

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Veikko Myller

TES-ELEMENTIN KOSTEUSTEKNISEN TOIMIVUUDEN ANALY-
SOINTI COMSOL MULTIPHYSICS JA WUFI PRO - OHJELMIS-
TOILLA.

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2015
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU

Tekijä
Veikko Myller

Nimeke
TES-elementin kosteusteknisen toimivuuden analysointi Comsol multiphysics ja WUFI PRO -ohjelmistoilla

Toimeksiantaja

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli esitellä TES (Timberbased Element System)-menetelmällä toteutettu lähiökerrostalon saneeraus, sekä tarkastella saneerauksessa käytettyjen rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta Comsol Multiphysics- ja WUFI PRO-ohjelmistoilla.

Suomessa on valtava määrä 1960 ja 1970-luvuilla rakennettuja asuinkerrostaloja, joiden julkisivujen saneeraukseen puurunkoisilla suurelementeillä on kehitetty korkeaan esivalmistusasteeseen perustuva menetelmä, jossa parannetaan rakennuksen energiataloutta, arkkitehtonisia ominaisuuksia ja asukkaiden viihtyvyyttä.

Ilmastonmuutos on tosiasia ja tämän takia rakennusfysiikan suunnittelun merkitys on avainasemassa kehitettäessä uusia rakentamismalleja. Rakenteiden toimivuutta tulee tarkastella myös tulevaisuuden ilmastossa.

Tässä työssä esimerkkinä olevassa kohteessa julkisivusaneeraus oli toteutettu puurungon päälle tehtynä tuulettumattomana eristerappauksena. Comsolista ja Wufista saatujen laskennallisten tulosten perusteella rakennetta ei voi pitää kosteusteknisesti turvallisena.

Kieli
suomi

Sivuja 63
Liitteet 5
Liitesivumäärä 36

Asiasanat
Lähiökerrostalo, Timberbased Element System, Rakennusfysiikka.



THESIS
MAY 2015
Degree Programme in Civil Engineering
Karjalankatu 3
FI 80200 JOENSUU
FINLAND

Author
Veikko Myller

Title
Analyzing the moisture technical functions of a TES-element with Comsol Multiphysics and WUFI PRO software

Commissioned by

Abstract

The purpose of this study was to present a suburban apartment building renovation that was carried out by TES (Timberbased Element System) method, as well as analyze the technical moisture functioning of the structures used for renovation by using Comsol Multiphysics and WUFI PRO softwares.

In Finland, there is a huge amount of residential apartment buildings built in the 1960s and 1970s. A new method has been developed for renovating these buildings with high prefabricated wooden elements which improve the building's energy efficiency, architectural features and living conditions.

Climate change is a fact and therefore the importance of climate and energy planning is very important when developing new building designs. The functioning of the structures has to be analyzed also for the future climate.

The structure used as an example in this thesis was wood frame element which has unventilated insulation rendering as a facade. On the basis of computational results obtained by COMSOL and WUFI softwares, these structures cannot be considered moisture safe.

Language
Finnish

Pages 63
Appendices 5
Pages of Appendices 36

Keywords

Suburban apartment building, Timberbased Element System, Building physics.

Sisällys

1	Johdanto.....	6
1.1	Tausta	6
1.2	Tavoitteet ja rajaus.....	6
2	Lähiökerrostalot	7
2.1	Tyypilliset ongelmat sandwich-elementeissä	9
2.2	Betonirakenteiden korjaustavat	11
3	TES-menetelmä.....	12
3.1	TES-menetelmän kuvaus ja Peltosaaren saneerauskohteen esittely...	12
3.2	TES-menetelmän ominaispiirteet	13
3.3	Kiinteistön lähtötiedot.....	14
3.4	Mittaus ja mallinnus	15
3.5	Julkisivuelementtien valmistus.....	16
3.6	Työ Peltosaaren saneerauskohteessa.....	18
4	Rakennusfysiikka.....	20
4.1	Rakennusfysikaalinen suunnittelu korjausrakentamisessa.....	20
4.2	Lämpö	20
4.3	Kosteus	21
4.4	Veden ja vesihöyryn siirtyminen rakenteeseen.....	22
4.5	Diffuusio	23
4.6	Kosteuden konvektio	24
4.7	Kondensoituminen	25
5	Saneeratun rakenteen toiminnan tarkastelu	25
5.1	Rakenteet.....	25
5.2	Rakennusfysikaaliset testivuodet	27
5.3	Sisäilman olosuhteet.....	29
5.4	Materiaaliominaisuudet.....	31
5.5	Rakenteen kosteus- ja lämpöominaisuudet	32
6	Rakenteiden tarkastelu Comsol Multiphysics -ohjelmalla	32
6.1	Comsol Multiphysics -ohjelman esittely	32
6.2	Mallin luonti Comsol Multiphysics -ohjelmistolla	33
6.2.1	Alkumäärittelyt.....	33
6.2.2	Geometria	33
6.2.3	Laskentaan määriteltävät materiaaliparametrit.....	34
6.2.4	Mallin verkotus	35
6.2.5	Sisä- ja ulkoilman olosuhteet.....	36

6.3	Lämmön siirtyminen.....	36
6.4	Kosteuden siirtyminen	37
7	Rakenteiden tarkastelu WUFI PRO-ohjelmistolla	39
7.1	WUFI PRO -Ohjelmiston esittely	39
7.2	Mallin luonti WUFI PRO -ohjelmistolla	40
8	Tulokset WUFI PRO -ohjelmistolla	41
9	Tulokset Comsol Multiphysics -ohjelmistolla	43
10	Tulosten tarkastelu	45
11	Tulosten yhteenveto	59
12	Pohdinta	61
	Lähteet	63

Liitteet

Liite 1	Materiaaliominaisuudet Comsol Multiphysics –ohjelmistossa
Liite 2	Materiaaliominaisuudet WUFI PRO -ohjelmistossa
Liite 3	Laskentatulokset Vantaa 2007–ilmastossa (Comsol)
Liite 4	Laskentatulokset Vantaa 2050–ilmastossa (Comsol)
Liite 5	Laskentatulokset Helsinki 2007–ilmastossa (WUFI)

1 Johdanto

1.1 Tausta

Suomessa on tällä hetkellä 570 000 huoneistoa 1960–1970-luvuilla rakennetuissa betonirunkoisissa kerrostaloissa. Nämä ovat tulossa niin sisä- kuin ulkopinnoiltaan peruskorjausikänsä. On laskettu, että tämän korjaustyön hinta on noin kahdeksan miljardia euroa. Vuonna 2012 korjausrakentamisen urakoiden arvo Suomessa oli 5,6 miljardia euroa, joten on aivan selvää, että 1960–70-lukujen lähiökerrostalojen korjaus vie useita vuosia. [1, 98.]

Monet 1960–70-lukujen kerrostalot ja kerrostaloalueet ovat paikoitellen huonokuntoisia, harmaita betonikuutioita. Rakennusten julkisivujen korjaukseen on kehitetty TES-menetelmä (Timberbased Element System), jolla parannetaan rakennusten lämpötekniisiä ja arkkitehtonisia ominaisuuksia vastaamaan nykypäivän odotuksia ja määräyksiä [1, 101].

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli

- Tuoda esille tyypilliset ongelmat lähiökerrostalojen julkisivuissa.
- Esitellä TES-menetelmällä toteutettu julkisivusaneeraus.
- Tutkia saneerauksessa käytettyjen rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta.

2 Lähiökerrostalot

1960–1970-lukujen lähiökerrostaloalueiden syntyyn vaikutti yhteiskunnan rakennemuutos. Sen seurauksena muuttovirta maaseudulta kaupunkeihin yltyi, ja 1950- ja 1960-luvun vaihteesta vuoteen 1975 mennessä Itä- ja Pohjois-Suomesta muutti eteläisen Suomen kasvukeskuksiin yhteensä noin 850 000 ihmistä. [2, 14–15.]

Tuon ajan kerrostalorakentamisen erityispiirteitä olivat valtava asuntotuotanto ja aluerakentaminen. Grynderit ja aluerakentaminen ohjasivat elementtirakentamisen kehitystä. Vuosikausia rakennettiin suuria määriä ja kehitettiin jatkuvasti rakenteita ja rakentamismalleja tavoitteena mahdollisimman sujuva ja nopea tuotanto. Tämän aikakauden kokeilujen seurauksista maksetaan laskua vielä tänäkin päivänä. [2, 46.]

Aikakauden suurimpia virheitä rakentamisessa olivat ulkoseinärakenteiden heikko betonin laatu, raudotteiden riittämättömät suojabetonipaksuudet, ruostuvan teräksen käyttö vaurioille alttiissa rakenneosissa, elementtien ansaiden ja kiinnikkeiden kestävyysliittymien liittyvät ongelmat sekä kosteusvauriot. [1, 98.]

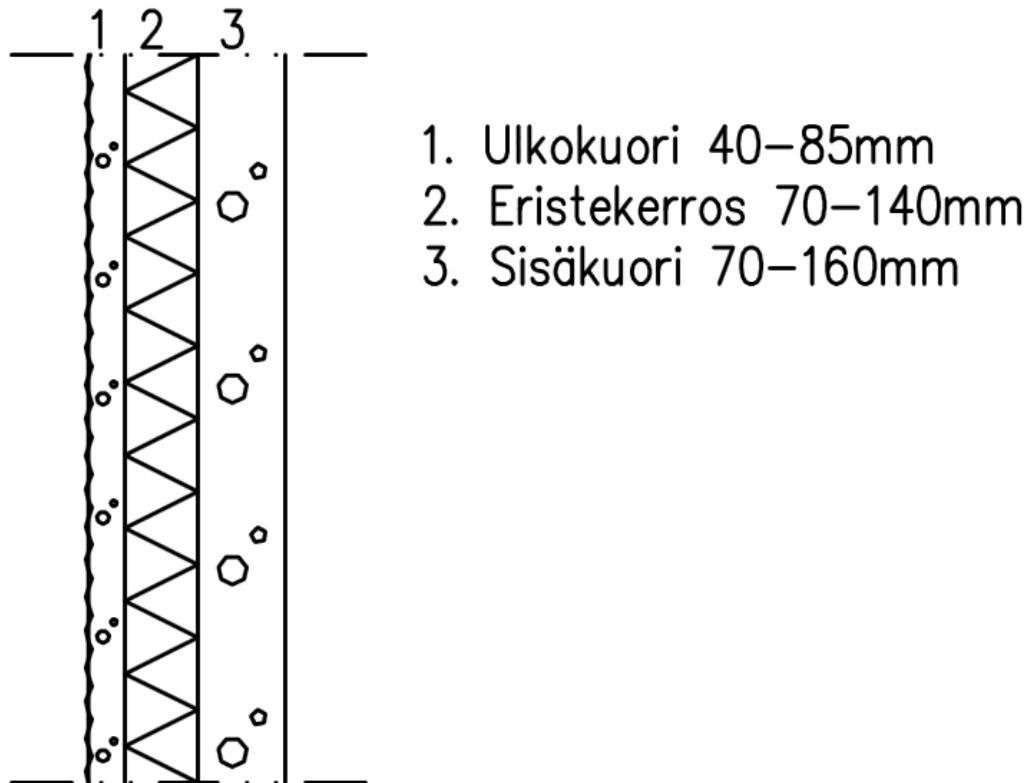
Taloissa on myös huono energiatehokkuus, ja eristettä on vain 80–120 mm. Ilmatiiveys on usein huono niin ulkoseinissä, ovissa kuin ikkunoissakin, mistä aiheutuu lämpövuotoja, vetoisuutta, kosteusvaurioita ja huonoa sisäilman laatua. Uskottiin myös, että tumma kyllästysively ikkunapuitteissa ja ovissa tekisi puuosista kestäviä. Ilmanvaihdossa toimimaton yhteiskanavajärjestelmä on tehoton ja lämmitysenergiaa hukkaava. [1, 98.]

Aluekokonaisuudet jäivät myös usein keskeneräisiksi. Asuntoja rakennettiin kovaa vauhtia, mutta alueelta jäivät puuttumaan palvelut ja toimivat virkistysalueet. Myös lapset unohdettiin suunnittelussa. Rakennuksen sijoittelun ja muodon määräsivät torninosturiradat, nostureiden kapasiteetti ja ulottuvuus. Sille sivulle, jolle kapasiteetti ei riittänyt, jouduttiin käyttämään kevyitä elementtejä. [2, 47.]

Liian nopea vauhti johti elementtituotannon virheisiin, koska ei ollut valmiuksia suoritua tällaisista tuotantomääristä. Rakentamisessa liikkuvat suuret rahat, ja rakentajat ammensivat tästä potista isolla mitalla. Osaltaan myös arkkitehtien luopuminen omasta tehtävästään ajoi lähiörakentamista huonompaan suuntaan: unohdettiin aluesuunnittelu sekä arkkitehtuuri ja keskityttiin gryndereiden johdolla voiton maksimointiin. [2, 48.]

Suomessa betonielementtirakenteita on asuinkerrostaloissa arviolta 44 miljoonaa neliometriä, ja näistä valtaosa on rakennettu 1960- ja 1970-luvuilla. Betonijulkisivujen järkevää korjaustoimintaa on tehty vain noin 20 vuoden ajan. 1960–1980-luvuilla rakennetuista betonijulkisivuista on korjattu arviolta kymmenesosa. Selvitysten mukaan raskaiden julkisivukorjausten tarve on 550 000 seinäneliometriä vuodessa. Julkisivu- ja parvekekorjausten arvon on laskettu olevan 170 miljoonaa euroa vuodessa. [3, 36]

Yleisin julkisivurakenne suomalaisessa kerrostalorakentamisessa on ollut betonielementtirakenne. Suurimmat määrät rakennettiin 1960–1980-luvuilla. Tyypillisin tällä aikakaudella käytetty julkisivuelementti on ollut niin sanottu betoni-sandwich-elementti (kuva 1). Se koostuu betonisesta ulkokuoresta, jonka paksuus on 40–85 mm sekä betonisesta sisäkuoresta, paksuudeltaan 70–150 mm, riippuen siitä, onko kyseessä kantava vai ei-kantava elementti. Lämmöneristeenä on käytetty mineraali-, lasi- tai kivivillaa, paksuudeltaan 70–140 mm. Betonin lujuus oli tähän aikaan melko vaatimaton, vain K25 [4, 14–15]. Betoniyhdistyksen säilyvyysohjeessa annettiin lujuusvaatimukseksi K30 vasta vuonna 1989 ja sitä korotettiin K45:een vuonna 1992. Pienempiä lujuusluokkia oli mahdollista käyttää lisäämällä suojabetonipaksuutta. [4, 12.]



Kuva 1. Tyypillinen betonisandwich-elementti.

2.1 Tyypilliset ongelmat sandwich-elementeissä

Merkittävimpiä ongelmia betonijulkisivuissa ovat:

- betonin pakkasrapautuminen
- raudotteiden korroosio
- kosteustekniset toimivuuspuutteet
- kiinnitysten, kannatusten ja sidontojen vauriot
- pintatarvikkeiden vauriot
- pintakäsittelyjen vauriot
- halkeilu ja muodonmuutokset

[4, 18.]

Betonin pakkasrapautuminen johtuu huokosverkostossa olevan veden jäätymisestä. Vesi laajenee jäätyessään noin yhdeksän prosenttia, ja tämän laajenemi-

sen aiheuttama hydraulinen paine rikkoo betonin rakennetta. Lisäksi betonin huokosverkostoon pääsee vettä esimerkiksi viistosateen vaikutuksesta. [4, 29.]

Betonin pakkasenkestävyydessä on huomattavia eroja riippuen siitä, mikä pinoite elementissä on. Huonoin pakkasenkestävyys on pesubetoni- ja klinkkeripintaisilla sekä maalaamattomilla lautamuottipintaisilla julkisivuilla. Puolessa tutkituista rakenteista ei ole pakkasenkestävyyden kannalta toimivaa suojauskostusta. Pesubetonipinnassa ei ole myöskään vedenimeytymistä estävää tai hidastavaa pintakerrosta, joten sadevesi pääsee imeytymään välittömästi rakenteeseen. Pakkasrapautuminen onkin tyypillisintä juuri pesubetonipinnassa. [5, 51.]

Suurin yksittäinen syy terästen korroosioon sandwich-elementeissä on betonin karbonatisoituminen. Korroosiovauriot tulevat näkyviin yleensä ensin rakennusten yläosissa, joissa kosteusrasitus on suurin, ja niissä kohdissa, joissa on pienimmät betonipeitepaksuudet. On tutkittu, että 1970-luvulla valmistuneiden rakennusten keskimääräinen karbonatisoitumissyvyys on 16 mm, ja tämän aikakauden rakenteissa 5–10 % asennusteräksistä on alle kymmenen millimetrin syvyydessä. [5, 52.]

Julkisivuille ja parvekkeille merkittävän kosteusrasituksen tuovat juuri ulkoilman olosuhteet. Myös ulkoseiniin rajoittuvat märkätilat tuovat lisäkosteutta rakenteeseen. Merkittäviä kosteusvaurioita on aiheuttanut muun muassa saumausten, pellitysten ja rakenteiden liitosten huonosta tiivistyksestä johtuva veden pääsy rakenteeseen. Myös eristetilan puutteellinen tuuletus ja vedenpoisto aiheuttavat merkittäviä vaurioita. [4, 37–38.]

Kiinnitysten heikkenemistä ja vaurioitumista esiintyy pääasiassa sandwich- ja kuorielementeissä. Pakkasrapautuminen, korroosio ja työvirheet vaurioittavat ansaita ja kiinnikkeitä. Vaurioita aiheuttavat lisäksi liian pienet betonipeitepaksuudet ja elementtirakentamisen alkuaikana käytetty ruostuva teräs. [4, 39–40]

Pintatarvikkeiden irtoamista on tapahtunut lähinnä klinkkerilaattapintaisissa elementeissä. Irtoamisen syinä ovat laatan ja betonin erilainen lämpölaaje-

nemiskerroin, betonin kutistuminen ja pakkasrapautuminen. Pintakäsittelyjen vahingoittuminen johtuu pitkälti ulkoilman rasituksista. Voimakas kosteusrasitus esimerkiksi saumavuodoista kerää kosteutta pinnoitteen taakse. Pitkäaikainen kosteus yhdessä betonin alkalisuuden kanssa heikentää pinnoitteiden tartuntaa. [4, 42–43.]

Muodonmuutoksia ja halkeilua aiheuttavat muun muassa betonin plastinen kutistuminen, kuivumiskutistuminen, pakkasrapautuminen, terästen korroosio ja lämpötilaerot. Sandwich-elementeissä ansaat rajoittavat kaareutumista, mikä aiheuttaa ulkokuoreen jännityksiä ja halkeamia. Kuorielementeissä kiinnikkeet eivät estä kaareutumista, ja näissä kaareutuminen onkin yleensä hyvin voimakasta. Niin pitkään kun kiinnikkeet tai niiden kiinnitys elementteihin ei ole vaurioitunut, ongelma on vain esteettinen. [4, 45–46.]

2.2 Betonirakenteiden korjaustavat

Rakenteiden kunto pyritään selvittämään perusteellisella kuntotutkimuksella, jonka perusteella valitaan käytettävä korjausmenetelmä ja korjauksen ajankohdasta. Rakenteen kunto määrittää, mitkä korjaustavat ovat teknisesti mahdollisia ja taloudellisesti järkeviä. [4, 50.]

Julkisivupinnan pintakäsittelyn uusiminen ja siinä yhteydessä tehtävät pienet laastipaikkaukset ja saumauskorjaukset ovat kevyttä pintakorjausta. Tässä yhteydessä vanhaa pinnoitetta ei poisteta, vaan korjaukset tehdään yleensä vanhan pinnoitteen päälle. Kevyillä korjauksilla on yleensä lyhyt, noin 5–10 vuoden käyttöikä. [4, 50–51, 61]

Betonielementeissä esiintyviä paikallisia vaurioita korjataan myös perusteellisella laastipaikkauksella ja pinnoituksen korjauksella. Siinä rapautunut ja karbonatisoitunut betoni poistetaan terästen päältä piikkaamalla. Rakenteesta tulee myös piikata esiin sellaiset teräkset, joissa on lähitulevaisuudessa odotettavissa korroosiovaurioita. [4, 51–52.] Huolellisesti toteutettuna korjaus lisää julkisivun käyttöikää noin 10–20 vuotta [4, 61].

Peittävän korjauksen tarkoituksena on peittää vaurioitunut rakenne uudella pintaverhouksella. Pintaverhouksen alle on myös mahdollista tehdä lisälämmöneristys. Vanha pintarakenne voi olla laajasti vaurioitunutta, mutta kelpaa vielä uusien rakenteiden alustaksi. Uudella pintaverhouksella vähennetään merkittävästi vanhan pintarakenteen kosteusrasitusta, jolloin rapautuminen ja korroosio hidastuvat. [4, 53.]

Julkisivun purkaminen ja uudelleenrakentaminen tulee kyseeseen silloin, kun korroosio ja rapautuminen ovat edenneet niin pitkälle, että paikkaus ja pinnoitus eivät ole enää teknisesti ja taloudellisesti järkeviä, eikä vanhaa rakennetta voi jättää enää uuden rakenteen alustaksi. Myös laaja mikrobikasvusto sandwich-elementin eristetilassa puoltaa vanhan vaurioituneen rakenteen poistoa. Uusi julkisivu voidaan tehdä eristerappauksena, eristyksenä ja kuorimuurauksena, täysikokoisina kuorielementteinä tai puurakenteisina suurelementteinä. [4, 55.] Peittäävillä korjauksilla ja julkisivun uudelleenrakentamisella saavutetaan hyvin pitkä, jopa yli 50 vuoden käyttöikä. [4, 61.]

Tässä opinnäytetyössä pyrin esittelemään korjaustavan, jossa vanha ulkokuori ja eriste puretaan ja jossa vanhan betonirungon päälle asennetaan uudet puurunkoiset, koko rakennuksen korkuiset suurelementit. Tätä menetelmää kutsutaan TES-menetelmäksi (Timberbased Element System) [6, 11–14].

3 TES-menetelmä

3.1 TES-menetelmän kuvaus ja Peltosaaren saneerauskohteen esittely

Teknillisen korkeakoulun tutkijat toteuttivat saksalaisten ja norjalaisten yhteistyökumppaneiden kanssa vuosina 2008–2009 tutkimushankkeen Timberbased element systems for improving the energy efficiency of the building envelope (TES Energy Facade). Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää yhteinen eurooppalainen ja helposti muokattavissa oleva menetelmä rakennusten ulkovaipan

energiatehokkaaseen korjaukseen mahdollisimman pitkälle esivalmistetuilla puurakenteisilla suurelementeillä. [6, 11–14.]

Tutkimushankkeen pohjalta ovat jalostuneet SmartTES 2010–2013 ja E2ReBuild 2011–2014 -tutkimushankkeet, joissa pyritään jalostamaan ja vakiomaan TES-menetelmää energiatehokkaampaan suuntaan.

Tässä opinnäytetyössä esittelen Riihimäen Peltosaaren kaupunginosassa TES-menetelmällä toteutetun saneerauksen pääpiirteet. 2010 käynnistyneessä Inno-va-hankkeessa oli tarkoituksena löytää uusia menetelmiä olemassa olevan rakennuskannan energiatason parantamiseen. Riihimäen Peltosaarella sijaitseva kerrostalo valittiin korjauskohteeksi syksyllä 2010. Rakennustyöt aloitettiin kohteessa syksyllä 2011 ja rakennus valmistui Heinäkuussa 2012. [7]

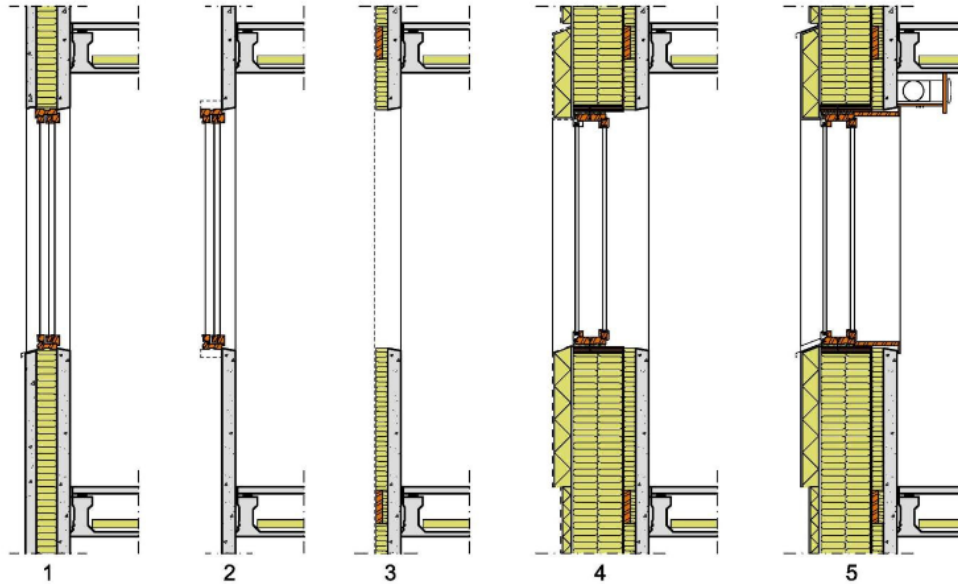
Opinnäytetyössä keskityn saneerauksessa käytettyjen rakenteiden rakennusfysikaaliseen simulointiin. TES-menetelmällä toteutettu korjaustapa on suhteellisen uusi, ja mielestäni on tarpeen tutkia sitä kuinka rakenteet toimivat pitkällä aikavälillä. Tällaisen saneerauksen tulisi antaa rakennukselle vähintään 50 vuoden käyttöikä ja on tärkeää tarkastella rakenteen toimivuutta myös tulevaisuuden muuttuvassa ilmastossa.

3.2 TES-menetelmän ominaispiirteet

TES-menetelmän tavoitteena on parantaa julkisivun energiatasoa eristystä lisäämällä ja ilmanpitävyyttä parantamalla. Eristettä voidaan lisätä jopa 400 mm. Tällä saneerauksella pyritään parantamaan rakennuksen arkkitehtuuria ja asumisviihtyvyyttä. Suunnittelussa, toteutuksessa ja ylläpidossa hyödynnetään tietomallinnusta (BIM). [1, 102.]

Julkisivuelementit valmistetaan elementtitehtaassa mahdollisimman suurina ja korkealla esivalmistusasteella. Ikkunat, ovet ja ilmanvaihtokanavat on mahdollista asentaa valmiiksi elementteihin. Elementit asennetaan joko olemassa olevan julkisivun päälle tai vanhan kuorielementin ja eristeen tilalle. Elementeissä

on itsekantava puurunko, joten aukotuksia on mahdollista muuttaa. Tässä yhteydessä on mahdollista lisätä ja muuttaa parvekkeita sekä rakentaa taloon hissi ja lisäkerroksia. [1, 102.] Kuvassa 2 esitetään Riihimäen Peltosaarella TES-menetelmällä toteutettu rakenne.



Kuva 2: Uloin sandwich-elementtikerros purettuna (2) ja nykyinen lämmöneristys poistettuna. 70 – 100 mm lämmöneristystä (PAROC-kiviillamatto) asennetaan betonipintaan (3) pinnan oikaisemiseksi. Julkisivuelementissä (4) on yhteensä 350/400 mm PAROC-kiviillä lämmöneristystä. Ikkunat, parvekkeen ovet ja pystysuora tuloilmakanavisto on valmiiksi asennettuna elementeissä. Väimeistelyt tehdään paikan päällä (5). Piirros: Arkkitehtuuritoimisto Kimmo Lylykangas.

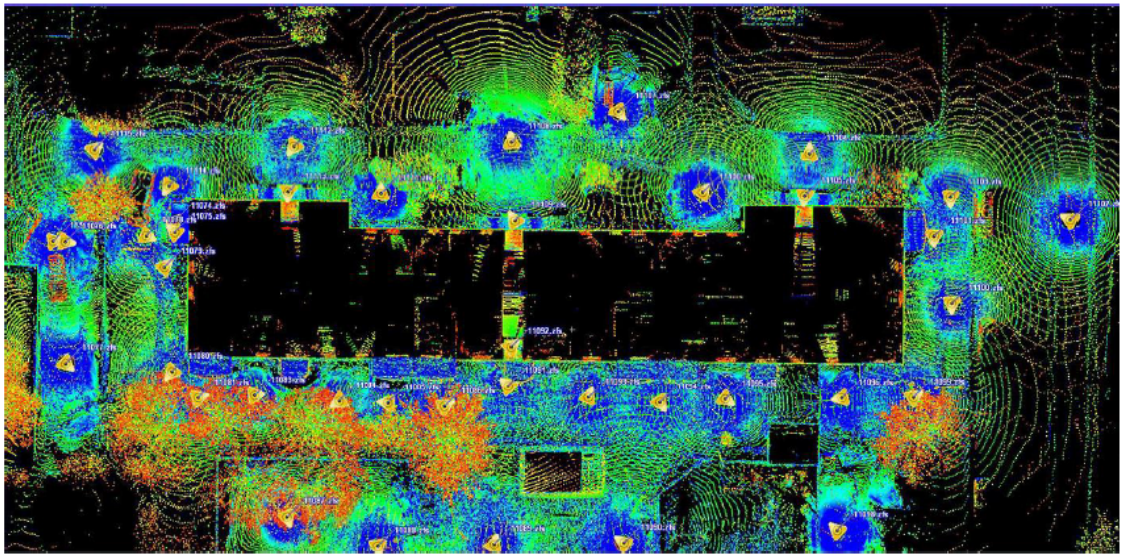
Kuva 2. Rakenneleikkaus Peltosaaren saneerauskohteesta [1, 107].

3.3 Kiinteistön lähtötiedot

Saneerattavan kiinteistön korjaustavan valintaan vaikuttaa olennaisesti rakennuksen kunto. Kiinteistöön tulee tehdä mahdollisimman kattava kuntotutkimus, jossa käydään läpi rakennuksen kaikki rakenteet ja järjestelmät. Rakennuksen elementtien ulkokuori ja parvekkeet voivat olla niin huonossa kunnossa, ettei niiden korjaus ole enää järkevää. Tällöin on perusteltua purkaa vanhat huonokuntoiset rakenteet pois ja toteuttaa saneeraus esimerkiksi TES-menetelmällä.

3.4 Mittaus ja mallinnus

Tietomallinnuksen käyttö uudis- ja korjausrakentamisessa kasvaa voimakkaasti. Vanhojen rakennusten piirustukset eivät välttämättä vastaa todellisuutta, joten korjausrakentamisen suunnittelu näiden virheellisten dokumenttien pohjalta on mahdotonta. Tätä varten on kehitetty laserkeilausmenetelmä, joka on mullistanut tiedonkeruuta olemassa olevista rakennuksista. Esimerkiksi Riihimäen kaupungin Peltosaaren kaupunginosassa toteutetussa saneerauskohteessa laserkeilauksen toteutti Pöyry Finland Oy. Laserkeilauksesta saatu pistepilvi voidaan siirtää suoraan mallinnus- ja suunnitteluohjelmiin. Kohteeseen koskematta saadaan tarkat mittatiedot elementtien suunnittelua ja valmistusta varten. Peltosaaren kohteessa huomattiin, että mittapoikkeamat alkuperäisiin piirustuksiin olivat jopa 200 mm. [7, 13.] Kuvassa 3 esitetään laserkeilaamalla tuotettua aineistoa.



Kuva 3. Laserkeilauksen aineistoa [8, 13].

3.5 Julkisivuelementtien valmistus

Elementit valmistettiin Teeri-kolmion tehtaalla kuivissa sisätiloissa, mikä takaa sen, että elementit tuli valmistettua laadukkaasti, mittatarkasti ja säältä suoja- sa. Elementtejä valmistettiin yhteensä 69 kappaletta. Ne ovat noin kolme met- riä leveitä ja 12 metriä korkeita ja paksuudeltaan 350–400 mm. Elementin reu- noissa ja ikkunoiden ympärillä oleva kantava rakenne on kertopuuta. Eristeenä on käytetty Paroc extra -mineraalivillaa. Tuloilmakanavat on integroitu elementin sisään. Myös ovet ja ikkunat on asennettu elementteihin jo tehtaalla. Elementin molempiin pintoihin on kiinnitetty jäykistävä levytys: ulkopintaan tuulensuojale- vyksi Aquapanel-kuitusementtilevy ja sisäpintaan 9 mm:n havuvaneri. Elemen- tin jäykistys mahdollistaa nostot ja kuljetuksen ilman pelkoa muodon- muutoksista. Tuulensuojalevytyksen pintaan on asennettu liimaamalla Paroc FAL 1 -rappauseriste. Elementeissä on käytetty 50 mm:n ja 100 mm:n rap- pauseristettä. Elementteihin on asennettu tehtaalla myös pohjarappaus ja ver- kotus. Näin työmaalle tehtäväksi jäi vain elementtien saumaus ja pintarappaus. Parveketaustaseinien elementit on toteutettu puuverhoiltuina, ja ensimmäisen kerroksen kohdalle tulevassa elementissä on levyrappaus. Kuvissa 4 ja 5 esite- tään elementtien valmistusta Teeri-kolmion tehtaalla. [9.]



Kuva 4. Elementtien valmistusta Teeri-kolmion tehtaalla [9].



Kuva 5. Elementtien valmistusta Teeri-kolmion tehtaalla [9].

3.6 Työ Peltosaaren saneerauskohteessa

Saneerattavasta rakennuksesta puretaan julkisivu ja parvekkeet sekä sandwich-elementin villakerros. Betonirungon pinnasta poistetaan pahimmat pursheet. Välipohjien kohdalle kiinnitetään vaakasuuntaiset elementin kiinnityspuut ja betonikuoren päälle asennetaan kokoonpuristuva tasausvilla. Tämän jälkeen rakennus vuorataan tuulensuojakankaalla ja saumat teipataan tiiviiksi ilmanpitävyyden varmistamiseksi. Kangas toimii myös asennuksen aikaisena sääsuojana julkisivulle. Sokkeliin muurataan kevytsoraharkoilla levennys uutta julkisivuelementtiä varten. [9.]

Esivalmistetut, mittatarkat rakennuksen korkuiset elementit asennetaan paikalleen levennetyn sokkelin päälle ja kiinnitetään seinään välipohjien kohdalle kiinnitettyihin elementin kiinnityspuihin. Sitä mukaan kun elementtiasennus etenee, poistetaan rakennuksesta vanhat ovet ja ikkunat sekä tehdään läpiviennit uusille ilmanvaihtokanaville. Elementtiasennuksen jälkeen asunnoissa tehdään ivkanavatyöt ja kotelointi, tiivistetään ikkuna- ja oviaukkojen liittymät betonirunkoon sekä suoritetaan viimeistelytyöt. Tällä menetelmällä työmaan läpimenoaika voidaan saada todella lyhyeksi ja näin minimoidaan talon asukkaille koituvat häiriöt. [9.] Kuvissa 6 ja 7 esitetään työn etenemistä saneerauskohteessa.



Kuva 6. Julkisivun purkutyö [9].



Kuva 7. Sokkelin levennystyö [9].

4 Rakennusfysiikka

4.1 Rakennusfysikaalinen suunnittelu korjausrakentamisessa

Korjausrakentamisessa noudatetaan uudisrakentamisen määräyksiä soveltaen. Kokonaisuuden huomioon ottaminen on erittäin tärkeää. Jos rakenteen yhtä osaa korjataan ottamatta huomioon sen vaikutusta koko rakenteen toimintaan, voidaan tehdä ratkaisevia virheitä rakenteen toimivuuden kannalta. Suunnittelu tulee tehdä kohteen ehdoilla, mikä tarkoittaa sitä, että joudutaan usein tekemään kompromisseja. Kuitenkin rakenteen on toimittava kosteus- ja lämpöteknisiltä ominaisuuksiltaan oikein. Lopputuloksen tulee olla käyttäjälle turvallinen ja terveellinen. [10, 50.]

Valittujen rakenneratkaisujen tulee olla vikasietoisia, ja rakenteen toiminta ei saa vaarantua käytön tai huoltotoimien vähäisen laiminlyönnin takia. Yleisesti rakenteen kosteusteknistä toimivuutta ei saa tukea sen varaan, että rakennusmateriaaleissa on käytetty homeenestoaineita. Rakenteet on suunniteltava riittävän yksinkertaisiksi, että ne sallivat pienet työvirheet ja puutteet rakenteessa. [10, 22.] Kosteuden kondensoitumista rakenteeseen on lähtökohtaisesti rajoitettava, vaikkakin laskennallisesti pystytään osoittamaan, että kondensoitunut kosteus pystyy kuivumisjakson aikana poistumaan rakenteesta [10, 59].

4.2 Lämpö

Lämpö on molekyylien ja atomien värähtelyliikettä. Rakenteessa lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla:

- johtumalla
- säteilemällä

- konvektiolla

Johtumisella eli konduktiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä aineen sisällä. Lämpö voi siirtyä johtumalla aineesta toiseen, mikäli aineet ovat kontaktissa toisiinsa. Termodynamiikan lakien mukaan lämpö siirtyy aina korkeammasta matalampaan lämpötilaan siten, että lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan. Lämmön johtumista mitataan lämmönvastuksella ja lämmönjohtavuudella. [11, 40–41.]

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jossa energia siirtyy aaltoliikkeen välityksellä. Absoluuttisen lämpötilan yläpuolella kaikki kappaleet lähettävät lämpösäteilyä. Auringon lähettämä säteily on lyhytaaltoista, ja kappaleiden lähettämä säteily on pitkäaaltoista. Esimerkiksi ikkuna läpäisee hyvin lyhytaaltoista säteilyä, mutta huonosti kappaleista lähtevää pitkäaaltoista säteilyä [11, 40–41.]

Konvektiossa lämpö siirtyy nesteen tai kaasun virtauksen mukana. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa väliaine liikkuu jonkin voiman - esimerkiksi iv-koneen tai tuulen - vaikutuksesta. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerot saavat aikaan ilman liikkeen. Esimerkiksi paksussa eristekerroksessa esiintyy luonnollista konvektiota, jonka seurauksena rakenteen eristyskyky heikkenee. [11, 40–41.]

4.3 Kosteus

Kaikki huokoiset materiaalit ja rakenteet sisältävät kosteutta. Materiaalit asettuvat tasapainokosteuteen ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. Tasapainokosteus riippuu myös siitä, tullaanko siihen kastumisen vai kuivumisen kautta. Rakenteissa voi olla myös ylimääräistä kosteutta rakennuskosteutena, tai sitä voi kulkeutua rakenteisiin käytön johdosta. [11, 65.]

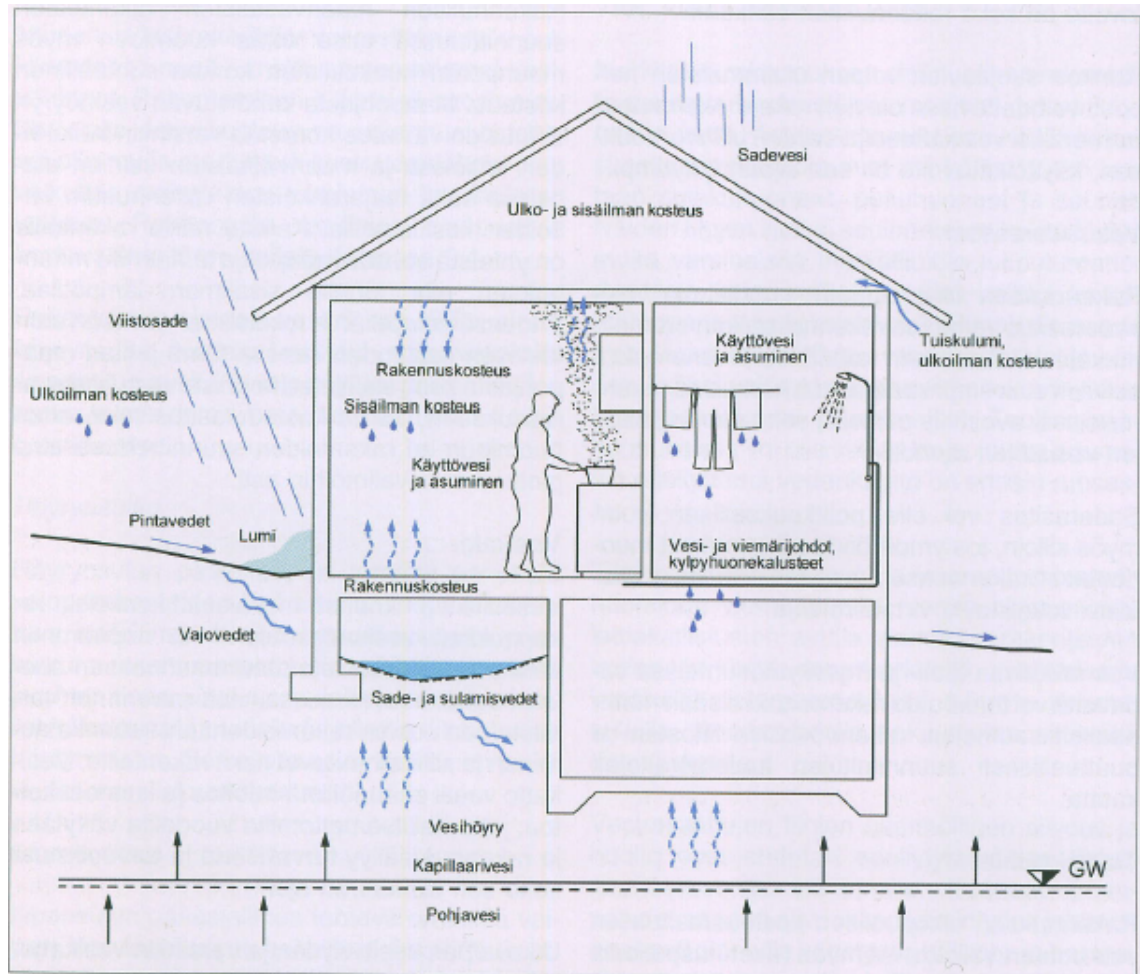
Rakennusaineen kosteuskapasiteetti ilmoittaa aineen kyvyn sitoa kosteutta ympäröivästä ilmasta. Puupohjaisilla materiaaleilla on suuri kosteuskapasiteetti,

mikä auttaa esimerkiksi seinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Suuren kosteuskapasiteetin omaavat rakenteet sitovat ja luovuttavat kosteutta tehokkaasti ja näin vähentävät rakenteen kosteusvaurioitumisriskiä. [11, 79.]

Rakennusmateriaalin tasapainokosteus esitetään sorptiokäyränä, jossa ilmoitetaan ilman suhteellisen kosteuden funktiona aineen sisältämä kosteuspitoisuus. Kosteuden siirtymistä aineeseen kutsutaan adsorptioksi, kosteuden poistumista kutsutaan desorptioksi ja kosteuden siirtymistä aineen sisällä sorptioksi. Lämpötilalla on vain vähän vaikutusta tasapainokosteuteen. [11, 77.]

4.4 Veden ja vesihöyryn siirtyminen rakenteeseen

Vesihöyry pyrkii siirtymään rakenteeseen diffuusiona, joka johtuu vesihöyryn osapaine-eroista, tai konvektiona, joka johtuu ilmanpaine-eroista. Lisäksi ulkoilman olosuhteet rasittavat rakennuksen ulkovaippaa: lumisade, vesisade, jää ja pintavedet aiheuttavat merkittävää kosteusrasitusta, eristerapattuihin seiniin merkittävän kosteusrasituksen tuo viistosade ja sateen jälkeen auringonpaiste voimistaa kosteuden siirtymistä rakenteeseen diffuusion avulla. [10, 41.] Kuvassa 8 on esitetty rakennusta rasittavat kosteuslähteet.



Kuva 8. Rakennusta rasittavat kosteuslähteet [10, 39].

4.5 Diffuusio

Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoitetaan kosteuden siirtymistä vesihöyrynä rakenteen läpi. Kylminä vuodenaikoina vesihöyryn osapaine ulkona on pienempi kuin sisällä. Yleisimmin diffuusion suunta on kylminä vuodenaikoina lämpimästä kylmään, mutta diffuusion suuntaan vaikuttavat rakenteen eri puolilla vallitseva kosteuspitoisuus, lämpötila ja auringon säteily. Kesällä diffuusion suunta voi olla ulkoa sisäänpäin. Osapaine-erot pyrkivät tasoittumaan suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Lähes kaikki rakennusmateriaalit läpäisevät jonkin verran vesihöyryä, ja tätä rakennusmateriaalin ominaisuutta kuvaa vesihöyryn-läpäisevyys, δ_v [m^2/s] ja δ_p [$\text{kg}/(\text{msPa})$]. [11, 71.]

Rakenteissa vesihöyryn haitallista kulkeutumista vastustetaan käyttämällä rakenteen lämpimällä puolella riittävän vesihöyryvastuksen omaavaa rakennekerrosta. Kerros voi olla massiivirakenne, kuten betoni, tiili tai puu, tai rankarakenteisissa seinissä höyrynsulkumuovi tai ilmansulkupaperi. Ilmansulkupaperia käytettäessä rakennuksen sisäilmankosteus laskee talvella kuitenkin liian alhaiseksi, koska ilmansulkupaperin vesihöyryvastus on pieni ja ulkona vesihöyryn osapaine on pieni, joten sisäilman kosteus siirtyy tehokkaasti rakenteen läpi ulospäin. On todettu, että liian kuiva sisäilma altistaa hengitystieinfektioille. Tasaisen sisäilmankosteuden kannalta olisikin turvallisinta käyttää rankarakenteisissa seinissä höyrynsulkumuovia. [10, 41.]

4.6 Kosteuden konvektio

Ilmankosteus voi siirtyä rakenteeseen konvektiolla eli ilmavirtausten avulla. Tämä ilmiö pyritään estämään ilmansulkukerroksella, joka sijoitetaan rakenteen lämpimälle puolelle. Yleensä rakenteessa sama ainekerros toimii ilman- ja höyrynsulkuna. Kerros voi olla massiivirakenne, kuten betoni, kivi tai puu, tai kalvomainen, kuten höyrynsulkumuovi tai ilmansulkupaperi. Rakenteeseen voi kulkeutua huomattavasti enemmän kosteutta konvektion avulla kuin diffuusiolla, joten on erittäin tärkeää kiinnittää huomiota rakenteiden ilmanpitävyyteen. Sisäilmankosteuden aiheuttamat vauriot rakenteessa ovat yleensä ilmavuotojen aiheuttamia. Ilmansulun läpiviennit ja jatkoskohdat tulee tiivistää erityisen huolellisesti. Uudisrakentamisessa tiiveyskoe tulee suorittaa ennen ulkoseinien ja laipion pinnoitusta, jotta mahdolliset vuotokohdat pystyttäisiin vielä tiivistämään. [10, 41.]

4.7 Kondensoituminen

Kosteuden kondensoituminen on hyvin tunnettu ilmiö. Kondensoitumisella tarkoitetaan ilman vesihöyryn tiivistymistä vedeksi. Tiivistyminen voi tapahtua rakenteen pinnassa tai huokoisen materiaalin sisällä, kun ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Kosteus tiivistyy aina kylmemmälle tiiviille pinnalle, kun vesihöyryn kyllästyskosteus ylittyy. [11, 72.]

Laskentaohjelmissa ei aina pystytä mallintamaan kondensoitumista oikealla tavalla. Ohjelmissa oletetaan, että kosteus on sitoutuneena materiaaleihin myös rakennekerrosten rajapinnoissa. Tämä pätee, kun lämpötila on yli 0 °C ja materiaaleilla on tiivis kontakti [10, 59].

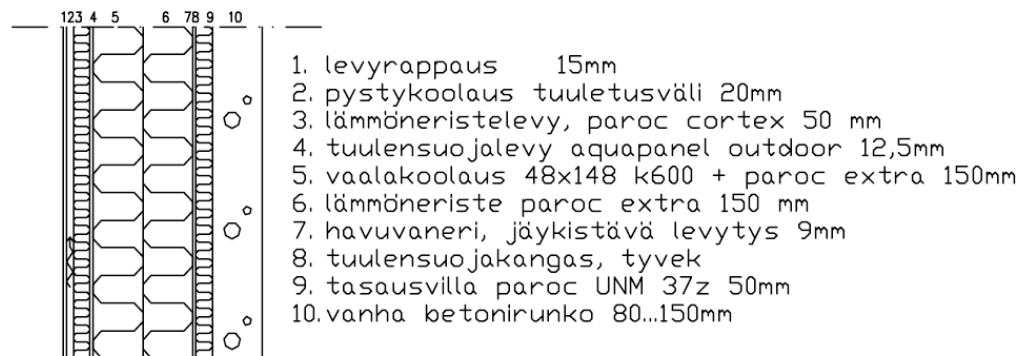
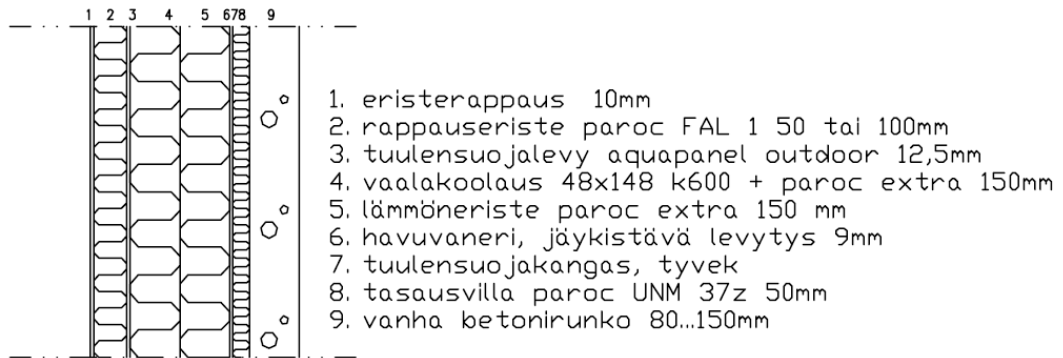
Kondensoitumisella on huonoja vaikutuksia puupohjaisiin materiaaleihin, muun muassa muodonmuutoksina ja lujuuden heikkenemisenä. Jos kondensoituminen jatkuu voimakkaana ja kauan, niin olosuhteet homeen kasvuille ja lahoamiselle tulevat otollisiksi. Kosteuden kondensoitumista rakenteeseen tulee välttää, vaikka laskelmissa näyttäisikin siltä, että kondensoitunut kosteus pystyisi poistumaan rakenteesta. [10, 59.]

5 Saneeratun rakenteen toiminnan tarkastelu

5.1 Rakenteet

Peltosaaren saneerauskohteessa on käytetty kolmea erityyppistä rapattua seinärakennetta. Rakennuksen ensimmäisen kerroksen ulkoseinä on toteutettu levyrappauksena, jolloin puurungon ja levyrappauksen väliin jää tuuletettu tila, joka mahdollistaa rakenteen turvallisen kosteusteknisen toiminnan. Tässä rakenteessa ulkopuolelta tuleva kosteus ei pääse tunkeutumaan varsinaiseen seinärakenteeseen, ja levyrappauksella on mahdollisuus kuivua molempiin

suuntiin, ulospäin ja tuuletusrakoon. Tehtyjen tutkimusten mukaan puurakenteinen rapattu julkisivu tulisi toteuttaa levyrapattuna, koska tämä on varmin ratkaisu rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta [13, 129–130, 447–448]. Kuvassa 9 on esitetty Peltosaaren saneerauskohteessa käytetyt rapatut seinätyypit.



Kuva 9. Peltosaaren saneerauskohteessa käytetyt rapatut seinätyypit.

Kaksi muuta seinätyyppiä on toteutettu siten, että runkoelementin pintaan on kiinnitetty suoraan 50 mm tai 100 mm paksu Paroc FAL1 -rappauseriste, ja rappaus on tehty Fescon-ruiskurappauksena. Tällaisen seinätyypin käyttö jakaa asiantuntijoiden mielipiteitä: Tuotekehityspäällikkö Jukka Sevón Parocilta on sitä mieltä, että nämä rakenteet toimivat moitteettomasti, kun taas TTY:n FRAME-tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, että puurungon päälle tehdyissä tuulettumattomissa eristerappauksissa esiintyy kosteusongelmia. [14, 331.]

Ruotsissa tehdyssä BETSI-tutkimuksessa [13, 127-132] eristerapattuista puurunkoisista ulkoseinistä on löytynyt runsaasti riskirakenteita ja kosteusvaurioita. Tehtyjen tutkimusten ja rakenteista saatujen kokemusten perusteella RIL:n kos-

teus- ja vedeneristysohjetta (RIL 107-2012) muutettiin siten, että tuulettumaton eristerappaus ei suositella puisille pinnoille tai puurunkojen päälle [12, 8].

Ulkopinnan tiiveydellä on huonoja ja hyviä puolia. Hyvin tiivis pinnoite estää ulkopuolisen kosteusrasituksen siirtymisen rakenteeseen, mutta toisaalta se estää rakenteeseen päässeän kosteuden kuivumista [10, 135]. Tuulettumattomalla eristerappauksella toteutetussa seinärakenteessa ongelma on kosteuden kerääntyminen rakenteeseen, jos siihen pääsee vettä epätiiveyskohdista. Viistosateen ja tuulen vaikutuksesta seinäpintaan muodostuu vesikalvo, ja rakenteeseen pääsee tunkeutumaan suuriakin määriä vettä jo pienistä halkeamista ja epätiiveyskohdista. [10, 121.] Eristerapatuissa julkisivuissa kosteusvauriot eivät yleensä näy ulospäin.

Eristepaksuuden kasvattaminen lisää ongelmia ja riskejä entisestään. Tässä kohteessa eristepaksuus on suurimmillaan 450 mm. Eristepaksuuden kasvattamisen seurauksena seinän uloimmissa kerroksissa lämpötila laskee ja suhteellinen kosteus nousee. Tämä tarkoittaa sitä, että varsinkin syksyisin olosuhteet homeen kasvulle ovat otolliset. Lämpötila on lähellä ulkoilman lämpötilaa, ilman suhteellinen kosteus on korkea ja lisänä on vielä saderasitus. Viistosateen määrä on noin 20–30 % kokonaissademäärästä, ja puolet tästä - noin 50–100 mm - sataa syksyllä. [10, 121]

5.2 Rakennusfysikaaliset testivuodet

Testivuosien määrittämiseksi ei ole olemassa yleisesti hyväksytyjä menetelmiä. Testivuosiksi tulisi löytää mahdollisimman kriittiset vuodet, joissa ilmenee kosteusrasituksen osalta ääri-ilmiöt. On esitetty, että edustavuuden tulisi vastata 90 %:n kriittisyystasoa 30 vuoden ilmastodatan perusteella, eli vähintään 90 % vuosista on vähemmän kriittisiä kuin valittu vuosi. [10, 67]

Suomen olosuhteisiin on valittu homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen kannalta kriittiset vuodet. Rakennusfysikaaliseksi testivuosiksi on valittu Jokioisen 2004 ja Vantaan 2007 ulkoilman olosuhteet. TTY ja Ilmatieteen laitos ovat

tehneet pitkällistä tutkimusta kriittisten rakennusfysikaalisten testivuosien määrittämiseksi. Tulevaisuuden testivuodet on modifioitu, ja ne ovat saatavilla vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastoille. Testivuodet Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007 ovat toteutunutta ilmastotietoa, ja ne kattavat koko Suomen alueen. [10, 67–68.]

Jokioisten 2004 ja Vantaan 2007 rakennusfysikaaliset testivuodet valitaan rakenteen tarkasteluun rakennetyypin ja niitä rasittavien olosuhteiden perusteella. Jokioisten 2004 testivuosi valitaan rakenteeseen, jossa ulkoilman kosteus vaikuttaa rakenteen sisäosien toimintaan. Tarkasteltava ilmansuunta on pohjoinen. Vantaan 2007 testivuosi valitaan, jos halutaan suhteellisen kosteuden lisäksi tarkastella viistosateen vaikutusta rakenteen toimintaan. Tarkasteltava ilmansuunta on etelä, jossa ilmansuunnassa viistosateen vaikutus on suurin. Lisäksi etelän valinnassa ilmansuunnaksi tulee otetuksi huomioon se, mikä on auringsäteilyn vaikutus kosteuden siirtymisessä rakenteeseen diffuusiona. [10, 68–69]

Tässä opinnäytetyössä käytän Comsol mulphysics -ohjelmistossa rakennusfysikaalisena testivuotena Vantaa 2007 ja Vantaa 2050 ilmastoja, koska kyseessä on eristerapattu julkisivu. Wufi Pro -ohjelmistossa käytän testivuotena Helsingin 2007 säätietaa. Kuvassa 10 on esitetty rakennusfysikaalisen testivuoden valintaperusteet eri rakenteille.

Rakennetyypit	Testivuosi		
	Nykyilmasto	2050 ilmasto	2100 ilmasto
Rakenteet, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Esimerkkirakenteita: <ul style="list-style-type: none"> - puu ja metalliverhotut ulkoseinät - betonisandwich rakenteet¹ - harkkorakenteet¹ - sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet - yläpohjat, joissa on vesikate - ryömintätilalliset alapohjat 	Jokioinen 2004 ilmansuunta seinärakennetarkastelussa pohjoinen ²	Jokioinen 2050 ilmansuunta seinärakennetarkastelussa pohjoinen ²	Jokioinen 2100 ilmansuunta seinärakennetarkastelussa pohjoinen ²
Rakenteet, joissa sade ja ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttavat niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Esimerkkirakenteita: <ul style="list-style-type: none"> - tiiliverhotut ulkoseinät - eristerapatut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet¹ - harkkorakenteet¹ - käännetyt katot 	Vantaa 2007 ilmansuunta seinärakennetarkastelussa etelä	Vantaa 2050 ilmansuunta seinärakennetarkastelussa etelä	Vantaa 2100 ilmansuunta seinärakennetarkastelussa etelä

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

² Rakenteen ulkopinnan kosteusteknistä toimivuutta tarkasteltaessa kriittisin ilmansuunta voi olla myös joku muu kuin pohjoinen

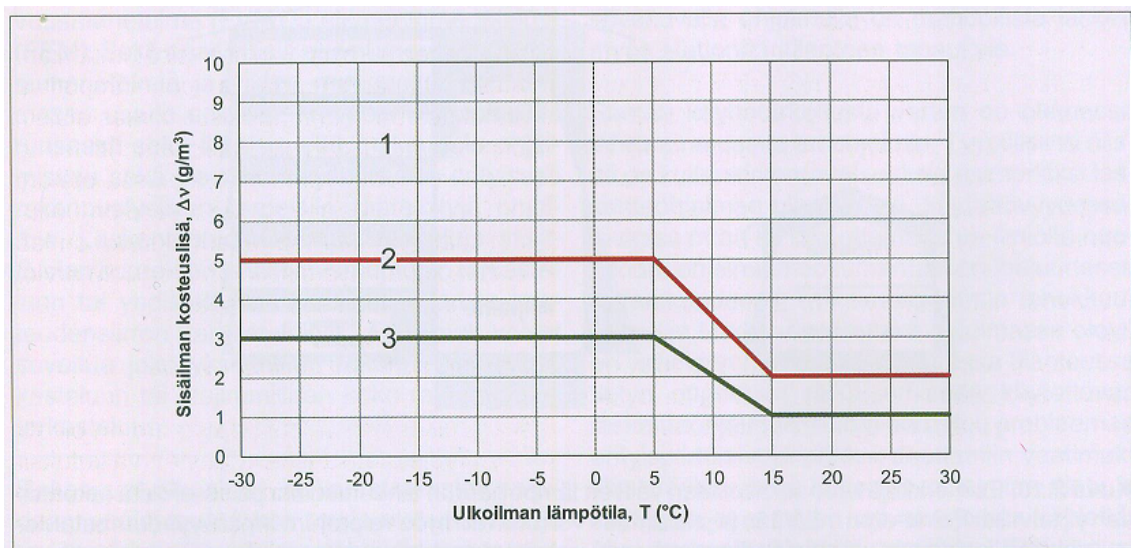
Kuva 10. Esimerkkejä eri vaipparakenteiden kosteusteknisissä tarkasteluissa käytettävistä rakennusfysikaalisista testivuosista ja ilmansuunnista [10, 68].

5.3 Sisäilman olosuhteet

Keskeiset sisäilman olosuhteet ovat lämpötila, sisäilman suhteellinen kosteus, paine-erot sisä- ja ulkoilman välillä, märkätilojen aiheuttama kosteusrasitus ja sisäilman kosteuslisä. Sisäilman kosteuslisällä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon enemmän sisäilmassa on sitoutuneena kosteutta verrattuna ulkoilmaan. Kosteuslisä on talvella suurempi kuin kesällä. Kuvissa 11 ja 12 on esitetty sisäilman kosteuslisän suuruus eri rakennustyypeissä sekä kosteuslisä ulkolämpötilan funktiona.

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

Kuva 11. Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyypit [10, 71].



Kuva 12. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona [10, 71]

Rakennusaikainen kosteus tulee myös ottaa huomioon tarkasteluissa. Tasoite-, valu- ja muuraustöiden aiheuttama sisäilman kosteuslisä voi olla huomattavasti

taulukkoarvoja suurempi. Työmaan kosteudenhallintasuunnitelmassa tulisikin ottaa huomioon, että kosteuslisä ei ylittäisi taulukkoarvoja kuin lyhytaikaisesti. [10, 70.] Sisäilman lämpötilana asuinrakennuksia tarkasteltaessa tulee käyttää 21:tä astetta vuoden ympäri, koska näin voidaan ottaa huomioon rakennuksen kesäaikainen jäähtymisen vaikutus.

Paine-erot otetaan myös huomioon tarkasteluissa. Rakennukseen syntyy painovoimaisen tai koneellisen ilmanvaihdon seurauksena alipaine. Paine-eroja syntyy myös tuulen ja lämpötilaerojen vaikutuksesta. Nykyisin rakennusten ilmanvaihto suunnitellaan siten, että sisällä vallitsee enintään 5 Pa:n alipaine. Paine-erot ovat olennaista tietoa, kun tutkitaan ilmavirtausten vaikutusta vaipparakenteen toimintaan. [10, 70–72.]

5.4 Materiaaliominaisuudet

Laskentaa varten tulee tietää käytettyjen rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet. Tärkeimmät laskennallisissa tarkasteluissa käytettävät materiaaliominaisuudet ovat.

- ominaislämpökapasiteetti
- lämmönjohtavuus
- lämmönvastus
- pinnan säteilyominaisuudet
- ilmanläpäisevyys
- ilmanläpäisyvastus
- tasapainokosteus
- ominaiskosteuskapasiteetti
- vesihöyrynläpäisevyys
- vesihöyrynvastus
- kapillaarisuusominaisuudet
- kosteudenjohtavuus
- kosteusdiffusiviteetti
- homehtumisominaisuudet

[10,81].

5.5 Rakenteen kosteus- ja lämpöominaisuudet

Rakennusaineen lämmönjohtavuusominaisuuksien ja niiden lämpöhäviövaikutusten lisäksi on otettava huomioon rakennusaineen hygroskooppiset ominaisuudet. Pysyvästi kohonneet kosteuspitoisuudet rakennusmateriaaleissa voivat aiheuttaa kosteusvaurioita. Korkeat kosteuspitoisuudet asuintiloissa voivat johtaa home- ja sisäilmaongelmiin. Rakennusaineen lämpö- ja kosteusominaisuudet ovat sidoksissa toisiinsa. Lisääntynyt kosteuspitoisuus lisää lämpöhäviötä, ja lämpötila vaikuttaa kosteuden siirtymiseen rakenteessa. Näin ollen näitä molempia ilmiöitä on tarkasteltava yhdessä. [15.]

Aikaisemmin rakenteiden tutkimiseen käytetty Glaser-menetelmä, joka on kuvailtu saksalaisessa standardissa DIN 4108, on ollut yleinen tapa arvioida rakennusosien kosteustasapainoa ottamalla huomioon vesihöyryn diffuusion kulkeutuminen rakenteen sisällä. Tämä menetelmä ei kuitenkaan ota huomioon kapillaarista kosteudensiirtymistä eikä aineen sorptiokykyä, jotka pienentävät rakenteen vaurioitumisriskiä silloin, kun kyseessä on kosteuden kondensoituminen rakenteeseen. Tämä menetelmä ottaa huomioon vain jatkuvuustilan olosuhteet hyvin yksinkertaisilla reunaehdoilla, eikä se ota huomioon realistisia sääolosuhteita tai kohteen sijaintia. [10, 76.]

6 Rakenteiden tarkastelu Comsol Multiphysics -ohjelmalla

6.1 Comsol Multiphysics -ohjelman esittely

Comsol Multiphysics -ohjelmisto on todella tehokas interaktiivinen ympäristö erilaisten tieteellisten ja teknisten mallien tekemiseen ja ratkaisemiseen FEM-menetelmällä (Finite Element Method) ja osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) avulla. Ohjelmiston käyttö ei sinänsä vaadi erityisen syvälle menevää mate-

maattista ja fysikaalista osaamista. Ohjelmaan on rakennettu erilaisia moduuleita, jotka sisältävät valmiiksi ratkaisuun tarvittavat yhtälöt. Käyttäjällä tulee kuitenkin olla hyvät tiedot rakennusfysiikasta ja rakennusfysikaalisten ilmiöiden ymmärtämisestä.

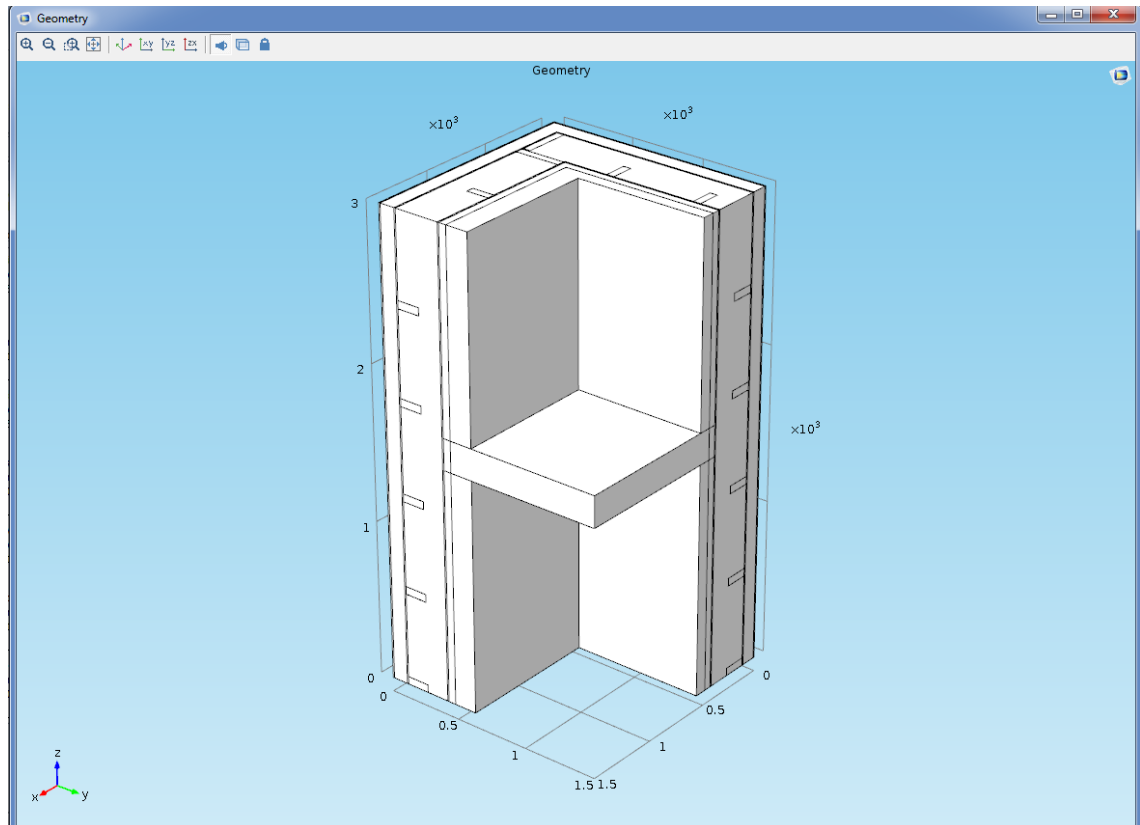
6.2 Mallin luonti Comsol Multiphysics -ohjelmistolla

6.2.1 Alkumäärittelyt

Mallin tekemisen aloitin määrittelemällä, missä dimensiossa malli halutaan rakentaa. Valittavana on 0D-, 1D- ja 1D-aksisymmetria, 2D- ja 2D-aksisymmetria sekä 3D. Tässä malli on tehty 3D:ssä. Tämän jälkeen valitaan moduulit tarkasteltavien fysikaalisten ilmiöiden mukaan. Tässä mallissa tarkastellaan lämmön ja kosteuden siirtymistä rakenteessa, joten valitaan moduulit heat transfer in solids (ht) ja transport of diluted species (tds). Tämän jälkeen valitaan stationääri- ja ajastariippuvan tilan tarkastelu.

6.2.2 Geometria

Geometrian luonti aloitettiin 2D-työtilassa tekemällä suorakulmioista eri rakennekerrokset. Tämän jälkeen malli pursotetaan vastaamaan haluttua korkeutta. Tässä seinäkulman malli oli kolme metriä korkea ja puolitoista metriä leveä molempiin suuntiin. Seuraavaksi mallinnettiin sisällä oleva ristirunko ja välipohja sekä elementtien kiinnityspuu. Kuvassa 13 esitetään Comsol Multiphysics -ohjelmistolla tehty rakennemalli.



Kuva 13. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla luotu rakennemalli.

6.2.3 Laskentaan määriteltävät materiaaliparametrit

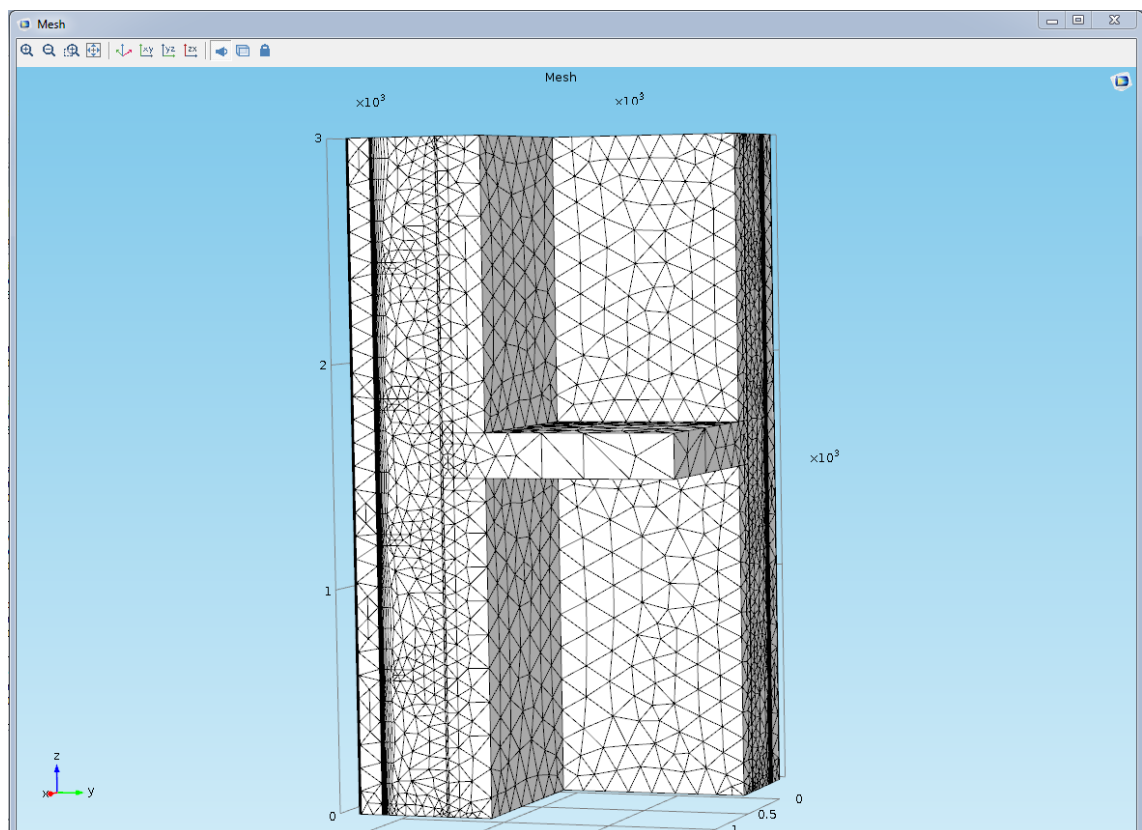
Comsol Multiphysics -ohjelmistossa on valmiina hyvin suppea materiaalikirjasto. Ohjelmaan pystyy kuitenkin luomaan materiaaleja itse tai voi hankkia valmiita materiaalikirjastoja. Tässä työssä materiaalit on määritelty opinnäytetyön ohjaajan avustuksella. Kaikille rakenneosille tulee olla määriteltynä materiaaliominaisuudet, jotta laskenta onnistuu.

Heat transfer in solids ja transport of diluted species -moduuleissa materiaaliominaisuuksiksi määritellään seuraavat.

- lämmönjohtavuus λ [W(m*K)]
- ominaislämpökapasiteetti c_p [J/(kg*K)]
- tiheys ρ [kg/m³]
- vesihöyrynläpäisevyys δ_v [m²/s]

6.2.4 Mallin verkotus

Ohjelma käyttää hyväkseen FEM-menetelmää, joten mallin verkotus on hyvin tärkeässä asemassa mallin laskennassa. Elementtiverkon voi luoda automaattisesti laskennan yhteydessä, mikä monissa tapauksissa onnistuu hyvin helposti. Verkotuksen koolla ja muodolla on paljon vaikutusta laskentatuloksiin. Mitä tiheämpi verkotus on, sitä tarkempaa on laskenta. Hyvin tiheässä verkossa tietokoneen laskentatehon rajat tulevat nopeasti vastaan. Verkotus kannattaa määrittellä itse ja verkottaa rajapinnat hieman tiheämmin, mutta muualla voi käyttää harvempaa verkotusta. Kuvassa 14 esitetään rakennemalliin luotu elementtiverkko.



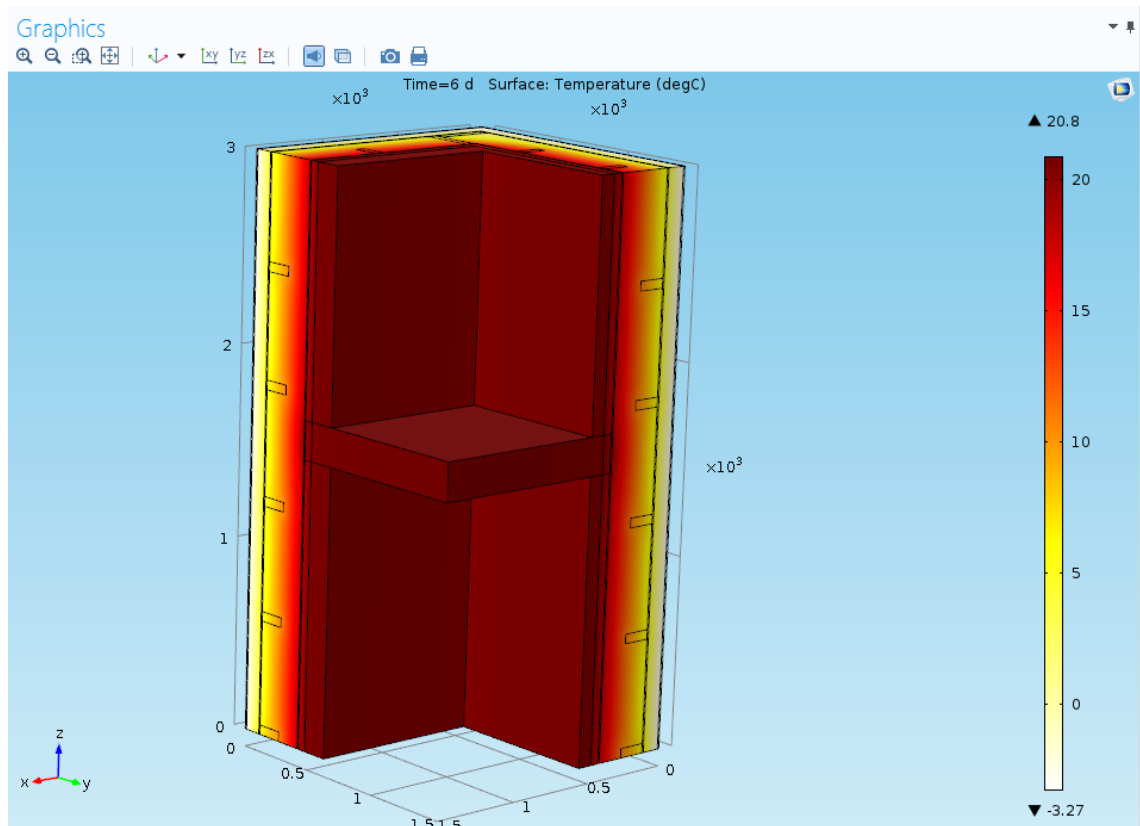
Kuva 14. Comsol Multiphysics -ohjelmistolla rakennemalliin luotu elementtiverkko.

6.2.5 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet

Mallin tarkastelussa käytettävät ulkoiset ja sisäiset olosuhteet syötetään ohjelmaan. Ulkoilman olosuhteina käytetään rakennusfysikaalista testivuotta Vantaa 2007 ja Vantaa 2050. Säätieto ladataan ohjelmaan ja osoitetaan rakennemallin sisä- ja ulkopinnoille oikeat lähtötiedot. Sisätilan lämpötilana on sovittu käytettäväksi +21 °C, jotta sisäilman jäähdytys tulisi otettua huomioon rakenteen tarkastelussa. Sisäilman kosteuslisänä käytetään 5g/m³, kun ulkoilman lämpötila on alle viisi astetta ja 2g/m³, kun ulkoilman lämpötila on yli 15 astetta. Sisäilman kosteuslisä muuttuu lineaarisesti, kun ulkolämpötila on välillä +5–+15 °C.

6.3 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtymisen mallintaminen tapahtuu heat transfer in solids (ht) -moduulin avulla. Ilmatieteen laitoksen sivuilta ladattu Vantaan 2007 rakennusfysikaalisen testivuoden aineisto on muokattu lämpötiladataltaan sopivaksi tekstitiedostoksi ja se on ladattu Comsoliin. Comsolissa rakenteen sisä- ja ulkopinnalle asetetaan laskennassa käytettävät lähtötiedot. Ulkopuolelle asetetaan rakennusfysikaalisesta testivuodesta lämpötilatieto ajan funktiona ja sisäpinnalle asetetaan tasainen 21 °C:n lämpötila ympäri vuoden. Sisä- ja ulkopinnoille asetetaan myös pintavastukset. Kuvassa 15 esitetään rakenteen lämpötilajakauma.



Kuva 15. Rakenteen lämpötilakenttä ajanhetkellä kuusi päivää.

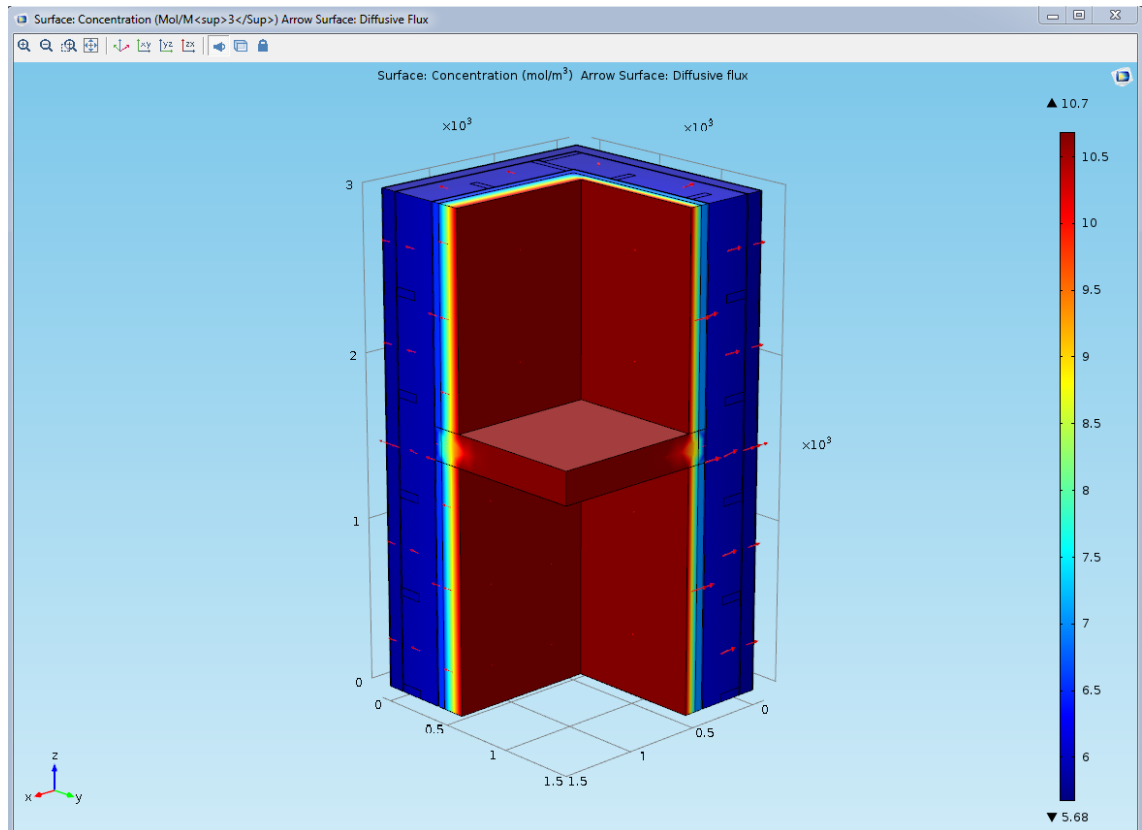
6.4 Kosteuden siirtyminen

Kosteuden siirtymisen simulointi haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, jotta tuloksia saisi järkevässä ajassa aikaiseksi. Comsolissa on erillinen moduuli kosteuden ja lämmönsiirtymisen simulointiin, heat and moisture transport -moduuli (ham), mutta kyseisen moduulin käyttö osoittautui sen verran haastavaksi, että siitä päätettiin luopua. Sen sijaan simuloitiin kosteuden siirtymistä diffuusion avulla, transport of diluted species -moduulilla (tds). Tämän moduulin käyttö vaikuttaa suhteellisen helpolta: rakenteessa tapahtuva kosteuden siirtyminen saadaan simuloitua samoin kuin rakenteen vesihöyrypitoisuus ja suhteellisen kosteus. Näistä voidaan tehdä joitain päätelmiä rakenteen toimivuudesta.

Tällä moduulilla ei kuitenkaan ole voitu simuloida viistosateen vaikutusta rakenteeseen. Viistosade kuitenkin tuo merkittävän kosteusrasituksen rakenteeseen, joten sen vaikutus on mallinnettu Wufilla. Tämä mallinnus on tehty sekä viistosateen kanssa ja ilman viistosadetta, jotta viistosateen vaikutus rakenteen kosteuteen selviää.

Transport of diluted species -moduuliin (tds) ladataan niin ikään Vantaa 2007 ja Vantaa 2050 -testivuoden säätieto. Tuntikohtainen ulkoilman sisältämä vesimäärä (abs) on laskettu Excelillä ja ladattu Comsoliiin. Sisäilman kosteuslisä lisättiin malliin taulukkona RIL:n ohjeen mukaan. Sisä- ja ulkopinnalle asetettiin laskentaa varten oikeat lähtötiedot. Ulkopinnalle asetettiin ulkoilman vesipitoisuus ja sisäpinnalle ulkoilman vesipitoisuus ja sisäilman kosteuslisä. Materiaaliominaisuuksiin tarvitsi lisätä vain rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyydet.

Malliin määritettiin myös yhtälöt ilman kyllästyskosteuspitoisuudelle (v_k) ja ilman suhteelliselle kosteudelle (RH %), jotta tuloksista voi tulkita rakenteen vesihöyrymäärää ja suhteellista kosteutta. Kuvassa 16 esitetään rakenteen vesihöyrymäärä ja diffuusion suunta.



Kuva 16. Rakenteessa oleva vesimäärä g/m^3 ja diffuusion suunta ajanhetkellä kuusi päivää.

7 Rakenteiden tarkastelu WUFI PRO-ohjelmistolla

7.1 WUFI PRO -Ohjelmiston esittely

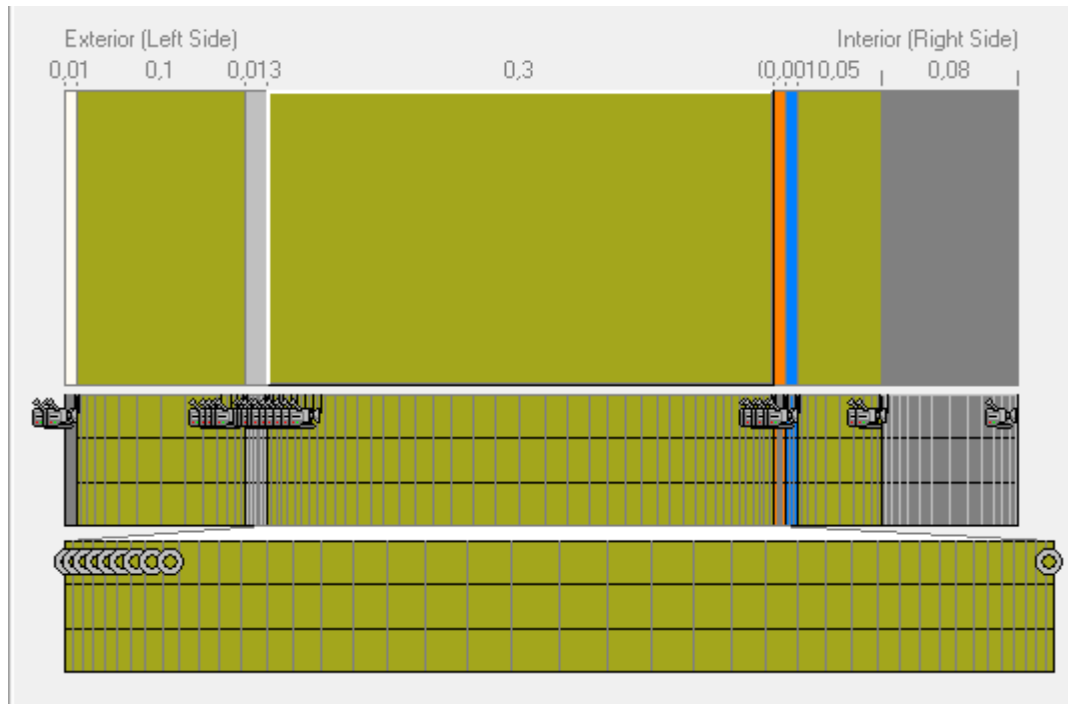
WUFI PRO on menu-pohjainen PC-ohjelmisto, joka on kehitetty mallintamaan kosteus- ja lämpöominaisuuksien käyttäytymistä rakenteessa epästationääritilassa. Ohjelma käyttää hyväkseen tietoa, joka on kerätty ulko- ja laboratoriotesteissä, sekä mitattuja säätietoja ja myös sateen ja auringonsäteilyn vaikutusta. Tämä mahdollistaa realistiset laskelmat liikkuvasta lämpö-kosteuskäyttäytymisestä monikerrosrakenteissa, jotka altistuvat luonnollisille ilmasto-olosuhteille. WUFI on työkalu rakennusmateriaalien kehittämiseksi ja optimoin-

nille, ja se on suunnattu rakennusmateriaalien valmistajille, suunnittelijoille, insinööritoimistoille ja asiantuntijoille. [15.]

7.2 Mallin luonti WUFI PRO -ohjelmistolla

Mallin luonti Wufi pro:lla 1D-tilassa on erittäin yksinkertaista. Ohjelmassa on hyvin laaja materiaalikirjasto, jossa on kaikki malliin tarvittavat materiaalit. Malliin määritellään rakennepaksuudet, materiaalit ja pintavastukset ulko- ja sisäpinnalle. Mallin luonnissa on käytetty automaattista elementtiverkkoa ja siihen on lisätty monitorointipisteet.

Tätä mallia on yksinkertaistettu siten, että malliin ei ole otettu mukaan puisia runkorakenteita, vaan kosteuden siirtymistä tarkastellaan vain eristeen kohdalta. Viistosateen mallinnus Wufilla on kuitenkin paljon yksinkertaisempaa kuin Comsolissa, joten malli on laskettu viistosateen kanssa ja ilman, että on saatu selville minkälainen vaikutus viistosateella on rakenteeseen. Wufiin ei ollut saatavilla rakennusfysikaalisten testivuosien säädädataa, joten laskennassa on käytetty Helsingin vuoden 2007 säätietoja. Kuvassa 17 on esitetty Wufilla tehty rakennemalli.



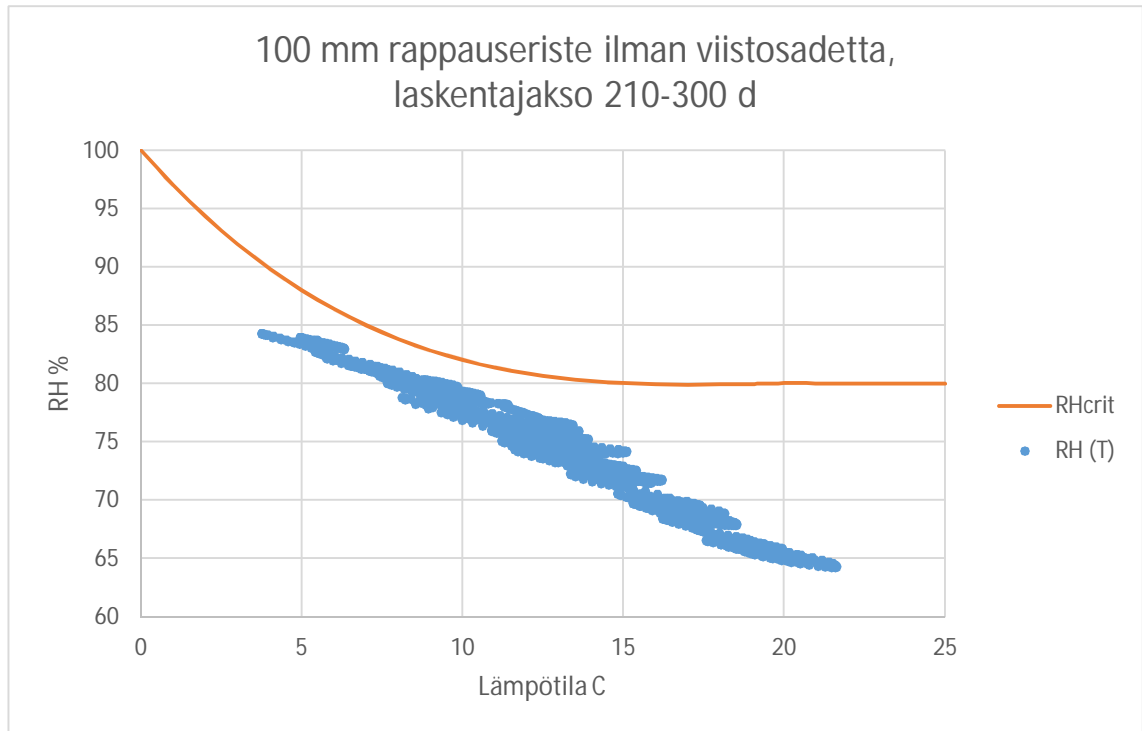
Kuva 17. Wufi Prolla tehty rakennemalli.

8 Tulokset WUFI PRO -ohjelmistolla

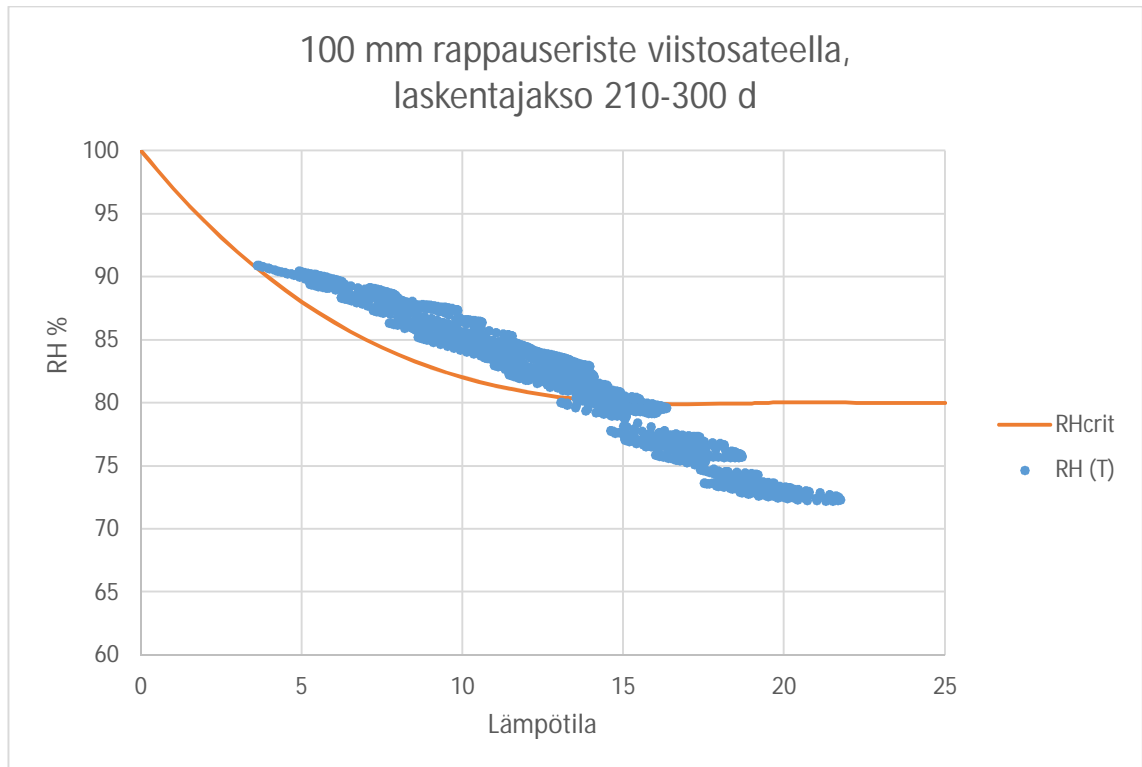
Kuvissa 18 ja 19 esitetään Wufi pro:lla saadut tulokset rakenteen käyttäytymisestä. Rakenteessa on käytetty 100 mm rappauseristettä ja laskentajakso on kuvassa 18 on 210-300 päivää ja kuvassa 19 koko vuosi. Mittauspiste on noin 120 mm syvyydessä ulkopinnasta, eli puurungon ja tuulensuojalevyn rajapinnassa. Tämä piste on vastaavassa kohdassa kuin Comsol-mallissa kuvassa 22 esitetty tarkastelupiste 1. Loput Wufi laskennasta saadut tulokset esitetään liitteessä 5.

Wufilla lasketuista tuloksista näkee selvästi, että viistosateella on merkittävä vaikutus rakenteen kosteusrasitukseen. Ilman viistosaderasitusta rakenteessa, jossa on 100 mm rappauseriste, kaikki suhteellisen kosteuden arvot laskentajaksolla 210-300 päivää ovat RH_{crit} käyrän alapuolella (kuva 18). Kun malliin

lisätään viistosaderasitus, niin suuri osa suhteellisen kosteuden arvoista nousee RH_{crit} käyrän yläpuolelle (kuva 19).



Kuva 18. RH_{crit} tarkastelupisteessä 1. (WUFI)

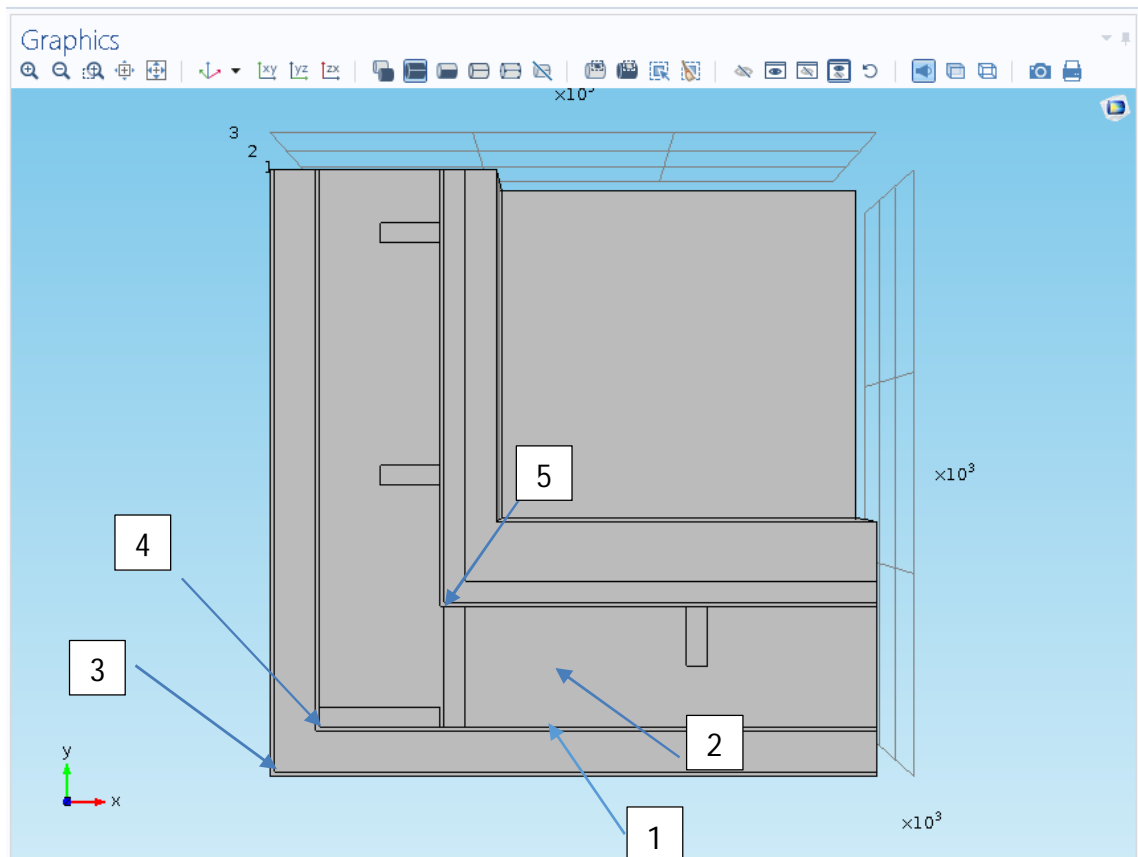


Kuva 19. RHcrit tarkastelupisteessä 1. (WUFI)

Rakenne mallinnettiin Wufilla käyttäen myös ohuempaa 50 mm rappauseristettä. Näissä laskelmissa näkyy selvästi, että tarkastelupisteessä yksi on homeen kasvulle suotuisat olosuhteet suuren osan aikaa vuodesta. Excel-ohjelmistolla työstetyt kuvaajat ovat liitteessä 5.

9 Tulokset Comsol Multiphysics -ohjelmistolla

Laskentajakson pituus on yksi vuosi. Laskenta suoritettiin Vantaa 2007 ja Vantaa 2050 -säädatalla. Laskenta oli melko hidasta, ja mallin laskentaan kului koulun koneella noin 60 tuntia. Molempien laskentojen aloituspäivämäärä on 1.1. ja lopetuspäivämäärä 31.12. Kuvassa 20 esitetään tarkasteluun valittujen pisteiden sijainti rakenteessa.



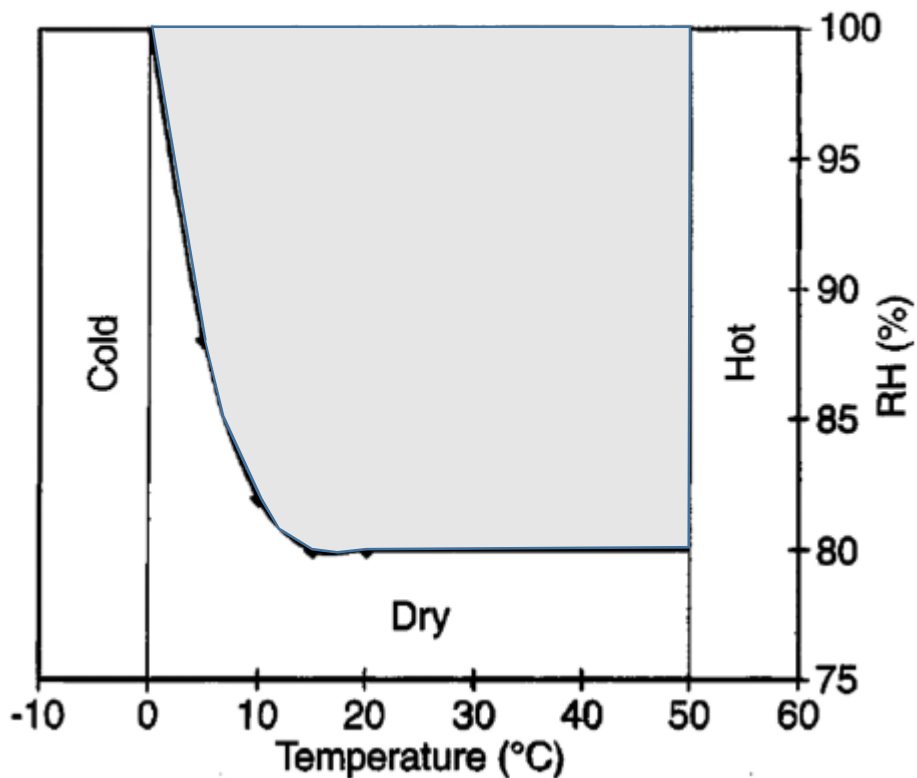
Kuva 18. Valitut tarkastelupisteet.

Tarkastelupisteiden mittaustulokset siirrettiin Comsolista livelinkin kautta Exceliin, jossa muodostettiin kuvaajat saadusta mittausdatasta. Molemmissa laskennoissa mittauspisteiden paikat olivat samat, jotta saatiin tarkkaa vertailutietoa siitä, miten rakenteen käyttäytyminen muuttuu tulevaisuuden ilmastossa.

Tarkastelupisteet ovat puurungon ja eristeen rajakohdissa, lukuun ottamatta ulointa pistettä (piste 3), joka on heti ohutrappauksen takana rappauseristeen pinnassa. Mittauspisteiden paikat on valittu siten, että paksuissa eristekerroksissa uloimmat osat ovat rakenteen vaurioitumisen kannalta kriittisiä pisteitä. Kosteuden siirtyminen on simuloitu vain diffuusiolla, mikä yksinkertaistaa laskentaa ja mallin tekemistä huomattavasti.

10 Tulosten tarkastelu

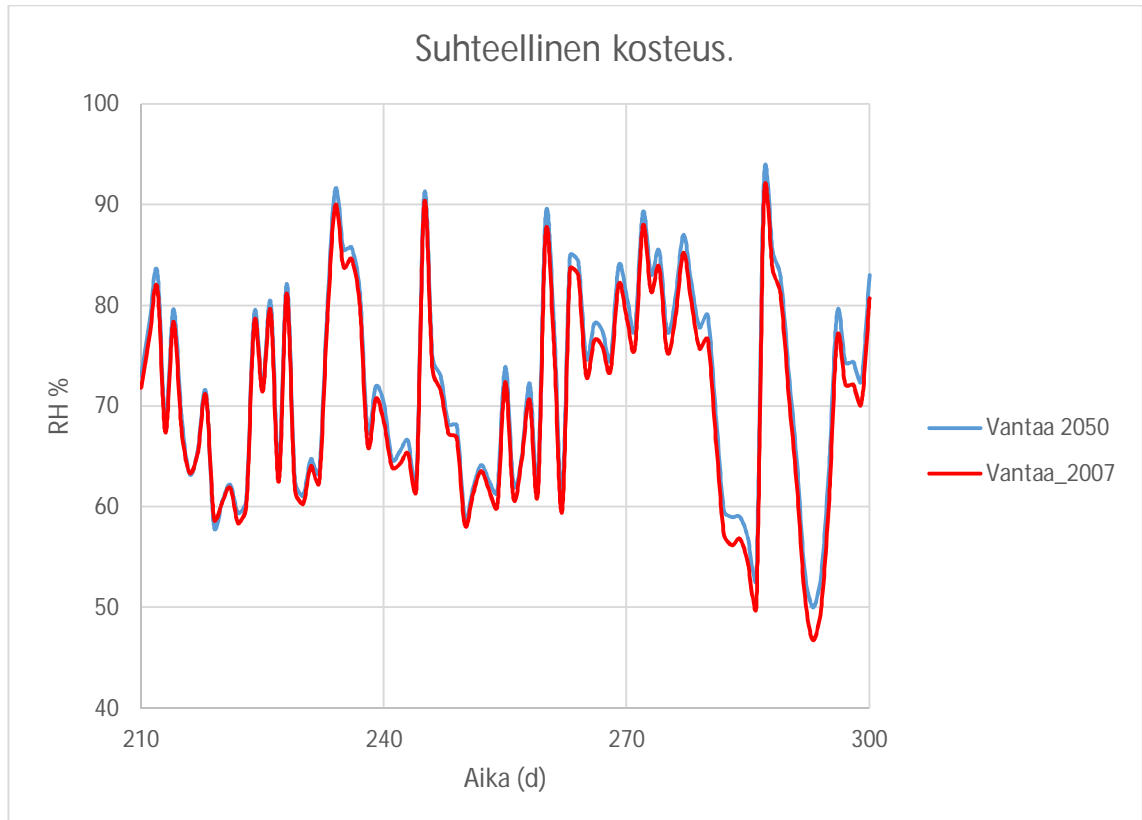
Tässä työssä ei sinänsä tarkastella rakenteiden homeutumisherkkyttä eikä homeen kasvua rakenteessa. Viitasen [16] tutkimustuloksiin pohjautuen jokaisen tarkastelupisteen T, RH -kuvaajaan on piirretty RH_{crit} käyrä (kuva 21), joka kuvaa homeen kasvulle suotuisia olosuhteita. Tarkastelupisteistä käy ilmi, onko rakenteessa sellaiset olosuhteet, että homeen kasvu olisi mahdollista, mutta ei sitä, kuinka pitkään olosuhteet homeen kasvulle ovat suotuisat. Homeen kasvun arviointiin tulisi tietää, kuinka kauan rakenteessa on homeenkasvulle suotuisat olosuhteet ja pystyykö rakenne kuivumaan kuivumisjakson aikana siten, että homeen kasvu taantuu. Vasta sitten voidaan tehdä päätelmiä rakenteen homeutumisherkyydestä.



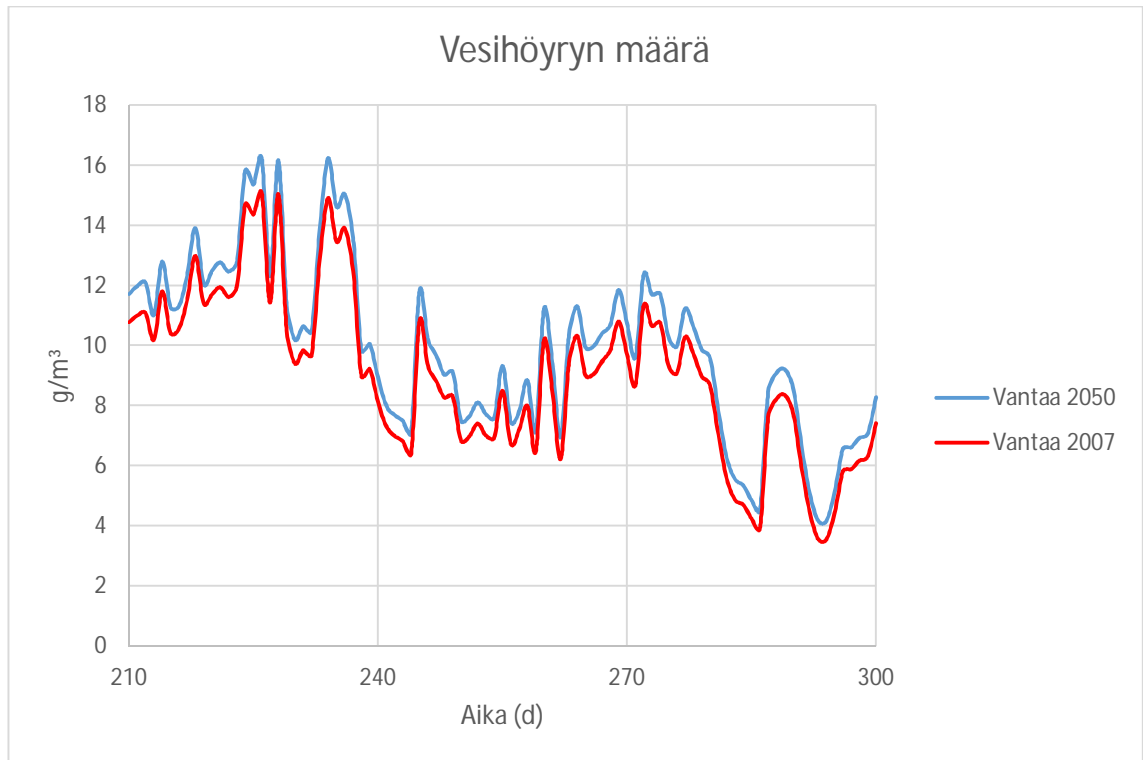
Kuva 19. Homeen kasvun kannalta suotuisat olosuhteet [16.]

Lopulliseen tulosten tarkasteluun on valittu noin kolmen kuukauden aikaväli, 29.7.–27.10., ajanjakson pituuden ollessa 210–300 päivää. Ajanjakso on määri-

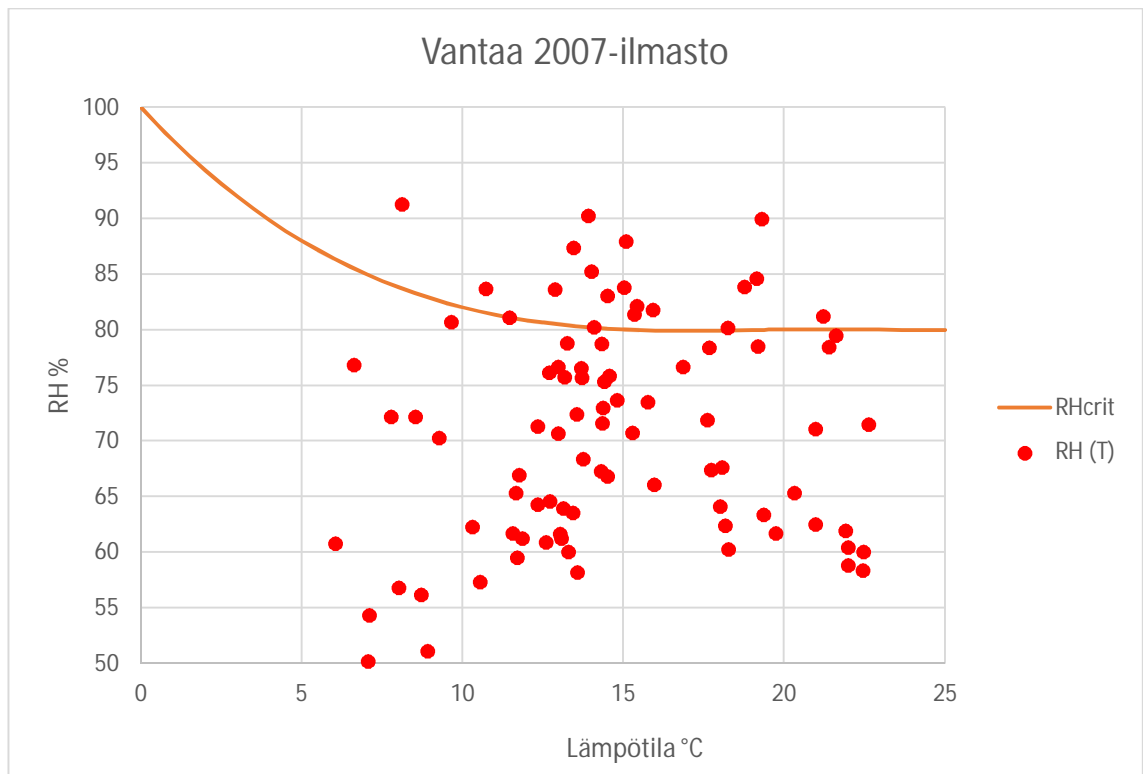
teltä analysoimalla koko vuoden laskentajakson kuvaajia ja valitsemalla niiden perusteella kriittisin ajanjakso, jona aikana rakenteessa oli korkein ilman suhteellinen kosteus. Kuvissa 22–25 esitetään tarkastelupisteessä 1 mitatut suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn määrät.



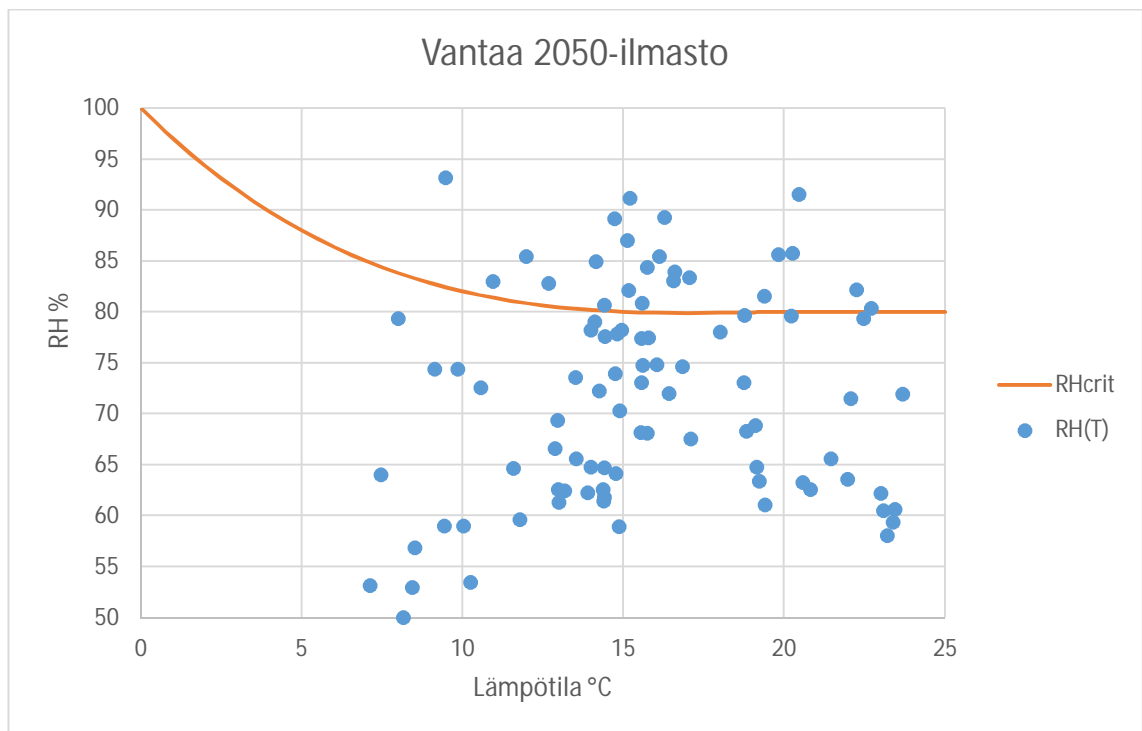
Kuva 20. Suhteellinen kosteus pisteessä 1.



Kuva 21. Vesihöyryn määrä pisteessä 1.



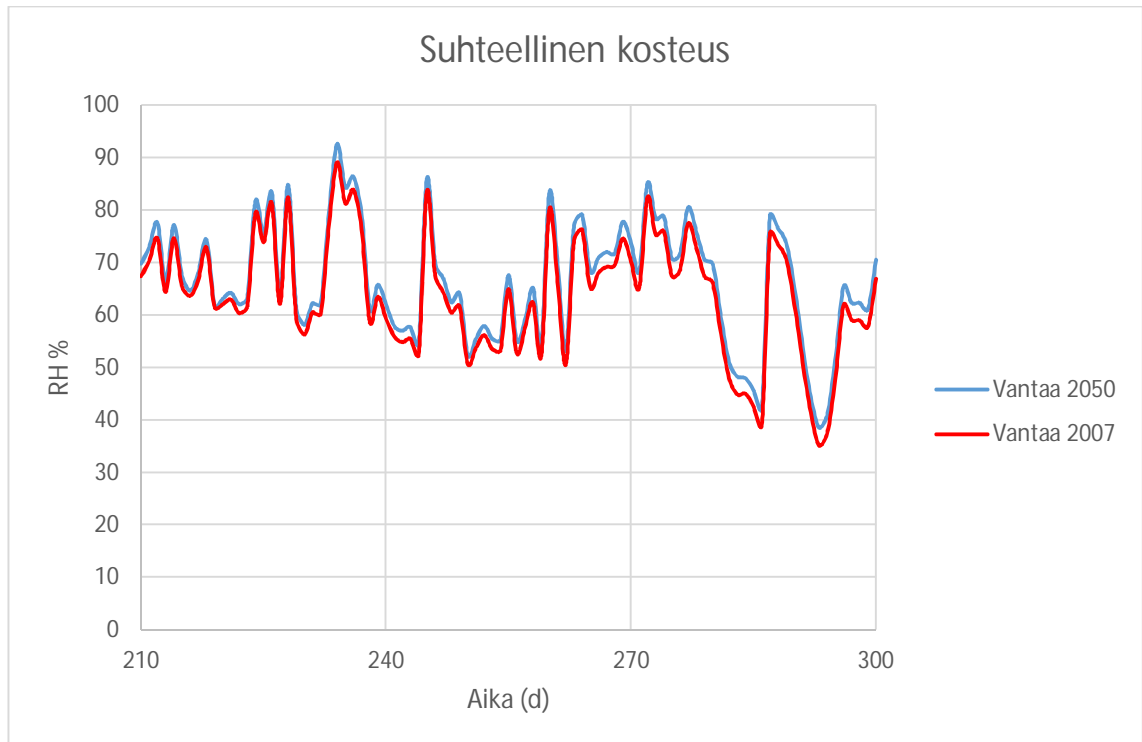
Kuva 22. RH_{crit} 2007 –ilmastossa.



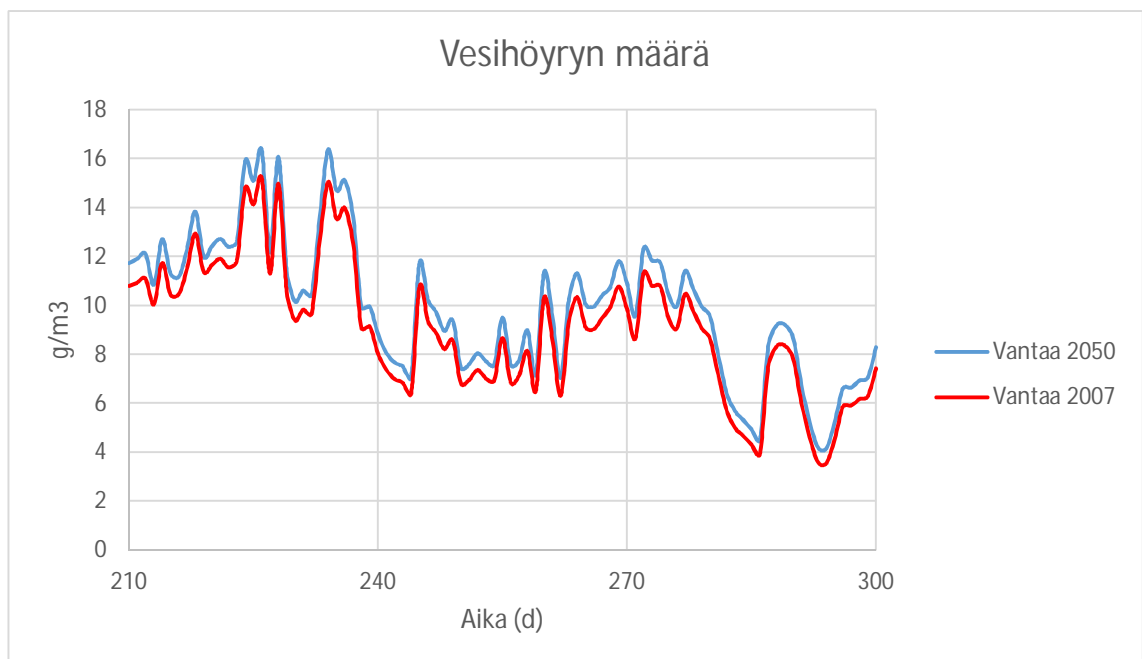
Kuva 23. RH_{crit} 2050 –ilmastossa.

Kun vertaillaan tuloksia 2007 ja 2050 -ilmaston välillä, pisteessä 1 suhteellisen kosteuden arvot muuttuvat 0,8–3,3 prosenttiyksikköä kuitenkin siten, että ainoastaan kahtena päivänä arvot laskevat ja muuna aikana kasvavat. Vesihöyrymäärässä kasvua tapahtuu koko tarkastelujakson aikana 0,6–1,3 g/m³. Suhteellisen kosteuden arvot 2007-ilmastossa menevät RH_{crit} -käyrän yläpuolelle 19 kertaa eli 21 % arvoista tarkastelujakson aikana. 2050-ilmastossa 26 pistettä eli 29 % arvoista on RH_{crit} -käyrän yläpuolella. Kasvua on 37 prosenttia.

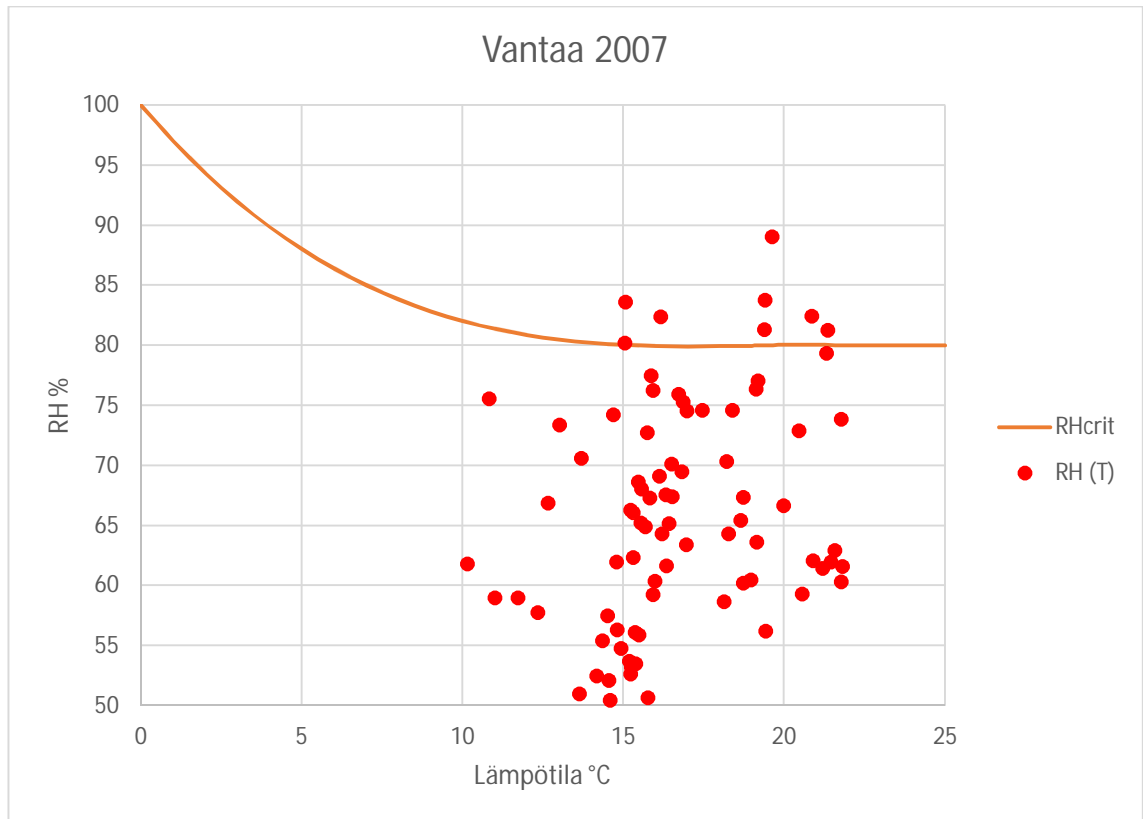
Kuvissa 26–29 esitetään vastaavat arvot mittauspisteessä 2.



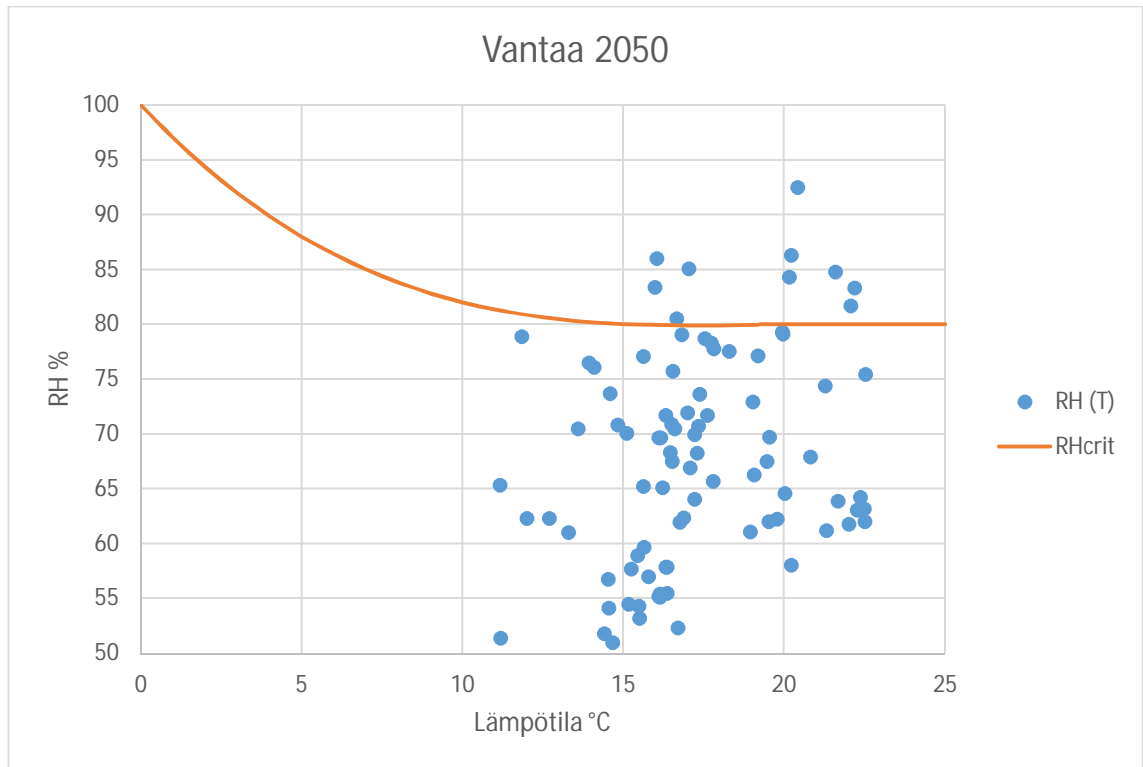
Kuva 24. Suhteellinen kosteus pisteessä 2.



Kuva 25. Vesihöyryn määrä pisteessä 2.



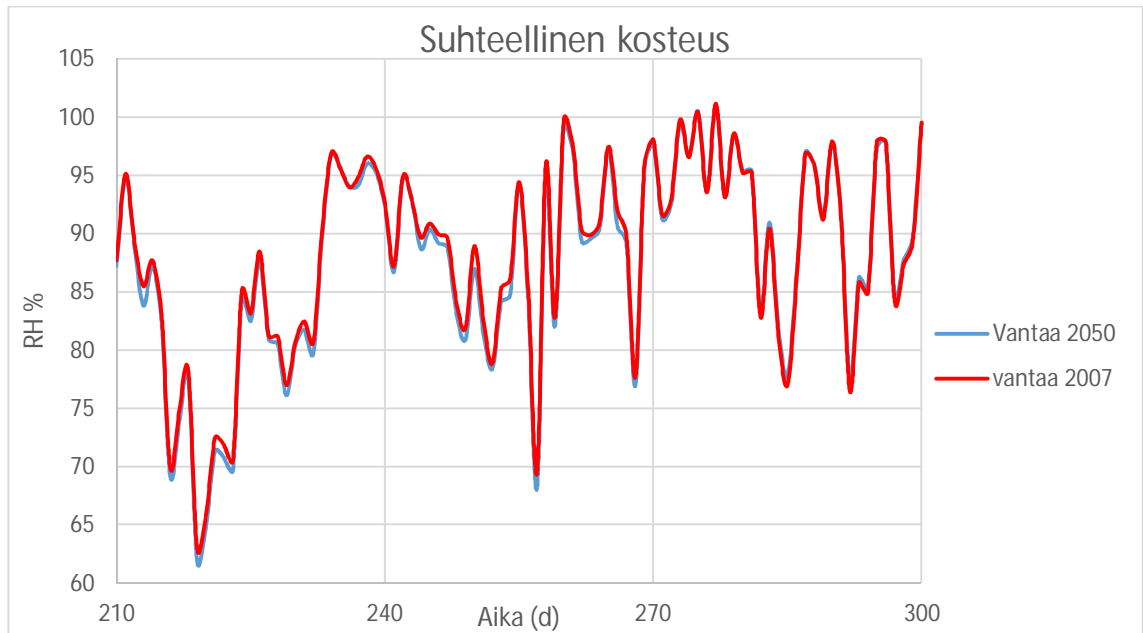
Kuva 26. RH_{crit} 2007-ilmastossa



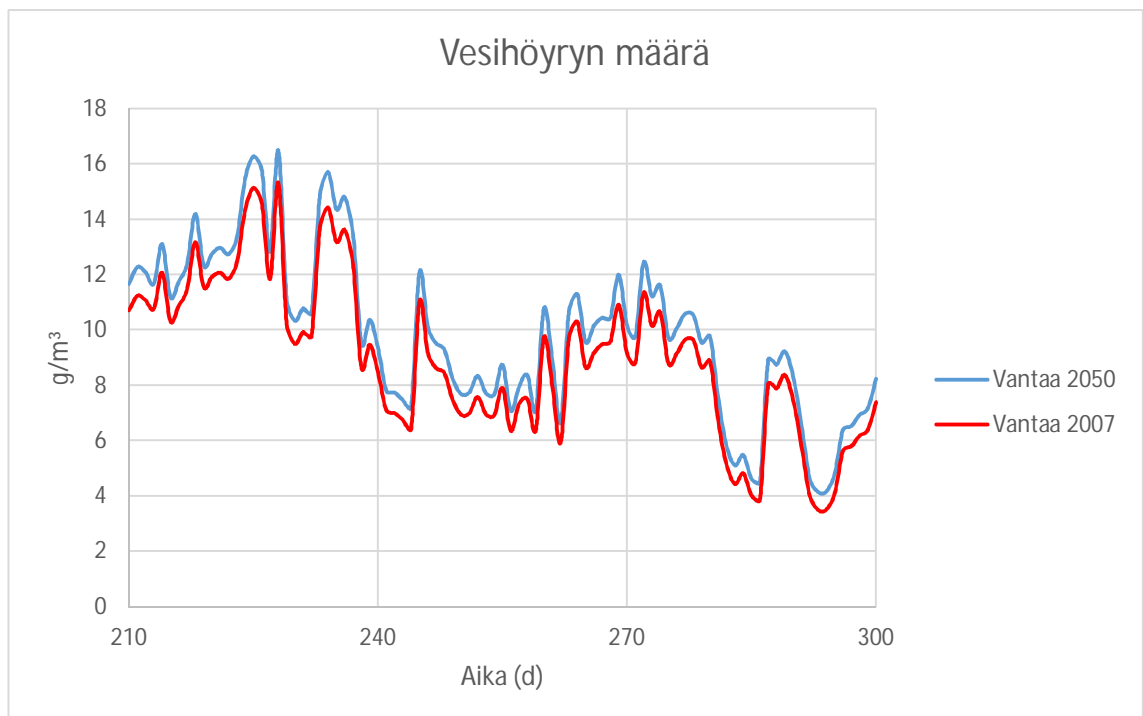
Kuva 27. RH_{crit} 2050-ilmastossa.

Tarkastelupisteessä 2 suhteellinen kosteus nousee 2050-ilmastossa 0,3–3,7 prosenttiyksikköä ja vesihöyrymäärä kasvaa 0,6–1,3 g/m³. Suhteellisen kosteuden arvoja 2007-ilmastossa RH_{crit} -käyrän yläpuolella on yhdeksän kappaletta ja 2050-ilmastossa 12 kappaletta, kasvua 30 %.

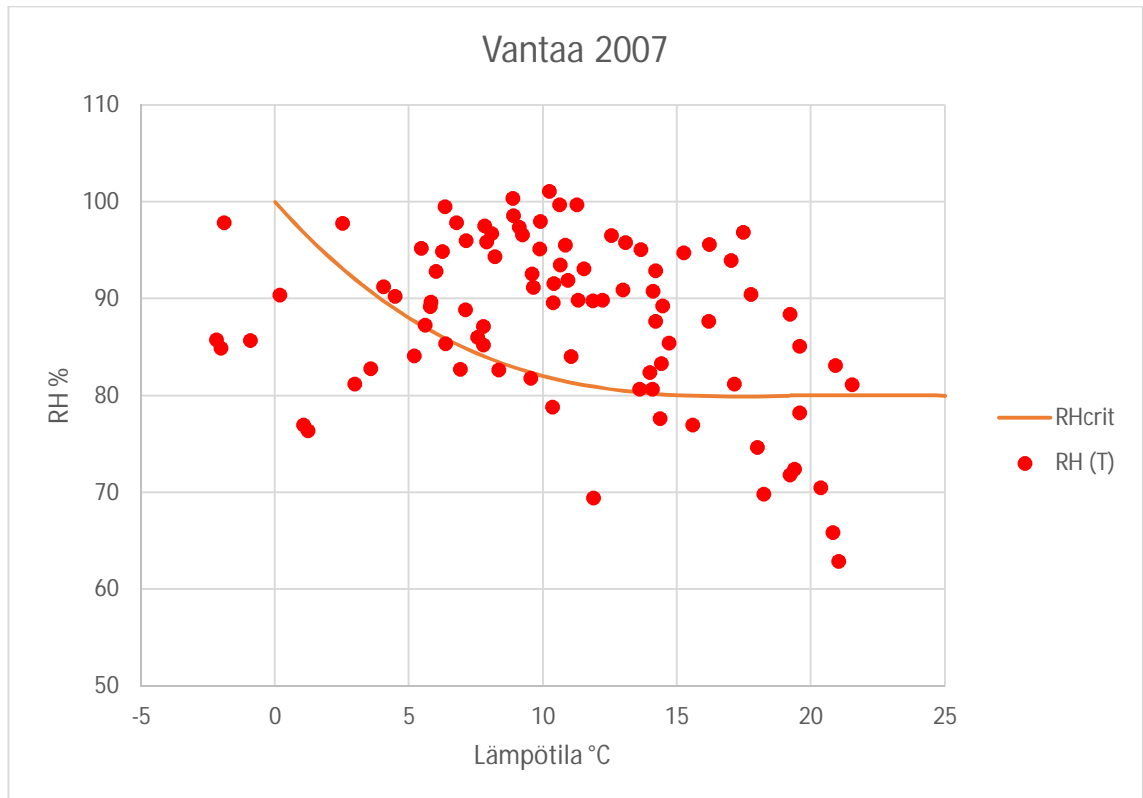
Kuvissa 30–33 esitetään tarkastelupisteessä 3 saadut tulokset.



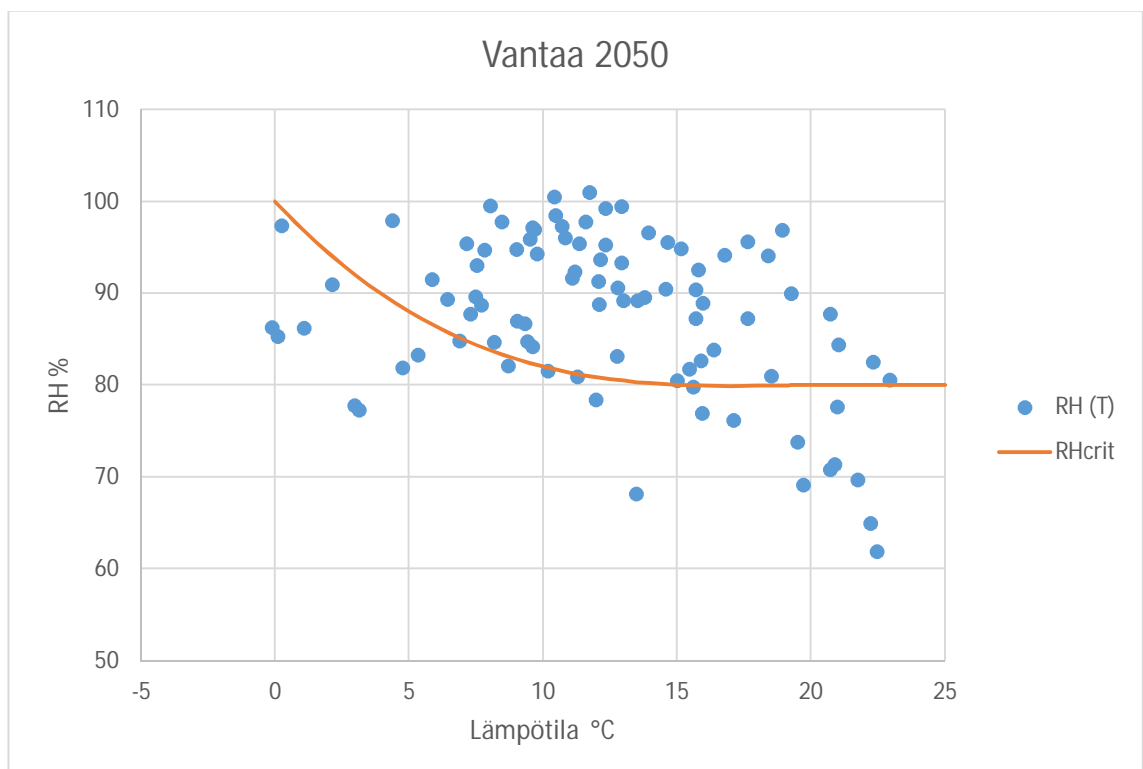
Kuva 28. Suhteellinen kosteus pisteessä 3.



Kuva 29. Vesihöyryn määrä pisteessä 3.



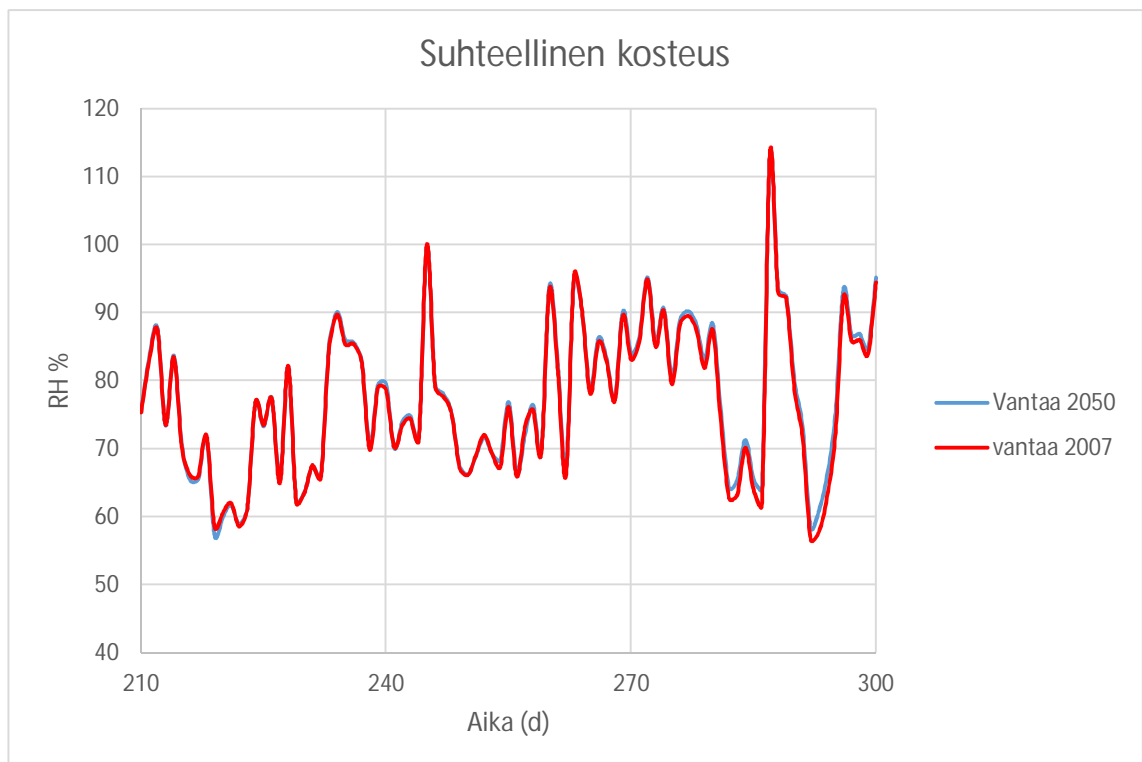
Kuva 30. RH_{crit} 2007-ilmastossa.



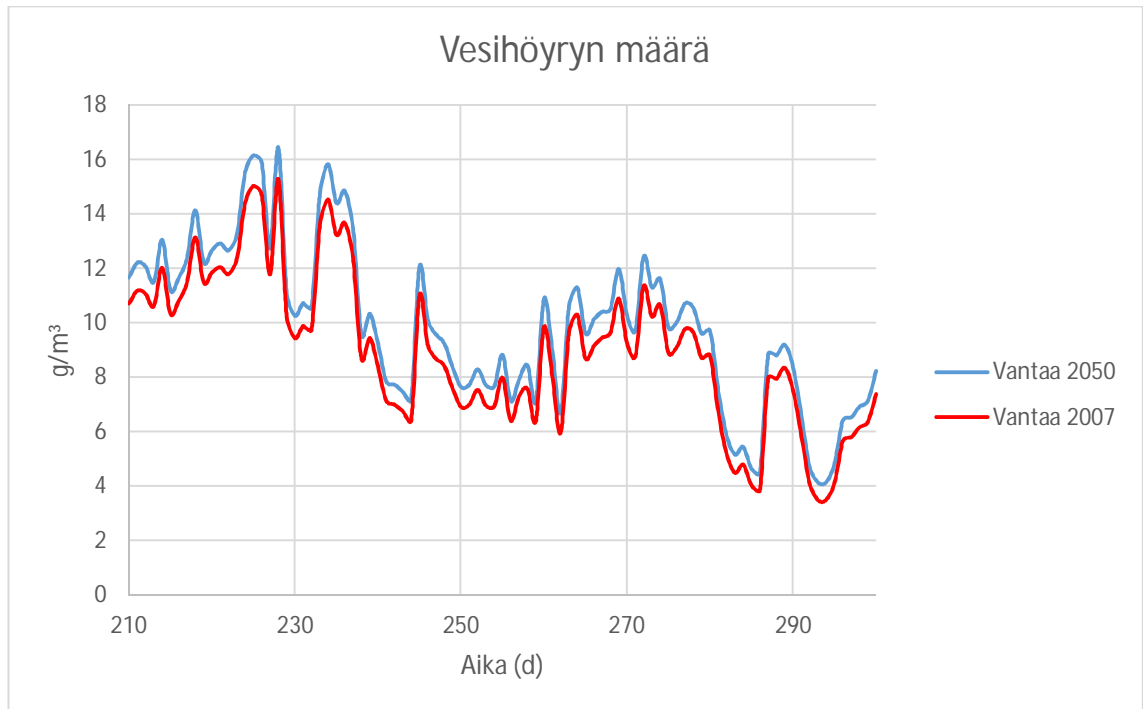
Kuva 31. RH_{crit} 2050-ilmastossa.

Vesihöyryn määrä kasvaa 0,6–1,3 g/m³ mentäessä 2007-ilmastosta 2050-ilmastoon. Myös rakenteen lämpötila nousee, joten suhteellisessa kosteudessa ei tapahdu juurikaan muutoksia. Tarkastelupiste on rappauseristeiden pinnassa, joten suhteellinen kosteus on korkealla suuren osan vuodesta.

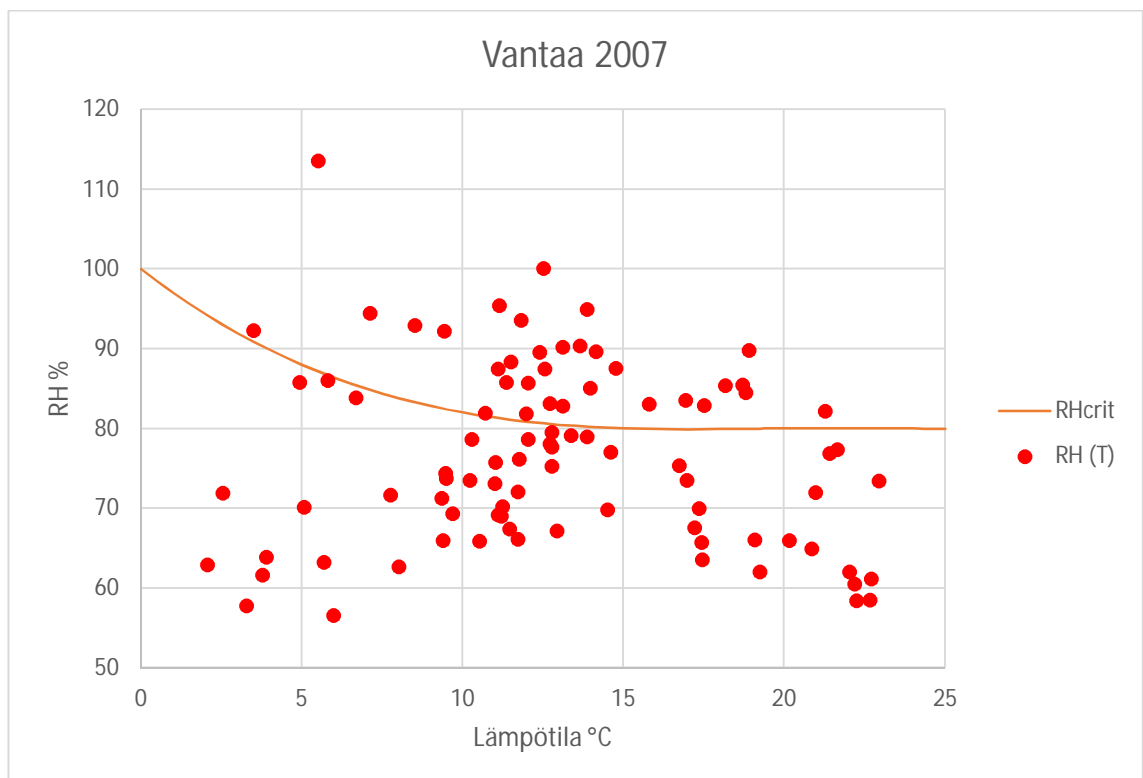
Kuvissa 34–37 esitetään tarkastelupisteessä 4 havaitut tulokset.



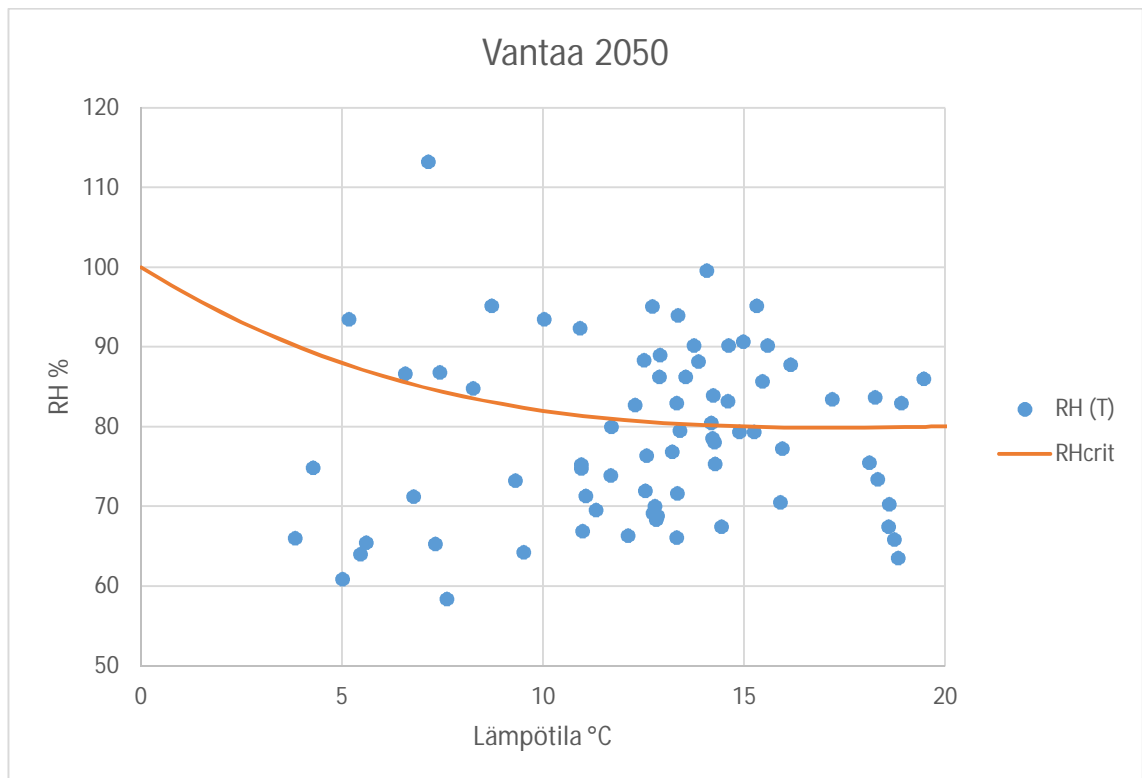
Kuva 32. Suhteellinen kosteus pisteessä 4.



Kuva 33. Vesihöyryn määrä pisteessä 4.



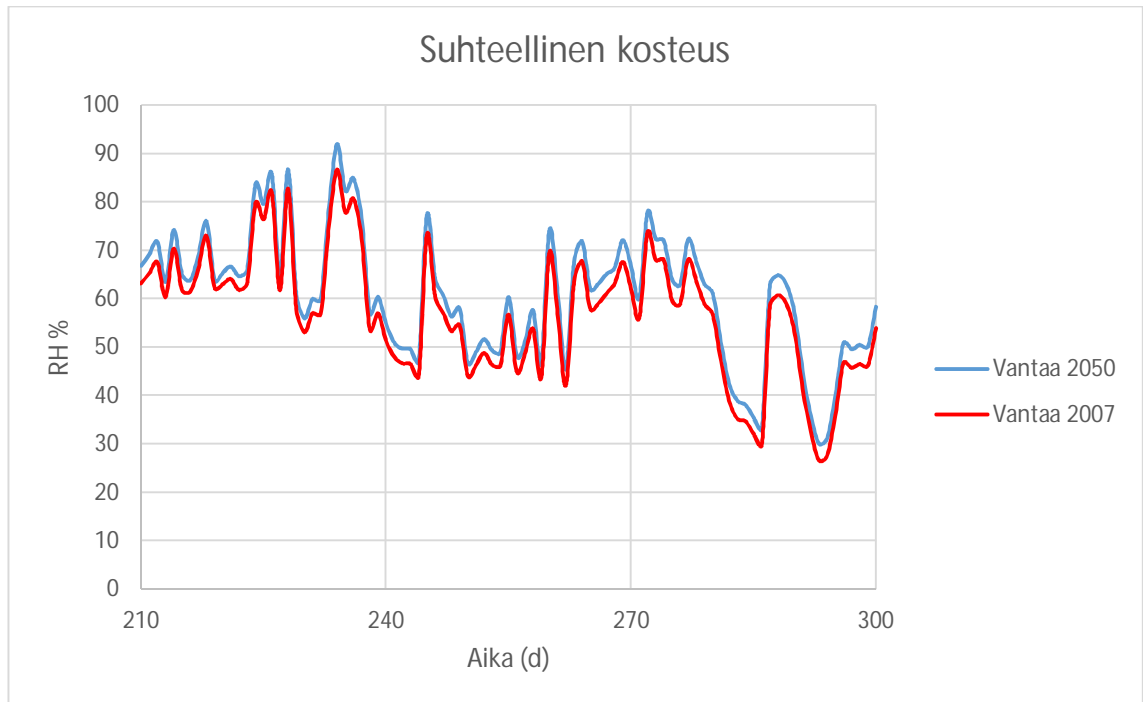
Kuva 34. RH_{crit} pisteessä 4.



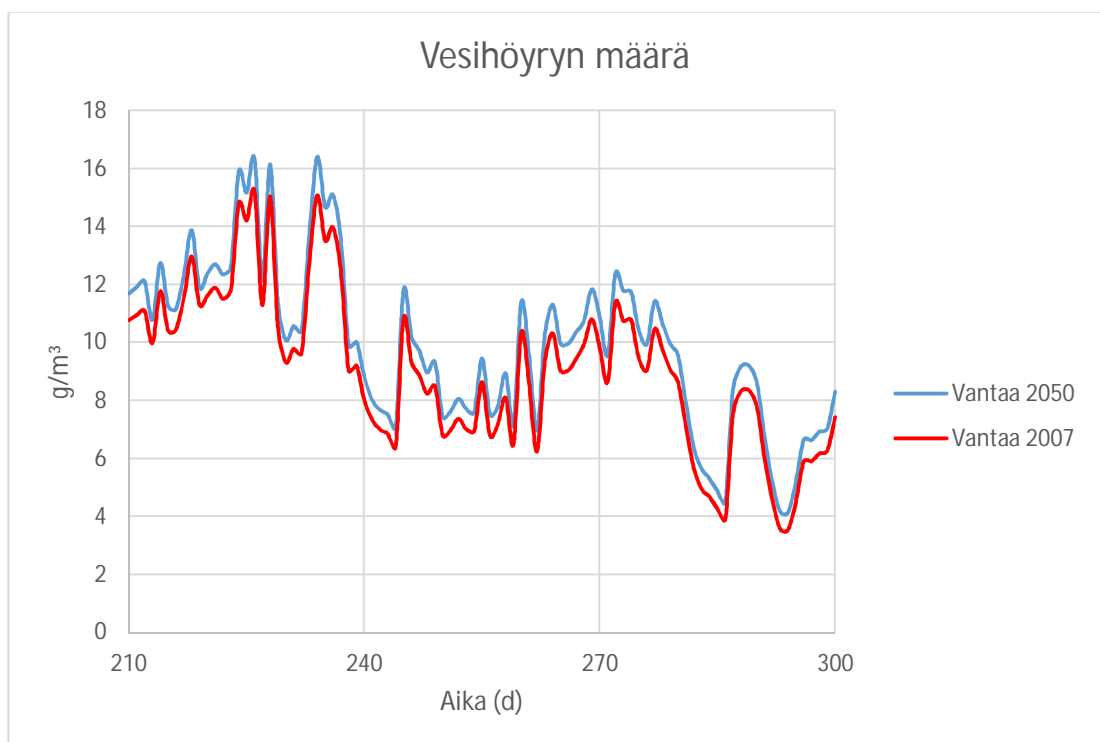
Kuva 35. RH_{crit} pisteessä 4.

Suhteellinen kosteus pisteessä 4 ei kasva juuri lainkaan. Vesihöyryn määrä kasvaa $0,6\text{--}1,3\text{ g/m}^3$. Lämpötila mittauspisteessä kasvaa myös, joten suhteellinen kosteus pysyy lähes ennallaan. RH_{crit} -käyrän yläpuolella olevat arvot kasvavat yhdellä kappaleella kolmen kuukauden tarkastelujakson aikana mentäessä 2050-ilmastoon, mutta kun tarkastellaan koko vuotta, niin lukumäärä kasvaa 72 kappaleesta 103 kappaleeseen. Kasvua on siis 43 %.

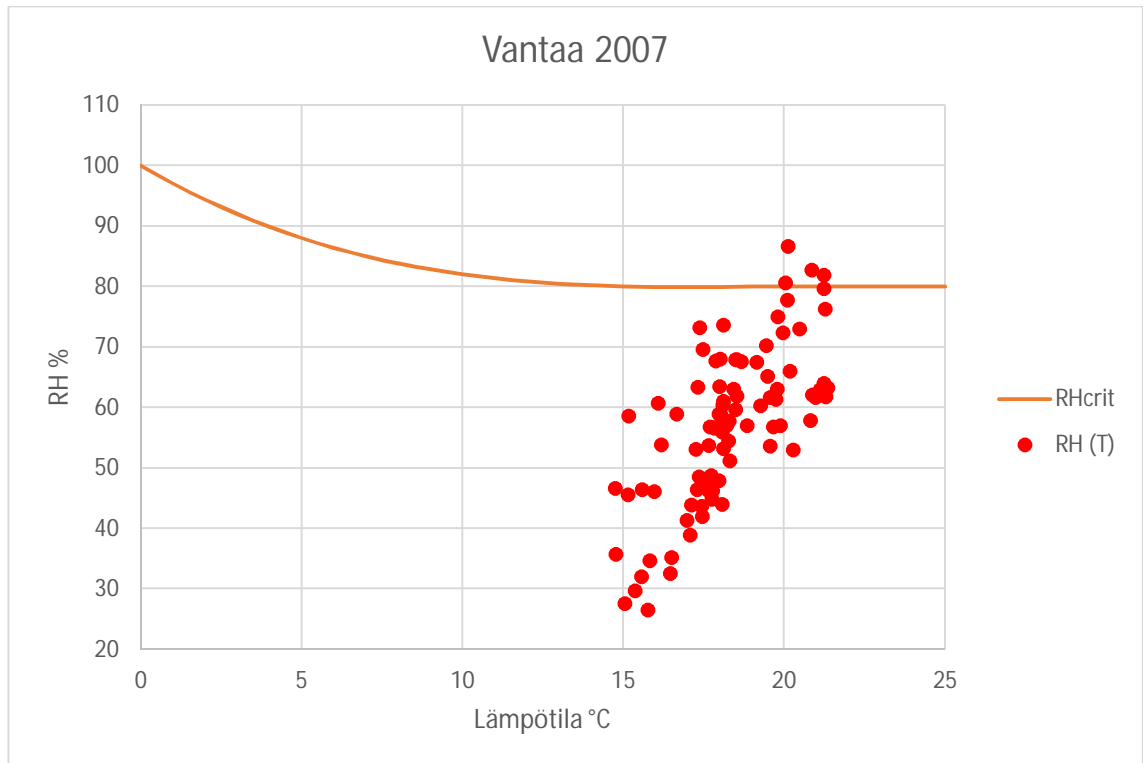
Kuvissa 38–41 esitetään mittauspisteessä 5 saadut tulokset.



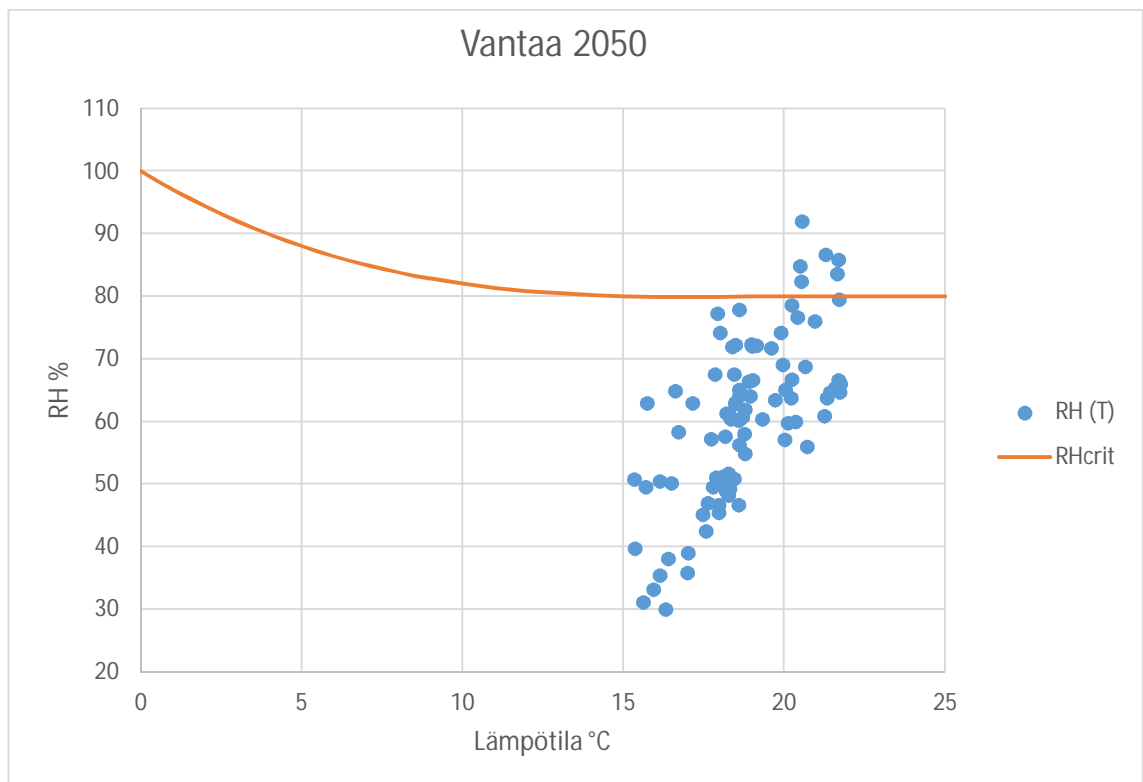
Kuva 36. Suhteellinen kosteus pisteessä 5.



Kuva 37. Vesihöyryn määrä pisteessä 5.



Kuva 38. RH_{crit} 2007-ilmastossa.



Kuva 39. RH_{crit} 2050-ilmastossa.

Vesihöyryn määrä tarkastelupisteessä 5 kasvaa 0,6–1,3 g/m³, ja suhteellinen kosteus kasvaa 1,6–5,3 prosenttiyksikköä. Arvot RH_{crit}-käyrän yläpuolella kasvavat viidestä seitsemään kolmen kuukauden tarkastelujakson aikana, ja kun tarkastellaan koko vuotta, niin arvot nousevat viidestä 11:een.

11 Tulosten yhteenveto

Comsolista saaduista tuloksista voi todeta, että rakenteen uloimmissa osissa - pisteissä 1,3 ja 4 - on korkeita suhteellisen kosteuden arvoja useina päivinä vuodessa. Pisteessä 3, joka on rappausvillan ulkopinnassa, suuri osa arvoista on RH_{crit}-käyrän yläpuolella. RH_{crit}-käyrä kuvaa suotuisia olosuhteita homeen kasvulle puupohjaisissa materiaaleissa. Home ei kuitenkaan kasva huokoisessa rappausvillassa niin helposti kuin puussa.

Tarkastelupisteissä kaksi ja viisi, olosuhteet ovat epäedullisia homeen kasvun kannalta. 2007-ilmastolla tehdyssä laskennassa suhteellisen kosteuden arvot eivät ylitä RH_{crit} käyrää kuin satunnaisesti. 2050-ilmastolla tehdyssä laskennassa suhteellisen kosteuden arvot RH_{crit} käyrän yläpuolella lisääntyvät, mutta eivät merkittävästi. Tehtyjen laskelmien mukaan voidaan osoittaa, että paksuja eristerokkoja käytettäessä, rakenteen uloimmissa osissa on korkeita suhteellisen kosteuden arvoja ja siten homeen kasvulle suotuisia olosuhteita.

Comsolilla ja Wufilla tehdyistä laskelmista voi todeta, että puurungon päälle tehty tuulettumaton eristerappaus ei ole riskitön rakenne. Jo nykyisessä ilmastossa rakenteen uloimmissa puuosissa on homeen kasvulle suotuisia olosuhteita, ja kun tarkastellaan rakennetta vuoden 2050 ilmastotiedoilla laskettuihin tuloksiin, niin olosuhteet homeen kasvulle tulevat entistä suotuisemmiksi.

Tällaiset rakenteet tulisi toteuttaa levyrapattuna siten, että rappauksen ja varsinaisen seinärakenteen väliin jää ulkoilmaan avoin tuuletusrako. Tällä tavalla

toteutetussa rakenteessa viistosade ei pääse rasittamaan varsinaisia runkorakenteita ja kosteus pääsee poistumaan rakenteista tuuletusraon kautta ulkoilmaan.

Wufi ja Comsol laskennoista saatujen tulosten erot johtuvat erilaisesta mallinnustavasta. Wufissa otetaan tarkemmin huomioon rakennusmateriaalien ominaisuudet kosteuden siirtymistä tarkasteltaessa. Comsol mallissa tarkasteltiin kosteuden siirtymistä vain diffuusion avulla ja rakennusmateriaaleille määriteltiin tarkasteluun ainoastaan vesihöyrynläpäisevyys. Tämän takia Wufilla saadaan ilman viistosaderasitusta pienemmät suhteellisen kosteuden arvot rakenteeseen, kuin Comsolilla tehdyssä laskennassa.

Kun Wufilla tehtyyn malliin lisättiin viistosaderasitus, laskennassa saatiin huomattavasti korkeammat suhteellisen kosteuden arvot rakenteessa, kuin Comsol mallissa. Tämä johtuu siitä, että Comsol mallissa ei ollut mukana viistosaderasitusta. Wufista saaduista tuloksista näkee myös sen miten suuren kosteusrasituksen viistosade aiheuttaa rakenteelle. Laskennassa tehdään myös se oletus että rappauspinta on ehjä. Rakenteessa on kuitenkin aina epätiivelyskohtia, joiden kautta sadevesi pääsee rakenteeseen ja aiheuttaa suurempaa kosteusrasitusta.

Tässä opinnäytetyössä tarkemmat tulokset kosteuden osalta on saatu Wufilla tehdyistä laskelmista. Comsolilla kuitenkin saatiin mallinnettua tarkasti seinärakenne 3D:ssä ja tarkasteltua rakenteen lämpötilamuutoksia, ja kosteuden osalta rakenteesta löydettiin kriittiset kohdat, mitä tulisi tarkastella tarkemmin. Näihin kriittisiin kohtiin rakennetta voisi esimerkiksi asentaa langattomia kosteusantureita ja seurata rakenteen toimivuutta, sekä verrata mitattuja ja laskettuja tietoja toisiinsa ja näin arvioida myös laskennallisten tulosten tarkkuutta.

Lähiökerrostalojen ulkoseinärakenteissa on paljon ongelmia ja näiden kiinteistöjen saneerauksessa on valtavasti työtä. TES-menetelmä vaikuttaa todella mielenkiintoiselta ja toimivalta ratkaisulta kiinteistöjen saneeraukseen. Hyvällä suunnittelulla ja toteutuksella työmaan läpimenoaika saadaan varsin lyhyeksi ja asukkaille koitua haitta minimoitua.

Puun käyttöä tulisi lisätä korjaus- ja uudisrakentamisessa. Puu on ekologinen materiaali ja sen käyttö pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä. Puun käytön lisäämisellä voidaan luoda valtavasti lisää työpaikkoja koko puunjalostusketjuun. Kannattaa kuitenkin miettiä onko kerrostaloista järkevää tehdä passiivitaloja. Eristepaksuuden kasvattaminen puisissa seinärakenteissa tuo merkittäviä riskejä rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Tulee myös miettiä kuinka pitkä takaisinmaksuaika saneeraukselle hyväksytään.

12 Pohdinta

Rakennusfysikaalinen simulointi on valtavan mielenkiintoista ja haasteellista. Voin todeta, että noin 80 % opinnäytetyön tekemiseen käytetystä ajasta syvenyin Comsol Multiphysics –ohjelmiston käyttöön. Itse geometrian luonti ohjelmalla on suhteellisen yksinkertaista, mutta se, että sain malliin kaikki tarvittavat parametrit ja materiaaliominaisuudet määritellyiksi riittävän oikeiksi, oli kohtuullisen haastavaa. Mallin laskenta-ajat ovat myös verrattain pitkiä. Vuoden mallin laskentaan meni aikaa noin 60 tuntia.

Koska Comsol mallissa tarkastellaan kosteuden siirtymistä vain diffuusion avulla, on hyvin ilmeistä, että tulokset eivät vastaa täysin todellisuutta, ja siksi niihin kannattaa suhtautua kriittisesti. Kosteushan siirtyy rakenteessa myös konvektiolla ja kapillaarisesti. Lisäksi rakenteessa voi olla myös vapaata vettä ja jäätä, ja vapaa vesi siirtyy rakenteessa painovoimaisesti. Paksussa yhtenäisessä eristerakroksessa tapahtuu myös luonnollista konvektiota, joka voi kerryttää kosteutta rakenteen alaosiin. Tosin kaikkien näiden mallintaminen ei simulointiohjelmillaan vielä onnistu. Kaikki materiaaliominaisuudet tulisi syöttää lämpötilan ja kosteuden funktiona, ja viistosaderasitus sekä auringon säteily tulisi myös sisällyttää malliin. Opinnäytetyöhön käytettävä aika on kuitenkin hyvin rajallinen ja tuntui järkevältä pitää malli yksinkertaisena. Toivottavasti palaan vielä tähän aiheeseen.

Comsol-ohjelmiston käyttö olisi huomattavasti helpompaa, jos siihen olisi saatavilla yhtä laaja materiaalitietopankki, kuin esimerkiksi Wufissa. Opinnäytetyöhön varattuun aikaan verrattuna tuntui liian suurelta työltä alkaa itse määrittelemään kaikkia tarvittavia materiaaliparametreja ohjelmaan.

Uskon, että tulevaisuudessa rakennusfysikaalinen simulointi yleistyy huomattavasti. Markkinoille tulee jatkuvasti uusia rakennusmateriaaleja ja -menetelmiä. Ilmastonmuutos tulee ottaa huomioon rakentamisessa: Ilmasto lämpenee, sademäärä lisääntyy ja olosuhteet rakenteiden kuivumiselle heikkenevät. Simuloimalla riittävän tarkasti rakenteita ja ottamalla huomioon tulevat ilmasto-olosuhteet, voidaan välttyä virheellisiltä ja toimimattomilta rakenteilta.

Lähteet

1. Tolppanen, J., Karjalainen, M., Lahtela, T. & Viljakainen, M. 2013. Suomalainen puukerrostalo. Tampere: Opetushallitus.
2. Mäkiö, E. Kerrostalot 1960-1975
3. Lahdensivu, J & Köliö, A. BEKO-tutkimus, artikkelisarja 7. Kiinteistöposti Professional 2010 s.36-38
4. Suomen Betoniyhdistys ry. 2013. BY 42 betonijulkisivun kuntotutkimus 2013. Vantaa. BY-koulutus Oy
5. Lahdensivu, J. BEKO-tutkimus, artikkelisarja 2. Kiinteistöposti 3/2010. s. 51-53
6. Teknillinen korkeakoulu. 2009. TES Energy Facade. Energiatohokkuuden parantaminen puurunkoisilla ja esivalmistetuilla julkisivuelementeillä. http://www.tesenergyfacade.com/downloads/tkk_tes_loppuraportti_2009.pdf 29.4.2015.
7. Lylykangas, K. 2011. Passiivikorjaus esivalmistetuilla julkisivuelementeillä. <http://www.paroc.fi/kampanjat/~media/Images/Campaigns/Paroc%20Innova/Passiivikorjaus%20esivalmistetuilla%20julkisivuelementeill%C3%A4.ashx>. 4.5.2015
8. Holopainen, R. & Nieminen, J. 2014. Innova, kerrostalosta passiivitaloksi. VTT. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T193.pdf> 29.4.2015
9. Paroc Oy Ab. 2012. Esivalmistukseen perustuva saneeraus passiivitaloksi. <http://www.paroc.fi/~media/Files/Brochures/Finland/Paroc-Innova-FI.ashx> 29.4.2015
10. RIL ry. 2014. 255-1 Rakennusfysiikka 1-Rakennusfysiikkaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki. RIL ry
11. Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka Perusteet ja sovelluksia. Tampere. 2014.
12. Mölsä, S. Tuulettumaton eristerappaus on homepommi? Rakennuslehti 10/2013. s.8
13. TTY. 2013. Rakennusfysiikka 2013. Tampere.
14. TTY Laitosraportti. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>. 4.5.2015
15. http://www.wufi.de/index_e.html. 10.5.2015.
16. Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. A Mathematical model of Mold Growth on Wooden material. Wood Science and Technology, Vol. 33, p

Comsol Multiphysics-ohjelmistossa käytetyt materiaalit ja niiden ominaisuudet

Ohutrappaus

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Tiheys	ρ [kg/m ³]	1900
Ominaislämpökapasiteetti	c_p [J/kgK]	1000
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	1
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$0.5 \cdot 10^{-6}$

Eriste

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Tiheys	ρ [kg/m ³]	30
Ominaislämpökapasiteetti	c_p [J/kgK]	850
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	0.037
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$22.6 \cdot 10^{-6}$

aquapanel

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Tiheys	ρ [kg/m ³]	1650
Ominaislämpökapasiteetti	c_p [J/kgK]	850
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	0.3
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$1 \cdot 10^{-6}$

Runkopuu

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Tiheys	ρ [kg/m ³]	450
Ominaislämpökapasiteetti	c_p [J/kgK]	1600
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	0.12
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$0.07 \cdot 10^{-6}$

vaneri

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Tiheys	ρ [kg/m ³]	400
Ominaislämpökapasiteetti	c_p [J/kgK]	1600
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	0.12
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$0.1 \cdot 10^{-6}$

betoni

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Tiheys	ρ [kg/m ³]	2300
Ominaislämpökapasiteetti	c_p [J/kgK]	880
Lämmönjohtavuus	λ [W/(mK)]	1.8
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$0.2 \cdot 10^{-6}$

tyvek kalvo

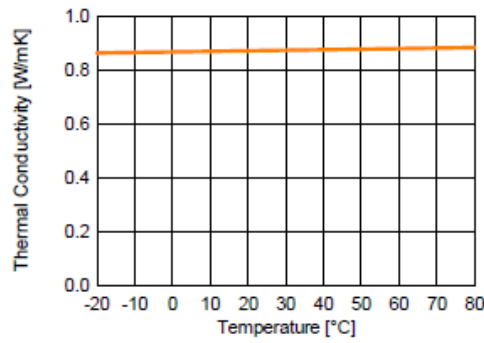
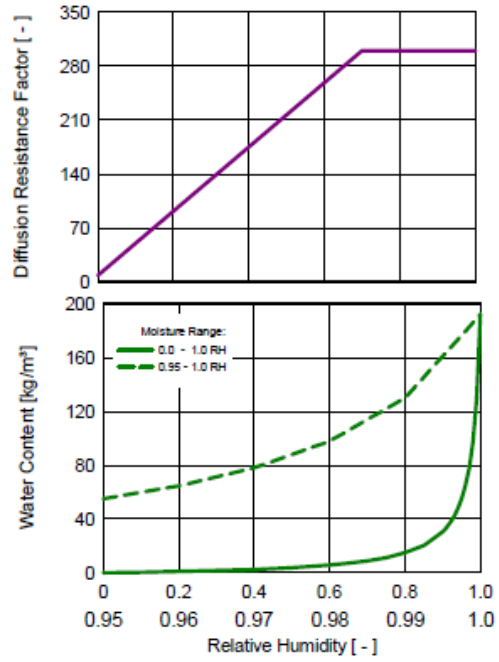
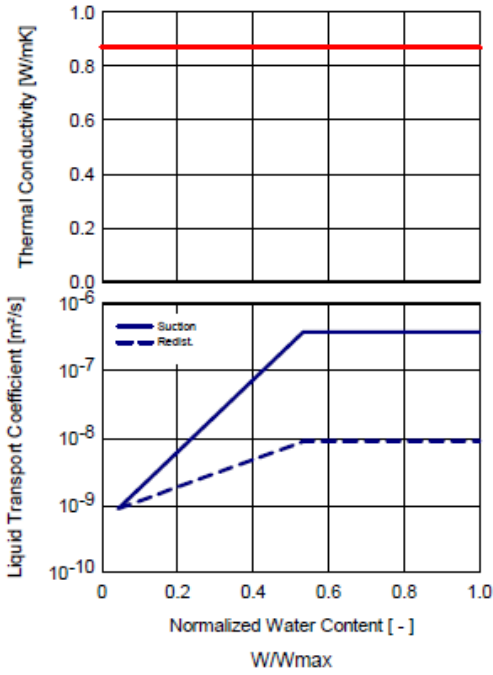
Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Arvo
Vesihöyrynvastus	δ [s/m ²]	$0.14 \cdot 10^{-6}$

WUFI® Pro 5.1

Material : Exterior Plaster A - layer 1 of 4 (exterior)

Checking Input Data

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m³]	1310,0
Porosity	[m³/m³]	0,36
Specific Heat Capacity, Dry	[J/kgK]	850,0
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/mK]	0,87
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	8,0
Reference Water Content	[kg/m³]	15,0
Free Water Saturation	[kg/m³]	192,0
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/mK²]	0,0002

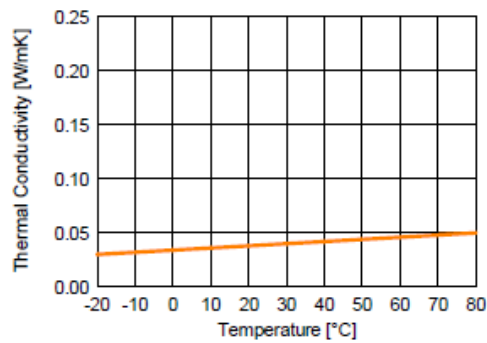
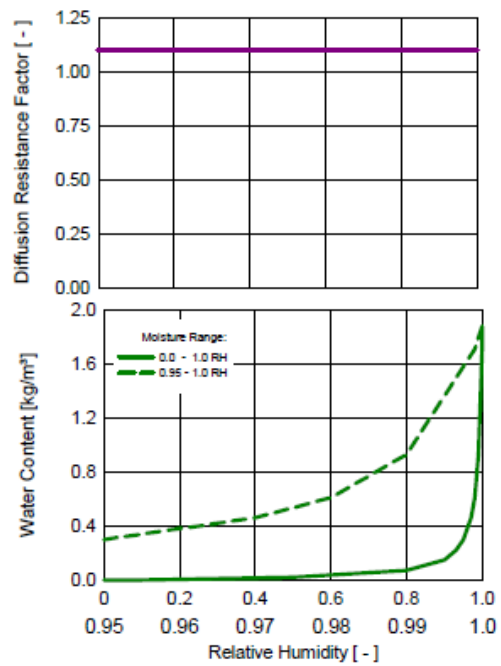
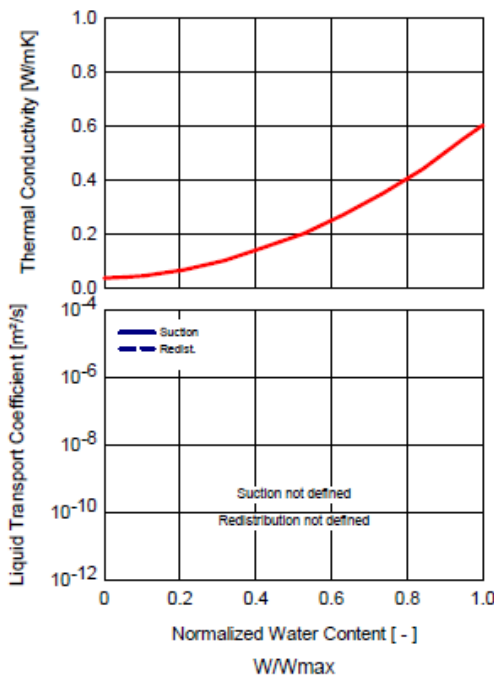


WUFI® Pro 5.1

Material : Roxul Plus

Checking Input Data

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m³]	30,0
Porosity	[m³/m³]	0,95
Specific Heat Capacity, Dry	[J/kgK]	850,0
Thermal Conductivity, Dry .10°C	[W/mK]	0,036
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	1,1
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/mK²]	0,0002

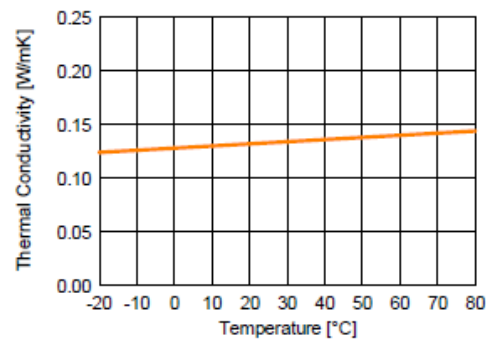
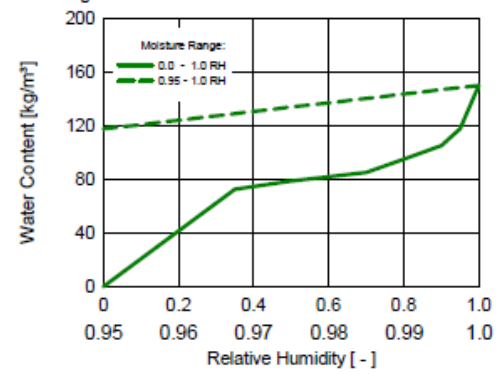
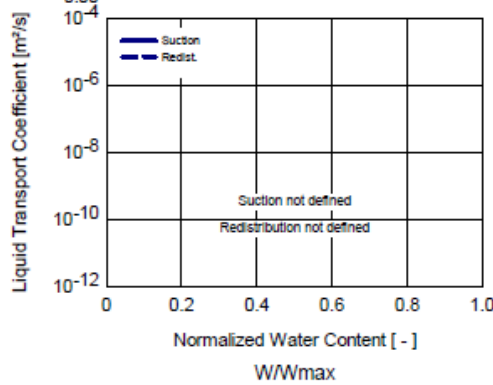
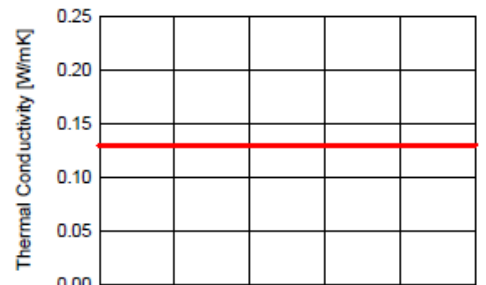


WUFI® Pro 5.1

Material : Fibrecementboard

Checking Input Data

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m ³]	1610,0
Porosity	[m ³ /m ³]	0,15
Specific Heat Capacity, Dry	[J/kgK]	850,0
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/mK]	0,13
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	83,3
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/mK ²]	0,0002

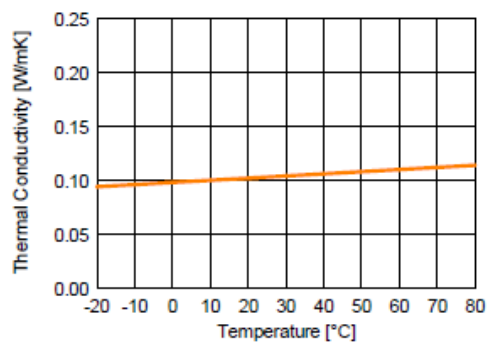
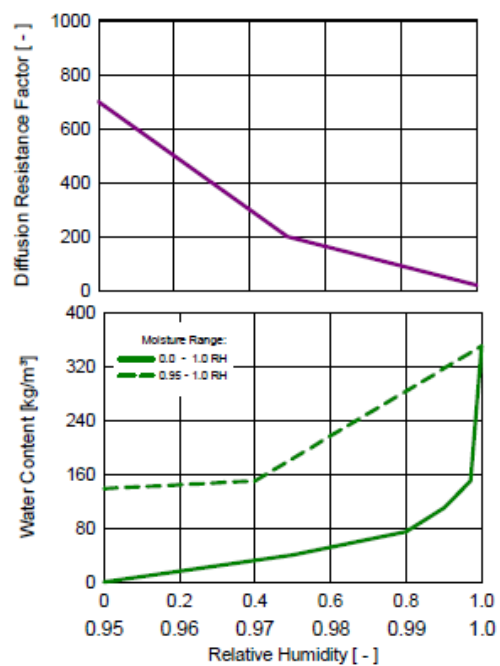
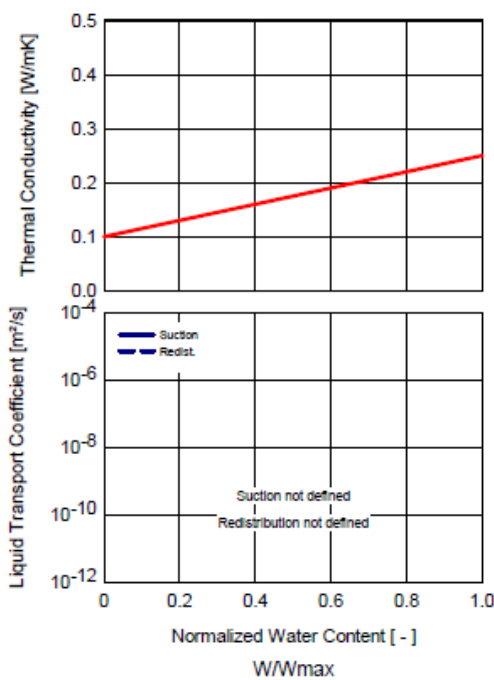


WUFI® Pro 5.1

Material : Plywood Board

Checking Input Data

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m ³]	500,0
Porosity	[m ³ /m ³]	0,5
Specific Heat Capacity, Dry	[J/kgK]	1500,0
Thermal Conductivity, Dry ,10°C	[W/mK]	0,1
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	700,0
Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement	[%/M,-%]	1,5
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/mK°]	0,0002

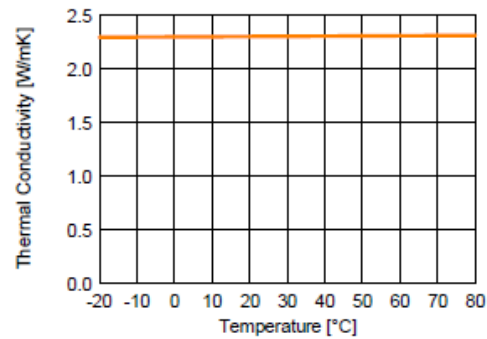
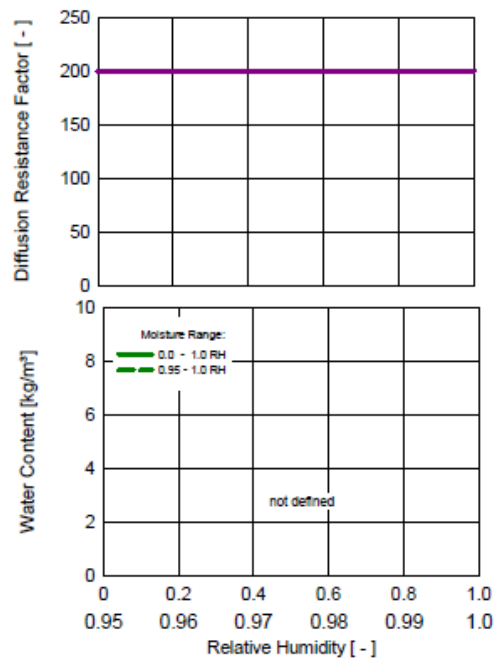
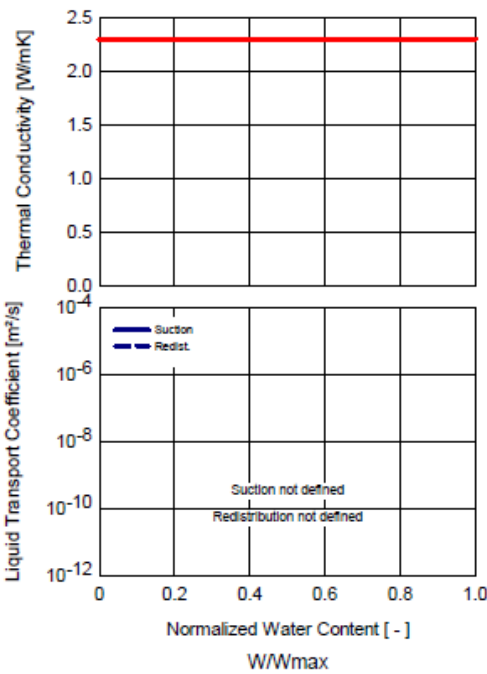


WUFI® Pro 5.1

Material : weather resistive barrier (sd=0,2m)

Checking Input Data

Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m³]	1300,0
Porosity	[m³/m³]	0,001
Specific Heat Capacity, Dry	[J/kgK]	2300,0
Thermal Conductivity, Dry, 10°C	[W/mK]	2,3
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	200,0
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/mK²]	0,0002

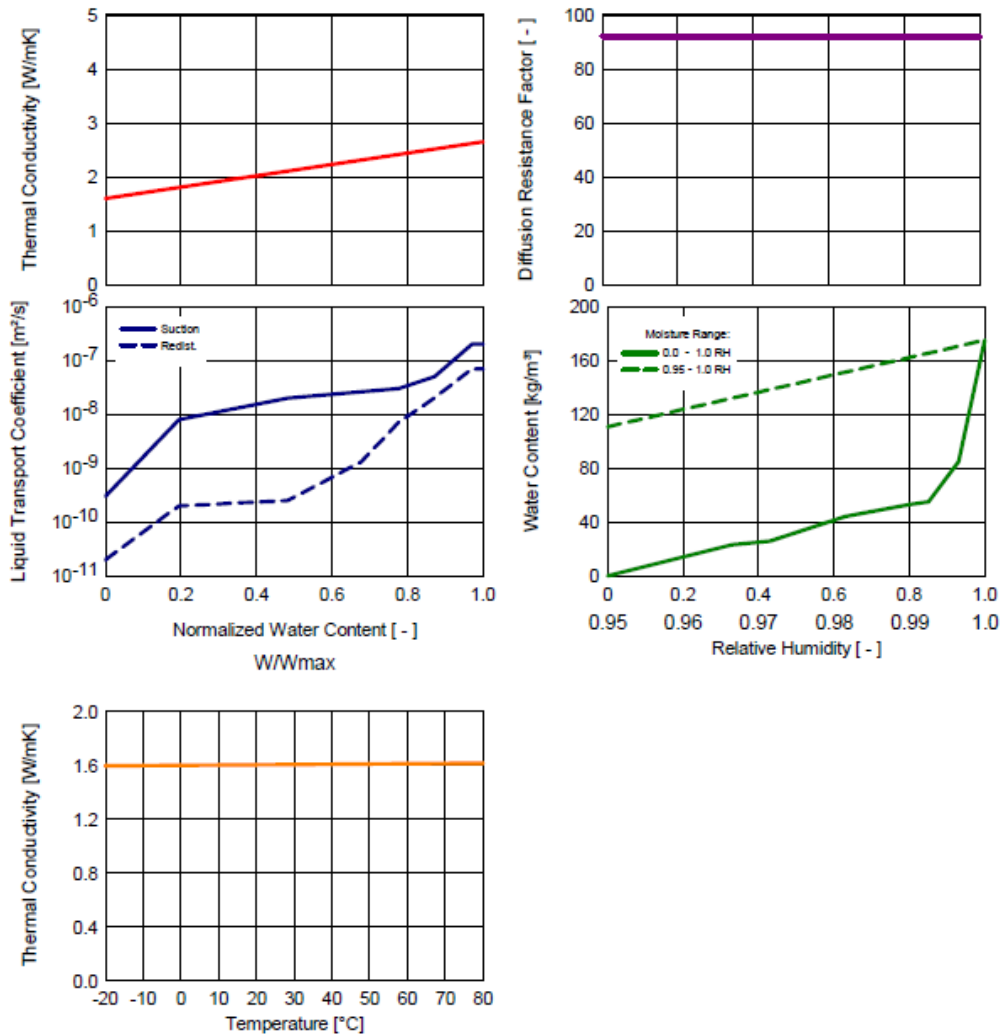


WUFI® Pro 5.1

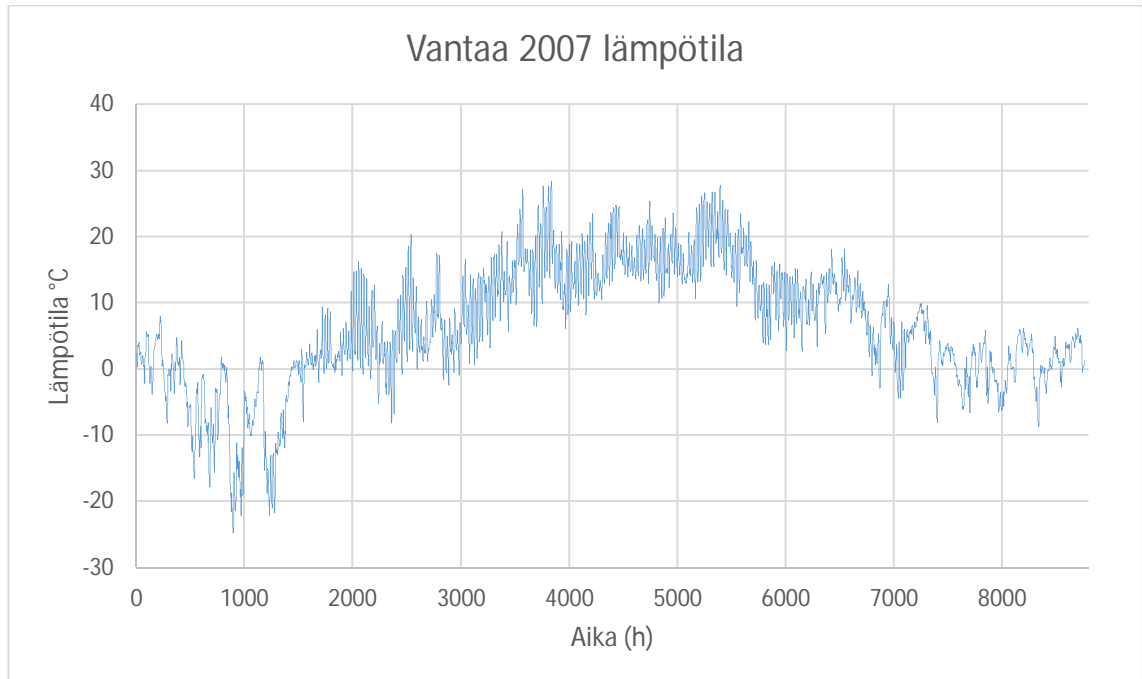
Material : Concrete, C12/15

Checking Input Data

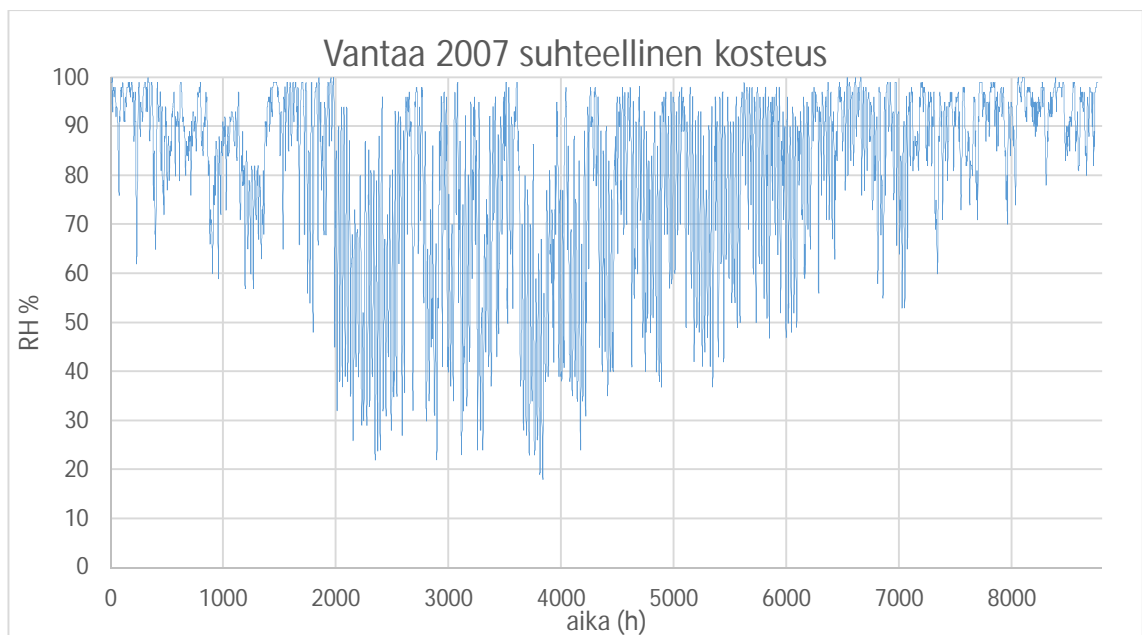
Property	Unit	Value
Bulk density	[kg/m³]	2200,0
Porosity	[m³/m³]	0,18
Specific Heat Capacity, Dry	[J/kgK]	850,0
Thermal Conductivity, Dry ,10°C	[W/mK]	1,6
Water Vapour Diffusion Resistance Factor	[-]	92,0
Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement	[%/M.-%]	8,0
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement	[W/mK²]	0,0002



Rakennusfysikaalinen testivuosi Vantaa 2007

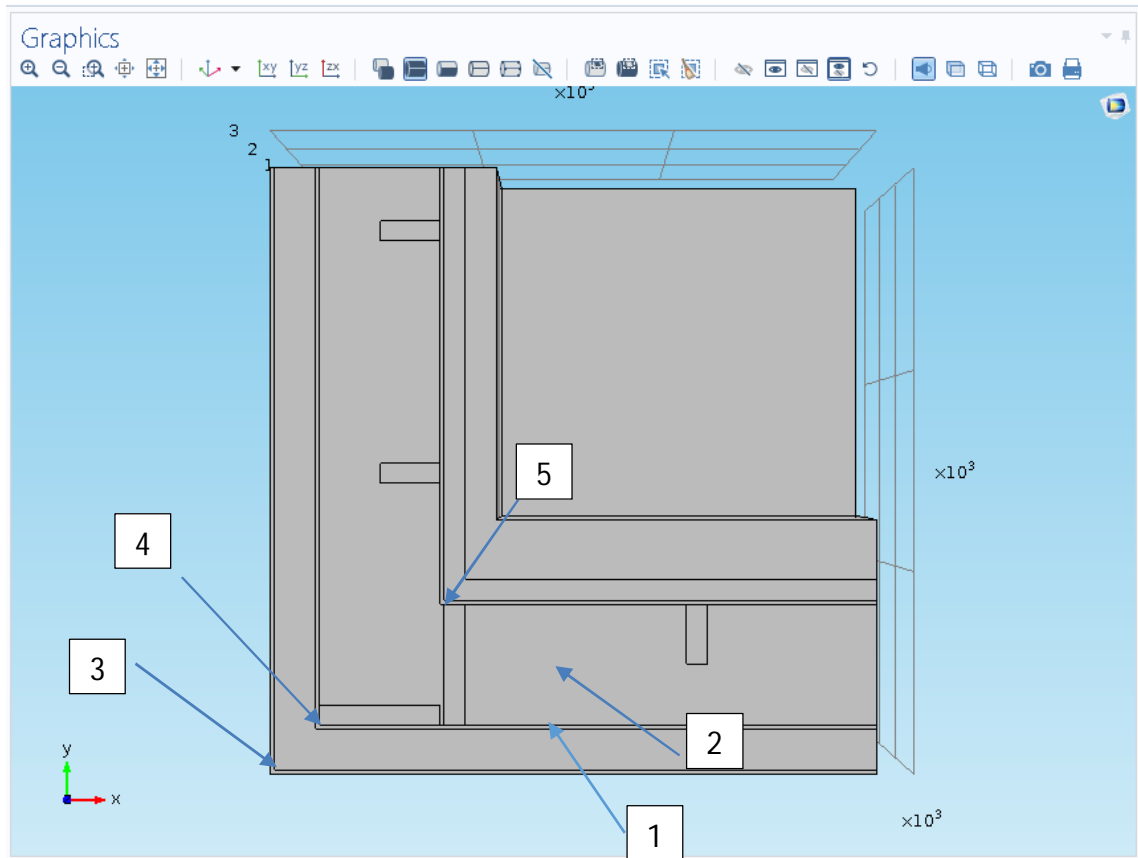


kuva 1 Lämpötila Vantaa 2007

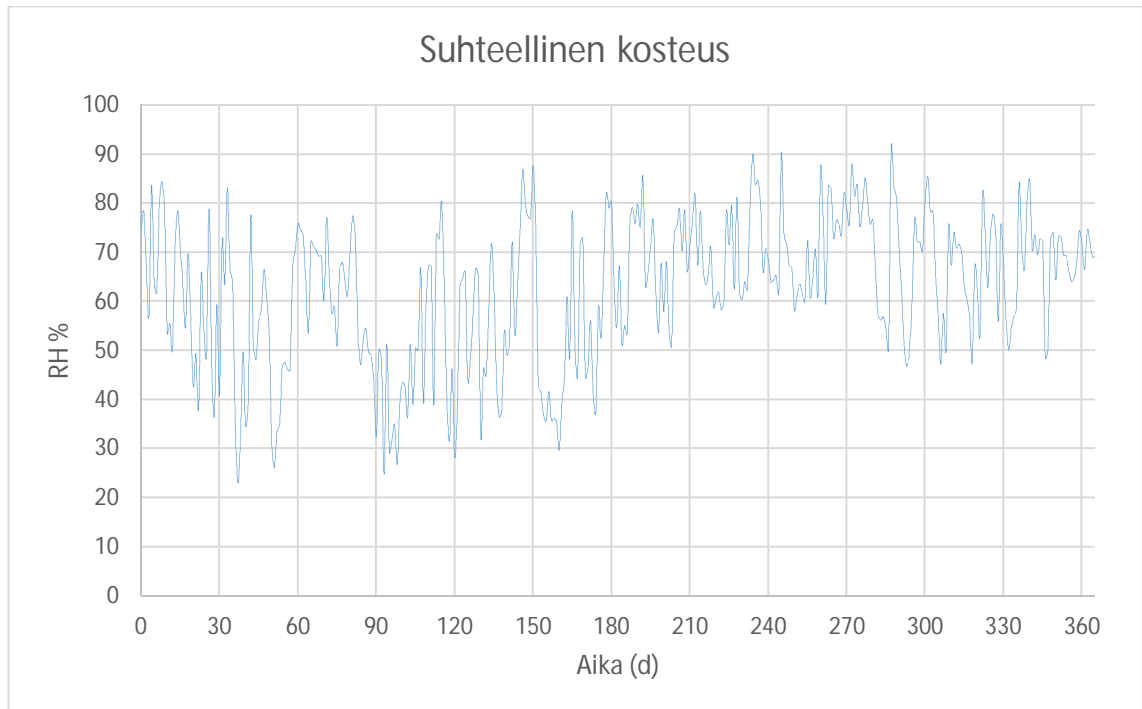


kuva 2 Suhteellinen ilmankosteus Vantaa 2007

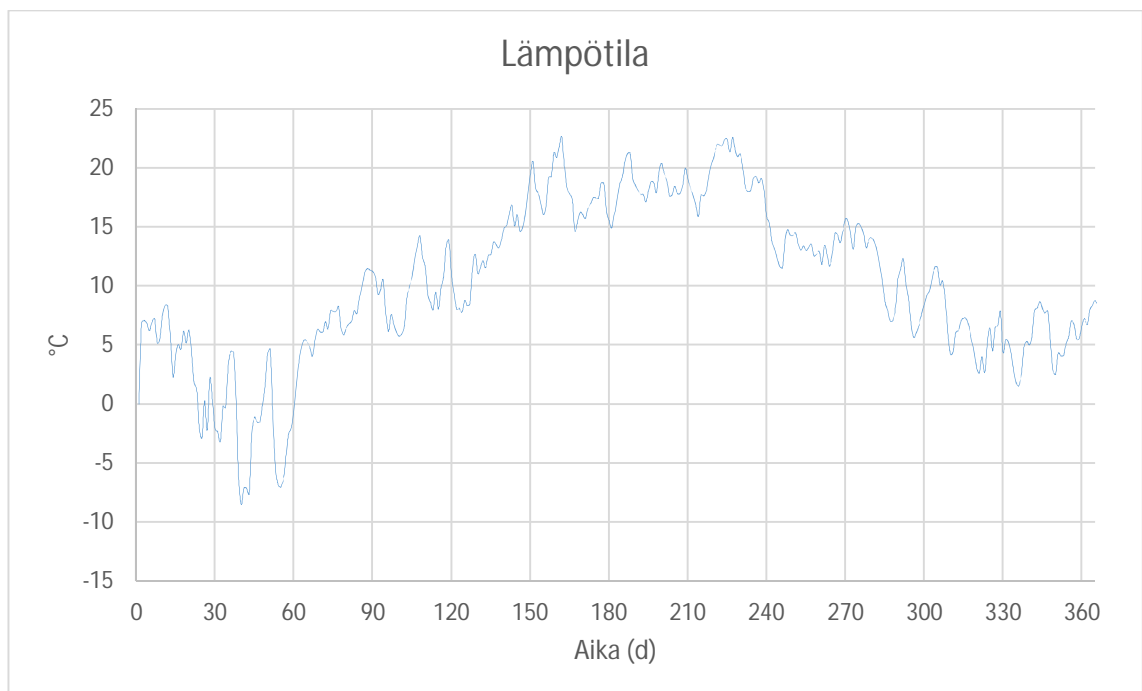
Pisteistä 1-5 saadut tulokset Vantaa 2007-ilmastossa taulukoituina



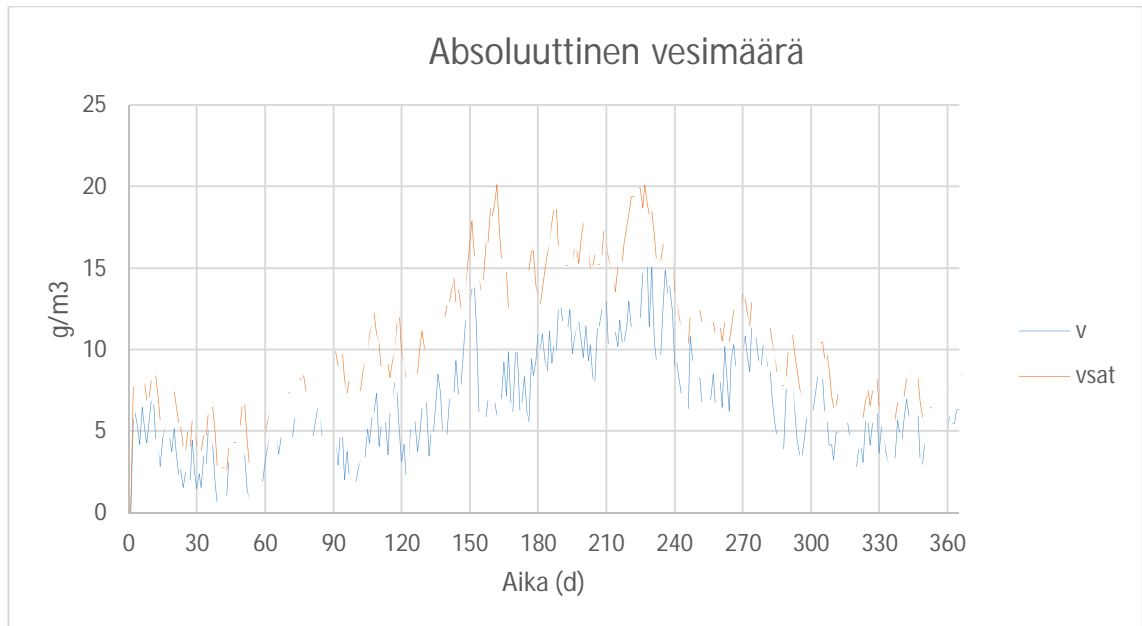
Kuva 3. Valitut tarkastelupisteet.



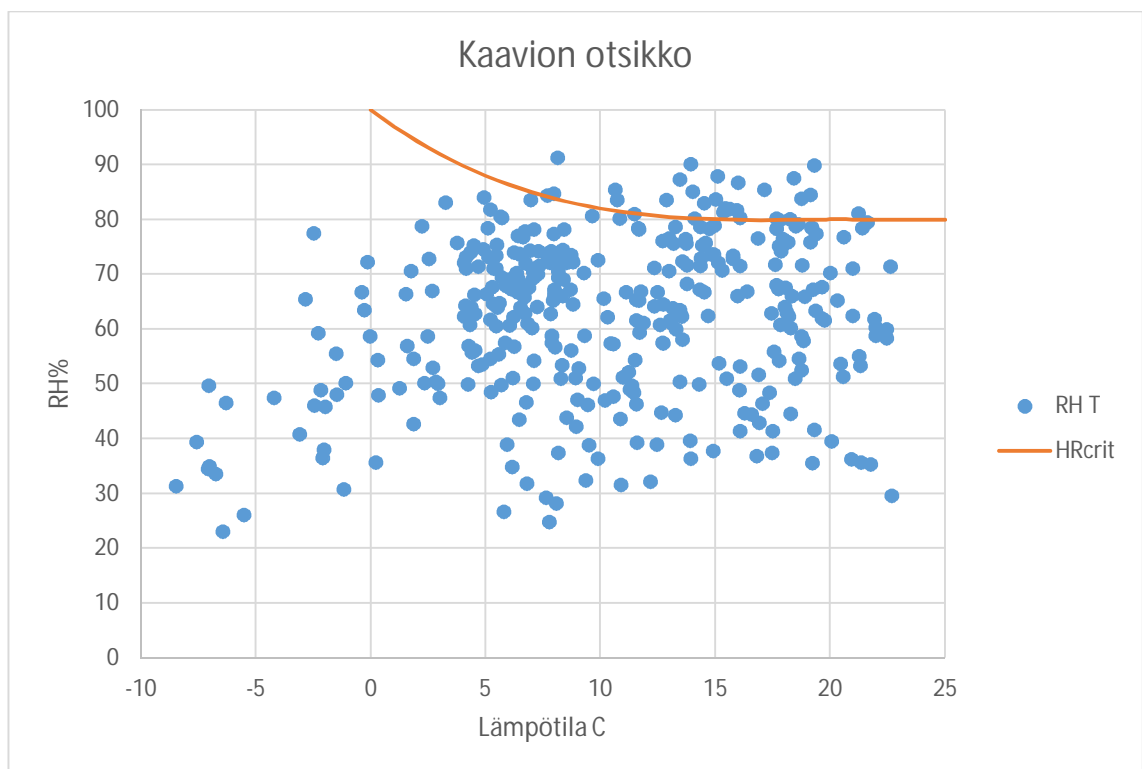
kuva 4 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1



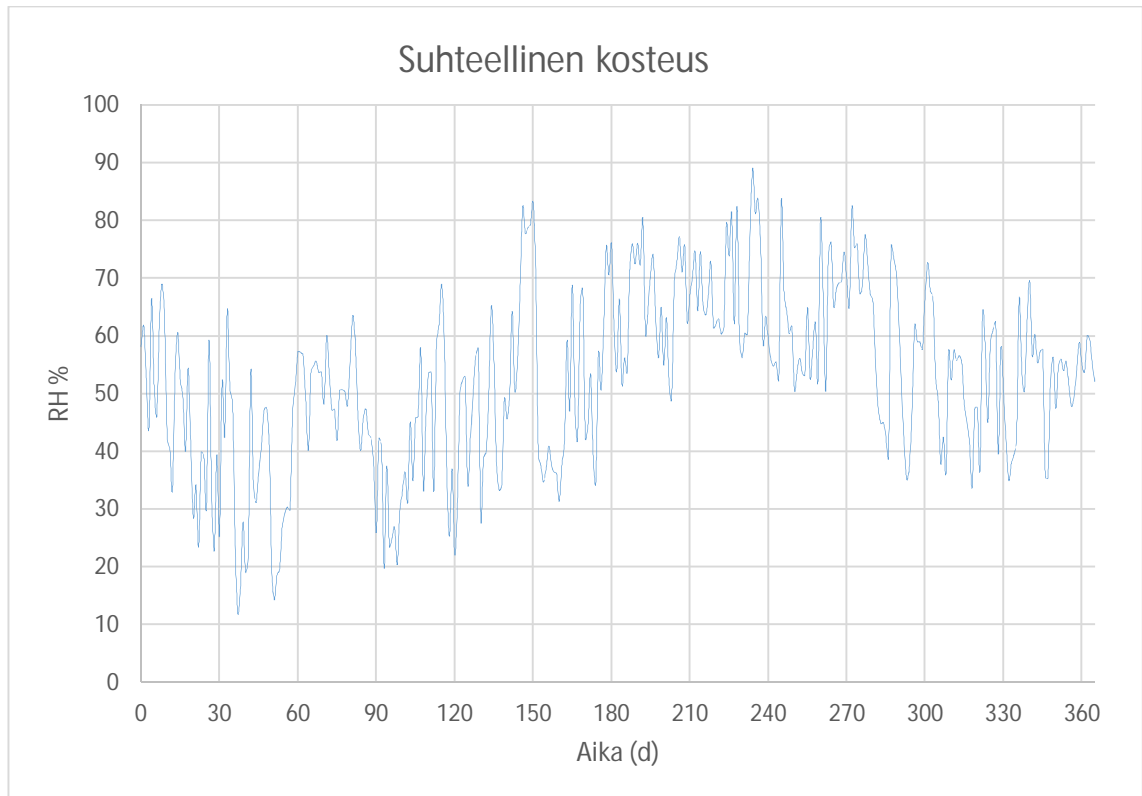
kuva 5 lämpötila tarkastelupisteessä 1



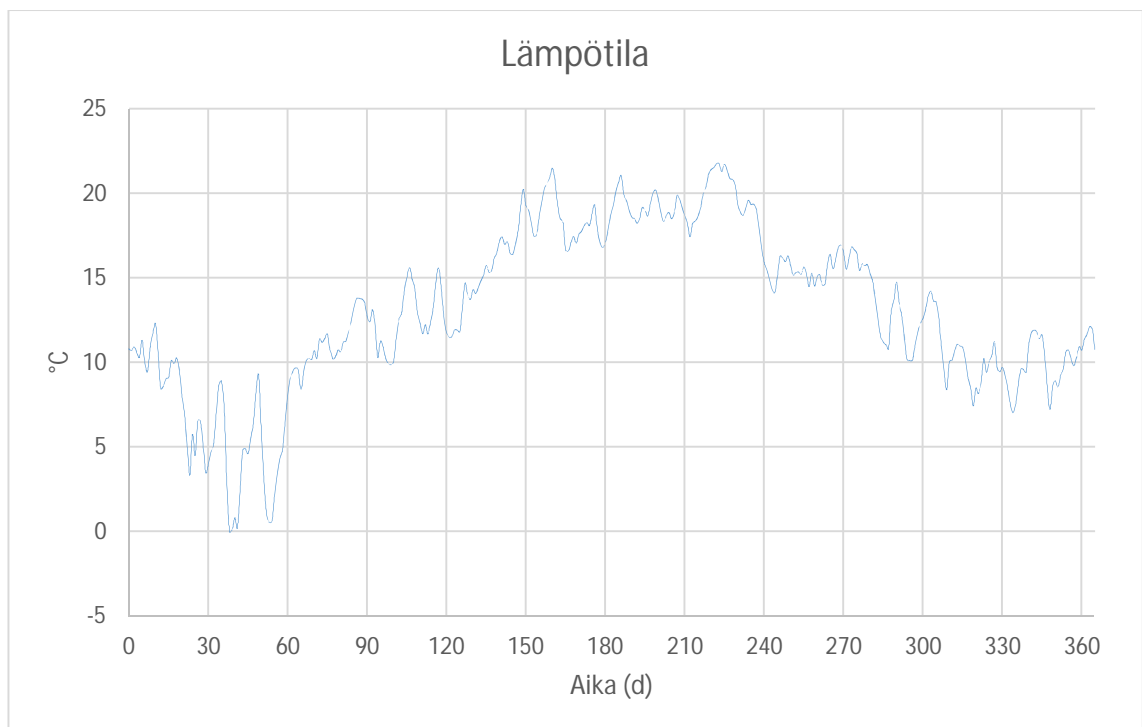
kuva 6 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 1



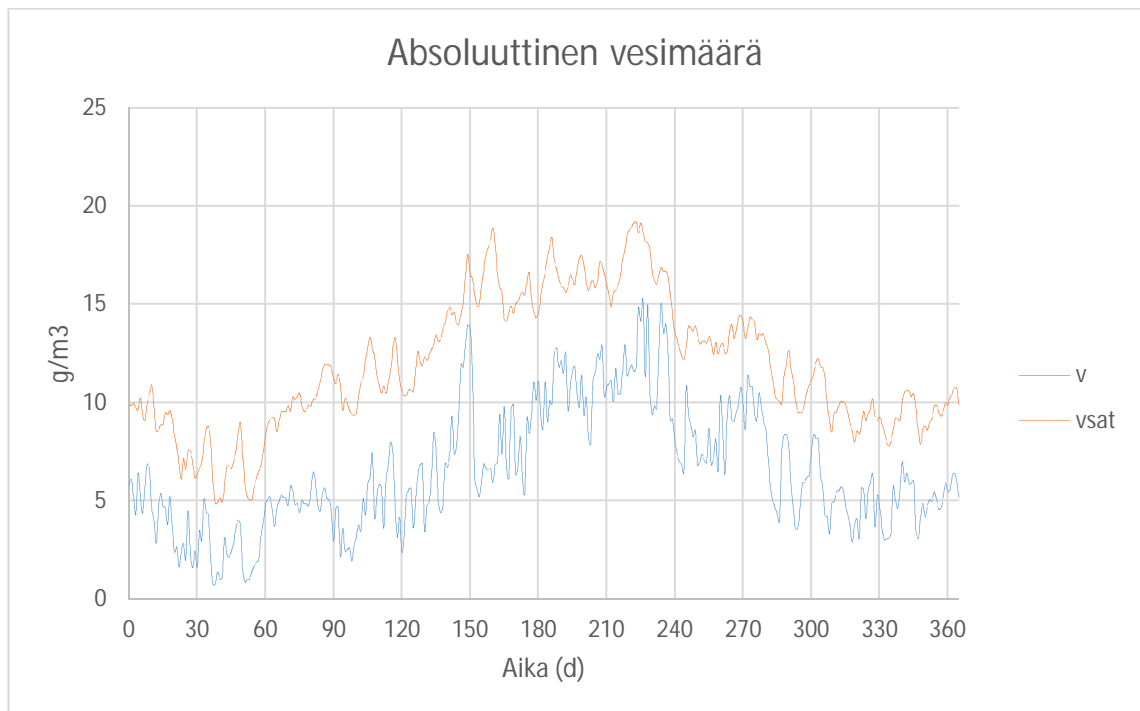
kuva 7 RHcrit tarkastelupisteessä 1



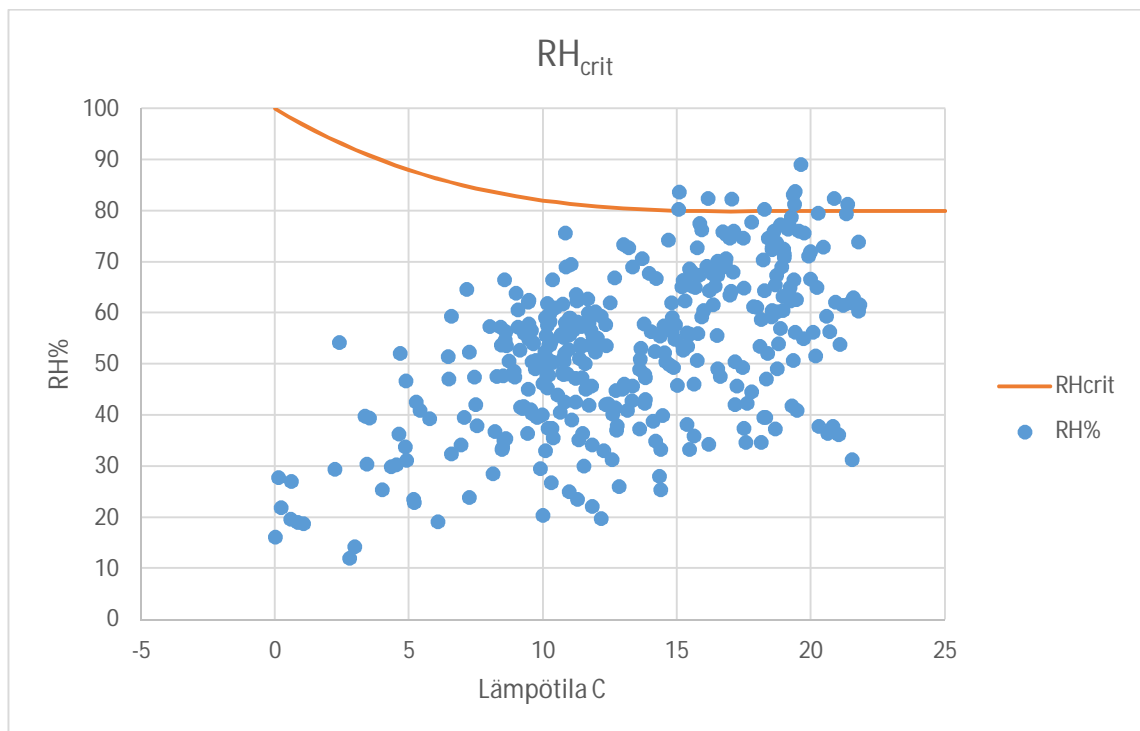
kuva 8 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 2



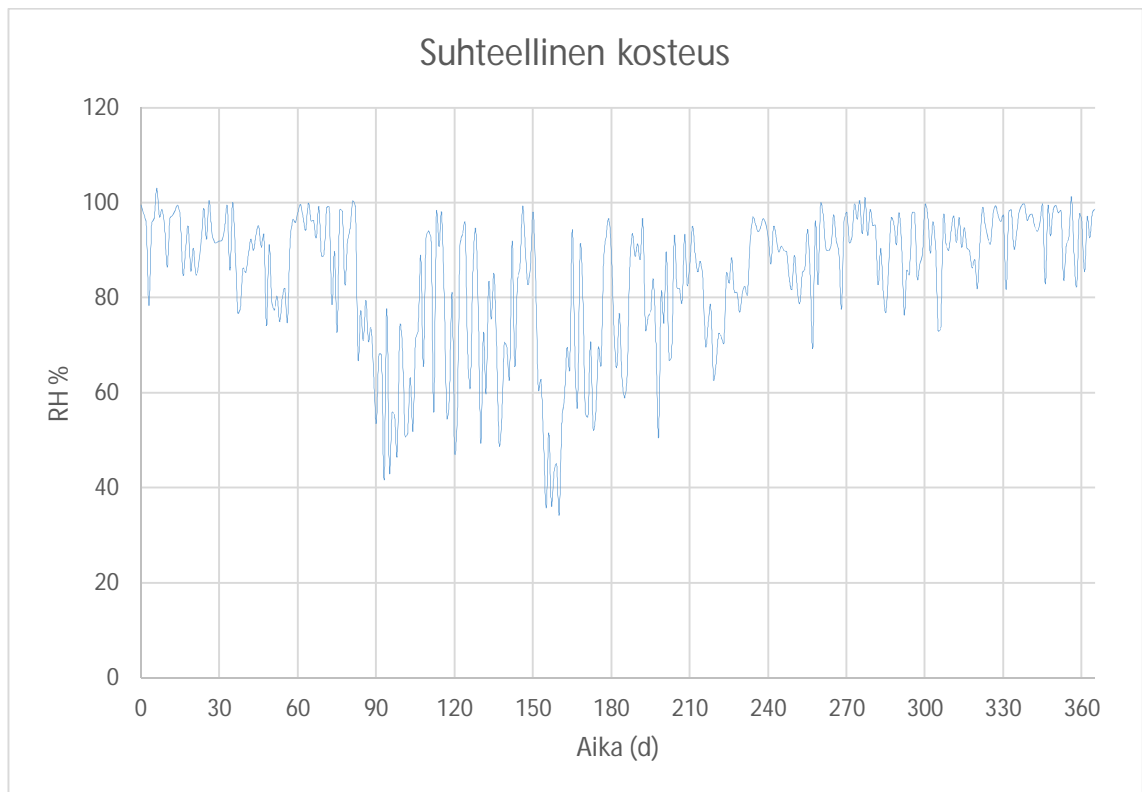
kuva 9 Lämpötila tarkastelupisteessä 2



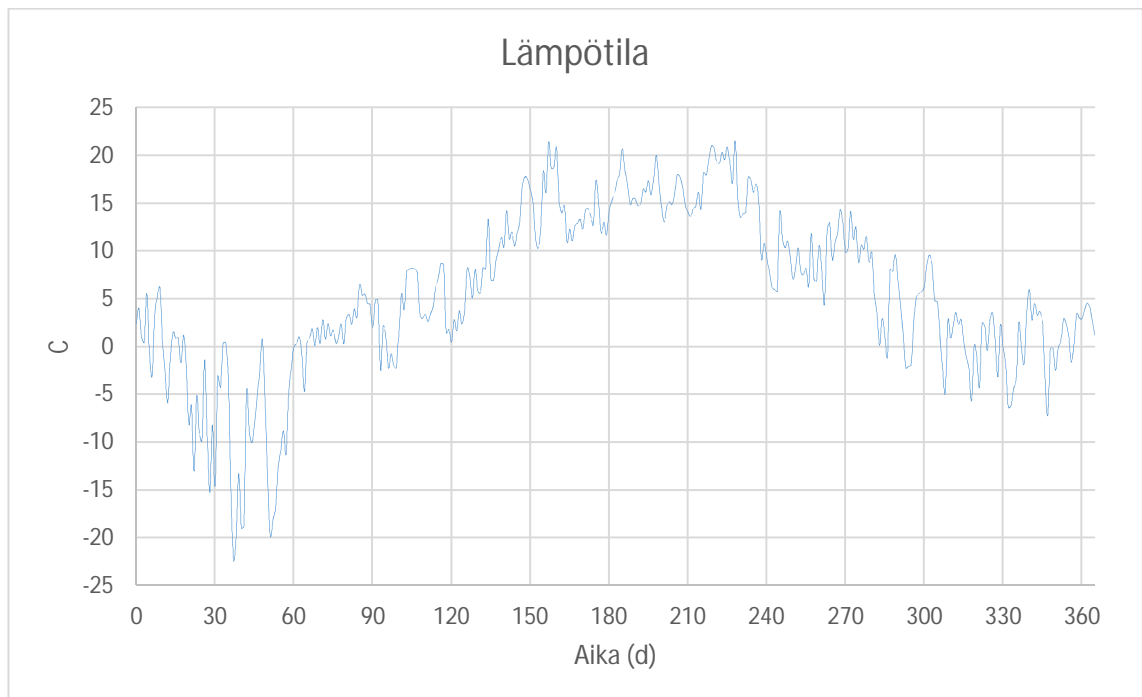
kuva 10 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 2



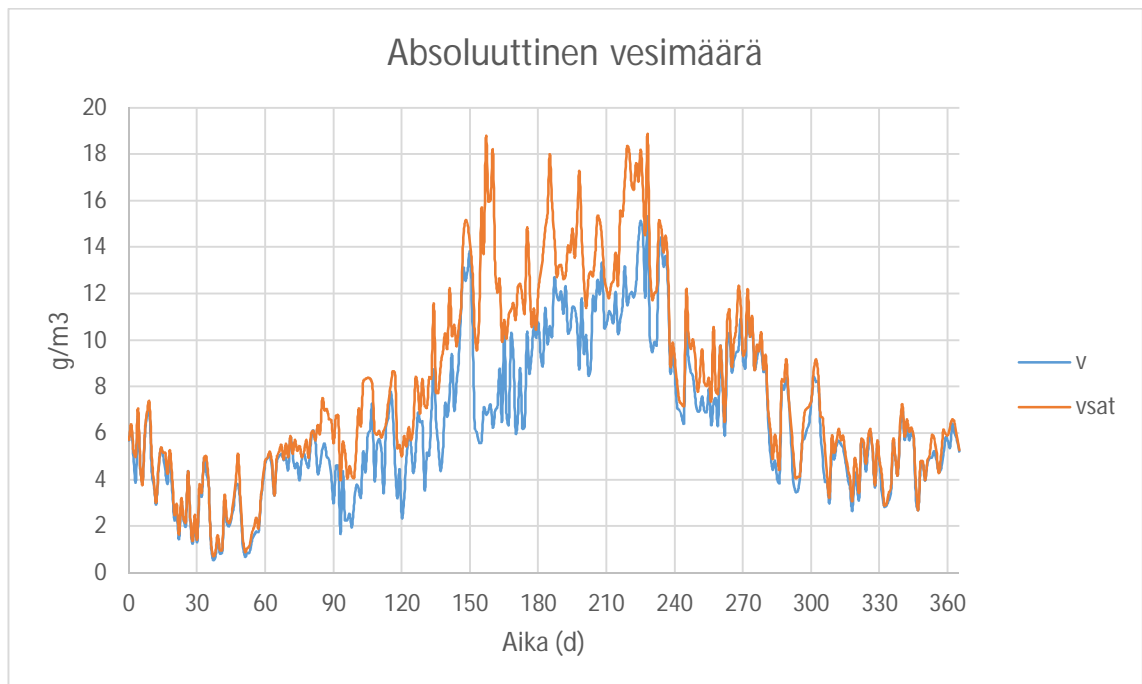
kuva 11 RHcrit tarkastelupisteessä 2



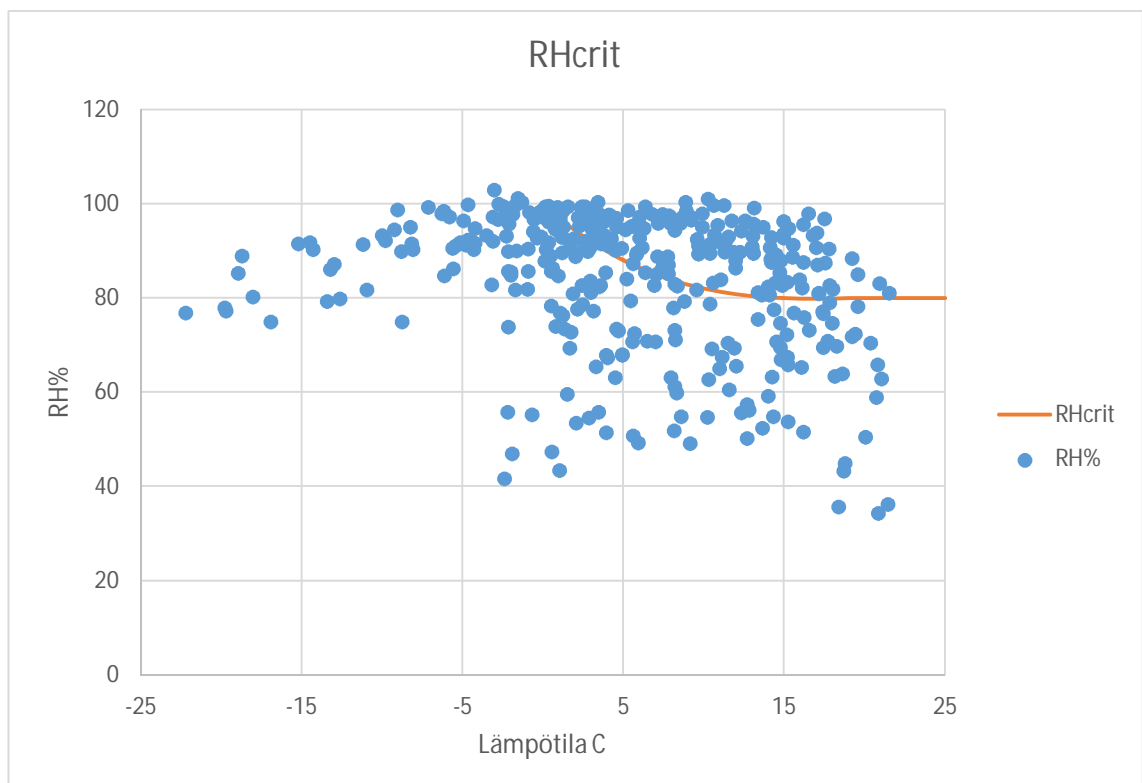
kuva 12 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 3



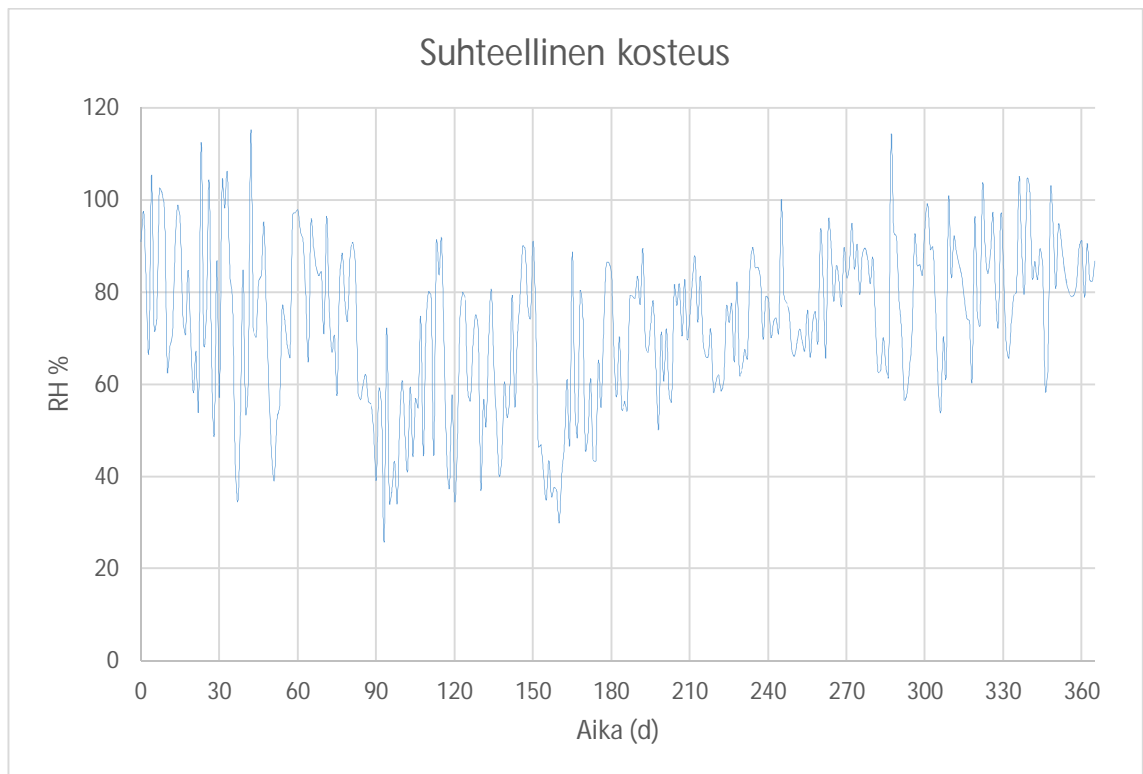
kuva 13 Lämpötila tarkastelupisteessä 3



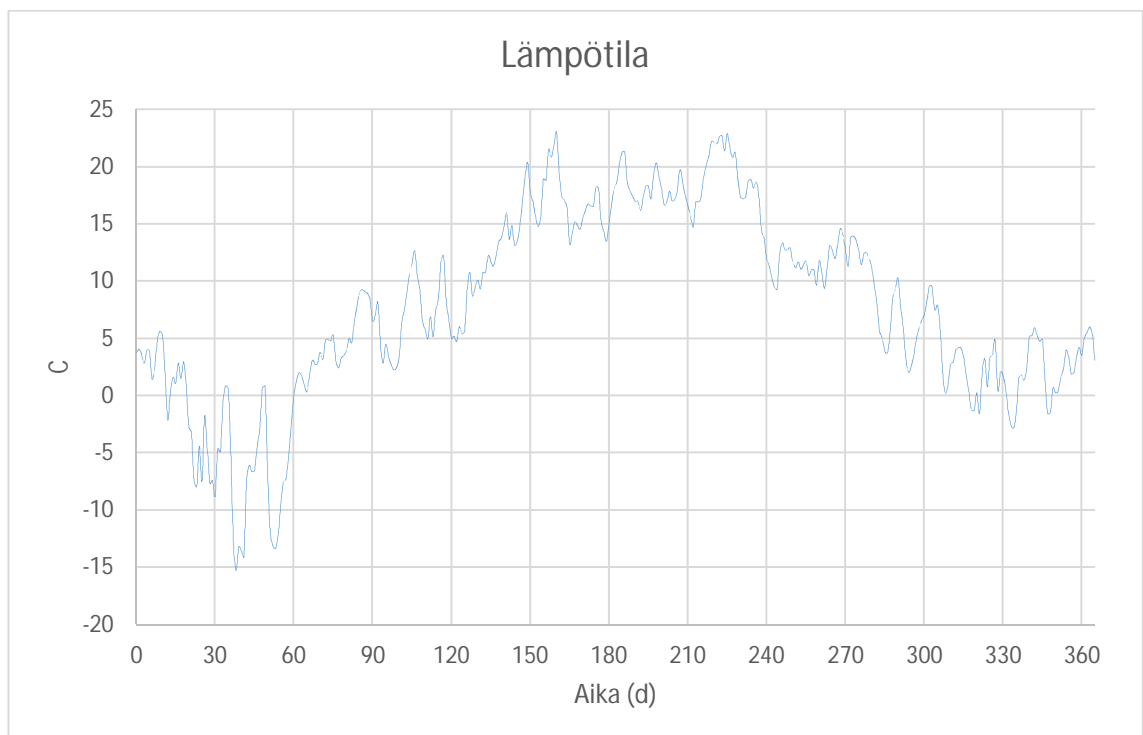
kuva 14 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 3



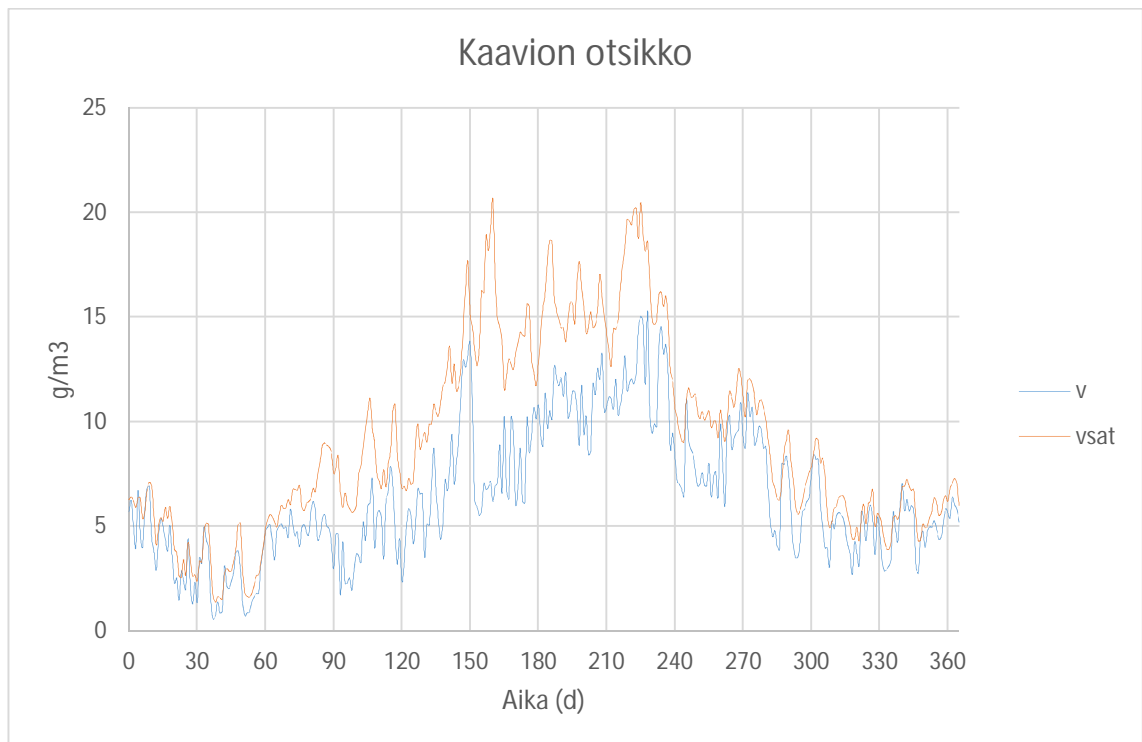
kuva 15 RHcrit tarkastelupisteessä 3



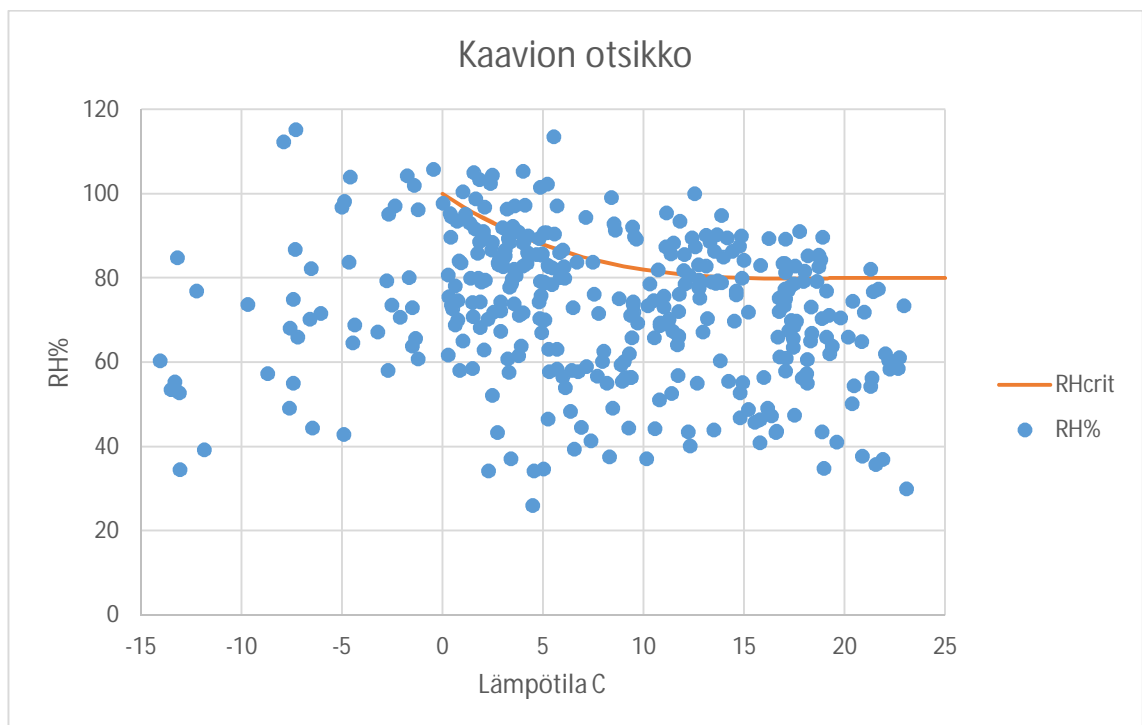
kuva 16 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 4



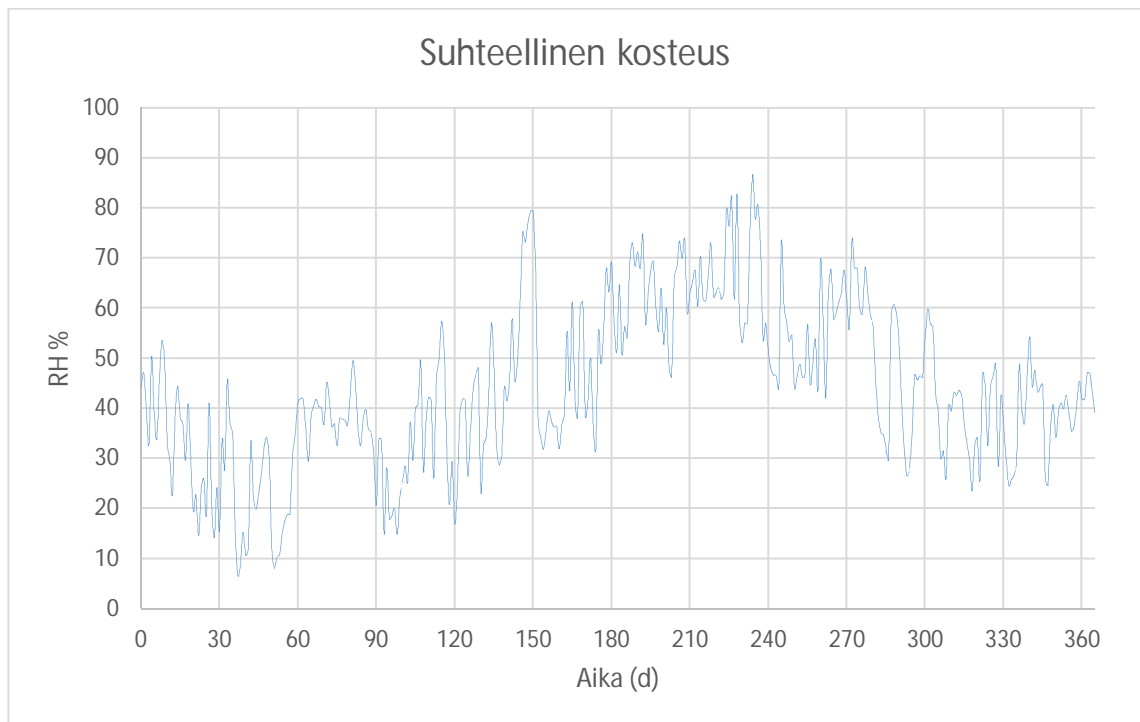
kuva 17 Lämpötila tarkastelupisteessä 4



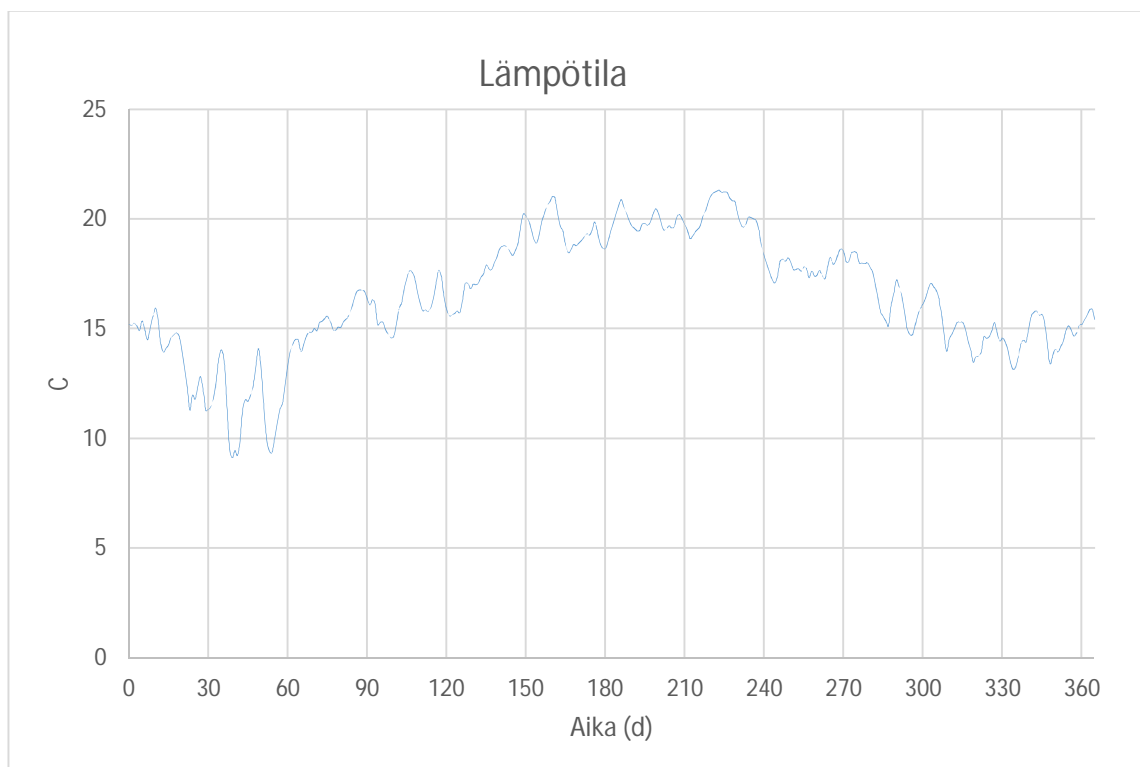
kuva 18 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 4



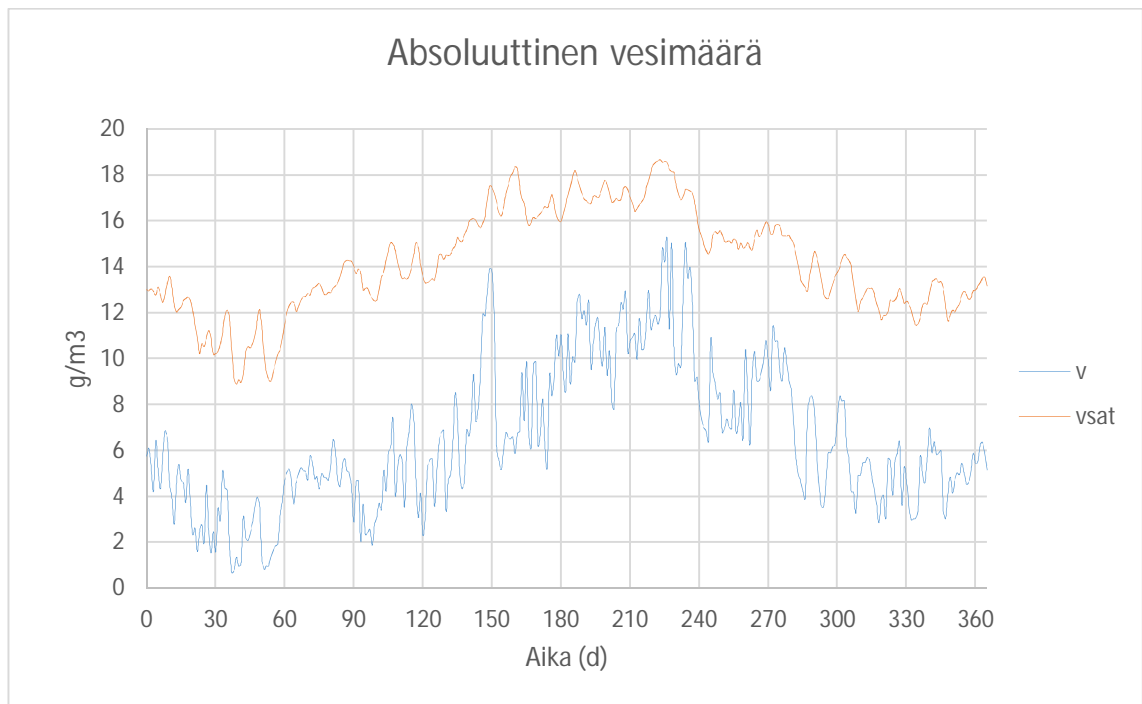
kuva 19 RHcrit tarkastelupisteessä 4



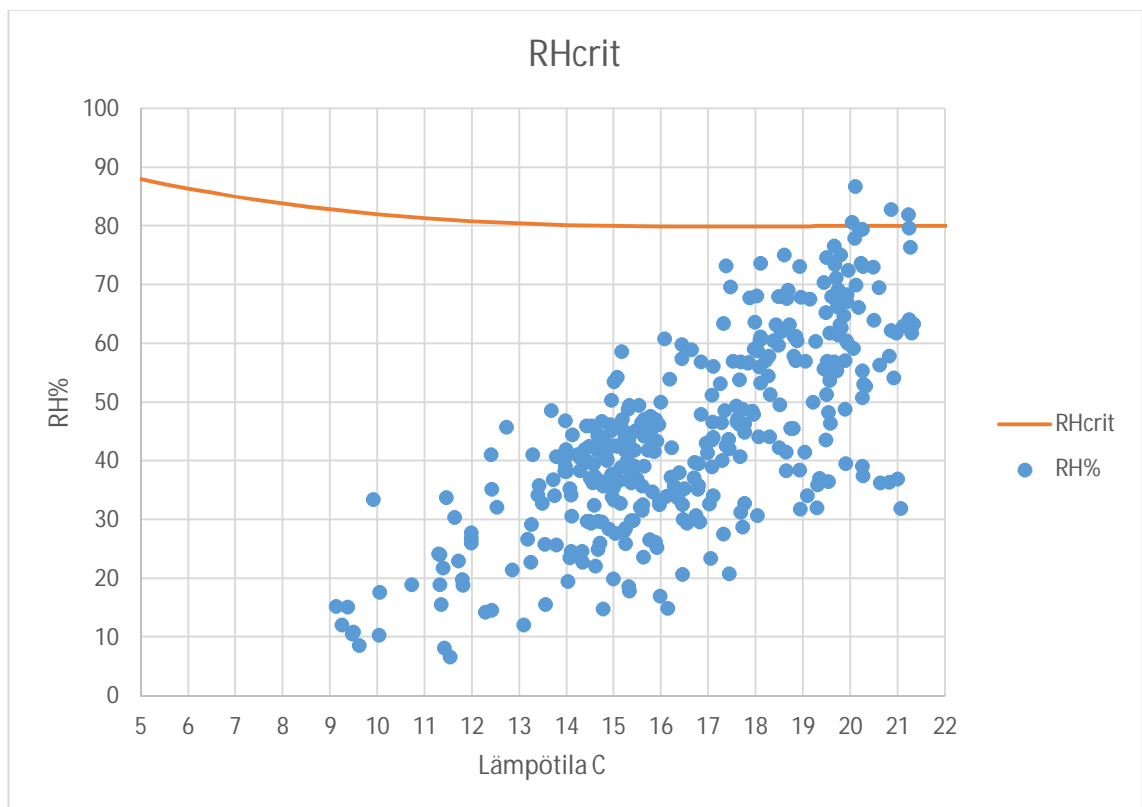
kuva 20 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 5



kuva 21 Lämpötila tarkastelupisteessä 5

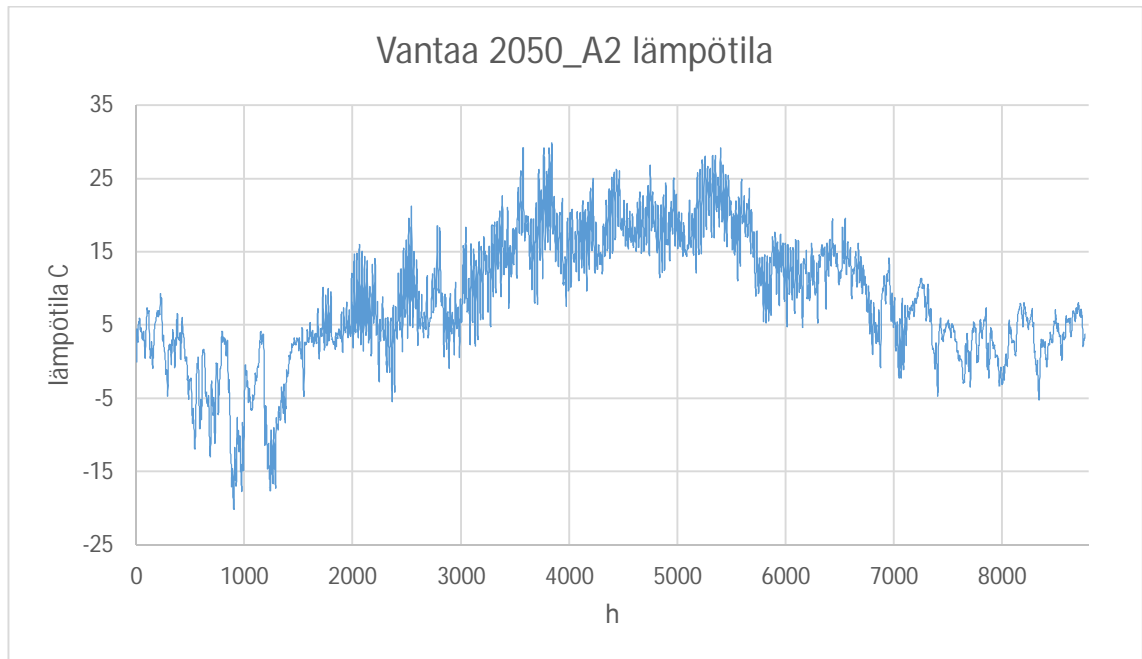


kuva 22 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 5

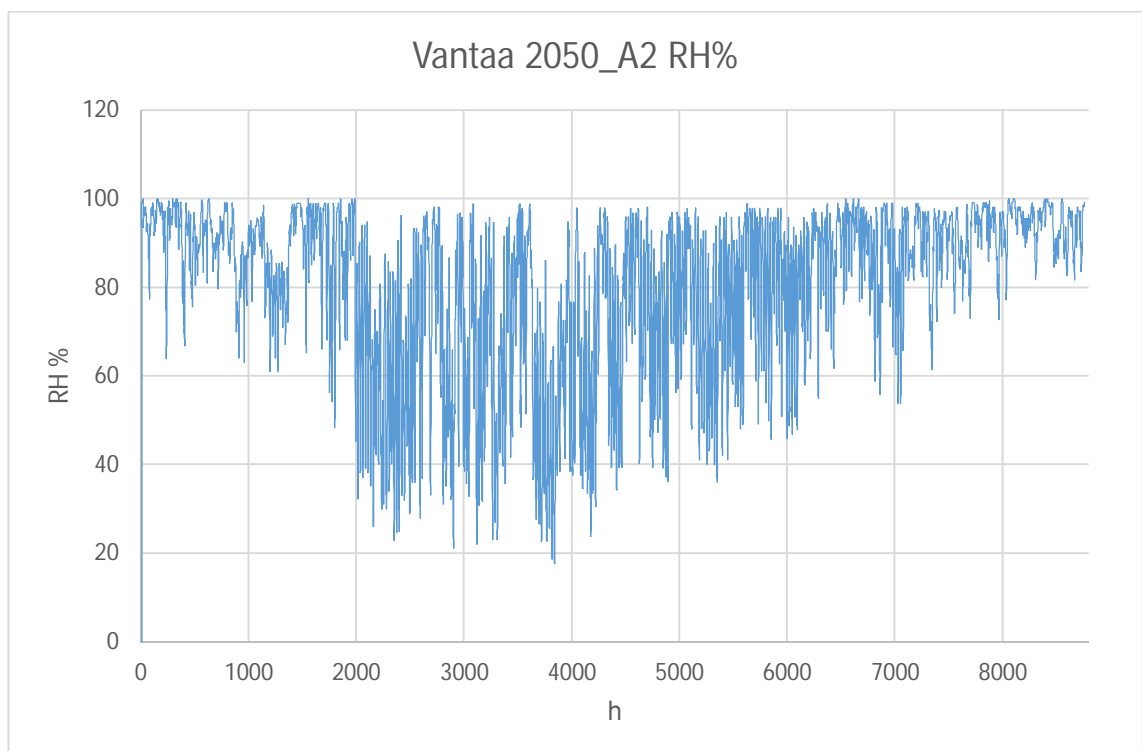


kuva 23 RHcrit tarkastelupisteessä 5

Rakennusfysikaalinen testivuosi Vantaa 2050_A2

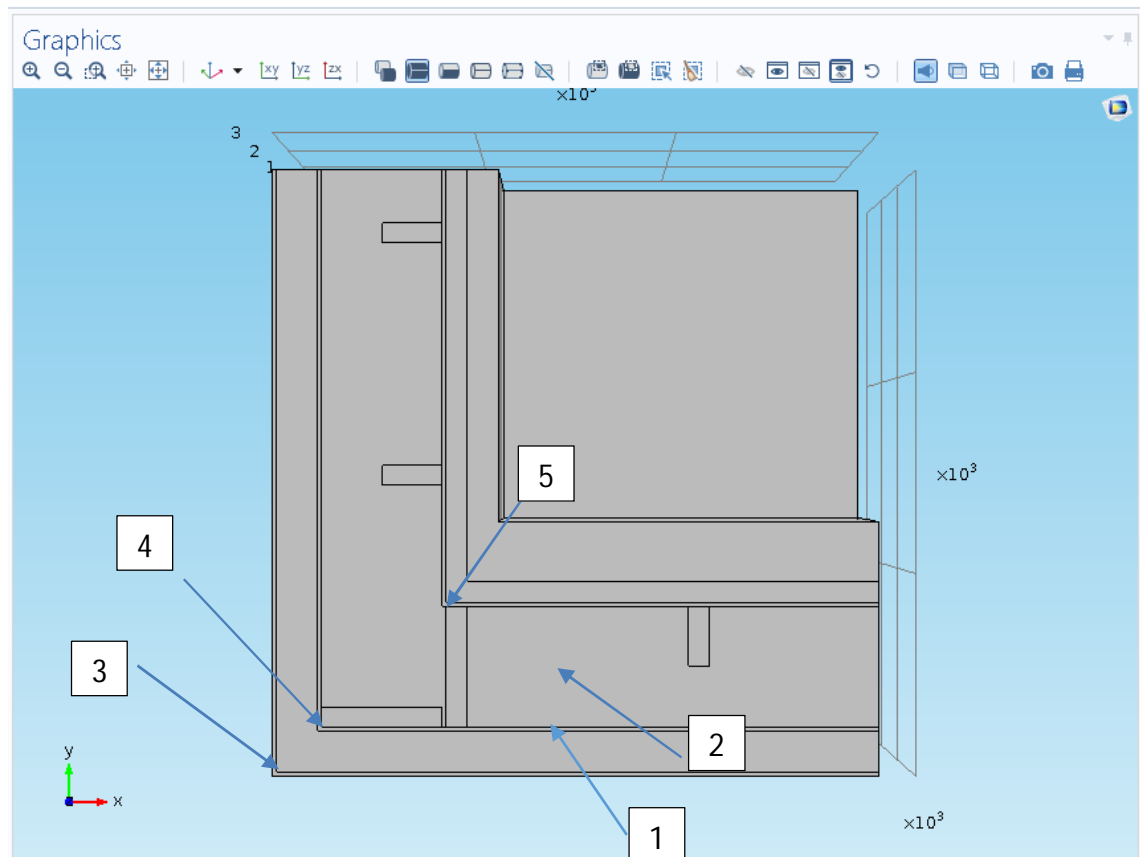


kuva 1 Lämpötila Vantaa 2050_A2

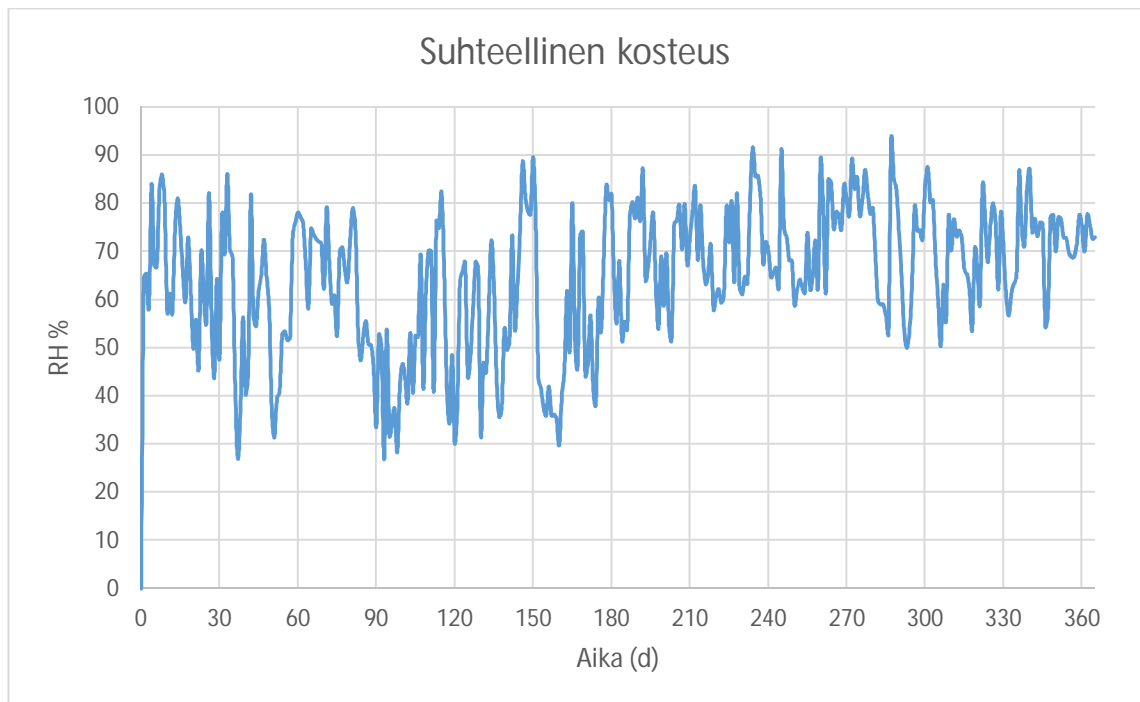


kuva 2 Suhteellinen ilmankosteus Vantaa 2050_A2

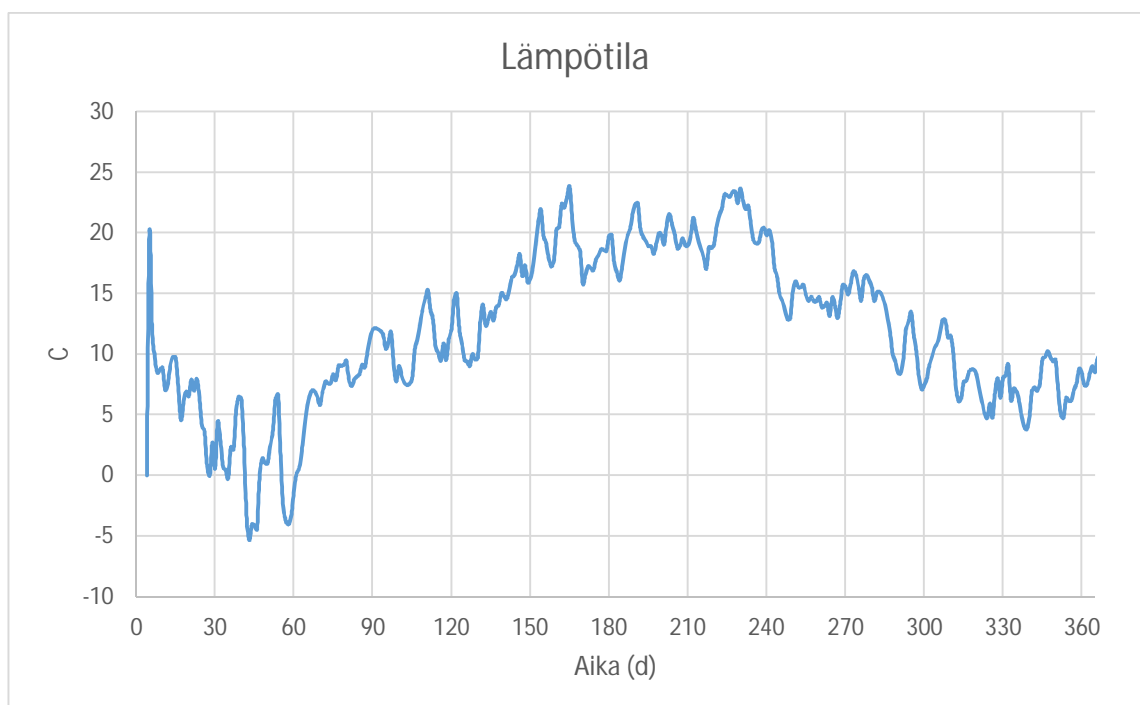
Pisteistä 1-5 saadut tulokset Vantaa 2050-ilmastossa taulukoituina.



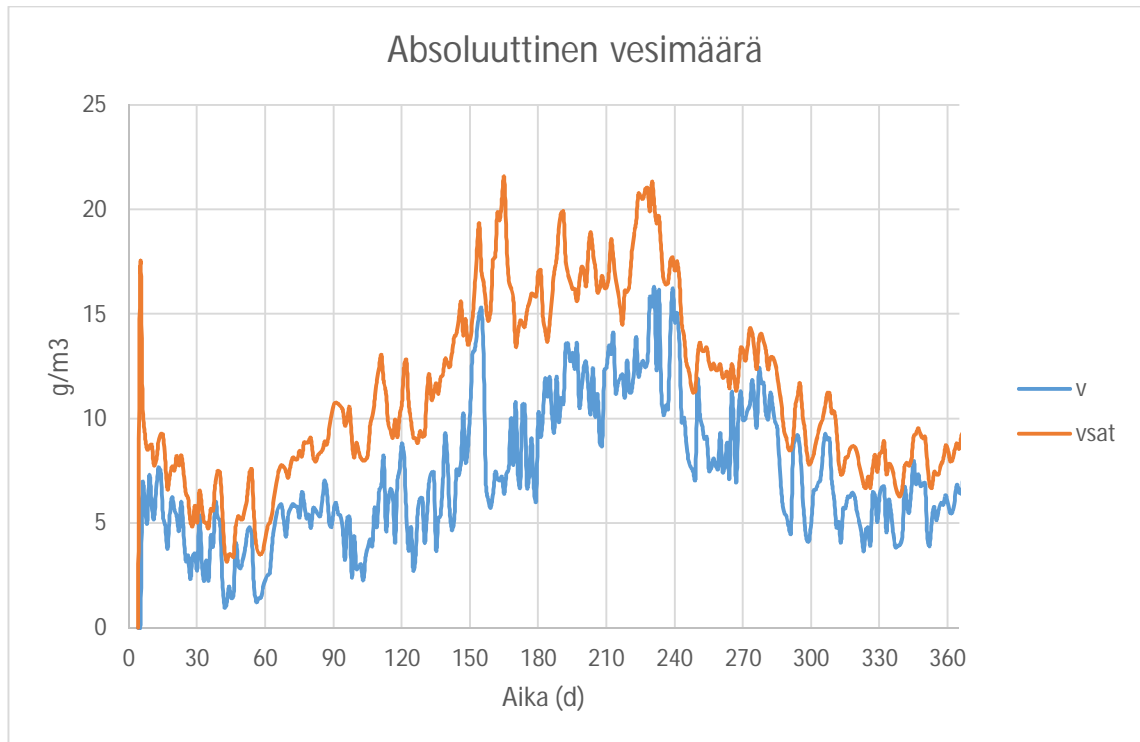
Kuva 3. Valitut tarkastelupisteet.



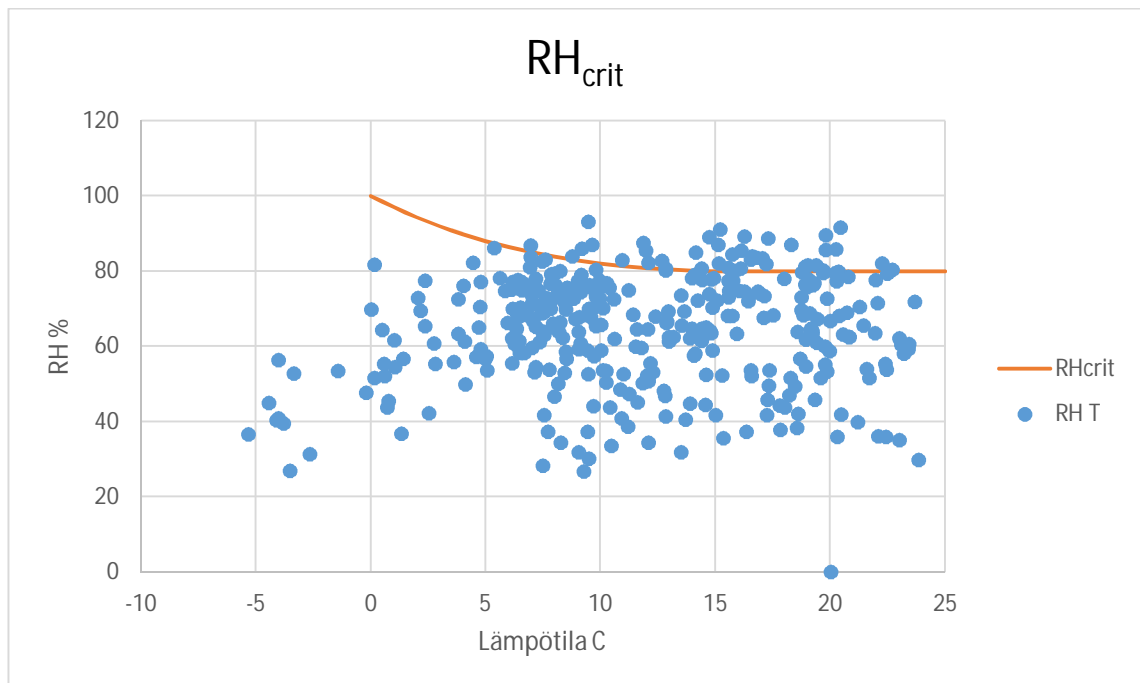
kuva 4 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1

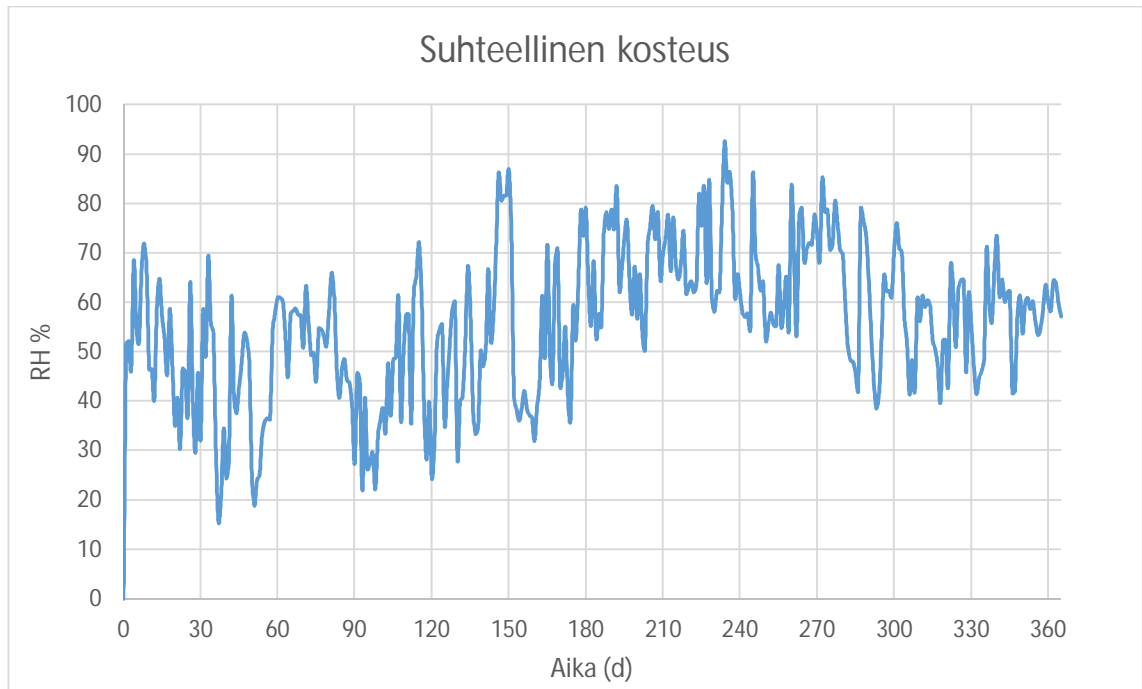


kuva 5 Lämpötila tarkastelupisteessä 1

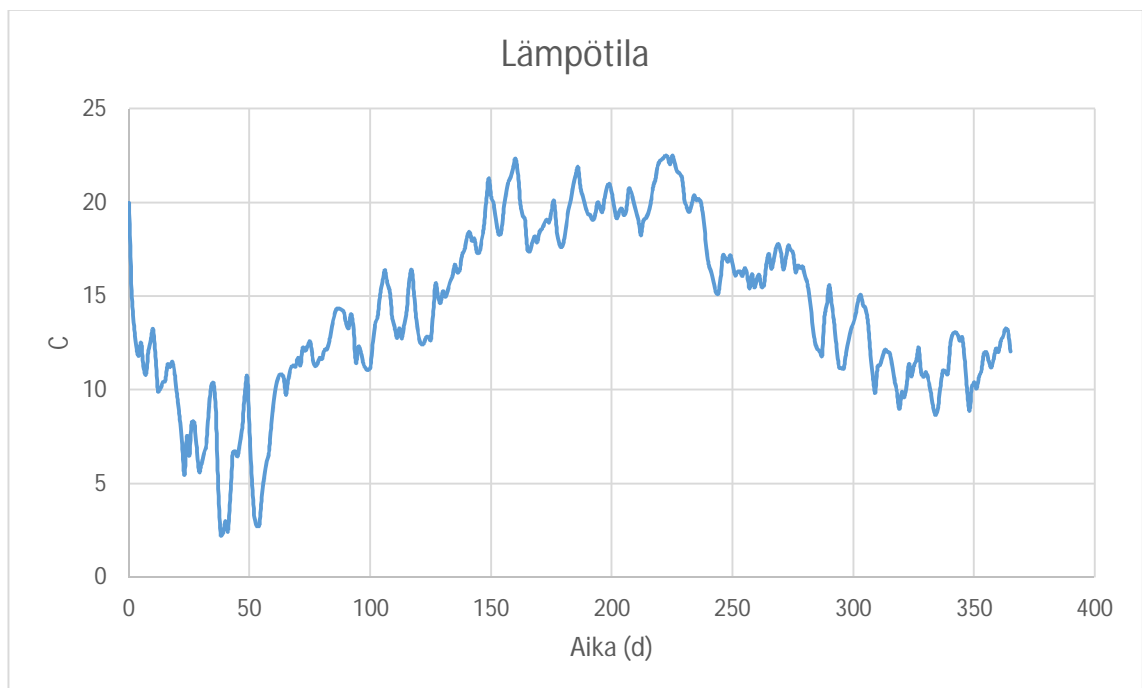


kuva 6 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 1

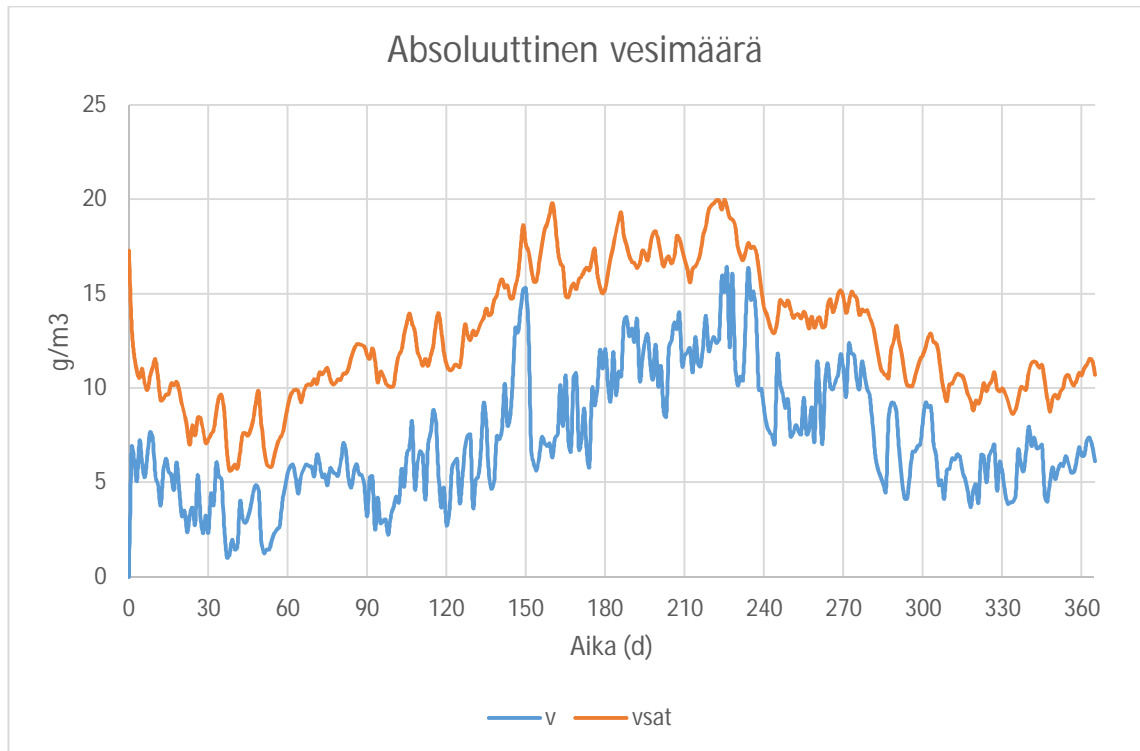
kuva 7 RH_{crit} tarkastelupisteessä 1



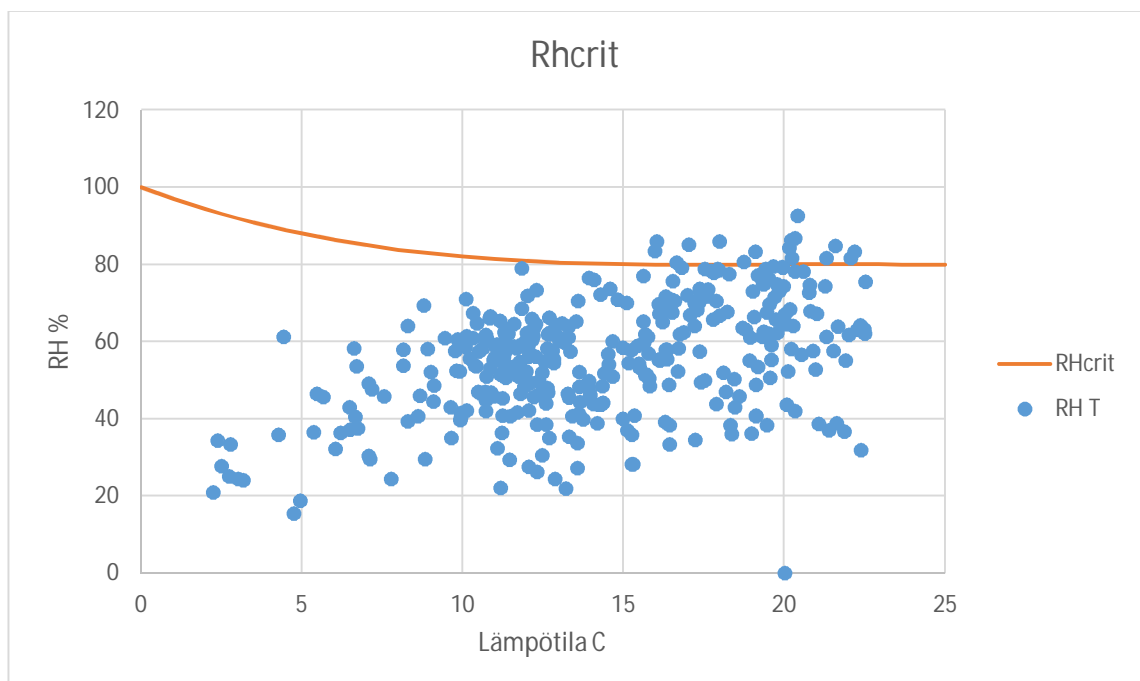
kuva8 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 2



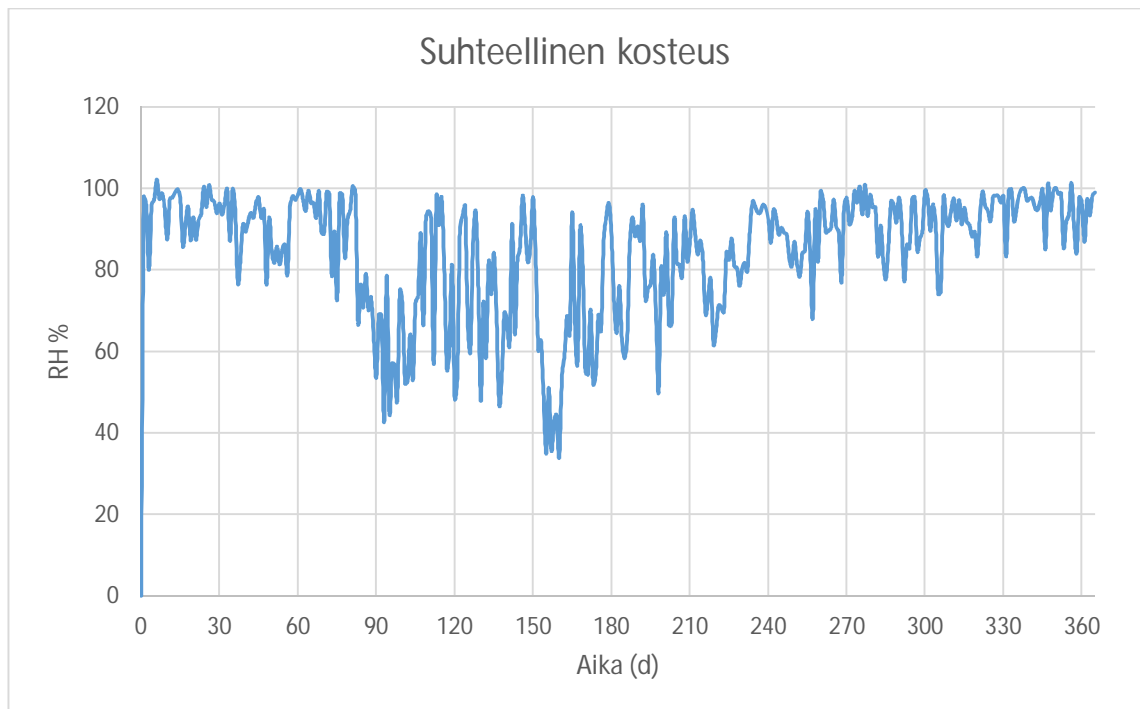
kuva 9 lämpötila tarkastelupisteessä 2



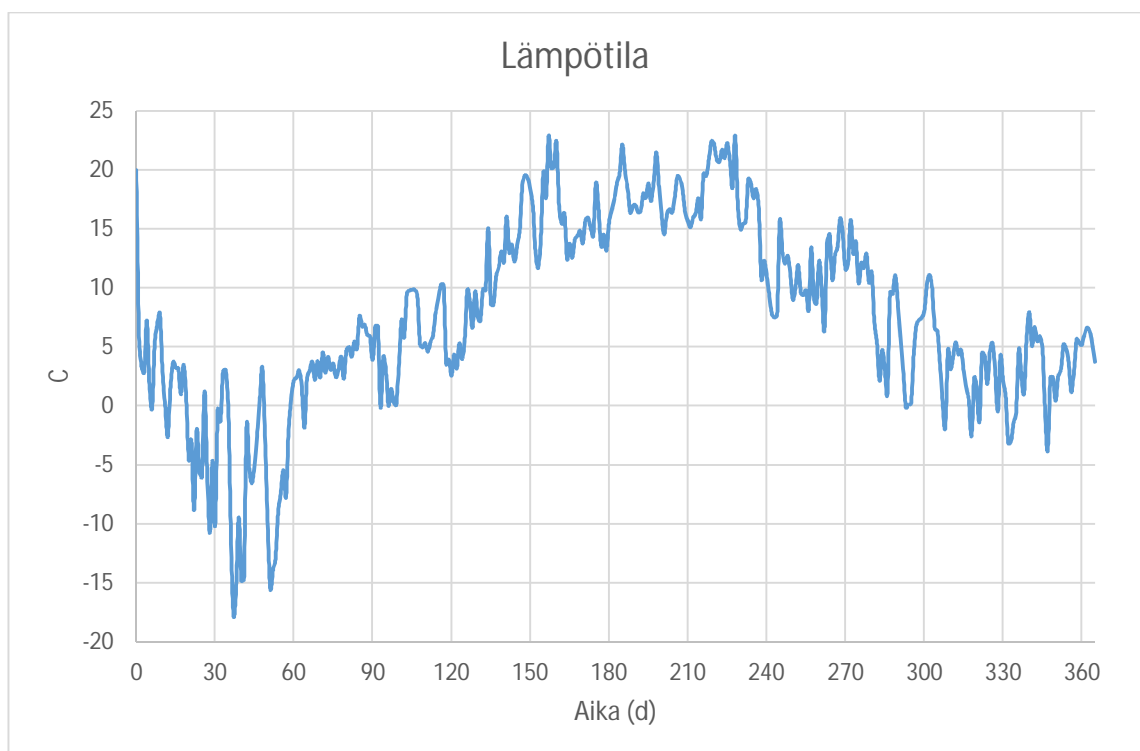
kuva 10 Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 2



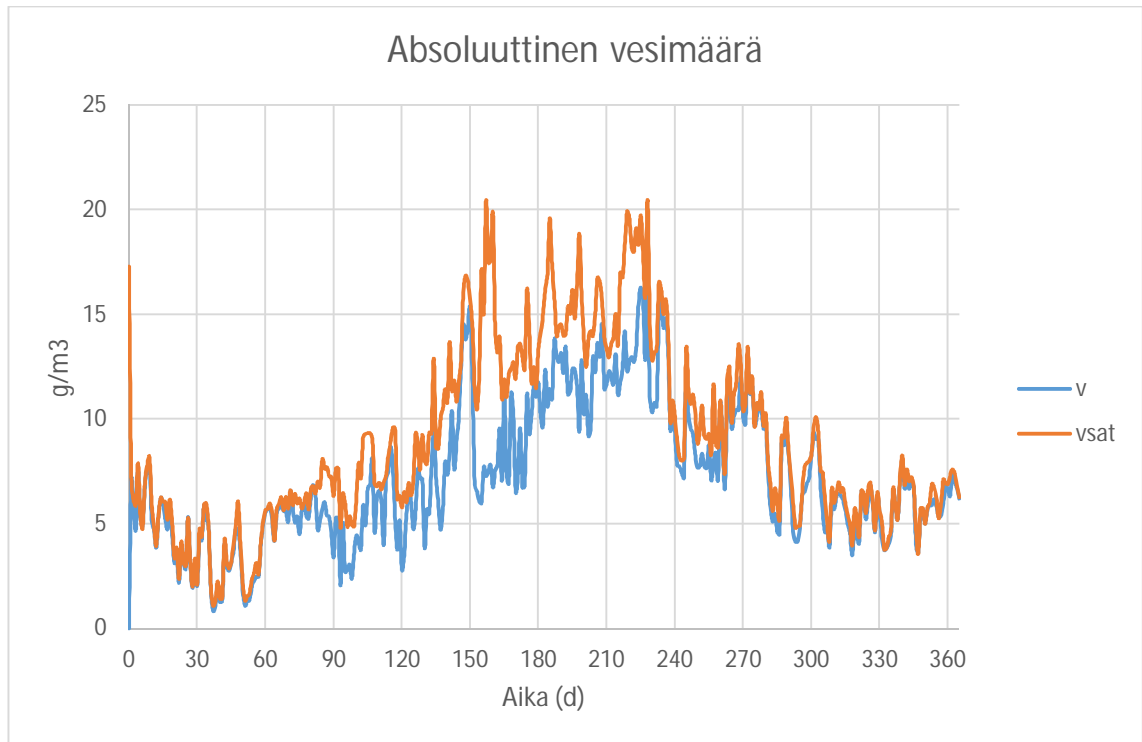
kuva 11 Rhcrit tarkastelupisteessä 2



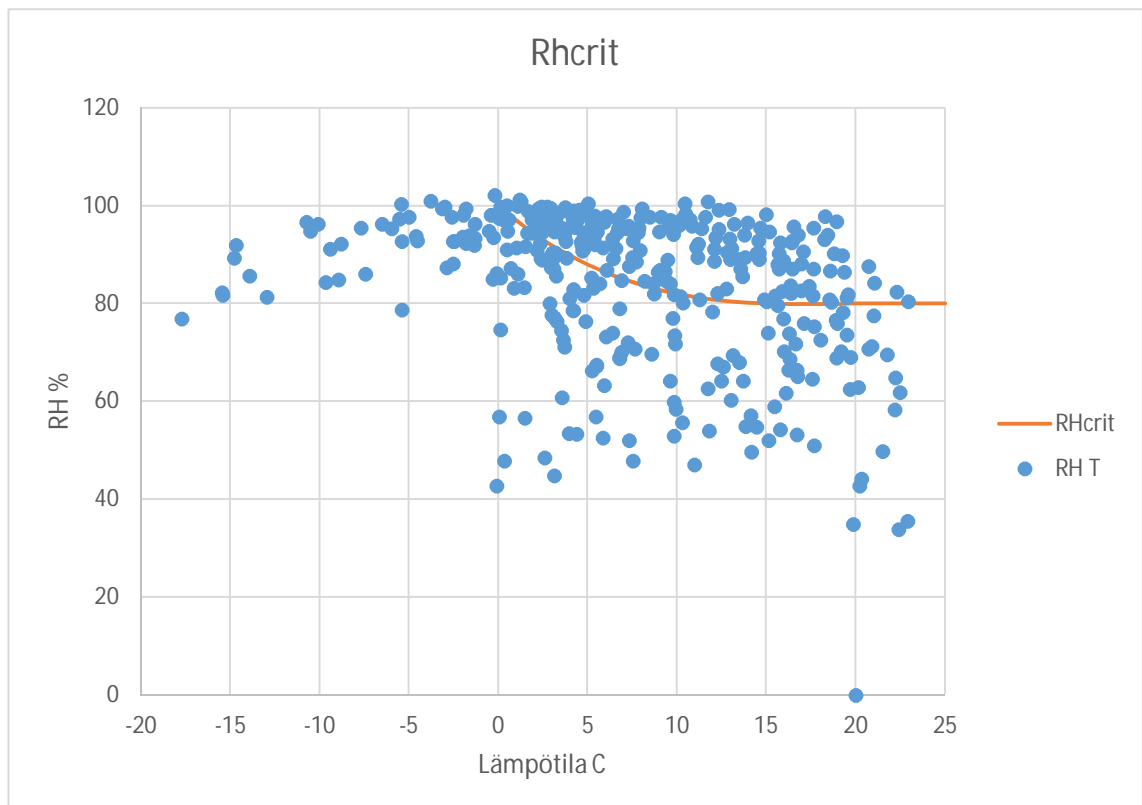
kuva 12. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 3



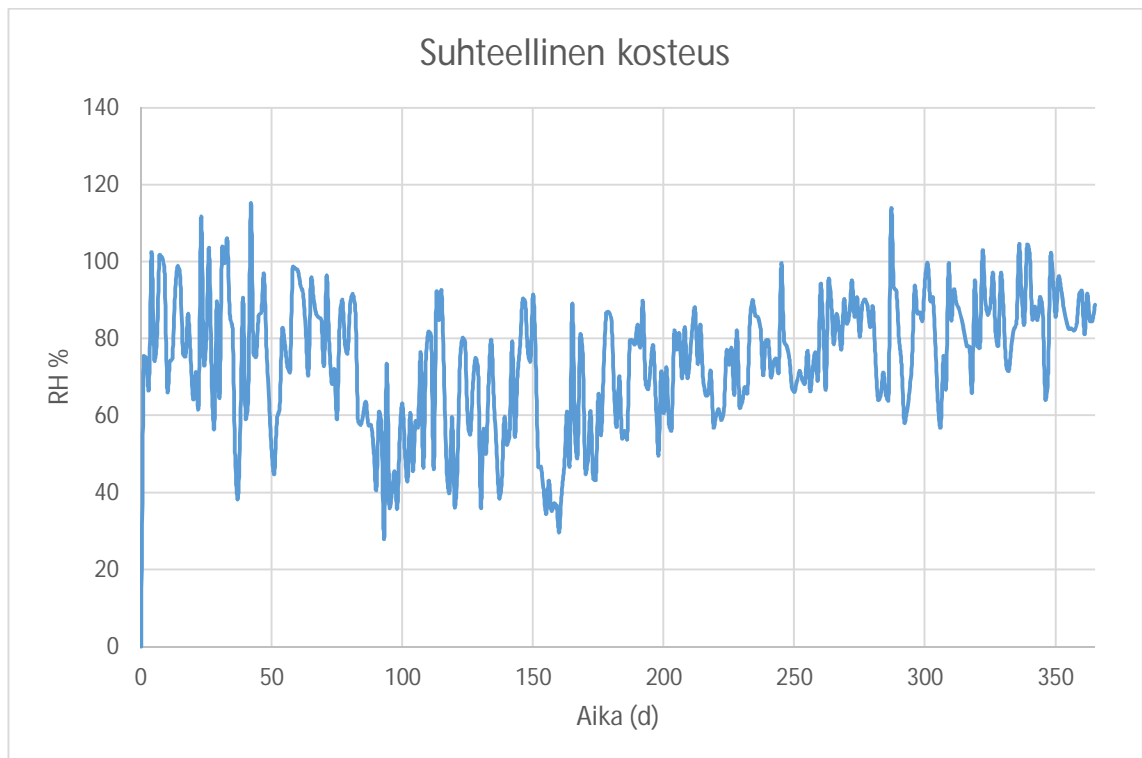
kuva 13. Lämpötila pisteessä 3.



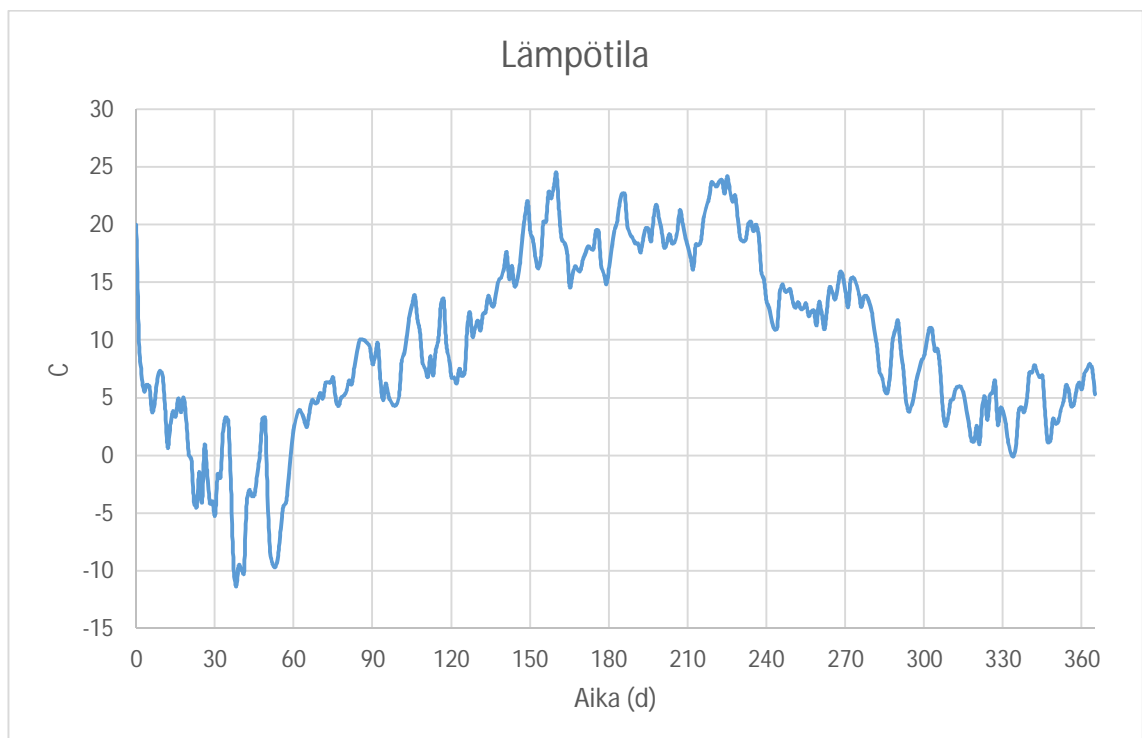
kuva 14. Absoluuttinen vesimäärä pisteessä 3.



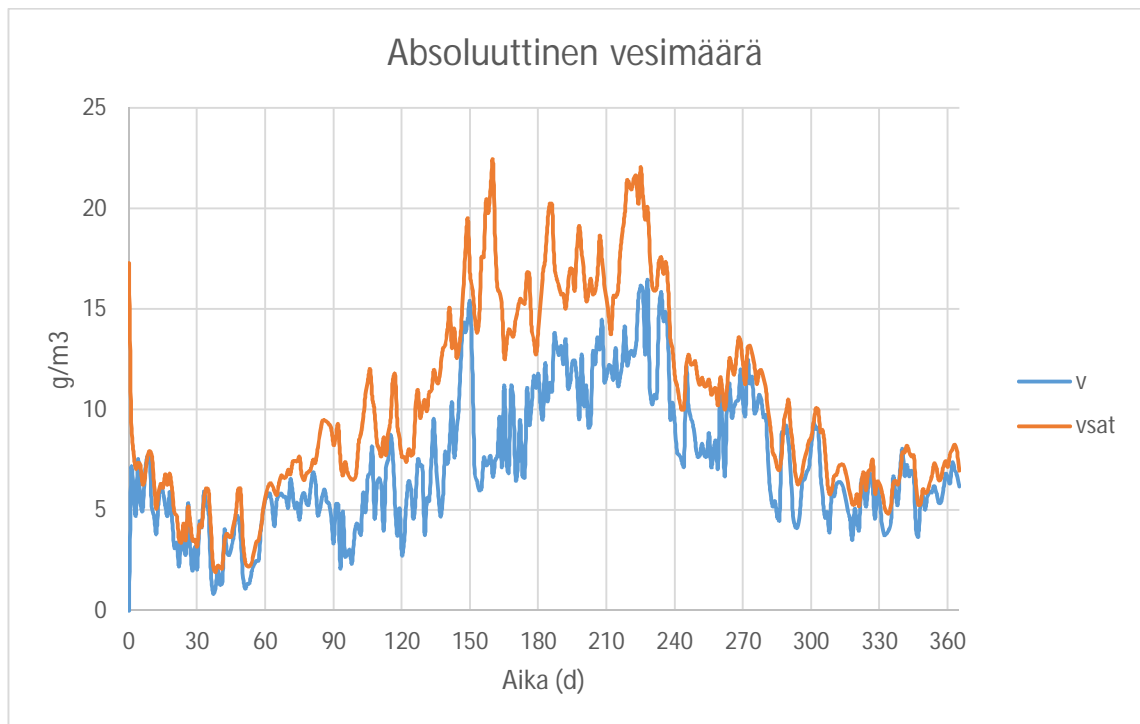
kuva 15. RHcrit tarkastelupisteessä 3.



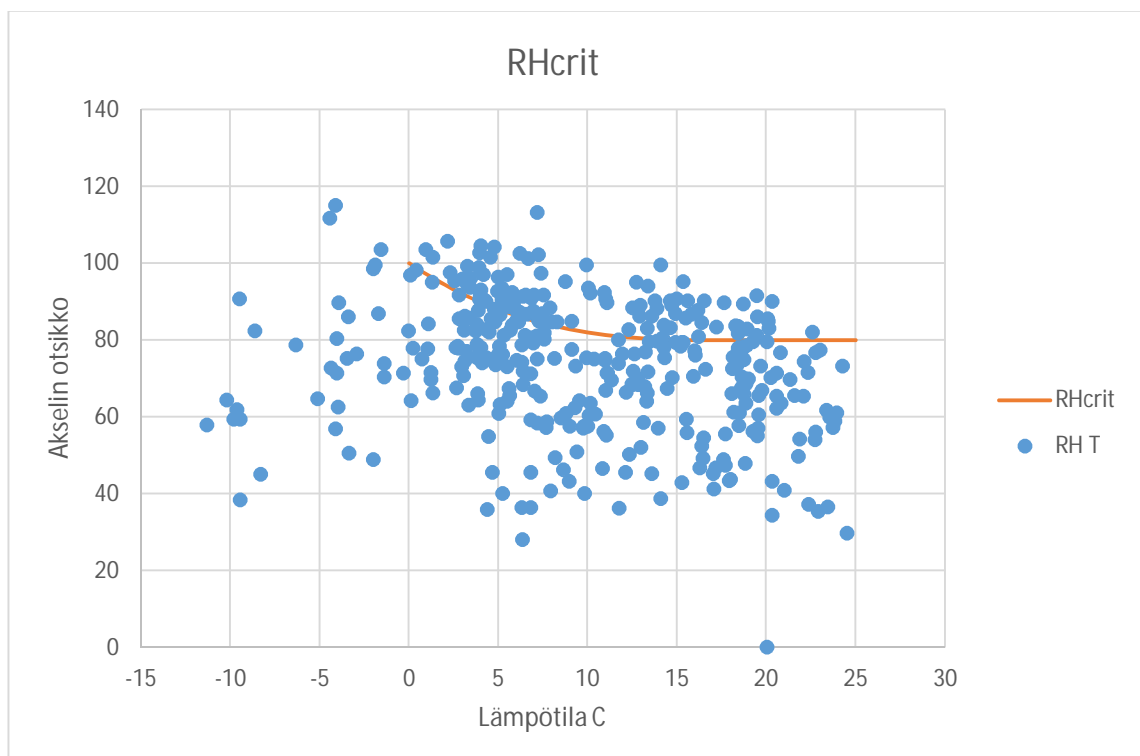
kuva 16. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 4.



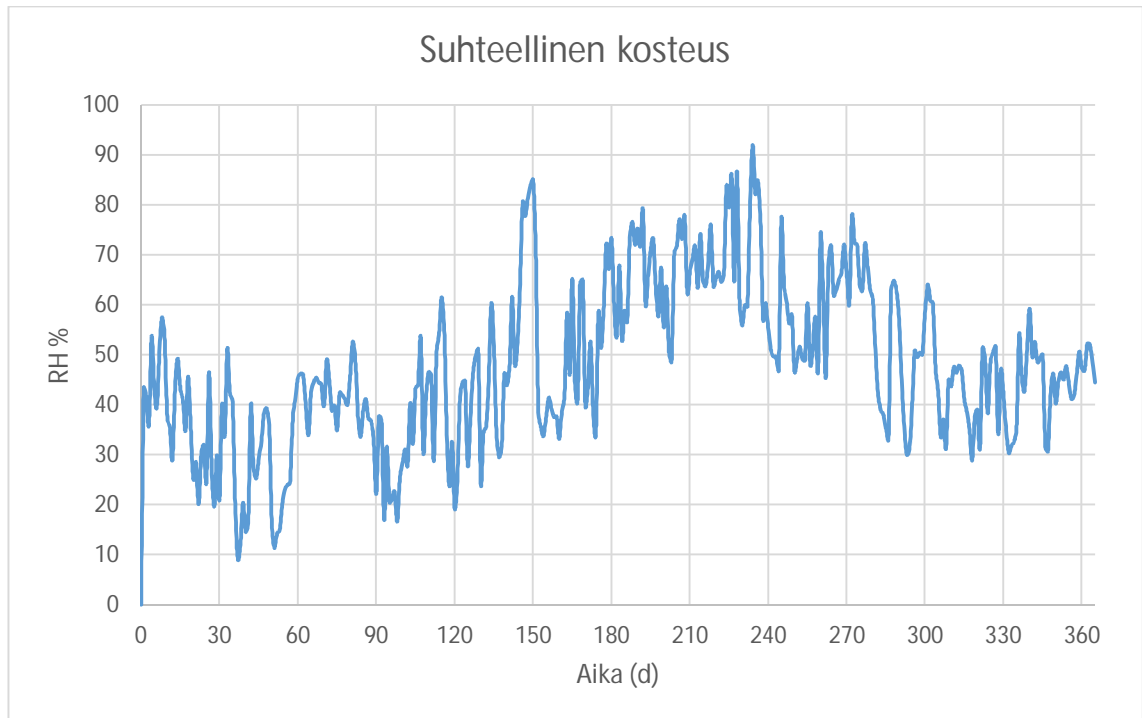
kuva 17. Lämpötila tarkastelupisteessä 4.



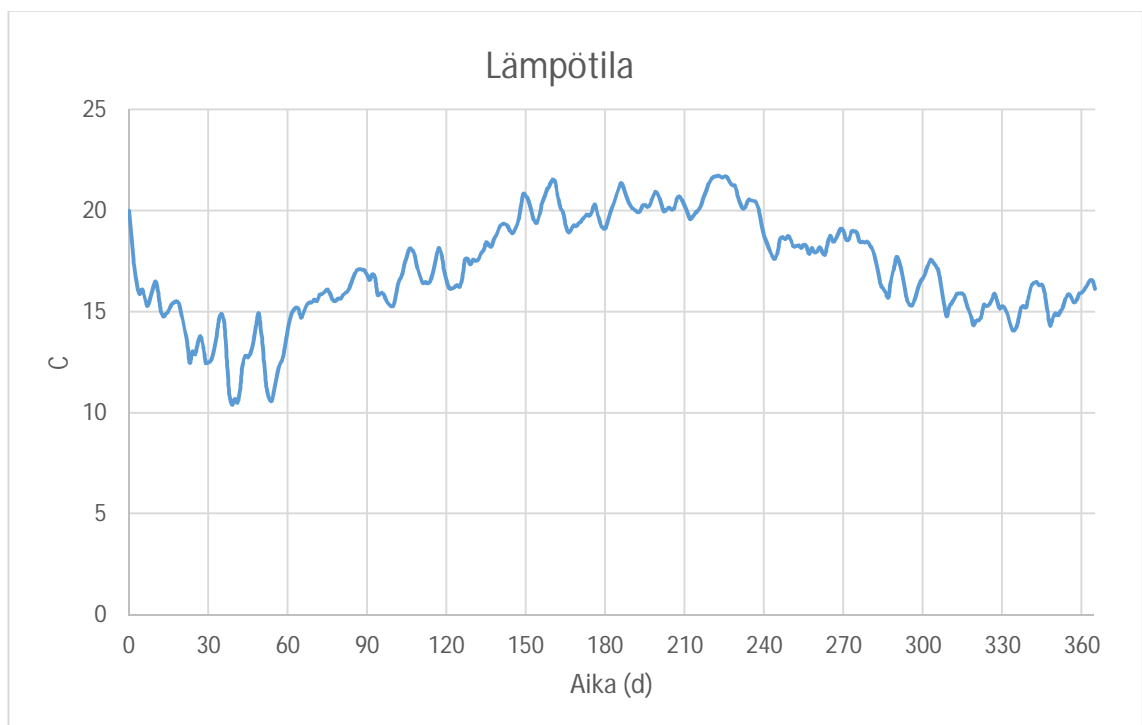
kuva 18. Absoluuttinen kosteus tarkastelupisteessä 4.



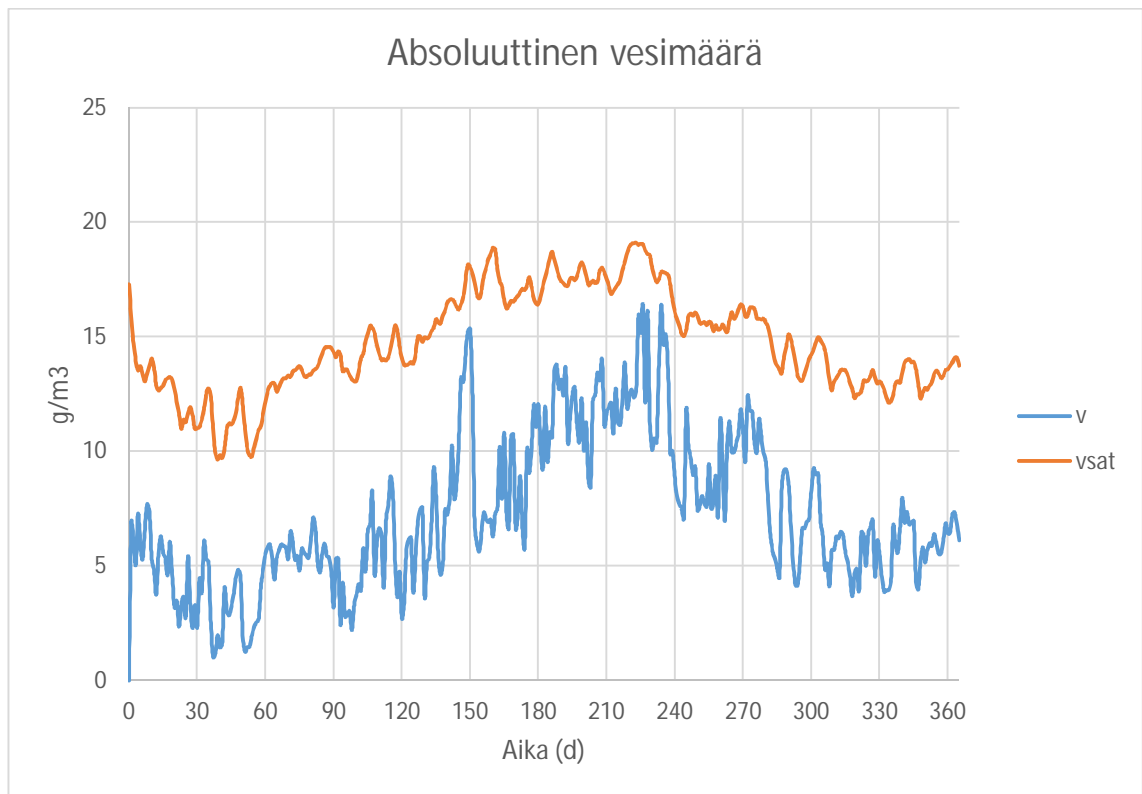
kuva 19. RHcrit tarkastelupisteessä 4.



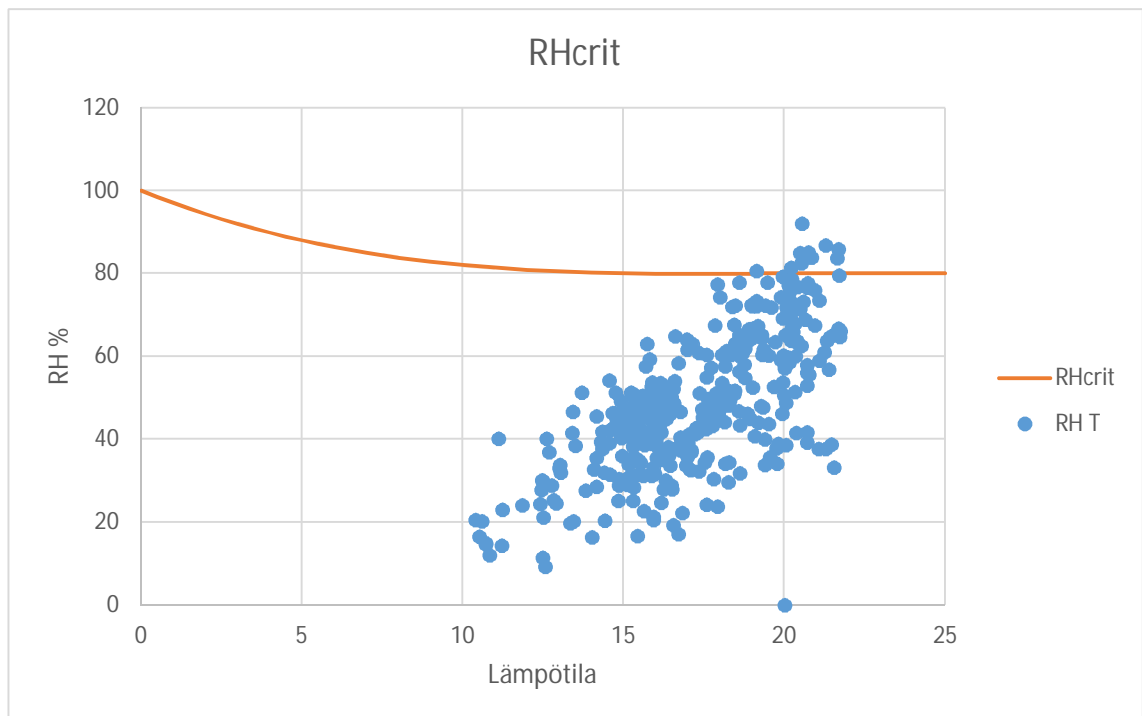
kuva 20. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 5.



kuva 21. Lämpötila tarkastelupisteessä 5.

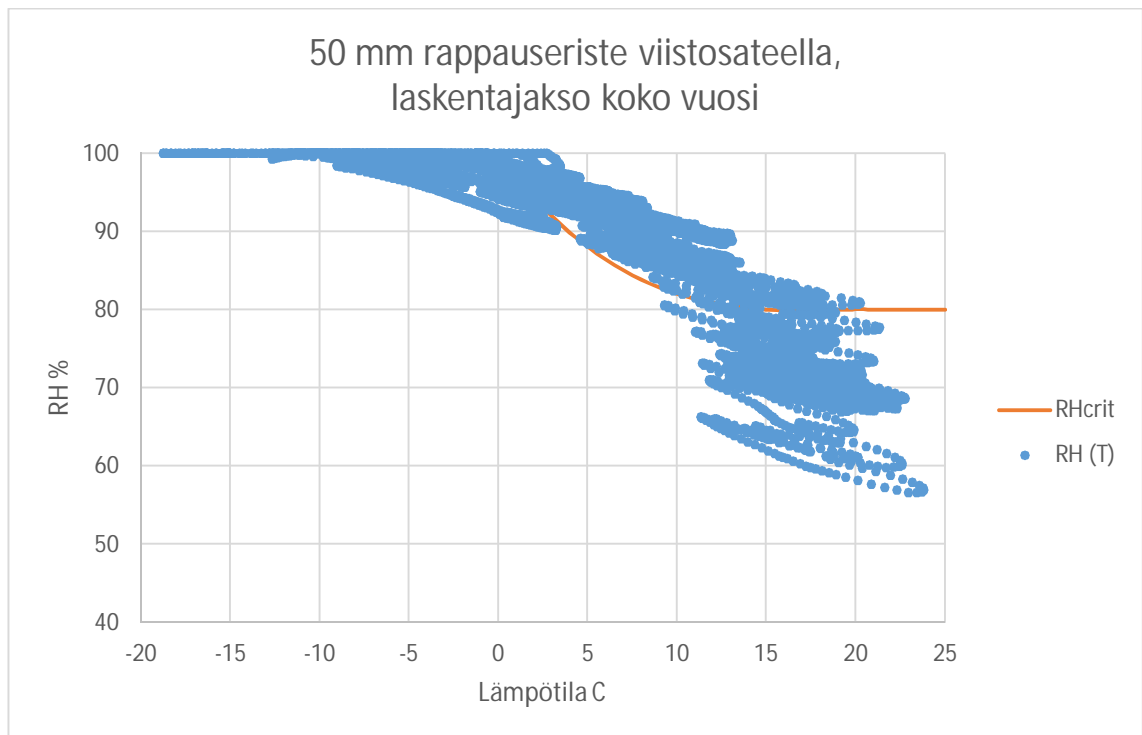


kuva 22. Absoluuttinen vesimäärä tarkastelupisteessä 5.

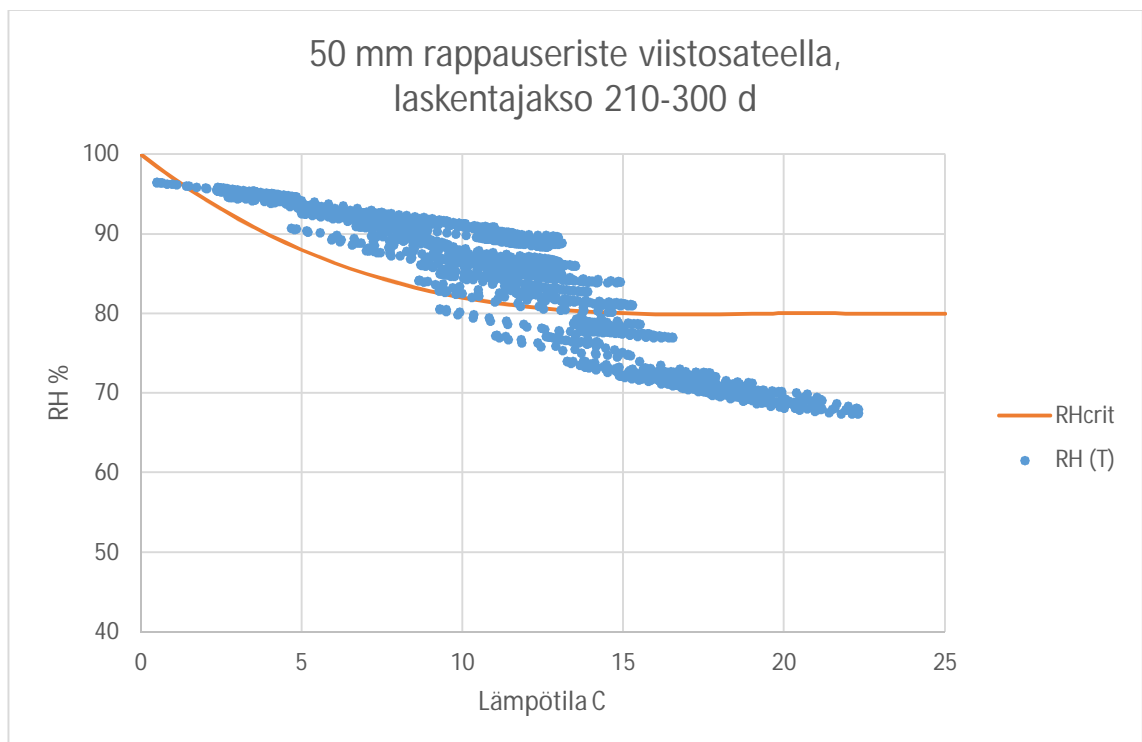


kuva 23. RHcrit tarkastelupisteessä 5.

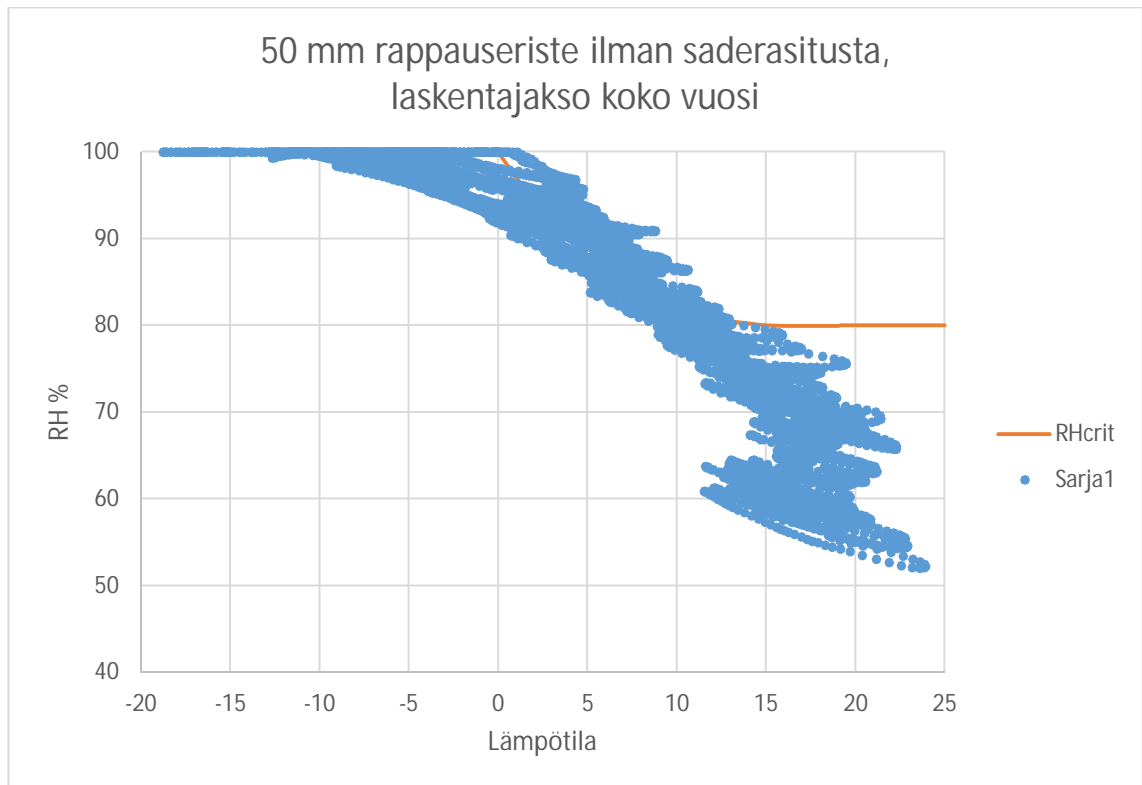
Laskentatulokset WUFI PRO –ohjelmistolla



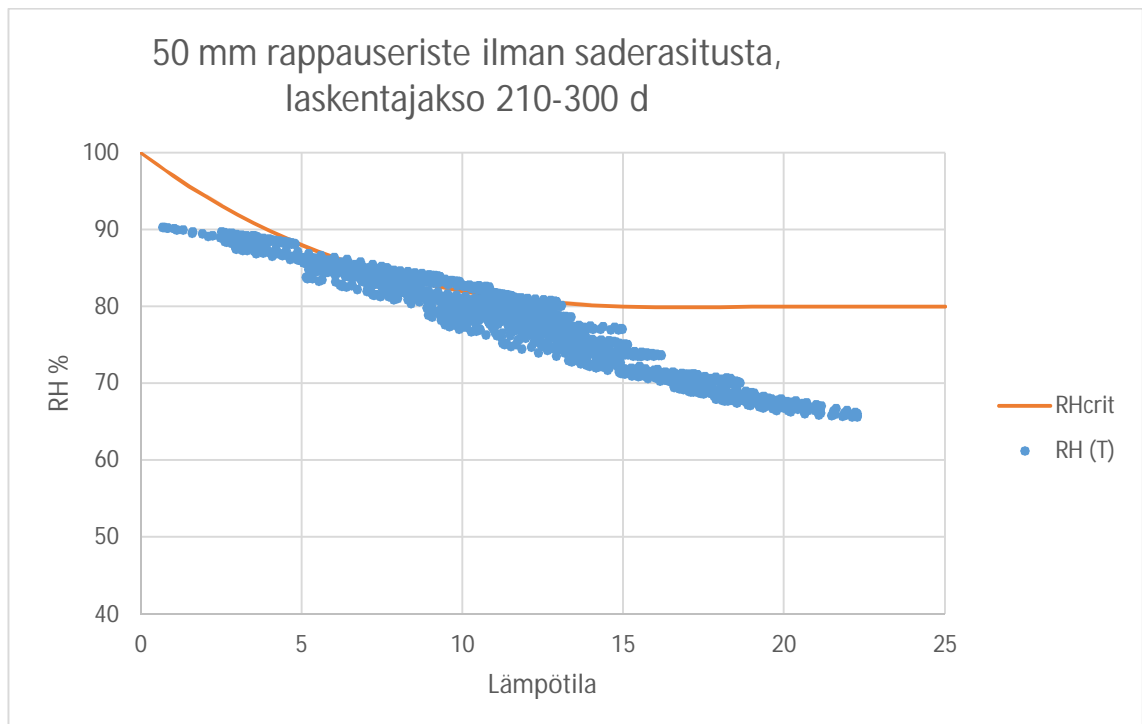
Kuva 1. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



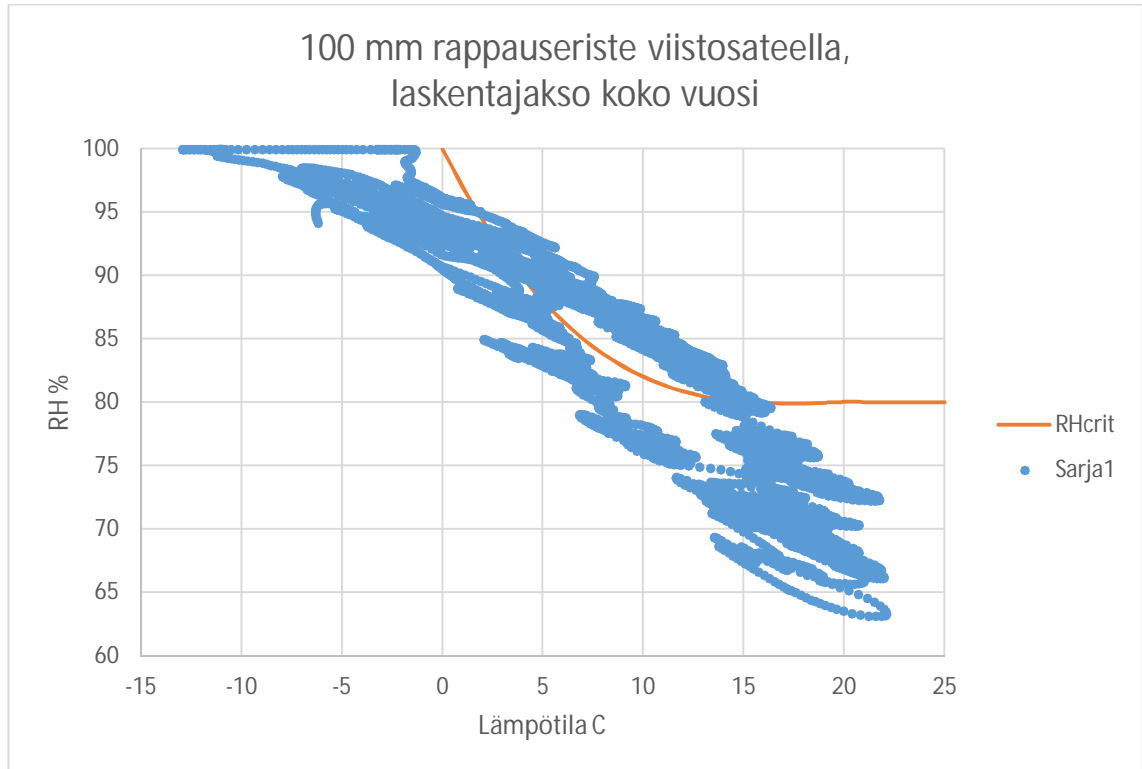
Kuva 2. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



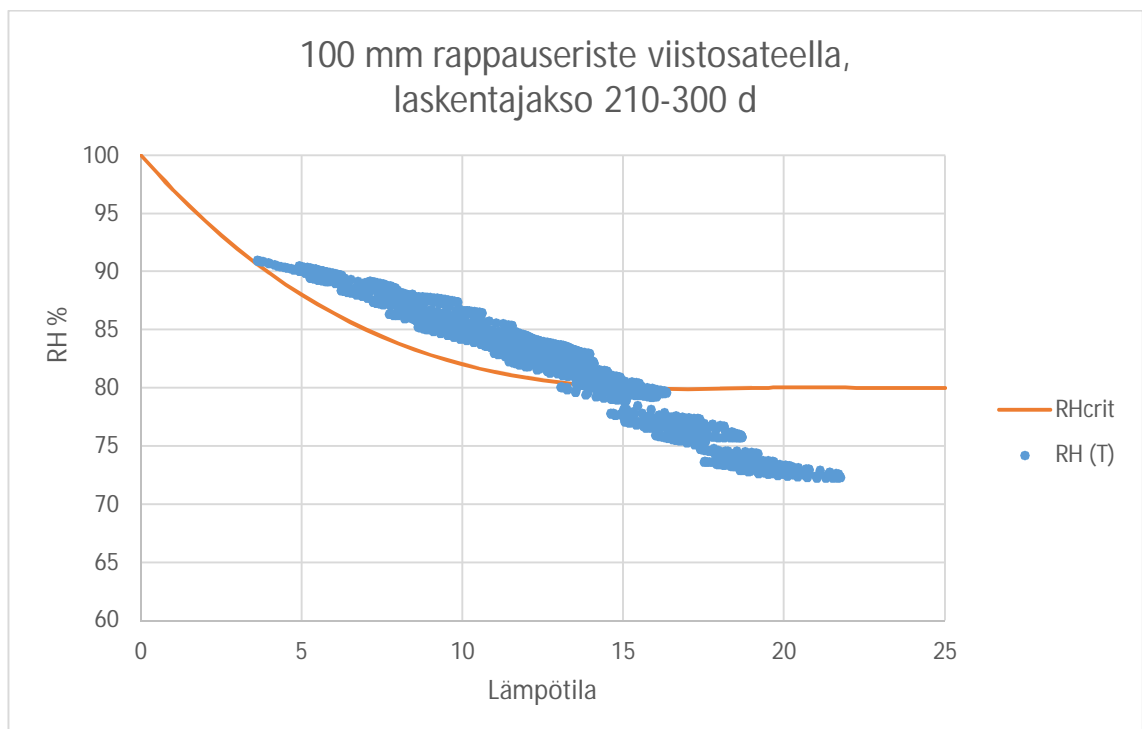
Kuva 3. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



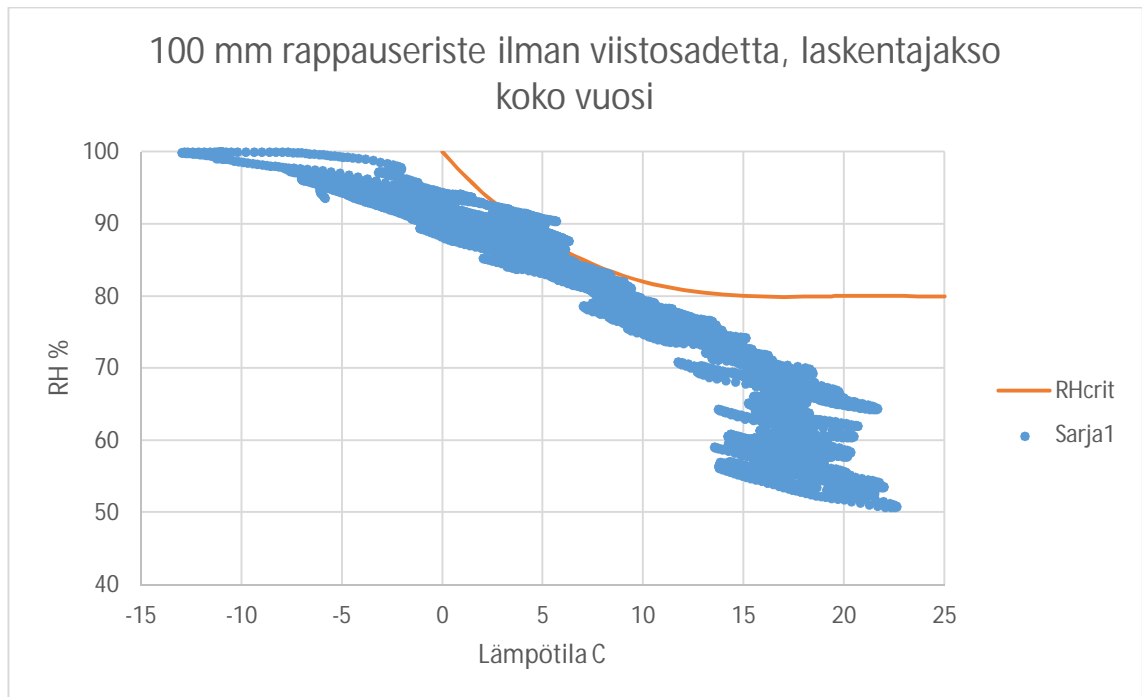
Kuva 4. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



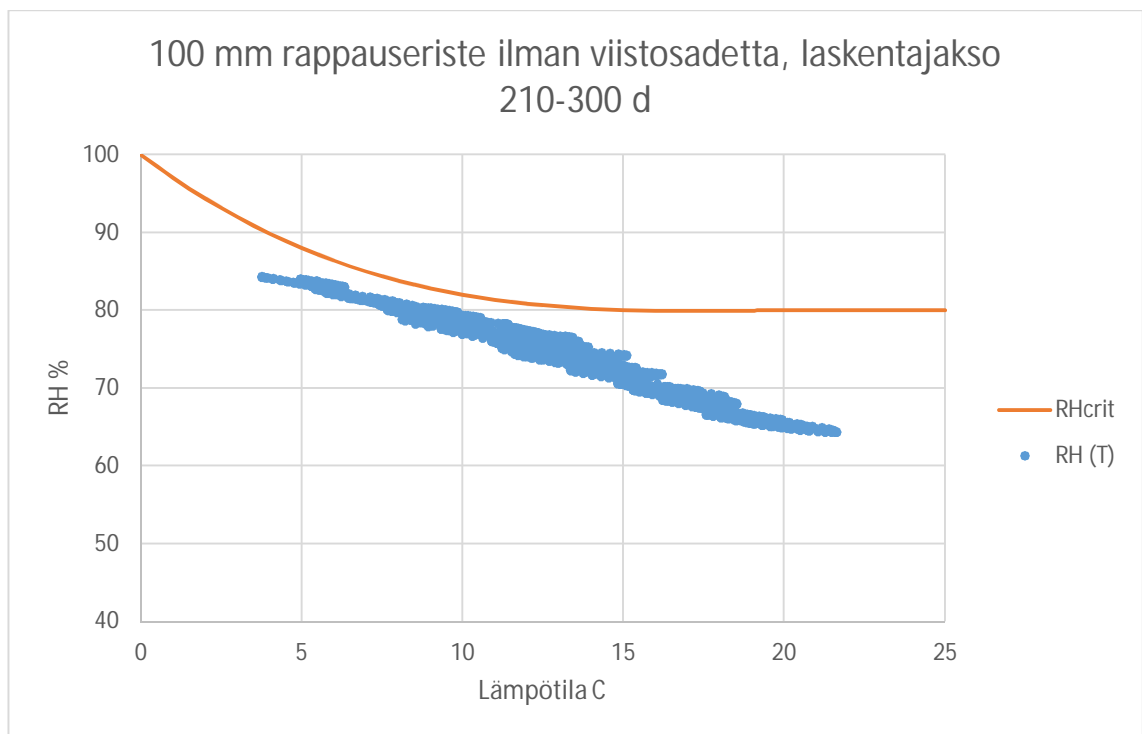
Kuva 5. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



Kuva 6. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



Kuva 7. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.



Kuva 8. RHcrit tarkastelupiste 1 WUFI.