

Sami Saari

**Kosteus- ja lämpösimulointi WUFI Pro 4.2.0- ja WUFI 2D 3.3.0
-ohjelmilla**

**Kosteus- ja lämpösimulointi WUFI Pro 4.2.0- ja WUFI 2D 3.3.0
-ohjelmilla**

Sami Saari
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, talonrakennus

Tekijä(t): Sami Saari

Opinnäytetyön nimi: Kosteus- ja lämpösimulointi WUFI Pro 4.2.0- ja WUFI 2D 3.3.0 -ohjelmilla

Työn ohjaaja(t): Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: K 2015 Sivumäärä: 68 + 2 liitettä

Kosteus- ja lämpösimulointi on talon eri rakenteiden kosteus- ja lämpötekni- sen toiminnan tarkastelua ohjelmallisesti. Simuloinnilla voidaan tuottaa laskennallis- ta tietoa rakenteiden käyttäytymisestä ulko- ja sisäilman olosuhteista sekä ma- teriaalien ominaisuuksista johtuen. Tämän tiedon perusteella voidaan arvioida rakenteiden toimivuutta.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa esimerkki yksi- ja kaksiulotteisesta simu- loinnista WUFI Pro- ja WUFI 2D -ohjelmistoilla. Esimerkkirakenteeksi valittiin tavanomainen puurunkoinen ulkoseinärakenne. Tarkoituksena oli laatia esi- merkki, jonka pohjalta uusi käyttäjä pystyy suorittamaan vastaavanlaiset simu- loinnit.

Aluksi WUFI:n mallinnettiin simuloitavaksi valittu ulkoseinärakenne laskenta- verkkoineen. Rakennemallille annettiin alku- ja ympäristöolosuhteet, joiden pe- rusteella se oli vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa. Tämän pohjalta ra- kenteelle suoritettiin simulointi, josta siirrettiin laskentatuloksena lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja valitusta monitorointipisteestä jatkokäsittelyä var- ten Excel-taulukkoon.

Opinnäytetyössä saatiin dokumentoitua tarkasti tavanomaisen ulkoseinäraken- teen simulointia ja ohjelman käyttöä. Työn esimerkkilaskelmia voidaan käyttää ohjekirjamaisina malleina tulevissa simuloinneissa ja ohjelman käytön opette- lussa.

Asiasanat: WUFI, kosteus, lämpö, simulointi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Construction engineering, House Building Engineering

Author(s): Sami Saari

Title of thesis: Moisture and heat simulation by WUFI Pro 4.2.0 and WUFI 2D 3.3.0

Supervisor(s): Kimmo Illikainen

Term and year when the thesis was submitted: S 2015

Pages: 68 + 2 appendices

Moisture and heat simulation is a way to observe how a building structures are working under the heat and moisture conditions. By the simulation it is possible to calculate data about the moisture and temperature in the structures due the outdoor and indoor climates, and also the properties of the materials.

The main point of the thesis was to develop an example of one-dimensional and two-dimensional simulation models by WUFI Pro- and WUFI 2D -programs. The chosen example structure was an ordinary wooden wall structure. The idea was that a new user of the program is able to run the same kind of simulations.

In the beginning the structure being observed was modeled in the WUFI Pro-program. The initial and boundary conditions were set in the model and with all that information the simulation was run for the structure. After the simulation the data of the temperature and relative humidity from the chosen monitoring point was exported to an Excel sheet for analyzing purposes.

In the thesis it was possible to document in detail how to simulate ordinary models in WUFI. It is possible to use those examples models as a guide book for the simulations and for the purpose of learning how to use the program.

Keywords: WUFI, moisture, heat, simulation

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
2 LÄMPÖ	8
2.1 Johtuminen	8
2.2 Konvektio	8
2.3 Säteily	9
2.3.1 Lyhytaaltainen säteily	9
2.3.2 Pitkäaaltainen säteily	10
2.4 Pintavastus	10
3 KOSTEUS	12
3.1 Vesihöyry	12
3.2 Kosteuden siirtymismuodot	12
3.2.1 Diffuusio	12
3.2.2 Konvektio	13
3.2.3 Kapillaarisuus	13
3.2.4 Painovoimainen siirtyminen	14
3.3 Materiaalin kosteuskäyttäytyminen	14
3.3.1 Tasapainokosteus	14
3.3.2 Vesihöyryn diffusiovastuskerroin	15
3.4 Sisäilman kosteuslisä	15
4 KOSTEUSSIMULOINTI WUFILLA	17
4.1 Ilmasto-olosuhteet	17
4.1.1 Sisäilmasto EN 13788	17
4.1.2 Ulkoilmasto	18
4.1.3 Rakennusfysikaalinen testivuosi	18
4.2 Pinnan siirtokertoimet	20
4.2.1 Rakenteen pintavastukset	20
4.2.2 Pinnoitteen vesihöyrynvastus	21
4.2.3 Säteilykertoimet	21
4.2.4 Sateen absorptiokerroin	22
4.3 Laskentaverkko	22
4.4 Materiaalitietojen saatavuus	23

5 ESIMERKKIRAKENTEIDEN SIMULOINTI	24
5.1 Esimerkkirakenne 1	24
5.1.1 Rakennemallin luonti	25
5.1.2 Mallin sijoitus ympäristöön	33
5.1.3 Pinnan siirtokertoimet	34
5.1.4 Alkuolosuhteet	37
5.1.5 Simuloinnin ohjaus	38
5.1.6 Ilmasto	39
5.1.7 Simulointi	41
5.1.8 Tulosten tallennus	43
5.1.9 Simuloinnin tulokset	44
5.2 Esimerkkirakenne 2	46
5.2.1 Geometrian luonti	46
5.2.2 Laskentaverkon määrittäminen	49
5.2.3 Materiaalien valinta	50
5.2.4 Alkuolosuhteet	51
5.2.5 Ympäristöolosuhteet ja pinnan siirtokertoimet	51
5.2.6 Ilmanvaihtolähde	55
5.2.7 Simuloinnin ohjaus	56
5.2.8 Simulointi	57
5.2.9 Tulosten tallennus	58
5.2.10 Simuloinnin tulokset	62
6 POHDINTA	65
LÄHTEET	66
LIITE 1 Esimerkkirakenteiden lähtötietoja	
LIITE 2 Materiaalitietojen lähteitä	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tarkastellaan kosteus- ja lämpösimulointia WUFI:n avulla. Puhuttaessa kosteussimuloinnista tässä työssä tarkoitetaan yhdistettyä kosteus- ja lämpösimulointia. Kosteussimuloinnilla voidaan tuottaa tietoa talon eri rakenteiden kosteus- ja lämpökäyttäytymisestä tietyinä ajan hetkenä muuttuvissa olosuhteissa.

Työn tavoitteena on tuottaa esimerkkisimulointeja, joiden avulla käydään lävitse kosteussimulointia WUFIlla. Simulointeja suoritetaan yksiulotteisena WUFI Pro -ohjelmalla ja kaksiulotteisena WUFI 2D -ohjelmalla. Molemmilla ohjelmaversioilla tehdään yksi simulointi tavanomaisesta ulkoseinärakenteesta. Simuloinnit dokumentoidaan tarkasti opinnäytetyöhön. Tarkoituksena on, että esimerkkisimulointien pohjalta uusi käyttäjä pystyy toistamaan vastaavanlaiset simuloinnit ja ymmärtää valittujen asetusten merkityksen.

Tällä hetkellä on olemassa vain vähän ohjeistusta Suomeksi kosteussimuloimisesta. Yritysten tarpeisiin simulointeja suorittavat yliopistot ja ammattikorkeakoulut sekä pieni määrä insinööritoimistoja. Simulointien tarve tulee kuitenkin kasvamaan tulevaisuudessa, kun siirrytään energiatehokkaampiin rakenteisiin. Kasvaneen energiatehokkuuden seurauksena rakennusfysikaalisesti toimivien rakenteiden suunnittelu on entistä haastavampaa. Ammattimaisesti suoritettu kosteussimulointi on hyvä työkalu rakenteiden tarkasteluun ennen varsinaista rakentamista.

2 LÄMPÖ

Lämpö on lämpötilaeroista johtuvaa energian siirtymistä kahden eri pisteen välillä. Lämmönsiirtyminen voi tapahtua johtumalla, säteilemällä tai konvektion avulla. (Hagentoft 2011, 4.)

2.1 Johtuminen

Johtumisessa energiaa siirtyy molekyylien sisäisen värähtelyliikkeen seurauksena molekyylisestä toiseen. Lämpö pyrkii tasoittumaan eri pisteiden välillä ja tasoittumissuunta on lämpimästä kylmempään päin. Johtumista tapahtuu kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa. (Hagentoft 2001, 4, 162; Siikanen 2014, 40.)

Lämmönjohtavuus on materiaalista riippuvainen arvo. Materiaalin lämmönjohtavuus ei ole vakio, vaan se riippuu materiaalin lämpötilasta ja kosteusolosuhteista. Useimmissa tapauksissa voidaan kuitenkin käyttää materiaalin vakioarvoa, joka ei riipu ympäröivistä olosuhteista. (Hagentoft 2001, 15, 161.)

Johtumista voidaan käsitellä yksiulotteisena ilmiönä, mutta yleensä ilmiö on kaksi- tai kolmiulotteinen. Kaksiulotteista lämmönjohtumista tapahtuu esimerkiksi seinän ja katon liitoksessa. Kolmiulotteista puolestaan kahden seinän ja katon nurkkauksessa. (Hagentoft 2001, 40.)

2.2 Konvektio

Rakennusfysikaalisessa mielessä konvektio tarkoittaa lämmön siirtymistä kahden eri pisteen välillä, yleensä ilman ja joskus veden lämpökapasiteetissa. Esimerkiksi lämmenteestä ulkoseinästä siirtyy lämpöä ilmaan. Tämän jälkeen ilma virtaa luonnollisen tai pakotetun konvektion seurauksena toiseen pisteeseen ja luovuttaa lämmön takaisin kylmempään pintaan. Lämpö siirtyy pinnan ja aineen välillä molekyylien diffuusion ja makroskooppisen ainesirron eli advektion seurauksena. (Hagentoft 2001, 4; Vinha 2010, 51.)

Luonnollisessa konvektiossa ilma siirtyy lämpötilaerosta johtuvan tiheyden muutoksen seurauksena. Lämmin ilma kohoaa kylmää kevyempänä ylöspäin. Pako-

tetussa konvektiossa ilman liikkeen aiheuttaa jokin ulkoinen voima. Rakennusfysiikassa ulkoinen voima on esimerkiksi tuuli tai puhallin. (Hagentoft 2001, 42; Vinha 2010, 51.)

Konvektiossa siirtyvän lämmön määrä riippuu pinnan lämmönsiirtokerroimesta sekä pinnan ja ympäröivän ilman lämpötiloista. Pinnan lämpösiirtokerroin riippuu pinnan geometriasta ja karheudesta, virtauksen luonteesta, virtaavan aineen virtausominaisuuksista ja termodynaamisista ominaisuuksista. Yleensä lämmönsiirtokerroimen määrittämiseksi käytetään likimääräisiä kaavoja, jotka perustuvat pakotetun konvektion tapauksessa tuulen nopeuteen ja luonnollisessa konvektiossa lämpötilaeroihin. (Hagentoft 2001, 45; Vinha 2010, 52.)

2.3 Säteily

Lämpötilaltaan absoluuttisen nolapisteen yläpuolella olevat pinnan säteilevät jatkuvasti. Säteilystä siirtyy lämpöenergiaa sähkömagneettisena aaltona kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä. Säteily ei vaadi minkäänlaista väliainetta, vaan sitä tapahtuu myös tyhjiössä. Pintaan osuvasta säteilystä osa heijastuu, osa absorboituu kappaleeseen ja osa läpäisee kappaleen. Rakennusfysiikan tapauksessa säteilyn ei oleteta läpäisevän kiinteitä kappaleita lukuun ottamatta lasia. Kappaleesta lähtevän nettosäteilyn määrä voidaan laskea säteilyn lämmönsiirtokerroimen avulla. (Hagentoft 2001, 46-48; Vinha 2010, 10, 64-68.)

2.3.1 Lyhytaaltoinen säteily

Lyhytaaltoista säteilyä on auringonsäteily. Säteily voi olla suoraa säteilyä tai ilmakehän hiukkasista ja molekyyleistä heijastunutta diffuusia säteilyä. Auringon säteily voi heijastua myös maasta ja toisista rakennuksista, mutta tällöin se muuttuu pitkäaaltoiseksi säteilyksi. (Vinha 2010, 64.)

Pinnan absorboiman lyhytaaltoisen säteilyn määrä riippuu sen lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroimesta. Absorptiokerroimen arvo korreloi hyvin pinnan värin kanssa. Tummempi pinta absorboi enemmän säteilyä kuin vaalea. Koska säteilyn läpäisevyyden oletetaan olevan nolla, se osuus säteilystä, joka ei ab-

sorboidu kappaleeseen, heijastuu pitkäaaltoisena säteilynä eteenpäin. (Hagentoft 2001, 48; Vinha 2010, 69.)

2.3.2 Pitkäaaltoinen säteily

Pinnan itsensä säteilemä säteily on pitkäaaltoista. Pinnan säteilemän säteilyn määrää kuvataan emissiviteetillä. Pinnan emissiivisyys kuvaan kappaleen kykyä säteillä ympäristöönsä suhteessa ideaalisen mustan kappaleen säteilymäärään. Yläraja säteilylle on siis ideaalikappaleen säteilymäärä, johon muiden pintojen säteilyä verrataan. (Hagentoft 2001, 48-50; Vinha 2010, 64-66.)

Kappaleiden pinnat ovat vuorovaikutuksessa muiden kappaleiden pintojen kanssa. Kaikki kappaleet säteilevät pitkäaaltoista säteilyä, mutta samalla myös absorboivat muiden kappaleiden lähettämää säteilyä. Pinnan emissiivisyyden ja absorptiokertoimen oletetaan olevan sama, ja niiden arvot vaihtelevat yleensä välillä 0,8-0,95. Koska vuorovaikutuksessa olevat pinnat sekä lähettävät että vastaanottavat säteilyä, on nettosäteilymäärä melko vähäinen. Lähes sama määrä säteilyä, jonka pinta säteilee pois, vastaanotetaan muiden pintojen säteilemänä. (Details:LongWaveExchange. 2008; Vinha 2010, 64-69.)

Sen lisäksi, että pinnat ovat vuorovaikutuksessa toisten pintojen kanssa, ne ovat vuorovaikutuksessa myös ilmakehän kanssa. Toisin kuin muut säteilevät pinnat, ilmakehä säteilee vähemmän lämpöä takaisin kuin esimerkiksi kattopinta säteilee ilmakehään. Ilmakehän vastasäteilyn määrä on riippuvainen muun muassa pilvisyydestä. Mitä pilvisempi taivas on, sitä enemmän ilmakehä säteilee lämpöä takaisin. Päiväsaikaan asia ei yleensä aiheuta ongelmaa, kun auringon lyhytaaltoinen säteily lämmittää pintoja. Yöaikaan ja erityisesti kirkkaina öinä säteilyhäviö ilmakehään voi kuitenkin viilentää pintoja paljonkin. (Details:LongWaveExchange. 2008.)

2.4 Pintavastus

Pinnan läheisyyteen muodostuu ohut ulkoilmaa hieman lämpimämpi ilmakerros, johtuen pinnasta poistuvasta lämmöstä. Lämpöä poistuu johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Käytännössä johtumalla poistuvan lämmön osuus on kuitenkin

kin niin pieni, että sitä ei oteta huomioon. Tätä lämpimämpää ilmakerrosta kuvataan yleensä lämmönvastuksena. (Hagentoft 2001, 167-168; Vinha 2010, 10.)

Pinnan lämmönvastus koostuu siis konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokertoimesta. Lämmönvastuksen suuruus riippuu edelle esitetyiden konvektion ja säteilyn suuruudesta pinnassa. (Hagentoft 2001, 167-168.)

Pinnan lämmönvastuksena voidaan yleensä käyttää likimääräisiä arvoja, jotka riippuvat ainoastaan lämpövirran suunnasta. Kyseiset likimääräiset arvot on laskettu erikseen sisä- ja ulkopuolen pintavastuksille. (Taulukko 1.)

TAULUKKO 1. Pintavastuksien likiarvoja (Vinha 2010, 11)

Pintavastus, $m^2 \cdot KW$	Lämpövirran suunta		
	ylöspäin	vaakasuora	alaspäin
Sisäpuolen pintavastus R_{si}	0,10	0,13	0,17
Ulkopuolen pintavastus R_{se}	0,04	0,04	0,04

Ulkopuolen pintavastuksena voidaan käyttää myös pinnan suuntaisen tuulen nopeuden perusteella laskettuja likiarvoisia lukuja (taulukko 2) (Vinha 2010, 11).

TAULUKKO 2. Pintavastuksen riippuvuus pinnan suuntaisesta tuulen nopeudesta (Vinha 2010, 11)

Tuulen nopeus m/s	Ulkopinnan pintavastus R_{se} , $m^2 \cdot KW$
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

3 KOSTEUS

Veden kolme olomuotoa ovat vesihöyry, vesi ja jää. Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa kaikki kolme olomuotoa ovat edustettuina. Kun puhutaan kosteudesta, tarkoitetaan yleensä kuitenkin vain vesihöyryä tai vettä. Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä veden esiintymistä jäänä. (Hagentoft 2001, 87; Björkholtz 1997, 52.)

3.1 Vesihöyry

Vesihöyry ja kuiva ilma yhdessä muodostavat ilmaksi kutsutun kaasuseoksen. Vesihöyryn määrä seoksessa voidaan ilmoittaa vesihöyryn osapaineena sekä suhteellisenä ja absoluuttisena kosteutena. (Björkholtz 1997, 43; Siikanen 2014, 68.)

Vesihöyryn osapaineella tarkoitetaan vesihöyryn painetta kaasuseoksessa. Lämpötilan noustessa myös vesihöyryn osapaine kasvaa, vaikka vesihöyrymäärä pysyisi ennallaan. Absoluuttinen kosteus kertoo ilmassa olevan vesihöyryn määrän kilogrammoina kuutiometrissä ilmaa. Tietyn lämpöiseen ilmaan mahtuu korkeintaan tietty enimmäismäärä vesihöyryä. Vesihöyryn enimmäismäärää ilmaseoksessa kutsutaan kyllästyskosteudeksi. Suhteellinen kosteus tarkoittaa puolestaan sitä, kuinka monta prosenttia vesihöyryä ilmassa on siihen mahtuvasta enimmäismäärästä. Toisin sanoen suhteellinen kosteus ei voi nousta yli 100 %:n. (Björkholtz 1997, 43; Siikanen 2014, 68-69.)

3.2 Kosteuden siirtymismuodot

Kosteus voi siirtyä kahden eri pisteen välillä diffuusiolla, konvektiolla, kapillaarisesti sekä painovoiman seurauksena. Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa kaikki edellä mainitut siirtymismuodot ovat mahdollisia. (Hagentoft 2001, 5.)

3.2.1 Diffuusio

Diffuusiolla tarkoitetaan vesihöyrypitoisuuksien tasoittumista. Kun vesihöyry on jakaantuneena epätasaisiin pitoisuuksiin ilmassa, pyrkivät vesimolekyylit siirtymään niin, että tuloksen syntyy tasaisesti jakaantunut seos. Tyypillisesti tarkas-

tellaan rakenteiden lävitse diffuusiolla siirtyvää kosteutta, jolloin diffuusion suunta on suuremmasta vesihöyryn osapaineesta pienempään päin. Yleensä kosteutta siirtyy lämpimämmästä kylmempään päin, mutta koska osapaine riippuu absoluuttisesta kosteudesta ja lämmöstä, voi kosteutta siirtyä myös toiseenkin suuntaan. (Siikanen 2014, 68-70.)

3.2.2 Konvektio

Ilmavirran siirtyessä paikasta toiseen kokonaispaine-eroista johtuen myös siinä oleva vesihöyry siirtyy osana kaasuseosta. Ilmavirrassa voi siirtyä myös neste-mäisessä muodossa olevaa vettä. Esimerkiksi kovalla tuulella vettä voi työntyä rakenteisiin ilmavirran mukana. Konvektiolla tapahtuvaan kosteuden siirtoon tarvitaan siis paine-ero, josta aiheutuu ilman siirtyminen. Paine-ero voi aiheutua muun muassa lämpötilaeroista, tuulesta, ilmanvaihtolaitteista ja puhaltimista. (Björkholtz 1997, 57; Hagentoft 2001, 5; Siikanen 2014, 71-72.)

Rakenteissa konvektiota voi tapahtua niissä olevien reikien ja rakojen kautta sekä hyvin ilmaa läpäisevien materiaalien lävitse. Konvektiota voi esiintyä myös rakenteen sisällä tiheyseroista aiheutuvana luonnollisena konvektiona. (Siikanen 2014, 71-72.)

3.2.3 Kapillaarisuus

Veden siirtyminen kapillaarisesti tapahtuu aineen huokosissa. Vettä voi siirtyä kapillaarisesti kaikkiin suuntiin. Kapillaarinen veden siirtyminen voidaan selittää helpoiten laittamalla ohut putki kosketuksiin veden kanssa. Veden ja putken sisäseinämän välillä vaikuttaa vetovoima eli adheesio, joka vetää seinämän vieressä olevia vesimolekyylejä ylöspäin. Samaan aikaan veden pinnassa vaikuttaa sisäinen vetovoima eli koheesio, joka pitää vettä kasassa. Toisin sanoen adheesio vetää ylöspäin putken laidalla olevia vesimolekyylejä, jotka vetävät muita vesimolekyylejä perässään koheesio-avulla. (Torvikoski 2013; Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus. 2004, 22-24.)

Koheesiosta johtuva pystysuuntainen komponentti on kapillaarivoima. Nousu jatkuu, kunnes veden paino on yhtä suuri kuin vaikuttava kapillaarivoima. Kapillaarisuus selitetään yleensä huokosalipaineen avulla, jonka suuruus on putkeen nousseen veden aiheuttamaa hydrostaattinen paine putken alapinnan tasossa. Huokoisessa materiaalissa voidaan ajatella olevan tällaisia ohuita putkia, joita pitkin vesi pääsee siirtymään kapillaarisesti. (Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus. 2004, 22-24; Torvikoski 2013.)

3.2.4 Painovoimainen siirtyminen

Maan vetovoiman vaikutuksesta vesi valuu alaspäin. Rakennuksen suunnittelussa on otettava huomioon, että alaspäin valuva vesi ei pääse tunkeutumaan sisälle rakennuksen ulkopinnoilta. Vetovoiman vaikutus aiheuttaa myös vedenpaineen pohjavesipinnan alapuolella. Jos pohjavesipinta nousee tavanomaista korkeammalle, se voi aiheuttaa helposti veden tunkeutumisen rakenteisiin. (Hagertoft 2001, 5; Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus. 2004, 26-27.)

3.3 Materiaalin kosteuskäyttäytyminen

Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa materiaalit ovat lähes poikkeuksetta tekemisessä kosteuden kanssa. Liiallinen kosteus mahdollistaa esimerkiksi olosuhteet materiaalien homehtumiselle. Lisäksi materiaalien ominaisuudet voivat muuttua kosteuden muutoksista johtuen. Onkin tärkeä ymmärtää materiaalien kosteuskäyttäytymistä, jotta pystytään suunnittelemaan toimivia rakenteita. (Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus. 2004, 34.)

3.3.1 Tasapainokosteus

Materiaalissa liikkuu kosteutta edellä mainittujen siirtymismuotojen avulla. Kosteuden siirtymistä materiaaliin kutsutaan absorptioksi, kosteuden liikkumista materiaalin sisällä kutsutaan sorptioksi ja kosteuden poistumista materiaalista sanotaan desorptioksi. Hygroσκοoppinen materiaali pystyy imemään itseensä kosteutta ilmassa olevasta vesihöyrystä sekä luovuttamaan sitä takaisin ilmaan. (Siikanen 2014, 77.)

Materiaali siis asettuu tasapainokosteuteen ympäröivän ilman olosuhteiden perusteella. Materiaalin ilmasta sitoman kosteuden määrää riippuu aineen ominaisuuksista sekä ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta, lisäksi lämpötilalla on asiaan vähäinen vaikutus. Hygrooskooppisesti sitoutuvan kosteuden määrä vaihtelee suuresti eri materiaalien välillä. Materiaalin kykyä sitoa itseensä kosteutta kuvataan sorptiokäyrällä eli kosteuskapasiteettifunktiolla, joka ilmaisee materiaalissa olevan kosteuden määrän tietyssä suhteellisen kosteuden arvossa. (Details:MoistureStorageFunction. 2013; Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus. 2004, 36-38; Siikanen 2014 77-78.)

3.3.2 Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin

Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin kertoo seisovan ilman vesihöyryläpäisevyyden ja materiaalin vesihöyryläpäisevyyden suhteen. Vesihöyryn läpäisevyydellä kuvataan vesimäärää, joka läpäisee aikayksikössä pituusyksikön paksuisen ja pintayksikön suuruisen homogeenisen ainekerroksen. Vesihöyrypitoisuuksien ero eri puolilla ainekerrosta on yksikön suuruinen. (Manelius 2013, IX.)

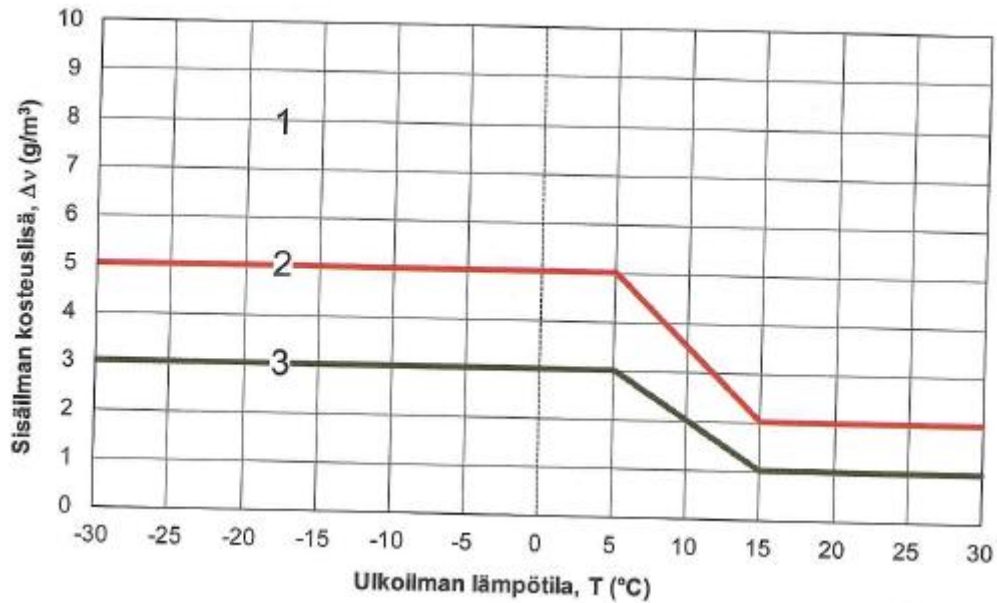
Materiaalin diffuusiovastuskerroin kuvaa sen vesihöyryn liikettä vastustavaa ominaisuutta. Diffuusiovastuskerroin ei riipu materiaalin paksuudesta. Materiaalin diffuusiovastuskerroin voi muuttua ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksista johtuen paljonkin. Erityisesti puupohjaisten rakennuslevyjen diffuusiovastuskerroin riippuu huomattavasti ilman suhteellisesta kosteudesta. Yleensä laskelmissa oletetaan kuitenkin diffuusiovastuskerroin vakioksi. (Manelius 2013, 8; Siikanen 2014, 72-73.)

3.4 Sisäilman kosteuslisä

Rakennuksen sisälle tulee kosteuslisää rakennuksen normaalista käytöstä johtuen. Tämä kosteuslisä tulee ottaa huomioon rakennusfysiikallisissa tarkastelemissa. Kosteuslisästä johtuen sisäilman kosteusmäärä on yleensä suurempi verrattuna ulkoilmaan. Suurimmillaan kosteuslisä on talvella, kun vietetään paljon aikaa sisällä ja tiloja ei tuuleteta niin usein. (RIL 107-2012. 2012, 23-24.)

Kosteuslisän määrästä on olemassa kansainvälisiä standardeja, mutta sen suuruutta Suomessa on tutkittu erillisellä tutkimuksella, jonka perusteella tulisi käyt-

tää hieman standardeista poikkeavia luku-arvoja. Kosteusluokat on jaettu rakennuksen tyypin ja käyttötarkoituksen mukaan kolmeen eri luokkaan. Kovimman kosteusrasituksen alaisessa luokassa 1 tulisi käyttää aina tapauskohtaisesti arvioituja luku-arvoja. Normaalissa käytössä olevat asuinrakennukset kuuluvat luokkaan 2 ja vapaa-ajan asunnot sekä muut vähäisellä käytöllä olevat rakennukset kuuluvat luokkaan 3. (Kuva 1.) (RIL 107-2012. 2012, 23-24.)



KUVA 1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot Suomessa (RIL 107-2012. 2012, 24)

4 KOSTEUSSIMULOINTI WUFILLA

WUFI on kosteuden- ja lämmönsiirron simulointiohjelma, jonka on valmistanut Saksalainen Fraunhofer institut für bauphysik. Rakenteen kosteuskäyttäytyminen on aina yhteydessä myös rakenteen lämpökäyttäytymiseen, jolloin puhuttaessa kosteussimuloinnista tarkoitetaan aina yhdistettyä kosteus- ja lämpösimulointia. Kosteussimuloinnilla voidaan arvioida rakenteen kosteuskäyttäytymistä ja tutkia esimerkiksi kuivumisaikoja, kosteuden kertymistä rakenteisiin ja homehtumisriskiä. (WUFI - What's that?. 2013.)

WUFI suorittaa simuloinnit epästationäärisessä eli ajasta riippuvassa tilassa, jolloin olosuhteet rakenteen molemmiin puoliin voivat muuttuvat jatkuvasti. Lämmönsiirtomekanismeista WUFI ottaa huomioon lämmön johtumisen, lyhytaaltoisen auringon säteilyn, pitkäaaltoisen säteilyn aiheuttaman jäähtymisen sekä veden faasimuutoksista johtuvan lämmönsiirtymisen. Kosteudensiirtomuodoista WUFI ymmärtää vesihöyryn diffuusion, liuoksen diffuusion, kapillaarisen siirtymisen sekä pintadiffuusion. (What is WUFI?. 2008.)

4.1 Ilmasto-olosuhteet

Simulointi alkaa ennalta määritetyistä kosteuden ja lämmön alkuolosuhteista. Ohjelma ottaa huomioon materiaalien sisällä tapahtuvan kosteuden- ja lämmönsiirron lisäksi molemmista rajapinnoista tapahtuvan siirron pinnan ja ympäristön välillä. Koska kyseessä on rakennusfysikaalinen simulointi, rajapinnat rajautuvat yleensä ulko- ja sisäilmaan. Ajasta riippuvina olosuhteina muuttuvat ne jatkuvasti määritettyjen ilmastotiedostojen mukaisesti. (Climate Data. 2012.)

4.1.1 Sisäilmasto EN 13788

Sisäilmasto voidaan määritellä esimerkiksi standardin EN 13788 mukaisesti. Tällöin sisäilman suhteellinen kosteus johdetaan ulkoilmasta. Sisäilmassa ei ole muita laskentaan vaikuttavia tekijöitä lämmön ja suhteellisen kosteuden lisäksi. Johdettavaksi ilmastoksi voidaan valita joko laskennassa käytettävä ulkoilma tai jokin toinen ulkoilma. Ulkoilman olosuhteiden lisäksi sisäilmastoon vaikuttaa käytettävä sisäilman kosteuslisän luokka. Käyttäjällä voi valita neljästä ennalta

määritetystä kosteuslisän luokasta tai määritellä kosteuslisän itse. Sisäilman lämmön osalta valitaan vakioarvo. (Dialog: Climate. 2009.)

4.1.2 Ulkoilmasto

Ulkoilma voidaan valita WUFI:n mukana tulevista ilmastotiedoista, joita on kerätty ympäri maapallon. Jotkin mukana olevista ilmastotiedoista eivät sisällä kaikkia tietoja, joita WUFI voi hyödyntää laskelmissa. Jotta WUFI voisi suorittaa mahdollisimman tarkan simuloinnin, tulisi sillä olla käytössä seuraavat tiedot:

- lämpötila
- suhteellinen kosteus
- sademäärä
- tuulen nopeus
- tuulen suunta
- auringon lyhytaaltoisen säteilyn määrä
- ilmakehän pitkäaaltoisen vastasäteilyn määrä.

Vähimmäisvaatimus käytettävissä oleville tiedoille ovat tieto lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Tällöin käyttäjän tulee itse arvioida tietojen riittävyys mallinnustapauksesta riippuen. (Climate Data. 2012; Creating Weather Files. 2013.)

4.1.3 Rakennusfysikaalinen testivuosi

FRAME-projektin yhteydessä määritettiin yhdessä Ilmatieteen laitoksen kanssa rakennusfysikaaliset testivuodet, jotka vastaavat kriittisiä vuosia rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta Suomen ilmastossa. Mitoittava rakennusfysikaalinen testivuosi määritettiin todellisista olemassa olleista vuosista. (Vinha - Laukkarinen - Mäkitalo - Nurmi - Huttunen - Pakkanen - Kero - Manelius - Lahdensivu - Köliö - Lähdesmäki - Piironen - Kuhno - Pirinen - Aaltonen - Suonketo - Jokisalo - Teriö - Koskenvesa - Palolahti 2013, 44.)

Mitoittava vuosi voi vaihdella erilaisista rakenteista ja rakenteen toimintakriteereistä johtuen. Tästä syystä FRAME-projektin yhteydessä määritettiin kaksi ny-

kyilmaston testivuotta, jotka ovat Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Rakenteiden toimintakriteereinä pidettiin homeen kasvua ja kondensoitumista. Jokioisen testivuosi on kriittinen silloin, kun rakenne ei ole suoranaisesti alttiina sateelle esimerkiksi tuuletusvälillisestä ulkoverhouksesta johtuen. Vantaan testivuosi on kriittinen, kun sade pääsee suoranaisesti vaikuttamaan rakenteen kosteuskäyt-
tämiseen. (Taulukko 3.) (Vinha 2013, 44-45.)

TAULUKKO 3. Rakennusfysikaaliset testivuodet (Vinha 2013, 45.)

Rakennetyypit	Testivuosi		
	Nykyilmasto	2050 ilmasto	2100 ilmasto
Rakenteet, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. <u>Esimerkkirakenteita:</u> - puu- ja metalliverhotut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet - yläpohjat, joissa on vesikate - ryömintätilaiset alapohjat	<i>Jokioinen 2004</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: pohjoinen ²	<i>Jokioinen 2050</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: pohjoinen ²	<i>Jokioinen 2100</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: pohjoinen ²
Rakenteet, joissa sade ja ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttavat niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan <u>Esimerkkirakenteita:</u> - tiiliverhotut ulkoseinät - eristerapatut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - käännettyt katot	<i>Vantaa 2007</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: etelä	<i>Vantaa 2050</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: etelä	<i>Vantaa 2100</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: etelä

¹ Rakenteesta riippuen kumpi tahansa testivuosista voi olla kriittisempi. Rakenteen toiminta on syytä tarkistaa kummallakin testivuodella.

² Rakenteen ulkopinnan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa kriittisin ilmansuunta voi olla myös joku muu kuin pohjoinen (ks. luku 4.5.3).

Projektin yhteydessä määritettiin myös tulevaisuuden ilmaston rakennusfysikaalisia testivuosia. Testivuosiksi valittiin vuodet 2030, 2050 ja 2100. Testivuosien muunnoksessa käytettiin kohtuullisen pessimististä A2 kasvihuonekaasuskenaariota. Tästä johtuen tulevaisuuden ilmastojen testivuosien pitäisi olla varmal-
la puolella kosteusteknisessä tarkastelussa. (Ruosteenoja - Jylhä - Mäkelä -
Hyvönen - Pirinen - Lehtonen 2013, 9; Vinha 2013, 70-72.)

Rakennusfysikaaliset testivuodet ovat saatavilla osoitteessa

<http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>. Testivuodet ovat prn-tiedostoina, joten ne pitää siirtää Exceliin, jotta niitä voidaan käyttää

WUFIssa. Exceliin vienti onnistuu "Ohjattu tekstin tuominen" -työkalun avulla. WUFI:n käyttämäksi WAC-tiedostoksi säätiedot muutetaan ohjelman tarjoaman CreateClimateFile.xls-tiedoston avulla. WAC-tiedoston tarvitsemien tietojen ja testivuosien tietojen vastaavuus on esitelty taulukossa 4. (Creating *.WAC Weather Files. 2012; Jylhä 2015; Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. 2013.)

TAULUKKO 4. Rakennusfysikaalisen testivuoden ja WAC-ilmastotiedoston tietojen vastaavuus (Creating Weather Files. 2013; Jylhä 2015; Ruosteenoja 2013, 26)

Rakennusfysikaalinen testivuosi	WAC-ilmastotiedosto
Lämpötila(°C)	Temperature [°C]
	Air Temperature
Suhteellinen_kosteus(%)*	Air Humidity
	Rel. Humidity [0..1]
Tuulen_nopeus(m/s)	Wind Speed [m/s]
	Skalar Average
Tuulen_suunta(astetta)	Wind Direction [°]
	north = 0; clockwise
Kokonaissäteily_vaakapinnalle(W/m2)	Radiation [W/m ²]
	Solar Global Horiz.
Hajasäteily_vaakapinnalle(W/m2)	Radiation [W/m ²]
	Solar Diffuse Horiz.
Sademäärä(mm/h)	Rain [Ltr/m ² h]
	Normal Rain
*Arvot pitää jakaa 100:lla	

4.2 Pinnan siirtokertoimet

WUFIssa määritetään pintojen siirtokertoimet suhteessa ympäröivään ilmastoon. Ne määritetään erikseen ulko- ja sisäilmastolle. (Dialog: Surface Transfer Coefficients. 2009.)

4.2.1 Rakenteen pintavastukset

Pintavastukseksi voidaan määrittellä ulkoilman osalta vakioarvo tai käyttää tuulesta riippuvaa arvoa. Tuulesta riippuvan arvon käyttö edellyttää tietysti, että käytetyssä ulkoilmassa on tieto tuulen nopeudesta ja suunnasta. Sisäilman

osalta on mahdollista käyttää ainoastaan vakioarvoa. (Dialog: Surface Transfer Coefficients. 2009.)

4.2.2 Pinnoitteen vesihöyrynvastus

Sekä sisä- että ulkopinnoille voidaan määrittää myös SD-arvo, joka vastaa rakenteen uloimmalla pinnalla olevan pinnoitteen tai pinnoitteiden vesihöyryn diffuusiosta. Tällöin ei tarvitse erikseen mallintaa rakenteeseen yksittäistä, mahdollisesti hyvin ohutta rakennekerrosta, jolla ei ole merkitystä rakenteen lämpösimuloinnin kannalta. SD-arvolla voidaan simuloida esimerkiksi maalipintaa, tapettia tai höyrynsulkukalvoa. (Details:SurfaceCoatings. 2013; Sd value vs. explicit layer 2013.)

SD-arvon käytössä tulee kuitenkin huomioida, että se vastustaa ainoastaan diffuusiolla tapahtuvaa kosteuden siirtymistä. Jos ulkoseinälle tuleva tiivis pinnoite määritetään ainoastaan SD-arvon avulla, se voi aiheuttaa epärealistisia kosteusolosuhteita, koska tällöin pintaan osuva vesisade pääsee siirtymään kapillaarisesti rakenteen sisään, pinnoitteen sitä estämättä. Rakenteen kuivuminen ulospäin tapahtuu kuitenkin diffuusiolla, jonka pinnoite kuitenkin tehokkaasti estää. Todellisuudessa erillinen rakennekerros olisi estänyt myös kosteuden siirtymistä kapillaarisesti rakenteeseen. SD-arvoa käytettäessä vesisade tulisi jättää kokonaan pois. (Details:SurfaceCoatings. 2013; Sd value vs. explicit layer 2013.)

4.2.3 Säteilykertoimet

Ulkopinnalle tulee määrittää myös säteilyn absorptio- ja emissiokertoimet. Lyhytaaltoisen absorptiokertoimen käyttö edellyttää, että ilmastotiedostossa on mittautustietoa auringonsäteilystä. Pitkäaaltoisen säteilyn osalta WUFI olettaa, että nettosäteily määrä pinnan ja ympäristön välillä otetaan huomioon pintavastuksessa. Jos yöaikaista säteilyhäviötä ilmakehän ja pinnan välillä ei tarvitse ottaa huomioon, voidaan emissiokerroin asettaa nolaksi. (Dialog: Surface Transfer Coefficients. 2009.)

Jos säteilyhäviö halutaan ottaa huomioon, asetetaan pinnalle emissiokerroin. Tällöin tulee varmistaa että käytetyssä ilmastodatassa on tieto ilmakehän vas-

tasäteilyn määrästä. Jos tätä tietoa ei ole tarjolla, voidaan vastasäteilyn määrä arvioida käyttämällä explisiittistä säteilytasetta. Vastasäteilyn määrän laskemiseksi WUFI tarvitsee kertoimet maan lyhytaaltoisesta heijastuksesta, maan pitkäaaltoisesta emissiviteetistä, maan pitkäaaltoisesta heijastuksesta ja pilvisuysindeksistä. Pilvisuysindeksi voidaan antaa ilmastotiedostossa tai vakioarvona. Edellä mainittujen säteilyhäviöiden käytössä tulee huomioida, että ne ovat vain karkeita arvioita säteilyhäviön määrästä. Erityisesti käytettäessä pilvisuysindeksinä vakioarvoa tulee tuloksiin suhtautua varauksella. WUFI suosittelokin suorittamaan simuloinnit ilman säteilyhäviön huomioon ottamista, jos yöaikaisella jäähtymisellä ei ole suurta merkitystä rakenteen kosteuskäyttäytymisen kannalta. (Details:LongWaveExchange. 2008; Dialog: Surface Transfer Coefficients. 2009.)

4.2.4 Sateen absorptiokerroin

Sateen absorptiokerroin ottaa huomioon, että kaikki pintaan tuleva vesisade ei voi siirtyä kapillaarisesti rakenteeseen, vaan osa sateesta kimpoaa seinäpinnasta pois osuessaan siihen. Vaakatasossa olevan pinnan tapauksessa kerroin on yleensä yksi, koska pinnasta pois kimpoava vesi tippuu joka tapauksessa takaisin pintaan. Pystypinnoille voidaan yleensä käyttää arvoa 0,7, mutta simulointeja voidaan tarvittaessa suorittaa myös muilla arvoilla. (Details:RainReductionFactor. 2008.)

4.3 Laskentaverkko

Rakennemalliin määritetään aina laskentahila eli laskentaverkko. Rakenne jaetaan WUFI Pro -ohjelmassa verkon avulla elementteihin yhdessä ulottuvuudessa. WUFI 2D -ohjelmassa malli jaetaan elementteihin x- ja y-suunnassa. WUFI suorittaa kosteus- ja lämpölaskelmat sillä oletuksella, että olosuhteet ovat vakiot yksittäisen elementin alueella. Tämä mahdollistaa kosteus- ja lämpövirtojen ratkaisun numeerisesti. (1D:Dialog Assembly. 2009; 2D:Dialog Grid. 2008.)

WUFI voi määrittää laskentaverkon automaattisesti, jolloin käyttäjän tulee ainoastaan valita, onko laskentaverkko karkea, keskitiheä vai tiheä. Lisäksi WUFI 2D -ohjelmassa käyttäjä voi valita yksittäisessä rakennekerroksessa olevan vä-

himmäismäärän elementtejä sekä koko rakenteen laskentaverkon muodostamiseen käytössä olevien elementtien määrään. WUFI Pro 4.2.0:ssa on rajoitettu elementtien määräksi koko rakenteelle 100. Myöhemmissä versioissa ja käytetyssä WUFI 2D:n versiossa tätä rajoitetta ei ole. Suurimassa osassa tapauksista WUFIn luoma automaattinen verkko on riittävän hyvä. (1D:Dialog Assembly. 2009; 2D:Dialog Grid. 2008.)

4.4 Materiaalitietojen saatavuus

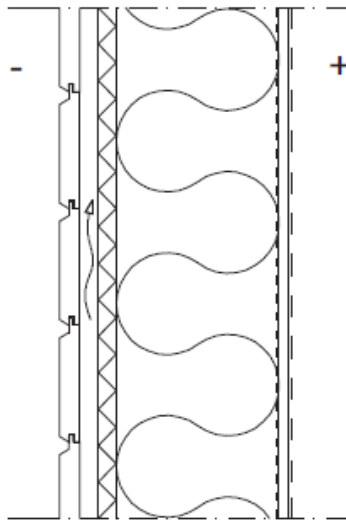
WUFI tarjoaa omassa tietokannassaan kohtuullisen laajan valikoiman eri materiaaleja. Opinnäytetyön aikana löydettiin lisää materiaaleja useista eri lähteistä. Materiaalilähteitä on listattu liitteeseen 2.

5 ESIMERKKIRAKENTEIDEN SIMULOINTI

WUFI:n käytön esittelemiseksi opinnäytetyössä simuloitiin valittu esimerkkirakenne yksi- ja kaksikulotteisena. Simuloinneissa käytettiin WUFI Pro 4.2.0.421- ja WUFI 2D 3.3.0.35 -ohjelmia. Nimensä mukaisesti WUFI 2D -ohjelmaa käytetään 2D-mallien simulointiin ja WUFI Pro -ohjelmalla simuloidaan 1D-malleja.

5.1 Esimerkkirakenne 1

Ensimmäiseksi simuloitiin WUFI Prolla perinteinen ulkoseinärakenne RT US 701 (kuva 2) (RT 82-11006. 2010, 24).



Rakennekerrokset:

28 mm	Pintäkäsittely rakennusselostuksen mukaan
22...25 mm	Ulkoverhous rakennusselostuksen mukaan, ulkoverhouslauta (vähintään 24 mm)
	Tuuletusväli
25 mm	Pystylaudat , 22...25 mm k 600 kiinnityslaudat runkotolppien kohdilla
223 mm	Tuulensuoja , mineraalivilla, $\lambda_{Design}=0,033$ W/mK
	Kantava rakenne rakennesuunnitelman mukaan, puurunko 48x223 k 600
	Lämmöneriste , 223 mm mineraalivilla, $\lambda_{Design}=0,036$ W/mK
0,2 mm	Ilman- ja höyrynsulku , polyeteenimuovikalvo, saumat ilma- ja höyrytiivit
9...15 mm	Rakennuslevy , esimerkiksi vaneri, lastulevy, kartonkipintainen kipsilevy
	Seinäpinta ja pintäkäsittely huoneselosteen mukaan

KUVA 2. Ulkoseinärakenne RT US 701 (RT 82-11006. 2010, 24)

Simuloinnissa käytettiin ensisijaisesti suomalaisista lähteistä löytyviä materiaali-tietoja, koska ne vastaavat parhaiten meillä käytettäviä rakennusmateriaaleja. Esimerkkirakenteen lähtötietoja taulukoitiin liitteeseen 1 ja materiaalilähteitä listattiin liitteeseen 2.

5.1.1 Rakennemallin luonti

Aluksi lisättiin simuloinnin suorittamiseksi vaadittavat materiaalit ohjelman tietokantaan. Ohjelman materiaalitietokannasta valittiin jokin materiaali ja klikattiin ikkunasta kohtaa "Uusi". (Kuva 3.)

Uusi						
Muokkaa		Poista		Muokkaa luetteloa		
Lähde	Fraunhofer-IBP - Holzkirchen; Saksa					
Luettelo	Kaikki luettelot					
Nimi	Tiheys [kg/m ³]	Huok. [m ² /m ³]	L. kap. [J/kgK]	Lämm.joht. [W/mK]	Diff.vas.ker. [-]	
Mineraalinen eristemateriaalilevy	115	0,95	850	0,043		3,4
Mineraalirappaus	1900	0,24	850	0,8		25
Mineraalivilla (Lämmönj. 0,04 W/mK)	60	0,95	850	0,04		1,3
Obernkirchner Hiekkakivi	2150	0,14	850	2,3		32

KUVA 3. Sattumanvaraisen materiaalin valinta uuden lisäämiseksi

Tämän jälkeen pystyttiin muokkaamaan lisättävän materiaalin tiedot avautuvaan ikkunaan. Kaikki materiaalista saatavilla olevat tiedot syötettiin ensimmäiseen ikkunaan. (Kuva 4.)

WUFI Tietokanta : Muuta materiaalia

Nimi Tuulensuojamineraalivilla

Materiaalitiedot Paksuus Tietoa... Luettelon valinta

Perusarvot

Raakatiheys [kg/m ³]	73.0
Huokoisuus [m ³ /m ³]	0.94
Ominaislämpökapiteetti, Kuiva [J/kgK]	850.0
Lämmönjohtavuus, Kuiva [W/mK]	0.031
Vesihöyryn diffusiovastuskerroin [-]	1.4

Optional Data

- Kosteuskapasiteettifunktio
- Kapillaariset ominaisuudet, Absorptiota
- Kapillaariset ominaisuudet, Uudelleenjakautuminen
- Lämmönjohtavuus, kosteudestariippuva
- Vesihöyryn diffusiovastuskerroin, kosteudestariippuva

Graafisesti Muokkaa taulukkoa Lue tied...

Arvioi

No.	SK [-]	Kosteuspitoisuus [kg/m ³]
1	0.0	0.0
2	0.33	0.51
3	0.55	0.58
4	0.65	0.6
5	0.75	0.62
6	0.8	0.91
7	0.83	1.1

Uusi Poista Kopioi Syötä

Optional Parameter

Tyypillinen rakennekosteus [kg/m³] 0.0

Väri

OK Keskeytä Apua

KUVA 4. Materiaalitietojen syöttäminen

Sitten siirryttiin välilehdelle "Paksuus". Tällä välilehdelle annettiin materiaalille oletuspaksuus. (Kuva 5.)

WUFI Tietokanta : Uusi materiaali

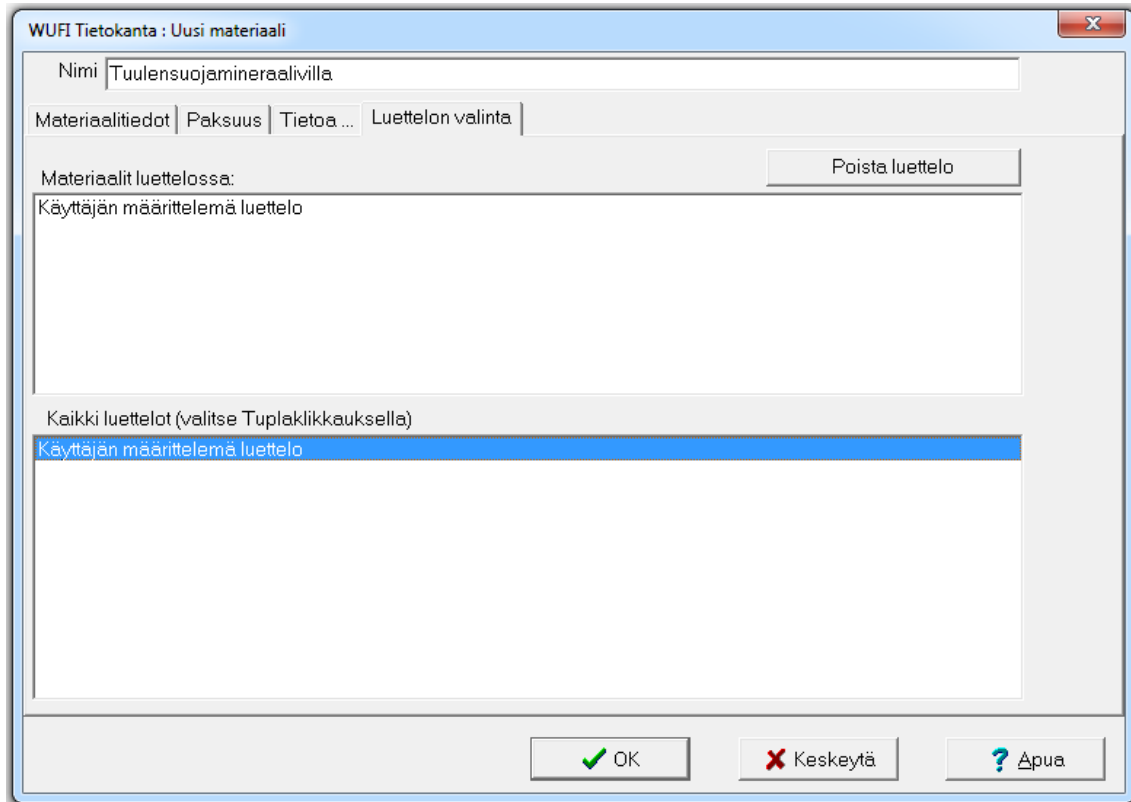
Nimi

Materiaalitiedot | **Paksuus** | Tietoa ... | Luettelon valinta

No.	Paksuus [m]
1	0.025

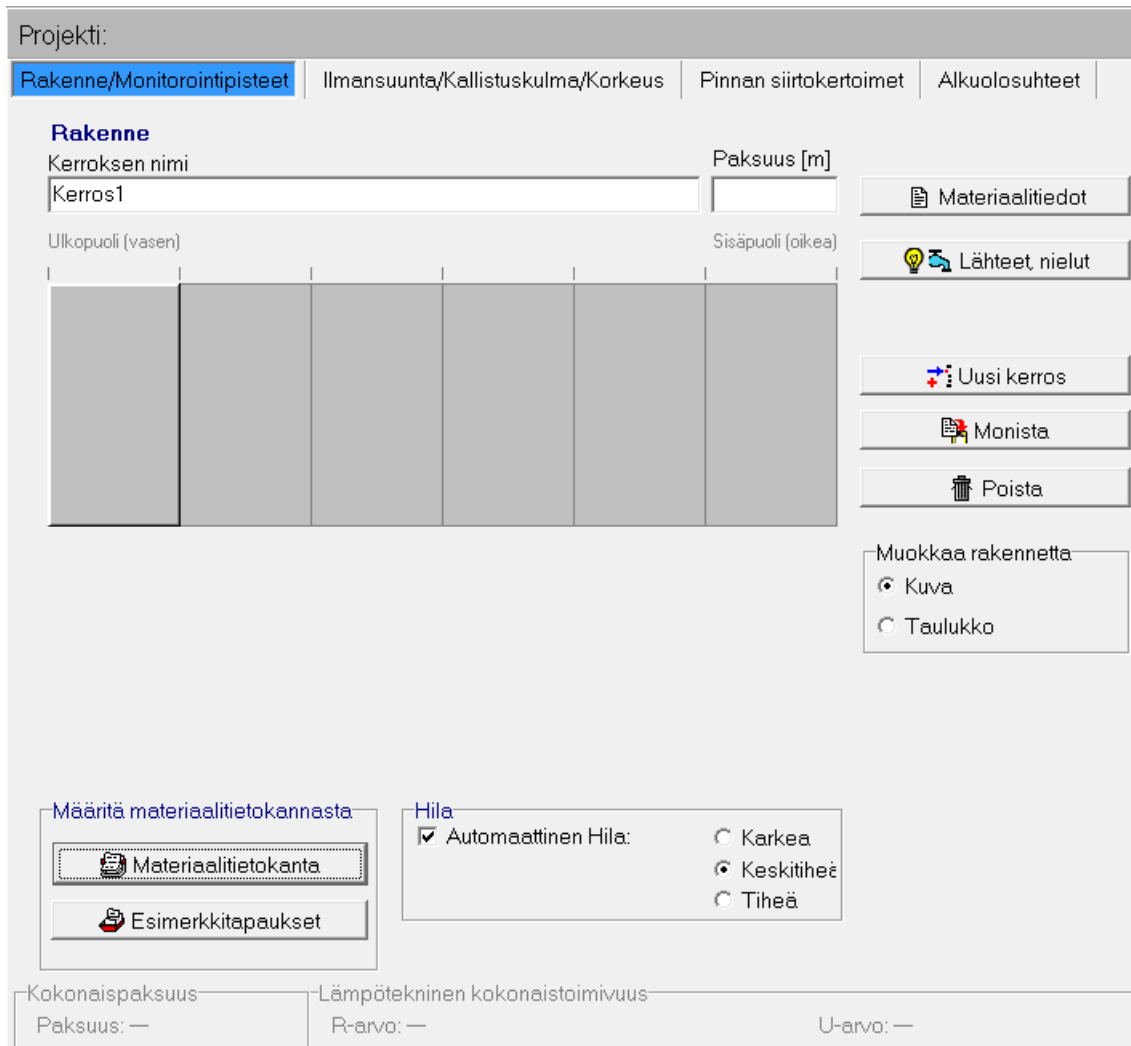
KUVA 5. Oletuspaksuuden syöttäminen

Viimeisellä välilehdellä uusi materiaali lisättiin johonkin materiaaliluetteloon. Oletuksena uusi materiaali laitettiin käyttäjän määrittelemään luetteloon. (Kuva 6.)



KUVA 6. Materiaaliluettelon valinta

Seuraavaksi luotiin simuloinnin geometria ja valittiin monitorointipisteet valikon kohdasta "Rakenne/Monitorointipisteet". Malliin lisättiin tarvittava määrä rakennekerroksia kohdasta "Uusi kerros". Tässä tapauksessa kerroksia tarvittiin kuusi. Tämän jälkeen muokattiin kerros hakemalla sille materiaalitiedot kohdasta "Materiaalitietokanta". (Kuva 7.)



KUVA 7. Materiaalitietojen lisäys

Materiaalitietojen hakemisen jälkeen kerroksen nimeä ja paksuutta pystyi vielä muokkaamaan. Tässä tapauksessa kerroksen nimeksi muutettiin "Ulkoverhous" ja rakennepaksuus jätettiin ennalleen. (Kuva 8.)

Projekti:

Rakenne/Monitorointipisteet | Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus | Pinnan siirtokertoimet | Alkuolosuhteet

Rakenne

Kerroksen nimi: Paksuus [m]:

Ulkopuoli (vasen): Sisäpuoli (oikea):

--	--	--	--	--	--

Materiaalitiedot

Lähteet, nielut

Uusi kerros

Monista

Poista

Muokkaa rakennetta

Kuva

Taulukko

Määritä materiaalitietokannasta

Materiaalitietokanta

Esimerkkitapaukset

Hila

Automaattinen Hila: Karkea Keskitiheä Tiheä

Kokonaispaksuus: Paksuus: —

Lämpötekninen kokonaistoimivuus: R-arvo: — U-arvo: —

KUVA 8. Kerroksen muokkaus

Tämän jälkeen haettiin muillekin rakennekerroksille oikeat materiaalitiedot ja tarvittaessa muokattiin oletuspaksuus oikeaksi. Rakennekerrosten muokkaamisen jälkeen muutettiin automaattinen hila tiheäksi. (Kuva 9.)

Projekti:

Rakenne/Monitorointipisteet | Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus | Pinnan siirtokertoimet | Alkuolosuhteet

Rakenne

Kerroksen nimi: Ulkoverhous Paksuus [m]: 0,028

Ulkopuoli (vasen): 0,028 | 0,025 | 0,025 | 0,223 Sisäpuoli (oikea): 0,00,013

Materiaalitiedot

Lähteet nielut

Uusi kerros

Monista

Poista

Muokkaa rakennetta

Kuva

Taulukko

Määritä materiaalitietokannasta

Materiaalitietokanta

Esimerkkitapaukset

Hila

Automaattinen Hila: Karkea Keskitiheä Tiheä

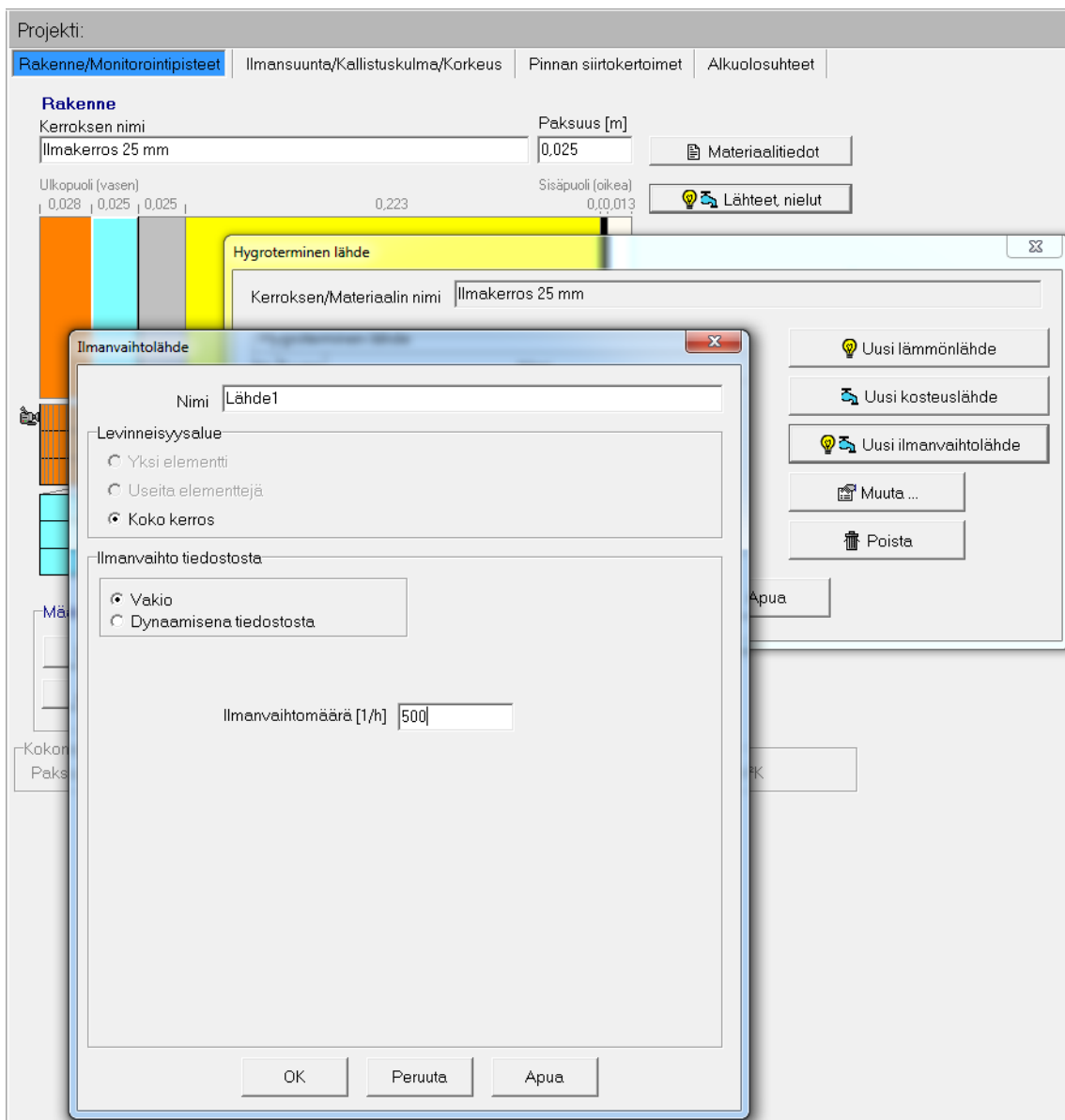
Kokonaispaksuus: Paksuus: 0,32 m

Lämpötekninen kokonaistoimivuus: R-arvo: 7,69 m²K/W

U-arvo: 0,127 W/m²K

KUVA 9. Valmis geometria

Seuraavaksi lisättiin ilmaväliin tuuletus. Tämä tapahtui valitsemalla ilmakerros ja etenemällä valikkoon "Lähteet, nielut -> Uusi ilmanvaihtolähde". Ilmanvaihto määritettiin vakioksi ja ilmanvaihtomääräksi asetettiin 500 1/h. Koska ilmasto-tiedostossa ei ollut tietoa ilmakehän pitkäaaltosen vastasäteilyn määrästä, pyrittiin tavallista suuremmalla ilmanvaihdolla huomioimaan vastasäteilyn jäähdyt-tävä vaikutus ulkoverhouspaneelissa. (Mäkitalo 2012, 56; Vinha 2013, 167). (Kuva 10.)



KUVA 10. Ilmanvaihdon lisäys tuuletusväliin

Viimeiseksi kyseisestä valikosta lisättiin monitorointipisteet eli pisteet, joista ohjelma simuloinnin jälkeen antaa tulokset. Tämä tapahtui valitsemalla valikosta "Taulukko -> Monitorointipaikat". Monitoroitava piste syötettiin valitsemalla kerros, johon se haluttiin ja ilmoittamalla pisteen kohta kyseisessä kerroksessa.

Esimerkiksi, kun haluttiin kipsilevyn ja höyrynsulun rajapintaan monitorointipiste, valittiin kipsilevy ja syötettiin syvyydeksi 0 m. Käytännössä piste tulee lähimpänä saatavilla olevaan hilaverkon elementtiin, ja ohjelma ilmoittaa erikseen todellisen monitorointipisteen syvyyden. Monitorointipisteiksi valittiin tuulensuojamineraalivillan ja mineraalivillan rajapinta, höyrynsulkumuovin ja mineraalivillan sekä höyrynsulkumuovin ja kipsilevyn rajapinnat. Lisäksi ohjelma valitsi automaattisesti monitorointipisteiksi ulko- ja sisäpinnan. (Kuva 11.)

Rakenne

No.	Kerros/Materiaali (ulkoa sisälle päin)	Paksuus [m]
1	Ulkoverhous	0,028
2	Ilmakerros 25 mm	0,025
3	Tuulensuojamineraalivilla	0,025
4	Lasivilla_oma	0,223
5	Höyrynsulkumuovi	0,001

Monitorointiasemat: Höyrynsulkumuovi

No.	Syvyydellä [m]	Todellinen syvyys [m]	Elementti

Uusi
Poista

Materiaalitiedot
Lähteet, nielut
Uusi kerros
Monista
Poista
Muokkaa rakennetta
 Kuva
 Taulukko
Taulukko: jaottelu
 Hila
 Monitorointipaikat

0,028 | 0,025 | 0,025 | 0,223 | 0,001

KUVA 11. Rakenteen monitorointipisteet

5.1.2 Mallin sijoitus ympäristöön

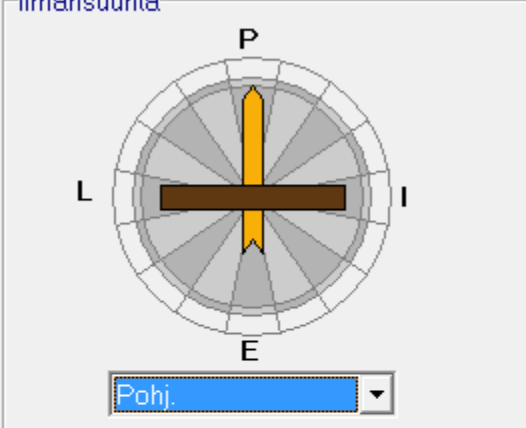
Rakennemallin luomisen jälkeen määritettiin rakenteen ympäristöolosuhteet valikon kohdasta "Ilmansuunnat". Ulkopinnan ilmansuunnaksi valittiin pohjoinen, jonka on todettu olevan yleensä haasteellisin ilmansuunta rakenteelle, jossa ulkoverhouksen takana on hyvin tuulettuva ilmaväli (Vinha 2013, 45). Rakenteen kallistuskulmaksi valittiin 90, koska kyseessä on pystysuora ulkoseinä. Sa-

teen osalta pitäydettiin oletusasetuksissa. Kyseessä on matala rakennus, ja R1 ja R2 arvoina käytettiin ohjelman antamia oletuksia. Sadekuorman laskentaa ei suoritettu ASHRAE-standardin 160 P mukaan. (Kuva 12.)

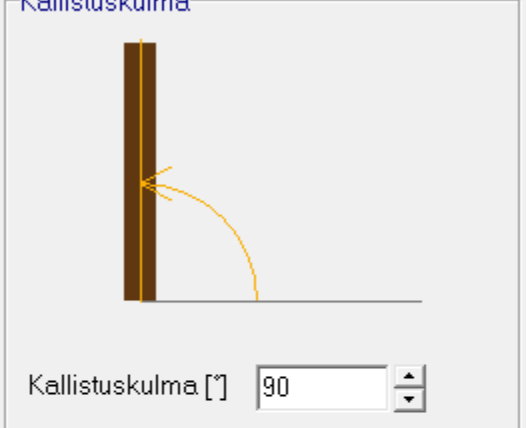
Projekti:

Rakenne/Monitorointipisteet | **Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus** | Pinnan siirtokertoimet

Ilmansuunta



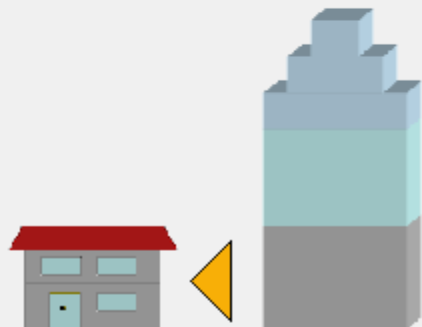
Kallistuskulma



Kallistuskulma [°] 90

Rakennuskorkeus/Sateen kerroin

Sadekuorman laskenta ASHRAE standardin 160 P mukaan



R1 [-] 0

R2 [s/m] 0,07

Ohje:
Sadekuorma =
 $Sade * (R1 + R2 * \text{Tuulen Nopeus})$

Matala rakennus, enintään 10 m

KUVA 12. Mallin sijoitus ympäristöön

5.1.3 Pinnan siirtokertoimet

Kun ympäristöolosuhteet olivat määritetty, siirryttiin valikossa kohtaan "Pinnan siirtokertoimet". Tässä valikossa muokattiin rakenteen ulko- ja sisäpinnan lämmönvastukset sekä pintojen säteilykertoimet ja SD-arvot.

Ulkopinnan lämmönvastuksena käytettiin tuulesta riippuvaa lämmönvastusta. Tämä oli mahdollista, sillä mallissa käytetty ilmastodata sisälsi tiedon tuulen

suunnasta ja nopeudesta. Siltä varalta, että mallilla simuloitaisiin myös muunlaisella ilmastodatalla, syötettiin lämmönvastukseksi kuitenkin myös Suomessa käytetty $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

SD-arvoksi valittiin "Ei pinnoitetta", koska kaikki rakennekerrokset oli mallinnettu erikseen maalipintoja lukuun ottamatta. Maalipintojen vaikutus jätettiin huomioida. Lyhytaaltoiseksi absorptiokertoimeksi valittiin mahdollisimman pieni luku, jotta auringon lämmittävä vaikutus olisi vähäinen. Valikosta löytyvien valmiiden pintojen perusteella valittiin arvoksi 0,4, joka vastaa pintaa "Puu (kuusi):käsittelemätön". Pitkäaaltoisen säteilyn emissiokertoimeksi valittiin 0, koska käytetty ilmastodata ei sisältänyt tietoa ilmakehän pitkäaaltoisen vastasäteilyn määrästä eikä explisiittistä säteilyasetta ollut valittu. Sateen absorptiokertoimeksi jätettiin ohjelman oletusarvo.

Sisäpinnan osalta piti valita ainoastaan lämmönvastus ja SD-arvo. Lämmönvastukseksi määritettiin Suomessa käytössä oleva $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. SD-arvoksi valittiin "Ei Pinnoitetta". (Kuva 13.)

Projekti:

Rakenne/Monitorointipisteet | Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus | **Pinnan siirtokertoimet** | Alkuolosuhteet

Ulkopinta (vasen puoli)

Lämmönvastus [m^2K/W] Käyttäjän määrittelemä

tuulesta riippuva sisältää pitkäaaltoisen säteilyn osat

Sd-arvo [m] Ei pinnoitetta

Lyhytaaltainen absorptiokerroin [-] Käyttäjän määrittelemä

Pitkäaaltoinen säteilyn emissiokerroin [-]

Explisiittinen säteilytase

Salli

Maan lyhytaaltainen heijastus [-]

Maan pitkäaaltoinen emissiviteetti [-]

Maan pitkäaaltoinen heijastus [-]

Pilvisyyssindeksi [-]

Sateen absorptiokerroin [-] Kallistuskulman ja rak.tyypin mukaan

Sisäpinta (oikea puoli)

Lämmönvastus [m^2K/W] (Käyttäjän määrittelemä)

Sd-arvo [m] Ei pinnoitetta

KUVA 13. Pinnan siirtokertoimien asetukset

5.1.4 Alkuolosuhteet

"Alkuolosuhteet"-valikon asetukset jätettiin ennalleen. Tekemällä simuloinnin tarpeeksi pitkänä tasoittuvat materiaalien olosuhteet joka tapauksessa. Komponenttien suhteelliseksi kosteudeksi valittiin läpi rakenteen 0,8 ja alkulämpötilaksi 20 °C. (Kuva 14.)

Projekti:

Rakenne/Monitorointipisteet | Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus | Pinnan siirtokertoimet | **Alkuolosuhteet**

Komponentin alkukosteus

- Vakio koko komponentissa
- Jokaisessa kerroksessa
- Lue tiedostosta

Komponentin alkulämpötila

- Vakio koko komponentissa
- Lue tiedostosta

Alkutilanteen suhteellinen kosteus [-] Komponentin alkulämpötila [°C]

Eri kerroksien alkutilanteen kosteuspitoisuus

No.	Materiaali Kerros	Paksuus [m]	Kosteus- pitoisuus [kg/m ³]
1	Ulkoerous	0,028	97,5
2	Ilmakerros 25 mm	0,025	0,0
3	Tuulensuojamateriaalilla	0,025	0,91
4	Lasivilla_oma	0,223	0,98
5	Höyrynsulkumuovi	0,001	0,0
6	Kipsilevy_oma	0,013	8,0

KUVA 14. Mallin alkuolosuhteet

5.1.5 Simuloinnin ohjaus

Laskentajakson pituudeksi muutettiin "Laskentajakso/Jakaumat" -valikosta kolme vuotta. Tällöin rakenne ehtii yleensä hyvin tasoittua normaalin kosteuspitoisuuteen. Laskentajakson alkupäivällä ei ole merkitystä simuloinnin kannalta. "Aika-askleet"-kohtaan jätettiin arvoksi 1, jolloin ohjelma simuloi rakenteen joka tunti kolmen vuoden ajan. "Numeriikka"-välilehden asetuksiin ei tehty muutoksia. (Kuva 15.)

Projekti:

Laskentajakset/Jakaumat | Numeriikka

Alku & Loppu /Jakaumat

Laskenta	Jakauma	Päivämäärä
Alku	Jakauma 1	1.10.2015
Loppu	Jakauma 2	1.10.2018
		8.4.2015

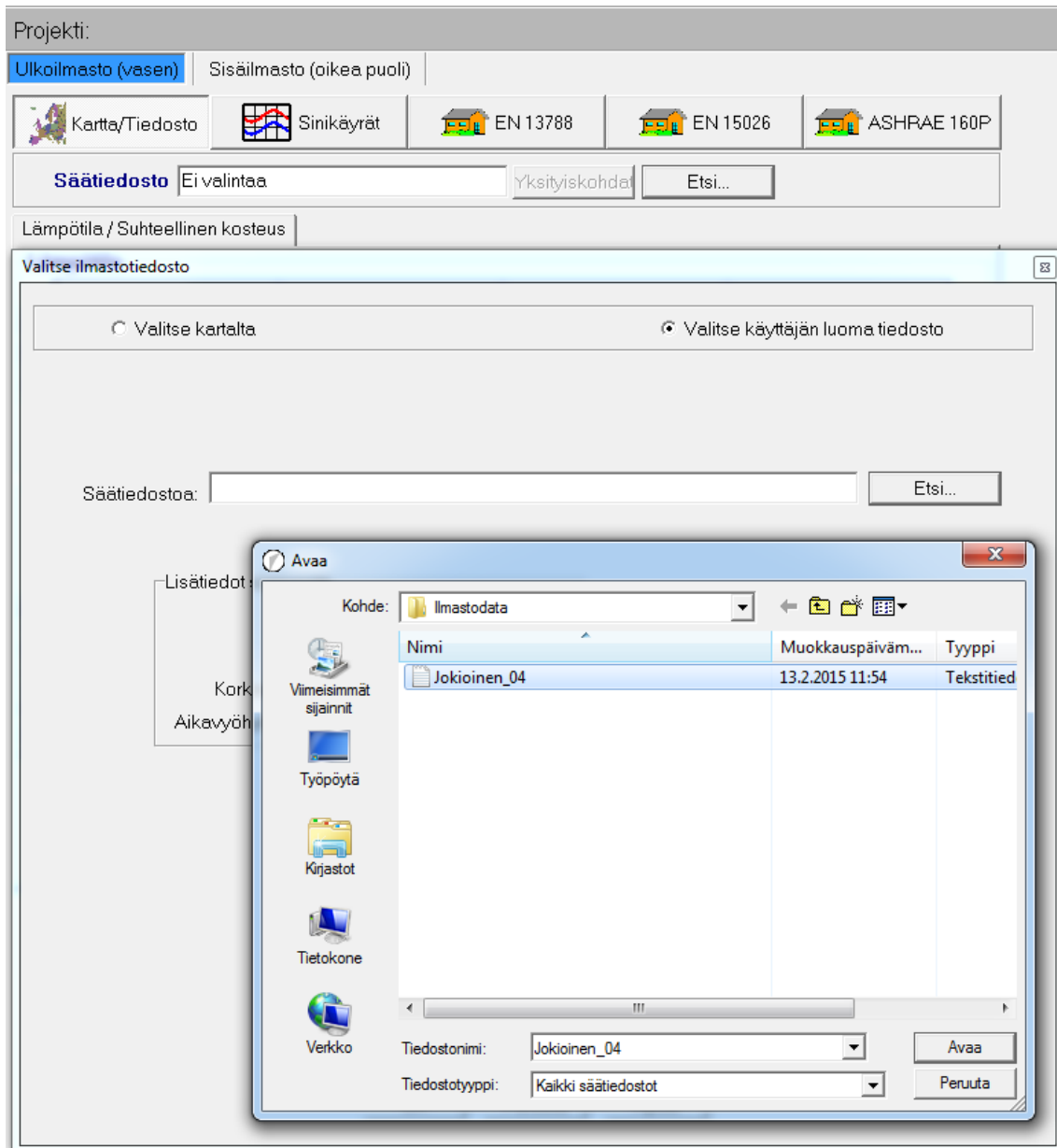
Aika-askleet [h]

Uusi
Poista
Kopioi
Syötä

KUVA 15. Laskentajakson määrittäminen

5.1.6 Ilmasto

Ulkona vaikuttava ilmasto valittiin valikosta "Ulkopuoli (vasen)". Simuloinnissa käytettiin ilmastona Ilmatieteen laitoksen rakennusfysikaalista testivuotta Jokioinen 2004 (Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. 2013). Tiedosto valittiin valikoiden "Etsi ->Valitse käyttäjän luoma tiedosto" kautta. (Kuva 16.)



KUVA 16. Ulkoilmaston ilmaston valinta

Sisäpuolen ilmasto valittiin valikosta "Sisäilma (Oikea puoli)", josta valittiin ensin EN 13788. Koska ulkopuolen ilmasto oli jo valittuna, haki ohjelma automaattisesti ilmastodatan, jonka perusteella se laski se sisäpuolen suhteellisen kosteuden. Lämpötila määritettiin vakioksi 21 °C. Kosteuslisä määritettiin itse manuaalisesti kohdasta "Suhteellinen kosteus->Taulukko". Kosteuslisänä käytettiin RIL 107-2012 mukaista kosteusluokkaa 2. (Kuva 17.)

Projekti:

Ulkoilmasto (vasen) **Sisäilmasto (oikea puoli)**

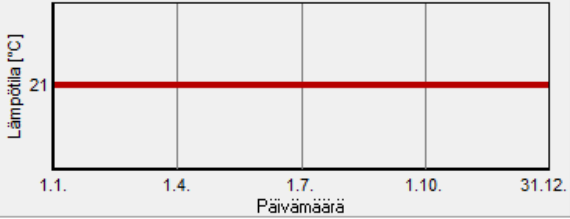
Kartta/Tiedosto Sinikäyrät EN 13788 EN 15026 ASHRAE 160P

On peräisin C:\Ilmastodata\Jokioinen_04.wac Yksityiskohdat Etsi... Ulkoilman tilasta riippu

Lämpötila / Suhteellinen kosteus

Lämpötila

sisäilman lämpötila [°C] 21



Suhteellinen kosteus

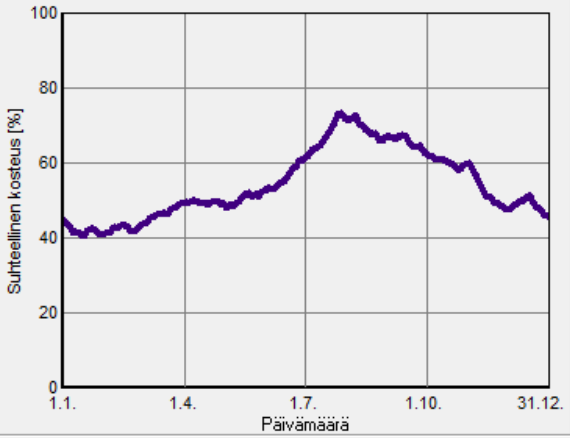
Käyttäjän määrittelemä

Kuva Taulukko

Kosteuskuorman funktio

Lämp. [°C]	Kost.kuorma [g/m³]
-40	5
5	5
15	2
40	2

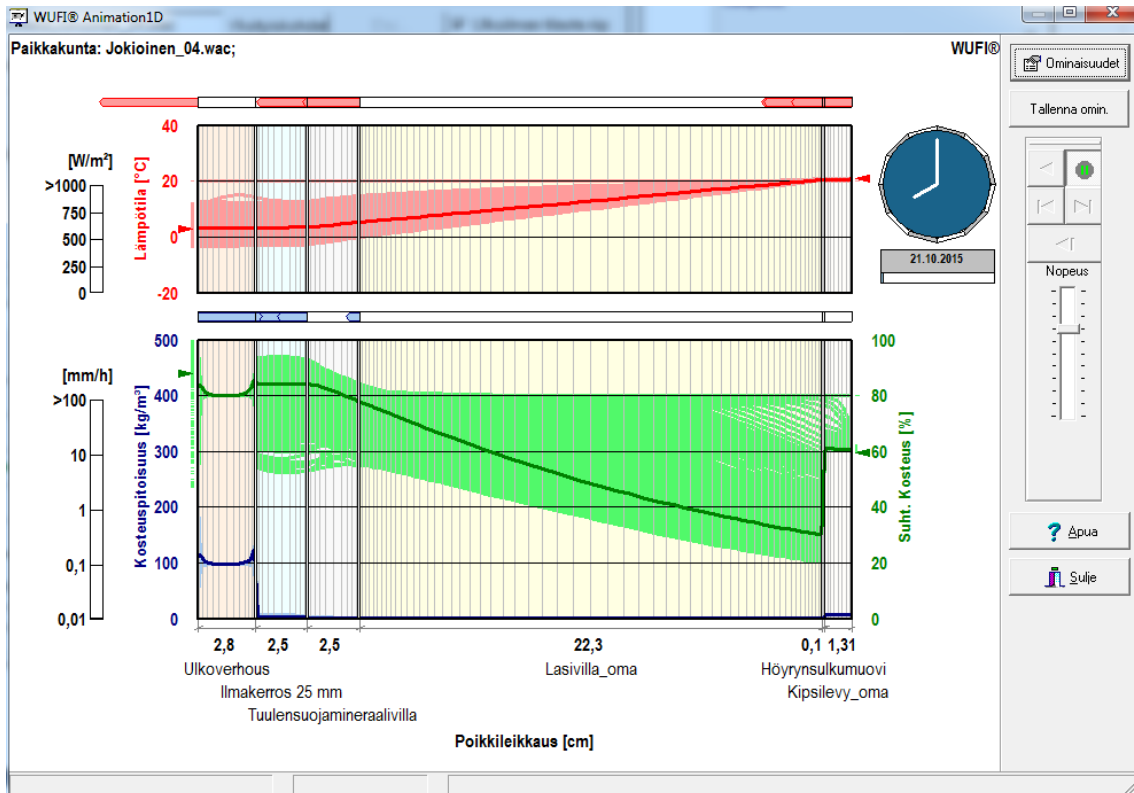
Poista
Syötä
Uusi



KUVA 17. Sisäpuolen ilmaston valinta

5.1.7 Simulointi

Laskentamalli saatiin valmiiksi ja seuraavaksi malli simuloitiin. Simulointi käynnistettiin painamalla ylävalikosta "Laskenta -> Käynnistä laskenta filmin kanssa". Simuloinnin aikana pystyttiin seuramaan muun muassa suhteellisen kosteuden ja lämpötilan käyttäytymistä rakenteessa. (Kuva 18.)



KUVA 18. Simuloinnin eteneminen

Simuloinnin valmistuttua tarkistettiin aukeavasta valikosta konvergointivirheiden määrät. Konvergointivirhe ilmoittaa yksittäisten elementtien määrän, joissa ohjelma ei ole saavuttanut tavoiteltua tarkkuutta laskennassa. Suuri virheiden määrä tarkoittaa epätarkempaa tulosta. Simuloinnissa oli tullut 84 konvergointivirhettä. (Kuva 19.)

Viimeisen laskennan tilanne

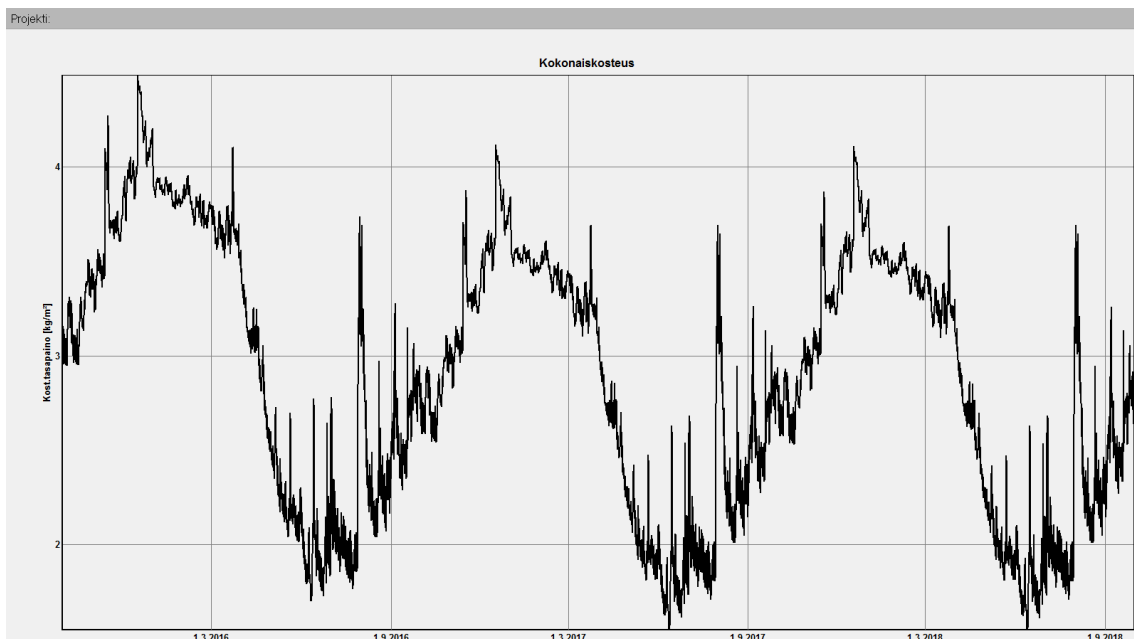
Lämpövirta, oikea puoli [MJ/m ²]	-197,41
Lämmönlähteet [MJ/m ²]	-263,78
Kosteusvirrat, vasen puoli [kg/m ²]	0,94
Kosteusvirrat, oikea puoli [kg/m ²]	-0,11
Kosteuslähteet [kg/m ²]	-1,57

Laskennan tilanne

Simulointi: Aika ja päivämäärä	8.4.2015 16:31:48
Laskennan kesto	1 min,48 s
Konvergointivirheiden lukumäärä	84
Sateen absorptiovirheiden lukumäärä	0

KUVA 19. Konvergointivirheiden määrä

Tämän jälkeen tarkistettiin rakenteen kokonaiskosteuden määrä valikosta "Kuvaajat". Jotta tuloksia voitaisiin pitää luotettavana, ei kokonaiskosteuden määrä saisi kasvaa tai vähentyä edellisvuoteen verrattuna. Nyt saatujen tulosten perusteella havaittiin, että kokonaiskosteuden määrä oli vakioitunut. (Kuva 20.)

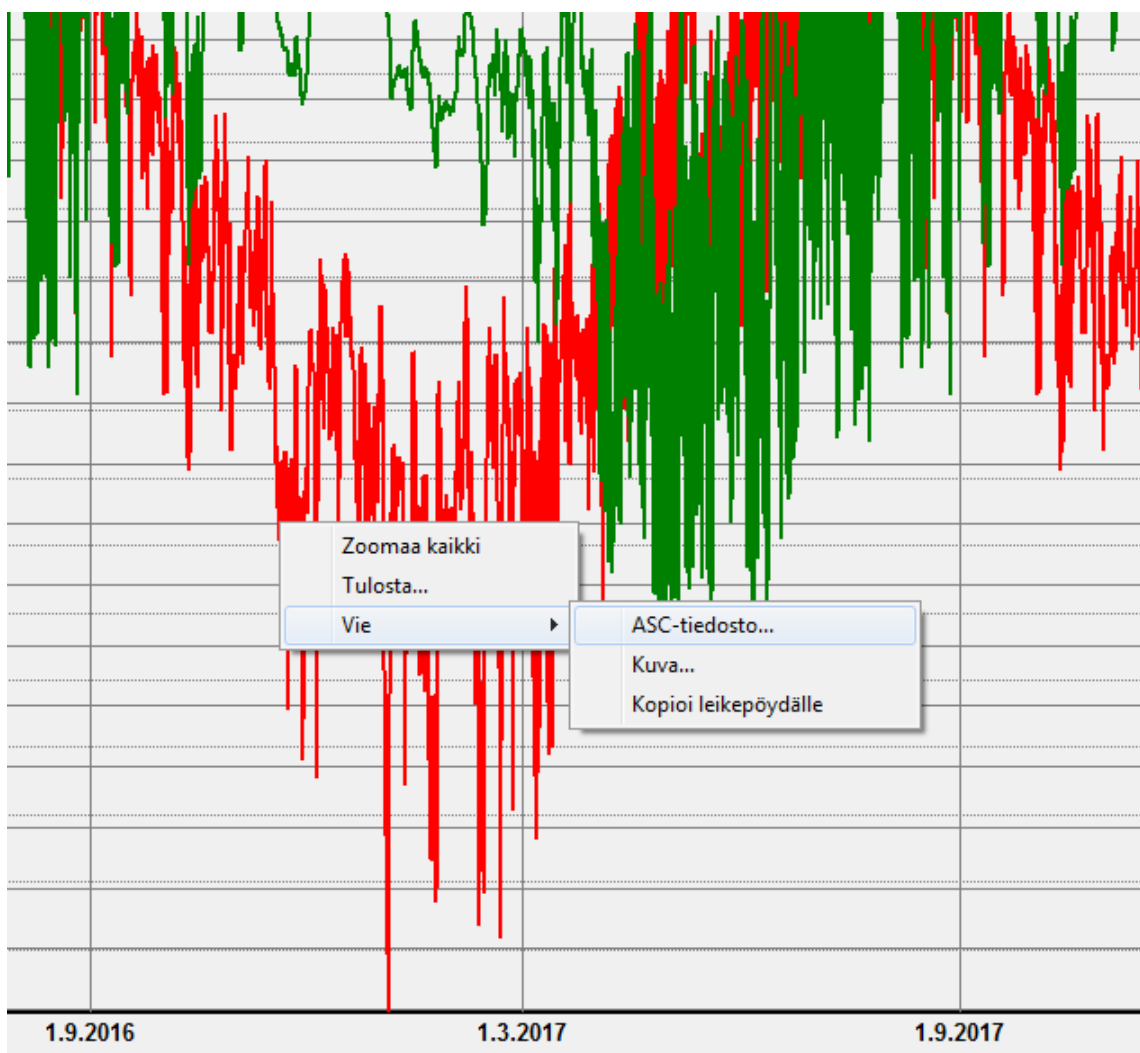
*KUVA 20. Kokonaiskosteuden määrä koko rakenteessa*

Samalla tavalla tarkistettiin myös yksittäisten materiaalikerrosten osalta kohdasta "Kerroksen kosteuspitoisuus", että kosteuspitoisuus oli vakioitunut viimeisen vuoden osalta.

5.1.8 Tulosten tallennus

Simuloinnin jälkeen vietiin monitorointipisteistä kerätyt tiedot suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta jatkokäyttöä varten Excel-taulukkoon. Tämä tapahtui valitsemalla valikosta kohta "Mon.Pos. Temp/Kosteus". Kyseisestä valikosta valittiin haluttu monitorointipiste, jotka ilmoitettiin mittoina ulkopinnasta.

Ensimmäisenä siirrettiin tuulensuojamineraalivillan ja mineraalivillan rajapinnan tiedot. Tämä tapahtui klikkaamalla kuvaajaa hiiren oikealla näppäimellä ja valitsemalla "Vie -> ASC-tiedosto...". (Kuva 21.)

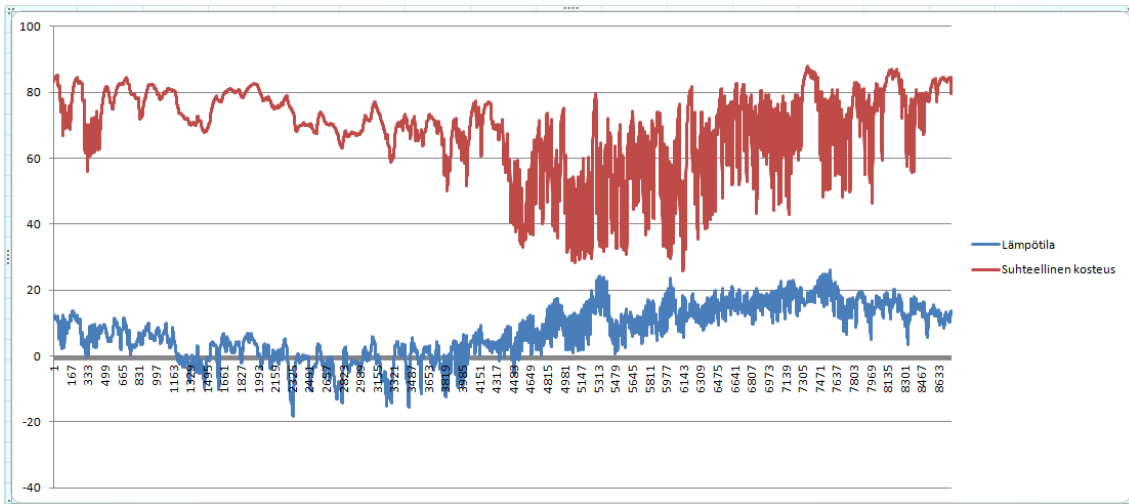


KUVA 21. Tietojen tallennus

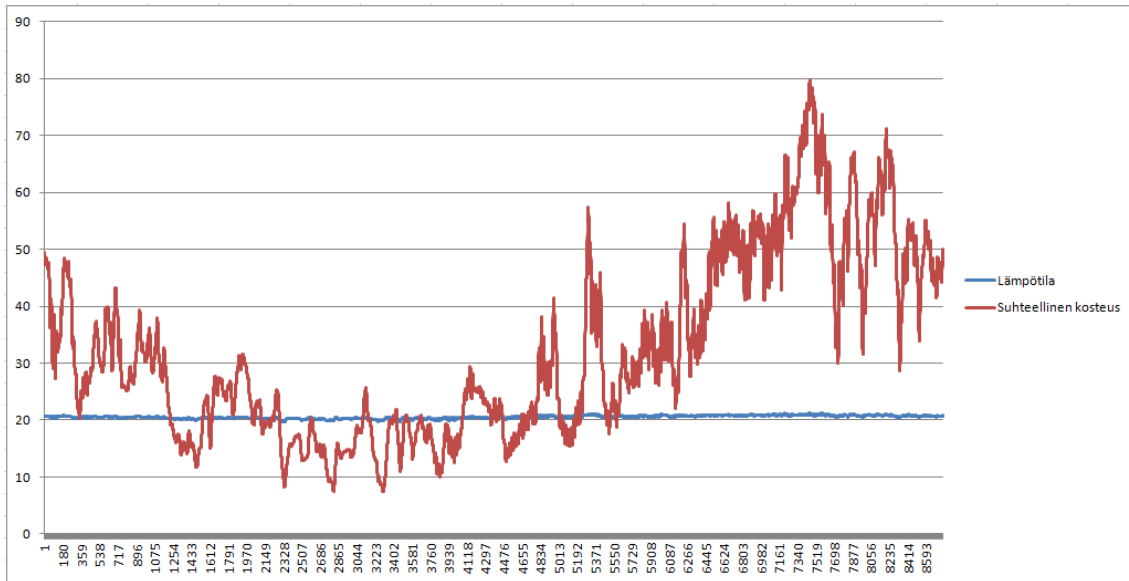
ASC-tiedosto vietiin Exceeliin avaamalla tyhjä Excel-taulukko ja raahaamalla kyseinen tiedosto Exceeliin. Tällöin ohjelma hoiti automaattisesti tietojen taulukointia. Nyt pystyttiin esimerkiksi valitsemaan viimeisen vuoden eli viimeisen 8760 tunnin tiedot ja luomaan niistä kaavioita.

5.1.9 Simuloinnin tulokset

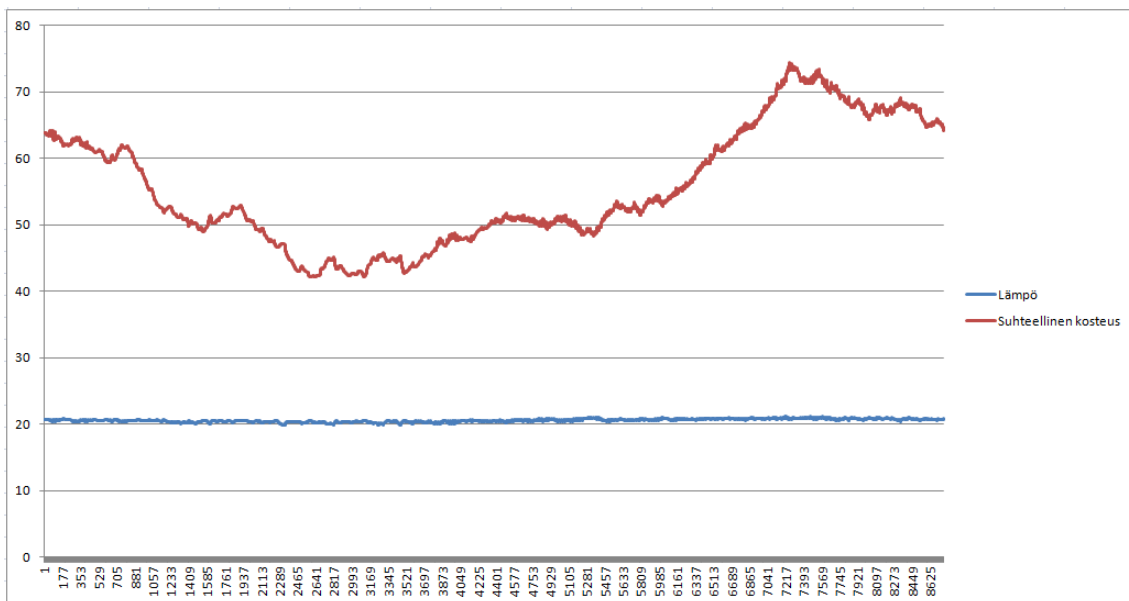
Valituista monitorointipisteistä vietiin tiedot Exceeliin. Niistä muodostettiin kuvaajat viimeiseltä vuodelta lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta. Ohjelman käyttäjä voi niiden avulla verrata saamiaan tuloksia opinnäytetyöhön. (Kuva 22; Kuva 23; Kuva 24.)



KUVA 22. Lämpötila ja suhteellinen kosteus tuulensuojamineraalivillan alla



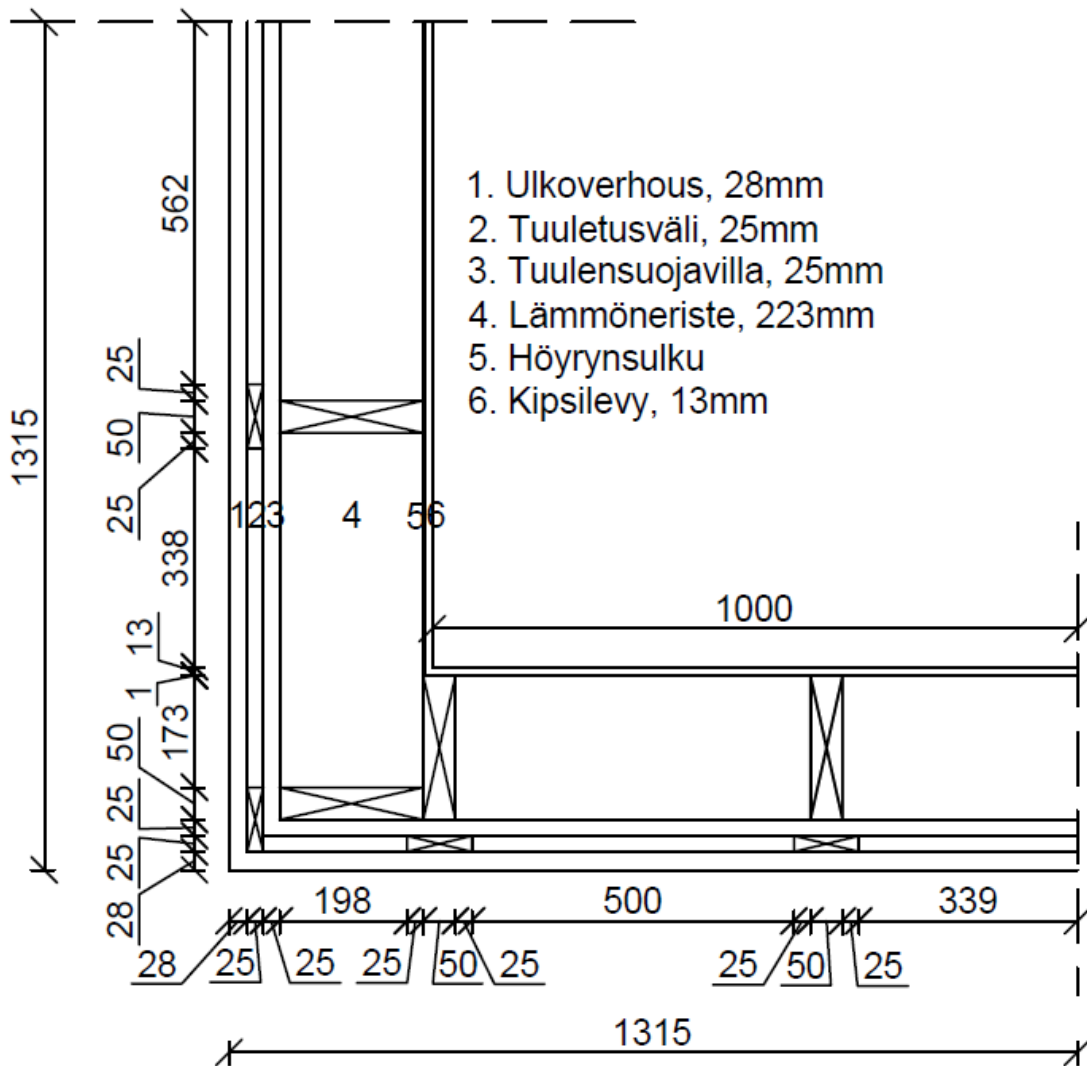
KUVA 23. Lämpötilä ja suhteellinen kosteus höyrynsulkumuovin alta



KUVA 24. Lämpötilä ja suhteellinen kosteus höyrynsulkumuovin päältä

5.2 Esimerkkirakenne 2

Toisena esimerkkirakenteena simuloitiin sama ulkoseinärakenne RT US 701 kaksikulotteisena WUFI 2D -ohjelmalla (kuva 25; RT 82-11006. 2010, 24). Simulointi suoritettiin nurkkaliitoksesta. Laskenta-alue rajattiin yhteen metriin molempiin suuntiin liitoksesta (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012, 13). Rakenteen lähtötiedot on esitetty myös liitteessä 1.



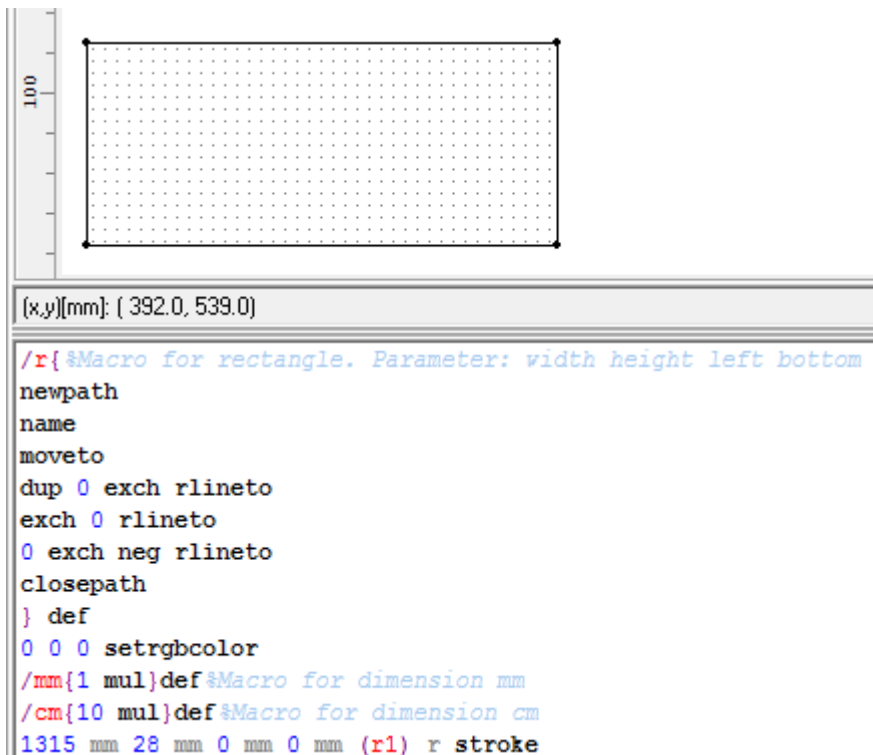
KUVA 25. Esimerkkirakenne 2

5.2.1 Geometrian luonti

Tarvittavat materiaalit simuloinnin suorittamiseksi olivat jo lisättyinä tietokantaan esimerkkirakenteen 1 yhteydessä. Tietokantaan lisättiin ainoastaan ilmavälille

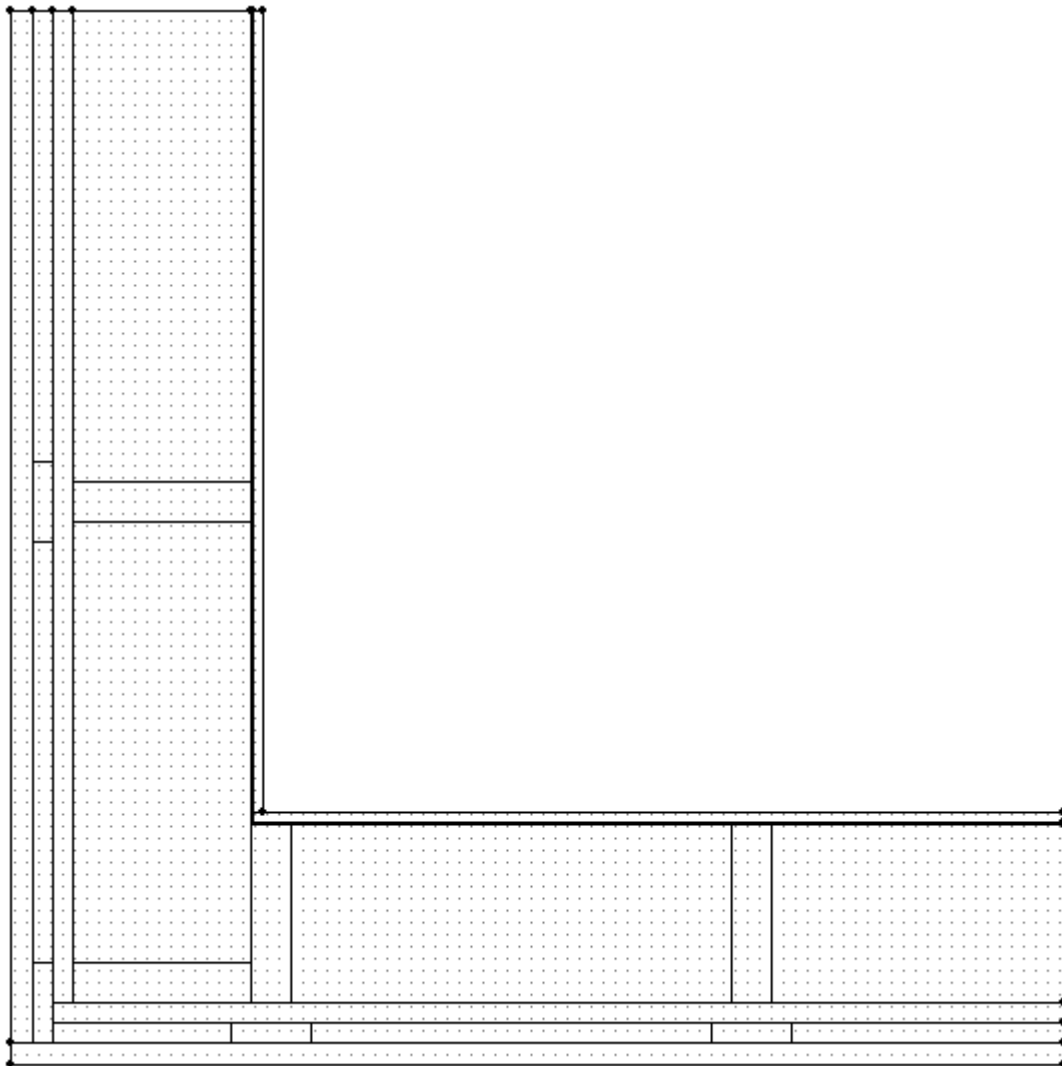
uusi materiaali, jossa käytettiin realistisempaa kosteuskapasiteettifunktiota. WUFIn oletuksena käyttämä kosteuskapasiteettifunktio ilmalle on mineraalivillan kosteuskapasiteettifunktio. Kun käytetään oletuskosteuskapasiteettifunktiota, pystyy ilma ottamaan vastaan suuremman määrän kosteutta kuin todellisuudessa. Tämä aiheuttaa kosteuspiikkien tasaantumista suhteellisessa kosteuden osalta, vaikka pitempiaikaisen trendin pitäisi edelleen olla realistinen. Ilman kosteuskapasiteettifunktioksi määritettiin lineaarinen suora $0 \rightarrow 0,017 \text{ kg/m}^3$.

Mallin geometria luotiin "Geometry"-välilehdeltä. Rakennemalli luotiin ohjelmaan käyttämällä suorakulmioita, koska ohjelmaan ei voi syöttää muita muotoja. Geometriaikkunaan piirrettiin jonkin kokoinen suorakulmio, jolle annettiin sitten tarkemmat arvot tekstikentässä. Tekstikentän arvot syötettiin järjestyksessä: pituus, korkeus, x-koordinaatti ja y-koordinaatti. Viimeisenä sulussa olevaan kohtaan "r1" voidaan suorakulmio vielä nimetä tarkemmin. (Kuva 26.)



KUVA 26. Ensimmäisen rakenteen luonti

Rakennemalli-ikkunassa siirryttiin CTRL-näppäimen ja hiiren vasemman näppäimen avulla ja zoomattiin SHIFT-näppäimen ja hiiren vasemman näppäimen avulla. "Page setup" -valinnan kautta koko ikkunaa pystyi skaalaamaan. Tämän jälkeen jatkettiin piirtämällä seuraava materiaalikerros ja antamalla sille aina tarkemmat arvot käsin tekstikenttään. Näin jatkaen lisättiin kaikki rakennekerrokset. (Kuva 27.)



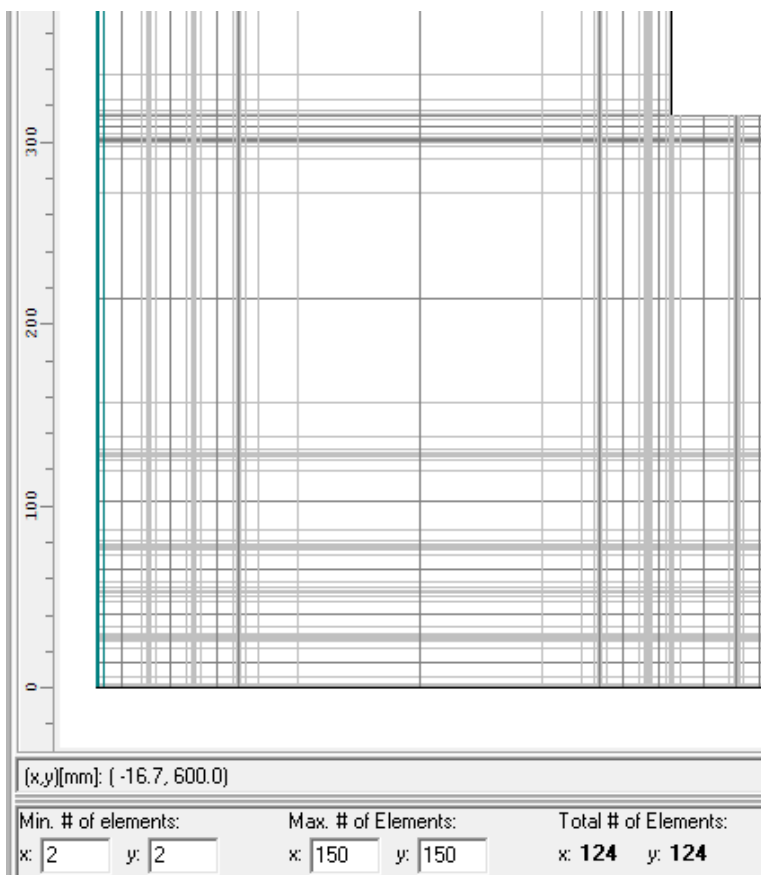
KUVA 27. Valmis rakennemalli

Simulointien yhteydessä havaittiin, että malli tulisi aina piirtää positiivisen x- ja y-akselin puolelle kokonaisuudessaan, jotta esimerkiksi tuuletusvälin asetukset pystyi määrittämään.

5.2.2 Laskentaverkon määrittäminen

Geometrian muodostamisen jälkeen mallille määritettiin laskentaverkko "Grid"-välilehdeltä. WUFIn annettiin määrittää verkko automaattisesti. Välilehdellä syötettiin ainoastaan tieto rakennekerroksessa olevasta vähimmäismäärästä elementtejä sekä koko rakennemallin verkon muodostamiseen käytössä olevien elementtien määrä. Molemmat tiedot annettiin erikseen x- ja y-suunnassa. Lisäksi klikkaamalla elementtiluetteloa hiiren oikealla näppäimellä ja valittiin molempiin suuntiin verkon tiheys asteikolla Coarse, Medium ja Fine.

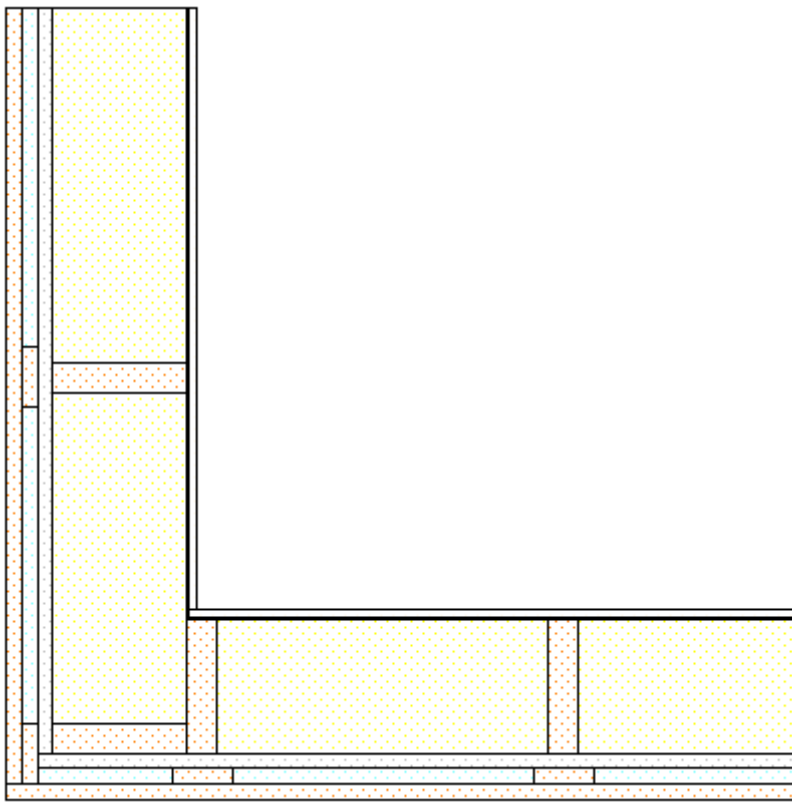
Tässä mallissa valittiin elementtien vähimmäismääräksi yksittäisessä rakennekerroksessa 2 ja koko mallin verkon muodostamiseen käytössä oli 125 elementtiä. Lisäksi valittiin molempiin suuntiin verkon tiheydeksi Fine. Verkon tiheyden olisi pitänyt olla todellisuudessa suurempi, mutta simulointiajan lyhentämiseksi sitä pienennettiin tässä esimerkissä. (Kuva 28.)



KUVA 28. Laskentaverkko määritettynä

5.2.3 Materiaalien valinta

Mallissa käytettävät materiaalit valittiin "Materials"-välilehdeltä. Rakennemallista valittiin määritettävä kerros kuvasta tai kuvan alla olevasta luettelosta. Valitsemalla haluttu kerros avautui "Allocation of properties" -ikkuna, johon haettiin sopiva materiaali "New->Assign" -valintojen kautta. Tämän jälkeen oikea materiaali valittiin vielä "Allocation of properties" -ikkunasta, jolloin se siirtyi malliin. Kertaalleen valitun materiaalin pystyi lisäämään suoraan kyseisestä ikkunasta. Näin edeten lisättiin kaikki materiaalit malliin. (Kuva 29.)



KUVA 29. Materiaalitiedot lisättynä malliin

Runkotolppien ja naulauspuiden materiaaleina käytettiin samaa materiaalia kuin ulkoverhouksessa. Mallia muutettaessa havaittiin, että kun kertaalleen lisätyn materiaalin muutti, joutui sen määrittämään erikseen x- ja y-suunnassa.

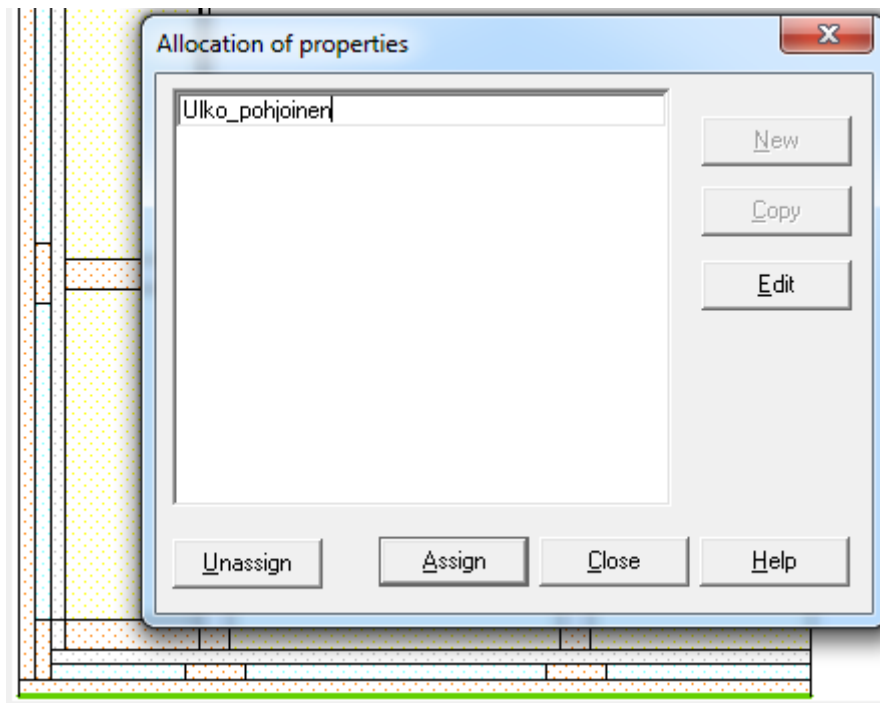
5.2.4 Alkuolosuhteet

Alkuolosuhteiden määrittäminen onnistuu välilehdeltä "Initial Conditions". Tässä mallissa niiden annettiin kuitenkin olla ennallaan eli koko mallin alkulämpötila oli 20 °C ja suhteellinen kosteus 0,8.

5.2.5 Ympäristöolosuhteet ja pinnan siirtokertoimet

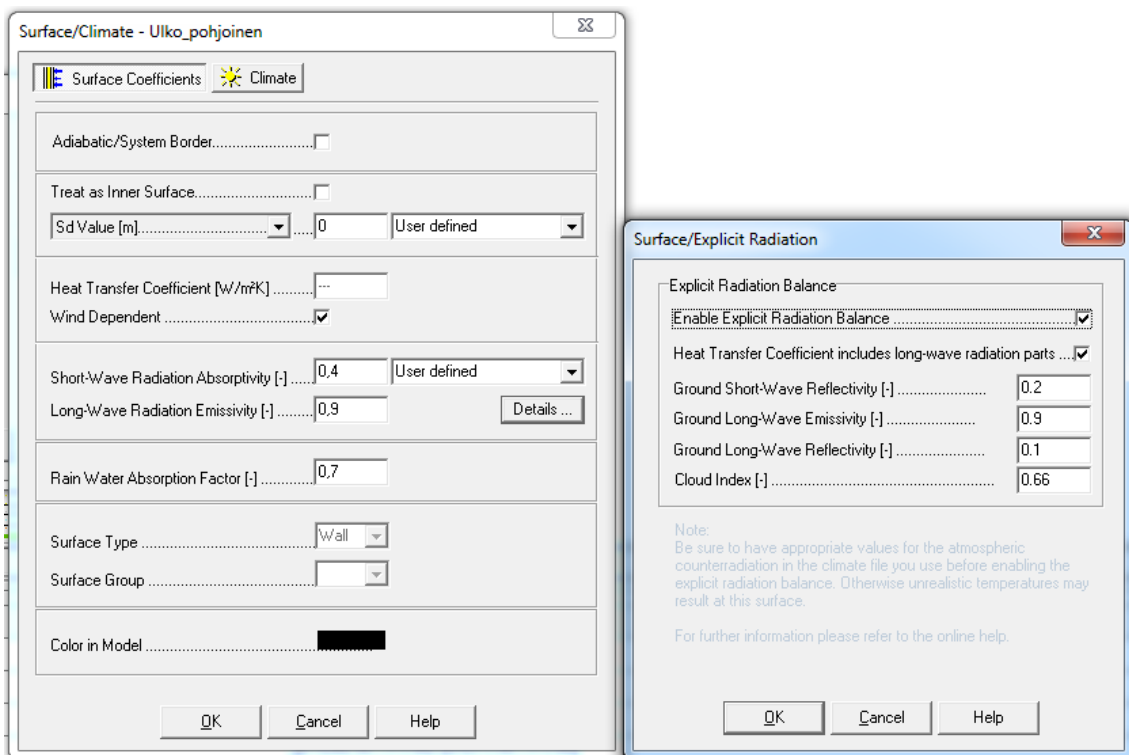
WUFI 2D:ssä ympäristöolosuhteet eli ilmasto-olosuhteet ja pinnan siirtokertoimet määritettiin molemmat valikosta "Surface/Climate". Ulko- ja sisäpinoille valittiin niitä vastaavat olosuhteet ja loput pinnat määritettiin adiabaattisiksi eli niiden kautta ei siirtyisi lämpöä eikä kosteutta ollenkaan.

Ensimmäisenä määritettiin ulkopintojen olosuhteet. Pinnat sijoitettiin ympäristöönsä siten, että alapinta suunnattiin pohjoiseen ja toinen sivu itään. Tämä jouduttiin huomioimaan, koska käytetty ilmasto sisälsi tiedot myös auringon paisteesta, sateesta ja tuulesta. Määritettävä pinta valittiin mallista ja se nimettiin aukeavaan ikkunaan tuplaklikkaamalla nimeä. (Kuva 30.)



KUVA 30. Määritettävän pinnan valinta ja nimeäminen

Tämän jälkeen pinnan olosuhteet ja siirtokertoimet määritettiin "Edit"-valikon kautta. Aukeavaan ikkunaan valittiin ensimmäisenä siirtokertoimien arvot. WUFI 2D:n valikko siirtokertoimien osalta vastasi pitkälle WUFI Pron vastaavaa valikkoa. Huomioitava ero on, että WUFI 2D:ssa pintavastus määritettiin lämmönsiirtokertoimena yksikössä W/m^2K , kun WUFI Prossa se määritettiin lämmönvastuksena yksikössä m^2K/W . Kyseessä ovat toistensa vastaluvut. Tässä mallissa pintavastus valittiin kuitenkin tuulesta riippuvaksi, joten pintavastuksen arvoa ei tarvinnut määrittää. Simulointi päätettiin suorittaa vertailun vuoksi käyttäen explisiittistä säteilytasetta, jolloin ohjelma arvioi ilmakehän pitkäaaltoisen vastasäteilyn määrän. Asetus valittiin päälle "Details"-näppäimen avulla. Arvoina käytettiin WUFIn oletusarvoja. Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimena käytettiin 0,4 ja pitkäaaltoisen säteilyn emissiivisyydeksi valittiin 0,9. (Kuva 31.)



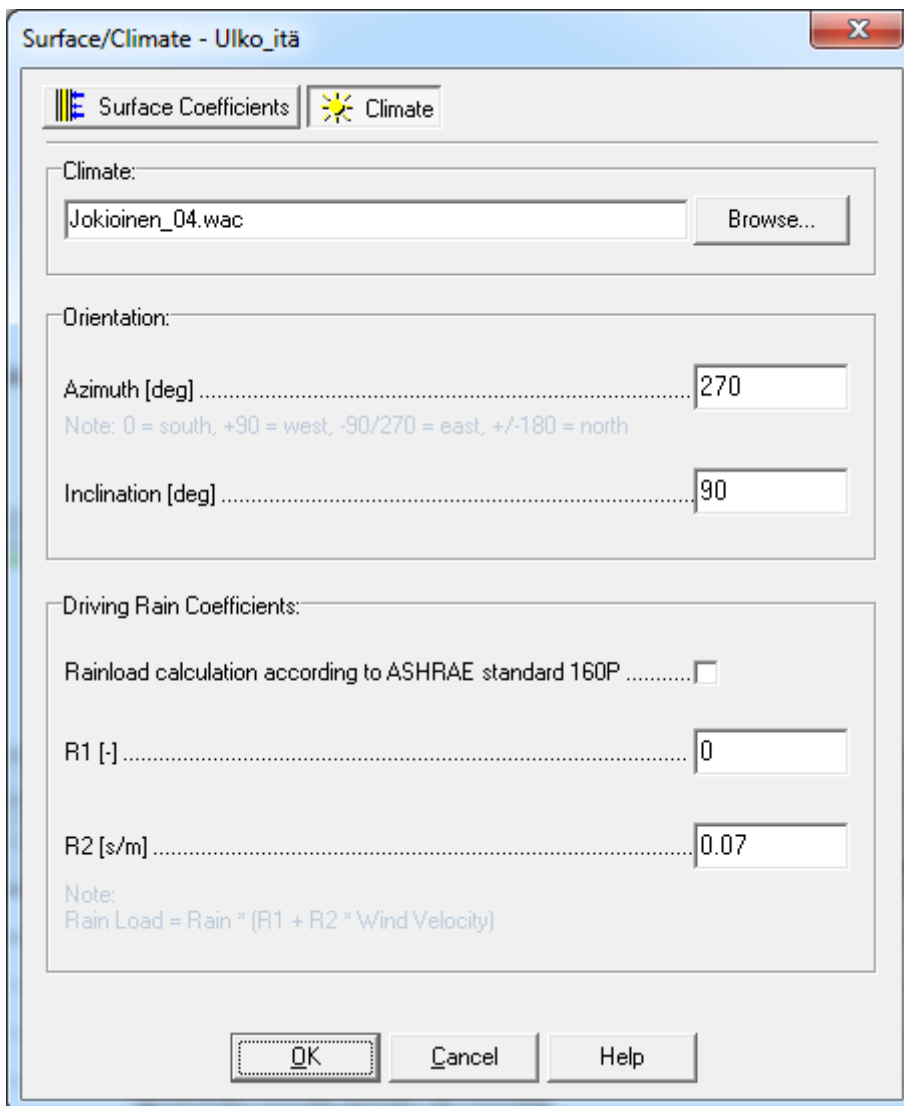
KUVA 31. Pinnan siirtokertoimet ulkona

"Climate"-välilehdeltä sijoitettiin valittu pinta ympäristöönsä valitsemalla sopiva arvo kohtaan "Azimuth [deg]". Koska kyseinen pinta suunnattiin pohjoiseen, valittiin kohtaan arvoksi 180. "Inclination [deg]" -kohdasta määritettiin pinnan

kulma suhteessa vaakatasoon. Tässä tapauksessa kyseessä oli pystysuora pinta, joten arvoksi laitettiin 90.

Viimeiseksi valittiin käytetty ilmastotiedosto klikkaamalla kohtaa "Browse". Valinta tapahtui täysin samalla tavalla kuin WUFI Prossa. Ilmastotiedoston valinnan jälkeen määritetty pinta hyväksyttiin "Allocation of properties" -välilehdeltä valitsemalla "Assign".

Idän puoleinen pinta määritettiin valitsemalla pinta ja kopiaimalla jo määritetty Ulko_pohjoinen "Copy"-painikkeen avulla. Kopioitu valinta nimettiin uudestaan ja käytiin "Edit"-painikkeen kautta muokkaamassa "Climate"-välilehdeltä "Azimuth [deg]" -kohtaan arvoksi 270, joka vastasi ilmansuuntana itää. (Kuva 32.)



KUVA 32. Idän puoleisen pinnan asetukset

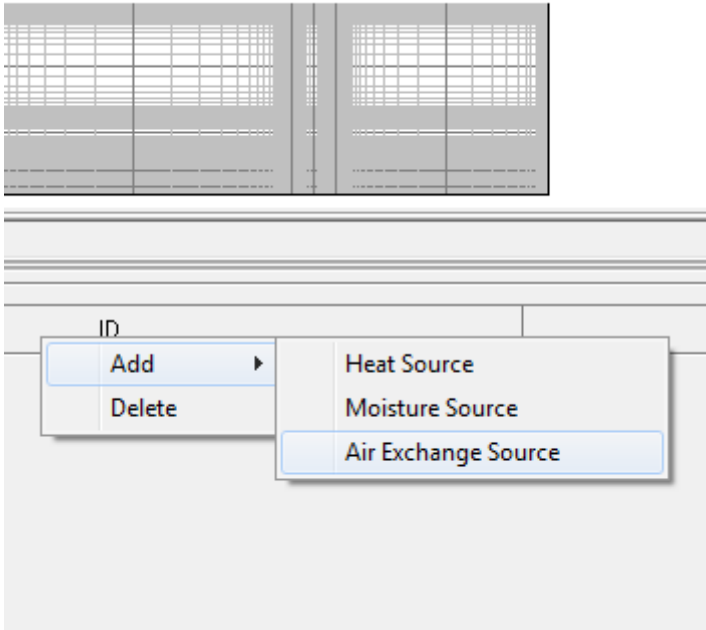
Sitten määritettiin sisäpinnat. Niiden osalta ei tarvinnut huomioida ilmansuuntia eikä kallistuskulmia suhteessa vaakatasoon. "Surface Coefficients" -välilehdeltä valittiin kohta "Treat as Inner Surface" ja kohtaan "Heat Transfer Coefficient" määritettiin pintavastukseksi $7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$, joka vastaa samaa arvoa kuin WUFI Prossa määritetty $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Kaikki muut arvot jätettiin kyseiseltä välilehdeltä nolliksi.

Tämän jälkeen valittiin "Climate"-välilehden kautta sisäilmastoksi EN 13788 samalla tavalla kuin WUFI Prossa. Erona oli ainoastaan, että nyt ohjelmalle piti erikseen hakea käytettävä ilmastotiedosto, josta sisäilmasto johdettiin. Kosteuslisäksi määritettiin samalla tavalla manuaalisesti RIL 107-2012 kosteusluokan 2 mukainen kosteuslisä.

Kaikki loput pinnat määritettiin adiabaattisiksi. Eli niiden kautta ei siirtyisi lainkaan lämpöä eikä kosteutta. Määritys onnistui klikkaamalla haluttua pinta ja luomalla uusi ilmasto johon valittiin "Surface Coefficients" -välilehdeltä ainoastaan kohta "Adiabatic/System Border". Muita valintoja ei tarvinnut tehdä.

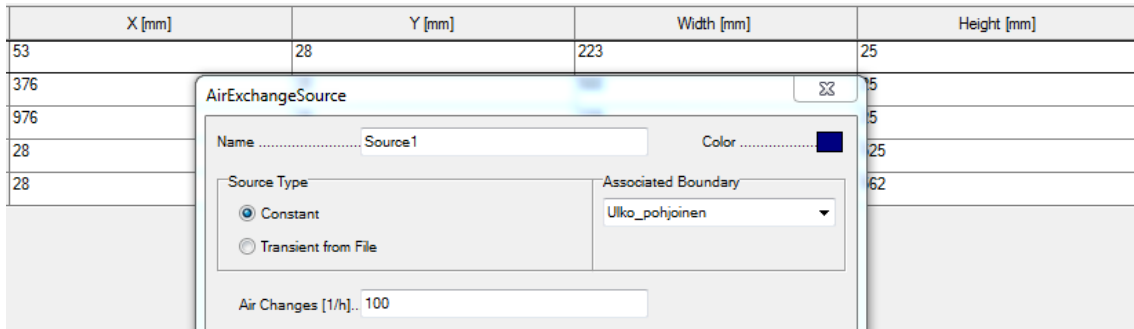
5.2.6 Ilmanvaihtolähde

Viimeiseksi malliin lisättiin ilmanvaihtolähde ulkoverhouksen taakse. Tämä tehtiin WUFI 2D:ssa "Sources"-välilehdeltä. Lähde lisättiin klikkaamalla tyhjänä olevaan taulukko-ikkunan alta ja valitsemalla "Air Exchange Source". (Kuva 33.)



KUVA 33. Ilmanvaihtolähteen lisäys

Ilmanvaihtokerros määritettiin x- ja y-koordinaattien sekä pituuden ja korkeuden perusteella. Tarvittavat arvot tarkistettiin "Geometry"-välilehdeltä. Ilmanvaihdoksi määritettiin vakioilmanvaihto 100 1/h ja sekoitettava ulkoilma sen mukaan, millä seinällä ilmaväli oli. Näin jatkaen lisättiin kaikki ilmavälit. Ilmanvaihtuvuutena käytettiin nyt normaalia arvoa, koska käytetystä explisiittisestä säteilytaseesta johtuen ulkopinnan yöaikainen jäähtyminen oli jo otettu huomioon. (Mäkitalo 2012, 56.) (Kuva 34.)



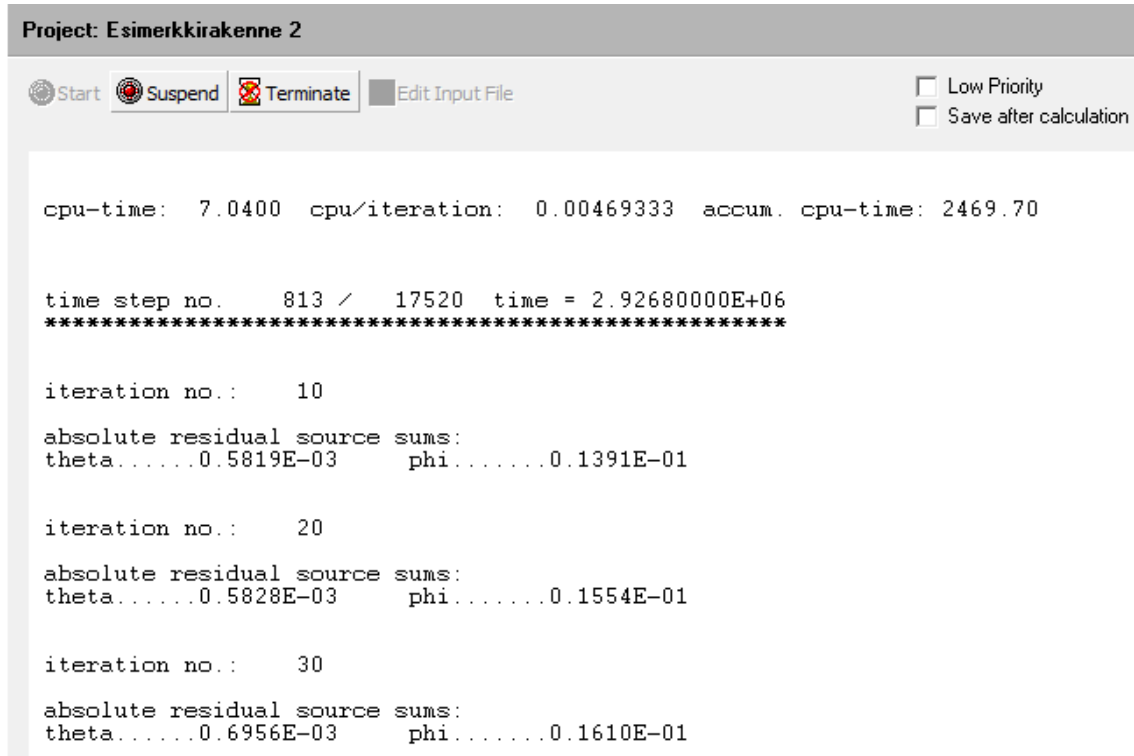
KUVA 34. Ilmanvaihtolähteen määrittäminen

5.2.7 Simuloinnin ohjaus

Ennen simuloinnin suorittamista valittiin käytettävät simulointiparametrit. Tämä tapahtui välilehdeltä "Computational Parameters". Välilehdeltä tarkistettiin, että valittuina olivat "Increased Accuracy" ja "Adapted Convergence". Simulointiajaksi valittiin 17 520 tuntia, joka vastaa kahden vuoden mittaista simulointia. Todellisuudessa mallia olisi simuloitu kolmen vuoden ajan, jotta kosteudet ehtivät varmasti tasoittua. Nyt tyydyttiin lyhyempään aikaan simuloinnin nopeuttamiseksi. Muut asetukset jätettiin välilehdellä ennalleen.

5.2.8 Simulointi

Mallin simulointi suoritettiin "Processing"-välilehdeltä. Ennen simuloinnin aloittamista poistettiin valinta kohdasta "Low priority" ja valittiin kohta "Save after calculation". Tällöin ohjelma käytti tehokkaammin hyödyksi koneen laskentakapasiteetin ja tallensi tulokset automaattisesti simuloinnin jälkeen. Tämän jälkeen simulointi aloitettiin valitsemalla "Start". (Kuva 35.)



The screenshot shows the WUFI 2D software interface. At the top, it displays 'Project: Esimerkkirakenne 2'. Below this are control buttons: 'Start' (a play icon), 'Suspend' (a red stop icon), 'Terminate' (a red X icon), and 'Edit Input File' (a document icon). To the right of these buttons are two checkboxes: 'Low Priority' and 'Save after calculation', both of which are currently unchecked. The main area of the window contains a text-based output log. The log shows the following information:

```
cpu-time: 7.0400  cpu/iteration: 0.00469333  accum. cpu-time: 2469.70

time step no.    813 / 17520  time = 2.92680000E+06
*****

iteration no.:    10

absolute residual source sums:
theta.....0.5819E-03  phi.....0.1391E-01

iteration no.:    20

absolute residual source sums:
theta.....0.5828E-03  phi.....0.1554E-01

iteration no.:    30

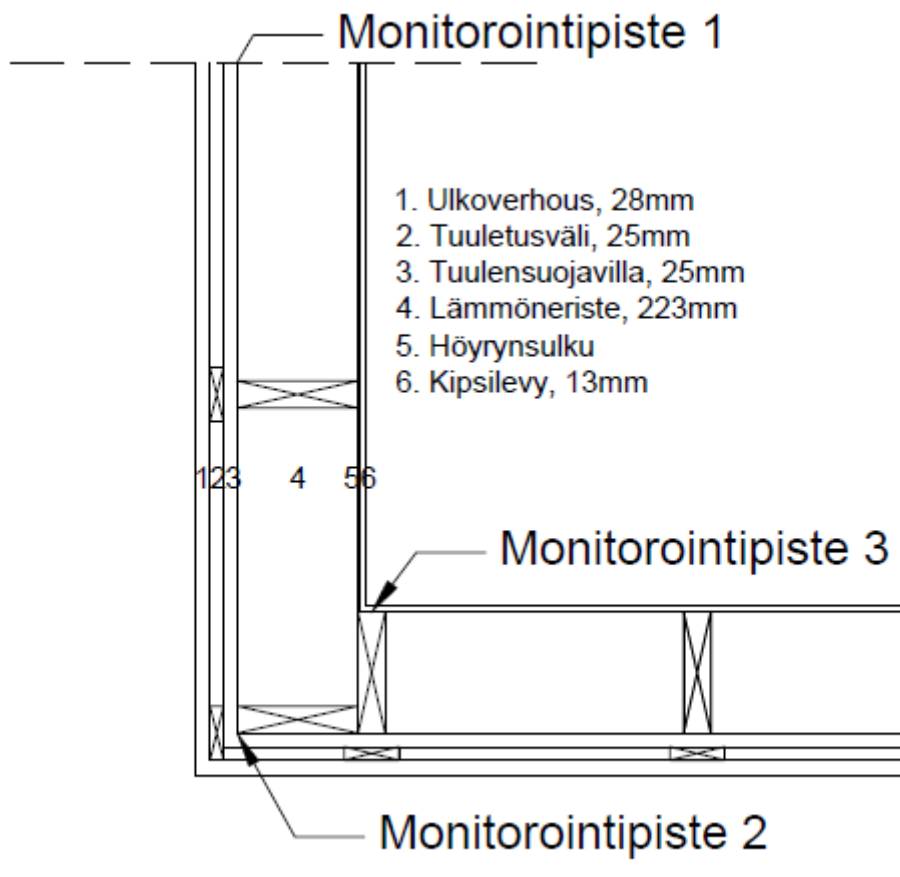
absolute residual source sums:
theta.....0.6956E-03  phi.....0.1610E-01
```

KUVA 35. Simulointi meneillään

Simuloinnin suorittamisen jälkeen tarkistettiin konvergointivirheiden määrä. WUFI 2D:ssa virheiden määrän pystyi näkemään "Convergence Analyzer" -valikon kautta. Simuloidussa mallissa oli 5 892 virhettä. Kyseisestä valikosta pystyi myös tarkistamaan tarkemmin, kuinka suurista virheistä oli kyse. Phin arvo 1E-02 eli 0,01 esimerkiksi kertoo, että jossakin elementissä pitäisi olla suhteellinen kosteus 80 %, mutta nyt tuloksissa se on 81 % tai 79 %. Thetan arvo vastaa lämpötilan heittoa samalla tavalla. Virheiden suuruutta tutkittiin ja todettiin, että suurin osa virheistä oli kuitenkin siedettävällä tasolla. Tuloksiin tuli kuitenkin suhtautua varauksella. (Convergence analyzer. 2011.)

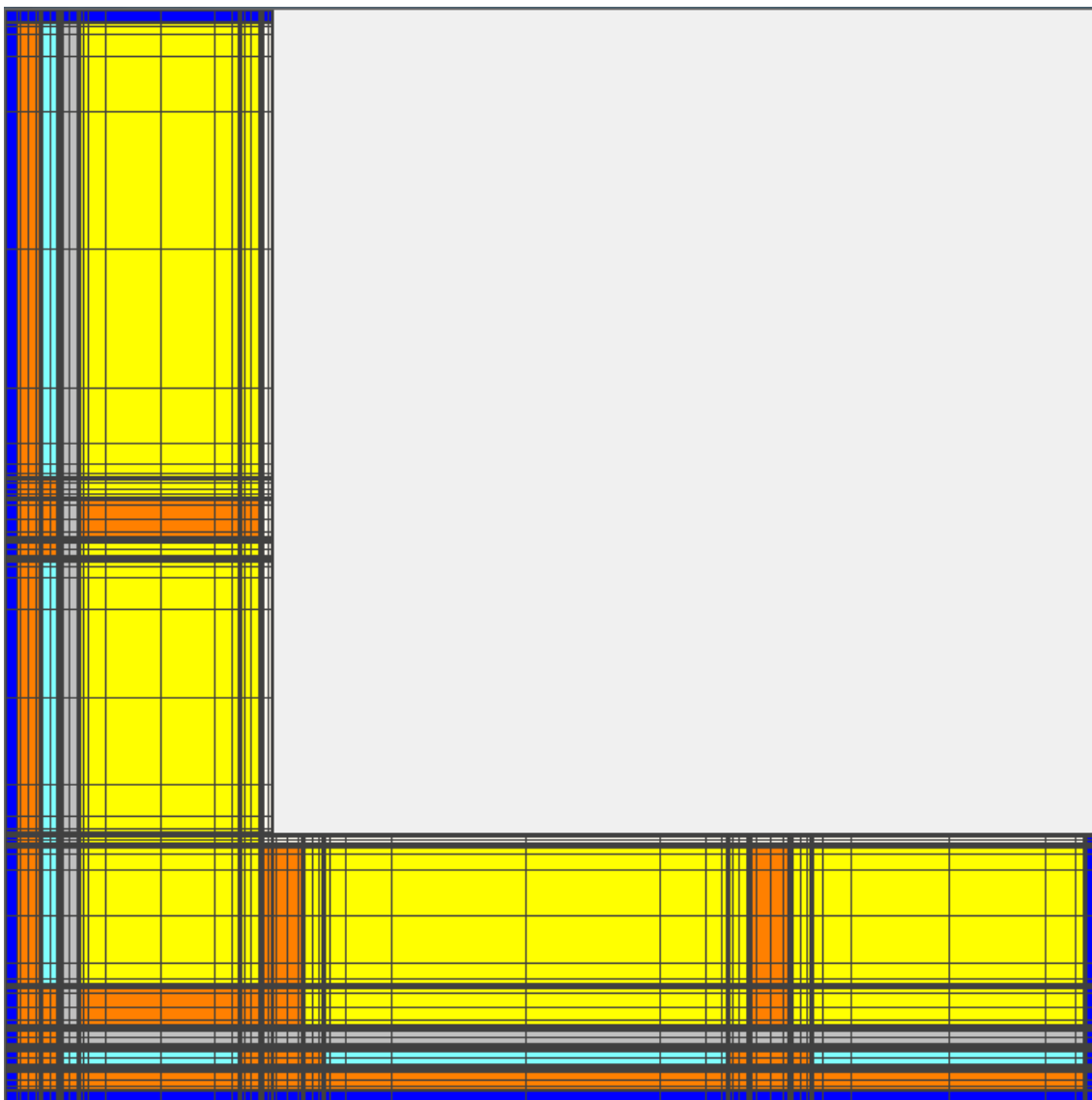
5.2.9 Tulosten tallennus

Simuloinnin jälkeen haluttujen elementtien tuloksia tallennettiin WUFI Graph -ohjelmalla. Ensimmäisenä tarkistettiin "Page 1" -kohdasta, että koko kappaleen kosteussisältö oli tasoittunut alkuolosuhteista. 2D-simuloinnissa ei tarvinnut etukäteen valita monitoroitavia pisteitä, vaan ohjelma tallensi tietokantaan kaikkien yksittäisten elementtien tiedot. Simuloinnin jälkeen WUFI Graph -ohjelmalla valittiin elementit josta haluttiin tallentaa tietoja. Simuloinnista tallennettiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot kolmesta monitorointipisteestä (kuva 36).



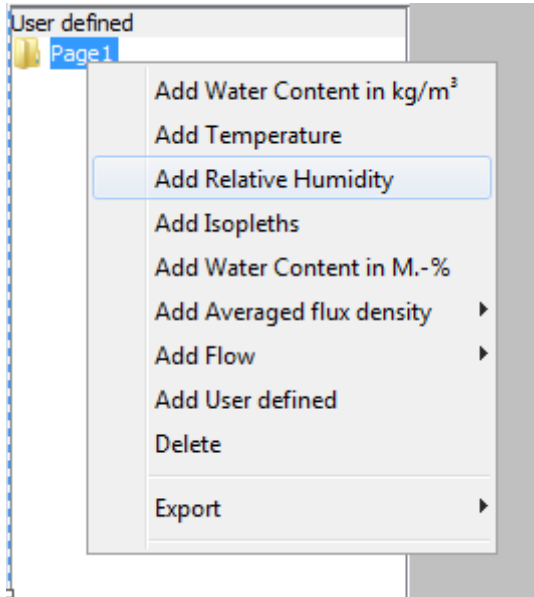
KUVA 36. Analysoitavaksi valitut monitorointipisteet

Tietojen tallentamiseksi valittiin ylävalikosta "New page" -kohdan alta haluttu tieto. Tämä aukaisi rakennemallin ikkunaan, josta valittiin haluttu elementti. Mallin laidoilla olevat siniset elementit vastasivat määritettyjä pintavastuksia. (Kuva 37.)



KUVA 37. Tietojen tallennus rakennemallista

Liikkuminen ikkunassa tapahtui samalla tavalla kuin geometrian luomisessa. Jos ikkunasta valittiin useampi elementti, laski ohjelma niistä keskiarvon. Ensimmäisenä tallennettiin lämpötilan tiedot WUFI Prolla tehtyä simulaatiota vastaavasta monitorointipiste 1:stä. Tämän jälkeen lisättiin suhteellisen kosteuden arvot valitsemalla "User defined" -kohtaan tullut "Page 1". (Kuva 38.)



KUVA 38. Suhteellisen kosteuden lisääminen

Seuraavaksi lisättiin loputkin monitorointipisteet. Ensin valittiin aina uuden elementin osalta "New page" -kohdan kautta ensimmäinen tallennettava arvo, ja loput halutut arvot kyseisestä elementistä lisättiin "User defined" -valikon kautta. Uuden elementin lisäyksessä piti huomioida, että WUFI jätti aikaisemmin valitun elementin automaattisesti valituksi, joten se piti aina muistaa käydä erikseen valitsemassa pois.

Tiedot tallennettiin tekstitiedostoon valitsemalla haluttu kuvaaja ja klikkaamalla "Export->as File". Lämpötilan ja kosteuden tiedot jouduttiin tallentamaan erikseen. Tekstitiedostot siirrettiin samalla tavalla kuin Exceliin kuin esimerkkirakenne 1:ssä. Koska WUFI 2D käytti desimaalierottimena pistettä, jouduttiin pisteet korvaamaan pilkuilla ennen kuin tiedoista pystyttiin piirtämään kuvaajia. Tämä onnistui Excelin "Etsi ja korvaa" -toiminnolla. (Kuva 39.)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Time	Temperature							
2	1,10,1991	20							
3	1,10,1991	14,52202							
4	1,10,1991	11,85216							
5	1,10,1991	10,09738							
6	1,10,1991	8,815207							
7	1,10,1991	7,833385							
8	1,10,1991	6,989108							
9	1,10,1991	6,38003							
10	1,10,1991	5,909259							
11	1,10,1991	5,899879							
12	1,10,1991	7,124457							
13	1,10,1991	8,663649							
14	1,10,1991	9,990608							
15	1,10,1991	10,38165							
16	1,10,1991	10,47224							

Etsi ja korvaa

Etsi Korvaa

Etsittävä: .

Korvaava: ,

Korvaa kaikki Korvaa Etsi kaikki Etsi seuraava

Microsoft Office Excel

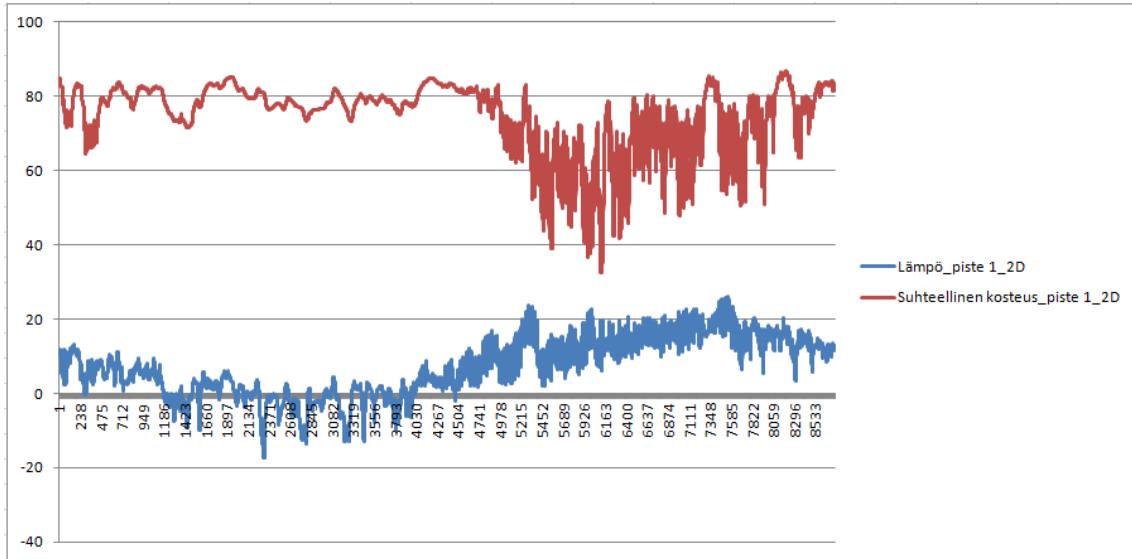
Excel on käynyt tiedoston läpi ja tehnyt 52563 korvausta.

OK

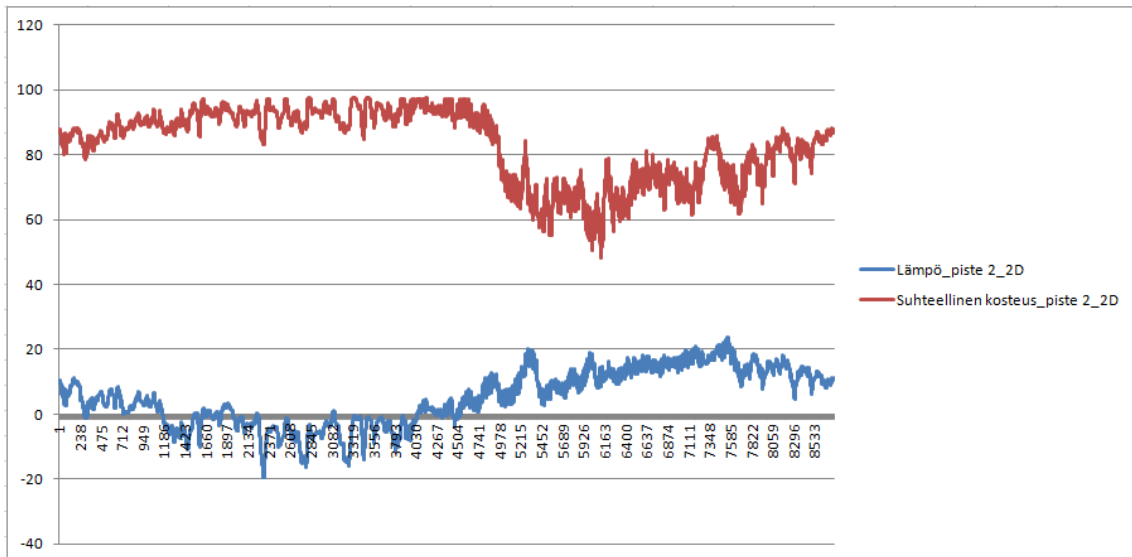
KUVA 39. Etsi ja korvaa -toiminto Excelissä

5.2.10 Simuloinnin tulokset

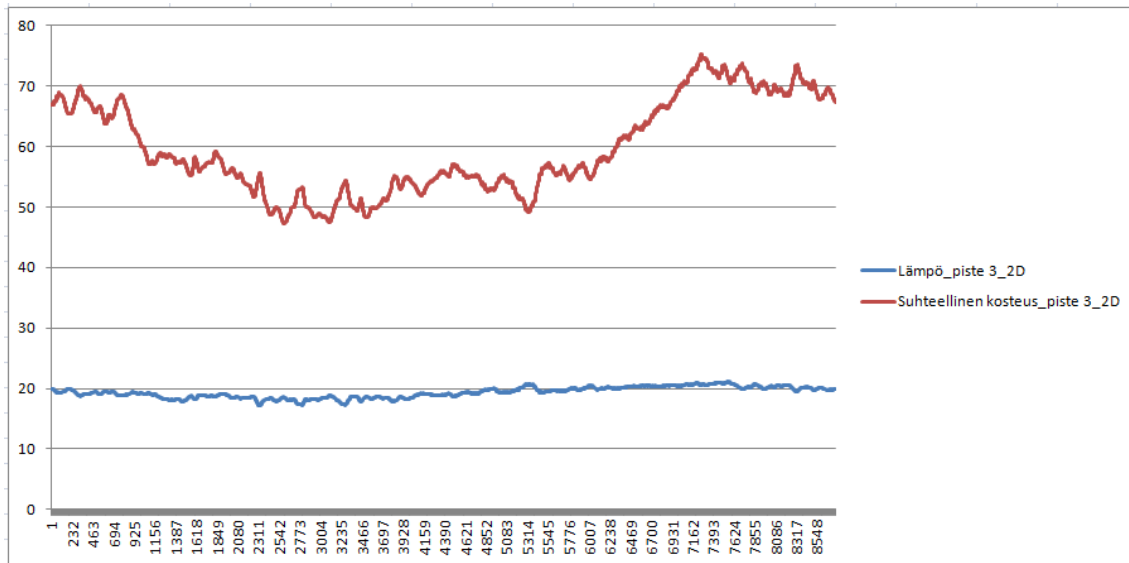
Myös kaikista esimerkkirakenne 2:n monitorointipisteistä piirrettiin kuvaajat jälkimmäiseltä vuodelta lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta. Niitä voidaan käyttää omien tulosten vertaamisessa opinnäytetyössä saatuihin tuloksiin. Monitorointipiste 3:n arvot tallennettiin höyrynsulun sisäpinnasta. (Kuva 40; Kuva 41; Kuva 42.)



KUVA 40. Monitorointipiste 1

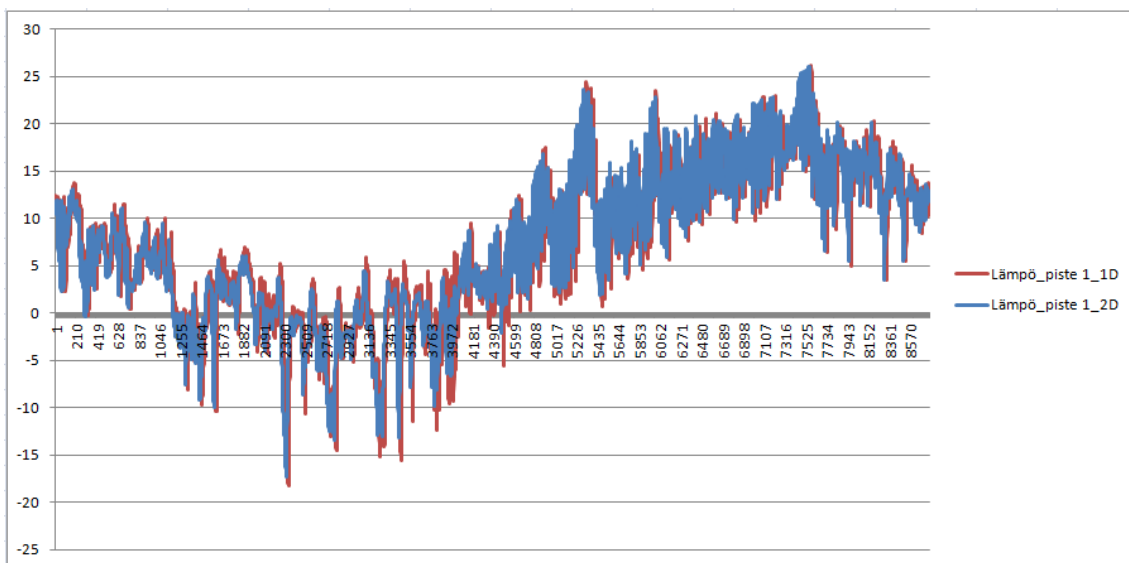


KUVA 41. Monitorointipiste 2

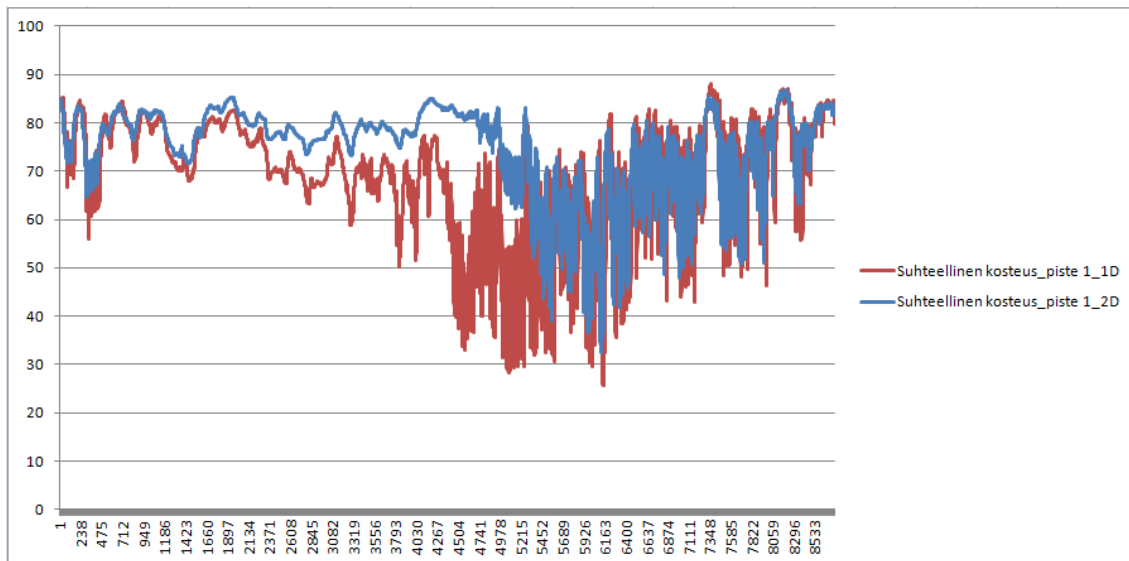


KUVA 42. Monitorointipiste 3

Viimeiseksi verrattiin vielä monitorointipisteen 1 arvoja WUFI Prolla suoritettuun simulointiin (kuva 43; kuva 44).



KUVA 43. Vertailu lämpötilan osalta



KUVA 44. Vertailu suhteellisen kosteuden osalta

Lämpötilan osalta ei havaittu käytännössä suuria eroja, vaikka explisiittinen säteilytase oli käytössä. Tavallista suuremmalla ilmanvaihdolla ilmeisesti pystyttiin huomioimaan jäähtymisen vaikutus kohtuullisen hyvin ulkoseinärakenteessa. Suhteellisen kosteuden osalta eroa syntyi enemmän. Todennäköisimmin ero johtui ilmalle käytetystä tarkemmasta kosteuskapasiteettifunktiosta. On myös mahdollista, että osa erosta johtui suuresta konvergointivirheiden määrästä.

6 POHDINTA

Työn päätavoitteena oli tuottaa WUFI Pro- ja WUFI 2D -ohjelmilla esimerkiksiimulaatiot, joiden avulla uusi käyttäjä voisi perehtyä ohjelman käyttämiseen. Lisäksi niitä voitaisiin muutenkin käyttää ohjekirjamaisena apuna simulaatioiden suorittamisessa.

Esimerkkisimulaatiot saatiin dokumentoitua työhön hyvin lähtötietoineen. Opin- näytetyön avulla uuden käyttäjän pitäisi pystyä toistamaan simulaatiot itse ja päättämään samoihin tuloksiin. Molemmista simulaatioista saatiin tallennettua lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot valituista monitorointipisteistä, joihin toinen käyttäjä voi verrata saamiaan tuloksia.

Ohjelman monimuotoisuudesta johtuen kaikkien asetusten ja pienten muutosten vaikutusta tuloksiin ei pystytty selvittämään. Todellisen oppaan kirjoittaminen kosteussimuloinnista vaatisi todella suuren määrän erilaisten yhdistelmien ko- keilua erilaisilla asetuksilla ja rakenteilla. Esimerkiksi explisiittiseen säteilytaseen käyttöä esimerkkirakenne 2:ssa ei todellisuudessa voi suositella. Se lisäsi kon- vergointivirheiden määrää huomattavasti ja pidensi simulointiaikaa. Suuremmal- la ilmanvaihtomäärällä tuuletusvälissä saadaan kohtuullisen hyvin huomioitua vastasäteilyn jäähdyttävä vaikutus ulkoseinärakenteessa. Säteilytaseen käyttö käytiin kuitenkin esimerkin vuoksi lävitse.

Tulevaisuudessa kosteussimuloinnin osalta olisi tärkeä tutkia esimerkiksi ylä- ja alapohjien ja niiden liitosten simulointia, tuuletusvälin pois jättämistä mallista sekä uloimpina olevien ohuiden kerrosten korvaamista SD-arvoilla. Simuloituja tuloksia olisi hyvä myös päästä vertaamaan todellisista kohteista mitattuihin tie- toihin. Lisäksi tulosten analysointia pitäisi viedä pidemmälle esimerkiksi VTT- TTY-homemallin avulla.

Olen kuitenkin tyytyväinen nyt dokumentoituihin esimerkkirakenteisiin. Suomek- si on saatavilla vain vähän ohjeistusta WUFI:n käytöstä, joten tämän työn avulla uusi käyttäjä pääsee vähintäänkin alkuun. Uskon opinnäytetyöstä olevan apua myös kokeneemmille käyttäjille.

LÄHTEET

1D:Dialog Assembly. 2009. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/1D:Dialog_Assembly. Hakupäivä 14.4.2015.

2D:Dialog Grid. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/2D:Dialog_Grid. Hakupäivä 14.4.2015.

Björkholtz, Dick 1997. Lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Climate Data. 2012. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:Climate>. Hakupäivä 10.4.2015.

Convergence analyzer. 2011. WUFI Forum. Saatavissa: <http://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=439>. Hakupäivä 24.4.2015

Creating *.WAC Weather Files. 2012. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi.de/wufi/demofilme_e.html. Hakupäivä 14.4.2015.

Creating Weather Files. 2013. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi.de/wufi/wetterdaten_e.html. Hakupäivä 10.4.2015.

Details:LongWaveExchange. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:LongWaveExchange>. Hakupäivä 14.4.2015.

Details:MoistureStorageFunction. 2013. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:MoistureStorageFunction>. Hakupäivä 16.4.2015.

Details:SurfaceCoatings. 2013. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:SurfaceCoatings>. Hakupäivä 14.4.2015.

Details:RainReductionFactor. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:RainReductionFactor>. Hakupäivä 14.4.2015.

Dialog: Climate. 2009. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/1D:Dialog_Climate. Hakupäivä 10.4.2015.

Dialog: Surface Transfer Coefficients. 2009. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/1D:Dialog_SurfaceTransferCoefficients. Hakupäivä 14.4.2015.

Hagentoft, Carl-Eric 2001. Introduction to building physics. Lund: Studentlitteratur.

Jylhä, Kirsti 2015. RE: Rakennusfysiikan testivuosien muuntaminen WUFlin. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Sami Saari. 25.2.2015.

Manelius, Elina 2013. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyyskokeiden kehittäminen. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Mäkitalo, Mikael 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. 2013. Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>. Hakupäivä: 8.4.2015.

Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus. 2004. Rafnet-ryhmä. Saatavissa: http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf. Hakupäivä 9.4.2015.

RIL 107-2012. 2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

RT 82-11006. 2010. Ulkoseinärakenteita. Rakennustieto Oy. Saatavissa: www.rakennustieto.fi/kortistot/rt/kortit/105115.html.stx. (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 16.4.2015.

Ruosteenoja, Kimmo - Jylhä, Kirsti - Mäkelä, Hanna - Hyvönen, Reijo - Pirinen, Pentti - Lehtonen, Ilari 2013. Rakennusfysiikan testivuosi sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa REFI-B-hankkeen tuloksia. Helsinki.

Sd value vs. explicit layer. 2013. WUFI Forum. Saatavissa: <http://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=794>. Hakupäivä 14.4.2015.

Siikanen, Unto 2014. Rakennusfysiikka: perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto.

Torvikoski, Antti 2013. T522105 Rakennusfysiikka, 5 op. Opintojakson oppimateriaali kevät 2013. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

Vinha, Juha - Laukkarinen, Anssi - Mäkitalo, Mikael - Nurmi, Sakari - Huttunen, Petteri - Pakkanen, Paavo - 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. Saatavissa: http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21640/vinha_ilmaston_muutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf. Hakupäivä 15.4.2015.

Vinha, Juha 2010. Lämpö ja lämmön siirtyminen RIL 255-2010. Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Saatavissa: <http://www.ril.fi/media/files/julkaisut/rakfys/luku-4-lampo-3.12.10-vinha.pdf>. Hakupäivä 16.4.2015.

What is WUFI?. 2008. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/1D:Wufi_1D_What_is. Hakupäivä 10.4.2015.

WUFI - What's that?. 2013. Fraunhofer IBP. Saatavissa: http://www.wufi.de/wufi/intro_e.html. Hakupäivä 10.4.2015.

<u>Esimerkkirakenne 1 ja 2</u>		
Rakennekerrokset		
Materiaali	Paksuus (m)	Materiaalilähde
Mänty	0,028	¹
Tuuletusväli	0,025	^{2,3}
Tuulensuojamineraalivilla	0,025	¹
Lasivilla	0,223	¹
Höyrynsulkumuovi	0,001	¹
Kipsilevy	0,013	¹
¹ Vinha 2013		
² Esimerkkirakenne 1:ssä WUFI materiaalikirjasto		
³ Esimerkkirakenne 2:ssa parennettu ilmanvälin kosteuskapasiteettifunktio		
Parannettu ilmapäli	SK [-]	Kosteuspitoisuus kg/m ³
	0	0
	1	0,017
Ulkoilma		
		Jokioinen 2004 ⁴
Sisäilma		EN 13788, RIL 107-2012 mukainen kosteusluokka 2 ⁵
⁴ Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. 2013		
⁵ RIL 107-2012. 2012		

Opinnäytetyön aikana löydettyjä lähteitä materiaalitietojen osalta.

Manelius, Elina 2011. Rapattujen ulkoseinien (Maxit/Weber) kosteustekninen toimivuus. Kandidaatintyö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

Masea-materiaalikirjasto. Saatavissa: <http://www.masea-ensan.de>. Hakupäivä 15.4.2015.

Mäkitalo, Mikael 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa:

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/20999/makitalo.pdf>.

Hakupäivä 15.4.2015.

Vinha, Juha - Laukkarinen, Anssi - Mäkitalo, Mikael - Nurmi, Sakari - Huttunen, Petteri - Pakkanen, Paavo - 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. Saatavissa:

http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21640/vinha_ilmaston_muutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf. Hakupäivä

15.4.2015.

Vinha, Juha - Valovirta, Ilkka - Korpi, Minna - Mikkilä, Antti - Käkelä, Pasi 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampere. Saatavissa:

http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/16493/vinha_rakennusmateriaalien_rakennusfysikaaliset_ominaisuudet.pdf. Hakupäivä 15.4.2015.