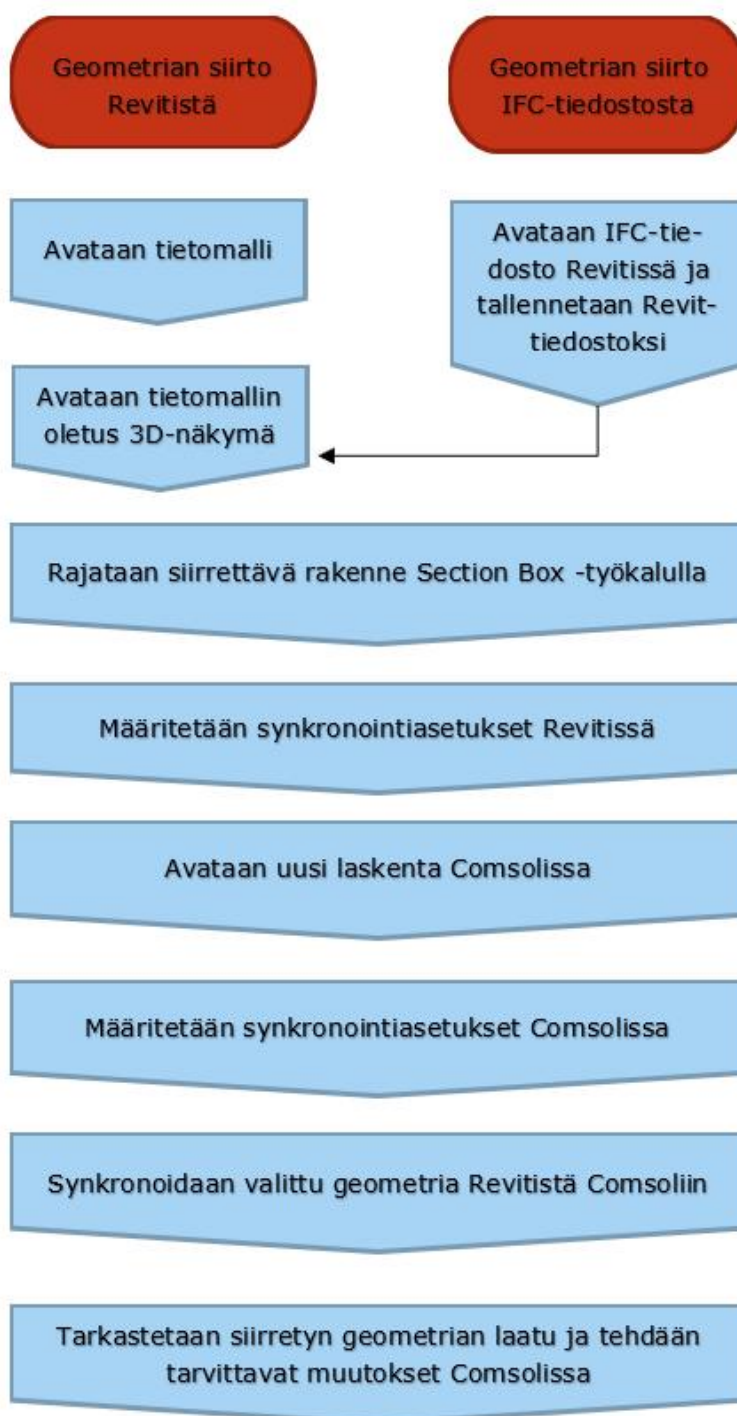
9. Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin, kuinka olemassa olevaa rakennesuunnittelun tietomallia voidaan hyödyntää laskentageometrian luomisessa rakennusfysikaalista mallintamista tehtäessä. Lopputuotteena työstä oli tarkoitus tuottaa toimintatapaohje, kuinka olemassa olevasta tietomallista siirretään geometria Comsoliin. Insinööriyössä pyrittiin vastaamaan seuraaviin kysymyksiin. Aiheutuuko olemassa olevan tietomallin käytöstä laskentageometriana virheitä laskentaan? Onnistuuko valmiista tietomallista geometrian siirto simulointiohjelmaan ja minkälaisia ongelmia prosessissa syntyy? Voidaanko IFC-tiedoston sisältämää geometriaa käyttää laskentageometriana.

Tutkimus toteutettiin käyttäen todellisten rakennushankkeiden tietomalleja. Jotta työn tavoitteeseen päästiin, tuli työntekijän opetella käyttämään kahta ennalta vierasta tietokoneohjelmaa Autodesk Revittiä ja Comsol Multiphysicsiä. Ohjelmien käyttöä harjoiteltiin insinööriyön sisältämän opiskelun lisäksi pienen projektin ja yrityksen sisäisen suunnittelua tukevan rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun yhteydessä. Comsol Multiphysics lisenssin tarjosi Comsol Oy ja Autodesk Revitin ja muiden työssä käytettyjen ohjelmistojen osalta käytettiin Ramboll Finland Oy:n lisenssejä.

Tutkimuksen perusteella tietomallin käyttämiselle laskentageometrian lähteenä löydettiin selkeä tapa, josta saatiin koostettua toimintatapaohje. Toimintatapaohjeen pohjana toimiva geometrian siirtämisen prosessi on esitetty taulukossa 5. Toimintatavasta huomattiin myös olevan selkeästi hyötyä monimutkaisempien geometrioiden luomisessa. IFC-tiedostoa käytettäessä laskentageometrian lähteenä pienenee mahdollisuus saada hyötyä tiedostotyyppin muutoksesta johtuvien geometriavirheiden seurauksena. Laskentatarkastelun suorittajan arvioitavaksi jääkin saadaanko tällöin olemassa olevasta geometriasta hyötyä, vai onko geometria nopeampaa luoda Comsolin geometriatyökalulla. Olemassa olevan geometrian monimutkaisuus ja riittävä mallinnustarkkuus edesauttavat IFC-tiedoston käytöstä saatavan hyödyn mahdollisuutta.

Taulukko 5. Geometrian siirtämisen prosessi.



Lähteet

- 1 Stolt Toni. Korjausrakentamisen tietomallintaminen ja Tekla Structures -komponentit
- 2 Eastman, Teicholz, Sacks & Liston 2011. Handbook of BIM
- 3 FGC:n kotisivut, <https://www.fcg.fi/fin/palvelut/tietomallintaminen>, luettu 28.11.2019
- 4 Rakennustietosäätiö RTS. ym. 2012, RT-1011066 Yleiset tietomallivaatimukset 2012, Osa 1. Yleinen osuus
- 5 Haavisto Ilkka. 2013. Tietomallintaminen korjausrakentamisen rakennesuunnittelussa. Tampere. Diplomityö. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21576/haavisto.pdf?sequence=1>
- 6 Autodeskin kotisivut, <https://www.autodesk.fi/>, luettu 29.12.2019
- 7 Autodesk Revit Help home, <https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ENU/>, luettu 31.12.2019
- 8 Siikanen, Unto 2014. Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy, Helsinki
- 9 Khan Academy kotisivut, www.khanacademy.org, luettu 3.1.2020
- 10 COMSOL Multiphysics kotisivut, www.comsol.com, luettu 3.1.2020
- 11 Thermal Engineering kotisivut, www.thermal-engineering.org, luettu 3.1.2020
- 12 Wolfram Research kotisivut, <http://scienceworld.wolfram.com>, luettu 3.1.2020
- 13 Inkinen, Pentti & Manninen, Reijo & Tuohi, Jukka 2012. Momentti 2: Insinöörifysiikka. Otava, Keuruu.
- 14 Jyväskylän yliopisto koppa, <https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/ako/Veden%20ominaisuudet>, luettu 6.1.2020
- 15 MesserWoland - own work created in Inkscape, based on the graphics by Daniel Stiefelmaier, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1353236>
- 16 Suvanto, Kari 2003. Tekniikan fysiikka 1. Edita Publishing Oy, Helsinki
- 17 Fick, Adolf 1855. "On liquid diffusion." *Journal of Membrane Science*, 33-38. Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-membrane-science>

- 18 Björkholtz, Dick 1987. Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki
- 19 Sisäilmayhdistys ry:n kotisivut, www.sisailmayhdistys.fi, luettu 12.1.2020
- 20 Tampereen yliopiston kotisivut, <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/kosteusanalysointimenetelma/rakennusfysikaaliset-testivuodet/>, luettu 13.1.2020
- 21 Ilmatieteenlaitoksen kotisivut, <https://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>, luettu 13.1.2020
- 22 Vinha, Juha., Laukkarinen, Anssi., Mäkitalo, Mikael., Nurmi, Sakari., Huttunen, Petteri., Pakkanen, Tomi., Kero, Paavo., Manelius, Elina., Lahdensivu, Jukka., Köliö, Arto., Lähdesmäki, Kimmo., Piironen, Jarkko., Kuhno, Vesa., Pirinen, Matti., Aaltonen, Anu., Suonketo, Jommi., Jokisalo, Juha., Teriö, Olli., Koskenvesa, Anssi & Palolahti, Tuomas. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 159
- 23 Vinha, Juha., Laamanen, Pekka., Laukkarinen, Anssi., Pentti, Matti., Årnström, Gunnar., Hemmilä, Kari., Mäkitalo, Mikael., Heljo, Juhani., Jokisalo, Juha., Kalema, Timo., Sundman, Tom L., Tetri, Eino., Ahola, Pirjo., Harjunalainen, Tapani., Laine, Katariina., Laurila, Pirjo., Lindberg, Pentti., Lähdesmäki, Kimmo., Mills, Christopher., Paavilainen, Jarmo., Panschin, Boris., Raad, Hassan., Ronkanen, Mika., Silvennoinen, Petri., Viitanen, Hannu., Wirtanen, Leif., Huttunen, Petteri., Kaartinen, Mikko., Lund, Mia., Manelius, Elina., Ojanen, Maija., Poutilainen, Jani., Ruuska, Tiina., Suonketo, Jommi & Tuominen, Eero. 2014. RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1, rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki
- 24 RIL 107-2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsinki
- 25 SFS-EN ISO 6946:2017:en. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, luettu 29.3.2020
- 26 buildingSMART kotisivut, <https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv2012-paivitystarveselvitys/>, luettu 24.04.2020