



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUHA SALO  
ALIPAINESTETUN TUULETTUVAN RYÖMINTÄTILAN RAKEN-  
NUSFYSIKAALISET FEM SIMULOINNIT

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
29. maaliskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**JUHA SALO:** Alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilan rakennusfysikaaliset FEM simuloinnit

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 86 sivua, 19 liitesivua

Kesäkuu 2017

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energiatehokkuus

Tarkastaja: professori Juha Vinha

**Avainsanat:** alipaineistettu ryömintätila, hallittu ilmanvaihto, COMSOL Multiphysics, lämpö- ja kosteusolosuhteet, Suomalainen homemalli

Tutkimuksessa selvitettiin laskennallisen mallinnuksen avulla poistoilmanvaihdolla alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan ryömintätilan tiiviyyden vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteiden hallittavuuteen kohtuullisilla poistoilmamäärillä. Lisäksi tarkasteltiin maata vasten olevien erilaisten ilmatiivistysratkaisuiden vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Työssä annetaan myös suosituksia ryömintätilan rakenneratkaisuiksi sekä ilmanvaihtuvuuksien arvoiksi hallitun ilmanvaihdon näkökulmasta. Ryömintätilan olosuhteita tarkasteltiin 2 vuoden ajan muuttuvilla, homeen kasvun kannalta kriittisillä ulkoilman olosuhteilla.

Tutkimuksessa simuloitiin todellisen alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan ajasta riippuvaa lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa toisiinsa kytketyistä eriulotteisista osamalleista koostuvalla kokonaisuomalla. Ryömintätila mallinnettiin nolaulotteisena (0D) pisteenä. Alapohjanrakenne mallinnettiin yksiulotteisena (1D) janana. Maa- ja perustusrakenteet mallinnettiin kaksiulotteisena (2D) tasona, jossa rakenteiden kolmiulotteisuutta otettiin huomioon mallintamalla alipaineen aiheuttama virtaus maassa 3D:nä, josta saatiin tietoa 2D-simulointeihin ja niissä käytettäviin ryömintätilan 0D energia- ja massatasapainoyhtälöihin. Tutkimuksessa mallinnus suoritettiin elementtimenetelmään perustuvalla monifysiikkamallinnusohjelmalla COMSOL Multiphysicsillä. Simulointien tuloksena saatiin ryömintätiloille ajasta riippuvia lämpötilan ja suhteellisia kosteuden arvoja, joiden perusteella Suomalaista homemallia käyttäen laskettiin ryömintätiloille homeen kasvun riskiä kuvaavia homeindeksin arvoja homehtumisherkkyysluokilla HHL3 (kohtalaisen kestävä puhdas materiaali) ja HHL1 (materiaalipinnan päällä on orgaanista ainetta).

Suosittelavat ilmanvaihtuvuudet riippuvat rakenneratkaisuista ja ryömintätilan puhtaudesta homehtumisherkkyysluokan kautta. Homehtumisherkkyysluokalla HHL3:lla yksikään alapohjarakenne ei tulosten perusteella osoittautunut riskialttiiksi homevaurioille. Homehtumisherkkyysluokalla HHL1 tarkasteltuna homehtumisvaurioille vähiten riskialttein maan pinnalla oleva ilmatiivistysrakenne on betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS) ilmanvaihtuvuuksilla 0,2 – 2,0 1/h ja seuraavaksi vähiten ilmatiivistysrakenne betoni 50 mm ilmanvaihtuvuuksilla 0,2 – 0,6 1/h. Avoin pohjarakenne homehtumisherkkyysluokalla HHL1 on homeindeksin perusteella riskialtis rakenne. Ilmatiivistyissä pohjarakenteissa homehtumisherkkyysluokalla HHL1 kova lämmöneriste 70 mm (XPS)- sekä höyrynsulkumuovi-ilmatiivistysrakenteet ovat riskialttiita rakenteita korkean homeindeksinsä takia.

## ABSTRACT

**JUHA SALO:** Building physical FEM simulations of depressurized ventilated crawl space

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 86 pages, 19 Appendix pages

June 2017

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering

Major: Energy Performance

Examiner: Professor Juha Vinha

**Keywords:** depressurized crawl space, controlled air change, COMSOL Multiphysics, heat and moisture conditions, Finnish mould growth model

In this study computational modeling is used to establish what effect air-sealing of the ventilated base floor of the depressurized crawl space has on controllability of heat and moisture conditions of the crawl space by means of appropriate exhaust air values. Another goal in this study is to establish what influence different air-sealing structures and building materials have on the heat and moisture conditions in the crawl space. Study also gives recommendations for the structural solutions for the crawl space as well as appropriate air-change rate values for controlled ventilation. Conditions of crawl space were studied for a period of two years in fluctuating outdoor conditions, which were critically relative to mould growth. Evaluation criteria used for the depressurized structural conditions are the Finnish mould growth index and the greatness of the air change rate in the crawl space.

3-dimensional (3D) simulation is used to show the behaviour of depressurized crawl space to time-dependent heat and moisture conditions. This is shown by a total model, which consist of partial models that are connected to each other. Crawl space is modeled in 0-dimensional (0D) point. Base floor structure is modeled in 1-dimensional (1D) line. Ground- and foundation structures are modeled in 2-dimensional (2D) surface. In the study the heat and moisture technical modeling are done by multiphysical modeling program COMSOL Multiphysic, which based on finite element method. As a result of the simulations the study finds time-depending temperature and relative humidity values for crawl space, which are then used to calculate the risk of growth of mould in the crawl space. The values are calculated in mould growth sensitivity classes 3 (quite durable clean material surface) and 1 (organic substance such as pollen on the surface).

Recommended air-change rates are dependent on structural solutions and the cleanness of the organic dust of the crawl space. In mould growth sensitivity class 3 all studied structures - both open and air-sealed bases - are recommended when studied on the mould growth model. On class 1 the most recommended air-sealing structure is concrete 50 mm + rigid thermal insulation with air-change rates 0,2 – 2,0 1/h. Second recommended air-sealing structure for mould growth sensitivity class 1 is concrete 50 mm with air-change rates 0,2 – 0,6 1/h. Open base structures are not recommended in sensitivity class 1. In mould growth sensitivity class 1 air-sealed base structures made by rigid thermal insulation 70 mm and plastic vapor barrier are also not recommended due to the high value of mould index.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen/laboratorion rakennusfysiikan tutkimusryhmässä 2016-2017 aikana. Diplomityön tuloksia käytetään FL Timo Keskikurun väitöskirjaan kuuluvassa artikkelissa. Hankeen on rahoittanut Ympäristöministeriön valtakunnallinen Kosteus- ja hometalkoot. Tämä diplomityö on samalla tutkimushankkeen yhteenveto. Kiitän professori Juha Vinhaa työn tarjoamisesta sekä tarkastamisesta sekä Petteri Huttusta työn ohjauksesta. Kiitos Timo Keskikurulle mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta olla osana väitöskirjaprosessia.

Kiitos perheelleni heiltä saadusta tuesta ja neuvoista.

Tampereella, 29.5.2017

Juha Salo

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Ryömintätilan alipaineisuus .....	1
1.2	Radon ja muut ryömintätilan epäpuhtaudet .....	2
1.3	Työn rakenne .....	3
2.	TEORIA .....	4
2.1	Lämmön siirtyminen.....	4
2.1.1	Lämpö ja lämmön säilyminen .....	4
2.1.2	Johtuminen .....	6
2.1.3	Konvektio .....	9
2.1.4	Säteily.....	10
2.2	Ilman kosteus.....	11
2.3	Kosteuspitoisuus.....	14
2.4	Kosteuden siirtyminen huokoisessa aineessa.....	16
2.4.1	Vesihöyryn diffusio.....	16
2.4.2	Kapillaarinen kosteuden siirtyminen .....	17
2.4.3	Vesihöyryn konvektio .....	18
2.5	Yhdistetty lämmön ja kosteuden mallinnus .....	19
2.6	Energia- ja massatasapainoyhtälöt.....	22
2.7	Elementtimenetelmä .....	26
3.	LASKENTAMALLIEN ESITTELY .....	28
3.1	Tutkitut rakenteet.....	28
3.1.1	Avoin pohjarakenne .....	29
3.1.2	Ilmatiivistetyt pohjarakenteet .....	29
3.1.3	Ryömintätila .....	32
3.1.4	Alapohja .....	34
3.2	Lämpö- ja kosteustekninen mallinnus COMSOL Multiphysicsillä .....	34
3.2.1	Osamallien väliset kytkennät.....	34
3.2.2	Ryömintätilan lämpö- ja massatasapainoyhtälöt .....	35
3.2.3	Ilman virtaus sepelissä .....	38
3.2.4	Huokoisen- ja kiinteän aineen lämmönsiirto .....	39
3.2.5	Sepelissä tapahtuva kosteuden siirtyminen .....	40
3.2.6	Yhdistetty lämmön- ja kosteudensiirto .....	41
3.2.7	Yhteenveto malleissa käytetyistä yhtälöistä.....	43
3.3	Laskennan lähtötiedot.....	45
3.3.1	Materiaaliominaisuudet .....	45
3.3.2	Ulko- ja sisäilmaolosuhteet .....	45
3.4	Alipaineistetun rakennerratkaisun toimivuuden arviointi.....	48
3.4.1	Homemalli .....	49
3.4.2	Kohtuullinen ilmavirta ja ilmanvaihtuvuus.....	53
4.	TULOKSET.....	56

4.1	Maa- ja perusrakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet.....	56
4.2	Ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteet .....	60
4.2.1	Lämpötila.....	60
4.2.2	Suhteellinen kosteus.....	64
4.3	Ryömintätilan homeindeksit .....	69
4.3.1	Homehtumisherkkyysluokka HHL1 .....	69
4.3.2	Homehtumisherkkyysluokka HHL3 .....	73
4.4	Mallinnuksen virhelähteitä.....	77
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	78
5.1	Ryömintätilan ilmanvaihdon hallinta .....	78
5.2	Avoimen pohjarakenteen homeindeksit.....	79
5.3	Ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden homeindeksit.....	80
5.4	Suosittelut ilmanvaihtuvuudet ja rakenteet .....	81
5.5	Huomioita suosituksista.....	82
	LÄHTEET .....	83

LIITE A: MATERIAALIOMINAISUUDET

LIITE B: AVOIMEN POHJARAKENTEEN KOKONAISMALLIN GEOMETRIA

LIITE C: TASAPAINOYHTÄLÖIDEN TERMIT

LIITE D: MALLIN LÄHDEKOODIN ESITTELY

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CS	kontrollipinta
CV	kontrollitilavuus
EPS	polystyreeni
FEM	elementtimenetelmä
HHL	homeutumisherkkyyssluokka
MVOC	mikrobien haihtuva aineenvaihduntatuote (haihtuva orgaaninen yhdiste)
RH	suhteellinen kosteus
VOC	haihtuva orgaaninen yhdiste
XPS	suulakepuristettu polystyreeni
0D	0-ulotteinen
1D	1-ulotteinen
2D	2-ulotteinen
3D	3-ulotteinen
<i>A</i>	pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
<i>a</i>	sepin kautta tulevan tilavuusvirran suhde ulkoa tulevaan korvausilmavirtaan [-]
<i>C</i>	lämpökapasiteetti [ $\text{J}/\text{K}$ ]
<i>C<sub>mat</sub></i>	homeen taantumakerroin [-]
<i>c</i>	ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ] tai konsentraatio [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ]
<i>c<sub>p</sub></i>	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
<i>c<sub>p,vol</sub></i>	volumetrinen lämpökapasiteetti vakioaineessa [ $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ ]
<i>c<sub>v</sub></i>	ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
<i>D<sub>a</sub></i>	ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmaistuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
<i>D<sub>w</sub></i>	kosteusdiffusiviteetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
<i>D<sub>φ</sub></i>	kosteudenjohtavuuskerroin [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ]
<i>E</i>	energia [ $\text{J}$ ]
<i>E<sub>b</sub></i>	on mustan kappaleen lähettämä säteilytehoitiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
<i>e</i>	energialähde [ $\text{J}/\text{kg}$ ]
<i>F</i>	näkyvyyskerroin [-]
<i>G</i>	kosteusvirta [ $\text{kg}/\text{s}$ ]
<i>g</i>	kosteusvirta [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
<i>h</i>	lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]
<i>h<sub>fg</sub></i>	höyrystymislämpö [ $\text{J}/\text{kg}$ ]
<i>k<sub>1</sub></i>	homeen kasvun intensiteettiä kuvaava kerroin [-]
<i>k<sub>2</sub></i>	homeen kasvun maltillisuutta kuvaava kerroin [-]
<i>M</i>	homeindeksi [-]
<i>M</i>	moolimassa [ $\text{kg}/\text{mol}$ ]
<i>m</i>	massa [ $\text{kg}$ ]
<i>ṁ</i>	massavirta [ $\text{kg}/\text{s}$ ]
<i>ṁ</i>	massavirta pinta-alaa kohden [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
<i>n</i>	ilmanvaihtuvuus [ $1/\text{h}$ ]
<i>P</i>	piiri [ $\text{m}$ ]
<i>P<sub>eff</sub></i>	tehollinen piiri [ $\text{m}$ ]

$p$	paine [Pa]
$Q$	lämpövirta tai teho [W]
$Q_m$	massalähdetermi [kg/(m <sup>3</sup> ·s)]
$q$	lämpövirran tiheys [W/m <sup>2</sup> ]
$R$	tilavuusvirta [m <sup>3</sup> /s]
$R_u$	universaalinen kaasuvakio, 8,31447 [J/(mol·K)]
$r$	tilavuusvirta pituusyksikköä kohti [m <sup>3</sup> /(m·s)]
$\mathbf{r}$	tilavuusvirta pinta-alaa kohden [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·s)]
$T$	lämpötila [K] tai [°C]
$t$	aika [s]
$U$	sisäenergia [J] tai lämmönläpäisykerroin [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$u$	ominaissisäenergia [J/kg] tai nopeus [m/s]
$\mathbf{u}$	nopeuskenttä [m/s]
$V$	tilavuus [m <sup>3</sup> ]
$v$	nopeus [m/s]
$w$	kosteuspitoisuus [kg/m <sup>3</sup> ]
$y$	ryömintätilan korkeus [m]
$\beta$	kosteudensiirtokerroin [m/s]
$\delta_p$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [kg/(m·s·Pa)]
$\delta_v$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna [m <sup>2</sup> /s]
$\varepsilon$	emissiviteetti [-] tai huokoisuus [-]
$\theta$	kulma [°]
$\theta_p$	kiinteän aineen osuus huokoisesta aineesta (tilavuusosuus) [-]
$\kappa$	permeabiliteetti [m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	lämmönjohtavuus [W/(m·K)]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti [kg/(m·s)]
$\nu$	vesihöyrypitoisuus [kg/m <sup>3</sup> ]
$\xi$	ominaiskosteuskapasiteetti [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmanin vakio, 5,67·10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\varphi$	suhteellinen kosteus [% RH] [-]

Yleisimmät työssä käytetyt alaindeksit:

$AP$	alapohja
$a$	kuiva ilma
$atm$	ilmakehä
$c$	konvektio
$cs$	ryömintätila
$diff$	diffuusio
$e$	ulkoinen
$evap$	höyrystyminen
$f$	fluidi
$i$	tarkasteltava komponentti



<i>in</i>	sisään
<i>joht</i>	johtuminen
<i>kond</i>	kondensoituminen
<i>m</i>	molaarinen tai massa
<i>maa</i>	tarkasteltavan ryömintätilan ilmatiivistysmateriaalin tai sepelin pinta
<i>mat</i>	materiaali
<i>out</i>	ulos
<i>p</i>	paine
<i>poisto</i>	ryömintätilasta poistuva
<i>r</i>	säteily
<i>s</i>	kiinteä tai sisäinen tai pinta
<i>sat</i>	kyllästystila
<i>tot</i>	kokonais
<i>ulko</i>	ulkoilma (Jokioinen 2004)
<i>v</i>	vesihöyry
<i>vol</i>	volumetrinen
<i>w</i>	kosteus
12	pinnasta 1 pintaan 2

Työssä käytetyt operaattorit skalaarimuuttujalle  $F$  ja vektorimuuttujalle  $\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}$  :

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \mathbf{k} \quad \text{muuttujan } F \text{ gradientti}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad \text{vektorin } \mathbf{F} \text{ divergenssi}$$

$$\nabla^2 F = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \quad \text{Laplace-operaatio muuttujalle } F$$

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial t} \quad \text{muuttujan } F \text{ osittaisderivaatta ajan suhteen}$$

# 1. JOHDANTO

Tutkimuksessa selvitettiin laskennallisen mallinnuksen avulla poistoilmanvaihdolla alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan ryömintätilan tiiviiden vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteiden hallittavuuteen kohtuullisilla poistoilmamäärillä. Lisäksi tarkasteltiin maata vasten olevien erilaisten ilmatiiivistysratkaisuiden vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Työssä annetaan myös suosituksia ryömintätilan rakenneratkaisuksi sekä ilmanvaihtuvuuksien arvoiksi hallitun ilmanvaihdon näkökulmasta. Ryömintätilan olosuhteita tarkasteltiin 2 vuoden ajan muuttuvilla, homeen kasvun kannalta kriittisillä ulkoilman olosuhteilla. Simulointien tuloksina saatiin ryömintätiloille ajasta riippuvia lämpötilan ja suhteellisia kosteuden arvoja, joiden perusteella Suomalaista homemallia käyttäen lasketaan ryömintätiloille homeen kasvun riskiä kuvaavia homeindeksin arvoja. Tarkasteltavien rakenneratkaisujen ja ilmanvaihtuvuuksien toimivuuden arviointikriteerinä homeindeksin lisäksi olivat poistoilmavirran suuruuden kohtuullisuus ja taloudellisuus.

## 1.1 Ryömintätilan alipaineisuus

Tuulettuvaan ryömintätilaan muodostuu ja kertyy terveydelle haitallisia epäpuhtauksia kuten esimerkiksi maaperästä kulkeutuvaa radonia, kosteutta, pölyä, epämiellyttäviä hajuja sekä mikrobeja. Mikrobit voivat olla esimerkiksi bakteereita ja sieniä (Leivo & Rantala 2006, s. 18). Epäpuhtaudet saattavat päätyä ryömintätilan yläpuolisiin tiloihin alapohjarakenteen vuotokohtien kautta, jos ryömintätilan yläpuoliset tilat ovat alipaineisia ryömintätilaan nähden. Rakennuksen vuotokohtia voivat olla esimerkiksi rakenteiden ja rakenneosien liitokset ja halkeamat. Ryömintätilan yläpuolisten tilojen alipaineisuus voi johtua tuulesta, rakennuksen korkeudesta ja sisäilman lämpötilaeroista aiheutuvasta savupiippuvaikutuksesta, virheellisesti säädetystä ilmavaihdosta, tilojen käytöstä sekä niiden yhteisvaikutuksesta. (Kuntotutkimusopas 2016, s. 118-123)

Asumisterveyden kannalta rakennuksen ryömintätila tulisi saattaa alipaineiseksi erityisesti oleskelutiloihin nähden, joka estää ilman virtaamisen ja siten epäpuhtauksien siirtymisen ryömintätilasta oleskelutiloihin. Rakennusten energiatehokkuuden kannalta alipaineistus tulisi toteuttaa kohtuullisen suuruisilla poistoilmavirroilla. Ryömintätilan ilmatiiviys on ratkaisevassa asemassa ryömintätilan energiatehokkaan poistoilmavaihdon toteutuksessa, koska tiiviimmät ryömintätilan rakenteet mahdollistavat tilan alipaineistamisen pienemmillä poistoilmamäärillä.

Ryömintätilan ilmatiivyyttä voidaan parantaa esimerkiksi maapojan ilmanläpäisevyyttä pienentämällä, jos perusrakenteita ympäröivä maa-aines on liian ilmaa läpäisevää. Ilmatiivistys voidaan toteuttaa esimerkiksi betonoimalla ryömintätilan pohja. Näin ryömintätilan kosteudentuotto pienenee merkittävästi ja myös kaasumaisten haitta-aineiden, kuten radonin ja mikrobien orgaanisia haihtuvia aineenvaihduntatuotteiden (MVOC) tuotto pienenee maaperästä (Leivo & Rantala 2006, s. 18). Ryömintätilan alipaineistamiseen tarvitaan pienempi ilmamäärä, joka vähentää ryömintätilan kautta tapahtuvaa lämpöhäviötä ja helpottaa ryömintätilan olosuhteiden hallittavuutta.

Tutkimuksessa ryömintätilan tuuletus oletetaan tapahtuvan hallitusti koneellisen poistoilmanvaihdon avulla. Todellisen ryömintätilan alipaineisuutta ja ilmanvaihtuvuutta säädetäisiin alapohjaan asennettavalla poistoilmapuhaltimella sekä tuuletusaukkoihin asennettävien säädettävien korvausilmanventtiilien avulla. Tutkimuksessa ryömintätilan oletettiin pysyvän 10 Pa alipaineisena ulkoilmaan nähden. Työssä ei oteta tarkemmin kantaa alipaineen suuruuteen, alipaineistamiseen vaadittavan järjestelmän ominaisuuksiin, vaatimukseen tai toteutukseen. Tarkempi kuvaus tuuletettujen ryömintätilaisten alapohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta on saatavilla esimerkiksi Kuntotutkimusoppaassa (2016, s. 183-185)

## 1.2 Radon ja muut ryömintätilan epäpuhtaudet

Radon on radiumin hajoamistuotteena syntyvä näkymätön, hajuton ja mauton radioaktiivinen jalokaasu. Pitkäaikainen altistuminen radonille, esimerkiksi sisäilmasta, kasvattaa tutkitusti keuhkosyöpäriskiä. Suomalaisten saamasta säteilyannoksesta noin puolet tulee huoneilman radonista. (Kuntotutkimusopas 2016, s. 75; STUK-A252 2012, s. 13-21; RT 81-11099 2012) Huoneilman radonpitoisuusrajoista on saatavilla tietoa esimerkiksi seuraavista Kuntotutkimusopas (2016, s. 75) ja RT 81-11099 (2012).

Maaperässä ja kiviaineksessa muodostuva kaasumainen radon pystyy liikkumaan helposti maaperän huokosissa lopulta päätyen maan pinnalle, ilmakehään, veteen ja rakennuksiin. Sisäilmaan radon pääsee maaperän huokosilman, rakennusmateriaalien, rakennuksen alapuolisten täyttökerrosten ja talousveden kautta, joista maaperän huokosilma on sisäilman radonin merkittävin lähde Suomessa. Huokosilma on merkittävin radonin lähde, koska rakennuksen alapuolella oleva maaperän huokosilma on yleensä lämpimämpää kuin rakennuksen ulkopuolella, joten huokosilman tiheyserosta johtuen rakennuksen perustuksiin virtaa muulta maaperästä radonpitoista huokosilmaa. (Kuntotutkimusopas 2016, s. 75; STUK-A252 2012, s. 13-21; RT 81-11099 2012)

Suomalaiset maalajit sisältävät sellaisia mineraaleja, joissa on radiumia. Kuitenkin sisäilman radonpitoisuudet vaihtelevat alueittain. Suomessa suurimmat radonpitoisuudet on mitattu Itä-Uudenmaan, Päijät-Hämeen, Kymenlaakson, Kanta-Hämeen, Pirkanmaan ja Etelä-Karjalan maakuntien alueilla. Kuntien rakennus- ja terveysturvallisuudesta on saata-

villa tietoa radonin esiintymisestä kuntien alueilla sekä kunta- ja aluekohtaisista vaatimuksista radonin huomioon ottamiseksi rakentamisessa. (STUK-A245 2010, s. 3; RT 81-11099 2012)

Ryömintätilasta voi päätyä oleskelutiloihin aikaisemmin mainitun radonin lisäksi muitakin asuinterveyden ja asuinviihtyvyyden kannalta haitallisia aineita. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi mikrobit ja niiden aineenvaihduntatuotteet (MVOC), kosteus, home- ja sieniitiöt, rakennusmateriaaleista peräisin olevat pöly ja hiukkaset, epämiellyttävät hajut ja rakennusmateriaalien sisältämät kemialliset yhdisteet. Rakennusten kosteus- ja homevauriotarkastelujen yhteydessä mikrobeilla tarkoitetaan yleensä bakteereita ja sieniä. Radonin lisäksi ryömintätilan kaasumaisia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi mikrobien haihtuvat aineenvaihduntatuotteet sekä vaurioituneiden rakennusmateriaalien sisältämät orgaaniset haihtuvat yhdisteet (VOC). (Kuntotutkimusopas 2016, s. 61-75; Leivo & Rantala 2006, s. 18 -19)

Ryömintätilasta tulevasta terveydelle haitallisista aineista saattaa asuinviihtyvyyden heikkenemisen lisäksi altistuneen henkilön herkkyydestä riippuen aiheutua oireilua ja sairastelua. Tyypillisiä mikrobien ja niiden aineenvaihduntatuotteiden (MVOC) altistumisen aiheuttamia oireita ovat silmien, ihon ja hengitysteiden ärsytysoireet sekä erilaiset yleisoireet, kuten esimerkiksi lämpöily. Altistumisesta voi myös seurata toistuvaa hengitysteiden infektioita tai altistus voi lisätä riskiä sairastua esimerkiksi astmaan. Myös poskiontelo- ja keuhkoputkentulehduksien riski on havaittu kasvavan mikrobeille ja niiden aineenvaihduntatuotteille altistumisen myötä. Altistumisesta pölylle ja muille hiukkasille saattaa aiheutua ihon, hengityselimien limakalvojen ja silmien ärsytysoireita sekä sydän- ja hengityselinsairauksia. (Asumisterveysohje 2003, s. 66,71). Sisäilman haitallisten aineiden pitoisuuksien raja-arvoja on esitetty esimerkiksi Kuntotutkimusoppaassa (2016).

### 1.3 Työn rakenne

Luvussa 2 luodaan teoreettinen pohja alipaineistetun ryömintätilan kosteus- ja lämpöolosuhteiden mallintamiseksi. Luvussa 3 esitellään laskentamalli, sen lähtötiedot ja tulosten arviointikriteerit. Luvussa 4 esitellään simuloinnin tuloksia, joiden pohjalta luvussa 5 pohditaan tuloksista tehtäviä johtopäätöksiä ja annetaan myös suosituksia ryömintätilan rakenneratkaisuista ja ilmanvaihtuvuuksien suuruuksista.

Työn lopussa olevissa liitteissä A-D on esitetty mallinnukseen käytettyjä materiaaliominaisuuksia, kuvia malligeometriasta sekä esitellään yhden simulointiin käytetyn mallin lähdekoodia. Liitteiden tarkoituksena on täydentää varsinaisen tekstin antamaa kokonaiskuvaa.

## 2. TEORIA

Tämän luvun tarkoituksena on luoda teoreettinen pohja ryömintätilaisen tuuletetun alapohjan ajasta riippuvaan lämpö- ja kosteusteknisiin tarkasteluihin. Aluksi luvussa 2.1 käsitellään lämpöä, lämmön varastoitumisominaisuuksia sekä lämmön siirtymistä. Tämän jälkeen luvussa 2.2 käsitellään ilman kosteutta sekä huokoisen materiaalin kosteuskäyttäytymistä. Luvussa 2.3 käsitellään kosteuden siirtymistä huokoisessa aineessa. Luku 2.4 yhdistää aikaisemmissa luvuissa käsitellyt asiat yhdistetyksi lämmön- ja kosteuden siirtymiseksi. Tämän jälkeen luvussa 2.5 johdetaan ryömintätilaisen tuuletetun alapohjan lämpö- ja kosteusolosuhteiden mallinnuksessa käytetyt energia- ja massatasapainoyhtälöt. Lopuksi luvussa 2.6 käsitellään työssä käytetyn simulointiohjelman COMSOL Multiphysicsin käyttämän numeerisen ratkaisumenetelmän, elementtimenetelmän, teorian pääperiaatteita.

### 2.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö voi siirtyä johtumalla, konvektiolla sekä säteilemällä (Mills 1999, s. 7). Lämpö on aineen atomien tai molekyylien liike-energiaa, jonka mitta on lämpötila. Jokainen lämmönsiirtomuoto tarvitsee tapahtuakseen lämpötilaeron. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (Çengel & Boles 2011, s. 92)

#### 2.1.1 Lämpö ja lämmön säilyminen

Sisäenergia  $U$  [J] kuvaa aineen molekulaarista energiaa, joka voi olla molekyylien liike-energiana olevaa tuntuvaa energiaa (eng. *sensible energy*), aineen vallitsevaan faasiin vaikuttavaa latenttia energiaa (eng. *latent energy*), atomien välisiin sidoksiin sidosenergiana sitoutuneena olevaa kemiallista energiaa (eng. *chemical energy*) tai atomien ytimiin sitoutunutta ydinenergiaa (eng. *nuclear energy*). Lämmönsiirrossa ja siihen liittyvissä tarkasteluissa ollaan yleensä kuitenkin kiinnostuneita ainoastaan tuntevan ja latentin energian muutoksista. Tuntuvaa ja latenttia energiaa kutsutaan myös tuntuvaksi ja latentiksi lämmöksi. (Çengel & Boles 2011, s. 55)

Termodynamiikassa määrätyn partikkelijoukon muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan systeemiksi. Systeemi voi olla suljettu tai avoin. Suljetun systeemin massa on vakio eli systeemissä ei tapahdu massanvaihtoa ympäristön kanssa. Energianvaihtoa voi kuitenkin tapahtua työn tai lämmön muodossa. Jos suljetussa systeemissä ei tapahdu lämpöenergian siirtoa systeemin ja ympäristön välillä, systeemiä kutsutaan eristetyksi systeemiksi. Avointa systeemiä kutsutaan myös kontrollitilavuudeksi (eng. *control volume*). (Çengel & Boles 2011 s. 10-11) Kontrollitilavuus on äärellinen alue, jonka aluetta rajoittavat pinnat ovat avoimet. Tätä pintaa kutsutaan

kontrollipinnaksi (eng. *control surface*) (White 1994, s. 114). Tämä mahdollistaa massan, liikemäärän ja energian vapaan siirtymisen kontrollitulavuuteen ja siitä pois. (White 1994, s. 33)

Systeemin tila (eng. *state*) määrittää systeemin kokonaan makroskooppisessa mittakaavassa. Systeemin tilan sisältämiä tietoja ovat esimerkiksi systeemin kantaman energian eri muotoihin liittyvä kaikki tieto sekä mahdollisesti systeemin sisältämien eri yhdisteiden ainemääriin liittyvät tiedot. Systeemin tilaa kuvaavat suureet voivat olla joko intensiivisuureita tai ekstensiivisuureita. Intensiivisuureet ovat riippumattomia tarkasteltavan systeemin ainemäärästä, kuten esimerkiksi lämpötila ja paine. Ekstensiivisuuret riippuvat tarkasteltavan systeemin ainemäärästä, kuten esimerkiksi systeemin massa, tilavuus tai lämpökapasiteetti  $C$  [J/K]. Intensiivisuureita merkitään yleensä pienellä kirjaimella, kun taas ekstensiivisuureita isolla kirjaimella. Ekstensiivisuure, joka on massayksikköä kohden, kutsutaan ominaisuureksi. Tällainen ominaisuure on esimerkiksi ominaislämpökapasiteetti  $c$  [J/(kg·K)]. Ekstensiivisuure lämpökapasiteettista  $C$  [J/kg] saadaan intensiivisuure (ominaisuure) ominaislämpökapasiteetti  $c$  [J/(kg·K)] jakamalla se massalla (Çengel & Boles 2011, s. 12):

$$c = \frac{C}{m} \quad (2.1)$$

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa sitä, paljonko energiaa tarvitaan nostamaan aineen massayksikön lämpötilaa yhden asteen. Ominaislämpökapasiteetti voidaan määrittää vakio-paineessa  $c_p$  [J/(kg·K)] tai vakio-tilavuudessa  $c_v$  [J/(kg·K)]. Yleisesti ottaen vakio-paineessa määritetyt lämpökapasiteetin arvot ovat suurempia kuin vakio-tilavuudessa määritetyt arvot. (Çengel & Boles 2011 s. 174) Kuitenkin kokoonpuristumattomassa tilanteessa pätee (Çengel & Boles 2011, s. 195):

$$c_p = c_v = c \quad (2.2)$$

Lämpökapasiteetin voi määrittää myös tilavuusyksikköä kohden, jolloin saatua suuretta kutsutaan volumetriseksi lämpökapasiteetiksi  $c_{p,vol}$  [J/(m<sup>3</sup>·K)]. Volumetrinen lämpökapasiteetti kuvaa sitä, paljonko energiaa tarvitaan nostamaan aineen tilavuusyksikön lämpötilaa yhden asteen. Volumetrinen lämpökapasiteetti voidaan laskea kaavalla (Hagentoft 2001, s. 148):

$$c_{p,vol} = c_p \rho \quad (2.3)$$

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemissä energiaa ei häviä eikä sitä synny, vaan energia muuttaa muotoaan toiseksi energiamuodoksi, kuten esimerkiksi mekaaninen energia muuttuu kitkan vaikutuksesta lämpöenergiaksi (Çengel & Boles 2011, s. 70). Seuraavaksi johdetaan systeemin sisäenergian säilymisen perusteella epästationäärinen eli ajasta riippuva energian säilymistä kuvaava yhtälö.

Tarkastellaan suljettua systeemiä, jossa ei ole sisäistä lämmöntuottoa tai lämpönielua. Systeemiin tuodaan lämpövirta  $Q$  [W]. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemin sisäenergian muutos  $\Delta U$  aikaväliä  $\Delta t$  [s] on

$$\Delta U = Q\Delta t \quad (2.4)$$

Kertomalla puolittain aikavälillä ja annetaan aikavälin lähestyä nollaa, saadaan

$$Q = \frac{dU}{dt} \quad (2.5)$$

Koska systeemin massa ei muutu, sisäenergian muutokseksi saadaan ominaissisäenergian  $du$  [J/kg] ja massan  $m = \rho V$  avulla:

$$dU = \rho V du \quad (2.6)$$

jossa

$\rho$  on tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  on tilavuus [m<sup>3</sup>]

Ominaissisäenergian muutos voidaan ilmasta kokoonpuristumattomassa tilanteessa kaavalla:

$$du = c dT \quad (2.7)$$

Kaavan 2.7 tarkempi johto on esitetty esimerkiksi lähteessä (Çengel & Boles 2011, s. 657-674) Yhdistämällä yhtälöt 2.6 ja 2.7 yhtälöön 2.5 saadaan

$$Q = \rho V c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

joka kuvaa aineen ajasta riippuvaa lämpötilanmuutosta termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti. (Mills 1999, s. 4-5)

## 2.1.2 Johtuminen

Nesteissä ja kaasuissa lämmönjohtumisella tarkoitetaan molekyylien tai atomien toisiinsa satunnaisesti törmäämisestä aiheutuvaa liike-energian siirtymistä. Liike-energia siirtyy korkeamman lämpötilan suuremman liike-energian omaavilta partikkeleilta matalamman lämpötilan pienemmän liike-energian omaaville partikkeleille. Kiinteissä aineissa johtuminen tapahtuu aineen partikkelien hilojen värähtelyenergian siirtymisenä suuremman energian omaavilta hiloilta pienemmän energian omaaville hiloille sekä vapaiden elektronien siirtymisen kuljettaman liike-energian avulla. (Çengel & Boles 2011, s. 92)

Lämmönjohtumista karteesisessa koordinaatistossa voidaan kuvata Fourierin lailla seuraavasti (Mills 1999, s. 135):

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.9)$$

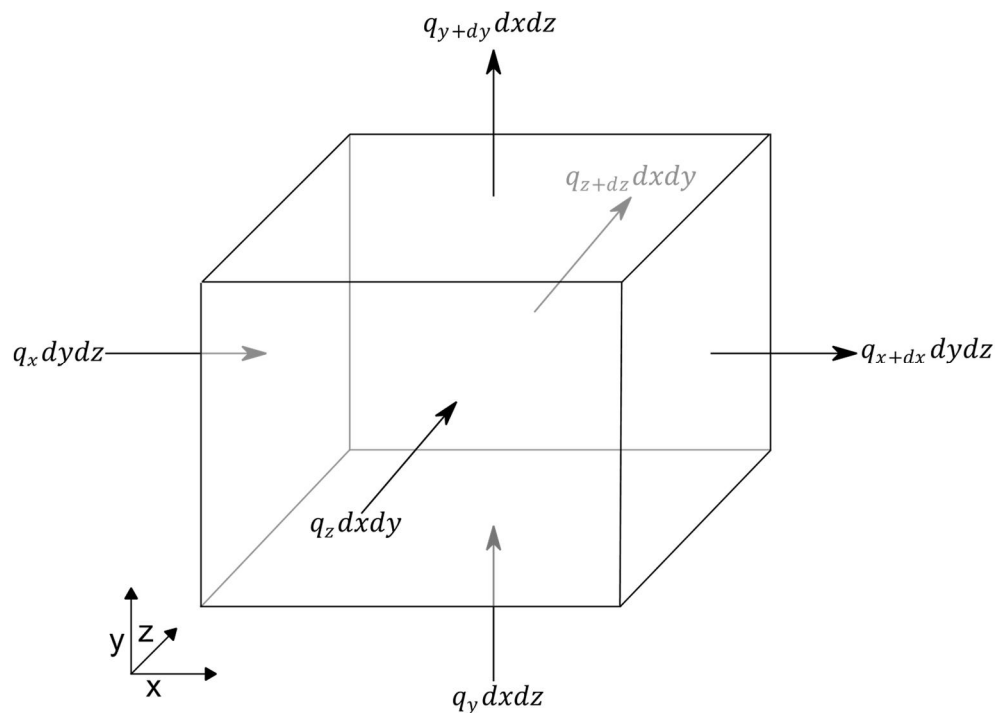
jossa

$\mathbf{q}$  on johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys vektorimuodossa [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]

$\nabla T$  on skalaarisen lämpötilankentän gradientti [ $\text{K}/\text{m}$ ]

Lämmönjohtumiselle voidaan johtaa ajasta riippuva differentiaaliyhtälö tarkastelemalla infinitesimaalisen kokoiseen kontrollitilavuuteen tulevia ja siitä lähteviä lämpövirran tiheyksiä. Karteesisessä koordinaatistossa lämpöä voi johtua  $x$ -,  $y$ - ja  $z$ -suuntiin. (White 1994, s. 208-210) Kuvassa 2.1 on havainnollistettu infinitesimaalista kontrollitilavuutta, lämpövirtoja sekä lämpövirtojen suuntia.



**Kuva 2.1.** Kontrollitilavuus karteesisessä koordinaatistossa.

Tarkasteltava infinitesimaalinen kontrollitilavuus on tilavuudeltaan

$$dV = dxdydz \quad (2.10)$$

Kontrollitilavuuteen kohdassa  $x$  pinnan läpi menevä lämpövuoto voidaan ilmaista

$$q_x dydz$$



ja pinnan kautta kohdassa  $x + dx$  lähtevä lämpövuoto

$$q_{x+dx} dydz$$

Kontrollitilavuuteen pinnasta sisään virtaava nettovirta kohdassa  $x$  on siten

$$(q_x - q_{x+dx}) dydz$$

Ulos virtaava lämpövirran tiheys voidaan ilmaista myös Taylorin sarjakehitelmänä

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \text{korkeamman asteen termejä} \quad (2.11)$$

Uudelleen järjestelemällä yhtälö 2.11 ja jättämällä korkeamman asteen termit pois niiden pienuuden takia, saadaan

$$(q_x - q_{x+dx}) = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz \quad (2.12)$$

Tekemällä lämmönjohtumisen tarkastelut myös  $y$ - ja  $z$ -suunnille (kuva 2.1) saadaan johtumisen aiheuttamaksi nettolämpövirtaa kuvaavaksi yhtälöksi

$$Q = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (2.13)$$

Yhdistämällä yhtälöt 2.8 ja 2.13 saadaan epästationääristä lämmönjohtumista kuvaavaksi yhtälöksi

$$\rho dV c \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (2.14)$$

Lisäksi ottamalla huomioon kontrollitilavuuden tilavuus (kaava 2.10), saadaan

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \quad (2.15)$$

joka voidaan ilmaista divergenssin avulla muodossa

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) \quad (2.16)$$

Yhdistämällä yhtälö 2.15 yhtälöön 2.9, saadaan

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.17)$$

Aineille, joilla on vakio lämmönjohtavuus, pätee yhtälö

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (2.18)$$

jota kutsutaan myös *yleiseksi lämmönjohtumisen yhtälöksi*. Yhtälö on voimassa sekä kiinteille aineille että kokoonpuristumattomille levossa oleville fluideille. (Mills 1999, s. 135-137; White 1994; s. 208-210)

### 2.1.3 Konvektio

Konvektiivisella lämmönsiirrolla tarkoitetaan lämmönsiirtotapaa, jossa aineen sisäenergia siirtyy fluidissa tapahtuvan virtauksen mukana. Fluidilla tarkoitetaan ainetta, joka ei vastusta ulkoisen voiman aiheuttamaa muodonmuutosta. Kaasuilla ja nesteillä on viskositeetti, joka kuvaa kuinka paljon kaasu tai neste vastustaa ulkoisen voiman aiheuttamaa muodonmuutosta muodonmuutosnopeuden funktiona. Näin ollen kaasut ja nesteet voidaan mieltää fluideiksi. (Çengel & Boles 2011, s. 92; White 1994, s. 2, 17-18)

Konvektiivinen lämmönsiirto voidaan luokitella kahteen eri luokkaan fluidin liikkeen syntyvän perusteella: pakotettuun konvektioon ja luonnolliseen konvektioon. Pakotetussa konvektiossa lämpöä siirtävän fluidin virtaus aiheutuu ulkopuolisen apuvoiman kuten esimerkiksi tuulen, pumpun tai puhaltimen avulla. Luonnollisessa konvektiossa fluidin liike aiheutuu fluidin sisäisestä tiheyserosta, jolloin syntyneen nosteen vaikutuksesta lämmin fluidi virtaa pyrkien tasoittamaan tiheyserot. (Çengel & Boles 2011, s. 92; White 1994, s. 2, 17-18)

Konvektiiviseksi lämmönsiirroksi voidaan mieltää myös pinnan ja ympäröivän fluidin välillä tapahtuvaa lämmön siirtymistä, joka koostuu sekä lämmön johtumisesta pinnasta fluidiin että pintaa ympäröivän fluidin liikkeestä joko luonnollisena tai pakotettuna virtauksena. Konvektiivista lämmönsiirtoa fluidin ja pinnan välillä voidaan kuvata yhtälöllä (Mills 1999, s. 18):

$$q_c = h_c \Delta T \quad (2.19)$$

jossa

$q_c$  on konvektiivinen lämpövirran tiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$h_c$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]

$\Delta T = T_s - T_e$  on lämmönsiirtopinnan pintalämpötilan  $T_s$  ja ohi virtaavan fluidin lämpötilojen erotus  $T_e$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Yhtälöä 2.19 kutsutaan myös *Newtonin jäähdytyslaiksi* (Mills 1999, s. 18).

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $h_c$  riippuu virtaavan fluidin termodynaamisista ominaisuuksista, lämpötilasta, viskositeetista, virtausnopeudesta, virtauksen luonteesta (turbulentti tai laminaari), virtauksen syntytavasta (pakotettu tai luonnollinen virtaus),

virtaustilanteesta (ulkopuolinen tai sisäinen virtaus) sekä pinnan muodosta, karheudesta ja lämpötilasta. (Mills 1999, s. 18, 334) Suurin osa konvektiivisen lämmönsiirron kertomista perustuvat kokeellisiin tuloksiin, joiden hyvyys tulee arvioida tapauskohtaisesti (Mills 1999, s. 263).

Fluideissa tapahtuva konvektiivinen lämmönsiirtyminen voidaan ottaa huomioon yleisessä lämmönjohtumista kuvaavassa yhtälössä 2.18 lisäämällä yhtälön oikealle puolelle konvektiivista lämmönsiirtoa kuvaava termi, jolloin yhtäaikaista lämmön siirtymistä sekä johtumalla että konvektiolla kuvaavaksi yhtälöksi saadaan:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T - \mathbf{u} \rho c_p \cdot \nabla T \quad (2.20)$$

jossa

$\mathbf{u}$  on virtauksen virtausnopeusvektori [m/s]

Yhtälö 2.20 soveltuu kuvaamaan lämmön johtumista ja konvektiota ei-reaktiivisissa koonpuristumattomissa virtauksissa.

## 2.1.4 Säteily

Jokainen kappale, jonka lämpötila on absoluuttista nollapistettä korkeampi, säteilee energiaa elektromagneettisena lämpösäteilynä. Lämmönsiirto säteilemällä ei tarvitse väliainetta sen fysikaalisesta luonteesta johtuen. Säteilyn emittoitumien tapahtuu, kun kineettistä energiaa kantavat molekyylit emittoivat satunnaisesti energiaa kantavia fotoneja, jotka lähtevät säteilypinnasta pois päin. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti pinta myös jäähtyy säteilyn emittoitumisen aikana, koska pinnan kineettinen värähtelyenergia vähenee. Lämpösäteilyssä on periaatteessa siis kyse aina pinnan jäähtymisestä. Kappaleiden välillä säteilemällä siirtyvä energia riippuu kappaleen pinnan lämpötilasta, pinnan ominaisuuksista, säteilevien kappaleiden sijoittumisesta toisiinsa nähden, kappaleiden muodosta, koosta sekä säteilevien kappaleiden välissä olevasta väliaineesta, jonka säteily kohtaa. (Çengel & Boles 2011, s. 92; Lienhard IV & Lienhard V 2008, s. 526; Mills 1999, s. 475)

Ideaalista kappaletta, joka absorboi kaiken pintaan kohdistuvan säteilyn eikä heijasta yhtään pois, kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Mustan kappaleen emittoima säteily voidaan ilmaista Stefan-Boltzmannin lain mukaisesti (Mills 1999, s. 13):

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.21)$$

jossa

$E_b$  on mustan kappaleen lähettämä säteilyteho [W/m<sup>2</sup>]

$\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio  $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>)

$T$  on mustan kappaleen pinnan absoluuttinen lämpötila [K]

Mustan kappaleen säteily edustaa maksimaalista säteilyn suuruutta. Todellinen kappale emittoi vähemmän säteilyä kuin musta kappale. Epäideaalisuus otetaan huomioon emissiviteetillä  $\varepsilon$  [-], joka kuvaa todellisen kappaleen emittoiman säteilytehon suhdetta mustan kappaleen säteilytehoon. (Mills 1999, s. 457) Todellisen kappaleen lähettämäksi säteilyn lämpötehon tiheydeksi eli lämpövirran tiheydeksi  $q_r$  [W/m<sup>2</sup>] saadaan yhtälön 2.21 ja emissiviteetin perusteella (Mills 1999, s. 457):

$$q_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.22)$$

Mustalle kappaleelle emissiviteetti on 1. Johtuen kappaleiden koosta, muodosta ja sijoitumisesta toisiinsa nähden kaikki pinnasta emittoitunut säteily ei välttämättä kohdistu kohdepintaan. Vähentynyt säteilyteho otetaan huomioon näkyvyyskerroimella  $F$  [-], joka kuvaa kohdekappaleesta ohimenneen säteilytehon suhdetta lähdekappaleen lähettämään säteilytehoon. (Mills 1999, s. 457)

Tarkasteltaessa tilannetta, jossa pintaa 1 ympäröi suuri, täysin musta pinta 2, pinnasta 1 pintaan 2 siirtyväksi lämpövirrantiheydeksi  $q_{12}$  [W/m<sup>2</sup>] saadaan (Mills 1999, s. 16):

$$q_{12} = \varepsilon_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.23)$$

Kappaleiden kokoerosta johtuen tilanteen näkyvyyskerroin  $F_{12}$  pinnasta 1 pintaan 2 on 1. Eri säteilylämmönsiirron tilanteiden näkyvyyskerroimia on saatavilla kirjallisuudesta esimerkiksi lähteistä Lienhard IV & Lienhard V (2008) ja Mills (1999).

## 2.2 Ilman kosteus

Ilmakehän ilman voidaan ajatella koostuvan kuivan ilman ja vesihöyryn seoksesta, jossa kuiva ilma koostuu pääasiassa typestä ja hapestä (Çengel & Boles 2011, s. 146). Kostea ilma voidaan käsitellä ideaalikaasuna vesihöyryn osapaineeseen 10 kPa asti, jonka jälkeen ideaalikaasu-oletus ei enää päde (Çengel & Boles 2011, s. 137). Ympäristön vapaan ilman kokonaisilmanpaine  $p_{atm}$  [Pa] koostuu Daltonin osapainelain mukaisesti seoksen kaasujen, kuivan ilman sekä vesihöyryn, osapaineiden summasta (Hens 2012, s. 16):

$$p_{atm} = p_a + p_v \quad (2.24)$$

jossa

$p_a$  on kuivan ilman osapaine [Pa]

$p_v$  on vesihöyryn osapaine [Pa]

Vesihöyryn osapaine kuvaa ensisijaisesti sitä, kuinka suuren voiman pinta-alayksikköä kohti pelkät vesimolekyylit aiheuttavat törmätessään ja kimmotessaan pois päin jostakin

pinnasta. Jos tunnetaan sekä lämpötila, joka kuvaa yksittäisten molekyylien keskimääräistä kineettistä energiaa, että vesimolekyylin massa, niin osapaineesta voidaan laskea molekyylien määrää kuvaavaa konsentraatio eli vesihöyrypitoisuus  $\nu$  [kg/m<sup>3</sup>]. Vesihöyrypitoisuus kuvaa ilmassa olevan vesihöyryn massaa tilavuusyksikköä kohden. Yleisen ideaalikaasulain (Çengel & Boles 2011 s. 135):

$$pV = \frac{mR_u T}{M} \quad (2.25)$$

jossa

$p$	on vallitseva paine [Pa]
$V$	on tarkasteltava tilavuus [m <sup>3</sup> ]
$m$	on massa [kg]
$R_u$	on universaalinen kaasuvakio, 8,31447 [J/(mol·K)]
$T$	on absoluuttinen lämpötila [K]
$M$	on moolimassa, vedelle $M_w = 18,02$ [g/mol],

avulla vesihöyryn osapaine  $p_v$  voidaan muuttaa vesihöyrypitoisuudeksi:

$$\nu = \frac{m}{V} = \frac{p_v M_w}{R_u T} \quad (2.26)$$

Ilma voi sisältää lämpötilasta riippuvan maksimimäärän vesihöyryä, jota kutsutaan vesihöyryn kyllästysosapaineeksi  $p_{sat}(T) = p_{sat}$  [Pa] tai vesihöyryn kyllästyspitoisuudeksi  $\nu_{sat}(T) = \nu_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>]. Ilman kosteuden maksimimäärä kasvaa lämpötilan noustessa. (Çengel & Boles 2011, s. 146, 692; Hagentoft 2001, s. 88) Kyllästystilan arvoille on olemassa mittauksiin perustuvia taulukkoarvoja sekä korrelaatiokaavoja kuten esimerkiksi lähteistä Çengel & Boles (2011, s. 146) ja Hagentoft (2001, s. 88). Yksi esimerkki korrelaatiokaavasta on (EN ISO 13788 2012, s. 37)

$$p_{sat}(T) = 610,5e^{\frac{17,269 T}{237,3+T}}, \text{ kun } T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.27)$$

$$p_{sat}(T) = 610,5e^{\frac{21,875 T}{265,5+T}}, \text{ kun } T < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.28)$$

Ilmassa olevan kosteuden määrän suhdetta ilman lämpötilaa vastaavaan kyllästystilan määrään kutsutaan suhteelliseksi kosteudeksi  $\varphi$  [-] (Hagentoft 2001, s. 288):

$$\varphi(T) = \frac{\nu}{\nu_{sat}(T)} = \frac{p}{p_{sat}(T)} \quad (2.29)$$

Suosittelua yksiselitteinen tapa ilmaista suhteellinen kosteuden suuruus on muodossa 100 % RH, jossa RH tarkoittaa suhteellista kosteutta (eng. *relative humidity*). Suhteellinen kosteus voidaan ilmaista myös desimaalilukumuodossa.

Vallitsevan ilman vesihöyrypitoisuuden ylittäessä kyllästyspitoisuuden, ylimääräinen vesihöyry kondensoituu eli tiivistyy nesteeksi (Hagentoft 2001, s. 107). Luonnossa kondensoitumisen voi havaita sumuna tai pinnoille tiivistyvänä kasteena. Pinnalle tiivistyvän kosteuden määrää hallitsee yhtälö (Hagentoft 2001, s. 107):

$$g_{kond} = \beta(v_a - v_s(T)) \quad (2.30)$$

jossa

$g_{kond}$	on pinnalle tiivistyvän kosteuden kosteusvirta [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
$\beta$	on pinnan kosteudensiirtokerroin [m/s]
$v_a$	on ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus [kg/m <sup>3</sup> ]
$v_s$	on pinnan lämpötilaa vastaava vesihöyryn kyllästyspitoisuus [kg/m <sup>3</sup> ]

Tiivistyminen on eksoterminen eli lämpöä luovuttava prosessi. Tiivistymisen luovuttama lämpövirrantiheys  $q_{kond}$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] saadaan laskettua kaavalla (Hagentoft 2001, s. 107):

$$q_{kond} = h_{fg}g_{kond} \quad (2.31)$$

jossa

$h_{fg}$	on höyrystymislämpö [J/kg], vedelle 2260 kJ/ kg
----------	---

Tiivistymisen luovuttama lämpö nostaa pinnan lämpötilaa ja samalla vähentää tiivistyvän veden määrää. (Hagentoft 2001, s. 107). Vesipinnasta emittoituu eli desorptoituu pinnasta pois päin aina tietyllä nopeudella vesimolekyylejä pinta-alayksikköä kohden. Desorptoitumisnopeus riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Samaan aikaan vesipintaa ympäröivän ilman vesimolekyylit törmäilevät vesipintaan alituisesti ja osa törmänneistä molekyyleistä adsorboituu osaksi vesipintaa. Adsorboitumisnopeus riippuu osapaineen suuruudesta. Kun desorptoitumisesta ja adsorboitumisesta aiheutuvat massavirrat ovat pinta-alayksikköä kohti yhtä suuret, pinnan asema ei enää muutu. Tällöin tarkasteltava tilanne on tasapainossa. Tasapainotilassa ympäröivän ilman vesihöyryn osapaine on kyllästysosapaineessa. (Çengel & Boles 2011, s. 147-148) Jos ympäröivä ilma ei ole kyllästysosapaineessa, pinnasta ilmaan siirtyvän kosteuden kosteusvirta  $g_{evap}$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] voidaan laskea (Hagentoft 2001, s. 107):

$$g_{evap} = \beta(v_s(T) - v_a) \quad (2.32)$$

Haihtumisnopeus kasvaa sitä suuremmaksi mitä suurempi on paine-ero vesihöyryn osapaineen ja nestemäisen veden kyllästysosapaineiden välillä (Çengel & Boles 2011, s. 147). Haihtuminen on endoterminen eli lämpöä sitova prosessi (Hens 2012, s. 210). Haihtumisen sitomalle lämmölle saadaan yhtälö (Hens 2012, s. 210):

$$q_{evap} = h_{fg}g_{evap} \quad (2.33)$$

Pinnan lämpötilan aleneminen laskee vesihöyryn kyllästyslämpötilaa. Samalla myös haihtumisen reaktionopeus pienenee, kunnes prosessi on saavuttanut tasapainotilan. Käytännössä haihtumisprosessi saavuttaa tilan, jossa prosessi säilyy vain näennäisesti tasapainotilassa jokaisella ajanhetkellä. Tällaista tila kutsutaan kvasi-stationääriseksi tilaksi. (Çengel & Boles 2011, s. 38, 147-148)

Pinnan kosteudensiirtokerroin  $\beta$  [m/s] voidaan määrittää esimerkiksi Lewisin kaavan avulla (Hagentoft 2001, s. 107):

$$\beta = \frac{h_c}{\rho_a c_{pa}} \quad (2.34)$$

jossa

$h_c$  on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]

$\rho_a$  on ympäröivän ilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c_{pa}$  on ympäröivän ilman ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

Rakennusfysiikan sovelluksissa käytettyjä kosteudensiirtokertoimien vakioarvoja ovat esimerkiksi sisäilmassa  $\beta \approx 3\text{e-}3$  m/s ja ulkoilmassa  $\beta \approx 10\text{e-}3$  m/s (Hagentoft 2001, s. 107). Kosteudensiirtokerroin on verrannollinen kostean pinnan ohi tapahtuvan virtauksen virtausnopeuteen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen kautta (Hagentoft 2001, s. 107, 303). Muita konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen vaikuttavia tekijöitä on tarkemmin esitelty luvussa 2.1.3.

## 2.3 Kosteuspitoisuus

Suurin osa rakennusmateriaaleista on huokoisia aineita. Kosteus siirtyy aineessa huokosten välityksellä. Kuiva materiaali ei sisällä vettä tai sen sisältämä vesi on kemiallisesti sitoutunut materiaaliin. Huokoiset aineet voidaan jakaa kosteuskäyttäytymisensä perusteella kahteen eri luokkaan: hygroskooppisiin- ja ei-hygroskooppisiin aineisiin. Hygroskooppiset aineet sitovat itseensä vesimolekyylejä ympäröivästä kosteasta ilmasta. Kosteutta sitoutuu materiaaliin huokosten välityksellä, kunnes materiaalin vesipitoisuus on saavuttanut ympäröivän ilman kosteutta vastaava tasapainotilan. Ei-hygroskooppisiin aineisiin sitoutuu hyvin vähän kosteutta niiden ollessa kosteassa ympäristössä. Näin ollen ei-hygroskooppisia aineita voidaan pitää kosteutta sitomattomina aineina. (Künzel 1995, s. 6) Huokosten täyttymistä vedellä kutsutaan sorptioksi ja tyhjentymistä desorptioksi (Hagentoft 2001, s. 91-92).

Huokoisella materiaalilla on olemassa jokaista ympäristön suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoa vastaava kosteuspitoisuuden tasapainotila. Huokoisen materiaalin tasapainotilan kosteuspitoisuus  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] voidaan ilmaista materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona

$$w(\varphi, T)$$

jota kutsutaan myös tasapainokosteuskäyräksi. Tasapainokosteuskäyrä on materiaalikoh-  
tainen ominaisuus. Kuitenkin käytännön tarkasteluissa lämpötilariippuvuus on työlästä ja  
hidasta määrittää, jolloin tasapainokosteutta on helpompi käsitellä pelkästään huokosil-  
man suhteellisesta kosteudesta riippuvana

$$w(\varphi)$$

Kosteus sitoutuu huokosseinän pintaan kerroksittain alkaen yhden molekyylin paksui-  
sesta vesikerroksesta päättyen monikerroksiseen molekyyli-rakenteeseen. (Hagentoft  
2001, s. 91, 151) Materiaaleille sorption ja desorption aikana mittaamalla määritetyt kos-  
teustasapainokäyrät saattavat poiketa toisistaan hystereesin takia. Hystereesillä kuvataan  
aikaisemmin vallinneiden olosuhteiden vaikutusta tuleviin olosuhteisiin (Mayhew 2015).  
Huokoisissa materiaaleissa hystereesin vaikutuksesta materiaali voi sisältää samassa suh-  
teellisessa kosteudessa desorption aikana enemmän kosteutta kuin adsorption aikana (Ha-  
gentoft 2001, s. 92). Kuitenkin monilla rakennusmateriaaleilla hystereesin vaikutukset  
eivät ole merkittäviä (Künzel 1995, s. 7). Tässä työssä ei tarkastella hystereesin syitä.

Huokoisen aineen huokosverkostossa tapahtuu kapillaarikondenssia huokosten koosta  
riippuen, joko huokosilmasta tiivistymällä tai huokosseinään adsorptoituvan veden vesi-  
kerrosten yhtyessä toisiinsa. (Hagentoft 2001, s. 91; Hens 2012 s. 175-176) Huokosten  
täytyminen alkaa pienimmistä huokosista ja jatkuu kohti isompia huokosia. Täytyminen  
jatkuu, kunnes materiaali on saavuttanut hygroskooppisen kyllästyskosteuspitoisuutensa.  
Hygroskooppisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa huokoisen aineen huokosilma voi saa-  
vuttaa korkeintaan n. 98 % suhteellista kosteutta vastaavan tasapainokosteuspitoisuuden  
ympäröivästä ilmasta siirtyvän kosteuden avulla. Huokosessa vallitsevien kapillaarivoi-  
mien takia vesihöyryn kondensoituminen tapahtuu alle 100 % suhteellisessa kosteudessa.  
(Hagentoft 2001, s. 91; Hens 2012, s. 173) Aluetta 0-98 % kutsutaan hygroskooppiseksi  
alueeksi (Hagentoft 2001, s. 91). Kapillaarivoimien vaikutusta vesihöyryn kondensoitu-  
miseen huokosessa voidaan käsitellä Kelvinin lain avulla (Hagentoft 2001, s. 288; Künzel  
1995, s. 9).

Hygroskooppista aluetta seuraa kapillaarinen alue. Kapillaarisella alueella huokoisen ma-  
teriaalin ollessa kosketuksessa veteen, materiaaliin siirtyy vettä kapillaaristen voimien  
avulla. Veden siirtyminen jatkuu, kunnes materiaalin kosteuspitoisuus on saavuttanut ka-  
pillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden (Hagentoft 2001, s. 91,99). Suurin mahdollinen  
kosteuspitoisuus eli maksimikosteuspitoisuus saavutetaan, kun kaikki huokokset ovat täyt-  
tyneet vedellä (Hagentoft 2001, s. 92). Maksimikosteuspitoisuuden saavuttaminen ei on-  
nistu ilman apulaitteita kuten esimerkiksi vakuumia (Hens 2012, s. 126).



## 2.4 Kosteuden siirtyminen huokoisessa aineessa

Tässä kappaleessa käsitellään kosteuden siirtymistä huokoisessa aineessa. Vettä voi siirtyä huokoisessa aineessa vesihöyryinä ja nesteinä. Vesihöyry voi siirtyä pitoisuuserosta johtuvana diffuusiona, termodiffuusiona, effuusiona sekä konvektion avulla. Nesteinä kosteus voi siirtyä kapillaarisesti, painovoimaisesti ja paine-eron vaikutuksesta. (Hagentoft 2001, s. 292; Hens 2012, s. 292) Tässä työssä käsitellään tarkemmin pelkästään vesihöyryä diffuusiota ja konvektiota sekä nestemäisen veden kapillaarista siirtymistä huokoisessa aineessa.

### 2.4.1 Vesihöyryä diffuusio

Diffuusiolla (eng. *ordinary diffusion*) tarkoitetaan aineen siirtymistä konsentraatioerosta aiheutuvan gradientin vaikutuksesta suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Suuremmassa konsentraatiossa on enemmän liike-energiaa, joka pyrkii tasoittumaan pienemmän konsentraation suuntaan. Liike-energioiden tasoittuminen tapahtuu liike-energiaa sisältävien aineen partikkelien siirtymisenä suuremmasta konsentraatiosta pienempään. (Mills 1999, s. 36, 827)

Vesihöyryä diffuusiota voidaan kuvata Fickin lailla, joka on lineaarinen kuvaus massavirran ja konsentraatiogradientin välillä (Mills 1999, s. 754). Vesihöyryä diffuusiovirraksi  $\mathbf{g}_v$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] saadaan (Hagentoft 2001, s. 294):

$$\mathbf{g}_v = -\delta_v \nabla v \quad (2.35)$$

jossa

$\delta_v$  on aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna [m<sup>2</sup>/s]

Aineen vesihöyrynläpäisevyys voidaan ilmaista myös diffuusiiovastuskertoimen  $\mu$  [-] ja paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyyden  $D_a$  [m<sup>2</sup>/s] avulla (Hagentoft 2001, s. 96):

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \quad (2.36)$$

Paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys riippuu ilman lämpötilasta, kuten esimerkiksi seuraavasta korrelaatiosta on nähtävissä (Hagentoft 2001, s. 292):

$$D_a = (22,2 + 0,14 T) \cdot 10^{-6} \quad (2.37)$$

jossa

$T$  on yksikötön °C lämpötila [-]

Massan diffuusio on analoginen lämmön johtumisen kanssa (Mills 1999, s.34). Fickin diffuusiolain tarkkuus on vakio, kunnes huokoskoot alkavat lähestyä vapaata törmäysväliä, jonka jälkeen molekyylien siirtymistä kutsutaan effuusioksi tai Knudsenin diffuusioksi, joita ei käsitellä tässä työssä tarkemmin. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa huokosen koolla ei ole Fickin lain tarkkuuteen merkittävää vaikutusta (Künzel 1995, s. 15).

## 2.4.2 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Huokosalipaineen aiheuttamaa veden siirtymistä kutsutaan kapillaariseksi kosteuden siirtymiseksi. Huokosalipaine johtuu ilman, veden ja huokosseinän koheesio- ja adheesiovoimista. Koheesiolla tarkoitetaan aineen sisäisiä vetovoimia, joita ilmenee esimerkiksi vedessä ja ilmassa. Koheesiovoimat aiheuttavat veden pintajännityksen. Adheesiolla tarkoitetaan kahden eri aineen sisäisten molekylaaristen voimien aiheuttamaa keskinäistä vuorovaikutusta, jonka seurauksena aineet pyrkivät vetämään toisiaan puoleensa. Adheesiota ilmenee ilman ja huokosseinän, veden ja huokosseinän sekä ilman ja veden välillä. (Hens 2012, s. 211-212; Rennie 2015; Robert & Martin 2016)

Yleisesti käytetty keino kapillaarisuuden havainnollistamiseen on käsitellä materiaali-huokosta putkena, joka sisältää nestemäistä vettä ja ilmaa (Hagentoft 2001, s. 99-102; Künzel 1995, s. 8-9). Kapillaariputkessa olevaa kaarevaa tai huokosessa olevaa monimutkaista ilman ja veden rajapintaa kutsutaan meniskukseksi (Hens 2012, s. 211; Law & Rennie 2015). Vesi nousee putkessa huokosalipaineen vaikutuksesta, kunnes vesipatsaan aiheuttama hydrostaattinen paine on yhtä suuri kuin huokosalipaine (Hagentoft 2001, s. 99). Alipaineen voimakkuus riippuu huokosen koosta: pienemmissä huokosissa alipaine on suurempi kuin isommissa (Hens 2012, s. 213). Todellisuudessa huokosrakenteet ovat monimutkaisempia eikä putkioletus ole pätevä todellisten materiaalien huokosverkoston käsittelyssä. (Hagentoft 2001, s. 100; Künzel 1995, s. 8-9)

Yleisesti käytetty yksinkertaistettu tapa käsitellä huokosalipaineen aiheuttamaa virtausta on käyttää kosteuspitoisuutta ajavana potentiaalina. Kapillaarinen kosteusvirran tiheys voidaan ilmaista materiaalin kosteusdiffusiviteetin ja kosteuspitoisuuden gradientin tulona seuraavasti (Künzel 1995, s. 17):

$$\mathbf{g}_w = -D_w(w)\nabla w \quad (2.38)$$

jossa

$\mathbf{g}_w$  on kapillaarisen kosteusvirta [ $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ]

$D_w$  on materiaalin kosteusdiffusiviteetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Materiaalin kosteusdiffusiviteetti riippuu voimakkaasti materiaalin kosteuspitoisuudesta (Künzel 1995, s. 17). Yksinkertaistetun mallin yhtälön 2.38 käyttäytymisen tarkempi ku-

vaus eri kosteusalueilla löytyy (Hens 2012, s. 228). Tarkempi menetelmä huokosalipaineen aiheuttaman virtauksen mallintamiseen olisi virtausmallipohjaisen tarkastelun, kuten esimerkiksi Darcyn lain (luku 2.4.3), käyttäminen (Künzel 1995, s. 15).

### 2.4.3 Vesihöyryn konvektio

Huokoisessa aineessa virtaava ilma voi kuljettaa mukanaan vesihöyryä. Kosteuden siirtymistä fluidin mukana kutsutaan kirjallisuudesta riippuen kosteuden konvektioksi tai advektioksi. (Hagentoft 2001, s. 292; Stocker 2011, s.55) Kun tiedetään virtaavan aineen virtauskenttä eli nopeuskenttä  $\mathbf{u}$  [m/s] huokoisessa materiaalissa, voidaan vesihöyryn molaarinen konvektio esittää yhtälöllä (Stocker 2011, s. 55):

$$\mathbf{g}_{v,cm} = \mathbf{u}c \quad (2.39)$$

jossa

$\mathbf{g}_{v,cm}$  on vesihöyryn molaarinen konvektiovirran tiheys [mol/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $c$  on veden konsentraatio virtaavassa ilmassa [mol/m<sup>3</sup>]

Vesihöyryn konsentraatiosta voidaan laskea virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus veden moolimassan avulla seuraavasti:

$$v = cM_w \quad (2.40)$$

Näin saadaan vesihöyryn konvektioksi

$$\mathbf{g}_{v,c} = \mathbf{u}v = \mathbf{u}cM_w \quad (2.41)$$

jossa

$\mathbf{g}_{v,c}$  on vesihöyryn konvektiovirrantiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]

Tiedettäessä virtaavan ilman tilavuusvirrantiheys tai massavirta pinta-alaa kohden, voidaan kosteuden konvektio laskea myös niiden avulla seuraavasti (Hagentoft 200, s. 292):

$$\mathbf{g}_{v,c} = \mathbf{r}_a v = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} v \quad (2.42)$$

jossa

$\mathbf{r}_a$  on virtaavan ilman tilavuusvirrantiheys [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $\dot{m}_a$  on ilman massavirta pinta-alaa kohden [kg/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $\rho_a$  on ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

Konvektiivinen massansiirto (vesihöyryn konvektio) on analoginen konvektiivisen lämmönsiirron kanssa (Mills 1999, s.36).

Vesihöyryn konvektiota kuvaavia yhtälöitä 2.39, 2.41 ja 2.42 varten tulee selvittää huokoisessa aineessa vallitseva paine-erosta johtuva virtauskenttä. Virtauskenttä voidaan selvittää esimerkiksi Darcyn lain avulla (Hagentoft 2001, s. 78):

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu}\nabla p \quad (2.43)$$

jossa

$\mathbf{u}$	on Darcyn lain mukainen nopeuskenttä [m/s]
$\kappa$	on huokoisen aineen permeabiliteetti [m <sup>2</sup> ]
$\mu$	on fluidin dynaaminen viskositeetti [kg/(m·s)]
$p$	on paine [Pa]

Darcyn laki on voimassa vain laminaarissa, ajasta riippumattomassa virtauksessa huokoisen aineen läpi eikä se ota huomioon fluidin viskositeetin muuttumista lämpötilan suhteen (Coutelieris & Delgado 2012, s. 24). Kuitenkin kostean ilman vesimolekyylit ovat kooltaan niin pieniä, että ne eivät vaikuta ilman virtaukseen. Darcyn laki on yksinkertainen kuvaus huokoisen aineen virtauskentälle. Kirjallisuudesta on löydettävissä muita tarkempia korrelaatioita huokoisen aineen virtauskentän selvittämiseksi, esimerkkinä tästä on Brinkmanin kaava (Nield & Bejan 2013, s. 15).

## 2.5 Yhdistetty lämmön ja kosteuden mallinnus

Tässä kappaleessa johdetaan lämmön ja kosteuden yhtäaikaista siirtymistä ja varastoitumista hallitsevat yhtälöt. Tarkoituksena on saattaa energian ja kosteuden siirtymistä ja varastoitumista hallitsevat yhtälöt muotoon, jossa ajavana potentiaalina ovat suhteellinen kosteus  $\varphi$  ja lämpötila  $T$ . Molemmat potentiaalit vaikuttavat energian ja kosteuden siirtymistä hallitseviin yhtälöihin. Tasapainoyhtälöt vaikuttavat toisiinsa termodynaamisten ominaisuuksien ja kosteuden siirtoa kuvaavien yhtälöiden kautta. (Künzel 1995, s. 39; Nusser & Teibinger 2012, s. 1) Seuraavaksi johdettuja kosteuden siirtymistä 2.59 ja energian siirtymistä 2.60 hallitsevia yhtälöitä käytetään esimerkiksi WUFI-nimisessä kosteuden- ja lämmönsiirron mallinnusohjelmassa (Künzel 1995).

Kosteuden säilymisen perusteella voidaan materiaalin kosteuspitoisuuden muutos ilmaista

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{g}_{tot} \quad (2.44)$$

jossa

$\mathbf{g}_{tot}$	on materiaalin kokonaiskosteusvirran tiheys [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
--------------------	--

Materiaalissa siirtyvä kokonaiskosteusvirran tiheys koostuu vesihöyryn diffuusiosta ja veden kapillaarisesta siirtymisestä:

$$\mathbf{g}_{tot} = \mathbf{g}_v + \mathbf{g}_w \quad (2.45)$$

Energian säilymisen perusteella voidaan kirjoittaa materiaalisissa tapahtuvalle lämmön johtumiselle ja diffuusion aiheuttaman vesihöyryvirran kuljettamalle energialle tasapainoyhtälö

$$c_{p,vol} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{q} + h_v \mathbf{g}_v) \quad (2.46)$$

Vesihöyryn diffuusiovirta voidaan esittää myös muodossa, jossa diffuusion ajavana potentiaalina käytetään vesihöyryn osapainetta  $p_v$

$$\mathbf{g}_v = -\delta_v \nabla v = -\delta_p \nabla p_v \quad (2.47)$$

jossa

$\delta_p$  on vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna  
[kg/(m·s·Pa)]

Vesihöyryn osapaine  $p_v$  voidaan ilmaista suhteellisen kosteuden määritelmän yhtälön 2.29 perusteella suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn kyllästysosapaineen avulla

$$p_v = \varphi p_{sat} \quad (2.48)$$

Sijoittamalla kaava 2.48 vesihöyryn diffuusiovirran kaavaan 2.47, voidaan vesihöyryn diffuusiovirta ilmaista suhteellisen kosteuden ja kyllästysosapaineen avulla:

$$\mathbf{g}_v = -\delta_p \nabla (\varphi p_{sat}(T)) \quad (2.49)$$

josta tulon derivoimissäännöllä saadaan yhtälö 2.49 muotoon

$$\mathbf{g}_v = -\delta_p (\varphi \nabla p_{sat} + p_{sat} \nabla \varphi) \quad (2.50)$$

Yhtälössä ajavina potentiaaleina ovat vesihöyryn kyllästysosapaine  $p_{sat}$  ja suhteellinen kosteus  $\varphi$ . Luvussa 2.2 todettiin vesihöyryn kyllästysosapaineen riippuvan pelkästään lämpötilasta, joten kyllästysosapaineen gradientiksi saadaan

$$\nabla p_{sat} = \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \nabla T \quad (2.51)$$

Sijoittamalla vesihöyryn kyllästysosapaineen kaava 2.51 vesihöyryn diffuusiovirran yhtälöön 2.50, saadaan kosteuden diffuusiovirtaa kuvaava yhtälö riippuvaksi pelkästään lämpötilasta  $T$  ja suhteellisesta kosteudesta  $\varphi$ :

$$\mathbf{g}_v = -\delta_p \left( \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \nabla T + p_{sat} \nabla \varphi \right) \quad (2.52)$$

Kapillaarinen kosteusvirta ilmaistiin aikaisemmin yhtälöllä 2.38 materiaalin kosteusdiffusiviteetin  $D_w$  avulla siten, että kosteuspitoisuus  $w$  on ajavana potentiaalina. Ajavana potentiaalina voidaan käyttää myös suhteellista kosteutta  $\varphi$ , jolloin materiaalin diffusiviteetin korvaa materiaalin kosteudenjohtavuuskerroin  $D_\varphi$  [kg/(m·s)] (Künzel 1995, s. 19):

$$\mathbf{g}_w = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (2.53)$$

Kosteusdiffusiviteetin ja kosteuspitoisuuden välille saadaan näin ollen yhteys differentiaalimuodossa (Künzel 1995, s. 19):

$$D_\varphi = D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (2.54)$$

Tarkemmat perustelut yhtälön 2.54 käytölle ja potentiaalien yhteydelle on saatavilla lähteestä Künzel (1995, s. 19). Kosteuspitoisuuden muutosta suhteellisen kosteuden muutoksen suhteen (tasapainokosteuskäyrän kulmakerrointa) voidaan ilmaista ominaiskosteuskapasiteetilla  $\xi$  [kg/m<sup>3</sup>]:

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (2.55)$$

Ominaiskosteuskapasiteetti on analoginen ominaislämpökapasiteetin kanssa.

Näin ollen kapillaarinen kosteusvirta voidaan ilmaista muodossa, jossa suhteellinen kosteus  $\varphi$  on ajavana potentiaalina:

$$\mathbf{g}_w = -D_w \xi \nabla \varphi \quad (2.56)$$

Yhdistämällä diffuusiovirran yhtälö 2.52 ja kapillaarisen kosteusvirran yhtälö 2.56 kokonaiskosteusvirran kaavaan 2.45, saadaan

$$\mathbf{g}_{tot} = - \left[ \delta_p \left( \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \nabla T + p_{sat} \nabla \varphi \right) + D_w \xi \nabla \varphi \right] \quad (2.57)$$

Materiaaliin sitoutuneen kosteuden vaikutus volumetriseen lämpökapasiteettiin (yhtälö 2.46) voidaan ottaa huomioon seuraavasti:

$$c_{p,vol} = \rho_{mat} c_{p,mat} + w c_{p,w} \quad (2.58)$$

jossa

$\rho_{mat}$  on kuivan materiaalin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$c_{p,mat}$  on kuivan materiaalin ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [J/(kg·K)]

$c_{p,w}$  on veden ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [J/(kg·K)], 4181 J/(kg·K)

Sijoittamalla massatasapainoyhtälöön 2.44 ja energiatasapainoyhtälöön 2.46 suhteellisen kosteuden ja lämpötilan avulla ilmaistut vesihöyryn diffuusiovirran 2.52 ja kokonaiskosteusvirran 2.57 yhtälöt sekä ominaiskosteuspitoisuus kaavasta 2.55 ja volumetrinen lämpökapasiteetti kaavasta 2.58, termejä järjestelemällä saadaan massatasapainoyhtälöksi

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot \left[ \delta_p \left( \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \nabla T + p_{sat} \nabla \varphi \right) + D_w \xi \nabla \varphi \right] \quad (2.59)$$

ja energiatasapainoyhtälöksi

$$c_{p,vol} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot \left[ \delta_p \left( \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \nabla T + p_{sat} \nabla \varphi \right) \right] \quad (2.60)$$

Yhtälöistä 2.59 ja 2.60 on havaittavissa, että halutusti yhtälöissä muuttujina ovat pelkästään suhteellinen kosteus  $\varphi$  ja lämpötila  $T$ . Myös molempien muuttujien ajavien potentiaalien vaikutus niin massan- kuin lämmönsiirtoa hallitseviin yhtälöihin on selkeästi havaittavissa. (Huttunen 2013, s. 21-24; Künzeli 1995; Nusser & Teibinger 2012, s.1-3; Williams Portal 2011, s.3-7)

## 2.6 Energia- ja massatasapainoyhtälöt

Tässä kappaleessa johdetaan energian ja massan säilymistä kuvaavat epästationääriset energia- ja massatasapainoyhtälöt 0-ulotteiselle (0D) kappaleelle. 0-ulotteisella ongelmalla tarkoitetaan pistemäisiä ongelmia, jotka eivät sisällä avaruudellisia osittaisderiivaattoja eli niitä hallitsee tavanomaiset differentiaaliyhtälöt (TDY) kun taas konvektio-diffuusio-yhtälö (luku 3.2.5) esimerkiksi on osittaisdifferentiaaliyhtälö (ODY). Tässä työssä ryömintätilan ilma oletettiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden suhteen täysin sekoittuneeksi, jolloin ryömintätilan energia- ja massatase on tavanomainen differentiaaliyhtälö.

Tasapainoyhtälöt kuvaavat tarkasteltavan kontrollitilavuuden sisällä tapahtuvan prosessin mahdollista muutosta alkutilasta lopputilaan. Alkutila voi olla prosessin alun tasapainotila ja lopputila prosessin lopun tasapainotila. Alku- ja lopputiloiksi voidaan mieltää myös kontrollitilavuuteen tulevat ja siitä lähtevät virrat, kuten esimerkiksi massa- ja energiavirrat. (Çengel & Boles 2011, s. 15, 224) Yhtälöiden johto perustuu Reynoldsin kuljetusteoreemaan (White 1994, s. 114-120).

Massalle pätee termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön (luku 2.1.1) mukainen häviötömyyden periaate: systeemissä massaa ei häviä eikä synny lisää, vaan systeemin sisältämä massa muuttaa muotoaan (Çengel & Boles 2011, s.214) Massatasapainoyhtälön johto lähtee liikkeelle tarkastelemalla mielivaltaisen muotoista kontrollitilavuutta, jonka sisällä olevan differentiaalisen tilavuuden  $dV$  sisältämä massa on

$$dm = \rho dV \quad (2.61)$$

jossa

$\rho$  on fluidin tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

Kontrollitilavuuden sisältämä massa jokaisella ajanhetkellä  $t$  voidaan määrittää integroimalla kontrollitilavuuden yli

$$m_{CV} = \int_{CV} \rho dV \quad (2.62)$$

Alaindeksi  $CV$  tarkoittaa kontrollitilavuutta. Massan muutosta kontrollitilavuudessa ajan suhteen kuvaava yhtälö saadaan kertomalla yhtälö 2.62 ajan derivaatalla

$$\dot{m}_{cv} = \frac{dm_{CV}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV \quad (2.63)$$

Seuraavaksi tarkastellaan differentiaalisen pinnan  $dA$  kautta kontrollitilavuuteen sisään ja ulospäin meneviä tilavuusvirtoja. Pinnan  $dA$  yli voi tapahtua virtausta nopeudella  $\mathbf{v}$  kulmassa  $\theta$  [°] pinnan  $dA$  normaaliin nähden. Massavirta on suoraan verrannollinen nopeusvektorin normaalikomponenttiin  $v_n$  [m/s], joka voidaan ilmaista skalaarimuodossa pistetulon avulla

$$v_n = v \cos \theta = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \quad (2.64)$$

jossa  $\mathbf{n}$  on pinnasta  $dA$  ulospäin oleva pinnan normaalin suuntainen yksikkövektori. Suurin tilavuusvirta kontrollitilavuuteen tai siitä pois saavutetaan, kun nopeusvektori on kohtisuorassa ( $\theta = 90^\circ$ ) differentiaalipinnan  $dA$  normaalin kanssa. Differentiaalinen massavirta pinnan  $dA$  läpi saadaan sijoittamalla massan kaavaan 2.61 nopeusvektorin normaalikomponentti yhtälöstä 2.64:

$$\delta \dot{m} = \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.65)$$

Integroimalla  $\delta \dot{m}$  kontrollipinnan yli saadaan kontrollitilavuuden nettomassavirta kontrollipinnan kautta

$$\dot{m}_{net} = \int_{CS} \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.66)$$

Alaindeksi  $CS$  tarkoittaa kontrollipintaa. Merkitsemällä massan muutosta kuvaava yhtälö 2.63 ja nettomassavirran yhtälö 2.66 yhtä suuriksi, saadaan uudelleenjärjestelemisen jälkeen yleinen massan säilymistä kuvaava yhtälö:



$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = 0 \quad (2.67)$$

Jakamalla yleinen massan säilymistä kuvaava yhtälö kontrollitilavuuteen sisään menevään ja ulos tulevaan osaan, voidaan yleinen massan säilyminen ilmaista muodossa

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \sum_{out} \rho |v_n| dA - \sum_{in} \rho |v_n| dA = 0 \quad (2.68)$$

Käyttämällä massavirran kaavaa 2.63, voidaan tekijöihin jaettu yleinen massan säilymislaki 2.68 ilmaista muodossa

$$\frac{dm_{CV}}{dt} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad (2.69)$$

joka ilmaisee kontrollitilavuuden massan muutoksen olevan kontrollitilavuuteen tulevien massavirtojen ja siitä lähtevien massavirtojen erotus. (Çengel & Boles 2011, s. 216-217)

Energiantasapainoyhtälön johto voidaan suorittaa samalla tavalla kuin massalle kertomalla massan tasapainoyhtälön johdossa käytetyt yhtälöt vakiona pysyvällä energialähdetermillä  $e$  [J/kg]. Johto lähtee liikkeelle tarkastelemalla mielivaltaisen muotoisen kontrollitilavuuden sisältämää energiamäärää (White 1994, s. 146):

$$dE = e dm = e \rho dV \quad (2.70)$$

jossa

$e$  kuvaa eri energialähteitä seuraavasti

$$e = e_{sisäinen} + e_{kinteettinen} + e_{potentiaali} + e_{muut} \quad (2.71)$$

jossa  $e_{muut}$  tarkoittaa energialähteitä, jotka eivät sisälly sisäenergiaan  $e_{sisäinen}$ , kineettiseen energiaan  $e_{kinteettinen}$  tai potentiaalienergiaan  $e_{potentiaali}$ . Tällainen energia voi olla peräisin esimerkiksi kemiallisesta reaktioista tai sähkö- ja magneettikentistä.

Tarkasteltaessa tilannetta, jossa fluidin kineettinen energia, potentiaalienergian muutokset sekä virtauksen tekemä työ ovat merkityksettömiä, sievenee yhtälö 2.71 muotoon (White 1994, s. 146):

$$e = e_{sisäinen} = u \quad (2.72)$$

jossa

$u$  on ominaissisäenergia [J/kg]

Näin ollen kontrollitilavuuden sisältämäksi energiaksi jokaisella ajanhetkellä saadaan:

$$E_{CV} = \int_{CV} e \rho dV \quad (2.73)$$

ja energian muutos kontrollitilavuudessa ajan suhteen voidaan ilmaista:

$$\dot{E}_{cv} = \frac{dE_{CV}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV \quad (2.74)$$

ja differentiaaliseksi energiavirraksi pinnan  $dA$  läpi saadaan:

$$\delta \dot{E} = e \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.75)$$

ja kontrollitilavuuden nettoenergiavirta kontrollipinnan kautta

$$\dot{E}_{net} = \int_{CS} e \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (2.76)$$

Lopputuloksena saadaan yleistä energian säilymistä kuvaava yhtälö:

$$\frac{d}{dt} \left( \int_{CV} e \rho dV \right) + \int_{CS} e \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = 0 \quad (2.77)$$

Jakamalla yhtälö 2.77 sisään tulevaan ja ulos menevään osaan, voidaan yleinen energian säilyminen paikallaan olevalle muuttumattomalle kontrollitilavuudelle saattaa muotoon

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \sum_{out} e \rho |v_n| dA - \sum_{in} e \rho |v_n| dA = 0 \quad (2.78)$$

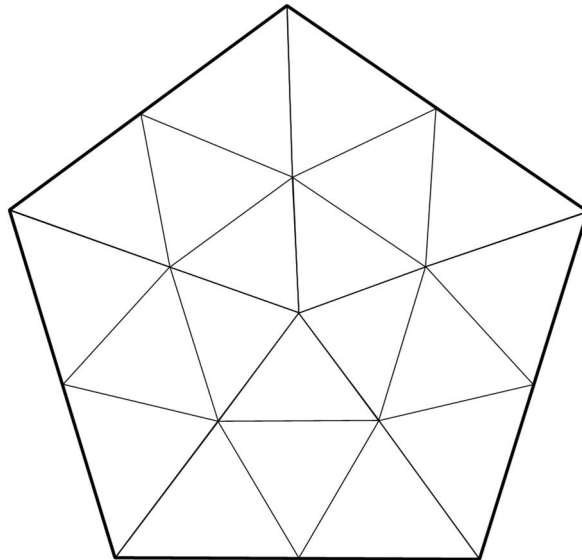
Käyttämällä energiavirran kaavaa 2.74, voidaan tekijöihin jaettu yleinen energian säilymlaki 2.78 ilmasta muodossa

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \sum_{in} \dot{E} - \sum_{out} \dot{E} \quad (2.79)$$

joka ilmaisee kontrollitilavuuden energianmuutoksen olevan kontrollitilavuuteen tulevien energiavirtojen ja siitä lähtevien energiavirtojen erotus. (White 1994, s. 146) Energiavirtoja voidaan kutsua myös tehoksi  $[J/s] = [W]$ .

## 2.7 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmän eli FEM (eng. *finite element method*) tarkoituksena on ratkaista monimutkaisia matemaattisia ongelmia, kuten esimerkiksi osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, korvaamalla monimutkainen ongelma yksinkertaisemmalla yhtälöllä. Alkuperäisen ongelman yksinkertaistamisen seurauksena elementtimenetelmällä saatava ratkaisu on approksimaatio. Elementtimenetelmässä tarkasteltava alue, joka voi olla kiinteä, fluidia tai kaasua, jaetaan eli diskretisoidaan pieniin osakokonaisuuksiin, joita kutsutaan elementteiksi. Elementtien muodostama kokonaisuutta kutsutaan usein verkoksi. Elementteihin jaetusta alueesta ratkaistavaa suuretta, kuten esimerkiksi lämpötila, kutsutaan kenttämuuttujaksi. Tarkasteltavan alueen elementtien lukumäärä, muoto, koko ja järjestys riippuvat ratkaistavasta yhtälöstä (mallinnettavasta fysiikasta), halutusta laskentatarkkuudesta ja sallitusta laskenta-ajasta. Kuvassa 2.2 on esimerkki diskretoidusta alueesta. Luvun 3.2.7 kuvassa 3.10. on havainnollistettu maa- ja perustusrakenteiden simuloinnissa käytettyä verkotusta.



**Kuva 2.2.** Esimerkki geometrian jaosta elementteihin.

Muodostetut elementit liittyvät toisiinsa elementtien kulmapisteissä, joita kutsutaan solmuiksi tai solmupisteiksi. Solmupisteiden välisten alueiden arvot interpoloidaan ratkaistavan yhtälön matemaattiseen luonteeseen sopivalla muotofunktiolla. Elementtimenetelmässä pyrkimyksenä on esittää tarkasteltava ongelma matriisimuodossa olevana lineaarisena yhtälöryhmänä

$$\underline{K} \mathbf{x} = \mathbf{p} \quad (2.80)$$

jossa

$\underline{K}$	on tarkasteltavan kentän jäykkyyismatriisi
$\mathbf{x}$	on tuntemattomien solmupisteiden vektori
$\mathbf{p}$	on reunaehtojen aiheuttama kuormavektori

Tarkasteltavan alueen elementtien solmupisteet muodostavat ratkaistavien tuntemattomien joukon  $x$ . Yhtälön 2.80 kaltaisille lineaarisille ongelmille tuntemattomien joukon  $x$  ratkaiseminen voidaan suorittaa suorilla menetelmilläkin, joten tuntemattomien ratkaisemiseksi ei ole välttämätöntä tehdä laskennallisesti kallista täyttä matriisikäntämistä, kuten esimerkiksi LU-hajotelmaa.

Epälineaaristen ongelmien tapauksissa ratkaisun saaminen vaatii iteratiivisia menetelmiä, jolloin myös ongelman jäykkyyismatriisi ja kuormavektori vaativat tilanteesta riippuen myös muokkausta ratkaisun saamiseksi. (Singiresu 2011, s. 10-13) Työssä ei oteta tarkemmin kantaa mallintamisessa käytetyn COMSOL Multiphysics - ohjelman käyttämiin ratkaisumenetelmiin eikä niiden taustalla oleviin teorioihin. Lisätietoa elementtimenetelmästä löytyy esimerkiksi Singiresun (2011) julkaisemasta teoksesta.

Useat todelliset ongelmat ovat epälineaarisia. Epälineaarisuuden lähteitä on monia. Tarkasteltavan kohteen geometria, kohteen geometrian muodon muuttuminen eli deformaation, kohteen geometrian ja materiaalin stabiiliusongelmat, epälineaariset reunaehdot sekä yhdistetyt ongelmat, esimerkiksi lämmön johtumisen mallinnus samaan aikaan kiinteässä aineessa ja fluidissa, voivat aiheuttaa epälineaarisuutta tarkasteltavaan ongelmaan. Epälineaarisuuden kasvaessa tietokoneen käyttämä aika ja laskentatehon määrä kasvavat. (Wriggers 2008 s. 2-3) Tässä työssä esimerkiksi vaihtelevat ulkoilmaolosuhteet sekä lämmön ja kosteuden yhdistetty siirtymistarkastelu tekevät tutkimuksessa tarkasteltavasta mallista epälineaarisen. Työssä ei tarkemmin selvitetä siinä ilmenneitä epälineaarisuuden lähteitä ja sen aiheuttamia seurauksia laskenta-aikaan. Lisätietoa epälineaarisuuden huomioon ottamisesta elementtimenetelmässä on saatavilla mm. Wriggers (2008) julkaisemasta teoksesta.

### 3. LASKENTAMALLIEN ESITTELY

Tässä työssä simuloitiin kolmiulotteisen poistoilmanvaihdolla alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan ajasta riippuvaa lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa toisiinsa kytketyistä eriulotteisista osamalleista koostuvalla mallilla, koska täysimittainen massiivinen yhdistetty 3D-mallinnus ei ole ainakaan ilman suurteholaskentaa mahdollista. Tarkasteltava kokonaisuus jaettiin rakenneseosten perusteella kolmeen eri osamalliin: ryömintätilaan, alapohjarakenteeseen sekä rakennuksen maa- ja perustusrakenteisiin. Ryömintätila mallinnettiin 0-ulotteisena (0D) pisteenä. Alapohjarakenne mallinnettiin 1-ulotteisena (1D) janana. Maa- ja perustusrakenteet mallinnettiin 2-ulotteisena (2D) tasana. Maa- ja pohjarakenteissa todellisuuden kolmiulotteisuutta otettiin kuitenkin jonkin verran huomioon Darcyn lain mukaisessa tilavuusvirrassa, jota voitiin soveltaa täysin sekoittuneen ilmatilan energia- ja massataseyhtälöissä (luku 3.2.2). Nämä yhtälöt olivat mukana yhdistetyissä lämmön- ja kosteudensiirron 2D-simulaatioissa, joista lopulliset johtopäätöksiin vaikuttavat tulokset saatiin.

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä tutkimuksessa tutkitut alipaineistetun ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan rakenneseosten osamallit ja käytetyt rakenneratkaisut (luku 3.1), ryömintätilan kosteus- ja lämpöolojen mallinnusta COMSOL Multiphysicsillä (luku 3.2), simuloinnin lähtötietoina käytettyjä materiaaliominaisuuksia sekä ulko- ja sisäilmaolosuhteita (luku 3.3). Luvussa 3.4 esitellään alipaineistettujen rakenneratkaisujen arviointikriteereinä käytettyjä Suomalaista homemallia ja ilmanvaihtuvuuden suuruutta.

#### 3.1 Tutkitut rakenteet

Työssä tutkittiin suorakaiteen muotoista rakennusta, jonka pohjapinta-ala on  $129 \text{ m}^2$  ( $14,5 \text{ m} \times 8,9 \text{ m}$ ). Ryömintätilaisen tuulettuvan alapohjan korkeus on vaatimusten mukainen  $y = 0,8 \text{ m}$  (RakMK C2 1998, s. 9). Ryömintätilan tilavuudeksi  $V_{CS} [\text{m}^3]$  saadaan näin ollen

$$V_{CS} = A y = 104 \text{ m}^3$$

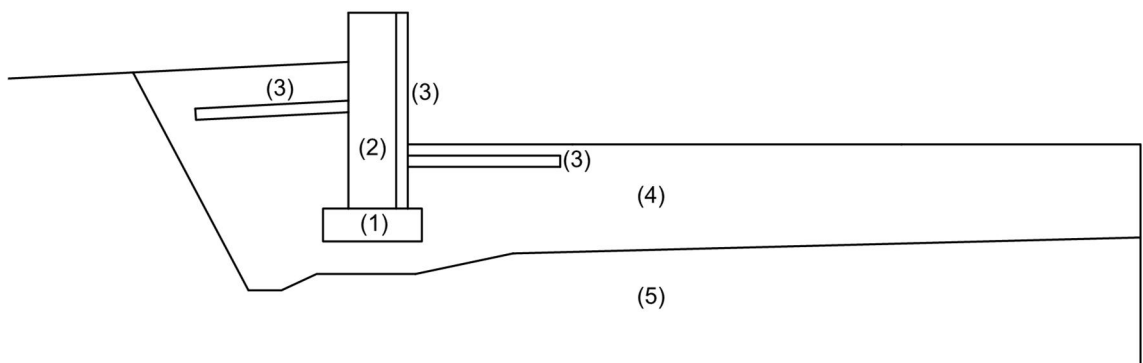
Tutkittu poistoilmanvaihdolla alipaineistettu ryömintätilainen tuulettuva alapohjarakenne koostuu maa- ja perustusrakenteesta, ryömintätilasta sekä alapohjarakenteesta. Mallinnettavaksi maa- ja perustusrakenteeksi valittiin periaatteeltaan kaksi erilaista maapohjarakennetta: avoin ja ilmatiivistetty pohjarakenne. Suomen rakennuskannan ryömintätilaiset alapohjarakennepäätökset vaihtelevat suuresti.

Avoimen pohjarakenteen (luku 3.1.1) tapauksessa ulkoa ryömintätilaan virtaa ryömintätilan alipaineesta johtuen soratäytön kautta kosteaa ilmaa. Ilmatiivistetyn pohjarakenteen (luku 3.1.2) tarkoituksena oli tiivistää ryömintätilan maanpinta estäen soratäytön kautta

ryömintätilaan tuleva kostea ilmavirta. Ryömintätilan (luku 3.1.3) ja alapohjarakenteen (luku 3.1.4) mallit pysyivät kaikissa malleissa samoina.

### 3.1.1 Avoin pohjarakenne

Työssä mallinnetussa avoimen pohjarakenteen tapauksessa ryömintätilaan virtaa ilmaa ulkoilmasta soratäytön kautta johtuen ryömintätilan alipaineisuudesta ulkoilmaan nähdessä. Paine-eron ollessa vakio, soratäytön kautta virtaavan ilmavirran suuruus riippuu soratäytön ilmanläpäisevyydestä, joka voidaan laskea permeabiliteetista  $\kappa$  [m<sup>2</sup>]. Muut rakenteet oletetaan olevan ilmatiiviitä. Kuvassa 3.1 on havainnollistettu tutkittua avointa pohjarakennetta.



*Kuva 3.1. Tutkitun avoimen pohjarakenteen havainnekuva.*

Tutkitussa maa- ja perustusrakenteessa (kuva 3.1) perustusten antura (1) oli betonia ja perusmuuri (2) koostui kevytsoraharkoista. Perustusten routasuojaus (3) toteutettiin perusmuurin molemmiin puolin olevilla vaakasuorilla tai loivasti alaspäin vinosti olevilla kovilla lämmöneristeillä (EPS) sekä perusmuuria vasten olleella kovalla lämmöneristeellä (EPS). Perustusten soratäyttö (4) koostui kauttaaltaan kapillaarikatkona toimivasta sepelistä, jossa ei oletettu tapahtuvan kapillaarista kosteudensiirtymistä. Myös pintatäyttöä oli toteutettu sepelillä. Perusmaa (5) käsiteltiin lämpöä johtavana kiinteänä aineena, jolla oli vakio lämmönjohtavuus. Sepelissä virtaava ilma oletettiin kokoonpuristumattomaksi.

Mallin tarkemmat materiaaliominaisuudet on esitelty luvussa 3.3.1 ja liitteessä A. Liitteessä B on havainnollistettu maa- ja perustusrakenteiden simuloinnissa käytettyä kokonaisgeometriaa avoimen pohjarakenteen mallin avulla.

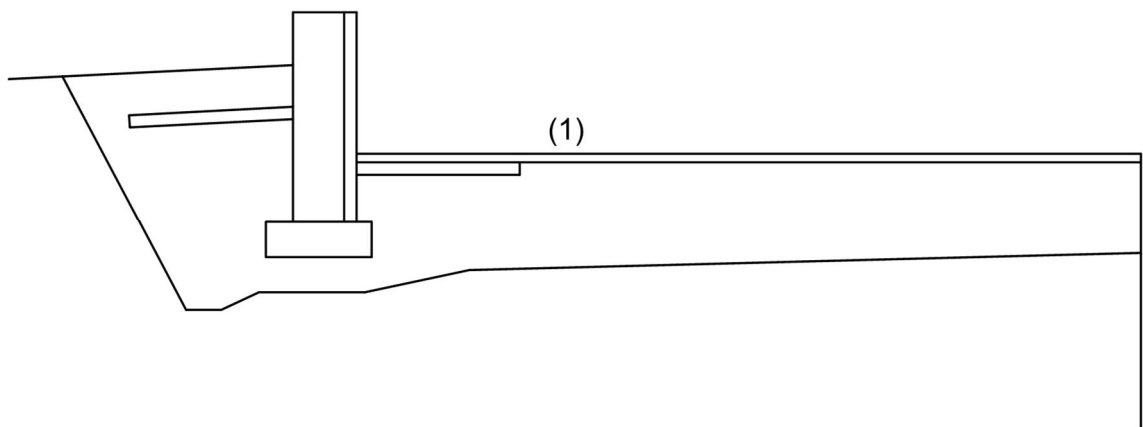
### 3.1.2 Ilmatiivistetyt pohjarakenteet

Tutkimuksessa mallinnettiin 4 erilaista ilmatiivistetyn pohjarakenteen omaavaa ryömintätilaa. Ilmatiivistetyt pohjarakenteet eroavat avoimesta pohjarakenteesta (luku 3.1.1) ainoastaan maapohjan ilmatiivistyksen osalta. Pohjarakenteiden ilmatiivistykseen käy-

tyt materiaalit olivat betoni, kova lämmöneriste (XPS) sekä höyrynsulkumuovi. Ilmatiivistysmateriaalit oletettiin olevan täysin ilmaa läpäisemättömiä. Mallissa ilmantiivistysmateriaalien sauma- ja liitoskohdat oletettiin olevan täysin tiiviit. Käytännössä sauma- ja liitoskohdat pyritään saamaan täysin tiiviiksi huolellisella asennuksella ja jälkikäteen tapahtuvalla tiivistämisellä.

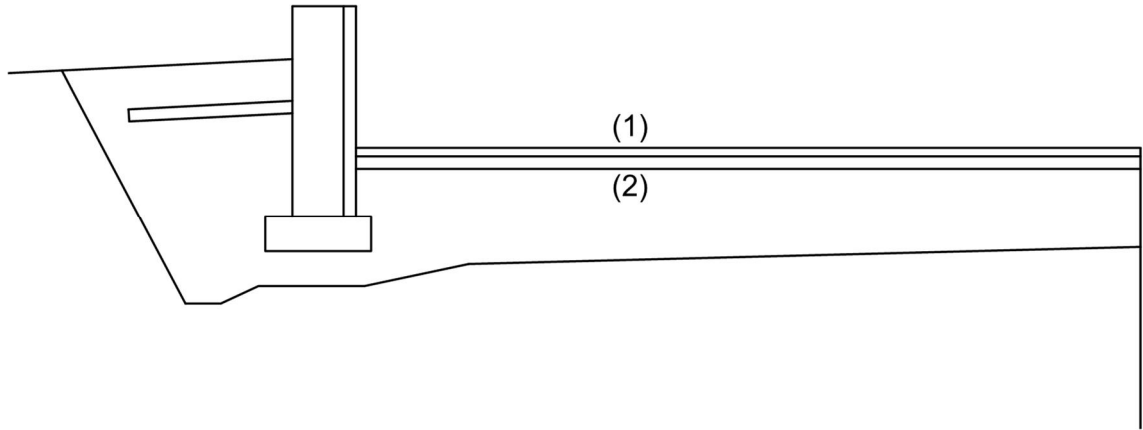
Mallinnuksessa käytetyt ilmatiivistysmateriaalit valittiin tarkasteluihin kyseisten materiaalien lämpö- ja kosteusteknisten materiaaliominaisuuksien takia. Ryömintätilan betonilaatan tarkoituksena oli tasata ryömintätilan lämpö- ja kosteusoloja betonin lämmön- ja kosteudensitomiskyvyn avulla (luvut 2.1.1 ja 2.3). Kovan lämmöneristeen tarkoituksena oli vähentää johtumalla tapahtuvaa lämmön siirtymistä ryömintätilan ja sen alla olevan sepelin välillä (luku 2.1.2). Kovalle lämmöneristeelle mallinnettiin todellisen lämmöneristeen tapaan myös kosteudensitomiskyky, joka kuitenkin on merkityksetön verrattuna betonin kykyyn sitoa kosteutta. Höyrynsulkumuovin tarkoituksena oli ainoastaan rajoittaa kostean ilman siirtyminen sekä diffuusiolla että konvektiolla sepelin kautta ryömintätilaan. Höyrynsulkumuoville ei mallinnettu lämmöneristys- tai lämpö- ja kosteuskapasiteettiominaisuuksia, koska ne oletettiin olevan merkityksettömän pieniä kokonaisuuden kannalta höyrynsulkumuovin pienen rakennepaksuuden takia. Höyrynsulkumuovin vesihöyrynvastus asetettiin samaksi kuin 70 mm paksuisen kovan lämmöneristeen (XPS) veishöyryvastus.

Seuraavaksi kuvissa 3.2-3.5 esitellään mallinnetut ilmatiivistysrakenteet sekä rakenteista tutkittavat ryömintätilan kosteus- ja lämpöolosuhteisiin vaikuttavat rakennusmateriaalien ominaisuudet. Kuvan 3.2 ilmatiivistysrakenteen koostui sepelin päällä olevasta 50 mm paksuisesta betonilaatasta. Rakenteen tarkoituksena oli selvittää ryömintätilan lämpö- ja kosteuskapasiteetin sekä kosteudensitomiskyvyn vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusoloihin.



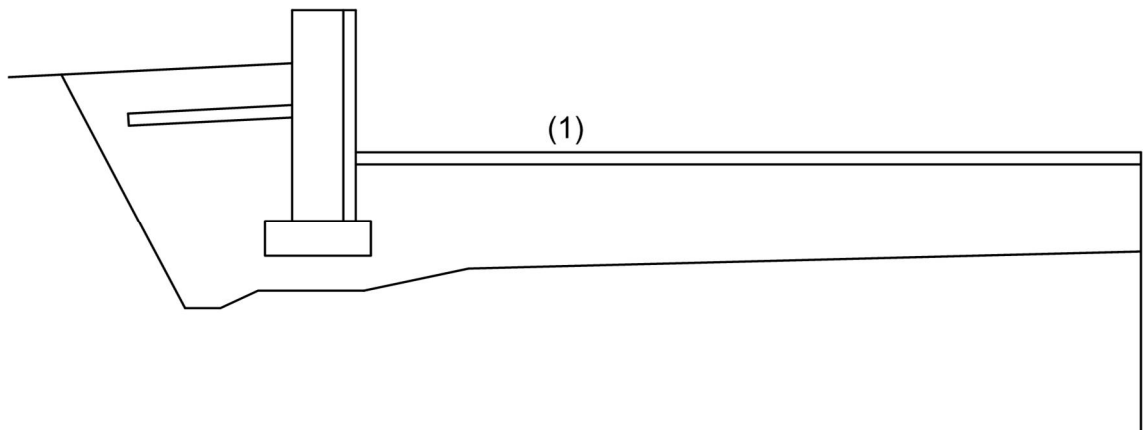
**Kuva 3.2.** Ilmatiivistetty rakenne, jossa on betoni 50 mm + routaseriste 70 mm.

Kuvan 3.3 ilmatiivistysrakenne koostui sepelin päällä olevasta 70 mm kovasta lämmöneristeestä (XPS) (2), jonka päällä on 50 mm betonilaatta (1). Rakenteen tarkoituksena oli selvittää ryömintätilan lämpö- ja kosteuskapasiteetin ja kosteudensitomiskyvyn (betoni) sekä sepelin päällä olevan lämmöneristyksen (XPS) yhteisvaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusoloihin.



**Kuva 3.3.** Ilmatiivistetty rakenne, jossa on betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS).

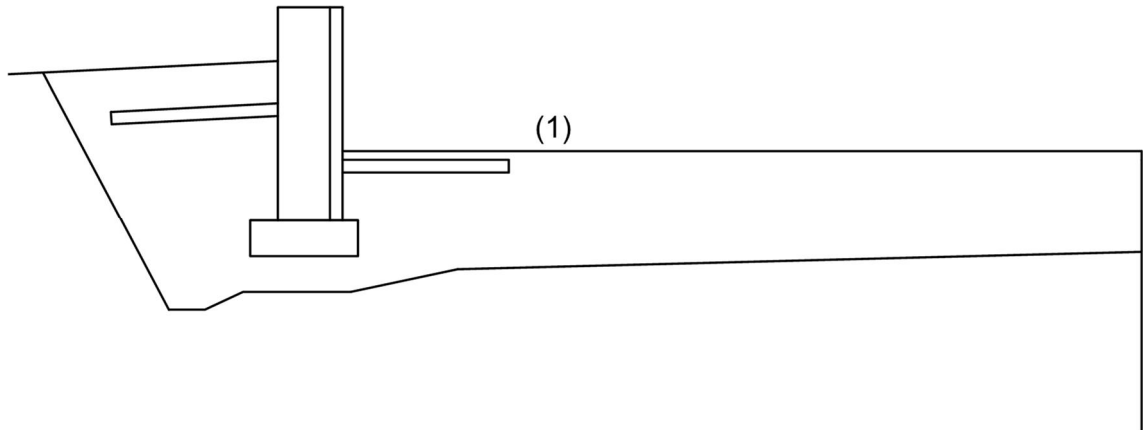
Kuvan 3.4 ilmatiivistysrakenne koostui sepelin päällä olevasta 70 mm paksuisesta kovasta lämmöneristeestä (XPS) (1). Rakenteen tarkoituksena on selvittää ryömintätilan sepelin päällä olevan lämmöneristyksen vaikutusta pohjarakenteeltaan ilmatiivistetyn ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteisiin.



**Kuva 3.4.** Ilmatiivistetty rakenne, jossa on kova lämmöneriste 70 mm (XPS).

Kuvan 3.5 ilmatiivistysrakenne koostui sepelin päällä olevasta höyrynsulkumuovista (1). Rakenteen tarkoituksena oli selvittää pelkän höyryn- ja ilmansulun vaikutusta ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteisiin, joten höyrynsulkumuovin paksuus oli tarkastelussa merkityksetön.





**Kuva 3.5.** Ilmatiivistetty rakenne, jossa on höyrynsulkumuovi.

Malleissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia on tarkemmin käsitelty luvussa 3.3.1 ja liitteessä A. Liitteessä B on havainnollistettu maa- ja perustusrakenteiden simuloinnissa käytettyä kokonaisgeometriaa avoimen pohjarakenteen mallin avulla.

### 3.1.3 Ryömintätila

Poistoilmanvaihdon alipaineistettu tuuletettu ryömintätila mallinnettiin 0-ulotteisena pisteenä. Ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteet mallinnettiin tarkastelemalla tasapainoyhtälöiden mukaisesti ryömintätilaan tulevia ja ryömintätilasta lähteviä massa- ja energiavirtoja (luku 2.6). Tasapainoyhtälöt määritettiin ottaen huomioon ryömintätilan muoto ja tilavuus (luku 3.2.2).

Mallinnettaessa 2D-mallilla todellista 3D maa- ja perustusrakenteita, ei 2D-malli ota huomioon rakennuksen nurkka-alueita. Nurkka-alueet lisäävät sepelin kautta ryömintätilaan tulevaa ilmavirtaa. Suurempi ilman tilavuusvirta tarvitsee ottaa huomioon rakennuksen lämpö- ja kosteusolojen mallintamista varten (luku 3.2.2). Tämä tehtiin määrittämällä mallinnettavalle 2D-rakenteelle niin sanottu tehollinen piiri  $P_{eff}$  [m].

Tehollisen piirin tavoitteena on ottaa huomioon nurkka-alueiden vaikutus ryömintätilaan tulevaan ilmavirtaan. Tehollinen piiri kuvaa sitä, kuinka suuri tarvitsee olla nurkattoman rakennuksen piiri, jotta maan kautta tuleva ilmavirta olisi yhtä suuri kuin nurkallisessa rakennuksessa. Näin ollen 2D-mallin ja 3D-mallin tilavuusvirtojen tulee olla yhtä suuret:

$$R_{3D} = R_{2D} \quad (3.1)$$

jossa

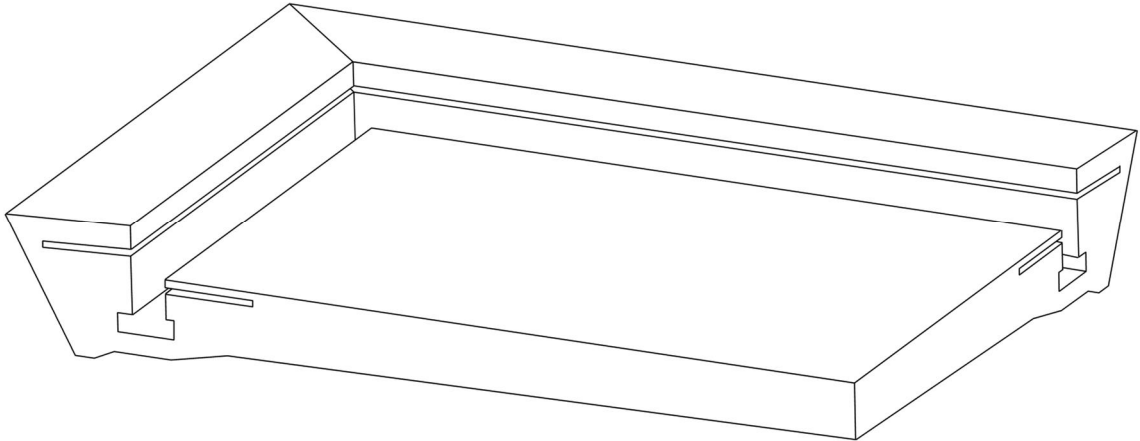
$R_{3D}$  on 3D-mallin tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$R_{2D}$  on 2D-mallin tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

3D-mallin tilavuusvirran selvittämiseksi mallinnettiin tarkasteltavan rakennuksen sepelin geometriasta neljännes, jolle ratkaistiin tilavuusvirta  $R_{3,1/4}$  [m<sup>3</sup>/s] Darcyn lain avulla (luku 2.4.3). Kokonaistilavuusvirta  $R_{3D}$  voidaan laskea siten

$$R_{3D} = 4 R_{3D,1/4} \quad (3.2)$$

Mallinnettavan rakennuksen sepelin geometria on havainnollistettu kuvassa 3.6.



**Kuva 3.6.** 3D-rakenteen tilavuusvirran selvittämiseen käytetty sepelin geometria.

Koska 2D-malli ei ota huomioon rakennuksen piiriä, 2D-mallista on saatavilla vain pituusyksikköä kohden oleva tilavuusvirta  $r_{2D}$  [m<sup>3</sup>/(s·m)]. Tiedettäessä tarkasteltavan rakennuksen piiri, voidaan pituusyksikköä kohden määritetyn tilavuusvirran ja piirin avulla laskea 2D-mallille tilavuusvirta mahdollisia 3D-tarkasteluja varten seuraavasti:

$$R_{2D} = P r_{2D} \quad (3.3)$$

jossa

$P$  on 2D-mallilla mallinnetun rakennuksen 3D-mallin mukainen piiri [m]

Yhdistämällä kaava 3.1 ja kaava 3.3 teholliseksi piiriksi  $P_{eff}$  [m] saadaan termien uudelleenjärjestelemisen jälkeen:

$$P_{eff} = \frac{R_{3D}}{r_{2D}} \quad (3.4)$$

Tehollista piiriä käytettiin myös ilmatiivistettyjen rakenteiden tapauksessa rakenneratkaisuiden vertailtavuuden säilyttämiseksi.

### 3.1.4 Alapohja

Mallinnettava 1D-alapohjarakenne koostui 175 mm paksuisesta betonisesta ontelolaa-tasta ja ontelolaatan alapinnassa ryömintätilan puolella olevasta 220 mm paksuisesta ko-vasta lämmöneristeestä (XPS). Mallinnetun alapohjarakenteen U-arvo on  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , joka vastaa Suomen rakentamismääräyskokoelman ryömintätilaan rajoittuvan alapohjan, jonka tuuletusaukkojen määrä on enintään 8 promillea alapohjan pinta-alasta, U-arvoa (RakMK D3 2012, s. 13). U-arvo on rakennusosan lämmönläpäisykerroin (RakMK D5 2012, s. 8).

Pintamateriaaleja ei otettu huomioon alapohjarakenteessa lämpimän ja kostean huoneil-man kosteusrasituksen maksimoimiseksi lattiarakenteessa. Alapohjarakenteen yksiulot-teisuudesta johtuen alapohjarakenteen malli kuvaa äärettömän leveää ja vakiopaksuista, kerroksellista rakennetta. Näin ollen alapohjarakennemalli ei huomioi ulkolämpötilan vaikutusta alapohjarakenteeseen rakennuksen ulkoseinien läheisyydessä.

Alapohjamallissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia on tarkemmin käsitelty luvussa 3.3.1 ja liitteessä A. Rakennuksessa vallitsevia sisäilmaolosuhteita käsitellään myöhem-min luvussa 3.3.2.

## 3.2 Lämpö- ja kosteustekninen mallinnus COMSOL Multiphy-sicsillä

Tässä luvussa esitellään lämpö- ja kosteusteknistä mallinnusta elementtimenetelmään pe-rustuvalla monifysiikkamallinnusohjelma COMSOL Multiphysicsillä. Mallintaminen ta-pahtuu ohjelmassa yhdistelemällä mahdolliseen tarkasteltavaan geometriaan tai geo-metrioihin ohjelmassa olevia erilaisia fysiikkamoduuleja. Fysiikkamoduulit mallintavat osittaisdifferentiaaliyhtälöiden avulla moduulin käsittelemää fysikaalista ilmiötä. Mallin-nusohjelmassa on myös moduuleja, joihin käyttäjä voi itse kirjoittaa haluamiaan yhtälöitä fysikaalisten ilmiöiden kuvaamiseksi. (COMSOL Multiphysics 2016c)

Luvussa 3.2.1 käsitellään moniulotteista mallinnuksesta johtuvia osamallien välisiä kyt-kentöjä ja niiden vaatimuksia. Luvuissa 3.2.2 – 3.2.6 käsitellään eri osamalleissa käytettyjä fysiikkamoduuleja ja niiden soveltamista alipaineistetun ryömintätilaisen tuuletetun alapohjarakenteen mallintamiseen. Lopuksi luvussa 3.2.7 on yhteenveto tarkasteltavissa geometrioissa käytetyistä yhtälöistä.

### 3.2.1 Osamallien väliset kytkennät

Tässä työssä simuloitiin COMSOL Multiphysicsillä kokonaismallia, joka koostuu useista toisiinsa kytketyistä eriulotteisista osamalleista. Mallin koostuessa eri ulottuvuuksissa ja toisistaan erillään olevista osamalleista, tarvitsee osamallien välillä siirtyä osamalleista

saatavaa tietoa. Osamallien mahdolliset erilaiset ulottuvuudet täytyy ottaa huomioon tiedonsiirrossa. Korkeamman ulottuvuuden osamallista saatava tieto tarvitsee muuttaa alemmassa ulottuvuudessa olevan osamallin vaatimaan muotoon. Jos osamallit ovat samassa ulottuvuudessa, riittää pelkkä osamallien kytkentä toisiinsa tiedonsiirron takaamiseksi. Tässä työssä käytettävässä mallinnusohjelmassa on olemassa erilaisia kytkentäoperaattoreita eri tilanteisiin käytettäväksi. Tarkemmat selostukset COMSOL Multiphysicsissä käytettävistä kytkennöistä ja kytkentäoperaattorien käytöstä löytyy COMSOL Multiphysicsin-ohjelman käyttöohjeesta (2016d, s. 289-303).

Tämän työn 2D-osamallin (taso) skalaarikentän reunan 1D-osan (jana) tieto muutettiin ryömintätilan 0D-mallille (piste) sopivaksi yhdeksi skalaariarvoksi integraali-operaattorilla  $intop()$ . Operaattori integroi valitusta lähteestä tarkasteltavan suureen yli saattaen sen skalaarimuotoon tarkasteltavan geometrian dimensiota kohden, esimerkiksi viivan lämpötila on siten  $intop(T)$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ]. Alapohjarakenteen 1D-malli ei tarvinnut ryömintätilan tiedon muuttamista varten kytkentäoperaattoria, koska ryömintätilan malli on kytkettynä alapohjarakenteen 1D-mallin skalaarimuodossa olevaan janan reunapisteeseen. Kuitenkin tiedonsiirtoa varten kytkentä tarvittiin.

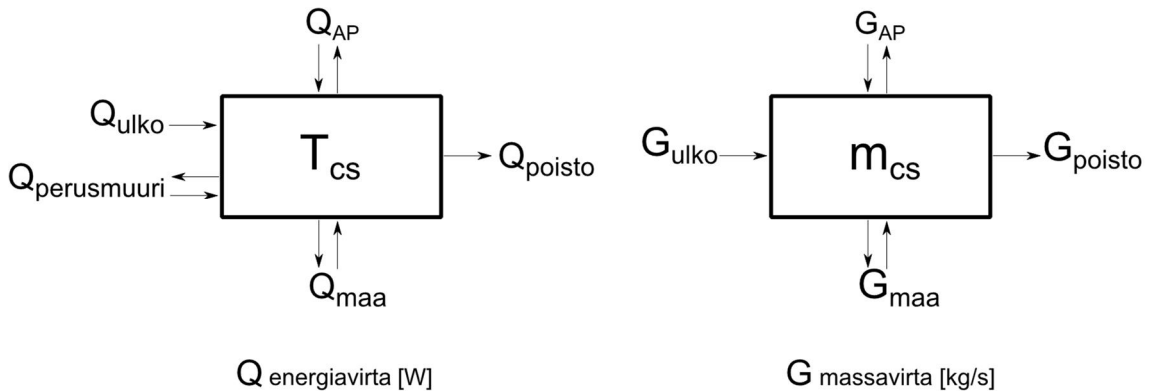
Alemman ulottuvuuden osamallin tietomuodon vaatimuksesta johtuen korkeamman ulottuvuuden osamalli saa alemman ulottuvuuden osamalleilta alemman osamallin tietomuodossa olevaa tietoa. Tämä ilmeni esimerkiksi maa- ja perustusrakenteiden tilanteessa, jolloin 2D-reunan arvot täytyi saattaa skalaarimuotoon, jotta ryömintätilan 0D-malli voi käyttää tietoa yhtälöissään. Vastaavasti maa- ja perustusrakenteet saivat ryömintätilasta takaisin ryömintätilan olosuhteita kuvaavan skalaariarvoisen luvun. Tällöin häviää tieto esimerkiksi tarkasteltavan muuttujan ajavista potentiaaleista tarkasteltavalla pinnalla tai janalla, joka voi vaikuttaa laskennan lopputulokseen simulointiin käytettävistä yhtälöistä riippuen. Asia havaittiin myös tehdyssä tutkimuksessa. Liitteessä D olevassa lähdekooditiedostossa on havainnollistettu kytkentäoperaattorien käyttöä.

### 3.2.2 Ryömintätilan lämpö- ja massatasapainoyhtälöt

Ryömintätilan vallitsevat tunnitaiset lämpö- ja kosteusolosuhteet ratkaistiin COMSOL Multiphysicsin ”*The Global ODEs and DAEs*”-moduulia käyttäen. Moduulilla voi ratkaista esimerkiksi avaruudesta riippumattomia yhden muuttujan erityyppisiä differentiaaliyhtälöitä, joita ovat esimerkiksi ODE (eng. *ordinary differential equation*) ja DAE (eng. *differential algebraic equation*) yhtälöt. Yhtälöt voivat olla ajasta riippuvia tai riippumattomia. Moduuli voi olla vuorovaikutuksessa muun mallin kanssa, ottaa muusta mallista tietoa tai toimia itsenäisesti. Moduuliin syötetään ratkaistava yhtälö, yhtälön muuttuja ja mahdolliset alkuarvot. (COMSOL Multiphysics 2016d, s. 845). COMSOL Multiphysicsin käyttöohjeessa on esitetty tarkemmat ohjeet moduulista ja sen käytöstä (COMSOL Multiphysics 2016d).

Ryömintätilassa tapahtuu massan- ja energianvaihtoa ryömintätilan ja ympäristön välillä. Tarkastelussa oltiin kiinnostuneita ryömintätilassa vallitsevista lämpötilan  $T_{CS}$  ja suhteellisen kosteuden  $\varphi_{CS}$  tunnittaisista arvoista. Saatuja arvoja käytetään hyödyksi myöhemässä vaiheessa ryömintätilan rakenneratkaisuiden ja ryömintätilan alipaineistamisen toimivuutta arvioitaessa (luku 3.4.1). Ryömintätilan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot laskettiin massa- ja energiatasapainoyhtälöiden avulla (luku 2.6). Tasapainoyhtälöistä ratkaistaan ryömintätilan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot 1 tunnin aika-askeleella johtuen simuloinnin lähtötietoina käytettyjen ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaustiedoista (luku 3.3.2).

Olosuhteiden selvittämisessä käytettävien massa- ja energiatasapainoyhtälöiden muuttujina käytettiin ryömintätilan lämpötilaa  $T_{CS}$  ja vesihöyryn massaa  $m_{CS}$ . Ryömintätilassa olevan vesihöyryn massan perusteella laskettiin ryömintätilan suhteellinen kosteus kaavalla 2.29 ja vesihöyrypitoisuus kaavan 2.26 avulla. Kuvassa 3.7 on havainnollistettu ryömintätilan massan- ja energianvaihtoa ympäristön kanssa. Avoimen maapohjan ja ilmatiiivistetyn maapohjan tasapainoyhtälöt poikkeavat toisistaan maan kautta tapahtuvan ilmavirtauksen osalta.



**Kuva 3.7.** Tasapainoyhtälöiden energia- ja massavirtojen havainnekuva.

Ryömintätilan olosuhteiden simuloimiseksi ryömintätilalle muodostettiin massan ja energian säilymistä kuvaavat tasapainoyhtälöt luvun 2.6 mukaisesti. Ryömintätilan massanmuutos tarkasteltavassa aikayksikössä (1 tunti) voidaan ilmasta kaavan 2.69 avulla:

$$\frac{dm_{CS}}{dt} = \sum G_{in} - \sum G_{out} \quad (3.5)$$

jossa

$\sum G_{in}$  on ryömintätilaan tulevien kosteusvirtojen summa [kg/s]

$\sum G_{out}$  on ryömintätilasta lähtevien kosteusvirtojen summa [kg/s]

Vastaavasti ryömintätilan energianmuutos tarkasteltavassa aikayksikössä (1 tunti) voidaan ilmaista kaavan 2.79 avulla:

$$\frac{dE_{cs}}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (3.6)$$

jossa

$\sum Q_{in}$  on ryömintätilaan tulevien energiavirtojen summa [W]

$\sum Q_{out}$  on ryömintätilasta lähtevien energiavirtojen summa [W]

Ryömintätilan massanvaihto ympäristön kanssa (kuva 3.7) tapahtui konvektiivisesti ryömintätilaan ulkoilmasta tulevan korvausilman, ryömintätilasta ulos menevän poistoilmavirran ja ryömintätilaan sepelin kautta tulevan ilmavirran mukana sekä diffuusiolla ryömintätilan maapohjarakenteen ja alapohjarakenteen lattiarakenteen kautta. Kosteutta voi diffuusion avulla siirtyä joko ryömintätilaan tai ryömintätilasta pois, riippuen vesihöyrypitoisuuksien erosta. Virtausten mukana kulkevan vesihöyryn suunta ei muutu. Näin ollen ryömintätilan massatasapainoyhtälöksi saatiin:

$$\frac{dm_{cs}}{dt} = G_{ulko} - G_{poisto} + G_{maa,diff} + G_{maa,konv} + G_{AP} - G_{kond} \quad (3.7)$$

jossa

$G_{ulko}$  on korvausilman mukana ulkoa ryömintätilaan tuleva kosteusvirta [kg/s]

$G_{poisto}$  on poistoilmavirran mukana ryömintätilasta ulos menevä kosteusvirta [kg/s]

$G_{maa,diff}$  on maan pinnan ja ryömintätilan välinen diffuusiokosteusvirta [kg/s]

$G_{maa,konv}$  on maan kautta ryömintätilaan tulevan ilmavirran mukana tuleva kosteusvirta [kg/s]

$G_{AP}$  on alapohjan ryömintätilan puoleisen pinnan ja ryömintätilan välinen diffuusiokosteusvirta [kg/s]

$G_{kond}$  on ryömintätilan ilmassa olevan vesihöyryn mahdollisen kondensoitumisen aiheuttama poistuva kosteusvirta [kg/s]

Ryömintätilan energiavaihto ympäristön kanssa tapahtui (kuva 3.7) konvektiivisesti ryömintätilaan ulkoilmasta tulevan korvausilman, ryömintätilasta ulos menevän poistoilmavirran ja ryömintätilaan sepelin kautta tulevan ilmavirran mukana sekä johtumalla alapohjan lattiarakenteen, perusmuurin ja ryömintätilan maapohjarakenteen kautta. Lämpöä voi johtumalla siirtyä joko ryömintätilaan tai ryömintätilasta pois, riippuen lämpötilaerosta. Virtausten mukana kulkevan lämmön suunta ei muutu. Näin ollen ryömintätilan energiatasapainoyhtälöksi saatiin:

$$\rho_a c_{p,a} V_{cs} \frac{dT_{cs}}{dt} = Q_{ulko} - Q_{poisto} + Q_{perusmuuri} + Q_{maa,joht} + Q_{maa,konv} + Q_{AP} + Q_{kond} \quad (3.8)$$

jossa

$\rho_a$	on ilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], kuivalle ilmalle $1 \text{ kg}/\text{m}^3$
$c_{p,a}$	on ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$Q_{ulko}$	on korvausilman mukana ryömintätilaan tuleva energiavirta [W]
$Q_{poisto}$	on poistoilmavirran mukana ryömintätilasta ulos poistuva energiavirta [W]
$Q_{perusmuuri}$	on perusmuurin pinnan ja ryömintätilan välinen johtumalla siirtyvä energiavirta [W]
$Q_{maa,diff}$	on maan pinnan ja ryömintätilan välinen johtumalla siirtyvä energiavirta [W]
$Q_{maa,konv}$	on maan kautta ryömintätilaan tulevan ilmavirran energiavirta [W]
$Q_{AP}$	on alapohjan ryömintätilan puoleisen pinnan ja ryömintätilan välinen johtumalla siirtyvä energiavirta [W]
$Q_{kond}$	on ryömintätilan ilmassa olevan vesihöyryn mahdollisen kondensoitumisen aiheuttama poistuva energiavirta [W]

Ryömintätilan massa- ja energiatasapainoyhtälöissä vesihöyryn mahdollinen kondensoituminen otettiin huomioon termien  $G_{kond}$  ja  $Q_{kond}$  avulla. Massatermin  $G_{kond}$  tarkoituksena on pyrkiä rajoittamaan ryömintätilan suhteellisen kosteuden nousua arvon 1 yli. Energiatermi  $Q_{kond}$  huomioi mahdollisen kondensoituvan kosteuden faasimuutoslämmön vaikutuksen energiatasapainoyhtälöön. Ryömintätilassa kondensoitunut kosteus oletettiin valuvan alas ilmatilasta sepelikerroksen kautta perusmaan pintaan.

Ilmatiivistetyissä tapauksissa ei tapahdu sepelin kautta ilmavirtausta, joten sepelin kautta tulevat kosteusvirta ja lämpövirta ovat  $G_{maa,konv} = 0 \text{ kg/s}$  ja  $Q_{maa,konv} = 0 \text{ W}$ . Liitteessä C on esitelty tarkemmin yhtälöiden 3.7 ja 3.8 sisältämiä termejä. Luvussa 3.2.7 on esitetty missä osassa maa- ja pohjarakenteiden geometriaa moduulin yhtälöitä on käytetty.

### 3.2.3 Ilman virtaus sepelissä

Sepelissä virtaa ilmaa ryömintätilan ja ulkoilman välisestä paine-erosta johtuen. Sepelitäytön huokosissa vallitseva stationaarinen virtauskenttä ratkaistiin käyttämällä COMSOL Multiphysicsin ”The Darcy’s Law Interface”-moduulia. Moduuli soveltuu hitaasti virtaavien fluidien mallintamiseen huokoisessa aineessa ulkopuolisen paine-eron vaikutuksesta (COMSOL Multiphysics 2016a, s. 256-257). Moduuli käyttää huokoisen aineen Darcyn lain mukaista virtauskentän teoriaa, jota käsiteltiin aikaisemmin luvussa 2.4.3. Darcyn lain mukainen virtauskenttä ratkaistaan moduulissa samalla tavalla kuin yhtälössä 2.43:

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (3.9)$$

Moduuli kytkee Darcyn lain myös jatkuvuusyhtälöön eli massan häviöttömyyden periaatteeseen seuraavasti (COMSOL Multiphysics 2016a, s. 258):

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m \quad (3.10)$$

jossa

$Q_m$  on mahdollinen massalähdetermi [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ]

Luvussa 3.2.7 on esitetty missä osassa maa- ja pohjarakenteiden geometriaa moduulin yhtälöitä on käytetty.

### 3.2.4 Huokoisen- ja kiinteän aineen lämmönsiirto

Maa- ja perustusrakenteissa lämpöä siirtyy sekä huokoisessa että kiinteässä aineessa, jota mallinnettiin COMSOL Multiphysicsin ”The Heat Transfer in Porous Media” moduulilla. Moduuli mallintaa lämmön siirtymistä huokoisessa aineessa johtumisen (luku 2.1.2) ja konvektion (luku 2.1.3) avulla seuraavasti (COMSOL Multiphysics 2016b, s. 128):

$$\begin{aligned} (1 - \theta_p) \left( \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \mathbf{u}_f \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q}_f \right) + \theta_p \left( \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s \right) \\ = (1 - \theta_p) Q_f + \theta_p Q_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

jossa

$\rho_f$  on virtaavan fluidin tiheys [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$\rho_s$  on kiinteän aineen tiheys [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$c_{p,f}$  on virtaavaan fluidin lämpökapasiteetti vakiopaineessa [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ], joka on kuivalle ilmalle  $c_{p,f} = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$c_{p,s}$  on kiinteän aineen lämpökapasiteetti vakiopaineessa [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]

$\mathbf{q}_f$  on virtaavan fluidin johtumisen aiheuttama lämpövirrantiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], jossa kuivalle ilmalle  $\lambda_a = 0,024 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$\mathbf{q}_s$  on kiinteän aineen johtumisen aiheuttama lämpövirrantiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\mathbf{u}$  on fluidin nopeuskenttä [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$Q_f$  on fluidin lämmönlähde tai lämpönielu [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]

$Q_s$  on kiinteän aineen lämmönlähde tai lämpönielu [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]

$\theta_p$  on kiinteän aineen osuus huokoisesta aineesta (tilavuusosuus) [-]

$1 - \theta_p$  on aineen huokoisuus [-]



Ennen huokoisen aineen lämmönsiirtoa kuvaavan yhtälön 3.11 käyttöä tuli selvittää virtaavan fluidin nopeuskenttä  $\mathbf{u}$  huokoisessa aineessa. Huokoisen aineen Darcyn lain mukainen virtauskenttä laskettiin sepelissä virtaavalle kuivalle ilmalle Darcyn laki- laskentamoduulin (luku 2.4.3) avulla.

Ilmatiiivistetyn pohjarakenteen tapauksissa ilmaa ei virtaa sepelissä, jolloin sepelissä lämpö siirtyy pelkästään johtumalla. Näin ollen huokoisen aineen lämmönsiirtoa kuvaava yhtälö 3.11 pelkistyi muotoon:

$$\begin{aligned} (1 - \theta_p) \left( \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_f \right) + \theta_p \left( \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s \right) \\ = (1 - \theta_p) Q_f + \theta_p Q_s \end{aligned} \quad (3.12)$$

Moduulin käyttämä huokoisen aineen lämmönsiirtymisen yhtälö 3.11 sieveni kiinteän aineen tapauksilla muotoon:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s = Q_s \quad (3.13)$$

koska kiinteissä aineissa ei ole huokosia, jolloin:

$$\begin{cases} \theta_p = 1 \\ 1 - \theta_p = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Kiinteitä aineita avoimen ja ilmatiiivistetyn pohjarakenteiden tapauksissa olivat perusmuuri, antura, perusmaa ja routaeristykset. Syvältä maaperästä maan pintaan nouseva lämpö otettiin huomioon sijoittamalla perusmaan geometrian pohjaan lämmönlähde  $Q_s = 0,03 \text{ W/m}^3$ . Luvussa 3.2.7 on esitetty missä osassa maa- ja pohjarakenteiden geometriaa moduulin yhtälöitä on käytetty.

### 3.2.5 Sepelissä tapahtuva kosteuden siirtyminen

Sepelissä ilmahuokosissa voi tapahtua kosteuden siirtymistä diffuusion ja konvektion avulla, joka mallinnettiin COMSOL Multiphysicsin ”The Transport of dilute species” moduulilla. Moduuli mallintaa aineen siirtymistä konsentraatioperusteisesti diffuusion (luku 2.4.1) ja konvektion (luku 2.4.3) avulla seuraavasti (COMSOL Multiphysics 2016a, s. 121):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i \quad (3.15)$$

jossa

$c_i$  on tarkasteltavan komponentin konsentraatio [ $\text{mol/m}^3$ ]

$D_i$  on tarkasteltavan komponentin diffuusiokerroin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$R_i$  on tarkasteltavan komponentin reaktionopeus [mol/(m<sup>3</sup>·s)]  
 $\mathbf{u}$  on fluidin nopeuskenttä [m/s]

Yhtälöä 3.15 kutsutaan lähteestä riippuen konvektio-diffuusioyhtälöksi tai advektio-diffuusioyhtälöksi (Stocker 2011, s. 56). Ennen konvektio-diffuusioyhtälön käyttöä tulee selvittää konvektiotermiä  $\mathbf{u} \cdot \nabla c_i$  varten virtaavan fluidin Darcyn lain mukainen nopeuskenttä  $\mathbf{u}$ , joka laskettiin sepelin tapauksessa sepelissä virtaavalle ilmalle Darcyn laki- laskentamoduulin luku 2.4.3 avulla. Mallinnettaessa kosteuden siirtymistä diffuusiolla termin  $\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i)$  mukaisesti, yhtälön 3.15 tarkasteltavan komponentin konsentraatiolla tarkoitetaan vesihöyryn konsentraatiota sepelissä olevassa ilmassa. Tarkasteltavan komponentin diffuusiokerrointa  $D_i$  vastasi ilmassa olevan vesihöyryn tapauksessa paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys (luku 2.4.1), joka voidaan laskea esimerkiksi lämpötilasta riippuvana yhtälön 2.37 avulla. Vesihöyryn tapauksessa reaktionopeustermi  $R_i$  kuvasi ryömintätilan vesihöyryn kondensoitumista luvun 2.2 mukaisesti. Reaktiotermi valittiin sellaiseksi, että se pyrki rajoittamaan sepelin suhteellisen kosteuden nousua arvon 1 yli. Samalla reaktiotermi vaikuttaa sekä sepelin energiatasapainoon että massatasapainoon faasimuutoslämmön ja kosteuden kondensoitumisen kautta. Sepelissä mahdollisesti kondensoituva vesi oletettiin valuvan alaspäin perusmaan pinnalle. Perusmaan pinta oletettiin säilyvän kauttaaltaan pinnan lämpötilaa vastaavassa vesihöyryn kyllästyspitoisuudessa  $v_{sat}$ .

Ilmatiivistetyn pohjarakenteen tapauksissa ilmaa ei virtaa sepelissä, jolloin sepelissä kosteus siirtyy pelkästään diffuusion avulla. Näin ollen konvektio-diffuusioyhtälö 3.15 pelkistyy muotoon:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) = R_i \quad (3.16)$$

Luvussa 3.2.7 on esitetty missä osassa maa- ja pohjarakenteiden geometriaa moduulin yhtälöitä on käytetty.

### 3.2.6 Yhdistetty lämmön- ja kosteudensiirto

Tässä työssä yhdistettyä lämmön- ja kosteudensiirtoa (luku 2.5) käytettiin 1D alapohjarakenteessa sekä ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden betoni- ja lämmöneristeosissa. Yhdistetty lämmön- ja kosteudensiirron yhtälöiden implementointi toteutettiin COMSOL Multiphysicsin osittaisdifferentiaaliyhtälöitä ratkaisevan ”The Coefficient Form PDE”-moduulin avulla. Moduuli soveltuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseen kerroinmuodossa (COMSOL Multiphysics 2016d, s. 797). Tarkemmat ohjeet moduulin käytöstä on saatavilla COMSOL Multiphysics- ohjelman käyttöohjeesta (2016d). Lämmön- ja kosteudensiirtoa kuvaavien yhtälöiden implementoinnissa mallinnusohjelmaan hyödynnettiin lähteitä (Nusser & Teibinger 2012; Williams Portal 2011).

Aikaisemmin esitetyt yhdistetyt massan- ja lämmönsiirtoa kuvaavat yhtälöt 2.59 ja 2.60 eivät suoraan sovellu käytettäväksi moduulissa, vaan ne tulee järjestää uudelleen moduulin vaatimaan matriisimuotoon. Termien uudelleenjärjestämisen jälkeen moduuliin soveltuvaksi kosteudensiirtoa kuvaavaksi yhtälöksi saatiin

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left( \delta_p \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \right) \nabla^2 T + (\delta_p p_{sat} + D_w \xi) \nabla^2 \varphi \quad (3.17)$$

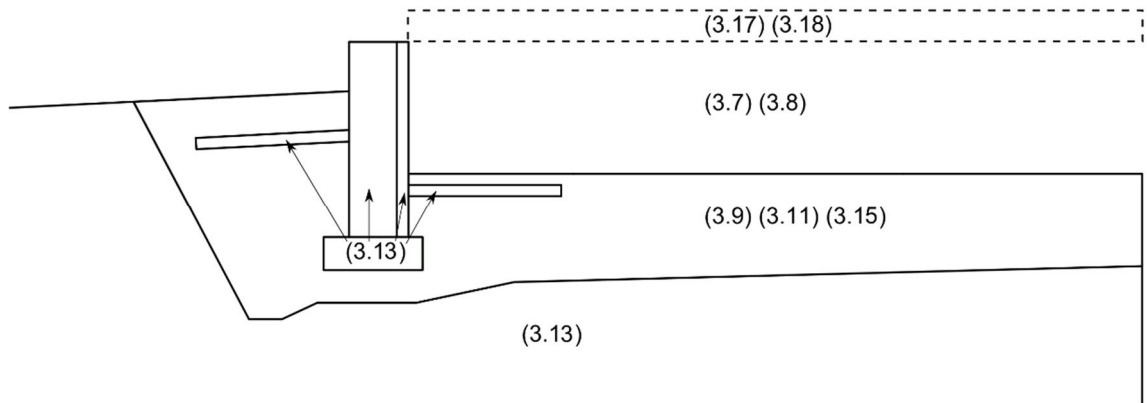
ja lämmönsiirtoa kuvaavaksi yhtälöksi

$$c_{p,vol} \frac{\partial T}{\partial t} = \left( \lambda + h_v \delta_p \varphi \frac{\partial p_{sat}}{\partial T} \right) \nabla^2 T + (h_v \delta_p p_{sat}) \nabla^2 \varphi \quad (3.18)$$

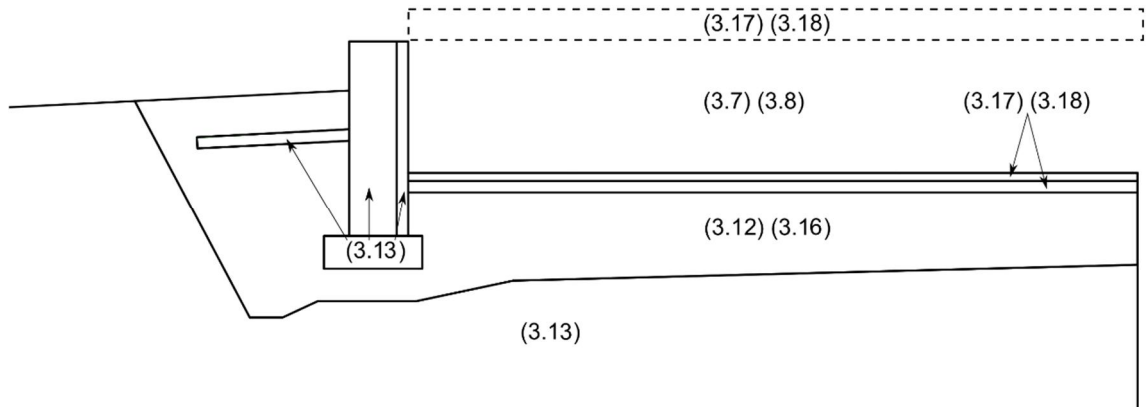
Liitteessä D olevassa lähdekooditiedostossa on esitetty yhtälöiden käyttöä ja implementointia. Luvussa 3.2.7 on esitetty missä osassa maa- ja pohjarakenteiden geometriaa moduulin yhtälöitä on käytetty.

### 3.2.7 Yhteenveto malleissa käytetyistä yhtälöistä

Tämän luvun tarkoitus on osoittaa, missä kohdin tarkasteltavia geometrioita aikaisemmin tässä luvussa esitettyjä COMSOL Multiphysicsin yhtälöitä on käytetty. Kuvassa 3.8 on esitelty avoimessa pohjarakenteessa käytetyt yhtälöt. Kuvassa 3.9 on esitetty ilmatiivistetyissä pohjarakenteissa käytettyjä yhtälöitä pelkästään betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS)-rakenteella muiden ilmatiivistysrakenteiden samankaltaisuuden vuoksi.

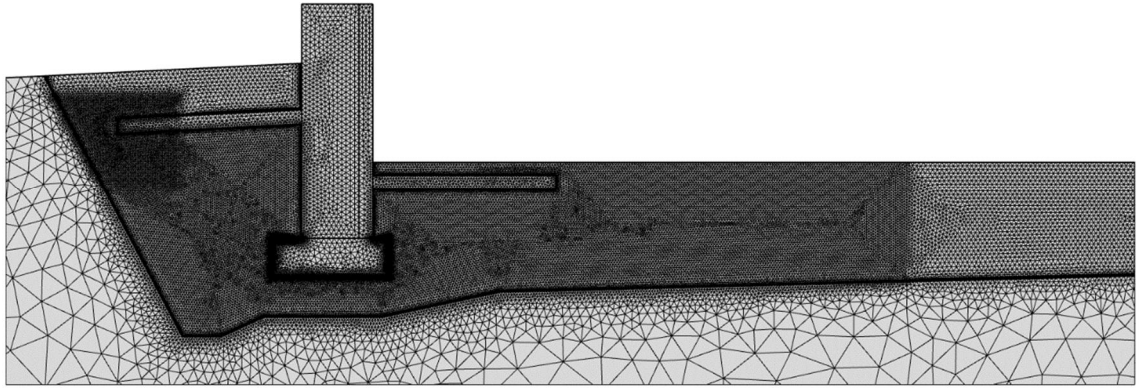


**Kuva 3.8.** Avoimen pohjarakenteen mallintamisessa käytetyt yhtälöt sijoitettuna tarkasteltuun geometriaan.



**Kuva 3.9.** Ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden mallintamisessa käytetyt yhtälöt sijoitettuna tarkasteltuun geometriaan.

Kuvassa 3.10. on esitetty maa- ja perustusrakenteiden simuloinnissa käytettyä verkotusta.



**Kuva 3.10.** Esimerkki maa- ja perustusrakenteiden verkotuksesta.

Kuvista 3.8 ja 3.9 on havaittavissa osamalleissa käytettyjen yhtälöiden lukumäärän perusteella, että vaativimmat mallinnettavat osa-alueet olivat sepeli, ilmatiivistysmateriaalit, alapohjarakenne sekä ryömintätila. Kuitenkin tarkasteltaessa aiemmin esiteltyjä mallinnukseen käytettyjä yhtälöitä, voidaan huomata ryömintätilan olosuhteiden mallintamiseen käytettyjen tasapainoyhtälöiden olevan helpommin ratkaistavissa kuin sepelin, alapohjarakenteen ja ilmatiivistysmateriaalien mallintamiseen käytetyt yhtälöt. Saman johtopäätöksen voi tehdä tarkastelemalla kuvan 3.10. simuloinnissa käytettyä laskentaverkkoa ja verkon tiheyksiä eri kohdissa tarkasteltua geometriaa. Näin ollen työn mallinnus- ja simulointiteknisesti haastavimmat rakenteet olivat sepeli, alapohjarakenne sekä ilmatiivistysmateriaalit.

### 3.3 Laskennan lähtötiedot

Tässä kappaleessa esitellään mallinnuksessa käytettyjen rakennusmateriaalien materiaaliominaisuuksia sekä ajasta riippuvaan simulointiin tarvittuja ulko- ja sisäilmaolosuhteita. Tarkoituksena oli valita rakennusmateriaalit ja niiden ominaisuudet vastaamaan Suomessa yleisesti käytettyjen rakennusmateriaalien ominaisuuksia (luku 3.3.1) mahdollisimman tarkasti. Myös sääolosuhteet valittiin Suomen ilmaston mukaiseksi (luku 3.3.2). Tällä tavoin pyrittiin varmistamaan tulosten soveltuvuus Suomen ilmasto-oloihin.

#### 3.3.1 Materiaaliominaisuudet

Tässä työssä käytettiin vuosina 2009-2012 toteutetussa FRAME-tutkimusprojektissa esitettyjä rakennusmateriaalien aineominaisuuksia (Vinha et al. 2013). FRAME-tutkimusprojektissa selvitettiin ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia rakennusten lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan Suomen ilmastossa (Vinha et al. 2013).

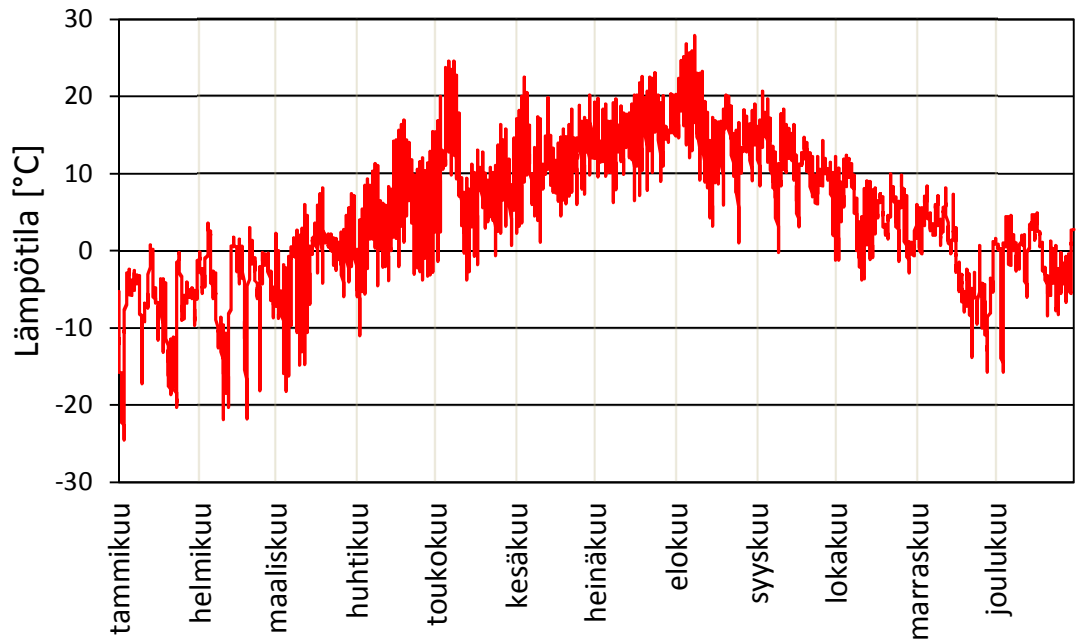
Sepelin ilmanläpäisevyydellä on suuri vaikutus ryömintätilan lämpö- ja kosteusoloihin. Sepelin permeabiliteetti voi vaihdella suuresti riippuen esimerkiksi käytettävästä raekoosta ja sen tiiviyydestä. Tutkimuksessa käytettäväksi sepelin permeabiliteeteiksi valittiin  $\kappa_1 = 1e-9 \text{ m}^2$  ja  $\kappa_2 = 1e-8 \text{ m}^2$ . Julkaisun (STUK-A252 2012, s.140) mukaan permeabiliteetin arvot  $1e-9 \text{ m}^2 - 1e-8 \text{ m}^2$  edustuvat Suomessa tyypillisesti käytettyjä täyttösora-aineita. Tällaisten täyttösora-ainesten raekoko on useista millimetreistä kymmeneen millimetriin (STUK-A252 2012, s.140).

Lämmön- ja kosteuden yhtäaikaisen siirtymisen tarkasteluissa (luku 2.5) käytettiin muuttuvia (dynaamisia) materiaaliominaisuuksien arvoja. Materiaaliominaisuuksien muutoksilla on ajasta riippuvissa tarkasteluissa vaikutusta ajavien potentiaalien (suhteellinen kostus  $\varphi$  ja lämpötila  $T$ ) suuntaan ja suuruuteen (luku 2.5). Muilta osin aineen lämpötilan ja kosteuspitoisuuden muutosten vaikutusten oletettiin olevan merkityksettömiä tarkasteltaviin materiaalien ominaisuuksiin. Käytettyjä materiaaliominaisuuksia on tarkemmin esitetty liitteessä A.

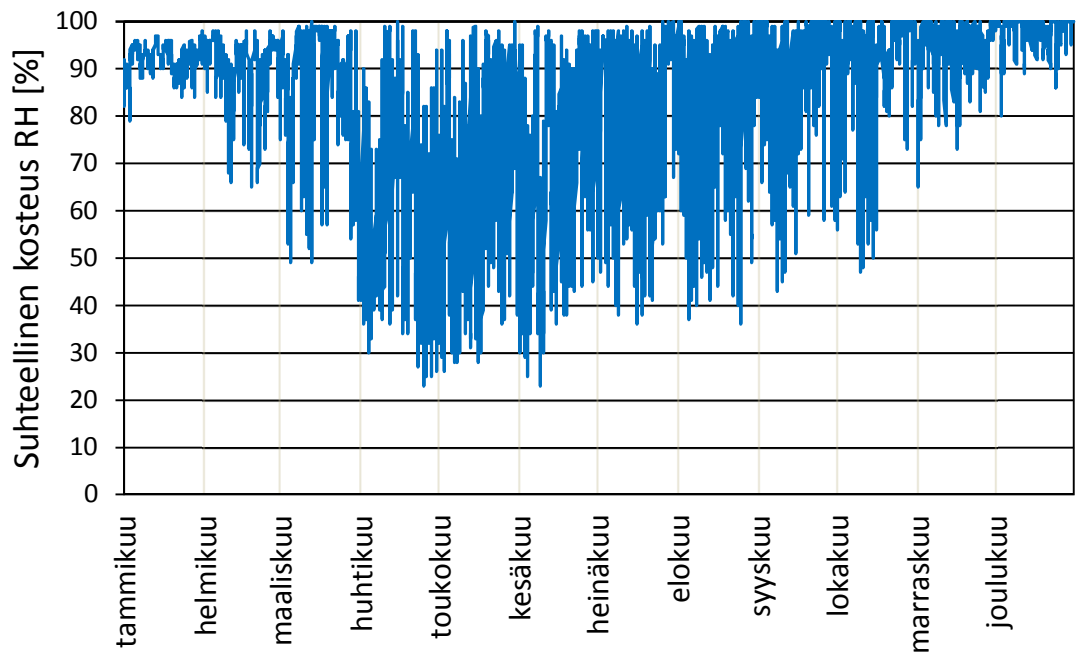
#### 3.3.2 Ulko- ja sisäilmaolosuhteet

Ulkoilman testiolosuhteina simuloinnissa käytettiin kahta peräkkäistä Jokioinen 2004 – testivuotta. Testivuosi on todettu aikaisemmin toteutetussa FRAME- tutkimusprojektissa Suomessa kriittiseksi rakennusfysikaaliseksi testivuodeksi tarkasteltaessa homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista rakenteen sisällä. Jokioinen 2004 – testivuosi soveltuu vaipparakenteille, joiden sisäosat ovat suojatut sateen vaikutukselta ja vaipparakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman olosuhdetekijöistä lähinnä suhteellinen kosteus. (Vinha et al. 2013, s. 45, 107) Ryömintätila on suojattu sateen vaikutukselta.

Sepelikerrokseen pääsevä sadevesi oletettiin valuvan perusmaan pintaan sepelin läpi. Ku-  
vissa 3.11 – 3.12 on esitetty Jokioinen 2004 testivuoden tunnitaiset lämpötilan ja suh-  
teellinen kosteuden mittausravot.



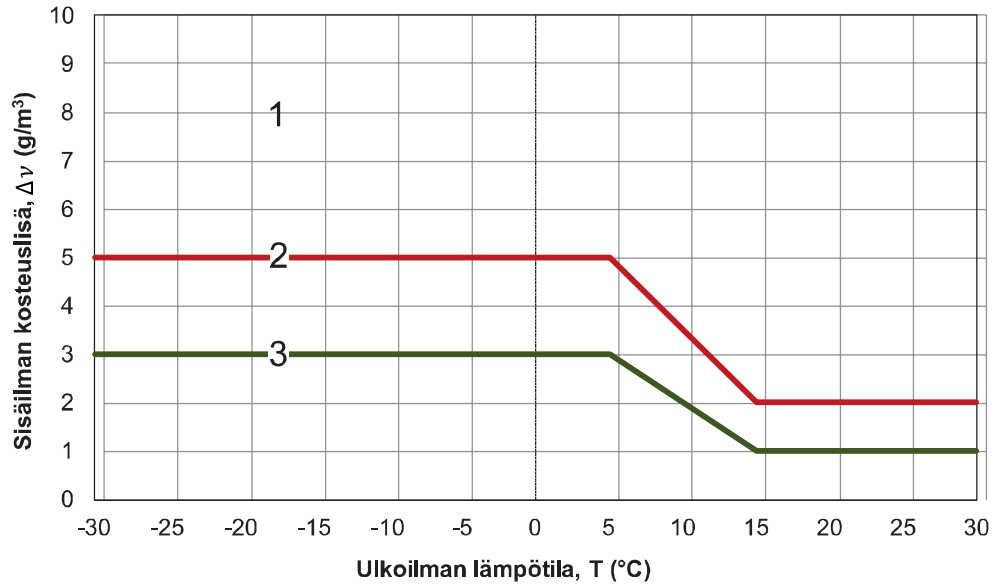
**Kuva 3.11.** Jokioinen 2004 – testivuoden ulkoilman lämpötila.



**Kuva 3.12.** Jokioinen 2004 – testivuoden ulkoilman suhteellinen kosteus.

Rakennuksen sisäilman lämpötila pidettiin vakiona  $T_s = 21$  °C ympäri vuoden. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihtelee vuoden aikana ulkoilman suhteellisen kosteuden ja sisäilman kosteuslisän vaikutuksesta. Sisäilman kosteuslisä kuvaa rakennuksen käytöstä ja

asumisesta aiheutuvaa lisäkosteuden määrää sisäilmassa. Sisäilman suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta saattaa rakenneosiin aiheutua vesihöyryn kondensoitumisriski, koska sisäilman korkeampi kosteuspitoisuus pyrkii tasoittumaan diffuusiolla ulkoilmaan seinärakenteen läpi (luku 2.2). Sisäilman kosteuslisän suuruus riippuu ulkolämpötilasta ja on tyypillisesti suurin talvella. Kuvassa 3.13 on esitetty erilaisille taulukossa 3.1 esitellyille eri rakennustyyppien kosteusluokille käytettäviä kosteuslisäiä.



**Kuva 3.13.** Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107 2012, s. 26).



**Taulukko 3.1.** Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyypit (RIL 107 2012, s. 26).

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitusarvo talvella ( $T \leq 5 \text{ °C}$ )	Rakennustyyppi <sup>3), 4)</sup>
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ <sup>1)</sup>	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	$5 \text{ g/m}^3$	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat <sup>5), 6)</sup> , kylmä- ja pakkahuoneet <sup>5), 6)</sup> , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	$3 \text{ g/m}^3$ <sup>2)</sup>	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

<sup>1)</sup> Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä 6–20 g/m<sup>3</sup>.

<sup>2)</sup> Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisän arvoa 3 g/m<sup>3</sup>, ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisä riittää tarkasteltavassa kohteessa.

<sup>3)</sup> Eri rakennustyyppeihin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa.

<sup>4)</sup> Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

<sup>5)</sup> Jäähdytettyjen tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslisä voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

<sup>6)</sup> Jäähdytettyjen tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

Tutkimuksessa käytettiin kuvan kosteuslisän arvoa  $5 \text{ g / m}^3$ , koska tutkittava asuinrakennus kuuluu taulukon 3.1 mukaan kosteusluokkaan 2. (RIL 107 2012, s. 25-28). Tässä työssä ei tarkastella tarkemmin rakennuksen sisäpuolisia tai ulkopuolisia kosteuslähteitä.

### 3.4 Alipaineistetun rakenneratkaisun toimivuuden arviointi

Ryömintätilan lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta arvioitiin Suomalaisen homemallin (luku 3.4.1) avulla sekä korvausilmavirran suuruuden ja taloudellisuuden perusteella (luku 3.4.2). Homemallin käyttöä varten tuli selvittää ryömintätalassa vallitsevat suhteellisen kosteuden ja lämpötilan tunnitaiset arvot. Tässä työssä eri alipaineistetun tuuletetun ryömintätilan tapauksille laskettiin tunnitaiset suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot luvussa 3.2.2 esitetyllä tavalla. Laskentatapausten eri homeutumisherkkyysluokille saadut homeindeksien arvot on esitetty luvussa 4.3.

### 3.4.1 Homemalli

Olosuhteiden aiheuttamaa alttiutta homeen kasvulle ryömintätilassa arvioitiin Suomalaisella homemallilla. Homemallin tarkoituksena on arvioida ensisijaisesti homeen kasvun riskiä materiaalissa. (Ojanen et al. 2010, s. 19) Malli tarkastelee homeen kasvun yleistä riskiä, ei tietyn homeen (Viitanen et al. 2010, s. 216).

Homeen ja mikrobien muodostumisen kannalta kriittisimmät tekijät ovat tarkasteltava materiaali, materiaalin kosteuspitoisuus, materiaalin pinnan lämpötila sekä materiaalin altistusaika homeen kasvulle otollisille olosuhteille (Viitanen et al. 2010, s. 220). Homeen kasvuun merkittävämpiä vaikuttavia tekijöitä ovat homeen kasvun kynnysolosuhteet materiaalin pinnassa, homeen kasvun voimakkuus vaihtelevissa olosuhteissa, homeen kasvun taso ja muuttumattomissa olosuhteissa maksimaalinen homeen kasvun taso (Viitanen et al. 2010, s. 216).

Homemallissa homeen kasvua materiaalin pinnalla kuvaa homeindeksi  $M$  [-], joka jaetaan 7 eri luokkaan homeen pinnan peittävyuden perusteella. Homeindeksi voi saada arvoja väliltä 0-6. (Ojanen et al. 2010, s. 2-3) Tämän työn tarkasteluissa turvallisena homeindeksin raja-arvona pidettiin  $M < 1$ .

Homeindeksin luokittelu perustuu tutkimukseen (Viitanen 1996, Viitanen & Ritschkoff 1991, Ojanen et al. 2010), jossa selvitettiin männyn ja kuusen pintapuussa homeen muodostumista ja kasvua. Luokittelua on myöhemmin paranneltu ja jatkokehitetty kattamaan muitakin rakennusmateriaaleja (Ojanen et al. 2010, s. 6-7; Viitanen et al. 2010, s. 206-207). Taulukossa 3.2 on kuvattu tarkemmin homeindeksin luokkien ja visuaalisesti havaitun homeen kasvun riippuvuutta.

**Taulukko 3.2.** Homeindeksin luokitusperusteet (Ojanen et al. 2010, s.3).

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 (alkavaa itiöiden muodostumista) 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, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Suomalaisen homemallin homeen kasvun matemaattinen malli perustuu tutkimukseen (Hukka & Viitanen 1999), jota on myöhemmin paranneltu ja jatkokehitetty kattamaan muissakin rakennusmateriaaleissa tapahtuvaa homeen kasvua. (Ojanen et al. 2010, s. 1-2; Viitanen et al. 2010, s. 206-207)

Homemallissa eri lämpötiloille lasketaan alin mahdollinen suhteellisen kosteuden arvo eli kriittinen suhteellisen kosteuden arvo  $RH_{crit}$ , jonka yläpuolella homeen kasvu on mahdollista olosuhteille altistumisajan ollessa tarpeeksi pitkä. Kriittinen suhteellisen kosteuden arvo homemallissa lasketaan kaavalla (Ojanen et al. 2010, s. 4):

$$RH_{crit} = \begin{cases} \max(-0,00267 T^3 + 0,160 T^3 - 3,13 T + 100,0, RH_{min}), & \text{kun } T \leq 20 \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20 \end{cases} \quad (3.19)$$

jossa

$T$  on dimensioton °C lämpötila [-]

$RH_{min}$  on materiaalista riippuva alin suhteellisen kosteuden arvo, jossa homeen kasvu on mahdollista (Ojanen et al. 2010, s. 6).

Homeen kasvunopeutta  $\frac{dM}{dt}$  [1/s] kuvataan homemallissa yhtälöllä (Ojanen et al. 2010, s. 4):

$$\frac{dM}{dt} = \left(\frac{1}{24}\right) \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \cdot \ln(T) - 13,9 \cdot \ln(RH) + 66,02)} k_1 k_2 \quad (3.20)$$

jossa

$T$  on dimensioton °C lämpötila [-]

$k_1$  on homeen kasvun intensiteettiä kuvaava kerroin [-]

$k_2$  on homeen kasvun maltillisuutta kuvaava kerroin [-], jos kasvun maksimi on välillä  $4 < M < 6$ .

Materiaaleille tehtyjen homehtumisherkkyytustutkimusten pohjalta homemallin tarkastelemat materiaalit jaetaan neljään eri homehtumisherkkyyssluokkaan (HHL). Jokaiselle herkkyyssluokalle on määritetty tarkastelujen pohjalta homeen kasvun voimakkuutta kuvaava kerroin  $k_1$  [-]. (Ojanen et al. 2010, s. 5) Taulukossa 3.3 on esitetty materiaalien herkkyyssluokittelu. Taulukossa 3.4 on esitetty homehtumisherkkyyssluokkakohtaiset  $k_1$  kertoimen arvot.

**Taulukko 3.3.** *Suomalaisen homemallin materiaalityypittäinen homehtumisherkkyyssluokittelu (Vinha 2014, s. 61).*

Herkkyyssluokitusperusteet		Rakennusmateriaali
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
HHL 2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaisetlevyt, kipsilevyt
HHL 3	Kohtalaisen kestävä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, EPS, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
HHL 4	Kestävä	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita home-suoja-aineita sisältävät materiaalit

Kertoimen  $k_1$  määrittämisen tarkempi kuvaus ja sen vaikutukset homeen kasvun mallintamiseen on esitetty lähteessä Ojanen et al. (2010, s. 4 - 6). Homeen kasvun maltillisuutta kuvaava kerroin  $k_2$  määritetään seuraavasti (Ojanen et al. 2010, s. 5):

$$k_2 = \max \begin{cases} 1 - e^{2,3(M-M_{max})} \\ 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

Kertoimen  $k_2$  merkitys homeen kasvun mallintamiseen on tarkemmin esitetty lähteessä (Ojanen et al. 2010, s. 5 - 6).

Homeen kasvun maksimiarvo  $M_{max}$  [-] saadaan laskettua kaavalla (Ojanen et al. 2010, s. 6):

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (3.22)$$

jossa

$RH$  on tarkasteltava suhteellinen kosteus [-]

$A, B$  ja  $C$  ovat tarkasteltavasta materiaalista riippuvia kertoimia (taulukko 3.4)

Taulukossa 3.4 on esitelty homeindeksin laskennassa tarvittavia eri materiaaliherkkyyshuokkakokohtaisia kertoimia (Ojanen et al. 2010, s. 6).

**Taulukko 3.4.** *Suomalaisessa homemallissa käytettäviä parametreja herkkyyshuokittain (Ojanen et al. 2010, s. 6).*

Materiaalin homehtumis-herkkyyshuokka	$k_1$		$k_2(M_{max})$			$RH_{min}$
	$M < 1$	$M \geq 1$	A	B	C	%
Hyvin herkkä (HHL1)	1	2	1	7	2	80
Herkkä (HHL2)	0,578	0,386	0,3	6	1	80
Kohtalaisen kestävä (HHL3)	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Kestävä (HHL4)	0,033	0,014	0	3	1	85

Homeen kasvun voi taantua, jos lämpötila ei ole homeen kasvuille edullisella lämpötila-alueilla (0 – 50 °C) tai suhteellinen kosteus on alle kriittisen suhteellisen kosteuden  $RH_{crit}$ . Homeen kasvun taantuma  $\left(\frac{dM}{dt}\right)_{mat}$  [-] riippuu homeen kasvuille epäedullisten olosuhteiden kestosta kaavan 3.23 mukaisesti (Ojanen et al. 2010, s. 7):

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_{mat} = C_d \left(\frac{dM}{dt}\right)_0 \quad (3.23)$$

jossa

$C_d$  on tarkasteltavan materiaalin taantumaa kuvaava vakio [-] (taulukko 3.5)

$\left(\frac{dM}{dt}\right)_0$  on referenssimateriaalissa (mänty/kuusi) tapahtuva homeen taantuma [-],

joka voidaan laskea seuraavasti (Ojanen et al. 2010, s. 7):

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_0 = \begin{cases} -0,00133 \cdot \frac{1}{24}, & \text{kun } t - t_1 \leq 6 \text{ h} \\ 0, & \text{kun } 6 \text{ h} \leq t - t_1 \leq 24 \text{ h} \\ -0,000667 \cdot \frac{1}{24}, & \text{kun } t - t_1 > 24 \text{ h} \end{cases} \quad (3.24)$$

jossa

$t_1$  on epäedullisten kasvuolosuhteiden alkuaikajankohta [h]

$t$  on epäedullisten kasvuolosuhteiden tarkasteluajankohta [h]

Taulukossa 3.5 on esitetty eri homehtumisherkkyyssuokilla käytettävät taantumakertoimet (Ojanen et al. 2010, s. 8).

**Taulukko 3.5.** *Suomalaisessa homemallissa käytetyt homeen kasvun taantumakertoimet (Ojanen et al. 2010, s. 8).*

Taantumaluokka		Taantumakerroin $C_d$
Merkittävä taantuma	HHL 1	0,5
Kohtalainen taantuma	HHL 2	0,25
Vähäinen taantuma	HHL 3 ja HHL 4	0,1

Homeen kasvussa tapahtuva mahdollinen taantuma otettiin huomioon homeindeksissä seuraavasti:

$$M_{t+1} = M_t + \left(\frac{dM}{dt}\right)_{mat} \quad (3.25)$$

jossa

$M_t$  on tarkasteltavan ajanhetken homeindeksi [-]

$M_{t+1}$  on tarkasteltavaa ajanhetkeä seuraavan ajanhetken homeindeksin arvo [-]

Tässä työssä tarkasteltiin poistoilmavaihdolla alipaineistetun tuuletetun ryömintätilan homehtumisriskiä kahdella eri homehtumisherkkyyssuokalla: HHL3 ja HHL1. Tarkasteltaessa kivirakenteisessa (betoni ja kevytsora) ryömintätilassa olevia puhtaita materiaalinpinnoja, ryömintätilan homehtumisherkkyyssuokkana voidaan käyttää luokkaa HHL3 (taulukko 3.3). Myös lämmöneristemateriaali EPS luokitellaan samaan homehtumisherkkyyssuokkaan. Kuitenkin todellinen tuulettuva ryömintätila sisältää epäpuhtauksia, kuten

esimerkiksi orgaanista ainetta. Orgaaninen aine voi olla esimerkiksi ryömintätilaan korvausilmavirran mukana kulkeutunutta siitepölyä. Materiaalin pinnalla oleva orgaaninen aine lisää homeen kasvun riskiä merkittävästi (Viitanen et al. 2010, s. 210-211, 220). Tämän perusteella tuulettuvan ryömintätilan homeen kasvun riskiä tarkasteltiin myös homehtumisherkkyyssluokalla HHL1 (taulukko 3.3).

### 3.4.2 Kohtuullinen ilmavirta ja ilmanvaihtuvuus

Ryömintätilan alipaineistuksen seurauksena rakenneratkaisusta riippuen ryömintätilaan voi virrata ulkoa ilmaa sekä korvausilmaventtiilin että sepelin kautta. Riittäväksi ryömintätilan alipaineeksi ulkoilmaan nähden valittiin 10 Pa, jotta varmistuttaisiin ettei ryömintätilaan virtaa ilmaa ja epäpuhtauksia oleskelutiloihin. Koska ryömintätilan alipaineena käytettiin vakioarvoa 10 Pa, oli mahdollista muuttaa korvausilmavirran suuruutta säädetävän korvausilmaventtiilin avulla halutun suuruiseksi. Tarkoituksena oli löytää sellaisia korvausilmavirtojen suuruuksia, että ne olisivat sekä homeindeksin kannalta hyväksyttäviä ( $M < 1$ ) että taloudellisuuden ja energiatehokkuuden kannalta kohtuullisia.

Tässä työssä tarkasteltaviksi korvausilman aiheuttamiksi ilmanvaihtuvuuksiksi alipaineistetuille ryömintätiloille valittiin 0,2 1/h, 0,4 1/h, 0,6 1/h, 0,8 1/h, 2,0 1/h, ja 5,0 1/h. Korvausilman aiheuttamat ilmanvaihtuvuudet on tarkemmin esitetty taulukoissa 3.6, 3.7 ja 3.8. Korvausilmavirran aiheuttamiksi ryömintätilan ilmanvaihtuvuuksiksi pyrittiin valitsemaan voimassa olevien suositusten (0,5 – 1,0 1/h (RIL 107 2012, s. 60)) mukaisia arvoja tulosten vertailtavuuden säilyttämiseksi suosituksiin nähden. Suosituksia on esitetty tarkemmin luvussa 5. Suositukset ovat korvausilmaventtiilin kautta tulevan korvausilmavirran aiheuttamia ilmanvaihtuvuuksia.

Korvausilman pienimmäksi ilmanvaihtuvuudeksi valittiin 0,2 1/h, koska ryömintätila ei saisi koskaan olla täysin tuulettumaton. Tuulettumattomaan ryömintätilaan kertyy enemmän kosteutta, mikrobeja, radonia ja muita terveydelle haitallisia aineita (luku 1.2), jolloin lattiarakenteiden vuotokohdista saattaa virrata kasvaneiden pitoisuuksien takia enemmän terveydelle haitallisia aineita ryömintätilan yläpuolisiin tiloihin. (STUK-A252, 2012, s. 86)

Ilmanvaihtuvuuksien 2,0 1/h ja 5,0 1/h tarkoituksena oli selvittää homeindeksin käyttäytymistä suuremmilla korvausilman vaihtuvuuksilla ja samalla myös homeindeksin käyttäytymistä olosuhteiden lähestyessä ulkoilmassa vallitsevia olosuhteita. Lisäksi ryömintätilan homeindeksejä tarkasteltiin myös ulkoilman olosuhteilla, joiden tarkoituksena oli kuvata äärettömän suuren ilmanvaihtuvuuden vaikutusta ryömintätilan olosuhteisiin. Näin saatiin selville ilmanvaihtuvuuden kasvattamisen vaikutus homeindeksiin.

Avoimen pohjarakenteen omaavaan ryömintätilaan tuleva kokonaisilmavirta  $R_{tot}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] koostui sepelin kautta tulevasta ilmavirrasta  $R_{maa}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] sekä korvausilmaventtiilin kautta ulkoa tulevasta korvausilmasta  $R_{ulko}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]:

$$R_{tot} = R_{maa} + R_{ulko} \quad (3.26)$$

Taulukoissa 3.7 ja 3.8 on esitetty sepelin kautta tulevan tilavuusvirran  $R_{maa}$  suuruudet sepelin eri permeabiliteeteilla. Ilmatiiivistetyn pohjarakenteen omaavan ryömintätilan kokonaisilmavirta koostuu pelkästään ulkoa tulevasta ilmavirrasta pohjarakenteen ilmatiiivistyksen takia:

$$R_{tot} = R_{ulko} \quad (3.27)$$

Tulosten vertailtavuuden ja suositusten yleispätevyyden säilyttämiseksi ryömintätilan toimivuutta arvioitiin ilmanvaihtuvuuden  $n$  [1/h] avulla. Ilmanvaihtuvuus kuvaa montako kertaa ryömintätilassa oleva ilma vaihtuu tunnin aikana. Ryömintätilan ilmanvaihtuvuus voidaan laskea ryömintätilalle kaavalla (Hagentoft 2001, s. 83):

$$n = \frac{R_{tot}}{V_{cs}} \cdot 3600 \quad (3.28)$$

Kerroin  $a$  [-] kuvaa sepelin kautta tulevan tilavuusvirran suuruutta ulkoa tulevan korvausilmavirran suuruuteen:

$$a = \frac{R_{maa}}{R_{ulko}} \quad (3.29)$$

Kertoimen  $a$  tarkoituksena oli vertailla korvausilmavirran suuruuden vaikutusta sepelin kautta tulevaan ilmavirran vaikutukseen ryömintätilan kosteus- ja lämpöolosuhteissa. Ilmatiiivistettyjen pohjarakenteiden (luku 3.1.2) tapauksessa kerroin  $a = 0$ , koska sepelin kautta ei tullut ilmaa ryömintätilaan.

**Taulukko 3.6.** Ilmatiiivistettyjen pohjarakenteiden simuloinnissa käytettyjen tilavuusvirtojen ja ilmanvaihtuvuuksien suuruudet.

$R_{tot}$ [m <sup>3</sup> /s]	$n$ [1/h]
0,0058	0,2
0,0115	0,4
0,0173	0,6
0,0230	0,8
0,0288	1,0
0,0576	2,0
0,1439	5,0

**Taulukko 3.7.** Avoimen pohjarakenteen, sepelin permeabiliteetin ollessa  $1e-9 \text{ m}^2$ , simuloinnissa käytettyjen tilavuusvirtojen ja ilmanvaihtuvuuksien suuruudet.

$R_{ulko}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$R_{maa}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$R_{tot}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$n$ [1/h]	$a$ [-]
0,0058	0,0028	0,0085	0,30	0,48
0,0115	0,0028	0,0143	0,50	0,24
0,0173	0,0028	0,0201	0,70	0,16
0,0230	0,0028	0,0258	0,90	0,12
0,0288	0,0028	0,0316	1,10	0,10
0,0576	0,0028	0,0603	2,10	0,05
0,1439	0,0028	0,1467	5,10	0,02

**Taulukko 3.8.** Avoimen pohjarakenteen, sepelin permeabiliteetin ollessa  $1e-8 \text{ m}^2$ , simuloinnissa käytettyjen tilavuusvirtojen ja ilmanvaihtuvuuksien suuruudet.

$R_{ulko}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$R_{maa}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$R_{tot}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$n$ [1/h]	$a$ [-]
0,0058	0,0278	0,0336	1,2	4,8
0,0115	0,0278	0,0393	1,4	2,4
0,0173	0,0278	0,0451	1,6	1,6
0,0230	0,0278	0,0509	1,8	1,2
0,0288	0,0278	0,0566	2,0	1,0
0,0576	0,0278	0,0854	3,0	0,5
0,1439	0,0278	0,1717	6,0	0,2

Suuret korvausilmavirran arvot eivät ole taloudellisesti kannattavia, koska ne voivat lisätä rakennuksen lämpöenergian häviöitä jäädyttämällä rakenteita ja taloteknisiä laitteita erityisesti talvella sekä lisätä ryömintätilan alipainetta ylläpitävän puhaltimen sähköenergian kulutusta. Korvausilmavirran arvojen suuruudet ja niiden taloudellisuus on tarkasteltava tapauskohtaisesti, koska ilmanvaihtuvuus on kääntäen verrannollinen ryömintätilan tilavuuteen.

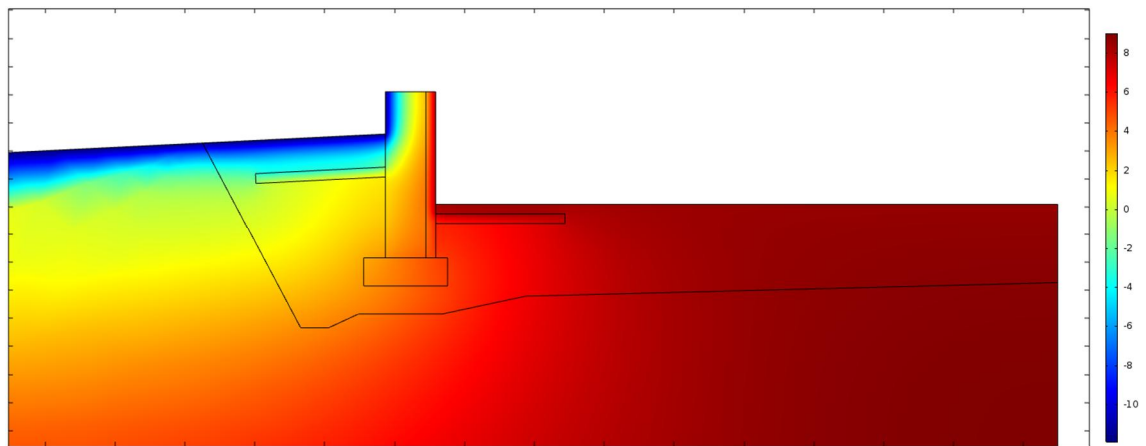


## 4. TULOKSET

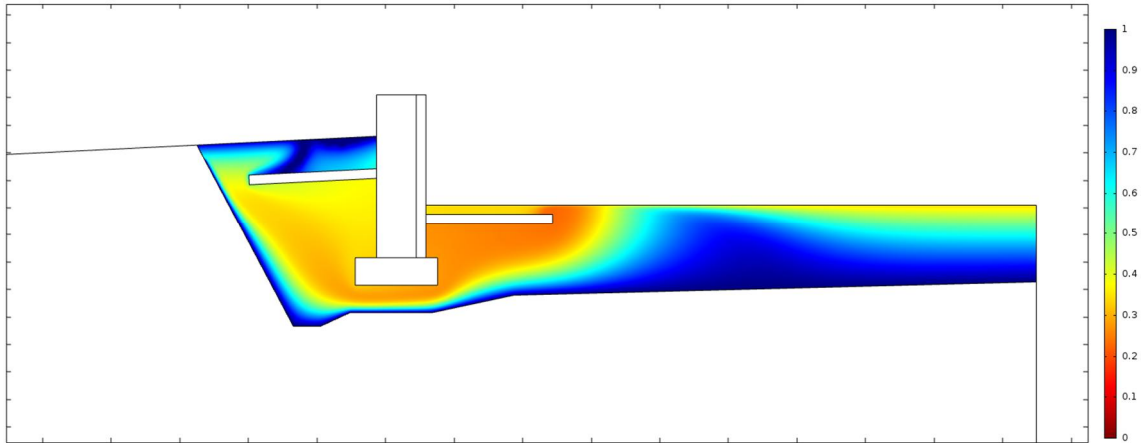
Johtuen tulosdatan suuresta määrästä, kaikkia laskentatuloksia ei voida esittää tässä työssä. Luvussa 4.1 havainnollistetaan maa- ja perustusrakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteita muuttuvissa ulkoilman olosuhteissa avoimelle ja ilmatiivistetylle pohjarakenteelle. Luvussa 4.2 esitellään simuloinnin tuloksena eri rakenneratkaisuille eri ilmanvaihtuvuuksien suuruuksilla saatuja ryömintätilan lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien arvoja. Luvussa 4.3 esitellään lämpö- ja kosteusolosuhteiden perusteella saatuja homeindeksien arvoja homeutumisherkkyyksiluokilla HHL1 ja HHL3. Luvussa 5 annetaan tulosten pohjalta suosituksia rakenneratkaisuksi ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuuksiksi.

### 4.1 Maa- ja perustusrakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet

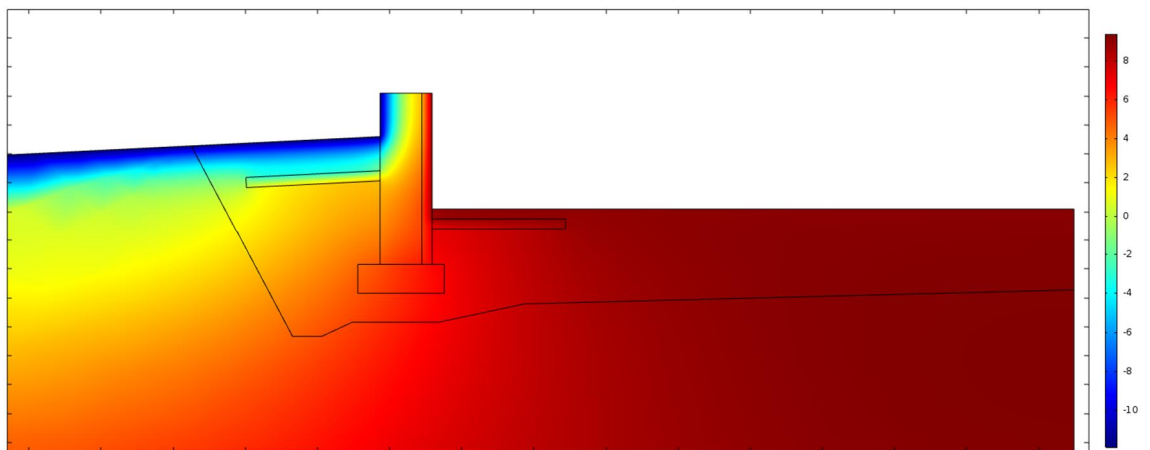
Tämän luvun tarkoituksena on havainnollistaa maa- ja perustusrakenteiden simuloinnin tuloksena saatuja lämpötilan lämpötilakenttiä ja suhteellisen kosteuden kosteuskenttiä. Esiteltävät geometriat ovat avoin pohjarakenne sepelin permeabiliteetin ollessa  $1e-8 \text{ m}^2$  ja  $1e-9 \text{ m}^2$  sekä betonilla ilmatiivistetty pohjarakenne. Kuvissa 4.1, 4.3 ja 4.5 on havainnollistettu maa- ja perustusrakenteiden lämpötilakenttiä ja kuvissa 4.2, 4.4 ja 4.6 suhteellisen kosteuden kosteuskenttiä 2. simulointivuoden tammikuussa (simuloinnin alusta 8772 h). Kaikissa tapauksissa ryömintätilaan korvausilmaventtiilin kautta ulkoa tulevan korvausilmavirran suuruus on  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tuloksenttien samankaltaisuuksien vuoksi muiden ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden lämpötila- ja kosteuskenttiä ei esitetä.



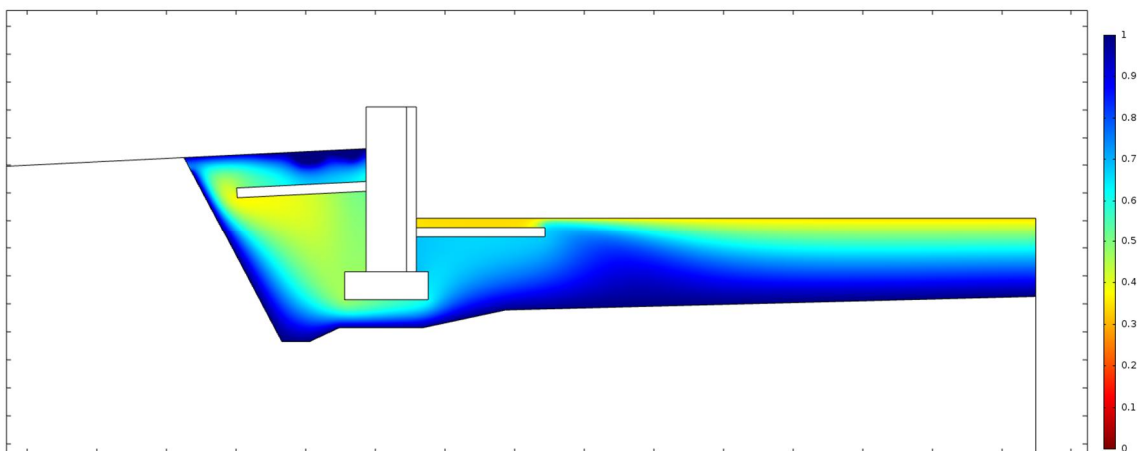
**Kuva 4.1.** Avoimen pohjarakenteen, jonka sepelin permeabiliteetti oli  $1e-8 \text{ m}^2$ , lämpötilan  $T [^{\circ}\text{C}]$  lämpötilakenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ .



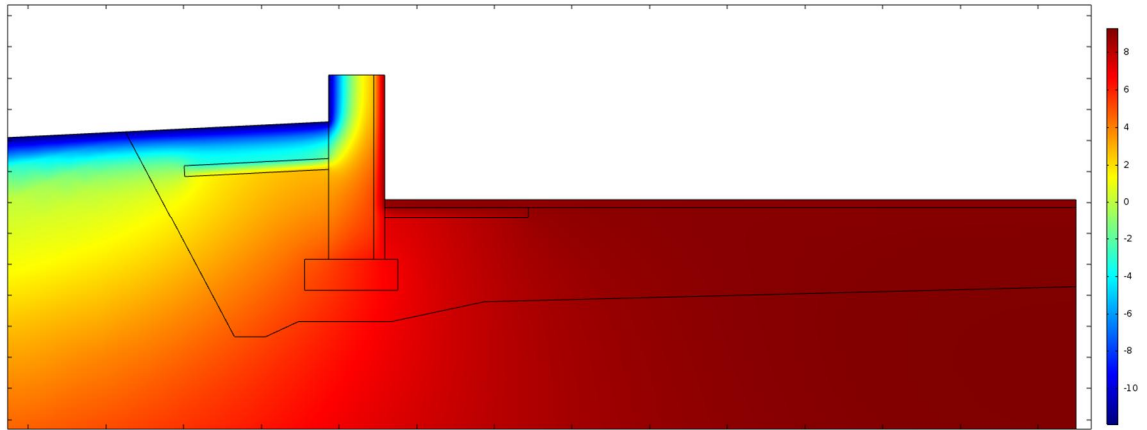
**Kuva 4.2.** Avoimen pohjarakenteen, jonka sepelin permeabiliteetti oli  $1e-8 \text{ m}^2$ , sepelin suhteellisen kosteuden  $RH [-]$  kosteuskenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ .



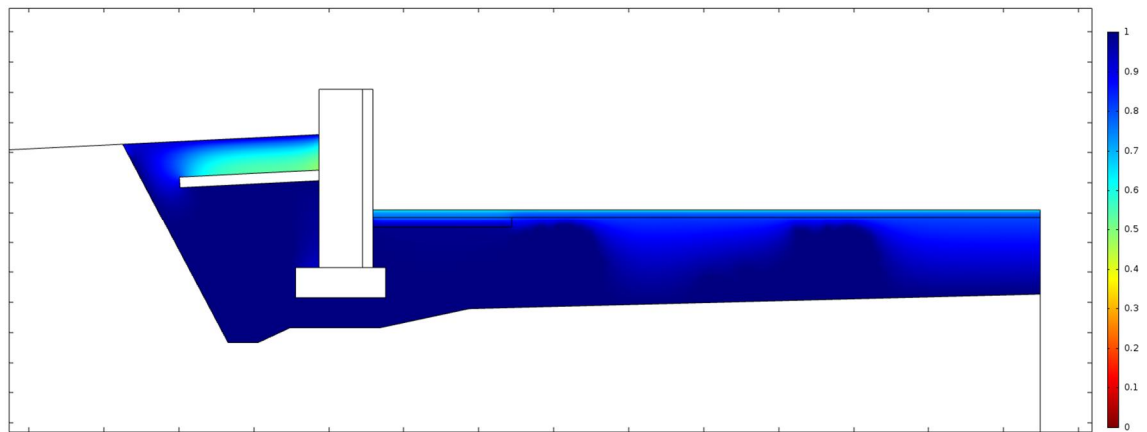
**Kuva 4.3.** Avoimen pohjarakenteen, jonka sepelin permeabiliteetti oli  $1e-9 \text{ m}^2$ , lämpötilan  $T [^\circ\text{C}]$  lämpötilakenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Kuva 4.4.** Avoimen pohjarakenteen, jonka sepelin permeabiliteetti oli  $1e-9 \text{ m}^2$ , sepelin suhteellisen kosteuden  $RH [-]$  kosteuskenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Kuva 4.5.** Betonilla ilmatiivistetyn pohjarakenteen lämpötilan  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] lämpötilakenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Kuva 4.6.** Betonilla ilmatiivistetyn pohjarakenteen sepelin suhteellisen kosteuden  $RH$  [-] kosteuskenttä 2. simulointivuoden tammikuussa (8772 h) korvausilmavirran ollessa  $0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Lämpötilakenttien kuvista 4.1, 4.3 ja 4.5 on havaittavissa, että maa- ja perustusrakenteiden lämpötilakentät ovat keskenään lähes samanlaiset. Sepelin kautta virtaavan tilavuusvirran suuruudella ei siis ole suurta vaikutusta maa- ja perustusrakenteiden lämpöolosuhteisiin. Kylmistä talvikuukausista huolimatta sepelin ja perusmaan lämpötilakentän lämpötilat ovat erityisesti rakennuksen alapuolisilta osilta huomattavasti korkeampia kuin ulkolämpötila (kuva 3.11). Tämä selittyy sepelin ja perusmaan hitaalla lämpödynamiikalla, joka asettaa omalta osaltaan haasteita ryömintätilaisen alapohjan rakennusfysikaaliselle toiminnalle.

Kosteuskenttien kuvista 4.2, 4.4 ja 4.6 on havaittavissa merkittäviä keskinäisiä eroavaisuuksia sepelin suhteellisen kosteuden kosteuskentän arvoissa. Tämän perusteella sepelin kautta virtaavan ilman tilavuusvirran suuruus vaikuttaa oleellisesti sepelin kosteusolosuhteisiin. Sepelin läpi siirtyvän ilman tilavuusvirran kasvaessa kyllästyskosteuspitoisuudessa säilyvän perusmaan yläpinnan kosteutta lisäävä vaikutus sepelin kosteusolosuhteisiin pienenee, jolloin sepelin suhteellisen kosteuden arvot laskevat. Tämä

ilmenee parhaiten vertailemalla keskenään tilannetta, jossa sepelin kautta ei virtaa ollenkaan ilmaa (kuva 4.6) ja tilannetta, jossa ilmaa virtaa sepelin kautta tutkituista avoimen maapohjan tapauksista eniten, jolloin sepelin permeabiliteetti oli  $1e-8 \text{ m}^2$ ) (kuva 4.2).

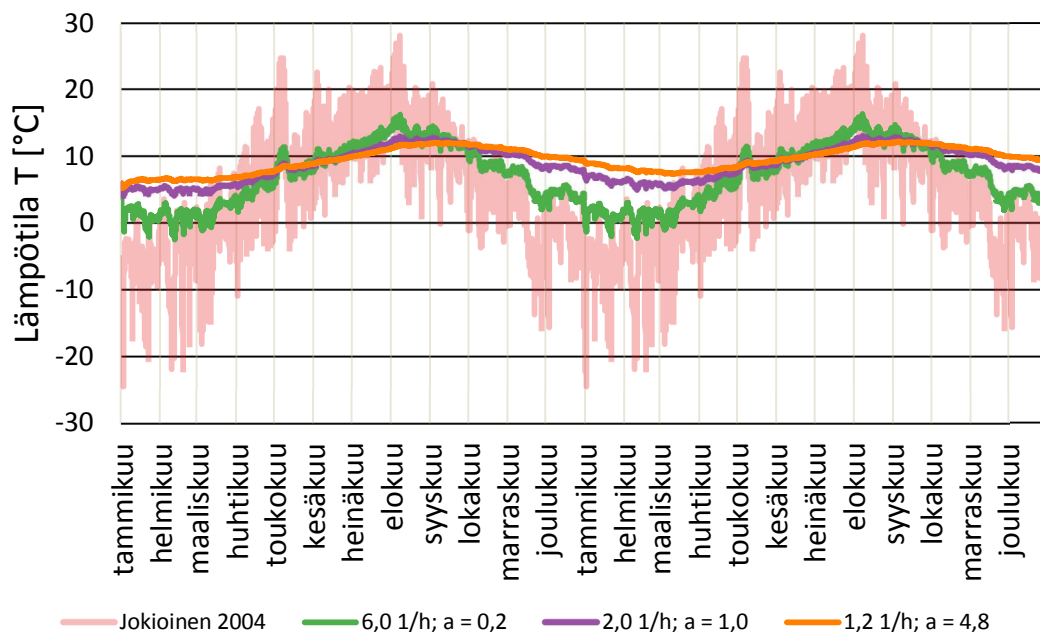
## 4.2 Ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteet

### 4.2.1 Lämpötila

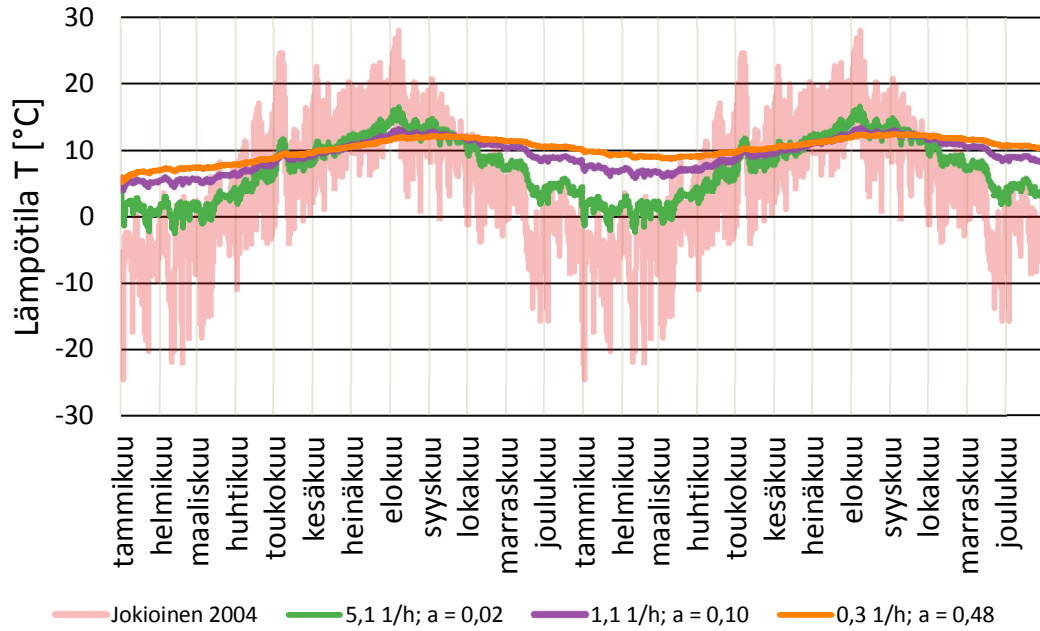
Tässä luvussa esitellään avoimella ja ilmatiivistetyillä pohjarakenteilla toteutettujen poistoilmanvaihdon alipaineistettujen tuuletettujen ryömintätilojen mallien simuloinnista saatuja lämpötilojen arvoja. Tulosten tarkoituksena on havainnollistaa ryömintätilan lämpötilan käyttäytymistä ryömintätilaan tulevan korvausilmavirran suuruuden muuttuessa.

Tulosten suuren määrän vuoksi kaikkien laskentatapausten ryömintätilojen lämpötiloja ei esitetä. Esitettäväksi korvausilmavirran aiheuttamiksi ilmavaihtuvuuksiksi valittiin tarkastelluista pienin (0,2 1/h), suurin (5,0 1/h) ja suositusten mukaisin suurin (1,0 1/h) ilmanvaihtuvuuden arvo. Avointen pohjarakenteiden tapauksilla ryömintätilaan virtaa korvausilmavirran lisäksi sepelin kautta ilmaa, jolloin ryömintätilan kokonaisilmavaihtuvuus on suurempi kuin ilmatiivistetyillä tapauksilla. Avointen pohjarakenteiden ilmavirtojen (korvausilmavirta ja sepelin kautta tuleva ilmavirta) suuruutta sekä niiden keskinäistä suhdetta (a-kerroin) on esitetty tarkemmin luvun 3.4.2 taulukoissa 3.7 ja 3.8.

Kuvissa 4.7 ja 4.8 on esitetty avointen pohjarakenteiden ryömintätilan lämpötilan käyttäytymistä tarkastellulla 2 vuoden ajanjaksolla. Avoimen pohjarakenteen kuvissa olevan a-kertoimen (yhtälö 3.29) tarkoituksena on havainnollistaa korvausilmaventtiilin ja sepelin kautta tulevien ilmavirtojen suhteen vaikutusta ryömintätilan olosuhteisiin. Kertoimen a pienentyessä korvausilmavirran suuruus kasvaa ja ryömintätilan lämpötila lähestyy ulkoilman olosuhteita. Tällöin sepelin kautta tulevan ilmavirran vaikutus pienenee ryömintätilassa.



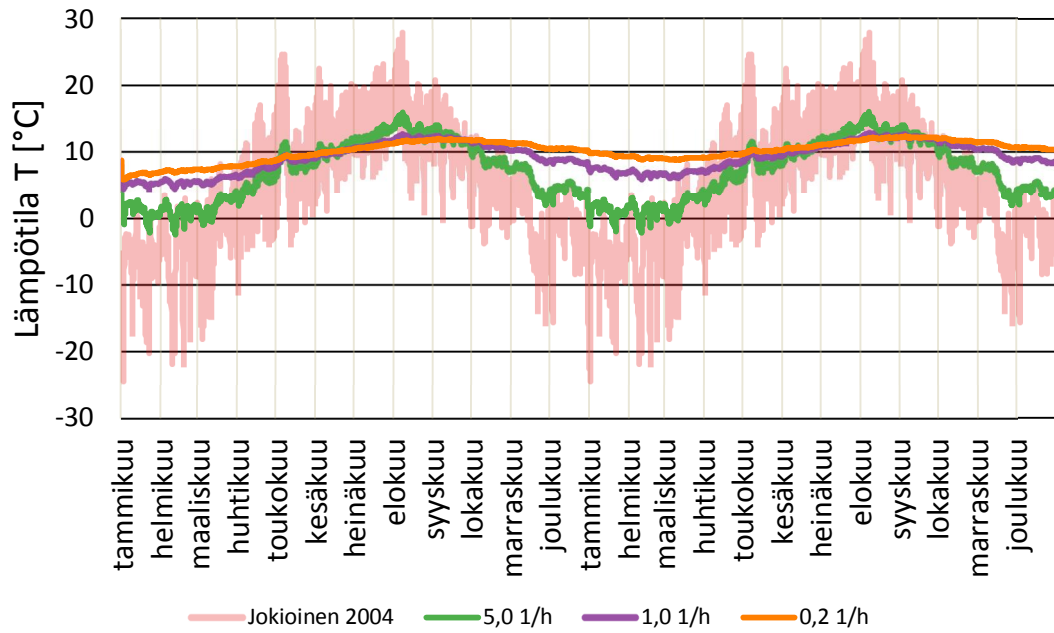
**Kuva 4.7.** Ryömintätilan lämpötila avoimella pohjarakenteella, jonka sepelin permeabiliteetti oli  $1e-8 \text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



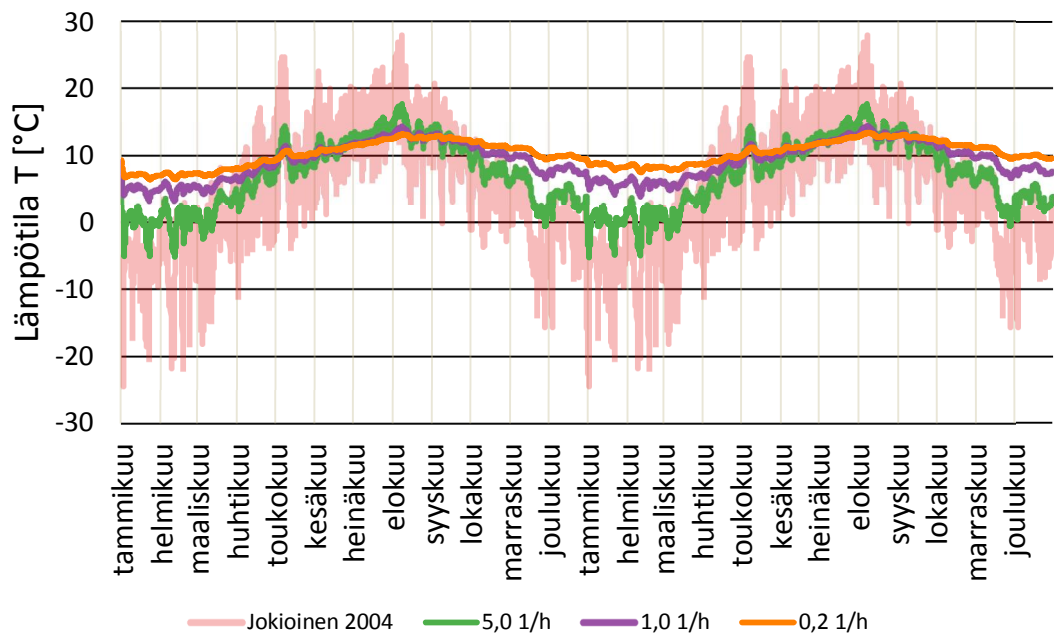
**Kuva 4.8.** Ryömintätilan lämpötila avoimella pohjarakenteella, jonka sepelin permeabiliteetti  $1e-9 \text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

Verratessa eri permeabiliteettien omaavien avointen pohjarakenteiden ryömintätilan lämpötiloja (kuvat 4.7 ja 4.8) toisiinsa, on huomattavissa, että molemmilla sepelin permeabiliteeteilla ryömintätilan lämpötilojen käyttäytymiset eivät poikkea toisistaan merkittävästi.

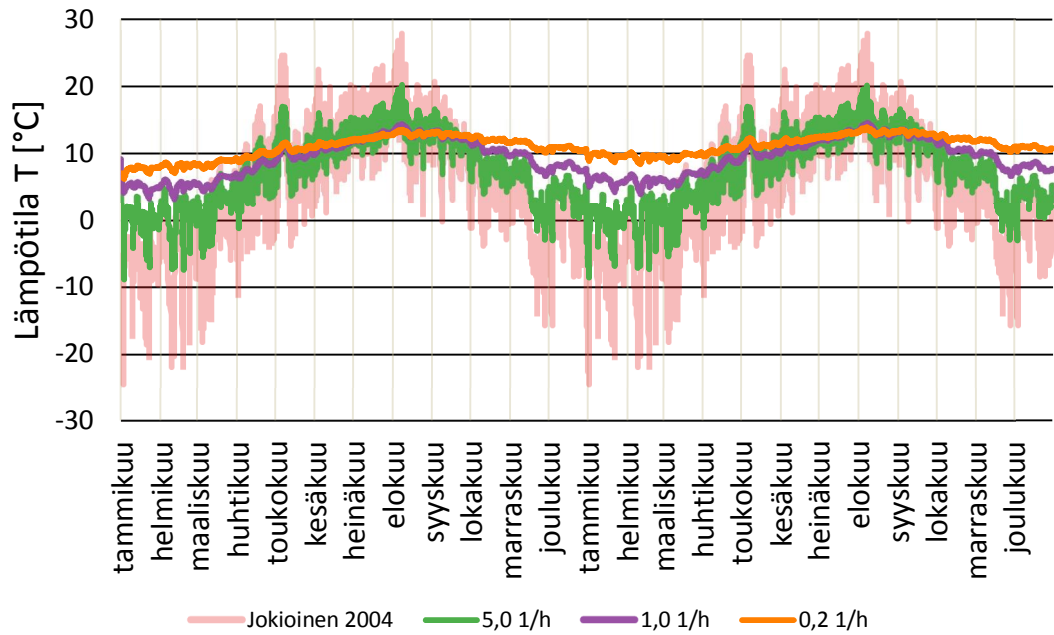
Kuvissa 4.9 – 4.12 on esitetty ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden ryömintätilan lämpötilan käyttäytymistä tarkastellulla 2 vuoden ajanjaksolla.



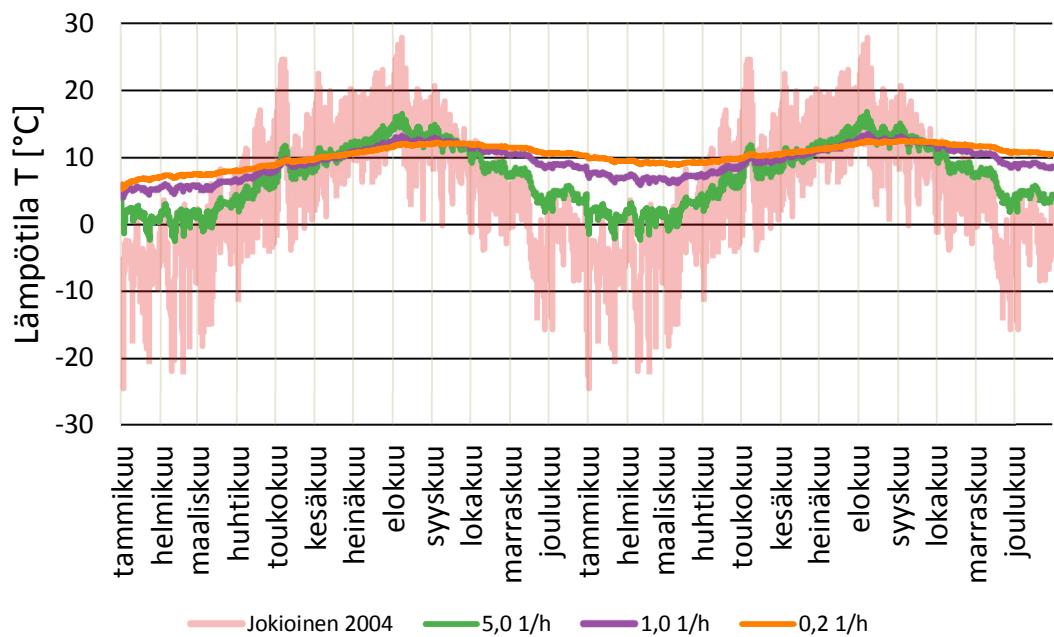
**Kuva 4.9.** *Betoni-rakenteella ilmatiivistetyn pohjarakenteen ryömintätilan lämpötila eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.*



**Kuva 4.10.** *Betoni + kova lämmöneriste-rakenteella ilmatiivistetyn ryömintätilan lämpötila eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.*



**Kuva 4.11.** Kova lämmöneriste-rakenteella ilmatiivistetyn ryömintätilan lämpötila eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



**Kuva 4.12.** Höyrinsulkumuovi-rakenteella ilmatiivistetyn ryömintätilan lämpötila eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

Betoni + kova lämmöneriste- ja kova lämmöneriste-rakenteilla (kuvat 4.10 ja 4.11) ilmatiivistettyjen ryömintätilojen lämpötilojen vaihtelut ovat hieman suuremmat kuin betoni- ja höyrinsulkumuovi-rakenteilla (kuvat 4.9 ja 4.12) ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden. Tosin betoni- ja höyrinsulkumuovi-rakenteisten ryömintätilojen lämpötilojen arvot jää-



vät talvikuukausina korkeammalle tasolle kuin betoni + kova lämmöneriste- ja kova lämmöneriste-rakenteilla. Talvikuukausin on erityisesti huomattavissa se, että kova lämmöneriste vähentää johtumalla tapahtuvaa lämmön siirtymistä ryömintätilan ja sen alla olevan sepelin välillä.

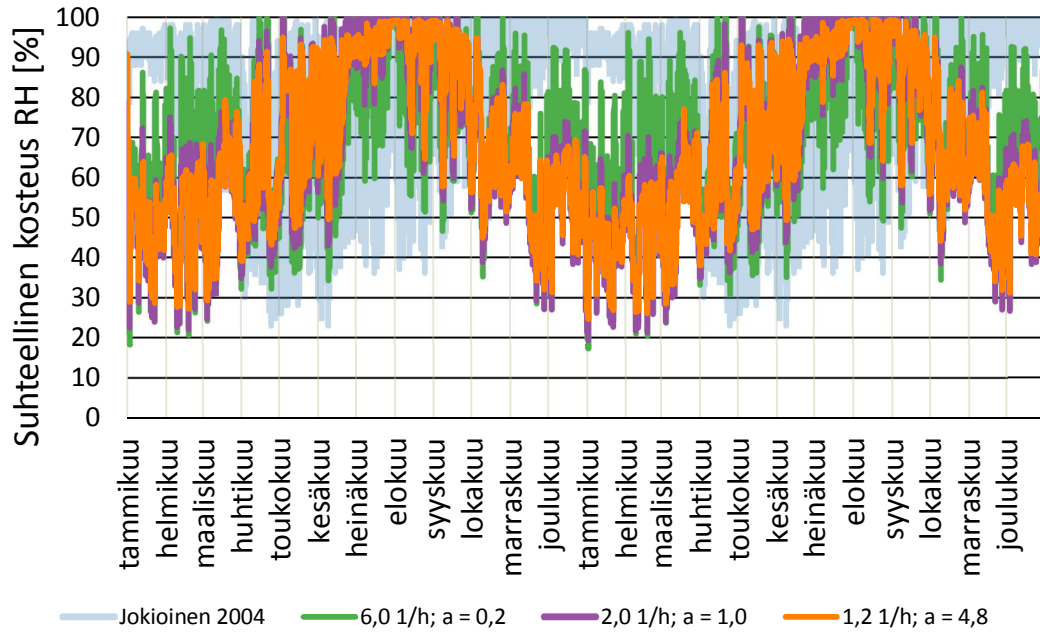
Avointen ja ilmatiivistettyjen ryömintätilojen lämpötilojen kuvista on havaittavissa, että suuremmilla korvausilmavirran arvoilla ryömintätilan lämpötilat ovat lähempänä ulkoilman (Jokioinen 2004) olosuhteita kuin pienimmillä korvausilmavirroilla. Avoimen ja ilmatiivistetyn tapausten ryömintätilojen lämpötilat eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa erisuuruisten ilmanvaihtuvuuksien takia.

#### **4.2.2 Suhteellinen kosteus**

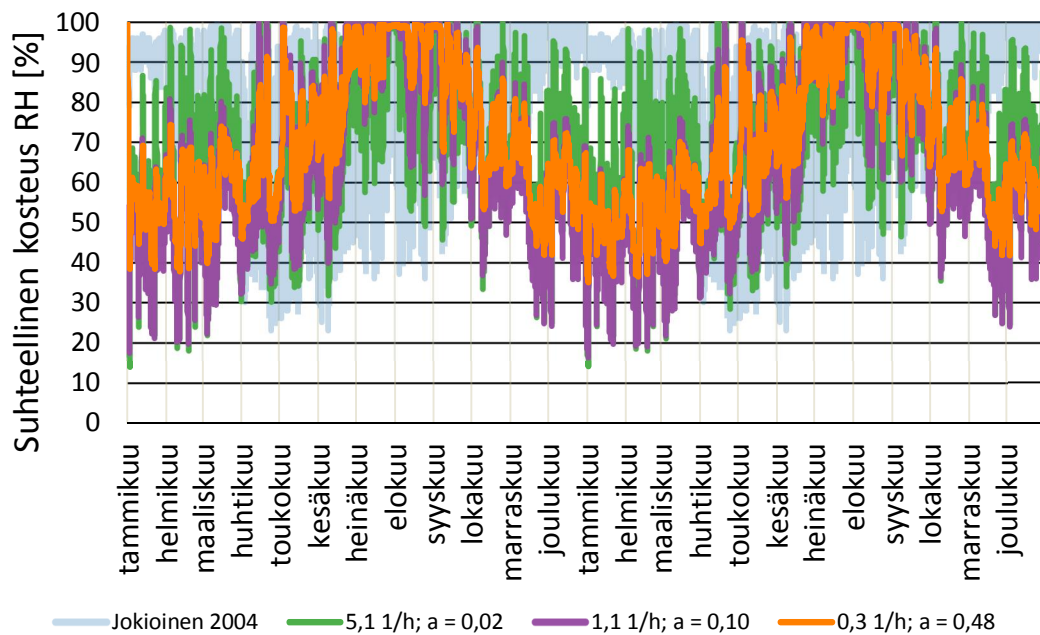
Tässä luvussa esitellään avoimella ja ilmatiivistetyillä pohjarakenteilla toteutettujen alipaineistettujen tuuletettujen ryömintätilojen mallien simuloinnista saatuja suhteellisen kosteuden arvoja. Tulosten tarkoituksena on havainnollistaa ryömintätilan suhteellisen kosteuden käyttäytymistä ryömintätilaan tulevan korvausilmavirran suuruuden muuttuessa.

Tulosten suuren määrän vuoksi kaikkien laskentatapausten ryömintätilojen lämpötiloja ei esitetä. Esitettäväksi korvausilmavirran aiheuttamiksi ilmavaihtuvuuksiksi valittiin tarkastelluista pienin (0,2 1/h), suurin (5,0 1/h) ja suositusten mukaisin suurin (1,0 1/h) ilmanvaihtuvuuden arvo. Avointen pohjarakenteiden tapauksilla ryömintätilaan virtaa korvausilmavirran lisäksi sepelin kautta ilmaa, jolloin ryömintätilan kokonaisilmavaihtuvuus on suurempi kuin ilmatiivistetyillä tapauksilla. Avointen pohjarakenteiden ilmavirtojen (korvausilmavirta ja sepelin kautta tuleva ilmavirta) suuruutta sekä niiden keskinäistä suhdetta (a-kerroin) on esitetty tarkemmin luvun 3.4.2 taulukoissa 3.7 ja 3.8.

Kuvissa 4.13 ja 4.14 on esitetty avointen pohjarakenteiden ryömintätilan suhteellisen kosteuden käyttäytymistä tarkasteltavalla 2 vuoden ajanjaksolla. Avointen pohjarakenteiden kuvissa olevan a-kertoimen (yhtälö 3.29) tarkoituksena on havainnollistaa korvausilma-venttiilin ja sepelin kautta tulevien ilmavirtojen suhteen vaikutusta ryömintätilan olosuhteisiin. Kertoimen a pienentyessä korvausilmavirran suuruus kasvaa ja ryömintätilan suhteellinen kosteus lähestyy ulkoilman olosuhteita. Tällöin sepelin kautta tulevan ilmavirran vaikutus pienenee ryömintätilassa.



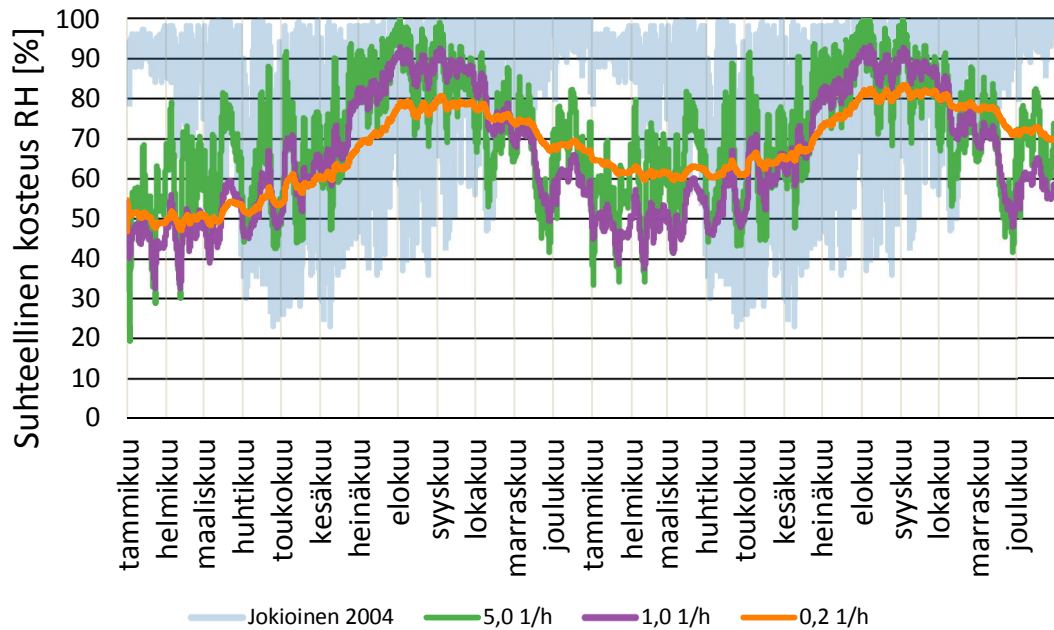
**Kuva 4.13.** Ryömintätilan suhteellinen kosteus avoimella pohjarakenteella, jonka sepe-  
lin permeabiliteetti oli  $1e-8 \text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



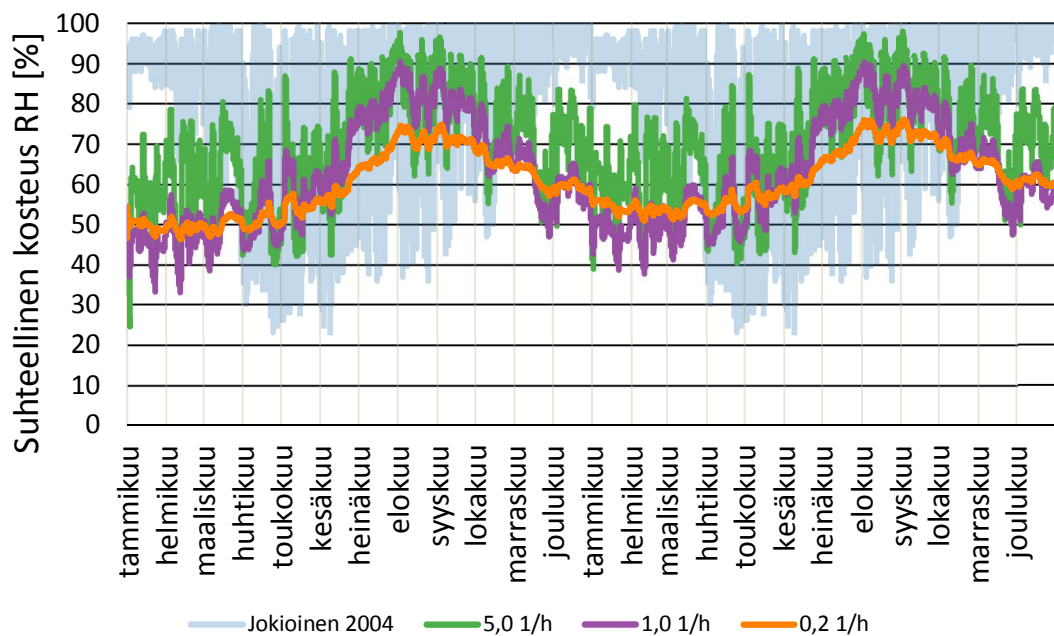
**Kuva 4.14.** Ryömintätilan suhteellinen kosteus avoimella pohjarakenteella, jonka sepe-  
lin permeabiliteetti  $1e-9 \text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

Verratessa eri permeabiliteettien omaavien avointen pohjarakenteiden ryömintätilan suhteellisia kosteuksia toisiinsa, on huomattavissa, että avoimessa pohjarakenteessa, jossa sepe-  
lin permeabiliteetti on  $1e-8 \text{ m}^2$ , ryömintätilan suhteellinen kosteuden arvot ovat ma-  
talampia kuin sepe-  
lin permeabiliteetin ollessa  $1e-9 \text{ m}^2$ .

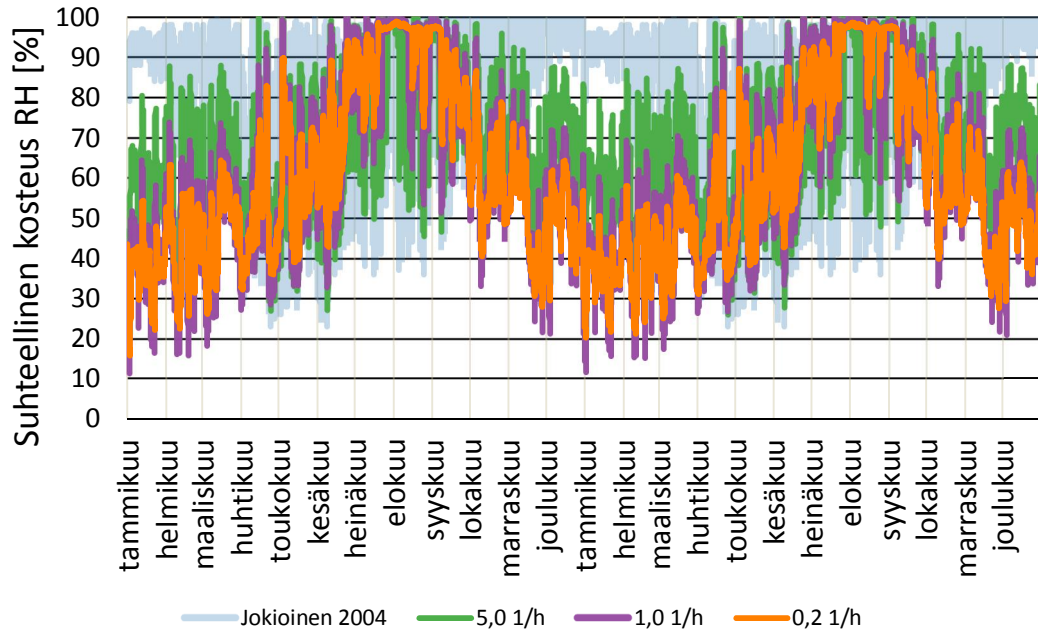
Kuvissa 4.15 – 4.18 ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden ryömintätilan suhteellisen kosteuden käyttäytymistä tarkasteltavalla 2 vuoden ajanjaksolla.



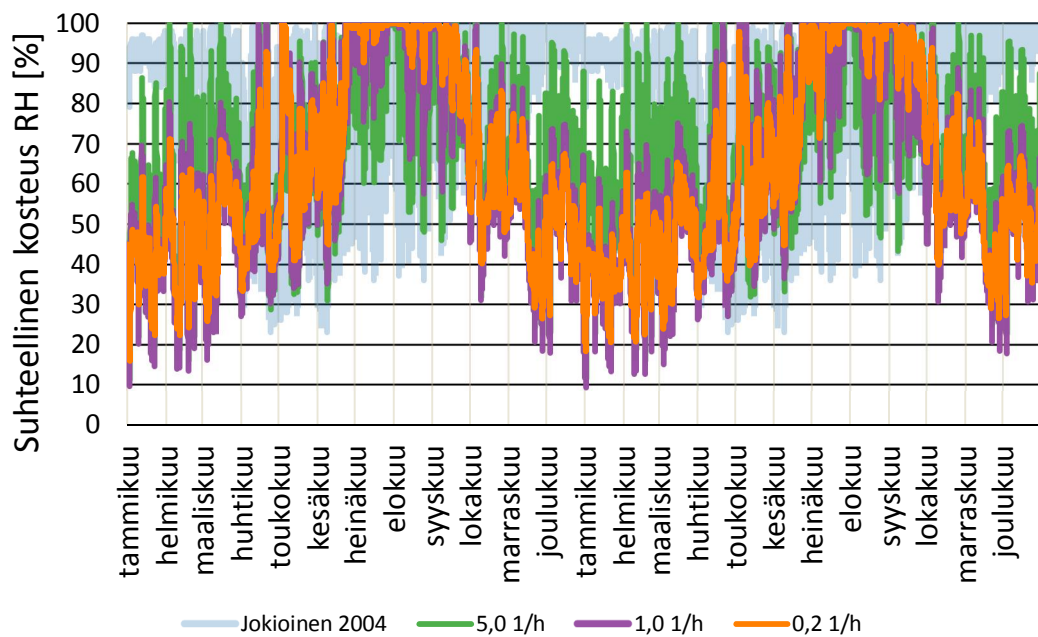
**Kuva 4.15.** *Betoni-rakenteella ilmatiivistetyn pohjarakenteen ryömintätilan suhteellinen kosteus eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.*



**Kuva 4.16.** *Betoni + kova lämmöneriste-rakenteella ilmatiivistetyn ryömintätilan suhteellinen kosteus eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.*



**Kuva 4.17.** Kova lämmöneriste-rakenteella ilmatiivistetyn ryömintätilan suhteellinen kosteus eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



**Kuva 4.18.** Höyrynsulkumuovi-rakenteella ilmatiivistetyn ryömintätilan suhteellinen kosteus eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

Betoni- ja betoni + kova lämmöneriste-rakenteilla (kuvat 4.15 ja 4.16) ilmatiivistetyn ryömintätilojen suhteellisten kosteuksien vaihtelut ovat huomattavasti maltillisemmat kuin kova lämmöneriste- ja höyrynsulkumuovi-rakenteilla (kuvat 4.17 ja 4.18) ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden. Tosin betoni- ja betoni + kova lämmöneriste-rakenteisten ryömintätilojen suhteellisten kosteuksien arvot jäävät talvikuukausina korkeammalle tasolle kuin

kova lämmöneriste- ja höyrynsulkumuovi-rakenteilla. Talvikuukausina on erityisesti huomattavissa ryömintätilan betonilaatan kosteudensitomiskyky, joka pitää ryömintätilan suhteellisen kosteuden arvoja talvella korkealla.

Ryömintätilan suhteellisen kosteuden kuvista on havaittavissa, että suuremmilla korvausilmavirran suuruuksilla ryömintätilan suhteellinen kosteus on lähempänä ulkoilman (Jokioinen 2004) olosuhteita kuin pienimmillä korvausilmavirroilla. Avoimen ja ilmatiivistettyjen rakenteiden ryömintätilojen suhteelliset kosteudet eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa erisuuruisten ilmanvaihtuvuuksien takia.

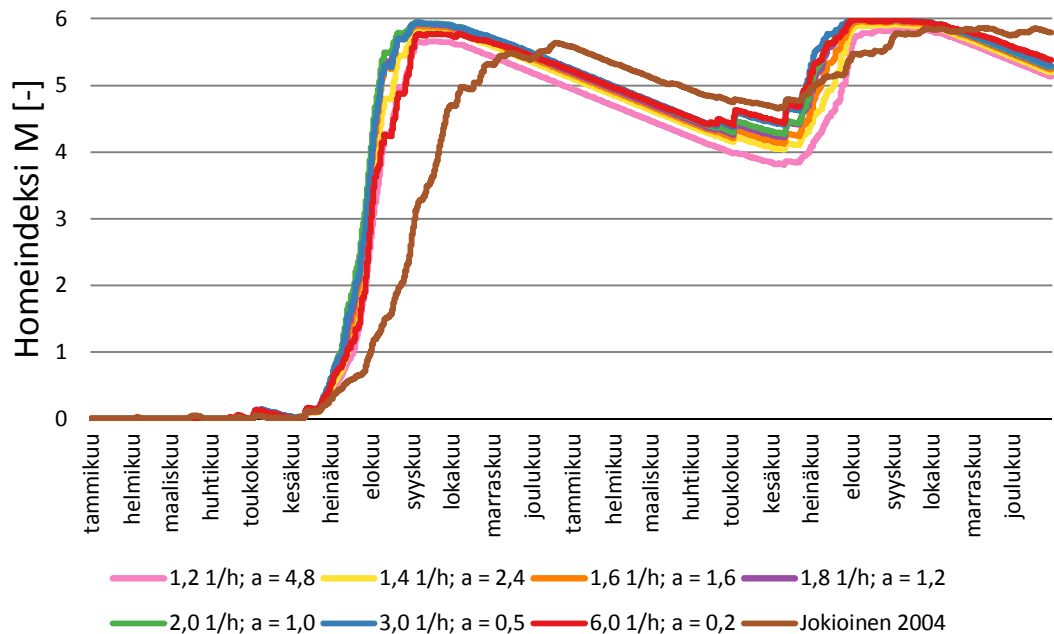
### 4.3 Ryömintätilan homeindeksit

Tässä luvussa esitellään avoimella ja ilmatiivistetyillä pohjarakenteilla toteutettujen alipaineistettujen tuuletettujen ryömintätilojen mallien simuloinnista saatuja Suomalaisen homemallin homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 ja HHL3 saatuja homeindeksin tuloksia. Homeindeksin tulokset laskettiin perustuen luvussa 4.2 esitettyihin lämpö- ja kosteusolosuhteiden tuloksiin. Luvussa 4.3.1 esitetään homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 ja luvussa 4.3.2 homeutumisherkkyyssluokalla HHL3 saatuja homeindeksin tuloksia.

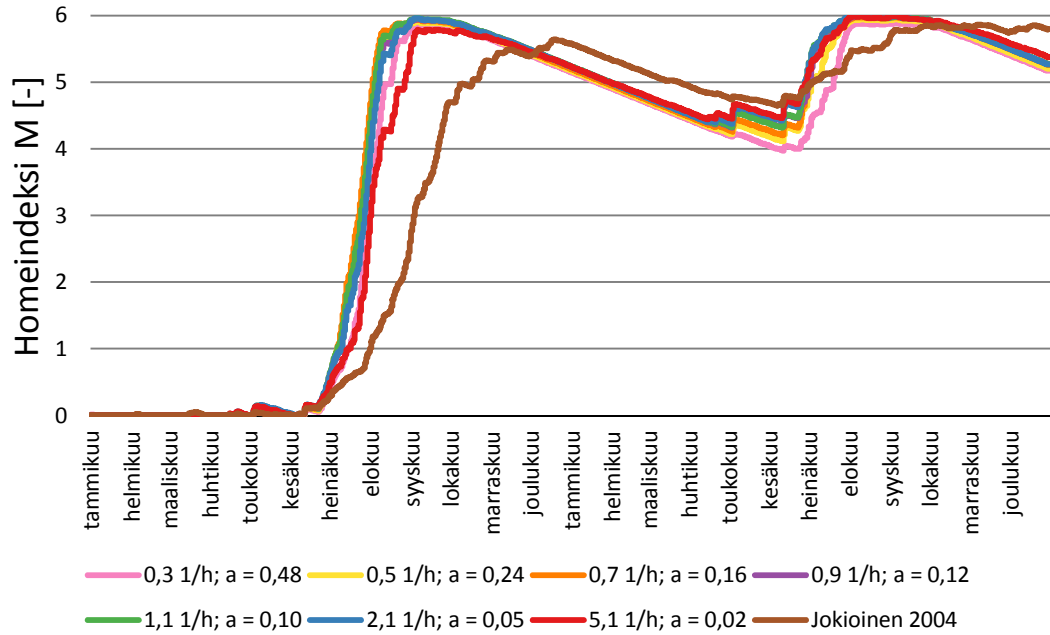
Ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden kokonaisilmavaihtuvuus muodostuu ainoastaan korvausilmaventtiilin kautta tulevasta korvausilmavirrasta. Avointen pohjarakenteiden tapauksilla ryömintätilaan virtaa korvausilmavirran lisäksi sepelin kautta ilmaa, jolloin ryömintätilan kokonaisilmavaihtuvuus on suurempi kuin ilmatiivistetyillä tapauksilla. Avointen pohjarakenteiden ilmavirtojen (korvausilmavirta ja sepelin kautta tuleva ilmavirta) suuruutta sekä niiden keskinäistä suhdetta (a-kerroin) on tarkemmin esitetty tarkemmin luvun 3.4.2 taulukoissa 3.7 ja 3.8.

#### 4.3.1 Homeutumisherkkyyssluokka HHL1

Kuvissa 4.19 ja 4.20 on esitetty avoimen pohjarakenteen simuloinnin pohjalta saatuja Suomalaisen homemallin homeindeksin tuloksia homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 tarkastellulla 2 vuoden ajanjaksolla.



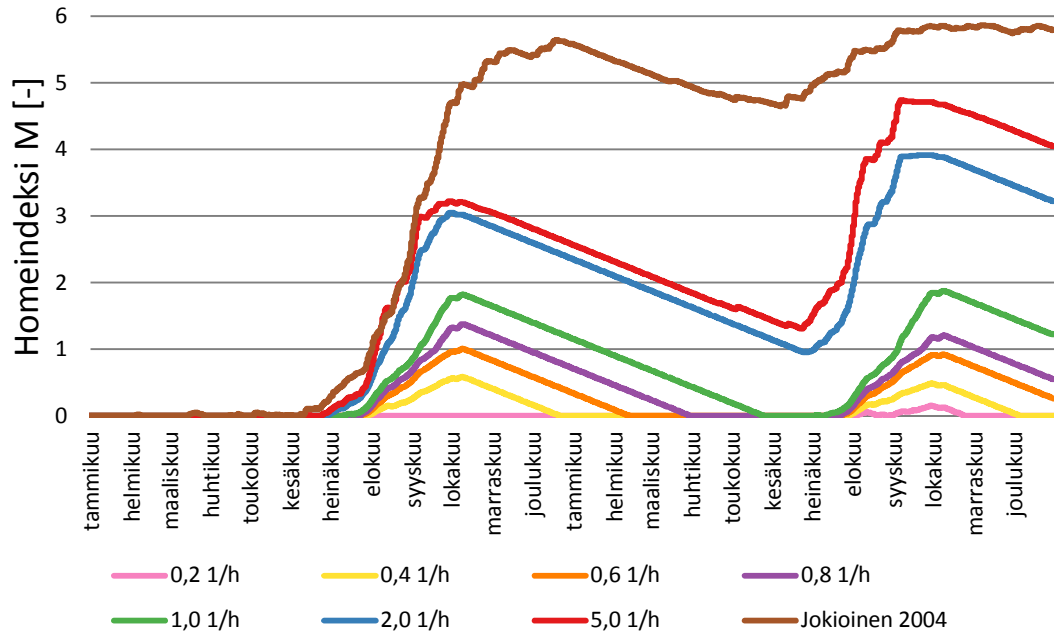
**Kuva 4.19.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL1, avoin pohjarakenne, permeabiliteetti  $1\text{e-}8\text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



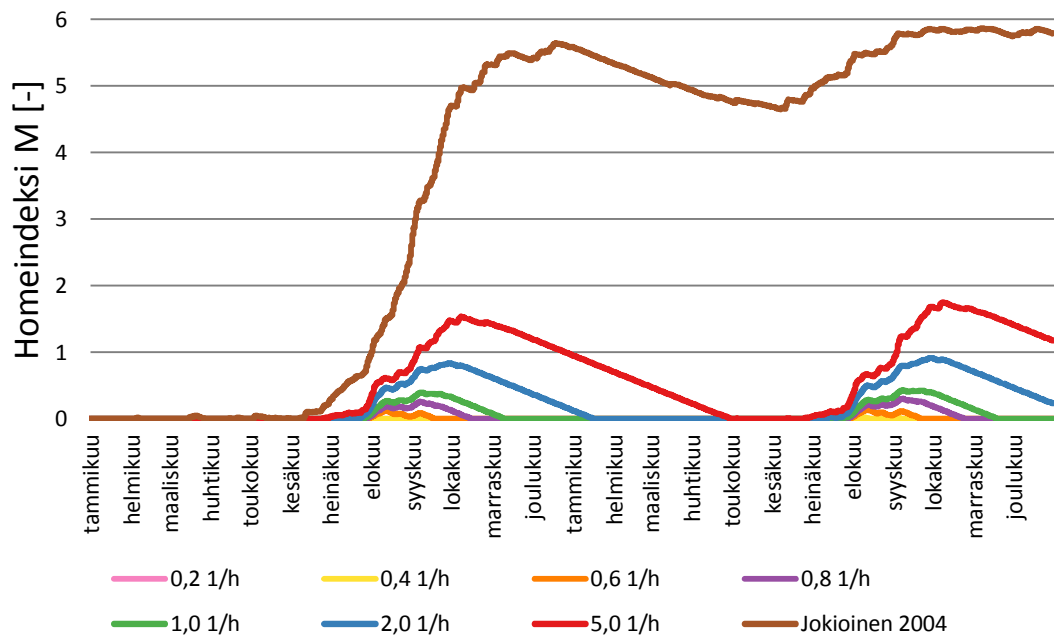
**Kuva 4.20.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL1, avoin pohjarakenne, permeabiliteetti  $1e-9 \text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

Suurempien sepelin kautta tulevien ilmavirtojen tapauksissa sepelin permeabiliteetin ollessa  $1e-8 \text{ m}^2$  homeindeksien arvot vaihtelivat hieman enemmän ja olivat myös matalampia kuin permeabiliteetin ollessa  $1e-9 \text{ m}^2$ . Tarkasteltaessa ryömintätilan olosuhteita homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 eli tilanteessa, jossa ryömintätilaan pääsee orgaanista ainetta, homeindeksin saamat arvot olivat homeen kasvun alettua jatkuvasti hyvin korkealla tasolla ( $\geq 4$ ) (kuvat 4.19 ja 4.20). Tulos ei ole rakennusfysikaalisesti hyväksyttävää, koska todennäköisesti avoin pohjarakenne molemmilla sepelin permeabiliteeteilla ( $1e-8 \text{ m}^2$  ja  $1e-9 \text{ m}^2$ ) johtaa voimakkaaseen homeen kasvuun materiaalien pinnoilla.

Kuvissa 4.21 – 4.24 on esitetty ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden simuloinnin pohjalta saatuja Suomalaisen homemallin homeindeksin tuloksia homehtumisherkkyyksiluokalla HHL1 tarkastellulla 2 vuoden ajanjaksolla.

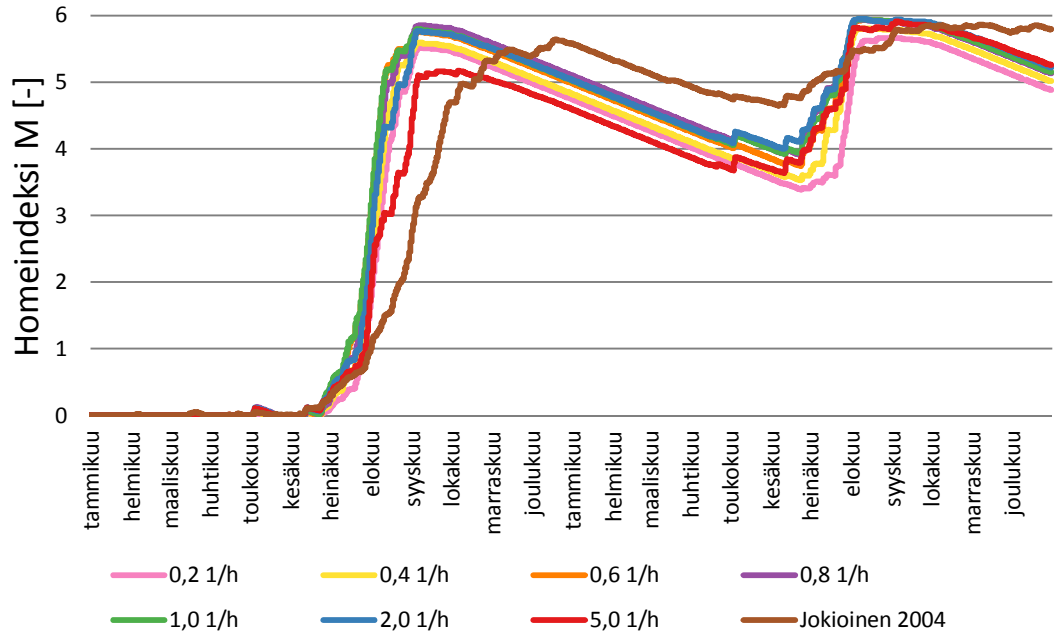


**Kuva 4.21.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL1, betoni, eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

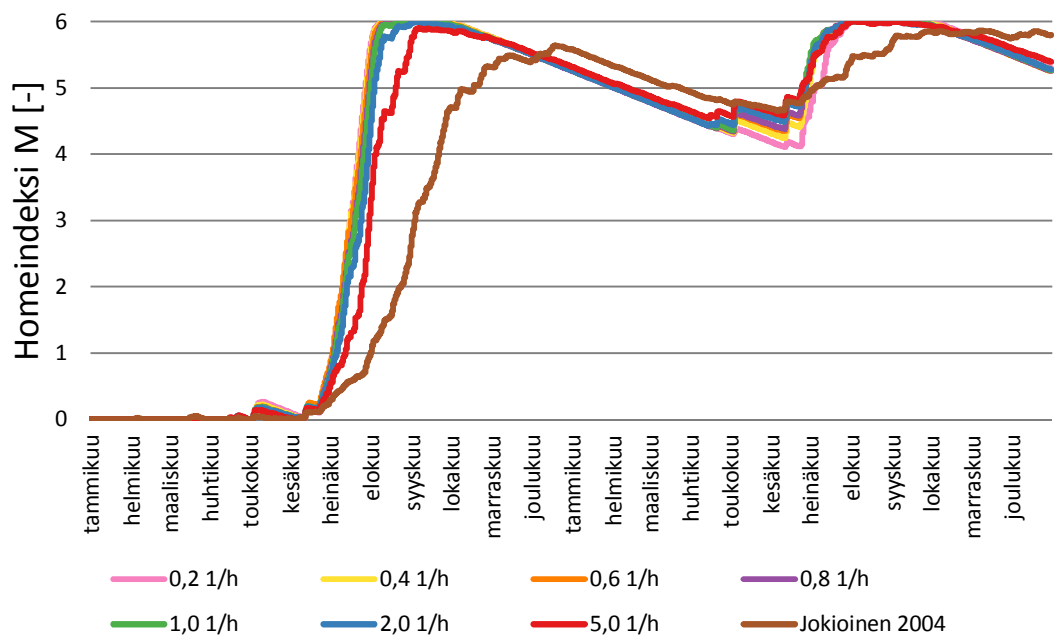


**Kuva 4.22.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL1, betoni + kova lämmöneriste, eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.





**Kuva 4.23.** Ryömintätilan homeindeksi, HHLI, kova lämmöneriste, eri kokonaisilma- vaihtuvuuksien arvoilla.



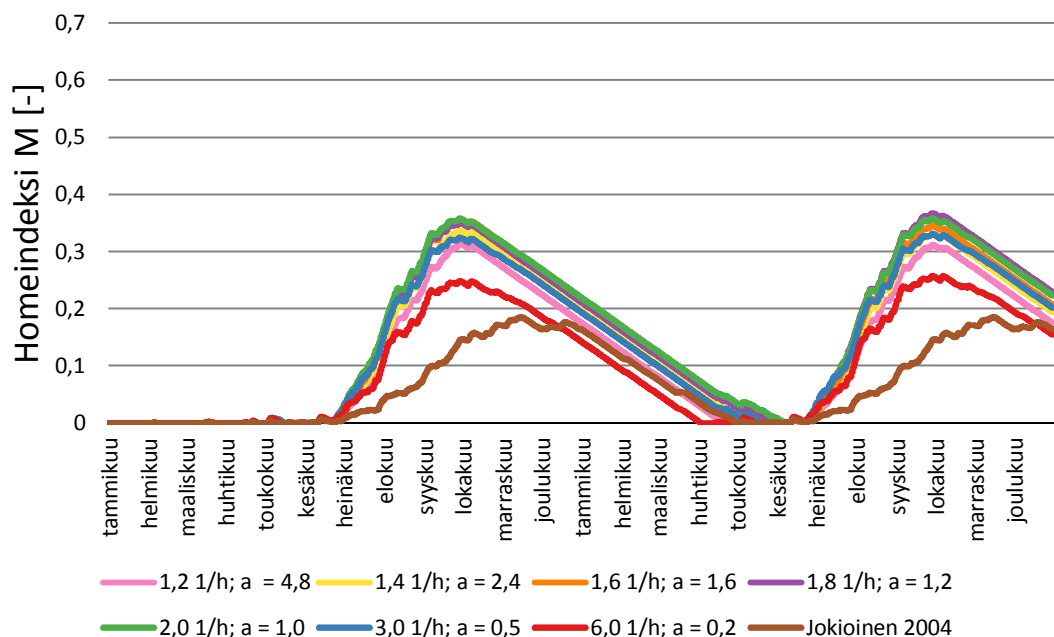
**Kuva 4.24.** Ryömintätilan homeindeksi, HHLI, höyrynsulkumuovi, eri kokonaisilma- vaihtuvuuksien arvoilla.

Avoimen pohjarakenteiden sekä kova lämmöneriste- ja höyrynsulkumuovi- tapauksissa homeindeksien kasvunopeus on nopeampaa kuin ulkoilman olosuhteilla tarkastellun homeindeksin (kuvat 4.23 ja 4.24), kun taas betoni + kova lämmöneriste-tapauksissa homeindeksien kasvu on hitaampaa kuin ulkoilman olosuhteilla tarkastellun homeindeksin kasvu (kuvat 4.21 ja 4.22)

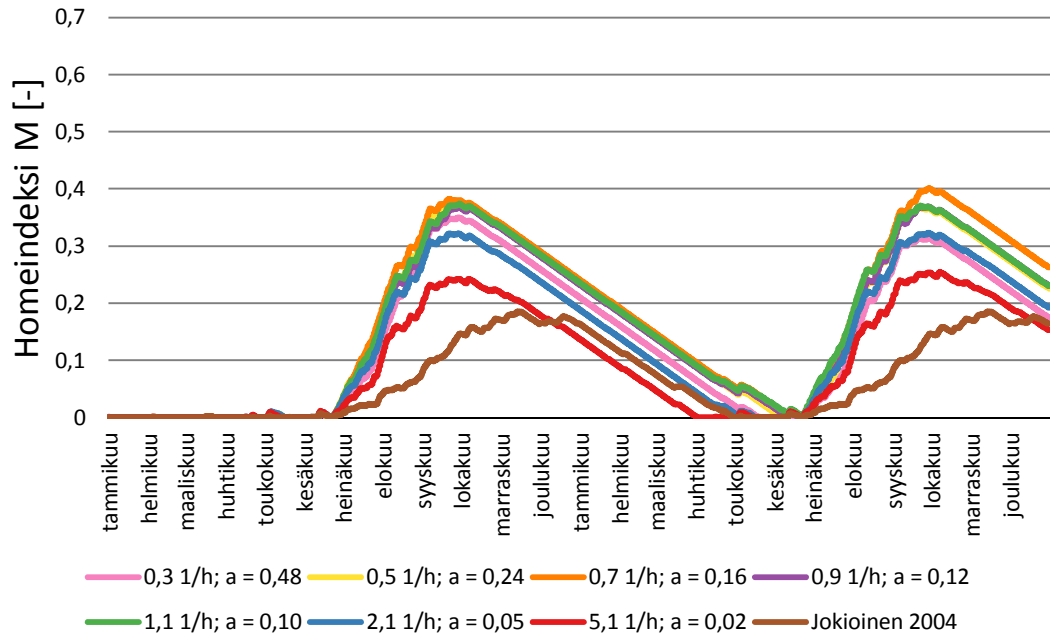
Tarkasteltaessa ilmatiivistettyjä pohjarakenteita homehtumisherkkyyssluokalla HHL1, riippuen tarkasteltavasta rakenteesta ja korvausilmavirran suuruudesta, suurin osa homeindekseistä ylitti sallitun raja-arvon 1 (kuvat 4.21 – 4.24). Kovalla lämmöneristeellä ja höyrynsulkumuovilla tulokset eivät ole rakennusfysikaalisesti hyväksyttäviä, koska todennäköisesti kyseiset rakenteet johtavat voimakkaaseen homeen kasvuun (kuvat 4.23 ja 4.24). Betonilla ilmatiivistetty pohjarakenne ilmanvaihtuvuuksilla 2,0 l/h ja 5,0 l/h johtaa homeindeksien perusteella todennäköisesti kohtalaiseen homeen kasvuun (kuva 4.21). Betonilla ilmatiivistetty pohjarakenne ilmanvaihtuvuuksilla 0,8 l/h ja 1,0 l/h sekä betoni + kova lämmöneriste-ilmatiivistetyllä pohjarakenteella ilmanvaihtuvuudella 5,0 l/h toteutetut ilmatiivistetyt pohjarakenteet johtavat homeindeksien perusteella todennäköisesti vähäiseen homeen kasvuun (kuvat 4.21 ja 4.22). Muilla ilmajähtyvyyksillä betoni sekä betoni + kova lämmöneriste-rakennusratkaisuissa homeindeksien arvot eivät nousseet yli 1 (kuvat 4.21 ja 4.22), joten todennäköisesti kyseisillä rakennusratkaisuilla ja ilmanvaihtuvuuksilla ryömintätilassa ei esiinny homeen kasvua.

### 4.3.2 Homehtumisherkkyyssluokka HHL3

Kuvissa 4.25 ja 4.26 on esitetty avoimen pohjarakenteen simuloinnin pohjalta saatuja homeinmallin homeindeksien tuloksia homehtumisherkkyyssluokalla HHL3 tarkastellulla 2 vuoden ajanjaksolla.



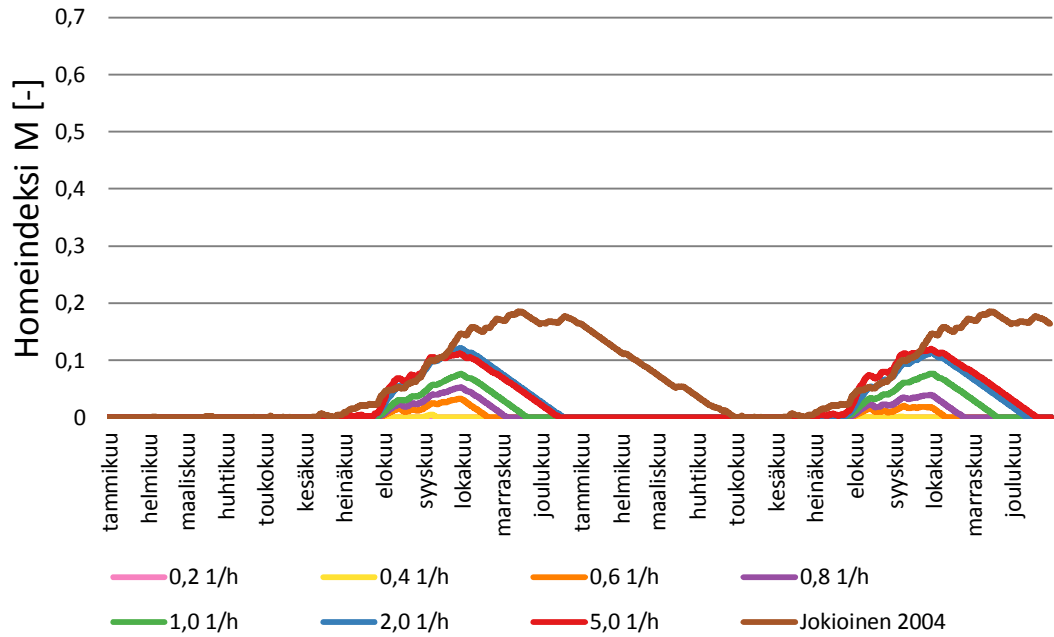
**Kuva 4.25.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL3, avoin pohjarakenne, permeabiliteetti 1–8 m<sup>2</sup>, eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



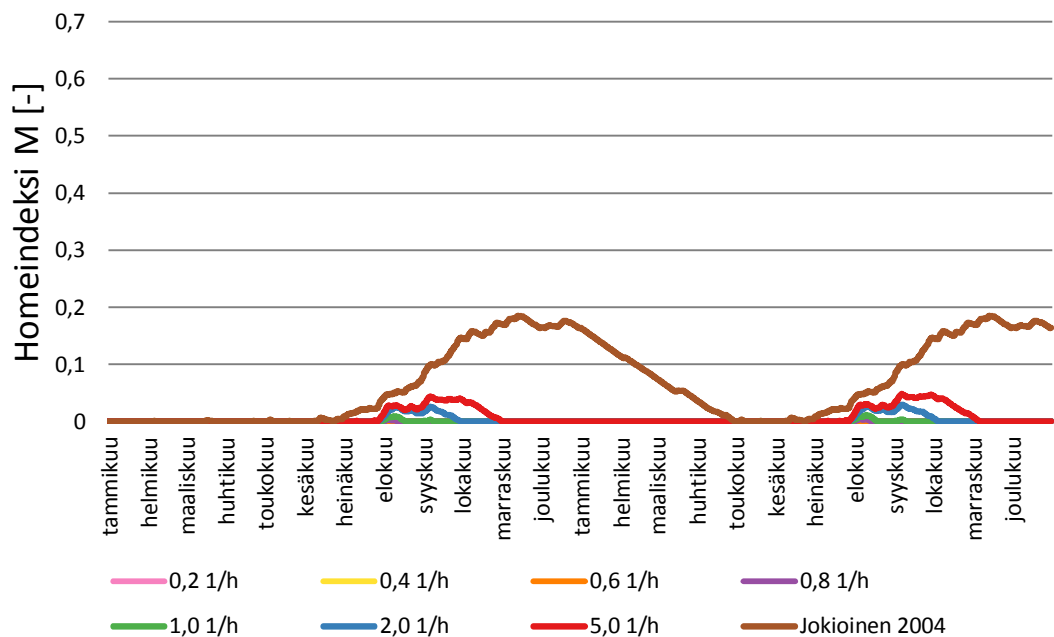
**Kuva 4.26.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL3, avoin pohjarakenne, permeabiliteetti  $1e-9 \text{ m}^2$ , eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.

Suurempien maan kautta tulevien ilmavirtojen tapauksissa permeabiliteetilla  $1e-8 \text{ m}^2$  homeindeksien arvot olivat hieman matalampia kuin permeabiliteetin ollessa  $1e-9 \text{ m}^2$ . Ryömintätilan homehtumisherkkyysluokan ollessa HHL3, joka vastaa orgaanisesta aineesta puhtaita ryömintätilan pintoja, homeindeksien arvot pysyvät tällöin alle sallitun raja-arvon 1 molemmilla sepelin permeabiliteetin arvoilla (kuvat 4.25 ja 4.26). Näin ollen homeen kasvu ei ole todennäköistä ryömintätilassa.

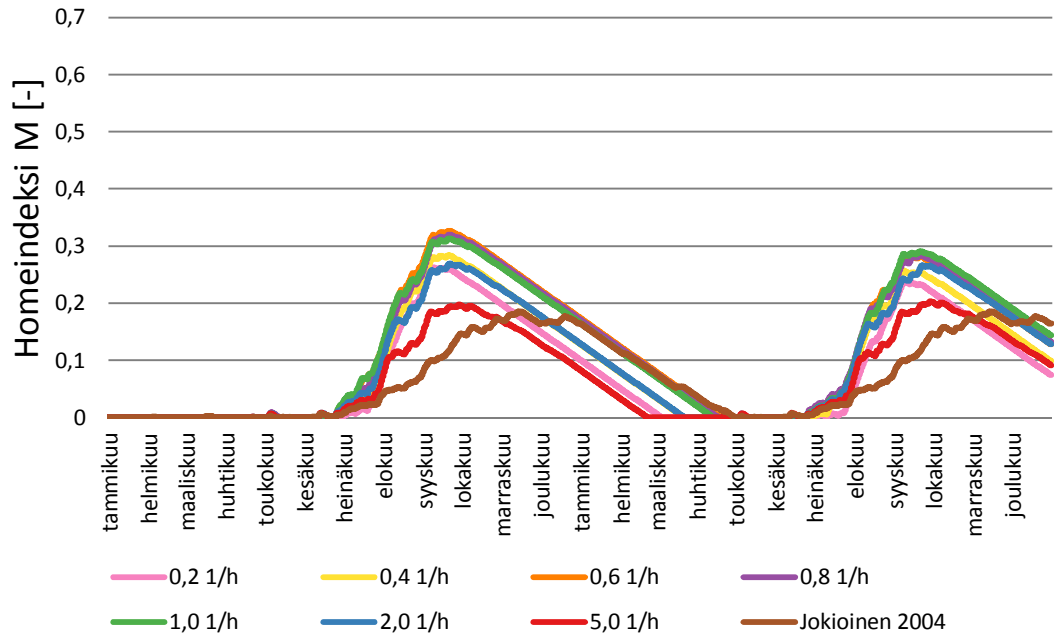
Kuvissa 4.27 – 4.30 on esitetty ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden simuloinnin pohjalta saatuja Suomalaisen homemallin homeindeksin tuloksia homehtumisherkkyysluokalla HHL3 tarkastellulla 2 vuoden ajanjaksolla.



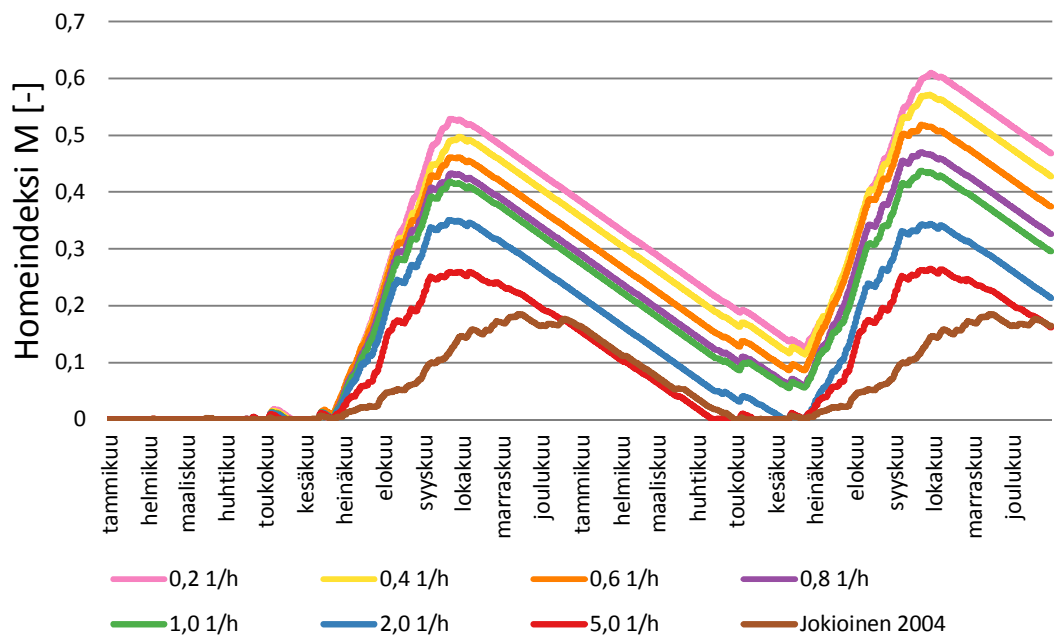
**Kuva 4.27.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL3, betoni, eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



**Kuva 4.28.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL3, betoni + kova lämmöneriste, eri kokonaisilmavaihtuvuuksien arvoilla.



**Kuva 4.29.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL3, kova lämmöneriste, eri kokonaisilma- vaihtuvuuksien arvoilla.



**Kuva 4.30.** Ryömintätilan homeindeksi, HHL3, höyrynsulkumuovi, eri kokonaisilma- vaihtuvuuksien arvoilla.

Avoimien pohjarakenteiden (kuvat 4.25 ja 4.26) sekä kova lämmöneriste- ja höyrynsul- kumuovi-tapauksissa (kuvat 4.29 ja 4.30) homeindeksien kasvu oli nopeampaa kuin ul- koilman olosuhteissa, kun taas betoni ja betoni + kova lämmöneriste-tapauksissa homein- deksien kasvu oli hitaampaa kuin ulkoilman olosuhteilla tehdyn homeindeksin kasvu (ku-

vat 4.27 ja 4.28). Tarkasteltaessa orgaanisesta aineesta puhdasta tilaa, jonka homehtumis-herkkyysluokka on HHL3, kaikilla eri ilmatiivistysvaihtoehdoilla ja eri ilmavaihtuvuuk-silla toteutetut maapohjan ilmatiivistyksien homeindeksit pysyivät hyväksyttävän rajan alla eli olivat alle 1 (kuvat 4.27 – 4.30). Näin ollen homeen kasvu ei ole todennäköistä ryömintätilassa.

#### 4.4 Mallinnuksen virhelähteitä

Tulosten luotettavuutta voi arvioida aikaisemmin käsiteltyjen yksinkertaistusten ja tässä luvussa esitettävien yksinkertaistuksien ja oletusten perusteella. Tässä luvussa käydään läpi mallinnuksessa tehdyt suurimmat yksinkertaistukset. Virhelähteiden suuren lukumäärän takia työssä ei kuitenkaan oteta tarkemmin kantaan eri virhelähteiden vaikutuk-sista tuloksiin. Työn tulosten soveltaminen todelliseen rakennukseen tulee arvioida ta-pauskohtaisesti. Tarkempi lähestyminen vaatisi suunnattoman laskentatehon, esimerkiksi tuulen vaikutuksen ja ryömintätilan virtauskentän selvittämistä varten, ja sellaisia lähtö-tietoja, joita ei välttämättä ole löydettävissä kirjallisuudesta, kuten esimerkiksi sepelin dynaaminen kosteuskapasiteetti.

Ulko-olosuhteissa ei otettu huomioon tuulen vaikutusta ryömintätilan paine-eroon, aurin-gon säteilylämmönsiirron vaikutusta perusmuuriin eikä sateen vaikutusta sepelin kosteu-den määrään. Pakkaskauden vaikutuksia ei ole myöskään otettu huomioon kaikilta osin mallissa. Pakkaskaudesta johtuvia muutoksia ovat esimerkiksi sepelin jäätyminen ja rou-tiintuminen sekä maanpinnan lumipeite ja niiden vaikutukset lämpö-, kosteus-, ja virtaus-tekniisiin tarkasteluihin.

Kokonaismallin jakamisesta osamalleihin aiheutuu myös virhettä. Tällaisia virhelähteitä olivat esimerkiksi todellisen rakennuksen nurkka-alueiden huomioon ottaminen tehollisen piirin avulla sekä eri ulottuvuuksien käyttö mallintamisessa. Ryömintätilan OD-simu-loinnin tuloksina saatujen ryömintätilojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot eivät ottaneet huomioon rakennuksen todellista muotoa. Malli oletti, että kaikkialla suorakai-teen muotoisessa rakennuksessa vallitsi OD-mallin simuloinnin tuloksena saadut olosuh-teet. Todellisuudessa esimerkiksi perusmuurissa tapahtuvan lämmönsiirron takia ryömin-tätilan ilman lämpötila on mahdollisesti erilainen perusmuurin vieressä kuin keskiosan lämpötila.

Fysikaalisten ilmiöitten mallintamisessa jouduttiin tekemään yksinkertaistuksia mallin-nusteknisistä syistä. Tällaisia yksinkertaistuksia olivat esimerkiksi se, että sepelillä ei ole-tettu olevan kosteuskapasiteettia, ja että ryömintätilan säteilylämmönsiirto oletettiin mer-kityksettömäksi verrattuna johtumalla ja konvektiolla siirtyvään lämpöön ryömintätilojen pintojen verrattain pienten lämpötilaerojen takia. Simuloinnissa COMSOL Multiphy-sicsin käyttämät laskentamenetelmät myös lisäsivät omalta osaltaan laskennan epätark-kuutta (luku 2.7).

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen aikana tehtyjä havaintoja ryömintätilan rakenteiden tiiviyydestä sekä simulointituloksiin perustuvia johtopäätöksiä. Luvun lopuksi annetaan suosituksia eri rakenneratkaisuiden ilmanvaihtuvuuksille. Poistoilmanvaihdolla alipaineistetuille ryömintätilaisille tuulettuville alapohjille annettavat suositukset riippuvat rakenneratkaisuista, käytettävistä rakennusmateriaaleista sekä ryömintätilaan pääsevän orgaanisen aineesta. Suosituksissa otettiin huomioon myös poistoilman suuruus ja sen vaikutus rakennuksen alapohjan kautta tapahtuviin lämpöhäviöihin. Vuodenaikojen vaihtelun vaikutuksia ryömintätilan olosuhteisiin ei käsitellä tarkemmin tässä työssä.

Ryömintätilojen kosteus- ja lämpöolosuhteita on tutkittu aikaisemmin Suomen olosuhteissa (Kurnitski 2000; Airaksinen 2003). Suomessa voimassaolevat yleiset suositukset ei-alipaineistetun avoimen pohjarakenteen omaavalle ryömintätilaisen alapohjan ilmanvaihtuvuudelle ovat 0,5 l/h (Airaksinen 2003; LVI 06-40064 2004) ja 0,5 – 1 l/h (RIL 107 2012, s. 60). Suositukset (Airaksinen 2003; LVI 06-40064 2004) ovat rakenteille, jonka maanpinta on lämmöneristetty. Suositus (RIL 107 2012, s. 60) ei ota kantaa maanpohjan pinnan lämmöneristykseen. Aihetta on myöhemminkin tutkittu (Vinha et al. 2013). Tutkimuksen mukaan suositellut ilmanvaihtuvuuden arvot ovat 0,5 – 1 l/h erilaisille rakenneratkaisuille. Annetuissa suosituksissa ei ole otettu tarkemmin kantaa ryömintätilan maanpohjan lisäksi ryömintätilan rakenneratkaisuihin, ryömintätilan tiiveyteen tai rakennusmateriaaleihin. Aikaisempien suositusten pohjalla on laskentatarkastelujen lisäksi myös mittaustuloksia.

### 5.1 Ryömintätilan ilmanvaihdon hallinta

Ryömintätilan hallitulla ilmanvaihdolla pyritään estämään ryömintätilassa olevien epäpuhtauksien päätyminen alapohjarakenteiden kautta ryömintätilan yläpuolisiin tiloihin. Ryömintätilan alipaineistaminen kohtuullisilla poistoilmavirroilla vaatii onnistuakseen tiiviin ryömintätilan rakenteet. Tutkimuksen aikana huomattiin sepelin permeabiliteetilla ja maarakenteella olevan suuri vaikutus alipaineistetun tuulettuvan ryömintätilaisen alapohjan tiiveyteen. Tutkimuksessa oletettiin muiden rakenteiden olevan täysin ilmatiiviitä. Todelliset rakenteet eivät kuitenkaan ole tiiviitä, jolloin ryömintätilaan päätyy hallitsemattomia ilmavirtauksia sepelin kautta tulevan ilmavirran lisäksi.

Ryömintätilaan tuleva ilmavirta on 10 kertaa suurempi permeabiliteetin ollessa  $1e-8 \text{ m}^2$  kuin permeabiliteetin ollessa  $1e-9 \text{ m}^2$  (taulukot 3.7 ja 3.8). Perustamiskaivannon ja vaakasuuntaisen routaeristeen ulkoreunan välisen etäisyyden todettiin vaikuttavan myös suu-

resti sepelin kautta ryömintätilaan virtaavaan ilmavirran suuruuteen. Suuremman etäisyyden omaavilla rakenteilla on suurempi virtauspinta-ala kuin pienemmän etäisyyden omaavilla rakenteilla. Suuremman virtauspinta-alan kautta virtaa enemmän ilmaa.

Korvausilmaventtiilin kautta tulevaa ilmavirtaa voitiin hallita säädettävien korvausilmaventtiilien avulla. Sepelin kautta tullutta ilmavirtaa ei voitu hallita tutkituissa tilanteissa, koska ryömintätilan alipaine pysyi vakiona. Korvausilmaventtiilin kautta tulevan korvausilmavirran vaikutus ryömintätilan olosuhteisiin pieneni sepelin kautta tulevan ilmavirran ja muiden rakenteiden vuotoilmavirtojen suuruuden kasvaessa. Ilmiö on havaittavissa esimerkiksi a-kertoimen (yhtälö 3.29) pienenemisenä ryömintätilan lämpötilakuvissa 4.7 ja 4.8 sekä suhteellisen kosteuden kuvissa 4.13 ja 4.14.

Ryömintätilan alipaineistuksen ja olosuhteiden hallinta tiiviillä rakenteilla on helpompaa, koska alipaineen muodostaminen ja olosuhteiden hallinta vaativat pienemmän poistoilmavirran. Pienempi poistoilmavirta kuluttaa vähemmän sähköenergiaa ja vaatii pienemmän puhallustehon. Samalla myös alapohjan lämpöhäviöt pienenevät. Näin ollen ryömintätilan hallitun ilmavaihdon toteuttaminen onnistuu parhaiten ilmatiiviillä ryömintätilan pohjarakenteilla.

## 5.2 Avoimen pohjarakenteen homeindeksit

Avoimen pohjarakenteen tapauksissa ryömintätilan puhtaudella oli homeen kasvun riskiin kannalta suuri merkitys. Vertailtaessa homeutumisherkkyyssuokalla HHL1 tehtyjä permeabiliteettien  $1e-8 \text{ m}^2$  ja  $1e-9 \text{ m}^2$  laskentatapauksia keskenään, ei homeindeksillä arvioitaessa ollut laskentatapauksen välillä havaittavissa merkittävä eroa (kuvat 4.19 ja 4.20). Kuitenkin tarkasteltaessa avointa pohjarakennetta molemmilla tutkituilla permeabiliteetin arvoilla kestävämmällä homeutumisherkkyyssuokalla HHL3 (kuvat 4.25 ja 4.26), permeabiliteetin  $1e-9 \text{ m}^2$  homeindeksin arvot olivat enemmän hajallaan ja suurempia kuin permeabiliteetin  $1e-8 \text{ m}^2$  arvot. Tämän perusteella sepelin permeabiliteetin  $1e-8 \text{ m}^2$  omaavaa avointa pohjarakennetta voidaan pitää parempana vaihtoehtona.

Enemmän ilmaa läpäisevämmän sepelin, jonka permeabiliteetti oli  $1e-8 \text{ m}^2$ , matalammat homeindeksin arvot aiheutuivat mahdollisesti nopeammasta ilman virtausnopeudesta sepelissä. Hitaamman ilmavirtauksen mukana kulkeutui enemmän kosteutta ryömintätilaan, koska hitaammin virtaavaan ilmaan ehtii sitoutua enemmän kosteutta sepelistä, jossa perusmaan 100 % RH suhteellisessa kosteudessa oleva pinta toimii kosteuslähteenä (luku 3.2.5). Hitaasti virtaava ilma ehti myös mahdollisesti lämmitä, jolloin ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuus ja potentiaalierot kasvavat. Suuremman potentiaalieron seurauksena kosteuden siirtyminen ilmaan kasvaa (luku 2.2). Tämän perusteella ilmaa läpäisevämpi sepeli, jonka permeabiliteetti on  $1e-8 \text{ m}^2$ , on parempi vaihtoehto. Tutkimuksessa ei selvitetty avoimen pohjarakenteen ryömintätilassa olevan kosteutta sitovan materiaalin, kuten esimerkiksi ryömintätilan sepelin päälle levitetyn kevytsorakerroksen, vaikutusta ryömintätilan kosteus- ja lämpöolosuhteisiin.



### 5.3 Ilmatiivistettyjen pohjarakenteiden homeindeksit

Ilmatiivistetyn pohjarakenteen omaavan ryömintätilan puhtaudella oli suuri merkitys homeen kasvun riskin kannalta. Arvioitaessa ilmatiivistetyn pohjarakenteen toimivuutta, paras rakenneratkaisu homeindeksin perusteella niin HHL1 ja HHL3 tarkasteltuna oli betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS)-rakenne (HHL3 kuvat 4.28 ja HHL1 4.22) ja seuraavaksi paras rakenneratkaisu oli betoni 50 mm-rakenne (HHL3 kuvat 4.27 ja HHL1 4.21). Molemmilla betonirakenteilla homehtumisherkkyyksiluokilla HHL1 ja HHL3 homeindeksit jäivät matalammiksi kuin ulkoilman olosuhteilla simuloidun ryömintätilan homeindeksi. Kova lämmöneriste- ja höyrynsulkumuovi-rakenteet olivat huonoimmat rakenneratkaisut tarkasteltuina sekä homehtumisherkkyyksiluokalla HHL3 että HHL1, joilla homeindeksit olivat korkeammat kuin ulkoilman olosuhteilla simuloidun ryömintätilan homeindeksi (HHL3 kuvat 4.29 ja 4.30 ja HHL1 4.23 ja 4.24). Käytännössä tarkasteltuja betonirakenteita voidaan pitää lähes yhtä hyvinä rakenneratkaisuinä.

On kuitenkin huomattavaa, että molemmilla homehtumisherkkyyksiluokilla höyrynsulkumuovilla ilmatiivistetty pohjarakenne sai suurempia homeindeksin arvoja kuin kovalla lämmöneristeellä toteutettu ilmatiivistys (HHL3 kuvat 4.29 ja 4.30 ja HHL1 4.23 ja 4.24). Lisäksi höyrynsulkumuovilla toteutetun ilmatiivistyksen homehtumisherkkyyksiluokalla HHL3 homeindeksien arvot nousivat pienillä ilmanvaihtuvuuksilla toisena tarkasteluvuotena korkeammalle kuin ensimmäisenä vuotena samalla lähentyen hitaasti sallittua raja-arvoa 1. Höyrynsulkumuovilla homehtumisherkkyyksiluokalla HHL3 homeindeksin toisen vuoden maksimiarvojen kasvu lakkasi vasta ilmanvaihtuvuuksilla 2,0 l/h ja 5,0 l/h (kuva 4.30). Kovalla lämmöneristeellä homehtumisherkkyyksiluokalla HHL3 toisena tarkasteluvuotena homeindeksin arvot olivat matalammat tai pysyivät samana kaikilla ilmanvaihtuvuuden arvoilla kuin 1. tarkasteluvuotena (kuva 4.29). Tämän perusteella kovalla lämmöneristeellä toteutettua ilmatiivistysrakennetta voi pitää parempana vaihtoehtona kuin höyrynsulkumuovilla toteutettua ilmatiivistystä. Pelkän ilmatiivistyksen (höyrynsulkumuovi) vaikutusta avoimen pohjarakenteen ryömintätilan olosuhteisiin ei voida arvioida simulointitulosten pohjalta, koska simuloinnissa käytetyt avoimen ja ilmatiivistetyn pohjarakenteiden ilmanvaihtuvuudet poikkeavat lähes jokaisen arvon kohdalla toistaan.

Betonirakenteiden alhainen homeindeksi voidaan olettaa johtuvan betonin kosteus- ja lämpökapasiteetista sekä betonin hygroskooppisesta luonteesta. Betonin kosteuskapasiteetin ansiosta ryömintätilan vesihöyrypitoisuus pienenee ja suhteellisten kosteuksien vaihtelut tasaantuvat merkittävästi heikentäen homeen kasvulle edullisia olosuhteita. Betonilaatan lämpökapasiteetti tasaa ryömintätilan lämpöolosuhteita. Tarkasteltujen tapaus-ten pohjalta ei voida päätellä, kuinka merkittävä betonilaatan lämpökapasiteetti on vaikutukseltaan ryömintätilan olosuhteisiin verrattuna betonilaatan kosteuskapasiteettiin. Eri vuodenaikoina lämpö- ja kosteuskapasiteetin vaikutukset korostuvat ulkoilman olosuhteiden vaihdellessa.

Kovalla lämmöneristeellä toteutetun ilmatiivistyksen lämmöneristyskyky parantaa ryömintätilan olosuhteita verrattuna pelkkään höyrynsulkumuovilla toteutettuun ilmatiivistykseen. Lämmöneriste vähentää sepelin jäähtymistä ja lämpenemistä ryömintätilan puolelta. Samalla se vähentää sepelin ja perusmaan lämpökapasiteetin vaikutusta ryömintätilaan. Kovalla lämmöneristeellä ei mallinnettu olevan merkittävää lämpökapasiteettia. Tämän perusteella voidaan olettaa sepelin ja perusmaan suurella lämpökapasiteetilla olevan ryömintätilan olosuhteita heikentävä vaikutus.

## 5.4 Suositellut ilmanvaihtuvuudet ja rakenteet

Suosittelvat ilmanvaihtuvuudet riippuvat rakenneratkaisuista ja ryömintätilan puhtaudesta homeutumisherkkyyssluokan kautta. Suosituksia annettaessa on lisäksi myös tarkastettava hallitun poistoilmavirran suuruutta ja sen kohtuullisuutta taloudellisuuden saavuttamiseksi. Taloudellisuuden arviointi perustuu ryömintätilan lämpöhäviöihin sekä puhaltimen energiakulutuksen kasvuun poistoilmavirtojen suuruuksien kasvaessa.

Homeutumisherkkyyssluokalla HHL3 kaikki tutkitut rakenteet, niin avoin pohjarakenne kuin ilmatiivistetyt pohjarakenteet, ovat eri ilmanvaihtuvuuksien mukaisilla homeindekseillä arvioitaessa suositeltuja. Kuitenkin suurien ilmanvaihtuvuuksien (2,0 1/h ja 5,0 1/h) tapauksissa poistoilmavirtojen suuruudet voivat olla toteutettavuuden ja taloudellisuuden kannalta liian suuria, koska suuret poistoilmavirrat lisäävät puhaltimen sähköenergian kulutusta ja lisäävät samalla myös rakennuksen energiahäviötä ryömintätilan kautta.

Avoin pohjarakenne homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 ei ole homeindeksin perusteella toimiva ratkaisu, vaikka korvausilmavirrat olisivat kohtuullisia. Ilmatiivistetyissä pohjarakenteissa homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 kova lämmöneriste- ja höyrynsulkumuovi-ilmatiivistysrakenteet eivät ole myöskään toimivia korkean homeindeksinsä takia. Betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS)-pohjarakenteella homeindeksillä homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 tarkasteltuna suositellut ilmanvaihtuvuudet ovat 0,2 – 2,0 1/h. Kuitenkin ilmanvaihtuvuudella 2,0 1/h poistoilmavirran suuruus saattaa olla liian suuri taloudellisesti toteutettavaksi. Näin ollen suositellut ilmanvaihtuvuudet betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS)-rakenneratkaisulle ovat 0,2 – 1,0 1/h. Betoni 50 mm-pohjarakenteella homeutumisherkkyyssluokalla HHL1 tarkasteltuna suositellut ilmanvaihtuvuudet ovat 0,2 – 0,6 1/h, jolloin homeindeksiin perustuvilla suositelluilla ilmanvaihtuvuuksilla korvausilmavirrat eivät nouse liian suuriksi eli ne jäävät alle 2,0 1/h. Poistoilmavirta ei ole siis suosituksia rajaava tekijä. Taulukossa 5.1 on yhteenveto annetuista suosituksista.

**Taulukko 5.1.** Yhteenveto alipaineistetun ryömintätilaisen alapohjan annetuista suosituksista.

	Rakenteen suositeltavuus		Suositellut ilmanvaihtuvuudet [1/h]	
	HHL1	HHL3	HHL1	HHL3
<b>Avoimet pohjarakenteet</b>				
permeabiliteetti 1e-8 m <sup>2</sup>	ei	kyllä	-	0,2-1,0
permeabiliteetti 1e-9 m <sup>2</sup>	ei	kyllä	-	0,2-1,0
<b>Ilmatiiivistetyt pohjarakenteet</b>				
betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm	kyllä	kyllä	0,2-1,0	0,2-1,0
betoni 50 mm	kyllä	kyllä	0,2-0,6	0,2-1,0
kova lämmöneriste 70 mm	ei	kyllä	-	0,2-1,0
höyrynsulkumuovi	ei	kyllä	-	0,2-1,0

Kuitenkin energiatehokkuuden kannalta pienemmät poistoilmavirrat ovat suositeltavimpia matalampien lämmitysenergian ja puhaltimen sähköenergiankulutusten takia. Poistoilmavirran suuruus tulee kuitenkin valita tapauskohtaisesti siten, että homeen kasvulle otollisia kosteus- ja lämpöolosuhteita ei muodostu.

## 5.5 Huomioita suosituksista

Työssä saadut tulokset ovat pelkästään laskennallisesti mallintamalla saatuja arvoja. Mallinnustulosten tarkkuutta ja oikeellisuutta voi arvioida mm. julkaisun Vinha et al. (2013), jossa on vertailtu muun muassa Suomessa rakennettujen ryömintätilaisten alipaineistamattomien tuuletettujen alapohjien olosuhteiden (lämpötila, suhteellinen kosteus ja homeindeksi) mittaus- ja mallinnustuloksia. Tulosten käytännön soveltamisessa tulee ottaa huomioon teoreettisen mallin ideaalisuudet ja todellisen rakennuksen epäideaalisuudet, kuten esimerkiksi todellisen rakennuksen mahdolliset rakenteiden vuotokohdat.

Epäedullisimpien olosuhteiden simuloimista varten tutkimuksessa käytettiin kahta peräkkäistä kosteusteknisesti kriittistä Jokioinen 2004 – testivuotta (luku 3.3.2). Todellisuudessa vallitsevat olosuhteet poikkeavat kriittisistä tarkasteluolosuhteista. Todennäköistä on myös, ettei todellisuudessa ole kahta kosteusteknisesti näin kriittistä vuotta peräkkäin. Näin ollen todelliset homeen kasvun riskit poikkeavat mallinnetuista homeen kasvun riskeistä. Julkaisussa Vinha et al. (2013) on myös lisätietoa Jokioinen 2004 – testivuodesta.

Homeindeksi määritettiin ryömintätilan ilmantilan olosuhteiden arvoilla. Todellisuudessa home ei kasva ryömintätilan ilmassa, vaan jossakin siihen rajoittuvassa pinnassa. Pinnassa esiintyvät olosuhteet eivät ole aivan samat kuin ilmassa, koska olosuhteisiin vaikuttavat pintamateriaalin lämpö- ja kosteuskapasiteetti ja niistä aiheutuvat hitaammat olosuhteiden muutokset pinnan vieressä. Tämä tyypillisesti alentaa homeindeksin arvoa pinnalla ilmatilaan verrattuna.

## LÄHTEET

- Airaksinen, M. (2003), Moisture and fungal spore transport in outdoor air-ventilated crawl spaces in a cold climate, Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, LVI-labo-ratorio, Raportti A7. Espoo.
- Asumisterveysohje (2003), Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijä, Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö. Helsinki. 93s.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011), Thermodynamics: An engineering approach (7th ed. in SI units.), Singapore: McGraw-Hill. 978p.
- COMSOL Multiphysics (2016a), COMSOL Multiphysics Chemical Reaction Engineering Module User's Guide 5.2a., COMSOL AB
- COMSOL Multiphysics (2016b), COMSOL Multiphysics Heat Transfer Module User's Guide 5.2a., COMSOL AB
- COMSOL Multiphysics (2016c), COMSOL Multiphysics Overview, COMSOL AB. Verkkosivu. Saatavissa: <https://www.COMSOL.com/COMSOL-multiphysics>, viitattu 12.11.2016.
- COMSOL Multiphysics (2016d), COMSOL Multiphysics Reference Manual 5.2a, COMSOL AB
- Coutelieiris, F.A. & Delgado, J.M.P.Q. (2012), Transport Processes in Porous Media, 2012th edn, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin/Heidelberg. 236p.
- Hagentoft C-E. (2001), Introduction to building physics. Sweden, Studentlitteratur, Lund. s. 422.
- Hens, H. S. L. C. (2012), Building physics - heat, air and moisture: Fundamentals and engineering methods with examples and exercises, Berlin: Ernst & Sohn. s. 270.
- Hine, R. & Martin, E.(Eds.) (2016), cohesion. A Dictionary of Biology.: Oxford University Press. Retrieved 2 Mar. 2017, Saatavissa: <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780198714378.001.0001/acref-9780198714378-e-940>.
- Hukka, A. & Viitanen, H. (1999), A Mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material, Wood Science and Technology, Vol. 33, pp. 475-485.
- Huttunen P. (2014), Tuuletetun teräsprofiilirunkoisen suurjulkisivuelementin rakennusfysikaalinen toiminta. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. 84s. + 26 liites.

Kuntotutkimusopas (2016), Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus (Toim. Miia Pitkäranta), Ympäristöministeriö. Saatavilla; <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4626-8>.

Kurnitski, J. (2000), Humidity control in outdoor air-ventilated crawl spaces in cold climate by means of ventilation, ground covers and dehumidification. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, LVI-laboratorio, Raportti A3. Espoo.

Künzel, H. (1995), Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components – One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Doctor's thesis, Fraunhofer Institute of Building Physics. Holzkirchen, Germany. 64p.

Law, J. & Rennie, R. (Eds.) (2015), meniscus. A Dictionary of Physics. Oxford University Press. Saatavissa: <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780198714743.001.0001/acref-9780198714743-e-1889>.

Leivo, V., & Rantala, J. (2006), Maanvastaisten rakenteiden mikrobiologinen toimivuus, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos. Tutkimusraportti; Vuosikerta 139). Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos.

Lienhard IV, J.H. and Lienhard V, J.H. (2016), A Heat Transfer Textbook (4th), Phlogiston Press Cambridge, MA. 764p. Saatavissa; <http://ahtt.mit.edu>

LVI 06-40064 (2004), Toimiva ryömintätila. Tiedonjyväkortti. Rakennustieto Oy

Mayhew, S. (2015). hysteresis. In A Dictionary of Geography: Oxford University Press. Saatavissa: <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199680856.001.0001/acref-9780199680856-e-3505>.

Mills, A. F. (1999), Basic heat and mass transfer 2/E. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.

Nield, D.A. & Bejan, A. (2013), Convection in Porous Media, 4th edn. Springer-Verlag, DE. 778p.

Nusser, B. & Teibinger, M. (2012), Coupled Heat and Moisture Transfer in Building Components – Implementing WUFI Approaches in COMSOL Multiphysics. Proceedings of the 2012 COMSOL Conference. Milan, Italy. 7 p.

Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010), Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, Clearwater Beach, Florida, USA, December 5–9. ASHRAE, DOE, ORNL, Session II-B, 10 p.

RakMK C2. (1998), Kosteus, määräykset ja ohjeet, Suomen rakentamismääräyskoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK D3. (2012, Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet, Suomenrakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK D5. (2012), Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet, Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

Rao, S.S. (2010), Finite Element Method in Engineering, Butterworth-Heinemann. 685 p.

Rennie, R. (2016), adhesion. In A Dictionary of Chemistry. : Oxford University Press. Retrieved 2 Mar. 2017, Saatavissa: <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780198722823.001.0001/acref-9780198722823-e-4901>.

RIL 107. (2012), Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje, Tekninen raportti, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RT 81-11099. (2012), Radonin torjunta. Ohjekortti. Rakennustieto Oy

Stocker, T. (2011), Introduction to Climate Modelling, 1st edn, Springer Verlag, DE. 179p.

STUK-A245 (2010), Valmari Tuomas, Mäkeläinen Ilona, Reisbacka Heikki, Arvela Hannu. Suomen radonkartasto. Helsinki 2010, 89 s. + liitteet 46 s

STUK-A252 (2012), Arvela H, Holmgren O, Reisbacka H. Asuntojen radonkorjaaminen. Helsinki 2012, 138 s. + liitteet 3 s.

White, F. M. (1994), Fluid mechanics (3rd ed). Boston, Mass: WCB/McGraw-Hill. 736p.

Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri R., Paajanen, L. & Lähdesmäki, K. (2010), Moisture and biodeterioration risk of building materials and structures, Journal of Building Physics, Vol. 33 (3), pp. 201-224.

Williams Portal, N. (2011), Evaluation of heat and moisture induced stress and strain of historic building materials and artefacts. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

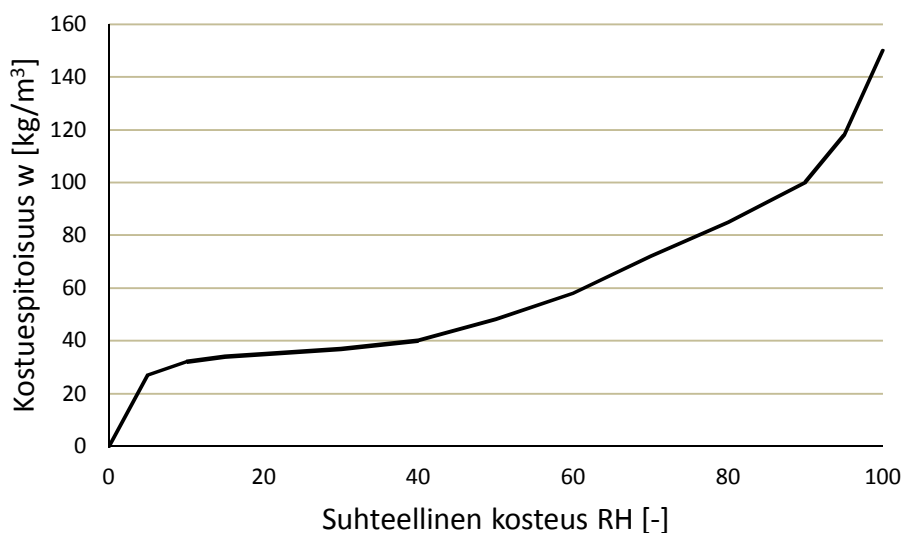
Vinha, J. (2014), Rakennusfysiikka: 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki.

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. (2013), Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tekninen raportti, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159. 354 s. + 43 liites.

Wriggers, P. (2008), *Nonlinear Finite Element Methods*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 566p

**LIITE A: MATERIAALIOMINAISUUDET**

Tässä liitteessä on esitetty tutkimuksessa käytettyjä rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusteknisiä aineominaisuuksia, joita ei ole aikaisemmin tekstissä esitetty.



**Kuva L.A.1.** *Betoni K3 tasapainokosteuskäyrä (Vinha et al. 2013).*

**Taulukko L.A.1.** *Betoni K3 tasapainokosteuskäyrä (Vinha et al. 2013).*

RH [%]	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
w [kg/m³]	0	27	32	34	35	37	40	48	58	72	85	100	118	150

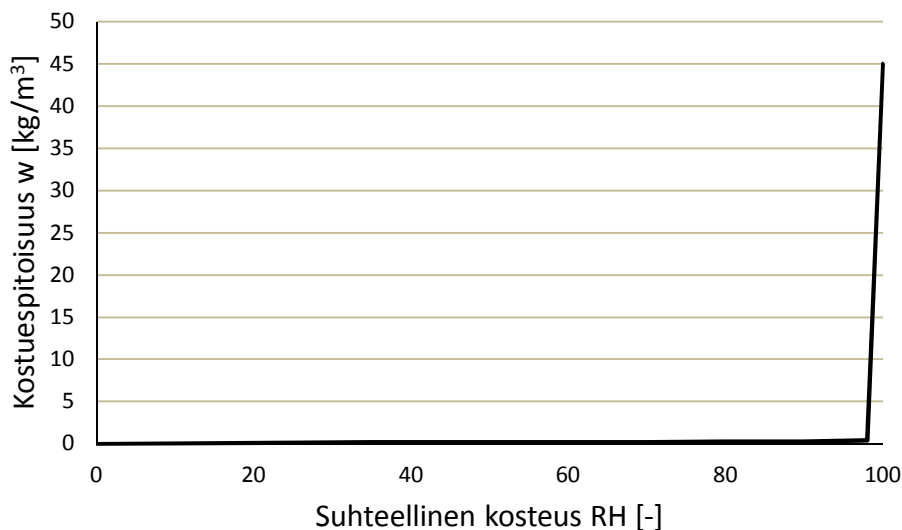
**Taulukko L.A.2.** *Betoni K3 kosteusdiffusiviteetti kosteuspitoisuuden funktiona (Vinha et al. 2013).*

w [kg/m³]	0	72	85	100	118
$D_w$ [m²/s]	0	7,40E-11	2,50E-10	1,00E-09	1,20E-09

**Taulukko L.A.3.** *Betonin K3 lämmönjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona (Vinha et al. 2013).*

kosteuspitoisuus w [kg/m²]	0	180
lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(m·K)]	1,6	2,602





**Kuva L.A.2.** XPS-lämmöneristeen tasapainokosteuskäyrä (Vinha et al. 2013).

**Taulukko L.A.4.** XPS-lämmöneristeen tasapainokosteuskäyrä (Vinha et al. 2013).

RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100
w [kg/m³]	0	0,14	0,17	0,2	0,21	0,28	0,36	45

**Taulukko L.A.5.** XPS-lämmöneristeen kosteusdiffusiviteetti ja lämmönjohtavuus (Vinha et al. 2013).

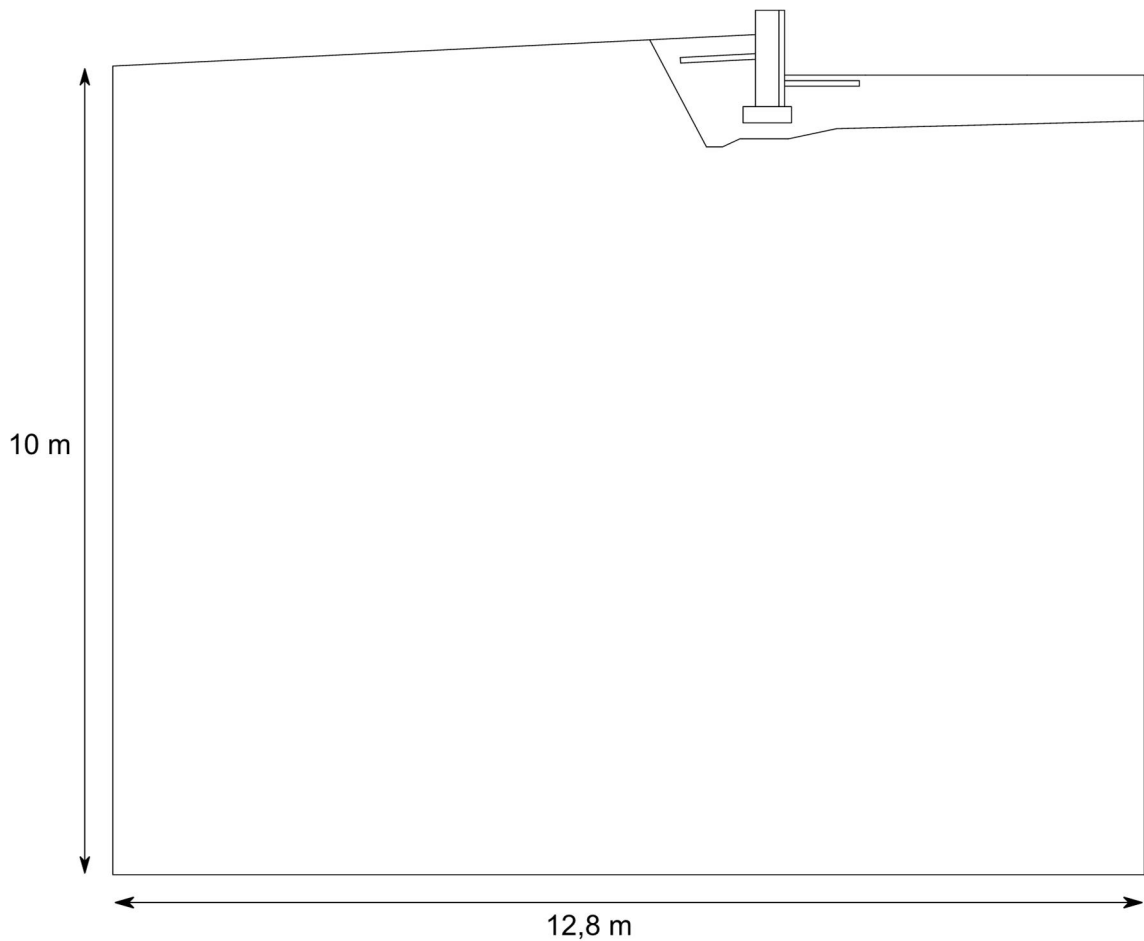
kosteusdiffusiviteetti	$D_w$ [m²/s]	0
lämmönjohtavuus	$\lambda$ [W/(m·K)]	0,037
ominaislämpökapasiteetti	$c_p$ [J/(kg·K)]	1500
tiheys	$\rho$ [kg/m³]	60

**Taulukko L.A.6.** Muiden tutkimuksessa käytettyjen rakennusmateriaalien ominaisuuksia (Vinha et al. 2013).

	lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(m·K)]	tiheys $\rho$ [kg/m³]	ominaislämpökapasiteetti $c_p$ [J/(kg·K)]	huokoisuus $\varepsilon$ [-]
sepeli	1	1800	900	0,5
perusmaa	1	1800	900	-
betoni	1,6	2300	850	-
kevytsorabetoni	0,25	700	1000	-
EPS	0,039	15	1300	-

**LIITE B: AVOIMEN POHJARAKENTEEN KOKONAISMALLIN GEOMETRIA**

Kuvassa L.B.1 on havainnollistettu avoimen pohjarakenteen simulointiin käytetty kokonaisgeometriaa.



*Kuva L.B.1. Mallinnukseen käytetty kokonaisgeometria, avoin pohjarakenne*

**LIITE C: TASAPAINOYHTÄLÖIDEN TERMIT**

Tässä liitteessä esitellään tarkemmin massan ja energian tasapainoyhtälöissä 3.7 ja 3.8 käytettyjä termejä. Liitteessä D olevassa lähdekooditiedostossa on esitetty tasapainoyhtälöiden käyttöä.

Ryömintätilassa tapahtuvaa massan muutosta  $\frac{dm_{cs}}{dt}$  ajan suhteen kuvataan kaavalla  $G_{cs}$  [kg/s]:

$$G_{cs} = \frac{dm_{cs}}{dt} \quad (\text{L.C.1})$$

Ulkoa korvausilman mukana tuleva kosteusvirta  $G_{ulko}$  [kg/s]:

$$G_{ulko} = R_{ulko} \varphi_{ulko} v_{sat}(T_{out}) \quad (\text{L.C.2})$$

jossa

$R_{ulko}$  on ulkoa tulevan korvausilmavirran suuruus [m<sup>3</sup>/s]

$\varphi_{ulko}$  on ulkoilman suhteellinen kosteus [-]

$v_{sat}(T_{out})$  on ulkoilman lämpötilaa vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

Poistoilmavirran mukana ryömintätilasta poistuva kosteusvirta  $G_{poisto}$  [kg/s]:

$$G_{poisto} = (R_{maa} + R_{ulko}) v_{cs} \quad (\text{L.C.3})$$

jossa

$R_{maa}$  on sepelin kautta tuleva ilmavirta [m<sup>3</sup>/s]

$v_{cs}$  on ryömintätilan vesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

Ryömintätilan maapohjan pinnan ja ryömintätilan välinen diffuusiokosteusvirta  $G_{maa,diff}$  [kg/s]:

$$G_{maa,diff} = \beta (v_{maa} - v_{cs}) A_{maa} \quad (\text{L.C.4})$$

jossa

$\beta$  on pinnan kosteudensiirtokerroin [m/s]

$v_{maa}$  on ryömintätilan maapohjan pinnan vesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

$A_{maa}$  on ryömintätilan pohjapinta-ala [m<sup>2</sup>]

Avoimen pohjarakenteen tapauksessa maan kautta ryömintätilan tuleva ilmavirran mukana tuleva kosteusvirta  $G_{maa,konv}$  [kg/s]:

$$G_{maa,konv} = R_{maa} v_{maa} \quad (\text{L.C.5})$$

Alapohjan ryömintätilan puoleisen pinnan ja ryömintätilan välinen diffuusiokosteusvirta  $G_{AP}$  [kg/s]:

$$G_{AP} = \beta(v_{AP} - v_{cs})A_{AP} \quad (\text{L.C.6})$$

jossa

$v_{AP}$  on alapohjan ryömintätilan puoleisen pinnan vesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

$A_{AP}$  on alapohjan ryömintätilan puoleinen pinta-ala [m<sup>2</sup>]

Ryömintätilan ilmassa olevan vesihöyryn mahdollisen kondensoitumisen aiheuttama poistuva kosteusvirta  $G_{kond}$  [kg/s]:

$$G_{kond} = \beta_{kond}(v_{cs} - v_{sat}(T_{cs})) \quad (\text{L.C.7})$$

jossa

$\beta_{kond}$  on kosteuden nopeaa tiivistymistä kuvaava kosteudensiirtokerroin [m/s]

$v_{sat}(T_{cs})$  on ryömintätilan lämpötilaa vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

Ryömintätilassa tapahtuvaa energianmuutosta  $\frac{dE_{cs}}{dt}$  tarkasteltavassa aikayksikössä kuvataan kaavalla:

$$\frac{dE_{cs}}{dt} = \rho_a c_{p,a} V_{cs} \frac{dT_{cs}}{dt} \quad (\text{L.C.8})$$

jossa

$\rho_a$  on kuivan ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$c_{p,a}$  on kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/(kg·K)]

$V_{cs}$  on ryömintätilan ilmatilan tilavuus [m<sup>3</sup>]

Korvausilmavirran mukana ryömintätilaan tuleva energiavirta  $Q_{ulko}$  [W]:

$$Q_{ulko} = R_{ulko} \rho_a c_{p,a} T_{ulko} \quad (\text{L.C.9})$$

jossa

$T_{ulko}$  on ulkoilman lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Poistoilmavirran mukana ryömintätilasta ulos poistuva energiavirta  $Q_{poisto}$  [W]:

$$Q_{poisto} = (R_{maa} + R_{ulko}) \rho_a c_{p,a} T_{cs} \quad (\text{L.C.10})$$

Perusmuurin pinnan ja ryömintätilan välinen johtumalla siirtyvä energiavirta  $Q_{perusmuuri}$  [W]:

$$Q_{perusmuuri} = h_{perusmuuri} (T_{perusmuuri} - T_{cs}) A_{perusmuuri} \quad (\text{L.C.11})$$

jossa

$h_{perusmuuri}$  on perusmuurin pinnan lämmönsiirtoin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ], tutkimuksessa 10  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$T_{perusmuuri}$  on perusmuuri lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$A_{perusmuuri}$  on perusmuuri pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

Ryömintätilan maapohjan pinnan ja ryömintätilan välinen johtumalla siirtyvä energiavirta  $Q_{maa,diff}$  [W]:

$$Q_{maa,diff} = h_{maa} (T_{maa} - T_{cs}) A_{maa} \quad (\text{L.C.12})$$

jossa

$h_{maa}$  on ryömintätilan maapohjan lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ], tutkimuksessa 10  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$T_{maa}$  on ryömintätilan maapohjan lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$A_{maa}$  on ryömintätilan maapohjan pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

Avoimen pohjarakenteen tapauksessa maan kautta ryömintätilaan tulevan ilmavirran energiavirta  $Q_{maa,konv}$  [W]:

$$Q_{maa,konv} = R_{maa} \rho_a c_{p,a} T_{maa} \quad (\text{L.C.13})$$

Alapohjan ryömintätilan puoleisen pinnan ja ryömintätilan ilman välillä siirtyvä energia-  
virta  $Q_{AP}$  [W]:

$$Q_{AP} = h_{AP}(T_{AP} - T_{cs})A_{AP} \quad (\text{L.C.14})$$

jossa

$h_{AP}$  on alapohjan ryömintätilan puoleinen lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)], tut-  
kimuksessa 10 W/(m<sup>2</sup>·K)

Vesihöyryn kondensoitumisessa vapautuva lämpövirta  $Q_{kond}$  [W]:

$$Q_{kond} = h_{fg}G_{kond} \quad (\text{L.C.15})$$

jossa

$h_{fg}$  on höyrystymislämpö [J/kg]

**LIITE D: MALLIN LÄHDEKOODIN ESITTELY**

Tässä liitteessä on esitelty tutkimuksessa mallinnetun betoni 50 mm + kova lämmöneriste 70 mm (XPS)-rakenteen COMSOL Multiphysicsin mallin MATLAB – tiedostomuodossa olevaa lähdekoodia.

```
function out = model
import com.comsol.model.util.*
model = ModelUtil.create('Model');
model.comments(['Untitled\n\n']);
model.param.set('epsilon', '0.5', 'soran huokoisuus');
model.param.set('z_syvyys', '14.5 [m]', 'alapohjan syvyys (pinta-ala)');
model.param.set('A_AP', 'z_syvyys*x_leveys', 'AP:n pinta-ala');
model.param.set('V_tilAP', 'kork_ryo*A_AP', 'alapohjan ilmatilavuus');
model.param.set('x_leveys', '8.9 [m]', 'AP maan leveys');
model.param.set('rho_air', '1[kg/m^3]', '');
model.param.set('Cpair', '1000[J/(kg*K)]', '');
model.param.set('U_AP', '0.2[W/(m^2*K)]', ['Lapaisykerroin (alustva)']);
model.param.set('U_mp', '10[W/(m^2*K)]', ['Maanpinnan lapaisykerroin (alustava)']);
model.param.set('Mw', '0.018[kg/mol]', 'veden moolimassa');
model.param.set('Vcs', 'V_tilAP', 'alapohjan ilmatilavuus');
model.param.set('Cvair', '1000[J/(m^3*K)]');
model.param.set('h_wall', '10', ['sokkelin konvektiivinen lammonsiirtokerroin']);
model.param.set('h_ground', '10', ['maan konvektiivinen lammonsiirtokerroin']);
model.param.set('h_react', '5', 'reaktionopeus kondensoituminen');
model.param.set('R_korvausilma', '0.026[m^3/s]', ['Tuuletusaukosta tulevan ilman maara']);
model.param.set('R_rako_ap', '0[l/s]', 'alapohjan raoista tuleva vuotoilma');
model.param.set('R_rako_perust', '0[l/s]');
model.param.set('deltap', '10[Pa]', 'paine-eromuuttuja');
model.param.set('P', '45.5 [m]', 'piiri');
model.param.set('d_bt', '175 [mm]', 'ontelolaatan pakuus (Parma EP20)');
model.param.set('hv', '2260000', ['hoyrystymislampo']);
model.param.set('mu', '130', ['Vesihoyryn diffuusiovastustuskerroin, bt']);
model.param.set('cp_b', '850', ['betonin ominaislampokapasiteetti']);
model.param.set('rho_b', '2300', 'tiheys betoni');
model.param.set('cp_w', '4181', ['vesi ominaislampokapasiteetti']);
model.param.set('he', '10', ['ULKKO lammonsiirtokerroin vaakataso alaspain']);
model.param.set('d_eriste', '220 [mm]', 'ontelolaatan eristepaksuus (Parma EP20)');
model.param.set('Dw_e', '0', 'kosteusdiffusiviteetti eriste');
model.param.set('k_e', '0.037', ['eristeen lammonjohtavuus']);
model.param.set('hi', '1/0.17', ['SISalammonsiirtokerroin vaakataso alaspain']);
model.param.set('mu_e', '150', ['Vesihoyryn diffuusiovastustuskerroin, eriste']);
model.param.set('cp_e', '1500', ['eristeen ominaislampokapasiteetti']);
model.param.set('rho_e', '60', 'eristeen tiheys');
model.param.set('h_ap', '10', ['alapohjan konvektiivinen lammonsiirtokerroin']);
model.param.set('kork_ryo', '0.8 [m]', 'ryomintatilan korkeus');
model.param.set('beta', '3e-3');
```

```

model.param.set('h_m', '100', ['lammonnsiirron kerroin rajapinnassa (iso
arvo) ']);
model.param.set('k', '100', ['massansiirron kerroin rajapinnassa (iso
arvo)']);
model.param.set('h_react_r', '0.25');
model.modelNode.create('comp1');
model.geom.create('geom1', 2);
model.modelNode.create('comp2');
model.geom.create('geom2', 1);
model.modelNode('comp1').label(['pelkkaa soraa']);
model.modelNode('comp2').label('AP');
model.file.create('res1');
model.file.create('res2');
model.file.create('res4');
model.file.create('res5');
model.file.create('res6');
model.file.create('res10');
model.file.create('res11');
model.file.create('res12');
model.file.create('res13');
model.func.create('an1', 'Analytic');
model.func.create('an2', 'Analytic');
model.func.create('an3', 'Analytic');
model.func.create('an4', 'Analytic');
model.func.create('int1', 'Interpolation');
model.func.create('int2', 'Interpolation');
model.func.create('int3', 'Interpolation');
model.func.create('an5', 'Analytic');
model.func.create('int4', 'Interpolation');
model.func.create('int5', 'Interpolation');
model.func.create('int6', 'Interpolation');
model.func.create('int7', 'Interpolation');
model.func.create('int8', 'Interpolation');
model.func('an1').label('Saturation pressure hot');
model.func('an1').set('args', {'T'});
model.func('an1').set('expr', '610.5*exp(17.269*(T-273.15)/(237.3+T-
273.15))');
model.func('an1').set('plotargs', {'T' '0' '1'});
model.func('an1').set('funcname', 'psath');
model.func('an2').label('Saturation pressure cold');
model.func('an2').set('args', {'T'});
model.func('an2').set('expr', '610.5*exp(21.875*(T-273.15)/(265.5+T-
273.15))');
model.func('an2').set('plotargs', {'T' '0' '1'});
model.func('an2').set('funcname', 'psatc');
model.func('an3').label('Saturation pressure');
model.func('an3').set('args', {'T'});
model.func('an3').set('expr', 'if(T-273.15>0,psath(T),psatc(T))');
model.func('an3').set('plotargs', {'T' '0' '1'});
model.func('an3').set('funcname', 'psat');
model.func('an4').label('Saturation concentration');
model.func('an4').set('args', {'T'});
model.func('an4').set('expr', 'psat(T)*0.018/(8.314*T)');
model.func('an4').set('plotargs', {'T' '0' '1'});
model.func('an4').set('funcname', 'nu_sat');
model.func('int1').label('Jokoioinen T');
model.func('int1').set('importedname', 'jokioinen_T.txt');
model.func('int1').set('funcs', {'Tout1' '1'});
model.func('int1').set('modelres', 'res1');
model.func('int1').set('importeddim', '1D');
model.func('int1').set('importedstruct', 'Spreadsheet');

```



```

model.func('int1').set('sourcetype', 'model');
model.func('int1').set('source', 'file');
model.func('int1').set('nargs', '1');
model.func('int1').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('int2').label('Jokioinen RH');
model.func('int2').set('importedname', 'jokioinen_phi.txt');
model.func('int2').set('funcs', {'RHout1' '1'});
model.func('int2').set('modelres', 'res2');
model.func('int2').set('importeddim', '1D');
model.func('int2').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int2').set('sourcetype', 'model');
model.func('int2').set('source', 'file');
model.func('int2').set('nargs', '1');
model.func('int2').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('int3').label('Jokioinen c');
model.func('int3').set('importedname', 'jokioinen_c.txt');
model.func('int3').set('funcs', {'c_out1' '1'});
model.func('int3').set('modelres', 'res4');
model.func('int3').set('importeddim', '1D');
model.func('int3').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int3').set('sourcetype', 'model');
model.func('int3').set('source', 'file');
model.func('int3').set('nargs', '1');
model.func('int3').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('an5').model('comp2');
model.func('an5').label('Vapor permeability of air');
model.func('an5').set('args', {'T'});
model.func('an5').set('expr', '2e-7*(T^0.81)/101325');
model.func('an5').set('plotargs', {'T' '0' '1'});
model.func('an5').set('funcname', 'delta_air');
model.func('int4').label('sisailman kosteuslisa');
model.func('int4').set('importedname', 'kosteuslisa.txt');
model.func('int4').set('funcs', {'delta_nul' '1'});
model.func('int4').set('modelres', 'res5');
model.func('int4').set('importeddim', '1D');
model.func('int4').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int4').set('sourcetype', 'model');
model.func('int4').set('source', 'file');
model.func('int4').set('nargs', '1');
model.func('int4').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('int5').label('Jokioinen T 3v');
model.func('int5').set('importedname', 'Jokioinen 3v T.txt');
model.func('int5').set('funcs', {'Tout' '1'});
model.func('int5').set('modelres', 'res10');
model.func('int5').set('importeddim', '1D');
model.func('int5').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int5').set('sourcetype', 'model');
model.func('int5').set('source', 'file');
model.func('int5').set('nargs', '1');
model.func('int5').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('int6').label('Jokioinen RH 3v');
model.func('int6').set('importedname', 'Jokioinen 3v RH.txt');
model.func('int6').set('funcs', {'RHout' '1'});
model.func('int6').set('modelres', 'res11');
model.func('int6').set('importeddim', '1D');
model.func('int6').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int6').set('sourcetype', 'model');
model.func('int6').set('source', 'file');
model.func('int6').set('nargs', '1');
model.func('int6').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('int7').label('Jokioinen c3v');

```

```

model.func('int7').set('importedname', 'Jokioinen 3v c konsen-
traatio.txt');
model.func('int7').set('funcs', {'c_out' '1'});
model.func('int7').set('modelres', 'res12');
model.func('int7').set('importeddim', '1D');
model.func('int7').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int7').set('sourcetype', 'model');
model.func('int7').set('source', 'file');
model.func('int7').set('nargs', '1');
model.func('int7').set('struct', 'spreadsheet');
model.func('int8').label('sisailman kosteuslisa3v');
model.func('int8').set('importedname', 'sisailman kosteuslisa 3v.txt');
model.func('int8').set('funcs', {'delta_nu' '1'});
model.func('int8').set('modelres', 'res13');
model.func('int8').set('importeddim', '1D');
model.func('int8').set('importedstruct', 'Spreadsheet');
model.func('int8').set('sourcetype', 'model');
model.func('int8').set('source', 'file');
model.func('int8').set('nargs', '1');
model.func('int8').set('struct', 'spreadsheet');
model.variable.create('var1');
model.variable('var1').model('comp1');
model.variable('var1').set('ccs', 'mv[kg]/(Vcs*Mw)');
model.variable('var1').set('Rext', 'R_korvausilma+R_rako_ap+R_rako_pe-
rust');
model.variable('var1').set('Qcs',
'Vcs*Cvair*rho_air[m^3/kg]*Tcst[s][K/J]');
model.variable('var1').set('Qulko',
'rho_air[m^3/kg]*Rext[s/m^3]*Cvair[m^3*K/J]*(Tout(t[1/s])+273.15)');
model.variable('var1').set('Qpoisto',
'rho_air[m^3/kg]*(Rext[s/m^3])*Cvair[m^3*K/J]*Tcs');
model.variable('var1').set('Qsokkeli', 'h_wall*intop2(T[1/K]-
Tcs)[1/m]*P[1/m]');
model.variable('var1').set('Qmaa_diff', 'h_ground*intop1(Tbm-
Tcs)*P[1/m^2]');
model.variable('var1').set('Qap', 'h_ap*(comp2.Tsurf-
Tcs)*(x_leveys/2)*P[1/m^2]');
model.variable('var1').set('Qkondenssi',
'if(mv/(nu_sat(Tcs)*Vcs[1/m^3])>1,h_react*(mv-
nu_sat(Tcs)*Vcs[1/m^3])*hv,0)');
model.variable('var1').set('Gcs', 'mvt[s]');
model.variable('var1').set('Gulko',
'Rext[s/m^3]*RHout(t[1/s])*nu_sat(Tout(t[1/s])+273.15)');
model.variable('var1').set('Gpoisto', '(Rext)[s/m^3]*mv/(Vcs[1/m^3])');
model.variable('var1').set('Gap', 'beta*(comp2.in-
top4(comp2.RHap*psat(comp2.Tap))*Mw[mol/kg]/(8.314*comp2.in-
top4(comp2.Tap))-mv/Vcs[1/m^3])*x_leveys/2*P[1/m^2]');
model.variable('var1').set('Gkondenssi',
'if(mv/(nu_sat(Tcs)*Vcs[1/m^3])>1,h_react*(mv-nu_sat(Tcs)*Vcs[1/m^3])
,0)');
model.variable('var1').set('Gmaa_diff', 'beta*in-
top1(RHbm*psat(Tbm)*Mw/(8.314*Tbm)-mv/Vcs)*P');
model.variable('var1').set('gsurf_m', 'in-
top1(RHbm*psat(Tbm)*0.018/(8.314*Tbm))/x_leveys');
model.variable('var1').set('Tsurf_m', 'intop1(Tbm)/x_leveys/2');
model.variable('var1').set('RH', '(c*Mw/nu_sat(T[1/K]))[(m^3/kg)^-1]');
model.variable.create('var2');
model.variable('var2').model('comp2');
model.variable('var2').set('Tsurf', 'intop4(Tap)');
model.variable('var2').set('gsurf', 'in-
top4(RHap*psat(Tap)*0.018/(8.314*Tap)');

```

```

model.variable('var2').set('nu_out', 'c_out(t[1/s])*Mw');
model.variable('var2').set('RHsis',
'if((nu_out[mol/kg]+delta_nu(t[1/s]))/nu_sat(293.15)>1,1
,(nu_out[mol/kg]+delta_nu(t[1/s]))/nu_sat(293.15) )');
model.view('view2').tag('view3');
model.view.create('view2', 2);
model.material.create('mat3', 'Common', 'comp1');
model.material.create('mat4', 'Common', 'comp1');
model.material.create('mat5', 'Common', 'comp1');
model.material.create('mat11', 'Common', 'comp1');
model.material.create('mat6', 'Common', 'comp1');
model.material.create('mat9', 'Common', 'comp2');
model.material.create('mat10', 'Common', 'comp2');
model.material('mat3').selection.set([2]);
model.material('mat4').selection.set([1]);
model.material('mat5').selection.set([4]);
model.material('mat11').selection.set([5]);
model.material('mat6').selection.set([3 6]);
model.material('mat9').propertyGroup('def').func.create('int1', 'Inter-
polation');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func.create('int2', 'Inter-
polation');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func.create('int3', 'Inter-
polation');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func.create('int1', 'In-
terpolation');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func.create('int2', 'In-
terpolation');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func.create('int3', 'In-
terpolation');
model.cpl.create('intop1', 'Integration', 'geom1');
model.cpl.create('intop2', 'Integration', 'geom1');
model.cpl.create('intop3', 'Integration', 'geom1');
model.cpl.create('maxop1', 'Maximum', 'geom1');
model.cpl.create('intop4', 'Integration', 'geom2');
model.cpl.create('aveop1', 'Average', 'geom1');
model.cpl.create('aveop2', 'Average', 'geom1');
model.cpl.create('maxop2', 'Maximum', 'geom1');
model.cpl.create('maxop3', 'Maximum', 'geom1');
model.cpl.create('minop1', 'Minimum', 'geom1');
model.cpl.create('minop2', 'Minimum', 'geom1');
model.cpl.create('aveop3', 'Average', 'geom2');
model.cpl('intop1').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('intop1').selection.set([32]);
model.cpl('intop2').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('intop2').selection.set([31]);
model.cpl('intop3').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('intop3').selection.set([5]);
model.cpl('maxop1').selection.set([2]);
model.cpl('intop4').selection.geom('geom2', 0);
model.cpl('intop4').selection.set([1]);
model.cpl('aveop1').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('aveop1').selection.set([32]);
model.cpl('aveop2').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('aveop2').selection.set([31]);
model.cpl('maxop2').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('maxop2').selection.set([32]);
model.cpl('maxop3').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('maxop3').selection.set([31]);
model.cpl('minop1').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('minop1').selection.set([32]);

```

```

model.cpl('minop2').selection.geom('geom1', 1);
model.cpl('minop2').selection.set([31]);
model.cpl('aveop3').selection.geom('geom2', 0);
model.cpl('aveop3').selection.set([1]);
model.physics.create('ht', 'PorousMediaHeat', 'geom1');
model.physics('ht').selection.set([1 2 3 4 5 6]);
model.physics('ht').feature('porous1').create('opq1', 'Opacity', 2);
model.physics('ht').create('solid1', 'SolidHeatTransferModel', 2);
model.physics('ht').feature('solid1').selection.set([1 3 4 5 6]);
model.physics('ht').feature('solid1').create('opq1', 'Opacity', 2);
model.physics('ht').create('hf1', 'HeatFluxBoundary', 1);
model.physics('ht').feature('hf1').selection.set([2]);
model.physics('ht').create('temp1', 'TemperatureBoundary', 1);
model.physics('ht').feature('temp1').selection.set([3 5 16]);
model.physics('ht').create('hf2', 'HeatFluxBoundary', 1);
model.physics('ht').feature('hf2').selection.set([28]);
model.physics('ht').create('hf3', 'HeatFluxBoundary', 1);
model.physics('ht').feature('hf3').selection.set([31]);
model.physics('ht').create('hs1', 'HeatSource', 2);
model.physics('ht').feature('hs1').selection.set([2]);
model.physics.create('tds', 'DilutedSpecies', 'geom1');
model.physics('tds').selection.set([2]);
model.physics('tds').create('concl', 'Concentration', 1);
model.physics('tds').feature('concl').selection.set([6 10 11 12 33 35]);
model.physics('tds').create('fl1', 'Fluxes', 1);
model.physics('tds').feature('fl1').selection.set([28]);
model.physics('tds').create('conc2', 'Concentration', 1);
model.physics('tds').feature('conc2').selection.set([5]);
model.physics('tds').create('reac1', 'Reactions', 2);
model.physics('tds').feature('reac1').selection.set([2]);
model.physics.create('ge', 'GlobalEquations', 'geom1');
model.physics.create('ge2', 'GlobalEquations', 'geom1');
model.physics.create('c', 'CoefficientFormPDE', 'geom2');
model.physics('c').field('dimensionless').component({'Tap' 'RHap'});
model.physics('c').create('cfeq2', 'CoefficientFormPDE', 1);
model.physics('c').feature('cfeq2').selection.set([1]);
model.physics('c').create('init2', 'init', 1);
model.physics('c').feature('init2').selection.set([1]);
model.physics('c').create('flux1', 'FluxBoundary', 0);
model.physics('c').feature('flux1').selection.set([3]);
model.physics('c').create('flux2', 'FluxBoundary', 0);
model.physics('c').feature('flux2').selection.set([1]);
model.physics.create('c2', 'CoefficientFormPDE', 'geom1');
model.physics('c2').field('dimensionless').component({'Tbm' 'RHbm'});
model.physics('c2').selection.set([7 8]);
model.physics('c2').create('flux1', 'FluxBoundary', 1);
model.physics('c2').feature('flux1').selection.set([32]);
model.physics('c2').create('flux2', 'FluxBoundary', 1);
model.physics('c2').feature('flux2').selection.set([28]);
model.physics('c2').create('flux3', 'FluxBoundary', 1);
model.physics('c2').feature('flux3').selection.set([27 29]);
model.physics('c2').create('src1', 'SourceTerm', 2);
model.physics('c2').create('cfeq2', 'CoefficientFormPDE', 2);
model.physics('c2').feature('cfeq2').selection.set([7]);
model.physics('c2').create('init2', 'init', 2);
model.result.table.create('tbl1', 'Table');
model.material('mat3').label('sora');
model.material('mat3').propertyGroup('def').set('porosity', '0.5');
model.material('mat3').propertyGroup('def').set('hydraulicpermeability', {'1e-9' '0' '0' '0' '0' '1e-9' '0' '0' '0' '1e-9'});

```

```

model.material('mat3').propertyGroup('def').set('thermalconductivity',
{'1' '0' '0' '0' '1' '0' '0' '0' '1'});
model.material('mat3').propertyGroup('def').set('density', '1800');
model.material('mat3').propertyGroup('def').set('heatcapacity', '900');
model.material('mat4').label('perusmaa');
model.material('mat4').propertyGroup('def').set('porosity', '0.5');
model.material('mat4').propertyGroup('def').set('hydraulicpermeabil-
ity', {'1e-13' '0' '0' '0' '1e-13' '0' '0' '0' '1e-13'});
model.material('mat4').propertyGroup('def').set('thermalconductivity',
{'1' '0' '0' '0' '1' '0' '0' '0' '1'});
model.material('mat4').propertyGroup('def').set('density', '1800');
model.material('mat4').propertyGroup('def').set('heatcapacity', '900');
model.material('mat5').label('betoni');
model.material('mat5').propertyGroup('def').set('heatcapacity', '850');
model.material('mat5').propertyGroup('def').set('thermalconductivity',
{'1.6' '0' '0' '0' '1.6' '0' '0' '0' '1.6'});
model.material('mat5').propertyGroup('def').set('density', '2300');
model.material('mat11').label('leca-harkko 1');
model.material('mat11').propertyGroup('def').set('heatcapacity',
'1000');
model.material('mat11').propertyGroup('def').set('thermalconductivi-
ty', {'0.25' '0' '0' '0' '0.25' '0' '0' '0' '0.25'});
model.material('mat11').propertyGroup('def').set('density', '700');
model.material('mat6').label('EPS');
model.material('mat6').propertyGroup('def').set('heatcapacity',
'1300');
model.material('mat6').propertyGroup('def').set('thermalconductivity',
{'0.039' '0' '0' '0' '0.039' '0' '0' '0' '0.039'});
model.material('mat6').propertyGroup('def').set('density', '15');
model.material('mat9').label('betoni K2');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int1').la-
bel(['tasapainokosteuskayraunicode' ]);
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int1').set('funcs',
{'w' '1'});
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int1').set('interp',
'piecewisecubic');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int1').set('source',
'file');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int2').label('kos-
teusdiffusiviteetti');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int2').set('table',
{'72' '7.4E-11'; ...
'73' '8.12646E-11'; '74' '8.92424E-11'; '75' '9.80034E-11'; '76'
'1.07625E-10'; '77' '1.1819E-10'; ...
'78' '1.29793E-10'; '79' '1.42535E-10'; '80' '1.56528E-10'; '81'
'1.71894E-10'; ...
'82' '1.88769E-10'; '83' '2.073E-10'; '84' '2.27651E-10'; '85'
'2.5E-10'; ...
'86' '2.74206E-10'; '87' '3.00756E-10'; '88' '3.29877E-10'; '89'
'3.61817E-10'; ...
'90' '3.9685E-10'; '91' '4.35275E-10'; '92' '4.77421E-10'; '93'
'5.23647E-10'; ...
'94' '5.74349E-10'; '95' '6.29961E-10'; '96' '6.90956E-10'; '97'
'7.57858E-10'; ...
'98' '8.31238E-10'; '99' '9.11722E-10'; '100' '0.000000001'; '101'
'1.01018E-09'; ...
'102' '1.02046E-09'; '103' '1.03085E-09'; '104' '1.04135E-09';
'105' '1.05195E-09'; ...
'106' '1.06266E-09'; '107' '1.07348E-09'; '108' '1.08441E-09';
'109' '1.09545E-09'; '110' '1.1066E-09'; ...

```

```

'111' '1.11786E-09'; '112' '1.12924E-09'; '113' '1.14074E-09'; '114'
'1.15235E-09'; ...
'115' '1.16408E-09'; '116' '1.17594E-09'; '117' '1.18791E-09';
'118' '1.2E-09'});
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int2').set('func-
name', 'Dw');
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int3').label(['lam-
monjohtavuus']);
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int3').set('table',
{'0' '1.6'; '180' '2.602'});
model.material('mat9').propertyGroup('def').func('int3').set('func-
name', 'k');
model.material('mat10').label('eriste(XPS)');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int1').la-
bel(['tasapainokosteuskayra']);
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int1').set('table',
{'0.0' '0'; ...
'0.35' '0.14'; '0.50' '0.17'; '0.70' '0.2'; '0.80' '0.21'; '0.90'
'0.28'; ...
'0.98' '0.36'; '1' '45'});
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int1').set('func-
name', 'w_e');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int2').ac-
tive(false);
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int2').label('kos-
teusdiffusiviteetti eriste');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int2').set('table',
{'0' '0'});
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int2').set('func-
name', 'Dw_e');
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int3').ac-
tive(false);
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int3').la-
bel(['lammonjohtavuus']);
model.material('mat10').propertyGroup('def').func('int3').set('func-
name', 'k_e');
model.cpl('intop1').label('maa - Integration 1');
model.cpl('intop2').label('sokkeli - Integration 2');
model.cpl('intop4').label('ap - Integration 4a');
model.cpl('aveop1').label('maa - Average 1');
model.cpl('aveop2').label('sokkeli - Average 2');
model.cpl('maxop2').label('maa - Maximum 2');
model.cpl('maxop3').label('sokkeli - Maximum 3');
model.cpl('minop1').label('maa - Minimum 1');
model.cpl('minop2').label('sokkeli - Minimum 2');
model.cpl('aveop3').label('ap - Average 3');
model.physics('ht').feature('porous1').set('fluidType', 'idealGas');
model.physics('ht').feature('porous1').set('k', {'0.024'; '0'; '0';
'0'; '0.024'; '0'; '0'; '0'; '0.024'});
model.physics('ht').feature('porous1').set('Cp', '1000');
model.physics('ht').feature('porous1').set('Rs', '287');
model.physics('ht').feature('porous1').set('theta_p', '1');
model.physics('ht').feature('porous1').label('Heat Transfer in Porous
Media 1');
model.physics('ht').feature('porous1').feature('opq1').label('Opaque
1');
model.physics('ht').feature('init1').set('Tinit', ' (5-
(y[1/m]/10)*5) [degC]');
model.physics('ht').feature('solid1').label('Heat Transfer in Solids
1');

```

```

model.physics('ht').feature('solid1').feature('opq1').label('Opaque
1');
model.physics('ht').feature('hf1').set('q0', '0.03');
model.physics('ht').feature('temp1').set('T0', 'Tout(t[1/s])+273.15');
model.physics('ht').feature('hf2').set('HeatFluxType', 'ConvectiveHeat-
Flux');
model.physics('ht').feature('hf2').set('h', 'h_m');
model.physics('ht').feature('hf2').set('Text', 'Tbm[K]');
model.physics('ht').feature('hf3').set('HeatFluxType', 'ConvectiveHeat-
Flux');
model.physics('ht').feature('hf3').set('h', 'h_wall');
model.physics('ht').feature('hf3').set('Text', 'Tcs[K]');
model.physics('ht').feature('hs1').set('Q0',
'if(c*Mw/nu_sat(T[1/K])[kg/m^3]>1,h_react[1/s]*(c*Mw-
nu_sat(T[1/K])[kg/m^3]),0)*2260000[J/kg]');
model.physics('tds').prop('TransportMechanism').set('Convection', '0');
model.physics('tds').feature('cdm1').set('D_c', {'2.5e-5/6.25'; '0';
'0'; '0'; '2.5e-5/6.25'});
model.physics('tds').feature('init1').set('initc', '0.3');
model.physics('tds').feature('concl').set('species', '1');
model.physics('tds').feature('concl').set('c0',
'nu_sat(T[1/K])[kg/m^3]/Mw');
model.physics('tds').feature('fl1').set('FluxType', 'ExternalForcedCon-
vection');
model.physics('tds').feature('fl1').set('species', '1');
model.physics('tds').feature('fl1').set('N0', '-
k*(RH*psat(T[1/K])/(8.314*T[1/K])-
RHbm*psat(Tbm)/(8.314*Tbm))[mol/(m^2*s)]');
model.physics('tds').feature('fl1').set('kc', 'k');
model.physics('tds').feature('fl1').set('cb',
'RHbm*psat(Tbm)/(8.314*Tbm)');
model.physics('tds').feature('conc2').set('species', '1');
model.physics('tds').feature('conc2').set('c0', 'c_out(t[1/s])');
model.physics('tds').feature('reacl').set('R_c',
'if(c*Mw/nu_sat(T[1/K])>1,-h_react[1/s]*(c*Mw-
nu_sat(T[1/K])[kg/m^3])/Mw,0)');
model.physics('ge').label(['1' native2unicode(hex2dec({'00' 'e4'}),
'unicode') 'mp' native2unicode(hex2dec({'00' 'f6'}), 'unicode') ]);
model.physics('ge').feature('gel').set('name', 'Tcs');
model.physics('ge').feature('gel').set('equation', 'Qcs-Qulko+Qpoisto-
Qsokkeli-Qmaa_diff-Qap-Qkondenssi');
model.physics('ge').feature('gel').set('initialValueU', '273.15+5');
model.physics('ge').feature('gel').set('description');
model.physics('ge2').label('massa');
model.physics('ge2').feature('gel').set('name', 'mv');
model.physics('ge2').feature('gel').set('equation', 'Gcs-Gulko+Gpoisto-
Gmaa_diff-Gap+Gkondenssi');
model.physics('ge2').feature('gel').set('initialValueU',
'Vcs[1/m^3]*0.5*nu_sat(273.15+5)');
model.physics('c').label('betoni - Coefficient Form PDE');
model.physics('c').feature('cfeq1').set('c',
{'mat9.def.k(mat9.def.w(RHap))+hv*(delta_air(Tap)/mu)*RHap*d(psat(Tap)
,Tap)';
'(\delta_air(Tap)/mu)*RHap*d(psat(Tap),Tap)';
'hv*(delta_air(Tap)/mu)*psat(Tap)');
'd(mat9.def.w(RHap),RHap)*mat9.def.Dw(mat9.def.w(RHap))+(\delta_air(Tap)
)/mu)*psat(Tap)');
model.physics('c').feature('cfeq1').set('f', {'0'; '0'});
model.physics('c').feature('cfeq1').set('da',
{'cp_b*rho_b+cp_w*mat9.def.w(RHap)'; '0'; '0';
'd(mat9.def.w(RHap),RHap)'});

```

```

model.physics('c').feature('cfeq1').label('betoni - Coefficient Form
PDE 1');
model.physics('c').feature('init1').set('Tap', '273.15+15');
model.physics('c').feature('init1').set('RHap', '0.5');
model.physics('c').feature('init1').label('betoni - Initial Values 1');
model.physics('c').feature('cfeq2').set('c',
{'k_e+hv*(delta_air(Tap)/mu_e)*RHap*d(psat(Tap),Tap)';
' (delta_air(Tap)/mu_e)*RHap*d(psat(Tap),Tap)';
'hv*(delta_air(Tap)/mu_e)*psat(Tap)';
'd(mat10.def.w_e(RHap),RHap)*Dw_e+(delta_air(Tap)/mu_e)*psat(Tap)'});
model.physics('c').feature('cfeq2').set('f', {'0'; '0'});
model.physics('c').feature('cfeq2').set('da',
{'cp_e*rho_e+cp_w*mat10.def.w_e(RHap)';'0';'0';
'd(mat10.def.w_e(RHap),RHap)'});
model.physics('c').feature('cfeq2').label('eriste - Coefficient Form
PDE 2');
model.physics('c').feature('init2').set('Tap', '273.15+10');
model.physics('c').feature('init2').set('RHap', '0.1');
model.physics('c').feature('init2').label('eriste - Initial Values 2');
model.physics('c').feature('flux1').set('g', {'hi*(293.15-Tap) [1/m]';
'beta*(RHsis*nu_sat(293.15)-RHap*nu_sat(Tap)) [1/m]'});
model.physics('c').feature('flux1').label(['sis'
native2unicode(hex2dec({'00' 'e4'}), 'unicode') 'pinta - betoni']);
model.physics('c').feature('flux2').set('g', {'he*(comp1.Tcs-
Tap) [1/m]';
'beta*(comp1.mv/Vcs [1/m^3]-
(RHap*psat(Tap)*Mw[mol/kg]) / (8.314*Tap)) [1/m]'});
model.physics('c').feature('flux2').label('ulkopinta - eriste');
model.physics('c2').label('bt-laatta (maa) - Coefficient Form PDE 2');
model.physics('c2').prop('ShapeProperty').set('order', '1');
model.physics('c2').feature('cfeq1').set('c',
{'comp2.mat9.def.k(comp2.mat9.def.w(RHbm))+hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu
)*RHbm*d(psat(Tbm),Tbm)'; '0' '0'
'comp2.mat9.def.k(comp2.mat9.def.w(RHbm))+hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu
)*RHbm*d(psat(Tbm),Tbm)'; ...
'(comp2.delta_air(Tbm)/mu)*RHbm*d(psat(Tbm),Tbm)'; '0' '0'
'(comp2.delta_air(Tbm)/mu)*RHbm*d(psat(Tbm),Tbm)'; ...
'hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu)*psat(Tbm)'; '0' '0'
'hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu)*psat(Tbm)'; ...
'd(comp2.mat9.def.w(RHbm),RHbm)*comp2.mat9.def.Dw(comp2.mat9.def.w(RHb
m))+comp2.delta_air(Tbm)/mu)*psat(Tbm)'; '0' '0'
'd(comp2.mat9.def.w(RHbm),RHbm)*comp2.mat9.def.Dw(comp2.mat9.def.w(RHb
m))+comp2.delta_air(Tbm)/mu)*psat(Tbm)'});
model.physics('c2').feature('cfeq1').set('f', {'0'; '0'});
model.physics('c2').feature('cfeq1').set('da',
{'cp_b*rho_b+cp_w*comp2.mat9.def.w(RHbm)';'0';'0';
'd(comp2.mat9.def.w(RHbm),RHbm)'});
model.physics('c2').feature('cfeq1').label('betoni - Coefficient Form
PDE 1');
model.physics('c2').feature('init1').set('Tbm', '273.15+9.42');
model.physics('c2').feature('init1').set('RHbm', '0.556');
model.physics('c2').feature('init1').label('betoni - Initial Values
1');
model.physics('c2').feature('flux1').set('g', {'he*(Tcs-Tbm) [1/m]';
'beta*(mv/Vcs [1/m^3]- (RHbm*psat(Tbm)*Mw[mol/kg]) / (8.314*Tbm)) [1/m]'});
model.physics('c2').feature('flux1').label(['Ry'
native2unicode(hex2dec({'00' 'f6'}), 'unicode') 'mint'
native2unicode(hex2dec({'00' 'e4'}), 'unicode') 'tilaa vasten -
Flux/Source 1']);
model.physics('c2').feature('flux2').set('g', {'h_m*(T[1/K]-Tbm) [1/m]';
'k*(c*Mw-RHbm*psat(Tbm)*Mw/(8.314*Tbm))'});

```



```

model.physics('c2').feature('flux2').label(['soraa/eristett' native2unicode(hex2dec({'00' 'e4'}), 'unicode') ' vasten - Flux/Source 2']);
model.physics('c2').feature('flux3').set('g', {'h_m*(T[1/K]-Tbm) [1/m]'; '0'});
model.physics('c2').feature('flux3').label('sokkelia+routa vasten - Flux/Source 2.1');
model.physics('c2').feature('src1').set('f', {'if (RHbm>1, h_react_r*(RHbm-1)*hv ,0) [1/m^2]'; 'if (RHbm>1, -h_react_r*(RHbm-1) ,0) [1/m^2]'});
model.physics('c2').feature('src1').active(false);
model.physics('c2').feature('src1').label('betoni - Source 1(ei kayteta WUFI kaavoissa)');
model.physics('c2').feature('cfeq2').set('c', {'k_e+hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*RHbm*d(psat(Tbm), Tbm) '0' '0' 'k_e+hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*RHbm*d(psat(Tbm), Tbm)'; ... '(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*RHbm*d(psat(Tbm), Tbm) '0' '0' '(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*RHbm*d(psat(Tbm), Tbm)'; ... 'hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*psat(Tbm) '0' '0' 'hv*(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*psat(Tbm)'; ... 'd(comp2.mat10.def.w_e(RHbm), RHbm)*Dw_e+(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*psat(Tbm) '0' '0' 'd(comp2.mat10.def.w_e(RHbm), RHbm)*Dw_e+(comp2.delta_air(Tbm)/mu_e)*psat(Tbm)'});
model.physics('c2').feature('cfeq2').set('f', {'0'; '0'});
model.physics('c2').feature('cfeq2').set('da', {'cp_e*rho_e+cp_w*comp2.mat10.def.w_e(RHbm)'; '0'; '0'; 'd(comp2.mat10.def.w_e(RHbm), RHbm)'});
model.physics('c2').feature('cfeq2').label('eriste - Coefficient Form PDE 2');
model.physics('c2').feature('init2').set('Tbm', '273.15+5');
model.physics('c2').feature('init2').set('RHbm', '0.5');
model.physics('c2').feature('init2').label('eriste - Initial Values 2');
model.frame('material1').sorder(1);
model.result.table('tbl1').label('Probe Table 1');
model.physics('ht').feature('porous1').set('k_mat', 'userdef');
model.physics('ht').feature('porous1').set('Cp_mat', 'userdef');
model.physics('ht').feature('porous1').set('Rs_mat', 'userdef');
model.study.create('std1');
model.study('std1').create('param', 'Parametric');
model.study('std1').create('time', 'Transient');
model.batch.create('p1', 'Parametric');
model.batch('p1').create('sol', 'Solutionseq');
model.batch('p1').create('saDef', 'Save');
model.batch('p1').study('std1');
model.study('std1').feature('param').set('pname', {'R_korvausilma'});
model.study('std1').feature('param').set('save', 'on');
model.study('std1').feature('param').set('punit', {'m^3/s'});
model.study('std1').feature('param').set('plistarr', {'0.005755556 0.011511111 0.017266667 0.023022222 0.028777778 0.057555556 0.143888889'});
model.study('std1').feature('param').set('keepsol', 'last');
model.study('std1').feature('time').set('rtolactive', true);
model.study('std1').feature('time').set('tlist', 'range(0, 12*3600, 2*365*24*3600)');
model.sol('sol1').attach('std1');
model.sol('sol1').feature('v1').set('clist', {'range(0, 12*3600, 2*365*24*3600)'});

```

```

model.sol('sol1').feature('t1').set('atoludotactive', {'comp1_c' 'off'
'comp1_T' 'off' 'comp2_RHap' 'off' 'comp2_Tap' 'off' 'comp1_ODE1' 'off'
...
'comp1_ODE2' 'off' 'comp1_RHbm' 'off' 'comp1_Tbm' 'off'});
model.sol('sol1').feature('t1').set('maxstepbdfactive', true);
model.sol('sol1').feature('t1').set('tlist',
'range(0,12*3600,2*365*24*3600)');
model.sol('sol1').feature('t1').set('atoludot', {'comp1_c' '1e-3'
'comp1_T' '1e-3' 'comp2_RHap' '1e-3' 'comp2_Tap' '1e-3' 'comp1_ODE1'
'1e-3' ...
'comp1_ODE2' '1e-3' 'comp1_RHbm' '1e-3' 'comp1_Tbm' '1e-3'});
model.sol('sol1').feature('t1').set('estrat', 'exclude');
model.sol('sol1').feature('t1').set('maxstepbdf', '3600');
model.sol('sol1').feature('t1').set('maxorder', '2');
model.sol('sol1').feature('t1').set('atolmethod', {'comp1_c' 'global'
'comp1_T' 'global' 'comp2_RHap' 'global' 'comp2_Tap' 'global'
'comp1_ODE1' 'global' ...
'comp1_ODE2' 'global' 'comp1_RHbm' 'global' 'comp1_Tbm' 'global'});
model.sol('sol1').feature('t1').set('atol', {'comp1_c' '1e-3' 'comp1_T'
'1e-3' 'comp2_RHap' '1e-3' 'comp2_Tap' '1e-3' 'comp1_ODE1' '1e-3' ...
'comp1_ODE2' '1e-3' 'comp1_RHbm' '1e-3' 'comp1_Tbm' '1e-3'});
model.sol('sol1').feature('t1').feature('fcl').active(true);
model.sol('sol1').feature('t1').feature('fcl').set('jstech', 'onevery');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('fcl').set('linsolver', 'd1');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('fcl').set('damp', '0.9');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('fcl').set('maxiter', '50');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('d1').set('linsolver',
'pardiso');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('sel').fea-
ture('ss1').set('segvar', {'comp1_RHbm' 'comp1_Tbm'});
model.sol('sol1').feature('t1').feature('sel').fea-
ture('ss1').set('subdtech', 'auto');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('sel').fea-
ture('ssDef').set('segvar', {'comp1_c' 'comp1_T' 'comp2_RHap' 'comp2_Tap'
'comp1_ODE1' 'comp1_ODE2'});
model.sol('sol1').feature('t1').feature('sel').fea-
ture('ssDef').set('subdamp', '0.9');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('sel').fea-
ture('ssDef').set('linsolver', 'd1');
model.sol('sol1').feature('t1').feature('sel').fea-
ture('ssDef').set('subjtech', 'onevery');
model.sol('sol1').runAll;
model.batch('p1').set('punit', {'m^3/s'});
model.batch('p1').set('plistarr', {'0.0057555556 0.0115111111 0.017266667
0.0230222222 0.0287777778 0.0575555556 0.143888889'});
model.batch('p1').set('err', true);
model.batch('p1').set('pname', {'R_korvausilma'});
model.batch('p1').set('control', 'param');
model.batch('p1').feature('sol').set('seq', 'sol1');
model.batch('p1').attach('std1');
model.batch('p1').run;
out = model;

```