

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Jukka Varpiola

LÄMMÖN- JA KOSTEUDENSIIRRON SIMULOINTI WUFI 5.1 PRO  
-OHJELMISTOLLA

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2013



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2013**  
**Rakennustekniikan koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU

**Tekijä**  
Jukka Varpiola

**Nimeke**  
Lämmön- ja kosteudensiirron simulointi WUFI 5.1 Pro -ohjelmistolla

**Toimeksiantaja**  
Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu

**Tiivistelmä**

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua lämmön- ja kosteudensiirron simulointiin WUFI 5.1 Pro -ohjelmistolla. Aineistossa käydään läpi rakennusfysiikan perusteita, WUFI:n laskentaprosessi vaihe vaiheelta, tulkitaan simuloinnista saatuja laskentatuloksia ja verrataan niitä perinteisiin kosteuden laskentakeinoihin. Toimeksiantajana toimi Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu.

Tutkimuksen taustatieto perustuu suurimmaksi osaksi kirjallisuuteen ja WUFI:n mukana tulleeseen englanninkieliseen käyttöoppaaseen, joiden avulla luotiin laaja katsaus WUFI:n käyttöön. Lisäksi työssä tehtiin kaksi esimerkkisimulointia. Ensimmäisen simuloinnin tarkoituksena oli olla mahdollisimman yksinkertainen malli, josta saatuja tuloksia verrattiin diffuusion taulukkolaskennasta saatuihin suhteellisen kosteuden käyriin. Toinen mallinnus tehtiin samasta rakenteesta, mutta simuloinnissa käytettiin WUFI:n tarjoamia lisäominaisuuksia, joita ei voida perinteisessä käsinlaskennassa ottaa huomioon.

Saatujen tuloksien välillä ei ollut kriittisiä eroavaisuuksia kyseisessä esimerkkirakenteessa, mutta tämän todettiin johtuvan simuloitavasta rakenteesta. Kauaskantoisempien johtopäätösten vetämiseksi simuloiteja pitäisi tehdä enemmän ja niitä tulisi verrata laboratoriokokeisiin.

**Kieli**  
suomi

Sivuja 70  
Liitteet 6  
Liitesivumäärä 38

**Asiasanat**  
WUFI, simulointi, rakennusfysiikka, mallintaminen



**THESIS**  
**May 2013**  
**Degree Programme in Civil Engineering**

Karjalankatu 3  
FI 80200 JOENSUU  
FINLAND

Author  
Jukka Varpiola

Title  
Simulation of heat and moisture transference with the WUFI 5.1 Pro software

Commissioned by  
Karelia University of Applied Sciences

Abstract

The goal of this thesis was to explore the simulation of heat and moisture transference with the WUFI 5.1 Pro software. The material goes through the basics of physics in construction, the calculation process of the WUFI software in stages, interpretations of the calculation results and their comparisons to traditional means of moisture calculation. The client of this thesis is the Karelia University of Applied Sciences.

The background of this study is based mostly on literature and the English manual of the WUFI software, which were used to make a wide review into the use of the software. Additionally this study includes two example simulations. The first simulation was meant to be as simple a model as possible, the results of which were compared to the relative moisture graphs from a diffusion spreadsheet. The second simulation was done in the same structure, but additional functions offered by the WUFI software were put into use which cannot be taken into account in traditional manual calculation.

The gained results did not have critical differences in the example structure but this was found to be a result of the structure used in the simulations. To draw far-reaching conclusions from the results would require more simulations and comparisons to laboratory experiments.

Language  
Finnish

Pages 70  
Appendices 6  
Pages of Appendices 38

Keywords  
WUFI, simulation, building physics, modeling

## Sisältö

1. Johdanto .....	6
2. Lämpö.....	7
2.1. Lämmön johtuminen (konduktio) .....	7
2.2. Lämpösäteily (emissio).....	8
2.3. Lämmön virtaus (konvektio) .....	11
3. Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen .....	11
3.1. Tasapaksut ja tasa-aineiset ainekerrokset (homogeeniset).....	12
3.2. Epätasa-aineiset ainekerrokset (epähomogeeniset) .....	13
3.3. Pintavastukset .....	14
4. Kosteus.....	15
4.1. Kosteuslähteet.....	15
4.2. Sade .....	15
4.3. Veden kapillaarinen siirtyminen.....	16
4.4. Ilmankosteus .....	16
4.5. Vesihöyryn diffuusio .....	19
4.6. Vesihöyryn konvektio .....	23
5. Materiaalien kosteuskäyttäytyminen .....	24
5.1. Kosteuspitoisuuden määrittäminen .....	24
5.2. Materiaalin hygroskooppisuus .....	25
5.3. Materiaalien tasapainokosteuskäyrät .....	26
5.4. Rakennuskosteus.....	26
5.5. Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys .....	29
6. WUFI.....	31
6.1. WUFI:n yleiskuvaus.....	31
6.2. Laskennan teoria.....	31
6.3. Projektin lisäys .....	32
6.4. Rakenne ja monitorointipisteet .....	32
6.5. Lähteet ja nielut .....	34
6.6. Materiaalitietokanta .....	37
6.7. Materiaalitiedot .....	38
6.8. Ilmansuunta, kallistuskulma ja rakennuskorkeus.....	42
6.9. Pinnan siirtokertoimet.....	45
6.10. Alkuolosuhteet.....	48
6.11. Laskentajakso/jakaumat .....	49
6.12. Numeriikka .....	50
6.13. Ilmasto.....	52

6.14. Laskenta.....	54
6.15. Tulokset.....	56
6.16. Tuloksien jälkiprosessointi.....	57
7. Simuloitavat esimerkkirakenteet ja vertailu käsinlaskentaan .....	60
7.1. Mallinnus I .....	61
7.2. Mallinnus II .....	63
7.3. WUFI:in syötettävät tiedot .....	66
8. Mallinuksien tulokset.....	67
9. Johtopäätelmät .....	68
10.Pohdinta.....	70

## 1. Johdanto

Ilmastonmuutos, kiristyvät lämmöneristysmääräykset ja suuret saneeraustarpeet ovat tehneet rakennusfysikaalisesta tutkimuksesta ja suunnittelusta kasvavan alan. Sisäilmaongelmat ovat jatkuvasti uutisotsikoissa ja terveellisiin rakenteisiin halutaan panostaa. Väärin suunnitellut rakenteet tarvitsevat myös nopeasti korjausta, jolloin rakentamisen kustannukset kasvavat tarpeettoman suuriksi.

Suunnittelijan tulee hallita monia fysikaalisia tekijöitä, jotta lopputuloksena olisi toimiva kokonaisuus. Esiintyneiden epäkohtien tärkein syy onkin liian usein suunnittelijoiden puutteellinen rakennuksen ja rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan tuntemus. Suunnittelun ja tutkimuksen uusimmat apuvälineet ovat erilaiset rakennusfysiikkaohjelmat, joiden avulla laadittavat lämpö- ja kosteustekniset laskelmat auttavat ymmärtämään rakenteiden toimivuutta.

Moni aloitteleva suunnittelija ja varsinkin opiskelija on ongelmien edessä aloittaessaan rakennusfysikaalisen mallintamisen. Ohjekirjat ovat useimmiten englanniksi ja sisältävät paljon vaikealukuista ammattisanastoa ja syötettäviä laskentaparametrejä on paljon. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutustuttaa lukija yksidimensionaaliseen kosteuden- ja lämmönsiirtolaskentaohjelmistoon WUFI 5.1 Pro:hon ja sen laskentaprosessiin ohjekirjamaisesti. Työn tavoitteena on myös tarkastella mallinnuksen avulla syntyviä tuloksia ja verrata niitä perinteisiin käsinlaskentakeinoihin.

Opinnäytetyössä tehdään aluksi simuloinnin ymmärtämiseksi kirjallisuuskatsaus rakennusfysiikan perusteisiin, jonka jälkeen tutustutaan WUFI:in syötettäviin laskentaparametreihin vaihe vaiheelta. Tämän jälkeen tehdään esimerkkirakenteesta kaksi kappaletta erilaisia kosteus- ja lämmönsiirtosimulaatioita. Saatuja tuloksia verrataan toisiinsa ja perinteiseen diffuusion taulukkolaskentaan.

## 2. Lämpö

Lämpö pystyy siirtymään rakenteessa tai tilassa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion avulla.

### 2.1. Lämmön johtuminen (konduktio)

Johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen eli tapahtuu lämmön virtaamista. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa eli virtaamaan lämpimästä kylmempään päin. Lämmön johtumista esiintyy kiinteissä aineissa ja nesteissä. [1, s. 37.]

Lämmön tasoittumisnopeus eli lämpövirran tiheys yksikerrosrakenteessa voidaan laskea kaavalla 1.

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (1)$$

missä

$q$  = lämpövirran tiheys yksidimensionaalisessa stationääritilassa, yksikerrosrakenne ( $W/m^2$ )

$\lambda$  = lämmönjohtavuus ( $W/(mK)$ )

$T_1$  ja  $T_2$  = tasomaisen ja tasapaksun ainekerroksen pintojen 1 ja 2 lämpötilat ( $T_1 > T_2$ ), (K tai °C)

$d$  = seinämän paksuus (m)

Lämpövirran tiheys monikerrosrakenteessa voidaan laskea kaavalla 2.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_t} \quad (2)$$

missä

$q$  = lämpövirran tiheys yksidimensionaalisessa stationääritilassa, monikerrosrakenteen (W/m<sup>2</sup>)

$R_t$  = kokonaislämmönvastus ((m<sup>2</sup>K)/W)

$T_1$  ja  $T_2$  = tasomaisen ja tasapaksun ainekerroksen pintojen 1 ja 2 lämpötilat ( $T_1 > T_2$ ), (K tai °C)

## 2.2. Lämpösäteily (emissio)

Säteilyssä energiaa siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettävät eli emittoivat säteilyä. Eniten lämpösäteilyä emittoi musta kappale. Osuessaan johonkin pintaan säteily osittain heijastuu ja osittain absorboituu. Lämpäisevissä pinnoissa osa säteilystä menee vielä pinnan läpi. [1, s. 37; 5, s. 5.]

Lämpösäteily käsittää aallonpituusalueen 10<sup>-1</sup>–10<sup>2</sup> μm. Tästä näkyvän valon osuus on 0.4–0.7 μm. Mitä korkeampi säteilevän pinnan lämpötila on, sitä suurempi osa siitä lähtevästä säteilystä on lyhytaaltoista (< 3 μm). Rakennusfysiikkalisissa tarkasteluissa säteily voidaan jakaa lyhytaaltoiseen auringon säteilyyn ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lyhytaaltoista säteilyä on suoran auringonsäteilyn lisäksi ilmakehästä ja pilvistä heijastunut diffuusi säteily. [7, s. 64.]

Diffuusia säteilyä syntyy, kun auringon säteily heijastuu ilmakehässä olevista hiukkasista ja molekyyleistä eri suuntiin. Säteily heijastuu myös maan pinnalta ja rakennuksista. Tällöin heijastunut säteily on pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Myös eri kappaleiden ja pintojen emittoima lämpösäteily on pitkäaaltoista säteilyä huonelämpötila-alueella. [7, s. 64.]



Mustan kappaleen kokonaissäteilyn tiheys lasketaan kaavalla 3.

$$q_m = \sigma \times T^4 \quad (3)$$

missä

- $q_m$  = mustan kappaleen emittoiva kokonaissäteilyn tiheys (W/m<sup>2</sup>)  
 $\sigma$  = 5,67 • 10<sup>-8</sup> (W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)) Stefan Boltzmannin säteilyvakio  
 $T$  = kappaleen lämpötila (K)

Todellisten pintojen säteilytehon tiheys  $q_s$  on pienempi kuin mustan pinnan. Suhdetta  $q_s/q_m$  kutsutaan emissiviteetiksi  $\varepsilon$ . Emissiviteetti riippuu sekä säteilyn aallonpituudesta että säteilyn lähtökulmasta pintaan nähden. Aallonpituusriippuvuudesta johtuen emissiviteetti riippuu myös pinnan lämpötilasta. Tietyllä kappaleella lämpötila-alueella emissiviteetin arvoja voidaan pitää vakiona. [7, s. 66.]

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa pintoja voidaan käsitellä ns. harmaina pintoina, joista säteilyn oletetaan emittoituvan diffuusina säteilyä tasaisesti kaikkiin suuntiin. Harmaan pinnan emissiviteetin oletetaan myös olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. [7, s. 66.]

Todellisten pintojen säteilytehon tiheys lasketaan kaavalla 4.

$$q_s = \varepsilon \times q_m = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (4)$$

missä

- $q_s$  = pinnan lähettämän säteilytehon tiheys (W/m<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon$  = emissiviteettikerroin  
 $\sigma$  = 5,67 • 10<sup>-8</sup> (W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)) Stefan Boltzmannin säteilyvakio  
 $T$  = kappaleen lämpötila (K)

Säteilyn lisäksi pinnat absorboivat ympäristössään olevien pintojen säteilyä. Kappaleen nettosäteilyvirran tiheys lasketaan kaavalla 5.

$$q_t = \varepsilon \times \sigma \times (T^4 - T_0^4) \quad (5)$$

missä

$q_t$  = pinnan nettosäteilylämpövirran tiheys ( $W/m^2$ )

$\varepsilon$  = emissiviteettikerroin

$\sigma$  =  $5,67 \cdot 10^{-8}$  ( $W/(m^2K^4)$ ) Stefan Boltzmannin säteilyvakio

$T$  = kappaleen lämpötila (K)

$T_0$  = ympäristön lämpötila (K)

Taulukossa 1 näkyy eräiden pintojen emissiviteettejä huoneenlämmössä.

Taulukko 1. Pintojen emissiviteettejä huoneenlämmössä [1, s. 12.]

Nimi	Emissiviteetti
Alumiini (kaupallinen kirkkaus)	0,09
Alumiini (oksidoitunut)	0,20 – 0,33
Betoni, karkea	0,94
Kattohuopa	0,92 – 0,94
Kipsi	0,8 – 0,9
Lasi	0,94
Musta maali	0,8 – 0,97
Valkoinen maali	0,9 – 0,97
Puu	0,8 – 0,9
Poltettu tiili	0,91 – 0,93

### 2.3. Lämmön virtaus (konvektio)

Lämpöä pystyy siirtymään kaasun tai nesteen virtauksien mukana. Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa kaasun tai nesteen liikkuminen aiheutuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu ulkopuolisen voiman vaikutuksesta, kuten ilmanvaihdon puhaltimien tai ihmisten liikkeiden takia. [2, s. 13.]

Lämpöä siirtyy myös aineen olomuodon muutoksissa (sulamis- ja höyrystymislämpö) lämpötilan muuttumatta. Tätä kutsutaan latentiksi eli piileväksi lämmöksi. [1, s. 38.]

## 3. Lämmönläpäisykerroimen määrittäminen

Lämmönläpäisykerroin ( $U$ ) ilmoittaa lämpömäärän, joka läpäisee sekunnissa neliömetrin suuruisen rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien tilojen välillä on  $1\text{ °C}$ . Käytännössä  $U$ -arvo ei voi pysyä vakiona, vaan se huononee rakenteen kastuessa ja paranee jälleen rakenteen kuivuesssa. [1. s. 41.]

Lämmönläpäisykerroin ( $U$ ) lasketaan kaavalla 6.

$$U = \frac{1}{R_T} \tag{6}$$

missä

$R_T$  = rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön (sisältäen pintavastukset) ( $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ )

### 3.1. Tasapaksut ja tasa-aineiset ainekerrokset (homogeeniset)

Kun rakennusosan ainekerrokset ovat tasapaksuja ja tasa-aineisia ja lämpö siirtyy ainekerrokseen nähden kohtisuoraan, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus  $R_T$  kaavalla 7. [6, s. 5.]

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{qn} + R_{se} \quad (7)$$

missä

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1}, R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2} \dots R_m = \frac{d_m}{\lambda_m}$$

$d_1, d_2, d_m$  = ainekerroksen 1,2,...m paksuus (m)

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_m$  = ainekerroksen 1,2,...m lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (W/(K\*m))

$R_g$  = rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus ((m<sup>2</sup>K)/W)

$R_b$  = maan lämmönvastus ((m<sup>2</sup>K)/W)

$R_{q1}, R_{q2}, R_{qn}$  = ohuen ainekerroksen 1,2, ...n lämmönvastus ((m<sup>2</sup>K)/W)

$R_{si} + R_{se}$  = sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa ((m<sup>2</sup>K)/W)

### 3.2. Epätasa-aineiset ainekerrokset (epähomogeeniset)

Rakennusosan ollessa epätasa-aineinen niin, että siinä on pintojen suuntaisia ainekerroksia, joissa on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia osa-alueita, lasketaan ainekerroksen  $j$  lämmönvastus  $R_j$  kaavalla 8. [6, s. 5.]

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_n}{R_{nj}} \quad (8)$$

missä

$f_a, f_b, f_n$  = epätasa-aineisessa ainekerroksessa  $j$  olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a, b, \dots, n$  suhteellinen osuus ainekerroksen kokonaispinta-alasta

$R_{aj}, R_{jb}, R_{nj}$  = epätasa-aineisessa kerroksessa  $j$  olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a, b, \dots, n$  lämmönvastus, jossa  $R_{aj} = d_j / \lambda_a$ ,  $R_{jb} = d_j / \lambda_{bj}$ ,  $R_{jn} = d_j / \lambda_{nj}$  ((m<sup>2</sup>K)/W)

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$  = ainekerroksen 1,2, ...  $n$  lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo ((m<sup>2</sup>K)/W)

Kokonaislämmönvastus  $R_T$  lasketaan kaavalla 9 ja lämmönläpäisykerroin kaavalla 6.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + \Sigma R + R_{se} \quad (9)$$

missä

$R_1, R_2, R_n$  = epätasa-aineisen ainekerroksen 1, 2, 3,  $n$  lämmönvastus laskettuna kaavalla 8 ((m<sup>2</sup>K)/W)

$\Sigma R$  = tasa-aineisten ainekerrosten, ilmakerroksen, ohuiden ainekerrosten ja maan lämmönvastusten summa ((m<sup>2</sup>K)/W)

$R_{si} + R_{se}$  = sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen summa ((m<sup>2</sup>K)/W)

### 3.3. Pintavastukset

Pintavastus kuvaa rakenteen pinnan lähelle muodostuvan hitaasti liikkuvan ilmakerroksen muodostamaa lämmönvastusta. Pintavastukset rakenteiden ulko- ja sisäpinnoilla tai ilmapäleissä riippuvat ilman liikkeestä pinnoilla ja muista säteilevistä pinnoista ja säteilylähteistä. [7, s. 10.]

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa pintavastuksille voidaan käyttää likiarvoja (taulukko 2), jotka riippuvat pinnan suunnasta. Lämpötilaeron aiheuttama kerrostuminen tai nostevirtaus vaikuttavat konvektioon, joka heikentää pintavastusta. [7, s. 10.]

Taulukko 2. Pintavastusten likiarvoja [6, s. 16.]

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

Ulkopinnan pintavastuksen riippuvuus pinnan suuntaisesta nopeudesta on esitetty taulukossa 3. Tavanomaisissa tarkasteluissa tuulen keskimääräiseksi nopeudeksi oletetaan 4 m/s. [7, s. 11.]

Taulukko 3. Ulkopinnan pintavastuksen riippuvuus tuulen nopeudesta [7, s. 11]

Tuulen nopeus (m/s)	Ulkopinnan pinta- vastus $R_{se}$ $m^2K/W$
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

## 4. Kosteus

### 4.1. Kosteuslähteet

Rakennuksissa ja rakenteissa esiintyvä kosteus esiintyy näkyvänä vetenä, näkymättömänä vesihöyrynä ja rakenteissa olevana rakennekosteutena. [1, s. 52.]

### 4.2. Sade

Sade on näkyvin rakennukseen kohdistuvista kosteusrasituksista ja sitä voi esiintyä vetenä, räntänä tai lumena. Suomessa yleisin sadetyyppi on ns. pystysade, joka rasittaa pääasiallisesti vaakasuoria ja vinoja pintoja ja räystäättömissä taloissa myös pystysuoria pintoja. [3, s. 52.]

Viistosateeseen liittyy aina voimakas tuuli. Viistosadetta voidaan pitää pahimpana rakennuksen vaippaan kohdistuvana rasitustekijänä ja kosteusvaurioiden aiheuttajana. Tuulen vaikutuksesta lumi ja vesi voivat nousta ylöspäin julkisivuverhouksen pinnassa. Ulkoseinän alaosassa ja perustusten maanpäällisissä osissa tulee ottaa mahdolliset sadeveden roiskumisen ja lammikoitumisen aiheuttamat kosteusrasitukset huomioon. [3, s. 52.]

Rakennuksen korkeus ja muoto sekä lähiympäristö vaikuttavat siten, ettei viistosade kohdistu tasaisesti rakennuksen seinään. Rasitus on suurin korkeitten rakennusten yläosissa ja nurkissa. Seinien keskiosissa ja pientalojen seinissä rasitus on pienempi. Räystäiden suojaava vaikutus voi olla matalissa rakennuksissa huomattava, joten seinät eivät välttämättä kastu lainkaan. [2, s. 42.]

Viistosateen kerryttäessä vettä ulkoseinärakenteen pinnalle voi kosteutta siirtyä rakenteisiin kapillaarisen imun voimasta raoissa ja halkeamissa, painovoiman vaikutuksesta (raon suunnan ollessa alaspäin), veden liike-energian johdosta, ilmavirran mukana tai paine-eron vaikutuksesta. [3, s.72.]

### 4.3. Veden kapillaarinen siirtyminen

Vesi siirtyy kapillaarisesti materiaaliin pääsääntöisesti veden pintajännitysvoimien aiheuttaman huokosalipaineen vaikutuksesta materiaalin ollessa kosketuksessa vapaaseen veteen tai toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan materiaaliin. Vesi voi siirtyä kapillaarisesti mihin suuntaan tahansa ja kulkeutuvat kosteusmäärät voivat olla hyvin suuria. Kapillaarinen kosteustasapaino saavutetaan siinä vaiheessa, kun huokosalipaineen aiheuttama kapillaarinen imu ja painovoima ovat yhtä suuria. [3, s. 71-72.]

### 4.4. Ilmankosteus

Kaikki vedenpinnan yläpuolella olevat rakenteet ovat kosketuksissa ilman kanssa ja useimmat rakennusaineista ovat huokoisia, ja niiden huokosissa on ilmaa. Kostea ilma on kahden kaasun eli kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Kuiva ilma koostuu pääasiallisesti typestä, hapestä ja argonista. Kuivan ilman moolipaino  $M_i = 28,96$  kg/kmol ja vesihöyryn  $M_v = 18,02$  kg/kmol. Vesihöyry on siis ilmaa kevyempi kaasu ja ilma on sitä kevyempää, mitä enemmän se sisältää vesihöyryä. [2, s. 44.]

Tietyissä lämpötilassa ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä. Tätä vesihöyrymäärää kutsutaan kyllästyskosteudeksi. Tämä riippuu ilman lämpötilasta siten, että mitä korkeampi lämpötila on, sitä suurempi on myös kyllästyskosteus. Näitten välillä ei ole täsmällistä matemaattista yhteyttä, vaan kyllästyskosteuden määrittämiseen käytetään erilaisia likiarvokaavoja. [2, s. 45.]



Lämpötila-alueella -20 ...+80 °C kyllästyskosteus voidaan laskea kaavalla 10.

$$v = 4,85 + 3,47 \left(\frac{t}{10}\right) + 0,945 \left(\frac{t}{10}\right)^2 + 0,158 \left(\frac{t}{10}\right)^3 + 0,0281 \left(\frac{t}{10}\right)^4 \quad (10)$$

missä

$v_k$  = ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )

$t$  = ilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

Suhteellisella kosteudella RH tarkoitetaan ilmassa olevan kosteusmäärän suhdetta kyllästyskosteuteen. Suhteellinen kosteus ilmaistaan prosentteina ja se lasketaan kaavalla 11.

$$RH = \frac{v}{v_k} \times 100 \% \quad (11)$$

missä

$v$  = ilman sisältämä vesihöyrypitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )

$v_k$  = kyllästysvesihöyrypitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )

Ilman vesihöyrypitoisuutta voidaan myös kuvata vesihöyryn osapaineen  $p_v$  (Pa) avulla. Vesihöyrypitoisuuden ja vastaavan vesihöyryn osapaineen välillä vallitsee yhteys, joka voidaan laskea kaavalla 12. [4, s. 8.]

$$p_v = 461,4 \times 10^{-3} \times T \times v \quad (12)$$

missä

$T$  = ilman lämpötila (K)

$v$  = ilman vesihöyrypitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )

Ulkoilman vesihöyrypitoisuus vaihtelee paljon vuoden aikana. Se on suurimmillaan kesä kautena ja pienimmillään talvella. Paikkakuntien väliset erot Suomessa ovat melko pieniä. [4, s. 12.]

Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttavat pääasiassa ulkoilman suhteellinen kosteus, sisällä kehitetyn kosteuden määrä, ilmanvaihdon suuruus, vesihöyryn

diffuusio rakenteiden läpi ja vesihöyryn sitoutuminen rakennusaineisiin, joista kahden viimeksi mainitun vaikutus on vähäinen. [4, s. 14.]

Sisäilman vesihöyryn riippuvuutta edellä mainittuihin tekijöihin voidaan jatkuvuustilassa laskea taseyhtälöllä 13.

$$v_s = v_u + \frac{G}{nV} \quad (13)$$

missä

- $v_s$  = sisäilman vesihöyrypitoisuus (g/m<sup>3</sup>)  
 $v_u$  = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (g/m<sup>3</sup>)  
 $G$  = sisätilan kosteustuotto (g/h)  
 $n$  = sisätilan ilmanvaihtoluku (1/h)  
 $V$  = sisätilan tilavuus (m<sup>3</sup>)

Rakennuksessa tapahtuvasta toiminnasta aiheutuvat kosteuslisät voivat olla hyvinkin suuria kosteustuotoista riippuen (taulukko 4).

Taulukko 4. Kosteuden tuotto asuinrakennuksissa [3, s. 67.]

Kosteuslähde	Tuotto
Ihminen	40-300 g/h riippuen aktiviteetistä (keskimäärin 90 g/h)
Kylpy	700 g/h
Suihku	2600 g/h
Keittiötoiminta	600-1500 g/h (päivittäinen keskiarvo noin 100 g/h)
Avoin vesipinta	40 g/m <sup>2</sup> h
Kasvit	
- pienet kasvit	7-15 g/h
- keskikokoiset	10-20 g/h
Vaatteiden kuivaus	
- lingottu pyykki	10-50 g/h /kg, kuivaa pyykkiä
- vettä tippuva	20-100 g/h /kg, kuivaa pyykkiä

Tavallisessa rakentamisessa kosteuslisän arvioidaan olevan asuinrakennuksissa  $3 \text{ g/m}^3$ , kosteissa ja painovoimaisesti ilmastoiduissa rakennuksissa  $4 \text{ g/m}^3$  ja toimistorakennuksissa  $2 \text{ g/m}^3$ . [3, s. 67.]

Sisäilman kosteus ja sisätilojen kosteuslähteet aiheuttavat erilaisia kosteusrisi-  
tuksia, kuten sisäilman vesihöyryn diffuusiota rakenteisiin sisäpintojen läpi, si-  
säilman vesihöyryn konvektiota rakenteisiin rakojen kautta ilmavirtojen mukana  
ja vesihöyryn tiivistymistä vedeksi kylmissä pinnoissa ja valumista rakenteisiin.  
Suuri riski kosteuden tiivistymiselle on rakentamisen aikana talvella, jolloin kos-  
teusmäärät voivat olla hyvinkin suuria, esimerkiksi betonilaattojen kuivumisesta  
johtuen. [3, s. 68.]

#### **4.5. Vesihöyryn diffuusio**

Vesihöyryn diffuusio on kaasun molekyylien liikettä kaasun suuremmasta pitoi-  
suudesta pienempään pitoisuuteen. Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoite-  
taan yleensä kosteuden liikkumista vesihöyrynä rakenteiden läpi. Lähes kaikki  
materiaalit läpäisevät tietyn määrän vesihöyryä. [1, s. 56.]

Tyypillisin vesihöyryn diffuusiosiiirtyminen esiintyy Suomessa talviaikaan, kun  
sisäilmassa on enemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa, jolloin sisäilman vesi-  
höyry pyrkii kulkeutumaan ulkoilmaan rakenteiden läpi. Diffuusiotarkasteluissa  
ilman vesihöyrypitoisuutta voidaan kuvata vesihöyrypitoisuutena tai vesihöyryn  
osapaineena. Kosteusvaurioita syntyy yleensä, jos rakenteen sisäpuolelta pää-  
see vesihöyryä diffuusiolla enemmän rakenteisiin kuin rakenteesta kerkeää  
poistua. [4, s. 27; 3 s. 72.]

Vesihöyryn diffuusiovirtaus ( $\text{kg/m}^2$ ) voidaan laskea osapaine-eroilla kaavalla 14.

$$g = \frac{p_{vs} - p_{vu}}{\Sigma Z_T} \quad (14)$$

missä

$p_{vs}$  = vesihöyryn osapaine sisäilmassa (Pa)

$p_{vu}$  = vesihöyryn osapaine ulkoilmassa (Pa)

$\Sigma Z_T$  = Koko rakenteen vesihöyrynvastus ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

Tehtäessä diffuusiolaskelmat vesihöyryn osapainelaskelmina lasketaan vesihöyrynvastus  $Z_T$  kaavalla 15.

$$Z_T = \Sigma \frac{d}{\delta_p} + Z_p \quad (15)$$

missä

$d$  = ainekerroksen paksuus (m)

$\delta_p$  = tasapaksun ainekerroksen vesihöyryn läpäisevyys ( $\text{kg/msPa}$ )

$Z_p$  = ohuiden ainekerrosten vesihöyrynvastus ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

Diffuusiolaskennalla on laskettavissa myös vesihöyryn osapaine jossakin rakenteen tarkastelukohdassa kaavalla 16.

$$p_{vx} = p_s - \frac{\Sigma Z_{px}}{Z_T} (p_s - p_u) \quad (16)$$

missä

$p_{vx}$  = vesihöyryn osapaine kohdassa x (Pa)

$\Sigma Z_{px}$  = sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

$\Sigma Z_T$  = koko rakenteen vesihöyrynvastus ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

$p_s, p_u$  = vesihöyryn osapaineet sisä- ja ulkoilmassa (Pa)

Lämpötilajakauma rakenteessa lasketaan kaavalla 17.

$$t_x = t_s \frac{\sum R_x}{R_T} (t_s - t_u) \quad (17)$$

missä

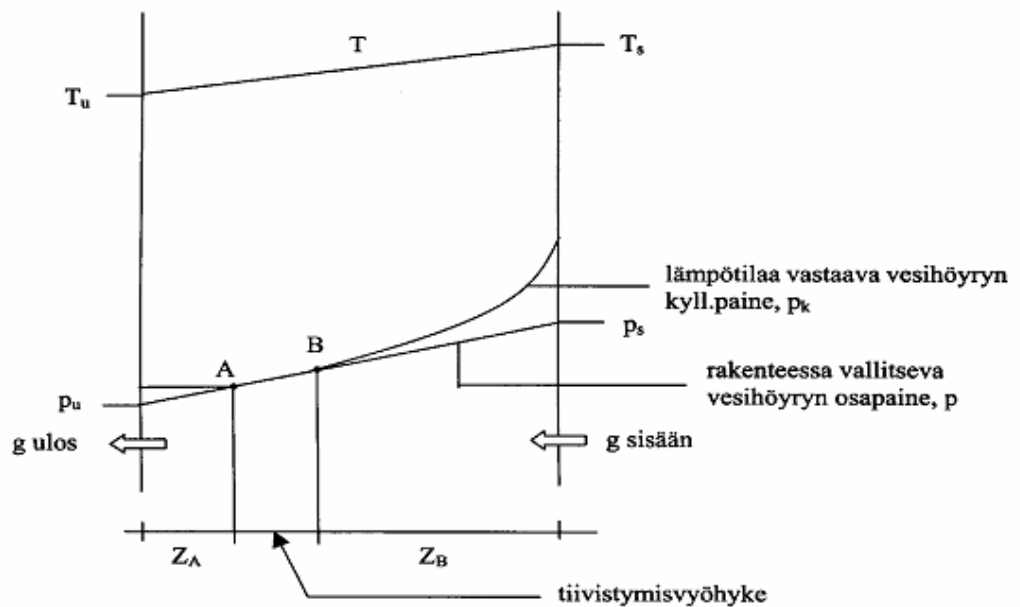
$t_x$  = Lämpötila kohdassa x (°C)

$\sum R_x$  = lämmönvastus sisäpinnasta kohtaan x ( $\text{m}^2\text{°C/W}$ )

$R_T$  = koko rakenteen lämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

$t_s, t_u$  = sisä- ja ulkolämpötilat (°C)

Diffuusiolaskelmilla voidaan tutkia mm. vesihöyryn kondensoitumismahdollisuutta rakenteeseen. Sen avulla voidaan myös tarkastella suhteellista kosteutta eri kohdissa ja arvioida rakenteisiin mahdollisesti tiivistyvää kosteutta vesihöyryn diffuusiovirtauksen seurauksena. Kuvio 1 esittää tilannetta, jossa vesihöyryn osapaine ylittää kyllästysosapaineen ja kosteutta tiivistyy rakenteeseen. [4, s. 29-30.]



Kuvio 1. Vesihöyryn tiivistyminen rakenteeseen. [4, s. 30.]

Kun tiivistymistä tapahtuu rakenteen sisällä, lasketaan aikayksikössä tiivistynyt vesimäärä ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) kaavalla 18.

$$g = \frac{p_s - p_B}{Z_B} - \frac{p_A - p_u}{Z_A} \quad (18)$$

missä

- $p_s$  = vesihöyryn osapaine sisäilmassa (Pa)
- $p_b$  = vesihöyryn osapaine kohdassa B (Pa)
- $Z_B$  = rakenteen vesihöyrynvastus sisäpinnasta kohtaan B ( $\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$ )
- $p_A$  = vesihöyryn osapaine kohdassa A (Pa)
- $p_u$  = vesihöyryn osapaine ulkoilmassa (Pa)
- $Z_A$  = rakenteen vesihöyrynvastus kohdasta A ulkopintaan ( $\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$ )

Ensimmäinen termi kuvaa sisältä rakenteeseen diffundoituvaa ja tiivistyvää kosteusmäärää. Toinen termi kuvaa tiivistymiskohdasta ulos diffundoituvaa kosteusmäärää. Termien erotus kuvaa seinärakenteeseen jäävää kosteutta. [4, s. 30]

Rakenteessa voi tapahtua kuivumista myös ulos- että sisäänpäin. Aikayksikössä poistuva kosteus saadaan kaavasta 19.

$$g = \frac{p_A - p_u}{Z_A} + \frac{p_B - p_s}{Z_B} \quad (19)$$

missä

- $p_s$  = vesihöyryn osapaine sisäilmassa (Pa)
- $p_b$  = vesihöyryn osapaine kohdassa B (Pa)
- $Z_B$  = rakenteen vesihöyrynvastus sisäpinnasta kohtaan B ( $\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$ )
- $p_A$  = vesihöyryn osapaine kohdassa A (Pa)
- $p_u$  = vesihöyryn osapaine ulkoilmassa (Pa)
- $Z_A$  = rakenteen vesihöyrynvastus kohdasta A ulkopintaan ( $\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$ )

#### **4.6. Vesihöyryn konvektio**

Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan ilmavirtausten mukana kulkeutuvaa vesihöyryn siirtymistä. Ilmavirtaukset aiheutuvat ilmanpaine-eroista. Konvektiovirtauksia esiintyy ilman tiheyseroista johtuvana eli luonnollisena konvektiona tai esimerkiksi rakenteissa olevien reikien tai rakojen kautta ilmanpaine-erojen vaikutuksesta tapahtuvana pakotettuna konvektiona. [1, s. 56.]

Tyypillisin vesihöyrykonvektion virtausriski rakenteeseen on, kun sisätila on ylipaineinen verrattuna ulkoilmaan. Konvektion virtausreitteinä toimivat rakenteiden epäjatkuvuuskohdat, kuten saumat, raot, reiät ja läpiviennit, jotka voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisia kosteusmääriä diffuusion verrattuna. Huone-tilassa vallitseva alipaine vähentää rakenteisiin kohdistuvaa vesihöyrynpainetta ja kondensoitumisvaaraa. [1, s. 57; 4, s. 34.]

## 5. Materiaalien kosteuskäyttäytyminen

### 5.1. Kosteuspitoisuuden määrittäminen

Kiinteissä materiaaleissa kosteuspitoisuudella tarkoitetaan materiaalissa olevan veden kemiallisesti sitoutumatonta osuutta. Materiaalin kosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa monella eri tavalla eikä täysin vakiintunutta tapaa ole. Rakennusaineen absoluuttinen vesipitoisuus lasketaan kaavalla 20. [4, s. 35.]

$$f_a = \frac{m_v}{m_t} \quad (20)$$

missä

$f_a$  = absoluuttinen vesipitoisuus

$m_v$  = aineessa olevan veden massa (kg)

$m_t$  = kuiva-aineen massa (aine, josta kaikki vesi on poistettu) (kg)

Suhteellinen vesipitoisuus lasketaan kaavalla 21.

$$f_r = \frac{m_v}{m_t + m_v} \quad (21)$$

missä

$f_r$  = suhteellinen vesipitoisuus

$m_v$  = aineessa olevan veden massa (kg)

$m_t$  = kuiva-aineen massa (aine, josta kaikki vesi on poistettu) (kg)



Suhteellinen kuiva-ainepitoisuus lasketaan kaavalla 22.

$$f_t = \frac{m_t}{m_t + m_v} \quad (22)$$

missä

$f_t$  = suhteellinen kuiva-ainepitoisuus

$m_v$  = aineessa olevan veden massa (kg)

$m_t$  = kuiva-aineen massa (aine, josta kaikki vesi on poistettu) (kg)

Materiaalin kosteuspitoisuus lasketaan kaavalla 23.

$$w = \frac{m_v}{V} \quad (23)$$

$w$  = materiaalin kosteuspitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)

$m_v$  = materiaalissa olevan kosteuden massa (kg)

$V$  = kappaleen tilavuus (m<sup>3</sup>)

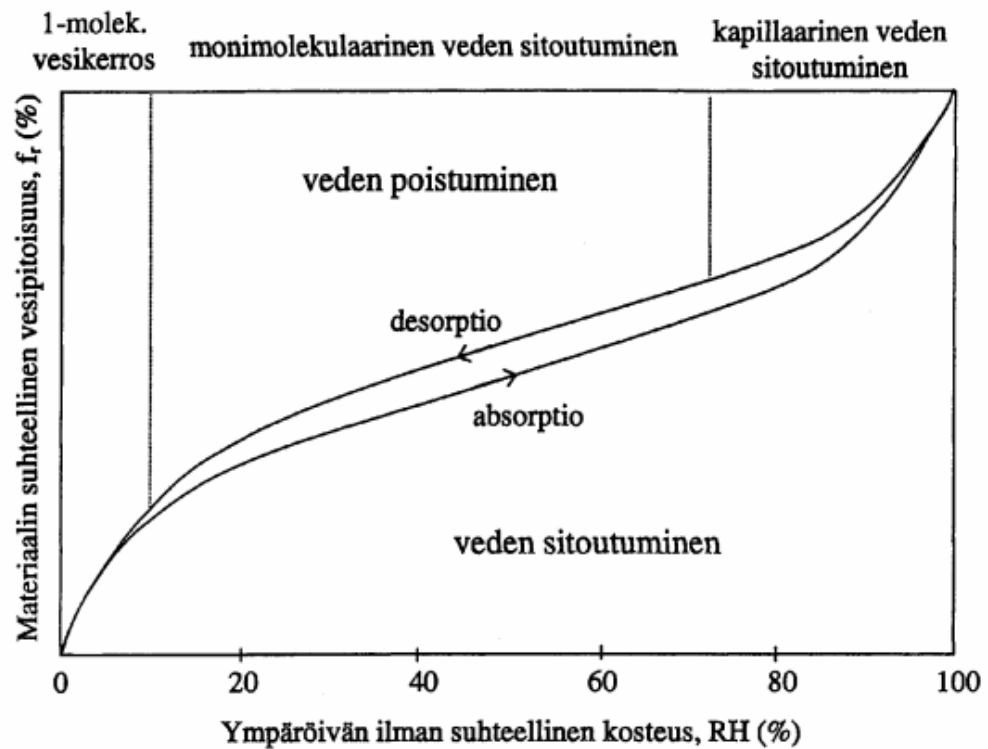
## 5.2. Materiaalin hygroskooppisuus

Hygroskooppisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä sitoa tai luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan. Aineen kosteuspitoisuuden ja ympäröivän ilman välille asettuu ns. hygroskooppinen tasapainokosteus, joka vaihtelee ainetta ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan suhteen riippuen siitä, onko tasapainokosteus saavutettu absorptio- tai desorptio- kautta. Materiaalin absorptio- ja desorptionopeus eli millä nopeudella se absorboi kosteutta ympäröivästä ilmasta tai luovuttaa sitä on tärkeä materiaalin kosteuskäyttäytymistä kuvaava tekijä. Sorption nopeus riippuu materiaalin ominaisuuksien lisäksi ympäristön ja materiaalin osapaineiden erotuksesta, lämpötilasta, materiaalin pinta-alasta ja kostean ilman liikkeestä. [4, s. 36.]

### 5.3. Materiaalien tasapainokosteuskäyrät

Aineen kosteuden ja ympäröivän ilman välille asettuu tasapaino, jota kuvaa tasapainokosteuskäyrä. Hygroskooppinen tasapaino eli kosteuspitoisuuden tasapaino määräytyy ensisijaisesti ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta. Lämpötila vaikuttaa käyrien kulkuun jonkin verran, sen sijaan absoluuttisen kosteuden vaikutus on vähäinen. [4, s. 37.]

Tasapainokosteuskäyrän periaate on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Tasapainokosteuskäyrän periaate. [4, s.69.]

### 5.4. Rakennuskosteus

Rakennuskosteus tarkoittaa sitä vesimäärää, jonka tulee poistua rakenteesta ennen kuin rakenne on kosteustasapainossa ympäristönsä kanssa. Rakennuskosteus on rakennusaineisiin ja -tarvikkeisiin valmistuksen, varastoinnin tai ra-

kentämisen aikana joutunutta kosteutta. Rakennuskosteus voidaan laskea kaavalla 24. [4, s. 39.]

$$W_{\text{rakennuskosteus}} = W_o - W_{\text{tasapaino}} \quad (24)$$

missä

$W_o$  = rakentamisvaiheessa rakenteessa oleva vesimäärä ( $\text{kg/m}^3$ )

$W_{\text{tasapaino}}$  = rakenteen tasapainokosteus ympäristön kanssa ( $\text{kg/m}^3$ )

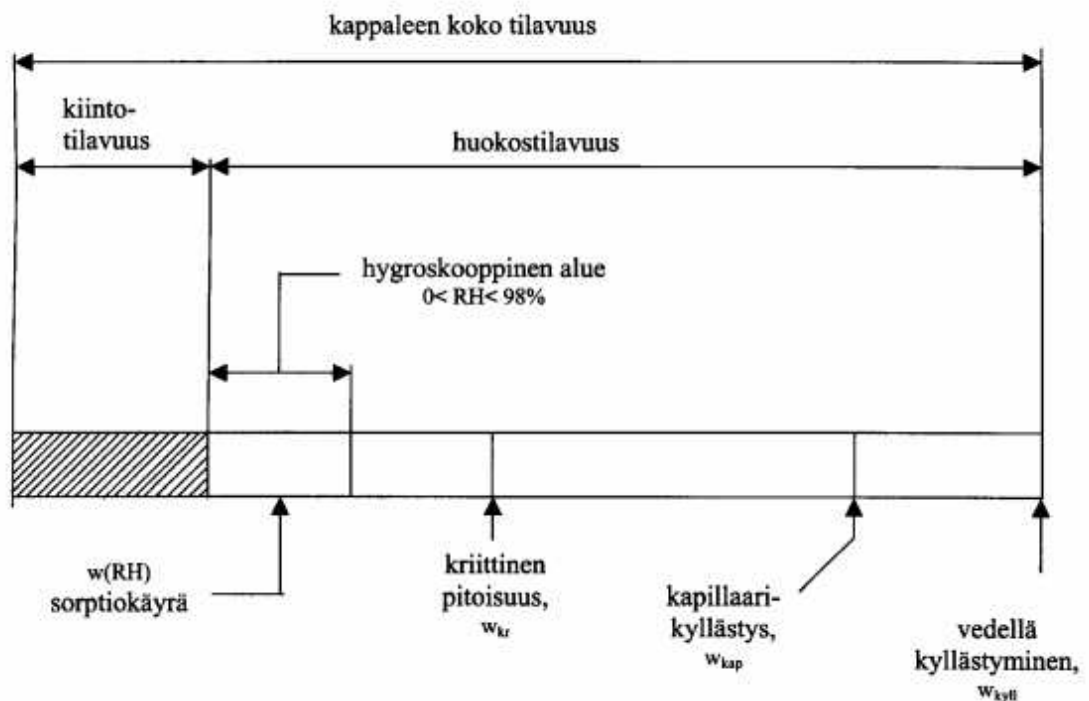
Rakenteessa rakentamisvaiheessa oleva vesimäärä voi vaihdella suuresti riippuen rakennusaineesta, varastoinnista, kuljetuksesta, rakenteen suojauksesta jne. Kosteuden poistumisnopeuteen vaikuttavat mm. rakenteen paksuus, kuivumissuuntien määrä ja rakennusaikana tapahtunut mahdollinen kastuminen. Rakennuskosteus voi tiivistyä kondensation vaikutuksesta ja aiheuttaa homevauraan. [4, s. 39; 3, s. 70.]

Taulukossa 5 on esitetty rakennusmateriaalien rakennuskosteuksia ympäristössä, jossa  $RH = 50\%$ .

Taulukko 5. Rakennusmateriaalien rakennuskosteuksia. [4 s.39.]

Materiaali	Rakennusvaiheen kosteus, $\text{kg/m}^3$	Kemiallisesti sidottu kosteus, $\text{kg/m}^3$	Tasapaino kosteus, $\text{kg/m}^3$	Rakennuskosteus, $\text{kg/m}^3$
Betoni K 15	180	40	25	115
Betoni K 25	180	60	30	90
Betoni K 40	180	70	40	70
Kevytbetoni	100 – 200		20	80 – 180
Kalkkisementti laasti	300	20	30	250
Tiili	10		10	0
Tiilimuuri	80		10	70
Puu	60		40	20

Rakenteissa esiintyvä kosteus voi olla näkyvää vettä, vesihöyryä tai rakenteisiin sitoutunutta rakennekosteutta. Kuivan huokoisen materiaalin joutuessa kosketuksiin kostean ilman, märän materiaalin tai veden kanssa, alkaa materiaali kastua. Ensiksi materiaalin pinta kastuu vesimolekyyleistä, jonka jälkeen vesimolekyylit tunkeutuvat materiaalin sisään diffuusion, kapillaari-ilmion tai konvektion avulla. Vesimolekyylit voivat tiivistyä vedeksi materiaalin pinnalle tai huokosseinämiin, jos niiden lämpötila alittaa ympäröivän ilman kastepistelämpötilan. Kuvio 3 esittää rakennusaineen eri kosteusalueet täysin kuivasta täysin märkään. [4, s. 41]



Kuvio 3. Materiaalin kosteusalueet. [4, s. 41.]

## 5.5. Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäiseväisyys on aineen ominaisuus päästää lävitseen vesihöyryä. Se ilmoittaa sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikön suorisen pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Merkintöinä käytetään  $\delta_v$  tai  $\delta_p$ . Yksikköinä käytetään  $\delta_v = \text{m}^2/\text{s}$  ja  $\delta_p = \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ . [8, s. 5.]

Materiaalin vesihöyrynvastus tarkoittaa vesihöyrynläpäisykerroimen käänteisarvoa. Se merkitään  $Z_v$  tai  $Z_p$ . Yksikköinä käytetään  $Z_v = \text{s}/\text{m}$  ja  $Z_p = \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ . [8, s. 6.]

Materiaalin vesihöyrynvastuksina käytetään myös  $S_d$ -arvoa ja diffuusiovastuskerrointa  $\mu$ .  $S_d$ -arvo kertoo materiaalin suhteellisen vesihöyrynvastuksen, joka ilmoitetaan ilmakerroksen paksuutena, yksikkönä m.  $S_d$ -arvo ilmaisee, kuinka paksua ilmakerrosta materiaalikerroksen vesihöyrynvastus vastaa. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin  $\mu$  kuvaa, kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen samassa lämpötilassa. Ilman diffuusiovastuskerroin on  $\mu = 1$ . [8, s. 8, 9 s. 1.]

$S_d$ -arvo voidaan laskea kaavalla 25, jos tiedetään materiaalin vesihöyrynvastus. [8, s. 9.]

$$S_d = Z_v \times \delta_{v\_ilma} \quad (25)$$

missä

$Z_v$  = materiaalin vesihöyrynvastus (s/m)

$\delta_{v\_ilma}$  = Ilman vesihöyrynläpäisevyys ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Ilman vesihöyrynläpäisevyys ilman lämpötilan suhteen lasketaan kaavalla 26. [8, s. 9.]

$$\delta_{v\_ilma} = 135,2 \times 10^3 \times (164,2 + 1,04 \times t) \times 10^{-12} \quad (26)$$

missä

$t$  = Ilman lämpötila [°C]

Diffuusiovastuskerroin  $\mu$  lasketaan kaavalla 27.

$$\mu = \frac{Sd}{d} \quad (27)$$

missä

$Sd$  = materiaalin Sd-arvo (m)

$d$  = ainekerroksen paksuus (m)

## 6. WUFI

### 6.1. WUFI:n yleiskuvaus

WUFI 5.1 PRO (Wärme- und Feuchetransport instationär – Transient Heat and Moisture Transport) suomenkielisen version on tuottanut VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka yhdessä saksalaisen Fraunhofer institut für bauphysikin kanssa. [10, s. 6.]

WUFI on tehty rakennuksen vaipan osien kosteus- ja lämpötekniseen tarkasteluun epästationäärisissä tilanteissa. Epästationäärinen laskenta on ajasta riippuvaa laskentaa, jossa ympäristön olosuhteet muuttuvat ajan mukana. WUFI:lla voidaan tutkia rakenteeseen joutuneen kosteuden tai rakennuskosteuden kuivumisaikoja, sisäisen kondenssin riskiä erilaisissa rakenneratkaisuissa, rakenteiden kosteuspitoisuuksia pitkällä aikavälillä ja viistosateen merkitystä rakennuskomponentteihin. [10, s. 6.]

### 6.2. Laskennan teoria

Lämmönsiirron laskennassa WUFI ottaa huomioon lämmön johtumisen, kosteuden faasimuutosten aiheuttaman lämmön sitoutumisen ja siirtymisen kosteuden mukana, lyhytaaltoisen auringon säteilyn ja yöaikaisen pitkäaaltoisen säteilyjäähdyttymisen. Konvektion mukana tapahtuvaa lämmönsiirtoa ei oteta huomioon, koska ilmavirtauksia on vaikea määrittää ja ne ovat harvoin yksidimensionaalisia. [10, s. 6.]

Kosteudensiirrosta otetaan huomioon vesihöyryn diffuusio, liuoksen diffuusio, pintadiffuusio ja veden kapillaarinen siirtyminen. Huomioon ei oteta gravitaatiota, veden paine-eroja eikä elektrokineettisiä tai osmoottisia vaikutuksia. [10, s. 6.]

### 6.3. Projektin lisäys

WUFI:n Projekti valikosta voidaan valita uusi projekti, lisätä tai poistaa laskentatapauksia ja hoitaa projektin tallentaminen ja lataaminen. Yhden projektin alla voi olla useampi laskentatapaus, jolloin niitä voi vertailla toisiinsa. Projektille pystytään antamaan tarvittavat tiedot Projekti-välilehden alla, kuten projektin nimi, asiakkaan nimi, projektin numero jne. [10, s. 7.]

### 6.4. Rakenne ja monitorointipisteet

Rakenne ja monitorointipisteet -välilehdellä (kuva 1) määritetään tutkittava rakennetyyppi. Välilehdellä syötetään rakennekerrosten materiaaliparametrit ja paksuudet. Osa yleisimmistä materiaaleista löytyy WUFI:n materiaalitietokannasta, mutta niitä voi lisätä myös käsin. Lisäksi välilehdellä valitaan hilajako, eli jaetaan rakennekerros numeerisen tarkastelun käyttämiin pienempiin kokonaisuuksiin. Rakenteeseen lisätään tarvittaessa tarkkailu- eli monitorointipisteet rakenteen sisälle myöhempää tarkastelua varten. Rakenteeseen voi myös lisätä lämpö-, kosteus- ja ilmanvaihtolähteitä/nieluja. [10, s. 7.]

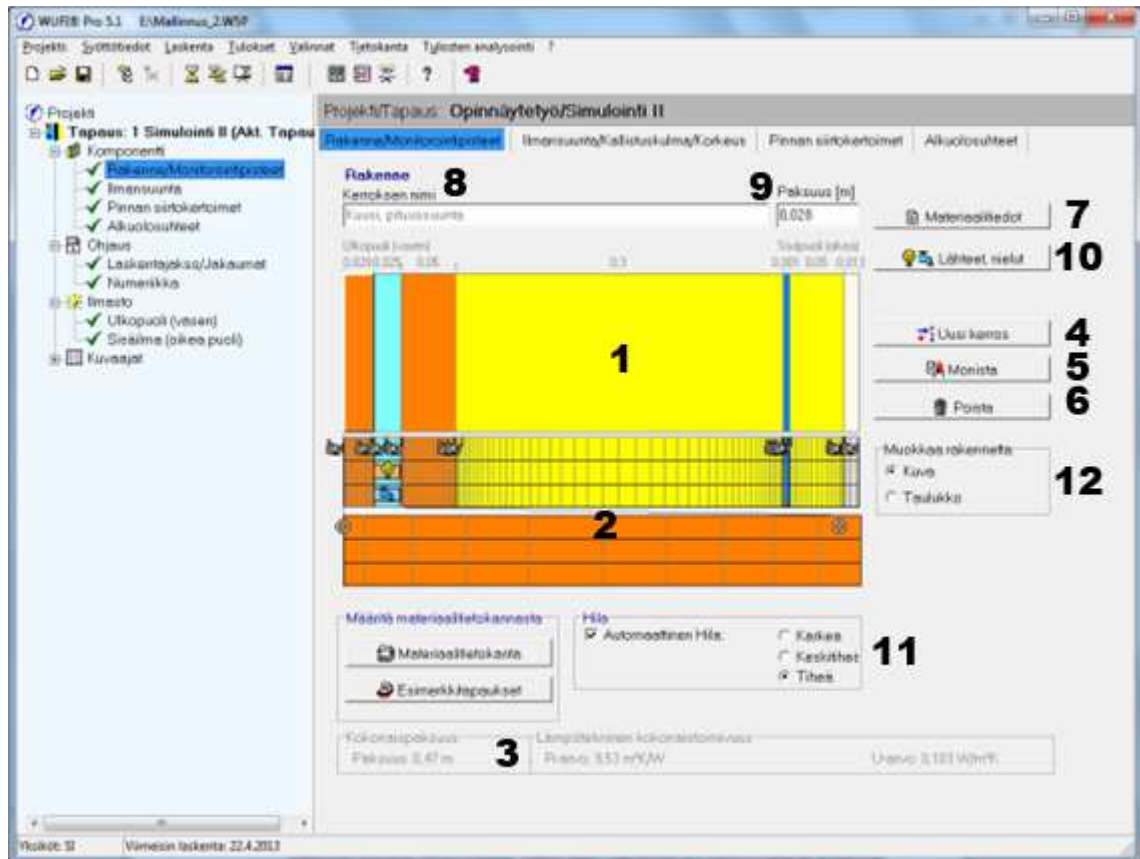
Rakenne esitetään graafisesti tai haluttaessa taulukkona valintaikkunan keskellä (kuva 1, kohta 1). Monitorointipisteitä rakenteen sisälle saadaan lisättyä graafisessa muodossa valitsemalla piste käsiteltävän kerroksen hilakuvaajasta (2) tai käsiteltäessä rakennetta taulukkomuodossa. Monitorointipisteiden poistaminen tapahtuu graafisessa mallissa oikealla hiiren napilla. Rakenteen ulkopuoli on vasemmalla ja sisäpuoli oikealla puolella. Ikkunan alaosassa näkyy rakenteen kokonaispaksuus ja lämpötekninen kokonaistoimivuus eli rakenteen R- ja U-arvo (3). [10, s. 8.]

Uuden kerroksen voi luoda Uusi kerros -näppäimellä (4) ja aikaisemmin luodun kerroksen voi kopioida Monista-näppäimellä (5). Valitun kerroksen voi poistaa Poista-näppäimellä (6). Hiirtä käyttämällä kerros voidaan tarvittaessa siirtää toiseen kohtaan rakennetta. Tämän jälkeen valitaan kerrokselle haluttu materiaali valitsemalla kerros ja painamalla Materiaalitiedot-näppäintä (7).



Materiaalikerrokset nimetään Kerroksen nimi -kohdassa (8) ja kerroksen paksuus määritetään Paksuus-kohdassa (9). Lämpö-, kosteus- ja ilmanvaihtolähteitä/nieluja voidaan lisätä tai poistaa Lähteet, nielut -näppäimen avulla (10).

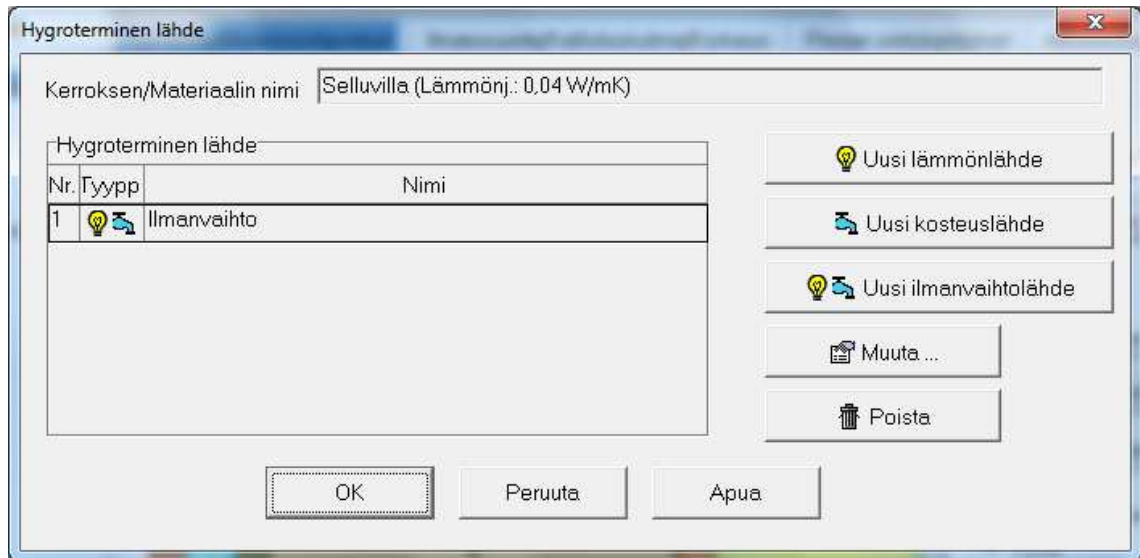
WUFI luo automaattisesti tarvittavan hilajaon tutkittavalle rakenteelle, kun tarvittavat rakennekerrokset ja niiden paksuudet on syötetty. Käyttäjä pystyy valitsemaan karkean, keskitiheän tai tiheän hilajaon (11). Hila tulisi valita riittävän tiheäksi, jotta lämmön ja kosteuden siirtyminen rakenteessa voidaan ratkaista riittävän tarkasti, etenkin jos kosteus- ja lämpötilajakaumat ovat rakenteessa jyrkkiä. Jyrkkien jakaumien esiintyminen riippuu rakenteen tyypistä, materiaaliarvoista ja reunaehdoista. Useimmiten WUFI:n luoma automaattinen hilajako on riittävä, mutta tarvittaessa käyttäjä voi luoda sen myös manuaalisesti (12). Tämä on tarpeellista tapauksissa, joissa esiintyy suurta kondenssia materiaalien rajapinnassa tai suuria lämpötilamuutoksia rajapinnoissa yhdessä alhaisen diffuusionvastuksen ja korkean kosteuspitoisuuden kanssa. [10, s. 8; 11.]



Kuva 1. Rakenne/Monitorointipisteet -välilehti.

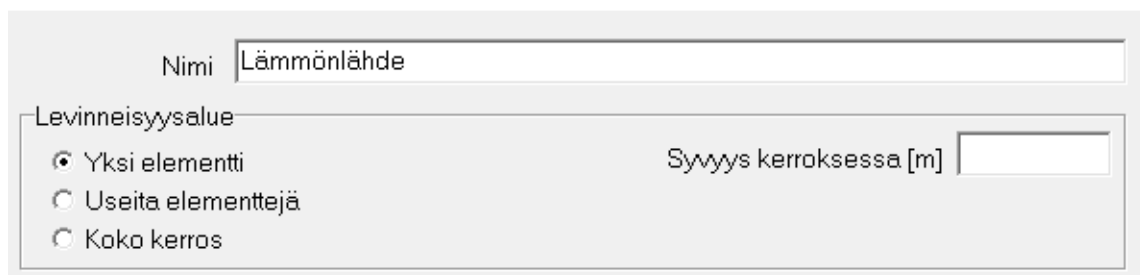
## 6.5. Lähteet ja nielut

WUFI:ssa on mahdollisuus lisätä eri rakennekerroksiin tai koko rakenteeseen lämpö-, kosteus-, ja ilmanvaihtolähteitä (tai nieluja). Lähteitä/nieluja lisätään valitsemalla ensin haluttu rakennekerros, jonka jälkeen painetaan Lähteet, nielut -näppäintä (kuva 1, kohta 10). Hygroterminen lähde -valintaikkunassa (kuva 2) pystyy lisäämään valittuun rakennekerrokseen lämpö- ja kosteuslähteitä tai ilmanvaihtolähteen ja muokkaamaan tai poistamaan jo lisättyjä lähteitä. [11.]



Kuva 2. Hygroterminen lähde -valintaikkuna.

Lämpö- ja kosteuslähdettä lisättäessä tulee määrittää sen sijainti ja laajuus (kuva 3). Elementillä tarkoitetaan tässä yhteydessä hilaelementtejä, eli lähde voi olla yhden tai useamman hilaelementin laajuinen, jolloin määritetään lähteen alku- ja loppupiste metreissä kerroksessa tai määritetään se koko rakennekerroksen paksuiseksi. Rakennekerroksessa voi olla useita kosteus- tai lämmönlähteitä, mutta ne eivät voi limittyä päällekkäin. Ilmanvaihtolähde sisältää aina lämpö- ja kosteuslähteen ja se ylettyy koko rakennekerroksen läpi, minkä takia rakenteeseen ei voi enää lisätä ylimääräisiä lähteitä. [11.]

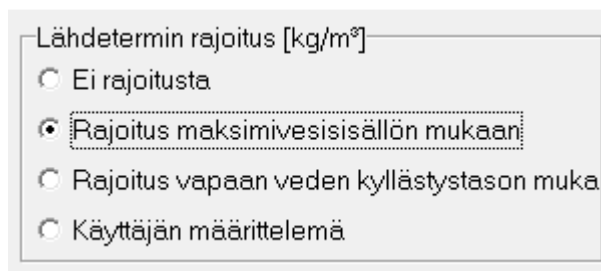


Kuva 3. Lämpö- ja kosteuslähteen sijainnin ja laajuuden määrittäminen.

Lämmönlähde voi olla joko muuttuva lämmönlähde, joka lisätään WUFI:in erillisestä tiedostosta tai se voi olla prosenttiosuus suorasta auringon säteilystä. Jälkimmäistä voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun simuloitavassa rakenteessa on läpikuultavia rakennuseristeitä. [11.]

Kosteuslähde voi olla muuttuva kosteuslähde, joka lisätään myös erillisestä tiedosta, prosenttiosuus viistosateesta tai ilmanläpäisymalli IBD. Viistosateen prosenttiosuuden avulla voidaan simuloida sateesta johtuvia pieniä diffuusiovuotoja syvemmälle rakenteeseen. Ilmanläpäisymalli IBD:n avulla voidaan simuloida konvektion vaikutuksesta tulevaa kosteuslisää. Konvektion määrä riippuu rakennuksen ilmanläpäisevyysluokasta Q50, sisätilan katkeamattomasta korkeudesta ja koneellisen ilmanvaihdon aiheuttamasta ylipaineesta. [11.]

Kosteuslähdettä käytettäessä saattaa tapahtua niin, että lähde tai nielu yrittää syöttää vettä jo täysin täynnä olevaan hilaan tai yrittää poistaa vettä täysin kuivasta hilasta. Kumpikaan näistä ei ole fyysikaalisesti mahdollista ja siirtolaskelmat muuttuvat mahdottomiksi ratkaista. Tämän estämiseksi WUFI:ssa on mahdollisuus rajoittaa lähde-termiä (kuva 4), joskin tämä ei vaikuta kosteusnielujen kanssa syntyvään ongelmaan. [11.]



Kuva 4. Lähde-termin rajoitus.

Valittaessa Ei rajoitusta WUFI ei rajoita kosteuslähdettä ja aikaisemmin mainittuja ongelmia voi esiintyä. Rajoitus maksimivesisisällön mukaan rajoittaa kosteuslähdettä, kun materiaalin maksimivesisisältö on saavutettu. Maksimivesisisältö tarkoittaa tilaa, jolloin materiaali on täysin kyllästynyt vedellä. Rajoitus vapaan veden kyllästystason mukaan toimii samalla tavalla kuin edellinen, mutta rajoittaa materiaalin kosteusmäärän vapaan veden kyllästystason mukaan. Vapaan veden kyllästystaso tarkoittaa materiaalin hygroskooppisen alueen ylärajaa eli materiaalikosteutta, jonka kyseinen materiaali saavuttaa ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ollessa 98 %. Käyttäjä pystyy myös määrittelemään lähde-termin rajoituksen itse. [11.]

Ilmanvaihtolähde (kuva 8) perustuu ilmanvaihtomäärään ja se lisätään joko dynaamisena tiedostosta tai määritetään vakioiksi. Sekoitettun ilman lähde tarkoittaa sitä tuleeko vaihtuva ilma vasemmalta (ulkoilma) vai oikealta (sisäilma) puolelta rakennetta. WUFI laskee näiden perusteella rakenteeseen tulevan/poistuvan kosteus- ja lämpövirran. Ilmanvaihtolähteitä käytetään useimpien tuulettuvissa ilmaraoissa. Tällöin tulee huomioida, että WUFI:n materiaalikirjastossa olevat ilmakerrokset käyttävät WUFI:n oletuskosteuskapasiteettifunktiota, joka vastaa mineraalivillaa. Mineraalivillan kyllästyskosteus on noin  $47 \text{ kg/m}^3$ , kun taas ilman vain  $17 \text{ g/m}^3$  ( $20 \text{ °C}$ ). Simuloinnissa ilmaraon kosteudenpoisto on noin 2700 kertaa hitaampaa, jos käyttäjä ei muokkaa ilmaraon tasapainokosteuskäyrästä ilmaa vastaavaksi. [11.]

Ilmanvaihto tiedostosta

Vakio  
 Dynaamisena tiedostosta

sekoitetun ilman lähde  
 vasen puoli  
 oikea puoli

Ilmanvaihtomäärä [1/h]

Kuva 5. Ilmanvaihtolähde-valintaikkuna.

## 6.6. Materiaalitietokanta

Materiaalitietokantavalikossa käyttäjä voi määrittää valitun rakenteen materiaalin. Materiaalin perusparametrit (kuva 6, kohta 1) on annettu materiaalilistassa ja tyypilliset materiaalipaksuudet (2) valintalaatikossa alhaalla. Valintaikkunan oikealla puolella on valinnaiset materiaaliominaisuudet eli materiaalin hygrotermiset funktiot (4). Materiaalit on jaettu lähteisiin ja luetteloihin (5) ja käyttäjä pystyy lajittelemaan ne nimen tai perusparametrien mukaan (6). Materiaali lisätään kaksoisklikkaamalla materiaalia tai valitsemalla haluttu materiaali ja painamalla Käytä painiketta (7). [11.]

The screenshot displays the 'Tietokanta Materiaalit' software interface. The main window shows a list of building materials with columns for name, density, moisture, thermal conductivity, and specific heat. A search bar at the top right is labeled '4'. A dropdown menu at the top center is labeled '6'. A table on the right side is labeled 'Hygrotermiset funktiot' and contains a table with columns 'No', 'SK [-]', and 'Kosteuspitoisuus [kg/m³]'. A graph below the table shows 'Kosteuspitoisuus [kg/m³]' on the y-axis and 'Suhteellinen kosteus [-]' on the x-axis. A search bar at the bottom right is labeled '7'. A small window at the bottom center is labeled '2' and shows 'Pakollisuus [m]'. A small window at the top left is labeled '1' and shows a search bar. A small window at the top right is labeled '3' and shows a search bar.

Kuva 6. Materiaalitietokanta valintaikkuna

## 6.7. Materiaalitiedot

Materiaalitiedot-alivalikossa käyttäjä voi lisätä, muuttaa tai tarkastella valitun rakennekerroksen materiaalitietoja ja käyttäjä voi myös halutessaan syöttää omia materiaaleja. Kerroksen/Materiaalin nimi -alaset valikosta (kuva 7, kohta 1) löytyy rakenteeseen syötetyt materiaalitiedot. Oikeassa yläkulmassa sijaitseva lukon kuva (2) ilmoittaa materiaalitietokannasta syötetyn materiaalitiedon olevan lukittu, eli käyttäjä ei voi muuttaa materiaalitietoja ilman lukituksen avaamista. Lukituksen tarkoituksena on ilmaista, ettei alkuperäisiä materiaalitietokantoja ole muutettu. Käyttäjä voi syöttää materiaalin tyypillisen rakennekoostuuden (3), joka tarkoittaa kyseisen materiaalin rakennusaikaista kosteutta ( $\text{kg/m}^3$ ) ja materiaalin kerrospaksuuden metreissä (4). [11.]

Käyttäjän lisätessä omia materiaaleja ovat materiaalin perusarvot pakollisia tietoja ja hygrotermiset vapaaehtoisia.

Raakatiheys (5) kertoo materiaalin massan (kg) tilavuutta (m<sup>3</sup>) kohti. Se voidaan laskea kaavalla 28. [11.]

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{total}} \quad (28)$$

missä

$\rho_{bulk}$  = materiaalin kiintotiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = kappaleen massa (kg)

$V_{total}$  = kappaleen kokonaistilavuus (m<sup>3</sup>)

Huokoisuus (6) ilmoittaa, kuinka tiheästi materiaali on pakkautunut, joka taas määrittää materiaalin kyllästyskosteuden. Useimmiten laskelmissa ei tarvita kyllästyskosteuden tarkkaa määrää, koska useimmiten materiaalikosteudet eivät ylitä kapillaarikyllästymistä. Huokoisuutta voidaan arvioida kaavalla 29. [11.]

$$huokoisuus = 1 - \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{true}} \quad (29)$$

missä

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{total}}$$

$\rho_{bulk}$  = materiaalin kiintotiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = kappaleen massa (kg)

$V_{total}$  = kappaleen kokonaistilavuus (m<sup>3</sup>)

$$\rho_{true} = \frac{m}{V_{total} - V_{pores}}$$

$\rho_{true}$  = materiaalin irtotiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = kappaleen massa (kg)

$V_{total}$  = kappaleen kokonaistilavuus (m<sup>3</sup>)

$V_{pores}$  = kappaleen ei-kiinteän osuuden tilavuus (neste ja huokokset) (m<sup>3</sup>)

Ominaislämpökapasiteetti (kuiva) (7) kuvaa kuinka paljon lämpöenergiaa sitoutuu kuivaan materiaaliin lämpötilaeroa ja massaa kohden, yksikkönä käytetään J/kgK. [11.]

Lämmönjohtavuus (kuiva, 10 °C) (8) kertoo materiaalin lämmönjohtavuuden kuivissa olosuhteissa, yksikkönä W/mK. Tämän arvon kohdalla tulee ottaa huomioon, että lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoissa on otettu huomioon tyypillisen materiaalikosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen, joten ne eivät ole suoranaisesti kuivan materiaalin arvoja. [11.]

Vesihöyryn diffuusionvastuskerroin ( $\mu$ ) (9) on suhdeluku, joka kertoo kuinka paljon suurempi diffuusionvastuskerroin materiaalilla on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen. Tämä on käsitelty tarkemmin tämän opinnäytetyön luvussa 5.6. [11.]

Hygrotermiset funktiot eivät ole pakollisia laskennan suorittamisen kannalta, mutta ne tarkentavat useimmiten laskennan tuloksia. Arvot syötetään WUFI:in taulukkoina tai luetaan erillisestä tiedostosta.

Kosteuskapasiteettifunktion (10) tarkoituksena on kertoa materiaalin kosteuspiitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ ) suhteellisen kosteuden vaihtuessa arvosta  $\text{RH} \% = 0$  arvoon  $\text{RH} \% = 100$ . Jos materiaaliin ei löydy valmiita arvoja, voi käyttäjä arvioida kosteuskapasiteettifunktion WUFI:n avulla painamalla Arvioi-näppäintä kosteuskapasiteettifunktion taulukon yläpuolelta. [11.]

Kapillaariset ominaisuudet (absorptio ja uudelleenjakautuminen) (11 ja 12) ilmaisevat materiaalin kapillaarisia ominaisuuksia eli nesteen liikkumista materiaalissa verrattuna materiaalin kosteuspiitoisuuteen ( $\text{kg/m}^3$ ). Kapillaarinen absorptio ( $D_{ws}$ ) tarkoittaa materiaalin kykyä imeä vettä kastuneesta pinnasta. Tämän tarkoituksena on simuloida sateen vaikutusta julkisivuun tai kun halutaan tarkastella materiaalin vedenimukykyä. Kapillaarinen uudelleenjakautuminen ( $D_{ww}$ ) tarkoittaa imeytyneen veden jakautumista materiaalissa. Tämän tarkoituksena on simuloida esimerkiksi sateesta aiheutuvan kosteuden kulkeutumista rakenteessa. Yksikkönä kummallakin on  $\text{m}^2/\text{s}$ . [11.]



Kosteudesta riippuva vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (13) kertoo  $\mu$ -kertoimen muutoksen verrattuna suhteellisen kosteuden vaihteluun. Epäorgaanisten materiaalien diffuusiovastuskertoimen pieneneminen kosteuden kasvaessa johtuu pintadiffuusiosta ja se on otettu huomioon materiaalin kapillaarisissa ominaisuuksissa. Tässä tapauksessa käyttäjän tulisi mieluiten käyttää vakiota vesihöyryn diffuusionvastuskerrointa ja syöttää materiaalille kapillaariset ominaisuudet. [11.]

Kosteudesta riippuva lämmönjohtavuus (14) ilmoittaa materiaalin lämmönjohtavuuden ( $W/mK$ ) muutoksen verrattuna materiaalin kosteuspitoisuuteen ( $kg/m^3$ ). Lämmönjohtavuuden muutos johtuu materiaaliin sitoutuneesta vedestä, mutta myös kosteuden höyrystymisestä ja kondensoitumisesta. WUFI pystyy luomaan kosteudesta riippuvan taulukon kuivan materiaalin lämmönjohtavuuden, raakatiheyden ja lämmönjohtavuuden kosteusriippuvuustekijän avulla. Kosteusriippuvuustekijä ilmoittaa lämmönjohtavuuden prosentuaalisen kasvun verrattuna materiaalin prosentuaalisen kosteuden kasvuun. Arvo perustuu materiaaliin ja yksikkönä on % / M.%. [11.]

Lämpötilariippuva lämmönjohtavuus (15) ilmoittaa lämmönjohtavuuden ( $W/mK$ ) muutoksen verrattuna lämpötilaan ( $^{\circ}C$ ). WUFI pystyy luomaan taulukon, kun käyttäjä syöttää lämmönjohtavuuslisän, yksikkönä  $W/mK^2$ . [11.]

Lämpötilariippuva entalpia (16) kuvaa entalpian muutosta ( $J/kg$ ) lämpötilan suhteen ( $^{\circ}C$ ). Useimmiten rakennusfysiikassa kohdatut prosessit ovat isobaarisia eli vakio paineisia, koska ne useimmiten altistuvat vain ympäristön paineelle. Näissä olosuhteissa lämmitetty systeemi pyrkii laajenemaan ja tekee samalla mekaanista työtä ympäristössä vallitsevaa painetta vastaan. Suljetussa systeemissä lämpötilan nousu johtaisi paineen kasvamiseen. Energiaa tässä isobaarisissa olosuhteissa tapahtuvaan prosessiin kuluu systeemin lämmittämiseen ja mekaanisen työhön systeemin laajentuessa. Tätä kutsutaan entalpiaksi. [11.]

Materiaali-/kerrostiedot

**1** Kerroksen/Materiaalin nimi: Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,055 W/mK) (Avoin)

Materiaalitiedot | Info

Perusarvot		
Reaktiivisuus [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>5</b>	60,0
Huokoisuus [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	<b>6</b>	0,95
Ominaislämpökapiteetti, Kuiva [J/kgK]	<b>7</b>	850,0
Lämmönjohtavuus, Kuiva, 10°C [W/mK]	<b>8</b>	0,055
Vesihöyryn diffuusiokerroin [-]	<b>9</b>	1,3

Valinnaiset parametrit

Lämmönjohtavuuslisä, f(T) [W/mK <sup>2</sup> ]	0,0002
--	--------

**3** Tyypillinen rakennekosteus [kg/m<sup>3</sup>] 0,0

**4** Kerrospaksuus [m] 0,3

Väri

**2**

Hygrotermiset funktiot

Kosteuskapasiteettifunktio **10**

Kapillaariset ominaisuudet, Absorptiota **11**

Kapillaariset ominaisuudet, Uudelleenjakautuminen **12**

Vesihöyryn diffuusiokerroin, kosteudesta riippuva **13**

Lämmönjohtavuus, kosteudesta riippuva **14**

Lämmönjohtavuus, Lämpötilasta riippuva **15**

Entalpia, Lämpötilasta riippuva **16**

Kuva Muokkaa taulukkoa Lue tied...

Luo

No.	Kosteuspitoisuus [kg/m <sup>3</sup> ]	Lämmönjoht. [W/mK]
1	0	0,055
2	10,0	0,04
3	20,0	0,041
4	50,0	0,043
5	100,0	0,049
6	200,0	0,07
7	300,0	0,1

Uusi

Poista

Kopioi

Syötä

Copy

Liitä materiaalitietokantaan

Tuo...

Vienti...

OK

Keskeytä

Apua

Kuva 7. Materiaalitiedot -välilehti

## 6.8. Ilmansuunta, kallistuskulma ja rakennuskorkeus

Ilmansuunta-välilehdellä tarkoituksena on määrittää rakennuskomponentin ilmansuunta, kallistuskulma ja rakennuskorkeus.

Ilmansuunta (kuva 8, kohta 1) määrittää suunnan, johon simuloitava rakenne osoittaa. Tämän tiedon avulla WUFI simuloi säätiöiden avulla rakenteeseen tulevan lämpösäteilyn ja mahdollisen sateen vaikutukset. [11.]

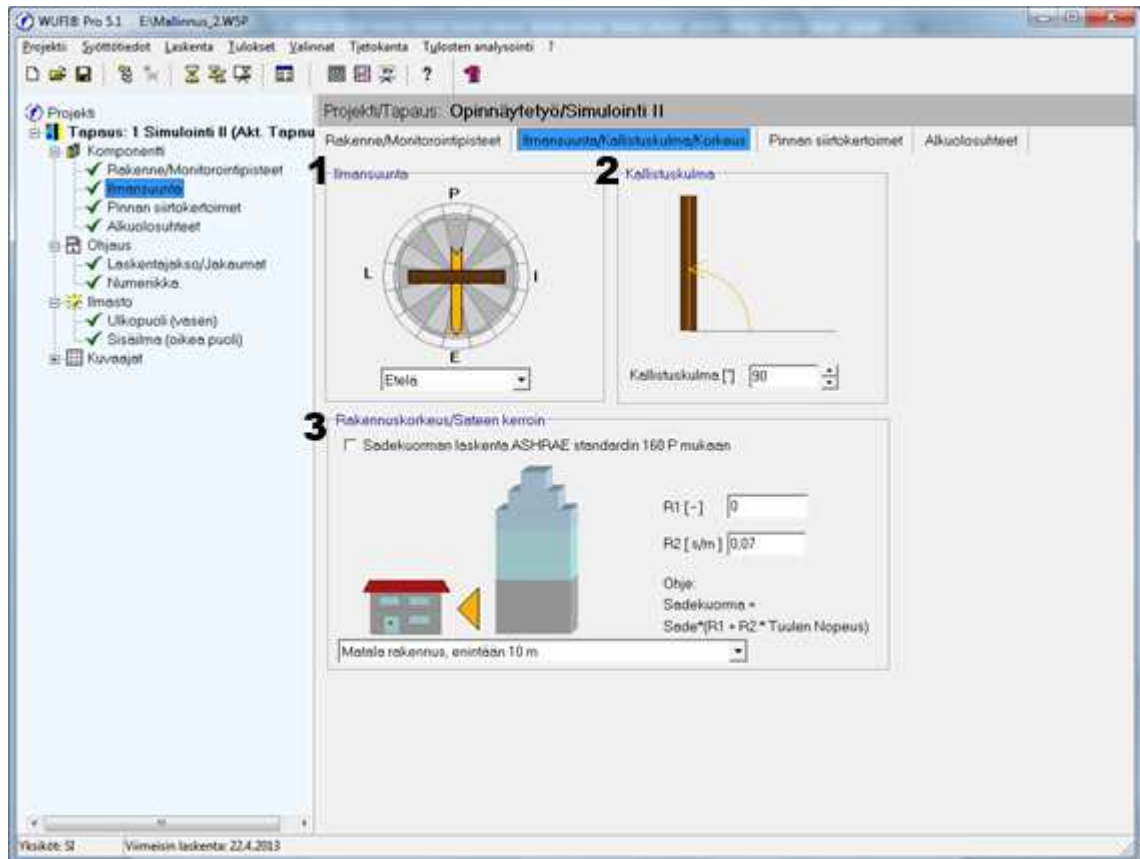
Kallistuskulma (2) on rakenteen kulma vaakatasosta mitattuna. WUFI tarvitsee myös tätä tietoa lämpösäteilyn ja sateen vaikutusten arviointiin. Käyttäjä voi syöttää kulmat väliltä 0° - 90°. [11.]

Rakennuskorkeus eli tässä tapauksessa sateen kerrointa (3) käytetään arvioi-  
dessa rakenteeseen tulevan viistosateen määrää. Sadekuorman laskenta pe-  
rustuu kaavaan 30. [11.]

$$\text{sadekuorma} = \text{sade} \times (R1 + R2 \times \text{tuulen nopeus}) \quad (30)$$

Rakenteeseen osuvan sateen määrä riippuu sateen intensiteetistä (mm/h), ker-  
toimista R1 ja R2 ja tuulen nopeudesta (m/s) mitattuna 10 metrin korkeudessa  
aukealla paikalla tuulen osuessa kohtisuoraan rakenteen pintaan. Sademäärä,  
tuulen nopeus ja sen suunta tulevat automaattisesti valitusta säätiedostosta ja  
WUFI määrittää kertoimet R1 ja R2 alavetovalikosta valitun rakennekorkeuden  
mukaan tai käyttäjä voi halutessaan muokata arvoja. [10 s. 9; 11.]

Kerroin R1 kuvaa pystysuorasta sateesta rakenteen pintaan pääsevän kosteu-  
den määrää ja R2 tuulen mukana pintaan pääsevän viistosateen osuutta. Pys-  
tysuorille pinnoille R1 on nolla. R2 on noin 0,2 m/s vapaille pinnoille, joihin ym-  
päriävät rakennukset eivät vaikuta. Julkisivun keskellä R2 voi olla huomattavasti  
pienempi ja vuorostaan huomattavasti suurempi tuulelle alttiissa kohdissa, ku-  
ten reunojen ja kulmien lähetyvillä. [10 s. 9; 11.]



Kuva 8. Ilmansuunta-valintaikkuna

Sadekuorman voi myös laskea ASHRAE standardin 160 P mukaan. Tämän laskentatavan sadekuorma perustuu kaavaan 31. [11.]

$$sadekuorma = sade \times FE \times FD \times 0,2 \frac{s}{m} \times tuulen\ nopeus \quad (31)$$

Sade tarkoittaa sateen määrän intensiteettiä (mm/h) ja tuulen nopeus keskimääräistä tuulennopeutta (m/s) mitattuna 10 metrin korkeudessa aukealla paikalla tuulen osuessa kohtisuoraan rakenteen pintaan. Nämä arvot WUFI määrittää automaattisesti valituista säätiedoista. Arvo 0.2 s/m on empiirinen vakio. Sateen altistuskerroin FE on riippuvainen rakennetta ympäröivästä maastosta ja rakennuksen korkeudesta. ASHRAE-standardi 160 P suosittelee käyttämään taulukossa 6 näkyviä arvoja altistuskerroin FE:lle. [11.]

Taulukko 6. Altistuskerroin FE rakennuksen korkeuden ja ympäröivän maaston mukaan. [11.]

Maasto			
Korkeus (m)	avonainen	puoliavonainen	suojaista
< 10	1,3	1,0	0,7
10-15	1,3	1,1	0,8
15-20	1,4	1,2	0,9
20-30	1,5	1,3	1,1
30-40	1,5	1,4	1,2
40-50	1,5	1,5	1,3
> 50	1,5	1,5	1,5

Sateen valumiskerroin FD kuvaa sateen valumista pitkin seinäpintoja. Taulukossa 7 on esitetty suositeltavia arvoja.

Taulukko 7. Sateen valumiskertoimen FD suositusarvoja. [11.]

Vinokattoiset rakennukset	FD = 0,5
Tasakattoiset rakennukset	FD = 1
Valuvalle sadevedelle altistuvat seinät	FD = 2

Sadevettä voi valua seinäpinnoille katoilta tai vettä läpäisemättömiltä pinnoilta, kuten ikkunoita pitkin. [11.]

## 6.9. Pinnan siirtokertoimet

Pinnan siirtokertoimet määrittävät missä määrin ulkoiset olosuhteet vaikuttavat rakennuskomponentteihin, erityisesti lämpö- ja kosteusvirtoihin pintojen läpi. Siirtokertoimet on lajiteltu ulkopintaan ja sisäpintaan.

Ulkopinnan lämmönvastus ( $m^2K/W$ ) (kuva 9, kohta 1) kuvaa konvektiosta ja säteilystä aiheutuvaa lämmönsiirtoa rakenteen ja ympäristön välillä. Lämmönvastus voidaan valita mallinnettavan rakennetyypin mukaan (ulkoseinä, katto, kellarri) tai käyttäjä voi määrittää sen itse. Vastus voidaan myös valita tuulesta riippu-

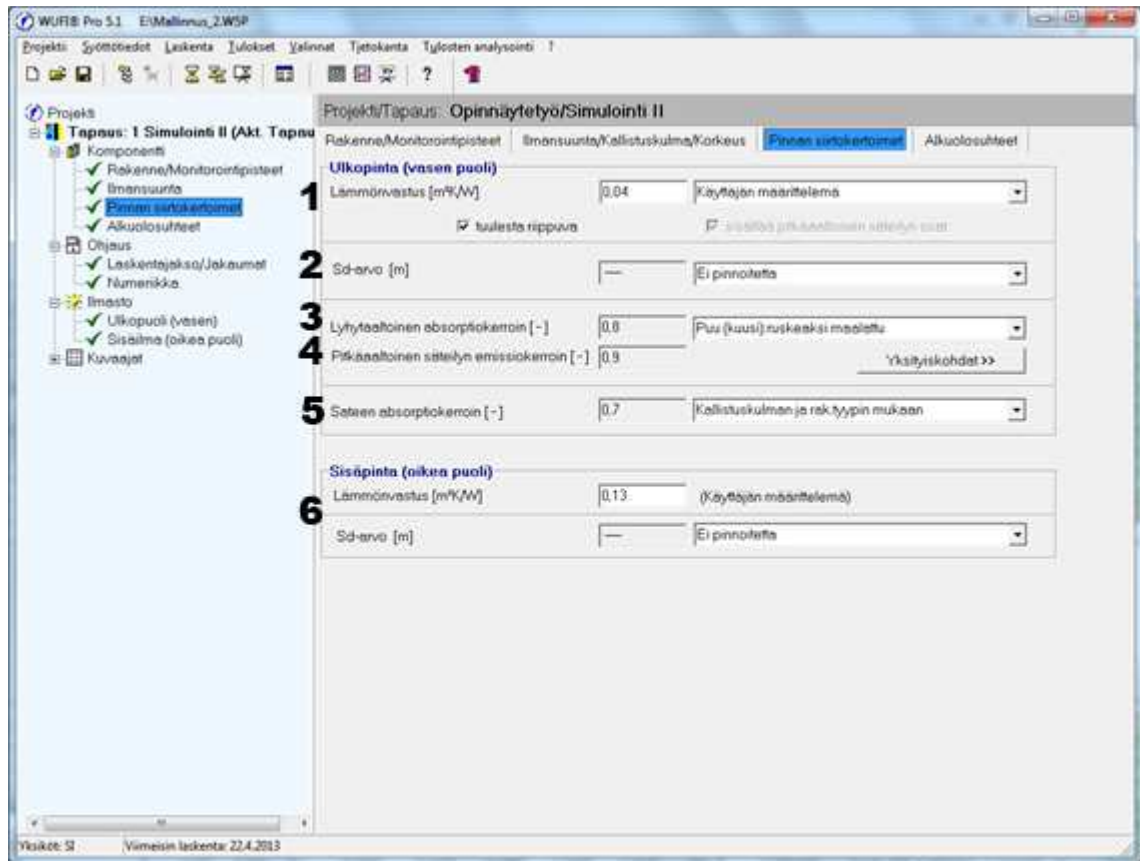
vaksi, jolloin WUFI ei huomioi annettua arvoa, vaan laskee lämmönvastuksen säätiedoston perusteella. Syötettäessä omaa lämmönvastusta tulee ottaa huomioon sisältääkö annettu arvo pitkäaaltoisen säteilyn osat. Pintojen lämmönvastukset on käsitelty tarkemmin tämän opinnäytetyön luvussa 3.3. [11.]

Sd-arvo (m) (2) huomioi rakennuksen ulko- tai sisäverhouksen ohuiden pinnoitekerrosten diffuusionvastuksen. Käytettäessä Sd-arvoa näitä kerroksia ei pidä lisätä rakennemalliin. Rakenteen pinnan ja ilman välinen vesihöyrynvastus on sisällytetty arvoon, eikä sitä tarvitse ottaa erikseen huomioida. Käyttäjä voi määrittää arvon itse, valita sen valmiiksi taulukoiduista pintamateriaaleista tai määrittää ettei pinnoitetta ole. Jos käyttäjä lisäsi ne/monitorointipisteet -välilehdellä sisäpinnoitteen rakenneleikkaukseen, ei sitä tule lisätä enää uudestaan Sd-arvo kohdassa. Sd-arvon laskenta on käsitelty tämän opinnäytetyön luvussa 5.5. [10, s. 10; 11]

Lyhytaaltainen absorptiokerroin (3) kuvaa lyhytaaltoisesta auringonsäteilystä absorptoituneen säteilyn määrää verrattuna kokonaissäteilyyn. Valikosta on valittavissa yleisimpien pintamateriaalien absorptiokertoimet. Pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin (4) kuvaa pitkäaaltoisen säteilyn emission tehokkuutta. Käyttäjä voi halutessaan muokata pitkäaaltoisen säteilyn arvoja tarkemmaksi painalla Yksityiskohdat-painiketta ja syöttämällä tarvittavat kertoimet ja indeksit. [10, s. 10; 11.]

Sateen absorptiokerroin (5) ottaa huomioon, että osa sateesta osuessaan seinään kimpoaa pois eikä ole mukana kapillaarisessa imeytymisessä. Arvo voidaan valita automaattisesti kallistuskulman ja rakennetyypin mukaan tai käyttäjä voi määrittellä sen itse. Useimmille seinätyypeille WUFI käyttää arvoa 0,7, joka on riittävän tarkka useimmissa tapauksissa. Sateelta täysin suojatun julkisivun kohdalla voidaan valita vaihtoehto "Ei absorptiota". [10, s. 10.]

Sisäpinnalle määritetään lämmönvastus ja Sd-arvo samalla periaatteella kuin ulkopinnallekin (6).



Kuva 9. Pinnan siirtokertoimet -välilehti.

## 6.10. Alkuolosuhteet

Alkuolosuhteissa määritetään rakenteen sisältämä alkukosteus ja rakenteen alkulämpötila. Käyttäjä pystyy määrittelemään kosteuden vakioksi koko rakenteessa alkutilanteen suhteellisen kosteuden mukaan, kosteusmäärän jokaisen rakennekerroksen mukaan tai antaa kosteusjakauma erillisessä tiedostossa (kuva 10, kohta 1). Alkulämpötila voidaan määrittää vakioksi koko elementissä tai se voidaan antaa erillisestä tiedostosta (kohta 2). [10, s. 11.]

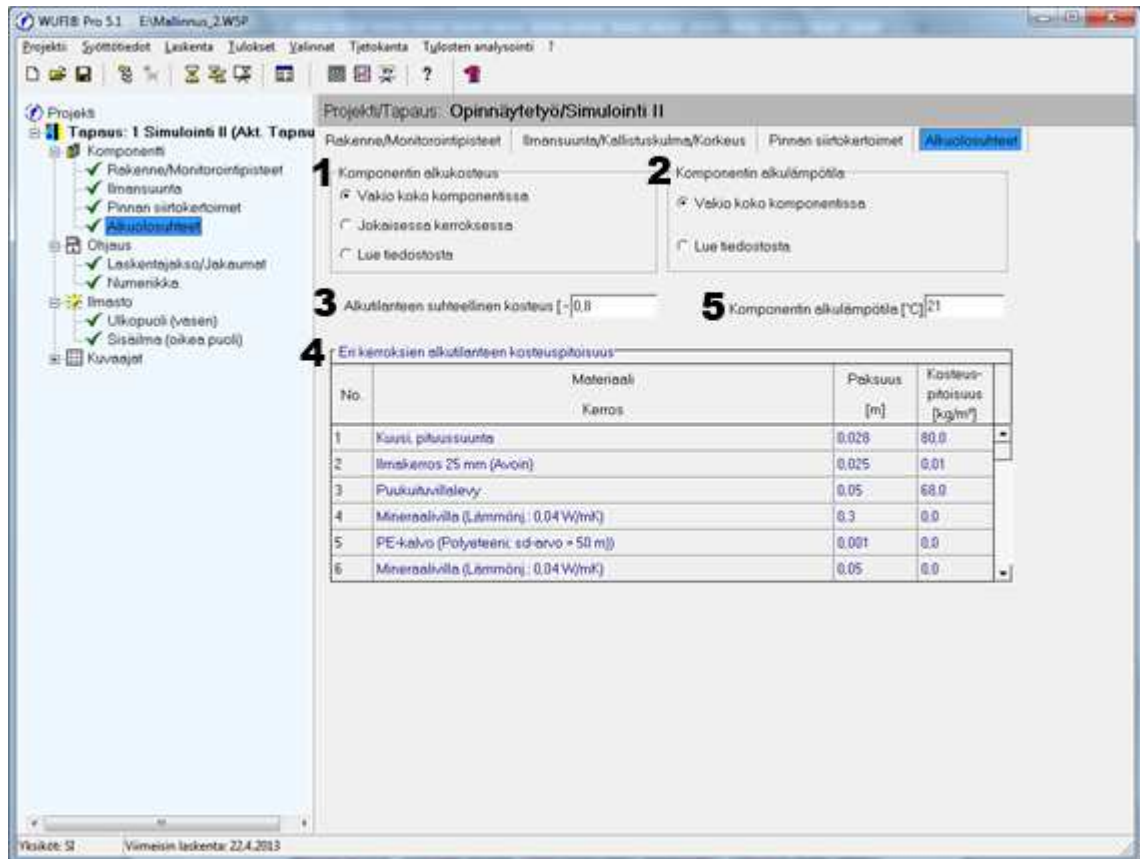
Määritettäessä kosteus vakioksi koko komponentissa syötetään alkutilanteen suhteellinen kosteus lukuna, eli esimerkiksi 0,8 tarkoittaa suhteellista kosteutta 80 % (3). WUFI laskee tämän jälkeen eri rakennekerroksille kosteuspitoisuuden ( $\text{kg/m}^3$ ) suhteellisen kosteuden ja kosteuden sitomisyhtälön avulla. Tuloksena syntyvät kosteusmäärät näkyvät taulukossa, mutta näitä arvoja ei pysty muuttamaan (4). [10, s. 11]

Käyttäjä voi määrittää halutun alkulämpötilan vakioksi koko elementissä (5). Tällöin kaikkien rakennekerroksien alkulämpötila on vakio. Yleensä tasaista lämpötilaa voidaan pitää riittävän tarkkana, koska lämpötila tasoittuu reunaehtojen mukaiseksi muutamien tuntien aikana. [10, s. 11]

Käyttäjä voi asettaa jokaiselle kerrokselle alkukosteuden erikseen syöttämällä taulukon kenttiin halutut kosteusmäärät eri rakennekerroksissa. Tätä vaihtoehtoa voidaan käyttää, jos halutaan syöttää materiaaleilla tiettyjä alkukosteuksia. Jos materiaalille on asetettu tyypillinen alkukosteus materiaaliominaisuuksissa, voidaan kyseinen arvo siirtää taulukkoon Aseta tyypillinen alkukosteus -näppäimellä. [10, s.11]

Lämpötila- ja kosteusjakauman voi asettaa myös suoraan ASCII-tiedostona, joka voi olla mallinnettu esimerkiksi edellisistä WUFI-laskelmista.





Kuva 10. Alkuolosuhteet-välilehti.

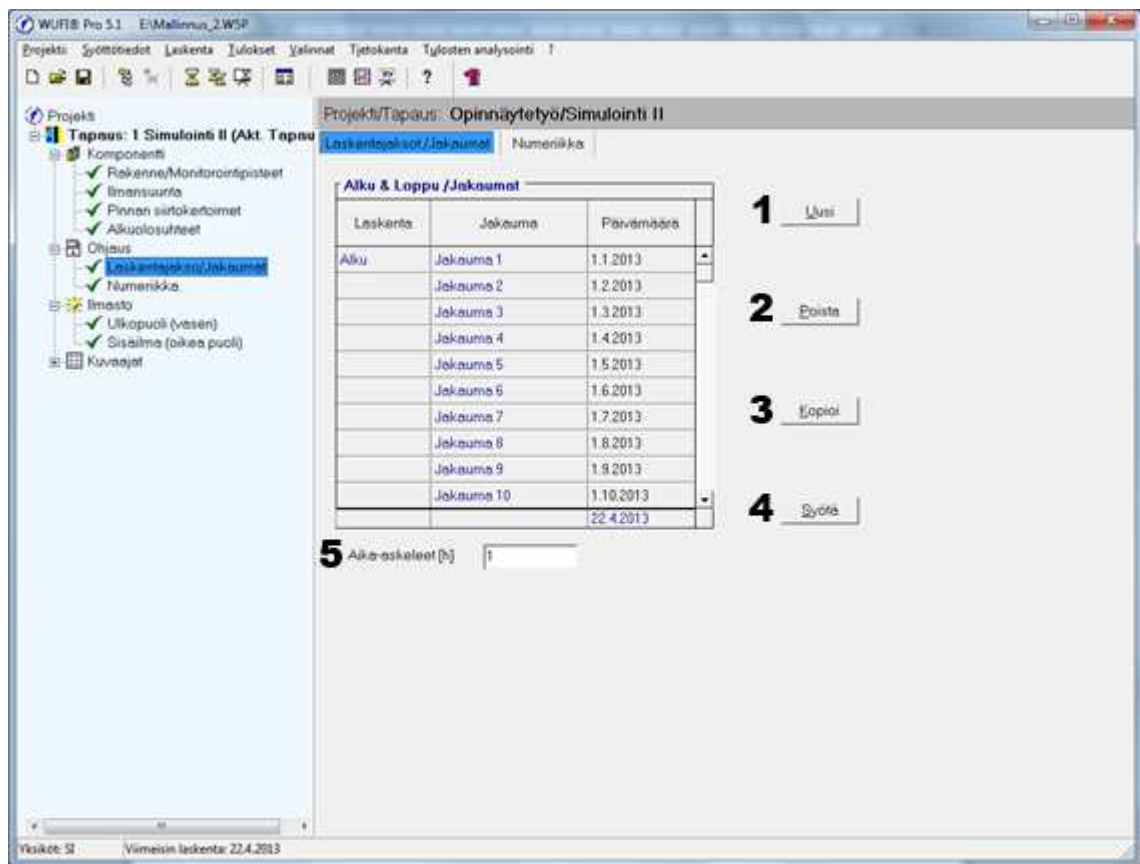
## 6.11. Laskentajakso/jakaumat

Laskentajakso/jakaumat -valikossa määritetään laskentajakson alkamis- ja päättymispäivä muokkaamalla taulukkoa. Taulukkoon voi myös lisätä muita tarkasteluajoja tulosten tarkastelua varten. Useimmat säätiedot edustavat yleisiä säätietoja alueelta eivätkä yksittäisiä vuosia. Täten aikajakaumaksi voidaan asettaa tuleviakin vuosia. Laskentajakson ylittäessä vuoden WUFI alkaa lukea samaa säätietoa alusta. [10, s.12.]

Tarkastelujakaumia voidaan lisätä Uusi-näppäimellä (kuva 11, kohta 1) ja poistaa Poista-näppäimellä (2). Kopioi-näppäimellä (3) WUFI tallentaa valitun päivämäärän muistiin ja lisää kyseisen päivämäärän taulukkoon Syötä-näppäimellä (4). Tulosten tarkastelussa saadaan syötetyille päivämäärille tulostettua graafi-

nen jakauma rakenteen lämpötilajakaumasta, suhteellisesta kosteudesta ja kosteuspitoisuudesta. [10, s. 12.]

Käyttäjä määrittää myös sopivan aika-askeleen (5). Useimpiin tapauksiin yhden tunnin aika-askel on sopiva, mutta askelta voi säätää minuuteista vuorokausiin. Se ei voi kuitenkaan olla pitempi kuin säätiedoston kokonaispituus. Lyhyemmillä aika-askelilla laskenta-aika kasvaa turhankin suureksi ja pidemmällä laskentatarkkuus voi kärsiä. [10, s. 12.]



Kuva 11. Laskentajaksot/Jakaumat -välilehti

## 6.12. Numeriikka

Numeriikka -välilehdellä voidaan säätää laskentatapaa ja poistaa halutessa joidenkin fysikaalisten ilmiöiden mallintaminen.

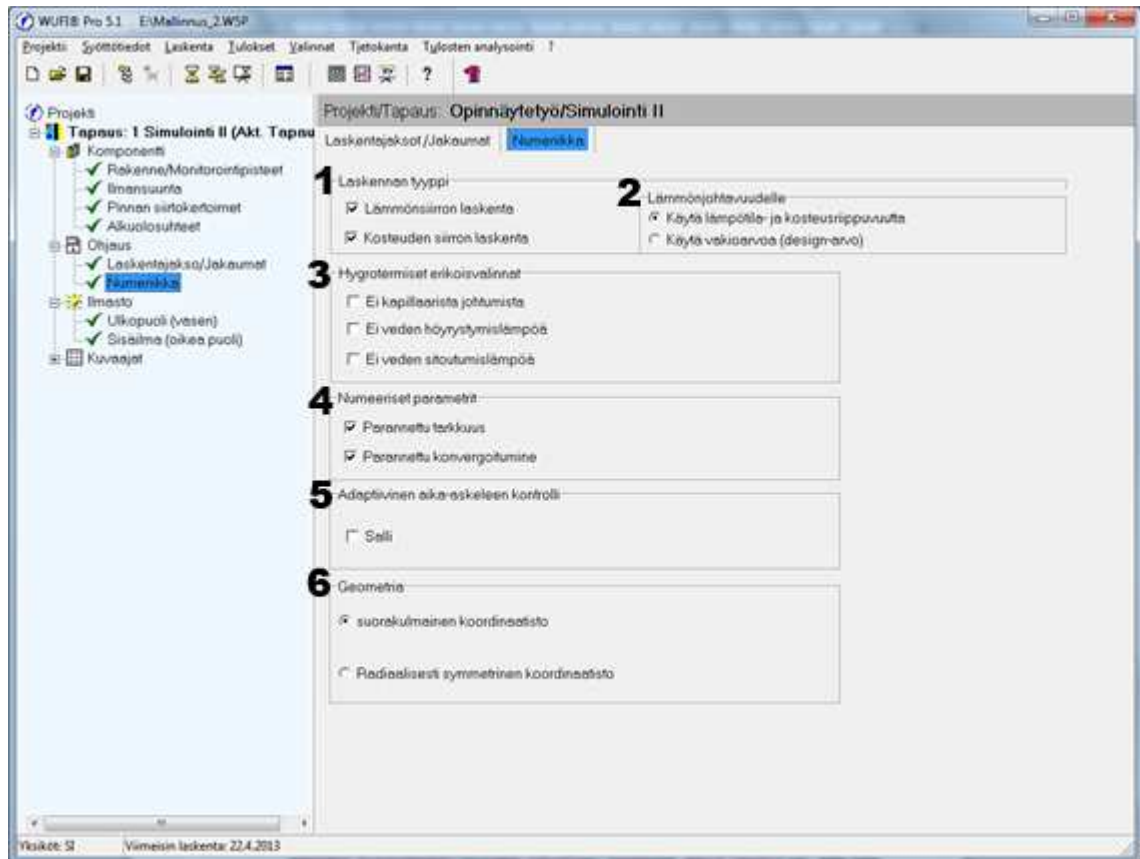
Laskennan tyypissä (kuva 12, kohta 1) käyttäjä voi valita mallinnetaanko lämmön- ja kosteudensiirtoa ja käytetäänkö lämmönjohtavuudelle lämpötila- ja kosteusriippuvaista arvoa vai vakioarvoa (design-arvo) (2). Esimerkiksi monimutkaisen kosteusjakauman sisältävän rakenteen lämmönvastuksen laskennan voi suorittaa määrittämällä alkuolosuhteiden kosteusjakauman tiedostosta, estämällä kosteusjakauman uudelleenjakautuminen ottamalla kosteuden siirron laskenta pois käytöstä ja mallintamalla ympäröivät ilmasto-olosuhteet vakioiksi. Kun tasapainotila on saavutettu, voidaan lämpövirta tulostaa tunnetulla lämpötilaerolla. [10, s.12]

Hygrotermisten erikoisvalintojen (3) alla voidaan valita sisällytetäänkö laskentaan kapillaarinen johtuminen, veden höyrystymislämpö ja veden sitoutumislämpö. Kapillaarisen johtumisen voi poistaa erikseen kosteudensiirronlaskennasta, jolloin kosteudensiirtoon vaikuttaa enää diffuusio. Näin voidaan tarkastella vain vesihöyryn diffuusion merkitystä. Veden höyrystymis- ja sitoutumislämmön poistolla käyttäjä voi tarkastella latentin lämmön vaikutuksia laskentaan. [11.]

Jos laskennassa ilmenee konvergointi- tai sateen absorptiovirheitä, voidaan tarkkuutta yrittää parantaa numeerisia parametrejä (4) säätämällä. Näistä yleensä parannettu tarkkuus on tehokkaampi kuin parannettu konvergointi. Ennen numeeristen parametrien tarkennusta on syytä tarkastaa hilajaan riittävä tarkkuus kyseisen rakenteen mallintamiseen. [10, s.12.]

Adaptiivisen aika-askeleen kontrollin (5) ollessa valittuna WUFI automaattisesti siirtyy lyhyempään aika-askeleeseen kohdatessaan numeraalisia ongelmia. Ongelmallista aika-askelta toistetaan vieläkin lyhyemmillä aika-askeleilla ja sitä tarkennetaan tarvittaessa. Tämän avulla monet konvergointivirheet voidaan välttää. Käyttäjä voi määrittää moneenko alavyöhykkeeseen WUFI voi jakaa aika-askeleen ja kuinka moneen vyöhykkeeseen alavyöhykkeen voi vielä jakaa. [11.]

Geometriassa (6) määritetään se onko rakenneleikkaus suorakulmaisessa vai radiaalisesti symmetrisessä koordinaatistossa.



Kuva 12. Numeriikka -välilehti

### 6.13. Ilmasto

Simuloitavan rakenteen pinnat ovat kosketuksissa sisä- ja ulkoilmaan, joilla on suuri hygroterminen vaikutus rakenteeseen. Yksidimensionaalisessa rakenteessa on vasen ja oikea pinta ja kummallekin näistä tulee määrittää omat ilmastolliset reunaehdonsa. Käyttäjä pystyy syöttämään kummallekin puolella sisä- tai ulkoilman ilmastotiedot, joten simuloitavassa rakenteessa voi olla esimerkiksi kummallakin pinnalla ulkoilman säätiedot. Ainut rajoitus on että säätiedot, jotka sisältävät sateen ja lämpösäteilyn vaikutukset, on sijoitettava vasemmalle puolelle. [11.]

Käyttäjä pystyy valitsemaan ilmaston reunaehdot suoraan meteorologisesta säätiedostosta, vuosittaisista sinikäyristä tai mallintaa niitä erilaisten standardien mukaan.

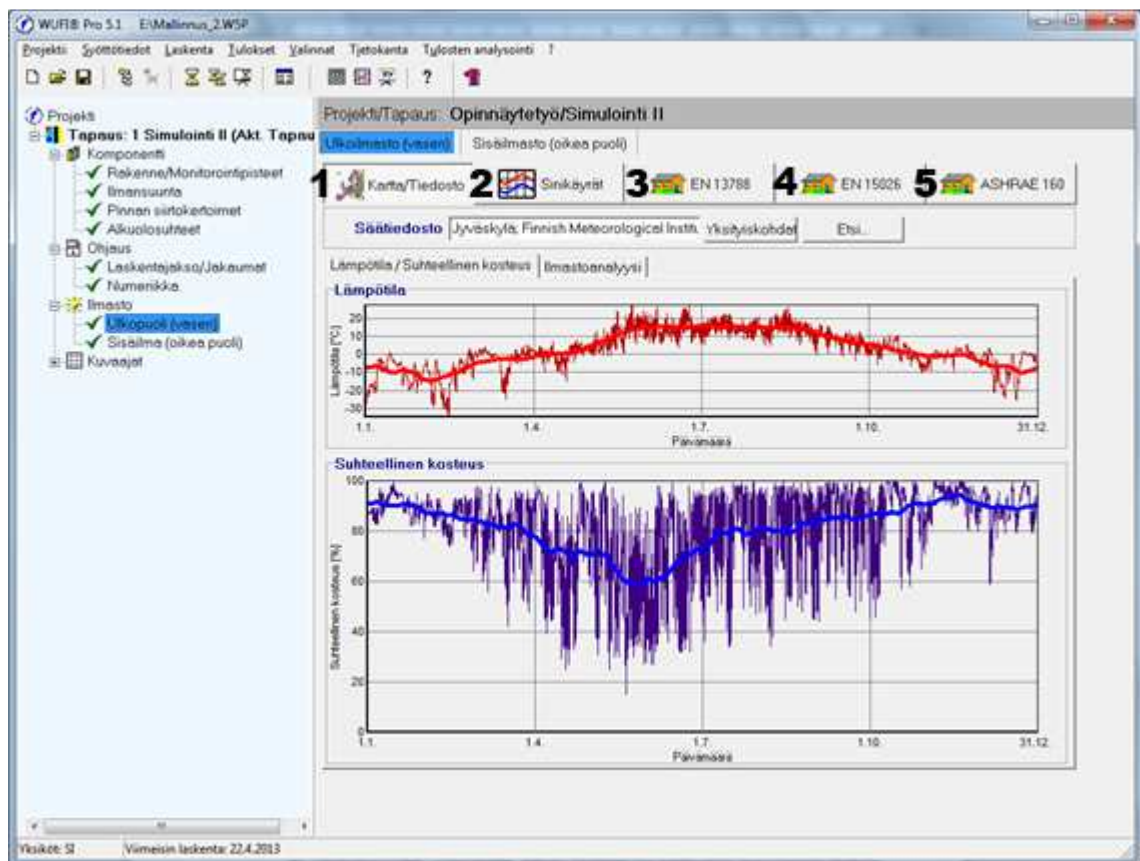
Ulkoilman meteorologiset säätiedot valitaan Kartta/Tiedosto-välilehdeltä (kuva 13, kohta 1) painamalla Sää tiedosto-kohdasta Etsi-painiketta. Tämän jälkeen käyttäjä valitsee halutun mantereen ja tarkemman sijainnin. Suomesta löytyy Helsingin, Espoon, Jyväskylän ja Sodankylän vuosittaiset säätiedot. Käyttäjä pystyy myös hakemaan säätiedot luomastaan tiedostosta. Sää tiedoston valinnan jälkeen valittua ilmastoa voi analysoida painamalla Ilmastoanalyysi-painiketta ja sen jälkeen Analysoi-painiketta. WUFI tutkii säätiedoston ja antaa siitä analyysin, joka sisältää esimerkiksi auringon lämpösäteilyn ja viistosateen summat ilmansuuntien mukaan. [11.]

Joissain tapauksissa lyhyen aikavälin ilmastovaihtelut eivät ole tärkeitä, jolloin käyttäjä voi valita ilmasto-olosuhteet sinikäyrien mukaan painamalla Sinikäyrät -painiketta (2) ja valitsemalla WTA Suositus 6-2-01/E -alasvetovalikosta halutun profiilin. Lämpötila ja suhteellinen kosteus voidaan mallintaa sinikäyrillä tai asettaa ne pysyviin arvoihin. Näitä olosuhteita käytetään useimmiten sisäilmaston mallintamisessa, koska lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut heikentyvät rakennuksen kalustukseen. Sinikäyriä voidaan käyttää simuloimaan ulkoilmaa, jos simuloitava rakenne ei altistu sateelle tai auringon lämpösäteilylle. [11.]

Sisäilmaa voi mallintaa algoritmilla, joka perustuu standardiin DIN EN ISO 13788 painamalla EN 13788 -painiketta (3). Algoritmi johtaa suhteellisen kosteuden annetusta ulkoilman säätiedostosta, mutta pitää sisälämpötilan vakiona ympäri vuoden. Käyttäjä pystyy valitsemaan sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden joko kosteusluokissa tai määrittämään sen itse. [11.]

Sisäilman vaihtelua voi myös mallintaa algoritmilla, joka perustuu standardiin prEN 15026 painamalla EN 15026 -painiketta (4). Tämänkin algoritmi johtaa sisäilmaston annetusta ulkoilman säätiedostosta. Erona tällä mallinnustavalla edelliseen on se, että sisälämpötila ei ole vakio vaan nousee kesäisin ulkolämpötilan tasolle ja pysyy lämmityskaudella 20 °C:ssa. Sisäilman suhteellinen kosteus määräytyy ulkoilman mukaan, mutta käyttäjä voi valita sisäilman kosteuskuorman normaaliksi tai korkeaksi. [11.]

Sisäilmaa voi vielä simuloida ASHRAE 160 P algoritmillä painamalla ASHRAE 160 -painiketta (5). Sekin perustuu ulkoilman säätietoihin, mutta ottaa huomioon simuloinnissa ilmastointijärjestelmän (lämmitys ja jäähdytys), suhteellisen kosteuden tuotot, ilmanvaihtokertoimen ja rakennustilavuuden.



Kuva 13. Ilmasto-välilehdet

## 6.14. Laskenta

Annetun tapauksen mallintaminen käynnistetään Laskenta-valikosta. Laskenta voi käynnistää numeerisena tai filmin kanssa, jolloin voidaan tarkastella mallinnuksen etenemistä ja lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja materiaalien kosteuspuitoisuuksien muutoksia rakenteessa.

Graafisen laskennan ominaisuuksia voi vaihtaa oikeasta yläkulmasta painamalla Ominaisuudet-painiketta (kuva 14, kohta 1), jolloin käyttäjä voi valita mitä graafisessa laskennassa esiintyy. Laskennan voi käynnistää ja pysäyttää vihreistä ohjauspainikkeista (2). Nopeus-liukukytkimellä voidaan muuttaa filmin näyttönopeutta (3). Kello ja kalenteri ilmaisevat kyseistä simuloitavaa hetkeä.

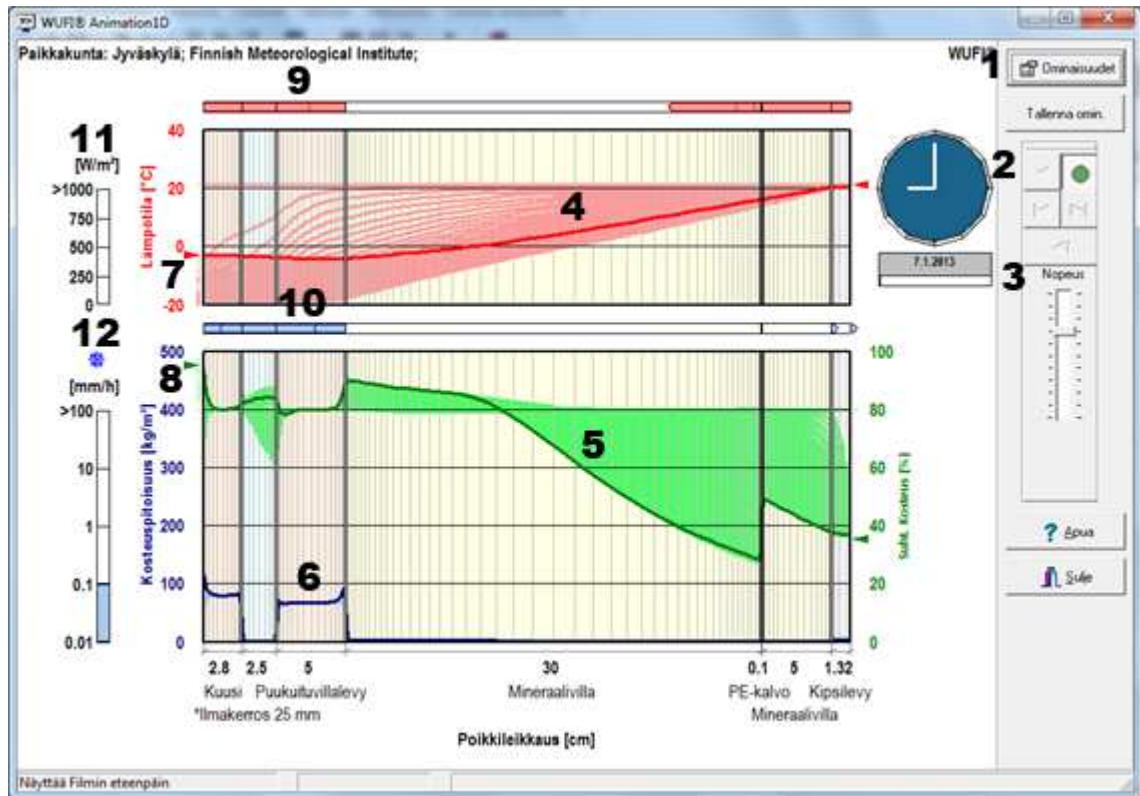
Filmissä ylempi punainen diagrammi (4) esittää rakenteen lämpöliikettä, alempi vihreä (5) suhteellista kosteutta/vesihöyryn osapainetta ja sininen (6) materiaalin kosteuspitoisuutta.

Diagrammien sivuilla näkyvät punaiset (7) ja vihreät (8) nuolet ilmaisevat mallintamisen lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn osapaineen reunaehdoja.

Diagrammien yläpuolella olevat punaiset (9) ja siniset (10) nuolet ilmaisevat lämpö- ja kosteusvirtoja materiaalien rajapinnoissa.

Lämpödiagrammin vasemmalla puolella näkyy lämpösäteilyn määrä (11) ja kosteusdiagrammin vasemmalla puolella sademäärä (12).

Laskennan päätyttyä WUFI ilmoittaa laskennan tilanteen, joka sisältää tiedot laskennasta, mahdolliset laskentavirheet, lämpö- ja kosteusvirrat sekä materiaalien kosteuspitoisuudet.



Kuva 14. Laskenta filmin kanssa.

## 6.15. Tulokset

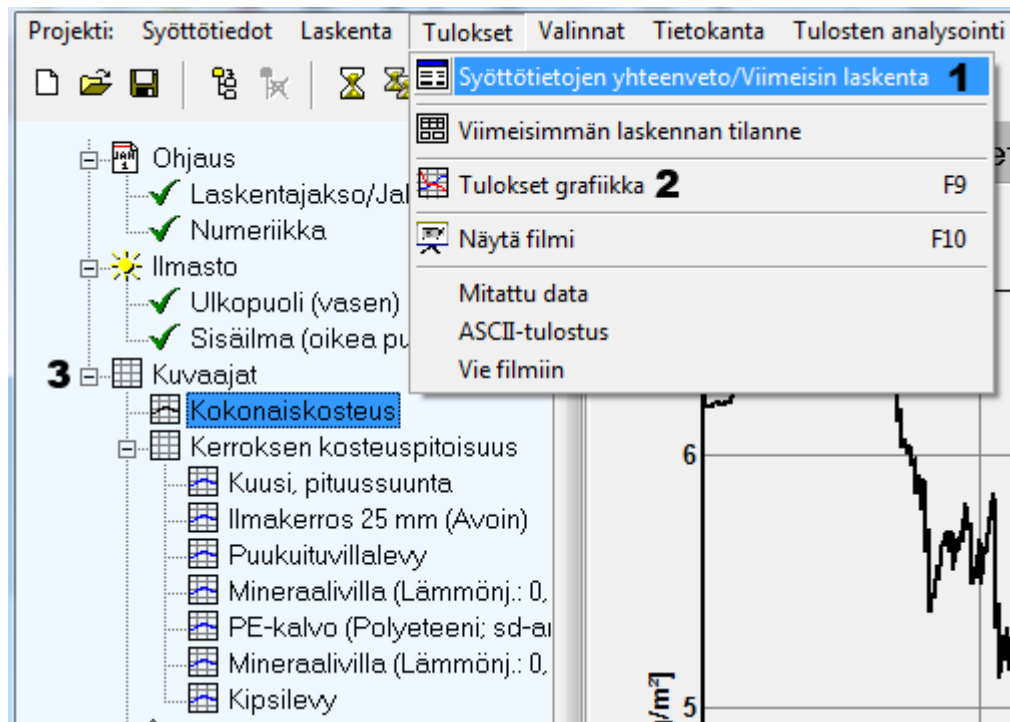
Laskennan jälkeen WUFI valmistaa tulokset kosteuden- ja lämmönsiirrosta. Syöttötietojen yhteenveto/Viimeisin laskenta -näppäimen (kuva 15, kohta 1) avulla käyttäjä voi tulostaa laskelman yhteenvedon, joka sisältää projektin yleis-tiedot, tapauskohtaiset tiedot rakennemallin osalta, reunaehdot, pinnan siirto-kertoimet, eksplisiittisen säteilytaseen, lähteet ja nielut. Valinnat -näppäimellä käyttäjä voi valita raporttiin tulevat tiedot.

Graafisia käyriä pääsee tarkastelemaan Tulokset grafiikka -näppäimen (2) alta. Valikossa käyriä, kuvia ja tulostussivuja voi tarkastella, muokata, lisätä, poistaa tai tulostaa. Muokkaaminen tapahtuu valitsemalla haluttu käyrä, kuva tai sivu listasta ja valitsemalla oikealla hiiren näppäimellä haluttu toiminto. [10, s. 14.]

WUFI piirtää myös vähemmän tarkat kuvaajat Kuvaajat -valikon (3) alle, joiden avulla käyttäjä voi tehdä pikakatsauksen simulointituloksiin. Näiden tuloksien



alla näkyy kokonaiskosteus, materiaalikerroksien kosteuspitoisuudet ja jokaisen monitorointipisteen lämpötila, suhteellinen kosteus ja materiaalikosteus.



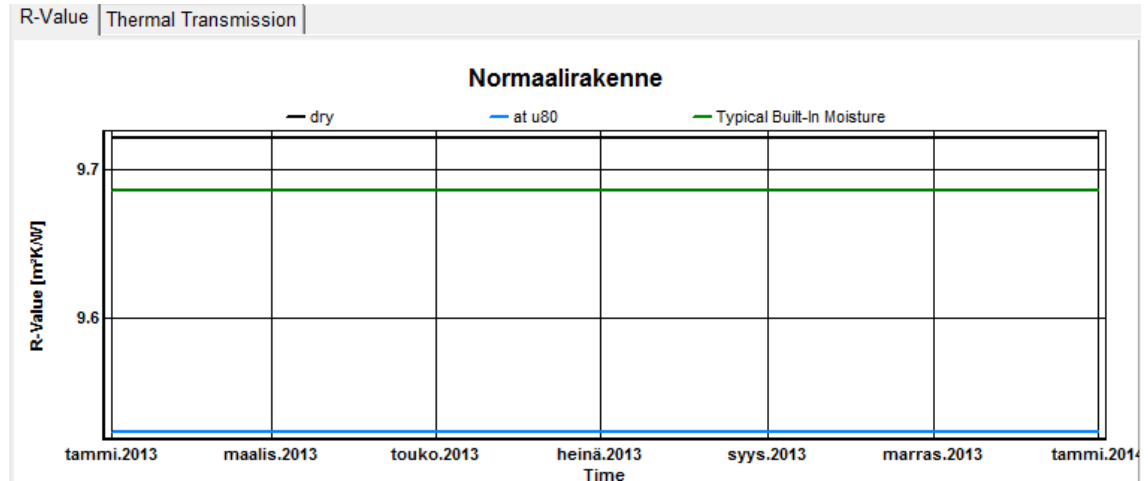
Kuva 15. Simulointitulosten tarkastelu.

## 6.16. Tuloksien jälkiprosessointi

WUFI:ssa tuotettua dataa pystyy jälkikäsittelemään erilaisilla sisäisillä jälkiprosessointiohjelmilla. Näitä voivat olla esimerkiksi WUFI 5.1 PRO:ssa mukana tuleva "Thermal Transmission" (lämmönsiirtyminen), jonka avulla voidaan tarkastella rakenteen lämpöhukkaa. WUFI:n kotisivuilta on myös saatavana "WUFI-BIO 3.1", jonka avulla pystyy arvioimaan homeen kasvun riskiä rakenteessa. Käyttäjä pystyy myös halutessaan luomaan omia jälkiprosessointiohjelmiä. [11.]

Lämmönsiirtymisen tulkinta käynnistetään painamalla Tulosten analysointi-painikkeen alta Lämmönsiirtyminen-painiketta. Lämmönsiirtoa pystyy tarkastelemaan ainoastaan, jos tehty mallinnus on yli vuoden pituinen. Ohjelma kertoo rakenteen R-arvon ja lämpöhukan ajan suhteen. [11.]

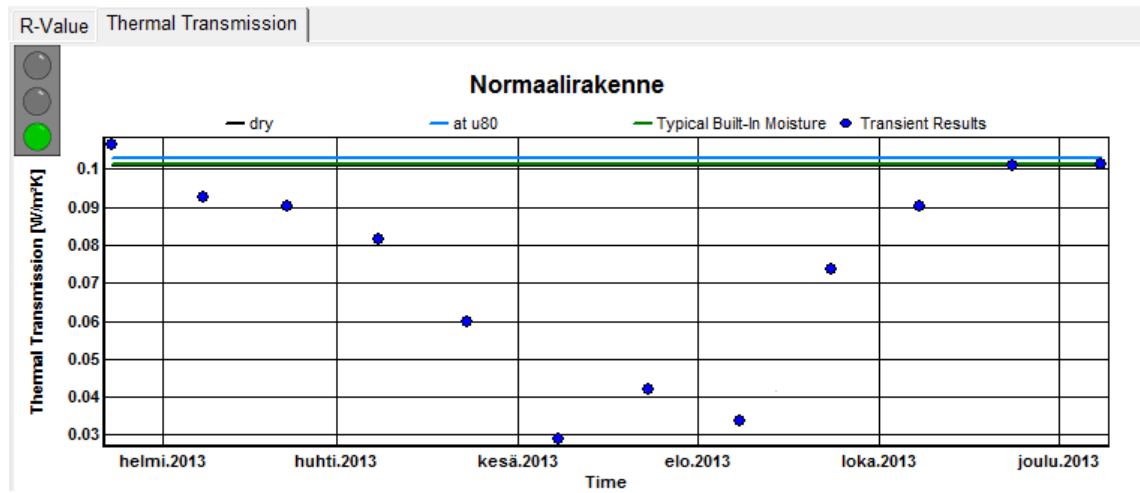
Kuvassa 16 näkyy rakenteen R-arvo ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ) kuukausien suhteen. Musta viiva ilmaisee kuivan rakenteen R-arvon, vihreä rakennuskostean rakenteen R-arvon ja sininen RH 80 %:n kosteudessa olevan rakenteen R-arvon. [11.]



Kuva 16. Rakenteen R-arvo kuukausien suhteen.

Kuvassa 17 näkyy lämmön siirtyminen rakenteen läpi ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) kuukausien suhteen. Musta viiva kuvaa kuivan rakenteen lämpöhukkaa, sininen RH 80 %:n kosteudessa olevan rakenteen lämpöhukkaa ja vihreä rakennuskosteudessa olevan rakenteen lämpöhukkaa. Kuvassa näkyvät siniset pisteet kuvaavat WUFI:sta saatujen tietojen avulla prosessoitua lämpöhukkaa, joka ottaa huomioon materiaalien hygrotermiset ominaisuudet, latentin lämmön, ylimääräiset lämmönlähteet ja ulkopuoliset tekijät (esimerkiksi tuuli). [11.]

Kuvassa vasemmalla näkyvä opastin ilmoittaa ylittävätkö WUFI:sta prosessoidut lämpöhukkatiedot standardissa DIN 4108-2(2003) ja DIN 4108-2(1981) annetut U-arvot, jotka käyttäjä voi halutessaan muuttaa toisiksi. Simuloinnin ollessa alle vuoden mittainen on osoitin harmaa. [11.]



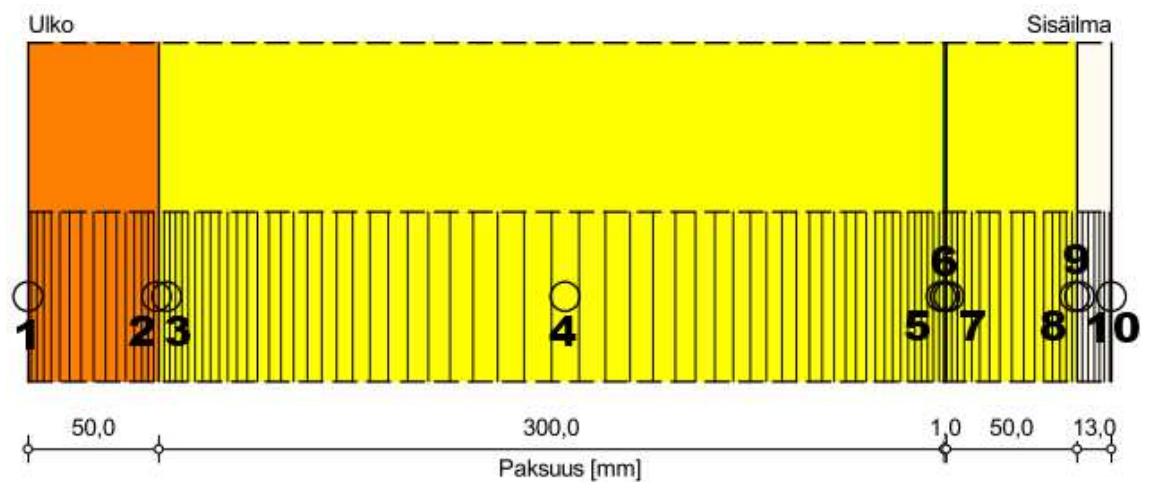
Kuva 17. Lämmön siirtyminen rakenteen läpi kuukausien suhteen



## 7.1. Mallinnus I






Ensimmäisen simuloinnin tarkoituksena on luoda WUFI:lla mahdollisimman samankaltainen malli kuin mitä käytetään perinteisessä käsinlaskennassa. Huomioon ei siis oteta sateen absorptiota, auringon lämpösäteilyä, materiaalien hygrotermisiä ominaisuuksia, kapillaarista johtumista, veden höyrystymislämpöä tai veden sitoutumislämpöä. Rakenneleikkauksesta poistettiin myös tuuletusrajo ja ulkoverhoilu.

Kuvassa 19 on esitetty mallinnus I:n rakenneleikkaus ja monitorointipisteitten numerot.



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :

-  - \*Puukuituvillalevy (Avoin)
-  - \*Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,060 W/mK) (Avoin)
-  - PE-kalvo (Polyeteeni; sd-arvo = 50 m))
-  - \*Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,060 W/mK) (Avoin)
-  - \*Kipsilevy (Avoin)

Kuva 19. Mallinnus I:n rakenneleikkaus ja monitorointipisteet

Simuloinnissa käytettiin samoja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja kuin käsinlaskennassa, koska lämpötilan ja kosteuden vaikutuksia lämmönjohtavuuteen ei oteta huomioon. Todellisuudessa WUFI:ssa ei yleensä käytetä suunnitteluarvoja, koska niiden laskutavassa on otettu huomioon kosteuden ja muiden tekijöiden vaikutus lämmönjohtavuuteen.

Simuloinnin ulkoilmastoon käytettiin Jyväskylän säätietoja ja sisäilmastoon standardin EN 13788 mukaista logaritmiä, joka johtaa sisäilman suhteelliset kosteudet ulkoilman säätietojen mukaan. Sisälämpötila pysyy vakiona ympäri vuoden (21 °C).

Diffuusion käsinlaskennassa käytetään Jyväskylän lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien kuukausikohtaisia keskiarvoja, jotka näkyvät taulukossa 8. Tiedot on saatu ympäristöministeriön sivuilta [12.] Sisäilman suhteellinen kosteus on laskettu ulkoilman suhteellisesta kosteudesta, johon lisätään asuinrakennuksen kosteuslisä 3 g/m<sup>3</sup>. Sisäilman lämpötilaksi oletetaan ympäri vuoden 21 °C.

Taulukko 8. Jyväskylän lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien keskiarvot

<b>Kuukausi</b>	<b>Lämpötila (°C)</b>	<b>RH %, ulkoilma</b>	<b>v<sub>k</sub> (g/m<sup>3</sup>), ulkoilma</b>	<b>v<sub>k</sub> (g/m<sup>3</sup>), sisäilma</b>	<b>RH %, sisäilma</b>
Tammikuu	-8	87,8	2,27	5,27	28,8
Helmikuu	-7,1	89,6	2,52	5,52	30,1
Maaliskuu	-3,5	85,1	3,19	6,19	33,8
Huhtikuu	2,4	74,2	4,26	7,26	39,7
Toukokuu	8,8	61,5	5,39	8,39	45,8
Kesäkuu	13,4	65,6	7,65	10,65	58,2
Heinäkuu	15,8	73,0	9,84	12,84	70,1
Elokuu	13,8	80,7	9,65	12,65	69,1
Syyskuu	9,2	82,2	7,39	10,39	56,7
Lokakuu	4,1	87,4	5,63	8,63	47,1
Marraskuu	-1,8	90,5	3,85	6,85	37,4
Joulukuu	-5,9	89,3	2,77	5,77	31,5

Taulukossa 9 näkyvät käsinlaskennassa käytettävät lämmönjohtavuudet (suunnitteluarvot) ja vesihöyrynvastukset. Puurunkojen ja -koolauksien kohdalla käytetään painotettua arvoa, jossa otetaan huomioon puun vaikutus lämmön- ja vesihöyrynvastukseen lämmöneristeen sisällä. Lämmönjohtavuudet on otettu Rakennusmääräyskokoelma C4:stä ja vesihöyrynvastukset kirjasta RIL 107-2000 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet [6, s. 10-15; 13 s. 39.]

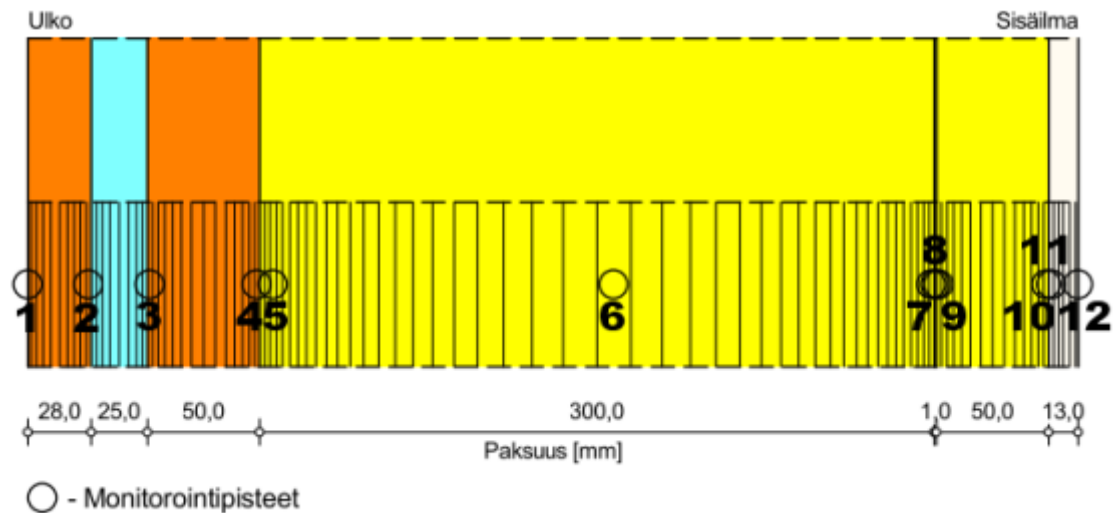
Taulukko 9. Laskennassa käytetyt arvot.

<b>Materiaali</b>	<b>Paksuus (mm)</b>	<b>Lämmön- johtavuus (W/m°C)</b>	<b>Lämmön- vastus (m<sup>2</sup>C/W)</b>	<b>Vesihöyryn- vastus (kg/msPa)</b>
Kipsilevy	13	0,22	0,059	2,6 x 10 <sup>-11</sup>
Puukoola- us/mineraalivilla	50	-	0,828	2,16 x 10 <sup>-11</sup>
Höyrinsulkukalvo (PE-kalvo)	0,2	-	0,020	4,00 10 <sup>-16</sup>
Puurun- ko/mineraalivilla	300	-	4,966	2,16 x 10 <sup>-11</sup>
Puukuitulevy	50	0,055	0,909	7,00 x 10 <sup>-11</sup>





## 7.2. Mallinnus II

Toisessa mallinnuksessa on tarkoituksena simuloida sama rakenne kuin edellisessä, mutta WUFI:n tarjoamat lisäominaisuudet on otettu huomioon. Huomiota otetaan siis kosteuden faasimuutokset, lyhytaaltainen auringon säteily, yöaikainen pitkäaaltainen säteilyjäähdyminen, viistosade, vesihöyryn diffuusio, pintadiffuusio ja veden kapillaarinen siirtyminen.

Kuvassa 20 on esitetty mallinnettavan rakenteen rakenneleikkaus ja monitorointipisteitten numerot.



#### Materiaalit :

-  - Kuusi, pituussuunta
-  - \*Ilmakerros 25 mm (Avoin)
-  - Puukuituvillalevy
-  - Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,04 W/mK)
-  - PE-kalvo (Polyeteeni; sd-arvo = 50 m))
-  - Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,04 W/mK)
-  - Kipsilevy

Kuva 20. Mallinnus II:n rakenneleikkaus ja monitorointipisteet.

Rakenteeseen lisätään tuuletusväli ja puuverhous viistosateen mallintamisen takia. Ulkopinnan lämmönvastus määritetään tuulesta riippuvaiseksi, eli se muuttuu säätietojen tuulennopeuden mukaan. Sisäpinnan lämmönvastuksen WUFI määrittää automaattisesti rakennetyypin mukaan. Sisä- ja ulkopinnalle ei anneta Sd-arvoja, koska rakenneleikkaukseen on lisätty sisä- ja ulkoverhous.



Simuloinnin ulkoilmastoon käytettiin Jyväskylän säätietoja ja sisäilmastoon standardin EN 13788 mukaista logaritmiä, joka johtaa sisäilman suhteelliset kosteudet ulkoilman säätietojen mukaan. Sisälämpötila pysyy vakiona ympäri vuoden (21 °C).

Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuksien ja vesihöyrynvastuksien arvoina käytetään WUFI:n materiaalitietokannassa olevia arvoja. Nämä eroavat hieman ensimmäisen simuloinnin arvoista, mutta toisaalta arvot muuttuvat lämpötilan ja kosteuden mukaan, mitä käsinlaskennassa ei oteta edes huomioon.

Tuuletusvälin ilmavirtaavuutta mallinnetaan lisäämällä sinne ilmanvaihtolähde, jonka arvoksi määritettiin 100 vaihtoa tunnissa. Etelän puoleisella puuverhotulla seinällä pelkästään lämpötiloista johtuva ilmavirtaus voi olla 90 - 560 vaihtoa tunnissa ja tuulen ollessa 4 m/s jopa 900 vaihtoa tunnissa. [14, s. 55]

### 7.3. WUFI:in syötettävät tiedot

Taulukkoon 10 on koottu kummankin esimerkkisimuloinnin WUFI:in syötettävät tiedot.

Taulukko 10. Simulointien tiedot.

Selite	Mallinnus I	Mallinnus II
Sijainti:	Jyväskylä	Jyväskylä
Rakenteen suunta:	Etelä	Etelä
Lähteet/nielut:	Ei lähteitä/nieluja	Ilmanvaihtolähde (tuuletusväli), ilmanvaihtoluku 100 1/h
Kallistuskulma:	90 ° (seinä)	90 ° (seinä)
Rakennuskorkeus ja sateen kertoimet:	R1 = 0, R2 = 0	R1 = 0, R2 = 0,07 s/m
Aika-askel:	1 h	1 h
Ulkopinnan lämmönvastus:	0,04 m <sup>2</sup> °C/W	Tuulesta riippuva
Ulkopinnan Sd-arvo:	Ei pinnoitetta	Ei pinnoitetta
Lyhytaaltainen absorptiokerroin:	0 (ei oteta huomioon)	0,8 (puu, kuusi, ruskeaksi maalattu)
Pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin:	0 (ei oteta huomioon)	0,9
Sateen absorptiokerroin:	Ei absorptiota	0,7 (kallistuskulman ja rakennetyypin mukaan)
Sisäpinnan lämmönvastus:	0,13 m <sup>2</sup> °C/W	0,13 m <sup>2</sup> °C/W
Sisäpinnan Sd-arvo:	Ei pinnoitetta	Ei pinnoitetta
Alkutilanteen suhteellinen kosteus:	Vakio joka komponentissa, RH % = 80 ja alkulämpötila 21 °C	Vakio joka komponentissa, RH % = 80 ja alkulämpötila 21 °C
Ulkoilmasto:	Jyväskylän säätietojen mukaan	Jyväskylän säätietojen mukaan
Sisäilmasto:	Standardin EN 13788 algoritmin mukaan, sisäilman lämpötila 21 °C, suhteellisen kosteuden kosteusluokka: 2	Standardin EN 13788 algoritmin mukaan, sisäilman lämpötila 21 °C, suhteellisen kosteuden kosteusluokka: 2

## 8. Mallinnuksien tulokset

Liitteessä 1 näkyy käsinlasketun diffuusiolaskennan tulokset verrattuna WU-FI:lla mallinnettuun vastaavaan tilanteeseen. Kosteuskäyriä vertaamalla nähdään niiden eroavaisuudet, jotka ovat yllättävän pieniä. Suurimmat eroavaisuudet näkyvät 300 mm:n mineraalivillan kohdalla.

Liitteessä 2 on rakenteiden kokonaiskosteusmäärät. Diagrammista voisi käsitellä, että toinen mallinnus on paljon kosteampi kuin ensimmäinen. Tämä kuitenkin johtuu toisessa mallinnuksessa olevasta ulkoverhouksesta, joka lisää rakenteen kokonaiskosteusmäärää. Tulokset eivät ole siis suoraan verrannollisia.

Liitteessä 3 näkyy mallinnuksien materiaalien kosteuspitoisuudet. Toisen mallinnuksen kosteuspitoisuudet ovat hieman pienempiä, mutta muuten arvot ovat hyvin samanlaisia.

Liitteessä 4 on ilmoitettu suhteelliset kosteudet monitorointipisteissä mallinnuksien välillä. Näistä voidaan nähdä, että useimmissa toisen mallinnuksen monitorointipisteissä RH % on 5-10 % suurempi kesäkuukausina verrattuna ensimmäiseen mallinnukseen.

Liitteessä 5 näkyvät lämpötilat, suhteelliset kosteudet ja kosteuspitoisuudet rakenteen syvyyden suhteen. Ulkopinta on vasemmalla. Diagrammeista nähdään, että toinen mallinnus on lämpötiloiltaan useampia asteita lämpimämpi, mutta myös suhteellinen kosteus on suurempi.

## 9. Johtopäätelmät

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että perinteisen diffuusion käsinlaskennan ja WUFI:lla saadut arvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Suurimmat eroavaisuudet tulivat esille 300 mm mineraalivillan kohdalla ja tietysti joinakin kuukausina simuloinnissa näkyi kosteuspiikkejä. Näitä ei voida ottaa perinteisessä laskennassa kunnolla huomioon, koska useimmiten suhteellisen kosteuden arvot lasketaan kuukauden keskiarvoilla. Perinteisen diffuusion käsinlaskennan avulla saadaan suuntaa antavia tuloksia rakenteen toiminnasta, mutta vain ja ainoastaan diffuusion kannalta. WUFI:n avulla saadaan otettua huomioon kosteuden faasimuutokset, auringon säteily, yöaikainen jäähtyminen, viistosade, pintadiffuusio ja veden kapillaarinen siirtyminen. Silti ulkopuolelle jää rakenteiden mahdolliset kylmäsillat ja konvektiovirtaukset. Nämä ovat useimmiten epäsäännöllisiä ja vaikeita simuloida, mutta voivat vaikuttaa suuresti rakenteen toimivuuteen. Parhaiten nämä ongelmat saadaan ehkäistyä oikeaoppisella rakennesuunnittelulla ja työvirheiden ehkäisyllä.

Ensimmäisen ja toisen simulaation tuloksissa ei ollut myöskään suuresti eroa. Toisen simulaation lämpötilat ja suhteelliset kosteudet olivat kesäkuukausina hieman korkeammat kuin ensimmäisen simuloinnin. Erot johtuvat todennäköisesti viistosateesta ja auringon lämpösäteilystä. Näiden vaikutuksen voitaneen todeta olevan hyvin vähäinen tuuletusraolliseen puuverhottuun ulkoseinärakenteeseen. Kapillaarinen kulkeutuminen on myös hyvin vähäistä johtuen ulkoverhouksen tuuletusraosta ja siitä että simuloitavat rakenteet eivät ole suuresti kapillaarisia. Jälkikäteen ajateltuna seinärakenteeksi olisi kannattanut valita esimerkiksi betoninen sandwich-elementtirakenne, jotta viistosateen ja kapillaarisen kulkeutumisen vaikutukset olisivat olleet suurempia ja siten helpommin nähtävissä.

Simuloinnista saatujen tuloksien tulkinta ja niiden perusteella tehtävät johtopäätökset vaativat tekijältään syvällistä rakennusfysiikan tuntemusta. Rakenteiden mallintaminen on hyvä apukeino rakennusfysikaalisessa suunnittelussa, mutta liian kauaskantoisten johtopäätösten vetäminen simuloinnilla aiheuttaa varmasti

ongelmia. Koko simuloinnin tulos voi vääristyä yhdenkin lähtöarvon ollessa väärin.

WUFI:sta saadut tulokset eivät itsessään kerro vielä mitään, vaan lämpö- ja kosteuskäyrien vaikutuksia pitäisi vielä osata tulkita. Kosteus ja lämpötila määrittävät homeelle ja mikrobeille sopivat kasvualustat, mutta näihin vaikuttavat myös materiaalin ominaisuudet. Tällä hetkellä Tampereen teknillinen yliopisto ja VTT kehittävät yhdessä homeen laskun matemaattista laskentamallia eli ns. homeindeksimallia. Tämän avulla simuloinnin tuloksia ja rakenteen toimivuutta on helpompi tulkita.

## 10. Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua WUFI:n laskentaprosessiin ja raportoida siitä ohjekirjamaisesti. Tavoitteena oli myös tutkia WUFI:n simuloinnista saatuja tuloksia ja verrata yhtäläisyyksiä perinteisiin taulukkolaskentakeinoihin. Täytin mielestäni asetetut tavoitteet hyvin, vaikkakin simulointeja olisi voinut olla erilaisia ja enemmän, jotta niistä olisi voitu vetää kauaskantoisempia johtopäätöksiä. Lisäksi simulointeja olisi voinut verrata laboratorioissa tehtäviin tutkimuksiin.

Kummankaan simuloitun esimerkkirakenteen suhteellisen kosteuden käyrät eivät eronneet suuresti diffuusion taulukkolaskennasta saaduista käyristä. Tämä ei tarkoita sitä, että WUFI:n tarjoamat lisäominaisuudet olisivat hyödyttömiä vaan ennemminkin sitä, että WUFI:n lisäominaisuudet eivät vaikuta simuloitavaan esimerkkirakenteeseen niinkään paljoa.

Uskon opinnäytetyöstäni olevan apua WUFI:n käyttöä aloittelevalle lukijalle, koska ohjelmasta on hyvin vähän suomenkielistä ohjeistusta yleisessä jakelussa. WUFI:n mukana tuleva ohjekirja on kattava, mutta paljon teknistä sanastoa sisältävä englanti voi olla perehtymättömälle lukijalle haastavaa ja hidasta luettavaa. Toivomukseni on, että joku jatkojalostaisi tekemääni opinnäytetyötä ohjekirjan muotoon.

## Lähteet

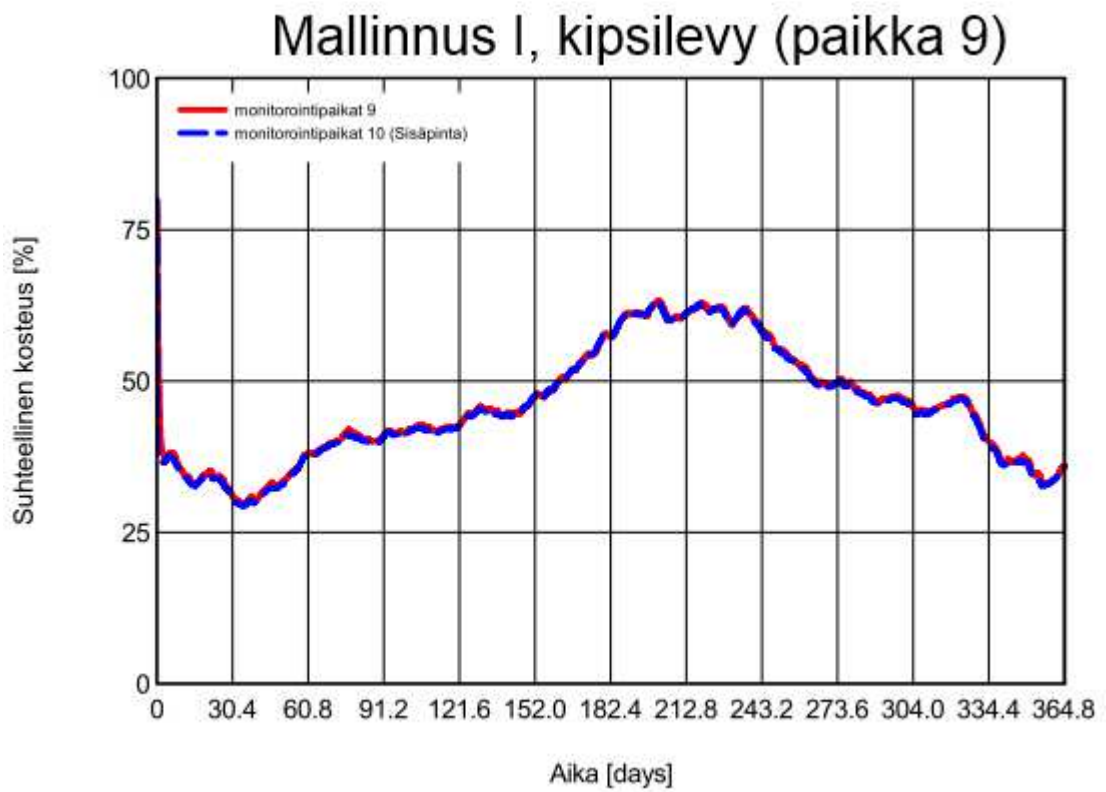
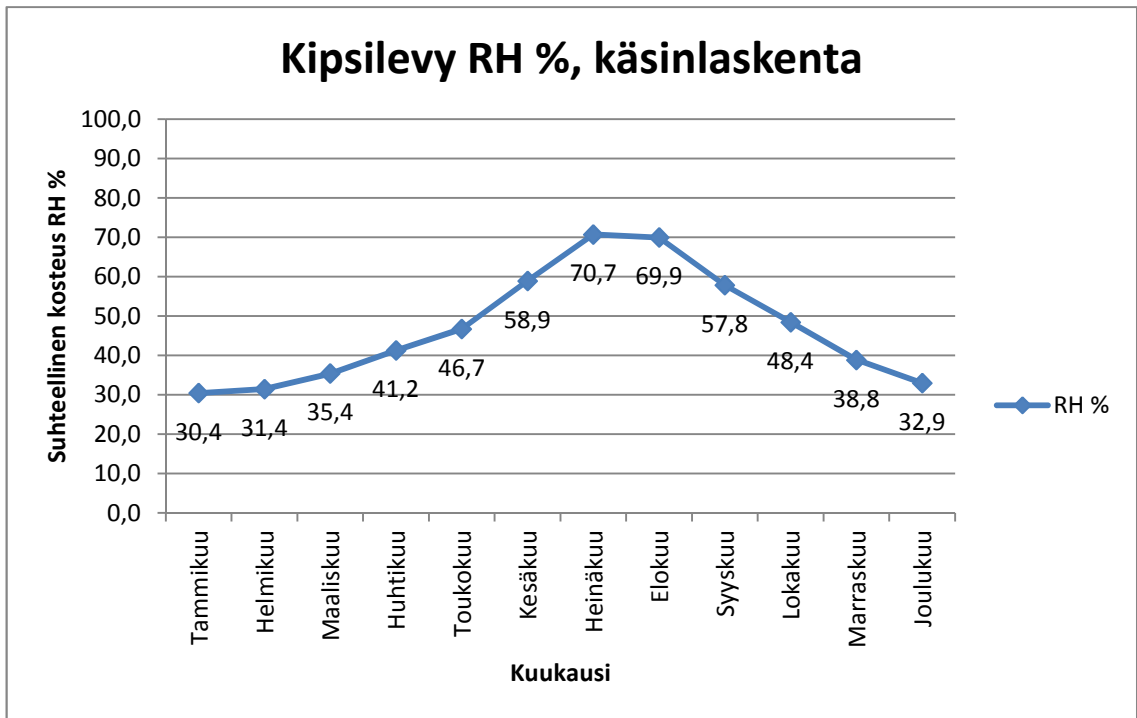
1. Siikanen, U. Rakennusfysiikka Perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy. 1996.
2. Björkholtz, D. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy. 1987.
3. RIL 250-2011. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2011.
4. Kosteus. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille. Rafnet-Ryhmä. 2004
5. Lämpö. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille. Rafnet-Ryhmä. 2004.
6. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Lämmöneristysohjeet 2003. Ympäristöministeriö. 2003.  
Saatavissa: <http://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/c4.pdf>  
Hakupäivä: 13.12.2012.
7. Vinha Juha. Lämpö ja lämmön siirtyminen RIL 255-2010. Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2010.  
Saatavissa: <http://www.ril.fi/media/files/julkaisut/rakfys/luku-4-lampo-3.12.10-vinha.pdf>  
Hakupäivä: 26.2.2013
8. Wahlfors Pasi. Tuulensuoja-aluskaterakenteen soveltuvuus Suomen ilmasto-olosuhteisiin. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 2011.  
Saatavissa:  
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/20828/wahlfors.pdf?sequence=3>  
Hakupäivä: 17.4.2013
9. Isover. 2011. Vario KM Duplex UV -vesihöyrynvastus.  
Saatavissa:  
<http://www.isover.fi/Download/26713/Vario%20KM%20Duplex%20UV%20-vesih%C3%B6yrynvastus.pdf>  
Hakupäivä: 17.4.2013
10. WUFI 3.3 Pro käyttöohje ja esimerkkilaskelmat. Rafnet-ryhmä. 2004.  
Saatavissa:  
<http://www.oamk.fi/~anttitor/kurssit/Vanhat%20kurssit/Rakennusfysiikan%20sovellukset/Wufin-ohjeet.pdf>  
Hakupäivä: 13.3.2013
11. Fraunhofer IBD. WUFI Pro 5.1 online help. Ohjekirja. 2012.

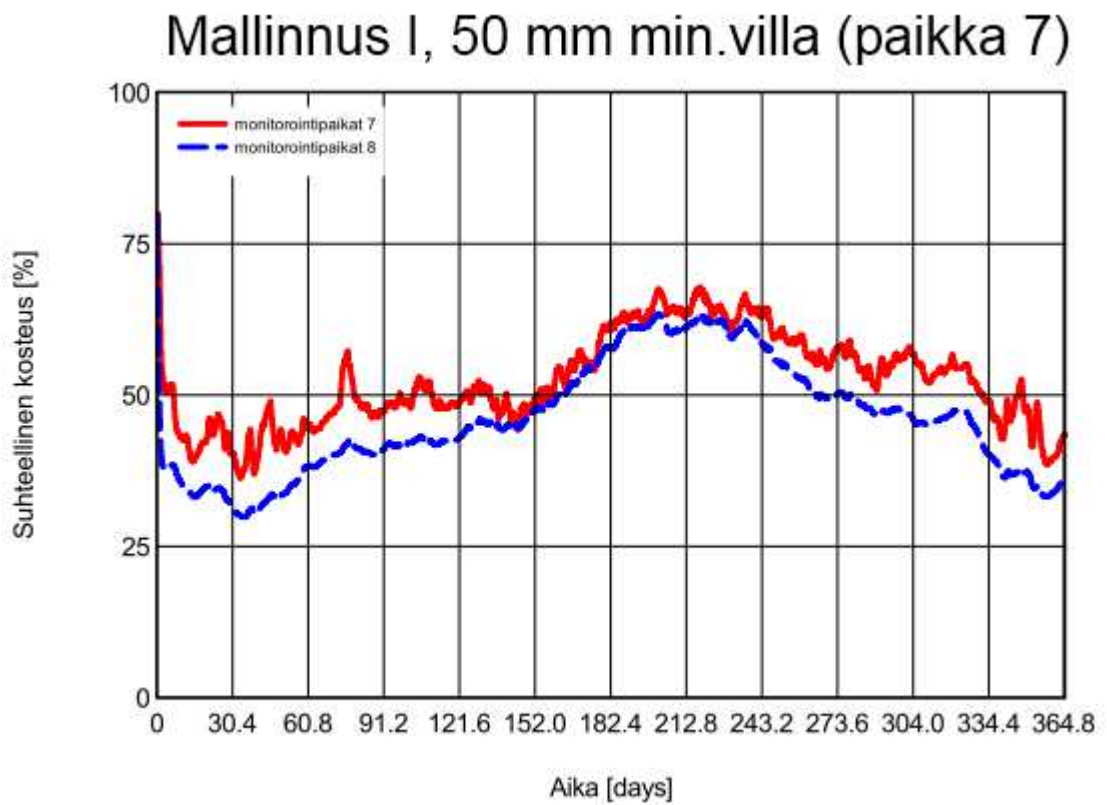
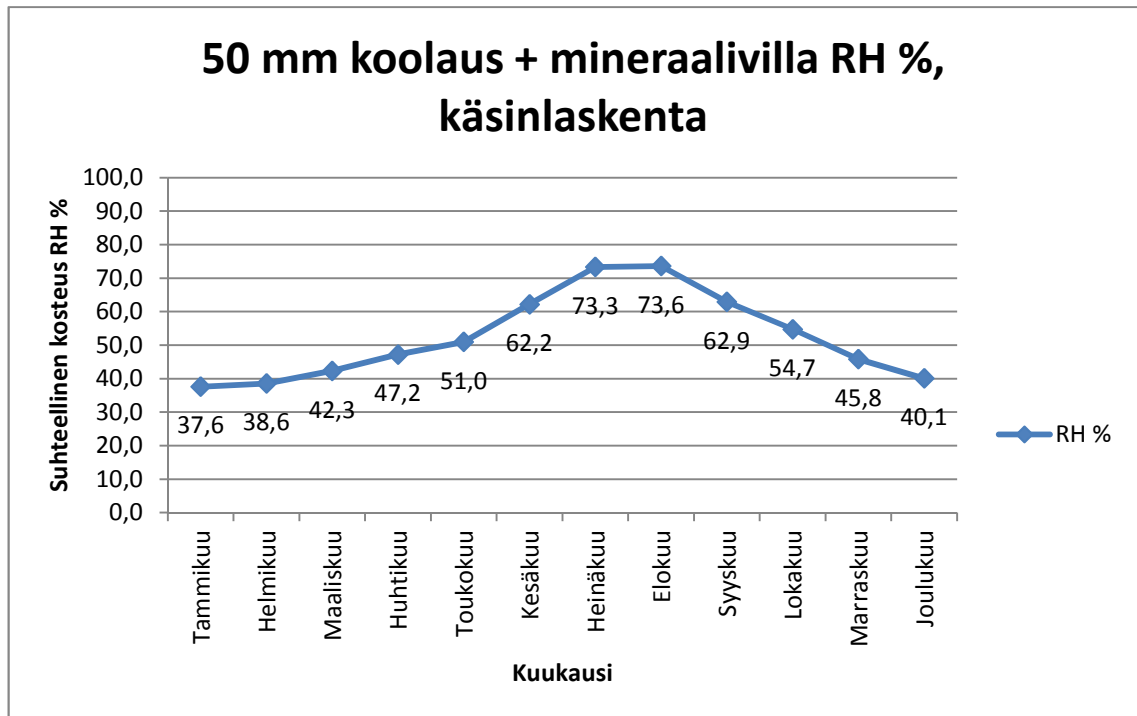
12. Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. 2012. Säätiötiedot Jyväskylä.  
Saatavissa:  
[http://ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma](http://ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma)  
Hakupäivä: 20.4.2013
13. RIL 107-2000. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet, Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2000.
14. Mäkitalo Mikael. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. 2012.  
Saatavissa:  
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/20999/makit alo.pdf?sequence=3>  
Hakupäivä: 23.4.2013

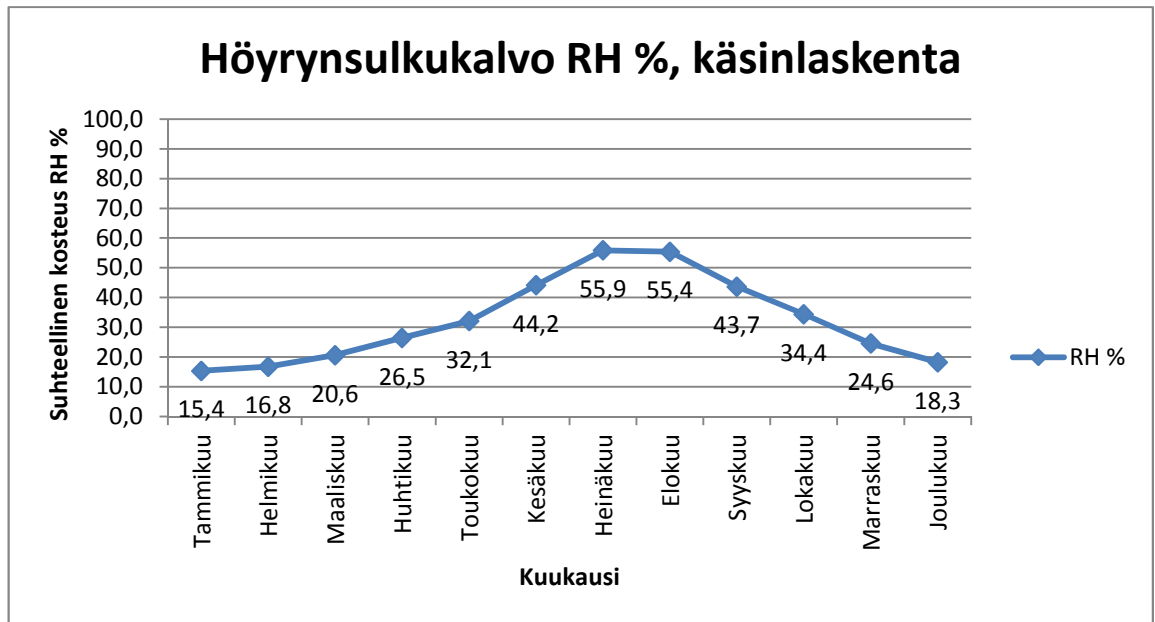


## Liitteet

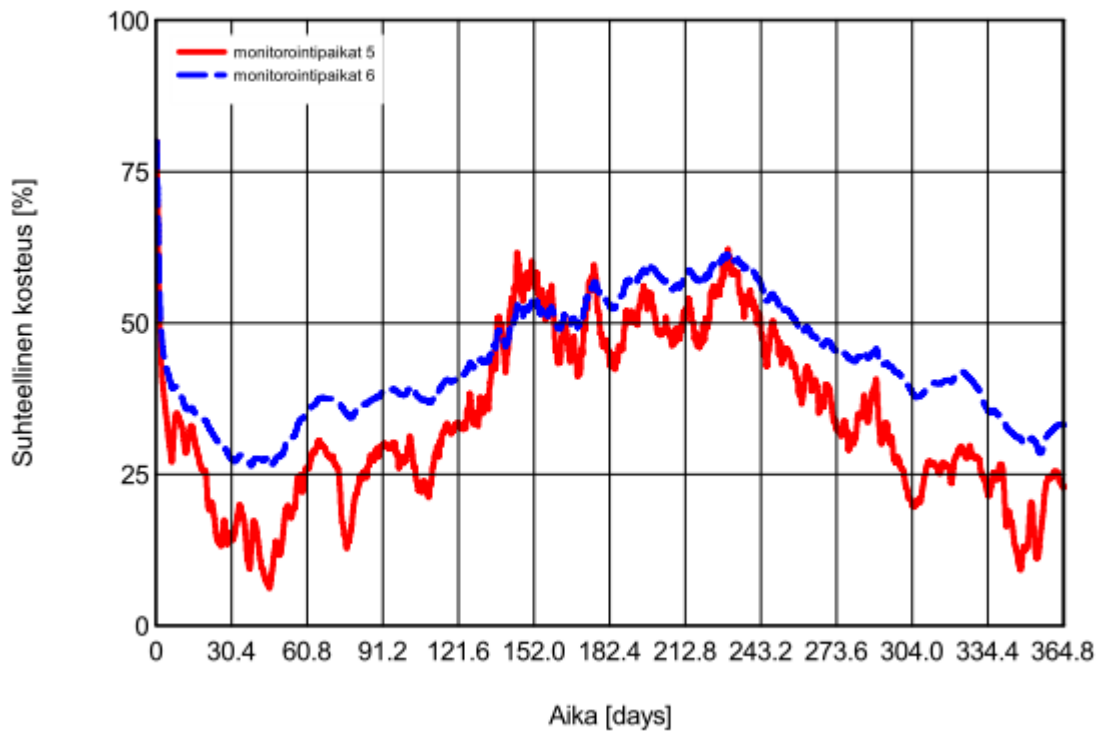
- Liite 1 Käsinlaskennan ja mallinnuksen vertailu
- Liite 2 Rakenteen kokonaiskosteusmäärät
- Liite 3 Materiaalien kosteuspitoisuudet
- Liite 4 Suhteelliset kosteudet monitorointipisteissä
- Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen
- Liite 6 Excel-taulukot kuukausittain, painotetut  $R_i$ -arvot

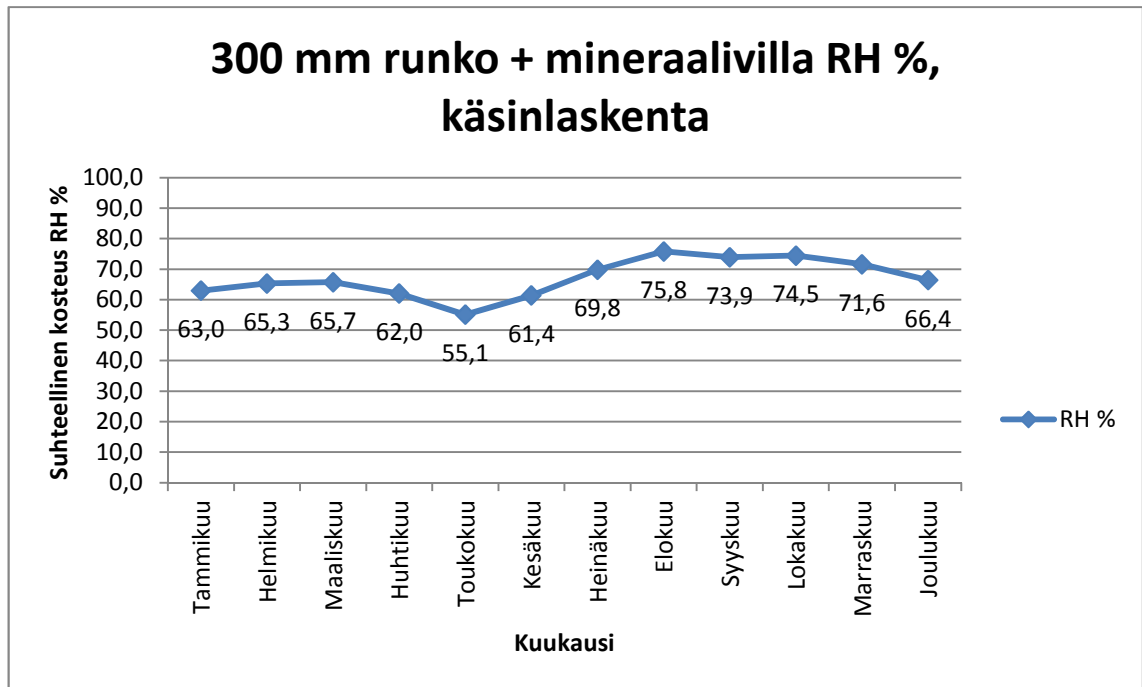




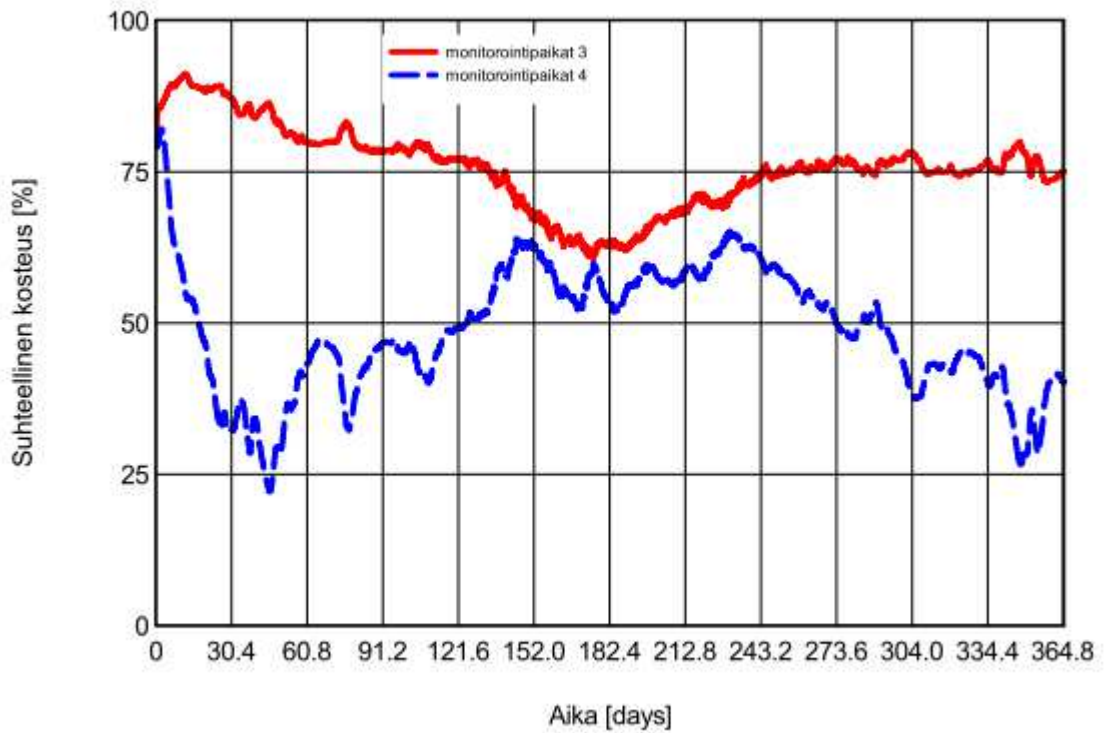


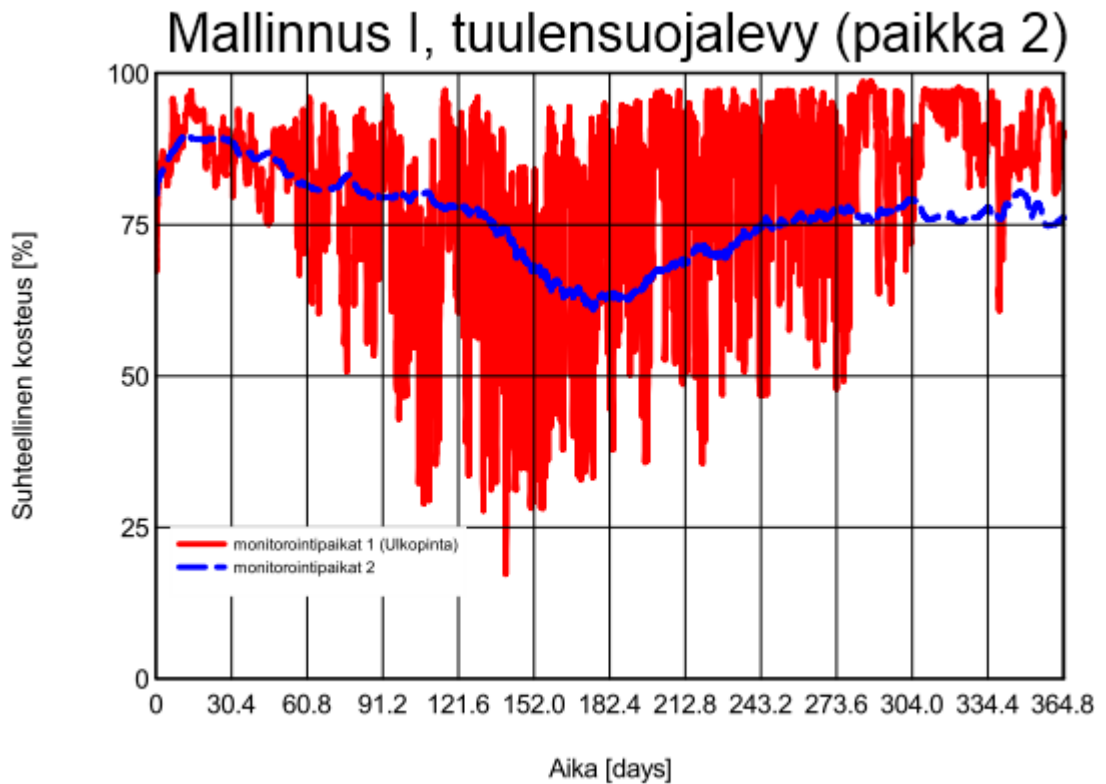
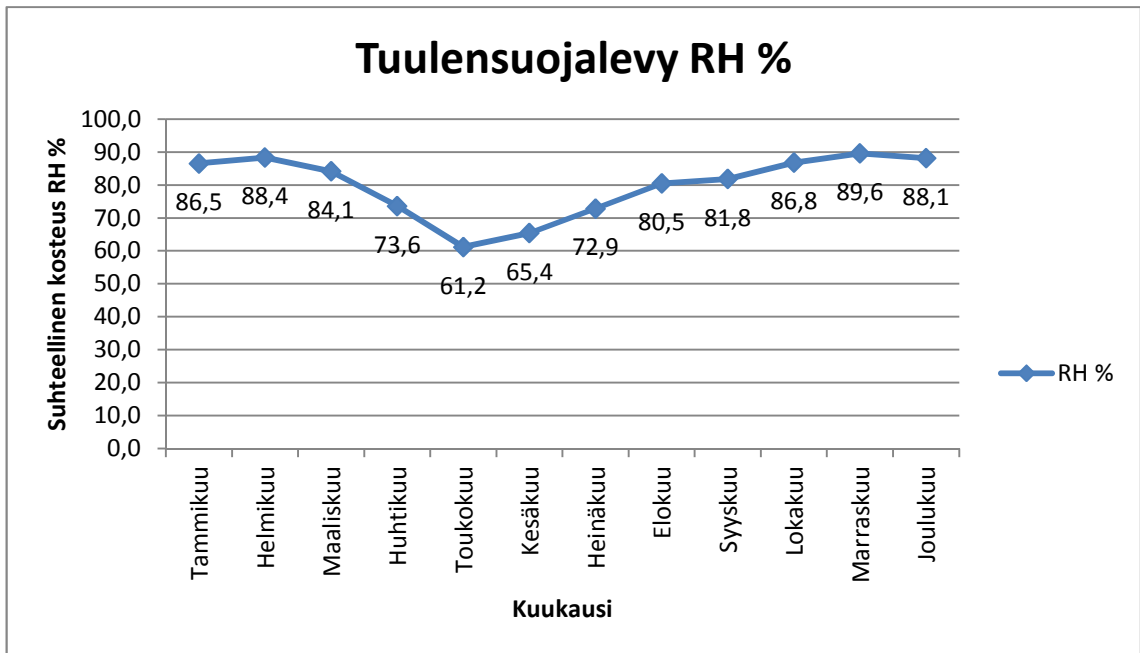
### Mallinnus I, höyrynsulkukalvo (paikka 6)



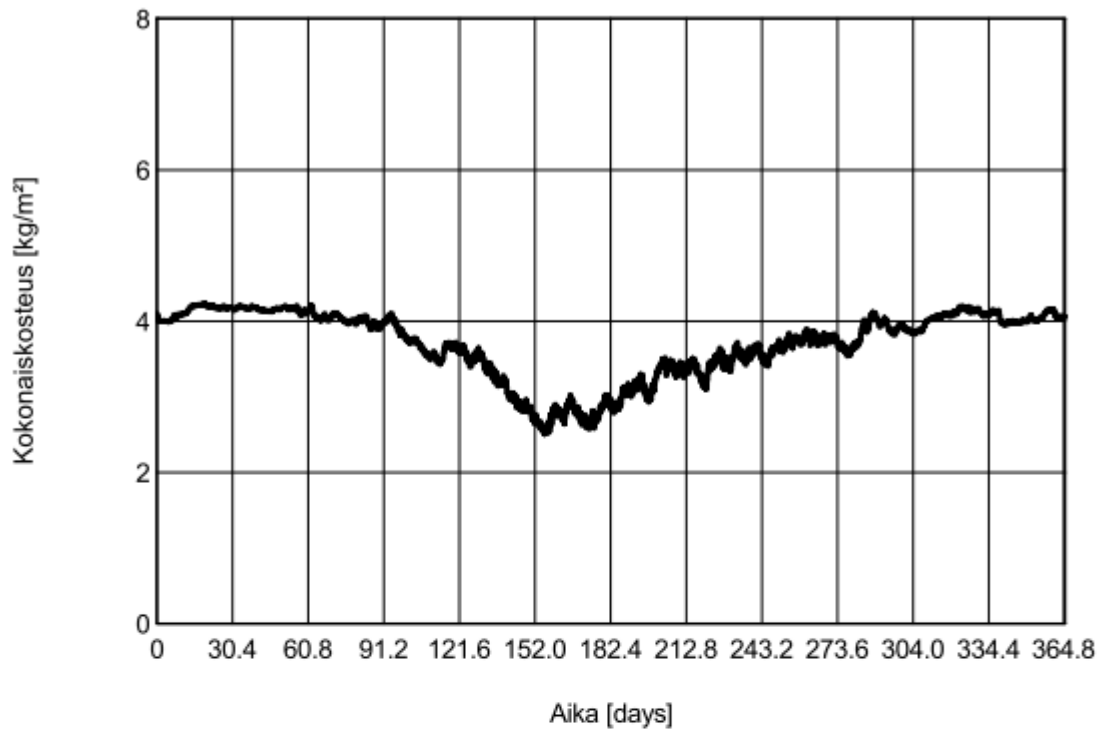


Mallinnus I, 300 mm min.villa (paikka 3)

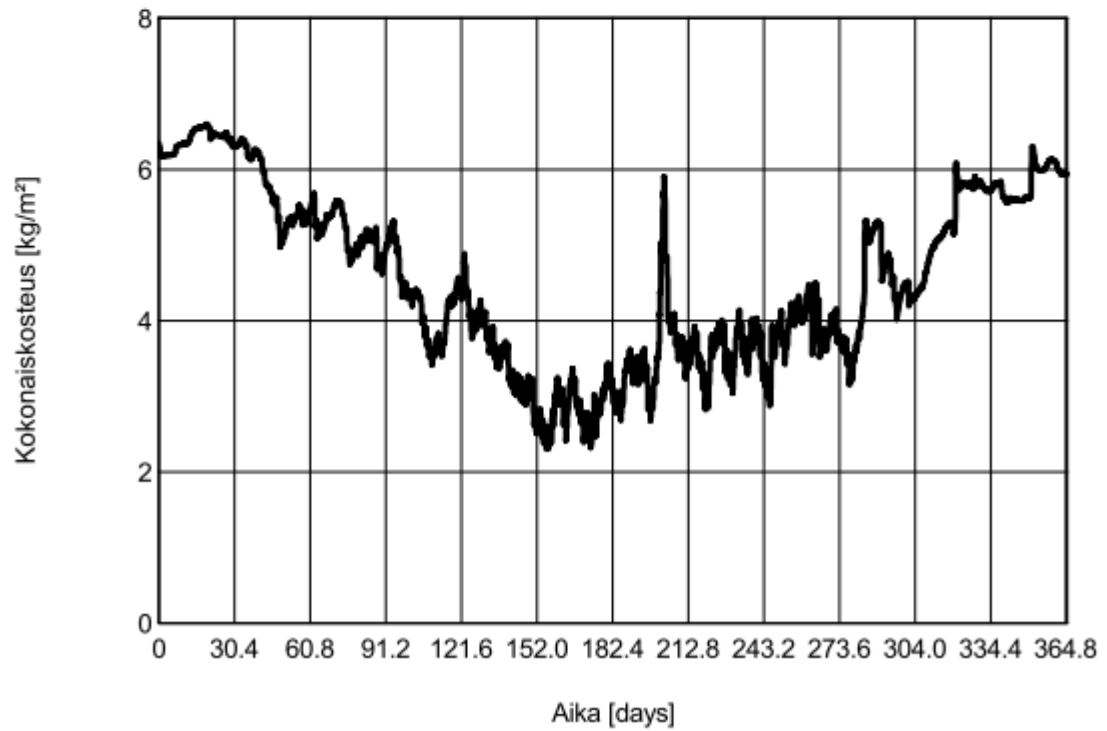


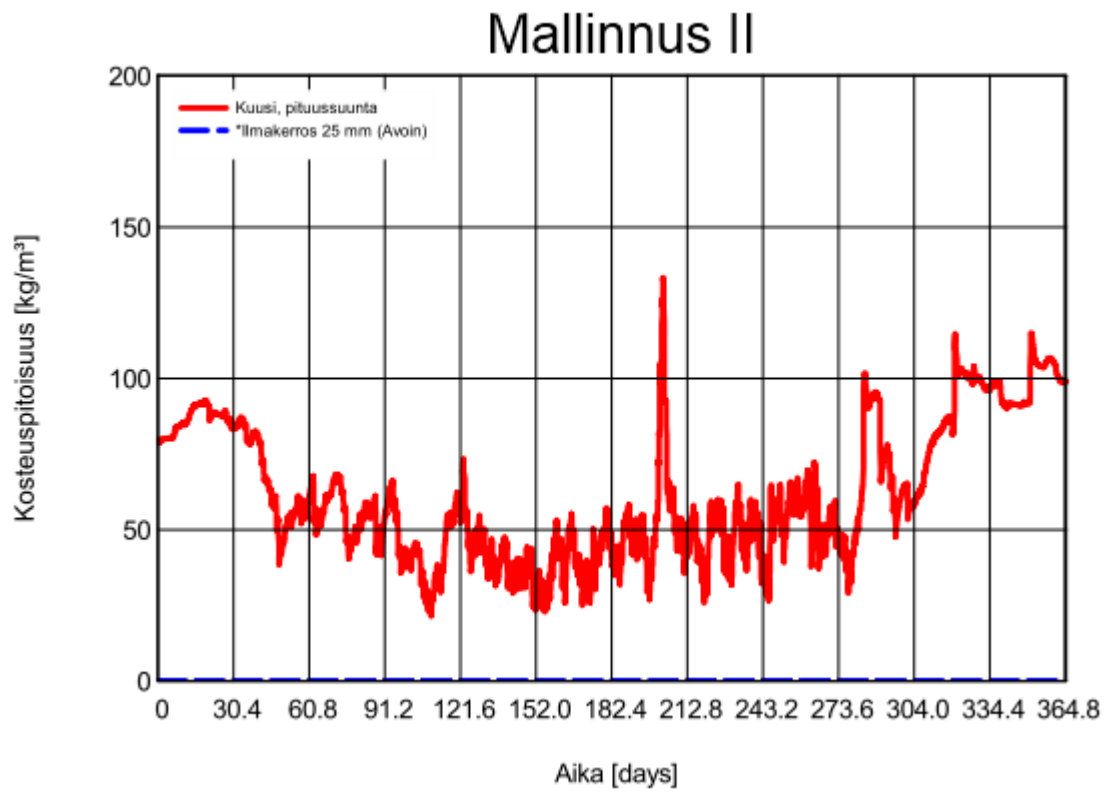


## Mallinnus I



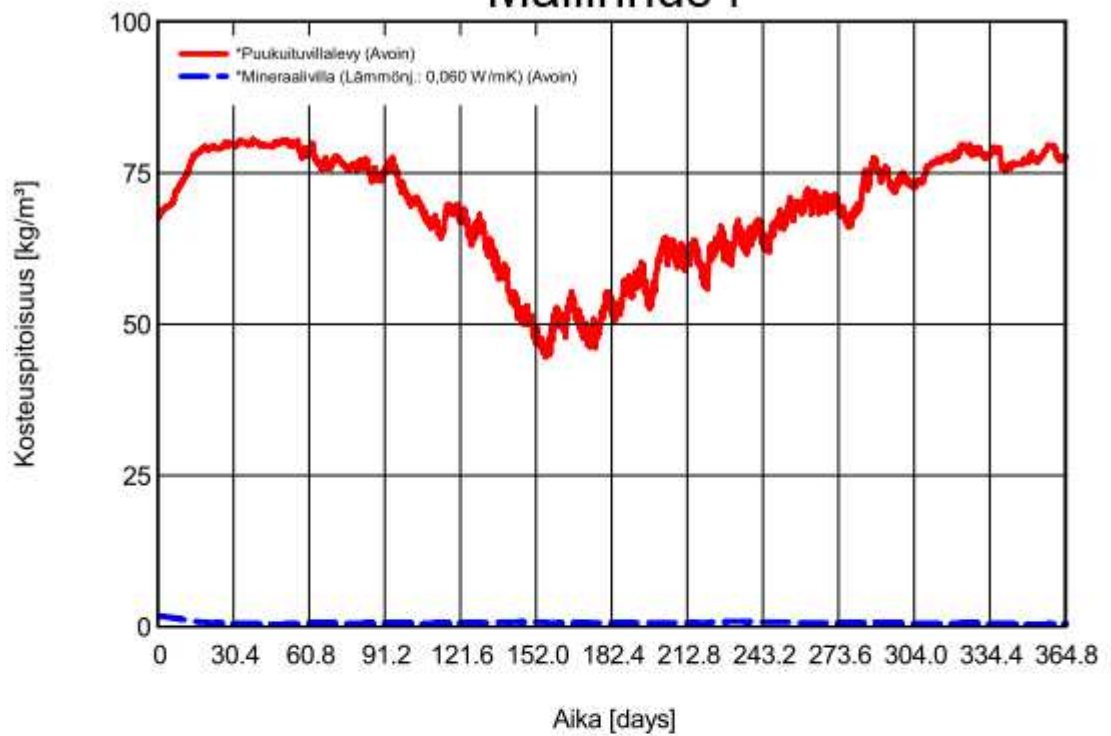
## Mallinnus II





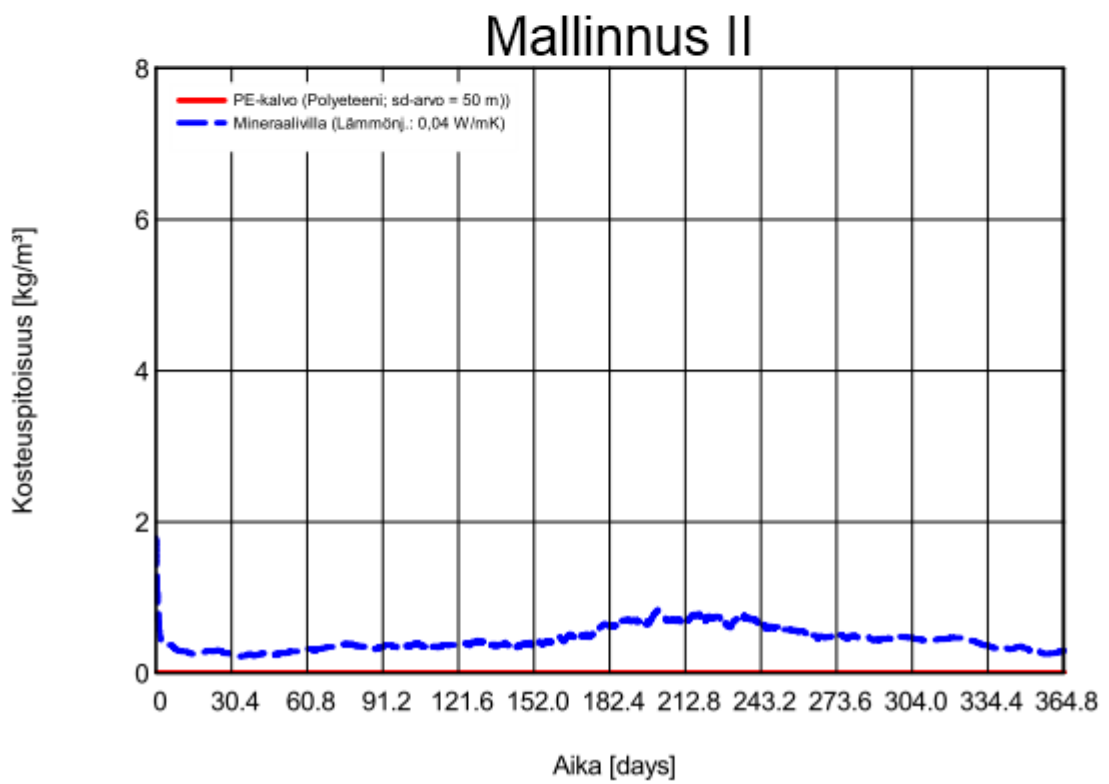
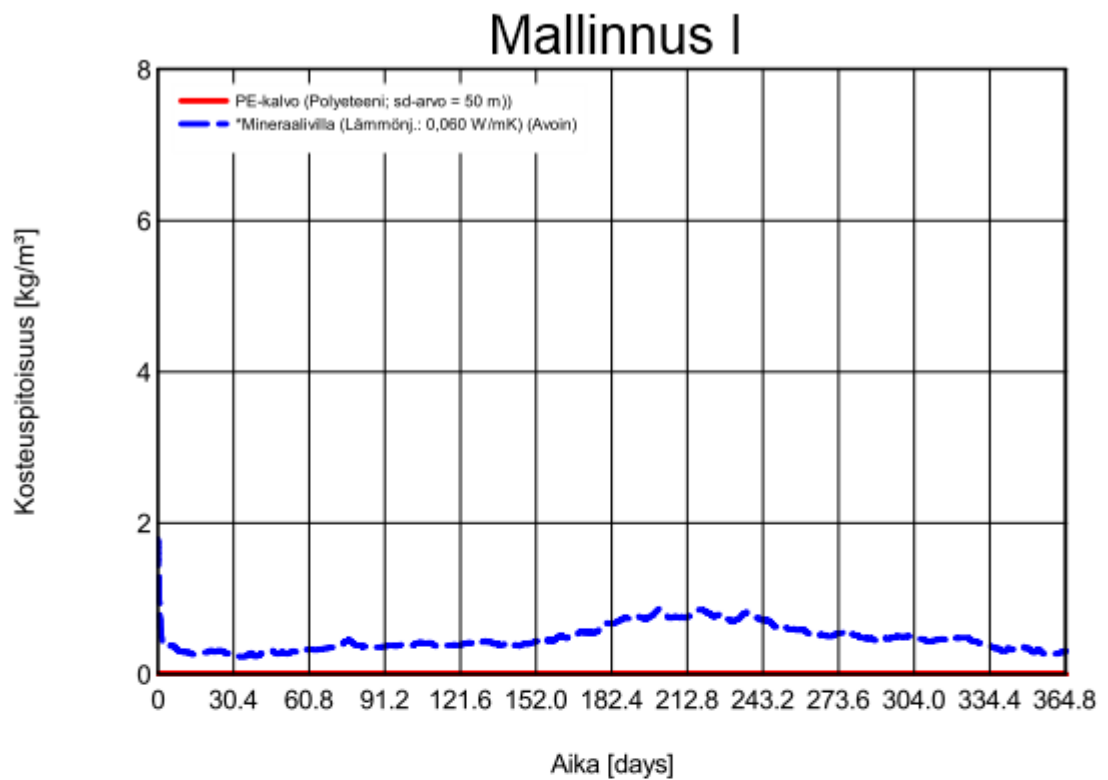


### Mallinnus I

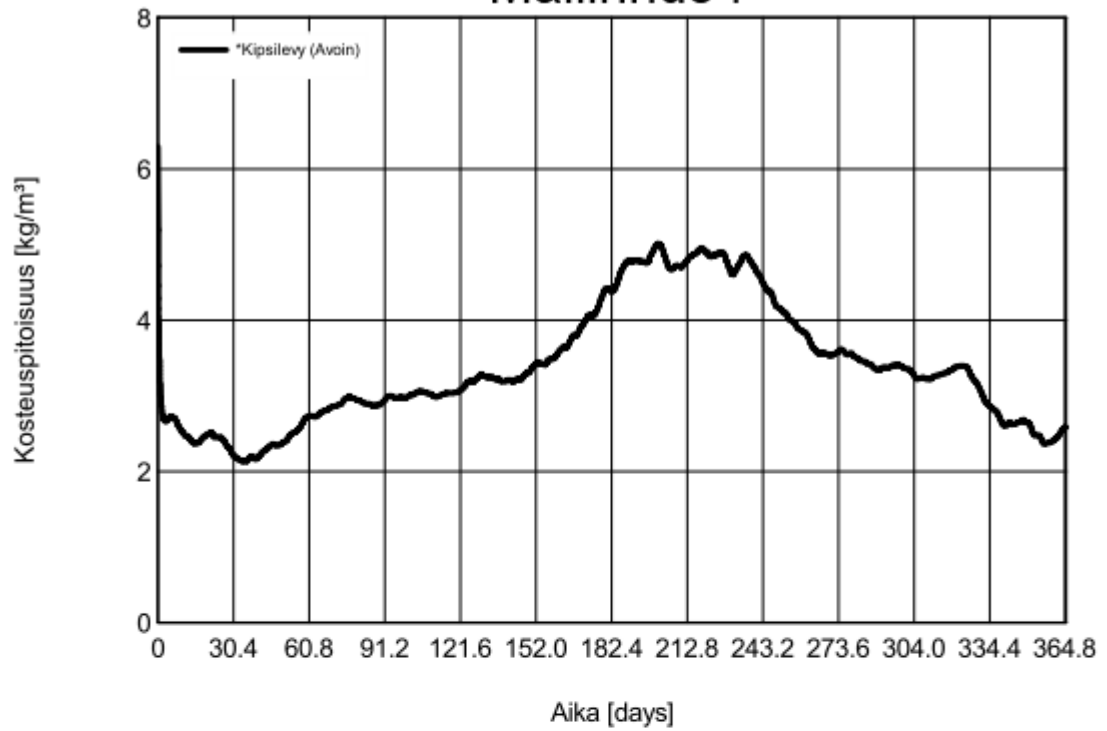


### Mallinnus II

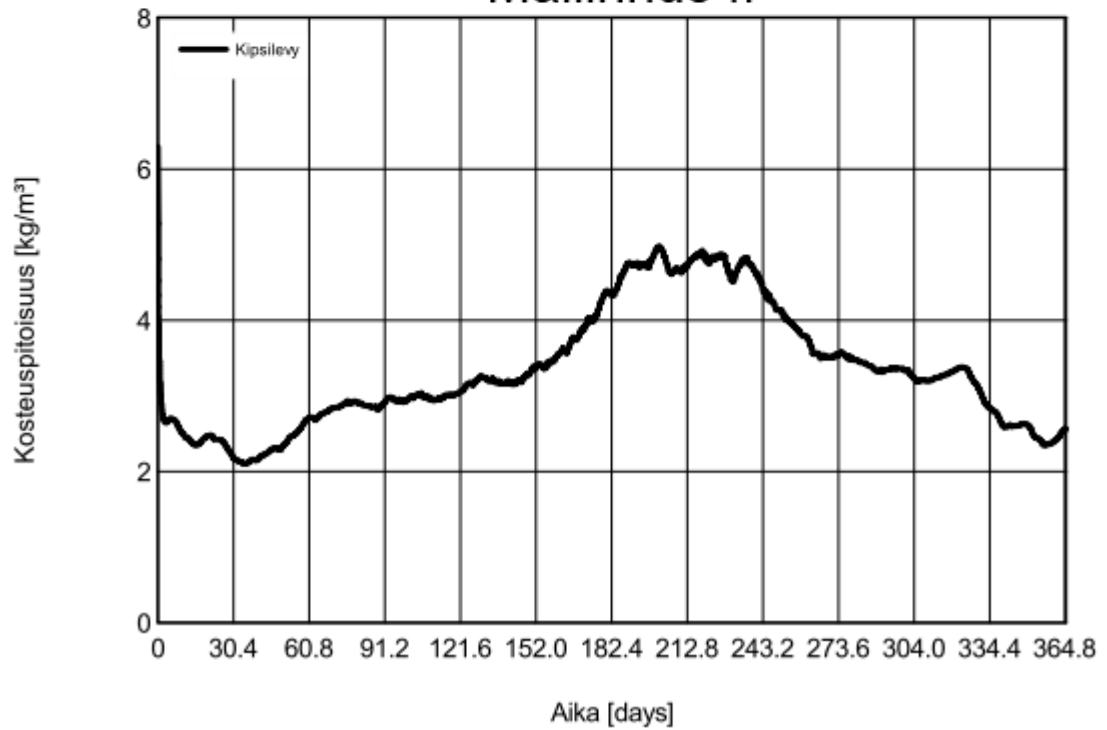


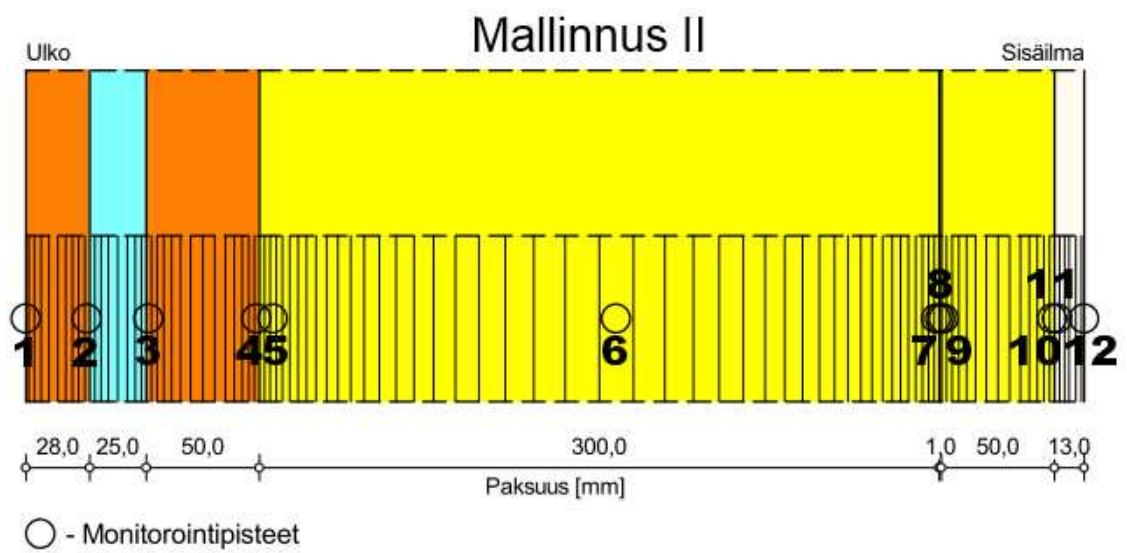
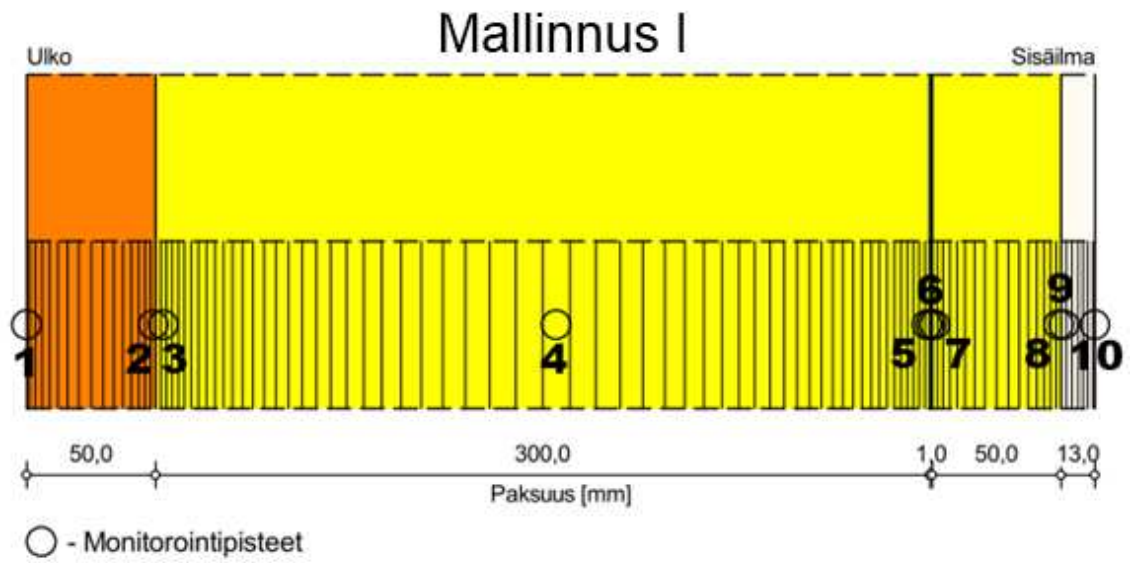


### Mallinnus I

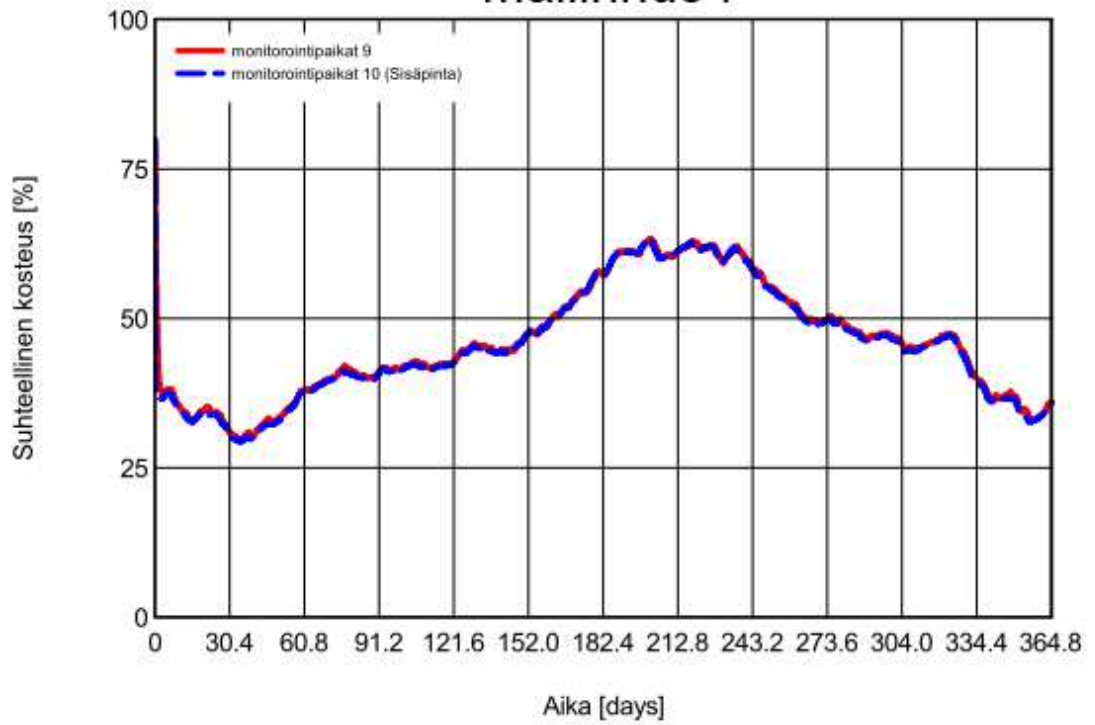


### Mallinnus II

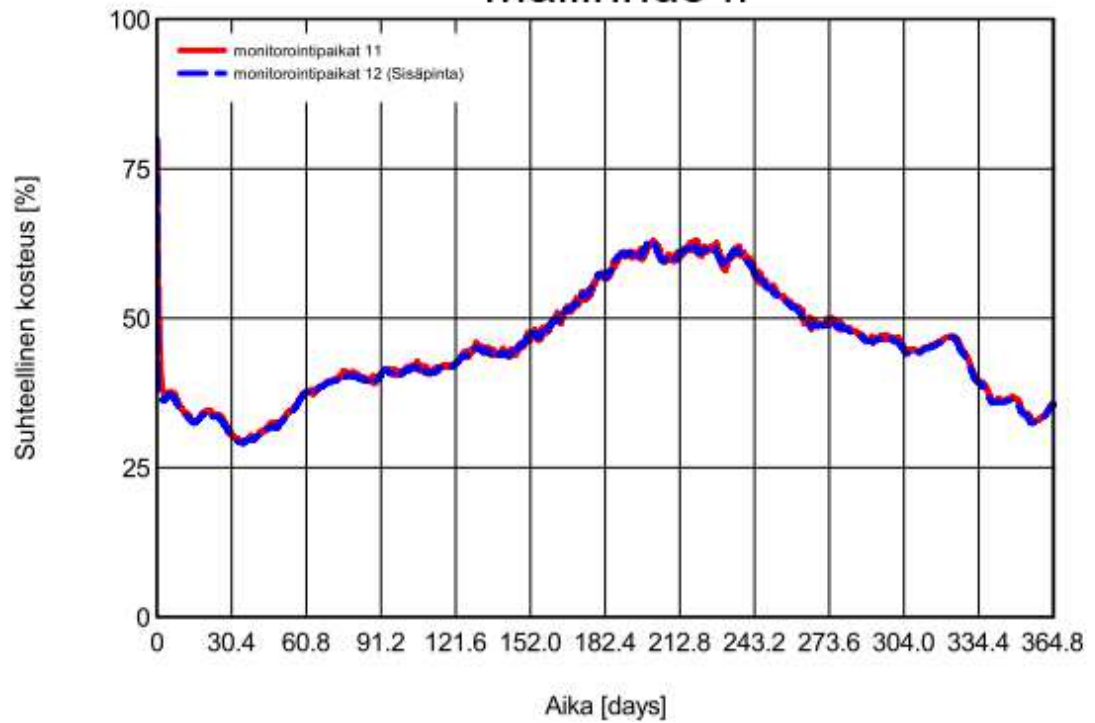




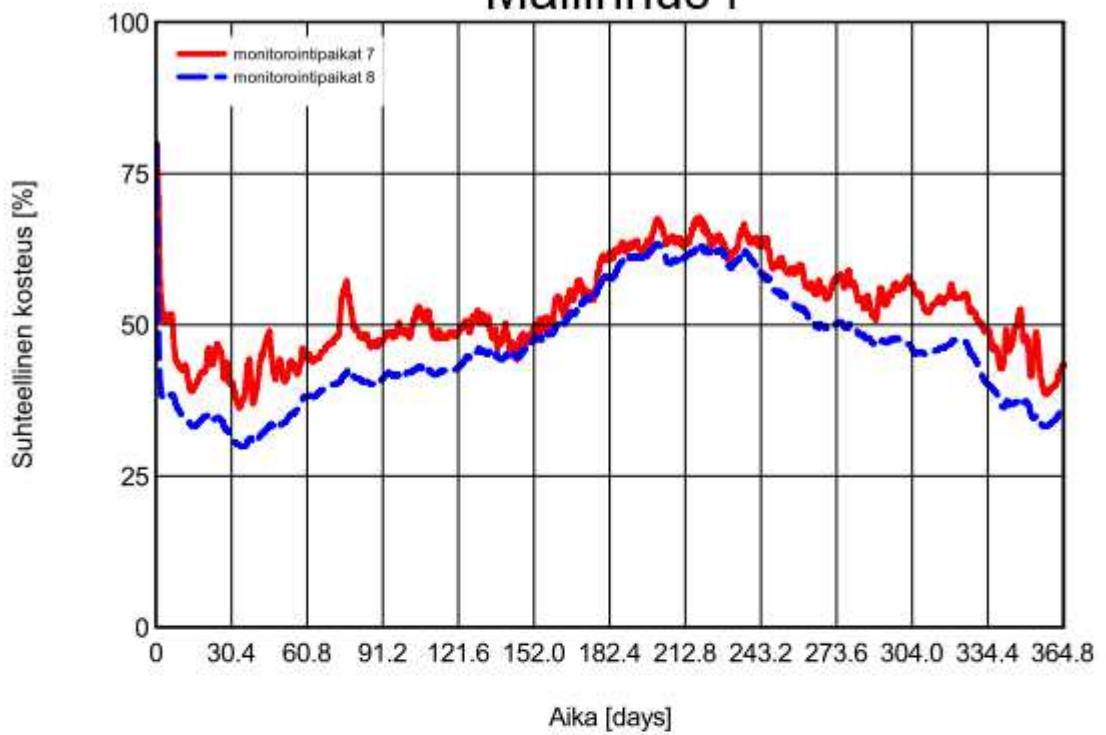
### Mallinnus I



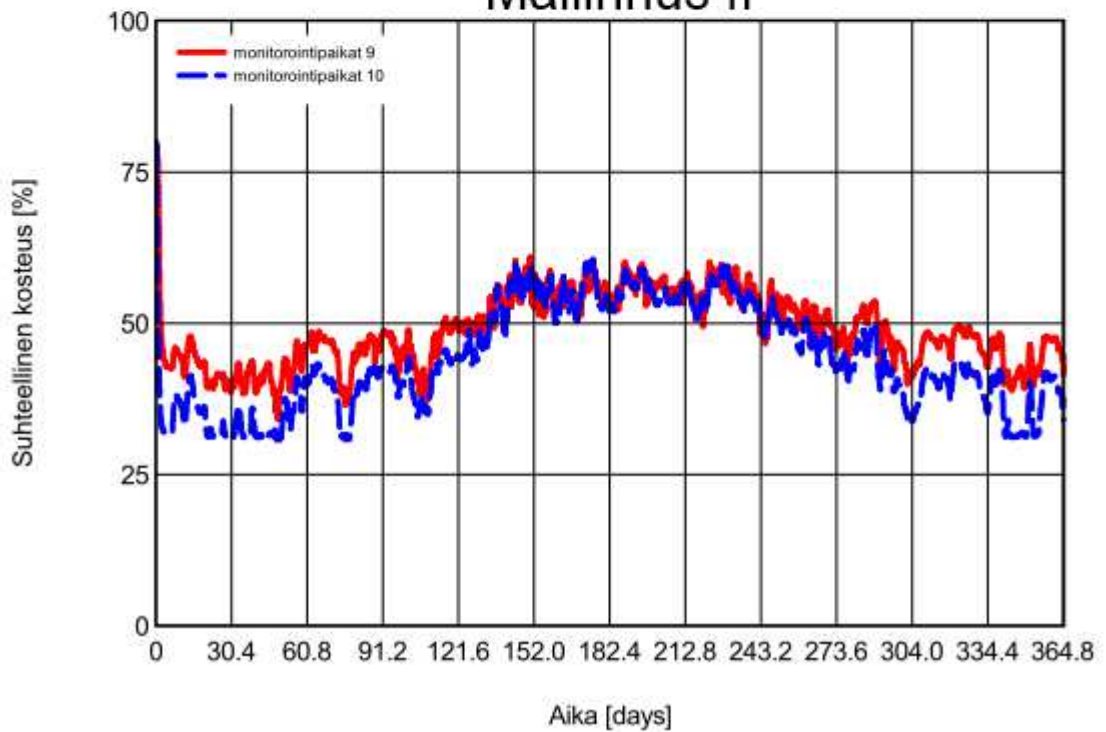
### Mallinnus II



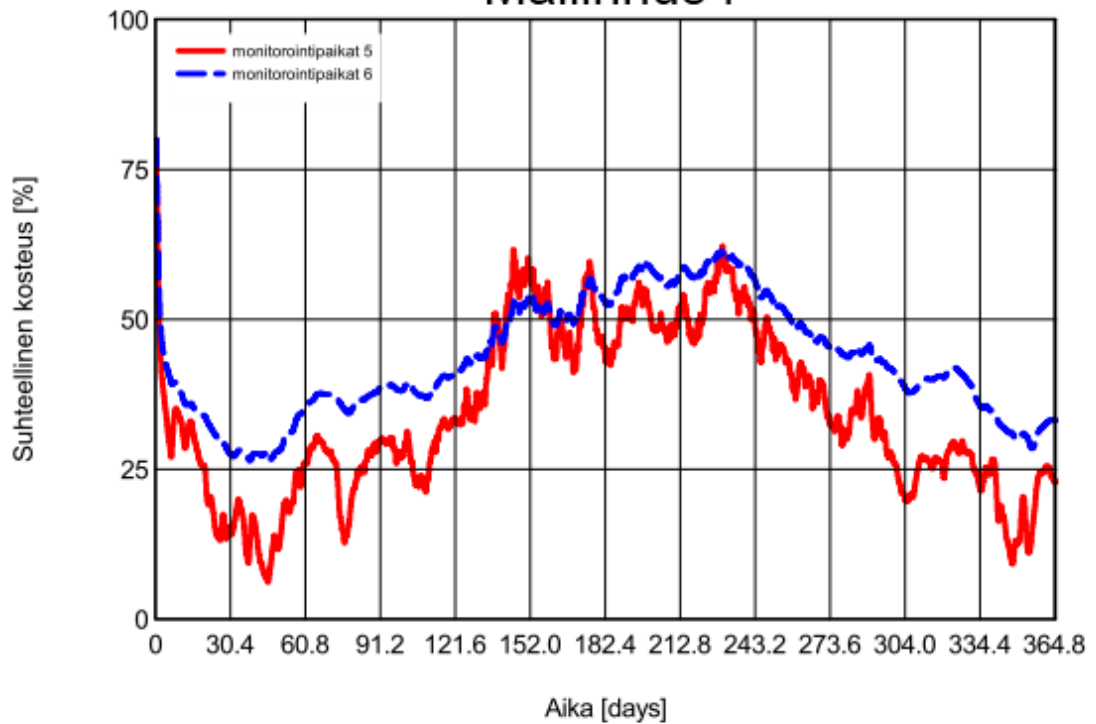
### Mallinnus I



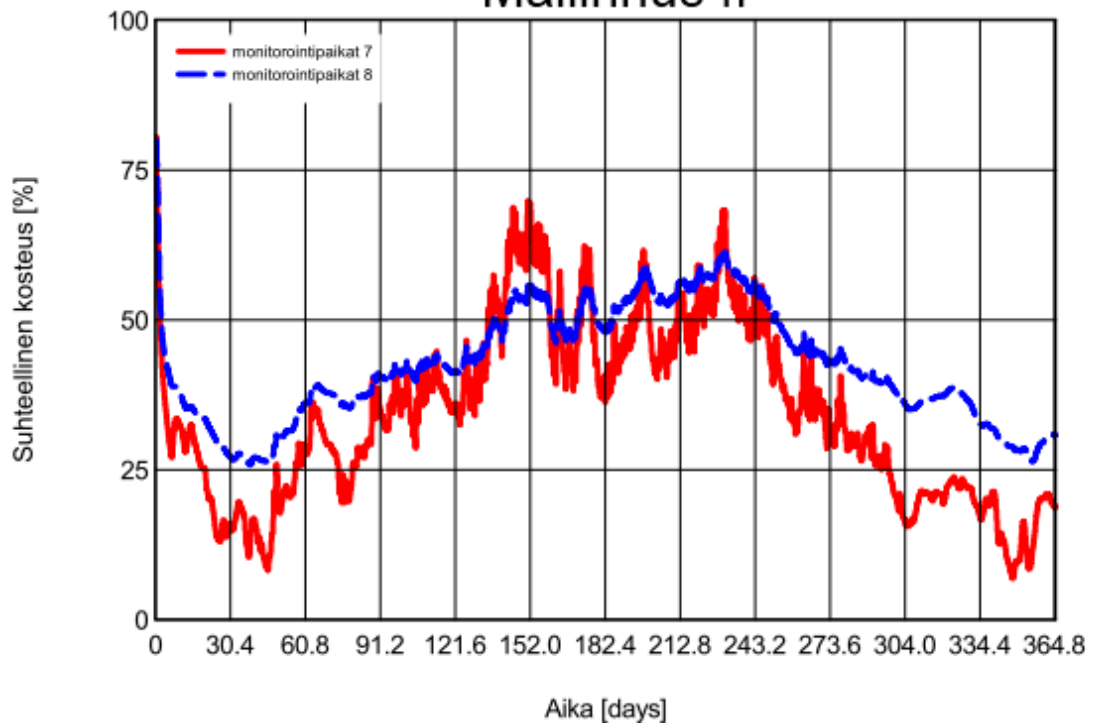
### Mallinnus II

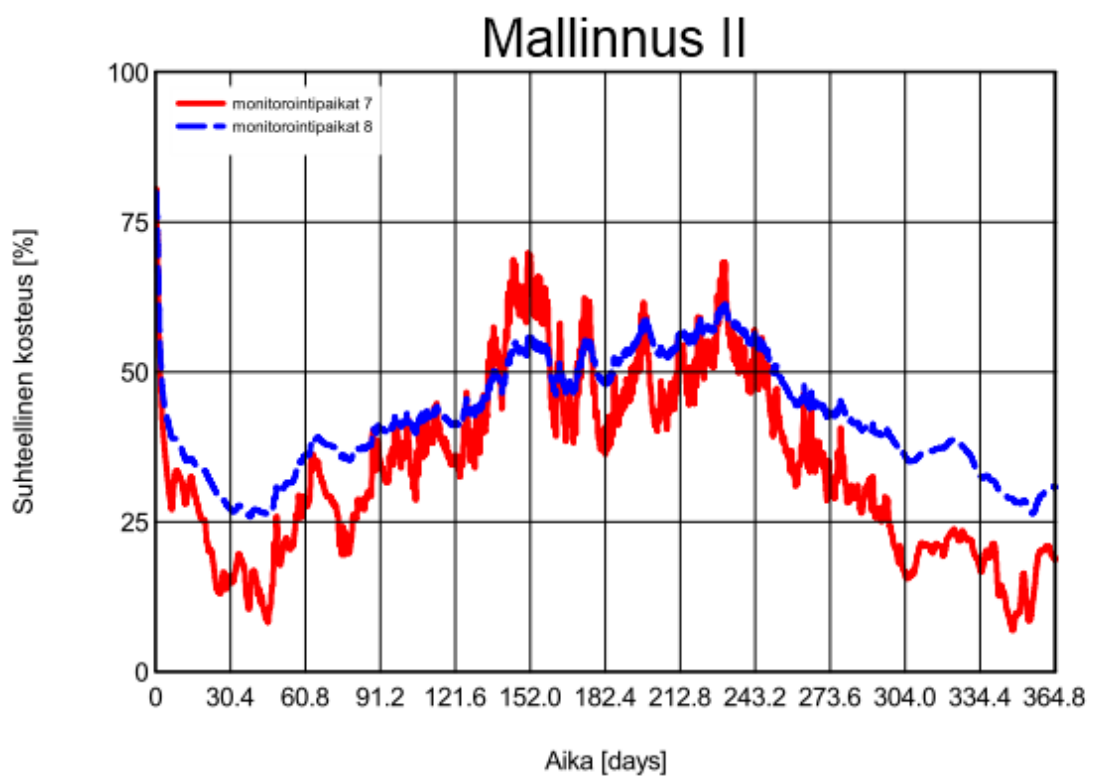
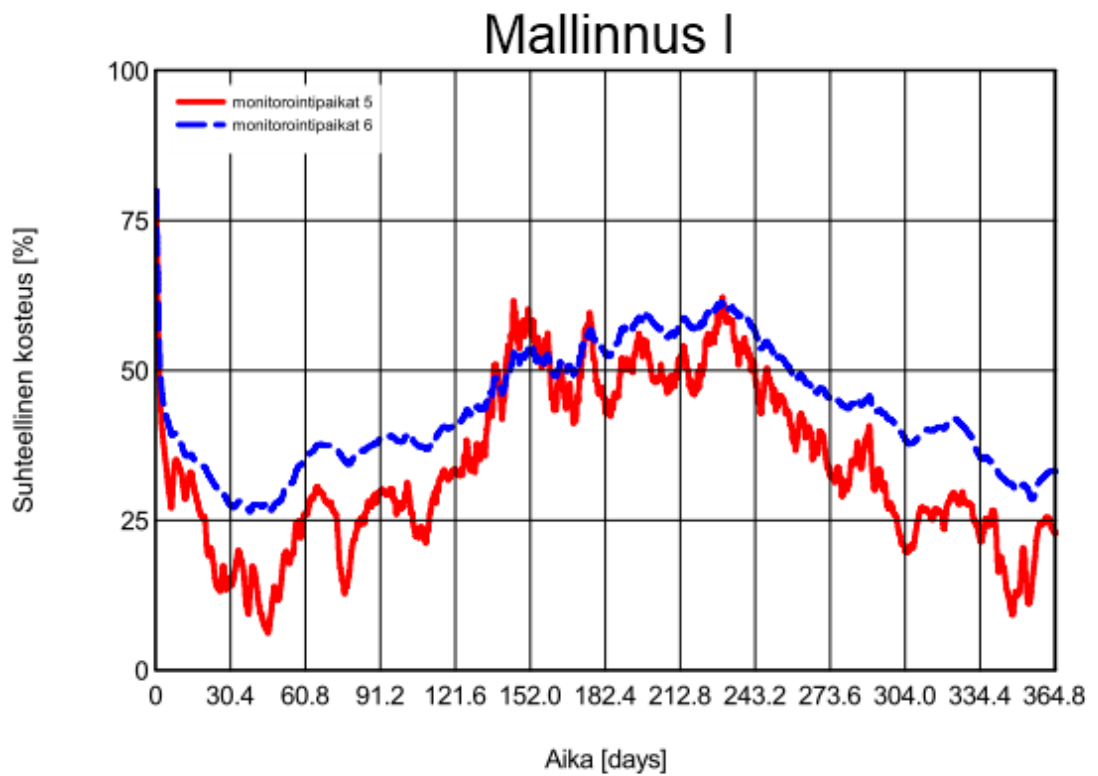


### Mallinnus I

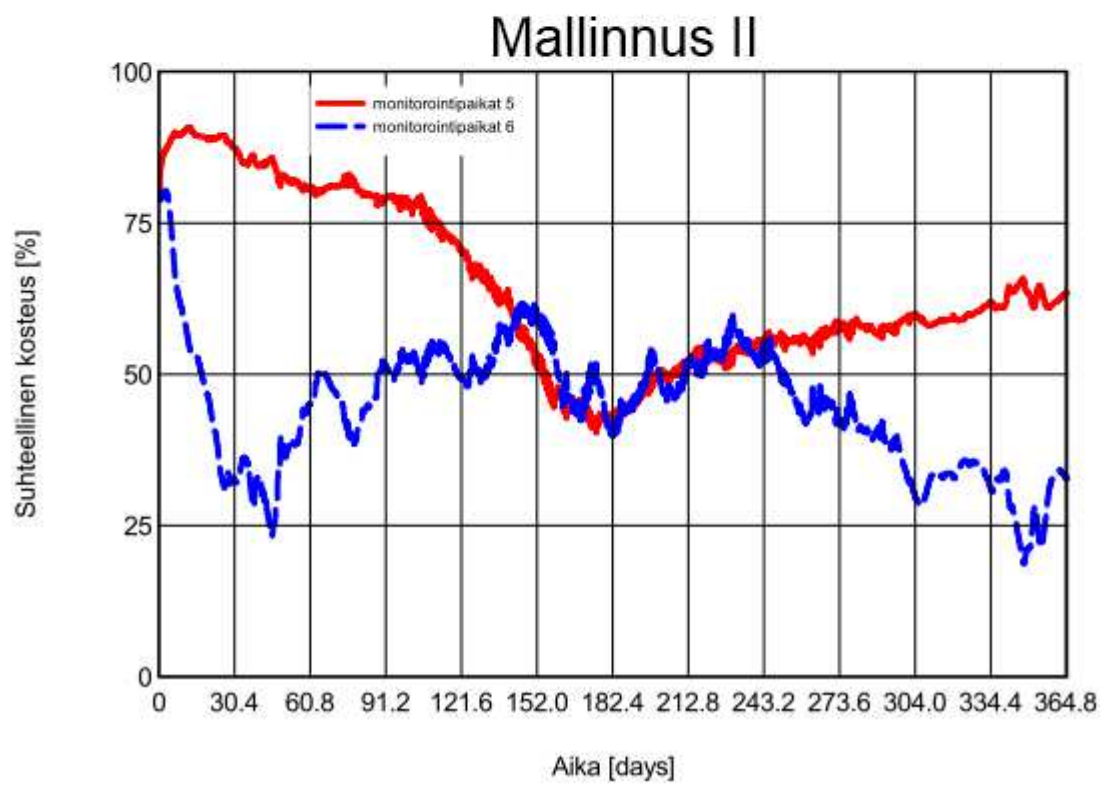
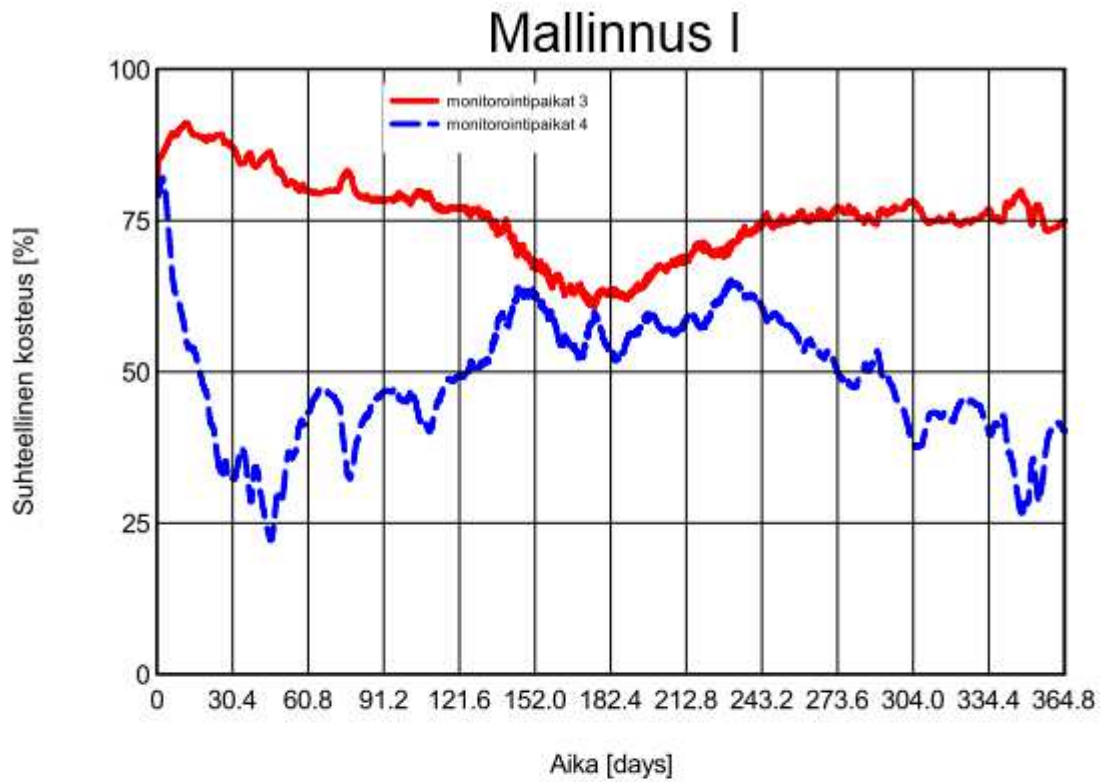


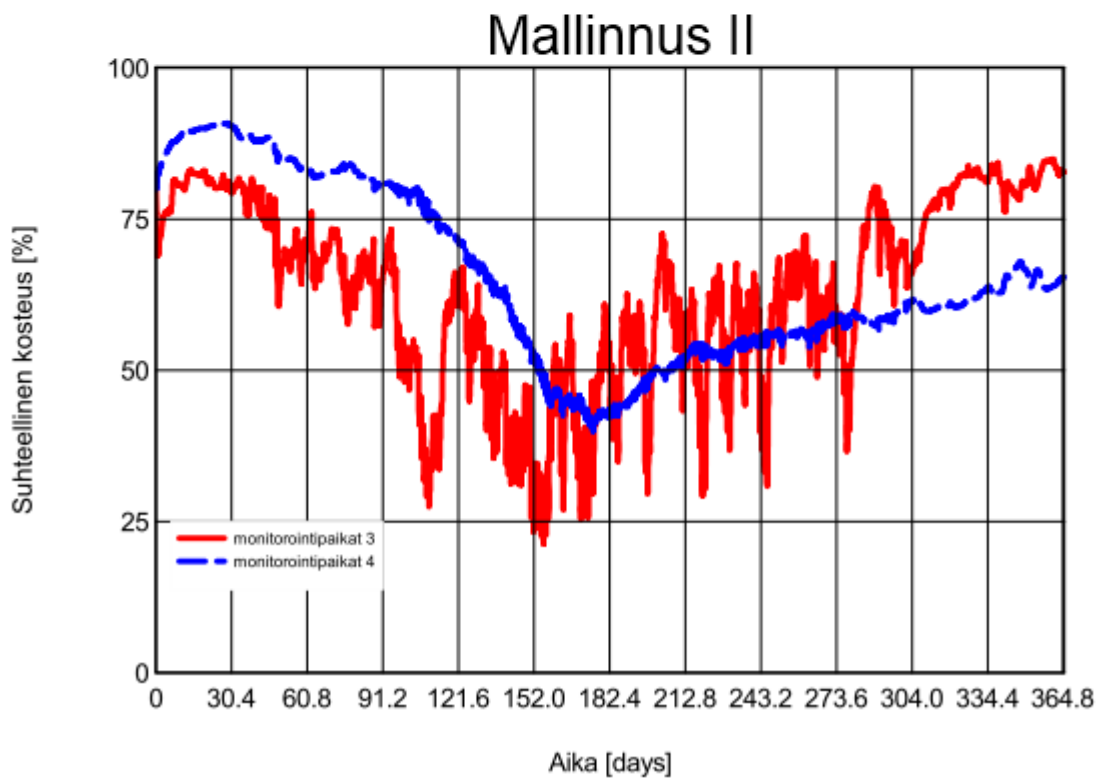
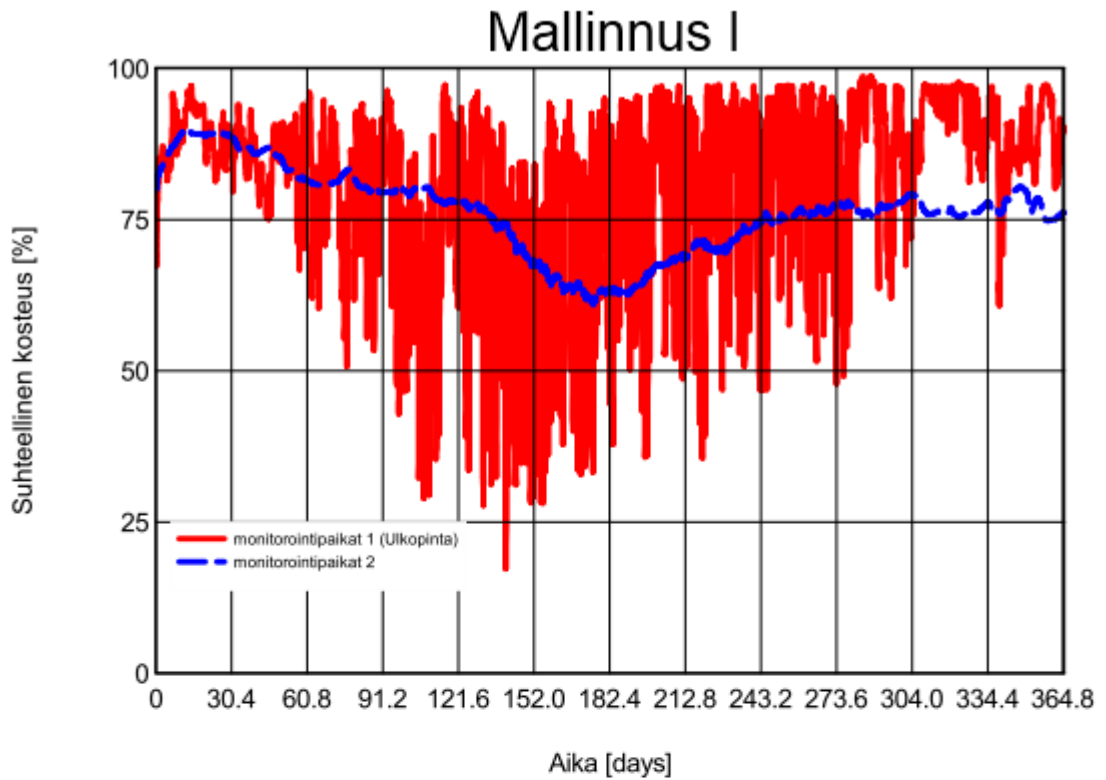
### Mallinnus II



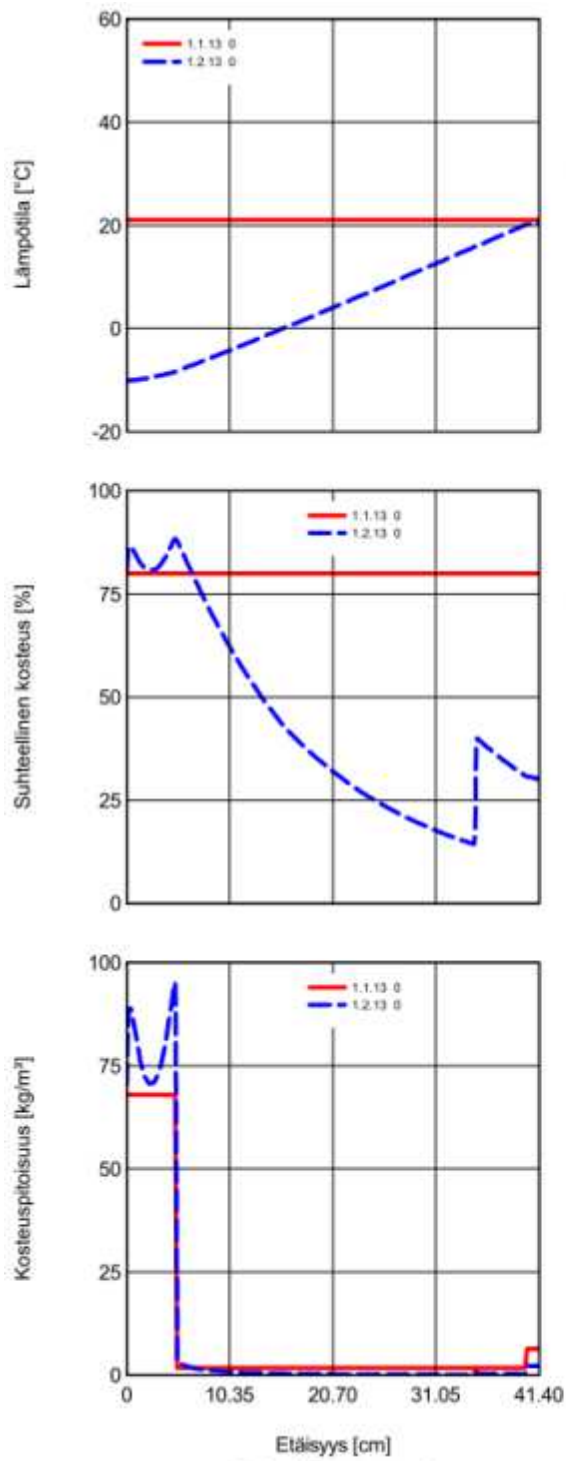




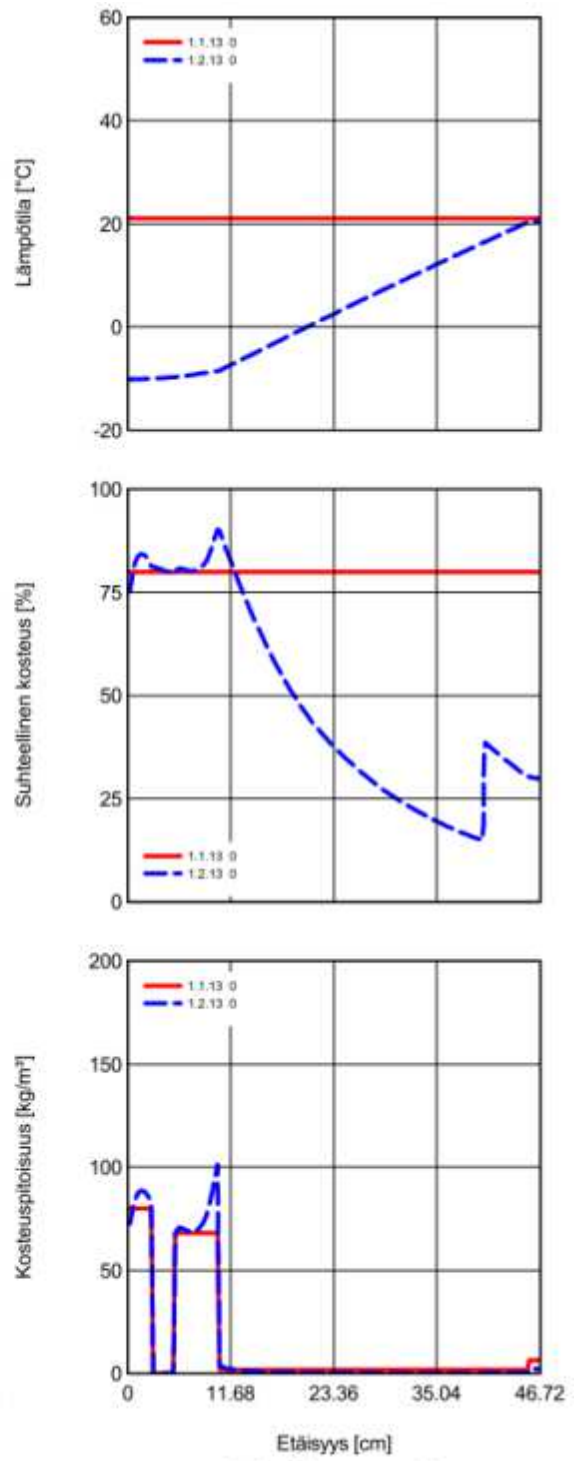




Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 1(7)

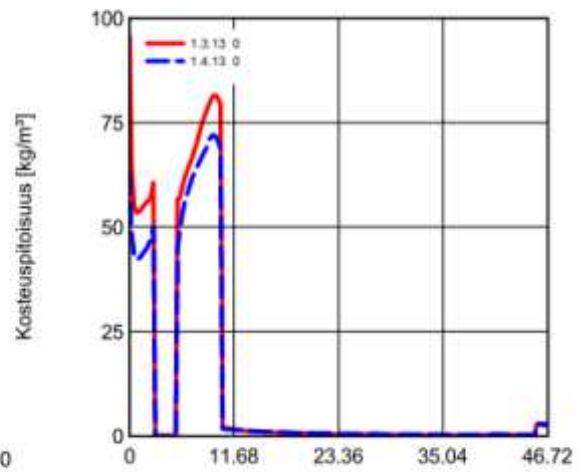
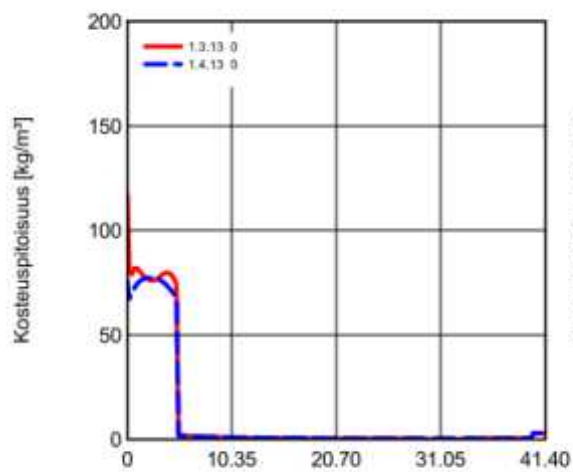
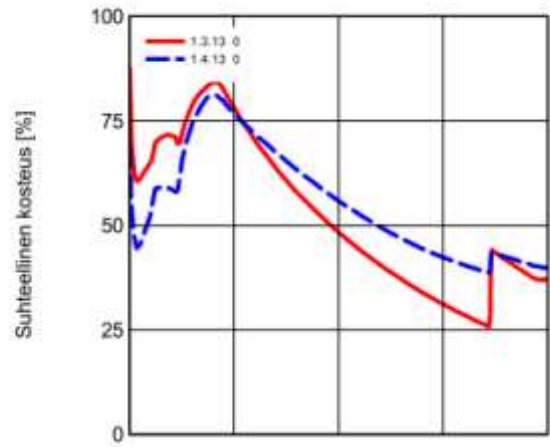
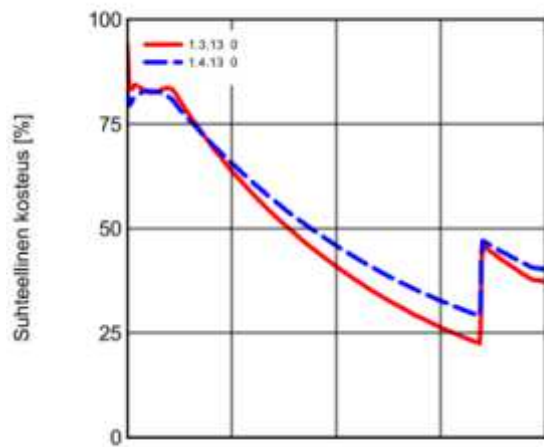
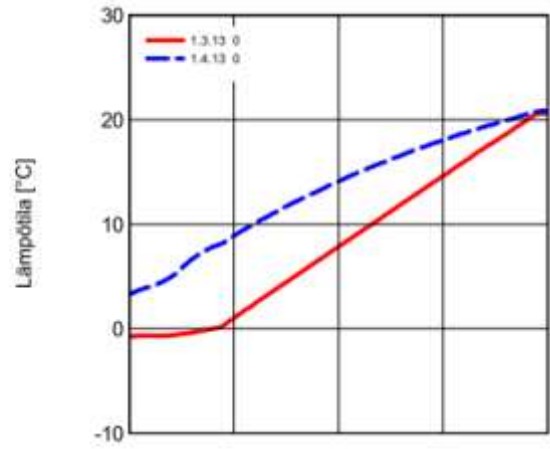
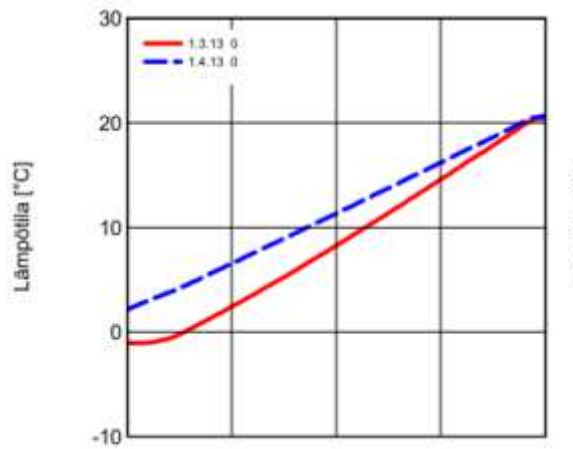


Mallinnus I



Mallinnus II

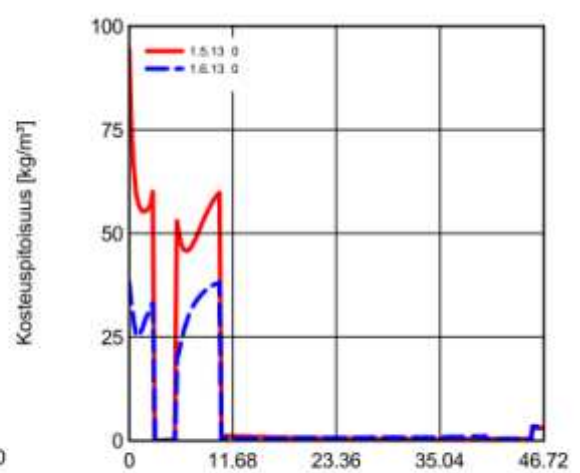
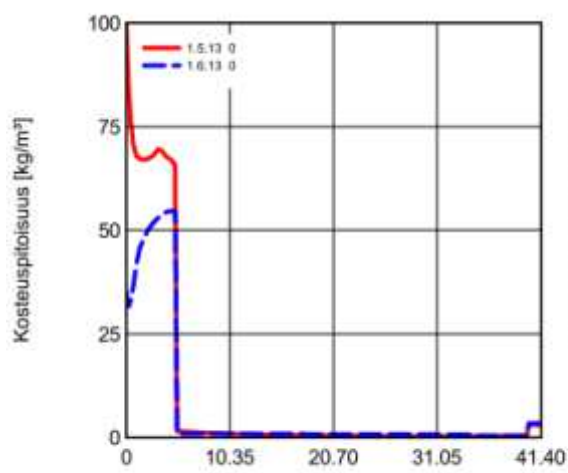
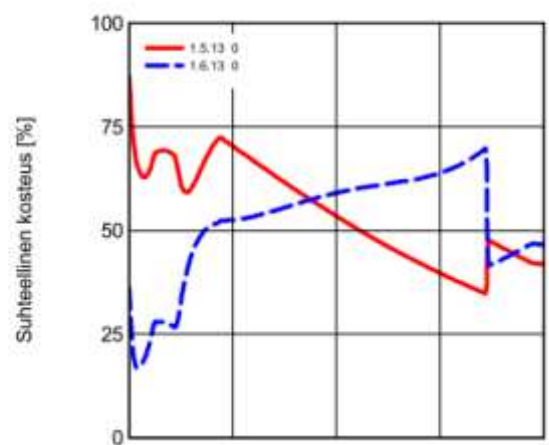
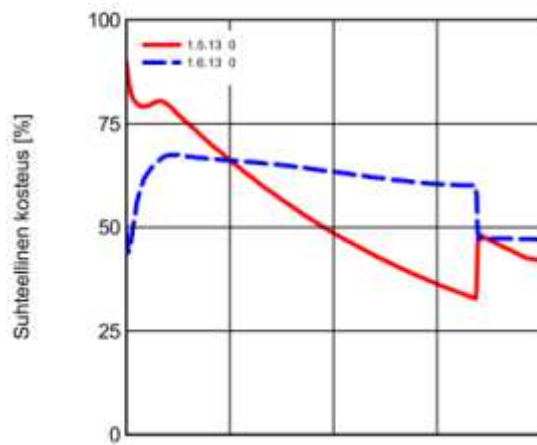
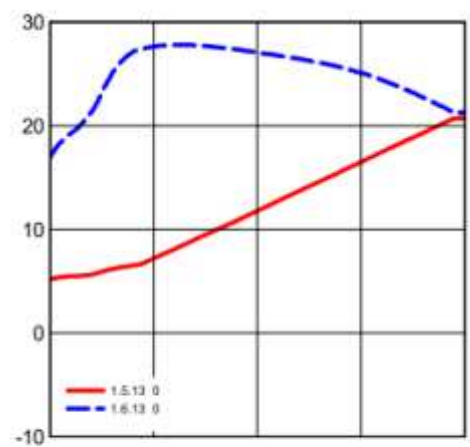
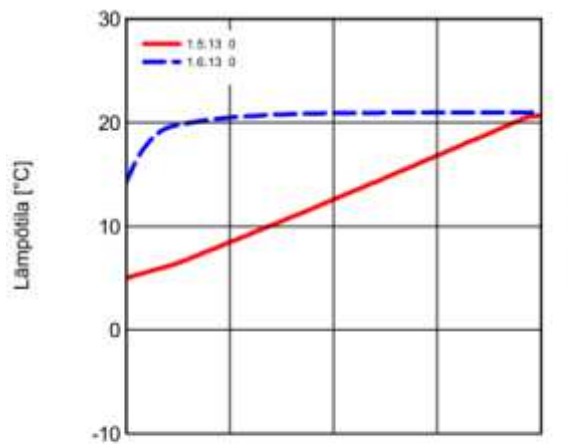
Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 2(7)



Mallinnus I

Mallinnus II

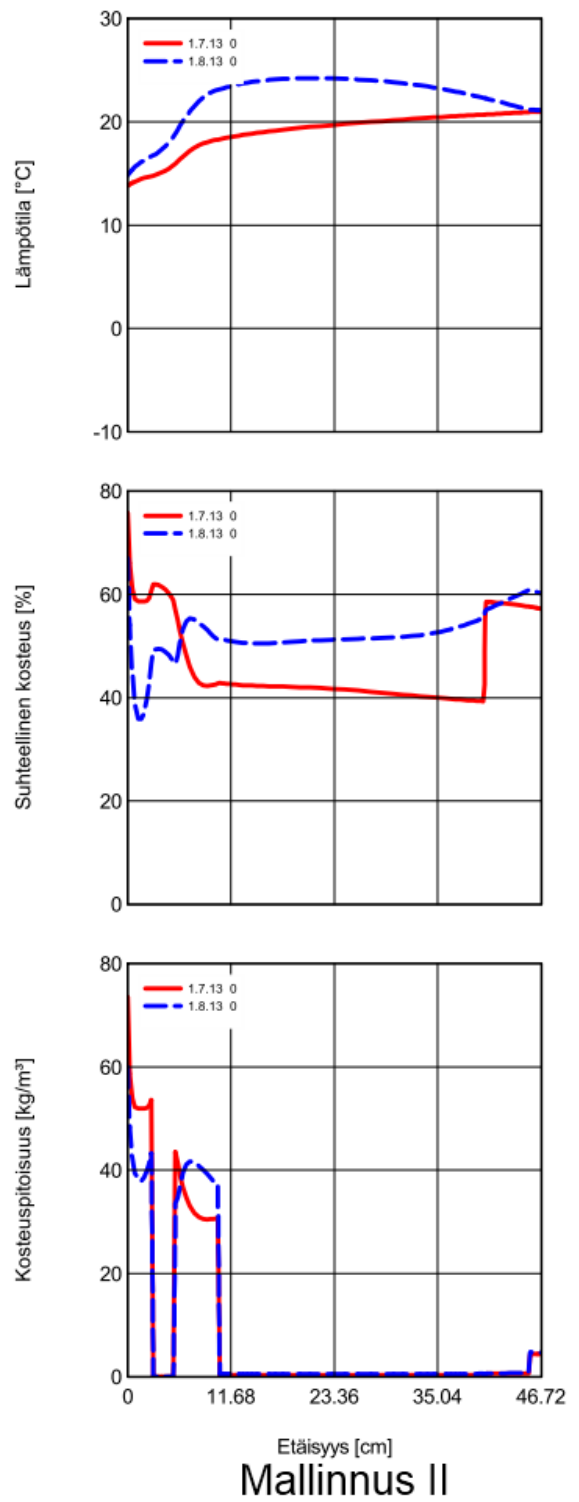
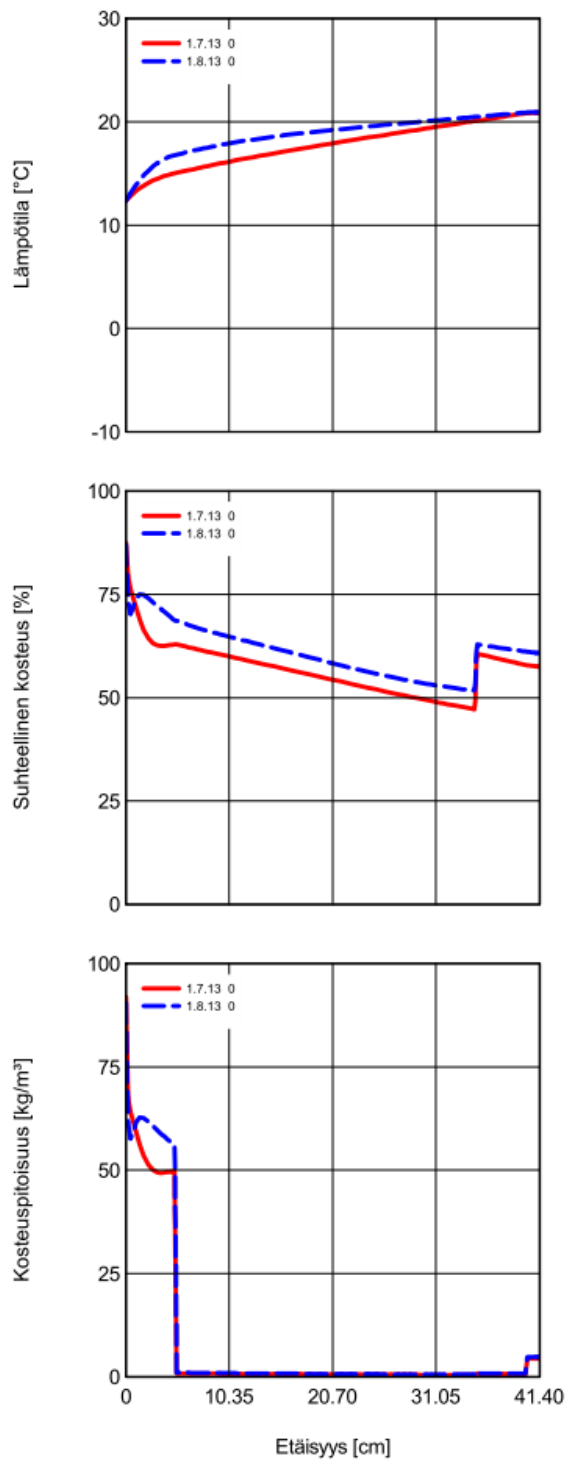
Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 3(7)



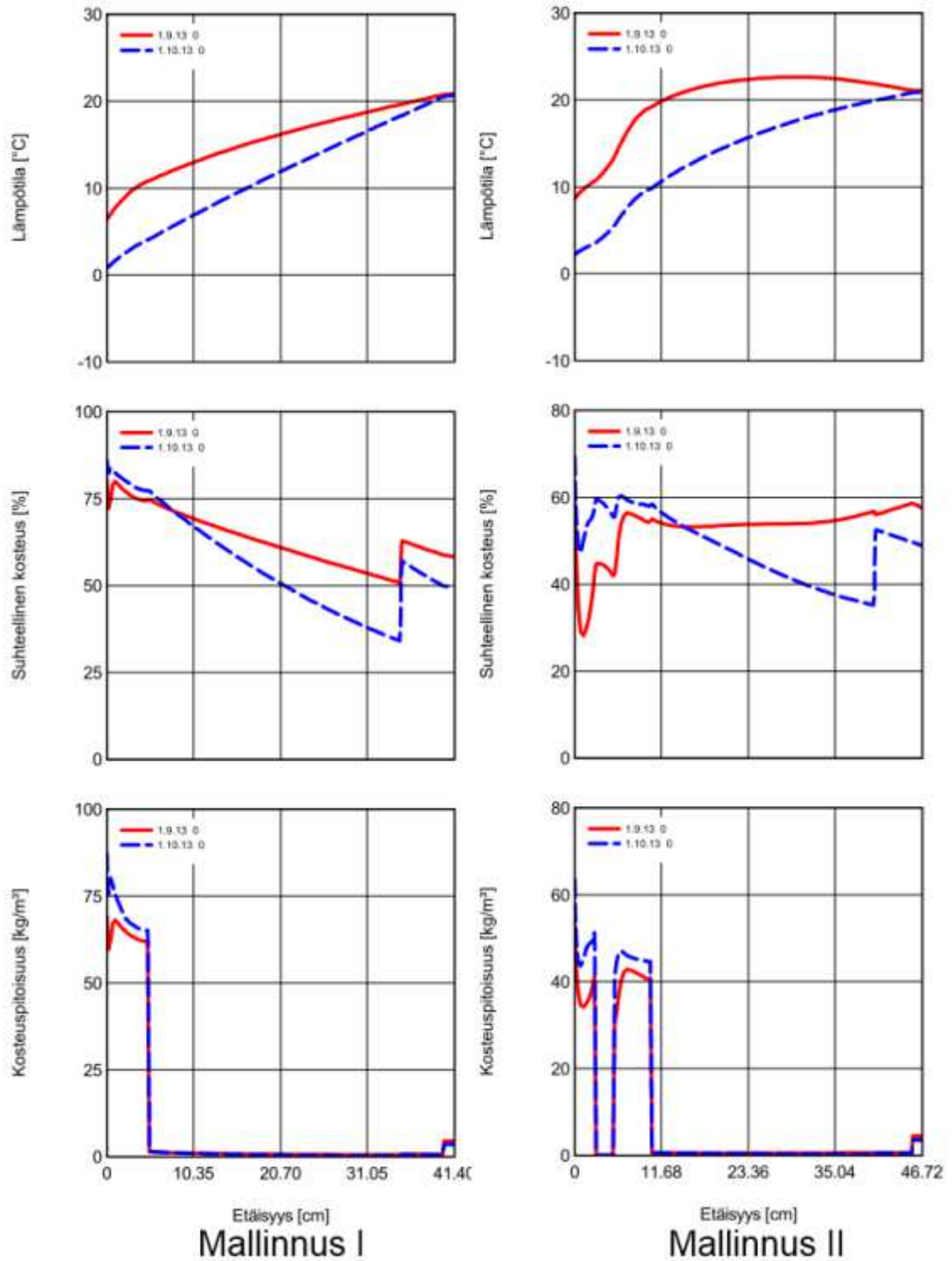
Etäisyys [cm]  
Mallinnus I

Etäisyys [cm]  
Mallinnus II

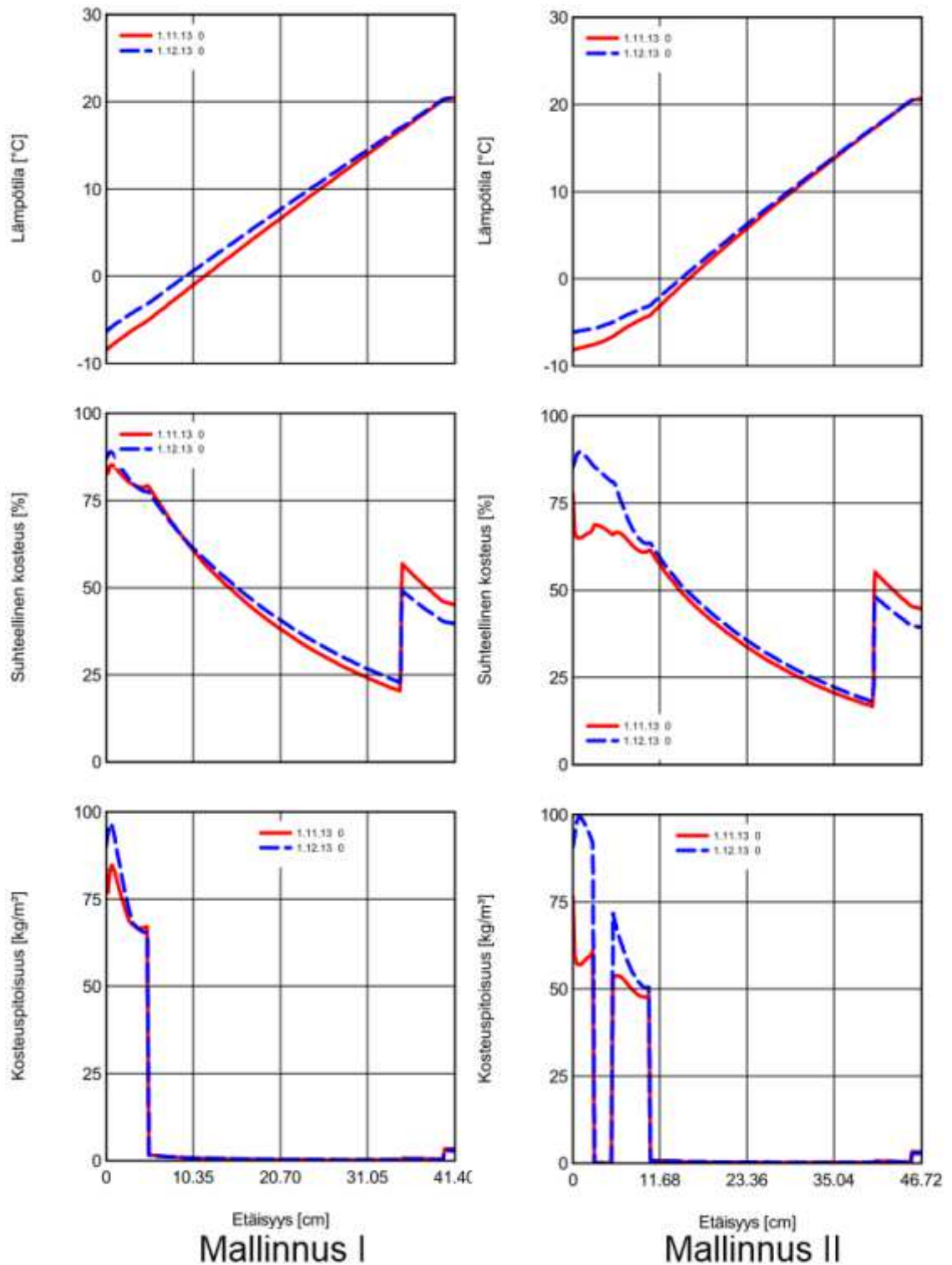
Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 4(7)



Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 5(7)

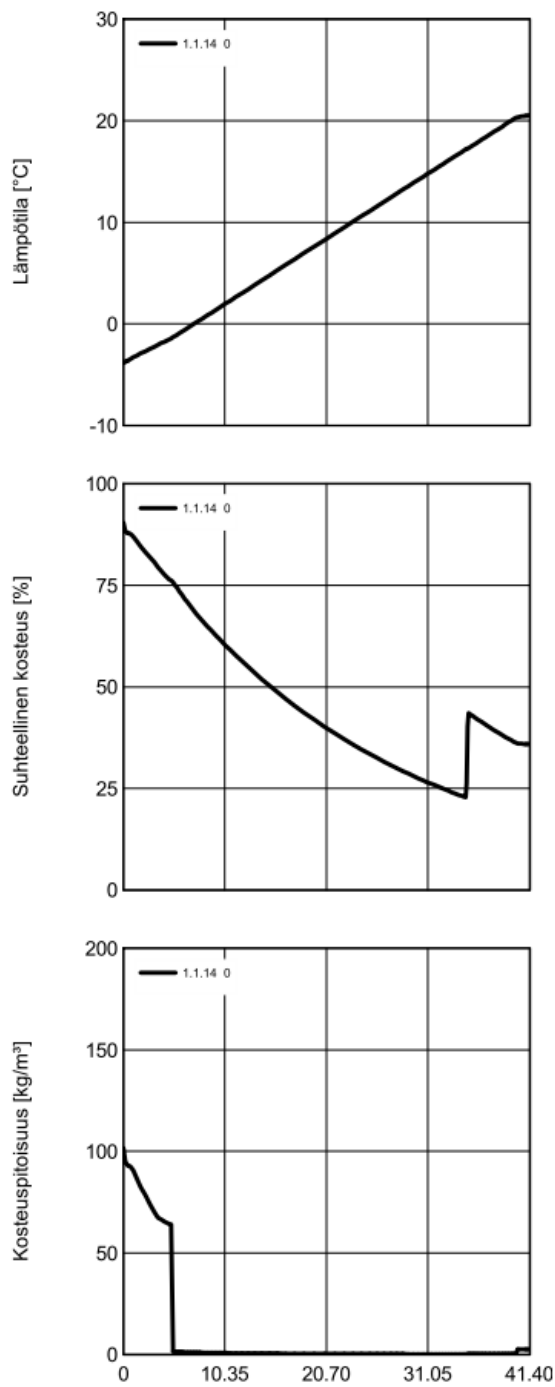


Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 6(7)

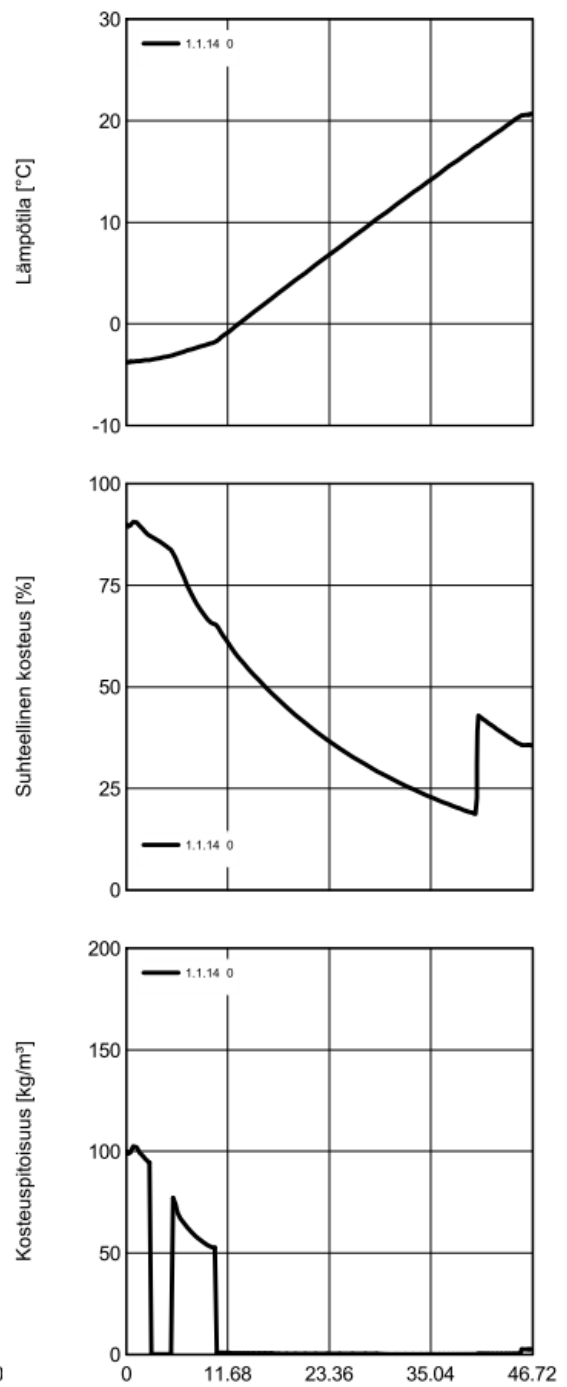




Liite 5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat rakenteen paksuuden suhteen 7(7)



Mallinnus I



Mallinnus II

JYVÄSKYLÄ TAMMIKUU		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	-8													
		RH <sub>e</sub> (%)	29	RH <sub>e</sub> (%)	88													
		p <sub>i</sub> (Pa)	720	p <sub>e</sub> (Pa)	280	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)				
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					720	29,0				
Rsi			0,13	0,019	0,542	20,458	17,749	2403,2					720,4609	30,0				
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,247	20,211	17,497	2367,1		5,00E+08	9,66E-04	0,42552	720,0353	30,4				
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	3,453	16,759	14,285	1909,8	2,60E-11	2,31E+09	0,00447	1,96796	718,0674	37,6				
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,083	16,675	14,214	1899,8	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	425,521	292,5465	15,4				
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	20,716	-4,040	3,593	445,8	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,8078	280,7387	63,0				
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	3,793	-7,833	2,646	323,8	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,60789	280,1308	86,5				
Rse			0,04	0,006	0,167	-8,000	2,609	319,1					280,1308	87,8				
Ulkoilma						-8,000	2,609	319,1					280,1308	87,8				
Yhteensä			6,951	1	29,000					5,17E+11	1	440,33						

JYVÄSKYLÄ HELMIKUU		t <sub>i</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	-7,1															
		RH <sub>i</sub> (%)	30	RH <sub>e</sub> (%)	90															
		p <sub>i</sub> (Pa)	745	p <sub>e</sub> (Pa)	309	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)						
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					745,3043	30,0						
Rsi			0,13	0,019	0,526	20,474	17,766	2405,7					745,3043	31,0						
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,239	20,236	17,522	2370,7	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,42139	744,8829	31,4						
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	3,345	16,890	14,397	1925,6	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,94884	742,9341	38,6						
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,081	16,809	14,328	1915,9	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	421,386	321,5485	16,8						
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	20,073	-3,263	3,813	474,6	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,693	309,8555	65,3						
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	3,675	-6,938	2,851	350,0	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,60198	309,2535	88,4						
Rse			0,04	0,006	0,162	-7,100	2,813	345,1					309,2535	89,6						
Ulkoilma						-7,100	2,813	345,1					309,2535	89,6						
Yhteensä			6,951	1	28,100					5,17E+11	1	436,051								

JYVÄSKYLÄ MAALISKUU		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	-3,5										
		RH <sub>e</sub> (%)	34	RH <sub>e</sub> (%)	85										
		p <sub>e</sub> (Pa)	845	p <sub>e</sub> (Pa)	396										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					844,6782	34,0	
R <sub>si</sub>			0,13	0,019	0,458	20,542	17,835	2415,6					844,6782	35,0	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,208	20,334	17,622	2385,0	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,43331	844,2449	35,4	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	2,917	17,417	14,853	1990,3	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	2,004	842,2409	42,3	
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,070	17,346	14,792	1981,6	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	433,313	408,9277	20,6	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	17,501	-0,155	4,796	603,8	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	12,024	396,9037	65,7	
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	3,204	-3,359	3,785	471,0	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,61902	396,2847	84,1	
R <sub>se</sub>			0,04	0,006	0,141	-3,500	3,745	465,7					396,2847	85,1	
Ulkoilma						-3,500	3,745	465,7					396,2847	85,1	
Yhteensä			6,951	1	24,500					5,17E+11	1	448,394			

JYVÄSKYLÄ HUHTIKUU		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	2,4													
		RH <sub>e</sub> (%)	40	RH <sub>e</sub> (%)	74													
		p <sub>i</sub> (Pa)	994	p <sub>e</sub> (Pa)	541	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)				
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					993,7391	40,0				
R <sub>si</sub>			0,13	0,019	0,348	20,652	17,950	2432,0					993,7391	40,9				
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,158	20,494	17,786	2408,6	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,43736	993,3017	41,2				
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	2,214	18,280	15,629	2100,5	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	2,02274	991,279	47,2				
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,054	18,226	15,580	2093,6	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	437,365	553,9144	26,5				
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	13,287	4,940	6,815	874,0	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	12,1364	541,778	62,0				
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	2,433	2,507	5,782	735,0	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,62481	541,1532	73,6				
R <sub>se</sub>			0,04	0,006	0,107	2,400	5,740	729,3					541,1532	74,2				
Ulkoilma						2,400	5,740	729,3					541,1532	74,2				
Yhteensä			6,951	1	18,600					5,17E+11	1	452,586						

JYVÄSKYLÄ TOUKOKUU		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	8,8													
		RH <sub>e</sub> (%)	46	RH <sub>e</sub> (%)	62													
		p <sub>i</sub> (Pa)	1138	p <sub>e</sub> (Pa)	700	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/MW)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)				
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					1137,831	45,8				
Rsi			0,13	0,019	0,228	20,772	18,074	2449,9					1137,831	46,4				
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,104	20,668	17,966	2434,4	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,42264	1137,409	46,7				
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	1,452	19,216	16,511	2226,2	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,95466	1135,454	51,0				
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,035	19,181	16,477	2221,4	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	422,644	712,8096	32,1				
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	8,715	10,466	9,732	1272,8	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,728	701,0817	55,1				
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	1,596	8,870	8,799	1144,4	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,60378	700,4779	61,2				
Rse			0,04	0,006	0,070	8,800	8,760	1139,0					700,4779	61,5				
Ulkoilma						8,800	8,760	1139,0					700,4779	61,5				
Yhteensä			6,951	1	12,200					5,17E+11	1	437,353						

		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
<b>JYVÄSKYLÄ</b> <b>KESÄKUU</b>		t <sub>i</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	13,4										
		RH <sub>i</sub> (%)	58	RH <sub>e</sub> (%)	66										
		p <sub>i</sub> (Pa)	1446	p <sub>e</sub> (Pa)	1011										
1															
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp ( Pa )	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					1445,89	58,2	
Rsi			0,13	0,019	0,142	20,858	18,164	2462,8					1445,89	58,7	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,065	20,793	18,097	2453,1	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,41986	1445,471	58,9	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	0,905	19,888	17,172	2320,6	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,9418	1443,529	62,2	
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,022	19,867	17,150	2317,5	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	419,865	1023,664	44,2	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	5,429	14,438	12,427	1648,2	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,6508	1012,013	61,4	
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	0,994	13,444	11,699	1546,1	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,59981	1011,414	65,4	
Rse			0,04	0,006	0,044	13,400	11,667	1541,8					1011,414	65,6	
Ulkoilma						13,400	11,667	1541,8					1011,414	65,6	
Yhteensä			6,951	1	7,600					5,17E+11	1	434,477			

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
<b>JYVÄSKYLÄ HEINÄKUU</b>		t <sub>i</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	15,8											
		RH <sub>i</sub> (%)	70	RH <sub>e</sub> (%)	73											
		p <sub>i</sub> (Pa)	1742	p <sub>e</sub> (Pa)	1312											
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m²C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m³)	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m²sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)		
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					1741,528	70,1		
Rsi			0,13	0,019	0,097	20,903	18,212	2469,6					1741,528	70,5		
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,044	20,859	18,165	2463,0	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,41486	1741,113	70,7		
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	0,619	20,239	17,526	2371,2	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,91865	1739,194	73,3		
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,015	20,225	17,510	2369,1	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	414,859	1324,335	55,9		
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	3,715	16,510	14,075	1880,1	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,5119	1312,823	69,8		
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	0,680	15,830	13,514	1801,0	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,59266	1312,231	72,9		
Rse			0,04	0,006	0,030	15,800	13,490	1797,6					1312,231	73,0		
Ulkoilma						15,800	13,490	1797,6					1312,231	73,0		
Yhteensä			6,951	1	5,200					5,17E+11	1	429,297				



JYVÄSKYLÄ ELOKUU		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	13,8										
		RH <sub>e</sub> (%)	69	RH <sub>e</sub> (%)	81										
		p <sub>i</sub> (Pa)	1717	p <sub>e</sub> (Pa)	1277										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					1716,684	69,1	
R <sub>si</sub>			0,13	0,019	0,135	20,865	18,172	2464,0					1716,684	69,7	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,061	20,804	18,108	2454,8	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,42517	1716,259	69,9	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	0,857	19,947	17,230	2329,0	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,96634	1714,293	73,6	
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,021	19,926	17,210	2326,0	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	425,171	1289,122	55,4	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	5,143	14,783	12,690	1685,0	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,7981	1277,324	75,8	
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	0,942	13,841	11,986	1586,3	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,60739	1276,717	80,5	
R <sub>se</sub>			0,04	0,006	0,041	13,800	11,955	1582,1					1276,717	80,7	
Ulkoilma						13,800	11,955	1582,1					1276,717	80,7	
Yhteensä			6,951	1	7,200					5,17E+11	1	439,968			

JYVÄSKYLÄ SYYSKUU		t <sub>i</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	9,2										
		RH <sub>i</sub> (%)	57	RH <sub>e</sub> (%)	82										
		p <sub>i</sub> (Pa)	1409	p <sub>e</sub> (Pa)	962										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					1408,625	56,7	
Rsi			0,13	0,019	0,221	20,779	18,082	2451,0					1408,625	57,5	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,100	20,679	17,978	2436,0	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,43188	1408,193	57,8	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	1,405	19,274	16,568	2234,3	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,99739	1406,196	62,9	
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,034	19,240	16,535	2229,6	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	431,884	974,3119	43,7	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	8,429	10,811	9,944	1302,2	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,9844	962,3275	73,9	
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	1,543	9,268	9,024	1175,3	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,61698	961,7106	81,8	
Rse			0,04	0,006	0,068	9,200	8,985	1170,0					961,7106	82,2	
Ulkolima						9,200	8,985	1170,0					961,7106	82,2	
Yhteensä			6,951	1	11,800					5,17E+11	1	446,915			

		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	4,1										
		RH <sub>e</sub> (%)	47	RH <sub>e</sub> (%)	87										
		p <sub>e</sub> (Pa)	1170	p <sub>e</sub> (Pa)	720										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m²C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m³)	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m²sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisällima						21,000	18,314	2484,3					1170,128	47,1	
Rsi			0,13	0,019	0,316	20,684	17,983	2436,8					1170,128	48,0	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,144	20,540	17,834	2415,4	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,43499	1169,693	48,4	
Min.villia (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	2,012	18,528	15,860	2133,3	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	2,01177	1167,681	54,7	
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,049	18,480	15,814	2126,9	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	434,994	732,6875	34,4	
Min.villia (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	12,072	6,407	7,508	967,9	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	12,0706	720,6168	74,5	
Min.villia(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	2,210	4,197	6,485	829,5	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,62142	719,9954	86,8	
Rse			0,04	0,006	0,097	4,100	6,443	823,8					719,9954	87,4	
Ulkoilma						4,100	6,443	823,8					719,9954	87,4	
Yhteensä			6,951	1	16,900					5,17E+11	1	450,132			

JYVÄSKYLÄ MARRASKUU		t <sub>e</sub> (°C)	21	t <sub>e</sub> (°C)	-1,8										
		RH <sub>e</sub> (%)	37	RH <sub>e</sub> (%)	91										
		p <sub>i</sub> (Pa)	929	p <sub>e</sub> (Pa)	482										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					929,1461	37,4	
R <sub>si</sub>			0,13	0,019	0,426	20,574	17,868	2420,4					929,1461	38,4	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,194	20,380	17,669	2391,7	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,43224	928,7138	38,8	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	2,714	17,665	15,074	2021,6	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,99902	926,7148	45,8	
Höyrysulku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,066	17,600	15,015	2013,3	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	432,235	494,4798	24,6	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	16,287	1,313	5,322	673,6	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,9941	482,4857	71,6	
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	2,982	-1,669	4,297	537,9	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,61748	481,8682	89,6	
R <sub>se</sub>			0,04	0,006	0,131	-1,800	4,255	532,5					481,8682	90,5	
Ulkoilma						-1,800	4,255	532,5					481,8682	90,5	
Yhteensä			6,951	1	22,800					5,17E+11	1	447,278			

JYVÄSKYLÄ JOULUKUU				t <sub>e</sub> (°C)	-5,9										
				RH <sub>e</sub> (%)	89										
				p <sub>e</sub> (Pa)	341										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	
Ainekerros	d (m)	λ <sub>n</sub> (W/m°C)	R <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> C/W)	R <sub>i</sub> / R <sub>T</sub>	Δt (°C)	t <sub>x</sub> (°C)	V <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	P <sub>k</sub> (Pa)	δp (kg/msPa)	Z <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Z <sub>i</sub> / Z <sub>T</sub>	Δp (Pa)	P <sub>x</sub> (Pa)	RH (%)	
Sisäilma						21,000	18,314	2484,3					782,5695	31,5	
Rsi			0,13	0,019	0,503	20,497	17,789	2409,0					782,5695	32,5	
Kipsilevy	0,013	0,22	0,059	0,009	0,229	20,268	17,555	2375,4	2,60E-11	5,00E+08	9,66E-04	0,42628	782,1433	32,9	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,05	-	0,828	0,119	3,203	17,066	14,548	1947,0	2,16E-11	2,31E+09	0,00447	1,97148	780,1718	40,1	
Höyrysuiku, PE	0,0002	-	0,020	0,003	0,077	16,988	14,481	1937,6	4,00E-16	5,00E+11	0,96637	426,282	353,8902	18,3	
Min.villa (kevyt)/puukoolaus	0,3	-	4,966	0,714	19,215	-2,227	4,122	515,0	2,16E-11	1,39E+10	0,02682	11,8289	342,0613	66,4	
Min.villa(kova), TS	0,05	0,055	0,909	0,131	3,518	-5,745	3,141	387,4	7,00E-11	7,14E+08	0,00138	0,60897	341,4523	88,1	
Rse			0,04	0,006	0,155	-5,900	3,103	382,4					341,4523	89,3	
Ulkolima						-5,900	3,103	382,4					341,4523	89,3	
Yhteensä			6,951	1	26,900					5,17E+11	1	441,117			

Painotettu $R_i$ -arvo (mineraalivilla ja koolaus)	
Mineraalivilla + puukoolaus	$R_i$ ( $m^2 C/W$ )
50 mm	0,828
100 mm	1,655
200 mm	3,310
300 mm	4,966

Aine	$\lambda_n$ ( $W/m^{\circ}C$ )
Mineraalivilla	0,055
Puu	0,12

$R_i =$	$\frac{1}{f_a}$	+	$\frac{1}{R_b}$	$f_b$
	$R_a$			$R_b$
	$0,083$		$1$	$0,917$
	$0,417$		+	$0,909$
$R_i$ (50 mm) =	$0,828$			

$R_a =$	Puu	d	$\lambda$	$R_{si}$
		0,05	0,12	0,4

$R_b =$	Mineraalivilla	d	$\lambda$	$R_{si}$
		0,05	0,055	0,9

$f_a =$	$\frac{50}{600}$	=	$0,083333$
$f_b =$	$\frac{550}{600}$	=	$0,916667$

R <sub>i</sub> =	$\frac{1}{\frac{f_a}{R_a} + \frac{f_b}{R_b}}$	Puu	d	λ	R <sub>si</sub>
			0,3	0,12	2,5
R <sub>i</sub> =	$\frac{1}{\frac{0,083}{2,500} + \frac{0,917}{5,455}}$	Mineraalivilla	d	λ	R <sub>si</sub>
			0,3	0,055	5,5
R <sub>i</sub> (300 mm) =	4,966	f <sub>a</sub> = $\frac{50}{600}$	=	0,083333	
		f <sub>b</sub> = $\frac{550}{600}$	=	0,916667	