

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Juuso Liuha

KOSTEUDEN JA LÄMMÖN SIIRTYMISEN FEM-MALLINTAMINEN
SEKÄ HOMEINDEKSIN LASKENTA

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014



**OPINNÄYTETYÖ
TOUKOKUU 2014
Rakennustekniikan koulutusohjelma**

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU

Tekijä
Juuso Liuha

Nimeke
Kosteuden ja lämmön siirtymisen FEM-mallintaminen sekä homeindeksin laskenta

Toimeksiantaja
Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli rakentaa toimiva rakenteen kosteuden ja lämmön siirtymisen laskentamalli Comsol Multiphysics -ohjelmaan ja sitä myötä pyrkiä tarkastelemaan homeen kasvun laskentamallia kyseisessä ohjelmassa. Tarkoituksena oli myös pohtia, kuinka homeindeksin laskenta olisi helpoin suorittaa, jos rakenteita haluaisi mallintaa tehokkaammin Comsolissa.

Taustatieto perustuu kirjallisuuteen ja aiempiin tutkimuksiin, joissa samaa homeen kasvun laskentamallia on käytetty. Homeindeksin laskentaan käytettiin apuna myös Excel-pohjaista laskentamallia.

Comsoliin rakennetusta laskentamallista tuli toimiva. Se mallintaa kosteuden ja lämmön siirtymisen ajasta riippuvalla mallilla. Laskentamallin säädätänä toimii Jyväskylän säädata. Homeindeksin laskentamalli kuvaa kasvavaa homeindeksiä. Homeen kasvun taantumisen mallintaminen jäi pois Comsolista sen hankaluuden vuoksi. Taantumista kuitenkin tarkasteltiin Excelissä.

Laskentamallin jatkokehityksen kannalta olisi tärkeää saada mallintamisen laskenta-aikoja lyhyemmiksi. Tällä hetkellä laskentamalli on liian hidas tehokkaaseen käyttöön. Homeen taantumista kuvaavan laskentamallin rakentaminen Comsoliin olisi kannattavaa, jos ohjelman laskentatoiminnasta saa nopeampaa.

Kieli

Sivuja 29

Suomi

Liitteet 2
Liitteiden sivumäärä 9

Asiasanat

FEM-mallintaminen, home, kosteus, lämpö



THESIS
MAY 2014
Degree Programme in Civil Engineering

Karjalankatu 3
FI 80200 JOENSUU
FINLAND

Author
Juuso Liuha

Title
Moisture and Heat Transfer FEM-modeling and Mold Index Calculation

Commissioned by
Karelia university of applied sciences

Abstract

The aim of this thesis was to create a functional heat and moisture transfer calculation model for structure in Comsol Multiphysics program. After the model was created the purpose was to examine the calculation model of mold growth in the program. In addition, the purpose was to consider the easiest method to carry out mold index calculation if one would like to model the structures more efficiently in Comsol.

The background information is based on the literature and previous studies where the same mold growth model have been used. Excel-based calculation model were also used in the mold index calculation.

Calculation model which was built to Comsol became operational. It models the moisture and heat transfer from a time-dependent model. The calculation model uses the functions of Jyväskylä weather data. Mold index of the calculation model describes the growing mold index. Mold growth recession modeling was left out due to the difficulty of the Comsol. Mold growth recession was examined in Excel.

For further development of modeling it is important to shorten the counting periods. At the moment the model is too slow for effective use. It would be profitable to create a mold growth recession model if calculation periods could be obtained faster.

Language

Pages 29

Finnish

Appendices 2

Keywords

FEM-modeling, mold, moisture, heat

Sisällys

1	JOHDANTO.....	5
2	LÄMPÖ JA KOSTEUS.....	6
2.1	Lämmön siirtyminen	6
2.2	Kosteus.....	6
2.2.1	Kosteusrasitukset	7
2.2.2	Kosteuden siirtyminen	9
3	HOME.....	10
3.1	Homeen synty	10
3.2	Homeindeksi	11
4	COMSOL MULTIPHYSICS	15
4.1	Laskentamalli	16
4.2	Lämmön siirtymisen mallintaminen	18
4.3	Kosteuden siirtymisen mallintaminen.....	19
4.4	Homeindeksin mallintaminen	20
5	TULOKSET	20
6	TULOSTEN ARVIOINTI.....	26
7	POHDINTA.....	27
	LÄHTEET.....	29

Liitteet

Liite 1	Vertailutulokset
Liite 2	Lisätarkasteluun valitut rakenteet

1 Johdanto

Tutkimuksen tarkoituksena oli rakentaa toimiva lämmön ja kosteuden siirtymismalli Comsol Multiphysics ohjelmaan ja selvittää onko VTT:n ja TTK:n kehittämä homeen kasvun laskentamallia mahdollista mallintaa FEM-pohjaisella laskentaohjelmalla. Työssä oli tavoitteena saada homeindeksin avulla havainnollistavampia kuvia rakenteiden toiminnasta. Tarkoituksena oli myös selvittää kuinka homeindeksin laskenta olisi helpoin suorittaa.

Jotta homeindeksiä saatiin laskettua, oli ensin tehtävä toimivat lämmön ja kosteuden siirtymismallit. Näistä homemalli sai tarvittavia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja laskentaan.

Tutkimuksessa käytettiin Kari Lindroosin tekemän opinnäytetyön tuloksia (liite 1) vertailuarvoina. Lindroosin opinnäytetyössä tutkittavana kohteena oli polyuretaanieristeinen seinärakenne, jonka hän mallinsi Wufi 2D –ohjelmalla. Saaduista tuloksista hän laski homeindeksi-arvot kriittisiin kohtiin Excel-pohjaisella laskentamallilla.

Tutkimuksen tarkoituksena ei ollut luoda täydellistä homeindeksin laskentamallia. Yritimme kuitenkin luoda laskentamallia ajan sallimissa puitteissa mahdollisimman pitkälle, ja pohtia lopuksi kannattaako laskentamallia kehittää jatkossa ja kuinka sitä olisi kehitettävä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Karelia-ammattikorkeakoulu ja työ tehtiin osana PePe – hanketta (Pohjois-Karjalasta energiatehokkaan puurakentamisen edelläkävijä). Karelia-ammattikorkeakoulun opettajat Miska Piirainen ja Hannu Tyrväinen olivat työssä mukana hankkeen rahoituksella. He avustivat laskentamallin rakentamisessa Comsolin.

2 Lämpö ja kosteus

2.1 Lämmön siirtyminen

Lämmöllä on kolme eri siirtymismuotoa:

- johtuminen
- säteily
- konvektio.

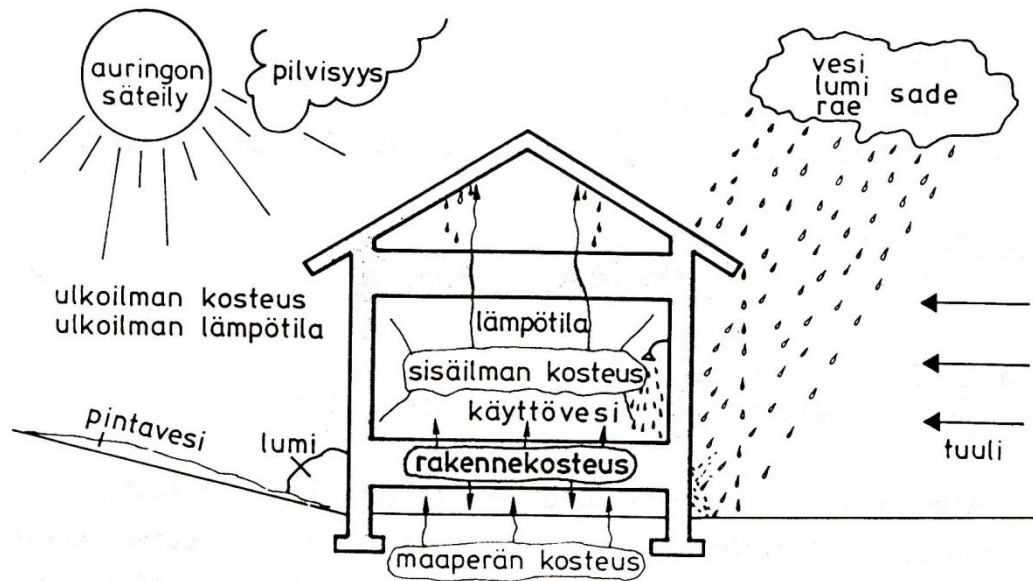
Johtumisessa voidaan puhua myös lämmön virtauksesta, koska johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen. Lämpö pyrkii tasoittumaan siirtymällä lämpimästä kylmään. [2, s. 12.]

Kappaleen lämpötila ollessa absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, se lähettää säteilyä. Säteilyn mukana kulkeutuu energiaa. Kohdatessaan jonkin pinnan, säteily heijastuu, absorboituu tai menee kappaleesta läpi. Kappaleeseen siirtyy lämpöä, kun energia absorboituu toiseen kappaleeseen. [5, s. 174.]

Kun lämpö siirtyy nesteen tai kaasun virtauksen, mukana puhutaan konvektios-
ta. Konvektio on joko pakotettua tai vapaata. Pakotetussa konvektiossa ulko-
puolinen voima liikuttaa nestettä tai kaasua. Ulkopuolinen voima voi olla esi-
merkiksi ilmanpuhaltimet ja ihmisten liikkeet. Luonnollisessa konvektiossa nes-
teen ja kaasun liikuttajana toimii lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero. [2, s. 13.]
Lämpötilaero saa esimerkiksi veden virtaamaan lämmityspattereissa [5, s. 173].

2.2 Kosteus

Rakennukseen vaikuttavat suurimmat kosteusrasitukset ovat sade, ilman kos-
teus, rakennuskosteus ja maaperän kosteus. Muita merkittäviä kosteuslähteitä
ovat pintavedet, vesivuodot ja sulamisvedet. Lisäksi huomioon on otettava muut
kosteuteen vaikuttavat säätekijät kuten lämpötila ja tuulen vaikutus. Kuvassa 1
on esitetty rakenteisiin vaikuttavat kosteusrasitukset. [1, s. 4.]



Kuva 1. Rakenteisiin vaikuttavat kosteusrasitukset [1, s. 14].

2.2.1 Kosteusrasitukset

Sade voi ilmetä vetenä, lumena tai jäänä. Rakentamisen aikainen sade vaikuttaa eniten suojaamattomiin rakennustarvikkeisiin. Puutuotteet ja lämmöneristeet ovat sateelle arimpia, ja yleensä kosteiden eristeiden mukana tulee rakenteseen rakennekosteutta. Rakentamisen jälkeisestä sateesta suurin vaikutus kohdistuu rakennusten vaakapinnoille kuten katoille, terasseille ja parvekkeille. Em. pinnoille onkin syytä mitoittaa vedenpoistojärjestelmät. Tuulen vaikutuksesta rakennusten seinille kohdistuu viistosadetta. Viistosateen määrä on n. 20–30 % pystysuoran sateen määrästä. Viistosade vaikuttaa eniten seinien yläosiin ja nurkkiin. [2, s. 40-41.]

Ilman kosteuden määrästä puhuttaessa ilmoitetaan yleensä ilman sisältämä absoluuttinen kosteus (g/m^3) tai ilman suhteellinen kosteus (%) [1, s. 5]. Ilmassa olevan kosteuden määrä on lämpötilasta riippuvainen. Tietyissä lämpötilassa ilma voi sisältää tietyn verran kosteutta, eli vesihöyryä, tätä kosteusmäärää kutsutaan kyllästyskosteudeksi. Mitä suurempi lämpötila on, sitä enemmän ilma voi sisältää kosteutta. Ilman suhteellisen kosteuden arvon voi laskea kaavalla 1. [2, s. 45.]

$$RH = \frac{v_i}{v_k} \cdot 100\% \quad (1)$$

missä

RH	on ilman suhteellinen kosteus (%)
v_i	on ilman vesihöyryn määrä (g/m^3)
v_k	on tarkasteltavaa ilman lämpötilaa vastaava kyllästystilan vesihöyryn määrä (g/m^3).

Ulkoilman suhteellinen kosteus voi vaihdella suuresti eri vuorokauden aikoina. Kesällä keskipäivän suhteellinen kosteus voi olla alle 50 %. Yöllä lämpötilan laskiessa ja absoluuttisen kosteuden pysyessä samana, suhteellinen kosteus kasvaa usein 100 %:iin ja kosteus saattaa tiivistyä rakenteiden ulkopinnoille. [1, s. 6.]

Sisäilman kosteuden määrään vaikuttaa ulkoilman kosteus, ilmanvaihto ja sisätilojen eri kosteuslähteet. Lisäkosteutta syntyy ensisijaisesti ihmisistä, pyykinpesusta, suihkun käytöstä ja ruuanlaitoista. [2, s. 48.] Sisäilman kosteuden määrä on pienimmillään talvella, kun ilmanvaihdossa ulkoa tuleva korvausilma sisältää vähän kosteutta [1, s. 6]. Sisäilman vesihöyrypitoisuuden voi arvioida kaavalla 2 [2, s. 48].

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \cdot V} \quad (2)$$

missä

v_u	on ulkoilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)
G	on kosteuden tuottosisällä (g/h)
n	on ilman vaihtuvuus aikayksikössä (l/h)
V	on tuuletetun huoneen tilavuus (m^3).

Maaperässä vesihöyryä ilmenee sen maahuokosissa. Huokosten suhteellisen kosteuden oletetaan kosteusteknisessä tarkastelun olevan 100 %. Maaperässä kosteutta esiintyy myös pohjavetenä, vajovetenä ja kapillaarivetenä. [1, s. 9.]

Rakenteista poistuvaa vettä sanotaan rakennekosteudeksi. Kosteutta poistuu, kun rakenteet pyrkivät kosteustasapainoon ympäristönsä kanssa. Kosteuden määrä vaihtelee suuresti ja siihen vaikuttaa rakennusaine, kuljetus, varastointi ja rakentamisen aikainen suojaus. [2, s. 51.]

2.2.2 Kosteuden siirtyminen

Rakenteissa liikkuva kosteus on yleensä vesihöyryä tai vettä. Vesihöyry liikkuu joko konvektion tai diffuusion vaikutuksesta. Nesteen siirtyminen on kapillaarista liikettä, mutta se voi siirtyä myös tuulen tai painovoiman vaikutuksesta. [1, s. 15.]

Diffuusiolla tarkoitetaan vesihöyryn osapaine-eron aiheuttamaa kosteuden liikettä. Kosteus siirtyy suuremmasta osapaineesta kohti pienempää osapainetta. Normaalisti Suomessa olosuhteet ovat sellaiset, että talvella diffuusio tapahtuu seinärakenteen läpi ulkoilmaan päin. Kesällä suunta voi vaihdella ulko- ja sisäilman olosuhteiden vaihdellessa. [1, s. 15.] Diffuusiolla kulkevan kosteuden määrän voi laskea kaavalla 3.

$$g = \delta_p \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (3)$$

missä

δ_p on vesihöyryn läpäisevyys ($\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)

Δp on kosteusero matkalla x (kg/m^3)

Δx on diffuusiomatka (m).

Rakenteen eri puolilla vallitsevat kokonaispaine-erot aiheuttavat konvektion, eli ilmavirtauksen, rakenteen läpi. Ilmanpaine-eroja aiheuttavat tuuli, lämpötilaerot ja ilmanvaihtojärjestelmät. Ilmavirtausten aiheuttamat kosteuden siirtymiset ovat merkityksellisiä lähinnä raoissa ja rei'issä. Mikäli raon tai reiän läpi kulkeva ilmamäärä tiedetään, voidaan kosteusvirta laskea kaavalla 4. [2, s. 58.]

$$g = v \cdot Q \quad (4)$$

missä

v on ilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)

Q on läpi virtaava ilmamäärä (m^3/s).

Kosteuskonvektio on kosteuden siirtymistä ilmavirran mukana. Sillä ei ole ainoastaan rakennetta vaurioittava vaikutus, vaan se myös kuivattaa rakennetta, kun ilma lämpenee virratessaan rakenteen läpi. Yleensä konvektiolla on kuivattava vaikutus ilman virratessa ulkoa sisälle. Rakenne kastuu, jos ilma virratessaan jäähtyy alle kastepisteen. [8, s. 56.]

3 Home

3.1 Homeen synty

Mikrobit tarvitsevat kasvaakseen lämpöä, kosteutta ja ravinteita. Rakennuksissa on yleensä mikrobikasvuston kasvamiseen tarvittava lämpötila ja jopa pöly sisältää tarpeeksi ravinteita mikrobien kasvamiseen. Rakenteiden ja pintojen kosteus on käytännössä ainoa asia, jolla voidaan vaikuttaa mikrobien kasvuun. [8, s. 65.]

Mikrobikasvustolle tarvittavan kosteuden määrä riippuu mikrobilajista, lämpötilasta ja tarjolla olevista ravinteista. Eri mikrobiryhmille vaadittavat vähimmäiskosteusarvot on esitetty taulukossa 1. Vaikka rakenteet kuivuisivat väliaikaisesti, ei mikrobikasvusto tuhoudu kokonaan. Osa mikrobeista jatkaa kasvua kosteuden kohotessa uudelleen. [8, s. 65.]

Taulukko 1. Eri mikrobiryhmien kasvun vähimmäiskosteusvaatimukset lämpötila-alueella 10...40 °C [8, s. 65].

Mikrobiryhmä	Hygroσκοoppista tasapainokosteutta vastaavan ilman suhteellinen kosteus %
Homesientien ja hiivojen kasvu	65...85
Bakteerien, mm. sädesienten kasvu	95
Sinistäjä- ja lahottajasienten kasvu	>95 ¹⁾
Sinistäjä- ja lahottajasienirihmaston leviäminen	>85...95 ²⁾
¹⁾ vastaa puun kosteutta 20...30 % kuivapainosta ²⁾ vastaa puun kosteutta 18...25 % kuivapainosta	

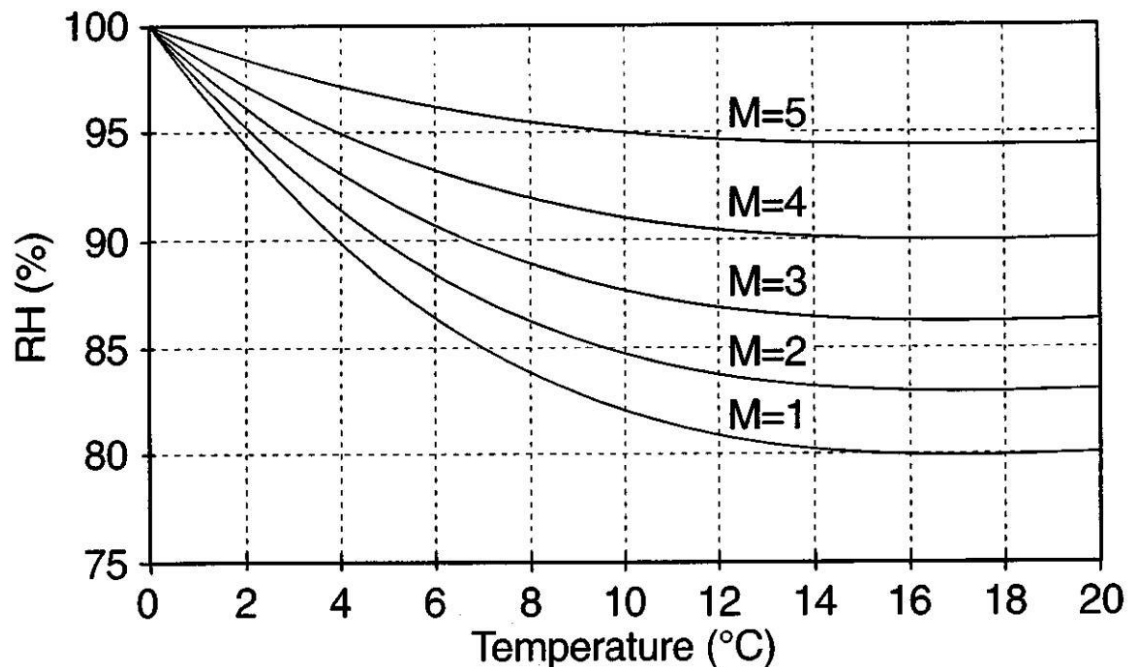
3.2 Homeindeksi

Homeen kasvua tarkastellaan VTT:n ja TTY:n yhteistyössä tekemän rakennusmateriaalien homehtumisastetta kuvaavan laskentamallin avulla. Laskentamalli perustuu kenttä- ja laboratoriotutkimuksiin, jotka on tehty vakioiduissa ja vaihtelevissa kosteus- ja lämpötilaoloissa. Malli kuvaa homehtumisastetta homeindeksiluokituksella (M = 0–6). Homehtuminen alkaa kun, indeksi saa arvon 1. Homeindeksin luokitusperusteet on esitelty taulukossa 2. [7, s. 59.]

Taulukko 2. Homeindeksin luokitusperusteet [7, s. 59].

Homeindeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (itiöitä alkaa muodostua) TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % alasta TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Homeen kasvun alkaminen vaatii sitä suuremman suhteellisen kosteuden, mitä pienempi lämpötila on. Kuviossa 1 on esitetty eri homeindeksiluokkien maksimiarvojen vaatimat olosuhteet. [7, s. 59.]



Kuvio 1. Olosuhteet joilla saavutetaan homeindeksiluokkien maksimiarvot [8, s. 59].

Jotta homeen kasvu hidastuu tai pysähtyy, on suhteellisen kosteuden mentävä alle kriittisen rajan (RH_{crit}). Lämpötilan ollessa yli $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, homeen kasvu ei ole mahdollista. Homeen kasvulle vaadittavan suhteellisen kosteuden kriittiset raja-arvot on esitetty kaavassa 5. [7, s. 60.]

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,0267T^3 + 0,16T^2 - 0,13T + 100, & \text{kun } 0^{\circ}\text{C} < T \leq 20^{\circ}\text{C} \\ 100\%, & \text{kun } 0^{\circ}\text{C} \geq T \geq 50^{\circ}\text{C} \\ RH_{min}, & \text{kun } 20^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

missä

T on lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

RH_{min} on homeen kasvulle vaadittava suhteellisen kosteuden minimiarvo.

Kahden materiaalin rajapintaa tarkasteltaessa herkemmin homehtuva materiaali määrää suhteellisen kosteuden minimiarvon. Puurunkoisissa seinärakenteissa yleensä herkimmin homehtuva materiaali on puu. Vakio-olosuhteissa homeen kasvun alkamiseen tarvittava aika kuvataan homemallissa regressiomallilla (kaava 6). [7, s. 60.]

$$t_m = e^{(-0,68\ln T - 13,9\ln RH + 0,14W - 0,3SQ + 66,02)} \quad (6)$$

missä

T on lämpötila (°C)

RH on suhteellinen kosteus (%)

W on puulaji (0 = mänty, 1 = kuusi)

SQ on pinnan ravinteikkuus (0 = kuivauksen jälkeen uudelleen sahattu pinta, 1 = alkuperäinen, kuivaamosta suoraan tullut pinta).

Rakenteen homehtumisaste määritetään ajan suhteen differentiaaliyhtälöllä kaavalla 7. Kaava kuvaa keskimääräistä homeindeksiä kerran vuorokaudessa ja se ottaa huomioon homeen kehityksasteen, suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutukset. [7, s. 61.]

$$\frac{dM_0}{dt_0} = \frac{1}{7 \cdot e^{(-0,68\ln T - 13,9\ln RH + 66,02)}} k_1 k_2 \quad (7)$$

missä

T lämpötila

RH suhteellinen kosteus

k_1 kuvaa materiaalin pinnan homehtumisnopeutta

k_2 kuvaa homeindeksin kasvun hidastumista alueella

$4 < M < 6$.

Muuttujaan k_1 vaikuttaa materiaalin homehtumisherkkyyssluokka. Homehtumisherkkyyssluokat on esitetty taulukossa 3 ja k_1 arvot taulukossa 4. Kertoimeen k_2 vaikuttaa edeltävän tunnin homeindeksin arvo M sekä materiaalin pinnalla saavutettava suurin homeindeksin arvo M_{max} . [7, s. 61.]

$$k_2 = \max [1 - e^{(2,3 \cdot (M - M_{\max}))}, 0] \quad (8)$$

Taulukko 3. Homehtumisherkkyyssluokat [7, s. 60].

Homehtumis-herkkyyssluokka	Rakennusmateriaalit
Hyvin herkkä	Sahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä	Höylätty kuusi, paperipintaiset tuotteet, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä	Tiilet, sementti- ja muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, mineraalivillat
Kestävä	Lasi ja metalli, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet, alkalinen uusi betoni

Taulukko 4. Homehtumisherkkyyssluokkien kertoimet ja suhteellisen kosteuden minimiarvot [7, s. 61].

Homehtumisherkkyyssluokka	k_1		A	B	C	RH_{\min}
	$M < 1$	$M > 1$				
Hyvin herkkä	1	2	1	7	2	80
Herkkä	0,578	0,368	0,3	6	1	80
Kohtalaisen kestävä	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Kestävä	0,033	0,014	0	3	1	85

Kaavassa 8 esiintyvä homeindeksin maksimiarvo M_{\max} riippuu materiaalin homehtumisherkkyydestä ja suhteellisesta kosteudesta. [7, s. 61.]

$$M_{\max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (9)$$

Kertoimet A , B ja C on esitetty taulukossa 4. Ne määräytyvät materiaalin homehtumisherkkyyden mukaan. Kahden materiaalin rajapinnassa kertoimet määräytyvät herkemmin homehtuvan materiaalin mukaan. Kuivan kauden aikana homeen kasvu on hidasta ja sen vaikutus homeindeksiin huomioidaan laskennassa korjauskertoimilla kaavan 10 mukaisesti. [7, s. 62.]

$$\frac{dM}{dt} = C_{mat} \cdot \begin{cases} -0,032 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } 0h < t < 6h \\ 0, & \text{kun } 6h \leq t \leq 24h \\ -0,016 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } t > 24h \end{cases} \quad (10)$$

missä

t on laskenta-aika alkuhetkestä

t_1 on alkuhetki (h)

C_{mat} on materiaalikohtainen taantumakerroin homeen taantumisnopeudelle.

Kaava 10 kuvaa homeindeksiä tunnin laskentaintervaleissa. Yhtälön kertoimet ovat alun perin pohjautuneet männyn pintapuulle määritettyyn taantumaan. C_{mat} -kerrointa käyttämällä saadaan kaava kattamaan yleisesti käytettävät rakennusmateriaalit. C_{mat} -kertoimen arvot on esitetty taulukossa 5. [7, s. 62.]

Taulukko 5. Kertoimen C_{mat} arvot sekä materiaalien taantumaluokat [7, s. 61].

Homehtumisherkkyyssluokka	Taantumaluokka	Taantumakerroin C_{mat}
Hyvin herkkä	Voimakas taantuma	0,50
Herkkä	Kohtalainen taantuma	0,25
Kohtalaisen kestävä	Vähäinen taantuma	0,10
Kestävä	Vähäinen taantuma	0,10

4 Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics on yleiskäyttöinen ohjelmistoalusta. Se on elementtimenetelmään (FEM) perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) numeeriseen ratkaisuun tarkoitettu ohjelma. Ohjelmisto soveltuu hyvin fysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen ja simulointiin, kuten lämmön ja kosteuden siirtymiseen, sähkömekaniikkaan, nesteen virtaukseen ja kemian sovelluksiin. Comsol soveltuu myös hyvin seuraaville aloille [4.]:

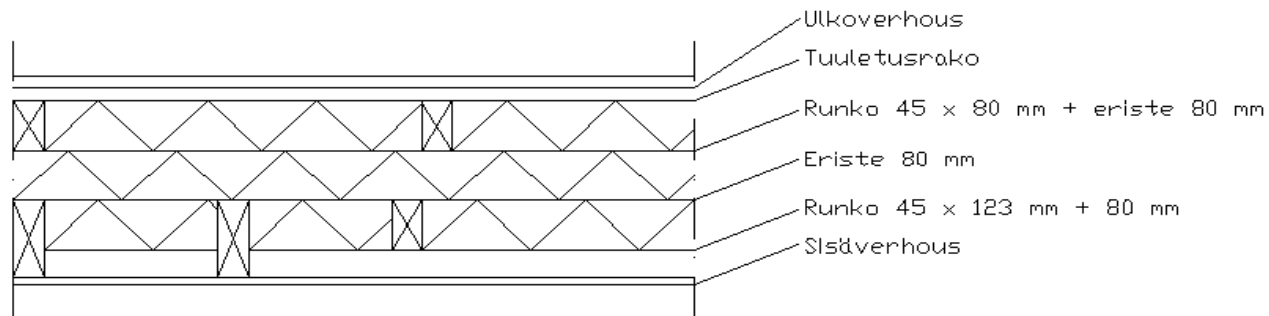
- aaltoyhtälöiden ratkaisemiseen
- aineen- ja massasiirto prosesseihin
- lämmönsiirtoprosesseihin
- osittaisdifferentiaaliyhtälöihin
- puolijohteiden mallintamiseen
- rakenteiden mekaniikkaan
- sähkömagnetiikkaan
- virtausmekaniikkaan.

Cosol Multiphysics toimii hyvin yhteen Cad-, Matlab- ja Excel -ohjelmien kanssa. Ohjelmien ja Cosolin välille pystyy luomaan LiveLink-yhteyden, joka helpottaa ohjelmien välistä toimintaa. LiveLink-yhteyden avulla voi esimerkiksi tuoda tuloksia suoraan Exceliin. AutoCAD-ohjelmilla piirrettyjä kuvia pystyy avaamaan Cosolissa.[3.]

4.1 Laskentamalli

Laskentamallin rakentamista varten mallinnettava rakenne valittiin Kari Lindroosin tekemän opinnäytetyön mukaan, jotta saaduille tuloksille oli vertailuarvoja. Vertailussa käytetyt tutkimustulokset on esitetty liitteessä 1.

Mallinnetussa seinärakenteessa on kolminkertainen polyuretaanieriste kaksoisrungolla. Ulkorunko on 45 x 80 mm ja sisärunko on 45 x 123 mm, kaikki eristelevyt ovat 80 mm paksuja. Ulkoverhouksena seinärakenteessa on puupanelointi, sisäverhouksena kipsilevy. Isomman sisärungon tarkoituksena on, että sisäverhouslevyn taakse jää tilaa sähköjohdoille. Kuvassa 2 on esitetty vaakaleikkaus rakenteesta.



Kuva 2. Leikkaus seinärakenteesta.

Rakenteesta piirrettiin AutoCAD –ohjelmalla leikkauskuva, joka tuotiin Comsolliin. Vaikka Lindroosin opinnäytetyössä asiaa ei ole suoraan mainittu, kuvista voi päätellä, että hän on jättänyt tutkimuksissaan rakenteestaan ulko- ja sisäverhouslevyt pois. Tässäkin työssä jätimme ulko- ja sisäverhouslevyt pois mallinnuksesta, jotta tuloksista tulisi mahdollisimman yhdenmukaisia. Materiaalien ominaisuuksien lähdeaineistona on käytetty Wufi 2D -ohjelmassa olevaa materiaalikirjastoa. Jokaiselle materiaalille syötettiin tiheys-, lämpökapasiteetti- ja lämmönjohtavuusarvot. Lisäksi jokaiselle materiaalille syötettiin erilliseen taulukkoon vesihöyrynläpäisevyysarvot.

Aluksi rakenteelle oli tehtävä toimiva lämmön ja kosteuden siirtymismalli, jotta homemalli pystyttiin rakentamaan. Homemalli tarvitsee laskentaan rakenteen suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja.

Laskennat suoritettiin ajasta riippuvalla mallilla. Ulkoilman olosuhteita varten Comsolliin ladattiin ympäristöministeriön sivuilla oleva Jyväskylän säädata. Säädata oli Excel-muodossa ja sen pystyi suoraan siirtämään Comsolliin. Säädata alkaa 1.1. ja on koko vuoden mittainen, aikahyppäykset ovat tunnin mittaisia. Laskennassa pystyy itse määrittelemään aikajakson, jolle sen haluaa suorittaa.

Kun saimme rakennettua toimivan laskentamallin, kokeilimme sitä myös eri rakenteille. Valitsimme tarkasteluun rakennetyyppejä, joista oli ennakkoon tiedossa, että homehtumista pitäisi tapahtua. Valitut rakenteet ja saadut tulokset on esitelty liitteessä 2.

Taulukossa 6 on esitetty yhteenveto mallintamisessa käytetyistä suureista. Osa suureista on syötetty itse luotuun taulukkoon Comsolissa ja osa on syötetty valmiiden laskentatoimintojen sisään. Taulukossa on maininnat minne suureet on syötetty Comsolissa.

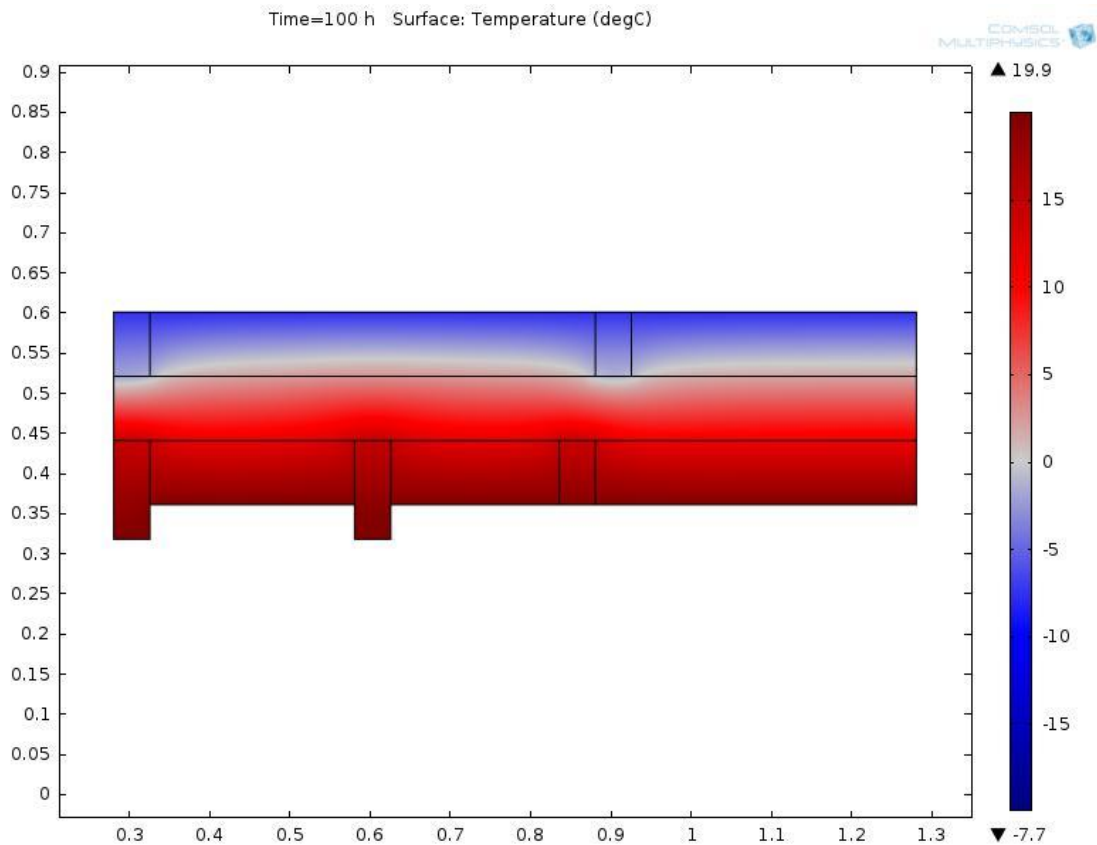
Taulukko 6. Mallintamisessa käytetyt suureet.

Suure	Selite	Sijainti
T_i	Sisälämpötila	Taulukko
T_e	Ulkolämpötila	Taulukko
RH_i	Sisäpuolinen suhteellinen kosteus	Taulukko
RH_e	Ulkopuolinen suhteellinen kosteus	Taulukko
δ_p	Vesihöyryn läpäisevyys	Taulukko
	Tasapainokosteuskäyrät	Taulukko
v_k	Kyllästysvesihöyrypitoisuus	Laskentakaavojen taulukko
RH	Suhteellinen kosteus	Laskentakaavojen taulukko
RH_{crit}	Krittiinen suhteellinen kosteus	Laskentakaavojen taulukko
ρ	Tiheys	Materiaalitiedot
k	Lämmön johtavuus	Materiaalitiedot
C_p	Ominaislämpökapasiteetti	Materiaalitiedot
R_{si}, R_{se}	Pintavastukset	Heat Transfer in Solids (ht)
v	Todellinen vesihöyrypitoisuus	Transport of Diluted Species (chds)
	Homemallin materiaalitiedot	Domain ODEs and DAEs (dode)

4.2 Lämmön siirtymisen mallintaminen

Lämmön siirtyminen rakenteessa mallinnettiin Comsolista löytyvällä *Heat Transfer in Solids (ht)* toiminnolla. Rakenteelle määriteltiin pintavastukset, sekä rakenteen leikkauskohtiin lämpöä läpäisemättömät rajat. Rakenteen sisälämpötilaksi määriteltiin normaali huonelämpötila (+21 °C), joka pysyy vakiona koko

laskennan ajan. Ajasta riippuvassa laskennassa ulkolämpötila vaihtelee ohjelmaan ladatun säädätän mukaisesti. Kuvassa 3 on esimerkki kuinka rakenteessa tapahtuvia lämpötilan vaihteluja voi tarkastella tietyllä ajanhetkellä.



Kuva 3. Rakenteen lämpötilan vaihtelut ajanhetkellä 100 tuntia.

4.3 Kosteuden siirtymisen mallintaminen

Kosteuden siirtymisen mallintaminen haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, joten tarkastelimme vain vesihöyryn liikettä diffuusiona. Diffuusion mallintamiseen käytimme *Transport of Diluted Species (chds)* toimintoa. Toimintoon lisättiin reaktiot, jotka mallintavat vesihöyryn muuttumista vedeksi ja veden höyrystymistä. Jotta jokaisen materiaalin kosteuskäyttäytyminen saatiin oikean mukaiseksi, määriteltiin materiaaleille tasapainokosteuskäyrät. Tarpeen oli myös lisätä kaavat, jotka laskivat todellista vesihöyrypitoisuutta sisä- ja ulkopuolella rakennetta.

4.4 Homeindeksin mallintaminen

Homeindeksiä kuvaava laskentakaava on differentiaaliyhtälö. Comsolista löytyi differentiaaliyhtälöiden laskentaan *Domain ODEs and DAEs (dode)* toiminto. Toiminnot lisättiin lähde-terminit (*Source*), jonne sai syötettyä kasvavan homeindeksin kaavan. Kaavaa lisättäessä oli muistettava, että Comsol laskee tuloksia joka sekunnille. Koska homeindeksin kaava kuvaa homehtumisastetta kerran vuorokaudessa, oli kaava jaettava 86400 sekunnilla. Homehtumisasteen kaava tehtiin molemmille materiaaleille erikseen, joka mahdollisti materiaalin homehtumisherkyydestä riippuvan homehtumisnopeutta kuvaavan kertoimen lisäämisen

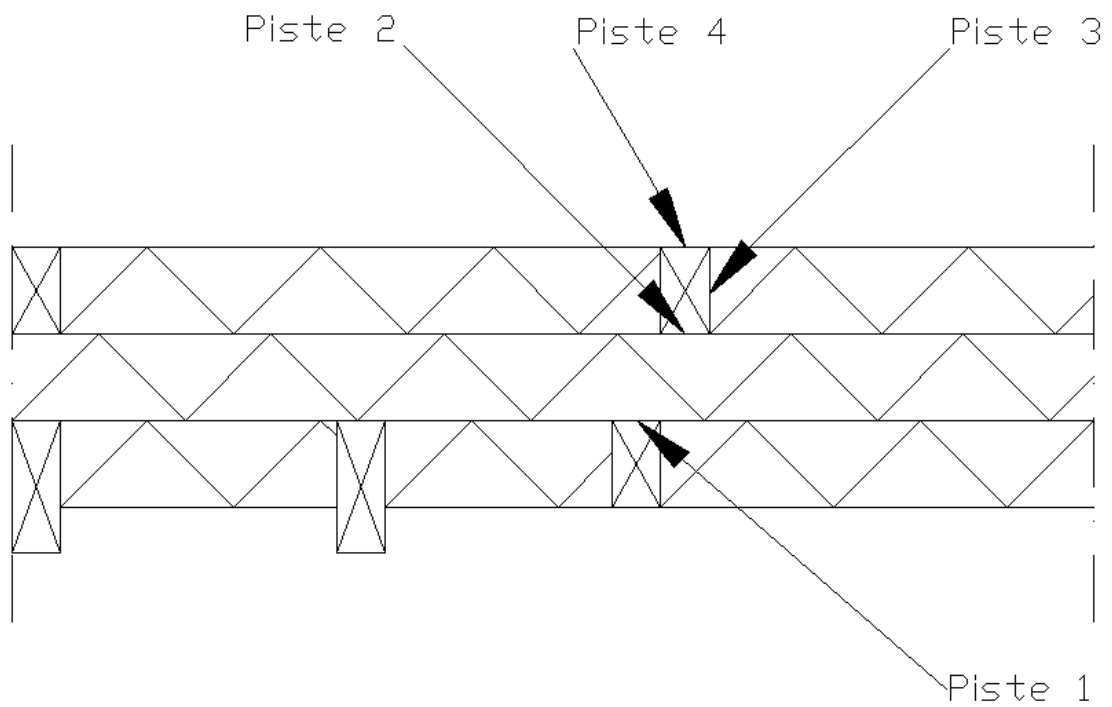
Homeen kasvun taantumista kuvaavan mallin rakentamisen jätimme pois Comsolista sen rakentamisen hankaluuden vuoksi. Taantumista tarkastelimme kuitenkin Exceliin rakennetussa laskentamallissa. Siirsimme Exceliin Comsolista saadut suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot, joiden avulla pystyimme laskemaan homeindeksin.

5 Tulokset

Valitsin lopulliseen tarkasteluun laskentajakson pituudeksi vajaan kahden kuukauden aikavälin. Laskennan aloituspäivämäärä oli 28.5. ja päättymispäivämäärä 16.7.

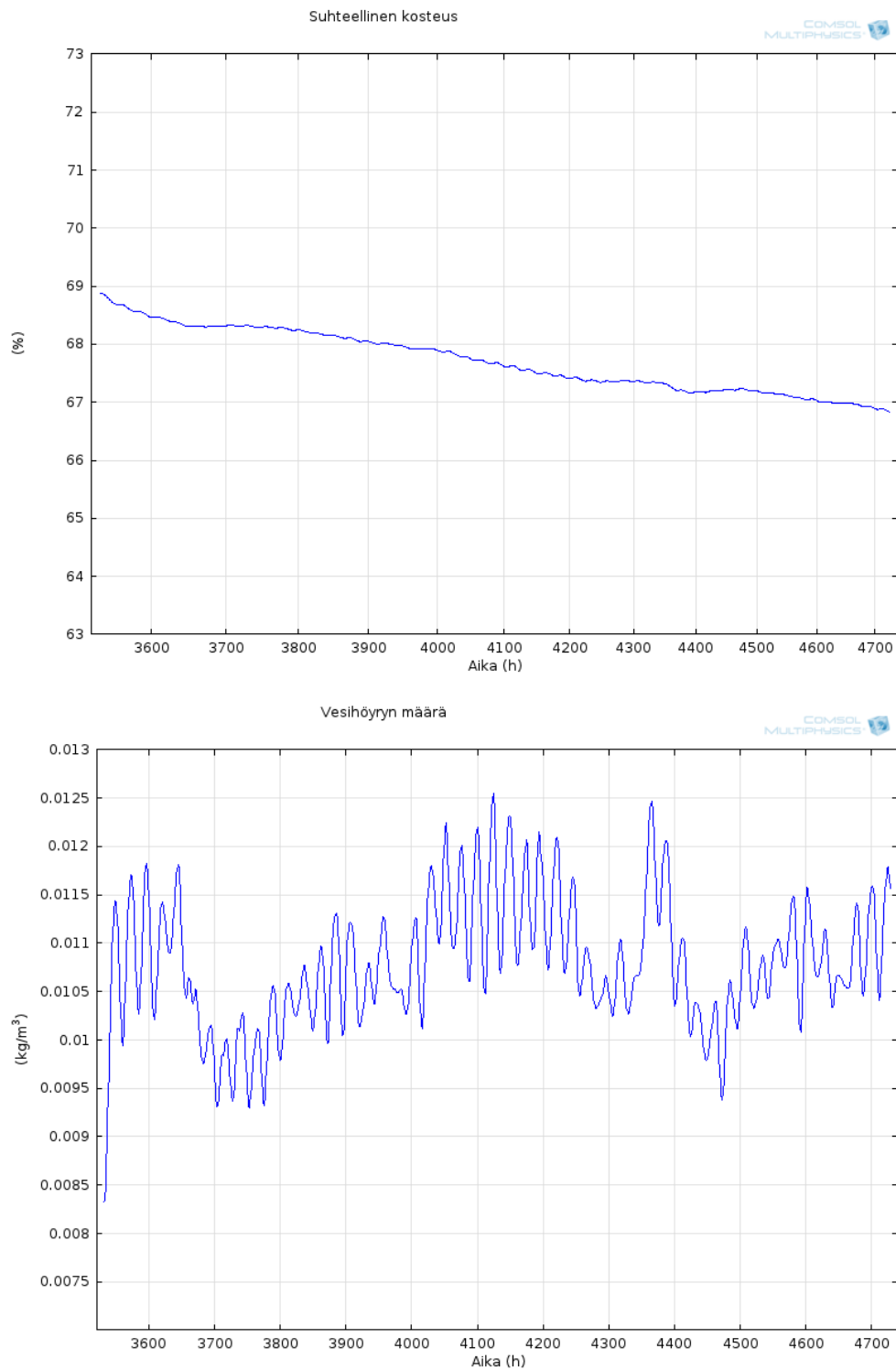
Ajankohta määräytyi vertailuun valitun Lindroosin opinnäytetyön tulosten perusteella (liite 1). Vertailuun valituista tuloksista näkee, että homeen kasvu alkaa toukokuussa. Kasvavan homeindeksin tuloksia oli helpompi vertailla, kun molemmissa töissä kasvu alkoi nollassa. Laskentajakson pituus määräytyi täysin siedettävästä laskennan ajankestosta.

Kuvassa 4 on esitetty pisteet, joissa suoritettiin tulosten vertailun. Tarkastelin ja vertailin kosteuden tuloksia pisteissä 1, 2 ja 3, homeindeksin tuloksia tarkastelin ja vertailin pisteessä 4.



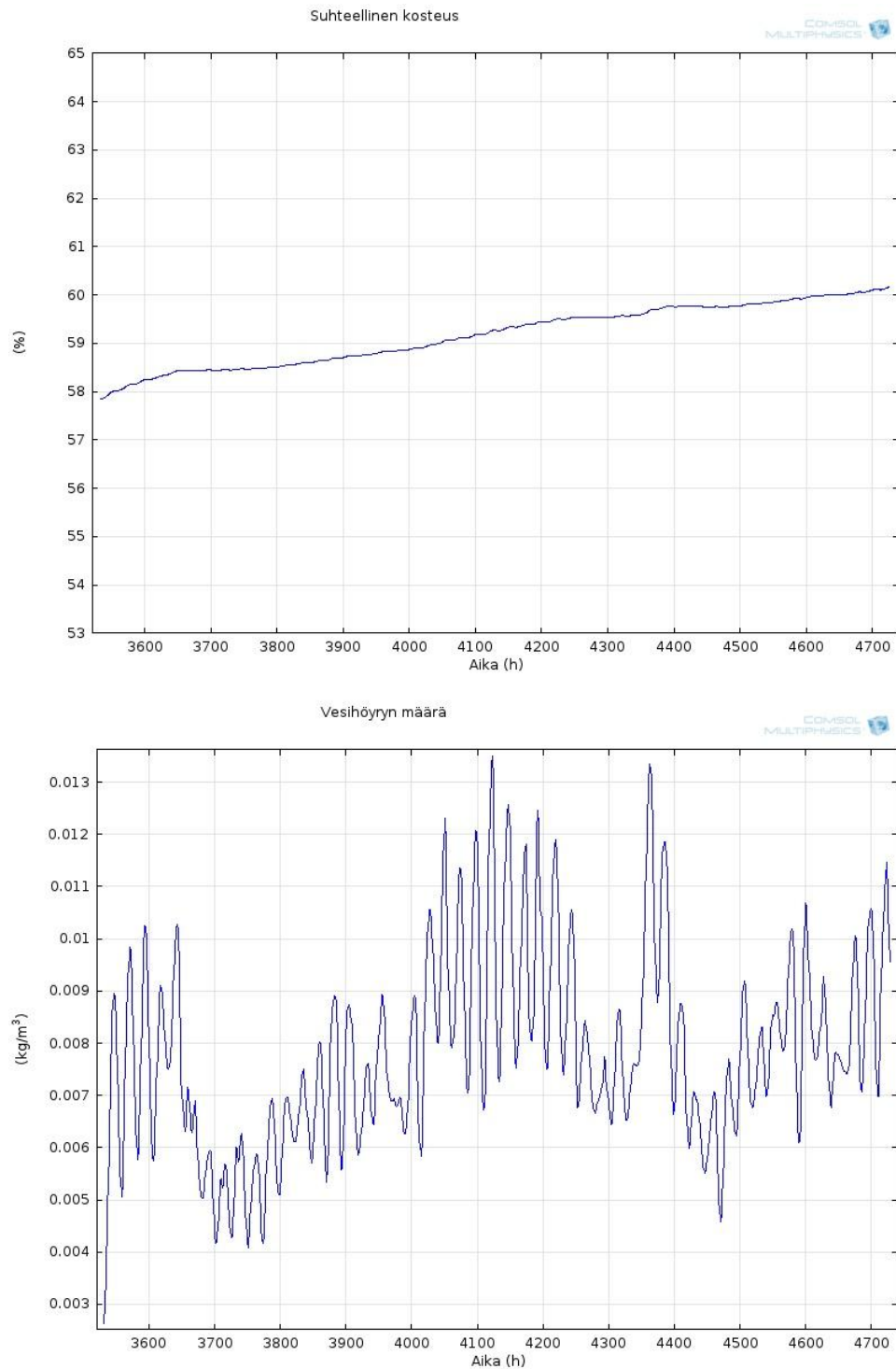
Kuva 4. Tarkasteluun valitut pisteet.

Kuvassa 5 on esitetty Comsolista saadut suhteellisen kosteuden arvot ja vesihöyryn määrä pisteessä 1. Suhteellinen kosteus laskee 69 %:sta 67 %:tiin ja vesihöyryn määrä vaihtelee yhdeksän ja kahdentoista gramman välillä kuutiota kohden.



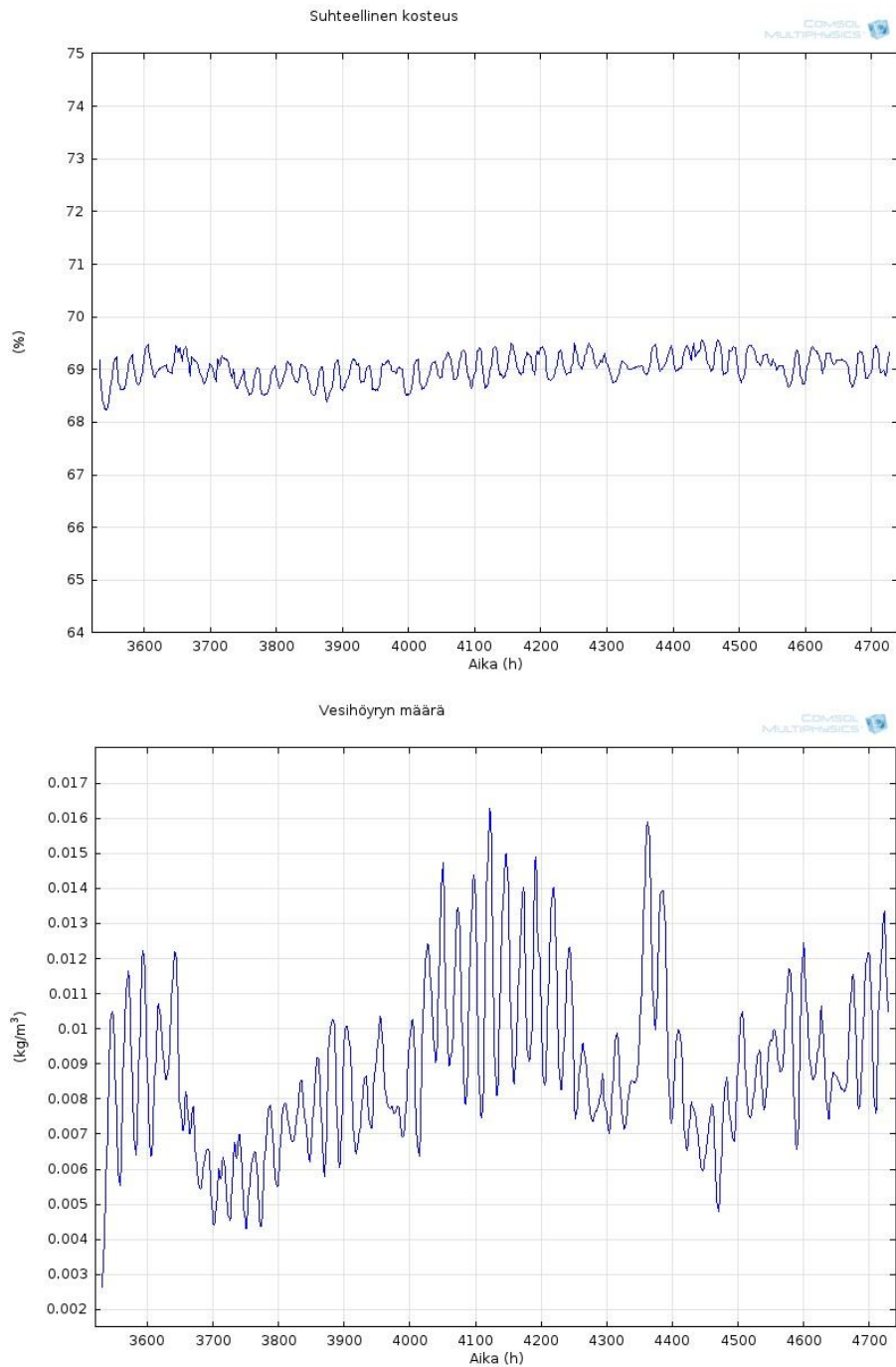
Kuva 5. Suhteellisen kosteuden arvot ja vesihöyryn määrä pisteessä 1.

Kuvassa 6 on pisteessä 2 saadut tulokset suhteelliselle kosteudelle ja vesihöyryn määrälle. Suhteellinen kosteus nousee 58 %:sta 60 %:tiin. Vesihöyryn määrä vaihtelee pääosin neljän ja kymmenen gramman välillä kuutiota kohden.



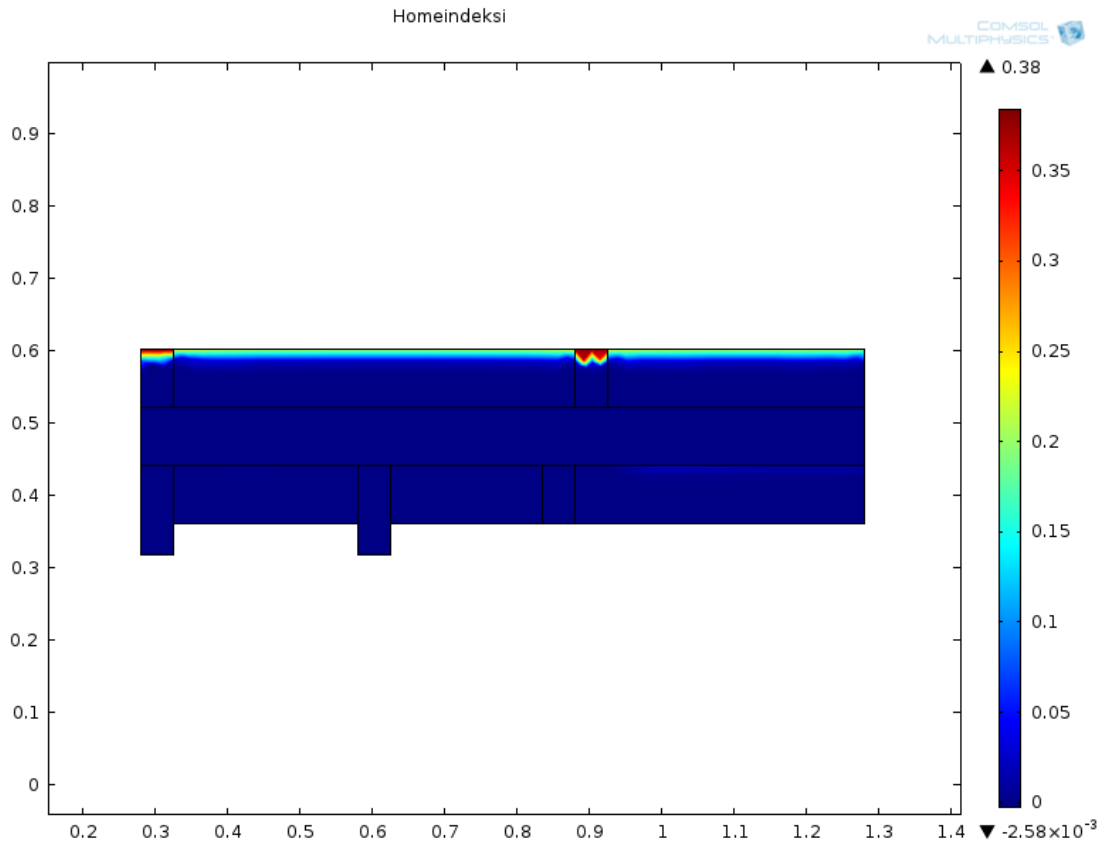
Kuva 6. Suhteellisen kosteuden arvot ja vesihöyryn määrä pisteessä 2.

Kuvassa 7 on Comsolista saadut suhteellisen kosteuden arvot ja vesihöyryn määrä pisteessä 3. Suhteellinen kosteus pysyttelee 69 %:ssa. Vesihöyryn määrä vaihtelee viiden gramman ja 14 gramman välillä kuutiota kohden.



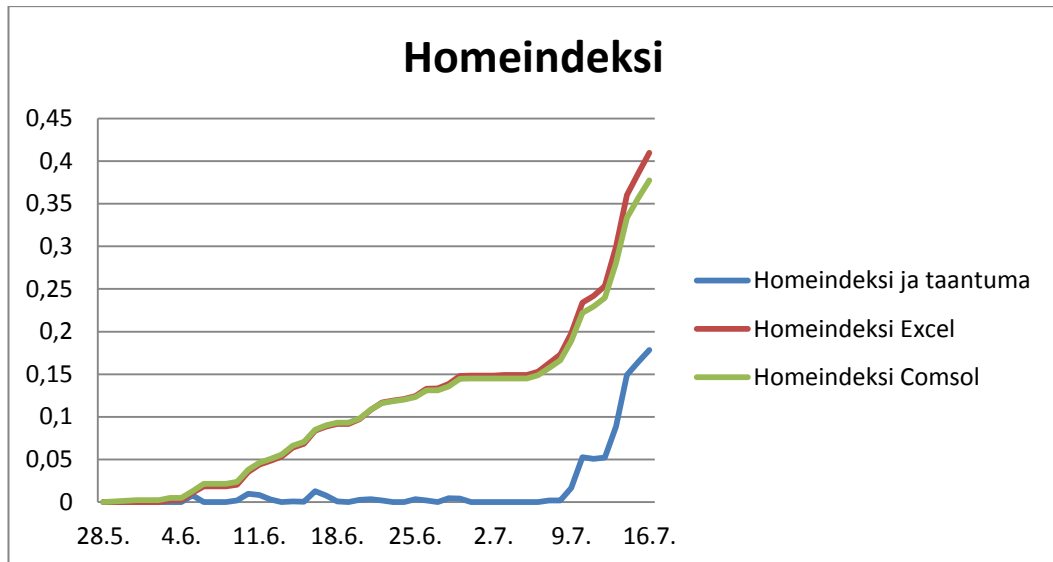
Kuva 7. Suhteellisen kosteuden arvot ja vesihöyryn määrä pisteessä 3.

Comsolista saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että homehtumista tapahtuu vain rakenteen ulkopinnassa. Runkopuut ovat herkimpiä homehtumaan, mutta myös uloimman eristeen ulkopinnassa tapahtuu hieman indeksiarvon kasvua. Koko rakenteen homeindeksin arvot on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Rakenteen homeindeksi.

Laskentajakson aikana homeindeksi kasvaa pisteessä 4 arvoon 0,38 (kuva 8). Koska Lindroosin laskemista tuloksista oli hankala lukea tarkkaa arvoa samalle aikavälille (liite 1), teimme oman Excel-pohjaisen laskentamallin homeindeksille tarkkoja vertailuarvoja varten. Saaduista tuloksista voidaan todeta, että Comsol tuottaa oikeita tuloksia. Excelistä saatu tulos on 0,43, eli vain 0,05 suurempi kuin Comsolin antama tulos. Laskimme Excelissä myös homeindeksin arvon taantuman kanssa ja saimme tulokseksi 0,19. Lisäksi siirsimme Comsolista saadut homeindeksin arvon Exceliin, jotta saimme tehtyä Excelillä lasketuista tuloksista ja Comsolin tuloksista havainnollistavan kaavion (kaavio 2).



Kaavio 2. Homeindeksin tulokset.

6 Tulosten arviointi

Vesihöyryn määrässä tulosten eroavaisuudet Lindroosin tuloksiin pysyivät hyvin samansuuruisena jokaisessa tarkastelupisteessä. Comsolin tulokset olivat keskimäärin kahdesta neljään grammaan suuremmat kuutiota kohden, kuin vertailutulokset. Tulosten eroavaisuus pysyttelee kuitenkin täysin hyväksyttävissä rajoissa.

Suhteellisen kosteuden tuloksissa eroavaisuudet vertailutuloksiin pienenevät mitä lähemmäs ulkopintaa rakenteessa siirryttiin. Pisteessä 1 ero oli keskimäärin 4 prosenttiyksikköä, kun taas pisteissä 2 ja 3 ero oli enimmillään n. 2 prosenttiyksikköä. Tulosten eroavaisuudet ovat täysin hyväksyttävissä rajoissa. Vaikka kosteuden tuloksissa oli eroavaisuuksia vertailutuloksiin, homeindeksin tuloksista saimme lähemmäs samoja arvoja. Lindroosin tuloksista ei pysty lukemaan tarkkaa lukemaa homeindeksille, mutta tulostemme välinen eroavaisuus oli n. 0,07. Eroavaisuuksia voi jo selittää sillä, että käytössä ei ollut samaa säädädataa. Lisäksi materiaaliominaisuudet eivät todennäköisesti ole täysin samat, mutta kuitenkin lähelle samoja arvoja.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että homeindeksin laskeminen Comsolilla on mahdollista. Tulosten tarkkuus jopa hieman yllätti. Lämpö- ja kosteusmallikin antoi hyviä tuloksia. Lämpö- ja kosteusmallin tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että ne ovat erinomaisesti suuntaa antavia, muttei välttämättä täysin paikkaansa pitäviä. Tuloksiin voi olla tyytyväinen, koska tutkimuksen tavoitteet saavutettiin.

Laskentamallilla suoritettiin mallinnus myös eristerapatulle seinärakenteelle sekä mineraalivillaeristeiselle seinärakenteelle, jossa oli höyrynsulku virheellisesti syvällä rakenteessa. Ennakkoon oli tiedossa, että homehtumista pitäisi tapahtua molemmissa rakenteissa. Eristerapatussa seinässä homehtumista olisi todennäköisesti tapahtunut enemmän, jos veden kapillaarinen siirtyminen olisi ollut mukana mallinnuksessa. Kapillaarinen siirtyminen rasittaa laskentaa paljon, jonka vuoksi se jätettiin pois laskentamallista. Molempien rakenteiden tulokset on esitelty liitteessä 2.

7 Pohdinta

Ennen kuin laskentamallia alkaa enemmän kehittää, olisi syytä paneutua kuinka laskennan keveyttä saisi lisättyä. Tällä hetkellä laskentamalli on Comsolille sen verran raskas, että kuukauden pituisen laskentajakson ajaminen voi viedä useita tunteja. Opinnäytetyön alkuvaiheessa oli toiveissa, että saisimme suoritettua vuoden pituisen laskennan, mutta siitä täytyi luopua. Kehittämisen kannalta onkin tärkeä saada laskenta-ajat mahdollisimman lyhyiksi. Kehittäminen on hidasta ja tehotonta, jos laskenta-ajat ovat pitkiä.

Vaikkei lämpö- ja kosteusmalli anna tällä hetkellä täysin oikeita tuloksia, sen kehittämiseen ei välttämättä kannata panostaa. Comsol Oy:llä on kosteuden siirtymiselle heidän itse rakentama malli. He eivät kuitenkaan siitä täysin ilmaiseksi siitä luovu. Käymällä heidän järjestämässä koulutuksessa kyseiselle laskentamallille, laskentamallin saa itselleen. Valmis kosteuden siirtymismalli ei

olisi ainoastaan homeindeksin kannalta hyödyllinen, vaan sitä voisi käyttää myös muissa mallintamisprojekteissa.

Homeindeksin laskentaan Excel on mainio apuväline. Excel on käytännöllinen, jos on tiedossa pisteet joissa haluaa tehdä tarkempaa tarkastelua. Livelink-yhteyden avulla tulokset on mahdollista siirtää suoraan Comsolista Exceliin. Homeindeksin määrittäminen käy vaivattomasti, jos kaavat on ennakkoon rakennettu Exceliin. Excelin käyttö myös nopeuttaa laskentaa, koska silloin ei ole tarpeen laskea homeindeksiä Comsolissa ja se vähentää laskennan raskautta. Parhaimmassa tapauksessa Comsolia ei tarvitse edes käynnistää, jos rakenne on jo mallinnettu valmiiksi, koska laskennan suorittamisen voi tehdä Excelin välityksellä.

Vaikka homeindeksin laskeminen onnistuu helposti Excelissä, olisi homeen kasvun taantuma -mallin kehittäminen Comsoliin kokeilemisen arvoista. Laskennan käytännöllisyyden kannalta olisi helpointa suorittaa kaikki tarkastelut yhdellä ohjelmalla. Comsolin tulosten esitystapakin on havainnollistava ja tuloksia pystyy tarkastelemaan monipuolisesti. Jos homemallilla on merkittävä vaikutus laskentojen ajan keston, yksi vaihtoehto olisi ensin suorittaa laskenta lämmölle ja kosteudelle, jolloin laskenta olisi nopeampi ja tuloksista voisi nähdä mahdolliset kriittiset ajan jaksot. Sen jälkeen laskentaan voisi ottaa homeindeksin mukaan ja tarkastella sitä vain kriittisillä ajan jaksoilla.

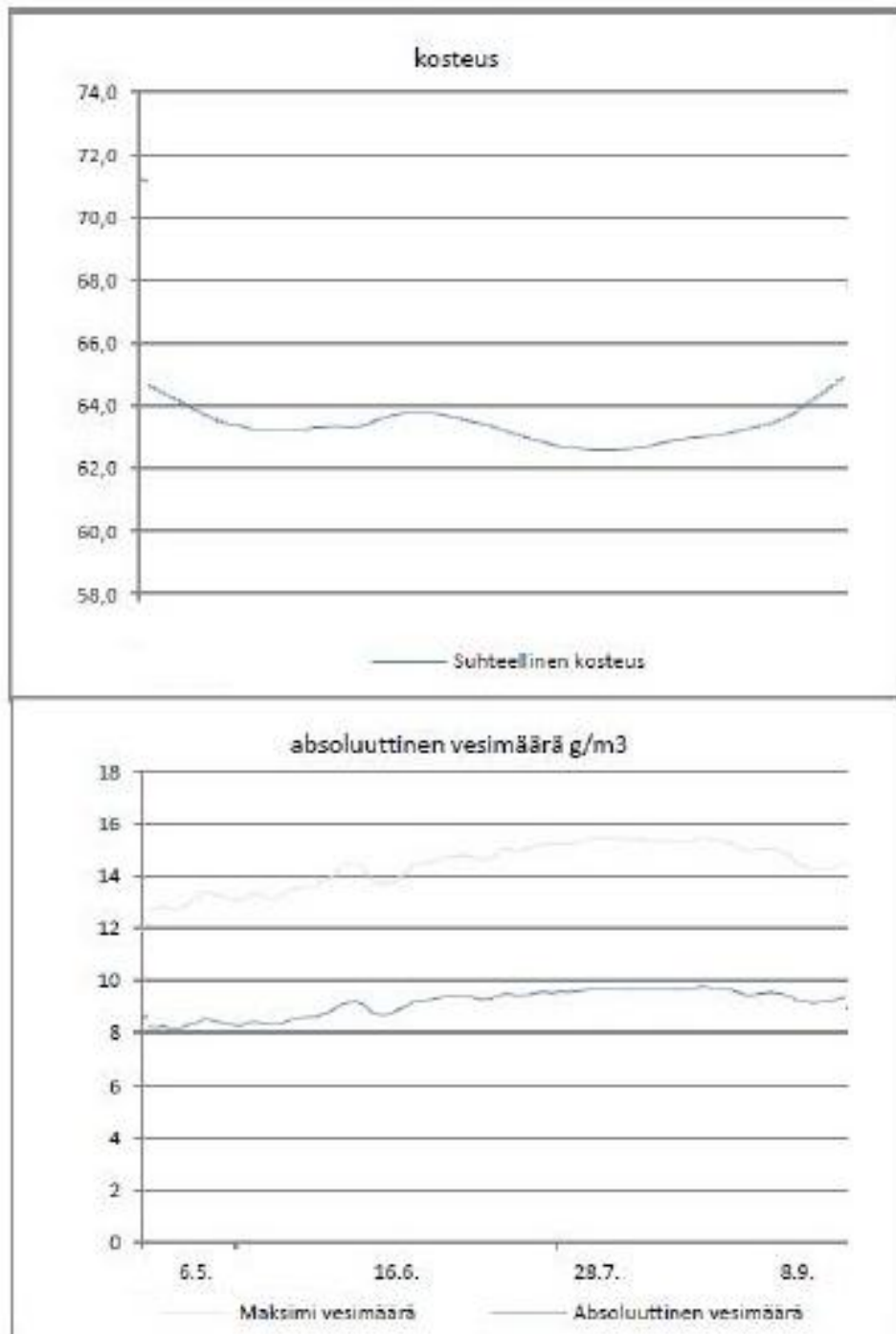
Homeindeksin laskentamalli on hyvä apuväline rakenteiden toiminnan tarkastelussa. Uusien rakennetyyppien mallinnuksessa olisi hyvä suorittaa homeen kasvun tarkastelu, jolloin ainakin terveyteen vaikuttavat haitat olisi paremmin nähtävissä.

Lähteet

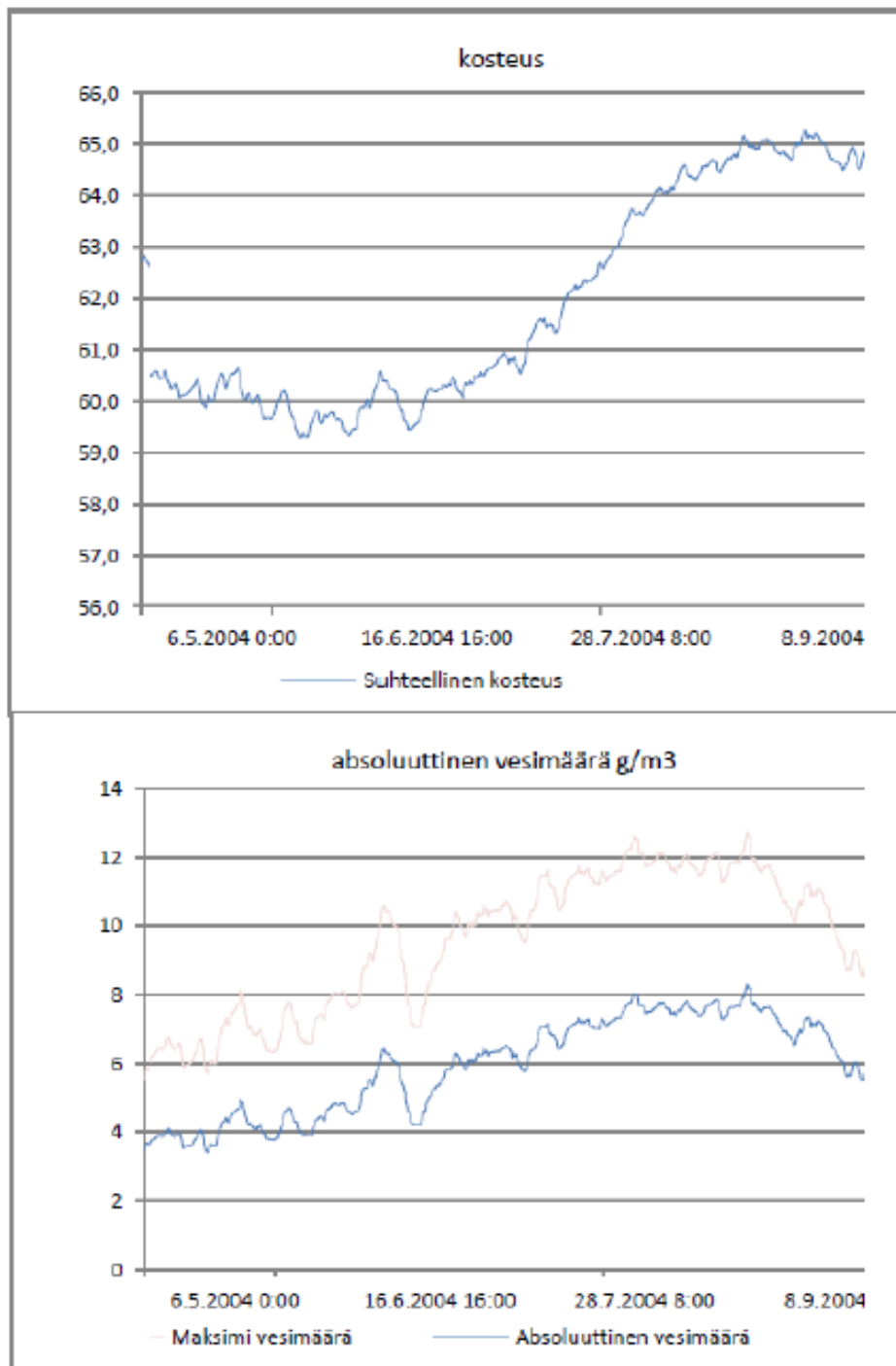
1. Asuntohallitus. Pientalon kosteustekniikka. Opasjulkaisu 1:1989. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 1989.
2. Björkholtz, D. Lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennustieto Oy. 1997.
3. Comsol Inc. Comsol Multiphysics. <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>. Luettu 24.4.2014.
4. CSC – Tieteen tietotekniikan keskus. Comsol multiphysics hipulla. http://www.csc.fi/tutkimus/alat/numeriikka/comsolmultiphysics_hippu. Luettu 24.4.2014.
5. Hautala, M. & Peltonen, H. Insinöörin (amk) fysiikka osa 1. Saarijärvi: Lahden teho-opetus Oy. 2009.
6. Lindroos, K. Polyuretaanieristeisen seinärakenteen rakennusfysikaalisen toiminnan tarkastelu Wufi2D-ohjelmalla. Oulu: Opinnäytetyö, Rakennustekniikka, Oulun seudun ammattikorkeakoulu. 2009.
7. Mäkitalo, M. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tampere: Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. 2012.
8. Ympäristöministeriö. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kunto-tutkimus. Helsinki: Rakennustieto Oy. 1997.

Vertailutulokset

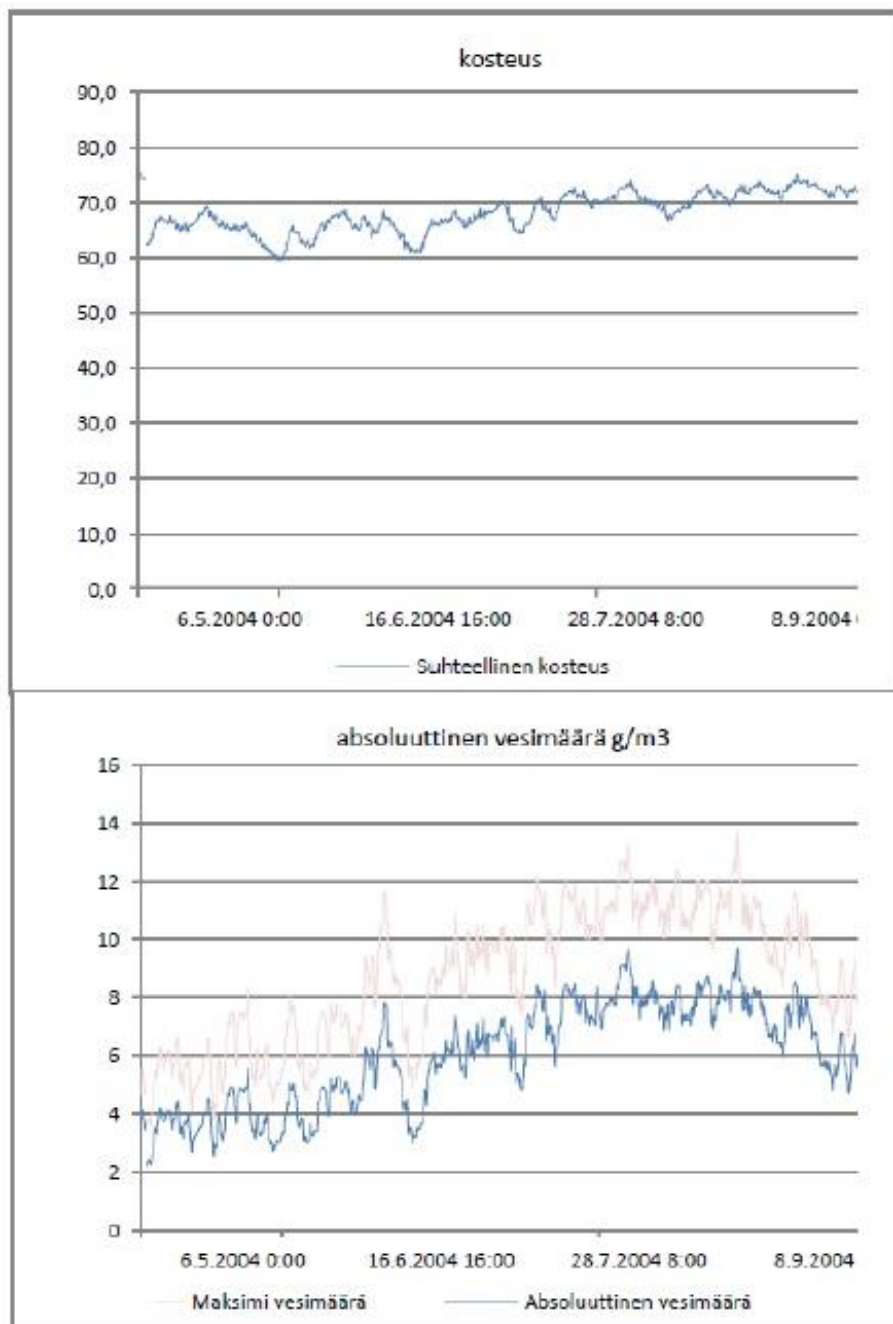
Kari Lindroosin opinnäytetyöstä otetut tulokset. Tuloksilla pystyttiin todentamaan Comsolista saatujen tulosten oikeanmukaisuus.



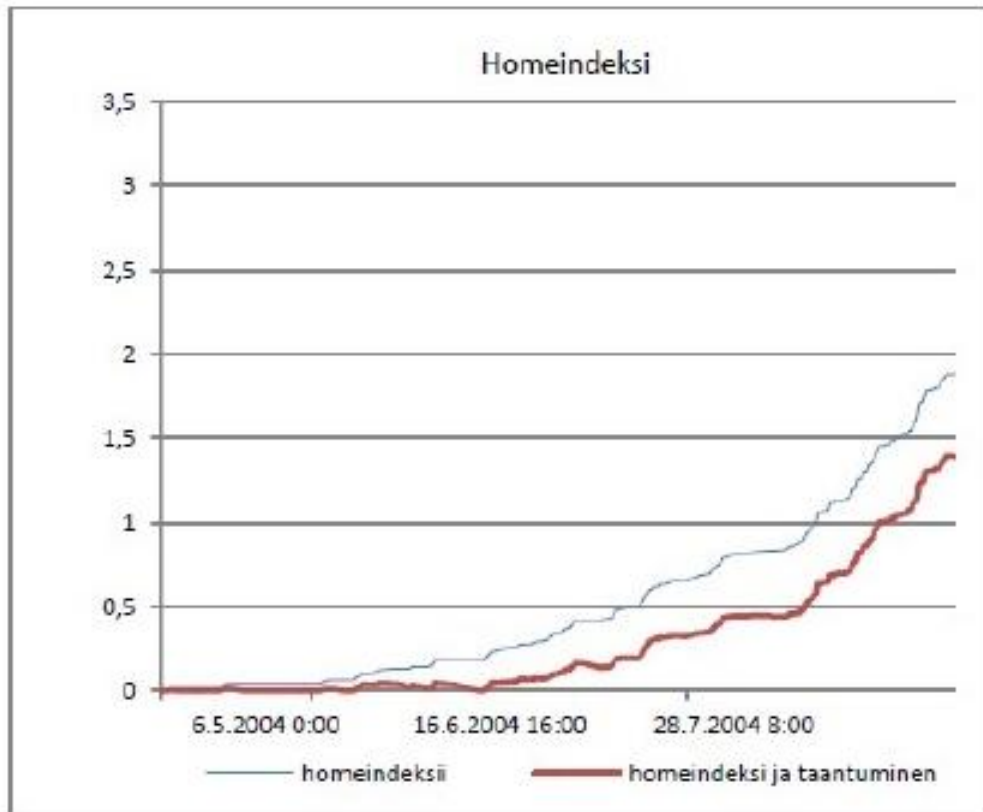
Kuva 1. Piste 1 tulokset Lindroosin opinnäytetyössä.



Kuva 2. Piste 2 tulokset Lindroosin opinnäytetyössä



Kuva 3. Piste 3 tulokset Lindroosin opinnäytetyössä



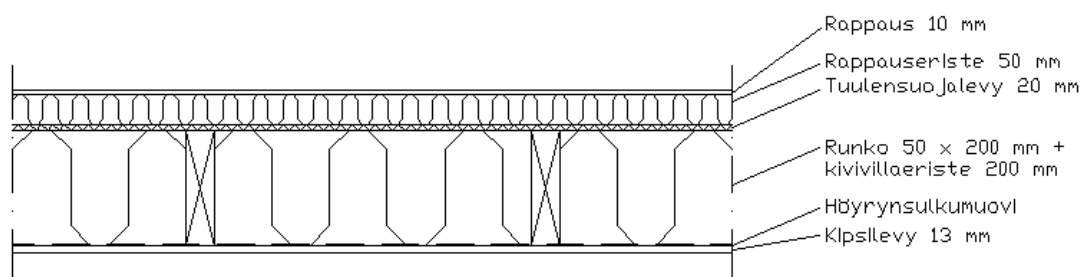
Kuva 4. Piste 4 homeindeksin arvot Lindroosin opinnäytetyössä

Lisätarkasteluun valitut rakenteet

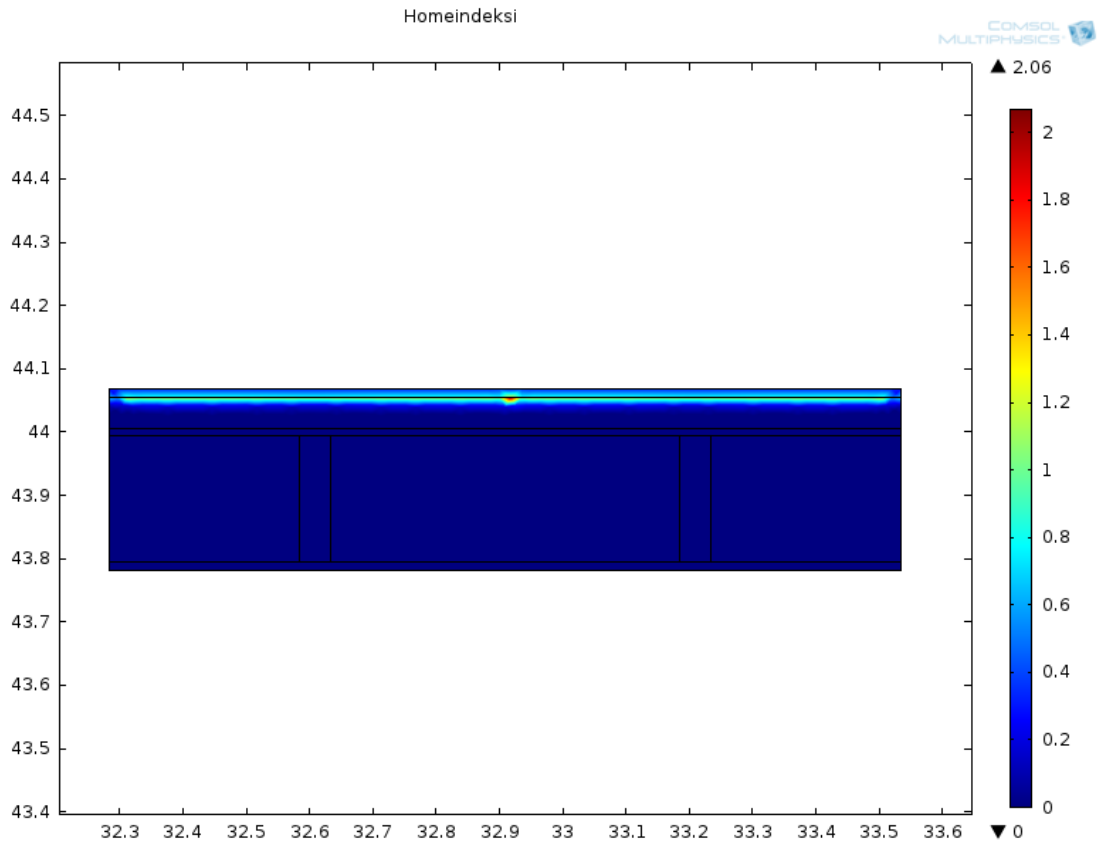
Eristerapattu puurunkoinen ulkoseinä

Valitsimme tarkasteluun eristerapatun puurunkoisen ulkoseinärakenteen (kuva 1). Kyseistä rakennetta on käytetty erityisesti Ruotsissa, jossa onkin havaittu rakenteessa tapahtuvan homehtumista. Ennakkoon oli tiedossa, että viistosade on mahdollisesti rakenteen suurin kosteusvaurioiden aiheuttaja, jolloin kapillaarinen siirtyminen aiheuttaa runkorakenteiden kastumisen ja homehtumisen.

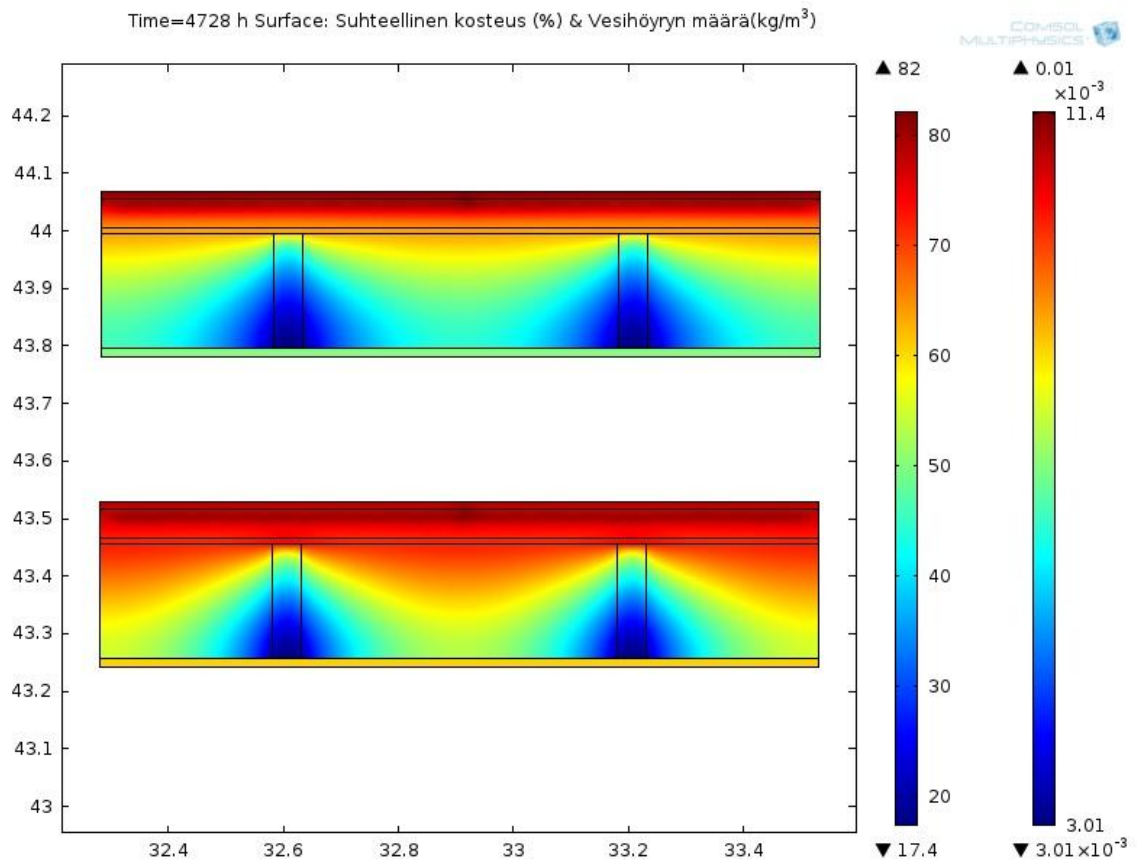
Koska emme ole mallintaneet viistosadetta, emmekä kapillaarista siirtymistä, runkorakenteissa ei laskentamallin mukaan homehtumista tapahdu. Sen sijaan rappauksen ja eristeen välissä tapahtuu homeindeksin kasvua. Homeindeksin suurin kasvu tapahtuu runkopuiden välissä (kuva 2), joka voi johtua liian harvasta laskentaverosta. Tarkemmalla laskennalla suurempi homeindeksin kasvu voisi olla laajempaa. Laskennan ajanjaksona oli 28.5.–16.7.



Kuva 1. Vaakaleikkaus eristerapatusta seinärakenteesta.



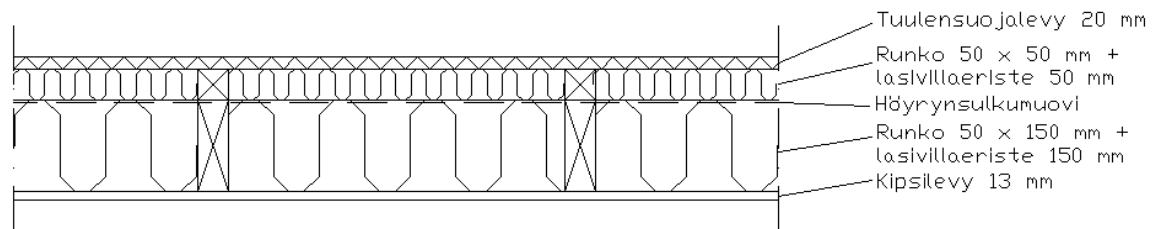
Kuva 2. Eristerapatun seinärakenteen homeindeksi.



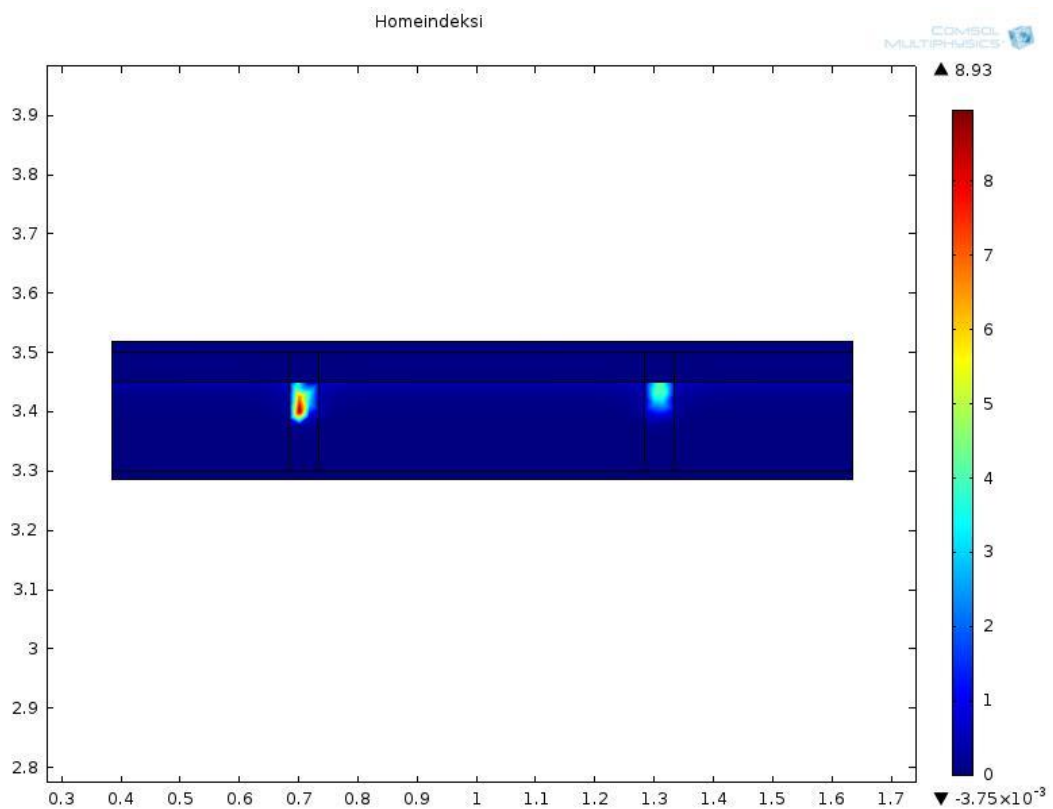
Kuva 3. Havainnekuva suhteellisesta kosteudesta (ylempi rakenne) ja vesihöyryn määrästä (alempi rakenne) eristerapatussa seinärakenteessa.

Mineraalivillaeristeinen puurunkoinen ulkoseinä, höyrönsulku syvällä rakenteesta

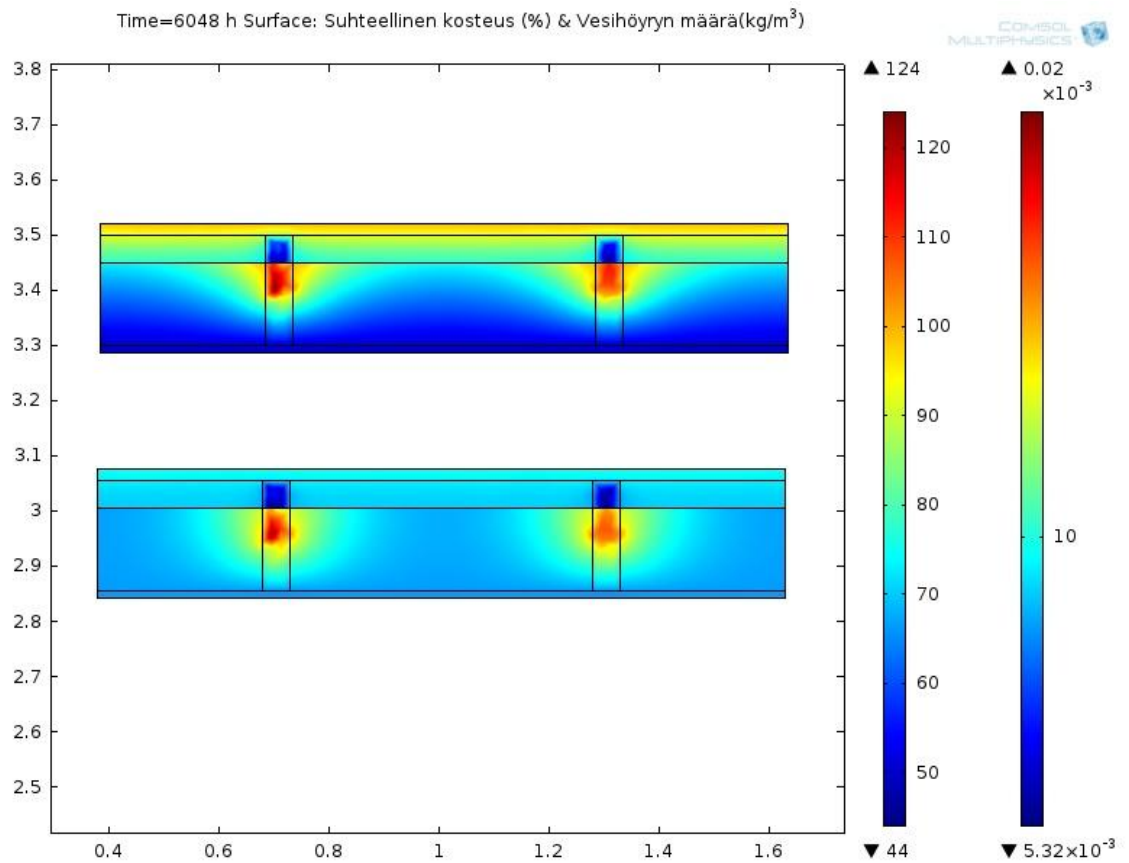
Rakenteesta tehtiin tahallisesti virheellinen. Haluttiin nähdä kuinka homeindeksi kasvaa virheellisessä rakenteesta. Laskentajaksoksi valikoitui neljän päivän jakso syksyn kosteilta päiviltä.



Kuva 4. Vaakaleikkaus mineraalivillaeristeisestä rakenteesta.



Kuva 5. Mineraalivillaeristeisen rakenteen homeindeksi.



Kuva 6. Havainnekuva suhteellisesta kosteudesta (ylempi rakenne) ja vesihöyryn määrästä (alempi rakenne) mineraalivillaeristeisessä rakenteessa.