

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Miika Kaasinen  
Kim Mustonen

RAKENTEELLISEN ENERGIATEHOKKUUDEN JA ILMASTON-  
MUUTOKSEN VAIKUTUKSET VAIPPARAKENTEIDEN KOSTEUS-  
TEKNISEEN TOIMIVUUTEEN

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2018



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Maaliskuu 2018**  
**Rakennustekniikan koulutusohjelma**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600 (vaihde)

**Tekijät**  
Miika Kaasinen, Kim Mustonen

**Nimeke**  
Rakenteellisen energiatehokkuuden ja ilmastonmuutoksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen

**Tiivistelmä**

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia vuonna 2018 voimaan tulleen lähes nollaenergiaraken-  
tamisen lainsäädäntöhankkeen vaikutus pientalojen ulkovaipparakenteiden kosteustekni-  
seen toimivuuteen. Rakenteita tarkasteltiin lainsäädännössä esitetyn rakenteellisen  
energiatehokkuuden kannalta eli rakenteiden eristepaksuutta lisättiin rakenteellisen ener-  
giatehokkuuden edellyttämien U-arvo vaatimusten mukaisiksi. Kosteusteknistä toimivuutta  
tarkasteltiin nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa pääsääntöisesti mik-  
robikasvuston muodostumisen kannalta, mutta tarkastelussa oli myös huomioitu kosteuden  
vaikutus rakenteiden lämpötekniisiin ominaisuuksiin.

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu suoritettiin käyttämällä kahta raken-  
nusteknistä mallinnusohjelmaa, WUFI Pro 5.1:tä ja COMSOL Multiphysics 5.3a:ta. Mallin-  
nusten ilmasto-olosuhteina käytettiin Ilmatieteen laitoksen laatimia rakennustekni-  
kaalisia testivuotia, jotta vertailuun saatiin nykyilmasto ja tulevaisuuden ilmasto. Mallin-  
nustulokset vietiin Microsoftin Excel-ohjelmaan analysointia ja kuvaajien laatimista varten.

Mallinnustuloksista selvisi, että eristepaksuuden lisääminen lisää useimpien rakenteiden  
kosteusrasitusta, jolloin myös mikrobikasvustolle suotuisat olosuhteet kasvavat. Eriste-  
paksuuden lisäämistä vieläkin merkittävämmäksi kosteusrasituksen lisääjäksi osoittautui-  
vat muuttuvat ilmasto-olosuhteet. Kosteus aiheutti myös rakenteiden lämpötekniisten  
ominaisuuksien heikkenemistä. Opinnäytetyötä voisi kehittää edelleen tutkimalla useam-  
pia rakenteita, vaihtoehtoisia rakennusratkaisuja tai perehtyä tarkemmin johonkin tiettyyn  
rakennustyyppiin. Lisäksi jatkotutkimuksena voisi tehdä kustannuslaskentaa rakenteille.

**Kieli**  
Suomi

Sivuja 113  
Liitteet 7  
Liitesivumäärä 41

**Asiasanat**

rakenteellinen energiatehokkuus, rakennustekninen mallinnus, kosteus, U-arvo, mik-  
robikasvusto



**THESIS**  
**March 2018**  
**Degree Programme in Construction**  
**Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600 (switchboard)

**Authors**

Miika Kaasinen, Kim Mustonen

**Title**

Effects of Structural Energy Efficiency and Climate Change on Moisture Performance of Envelope Structures

**Abstract**

The purpose of this thesis was to inspect the nearly zero-energy building legislation that came into operation in 2018, and its effects on the moisture performance of a detached house's envelope structures. The structures were examined in the aspect of a structural energy efficiency, which was stated in the legislation. This means that the structures' insulation thickness was increased to meet the U-value requirements given to fulfil structural energy efficiency. The moisture performance of the structures was examined in both present and future climates. The examination was made by inspecting effect of moisture on the structures' microbe growth and thermal properties.

The moisture performance examination of the structures was conducted with two building physics modeling programs, WUFI Pro 5.1 and COMSOL Multiphysics 5.3a. The climate conditions used in the models are building physical test years created by The Finnish Meteorological Institute. This made it possible to compare the present climate to future climate. The modeling results were exported to Microsoft Excel -program for further analysis and to create the necessary charts.

It turned out that more insulation means more moisture load for most structures, which in turn allowed for better environment for the microbes to grow. Future climate conditions increased the moisture load even more than just the thicker insulation. More moisture in structures also weakened their thermal properties. Further development for this thesis could be to examine more structures, develop alternate structural concepts or to examine a specific structure type more. Moreover, a subject to consider for further study would be to do some cost estimations for the structures.

**Language**

Finnish

Pages 113

Appendices 7

Pages of Appendices 41

**Keywords**

structural energy efficiency, building physics modeling, moisture, U-value, microbe growth

## Sisältö

1	Johdanto .....	9
1.1	Tausta .....	9
1.2	Tavoite .....	9
1.3	Rajaus .....	10
1.4	Tutkimusmenetelmät .....	10
2	Lähes nollaenergiarakentaminen .....	11
2.1	Lainsäädäntöhankkeen kulku .....	11
2.2	Rakenteellinen energiatehokkuus .....	12
2.3	Kiristyvien vaatimusten vaikutus pientalon ulkovaipparakenteisiin .....	14
3	Lämpö ja kosteus .....	14
3.1	Rakennustekninen tarkastelu .....	14
3.2	Suomen rakentamismääräyskokoelmat C4 ja C2 .....	14
3.2.1	Määräysten tarkastelu .....	14
3.2.2	U-arvon määrittäminen C4:n mukaisesti .....	15
3.2.3	Rakennusosien kosteustekniset vaatimukset C2:n mukaan .....	18
3.3	Rakennusfysikaalinen tarkastelu .....	19
3.3.1	Lämmön siirtyminen rakenteissa .....	19
3.3.2	Kosteus rakennuksissa .....	20
3.3.3	Vesihöyryn konvektio .....	21
3.3.4	Diffuusio .....	21
3.3.5	Kondensoituminen .....	22
3.3.6	Rakennuskosteus .....	22
3.3.7	Muut kosteuslähteet .....	22
4	Mikrobikasvusto .....	23
4.1	Rakennustekninen tarkastelu .....	23
4.2	Edellytykset mikrobikasvuston muodostumiselle .....	23
4.3	Rakennusosien homehtumisriski .....	24
5	Aiemmat tutkimukset kiristyvistä energiavaatimuksista .....	26
5.1	Ympäristöministeriön selvityspyyntö vuonna 2008 .....	26
5.2	FRAME-projekti .....	27
5.3	Uudet energiakiristykset vuosina 2017–2020 .....	28
5.4	Pääpiirteet aiemmista tutkimuksista .....	30
6	Rakennusfysikaalinen mallinnus .....	31
6.1	Rakenteiden tarkastelu mallintamalla .....	31
6.2	Käytetyt mallinnusohjelmat .....	31
6.2.1	WUFI Pro 5.1 .....	31
6.2.2	COMSOL Multiphysics 5.3a .....	32
6.3	Mallinnetut rakenteet .....	33
6.4	Valitut tarkastelupisteet .....	36
6.4.1	Yläpohjien tarkastelupisteet .....	36
6.4.2	Puu-ulkoseinien tarkastelupisteet .....	37
6.4.3	Kiviulkoseinien tarkastelupisteet .....	38
6.4.4	Alapohjien tarkastelupisteet .....	39
6.5	Ilmasto-olosuhteet mallintamisessa .....	39
6.6	Maan olosuhteet alapohjien mallintamisessa .....	40
7	Tulokset nykyilmastossa .....	41
7.1	Tulosten tarkastelu nykyilmastossa .....	41

7.2	Yläpohjien tulokset nykyilmastossa .....	42
7.3	Puu-ulkoseinien tulokset nykyilmastossa.....	44
7.4	Kiviulkoseinien tulokset nykyilmastossa.....	45
7.5	Alapohjien tulokset nykyilmastossa .....	47
8	Tulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa .....	49
8.1	Tulosten tarkastelu kriittisissä ilmasto-olosuhteissa.....	49
8.2	Yläpohjien tulokset Vantaa 2050 -ilmastossa .....	49
8.3	Puu-ulkoseinien tulokset Vantaa 2050 -ilmastossa.....	50
8.4	Kiviulkoseinien tulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa .....	52
8.5	Alapohjien tulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa .....	54
8.6	Nykyilmaston ja kriittisten ilmasto-olosuhteiden tulosten vertailu .....	56
9	Johtopäätökset .....	58
9.1	Tulosten tulkinta.....	58
9.2	Yläpohjien tulosten tulkinta .....	58
9.2.1	Yläpohjien kriittiset olosuhteet ja U-arvojen muuttuminen .....	58
9.2.2	Mikrobikasvuston muodostuminen yläpohjissa .....	60
9.3	Puu-ulkoseinien tulosten tulkinta .....	61
9.3.1	Puu-ulkoseinien kriittiset olosuhteet ja U-arvojen muuttuminen.....	61
9.3.2	Mikrobikasvuston muodostuminen puu-ulkoseinissä .....	62
9.4	Kiviulkoseinien tulosten tulkinta .....	63
9.4.1	Kiviulkoseinien kriittiset olosuhteet ja U-arvojen muuttuminen.....	63
9.4.2	Mikrobikasvuston muodostuminen kiviulkoseinissä .....	65
9.5	Alapohjien tulosten tulkinta .....	66
9.6	Yhteenveto johtopäätöksistä.....	67
10	Pohdinta.....	68
10.1	Tavoitteet ja toteutus.....	68
10.2	Luotettavuus .....	69
10.3	Oppimisprosessi .....	69
10.4	Kehittämisideat ja jatkotutkimukset.....	69
	Lähteet.....	71

## Liitteet

Liite 1	WUFI Pro -ohjelmiston materiaaliparametrit
Liite 2	Mallin luominen WUFI Pro -ohjelmistossa
Liite 3	COMSOL-ohjelmiston materiaaliparametrit
Liite 4	Mallin luominen COMSOL-ohjelmistossa
Liite 5	Esimerkit rakenteiden ajoista kriittisissä olosuhteissa
Liite 6	Laskentatulokset nykyilmastossa
Liite 7	Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

## Käsitteet

Diffuusio	Diffuusiolla tarkoitetaan aineen pitoisuuseroista johtuvaa molekyylien (esim. vesihöyryn) liikkumista.
Höyrynsulku	Höyrynsululla saadaan katkaistua vesihöyryn eteneminen rakenteissa.
Kapillaarinen veden siirtyminen	Kapillaarinen veden siirtyminen tarkoittaa nestemäisen veden siirtymistä materiaalin sisällä olevissa huokosputkissa.
Kondensoituminen	Kondensoitumisella tarkoitetaan vesihöyryn tiivistymistä vedeksi rakenteiden pinnoille tai sisäpuolelle vesihöyrypitoisuuden saavuttaessa kyllästyskosteuden.
Konduktio	Konduktio tarkoittaa lämmön siirtymistä jonkin kappaleen tai aineen sisällä eli tällöin kappaleen tai aineen lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan. Konduktiota voi tapahtua myös kahden aineen välillä, jos aineet ovat kosketuksissa toisiinsa.
Kosteusdiffusiviteetti	Kosteusdiffusiviteetillä ( $D_w$ ) kuvataan sitä, kuinka nopeasti jonkin materiaalin kosteuspitoisuuserot tasoittuvat. Se ottaa huomioon kaikki kosteuden siirtymismuodot. (Vinha ym. 2013, 19.)
Kosteuspitoisuus	Kosteuspitoisuudella ( $w_c$ ) tarkoitetaan materiaalissa olevaa kosteuden kokonaismäärää suhteessa materiaalin tilavuusyksikköä kohden.

Kyllästyskosteus	Kyllästyskosteus kertoo ilmaan mahtuvan suurimman mahdollisen vesihöyrypitoisuuden tietyssä lämpötilassa.
Lämmön konvektio	Lämmön konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä jonkin väliaineen, kuten veden tai ilman virtauksen mukana.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) ilmoittaa, kuinka hyvin jokin materiaali johtaa lämpöä. Korkeampi lämmönjohtavuuden arvo tarkoittaa, että materiaali johtaa paremmin lämpöä.
Lämmönvastus	Lämmönvastus ( $R$ ) ilmoittaa rakennusosan tai ainekerroksen kyvyn vastustaa lämmön johtumista. Tämä voidaan laskea jakamalla ainekerroksen paksuus sen lämmönjohtavuudella.
Suhteellinen kosteus	Suhteellinen kosteus kertoo ilman vesihöyrypitoisuuden määrän suhteessa kyllästyskosteuspitoisuuteen tietyssä lämpötilassa.
U-arvo	U-arvo eli lämmönläpäisykerroin on rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ( $R_T$ ) käänteisarvo eli se kertoo, kuinka hyvin lämpö pääsee läpäisemään rakenteen.
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin tarkoittaa paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta huokoisen aineen vesihöyrynläpäisevyyteen. Sillä voidaan myös ilmoittaa vesihöyrynvastuksien suhde jonkin ainekerroksen ja yhtä paksun ilmakerroksen välillä. (Vinha ym. 2013, 23.)
Vesihöyryn konvektio	Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan vesihöyryn kulkeutumista ilmavirran mukana.

Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyydellä ( $\delta\rho$ ) ilmaistaan sitä, kuinka tehokkaasti vesihöyry pääsee läpäisemään jonkin ainekerroksen.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastus tarkoittaa ainekerroksen kykyä vastustaa vesihöyrynsä etenemistä kerroksen läpi. Vesihöyrynvastus voidaan laskea jakamalla ainekerroksen paksuus sen vesihöyrynläpäisevyydellä.
Viistosade	Viistosateella tarkoitetaan tuulesta johtuvaa vaakasuuntaisesti tai lähes vaakasuuntaisesti etenevää sadetta.

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Opinnäytetyömme aiheena on vuonna 2018 voimaan tulleen lähes nollaenergiarakentamisen lainsäädännön vaikutus pientalojen ulkovaipparakenteisiin (alapohja, ulkoseinä ja yläpohja) rakenteellisen energiatehokkuuden kautta. Luvussa 2.1 on kerrottu tarkemmin lainsäädäntöhankkeen etenemisestä ja sen vaikutuksista.

Vuosina 2009–2012 toteutettu FRAME-projekti tutki vuonna 2010 kiristettyjen energiavaatimusten vaikutusta rakennusten vaipparakenteiden kosteustekniiseen toimintaan. Tämä projekti sai meidät kiinnostumaan uusien energiavaatimusten mukaisten rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta. Pidimme oletuksena, että uudet kiristykset muuttavat rakenteiden kosteusteknistä toimintaa edelleen heikompaan suuntaan, kuten FRAME-projektissa kävi ilmi aiemmin kiristyneiden energiavaatimusten osalta.

## 1.2 Tavoite

Tavoitteenamme oli siis selvittää, kuinka lainsäädännön mukaisen rakenteellisen energiatehokkuuden edellyttämät uudet U-arvovaatimukset vaikuttavat pientalon vaipparakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Tutkimme sekä puu- että kivirakenteita, jotta saimme vertailtua kosteusteknisesti erilaisten materiaalien toimivuutta. Tarkastelimme rakenteita nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa, kuten FRAME-projektissakin oli tehty.

Voimme jakaa opinnäytetyömme tavoitteet seuraavasti:

1. Tutkittavien rakennetyyppien määrittäminen siten, että ne täyttävät nyky-määräysten mukaiset U-arvovaatimukset.
2. Tutkittavien rakennetyyppien määrittäminen siten, että ne täyttävät uusien määräysten mukaiset rakenteellisen energiatehokkuuden edellyttämät U-arvovaatimukset.

3. Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu nykyilmastossa.
4. Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu tulevaisuuden ilmastossa.

### 1.3 Rajaus

Rajasimme opinnäytetyömme siten, että tutkimme rakenteita vain niin sanotusti ”virheettöminä” rakenteina. Näin ollen emme ottaneet huomioon mahdollisia toteutusvirheitä tai kylmäsiltoja, vaan tarkastelimme rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta sellaisenaan. Tällöin saimme vertailukelpoiset tulokset rakenteiden ja olosuhteiden välille.

Tutkittavat rakenteet rajasimme rakennetyypeittäin seuraavasti:

1. Tavanomainen maanvarainen betonilaatta alapohja nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa.
2. Tavanomainen puurakenteinen yläpohja nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa.
3. Tavanomainen puurakenteinen ulkoseinä nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa sekä vaihtoehtoinen toteutustapa puiselle ulkoseinälle tulevaisuuden ilmastossa.
4. Tavanomainen eristeharkkoulkoseinä nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa sekä vaihtoehtoinen toteutustapa eristeharkko ulkoseinälle tulevaisuuden ilmastossa.

Näillä rajauksilla saimme vertailuun tavallisimpia pientalon ulkovaipparakenteita, joiden kosteusteknisen toimivuuden pyrimme selvittämään nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa. Tutkittavia rakenteita oli siis yhteensä kymmenen kappaletta.

### 1.4 Tutkimusmenetelmät

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden tarkastelua varten käytimme Microsoftin Excel-ohjelmaa sekä kahta rakennusfysikaalista mallinnusohjelmaa, WUFI Pro 5.1:tä ja COMSOL Multiphysics 5.3a:ta. Exceliä käytimme tutkimiemme ul-

koseinä- ja yläpohjarakenteiden U-arvojen määrittämiseen Suomen rakentamismääräyskokoelma C4:n ohjeiden mukaisesti. Alapohjarakenteiden U-arvot puolestaan määritimme Puuinfo Oy:n laskurilla (Puuinfo Oy 2011). Määritettyämme rakenteet vaatimusten mukaisiksi testasimme niiden kosteusteknisen toimivuuden edellä mainituilla mallinnusohjelmilla.

Päädyimme käyttämään Exceliä ulkoseinien ja yläpohjien U-arvojen määrittämiseen laskurin sijasta, koska tällöin saimme paremman ymmärryksen siitä, mitkä asiat vaikuttavat rakenteiden lämpötekniiseen toimintaan. Alapohjiin käytimme Puuinfo Oy:n laskuria, koska alapohjat ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia ja oletuksenamme oli, ettei niissä todennäköisesti ilmene eristepaksuuden lisäämisestä aiheutuvia kosteusteknisiä ongelmia.

Päätimme suorittaa rakenteiden tutkimisen mallintamalla, koska aika ei olisi millään riittänyt suorittamaan varsinaisia mittauksia rakenteille. Lisäksi mallintamalla pystyimme tarkastelemaan rakenteita sellaisenaan ilman rakennusvirheitä. Myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteiden tarkastelu edellytti rakennusfysikaalista mallintamista.

Mallinnuksesta saaduista tuloksista analysoimme rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta sekä mikrobikasvuston muodostumisen riskiä. Analysointia varten veimme mallinuksista saamamme tulokset Exceliin, jolla saimme luotua tarvittavat kuvaajat ja rajattua tulokset tulkittavaan muotoon.

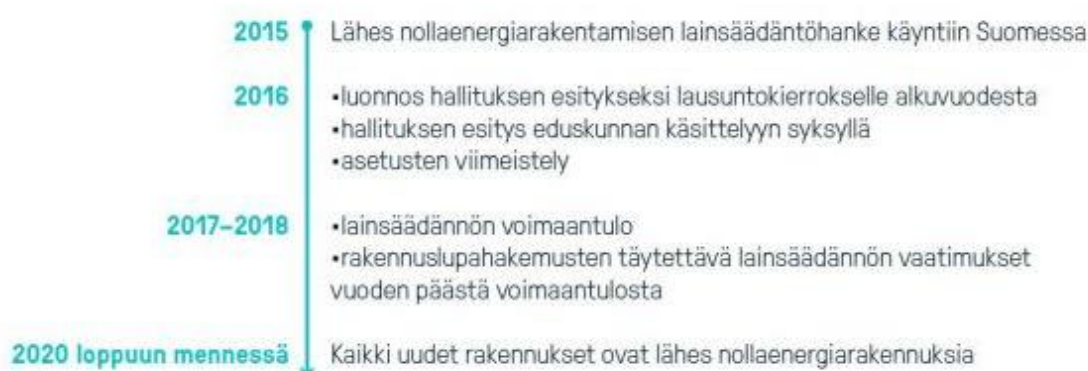
## **2 Lähes nollaenergiarakentaminen**

### **2.1 Lainsäädäntöhankkeen kulku**

Suomen ympäristöministeriö laittoi vuonna 2015 aluilleen hankkeen, jonka tavoitteena Suomessa on saavuttaa lähes nollaenergiarakentamisen taso uudisrakentamisessa vuoden 2020 loppuun mennessä. Näin Suomi noudattaisi Euroopan unionin vuonna 2010 asettamaa direktiiviä rakennusten energiatehokkuudesta. (Ympäristöministeriö 2017a.)

Direktiivissä (2010/31/EU) määrätään, että jokaisen EU:n jäsenvaltion on laadittava suunnitelma, jota noudattamalla päästään lähes nollaenergiarakentamiseen. Vaatimuksena on, että vuoden 2018 jälkeen rakennetut uudet viranomaisten omistuksessa ja käytössä olevat rakennukset, ja vuoden 2020 loppuun mennessä kaikki uudet rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia.

Kuvassa 1 on esitetty ympäristöministeriön lähes nollaenergiarakentamisen lainsäädäntöhankkeen eteneminen.



Kuva 1. Ympäristöministeriön lainsäädäntöhankkeen kulku (Ympäristöministeriö 2017a).

## 2.2 Rakenteellinen energiatehokkuus

Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta voidaan energiatehokkuusvaatimukset täyttää käyttötarkoituseräluokkiin 1 ja 2 kuuluvien rakennusten rakenteellisella energiatehokkuudella (Ympäristöministeriö 2017b). Tämä tarkoittaa sitä, että rakenteiden U-arvovaatimusten, ilmanvuotoluvun ja poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen vertailuarvot määräytyisivät taulukon 1 mukaisiksi. Lisäksi rakenteellisen energiatehokkuuden täyttymiseksi rakennus tulee varustaa koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä, ja lämmitykseen on käytettävä maalämpöä, kaukolämpöä tai ilmavesilämpöpumppua.

Taulukko 1. Rakenteellisen energiatehokkuuden vertailuarvot vuonna 2018 (Ympäristöministeriö 2017b).

<b>Rakenne</b>	<b>Vertailutaso 2018</b>
seinä, käyttötarkoitussluokka 1	0,12 W/(m <sup>2</sup> K)
seinä, käyttötarkoitussluokka 2	0,14 W/(m <sup>2</sup> K)
yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja	0,07 W/(m <sup>2</sup> K)
ryömintätilaan rajoittuva tuuletettu alapohja ja maata vasten oleva rakennusosa	0,10 W/(m <sup>2</sup> K)
ikkuna, kattoikkuna, ovi, kattovalokupu, savunpoisto- ja uloskäyntiluukku	0,70 W/(m <sup>2</sup> K)
rakennuksen ilmanvuotoluku (q <sub>50</sub> )	0,60 m <sup>3</sup> /(hm <sup>2</sup> )
poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde	70 %

Taulukossa 2 on vertailtu nykyisin voimassa olevia eri rakennusosien lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoja vuonna 2018 voimaan astuvien rakenteellisen energiatehokkuuden edellyttämiin vertailuarvoihin.

Taulukko 2. Nykyisten ja tulevien U-arvovaatimusten vertailu.

<b>Rakenne</b>	<b>Vertailutaso 2012<sup>1</sup> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>	<b>Vertailutaso 2018<sup>2</sup> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>
seinä, käyttötarkoitussluokka 1	0,17	0,12
seinä, käyttötarkoitussluokka 2	0,17	0,14
yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja	0,09	0,07
ryömintätilaan rajoittuva tuuletettu alapohja	0,17	0,10
maata vasten oleva rakennusosa	0,16	0,10
ikkuna, kattoikkuna, ovi, kattovalokupu, savunpoisto- ja uloskäyntiluukku	1,00	0,70

1 RakMK D3 2012

2 Ympäristöministeriö 2017b

### **2.3 Kiristyvien vaatimusten vaikutus pientalon ulkovaipparakenteisiin**

Rakenteellisen energiatehokkuuden edellyttämät lämmönläpäisykertoimet tarkoittavat huomattavaa eristepaksuuden lisäämistä pientalon ulkovaipparakenteisiin. Ulkoseinän lämmönläpäisykertoimen tulee uusien vaatimusten myötä olla noin 29,4 % parempi kuin nykyisillä määräyksillä. Vastaavasti maanvastaisen alapohjan U-arvon tulee uusilla määräyksillä olla 37,5 % parempi ja yläpohjan 22,2 % parempi kuin nykyisillä määräyksillä. Etenkin yläpohjan osalta muutos tarkoittaa merkittävää eristepaksuuden lisäämistä jo entuudestaan pienestä U-arvovaatimuksesta johtuen.

## **3 Lämpö ja kosteus**

### **3.1 Rakennustekninen tarkastelu**

Opinnäytetyössämme on tarkasteltu lämmöstä ja kosteudesta annettuja rakentamismääräyksiä sekä rakentamisen kannalta lämmön ja kosteuden oleellisimpia fysikaalisia ominaisuuksia. Luvussa 3.2 on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelmista C4 ja C2 sellaiset asiat, joita opinnäytetyössä on tarvittu. Luvussa 3.3 on esitetty opinnäytetyömme kannalta oleellista rakennusfysikaalista teoriaa lämmöstä ja kosteudesta. Tätä tietoa on käytetty tulosten tarkastelua varten ja selventämään rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa.

### **3.2 Suomen rakentamismääräyskokoelmat C4 ja C2**

#### **3.2.1 Määräysten tarkastelu**

Suomen rakentamismääräyskokoelma C4:ssä on ohjeet rakennusten lämmöneristyksen suunnittelusta ja toteutuksesta sekä rakenteiden lämmönläpäisykertoimien määrittämisestä. Käytimme opinnäytetyömme lähteenä Suomen ympäristöministeriön vuonna 2012 laatimaa C4:n luonnosta.

Rakentamismääräyskokoelma C2:ssa puolestaan on ohjeet ja määräykset rakennusten kosteusteknistä toimivuutta varten. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennuksesta ei saa aiheutua kosteudesta johtuvaa terveyshaittaa käyttäjille tai rakennuksen ympäristössä oleville.

Tarkastelimme opinnäytetyössämme C4:n mukaisia menetelmiä rakenteiden lämmönläpäisykertoimien määrittämiseksi. Lisäksi otimme huomioon C2:ssa esitetyt määräykset ja ohjeet, jotta uusien U-arvovaatimusten mukaiset rakenteet olisivat kosteusteknisesti toimivia ja terveellisiä.

### 3.2.2 U-arvon määrittäminen C4:n mukaisesti

Rakennusosan lämmönläpäisykertoimen laskeminen on C4:ssä esitetty kaavoilla 1–7. Lisäksi C4:ssä on kaavat korjatun U-arvon laskemiseen. Näin saadaan otettua huomioon rakennuksen kylmäsillat, ilmaraot, mekaaniset kiinnikkeet ja käännetyt katot, jotka nostavat rakennusosien lämmönläpäisykerrointa. Emme kuitenkaan ottaneet näitä korjaustekijöitä huomioon, sillä tarkoituksenamme oli tarkastella pelkästään rakennusosien varsinaisten ainekerrosten U-arvoja.

Kaavalla 1 saadaan laskettua rakennusosan lämmönläpäisykerroin ( $U$ ).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (1)$$

missä

$U$	rakennusosan lämmönläpäisykerroin, [W/(m <sup>2</sup> K)]
$R_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastus, [m <sup>2</sup> K/W]

Kaavalla 2 saadaan laskettua yksittäisen tasapaksun ainekerroksen lämmönvastus ( $R$ ).

$$R = \frac{d}{\lambda_U} \quad (2)$$

missä

$R$	ainekerroksen lämmönvastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$d$	ainekerroksen paksuus, [m]
$\lambda_U$	ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo, [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

Kaavalla 3 saadaan laskettua kokonaislämmönvastus ( $R_T$ ) rakennusosalle, jossa ainekerrokset ovat peräkkäin lämpövirran suuntaan nähden. Yksittäisten ainekerrosten ( $R_1, R_2, \dots, R_n$ ) lämmönvastukset lasketaan kaavalla 2.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3)$$

missä

$R_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R_{si}$	sisäpuolen pintavastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R_1, R_2, R_n$	rakennusosan ainekerrosten 1, 2, n lämmönvastukset, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R_{se}$	ulkopuolen pintavastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

Kaavalla 4 saadaan laskettua kokonaislämmönvastus ( $R_T$ ) rakennusosalle, jossa on erilaisia rinnakkaisia ainekerroksia lämpövirran suuntaan nähden.

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad (4)$$

missä

$R'_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiarvo, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R''_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alakiarvo, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

Kaavalla 5 saadaan laskettua rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiarvo ( $R'_T$ ). Yläkiarvoa laskettaessa rinnakkaiset ainekerrokset jaetaan itsenäisiin lämpövirran suuntaan nähden peräkkäisiin lohkoihin. Jokaiselle lohkolle lasketaan kokonaislämmönvastus kaavan 3 mukaisesti, minkä jälkeen saadut arvot sijoitetaan kaavaan 5.

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{Tn}} \quad (5)$$

missä

$R'_T$	rakennuksen kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$f_a, f_b, f_n$	lohkojen a, b, n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta, [-]
$R_{Ta}, R_{Tb}, R_{Tn}$	lohkojen a, b, n kokonaislämmönvastukset, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

Kaavalla 6 saadaan yhdistettyä rakennusosan kunkin kerroksen lämmönjohtavuudeltaan erilaisten rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset. Kerrokset ovat kohtisuorassa lämpövirran suuntaan nähden ja ulottuvat koko rakenneosan läpi. Lämpövirran suunnassa jokainen kerros on lämmönjohtavuudeltaan yhtenäinen. Rinnakkaisten lohkojen ( $R_{ja}, R_{jb}, \dots, R_{jn}$ ) lämmönvastukset lasketaan kaavalla 2.

$$\frac{1}{R''_j} = \frac{f_a}{R_{ja}} + \frac{f_b}{R_{jb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{jn}} \quad (6)$$

missä

$R''_j$	rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, n yhteenlaskettu lämmönvastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$f_a, f_b, f_n$	yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta, [-]
$R_{ja}, R_{jb}, R_{jn}$	rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, n lämmönvastukset, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

Kaavalla 7 saadaan laskettua rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alaliikiarvo ( $R''_T$ ) kaavassa 6 esitetyn lohkojen lämmönvastuksen yhdistämisen jälkeen.

$$R''_T = R_{si} + (R''_1 + R''_2 + \dots + R''_j) + (R_1 + R_2 + \dots + R_k) + R_{se} \quad (7)$$

missä

$R''_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R_{si}$	sisäpuolen pintavastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R_{se}$	ulkopuolen pintavastus, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R''_1, R''_2, R''_j$	rakennusosan kerroksissa a, b, j olevien rinnakkaisten lohkojen yhdistetyt lämmönvastukset, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]
$R_1, R_2, R_k$	rakenneosan tasa-aineisista ja tasapaksuisista ainekerroksista muodostuvien kerrosten 1, 2, k lämmönvastukset, [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]

Yllä esitetyillä kaavoilla 1–7 saimme Exceliä apuna käyttäen laskettua tutkimiemme ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden U-arvot. Alapohjarakenteiden lämmönläpäisykertoimien määrittämistä varten puolestaan käytimme Puuinfo standardiin EN ISO 13370 perustuvaa laskuria (Puuinfo Oy 2011).

### 3.2.3 Rakennusosien kosteustekniset vaatimukset C2:n mukaan

C2:ta tarkastelemme siltä osin kuin siinä on ohjeita ja määräyksiä alapohjan, ulkoseinän ja yläpohjan kosteusteknistä toimivuutta varten. Yleisenä ohjeena voidaan pitää, että rakennus ja rakenteet tulee suunnitella siten, että niihin ei pääse tunkeutumaan haitallista kosteutta (vesihöyry, vesi tai lumi). Mikäli rakenteisiin kuitenkin pääsee kosteutta, on rakenteiden pystyttävä kuivumaan haittaa aiheuttamatta.

C2:ssa ohjeistetaan, että maanvastaisen alapohjan lämmöneristys tulee sijoittaa pääsääntöisesti pohjalaatan alle, ja lattian puurakenteet tulee erottaa kosteudenkestävällä materiaalilla (esimerkiksi bitumikermikaistalla) sokkelin ja alapuolisen laatan rakenteista. Höyrynsulkua ei yleensä alapohjaan laiteta. Lisäksi lattiarakenteen alle tulee levittää kosteuden kapillaarisen nousun katkaiseva kerros, joka on vähintään 200 mm paksu. Tähän soveltuu muun muassa sepeli.

Ryömintätilainen alapohja on C2:n mukaan suunniteltava ja toteutettava siten, että ryömintätilaan ei kerry vettä ja että se tuulettuu riittävästi. Myöskään ryömintätilan ilmankosteudesta ei saa olla haittaa rakenteiden kestävyydelle ja toiminnalle. Ryömintätilan kosteutta voidaan alentaa salaojituskerroksella,

kosteudeneristyksellä tai maapohjan lämmöneristyksellä. Tuuletus toteutetaan sokkelin läpi tehtävillä aukoilla, koneellisesti tai painovoimaisesti.

Ulkoseinän osalta C2 ohjeistaa, että ulkoseinän, ulkoseinään liittyvien rakenteiden ja ulkoseinän liitosten tulee olla sellaiset, että sisäilman vesihöyry tai maasta tuleva kosteus ei aiheuta diffuusion tai konvektion kautta haitallista kosteutta seinärakenteisiin. Ulkoseinän on myös toimittava siten, että seinään satunnaisesti tunkeutuneen kosteuden sekä rakennuskosteuden on poistuttava aiheuttamatta terveysriskiä tai muuta vahinkoa.

Ulkoseinän ulkoverhous on C2:n ohjeiden mukaisesti suunniteltava ja toteutettava siten, että sen taakse ei pääse vettä tai vastaavasti siten, että sen taakse joutuneet vesi ja kosteus pystyvät poistumaan rakenteita vahingoittamatta. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi ulkoverhouksen taustan tuulettamisella.

Yläpohja ja katon tuuletus on C2:n mukaan suunniteltava ja toteutettava siten, ettei kattorakenteisiin kerry haitallista kosteutta ilmavirtausten tai vesihöyryn diffuusion vuoksi. Mikäli yläpohjaan kuitenkin pääsee kosteutta, on sen voitava kuivua.

### **3.3 Rakennusfysikaalinen tarkastelu**

#### **3.3.1 Lämmön siirtyminen rakenteissa**

Lämpö voi siirtyä rakenteissa kolmella tavalla:

- kuljettumalla (konvektio)
- johtumalla (konduktio)
- säteilemällä

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä jonkin väliaineen, kuten veden tai ilman virtauksen mukana. Kuljettuminen voi olla luonnollista tai pakotettua, mutta rakenteissa ja rakennuksissa konvektio esiintyy usein näiden yhdistelmänä tai pakotettuna. Pakotetussa konvektiossa on jokin ulkopuolinen tekijä (esimerkiksi ilmanvaihtokone), joka aiheuttaa nesteen tai kaasun virtauksen. Luonnollinen

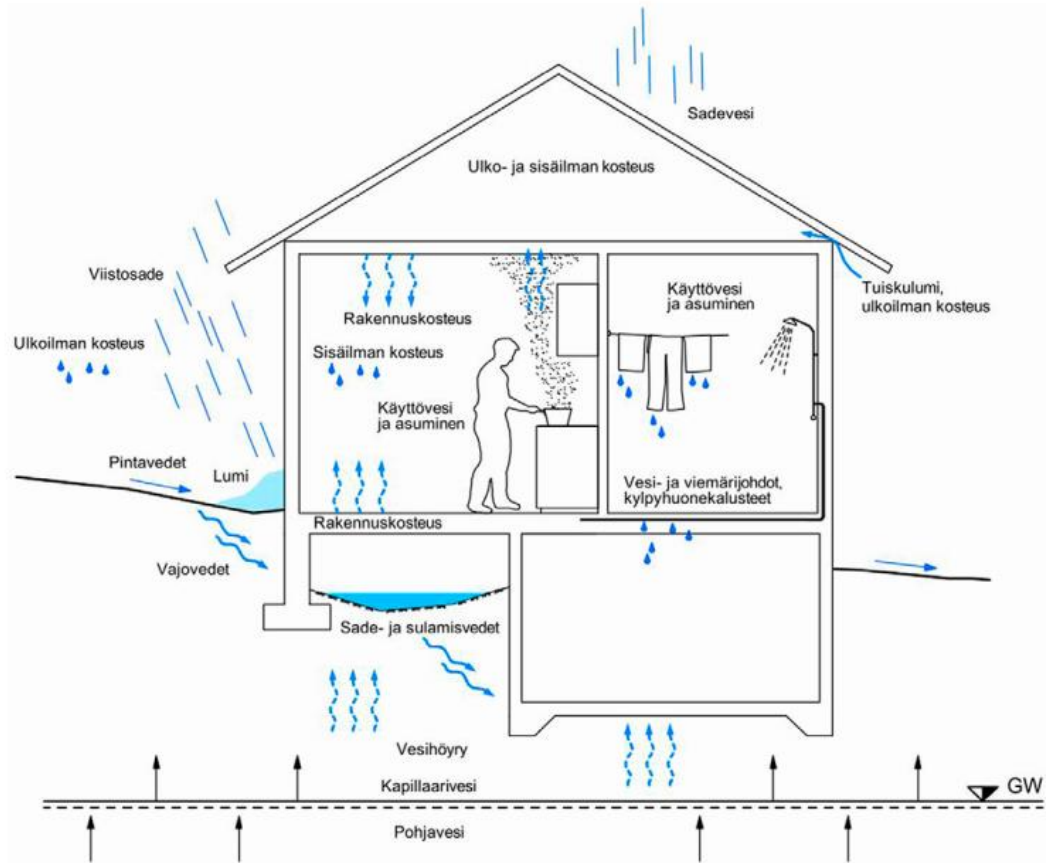
konvektio puolestaan johtuu lämpötilaerojen aiheuttamasta virtauksesta. Tämä ilmenee muun muassa savupiipussa vetona. (Björkholtz 1990, 17.)

Konduktiossa lämpö siirtyy kappaleessa tai aineessa itsessään. Toisin sanoen yhtenäisen aineen tai kappaleen lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan siten, että lämpöenergia siirtyy korkeammasta lämpötilasta pienempään. Aineesta toiseen lämpö pääsee johtumaan vai silloin, kun aineet ovat kosketuksissa toisiinsa. Rakennusaineiden lämmöneristävyys ilmaistaankin lämmönjohtavuudella ( $\lambda$ ), joka kertoo, kuinka hyvin aine johtaa lämpöä eli mitä suurempi arvo on, sitä huonommin aine eristää lämpöä. (Björkholtz 1990, 10–11.)

Lämpösäteily tarkoittaa lämmön siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Näin ollen kaikki lämpötilaltaan absoluuttisen nollapisteen yläpuolella olevat kappaleet emittoivat eli lähettävät säteilyä. Merkittävänä säteilylähteenä rakenteiden kuivumisen kannalta on auringosta tuleva säteily, mikä vaikuttaa myös rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. (Björkholtz 1990, 15–16.)

### **3.3.2 Kosteus rakennuksissa**

Rakennuksissa ja rakenteissa ilmenee sekä ulkoisia että sisäisiä kosteuden lähteitä. Kosteus voi esiintyä vetenä, vesihöyrynä tai rakennuskosteutena, joista vesihöyry voi siirtyä rakenteisiin konvektiolla, diffuusiolla tai kondensoitumalla. Rakennusosien kostuminen ei hetkellisenä ilmiönä ole vaarallista, mutta pitkään kosteana olevassa rakenteessa voi alkaa kasvaa mikrobikasvustoa kuten bakteereja, hometta tai lahosieniä. (RT 05-10710 1999, 1.) Kuvassa 2 on esitetty yleisiä kosteuden lähteitä rakennuksissa (Ympäristöministeriö 2016, 107).



Kuva 2. Rakennuksen yleiset kosteuden lähteet (Ympäristöministeriö 2016, 107).

### 3.3.3 Vesihöyryn konvektio

Konvektio tarkoittaa ilman virtaamista ilmaa läpäisevien huokoisten aineiden ja rakennusosien rakojen lävitse. Virtaukset syntyvät lämpötilaerojen, tuulen ja koneellisen ilmanvaihdon aiheuttamista ilmanpaine-eroista rakenneseosan eri puolilla. (RIL 255-1-2014, 41–48.) Jos rakennuksen sisätiloissa on ylipainetta ja vaipparakenteen ilmansulussa vuotokohta, voi ilmavirran mukana kulkeutua vesihöyryä ulkoseinään tai yläpohjaan. Tämä puolestaan voi johtaa kosteuden kondensoitumiseen rakenteissa, mikä voi aiheuttaa haitallisen mikrobikasvuston muodostumista. (RT 05-10710 1999, 2–3.)

### 3.3.4 Diffuusio

Diffuusiolla tarkoitetaan aineen pitoisuuseroista johtuvaa molekyylien liikkumista. Rakennuksissa vesihöyryn diffuusiolla tarkoitetaan sitä, että kosteus siirtyy suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempään joko kiinteän aineen huokosissa

tai ilmassa. (Hautala & Peltonen 2005, 204–205.) Usein rakennuksissa on sisällä korkeampi kosteuspitoisuus, jolloin myös vesihöyry siirtyy usein sisältä ulospäin. Tästä syystä rakennusosissa käytetään monesti höyrinsulkua estämään vesihöyryn siirtymistä rakenteisiin. (RIL 255-1-2014, 41.)

### **3.3.5 Kondensoituminen**

Vesihöyryn kondensoitumisella tarkoitetaan kosteuden tiivistymistä nesteeksi ilman kosteuden ollessa suurempi kuin ilman lämpötilan kyllästyskosteus. Tämä voi tapahtua ilmassa, kiinteän aineen pinnalle tai ilmahuokosiin kiinteän aineen sisälle. (RT 05-10710 1999, 2.) Kondensoituminen on yleisintä rakennusten yläpohjarakenteissa, mistä syystä vesikatteen aluskate on usein kondenssisuojattu.

### **3.3.6 Rakennuskosteus**

Rakennuskosteus on rakennusmateriaaleihin tai rakennusosiin ennen rakennusvaihetta tai sen aikana joutunutta kosteutta, joka ylittää rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden. Rakennusosien tulisi olla sellaisia, että tämä kosteus pääsisi poistumaan aiheuttamatta kosteusvaurioita rakenteisiin. Oleellista on myös antaa rakennusosan kuivua riittävästi ennen peittävän pintakerroksen tai muun kuivumista haittaavan rakennusosan tekemistä. (RIL 255-1-2014, 42.)

### **3.3.7 Muut kosteuslähteet**

Kosteutta voi päästä rakenteisiin myös painovoiman tai tuulenpaineen vaikutuksesta sekä kapillaarisesti huokoisissa aineissa. Vesi pääsee valumaan painovoimaisesti kaltevilla ja pystysuorilla pinnoilla, mistä johtuen rakennuksen ulkopinnan ja siinä olevien kiinnitysten tulee olla tiiviitä vuotojen estämiseksi. Tuulenpaine puolestaan voi saada veden ja lumen nousemaan ylöspäin ulkoseinällä. Etenkin kivirakenteissa, kuten kevytsora tai betoni, kapillaarinen kosteuden siirtyminen on merkittävässä asemassa. Tämä kuitenkin edellyttää kosketusta veteen. (RT 05-10710 1999, 3–4.)

## **4 Mikrobikasvusto**

### **4.1 Rakennustekninen tarkastelu**

Rakenteiden kosteustekninen toimivuus voidaan rinnastaa suurilta osin siihen, alkaako rakenteissa muodostua mikrobikasvustoa vai ei. Tästä syystä tutkimme rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta pääsääntöisesti arvioimalla mikrobikasvuston muodostumisen todennäköisyyttä eri rakennusmateriaaleissa. Arviointi perustuu rakennusosan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan suhteesta aikaan, huomioiden kuitenkin kyseessä oleva materiaali. Luvussa 4.2 on kerrottu edellytyksiä mikrobikasvuston muodostumiselle ja luvussa 4.3 on esitetty käyttämämme aineistoa eri rakennusmateriaalien homehtumisen ja muun mikrobikasvuston muodostumisen mahdollisuutta arvioitaessa.

### **4.2 Edellytykset mikrobikasvuston muodostumiselle**

Perusedellytyksinä mikrobikasvuston, kuten home- ja lahottajasienet, muodostumiselle ovat sopiva lämpötila, kosteus, riittävä happi, ravinteet ja aika. Näistä oleellisimpana rajoittavana tekijänä kasvuston muodostumiselle voidaan pitää kosteutta, sillä mikrobit eivät kasva liian kuivissa olosuhteissa. Mikrobeja esiintyy kaikkialla ympäristössä, mutta osa niistä kuuluu rakennusten luontaiseen mikrobikuormitukseen. Liiallinen mikrobikasvusto kuitenkin voi aiheuttaa ongelmia rakennuksissa ja rakenteissa. (RT 08-11286 2017, 1–2.)

Homesienet eivät sinänsä ole vaarallisia rakenteille, mutta liiallinen homekasvuston esiintyminen rakenteissa voi aiheuttaa sisäilmaongelmia ja terveyshaittoja. Lahottajasienet puolestaan hajottavat puuta ja näin ollen myös heikentävät puun lujuusteknisiä ominaisuuksia, mutta vaativat usein hyvin kosteat olosuhteet. Eri-laiset mikrobikasvustot leviävät yleensä rihmaston avulla, minkä ansiosta ne voivat levitä hyvinkin laajalle alueelle. (Ympäristöministeriö 2016, 127–129.)

Mikrobikasvuston muodostuminen vaatii aina riittävästi kosteutta ja sopivan lämpötilan. Mikrobin kasvu on yleisesti mahdollista suhteellisen kosteuden (RH) ollessa vähintään 70...80 % ja lämpötilan ollessa välillä +5...50 °C. Mikrobin kasvu on nopeaa suhteellisen kosteuden ollessa yli 90 %. Optimaalisin tilanne

mikrobikasvuston muodostumiselle on silloin, kun lämpötila on +20-30 °C ja RH 95-99 %. Mikrobit eivät kasva alle 0:n °C lämpötilassa ja yleensä mikrobit vaativat vähintään +5:n °C lämpötilan. (Ympäristöministeriö 2016, 130–131.)

Materiaaliominaisuuksilla on suuri vaikutus siihen, kuinka herkästi home ja muut mikrobit alkavat kasvaa. Materiaali vaikuttaa myös siihen, minkälaista mikrobikasvustoa on mahdollista muodostua. Optimaalisissa olosuhteissa mikrobikasvustoa voi herkästi homehtuviin materiaaleihin muodostua jo muutamassa päivässä, kun taas kestävillä materiaaleilla tähän voi kulua vuosia. Lahosienet alkavat yleensä kehittyä puumateriaaleihin, jos kosteus pysyy korkeana useita kuukausia. (Ympäristöministeriö 2016, 130.)

### 4.3 Rakennusosien homehtumisriski

Kaavalla 8 saadaan määritettyä puisten rakennusosien suhteellisen kosteuden kriittinen raja-arvo ( $RH_{crit}$ ), jonka ylittyessä homeen kasvamiselle on suotuisat olosuhteet (Hukka & Viitanen 1999, 477).

$$RH_{crit} = -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100, \text{ kun } T \leq 20$$

$$RH_{crit} = 80 \%, \text{ kun } T > 20 \quad (8)$$

missä

$T$  lämpötila, [°C]

Taulukossa 3 on esitetty eri rakennusosien homehtumisriski suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan (RT 05-10710 1999, 6).

Taulukko 3. Rakennusosien homehtumisriski (RT 05-10710 1999, 6).

Rakennusosa	Homehtumisriski			
	RH <70 %	RH 70...80 %	RH 80...90 %	RH >90 % ja kapillaarialue
Rakennuksen ulkovaipan sisäosat, väliseinät ja välipohjat	vähäinen, vaikka kosteusrasitus on jatkuva	vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina	*vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina	rakennusosa on pääsääntöisesti korjattava, ellei kosteuspitoisuus esiinny vain lyhyinä jaksoina, esimerkiksi märkätilojen sisäpinoilla
Rakennuksen ulkovaipan ulko-osat	vähäinen, vaikka kosteusrasitus on jatkuva	vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai pidempiaikaisesti vuoden kylmimpänä aikana	*vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai kylminä vuodenaikoina	*rakennusosa on pääsääntöisesti korjattava, jos kosteuspitoisuus esiintyy pitkinä jaksoina, ellei rakenteen lämpötila ole samanaikaisesti alle 0 °C

\*Edellyttää laskennallista analyysiä.

Taulukossa 4 on esitetty eri rakennusmateriaalien homehtumisherkyys VTT-homeriskimallin mukaisesti (Ympäristöministeriö 2016, 133).

Taulukko 4. VTT-homeriskimallin mukaiset homehtumisherkyysluokat (Ympäristöministeriö 2016, 133).

Homehtumisherkyysluokka	Rakennusmateriaalit
HHL 1 hyvin herkkä	karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
HHL 2 herkkä	höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
HHL 3 kohtalaisen kestävä	mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
HHL 4 kestävä	lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuojaineita sisältävät materiaalit

## **5 Aiemmat tutkimukset kiristyvistä energiavaatimuksista**

Tässä luvussa on esitetty aiempia tutkimuksia sekä niiden taustaa kiristyvistä energiavaatimuksista. Luvussa 5.1 on kerrottu nykymääräysten mukaisia U-arvovaatimuksia varten tehdyistä selvityksistä rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Luvussa 5.2 on esitetty opinnäytetyömme kannalta oleelliset tulokset vuosina 2009–2012 toteutetusta FRAME-projektista, joka toimi merkittävänä lähtökohtana opinnäytetyöllemme.

Luvussa 5.3 on tarkasteltu lähes nollaenergiarakentamisen lainsäädäntöä varten laadituista selvityksistä rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta. Lisäksi luvussa on tuotu esille Rakennuslehdessä julkaistu artikkeli, jossa on haastateltu FRAME-projektin johdossa ollutta rakennusfysiikan professori Juha Vinhaa kiristyviä energiavaatimuksia varten tehdyistä selvityksistä. Pidimme tätä artikkelia opinnäytetyömme kannalta tärkeänä, koska tällöin saimme eriäviä näkemyksiä omia tarkastelujamme varten. Koska kyseessä on kuitenkin lehtiartikkeli, suhtauduimme siihen riittävällä kriittisyydellä.

### **5.1 Ympäristöministeriön selvityspyyntö vuonna 2008**

Ympäristöministeriö ilmoitti vuonna 2007 kiristävänsä energiamääräyksiä vuonna 2010 30–40 prosentilla. Kiristys tarkoitti muun muassa rakenteiden U-arvovaatimusten tiukentamista. Tätä varten ministeriö tilasi Tampereen teknilliseltä yliopistolta (TTY) selvityksen kiristyneen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. (Mölsä 2008.)

TTY:n todetessa tutkimuksessaan, että suunniteltuja kiristyksiä ei voida toteuttaa ilman lisääntyviä riskejä, lupasi ympäristöministeriö ottaa TTY:n kannan huomioon uusia säädöksiä laatiessaan. Ministeriö kaikesta huolimatta tilasi uuden tutkimuksen Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä (VTT), jonka mukaan kiristyksissä ei piile ongelmia, eikä pelkällä eristepaksuuden lisäämisellä olisi kosteusriskejä kasvattavaa vaikutusta. VTT kuitenkin totesi, että matalaenergiarakenteissa konvektio voi esiintyä voimakkaampana ja kosteuden seurannaisvaikutukset voivat lisääntyä verrattuna ohuempiin eristerakenteisiin. (Mölsä 2008.)

Ympäristöministeriön tiedotteessa todettiin, että energiasäästöillä voidaan jopa vähentää kosteusongelmia. Ministeriö perusteli kantaansa sillä, että VTT oli tutkimuksessaan korostanut tarkan suunnittelun ja toteutuksen merkitystä energiatehokkaissa rakenteissa. (Mölsä 2008.)

## 5.2 FRAME-projekti

Vuosina 2009-2012 Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitos toteutti yhteistyössä Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitoksen, Ilmatieteen laitoksen ja Mittaviiva Oy:n kanssa FRAME-projektin. Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia lämmöneristyksen lisäämisen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia rakennusten energiankulutukseen ja vaipparakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. (Vinha ym. 2013, 1, 7.) Projekti lähti liikkeelle TTY:n vuonna 2008 ympäristöministeriölle tekemästä selvityksestä rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta kiristyvien energiavaatimusten myötä (Vinha 2012, 6).

FRAME-projektissa selvisi, että lämmöneristeen lisäämisellä nykyisin voimassa olevien U-arvo vaatimusten täyttymiseksi ei olisi negatiivista vaikutusta kaikkien rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Esimerkiksi perinteinen betonisandwich-rakenne tai eristerapattu betonirakenne toimivat kosteusteknisesti, vaikka lämmöneristettä lisätäänkin, kunhan rakennusaikaisen kosteuden hallinnasta huolehditaan asianmukaisesti (Vinha ym. 2013, 330).

Kuitenkin rankarakenteisissa puuseinissä voi lämmöneristeen lisäämisestä koitua ongelmia. Tällöin ulkoseinän ulko-osat viilenevät, jolloin yhdessä ilmastonmuutoksen vaikutuksen kanssa kosteuden kondensoituminen ja homeen kasvu lisääntyvät niissä. Tiiliverhotussa tai rapatussa puurunkoisessa seinärakenteessa puolestaan on huolehdittava riittävästä tuuletusvälistä, jotta rakenteen kosteusteknistä toimivuutta saadaan parannettua. (Vinha ym. 2013, 330–331.)

Kevytbetonirakenteissa puolestaan ei tutkimuksen mukaan esiinny kosteuden tiivistymistä eikä homeen kasvua sisäpuolen eristeen ollessa XPS-, EPS- tai kalsiumsilikaattieristettä. Paksummat harkot vähentävät homeen muodostumista

entisestään. Edellytyksenä kosteustekniselle toimivuudelle on kuitenkin ulkopinnan toteuttaminen siten, että sadevesi ei pääse tunkeutumaan rakenteeseen kapillaarisesti. Tähän soveltuu muun muassa sementtirappaus. (Vinha ym. 2013, 332.)

FRAME-projektissa todettiin myös ilmastonmuutoksen ja U-arvojen kiristämisen heikentävän tuulettuvan yläpohjan ja ryömintätillaisen alapohjan kosteusteknistä toimintaa homeen kasvulle suotuisten olosuhteiden lisääntymisellä. Tutkimuksessa kävi kuitenkin ilmi, että ilmastonmuutoksella on suurempi vaikutus kuin U-arvojen kiristämällä. (Vinha ym. 2013, 332.)

Projektissa selvisi, että eristerakenteen lisääminen rakennuksen ulkovaippaan osaltaan parantaa rakennuksen energiatehokkuutta, mutta ei yksiselitteisesti tee siitä taloudellisempaa ratkaisua. Eristepaksuuden lisääminen lisää sisätilojen jäähdytystarvetta, jolloin säästetty energia voi kulua rakennuksen jäähdyttämiseen lämpimänä aikana. Tätä tarvetta lisää entisestään ilmaston lämpeneminen tulevaisuudessa. (Vinha ym. 2013, 335–336.)

### **5.3 Uudet energiakiristykset vuosina 2017–2020**

Vuoden 2016 syksyllä, kun ympäristöministeriö valmisteli taas kiristyviä energia-vaatimuksia eli lähes nollaenergiarakentamisen määräyksiä, tarvittiin jälleen selvitykset niiden toimivuudesta. Tätä varten TTY toimitti FRAME- ja COMBI-tutkimusten tulokset ympäristövaliokunnalle, mutta ympäristöministeriön VTT:ltä tilaama raportti kumosi TTY:n tulokset. VTT:n mukaan jälleen kiristyvät vaatimukset eivät heikennä rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. (Mölsä 2016.)

VTT:n raportissa todetaan, että uusien rakennusten energiatehokkuuden parantaminen ulkovaipan eristystä lisäämällä ei lisää kosteusteknisiä ongelmia. Raportin mukaan ongelmien lähteenä on yleensä puutteellinen suunnittelu tai toteutus sekä kunnossapidon laiminlyöminen. Energiatehokkuudesta tinkiminen ei VTT:n mukaan ole ratkaisu kosteusteknisten ongelmien ratkaisemiseksi. (Ojanen, Airaksinen & Tuomaala 2016, 27.)

VTT ilmoittaa raportissaan, että FRAME-hankkeessa todettu ulkopintojen viileneminen lämmöneristyksen lisäämisen seurauksena ei aiheuta ongelmia rakenteen kuivumisen kannalta. Lisäksi raportissa todetaan, että paksujen vaipparakenteiden toteuttaminen onnistuu hyvällä suunnittelulla yhtä helposti kuin tavanomaisen rakenteen toteuttaminen, jolloin myöskään rakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ei ilmene ongelmia. (Ojanen ym. 2016, 11–12.)

Molemmat näkemykset ovat päinvastaisia TTY:n FRAME-tutkimukseen verrattuna. Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan professori Juha Vinha (FRAME-projektin tutkimusjohtaja) kertoo Mölsän vuonna 2016 kirjoittamassa artikkelissa oman näkemyksensä VTT:n laatimasta raportista.

Vinhan toteaa artikkelissa, että VTT:n johtopäätökset ja tutkimukset ovat virheellisiä, sillä kuten jo FRAME-hankkeessa on käynyt ilmi, heikentää eristepaksuuden lisääminen monien nykyisten vaipparakenteiden kosteusteknistä toimivuutta. Erityisesti puurunkoiset rakenteet tai usealla eri lämmöneristeellä toteutetut rakenneratkaisut ovat alttiina kosteusvaurioille, mikäli lämmöneristettä joudutaan lisäämään entisestään. Lisäksi ongelmana on omatoimirakentajien puutteelliset tiedot ja taidot uusien rakenneratkaisujen oikeaoppiseen toteuttamiseen. (Mölsä 2016.)

Artikkelissa on listattu VTT:n laatiman raportin puutteita, sillä kyseiset puutteet vaikuttavat merkittävästi raportin perusteella tehtäviin johtopäätöksiin. Raportissa esitetyt koerakennukset ovat ideaalirakennuksia, eli ne on toteutettu parhaan asiantuntemuksen ja tietotaidon avulla, mikä vääristää tuloksia keskivertorakentamiseen verrattuna. Lisäksi raportissa on esitetty vain yksittäisiä tutkimuskohteita, ja käsitellyt rakenteet ovat sellaisia, jotka myös TTY on todennut toimiviksi. (Mölsä 2016.)

Puutteita esiintyy myös VTT:n tutkimusmenetelmien valinnassa sekä tulosten tulokinnassa. Raportissa ei käsitellä ilmastomuutoksen vaikutusta ollenkaan, ja joissakin tuloksissa ei ole otettu huomioon suhteellista kosteutta, joka on oleellinen tekijä homeutumisriskiä tarkasteltaessa. Myös ylipaineen vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan on jätetty huomioimatta. (Mölsä 2016.)

Vinha antaa artikkelissa vastauksen VTT:n kantaan FRAME-hankkeesta. VTT:n mukaan FRAME-tutkimuksessa ei olisi perusteltu kaikkia johtopäätöksiä, vaikka ne ovatkin perusteltu hankkeen loppuraportin tiivistelmässä. VTT:n raportissa on todettu, että FRAME-tutkimuksessa olisi ristiriitaisia tuloksia ja päätelmiä, vaikka näin ei kuitenkaan ole. (Mölsä 2016.)

Artikkelin loppuun Vinha toteaa, että lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoja ei tulisi tiukentaa, sillä vaikutuksista ei vielä ole riittävästi tutkimustietoa. Lisäksi eristemäärän lisääminen hankaloittaisi rakenteiden turvallista toteuttamista etenkin puurunkoisissa seinissä, sillä sahatavaran vakiokoot eivät näin ollen riittäisi perinteiseen toteuttamistapaan. Vinha huomauttaa artikkelissa, että VTT:n mukaan ulkoseinän eristepaksuuden lisääminen edustaisi vain vähäistä muutosta, vaikka muutos onkin 50 % suurempi. (Mölsä 2016.)

#### **5.4 Pääpiirteet aiemmista tutkimuksista**

Aiemmista tutkimuksista huomasimme, että TTY:llä ja VTT:llä on useaan otteeseen ollut eriäviä näkemyksiä rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta. TTY:n mukaan kiristyvillä energiavaatimuksilla on negatiivisia vaikutuksia rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen ja jopa lämpöominaisuuksiin. VTT puolestaan toteaa, että energiavaatimusten kiristymisellä ei ole rakenteiden kosteusriskejä lisäävää vaikutusta.

Oma kantamme oli alun perin enemmän TTY:n puolelle jo ennen näiden tutkimusten tarkempaa tarkastelua. Lähtökohtana opinnäytetyöllemme oli kuitenkin molempien näkemysten huomioon ottaminen ja rakenteiden kosteusteknisen toiminnan objektiivinen tarkastelu.

## **6 Rakennusfysikaalinen mallinnus**

### **6.1 Rakenteiden tarkastelu mallintamalla**

Suoritimme määrittämiemme rakenteiden kosteusteknisen tarkastelun mallintamalla. Näin saimme tutkittua rakenteita sellaisinaan sekä otettua huomioon muuttuvat ilmasto-olosuhteet. Ajan puute oli myös oleellinen tekijä siihen, että valitsimme mallintamisen tutkimusmenetelmäksi. Mallinnuksesta saadut tulokset ovat kuitenkin vain teoreettisia, minkä otimme huomioon tuloksia analysoidessa.

Luvussa 6.2 on kerrottu yleistä tietoa käyttämistämme mallinnusohjelmista. Luvuissa 6.3 ja 6.4 on esitetty mallinnettavat rakenteet sekä niille valitut tarkastelupisteet. Luvut 6.5 ja 6.6 käsittelevät mallinuksessa käytettyjä ilmasto-olosuhteita ja sitä, kuinka ne ovat määritetty.

### **6.2 Käytetyt mallinnusohjelmat**

#### **6.2.1 WUFI Pro 5.1**

WUFI Pro on saksalaisen Fraunhofer IBP:n (Fraunhofer Institute for Building Physics) luoma rakennusfysikaalinen mallinnusohjelma rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä tarkastelua varten. Ohjelmalla pystyy mallintamaan yksiulotteisia rakenteita nopeasti ja tarkasti. Ohjelman käyttäminen on yksinkertaista, sillä tutkittaville rakenteille tarvitsee määrittää vain käytettävät materiaalit, sisä- ja ulkoilmaolosuhteet sekä laskennan lähtötilanne, minkä jälkeen ohjelma ratkaisee mallin valitulle ajanjaksolle. (Fraunhofer IBP 2018.)

WUFI Pro -ohjelmistolla mallinnetuissa rakenteissa materiaalien lämmönjohtavuus on esitetty sekä kosteuspitoisuudesta että lämpötilasta riippuvaisena. Materiaalien kosteuspitoisuus puolestaan on esitetty suhteellisesta kosteudesta riippuvaisena. Kosteusdiffusiviteetit on annettu kosteuspitoisuuden suhteen. Mallinnuksen kannalta on oleellista huomata, että monet arvot ovat toisesta tekijästä riippuvaisia, mikä edesauttaa mallien tarkkuuteen. Esimerkiksi lämmönjohtavuuden ollessa riippuvainen kosteudesta ja lämpötilasta muuttuu myös rakenteen

lämmönläpäisykerroin todellisuudessa sen mukaisesti. Koska tarkoituksenamme oli tarkastella rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta, etenkin kosteuteen sidonnaiset materiaaliparametrit olivat malliemme kannalta tärkeitä. Liitteessä 1 on esitetty WUFI Pro -ohjelmistossa käytetyt materiaaliparametrit.

WUFI Pro -ohjelmiston käytöstä helppoa tekee ohjelman sisäinen laaja materiaalikirjasto, yksinkertainen käyttöliittymä, pääsääntöisesti automatisoitu laskenta-prosessi sekä mahdollisuus valita ulkoilmaolosuhteet eri kriteerien mukaisesti tai todellisten mittausten pohjalta laadittuun dataan perustuen. Valmiiden säätietojen lisäksi mallinnuksen voi suorittaa myös omalla säädatalla.

Mallin luominen WUFI Pro -ohjelmistossa on jo pelkän mallipuun perusteella melko yksinkertaista. Määritettäviä kohtia ei ole montaa ja ohjelma ilmoittaa vihreällä väkäsellä, kun kaikki tarvittavat määritykset on tehty. Lisäksi mallipuuta ei tarvitse itse luoda, vaan se on automaattinen. Malliin valitut tarkastelupisteet on merkitty pienillä videokameroilla mallin geometriassa. Liitteessä 2 on havainnollistettu mallin luomista WUFI Pro -ohjelmistossa.

### **6.2.2 COMSOL Multiphysics 5.3a**

COMSOL Multiphysics on Ruotsista lähtöisin olevan COMSOL Inc. -yhtiön luoma avoin ohjelmisto tekniikan alan sovellutuksien mallintamiseen ja simulointiin. Näihin kuuluvat muun muassa lujuusopilliset mallit, akustiset ominaisuudet, lämmön- ja kosteuden siirtyminen, sähkömagnetismi ja kemiallinen käyttäytyminen. Ohjelmistolla on mahdollista mallintaa niin yksiulotteisia kuin kolmiulotteisiakin rakenteita ja malleja. COMSOL-ohjelmiston laskenta perustuu FEM-analyysiin (Finite Element Method) ja osittaisdifferentiaaliyhtälöihin. Lisäksi ohjelman avoimuus mahdollistaa usean erilaisen simuloinnin suorittamisen samassa mallissa. (COMSOL Inc. 2018.)

COMSOL-ohjelmistolla mallinnetuissa rakenteissa lämmönjohtavuus, kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti, kosteuspitoisuus ja vesihöyrynläpäisevyys on esitetty materiaalista riippuen suhteellisesta kosteudesta tai lämpötilasta riippuvaisena. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin on esitetty puussa vesihöyryn läpäisevyyteen riippuvaisena funktiona, mutta muissa materiaaleissa se on

vakioarvo. Myös COMSOL-ohjelmistossa materiaaliparametrien riippuvaisuus muista tekijöistä antaa tarkemman laskentatuloksen, mutta myös hidastaa laskentaa. Nämä riippuvaisuudet olivat kuitenkin tuloksiemme kannalta tärkeitä, sillä tällöin saimme paremman ja totuudenmukaisemman kuvan siitä, kuinka kosteus liikkuu rakenteissa ja mitkä seikat vaikuttavat siihen. Liitteessä 3 on esitetty COMSOL-ohjelmistossa käytetyt materiaaliparametrit.

COMSOL-ohjelmistossa on melko suppea sisäinen rakennustekniikan materiaalikirjasto, mutta mallintamillamme rakenteille löytyi tarvittavat materiaalitiedot suoraan ohjelmasta. Haastavaa COMSOL-ohjelmiston käytöstä tekee sen avoimuus, koska tällöin käyttäjän on itse määritettävä käytettävät parametrit tutkimaan mallin ratkaisuun. Näin ollen myös virheen mahdollisuus kasvaa, mistä syystä suoritimme useita koelaskentoja ennen varsinaisten simulointien suorittamista. Ohjelmistossa on WUFI Pro -ohjelmiston tapaan mahdollista käyttää omaa säädataa.

Mallipuu COMSOL-ohjelmistossa on huomattavasti monimutkaisempi kuin WUFI Pro -ohjelmistossa ja se täytyy luoda itse. Mallinnettaessa 3D-rakenteita on geometriankin luominen monimutkaisempaa kuin 1D-rakenteissa. Tästä syystä loimme geometriat malleillemme Autodeskin AutoCAD-ohjelmalla. Mallin ratkaisunopeuteen vaikuttaa merkittävästi malliin luotu ”verkko”. Verkon risteyskohdat määrittävät ne pisteet, joihin ohjelma laskee tulokset. Tiheämpi verkko antaa tarkemmat tulokset, mutta on myös laskennan kannalta raskaampi. Liitteessä 4 on havainnollistettu mallin luomista COMSOL-ohjelmistossa.

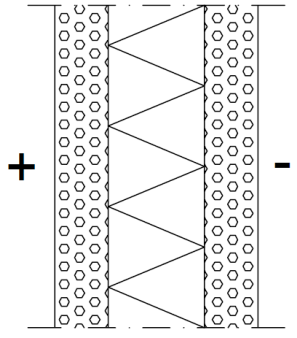
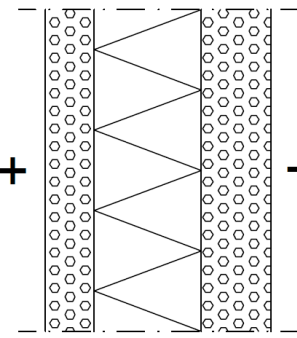
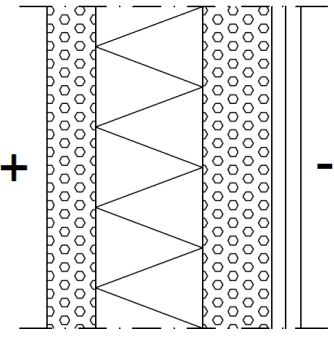
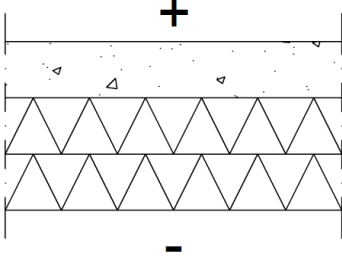
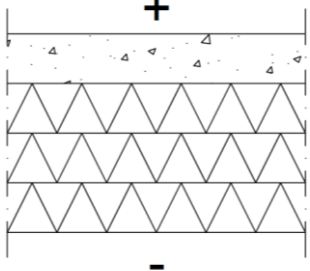
### **6.3 Mallinnetut rakenteet**

Tutkittavia rakenteita meillä oli yhteensä kymmenen kappaletta. Näihin sisältyi kolme kivirakenteista ulkoseinää, kolme puurakenteista ulkoseinää, kaksi alapohjaa ja kaksi yläpohjaa. Yksiulotteiset rakenteet eli alapohjat ja kivirakenteiset ulkoseinät mallinsimme WUFI Pro -ohjelmistolla. Loput rakenteet ovat kolmiulotteisia, joten niiden mallintamiseen käytimme COMSOL-ohjelmistoa. Taulukossa 5 on esitetty COMSOL-ohjelmistolla mallinnetut rakenteet ja taulukossa 6 on esitetty WUFI Pro -ohjelmistolla mallinnetut rakenteet.

Taulukko 5. COMSOL-ohjelmistolla mallinnetut rakenteet.

Rakenteen nimi	Mallinnus-ohjelma	Rakenne sisältä ulospäin	Rakenneleikkaus
US1A	COMSOL	Kipsilevy 13 mm Vaakakoolaus 48 x 48 + min.villa Höyrynsulkumuovi Runko 48 x 198 + min.villa Tuulensuojalevy 12 mm Pystykoolaus + tuuletus 25 mm Ulkoverhouspaneeli 28 mm  (U-arvo 0,16 W/m <sup>2</sup> K)	
US1B	COMSOL	Kipsilevy 13 mm Vaakakoolaus 48 x 48 + min.villa Höyrynsulkumuovi Runko 2x 48 x 148 + min.villa Tuulensuojalevy 12 mm Pystykoolaus + tuuletus 25 mm Ulkoverhouspaneeli 28 mm  (U-arvo 0,12 W/m <sup>2</sup> K)	
US1C	COMSOL	Kipsilevy 13 mm Vaakakoolaus 48 x 48 + min.villa Höyrynsulkumuovi Runko 48 x 248 + min.villa Vaakakoolaus 48 x 48 + min.villa Tuulensuojalevy 25 mm Pystykoolaus + tuuletus 25 mm Ulkoverhouspaneeli 28 mm  (U-arvo 0,12 W/m <sup>2</sup> K)	
YP1A	COMSOL	Kipsilevy 13 mm Koolaus 48 x 48 + min.villa Höyrynsulkumuovi Alapaarre 100 mm + min.villa Puhallusvilla 500 mm  (U-arvo 0,09 W/m <sup>2</sup> K)	
YP1B	COMSOL	Kipsilevy 13 mm Koolaus 48 x 48 + min.villa Höyrynsulkumuovi Alapaarre 100 mm + min.villa Puhallusvilla 750 mm  (U-arvo 0,07 W/m <sup>2</sup> K)	

Taulukko 6. WUFI Pro -ohjelmistolla mallinnetut rakenteet.

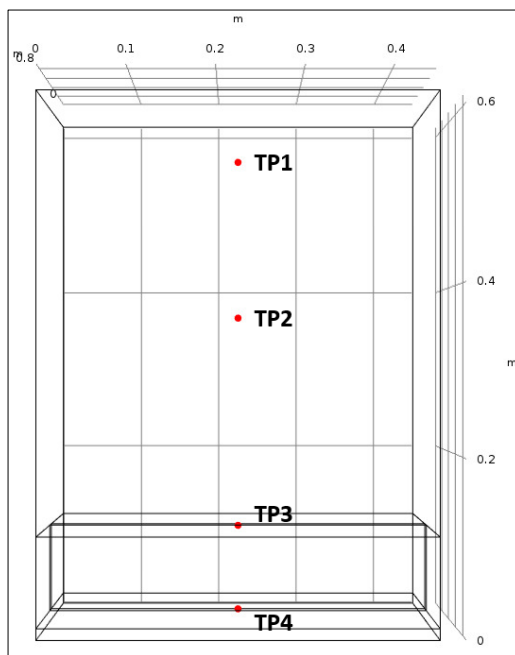
Rakenteen nimi	Mallinnus-ohjelma	Rakenne sisältä ulospäin	Rakenneleikkaus
US2A	WUFI	Kevytsoharkko 100 mm EPS eriste 180 mm Kevytsoharkko 100 mm  (U-arvo 0,15 W/m <sup>2</sup> K)	
US2B	WUFI	Kevytsoharkko 90 mm PU eriste 200 mm Kevytsoharkko 130 mm  (U-arvo 0,12 W/m <sup>2</sup> K)	
US2C	WUFI	Kevytsoharkko 90 mm PU eriste 200 mm Kevytsoharkko 130 mm Pystykoolaus + tuuletus 25 mm Ulkoverhouspaneeli 28 mm  (U-arvo 0,12 W/m <sup>2</sup> K)	
AP1A	WUFI	Betonilaatta 100 mm EPS eriste 200 mm  (U-arvo 0,14 W/m <sup>2</sup> K)	
AP1B	WUFI	Betonilaatta 100 mm EPS eriste 300 mm  (U-arvo 0,10 W/m <sup>2</sup> K)	

Kaikissa rakennetyypeissä A-versiot ovat sellaisia, jotka täyttävät nykymääräysten mukaiset U-arvovaatimukset. B-versiot täyttävät uusien määräysten mukaiset rakenteellisen energiatehokkuuden edellyttämät U-arvovaatimukset. C-versiot ovat vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa uusien vaatimusten mukaiset rakenteet.

## 6.4 Valitut tarkastelupisteet

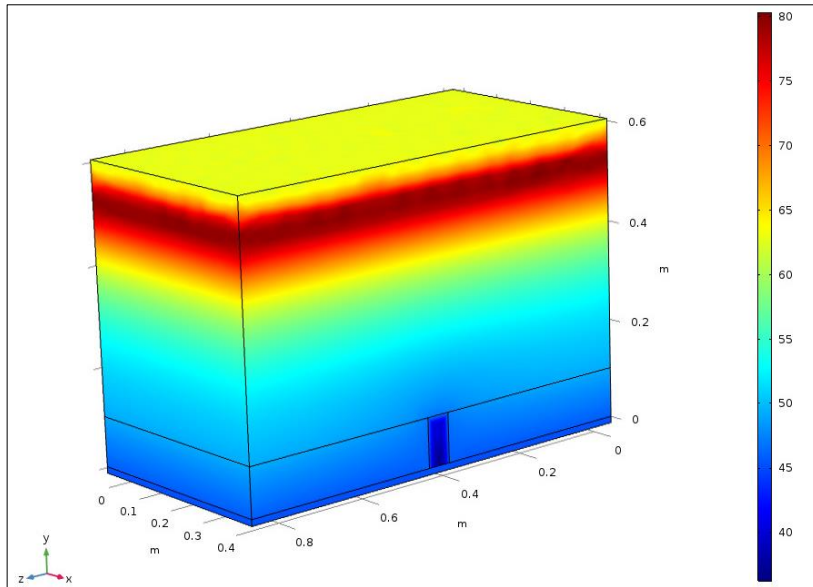
### 6.4.1 Yläpohjien tarkastelupisteet

Yläpohjien tarkastelupisteiksi valitsimme puhallusvillan yläosan (TP1), puhallusvillan puolivälin (TP2), alapaarteen yläpinnan (TP3) ja alapaarteen alapinnan (TP4). Kuvassa 3 on esitetty yläpohjien tarkastelupisteet.



Kuva 3. Yläpohjien tarkastelupisteet, esimerkkinä YP1A.

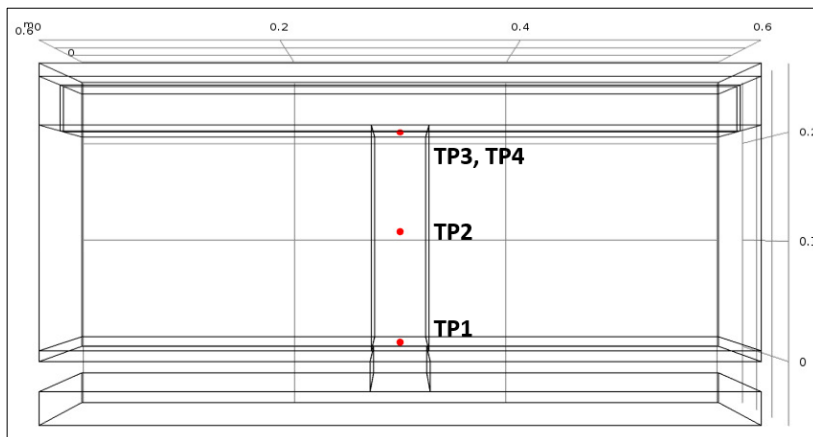
Tarkastelupiste 1:n määritimme noin 60 mm puhallusvillan yläpinnasta alaspäin, koska huomasimme mallinnuksen aikana, että siinä kohdin kosteuspitoisuus on usein korkeampi kuin aivan yläpinnassa (kuva 4). Tarkastelupiste 2 on valittu puhallusvillan puoliväliin, koska siinä eriste on jo huomattavasti lämpimämpi kuin yläpinnassa, vaikka kosteuspitoisuus olisikin hieman matalampi. Tarkastelupisteet 3 ja 4 ovat kiinnostavia, koska ne sijaitsevat eri materiaalien rajapinnoissa.



Kuva 4. YP1A:n suhteellinen kosteus toukokuun lopussa.

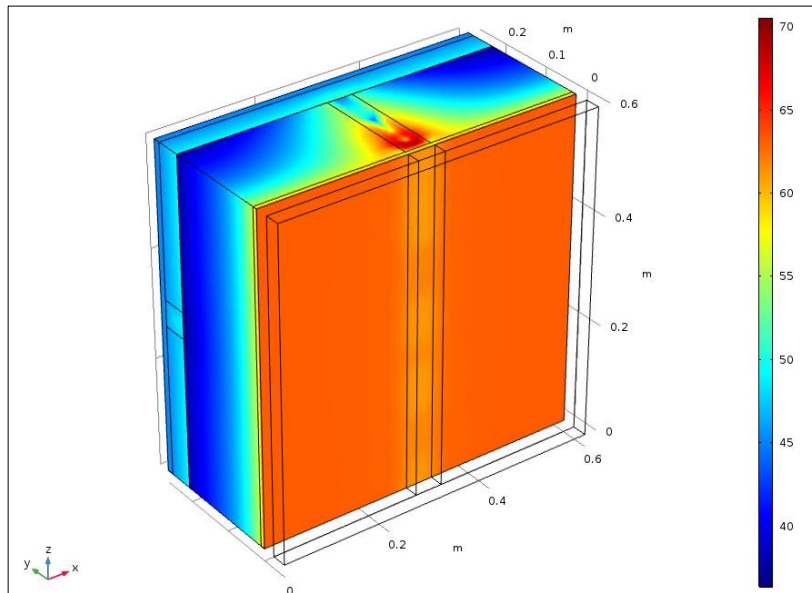
#### 6.4.2 Puu-ulkoseinien tarkastelupisteet

Puu-ulkoseinien tarkastelupisteiksi valitsimme tuulensuojalevyn sisäpinnan (TP1), höyrynsulun ulkopuolisen eristeen puolivälin (TP2), höyrynsulun ulkopinnan (TP3) ja höyrynsulun sisäpinnan (TP4). Kuvassa 5 on esitetty puu-ulkoseinien tarkastelupisteet.



Kuva 5. Puu-ulkoseinien tarkastelupisteet, esimerkkinä US1A.

Tarkastelupisteet 1, 3 ja 4 ovat kiinnostavia, koska ne sijaitsevat eri materiaalien rajapinnoissa. Tarkastelupisteen 2 valitsimme eristemassan puoliväliin, jotta pystyimme seuraamaan kosteuden ja lämpötilan siirtymistä rakenteen läpi (kuva 6). Kaikki tarkastelupisteet on sijoitettu rungon kohdalle, koska se on mikrobikasvuston kannalta herkin rakenneosia.

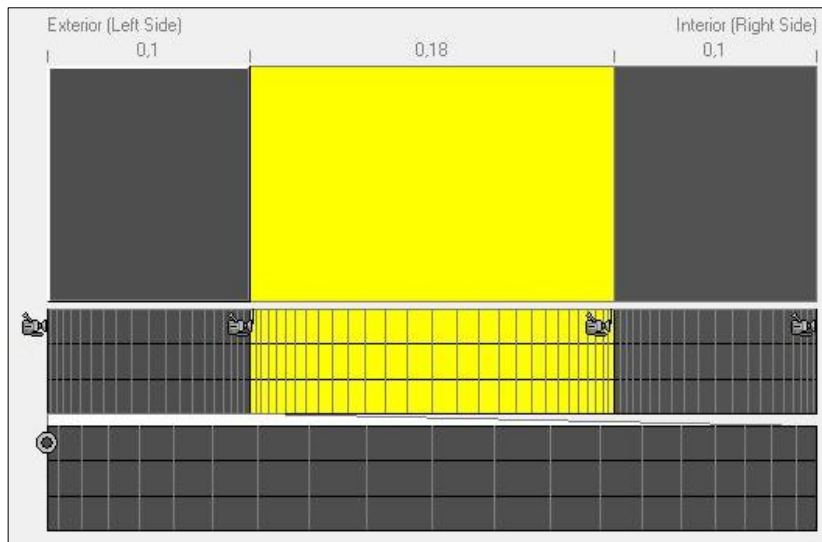


Kuva 6. US1A:n suhteellinen kosteus toukokuun lopussa.

### 6.4.3 Kiviulkoseinien tarkastelupisteet

Kiviulkoseinien tarkastelupisteiksi valitsimme kaikki rajapinnat eli ulkopinnan (TP1), eristeen ulkopinnan (TP2), eristeen sisäpinnan (TP3) ja sisäpinnan (TP4). US1C:ssä tarkastelupiste 1 on eristeharkon ulkopinnassa. Kivirakenteissa emme määrittäneet tarkastelupistettä eristemassan keskelle, koska kyseessä on kova muovieriste. Tällöin eristeen rajapinnat ovat kiinnostavampia.

Tulosten tarkastelussa on kuitenkin huomioitu vain kaksi ensimmäistä tarkastelupistettä, sillä muovieriste toimii höyrynsulkuna. Tällöin se estää tehokkaasti kosteuden siirtymisen eristeen sisäpuolelle, jolloin eristeen sisäpinnan kosteus on lähes sama kuin sisäkosteus. Kuvassa 7 on esitetty videokameroilla kiviulkoseinien tarkastelupisteet siten, että vasen puoli on rakenteen ulkopinta.



Kuva 7. Kiviulkoseinien tarkastelupisteet, esimerkkinä US2A.

#### 6.4.4 Alapohjien tarkastelupisteet

Alapohjien tarkastelupisteiksi valitsimme alimman eristeen alapinnan (TP1) ja alimman eristeen yläpinnan (TP2). Tarvetta muille pisteille ei ollut, sillä kuten kiviulkoseinissäkin, kova muovieriste estää tehokkaasti kosteuden siirtymisen syvemmälle rakenteeseen. Näin ollen tarkastelupiste 2 ei ole koskaan kriittisissä olosuhteissa

#### 6.5 Ilmasto-olosuhteet mallintamisessa

Ilmasto-olosuhteiksi malleihin valitsimme Ilmatieteen laitoksen luomat rakennusfysiikan testivuosiin määritellyt ilmasto-olosuhteet. Käytimme mallintamisessa Vantaan 2007, 2030, 2050 ja 2100 vuosien dataa (Ilmatieteen laitos 2014). Näistä vuoden 2007 data perustuu todellisiin mittauksiin, kun taas tulevaisuuden ilmasto-olosuhteet ovat laskennallisesti laadittuja, olettaen, että ilmastonmuutos jatkuu nykyistä tahtia. Rakenteiden sisäpuolisina olosuhteina puolestaan käytimme lämpötilan arvona +21 °C ja suhteellisen kosteuden arvona 45 %.

WUFI Pro -ohjelmistolla mallinnettavat rakenteet mallinsimme jokaisella rakennusfysiikan testivuodella, jotta saimme selville mikä tulevaisuuden testivuosisista olisi kriittisin kunkin rakenteen kosteusteknistä tarkastelua varten. COMSOL-oh-

jelmistolla tarkastelimme valittuja rakenteita nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa. Päädyimme tähän ratkaisuun, koska mallintaminen COMSOL-ohjelmistolla vie paljon aikaa. Lisäksi pientalojen puurakenteiden suunnitellun käyttöiän ollessa noin 50 vuotta on sääolosuhteiden tarkastelu järkevämpää 2050 vuoden ilmasto-olosuhteilla kuin vuoden 2100 ilmasto-olosuhteilla.

## 6.6 Maan olosuhteet alapohjien mallintamisessa

Alapohjien mallintamista varten emme voineet käyttää suoraan rakennusfysikaalisten testivuosien mukaisia sääolosuhteita, mutta saimme laskettua niitä vastaavat maan olosuhteet Suomen rakentamismääräyskokoelma D5:stä löytyvillä kaavoilla. Kaavalla 9 saadaan laskettua alapohjan alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila. Kaavassa 9 alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan erona käytetään D5:n ohjeiden mukaisesti arvoa 5 °C.

$$T_{maa,vuosi} = T_{u,vuosi} + \Delta T_{maa,vuosi} \quad (9)$$

missä

$T_{maa,vuosi}$	alapohjan alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila, [°C]
$T_{u,vuosi}$	ulkoilman vuotuinen keskilämpötila, [°C]
$\Delta T_{maa,vuosi}$	alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero, [°C]

Kaavalla 10 saadaan määritettyä alapohjan alapuolisen maan kuukausittainen keskilämpötila.

$$T_{maa,kuukausi} = T_{maa,vuosi} + \Delta T_{maa,kuukausi} \quad (10)$$

missä

$T_{maa,kuukausi}$	alapohjan alapuolisen maan kuukausittainen keskilämpötila, [°C]
$T_{maa,vuosi}$	alapohjan alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila, [°C]

$\Delta T_{\text{maa,kuukausi}}$ 

alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen keskilämpötilan ja vuotuisen keskilämpötilan ero (taulukko 7), [°C]

Taulukko 7. Alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen keskilämpötilan ja vuotuisen keskilämpötilan ero (Suomen rakentamismääräyskokoelma D5).

Kuukausi	$\Delta T_{\text{maa, kuukausi}}$ , °C
Tammikuu	0
Helmikuu	-1
Maaliskuu	-2
Huhtikuu	-3
Toukokuu	-3
Kesäkuu	-2
Heinäkuu	0
Elokuu	1
Syyskuu	2
Lokakuu	3
Marraskuu	3
Joulukuu	2

## 7 Tulokset nykyilmastossa

### 7.1 Tulosten tarkastelu nykyilmastossa

Tarkastelimme mallinnoista saatuja tuloksia ensin nykyilmastossa eli rakennusfysiikan testivuodeksi määritetyssä Vantaa 2007 -ilmastossa. Näin saimme kullekin rakenteella vertailukohtaan kriittisiä ilmasto-olosuhteita varten. Luvussa 8 puolestaan on esitetty kriittisten ilmasto-olosuhteiden tulokset.

Tuloksissa on esitetty kunkin rakenteen eri tarkastelupisteiden kriittiset olosuhteet ajan suhteen sekä U-arvon kehittyminen olosuhteiden muuttuessa. Ajasta riippuvainen tarkastelu on oleellista mikrobikasvuston muodostumisen mahdollisuutta arvioitaessa. Kaikissa rakenteissa tulokset on esitetty tunnin välein yhden vuoden ajalta.

Tuloksissa on tarkasteltu pisimpiä yhtenäisiä ajanjaksoja jolloin rakenteet ovat kriittisissä olosuhteissa, kriittisten olosuhteiden osuutta koko vuodesta sekä U-

arvon muuttumista vuoden aikana. Pisimpään yhtenäiseen kriittisten olosuhteiden ajanjaksoon on huomioitu yhden vuorokauden taantuma-aika. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka olosuhteet eivät olisi laskennallisesti kriittisellä alueella alle vuorokauteen, ne huomioidaan kriittisen ajan pituudessa. Taantuma-ajan määrittämistä varten ei ole selkeää ja yksiselitteistä ohjeistusta, joten pidimme yhtä vuorokautta järkevänä vaihtoehtona. Liitteessä 5 on esimerkkikuvaajia yhtenäisten kriittisten ajanjaksojen määrittämistä varten.

Kivirakenteissa mallinsimme viiden vuoden jakson, josta tarkastelimme viimeistä vuotta. Tällä tavoin saimme huomioitua kivirakenteiden olosuhteiden tasapainotumisen, joka voi kestää useamman vuoden. Puurakenteet puolestaan mallinsimme vain yhdellä vuodella siten, että mallinsimme ensin tasapainotetun tilanteen mallin lähtöarvoksi.

U-arvojen kehityksessä esiintyi COMSOL-ohjelmiston laskutavasta johtuen suuriakin vaihteluita todelliseen U-arvoon nähden. Tästä syystä U-arvot ovat esitetty kahden vuorokauden keskiarvoina, joihin on sallittu maksimissaan 20 %:n poikkeama laskennallisesta U-arvosta. Tämä on tuloksissa esitetty korjattuna U-arvona. WUFI Pro antoi U-arvot automaattisesti kuukauden tarkkuudella, joten niihin emme tehneet muutoksia. U-arvoista on esitetty ohjelmien antamat tarkat tulokset sekä liukuva keskiarvo.

Luvuissa 7.2–7.5 on esitetty rakennetyypeittäin mallinnoista saadut laskentatulokset nykyilmastossa. Kaikkien tulosten yhteenveto on esitetty luvussa 8.6.

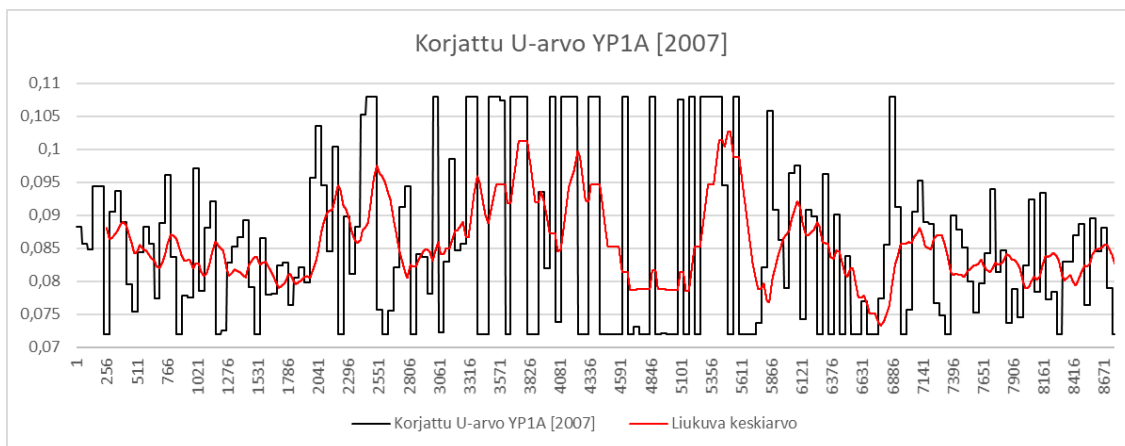
## **7.2 Yläpohjien tulokset nykyilmastossa**

Yläpohjien ollessa puurakenteisia, määräytyvät kriittiset olosuhteet kaavan 8 (luku 4.3) mukaisesti. Taulukossa 8 on esitetty yläpohjien pisimmät yhtenäiset ajat kriittisissä olosuhteissa sekä kriittisten olosuhteiden osuus koko vuodesta. Yläpohjien nykyilmaston tuntikohtaiset laskentatulokset suhteelliselle kosteudella ja lämpötilalle löytyvät liitteestä 6. Kuviossa 1 näkyy YP1A:n U-arvon muuttuminen ja kuviossa 2 YP1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana.

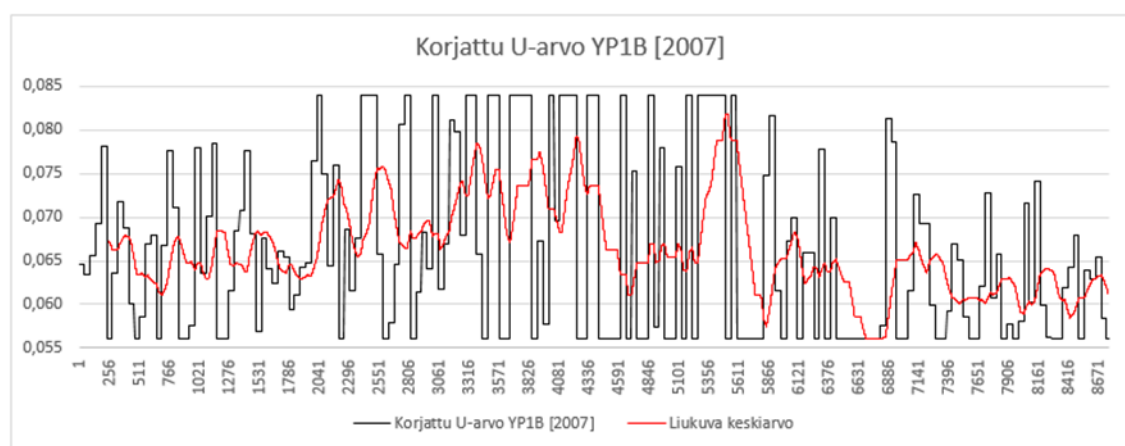
Taulukko 8. Yläpohjien kriittiset olosuhteet nykyilmastossa.

YP1		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta [%]
Rakenne	TP		[h]	[d]	
YP1A	1	2007	557	23,2	25
	2		169	7,0	9
	3		0	0	0
	4		0	0	0
YP1B	1	2007	558	23,3	27
	2		630	26,3	9
	3		0	0	0
	4		0	0	0

TP = Tarkastelupiste



Kuvio 1. YP1A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.



Kuvio 2. YP1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.

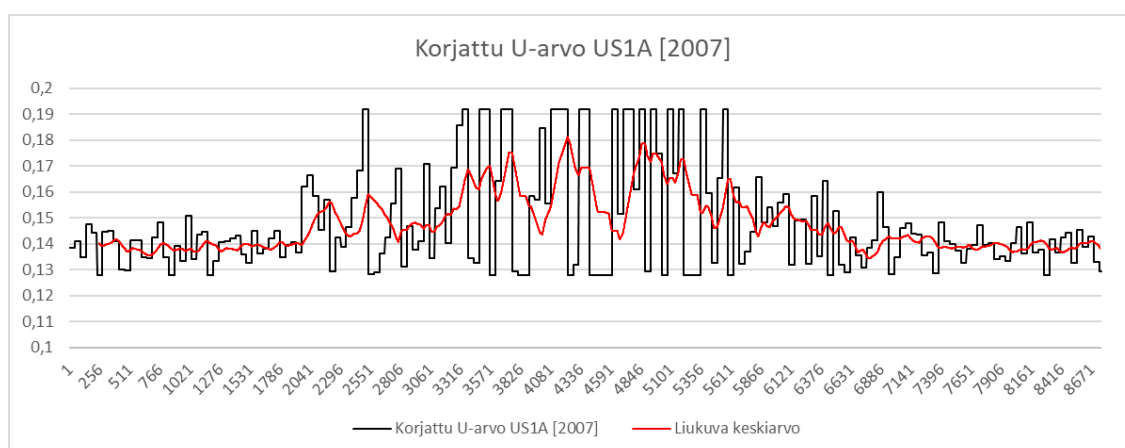
### 7.3 Puu-ulkoseinien tulokset nykyilmastossa

Myös puu-ulkoseinien kriittisten olosuhteiden määrittämiseen on käytetty kaavaa 8 (luku 4.3). Taulukossa 9 on esitetty puisten ulkoseinien pisimmät yhtenäiset ajat kriittisissä olosuhteissa sekä kriittisten olosuhteiden osuus koko vuodesta. Liitteestä 6 löytyy tunti-kohtaiset laskentatulokset puu-ulkoseinien suhteelliselle kosteudelle ja lämpötilalle nykyilmastossa. Kuvioissa 3–5 on esitetty puisten ulkoseinien U-arvojen muuttuminen vuoden aikana.

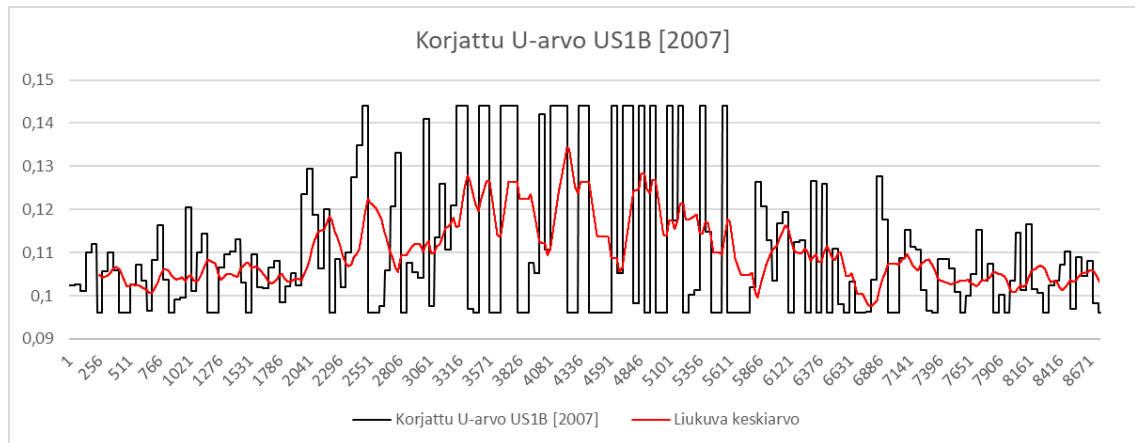
Taulukko 9. Puu-ulkoseinien kriittiset olosuhteet nykyilmastossa.

US1		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta [%]
Rakenne	TP		[h]	[d]	
US1A	1	2007	571	23,8	25
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US1B	1	2007	586	24,4	27
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US1C	1	2007	561	23,4	33
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0

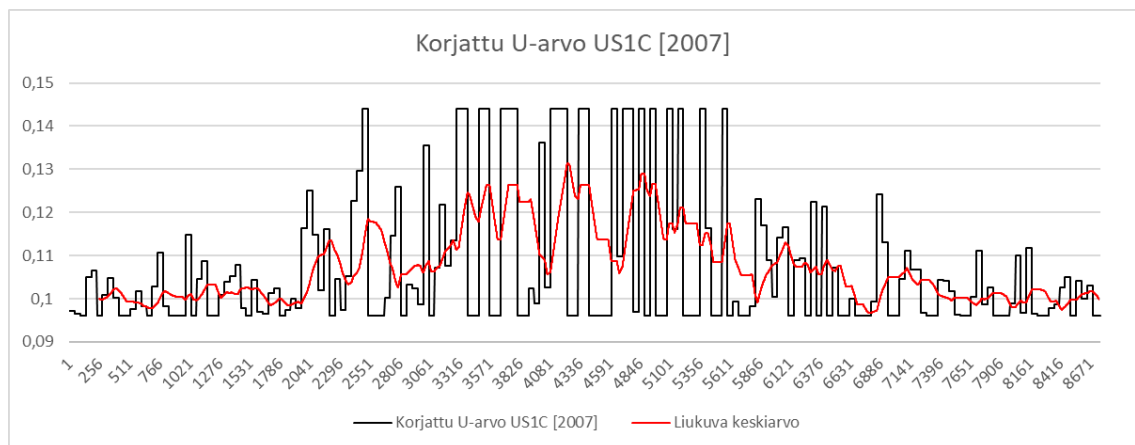
TP = Tarkastelupiste



Kuvio 3. US1A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.



Kuvio 4. US1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.



Kuvio 5. US1C:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.

## 7.4 Kiviulkoseinien tulokset nykyilmastossa

Koska kivirakenteiden kriittisten olosuhteiden määrittämiseen ei ole vastaavaa kaavaa kuin puurakenteille, määritimme raja-arvo-olosuhteet itse. Tähän käytimme apunamme luvussa 4.2 esitettyjä edellytyksiä mikrobikasvuston muodostumiselle sekä luvun 4.3 taulukoita 3 ja 4. Näiden perusteella määritimme kriittisten olosuhteiden lämpötilan alarajaksi +10 °C ja suhteellisen kosteuden alarajaksi 90 %.

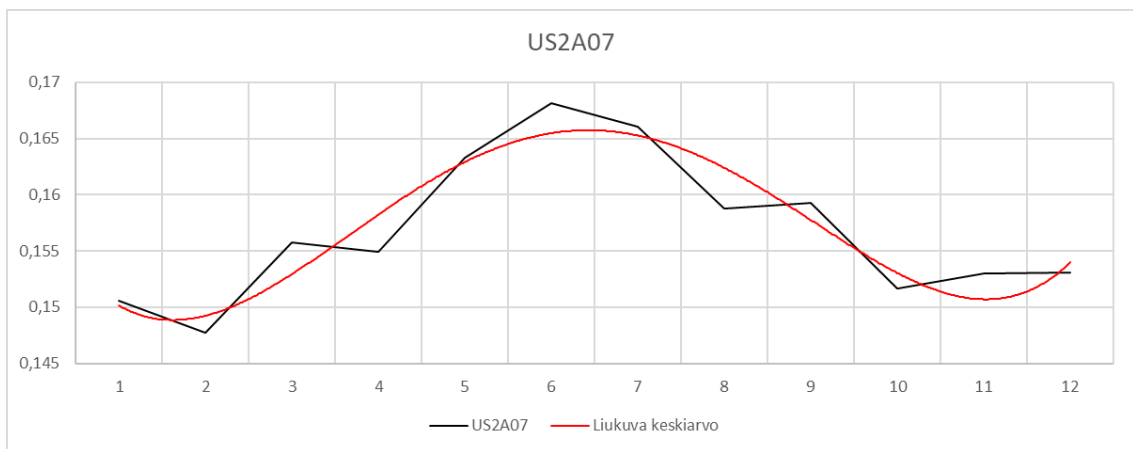
Taulukossa 10 on esitetty kiviulkoseinien pisimmät yhtenäiset ajat kriittisissä olosuhteissa sekä kriittisten olosuhteiden osuus koko vuodesta. Tuntikohtaiset laskentatulokset kiviseinien lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle nykyilmastossa

löytyvät liitteestä 6. Kuvioissa 6–8 näkyy kivirakenteisten ulkoseinien U-arvojen muuttuminen vuoden aikana.

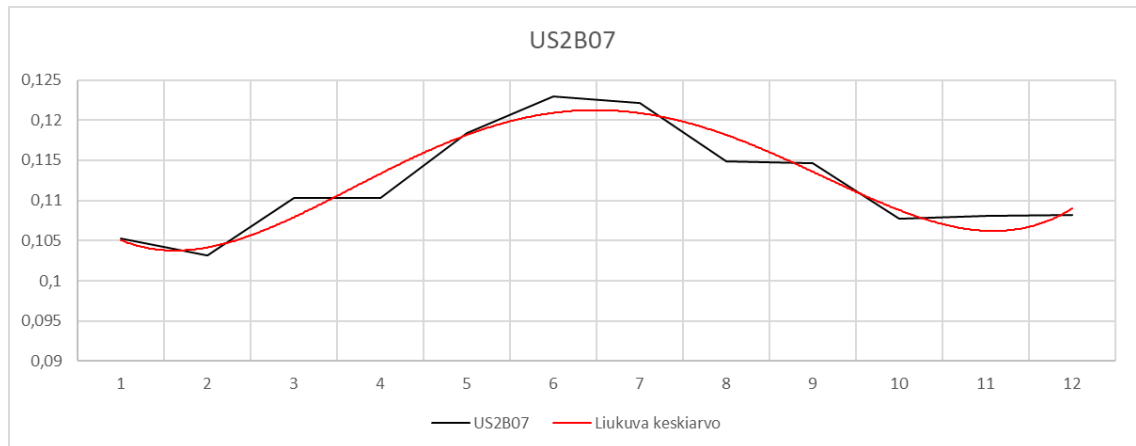
Taulukko 10. Kiviulkoseinien kriittiset olosuhteet nykyilmastossa.

US2		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta
Rakenne	TP		[h]	[d]	[%]
US2A	1	2007	284	11,8	12
	2		1850	77,1	39
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US2B	1	2007	419	17,5	11
	2		2644	110,2	39
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US2C	1	2007	213	8,9	2
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0

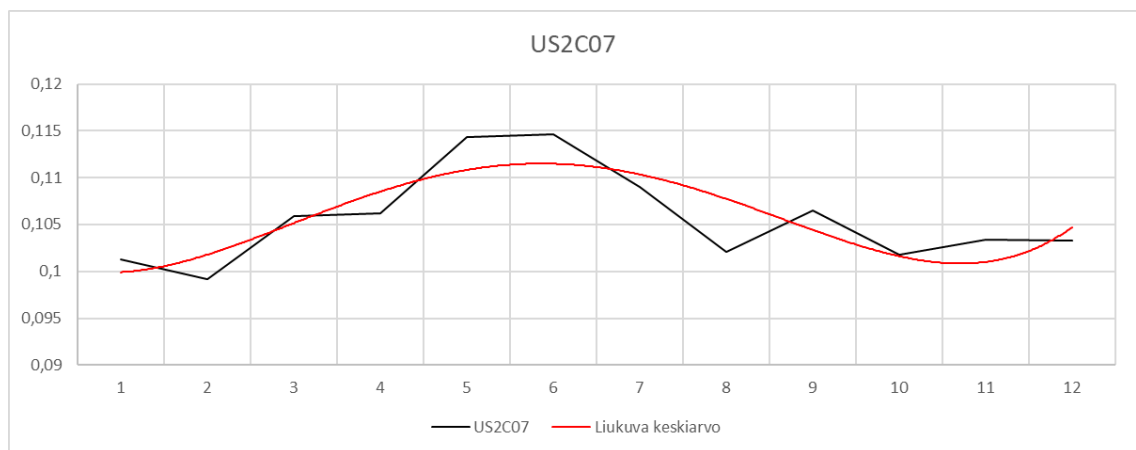
TP = Tarkastelupiste



Kuvio 6. US2A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.



Kuvio 7. US2B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.



Kuvio 8. US2C:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.

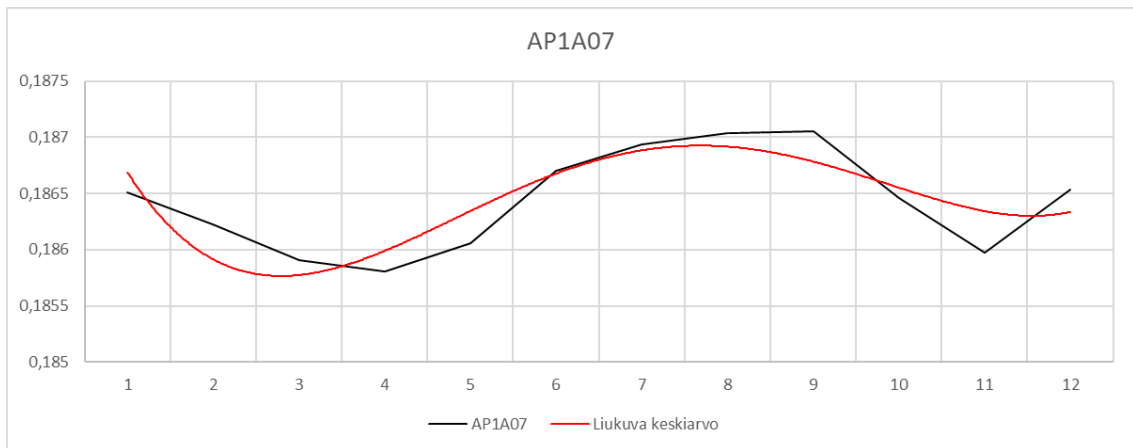
## 7.5 Alapohjien tulokset nykyilmastossa

Kuten jo luvussa 6.4.4 mainittiin, kriittiset olosuhteet eivät alapohjien osalta koskaan saavuta tarkastelupistettä 2. Tästä syystä käytimme alapohjien kriittisten olosuhteiden kriteerinä vähimmäislämpötilaa  $+10\text{ °C}$ , sillä alapohjien alapuolisen maan suhteellinen kosteus oli mallinuksissa koko ajan 100 %. Taulukossa 11 on esitetty alapohjien kriittiset olosuhteet vuoden aikana. Kuvioissa 9 ja 10 puolestaan näkyy alapohjien U-arvojen vuotuinen muuttuminen.

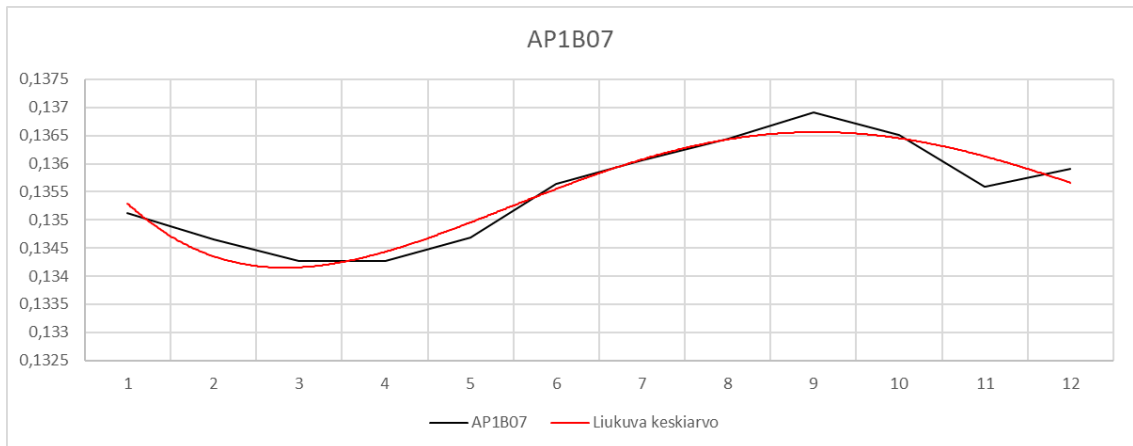
Taulukko 11. Alapohjien kriittiset olosuhteet nykyilmastossa.

AP1		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta
Rakenne	TP		[h]	[d]	[%]
AP1A	1	2007	5832	243,0	67
	2		0	0	0
AP1B	1	2007	5832	243,0	67
	2		0	0	0

TP = Tarkastelupiste



Kuvio 9. AP1A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.



Kuvio 10. AP1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana nykyilmastossa.

## 8 Tulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

### 8.1 Tulosten tarkastelu kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

Tässä luvussa on tarkasteltu mallinuksista saatuja tuloksia kunkin rakenteen kriittisimmässä ilmasto-olosuhteessa. Puurakenteille valitsimme kriittisimmäksi ilmasto-olosuhteeksi Vantaa 2050 ilmaston puurakenteiden 50 vuoden suunnitellusta käyttöiästä johtuen. Kivirakenteilla kriittinen ilmasto määräytyi tulosten perusteella. Tulosten tarkastelu on suoritettu samaan tapaan kuin luvussa 7.1 on esitetty.

Luvuissa 8.2–8.5 on esitetty rakennetyypeittäin mallinuksista saadut laskentatulokset kunkin rakenteen kriittisimmässä ilmastossa. Luvussa 8.6 on vertailtu nykyilmaston tuloksia kriittisiin tuloksiin. Kunkin rakennetyypin kriittisten olosuhteiden kriteerit ovat samat kuin luvuissa 7.2–7.5 on esitetty.

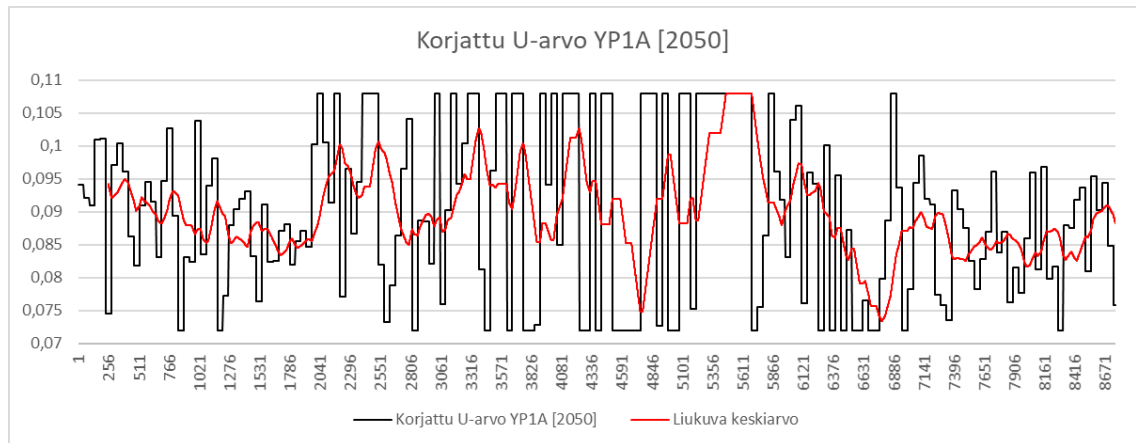
### 8.2 Yläpohjien tulokset Vantaa 2050 -ilmastossa

Taulukossa 12 on esitetty yläpohjien pisimmät yhtenäiset ajat kriittisissä olosuhteissa sekä kriittisten olosuhteiden osuus koko vuodesta. Liitteestä 7 löytyy Vantaa 2050 -ilmaston tuntikohtaiset laskentatulokset yläpohjien lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle. Kuvioissa 11 ja 12 näkyy yläpohjien U-arvojen muuttuminen vuoden aikana.

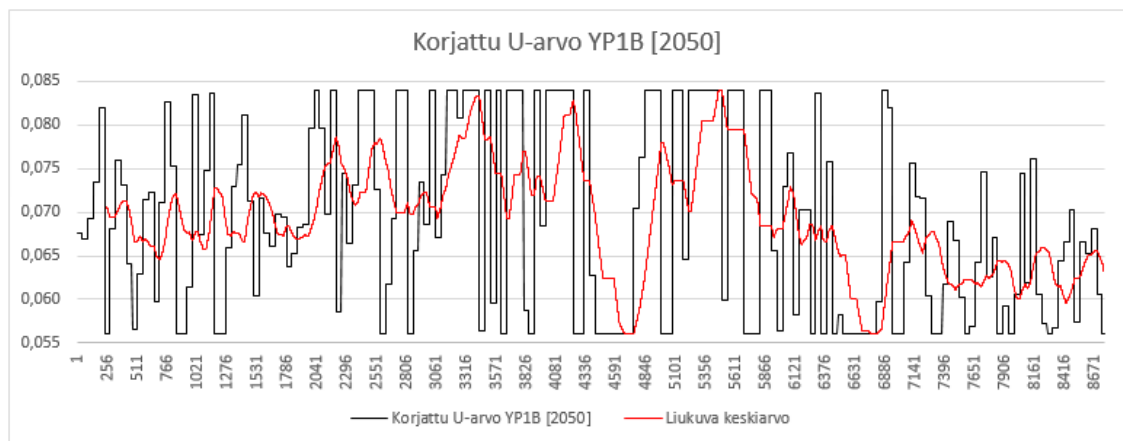
Taulukko 12. Yläpohjien kriittiset olosuhteet Vantaa 2050 -ilmastossa.

YP1		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta
Rakenne	TP		[h]	[d]	[%]
YP1A	1	2050	607	25,3	40
	2		510	21,3	27
	3		0	0	0
	4		0	0	0
YP1B	1	2050	670	27,9	42
	2		1168	48,7	27
	3		0	0	0
	4		0	0	0

TP = Tarkastelupiste



Kuvio 11. YP1A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2050 -ilmastossa.



Kuvio 12. YP1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2050 -ilmastossa.

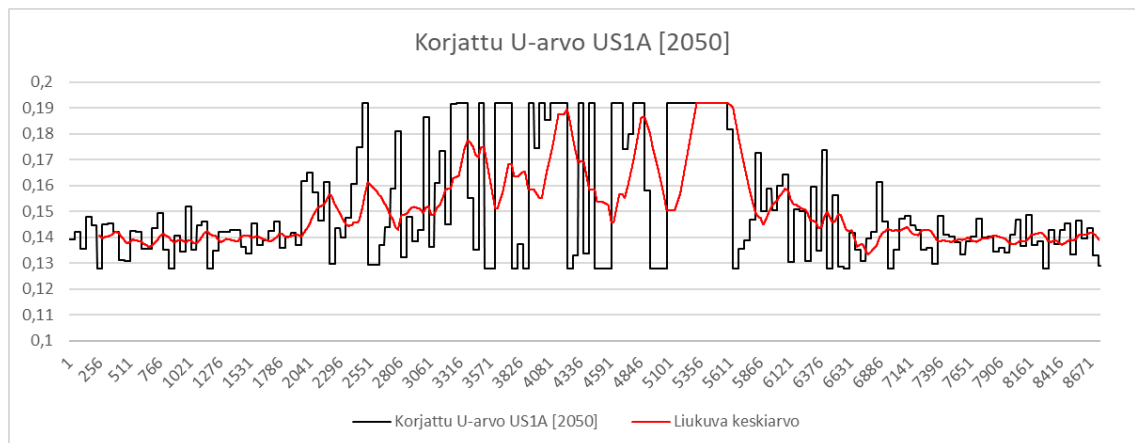
### 8.3 Puu-ulkoseinien tulokset Vantaa 2050 -ilmastossa

Taulukossa 13 on esitetty puu-ulkoseinien pisimmät yhtenäiset ajat kriittisissä olosuhteissa sekä kriittisten olosuhteiden osuus koko vuodesta. Liitteestä 7 löytyy tuntikohtaiset laskentatulokset puisten ulkoseinien suhteelliselle kosteudella ja lämpötilalle Vantaa 2050 -ilmastossa. Kuvioissa 13–15 on esitetty puu-ulkoseinien U-arvojen muuttuminen vuoden aikana.

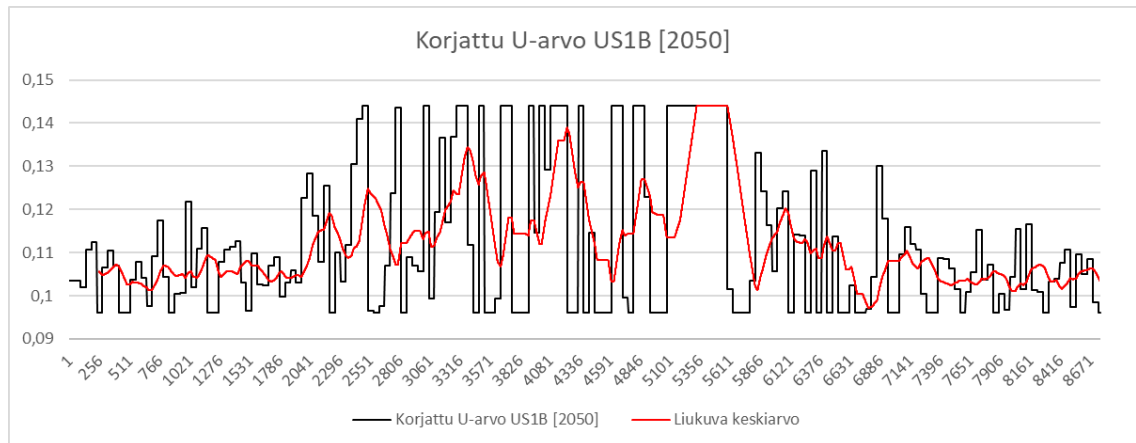
Taulukko 13. Puu-ulkoseinien kriittiset olosuhteet Vantaa 2050 -ilmastossa.

US1		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta
Rakenne	TP		[h]	[d]	[%]
US1A	1	2050	670	27,9	37
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US1B	1	2050	687	28,6	39
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US1C	1	2050	670	27,9	45
	2		0	0	0
	3		0	0	0
	4		0	0	0

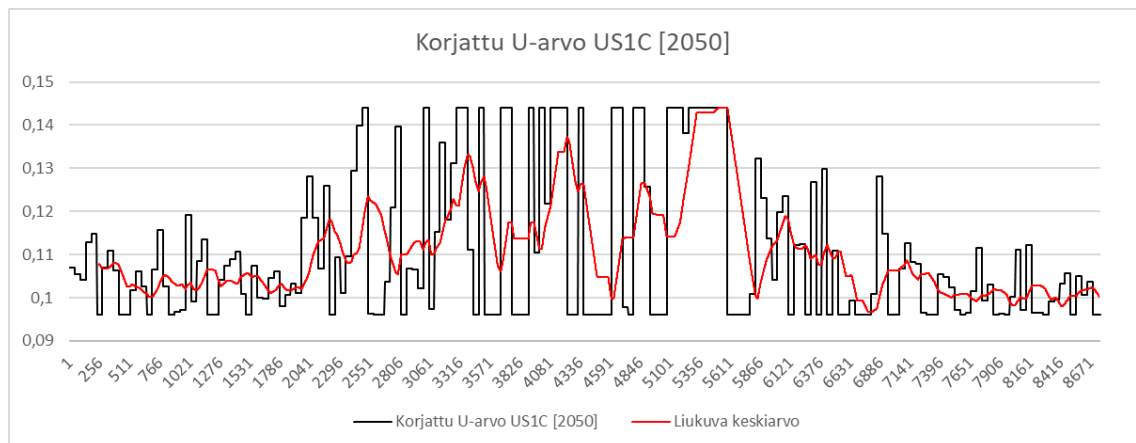
TP = Tarkastelupiste



Kuvio 13. US1A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2050 -ilmastossa.



Kuvio 14. US1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2050 -ilmastossa.



Kuvio 15. US1C:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2050 -ilmastossa.

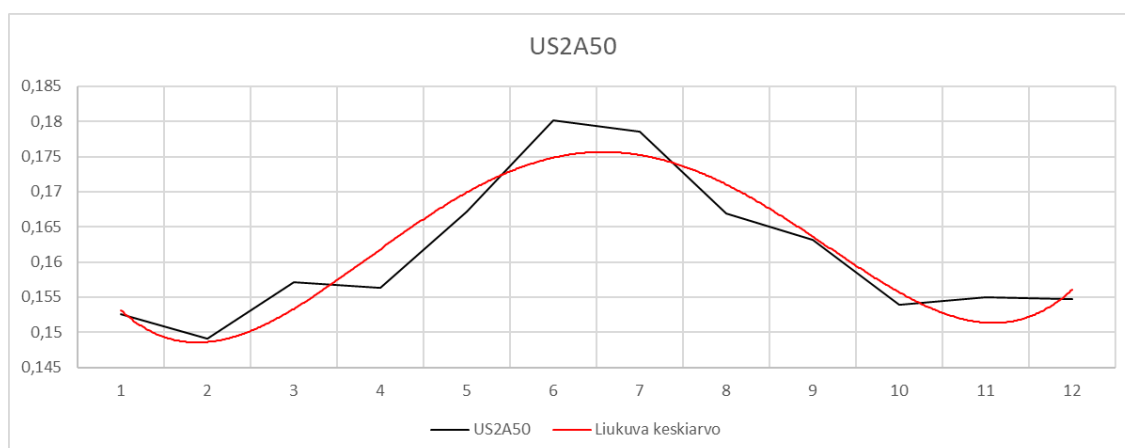
#### 8.4 Kiviulkoseinien tulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

Taulukossa 14 on esitetty kiviulkoseinien pisimmät yhtenäiset ajat kriittisissä olosuhteissa sekä kriittisten olosuhteiden osuus koko vuodesta. Tuntikohtaiset laskentatulokset kiviulkoseinien suhteelliselle kosteudelle ja lämpötilalle kriittisissä ilmasto-olosuhteissa on esitetty liitteestä 7. Kuvioissa 16–18 näkyy kivrakenteisten ulkoseinien U-arvojen vuotuinen muuttuminen.

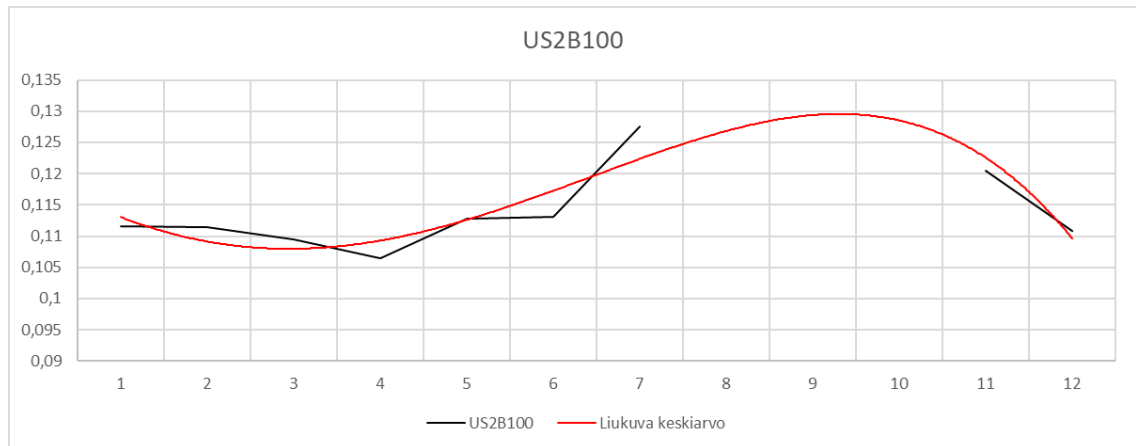
Taulukko 14. Kiviulkoseinien kriittiset olosuhteet kriittisissä ilmasto-olosuhteissa.

US2		Kriittinen aika			
		Tarkastelu- vuosi	Pisin yhtenäinen jakso		Osuus vuodesta
Rakenne	TP		[h]	[d]	[%]
US2A	1	2050	163	6,8	13
	2		1454	60,6	40
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US2B	1	2100	311	13,0	15
	2		3760	156,7	52
	3		0	0	0
	4		0	0	0
US2C	1	2100	290	12,1	6
	2		228	9,5	2
	3		0	0	0
	4		0	0	0

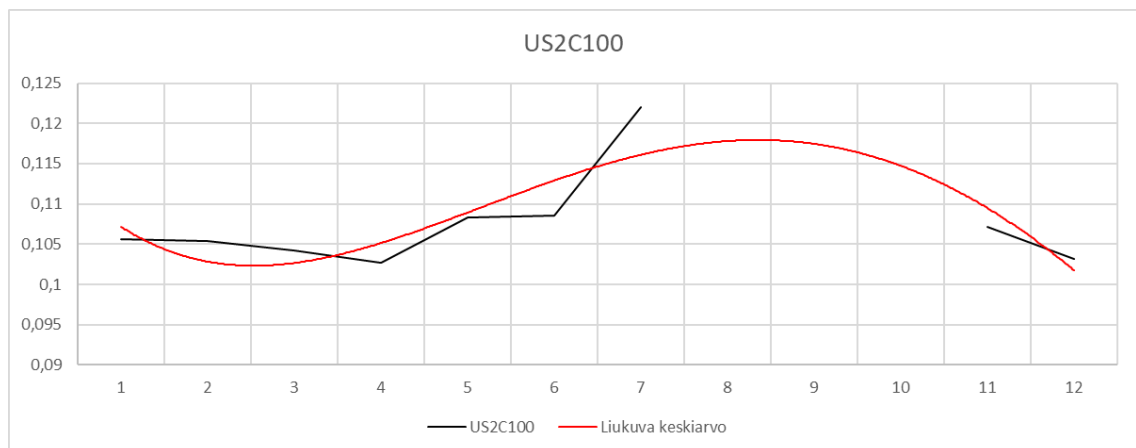
TP = Tarkastelupiste



Kuvio 16. US2A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2050 -ilmastossa.



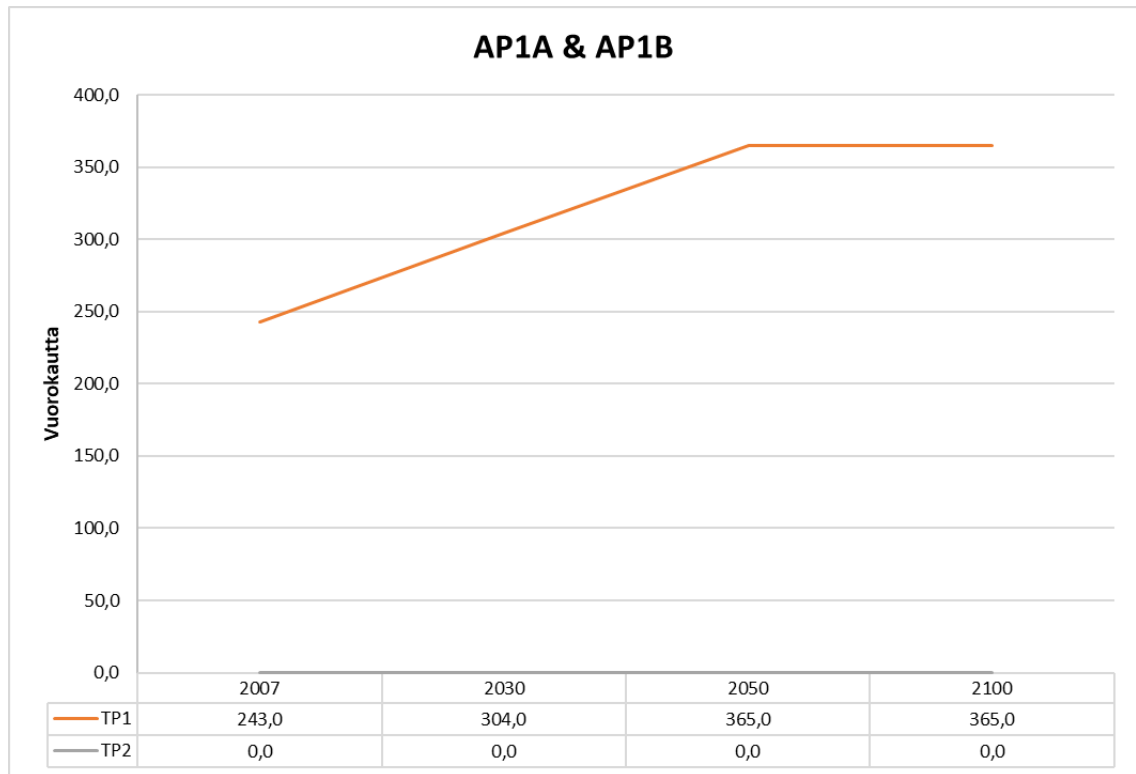
Kuvio 17. US2B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2100 -ilmastossa.



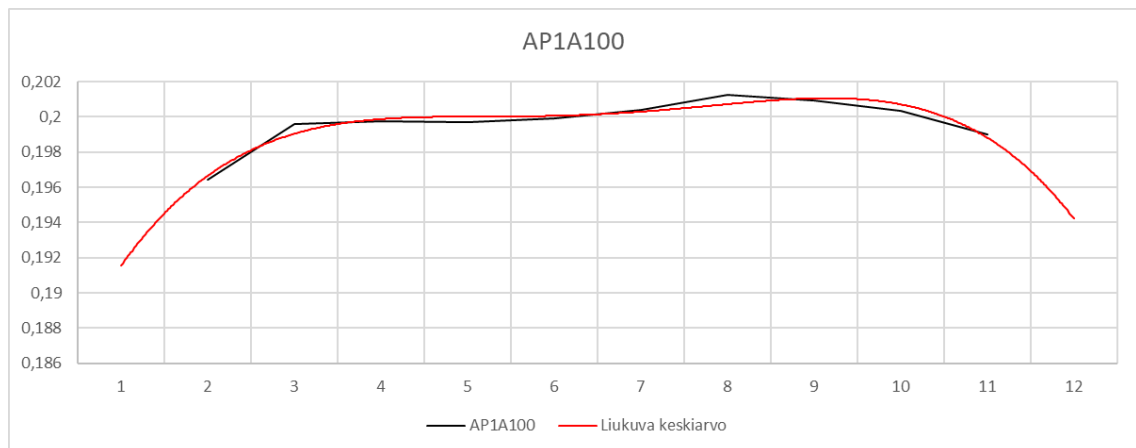
Kuvio 18. US2C:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2100 -ilmastossa.

## 8.5 Alapohjien tulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

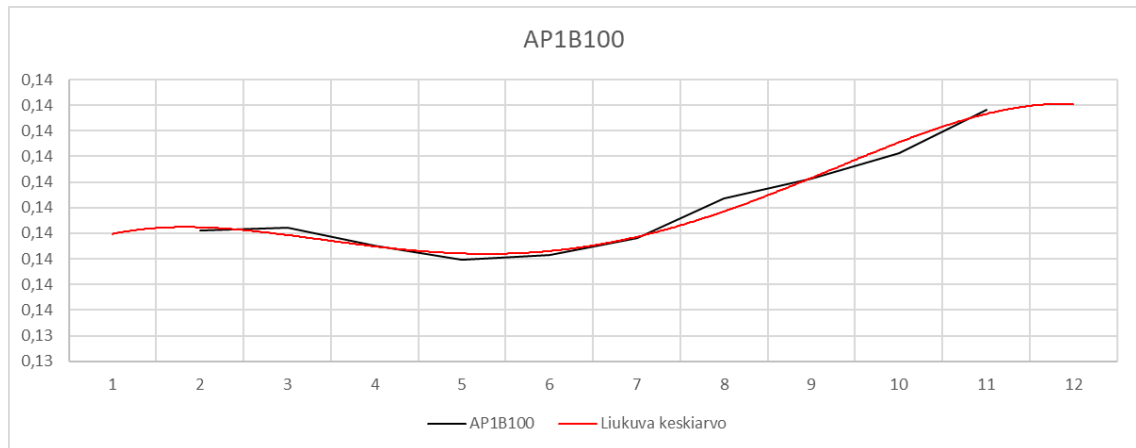
AP1A:n ja AP1B:n tulokset ovat keskenään samat, koska molemmissa ainoana merkitsevänä tarkastelupisteinä on niiden alapinta. Molemmat alapohjat ovat tarkastelupisteessä 1 vuoden 2050 ilmastosta eteenpäin koko ajan kriittisissä olosuhteissa. Kuviossa 19 on esitetty alapohjien kriittisten olosuhteiden kehittyminen kriittisissä ilmasto-olosuhteissa. Kuviossa 19 ilmoitettu aika tarkoittaa sekä pisintä yhtenäistä ajanjaksoa että koko vuoden aikaa kriittisissä olosuhteissa. Kuvioissa 20 ja 21 on esitetty alapohjien U-arvojen muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2100 -ilmastossa.



Kuvio 19. Alapohjien kriittisten olosuhteiden kehittyminen.



Kuvio 20. AP1A:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2100 -ilmastossa.



Kuvio 21. AP1B:n U-arvon muuttuminen vuoden aikana Vantaa 2100 -ilmastossa.

## 8.6 Nykyilmaston ja kriittisten ilmasto-olosuhteiden tulosten vertailu

Taulukossa 15 on vertailtu yläpohjien nykyilmaston laskentatuloksia kriittisten ilmasto-olosuhteiden laskentatuloksiin. Vertailussa on esitetty rakenteiden pisimpien yhtenäisten kriittisten ajanjaksojen ja koko vuoden kriittisten olosuhteiden muutos nykyilmaston ja kriittisen ilmaston välillä. Toisessa sarakkeessa esitetyt vuodet ilmoittavat kunkin rakenteen osalta mitä vuosia on vertailtu keskenään.

Taulukko 15. Yläpohjien nykyilmaston ja kriittisen ilmaston tuloksien vertailu.

YP1		Kriittinen aika						
Rakenne	Tarkastelu- vuodet	TP	Pisin yhtenäinen jakso [d]		Muutos [d]	Osuus vuodesta [%]		Muutos [%-yks]
			Nykyilmasto	Kriittinen		Nykyilmasto	Kriittinen	
YP1A	Nykyilmasto:	1	23,2	25,3	2,1	25	40	15
	2007	2	7,0	21,3	14,3	9	27	18
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2050	4	0	0	0	0	0	0
YP1B	Nykyilmasto:	1	23,3	27,9	4,6	27	42	15
	2007	2	26,3	48,7	22,4	9	27	18
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2050	4	0	0	0	0	0	0

TP = Tarkastelupiste

Taulukossa 16 on vertailtu ulkoseiniä nykyilmaston tuloksia kriittisten ilmasto-olosuhteiden tuloksiin. Vertailussa on esitetty rakenteittain pisimpien yhtenäisten kriittisten ajanjaksojen ja koko vuoden kriittisten olosuhteiden muutos nykyilmaston ja kriittisen ilmaston välillä. Toisessa sarakkeessa esitetyt vuodet ilmoittavat kunkin rakenteen osalta mitä vuosia on vertailtu keskenään.

Taulukko 16. Ulkoseinien nykyilmaston ja kriittisen ilmaston tuloksien vertailu.

US1		Kriittinen aika						
Rakenne	Tarkastelu- vuodet	TP	Pisin yhtenäinen jakso [d]		Muutos [d]	Osuus vuodesta [%]		Muutos [%-yks]
			Nykyilmasto	Kriittinen		Nykyilmasto	Kriittinen	
US1A	Nykyilmasto:	1	23,8	27,9	4,1	25	37	12
	2007	2	0	0	0	0	0	0
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2050	4	0	0	0	0	0	0
US1B	Nykyilmasto:	1	24,4	28,6	4,2	27	39	12
	2007	2	0	0	0	0	0	0
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2050	4	0	0	0	0	0	0
US1C	Nykyilmasto:	1	23,4	27,9	4,5	33	45	12
	2007	2	0	0	0	0	0	0
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2050	4	0	0	0	0	0	0
US2		Kriittinen aika						
Rakenne	Tarkastelu- vuodet	TP	Pisin yhtenäinen jakso [d]		Muutos [d]	Osuus vuodesta [%]		Muutos [%-yks]
			Nykyilmasto	Kriittinen		Nykyilmasto	Kriittinen	
US2A	Nykyilmasto:	1	11,8	6,8	-5,0	12	13	1
	2007	2	77,1	60,6	-16,5	39	40	1
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2050	4	0	0	0	0	0	0
US2B	Nykyilmasto:	1	17,5	13,0	-4,5	11	15	4
	2007	2	110,2	156,7	46,5	39	52	13
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2100	4	0	0	0	0	0	0
US2C	Nykyilmasto:	1	8,9	12,1	3,2	2	6	4
	2007	2	0	9,5	9,5	0	2	2
	Kriittinen:	3	0	0	0	0	0	0
	2100	4	0	0	0	0	0	0

TP = Tarkastelupiste

Taulukossa 17 on esitetty nykyilmaston ja kriittisen ilmaston kriittisten olosuhteiden laskentatuloksien vertailu ja muutos alapohjien osalta.

Taulukko 17. Alapohjien nykyilmaston ja kriittisen ilmaston tuloksien vertailu.

AP1		Kriittinen aika						
Rakenne	Tarkastelu- vuodet	TP	Pisin yhtenäinen jakso [d]		Muutos [d]	Osuus vuodesta [%]		Muutos [%-yks]
			Nykyilmasto	Kriittinen		Nykyilmasto	Kriittinen	
AP1A	Nykyilmasto:	1	243,0	365,0	122,0	67	100	33
	Kriittinen:	2	0	0	0	0	0	0
AP1B	Nykyilmasto:	1	243,0	365,0	122,0	67	100	33
	Kriittinen:	2	0	0	0	0	0	0

TP = Tarkastelupiste

## **9 Johtopäätökset**

### **9.1 Tulosten tulkinta**

Johtopäätöksissä on huomioitava, että olemme esittäneet ne mallinnoista saamiemme tulosten pohjalta. Tutkimiemme rakenteiden kosteustekninen toimivuus voi todellisuudessa olla hyvinkin erilainen, koska tuloksemme perustuvat virheettömiin rakenteisiin ja olosuhteiden muutos on laskennallisesti toteutettu. Lisäksi mallinnusohjelmien laskutavat ja mallien tarkkuus vaikuttavat tuloksiin.

Johtopäätöksissä on esitetty kunkin rakennetyypin kriittisten olosuhteiden kehittyminen ja U-arvojen muuttuminen sekä tulkintamme niiden syistä. Lisäksi olemme vertailleet rakenteiden keskinäistä toimivuutta rakennetyypeittäin. Yläpohjien ja ulkoseinien osalta mikrobikasvuston muodostumisen mahdollisuus on eritelty omaksi luvukseen.

### **9.2 Yläpohjien tulosten tulkinta**

#### **9.2.1 Yläpohjien kriittiset olosuhteet ja U-arvojen muuttuminen**

Nykyilmaston pisin yhtenäisen kriittinen ajanjakso tarkastelupisteessä 1 on molemmissa yläpohjissa lähes sama, mutta tarkastelupisteessä 2 eroa on jo noin 19,3 vuorokautta. Tarkastelupisteissä 3 ja 4 puolestaan olosuhteet eivät koskaan ole kriittiset mikrobikasvuston muodostumisen kannalta. Nykyilmastossa yläpohjien tarkastelupisteen 1 koko vuoden kriittisten olosuhteiden välillä on kaksi prosenttiyksikköä eli noin viikko eroa.

Näistä tuloksista voimme huomata, että yläpohjan eristepaksuuden lisääminen vaikuttaa huomattavasti puhallusvillan puolivälin kosteuspitoisuuteen. Tämä selittyy sillä, että YP1B:ssä on enemmän kosteutta sitovaa eristemassaa, jolloin myös kuivuminen on hitaampaa rakenteen keskellä. Toisin sanoen YP1B reagoi hitaammin kosteusvaihteluihin rakenteen keskiosassa kuin YP1A, mistä johtuen koko vuoden kriittinen aika on molempien rakenteiden tarkastelupisteessä 2

sama, vaikka pisin kriittinen jakso on YP1B:ssä pidempi. Nykyilmastossa eristepaksuuden lisäämisellä ei ole merkittävää vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen yläpinnan tuntumassa.

U-arvojen muutokset ovat molemmissa yläpohjissa samansuuntaiset, mutta YP1A:ssa muutokset ovat pienempiä, mutta terävämpiä kuin YP1B:ssä. Tämäkin voidaan selittää YP1B:n kosteutta sitovalla eristemassalla, jolloin ulkoilman olosuhteet eivät aiheuta YP1B:n lämmönjohtavuudessa yhtä nopeita vaihteluita kuin YP1A:ssa. Suuremmassa eristemassassa kosteuden sitoutuminen aiheuttaa kuitenkin pidemmällä aikavälillä suurempia muutoksia lämmönjohtavuudessa.

Vantaa 2050 -ilmastossa tarkastelupisteen 1 pisin yhtenäinen kriittinen ajanjakso kasvaa molemmissa yläpohjissa muutamalla päivällä. Tarkastelupisteessä 2 puolestaan YP1A:n pisin kriittinen jakso kasvaa noin kahdella viikolla ja YP1B:n pisin jakso yli kolmella viikolla. Vantaa 2050 -ilmastossa koko vuoden kriittiset olosuhteet ovat yläpohjien välillä samat tarkastelupisteessä 2, kun taas tarkastelupisteessä 1 eroa on nykyilmaston tapaan kaksi prosenttiyksikköä. Molemmissa yläpohjissa tarkastelupisteiden koko vuoden kriittiset olosuhteet kasvavat yhtä monta prosenttiyksikköä nykyilmaston ja Vantaa 2050 -ilmaston välillä.

Vantaa 2050 -ilmaston tuloksista voimme siis todeta, että yläpohjien kriittiset olosuhteet kasvavat merkittävästi nykyilmastoon verrattuna. Yläpohjien välinen suhde kuitenkin pysyy lähes samana, eli puhallusvillan puolivälin tuntumassa on YP1B:ssä huomattavasti kriittisemmät olosuhteet kuin YP1A:n puhallusvillan puolivälissä. Myös U-arvot muuttuvat samaan tapaan kuin nykyilmastossa.

## 9.2.2 Mikrobikasvuston muodostuminen yläpohjissa

Yläpohjien materiaalit voidaan jakaa seuraaviin homeutumisherkkyysluokkiin (luku 4.3, taulukko 4):

Puhallusvilla	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
Puuosat (kuusi)	HHL1 (hyvin herkkä)
Mineraalivilla	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
Höyrynsulkumuovi	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
Kipsilevy	HHL2 (herkkä)

Homeutumisen ja muun mikrobikasvuston muodostumisen kannalta puuristikko on yläpohjien materiaaleista herkin. Höyrynsulun sisäpuoliset materiaalit eivät mallinnustuloksien mukaan koskaan ole kriittisissä olosuhteissa, mistä syystä ne voidaan jättää tarkastelusta pois. On kuitenkin huomioitava, että mallinnus suoritettiin virheettömillä rakenteilla, joten todellisuudessa mahdolliset virheet, kuten vuotokohdat höyrynsulussa, voivat altistaa myös höyrynsulun sisäpuoliset osat kriittisille olosuhteille.

Yläpohjien mallintamisessa ei ollut ristikköä mukana alapaarretta lukuun ottamatta, koska ristikon voidaan olettaa olevan lähes samoissa olosuhteissa kuin sitä ympäröivä puhallusvilla. Nykyilmaston tuloksista huomaamme, että pisimmät kriittiset ajanjaksot yläpohjissa ovat kolmesta neljään viikkoa ja yläpohjien yläosat ovat kriittisissä olosuhteissa noin neljänneksen koko vuodesta. Kriittiset olosuhteet kasvavat entisestään Vantaa 2050 -ilmastossa.

Optimaalisissa olosuhteissa puuhun voi alkaa muodostua mikrobikasvustoa jo muutamassa päivässä, joten molempien yläpohjien osalta riski mikrobikasvuston muodostumiselle on suuri, vaikka olosuhteet eivät olisikaan täysin optimaaliset. Mikrobikasvustoa ei kuitenkaan välttämättä pääse muodostumaan yhtä tehokkaasti kuin tulokset antavat olettaa, sillä puhallusvilla on yleensä käsitelty home-suoja-aineilla, jolloin suojavaikutuksen voidaan olettaa siirtyvän myös puun pintaan. Vaikka puu onkin yläpohjien herkin materiaali mikrobikasvuston muodostumiselle, voi puun pinnalle muodostunut kasvusto kulkeutua myös puhallusvillaa pitkin muualle yläpohjaan.

Yläpohjien toteuttamisessa kiristyvien U-arvovaatimusten mukaisiksi on hyvä kiinnittää huomiota riittävään yläpohjan tuulettumiseen, jolloin yläpohjarakenteen kuivumista saadaan edistettyä ja mikrobikasvuston muodostumisele suotuisia olosuhteita vähennettyä. Lisäksi on tärkeää, että höyrynsulussa ei ole vuotokoh-  
tia, koska tällöin yläpohjaan pääsee sisäilmasta kosteutta, joka voi kondensoitua yläpohjan alaosiin aiheuttaen mikrobikasvustoa. Ylipaine rakennuksen sisällä li-  
sää entisestään huoneilman kosteuden siirtymistä yläpohjaan. Vuodot höyrynsu-  
lussa voivat myös päästää haitallisia mikrobeja yläpohjasta rakennuksen  
sisäilmaan. Alipaine rakennuksessa pahentaa tätä tilannetta entisestään.

### **9.3 Puu-ulkoseinien tulosten tulkinta**

#### **9.3.1 Puu-ulkoseinien kriittiset olosuhteet ja U-arvojen muuttuminen**

Puisissa ulkoseinissä tarkastelupiste 1 on ainut, jossa esiintyy mikrobikasvuston muodostumisen kannalta kriittisiä olosuhteita. Pisin yhtenäinen kriittinen ajan-  
jakso on jokaisessa puu-ulkoseinässä noin 24 vuorokautta nykyilmastossa ja  
noin 28 vuorokautta Vantaa 2050 -ilmastossa. Pisimmällä yhtenäisellä kriittisellä  
jaksolla ei siis ole suurta eroa nykyilmaston ja kriittisen ilmaston välillä.

Koko vuoden kriittisissä olosuhteissa puolestaan on merkittäviä eroja puisten ul-  
koseinien välillä. US1A:n ja US1B:n välillä eroa on kaksi prosenttiyksikköä eli noin  
viikko, mutta US1C:n ja US1A:n välillä eroa on jo 8 prosenttiyksikköä eli noin  
kuukausi. Vantaa 2050 -ilmastossa vuoden kriittiset olosuhteet kasvavat jokaisen  
ulkoseinän osalta 12 prosenttiyksikköä nykyilmastoon verrattuna. Näin ollen  
US1C on Vantaa 2050 -ilmastossa jo melkein puolet vuodesta kriittisissä olosuh-  
teissa mikrobikasvuston muodostumisen kannalta.

Näistä tuloksista voimme tulkita, että pelkän rungon ja sen sisältämän eristemää-  
rän kasvattaminen ei lisää merkittävästi mikrobikasvustolle suotuisia olosuhteita  
puisessa ulkoseinässä, mutta ilmaston muuttumisella on iso vaikutus. US1C:n  
mukainen rungon ulkopuolinen lisäkoolaus ei kuitenkaan ole hyvä ratkaisu eris-  
tepaksuutta lisätessä, koska tällöin kriittiset olosuhteet kasvavat huomattavasti  
pelkkään rungon kasvattamiseen verrattuna. On kuitenkin syytä huomata, että

eristepaksuuden lisäämisellä joko US1B:n tai US1C:n mukaisesti on vaikutusta rakenteen U-arvon vaihteluun. US1A:ssa U-arvon vaihtelu on selkeästi maltillisempaa kuin muissa puu-ulkoseinissä.

US1B:n ja US1C:n U-arvojen vaihtelut selittyvät yläpohjien tapaan kosteutta sitovalla eristemassalla, mikä näkyy selvästi, kun vertailee puu-ulkoseinien tarkastelupisteen 2 kosteuspitoisuutta Vantaa 2050 -ilmastossa (liite 7). Vaikka tuossa pisteessä ei koskaan ole mikrobikasvuston muodostumisen kannalta kriittiset olosuhteet, on US1B:ssä ja etenkin US1C:ssä kosteuspitoisuus huomattavasti suurempi eristemassan puolivälissä kuin US1A:ssa. Tällöin US1B:n ja US1C:n eristyskyky heikkenee, jolloin myös U-arvo vaihtelee rajummin.

### 9.3.2 Mikrobikasvuston muodostuminen puu-ulkoseinissä

Puisten ulkoseinien materiaalit voidaan jakaa seuraaviin homehtumisherkkyysluokkiin (luku 4.3, taulukko 4):

Tuulensuojalevy	HHL2 (herkkä)
Puuosat (kuusi)	HHL1 (hyvin herkkä)
Mineraalivilla	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
Höyrynsulkumuovi	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
Kipsilevy	HHL2 (herkkä)

Puu-ulkoseinissä mikrobikasvustolle herkin materiaali on puu, mutta myös puukuituinen tuulensuojalevy on herkkä mikrobikasvuston muodostumiselle. Kuten yläpohjissakin, ei puu-ulkoseinien höyrynsulun sisäpuoliset rakenteet ole tulosten mukaan koskaan kriittisissä olosuhteissa mikrobikasvuston muodostumisen kannalta. Tuloksia tulkitessa on kuitenkin jälleen huomioitava rakenteiden virheettömyys mallinuksissa. Ulkoverhousta ei ole otettu tarkastelussa huomioon, sillä se on tuuletusraosta johtuen irrallaan muusta rakenteesta. Lisäksi ulkoverhouksessa käytetyn pintakäsittelyn voidaan olettaa estävän mikrobikasvuston muodostumisen siihen.

Puisissa ulkoseinissä pisimmät kriittiset ajanjaksot ovat kaikissa rakenteissa samaa kokoluokkaa niin nykyilmastossa kuin kriittisessäkin ilmastossa. Koko vuoden kriittisissä olosuhteissa sen sijaan on jo suurempia muutoksia. US1C:n tarkastelupiste 1 on jo melkein puolet vuodesta kriittisissä olosuhteissa, mikä tekee rakenteesta selvästi muita puu-ulkoseiniä huonomman vaihtoehdon.

Puu-ulkoseinissä höyrynsulun ulkopuolisissa puuosissa sekä tuulensuojalevyssä pääsee optimaalisissa olosuhteissa muodostumaan mikrobikasvustoa vain muutamassa päivässä, joten riski sen muodostumiselle on tuloksien perusteella suuri. Lisäksi tuulensuojalevyn huokoisuus mahdollistaa mikrobikasvuston muodostumisen myös levyn sisälle. Mineraalivilla ei puhallusvillan tapaan sisällä home-suoja-aineita, koska eriste on itsessään lähes homehtumaton, joten tämä mahdollistaa mikrobikasvuston vapaamman muodostumisen ja etenemisen puu-ulkoseinissä kuin yläpohjissa.

Kuten yläpohjissakin, tulee puisten ulkoseinien toteuttamisessa kiinnittää erityistä huomiota riittävään tuulettumiseen sekä höyrynsulun tiivyyteen. US1C:n mukaista rakenneratkaisua on kuitenkin syytä välttää, vaikka se olisikin työteknisesti helpompi toteuttaa kuin US1B. US1B voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa myös viilupuurungolla, jolloin tarvetta tuplarungolle ei ole. Tällöin tosin rungon kustannukset kasvavat merkittävästi, vaikka toteuttaminen olisikin helpompaa.

## **9.4 Kiviulkoseinien tulosten tulkinta**

### **9.4.1 Kiviulkoseinien kriittiset olosuhteet ja U-arvojen muuttuminen**

Kiviulkoseinissä määrittämiämme kriittisiä olosuhteita esiintyy tarkastelupisteissä 1 ja 2, mutta näistä jälkimmäinen on oleellisempi. Ottaen huomioon kivirakenteiden homehtumiskestävyys ei tarkastelupisteessä 1 esiintyvä pisin kriittinen ajanjakso (17,5 vuorokautta) ole kovinkaan merkittävä. Tarkastelupisteessä 2 puolestaan US2A:n pisin kriittinen jakso nykyilmastossa on noin 2,5 kuukautta ja US2B:n pisin jakso melkein neljä kuukautta. US2C:n tarkastelupisteessä 2 ei esiinny ollenkaan kriittisiä olosuhteita nykyilmastossa.

Kivirakenteissa viistosade aiheuttaa merkittävää veden kapillaarista siirtymistä rakenteen sisälle, mutta harkkorakenteen muovieriste katkaisee tehokkaasti veden kulkeutumisen, jolloin vesi alkaa kertyä eristeen ulkopintaan. Tällöin myös koko rakenteen ulkopinta pysyy kuivempänä, koska rakenteen kuivuminen tapahtuu ulkopinnan kautta. US2C:ssä viistosateen aiheuttama veden kapillaarinen siirtyminen on estetty ulkoverhouksella, jolloin rakenne pysyy myös sisältä melko kuivana. Nykyilmastossa US2A:n ja US2B:n koko vuoden kriittiset olosuhteet ovat lähes samat, mutta US2C ei ole juuri ollenkaan kriittisissä olosuhteissa.

Kiviulkoseinien U-arvojen muuttuminen nykyilmastossa on US2A:n ja US2B:n osalta hyvin samanlainen. Molemmissa muutos minimin ja maksimin välillä on noin 0,017 yksikköä, kun taas US2C:ssä muutos on vain noin 0,012 yksikköä. Tämä voidaan selittää US2C:n kyvyllä estää kapillaarinen veden siirtyminen rakenteeseen, jolloin kosteusvaihtelut ovat pienempiä ja U-arvo pysyy tasaisempana.

US2A:n kriittiseksi ilmastoksi määräytyi tulosten pohjalta Vantaa 2050 -ilmasto, mutta yhden vuorokauden taantuma-ajan kanssa nykyilmasto onkin itse asiassa kriittisempi kuin Vantaa 2050 -ilmasto. Tarkastelupisteen 2 pisin kriittinen jakso pienenee kriittisessä ilmastossa yli kahdella viikolla nykyilmastoon verrattuna. Koko vuoden kriittiset olosuhteet puolestaan nousevat vain yhdellä prosenttiyksiköllä. US2B:ssä kriittisen ilmaston tarkastelupisteen 2 pisin kriittinen jakso on noin 1,5 kuukautta pidempi kuin nykyilmastossa ja koko vuoden kriittiset olosuhteet kasvavat 13 prosenttiyksikköä. US2C:ssä merkittäviä muutoksia ei tapahdu.

US2A:n erikoinen käyttäytyminen voi johtua siitä, että siinä on käytetty eri eristettä ja siinä on vähemmän massaa ulkopinnan ja eristeen ulkopinnan välillä kuin toisissa kiviulkoseinissä. US2A:n EPS eriste päästää kosteutta paremmin lävitseen kuin muissa käytetty PU-eriste, jolloin eristeen pintaan ei pääse kertymään yhtä paljon kosteutta. Lisäksi pienempi harkkomassa ennen eristettä mahdollistaa veden tehokkaamman kuivumisen muihin kiviulkoseiniin verrattuna. Tulevaisuuden ilmasto-olosuhteet ovat lämpimämmät kuin nykyilmaston olosuhteet, jolloin kuivuminenkin pääsee kiihtymään US2A:n osalta.

US2A:n U-arvon muuttuminen pysyy kriittisessä ilmastossa hyvin samanlaisena kuin nykyilmastossa. US2B:n ja US2C:n U-arvot kriittisessä ilmastossa on muoltaan samanlaisia kuin nykyilmastossa, mutta heikoimmillaan U-arvo onkin kesän sijaan syksyllä. US2C:ssä muutokset ovat edelleen pienempiä kuin muissa kiviulkoseinissä.

#### 9.4.2 Mikrobikasvuston muodostuminen kiviulkoseinissä

Kiviulkoseinien materiaalit voidaan jakaa seuraaviin homehtumisherkkyysluokkiin (luku 4.3, taulukko 4):

Kevytsoramassa	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
EPS-eriste	HHL3 (kohtalaisen kestävä)
PU-eriste	HHL3 (kohtalaisen kestävä)

US2C:n mukaista ulkoverhousa ei ole otettu homehtumistarkasteluun mukaan, koska oikein toteutettuna siihen ei pääse muodostumaan mikrobikasvustoa pintakäsittelyn ja tehokkaan tuulettumisen ansiosta. Mikäli ulkoverhoukseen kuitenkin muodostuisi mikrobikasvustoa, se ei tuuletusraosta johtuen olisi kovinkaan merkittävää varsinaisen rungon kannalta.

Kivirakenteisten seinien homehtumiskestävyys on korkea, joten mikrobikasvuston muodostuminen materiaaleihin itseensä on hyvin epätodennäköistä. Kivirakenteiden ja muovieristeiden homehtuminen vaatisi jopa vuosia kestävätkä kriittiset olosuhteet. Tuloksista huomaamme, että pahimmassa tapauksessa mikrobikasvuston muodostumisen kannalta pisin kriittinen ajanjakso on vain noin 156 vuorokautta.

Vaikka kivirakenteisiin ja niiden sisältämiin muovieristeisiin ei pääsisikään muodostumaan mikrobikasvustoa ilmasto-olosuhteiden muuttumisesta huolimatta, voi niiden pinnalla oleva orgaaninen aine, kuten puupöly, homehtua. Esimerkiksi sadeveden ja tuulen mukana voi kulkeutua orgaanista pölyä kivirakenteiden pinnalle ja jopa sisälle kevytsoran huokoisen rakenteen läpi. Orgaanista ainesta voi

päästä rakenteisiin myös valmistuksen, varastoinnin tai asennuksen aikana. Kuten muissakin rakenteissa, on valmiin mikrobikasvuston leviäminen helpompaa kuin uuden muodostuminen.

Orgaanisen aineen puhdistaminen kivirakenteista voi olla haastavaa, joten huomiota tuleekin kiinnittää rakenneosien suojaamiseen varastointi- ja rakennusaikana. Tällöin mahdollinen orgaaninen aines rakenteissa saadaan minimoitua. Kuten tuloksista huomaamme, US2C:n mukainen ulkoverhous kiviulkoseinässä vähentää kosteusrasituksen lähes olemattomaksi rakenteessa. Tämä on siis ainakin teoriassa toimiva ratkaisu mikrobikasvuston muodostumisen vähentämiseen ja jopa estämiseen kivirakenteissa.

## **9.5 Alapohjien tulosten tulkinta**

Alapohjien keskinäiset tulokset ovat käytännössä samanlaiset, koska niiden ainoana merkitsevänä tarkastelupisteenä on alapinta ja eristemateriaali on muovia. Kriittisten olosuhteiden tasainen kehittyminen johtuu alapohjan alapuolisen maan sadan prosentin suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilan laskemisesta aina kuu-kauden keskiarvona. Tällöin ilmaston lämmitessä myös kriittiset olosuhteet kasvavat tasaisesti.

Maan korkeasta suhteellisesta kosteudesta johtuen olikin oletettavaa, että alapohjien alapinta on käytännössä koko ajan kriittisissä olosuhteissa. Näin ollen mikrobikasvuston muodostuminen alapohjan alapuolelle on väistämätöntä olosuhteista ja eristepaksuuden lisäämisestä huolimatta. Syytä on siis kiinnittää erityistä huomiota alapohjien läpivientien tiiviyyteen, jotta haitallisia mikrobeja ei pääse rakennuksen sisäilmaan. Muuten varsinainen alapohjarakenne pitää mikrobit poissa rakennuksen sisäpuolelta.

Alapohjien U-arvot muuttuvat ilmasto-olosuhteista riippumatta hyvin vähän, mutta laskennallinen U-arvo ei täyty tuloksien mukaan kummassakaan alapohjassa. Tämä voi johtua WUFI Pro -ohjelmiston tavasta laskea alapohjien U-arvo, jolloin U-arvo on todellisuudessa laskennallista arvoa huonompi tai ohjelmiston antamat arvot eivät ole täysin paikkaansa pitäviä.

## 9.6 Yhteenveto johtopäätöksistä

Kaikkien rakenteiden kosteusteknisessä toimivuudessa on selviä eroja nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteiden välillä. Kuten alkuolettamuksenaakin oli, muuttuvalla ilmastolla on pääsääntöisesti negatiivinen vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Ainoana poikkeuksena tästä on US2A, jossa olosuhteet jopa paranevat tulevaisuuden ilmastossa.

Eristepaksuuden lisääminen aiheuttaa merkittävää kosteusrasituksen lisääntymistä yläpohjissa ja kiviulkoseinissä. Puu-ulkoseinissä kosteusrasitus lisääntyy jonkin verran eristepaksuuden kasvaessa, mutta mikrobikasvuston muodostumisen kannalta pisin yhtenäinen kriittinen ajanjakso pysyy lähes samana. Maanvaraisessa betonilaatta-alapohjassa eristepaksuuden lisääminen ei heikennä rakenteen kosteusteknistä toimivuutta.

Kaikkien rakenteiden toteuttamisessa tärkein huomioitava asia on tiiviys. Läpivientien ja höyrynsulun tulee olla tiiviitä, jotta kosteuden liikkumista saadaan rajoitettua ja haitallisten mikrobien pääsy rakennuksen sisäilmaan estettyä. Myös rakenneosien suojaaminen varastointi- ja rakennusaikana voi merkittävästi vähentää mikrobikasvustolle suotuisia olosuhteita. Tämä korostuu etenkin kivirakenteissa, jotka eivät itsessään ole kovin herkkiä homehtumaan.

Kaikki tulkintamme on tehty saamiemme tulosten pohjalta, mutta voimme todeta, että aiempiin tutkimuksiin verrattuna tuloksemme vastaavat enemmän TTY:n kuin VTT:n tutkimustuloksia. Saamamme tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, sillä ne perustuvat annettuihin lähtöarvoihin ja käytettyihin laskukaavoihin. Todellisuudessa muuttujia on paljon enemmän kuin on mahdollista mallintaa.

## 10 Pohdinta

### 10.1 Tavoitteet ja toteutus

Tavoitteenamme oli tarkastella pientalon vaipparakenteiden eristepaksuuden lisäämisen vaikutusta niiden kosteustekniseen toimivuuteen muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa. Oletuksenamme oli alun perinkin, että eristepaksuuden lisääminen ja ilmaston muuttuminen lisäävät rakenteiden kosteusriskejä. Tämä oletamus pohjautui omaan tietouteemme sekä vuosina 2009–2012 toteutetun FRAME-hankkeen tutkimustuloksiin. Viitekehyksenä toimi aiempien tutkimusten lisäksi myös yleistieto ja ohjeistukset rakenteiden kosteus- ja lämpöteknisestä toiminnasta, mitkä otimme huomioon opinnäytetyömme tarkasteluissa. Saamamme tulokset olivat olettamuksemme mukaisia, ja täytimme tavoitteemme onnistuneesti.

Opinnäytetyömme tutkimusmenetelmäksi valitsimme rakennusfysikaalisen mallintamisen, koska muuta järkevää vaihtoehtoa ei ollut. Vaikka mallintaminen on tehokas tapa tarkastella rakenteiden toimivuutta pidemmällä aikavälillä, mallin luominen on työlästä ja mallien ratkeaminen hidasta. Luulimme itsekkin, että teoriaosuuden kasaamisessa menisi pisin aika, mutta todellisuudessa mallien luominen ja niiden ratkeaminen olivat kaikista työläin ja aikaa vievin osuus. Lisäksi tulosten saaminen raporttiin vei paljon aikaa, sillä mallinnusohjelmien antamat tulokset piti viedä ensin Excelliin, josta vasta saimme lopulliset ja tulkittavat tulokset raporttiin.

Mallinnus ei COMSOL-ohjelmiston osalta sujunut ongelmitta, sillä alussa meni useampi viikko ennen kuin saimme mallit toimimaan oikein. Tämän jälkeen meni vielä pari viikkoa siihen, että saimme optimoitua mallit siten, että ne ratkeaisivat nopeammin. Lopulta kuitenkin saimme vähennettyä mallien ratkaisuaikaa noin kahdesta vuorokaudesta noin kahdeksaan tuntiin. Näitä malleja meillä oli kymmenen kappaletta, joten mallien optimointi oli haasteellisuudestaan huolimatta tärkeä työvaihe opinnäytetyömme kannalta. Aluksi tarkoituksenamme oli mallintaa useampikin rakenne COMSOL-ohjelmistolla, mutta päädyimme karsimaan joitakin rakenteita pois ajan puutteen vuoksi.

## 10.2 Luotettavuus

Kuten jo aiemmin mainitsimme, rakenteemme ovat virheettömästi toteutettuja ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteet laskennallisesti laadittuja. Tämä tarkoittaa sitä, että todellisuudessa tulokset voivat olla hyvinkin erilaisia, joten tuloksiimme on suhtauduttava toteutustavan mukaisesti. Lisäksi mallinnusohjelmien laskutavat vaikuttavat merkittävästi tulosten oikeellisuuteen, eivätkä ne ota huomioon jo-kaista tosielämän muuttujaa. Voimme kuitenkin olettaa, että saamamme tulokset ovat oikeansuuntaisia, eikä tilanne todellisuudessa ole ainakaan parempi, koska mukaan tulevat myös mahdolliset rakennusvirheet.

## 10.3 Oppimisprosessi

Opinnäytetyömme aikana rakenteiden kosteus- ja lämpötekninen toiminta sekä niihin vaikuttavat asiat tulivat erittäin tutuiksi. Tuloksista huomasimme kuinka iso vaikutus eri materiaaleilla ja toteutustavoilla on rakenteiden toimintaan. Yllättävintä tuloksissa oli US2C:ssä olevan puuverhouksen vaikutus rakenteen toimintaan. Emme olisi uskoneet, että puuverhouksen lisääminen kivirakenteisen ulkoseinän pintaan poistaisi rakenteen kriittiset olosuhteet lähes kokonaan.

Mielenkiintoista oli myös huomata, että eristepaksuuden lisääminen ei välttämättä olekaan paras ratkaisu rakenteen energiatehokkuutta parannettaessa, vaan talotekniikalla on yhä suurempi merkitys. Jos energiavaatimukset saadaan talotekniikan avulla täytettyä pienemmällä rakennepaksuudella, voidaan välttyä suuremmilta kosteusongelmilta. Lisäksi on oletettavaa, että tulevaisuudessa talotekniset laitteet kehittyvät entisestään, jolloin myös rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta voidaan parantaa.

## 10.4 Kehittämissideat ja jatkotutkimukset

Mallinsimme opinnäytetyössämme vain hyvin tavallisia pientalorakenteita, joten jatkotutkimuksena mallinnuksen voisi toteuttaa eri rakenteilla tai perehtyä tarkemmin johonkin tiettyyn rakennetyyppiin. Esimerkiksi puisissa ulkoseinissä tarkastelupiste 1 oli ainut, jossa oli kriittisiä olosuhteita, mutta tarkastelupisteen 2

olosuhteissa oli selviä eroavaisuuksia. Tällöin jatkotutkimuksena meidän tarkastelupisteiden 1 ja 2 välin voisi jakaa osiin sitten, että tarkastelupisteet olisivat esimerkiksi kymmenen millimetrin välein. Näin kunkin rakenteen osalta saisi selville, kuinka syväälle kriittiset olosuhteet ulottuvat.

Opinnäytetyömme ideaa voisi myös kehittää määrittämällä yhä useampia vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa rakenteellisen energiatehokkuuden edellyttämät rakenteet. Esimerkiksi rakenteet voisi määrittää sellaisiksi, että ne täyttäisivät vaaditut U-arvot kosteuden aiheuttamista vaihteluista huolimatta. Tämä tarkoittaisi joko eristepaksuuden lisäämistä tai muuta vaihtoehtoista toteutustapaa. Tällöin kuitenkin olisi edelleen hyvä ottaa huomioon, että rakenteen kosteustekninen toimivuus ei heikkenisi entisestään.

Jatkotutkimuksena voisi toteuttaa myös kustannusvertailua uusien ja vanhojen rakenteiden välillä. Tässä olisi hyvä ottaa huomioon varsinaisten materiaalikustannusten lisäksi myös työn suorittamisen kustannukset. Esimerkiksi puu-ulkoseinät on mahdollista toteuttaa usealla eri tavalla, joten niiden toteuttamiseen käytetty aika on varmasti hyvinkin erilainen, jolloin myös työkustannukset vaihtelevat.

Opinnäytetyössämme käsitelimme rakenteita sellaisinaan, joten jatkotutkimuksena mallinnuksen voisi suorittaa myös rakenteiden liitoskohdista ja nurkka-alueista. Tällöin saisi selville vaikuttaako eristepaksuuden lisääminen ja ilmasto-olosuhteiden muuttuminen liitosten ja nurkka-alueiden kosteusteknisen toimivuuteen samalla tavalla kuin varsinaisissa rakennekerroksissa. Lisäksi tuloksista selviäisi rakenteiden keskinäinen kosteustekninen toimivuus.

## Lähteet

- Björkholtz, D. 1990. Rakennuksen kuivattaminen. Tampere: Rakentajain Kustannus Oy.
- COMSOL Inc. 2018. Understand, Predict, and Optimize Engineering Designs with the COMSOL Multiphysics® Software. <https://www.comsol.fi/comsol-multiphysics>. 14.2.2018.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:fi:PDF>.
- Fraunhofer IBP. 1.2.2018. WUFI. <https://wufi.de/en/>. 7.2.2018.
- Hautala, M. & Peltonen, H. 2005. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa 1. Lahti: Lahden Teho-opetus Oy.
- Hukka, A. & Viitanen, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33, pp. 475-485.
- Ilmatieteen laitos. 9.6.2014. Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>. 9.3.2017.
- Mölsä, S. 2008. VTT kumosi parissa viikossa TTY:n tutkimuksen. Rakennuslehti. <http://www.rakennuslehti.fi/2008/12/vtt-kumosi-parissa-viikossa-tty-n-tutkimuksen/>. 9.3.2017.
- Mölsä, S. 2016. TTY:n rakennusfysiikan professori kertoo, miksi eristemäärien lisäys nollaenergiatasolle saattaa olla kosteusriski. Rakennuslehti. <http://www.rakennuslehti.fi/2016/12/tty-n-rakennusfysiikan-professori-kertoo-miksi-eristemaerien-lisays-nollaenergiatasolle-saattaa-olla-kosteusriski/>. 10.3.2017.
- Ojanen, T., Airaksinen, M. & Tuomaala, P. 2016. Energiatehokkaiden uudisrakennusten rakenteiden kosteustekninen toimivuus. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <http://www.ym.fi/download/noname/%7BCD61A994-7B55-4691-A396-E1469BE9DBF8%7D/123273>. 10.3.2017.
- Puuinfo Oy. 2011. Alapohjan U-arvon määrittäminen. <http://www.puuinfo.fi/mitoitusohjelmat/alapohjan-u-arvon-m%C3%A4%C3%A4ritt%C3%A4minen>. 16.9.2017.
- Rakennustieto Oy. 1999. RT 05-10710 Kosteus rakennuksissa. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Rakennustieto Oy. 2017. RT 08-11286 Puurakenteiden home- ja lahottajasierit sekä bakteerit. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- RIL ry. 2014. RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 Rakennusfysiikkaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki.
- Vinha, J. 2012. FRAME-projektin päätösseminaari. Tampereen teknillinen yliopisto. <http://www.tut.fi/cs/groups/public/@1102/@web/@p/documents/liit/mdbw/mdm0/~edisp/p034307.pdf>. 9.3.2017.
- Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. 2013.

Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

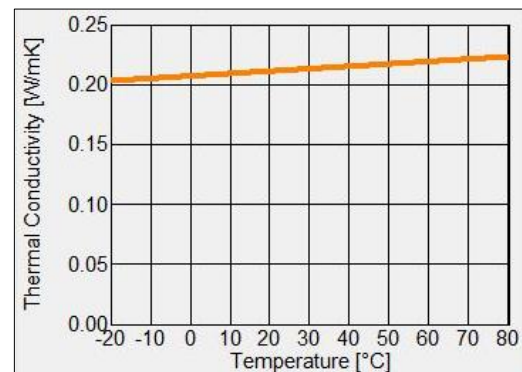
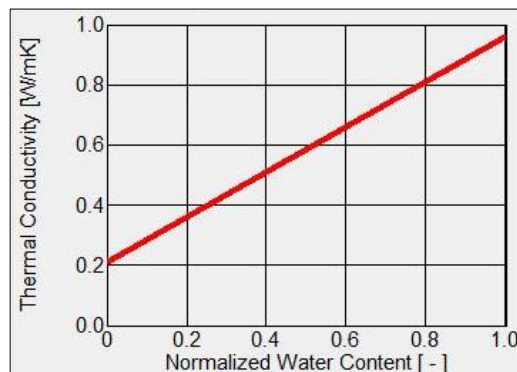
- Ympäristöministeriö. 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma C2. Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki.
- Ympäristöministeriö. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Lämmöneristys, ohjeet luonnos 2012. Helsinki.
- Ympäristöministeriö. 2013. Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta, ohjeet 2012. Helsinki.
- Ympäristöministeriö. 2016. Ympäristöopas 2016. Helsinki.
- Ympäristöministeriö. 2017a. Lähes nollaenergiarakentamisen lainsäädännön valmistelu. [http://www.ymparisto.fi/FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Maankayton\\_ja\\_rakentamisen\\_valmistella\\_oleva\\_lainsaadanto/Lahes\\_nollaenergiarakentamisen\\_lainsaadanto](http://www.ymparisto.fi/FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Maankayton_ja_rakentamisen_valmistella_oleva_lainsaadanto/Lahes_nollaenergiarakentamisen_lainsaadanto). 7.3.2017.
- Ympäristöministeriö. 2017b. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta.

## WUFI Pro -ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 1. Kevytsoraharkon materiaaliparametrit.

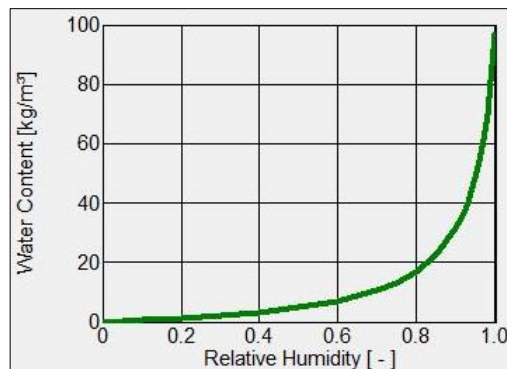
Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	750	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	850	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(wc)$	Kuvio 1	W/(m*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 2	W/(m*K)
Kosteuspitoisuus	$wc(RH)$	Kuvio 3	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	7,0	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus



Kuvio 1.  $\lambda$ :n arvo  $wc$ :n suhteen.

Kuvio 2.  $\lambda$ :n arvo  $T$ :n suhteen.



Kuvio 3.  $wc$ :n arvo  $RH$ :n suhteen.

Taulukko 2. Kevytsoraharkon kosteusdiffusiviteetit kosteuspitoisuuden suhteen.

$wc$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	DWW [m <sup>2</sup> /s]
0	0	0
17	5,4E-10	4E-10
97	1,6E-7	4E-8

DWS = Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti

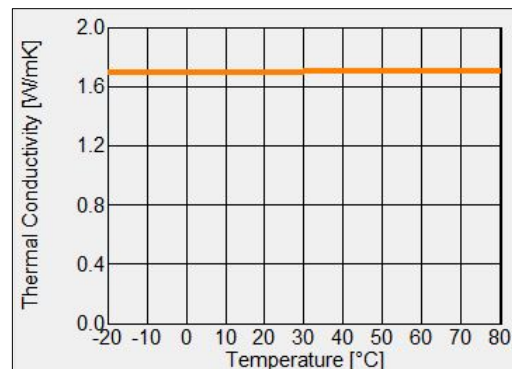
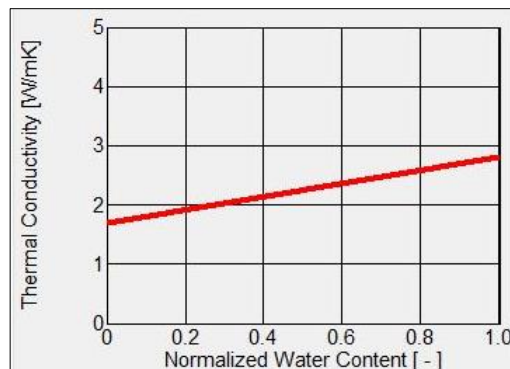
DWW = Kosteusdiffusiviteetti kapillaarisesti siirtyvän kosteuden uudelleenjakautumiselle

## WUFI Pro -ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 3. Betonin materiaaliparametrit.

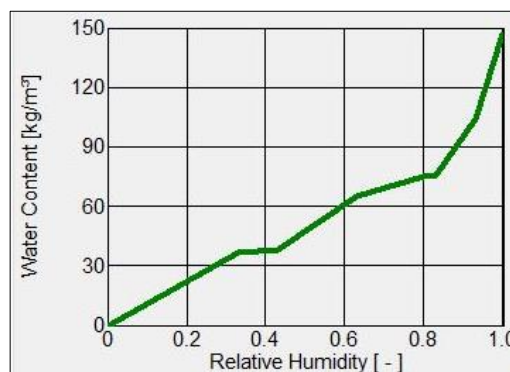
Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	2220	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	850	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(wc)$	Kuvio 4	W/(m*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 5	W/(m*K)
Kosteuspitoisuus	$wc(RH)$	Kuvio 6	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	248	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus



Kuvio 4.  $\lambda$ :n arvo  $wc$ :n suhteen.

Kuvio 2.  $\lambda$ :n arvo T:n suhteen.



Kuvio 6.  $wc$ :n arvo  $RH$ :n suhteen.

Taulukko 4. Betonin kosteusdiffusiviteetit kosteuspitoisuuden suhteen.

$wc$ [kg/m <sup>3</sup> ]	DWS [m <sup>2</sup> /s]	DWW [m <sup>2</sup> /s]
0	1E-9	2E-11
29	4E-9	4E-11
72	1E-8	6E-11
100	-	4E-10
116	2E-8	8E-10
130	3E-8	8E-9
147	3E-7	1E-7

DWS = Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti

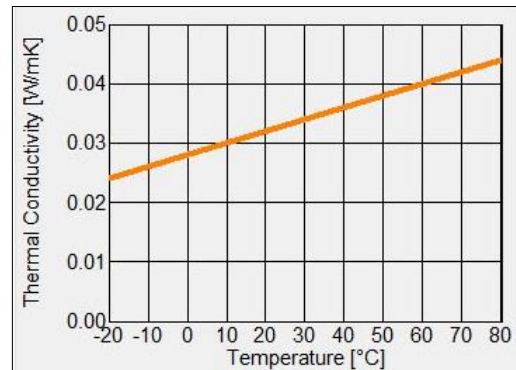
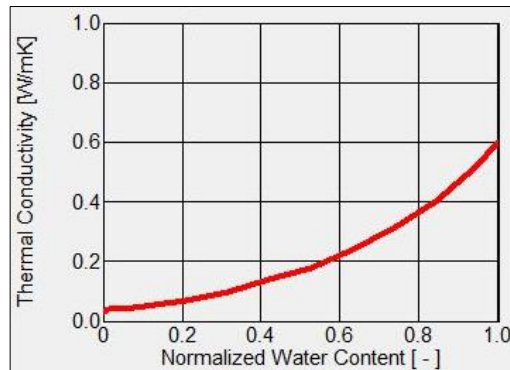
DWW = Kosteusdiffusiviteetti kapillaarisesti siirtyvän kosteuden uudelleenjakautumiselle

## WUFI Pro -ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 5. EPS-eristeen materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	30	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	1500	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(wc)$	Kuvio 7	W/(m*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 8	W/(m*K)
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	30	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus



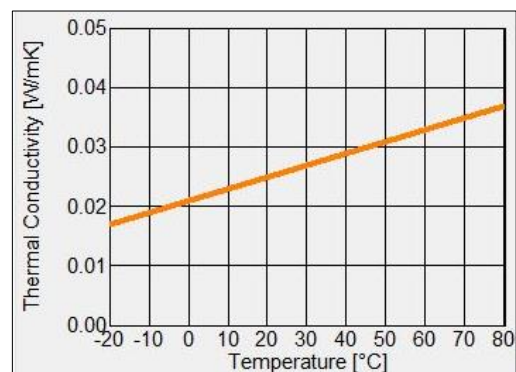
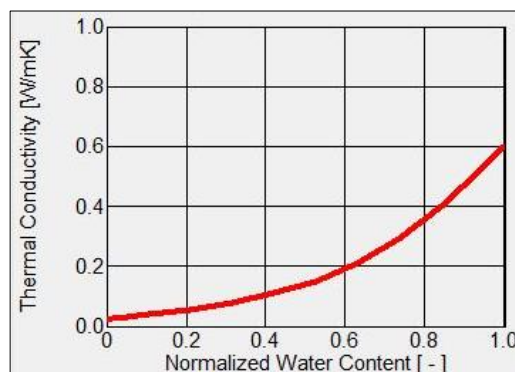
Kuvio 7.  $\lambda$ :n arvo  $wc$ :n suhteen.

Kuvio 8.  $\lambda$ :n arvo T:n suhteen.

Taulukko 6. PU-eristeen materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	37	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	1500	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(wc)$	Kuvio 9	W/(m*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 10	W/(m*K)
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	50	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus



Kuvio 9.  $\lambda$ :n arvo  $wc$ :n suhteen.

Kuvio 10.  $\lambda$ :n arvo T:n suhteen.

## Mallin luominen WUFI Pro -ohjelmistossa

**Projektin sisältö:**

- Case: 1 #1 (Act. Case)
  - Component
    - Assembly/Monitor Positions
    - Orientation
    - Surface Transfer Coeff.
    - Initial Conditions
  - Control
    - Calculation Period/Profiles
    - Numerics
  - Climate
    - Outdoor (Left Side)
    - Indoor (Right Side)
  - Quick Graph
    - Total Water Content
    - Water Content in Layer
      - Expanded Clay (unlocked)
      - EPS (heat cond.: 0.04 W/mK)
      - Expanded Clay (unlocked)
    - Mon.Pos. Temp./Humidity
    - Mon.Pos. Isopleths

Kuva 1. WUFI Pro -ohjelmiston mallipuu.

Project/Case: **Oppari1/#1**

Assembly/Monitor Positions | Orientation/Inclination/Height | Surface Transfer Coeff. | Initial Conditions

**Assembly**

No.	Layer/Material (from Outside to Inside)	Thickn. [m]
1	Expanded Clay (unlocked)	0,1
2	EPS (heat cond.: 0.04 W/mK - density: 15 kg/m <sup>3</sup> ) (unlocked)	0,18
3	Expanded Clay (unlocked)	0,1

**Subdivision: Expanded Clay (unlocked)**

No.	Thickn. [m]	No. of El.	Exp. Factor	First El.	Last El.
1.1	0,05	10	1,1356	0,0027	0,0085
1.2	0,05	10	0,8849	0,0082	0,0027

Total Thickness: 0,38 m

Total Thermal Performance: R-Value: 6,54 m<sup>2</sup>K/W

U-Value: 0,149 W/m<sup>2</sup>K

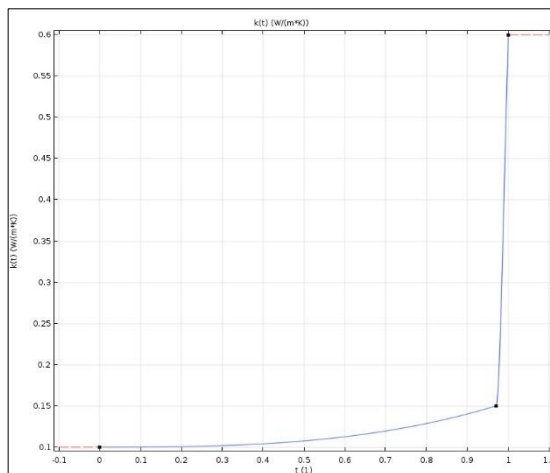
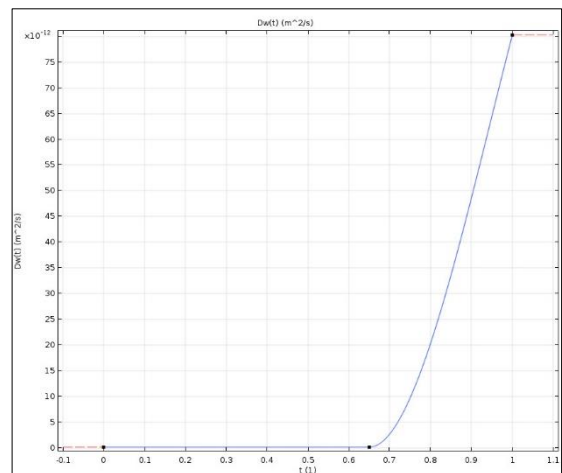
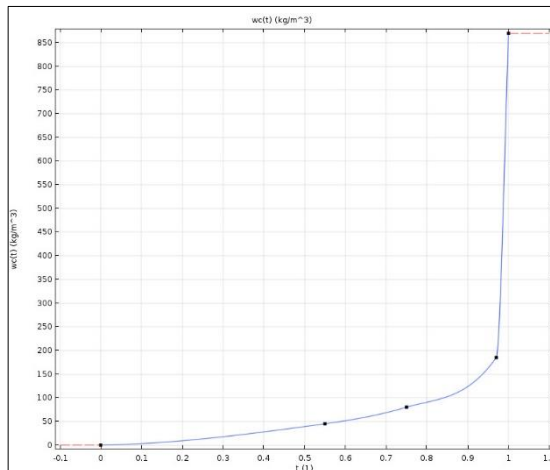
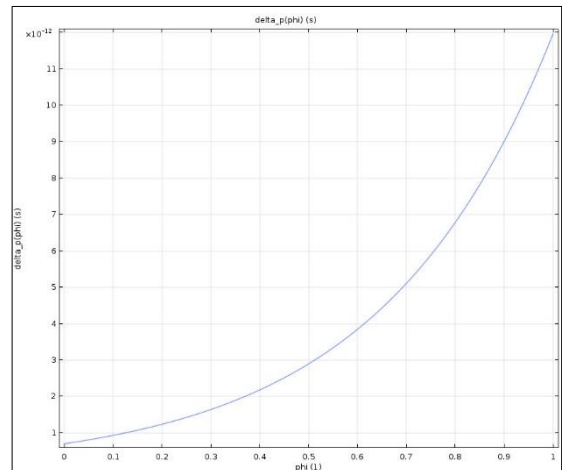
Kuva 2. Esimerkki mallin geometriasta ja tarkastelupisteistä, (US2A).

## COMSOL-ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 1. Puun materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	532	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	2700	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(RH)$	Kuvio 1	W/(m*K)
Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	$D_w(RH)$	Kuvio 2	m <sup>2</sup> /s
Kosteuspitoisuus	$w_c(RH)$	Kuvio 3	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyrynläpäisevyys	$\delta p(RH)$	Kuvio 4	s
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	Kaava 1	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus

Kuvio 1.  $\lambda$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 2.  $D_w$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 3.  $W_c$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 4.  $\delta p$ :n arvo RH:n suhteen.

$$\mu_{vrf} = \frac{2,01 \cdot 10^{-7} \cdot 293,15^{0,81}}{1 \cdot 10^5 \cdot \delta p(RH)} \quad (1)$$

missä

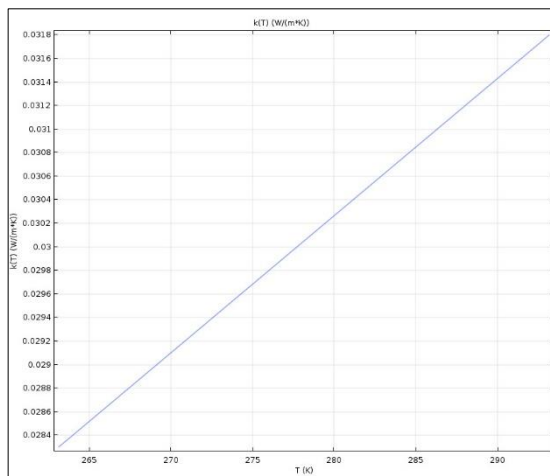
$\mu_{vrf}$  vesihöyryn diffuusiovastuskerroin, [-]  
 $\delta p(RH)$  vesihöyrynläpäisevyys RH:n suhteen, [s]

## COMSOL-ohjelmiston materiaaliparametrit

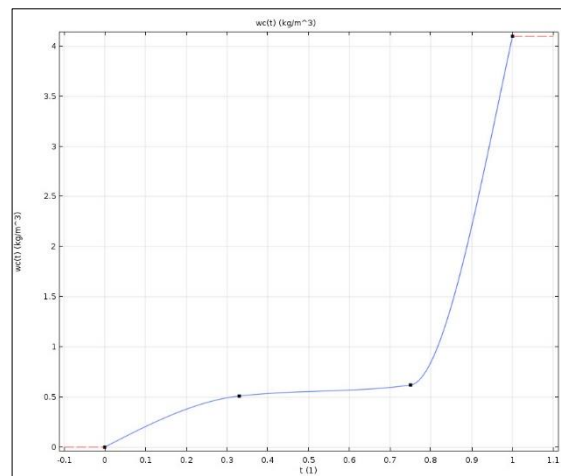
Taulukko 2. Mineraalivillan materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	73	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	850	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 5	W/(m*K)
Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	$D_w$	1E-14	m <sup>2</sup> /s
Kosteuspitoisuus	$w_c(RH)$	Kuvio 6	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyrynläpäisevyys	$\delta\rho(T)$	Kuvio 7	s
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	1,4	-

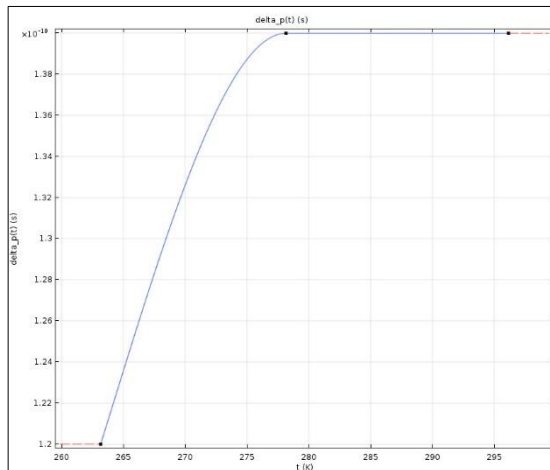
T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus



Kuvio 5. λ:n arvo T:n suhteen.



Kuvio 6. Wc:n arvo RH:n suhteen.



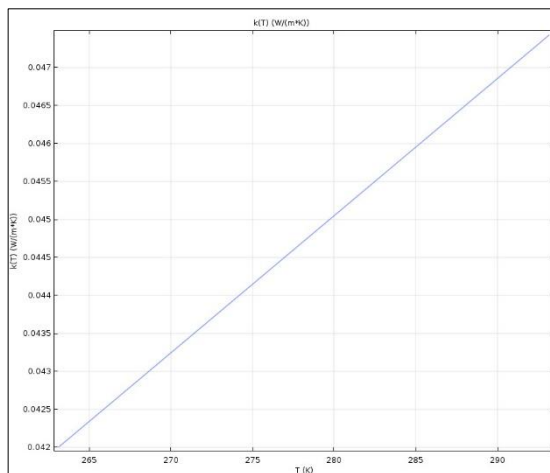
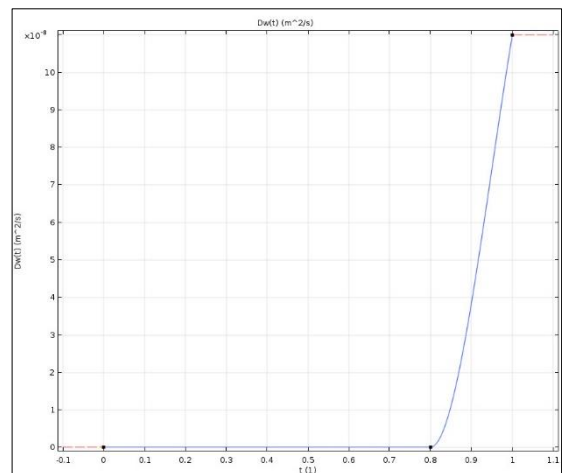
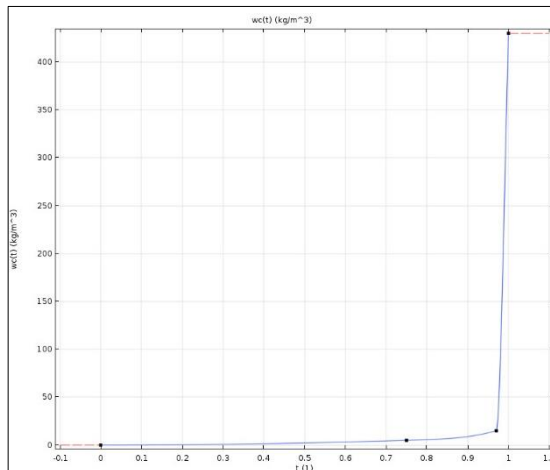
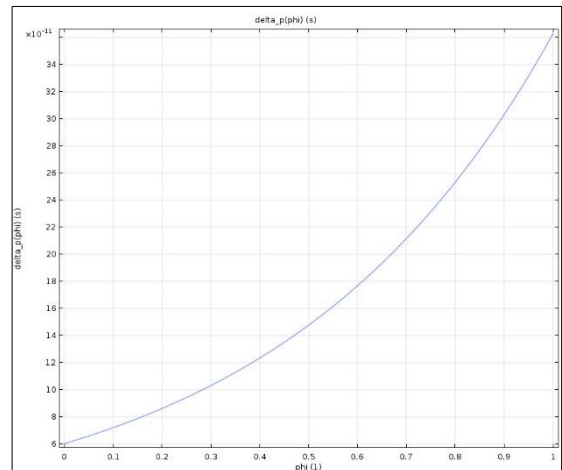
Kuvio 7. δρ:n arvo T:n suhteen.

## COMSOL-ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 3. Puhallusvillan materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	37	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	2000	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 8	W/(m*K)
Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	$D_w(RH)$	Kuvio 9	m <sup>2</sup> /s
Kosteuspitoisuus	$w_c(RH)$	Kuvio 10	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyrynläpäisevyys	$\delta\rho(RH)$	Kuvio 11	s
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	1,3	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus

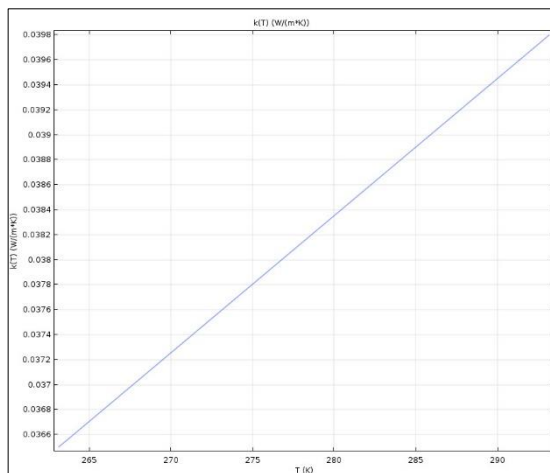
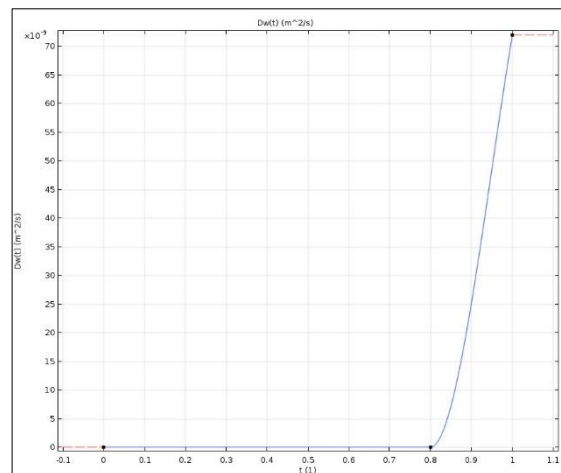
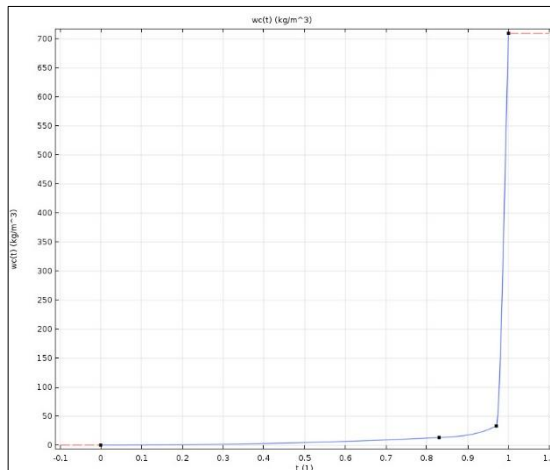
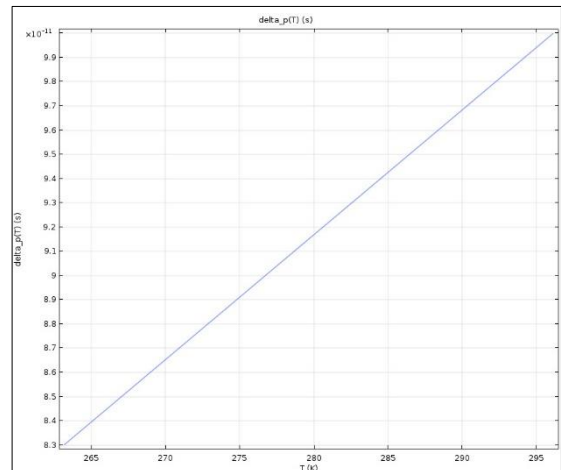
Kuvio 8.  $\lambda$ :n arvo T:n suhteen.Kuvio 9.  $D_w$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 10.  $w_c$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 11.  $\delta\rho$ :n arvo RH:n suhteen.

## COMSOL-ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 4. Tuulensuojalevyn materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	63	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	2000	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(T)$	Kuvio 12	W/(m*K)
Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	$D_w(RH)$	Kuvio 13	m <sup>2</sup> /s
Kosteuspitoisuus	$w_c(RH)$	Kuvio 14	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyrynläpäisevyys	$\delta\rho(T)$	Kuvio 15	s
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	2,0	-

T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus

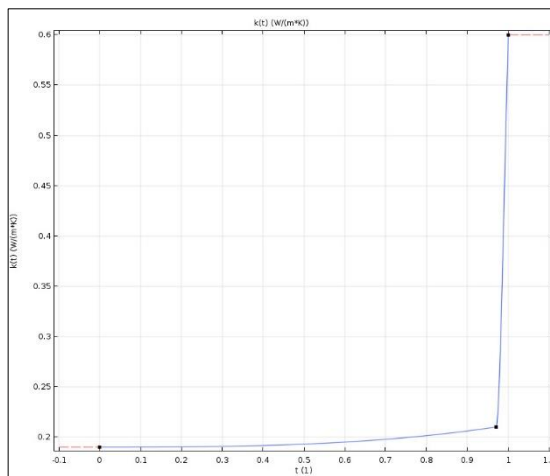
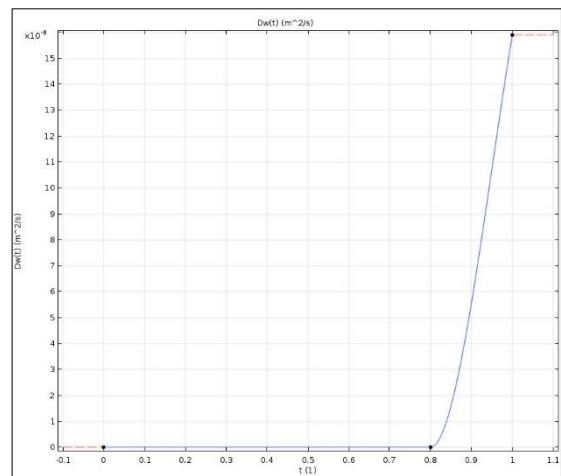
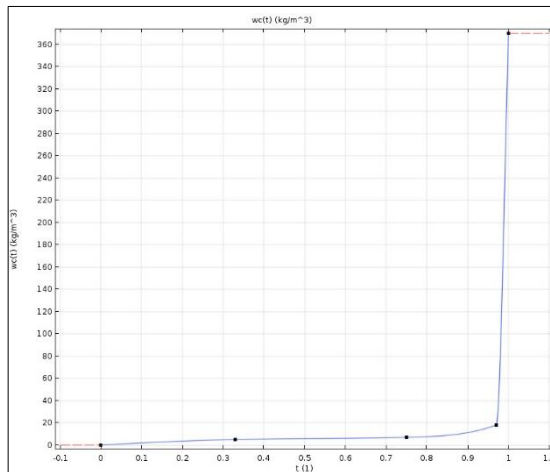
Kuvio 12.  $\lambda$ :n arvo T:n suhteen.Kuvio 13.  $D_w$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 14.  $W_c$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 15.  $\delta\rho$ :n arvo T:n suhteen.

## COMSOL-ohjelmiston materiaaliparametrit

Taulukko 5. Kipsilevyn materiaaliparametrit.

Ominaisuus	Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys	$\rho$	574	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti	$C_p$	1100	J/(kg*K)
Lämmönjohtavuus	$\lambda(RH)$	Kuvio 16	W/(m*K)
Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	$D_w(RH)$	Kuvio 17	m <sup>2</sup> /s
Kosteuspitoisuus	$w_c(RH)$	Kuvio 18	kg/m <sup>3</sup>
Vesihöyrynläpäisevyys	$\delta\rho(T)$	2,9E-11	s
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	$\mu_{vrf}$	6,9	-

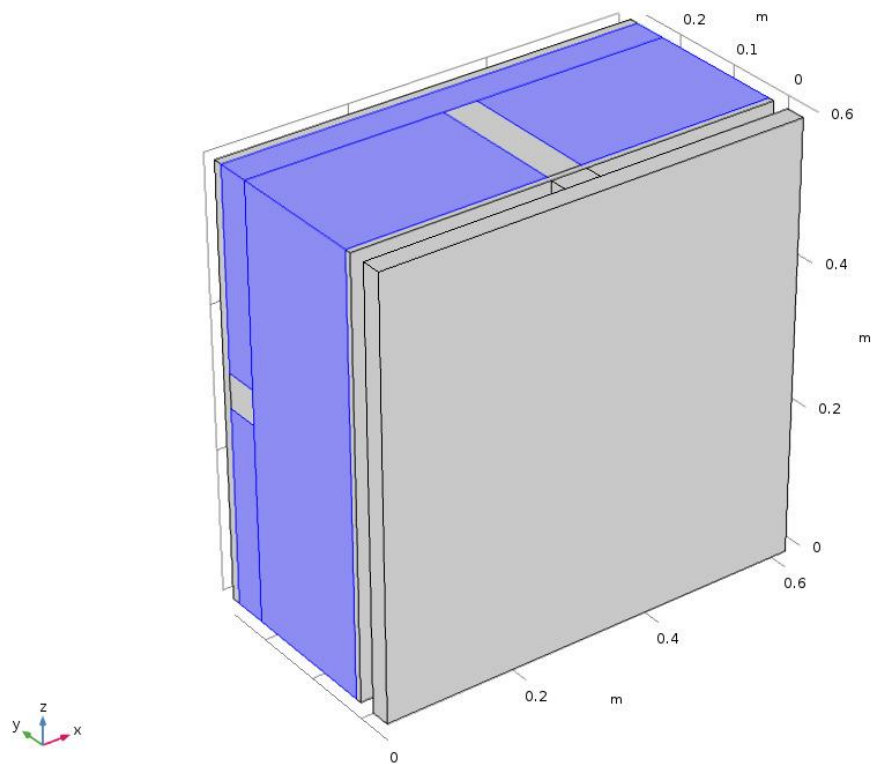
T = lämpötila, RH = suhteellinen kosteus

Kuvio 16.  $\lambda$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 17.  $D_w$ :n arvo RH:n suhteen.Kuvio 18.  $w_c$ :n arvo RH:n suhteen.

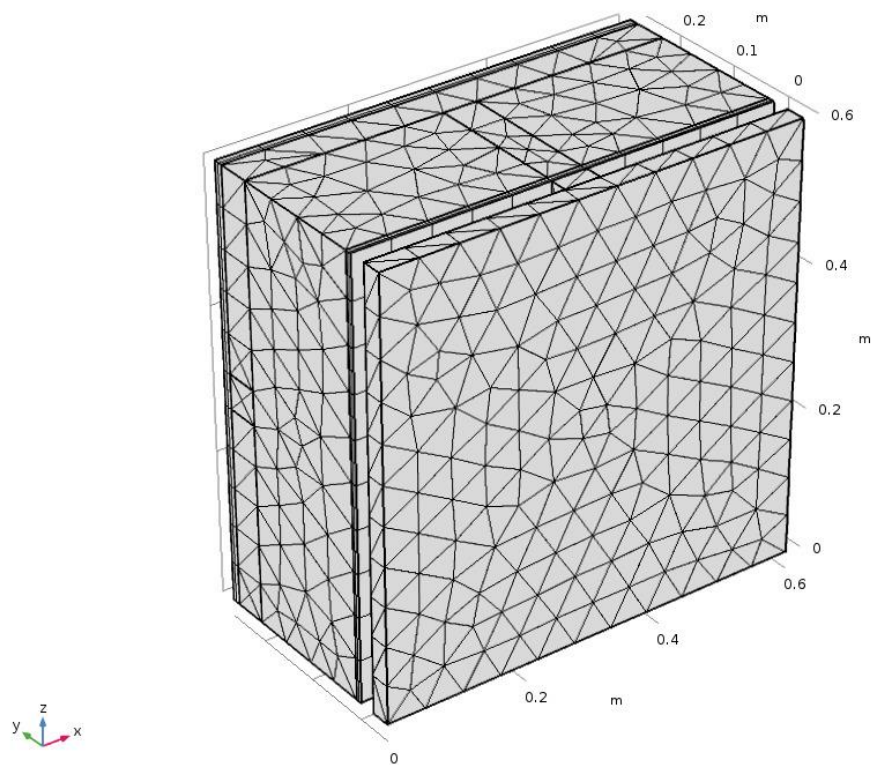
## Mallin luominen COMSOL-ohjelmistossa

<ul style="list-style-type: none"> <li>US1A (2007).mph (root) <ul style="list-style-type: none"> <li>Global Definitions <ul style="list-style-type: none"> <li>Parameters</li> <li>Materials</li> </ul> </li> <li>Component 1 (comp 1) <ul style="list-style-type: none"> <li>Definitions <ul style="list-style-type: none"> <li>Variables 1</li> <li>Interpolation 1 (Te, Rhe)</li> <li>Boundary System 1 (sys 1)</li> <li>View 1</li> </ul> </li> <li>Geometry 1 <ul style="list-style-type: none"> <li>Import 1 (imp 1)</li> <li>Form Union (fin)</li> </ul> </li> <li>Materials <ul style="list-style-type: none"> <li>Puuosat (mat1)</li> <li>Mineraalivilla (mat2)</li> <li>Kipislevy (mat3)</li> <li>Tuulensuojalevy (mat4)</li> </ul> </li> <li>Heat Transfer in Building Materials 2 (ht2) <ul style="list-style-type: none"> <li>Building Material 1</li> <li>Initial Values 1</li> <li>Thermal Insulation 1</li> <li>Initial Values 2</li> <li>Rsi</li> <li>Rse</li> </ul> </li> <li>Moisture Transport in Building Materials 2 (mt2) <ul style="list-style-type: none"> <li>Building Material 1</li> <li>Initial Values 1</li> <li>Insulation 1</li> <li>Initial Values 2</li> <li>Thin Moisture Barrier 1</li> <li>Moisture Flux 1</li> <li>Moisture Flux 2</li> </ul> </li> <li>Multiphysics <ul style="list-style-type: none"> <li>Heat and Moisture 1 (ham 1)</li> </ul> </li> <li>Mesh 1 <ul style="list-style-type: none"> <li>Size</li> <li>Swept 1</li> <li>Free Tetrahedral 1</li> </ul> </li> <li>Study 1 <ul style="list-style-type: none"> <li>Step 1: Stationary</li> <li>Step 2: Time Dependent</li> <li>Solver Configurations</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<p><b>Projektin nimi</b></p> <p><b>Yleiset määrittymiset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Parametrit</li> <li>Materiaalit</li> </ul> <p><b>Mallinnettava komponentti</b></p> <p><b>Määrittymiset</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Muuttujat</li> <li>Kuvaaja (tuotu säädä)</li> <li>Rajasyteemi</li> <li>Näkymä</li> </ul> <p><b>Geometria</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tuotu geometria</li> <li>Muodon liittäminen</li> </ul> <p><b>Materiaalit</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Materiaali 1</li> <li>Materiaali 2</li> <li>Materiaali 3</li> <li>Materiaali 4</li> </ul> <p><b>Lämmön siirtyminen rakennusmateriaaleissa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rakennusmateriaalit</li> <li>Lähtöarvot 1 (höyrynsulun ulkopuoliset osat)</li> <li>Lämmöneriste</li> <li>Lähtöarvot 2 (höyrynsulun sisäpuoliset osat)</li> <li>Sisäpuolen pintavastus</li> <li>Ulkopuolen pintavastus</li> </ul> <p><b>Kosteuden siirtyminen rakennusmateriaaleissa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Rakennusmateriaalit</li> <li>Lähtöarvot 1 (höyrynsulun ulkopuoliset osat)</li> <li>Lämmöneriste</li> <li>Lähtöarvot 2 (höyrynsulun sisäpuoliset osat)</li> <li>Höyrynsulkumuovi</li> <li>Kosteusvirta 1 (ulkopinnan läpi)</li> <li>Kosteusvirta 2 (sisäpinnan läpi)</li> </ul> <p><b>Fysiikkamalli</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lämpö ja kosteus</li> </ul> <p><b>Verkko</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verkon koko</li> <li>Pyyhkäisyverkko</li> <li>Vapaa tetraedriverkko</li> </ul> <p><b>Tutkimus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vaihe 1: stationäärinen</li> <li>Vaihe 2: ajasta riippuvainen</li> <li>Ratkaisijan asetukset</li> </ul>
---	--

Kuva 1. Esimerkki mallinnuksessa käytetystä mallipuusta, (US1A).

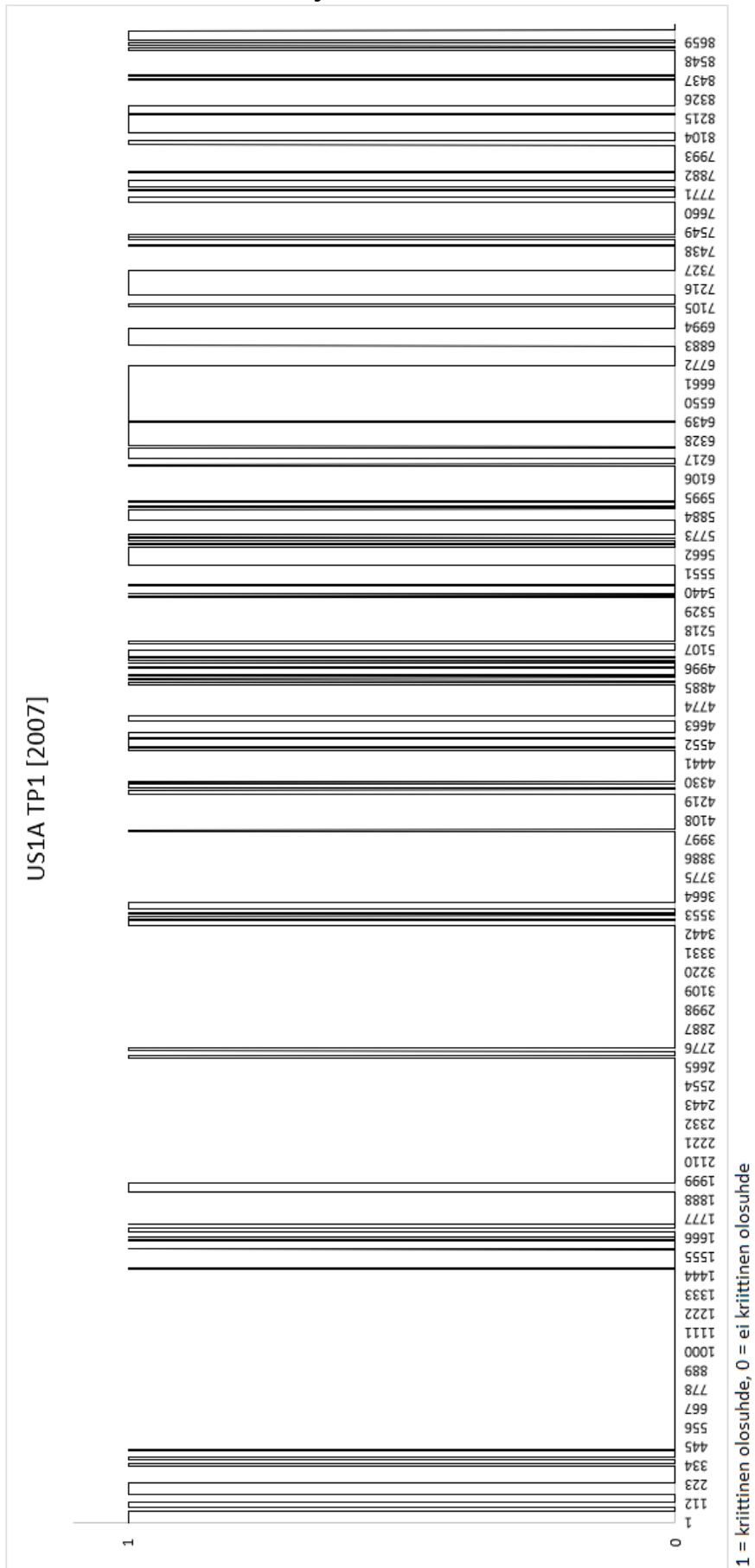
**Mallin luominen COMSOL-ohjelmistossa**

Kuva 2. Esimerkki mallin geometriasta ja eristekerrosten valinnasta, (US1A).



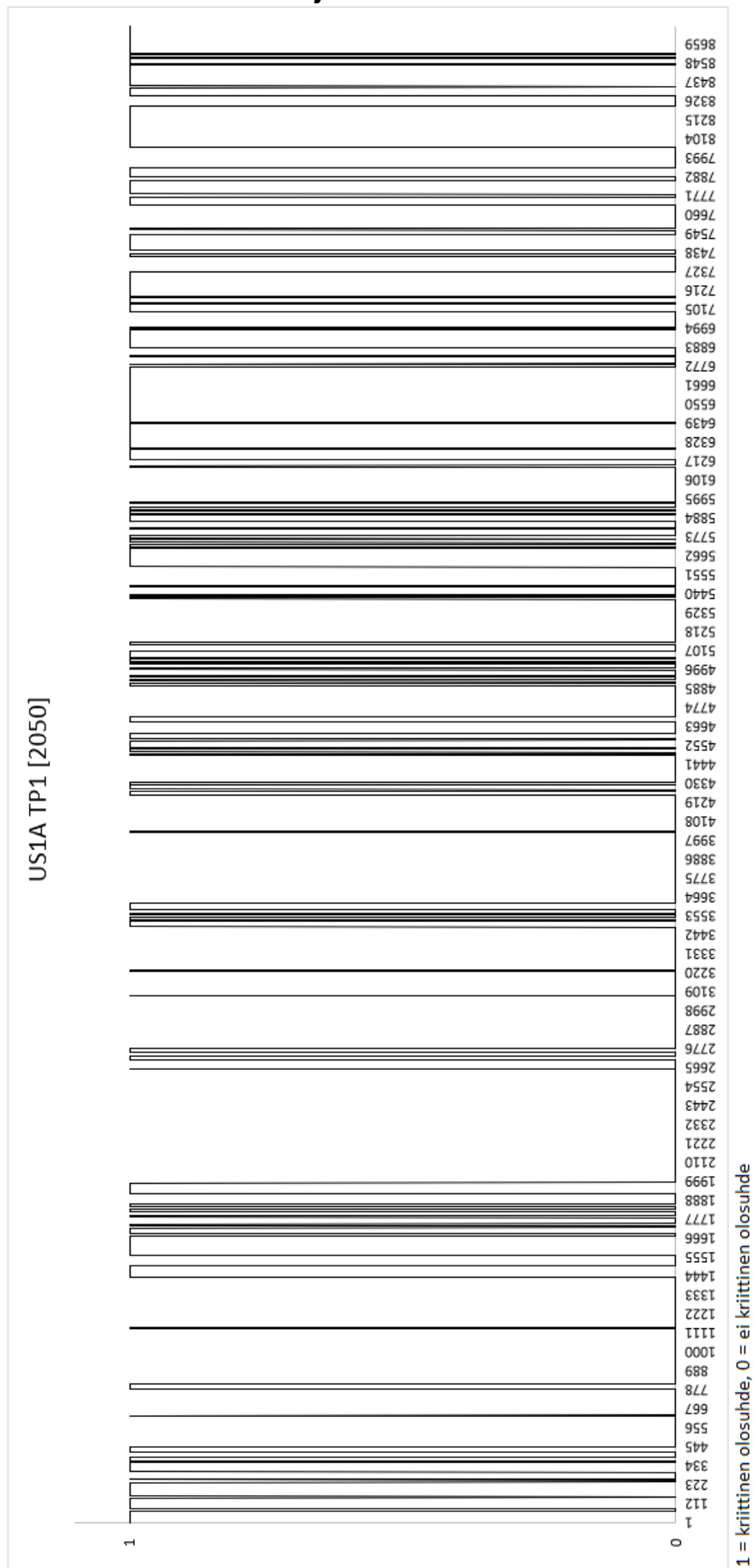
Kuva 3. Esimerkki mallin verkotuksesta, (US1A).

**Esimerkit rakenteiden ajoista kriittisissä olosuhteissa**



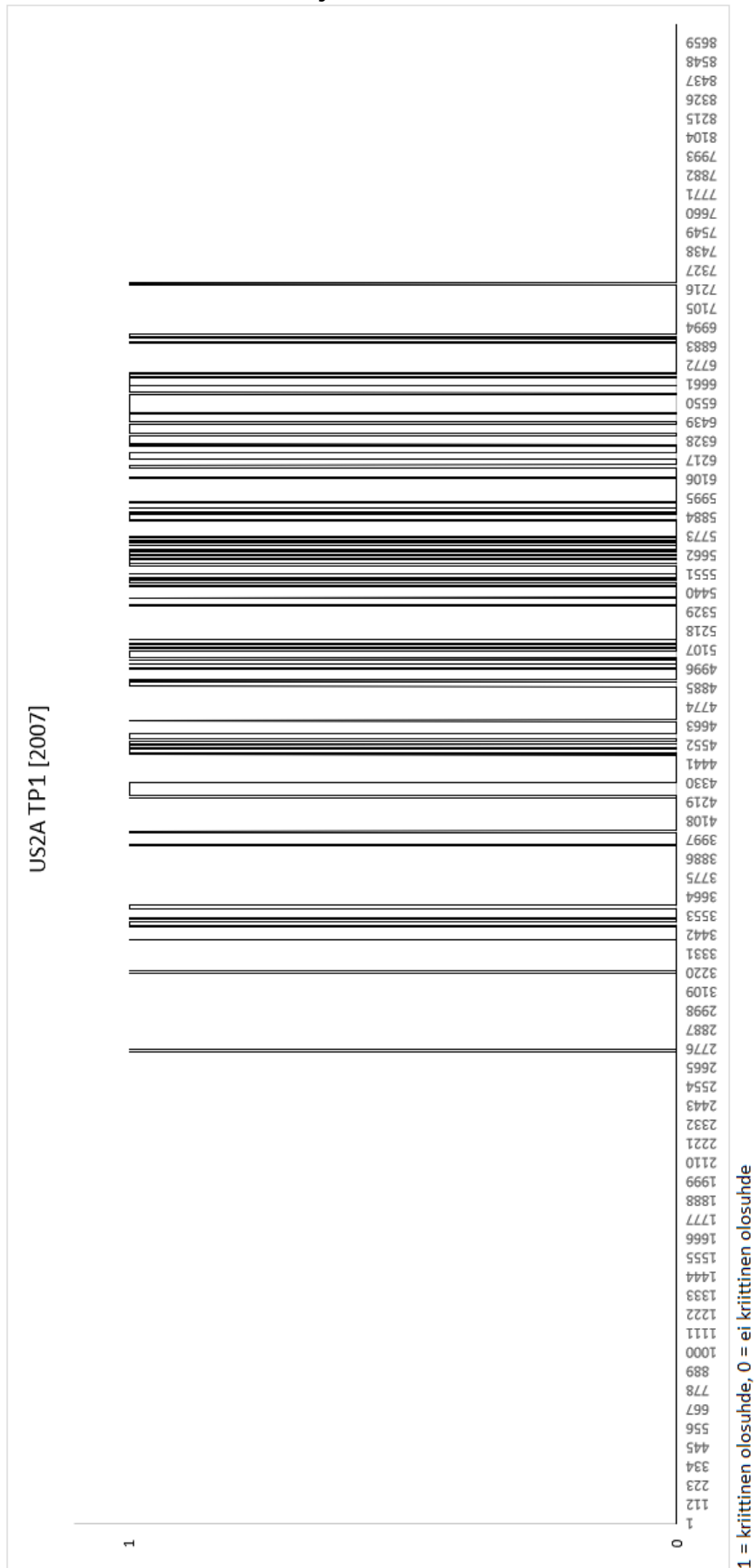
Kuvio 1. US1A, tarkastelupiste 1, vuoden kriittiset olosuhteet (Vantaa 2007).

### Esimerkit rakenteiden ajoista kriittisissä olosuhteissa



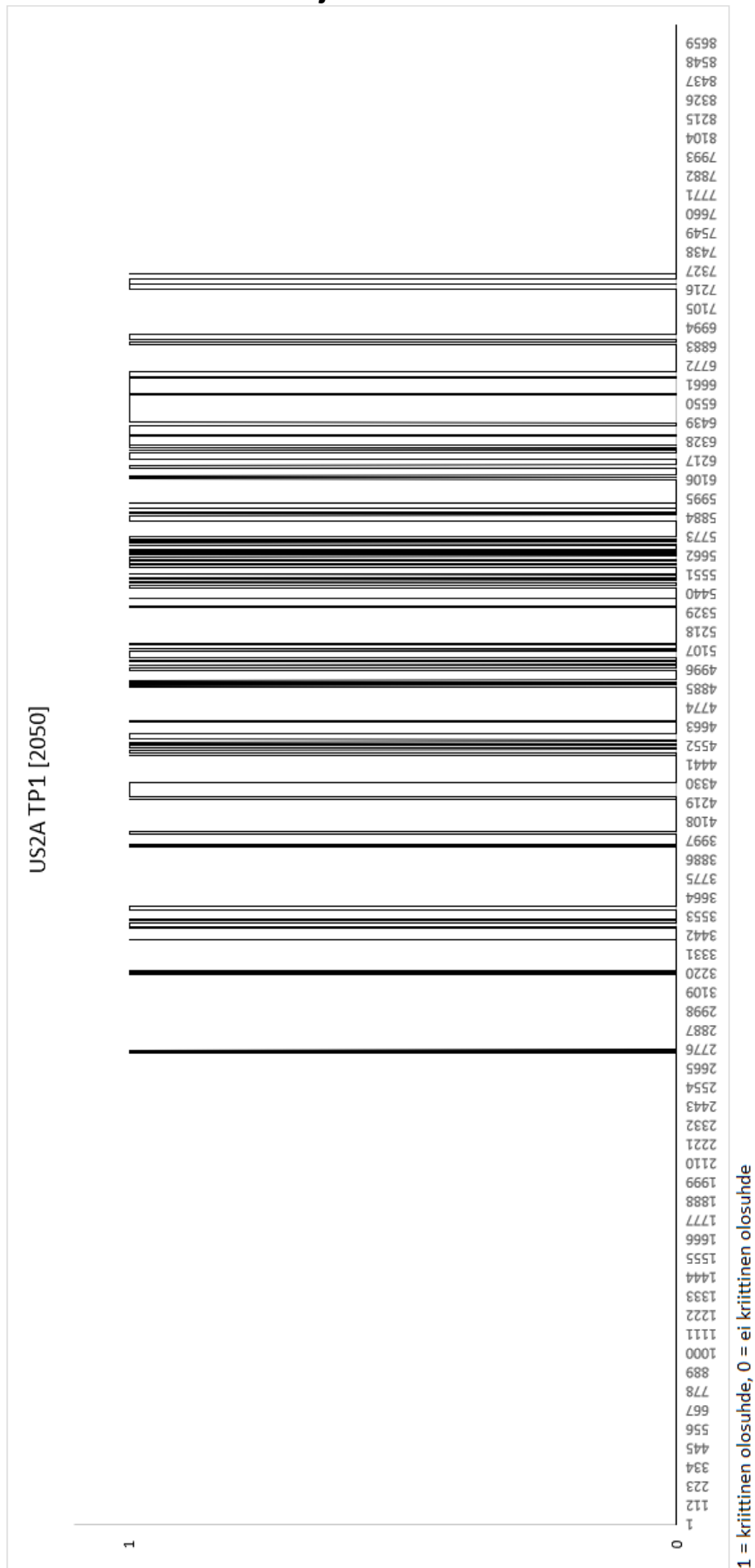
Kuvio 2. US1A, tarkastelupiste 1, vuoden kriittiset olosuhteet (Vantaa 2050).

### Esimerkit rakenteiden ajoista kriittisissä olosuhteissa



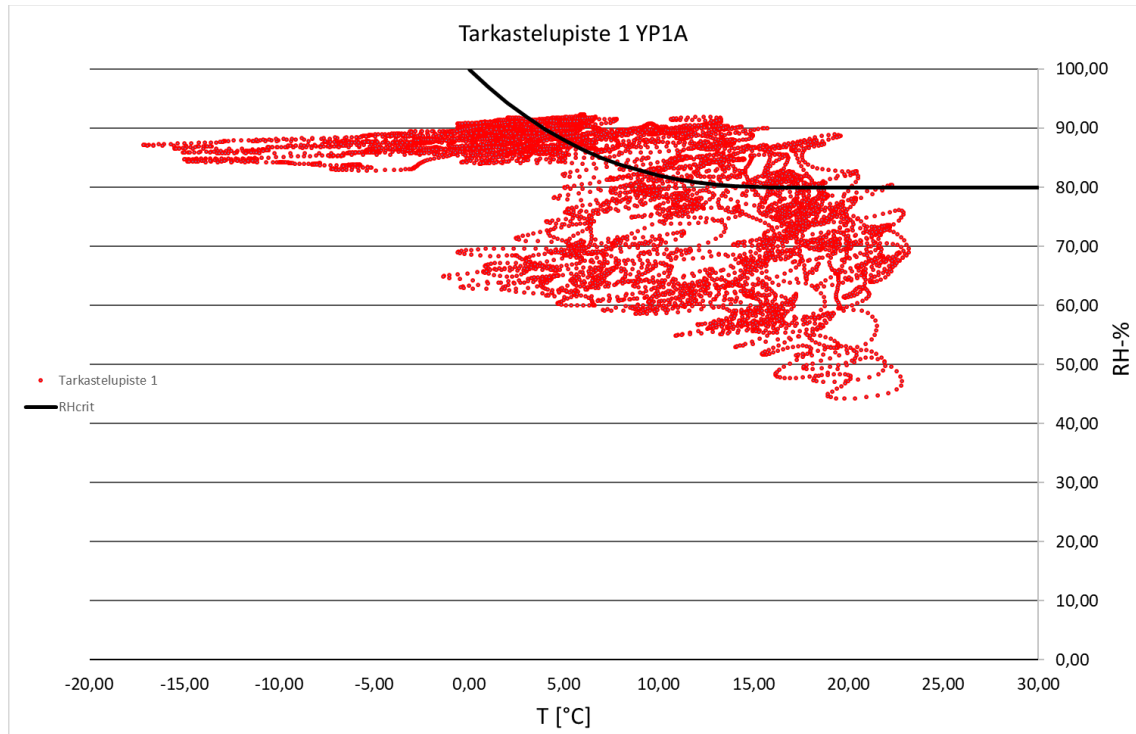
Kuvio 3. US2A, tarkastelupiste 1, vuoden kriittiset olosuhteet (Vantaa 2007).

### Esimerkit rakenteiden ajoista kriittisissä olosuhteissa

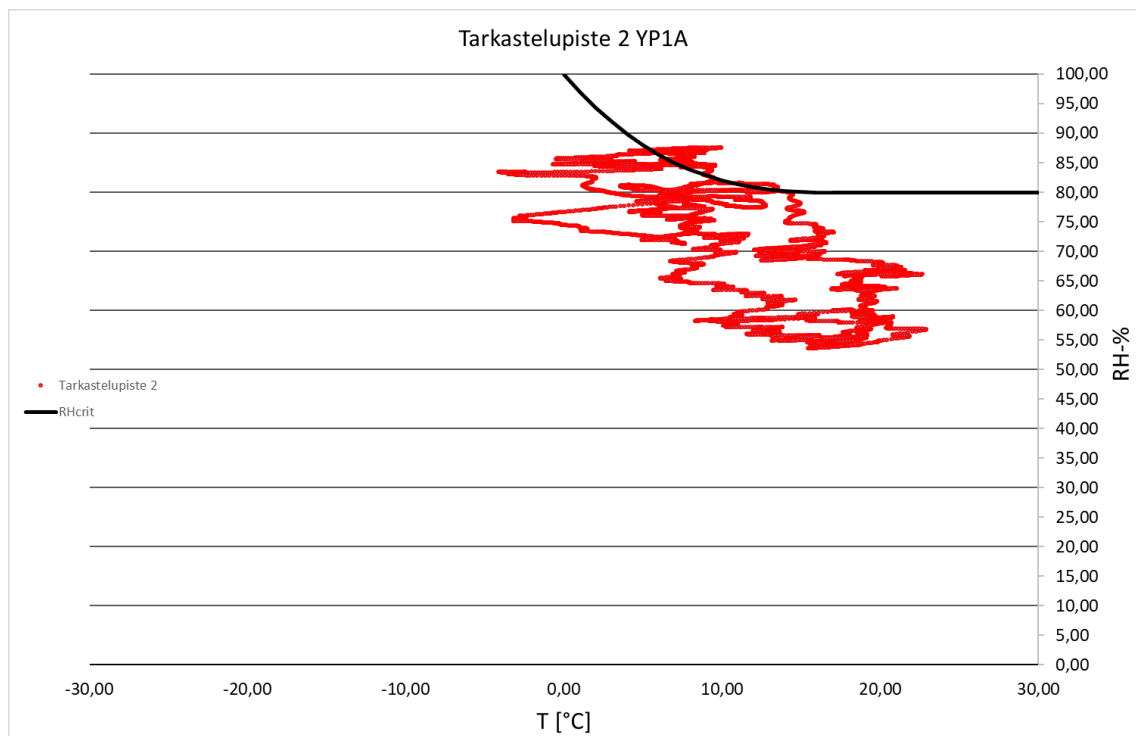


Kuvio 4. US2A, tarkastelupiste 1, vuoden kriittiset olosuhteet (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset nykyilmastossa

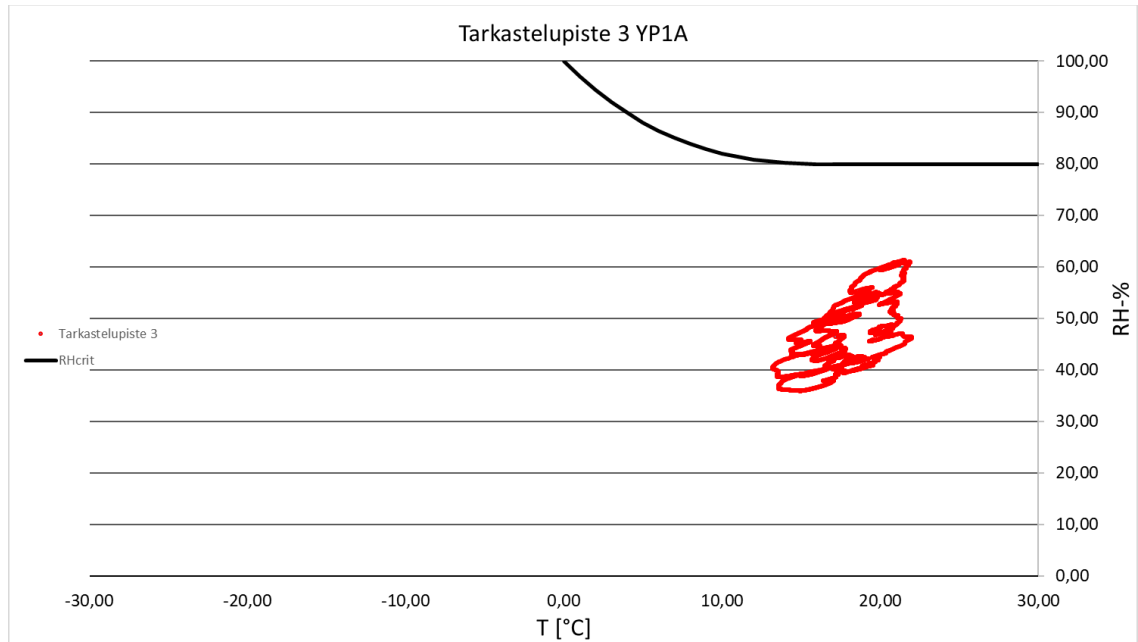


Kuvio 1. YP1A, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

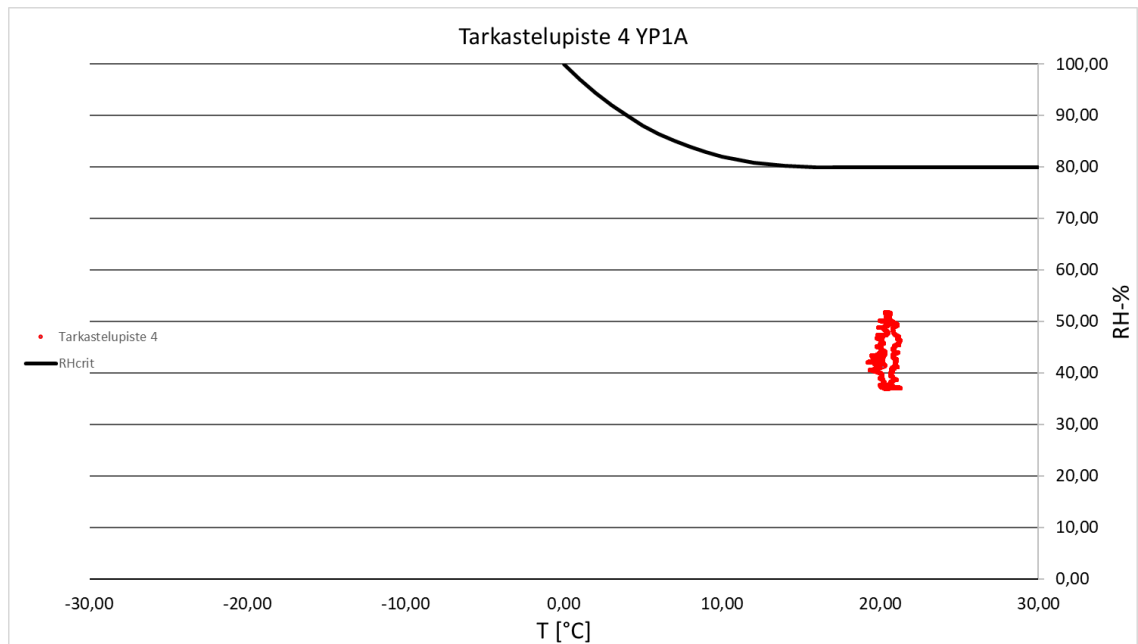


Kuvio 2. YP1A, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

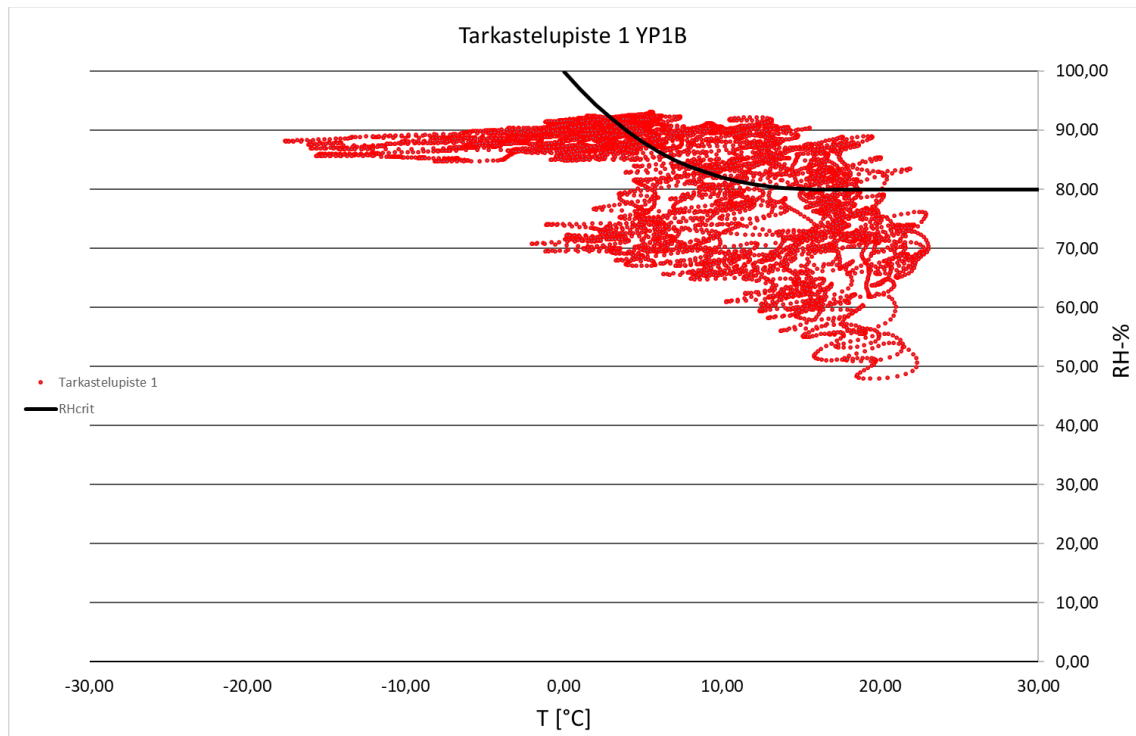


Kuvio 3. YP1A, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

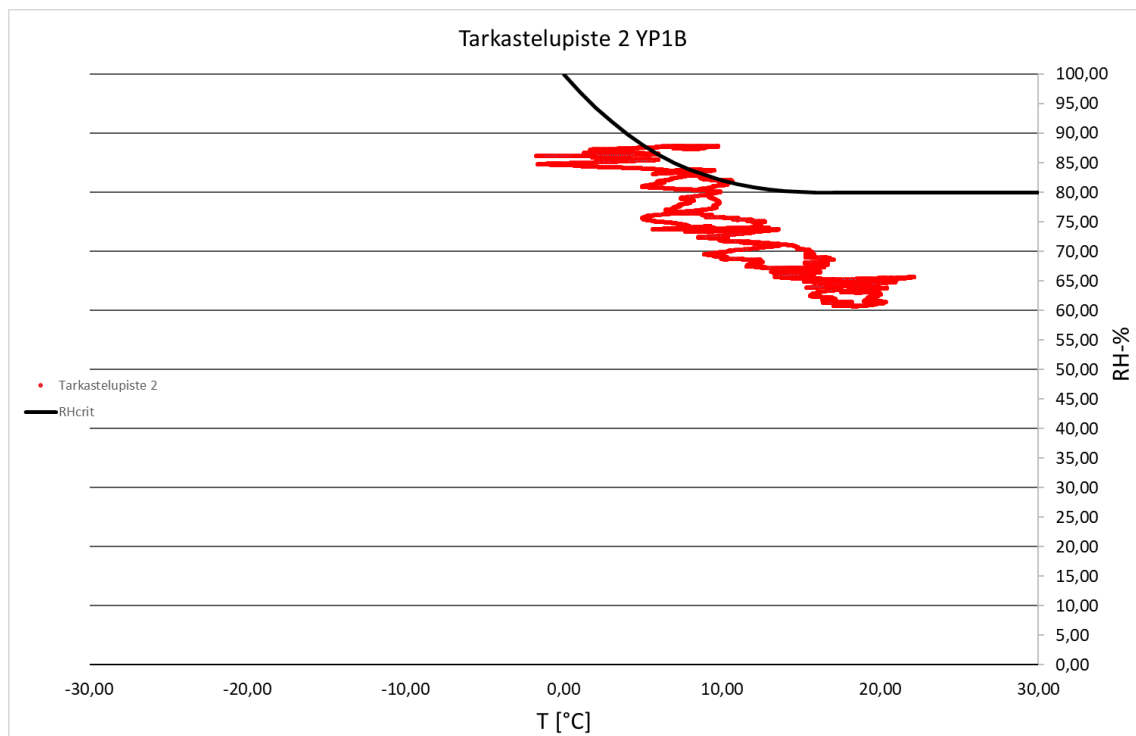


Kuvio 4. YP1A, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

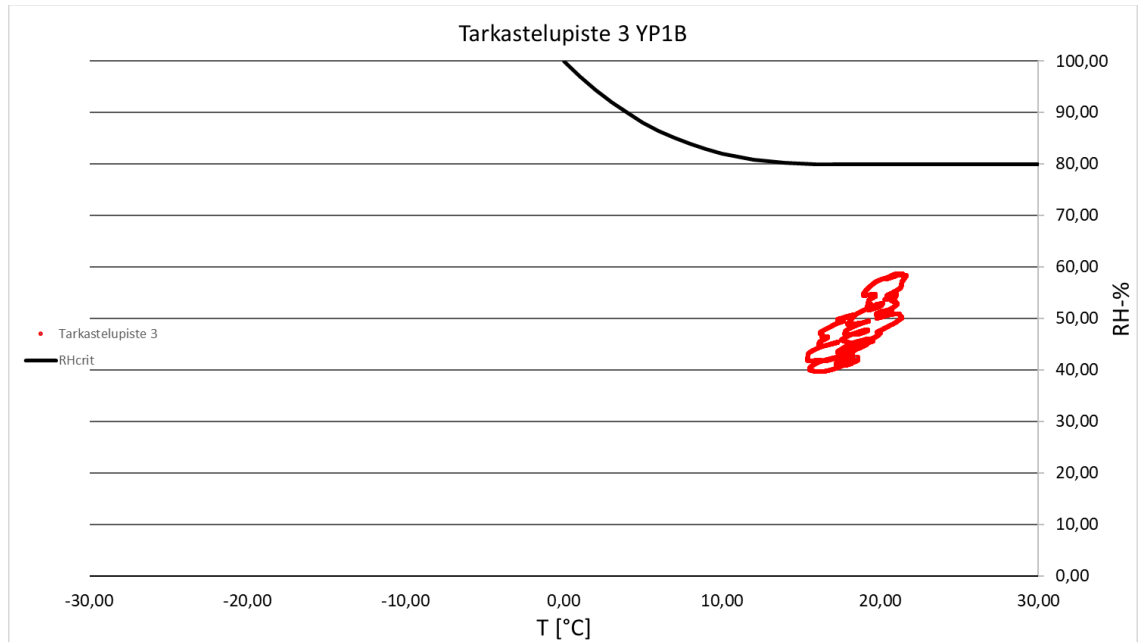


Kuvio 5. YP1B, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

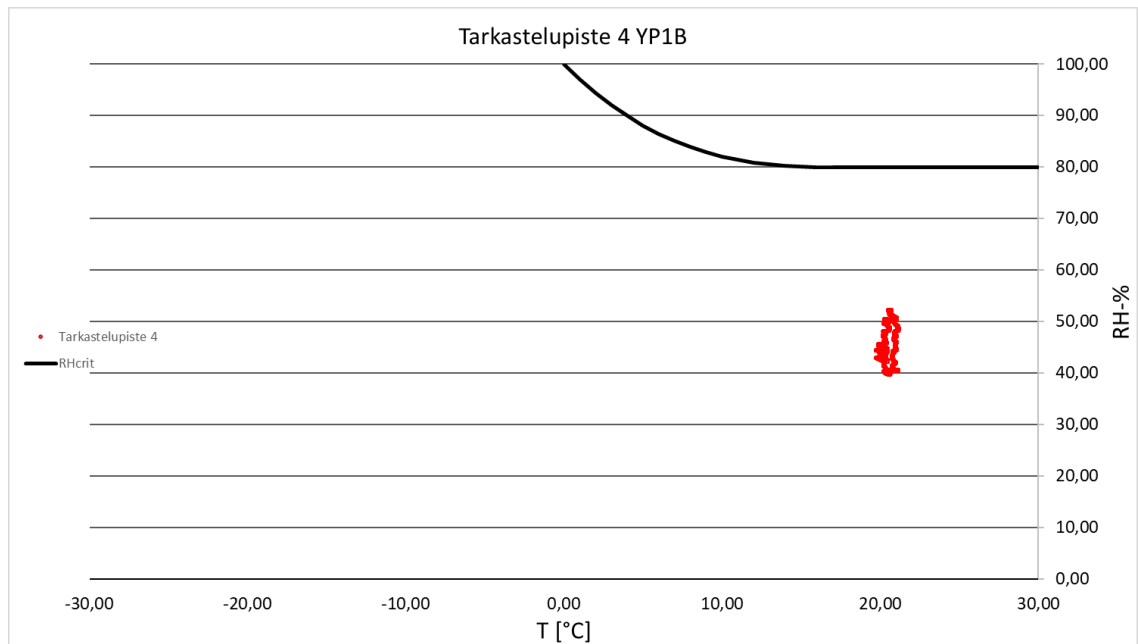


Kuvio 6. YP1B, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

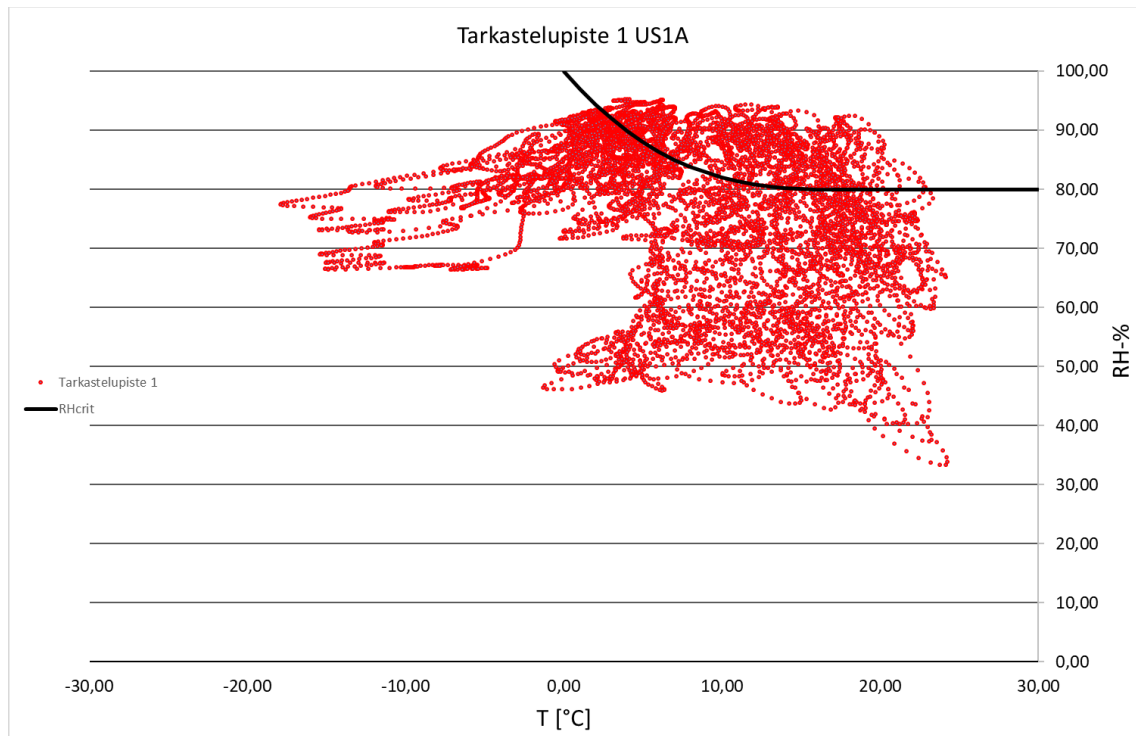


Kuvio 7. YP1B, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

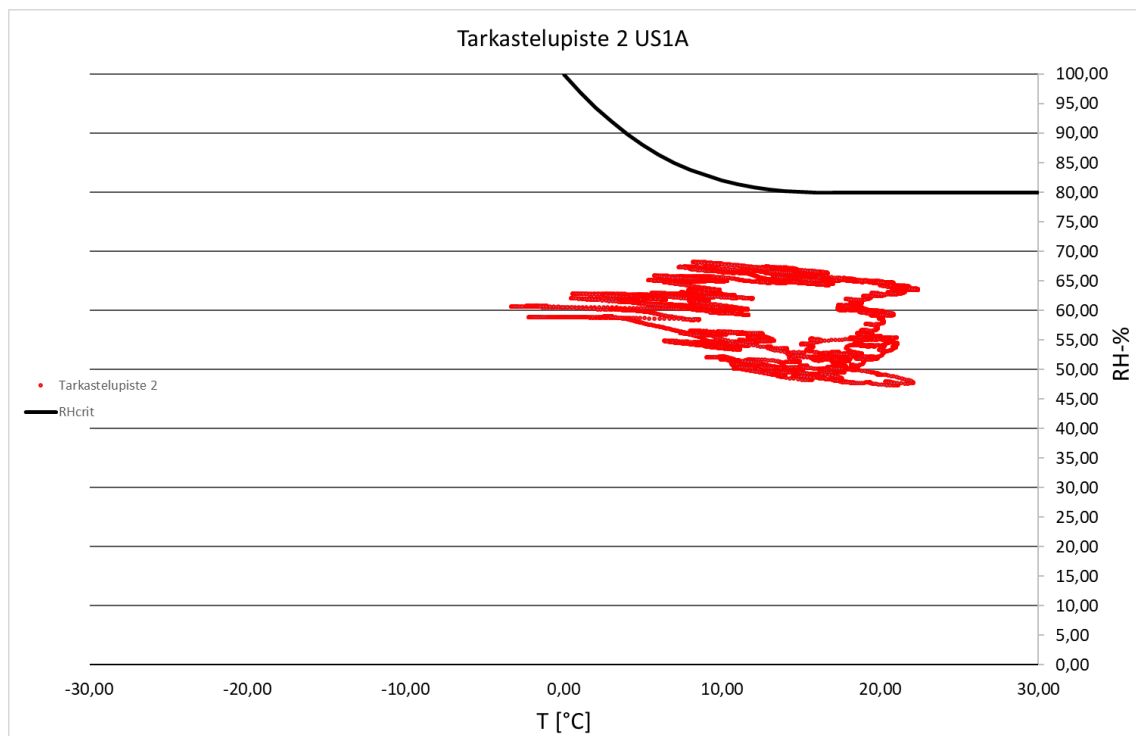


Kuvio 8. YP1B, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

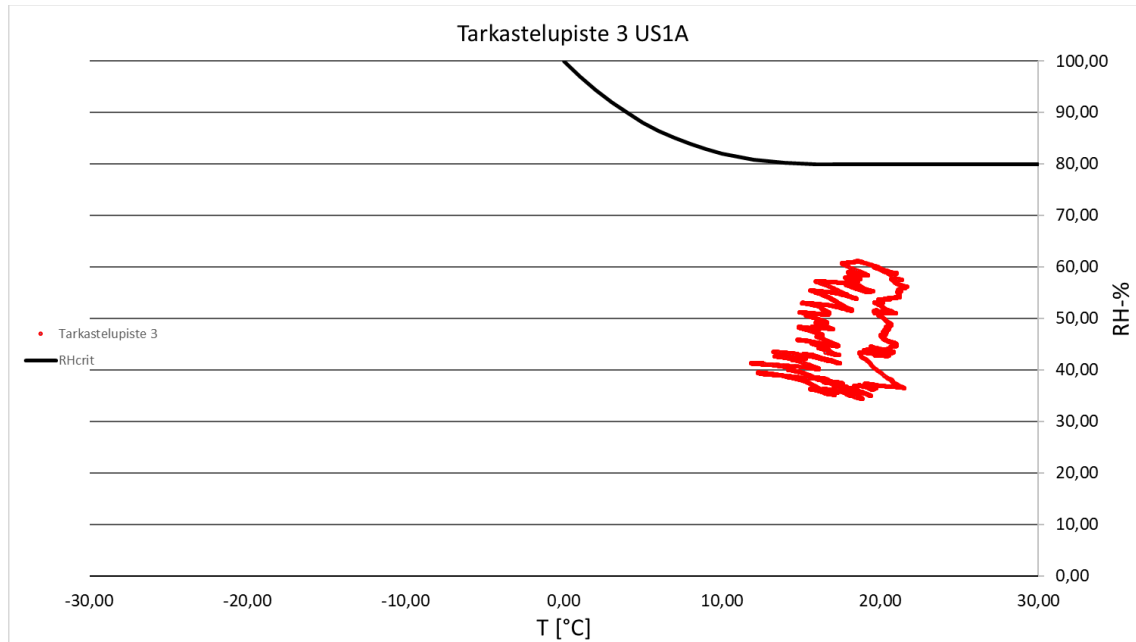


Kuvio 9. US1A, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

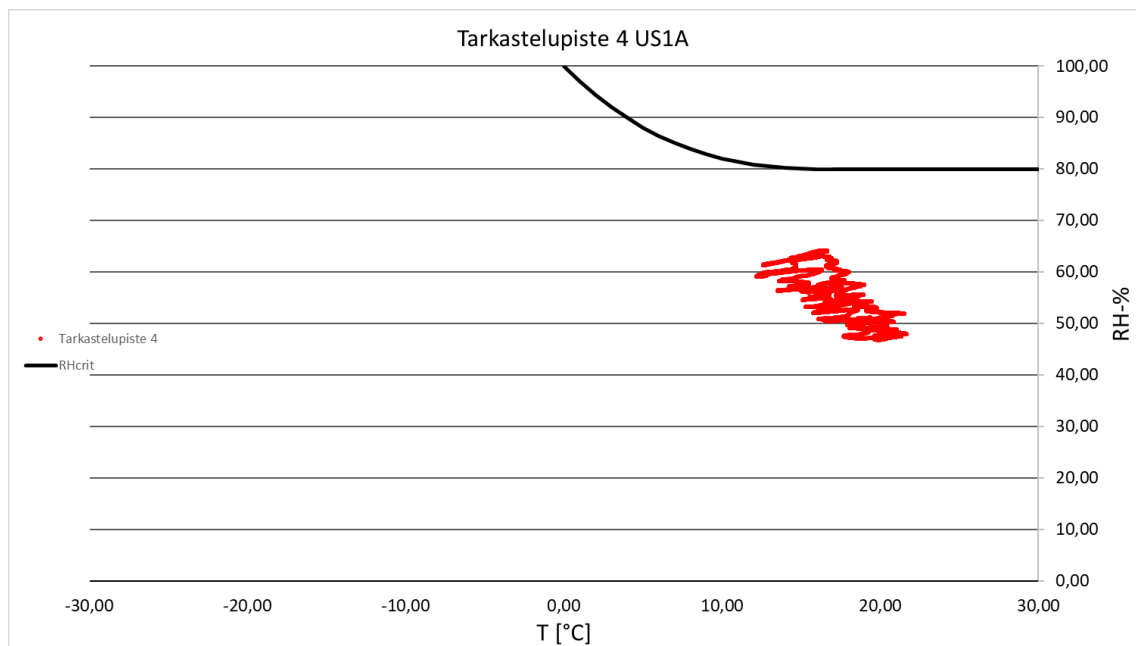


Kuvio 10. US1A, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

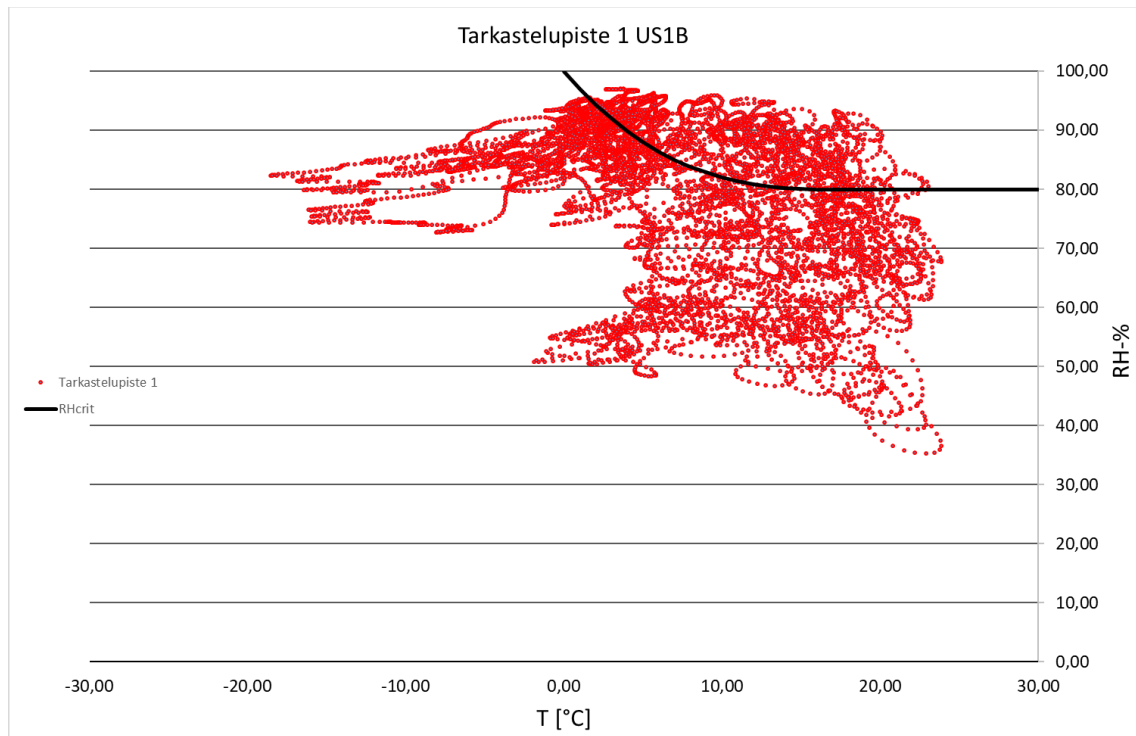


Kuvio 11. US1A, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

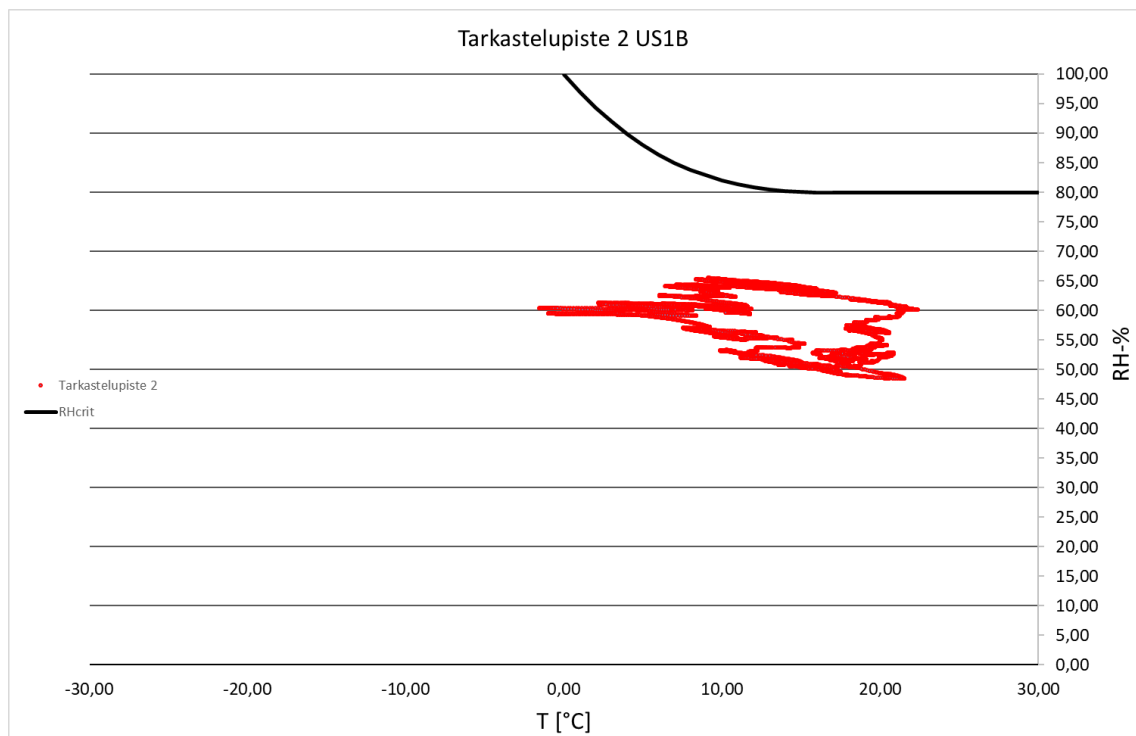


Kuvio 12. US1A, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

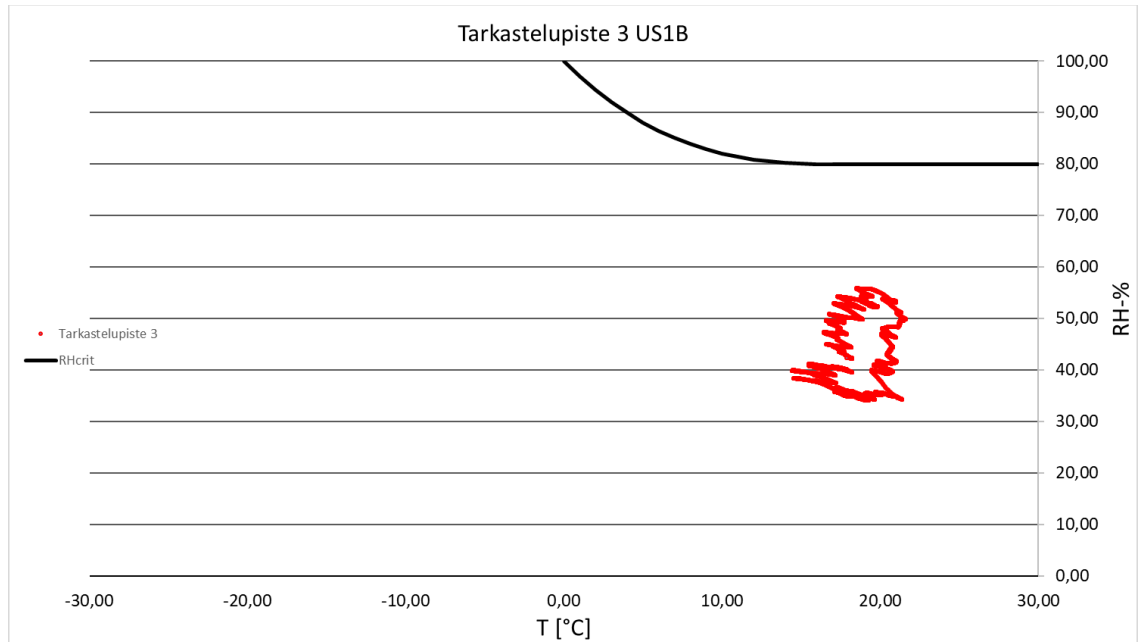


Kuvio 13. US1B, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

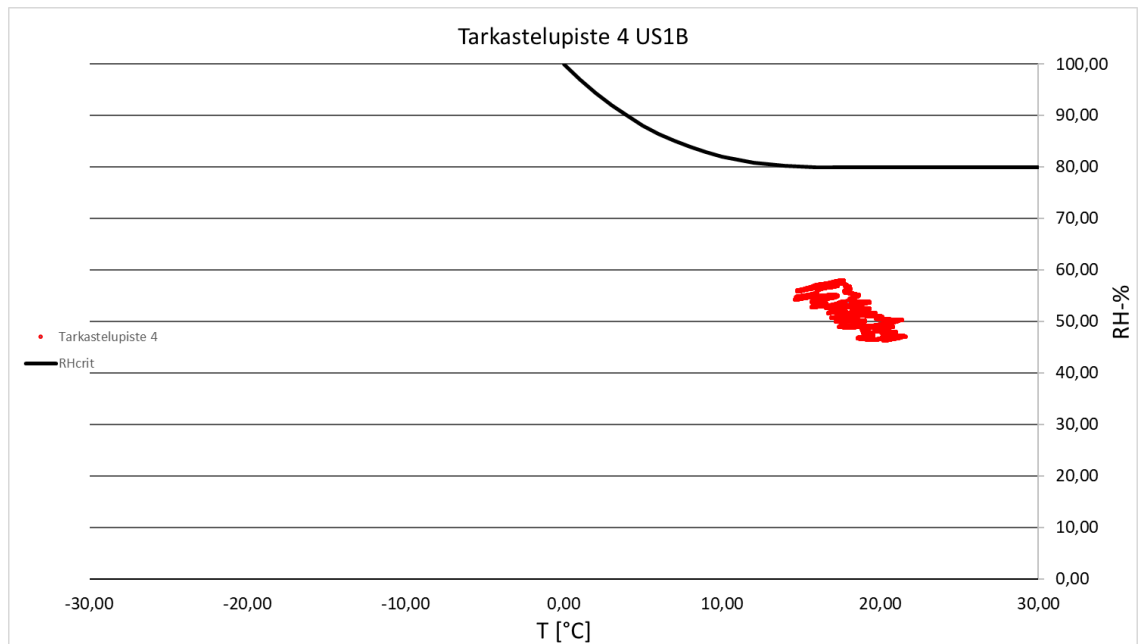


Kuvio 14. US1B, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

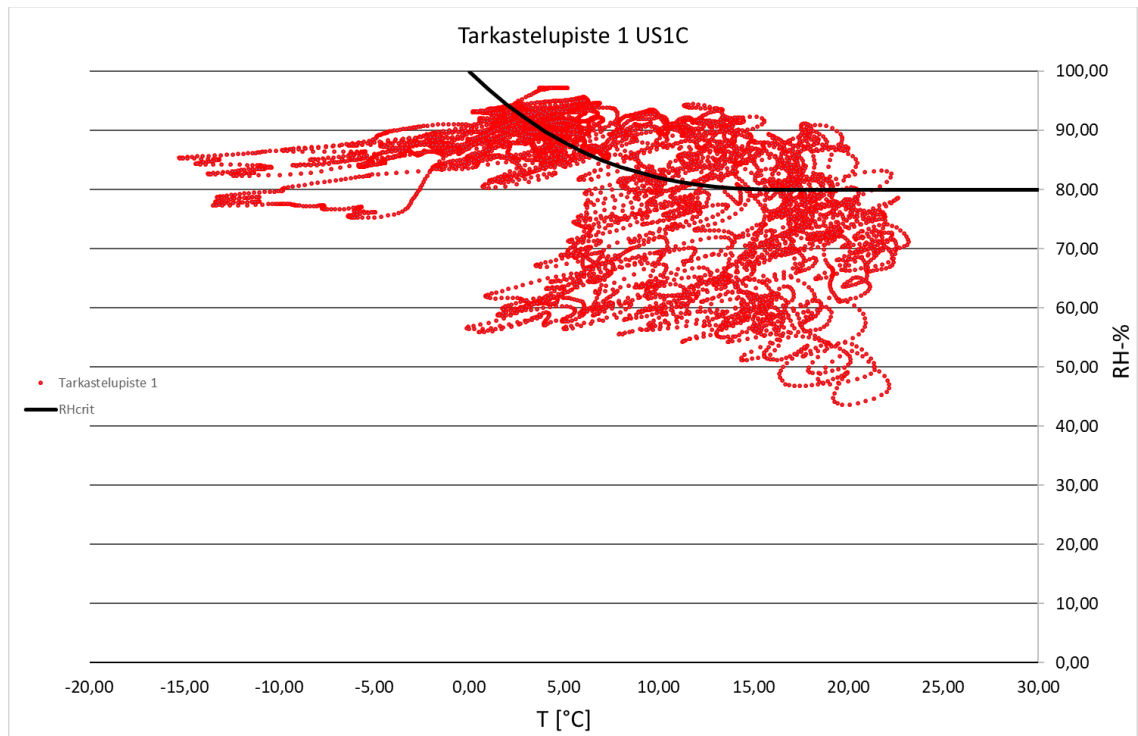


Kuvio 15. US1B, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

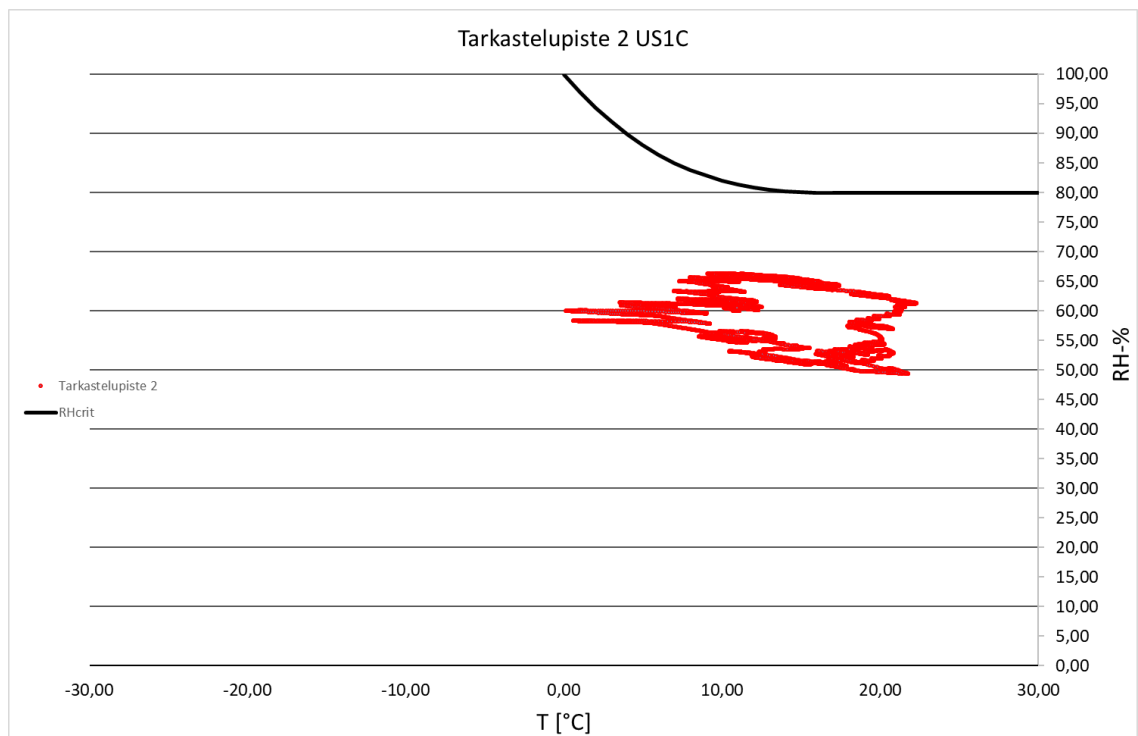


Kuvio 16. US1B, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

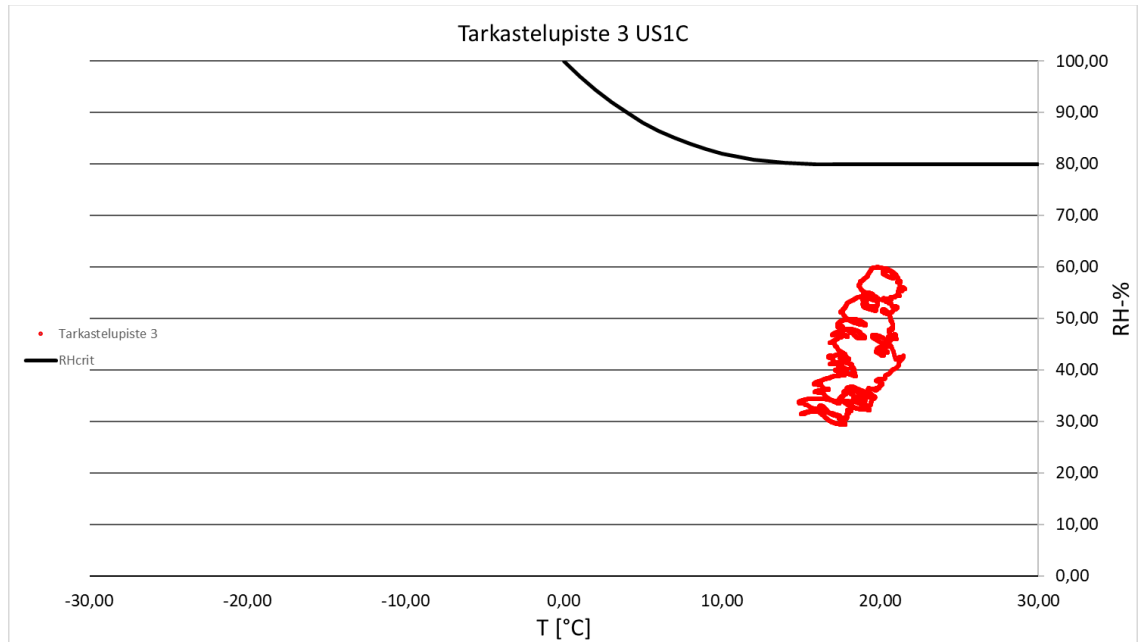


Kuvio 17. US1C, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

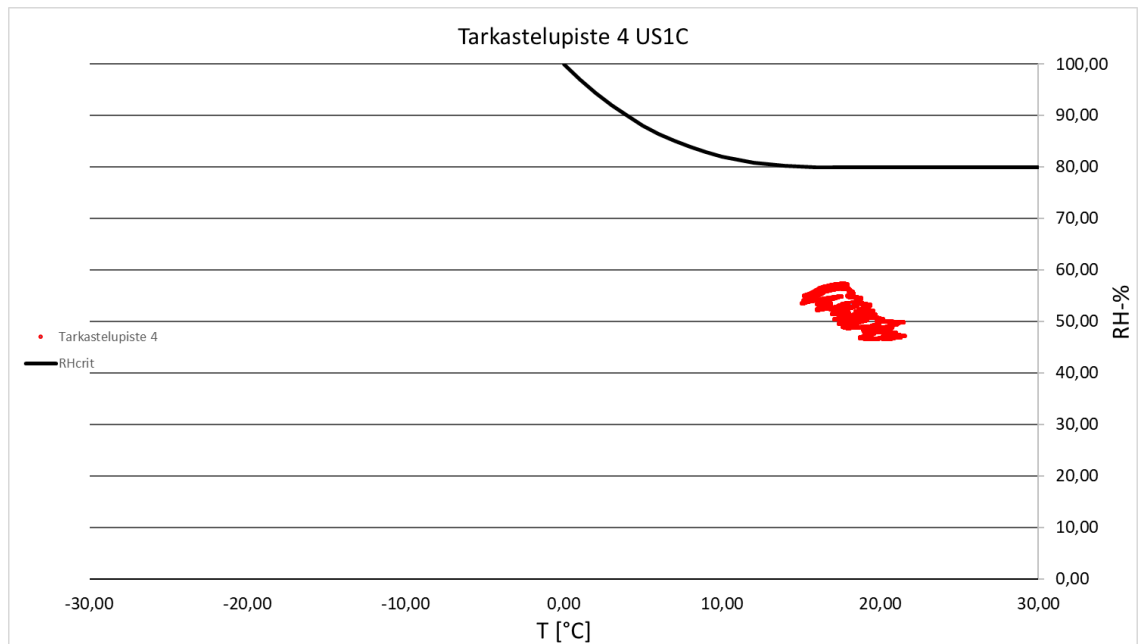


Kuvio 18. US1C, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

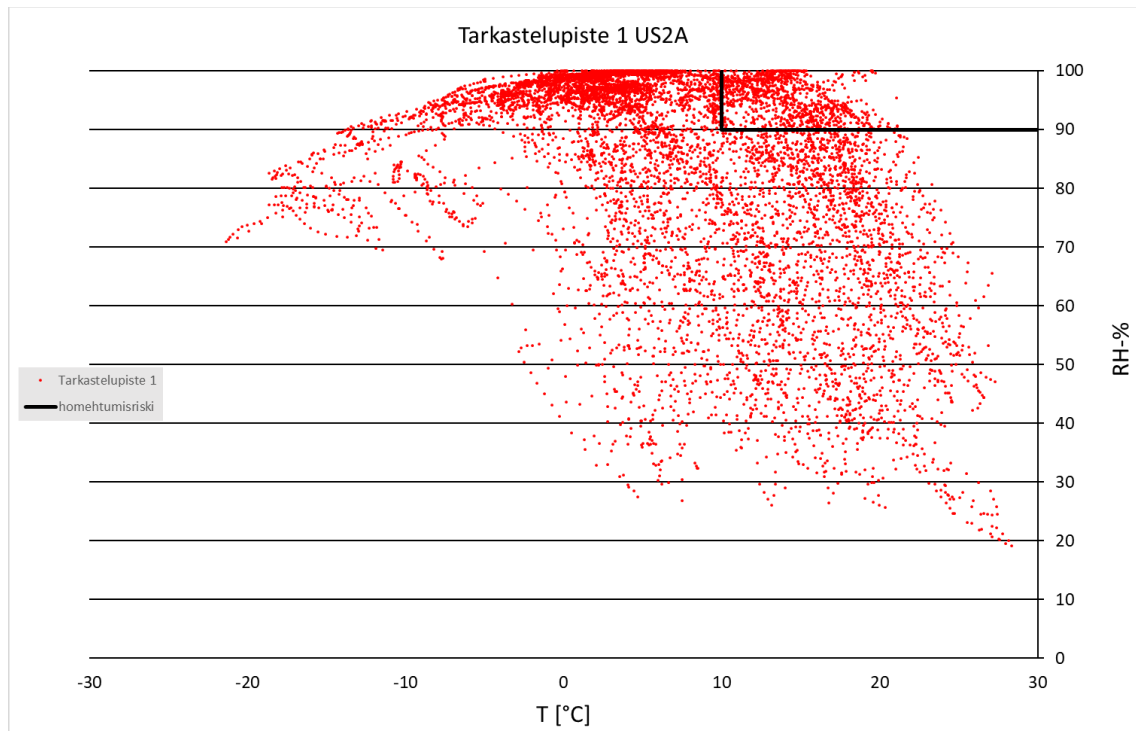


Kuvio 19. US1C, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

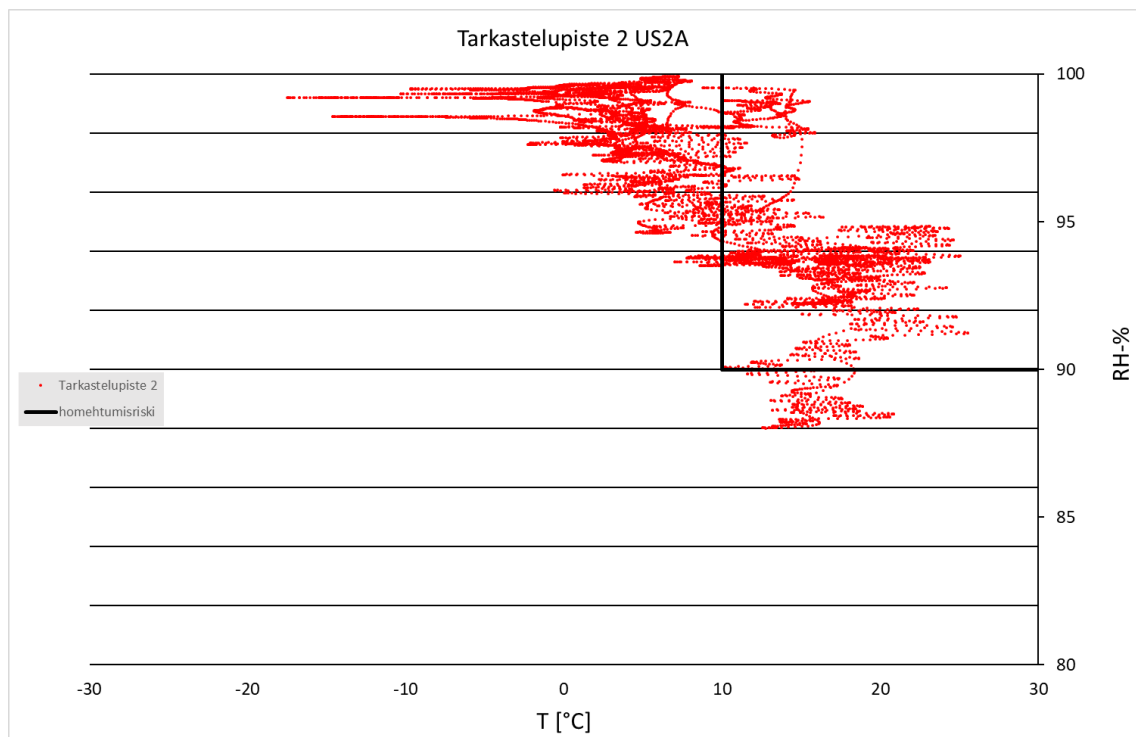


Kuvio 20. US1C, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

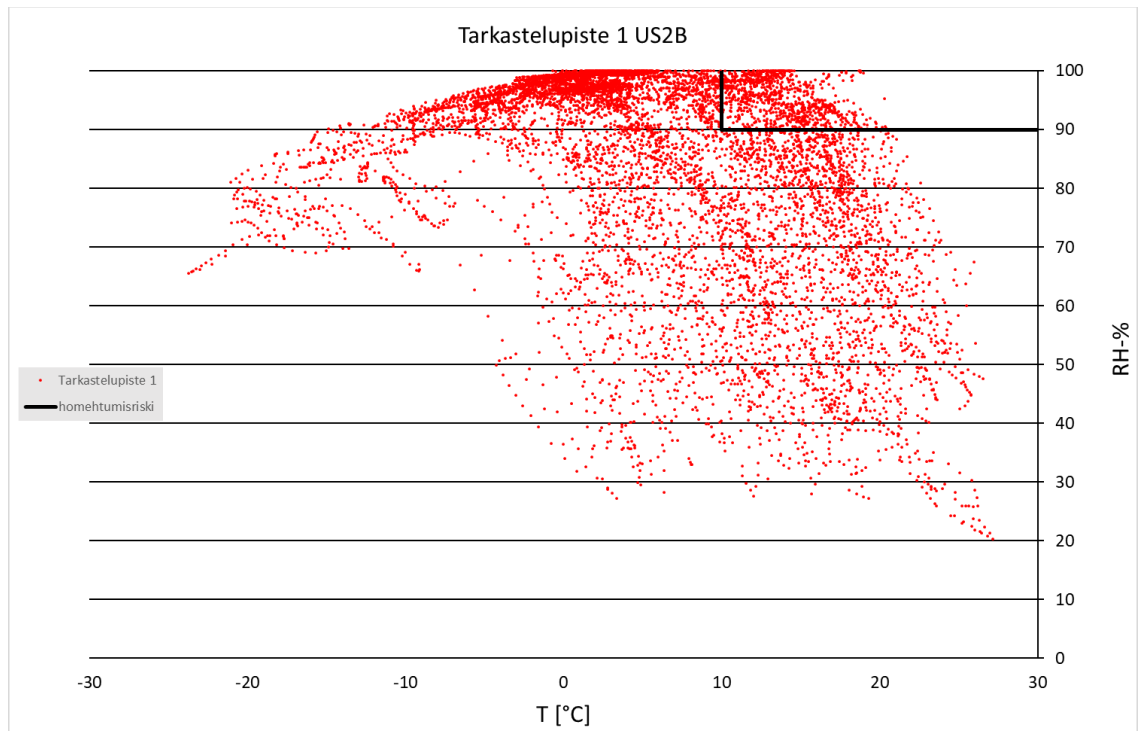


Kuvio 21. US2A, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

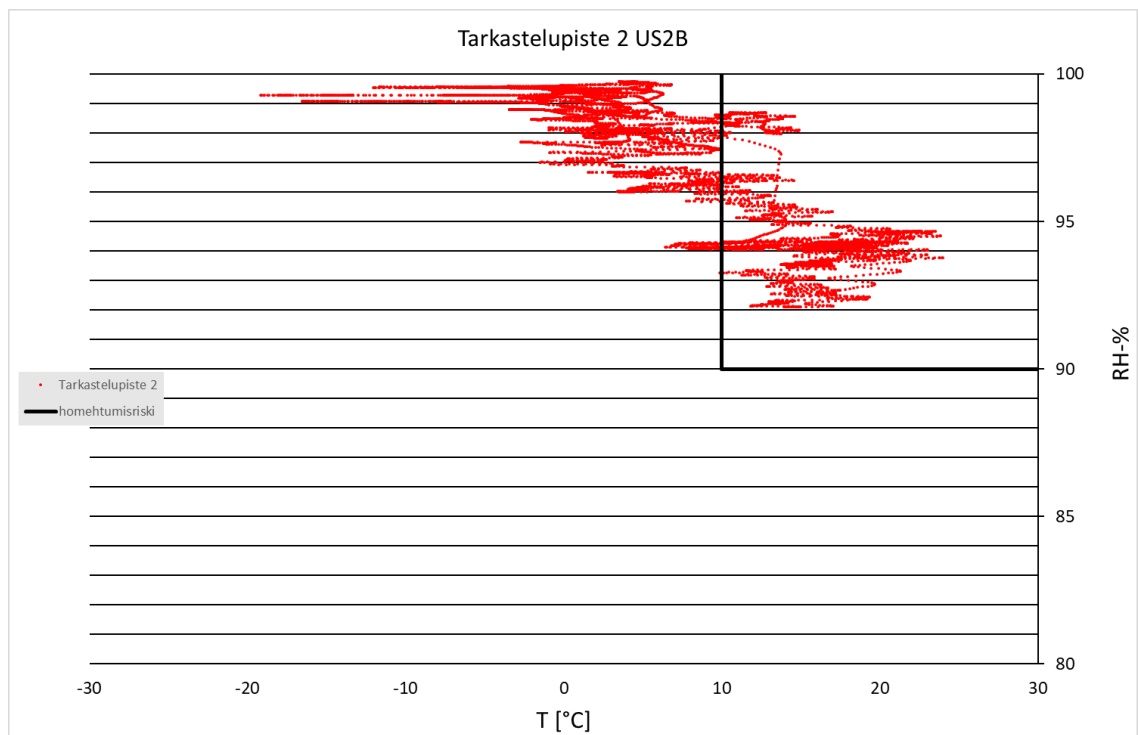


Kuvio 22. US2A, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

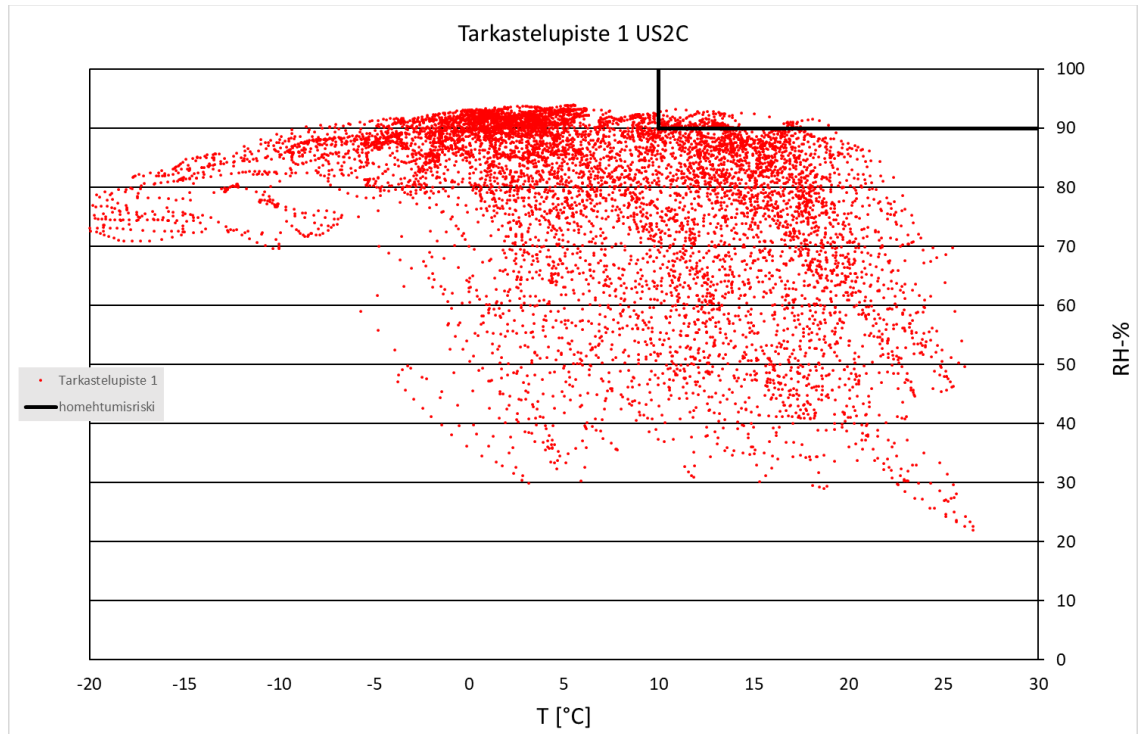


Kuvio 23. US2B, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

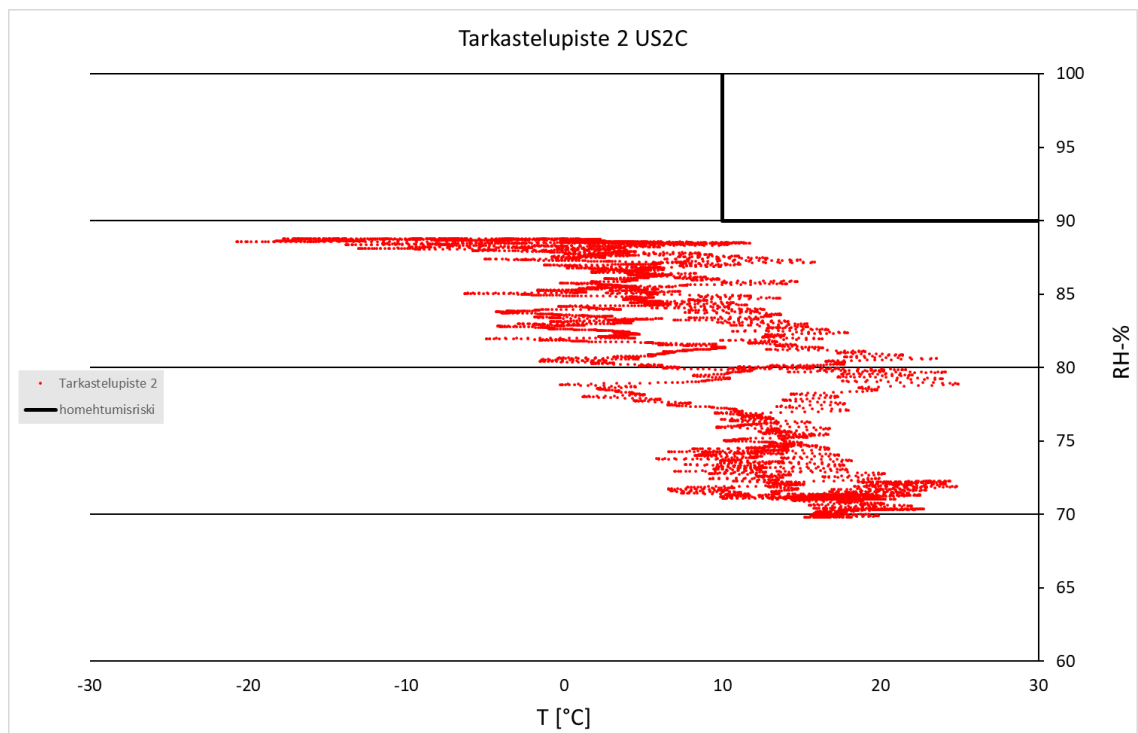


Kuvio 24. US2B, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset nykyilmastossa

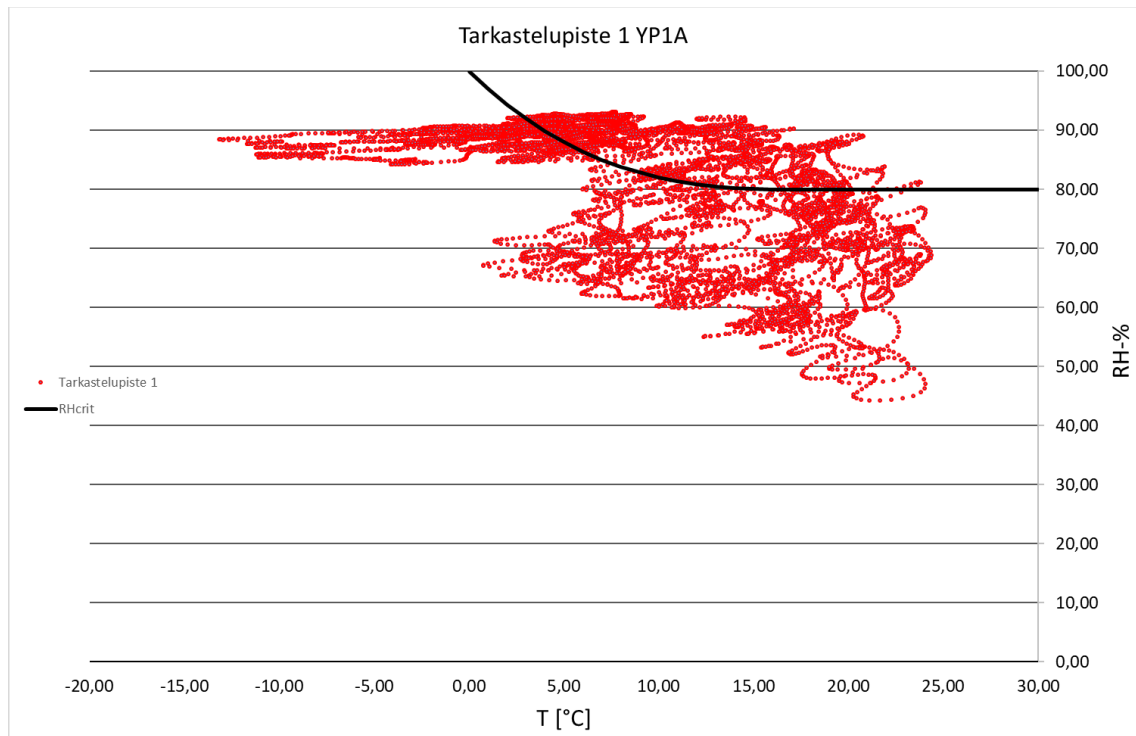


Kuvio 25. US2C, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

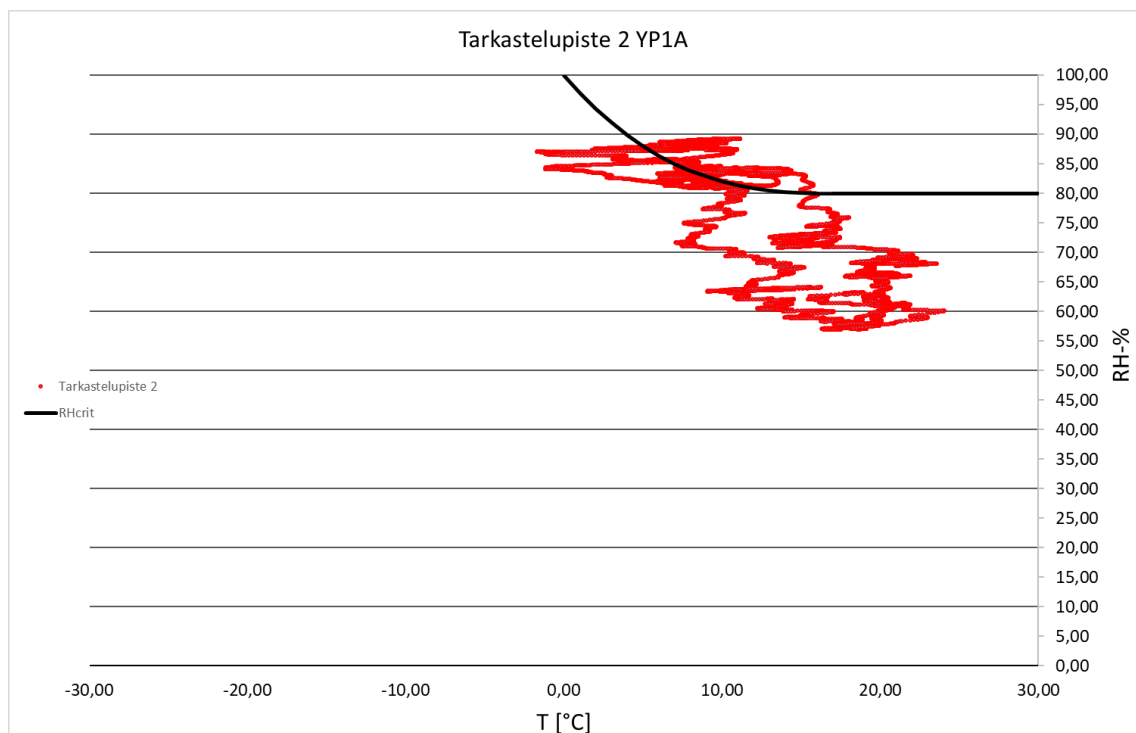


Kuvio 26. US2C, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus.

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

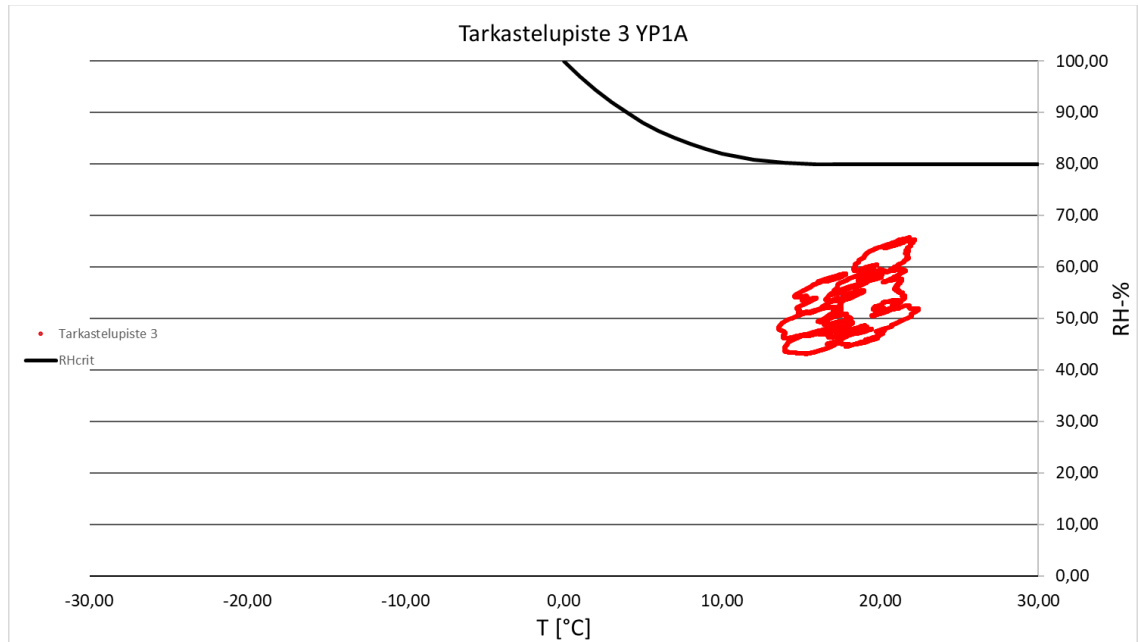


Kuvio 1. YP1A, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

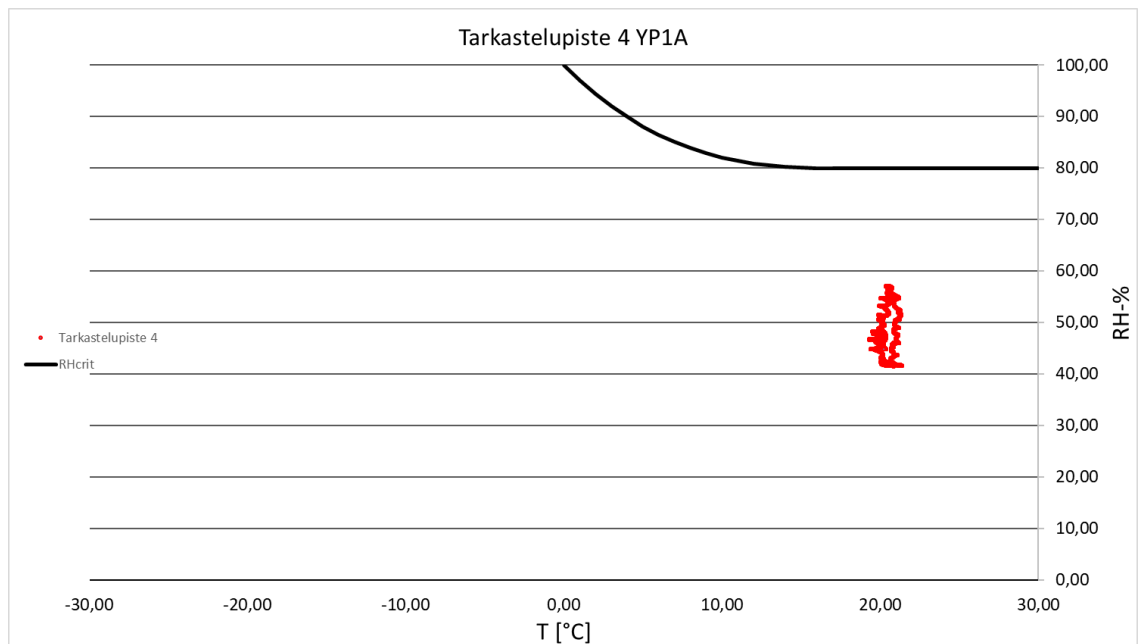


Kuvio 2. YP1A, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

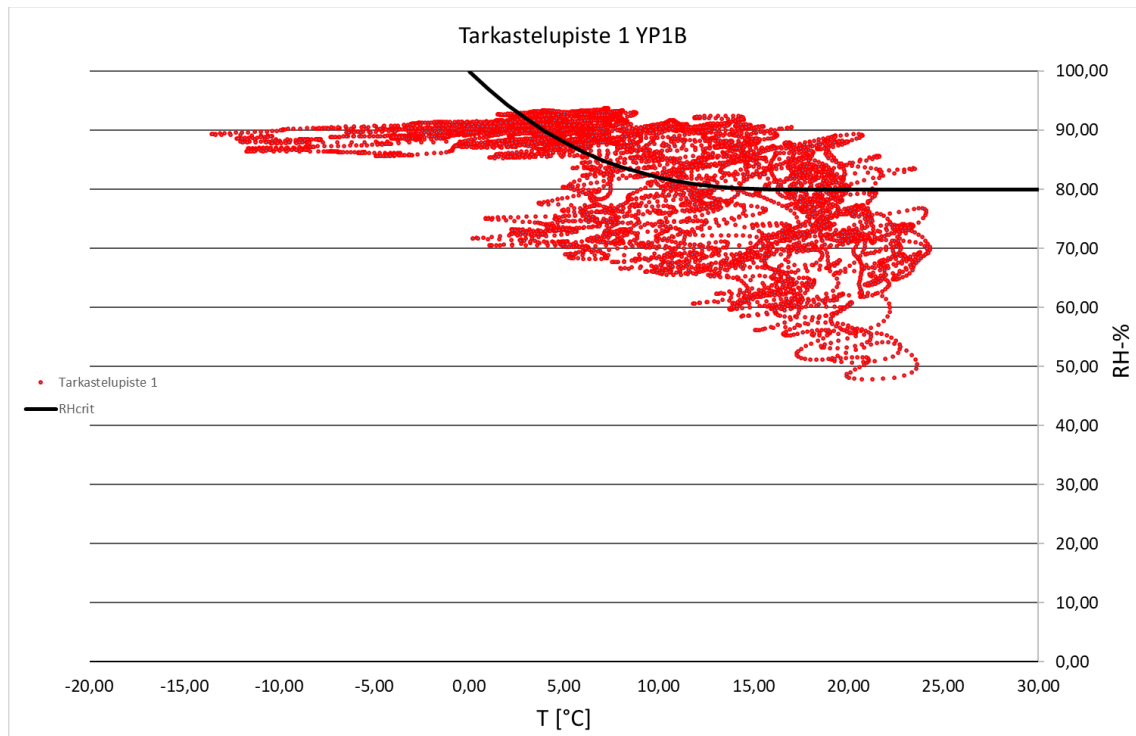


Kuvio 3. YP1A, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

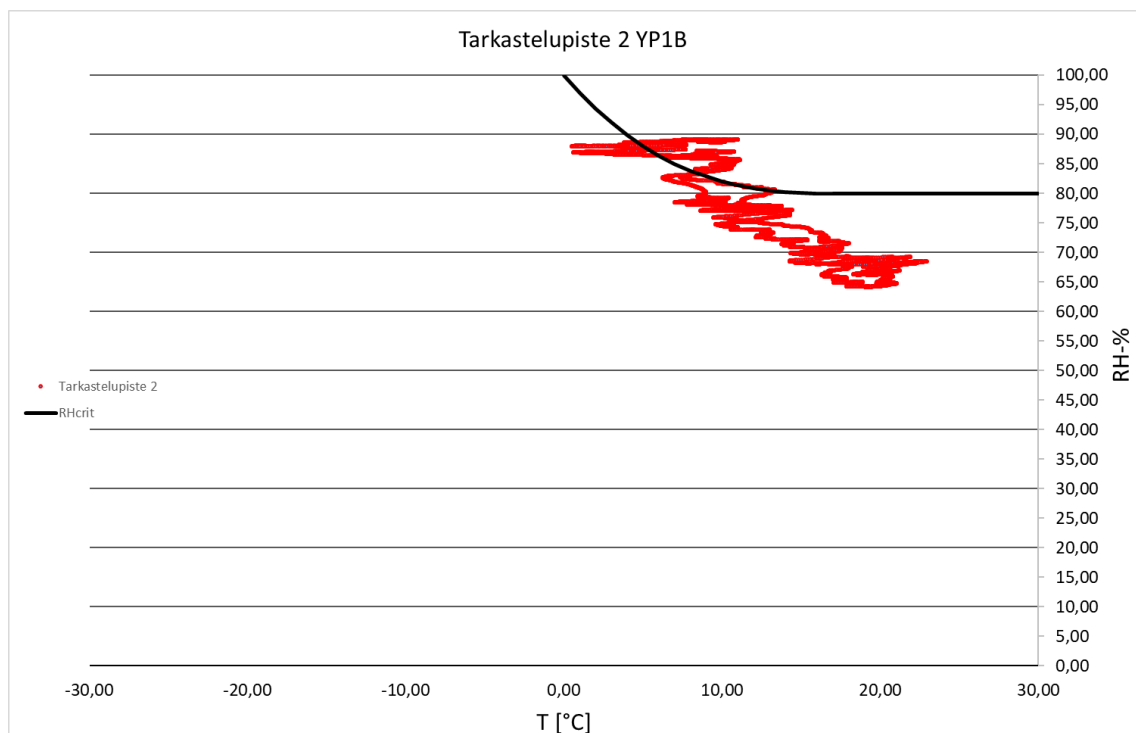


Kuvio 4. YP1A, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

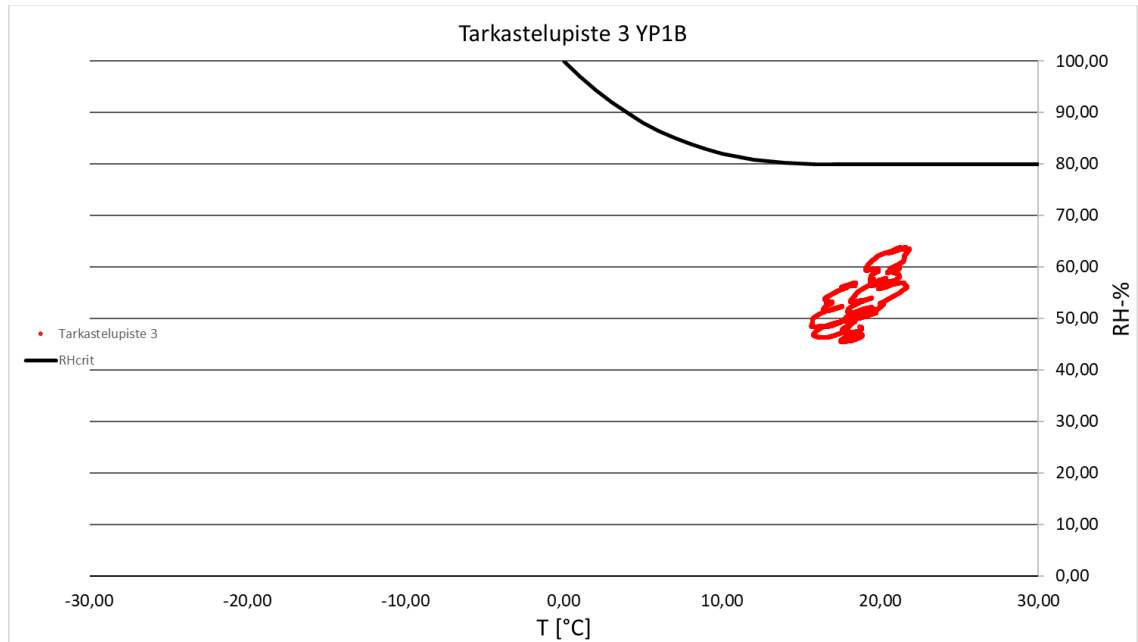


Kuvio 5. YP1B, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

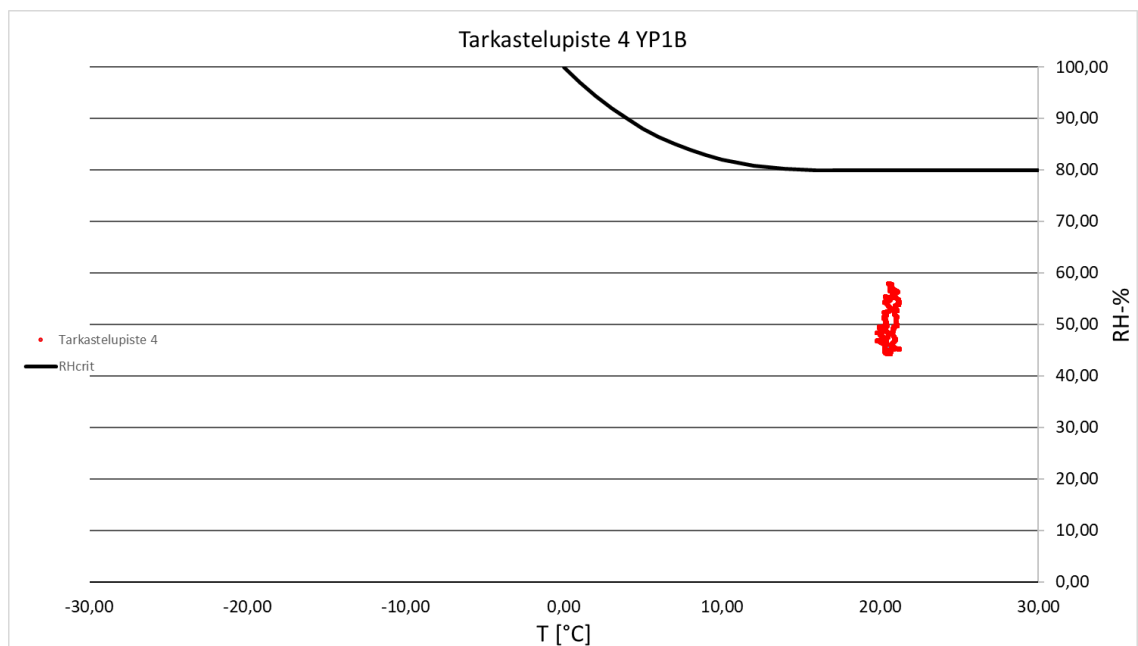


Kuvio 6. YP1B, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

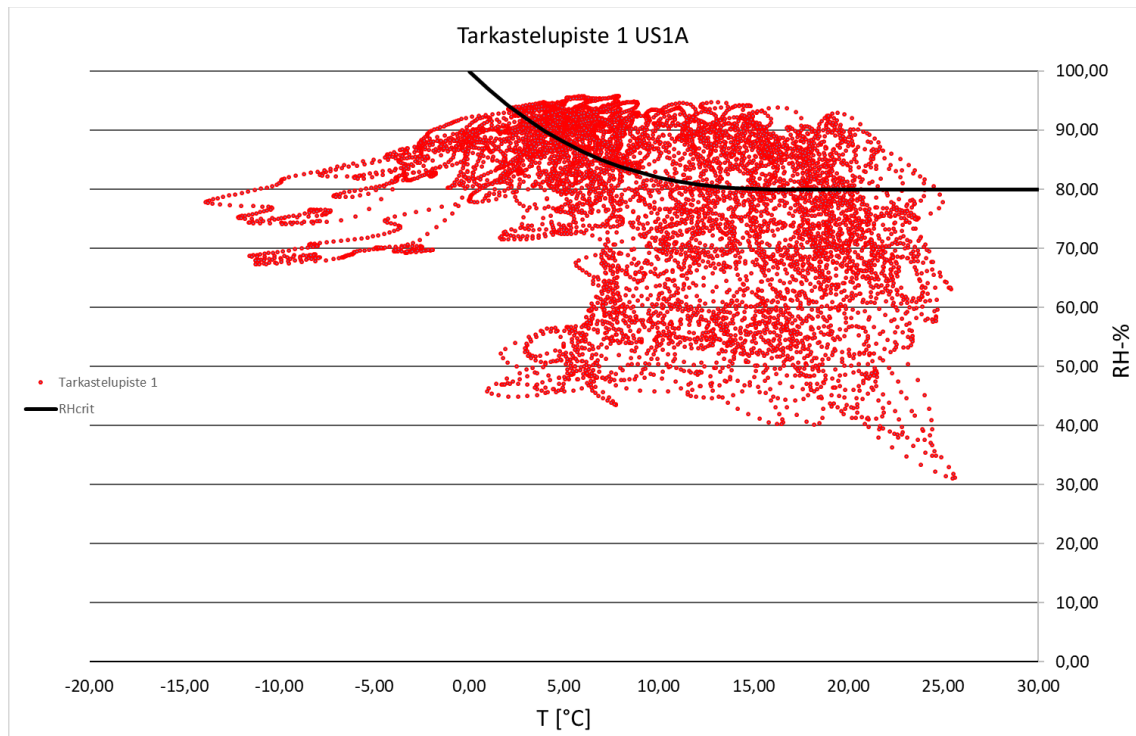


Kuvio 7. YP1B, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

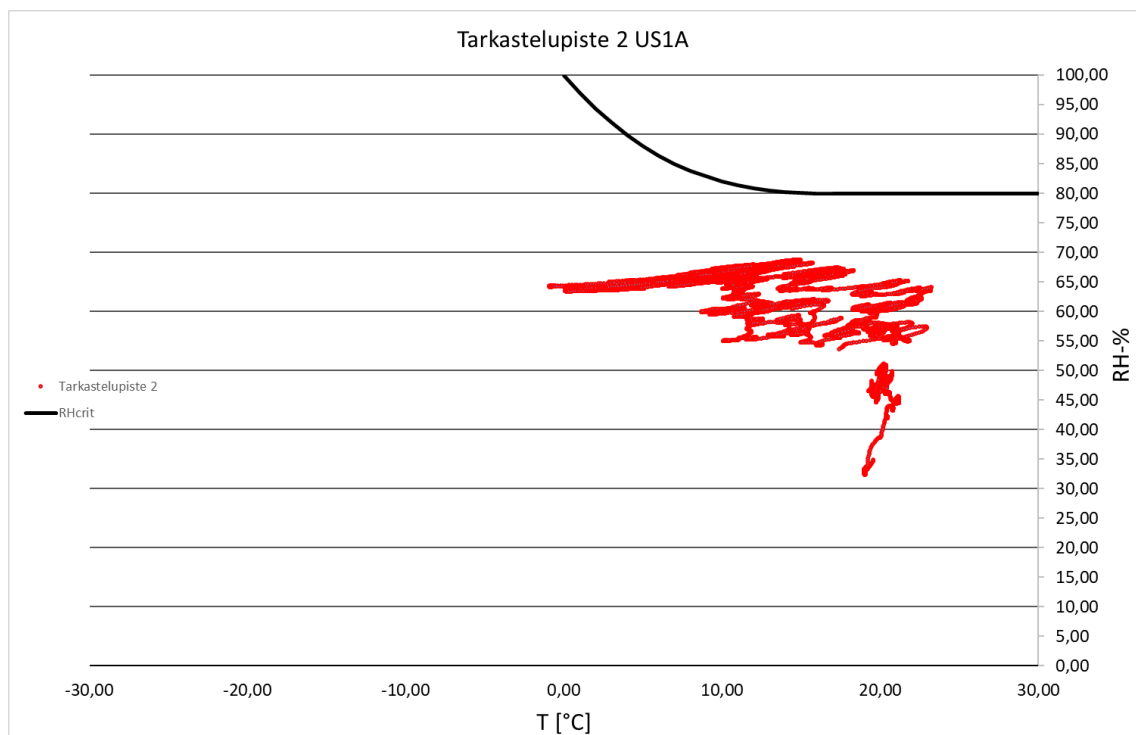


Kuvio 8. YP1B, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

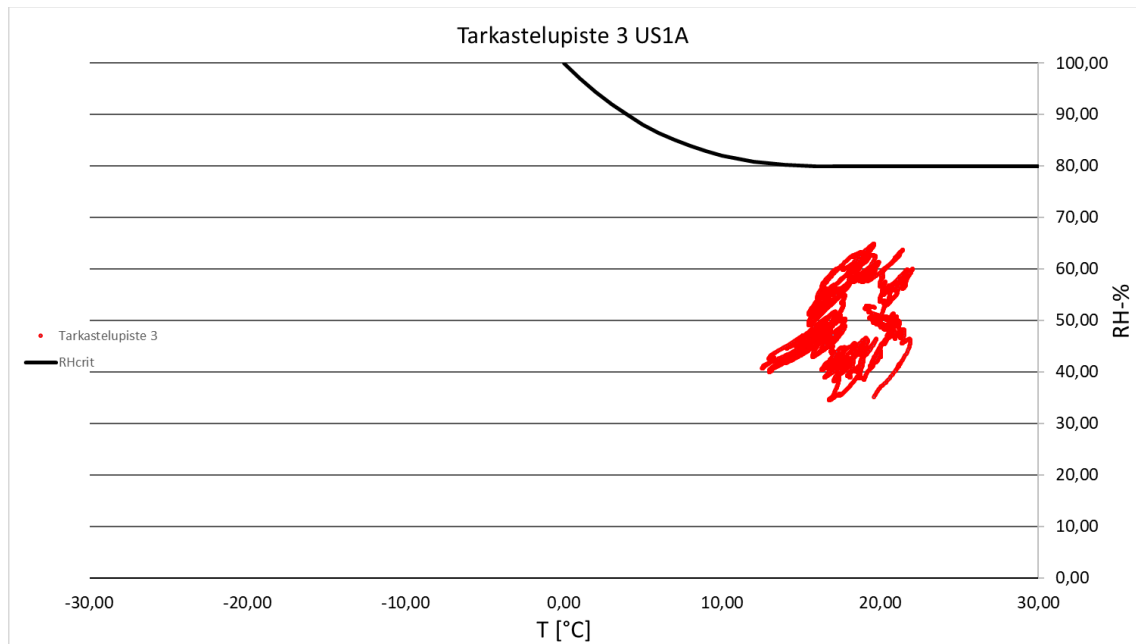


Kuvio 9. US1A, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

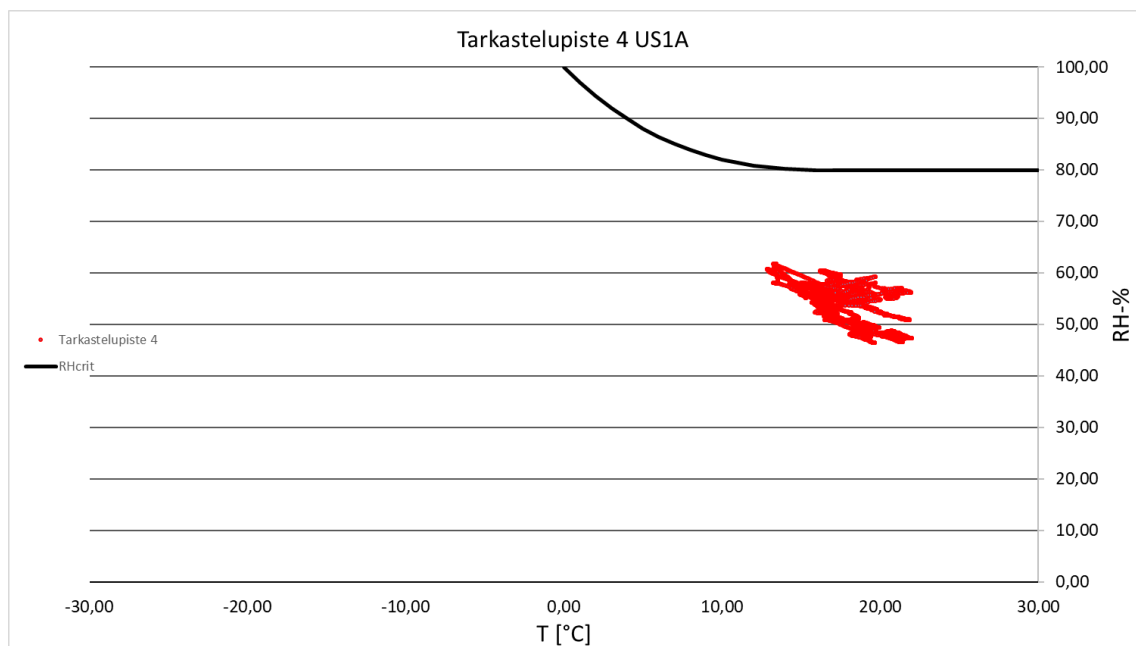


Kuvio 10. US1A, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

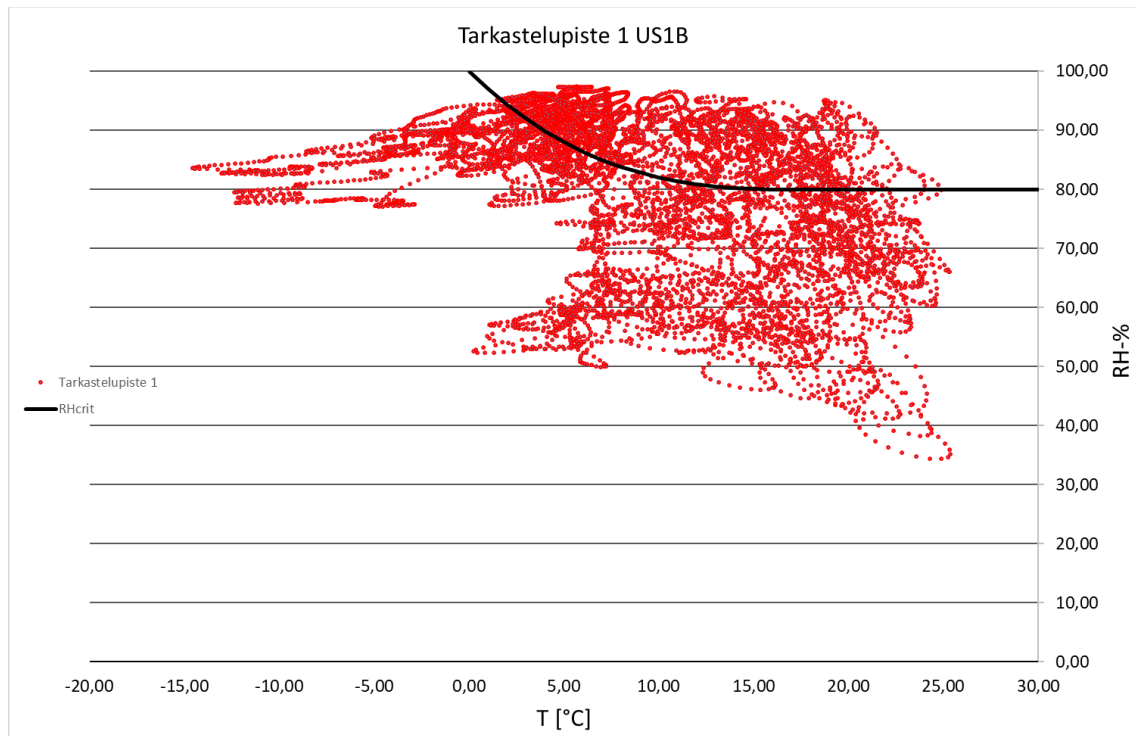


Kuvio 11. US1A, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

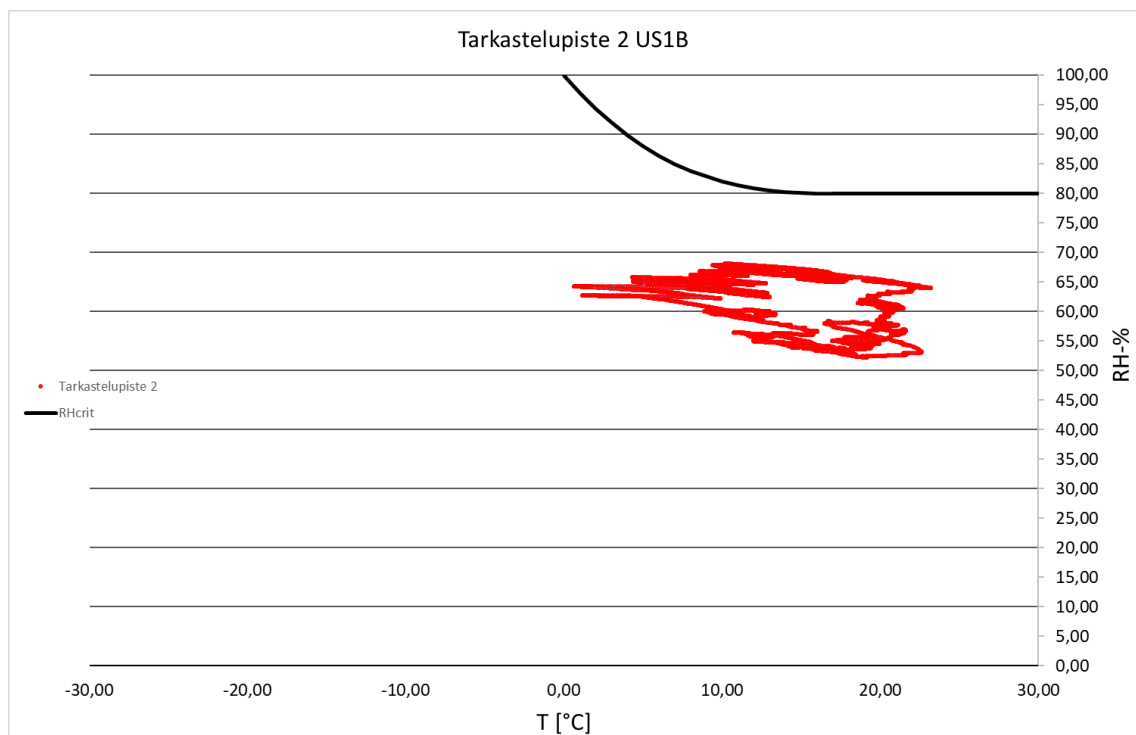


Kuvio 12. US1A, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

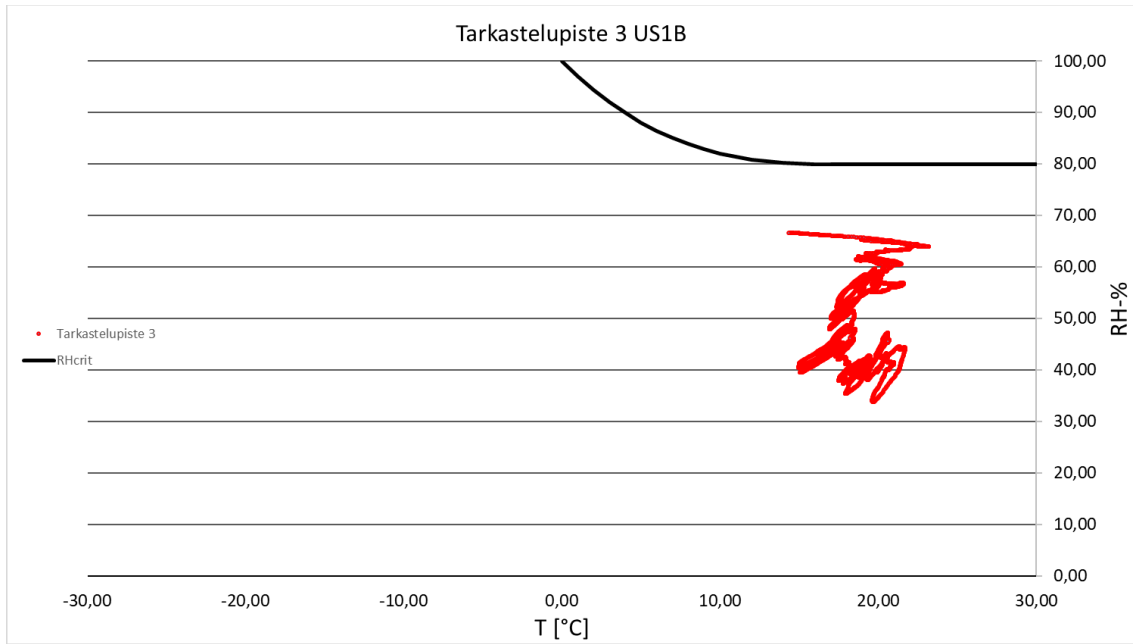


Kuvio 13. US1B, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

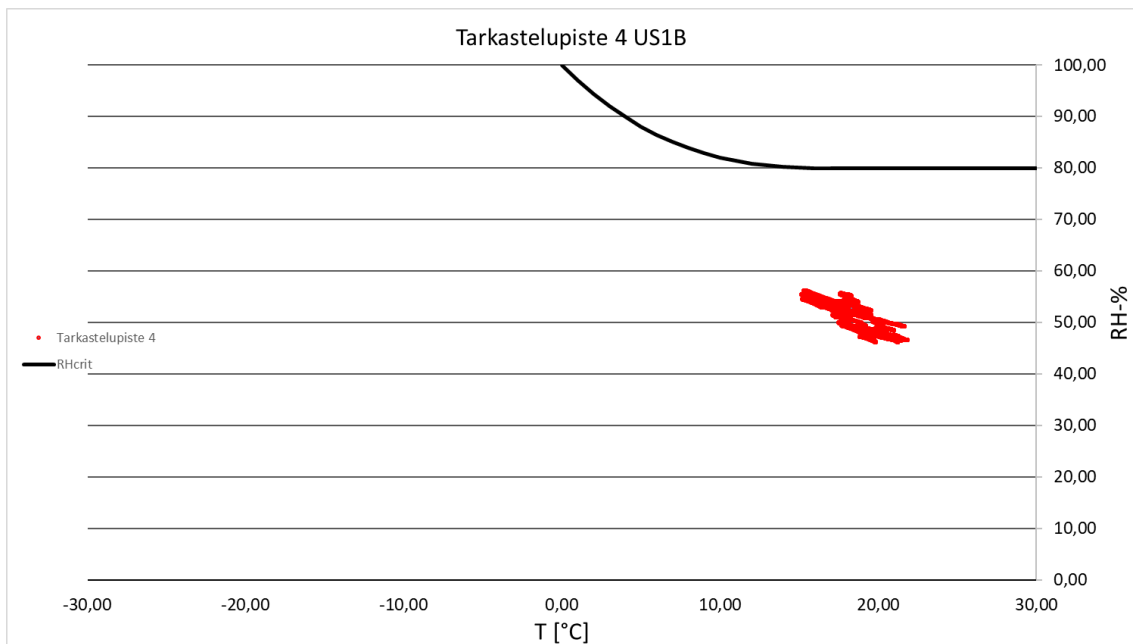


Kuvio 14. US1B, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

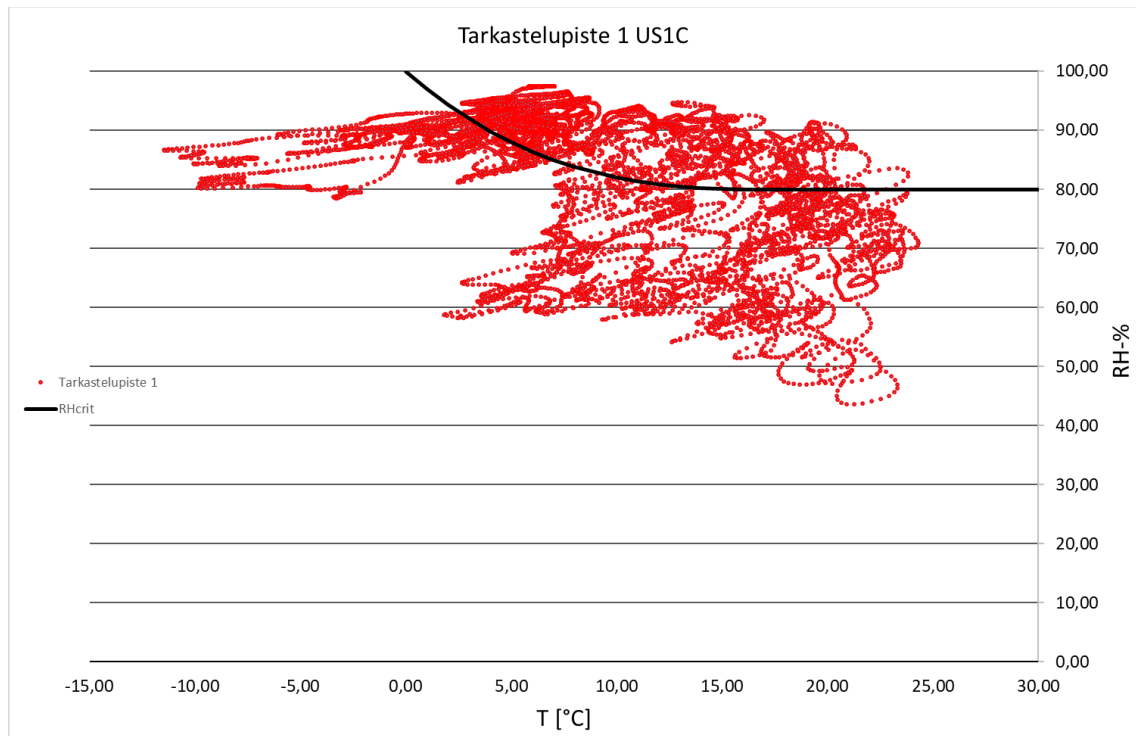


Kuvio 15. US1B, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

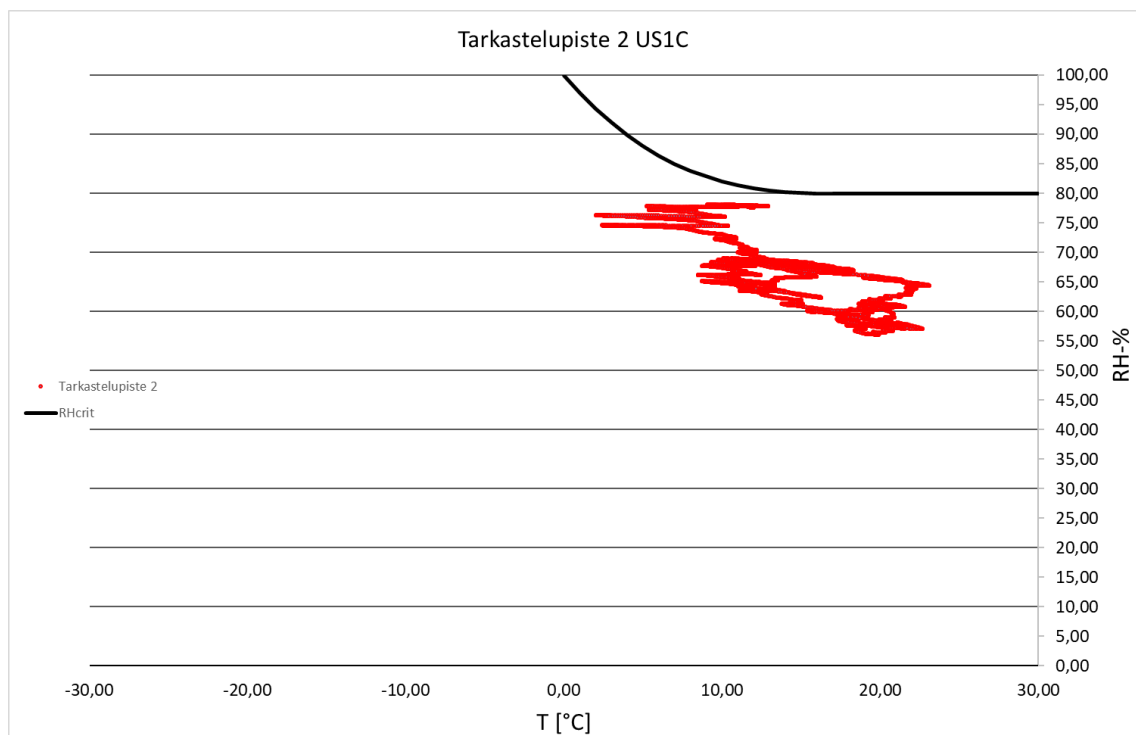


Kuvio 16. US1B, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

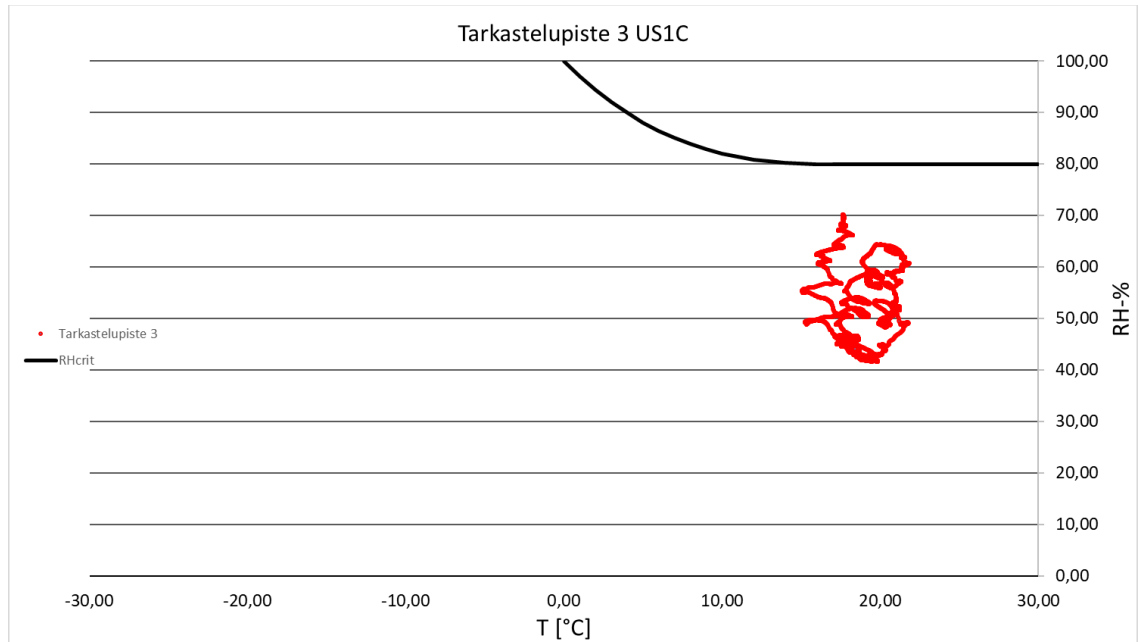


Kuvio 17. US1C, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

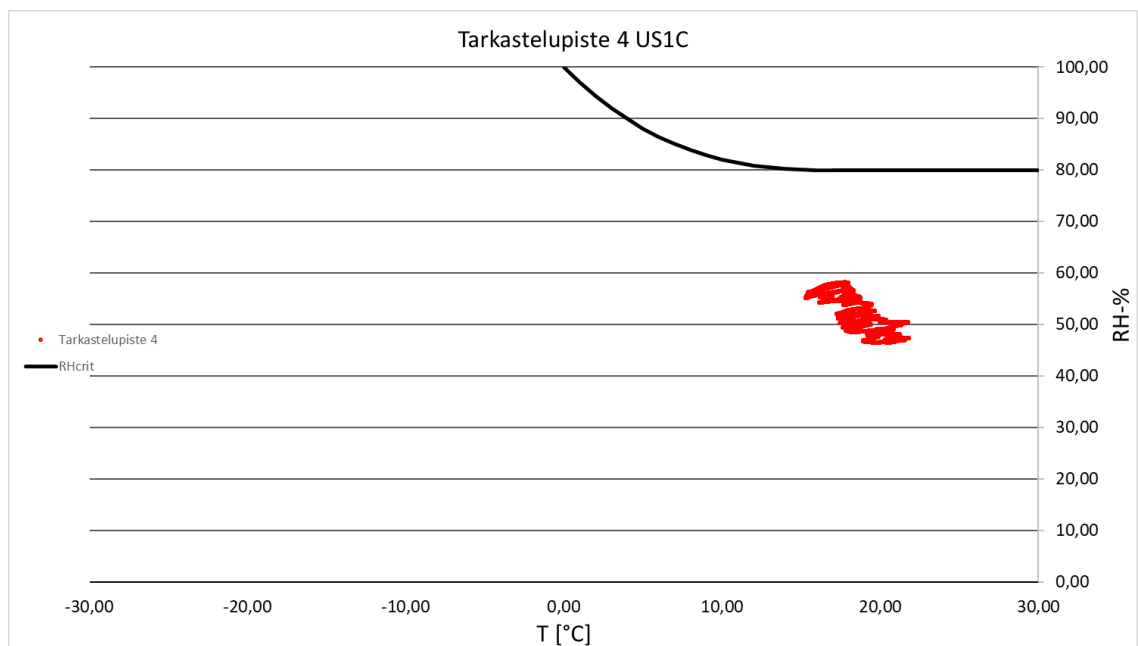


Kuvio 18. US1C, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

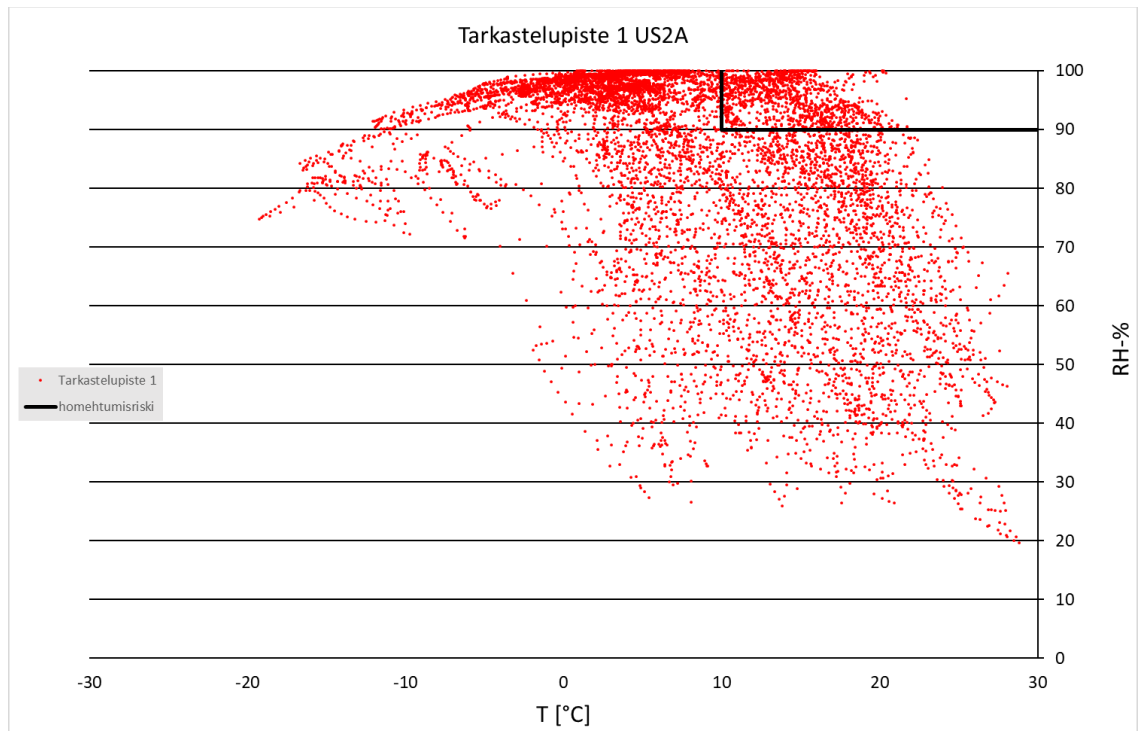


Kuvio 19. US1C, tarkastelupiste 3, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

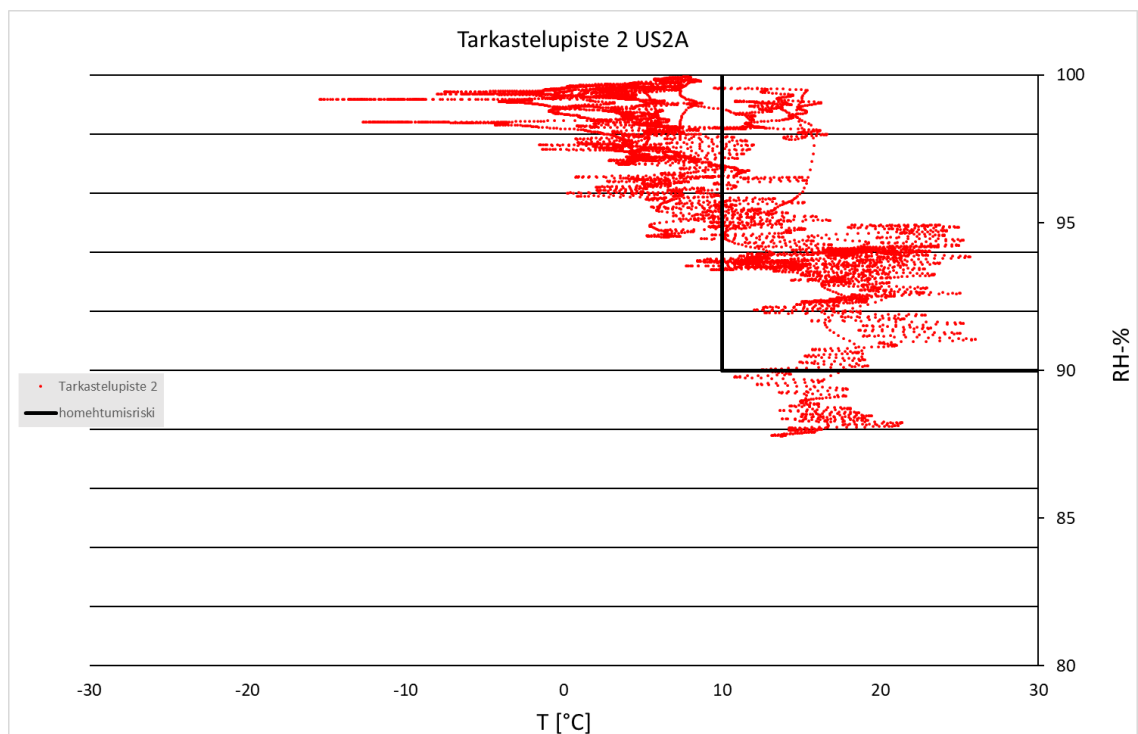


Kuvio 20. US1C, tarkastelupiste 4, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

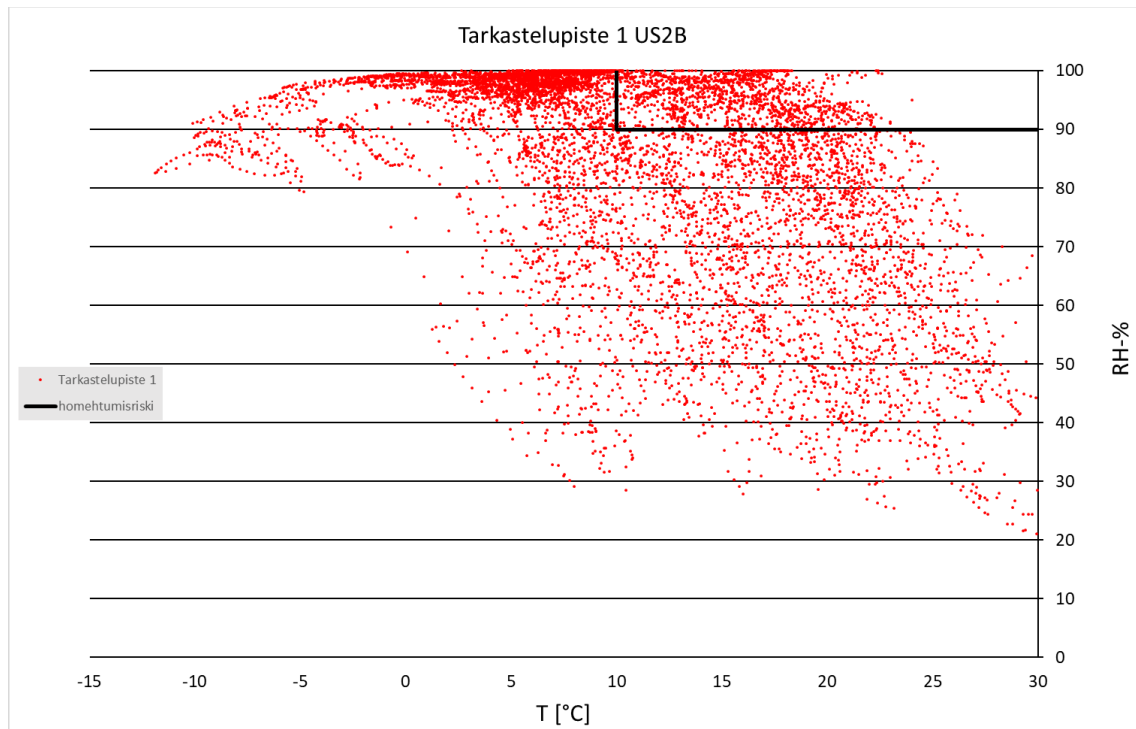


Kuvio 21. US2A, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

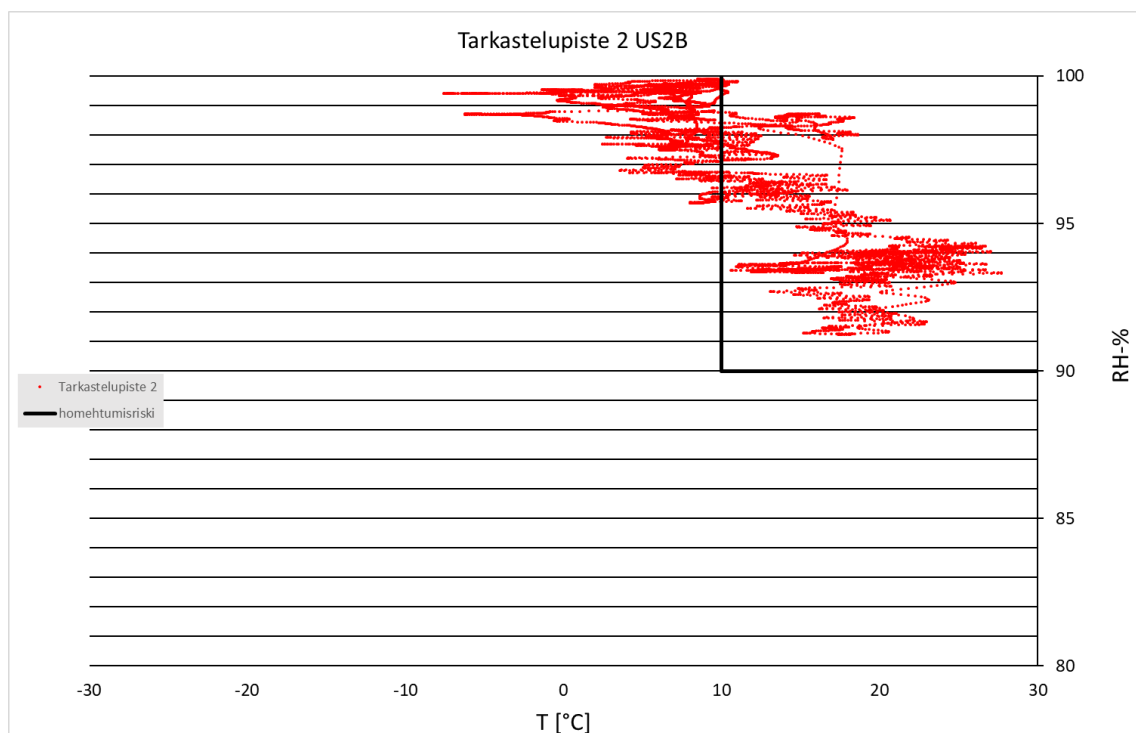


Kuvio 22. US2A, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2050).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa

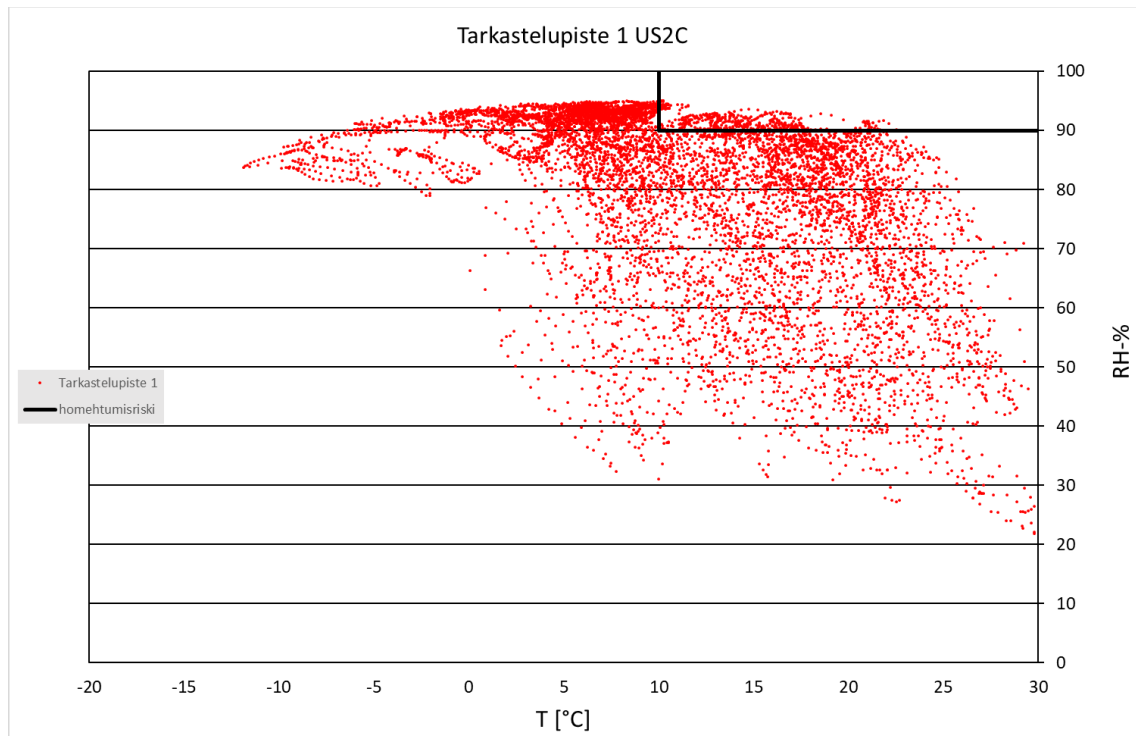


Kuvio 23. US2B, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2100).

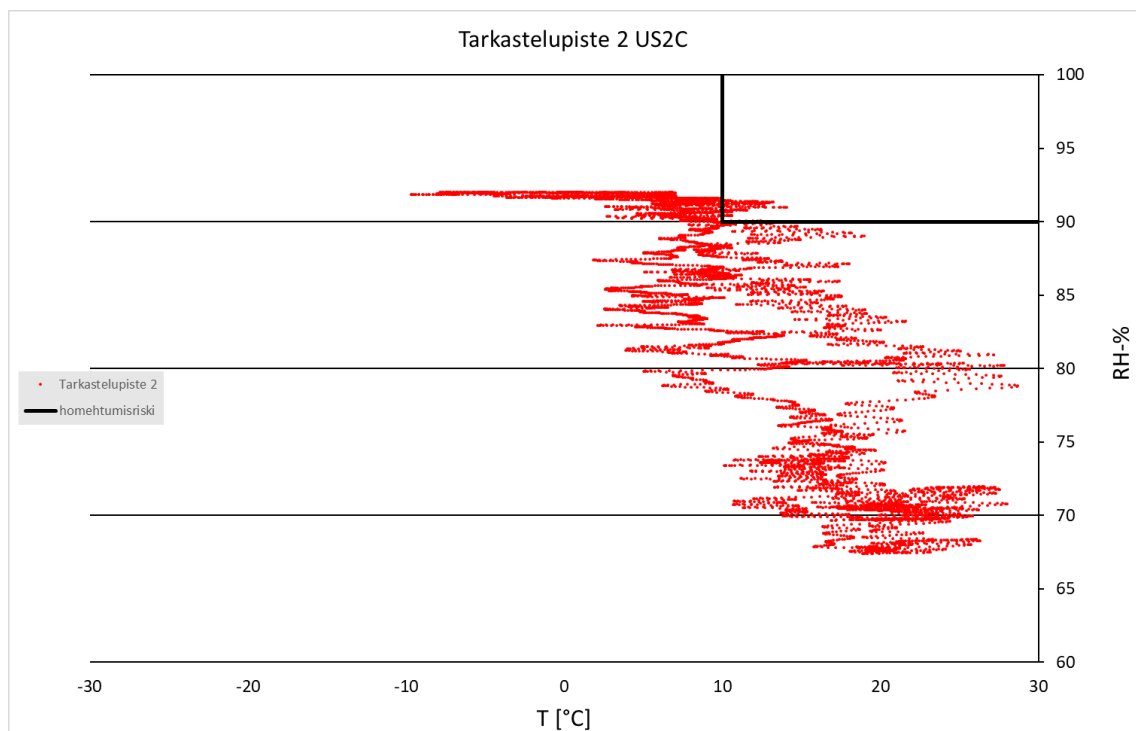


Kuvio 24. US2B, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2100).

## Laskentatulokset kriittisissä ilmasto-olosuhteissa



Kuvio 25. US2C, tarkastelupiste 1, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2100).



Kuvio 26. US2C, tarkastelupiste 2, lämpötila ja suhteellinen kosteus (Vantaa 2100).