



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Valesokkeli- ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen mallintaminen

Pekka Ruutikainen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2017
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Talorakennustekniikka

RUUTIKAINEN PEKKA

Valesokkeli- ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen mallintaminen

Opinnäytetyö 62 sivua, joista liitteitä 20 sivua
Huhtikuu 2017

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, mallintaa sekä analysoida peruskorjauksen alla olevan rakennuksen valesokkeli- ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa Wufi-simulointiohjelmalla ja selvittää rakenteen mahdolliset kosteustekniset riskit simulointitulosten pohjalta. Valesokkelirakenteeseen asennettiin myös kosteudenseurantalaitteisto, ja näitä mittauksia on tarkoitus verrata tämän työn lopputuloksiin. Työ tehtiin osana julkisen rakennuksen peruskorjaushanketta Wise Group Finland Oy:lle.

Rakenteen kosteusteknistä toimintaa tutkittiin kahdessa osassa: ensimmäisessä osassa tarkasteltiin ulkoseinärakennetta ja toisessa osassa tutkittiin koko valesokkelirakennetta. Työssä käytettävät rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet saatiin simulointiohjelman materiaalikirjastosta, tuotetoimittajilta sekä rakennusfysiikan julkaisuista. Mallinnuksien ulkoilmaston olosuhteina käytettiin TTY:n ja Ilmatieteenlaitoksen kehittämää rakennusfysikaalisia testivuotia. Mallinnukset toteutettiin nykyilmaston sekä tulevaisuuden oletetun ilmaston olosuhteilla. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin Suomen standardien mukaisia arvoja. Mallinnukset toteutettiin kahdella eri sisäpuolisella eristevaihtoehdolla. Simulointitulosten analysoimisen apuvälineenä käytettiin VTT:n ja TTY:n kehittämää homemallin laskentakaavaa.

Simulointien lopputulokset osoittivat, että valesokkelirakenteeseen muodostuu kastepiste rakenteen ulko-osiin betoniulkokuoren sekä lämmöneristeen väliseen tuulettumattomaan ilmväliin. Rakennetta tarkasteltiin simulointiohjelmassa myös siten, että ilmväliin oletettiin pieni ilmanvaihtuvuus, jolloin se toimi kosteusteknisesti paremmin. Rakenteen tuuletuksen parantaminen vaatisi sokkelirakenteen vedeneristeen rei'ittämistä. Peruskorjauksen aikana toteutettavat muut korjaustyöt, kuten salaojituksen parantaminen, vähentävät sokkelirakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta merkittävästi ja siten parantavat sen kosteusteknistä toimintaa nykyiseen tilanteeseen verrattuna.

Kosteudenseurantalaitteisto asennettiin rakennukseen kolmeen eri pisteeseen. Mittauspisteet valittiin tiloihin, joissa oli havaittu kosteusvaurioita ennen peruskorjausta. Todellisia mittauksia voidaan verrata tämän työn tuloksiin vasta kun rakennuksen sisäilman kosteusolosuhteet ovat tasaantuneet vastaamaan käytönaikaista tilaa. Oletettavasti mittauksista voidaan tehdä samansuuntaisia johtopäätöksiä rakenteen toiminnasta.

Asiasanat: wufi, korjausrakentaminen, rakennusfysiikka, valesokkeli

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Specialization in Building Construction

RUUTIKAINEN PEKKA

Heat and Moisture Transport Modelling in the Facade and Foundation wall

Bachelor's thesis 62 pages, appendices 20 pages

April 2017

The purpose of this thesis was to research, model and analyze heat and moisture transfer in the facade and foundation wall using Wufi-software and to find out the possible risk points of the structure. Moisture sensors were also installed in the structure and the sensors' results will be compared with the results of this thesis. The thesis was made as a part of a public building renovation project for Wise Group Finland Oy (Ltd).

The simulations were divided into two parts. In the first part, only the facade was simulated. In the second part, the facade and foundation wall were simulated. Building material's humidity and heat features were presumed from the material library of Wufi-software, the material deliverers and the releases of heat and moisture transport. Simulations' outdoor conditions were presumed exploiting the structural physical test years developed by TUT and The Finnish Meteorological Institute. Simulations were made in current outdoor conditions and in predicted future outdoor conditions. For the indoor excess moisture values of Finnish standard were used. The simulation results were also analyzed using VTT-TUT mold growth model formulas.

Simulation results showed that the critical point of the structure was situated in a non-air part between the outer concrete wall and the insulation. Simulations were also made by assuming a little ventilation in the structure. With ventilation, the structure was working building physically better. Although, ventilation required perforating the waterproofing of the foundation wall. Other repair works, like repairing underdrainage, are decreasing moisture charge significantly and improving moisture technical circumstances, compared the previous structure.

Moisture sensors were installed in three different point of the building. Measuring points were selected in areas, where moisture damage had been found before renovation. Sensors' results will be compared with the results of this thesis. Presumably, the same conclusions can be made from both results, simulated and measured.

Key words: wufi, renovation, building physics, foundation wall

SISÄLLYS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 6 |
| 2 | LÄMPÖ JA KOSTEUS..... | 7 |
| 2.1 | Lämpö ja kosteus korjausrakentamisessa | 7 |
| 2.2 | Lämmön siirtyminen..... | 7 |
| 2.2.1 | Johtuminen | 7 |
| 2.2.2 | Konvektio..... | 7 |
| 2.3 | Kosteuden lähteet ja siirtyminen..... | 8 |
| 2.3.1 | Vesihöyryn diffuusio..... | 9 |
| 2.3.2 | Kapillaarinen vedenliike | 9 |
| 2.3.3 | Kosteuden konvektio..... | 10 |
| 3 | HOMEVAURIOT RAKENNUKSISSA | 11 |
| 3.1 | Kosteus- ja homevauriot | 11 |
| 3.2 | Homeen kasvun laskennallinen tarkastelu | 11 |
| 4 | LASKENTAMALLI | 17 |
| 4.1 | Wufi-ohjelma | 17 |
| 4.2 | Tarkasteltava rakenne | 19 |
| 4.2.1 | Tarkastelun lähtökohdat | 19 |
| 4.2.2 | Tarkastelun toteutus ja raja-arvot..... | 21 |
| 4.2.3 | Tarkastelupisteet | 21 |
| 4.3 | Ulko- ja sisäilman olosuhteet..... | 23 |
| 4.3.1 | Ulkoilman olosuhteet | 23 |
| 4.3.2 | Viistosade..... | 25 |
| 4.3.3 | Sisäilman olosuhteet | 26 |
| 4.4 | Maaperän olosuhteet | 28 |
| 4.5 | Rakennusmateriaalien ominaisuudet ja alkuolosuhteet | 29 |
| 5 | LASKENTATULOSTEN TARKASTELU | 31 |
| 5.1 | Alkuperäinen ulkoseinärakenne..... | 31 |
| 5.2 | Korjattu ulkoseinärakenne | 32 |
| 5.3 | Korjattu valesokkelirakenne | 34 |
| 5.4 | Yhteenveto laskentatuloksista..... | 35 |
| 6 | LÄMPÖ- JA KOSTEUSMITTAUKSET RAKENTEESSA | 36 |
| 6.1 | Jatkuvan kosteudenseurannan laitteisto | 36 |
| 6.2 | Mittauspisteet ja antureiden asennus | 36 |
| 6.3 | Todellisten mittaustulosten arvioiminen..... | 37 |
| 7 | YHTEENVETO | 39 |
| 8 | LÄHTEET | 41 |

| | |
|--|----|
| LIITTEET | 43 |
| Liite 1. Materiaaliominaisuudet | 43 |
| Liite 2. VTT-TTY homemallin laskentakaavojen tulokset | 44 |
| Liite 3. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat | 46 |

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, mallinnetaan ja analysoidaan valesokkeli- ja ulkoseinä-rakenteen kosteusteknistä toimintaa Wufi-simulointiohjelmalla sekä VTT-TTY home-mallin laskentakaavojen avulla. Työ tehdään osana julkisen rakennuksen peruskorjauksen suunnittelua. Rakenteeseen asennetaan korjauksen yhteydessä kosteudenseurantalaitteisto, jonka mittaustuloksia on tarkoitus verrata tämän työn lopputuloksiin. Vertailua ei tehdä tämän opinnäytetyön yhteydessä.

Kosteusteknisten simulointien tekeminen on tärkeää sekä uudis- että korjausrakentamisessa, mutta siinä esiintyy myös monia haasteita. Simulointiin valittavat alkuarvot vaativat hyvää perehtymistä itse kohteeseen, mutta myös simulointiohjelmaan sekä käytettyihin materiaaleihin. Kaikkia materiaaleja ei ole tarjolla simulointiohjelmien kirjastoissa valmiina, eikä tuotetoimittajalla ole välttämättä tarjota riittävän kattavaa tutkimustietoa materiaalin lämpö- ja kosteusteknisistä ominaisuuksista. Rakennusfysikaalisten laskelmien tekeminen on hankalaa, koska niille ei ole asetettu samanlaisia varmuustekijöitä, kuten esimerkiksi lujuslaskelmille. Vaikka laskentamalli näyttää toimivalta, saattavat kuitenkin itse rakennuspaikan ilmasto-olosuhteet poiketa huomattavasti mallissa oletetuista olosuhteisiin. Suunnittelijan onkin myös oltava tietoinen käytännön tasolla vallitsevista sääolosuhteista. Tämän työn simulointimallin rakentamisessa on hyödynnetty viime vuosien aikana julkaistuja rakennusfysikaalisten tarkastelujen ohjeita sekä tutkimuksia.

Työssä tutkitaan sekä alkuperäisen että korjatun valesokkelirakenteen kosteusteknistä toimintaa. Korjatun rakenteen toimintaa tutkitaan kahdella eri eristevaihtoehdolla. Alkuperäisen rakenteen mallintamisessa ei ole huomioitu rakenteeseen vaikuttavia ulkopuolisia kosteusrasituksia, jotka ovat johtuneet pääasiassa tontin puutteellisesta kuivatuksesta. Työn lopputuloksena saadaan käsitys, kuinka tutkittava rakenne toimii ja mitkä ovat sen kosteustekniset puutteet ja kuinka ne tulisi huomioida rakennetta korjatessa. Lopputulokset valitulle eristevaihtoehdolle esitetty kokonaisuudessaan tämän työn lopussa.

Työn tilaajana on Wise Group Finland Oy, joka on suomalainen yritys. Yritys tarjoaa talonrakennusalan konsultointi-, suunnittelu- ja rakennuttamispalveluja. Työn aikana yrityksen käyttöön kehitettiin myös rakennusfysikaalisten tarkasteluiden raportointiohjeistus sekä Wufi-ohjelman käyttöopas.

2 LÄMPÖ JA KOSTEUS

2.1 Lämpö ja kosteus korjausrakentamisessa

Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta on haastava osa-alue korjausrakennesuunnittelussa, koska siinä joudutaan toimimaan alkuperäisten rakenteiden puitteissa ja rajoituksissa. Korjattavat rakenteet voivat olla kosteustekniseltä toiminnaltaan virheellisiä tai riskirakenteita, jolloin suunnittelussa ja toteutuksessa joudutaan yleensä tekemään kompromisseja. Kaikkia nykypäivän määräyksiä ei tällöin pystytä noudattamaan ilman että ne aiheuttavat kohtuuttomia lisäkustannuksia tai ratkaisuja. Rakenteiden korjaamisessa on otettava huomioon lopputulos, jonka täytyy olla rakennuksen käyttäjälle turvallinen ja terveellinen. (RIL 255-1-2014, 50.)

2.2 Lämmön siirtyminen

Lämpö on atomien tai molekyylien liike-energiaa. Lämpö voi siirtyä rakenteessa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla (Siikanen 2011, 40). Tässä opinnäytetyössä käsitellään lämmön siirtymistä johtumalla ja konvektiolla.

2.2.1 Johtuminen

Johtuminen eli konduktio tarkoittaa kosketuksissa olevien kappaleiden välistä lämpöenergian siirtoa, mikä johtuu molekyylien sisäisestä värähtelyliikkeestä. Lämpöenergia pyrkii tasapainoon myös kappaleen sisällä, jossa kappaleen kuumemmasta päästä johtuu lämpöenergiaa kohti kappaleen kylmää päätä. (Hens 2012, 14.)

2.2.2 Konvektio

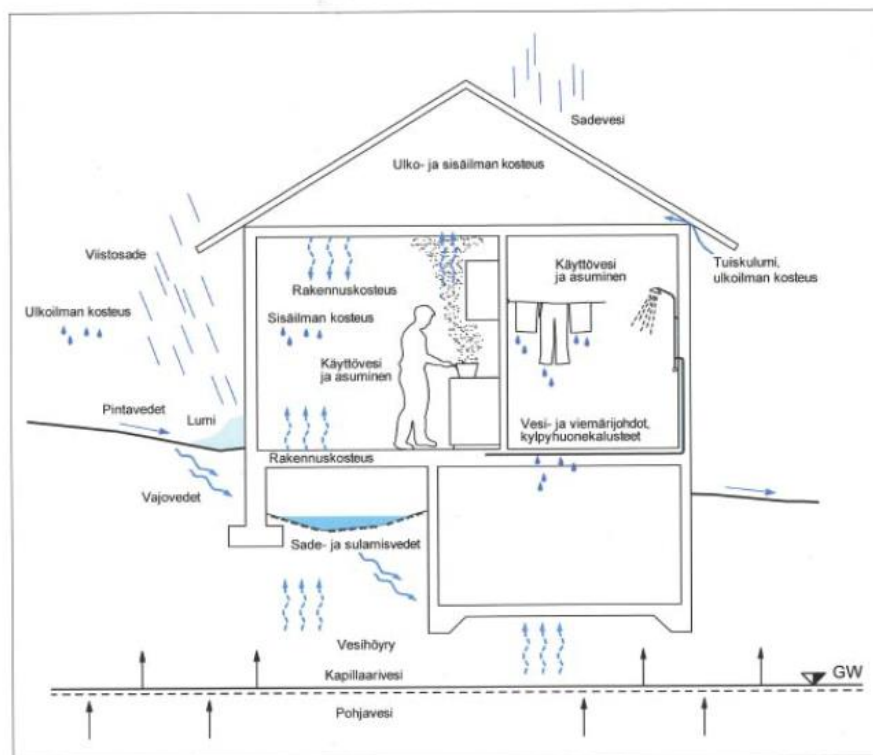
Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana paine-eron vaikutuksesta. Konvektiota on kahdenlaista: pakotettua ja luonnollista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu ulkopuolisen voiman, esimerkiksi tuulen tai koneellisen ilmanvaihdon, vaikutuksesta. Luonnollisessa konvektiossa liikkeen saa aikaan lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero, mutta täysin puhdasta konvektiota esiintyy harvoin. (Siikanen 2011, 41.)

2.3 Kosteuden lähteet ja siirtyminen

Rakennukseen kohdistuu sekä ulkoisia että sisäisiä kosteusrasituksia. Ulkoisia kosteusrasituksia ovat esimerkiksi vesi- ja lumisade, maaperän kosteus, ilman kosteus, pintavesi ja pohjavesi. Ulkoisiin kosteusrasitukseen vaikuttavat myös muut luonnonilmiöt, kuten tuuli. Vesisateen ja voimakkaan tuulen yhteisvaikutuksesta syntyy viistosade, joka rasittaa erityisesti pystysuoria pintoja.

Sisäisiä kosteusrasituksia ovat esimerkiksi rakennekosteus ja rakennuksen käyttäjistä johtuva kosteus, joka johtuu arkipäivän toiminnoista. Rakennekosteus on rakennusmateriaaleihin valmistuksen, varastoinnin, kuljetuksen tai työmaa-aikana päätyntä ylimääräistä kosteutta. Työmaa-aikainen kosteudenhallinta on tärkeää, koska epäonnistuessaan se lisää rakennekosteutta sekä hidastaa rakenteiden kuivumista. Pahimmissa tapauksissa se voi johtaa kosteus- ja homevaurioihin. (Siikanen, 78.)

Kosteus voi siirtyä rakenteessa diffuusiolla (vesihöyryn), konvektiolla, kapillaarisesti sekä painovoiman seurauksena. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kosteuden siirtymistä diffuusiolla, konvektiolla sekä kapillaarisesti.



KUVA 1. Rakennusta rasittavat kosteuslähteet (RIL 255-1-2014, 39)

2.3.1 Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio tarkoittaa tilannetta, jossa epämääräisesti jakaantuneen kaasuseoksen molekyylit pyrkivät muodostamaan tasaisesti jakaantuneen kaasuseoksen. Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoitetaan vesihöyryn diffuusiota, mutta se pätee yhtä lailla myös muilla kaasuilla, kuten hiilidioksidilla ja hapella. (Siikanen 2011, 70 – 71.)

Vesihöyryn diffuusio tapahtuu aina suuremmasta ilman vesihöyryn osapaineesta pienempään. Vesihöyryn kulkeutuminen seinärakenteeseen estetään riittävän vesihöyrytiivillä kerroksella. Kerroksen on sijoitettava eristeen lämpimällä puolella, jotta kosteutta ei pääse tiivistymään rakenteeseen. Seinärakenteen vesihöyryvastuksen tulee siis pienentyä kylmään tilaan päin mennessä. Suunnittelussa on aina huomioitava, että tiivis kerros on yhtenäinen myös rakenneliittyvien kohdalla, jotta kosteutta ei pääse niiden kautta siirtymään rakenteeseen. (Siikanen 2011, 70 – 71.)

2.3.2 Kapillaarinen vedenliike

Kapillaarivirtaus on kosteuden siirtymistä huokoisissa materiaaleissa ja sen aiheuttaa huokoisalipaineen paikalliset erot aineessa. Rakenne ja sen eri ainekerrokset pyrkivät kapillaariseen tasapainokosteuteen, mikä synnyttää kapillaarisen vedenliikkeen. (Siikanen 2011, 68.)

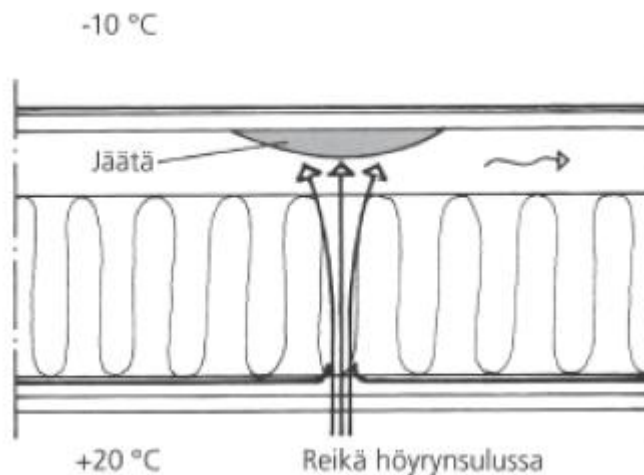
Rakenteiden suunnittelussa kosteuden kapillaarinen siirtyminen materiaaliin estetään esimerkiksi bitumikermillä, bitumisivelyllä tai jollain muulla riittävän tiiviillä kerroksella. Maaperässä kapillaarisen nousuveden suuruus riippuu maalajin karkeudesta. Maanvaraisissa rakenteissa kapillaarinen nousuvesi katkaistaan maanvaraisen rakenteen alapuolelle tehtävällä karkealla kerroksella, jota kutsutaan kapillaarikatkoksi. (Siikanen 2011, 68.)

Rakentamisessa kapillaarinen vedenliike käsitetään yleensä vain maaperästä nousevaksi kosteudeksi. Kapillaarista vedenliikettä voi tapahtua myös muihin suuntiin, esimerkiksi vaakasuunnassa ulkoseinärakenteessa viistosateen aiheuttamana. (Björkholtz 1997, 53.)

2.3.3 Kosteuden konvektio

Konvektiossa kosteus siirtyy liikkuvan ilmavirran mukana ilmavirran liikkussa rakennuksen eri puolilla vallitsevien kokonaispaine-erojen vaikutuksesta. Ilmanpaine-eroja aiheuttavat tuuli, lämpötilaerot sekä ilmanvaihtojärjestelmät. Konvektiovirtaukset tapahtuvat rakenteessa olevien reikien, rakojen sekä huokoisten materiaalien läpi. Reikien ja rakojen kautta tapahtuvat konvektiovirtaukset ovat kuitenkin moninkertaiset huokoisiin materiaaleihin nähden. (Björkholtz 1997, 57-58.)

Kosteuden konvektion hallinta on erittäin tärkeää kylminä kuukausina, jolloin sisä- ja ulkoilman välillä vallitsee suuri lämpötilaero. Lämmin ilma pystyy sitomaan itseensä suuremman määrän absoluuttista kosteutta kuin kylmä ilma. Tästä syystä kosteus saattaa tiivistyä eli kondensoitua ja kerääntyä rakenteen ulko-osiin. Sisältäpäin tuleva ilmavirtaus voi kuljettaa rakenteeseen moninkertaisen määrän kosteutta verrattuna vesihöyryn diffuusioon. Ulkoseinärakenteen läpi kulkevat konvektiovirtaukset estetään rakenteen sisäpintaan asennettavalla riittävän tiiviillä rakennekerroksella esimerkiksi höyrynsulkumuovilla (Siikanen 2011, 71-72.)



KUVA 2. Konvektio ja kosteuden tiivistyminen tasakattoisen rakenteen ulko-osiin puutteellisen tuuletuksen vaikutuksesta. (Siikanen 2011, 71).

3 HOMEVAURIOT RAKENNUKSISSA

3.1 Kosteus- ja homevauriot

Kasvaakseen home tarvitsee vain vettä, koska ravinteita homeen kasvulle on riittävästi ilmassa ja pinnoilla. Hometta voi siis esiintyä minkä tahansa materiaalin pinnalla, kunhan sille on tarjolla vettä. Silmin nähtävä homekasvusto on riittävä syy epäillä kosteusvauriota. Pelkkä näkyvän homeen poisto ei riitä, koska homekasvusto uusiutuu, jos alkupeleistä vauriota ei korjata.

Homeen kasvun löytäminen on yleensä haastavaa, koska vauriot saattavat olla rakenteen sisällä. Homeen kasvu voidaan todeta myös huoneilmaan tehtävillä mittauksilla, jossa tutkitaan homeitiöitä. Tämän tutkimuksen perusteella ei kuitenkaan pystytä aina sulkemaan pois homeen mahdollisuutta, koska homeesta irtoaa itiöitä vain aika ajoin.

Homeinen ilma ei ole ihmisellä terveellistä, mutta se ei ole ainut syy sisäilmaongelmiin. Sisäilmasto on tärkeä rakennuksen ympäristötekijä, mikä vaikuttaa tilan käyttäjien terveyteen ja viihtyvyyteen. Tämän takia sisäilmasta tuleviin valituksiin tai havaittuihin puutteisiin on aina puututtava välittömästi ja ongelmia on tutkittava asiaan kuuluvien menetelmin. (Sisäilmayhdistys ry, 2017)

3.2 Homeen kasvun laskennallinen tarkastelu

Rakenteissa tapahtuvaa mikrobivaurioiden syntymistä voidaan arvioida laskennallisesti VTT-TTY homemallin laskentakaavojen avulla. VTT on kehittänyt vuonna 1999 ensimmäisen version homemallista, joka perustuu puurakenteille tehtyihin laboratorio- ja kenttäkokeisiin. Kokeissa homeenkasvua tarkasteltiin materiaalin pinnalla aistinvaraisesti sekä mikroskoopilla. VTT ja TTY ovat yhteistyössä kehittäneet myös parannellun version homemallista: VTT-TTY homemallin, jossa mikrobivaurioiden kehittymistä voidaan arvioida myös muille materiaaleille. (RIL 255-1-2014, 60.)

Homeindeksi M [-] on vertailusuure, joka kuvaa materiaalin homehtumista. Homeindeksi vaihtelee arvojen 0 ja 6 välillä riippuen materiaalista, lämpötilasta sekä suhteellisesta kosteudesta. Homeindeksi kuvaa vain homeen kokonaismäärää materiaalin pinnalla, eikä siitä voida päätellä homeen merkittävyyttä esimerkiksi sisäilmaongelmille. Homeindeksi

lasketaan tunnin välein määritettyjen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. (RIL 255-1-2014, 60.) Tässä työssä nämä arvot saatiin Wufi -simulaatioiden tuloksista. Tarkastelun lähtökohtana pidetään, että homeindeksi ei saa ylittää arvoa 1 missään tarkastelupisteessä (RIL 255-1-2014, 64). Korjausrakentamisessa tämä ei ole aina mahdollista johtuen alkuperäisistä rakenneratkaisuista. Taulukossa 1 on esitetty homeindeksin luokitusperusteet.

TAULUKKO 1. Homeindeksin luokitusperusteet (RIL 255-1-2014, 60)

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

Materiaalit on jaettu homehtumisen kannalta neljään homehtumisherkkyyssluokkaan HHL (RIL 255-1-2014, 61). Materiaalin homehtumisherkkyyys vaikuttaa laskennassa erilaisten kertoimien kautta. Homehtumisherkkyyssluokat on määritetty laskentamallin kehitystyön yhteydessä. Homehtumisherkkyyssluokat eri materiaaleilla on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Homehtumisherkkyyssluokat eri rakennusmateriaaleille (RIL 255-1-2014, 61)

| Homehtumisherkkyyssluokka | Rakennusmateriaali |
|-----------------------------------|---|
| HHL 1 Hyvin herkästi homehtuva | Karkeasahattu mänty ja kuusi, mitallistettu mänty |
| HHL 2 Herkästi homehtuva | Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy |
| HHL 3 Kohtalaisen kestävä | Mineraalivilla, muovipohjaiset materiaalit, tiilet, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut betoni |
| HHL 4 Kestävä | Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit |

Mikrobivaurioiden syntymiseen vaaditaan homeen kasvulle suotuisat lämpö- ja kosteusolosuhteet. Kriittisen kosteuden arvon RH_{crit} määritetään eri lämpötiloille, kun lämpötila vaihtelee 0 °C ja 20 °C välissä. Lämpötilan ollessa yli 20 °C, määritetään RH_{min} arvo homehtumisherkkyyssluokan mukaisesti taulukosta 2. (Mäkitalo 2012, 60.)

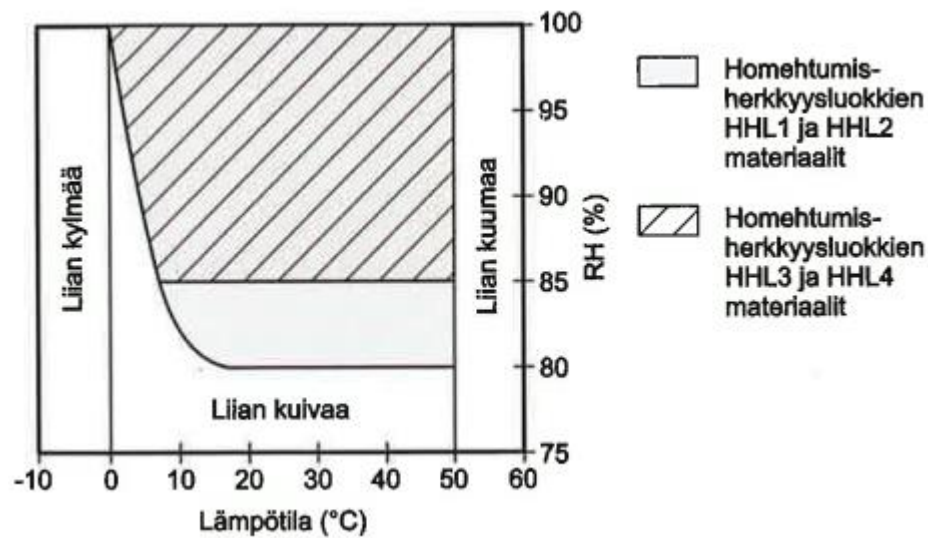
$$RH_{crit} = \begin{cases} 0,16T^2 - 3,13T + 100, & \text{kun } T \leq 20 \text{ °C} \\ RH_{min}, & \text{kun } 20 \text{ °C} < T < 50 \text{ °C} \\ 100 \%, & \text{kun } 0 \text{ °C} \geq T \geq 50 \text{ °C} \end{cases} \quad (3.1)$$

missä,

RH_{crit} on alhaisin suhteellisen kosteuden arvo, missä homeen kasvu on mahdollista

RH_{min} on suhteellisen kosteuden minimiarvo, joka vaaditaan homeenkasvun alkamiseen taulukon 3 mukaisesti.

Lämpötilan ollessa alle 0°C tai yli 50°C olosuhteet ovat mikrobien kasvulle epäedulliset ja homeen kasvu joko hidastuu tai pysähtyy kokonaan kuvan 1 mukaisesti. (RIL 255-1-2014, 61.)



KUVIO 1. Homeen kasvun kannalta suotuisat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet eri homehtumisherkkyyssuokissa (RIL 255-1-2014, 61).

Homeindeksi voidaan laskea alla esitetyllä kaavalla 3.2, jossa aika on mitattu päivissä. Yhtälö ottaa huomioon vuorokauden ajanjaksolla keskimääräisen homeindeksin arvon. Korjauskertoimilla k_1 ja k_2 huomioivat yhtälössä homeen kasvuun nopeutta ja homeen kasvun hidastumista, kun se lähestyy homeindeksin maksimiarvoa. (Mäkitalo 2012, 61.)

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 66,02)} k_1 k_2 \quad (3.2)$$

missä,

| | | |
|-------|----|---|
| T | on | lämpötila |
| RH | on | suhteellinen kosteus |
| k_1 | on | korjauskerroin homeen kasvunopeudelle |
| k_2 | on | korjauskerroin homeen kasvun hidastumiselle |

Laskentamallissa homeen maksimiarvo M_{\max} on riippuvainen olosuhteesta ja materiaalista. Materiaalin homehtumisherkkyyssuokka huomioidaan kertoimilla A, B ja C, jotka on esitetty taulukossa 3. (Mäkitalo 2012, 61.)

TAULUKKO 3. Laskennassa käytettävät kertoimet eri homehtumisherkkyyssluokille

| Homehtumisherkkyyssluokka | A | B | C | RH _{min} % |
|----------------------------|-----|---|-----|---------------------|
| HHL 1, Hyvin herkkä | 1 | 7 | 2 | 80 |
| HHL 2, Herkkä | 0,3 | 6 | 1 | 80 |
| HHL 3, Kohtalaisen kestävä | 0 | 5 | 1,5 | 85 |
| HHL 4, Kestävä | 0 | 3 | 1 | 85 |

Kaavalla 3.3 voidaan laskea homeindeksin maksimi-arvo eri lämpö- ja kosteusolosuhteissa materiaalin pinnalla. (Mäkitalo 2012, 61.)

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (3.3)$$

missä,

M_{max} on suurin mahdollinen homeindeksin arvo [-]

RH on suhteellinen kosteus [%]

A, B ja C ovat kertoimia, jotka huomioivat homeen maksimäärän eri homeenherkkyyssluokissa

Korjauskertoimet k_1 ja k_2 huomioivat homeen kasvun nopeuden. Kerroin k_1 huomioi materiaalin pinnan homehtumisnopeuden ja k_2 homeen kasvun hidastumista, kun homeindeksi lähestyy maksimi-arvoa 6 (Mäkitalo 2012, 61). Kertoimet vaihtelevat eri homehtumisherkkyyssluokissa. Kertoimet on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Korjauskertoimet eri homehtumisherkkyyssluokille

| Homehtumisherkkyyssluokka | Kerron k_1 , kun $M < 1$ | Kerroin k_1 , kun $M > 2$ |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| HHL 1, Hyvin herkkä | 1 | 2 |
| HHL 2, Herkkä | 0,578 | 0,368 |
| HHL 3, Kohtalaisen kestävä | 0,072 | 0,097 |
| HHL 4, Kestävä | 0,033 | 0,014 |

Korjauskertoimen k_2 määritetään seuraavalla kaavalla 3.4. Kerroin k_2 on riippuvainen edellisen tunnin homeindeksin arvosta sekä materiaalin pinnalla saavutettavasta homeindeksin maksimi-arvosta (Mäkitalo 2012, 61).

$$k_2 = \max[1 - \exp(2,3 \cdot (M - M_{max})), 0] \quad (3.4)$$

Laskentamallissa otetaan huomioon myös homeen taantuma kertoimella C_{mat} . Homeen taantuminen alkaa lämpötilan putoaa alle 0°C tai noustessa yli 50°C tai jos suhteellinen kosteus pudotessa alle kriittisen arvon (RIL 255-1-2014, 62). Taantumakertoimet perustuvat alun perin männyn pintapuulle määritettyyn taantumaan (Mäkitalo 2012, 62). Taantuma on jaettu materiaalin homehtumisherkkyyssuokkien neljään luokkaan ja ne on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Homeen taantumasta aiheuta kerroin eri homehtumisherkkyyssuokille

| Homehtumisherkkyyssuokka | Taantumaluokka | C_{mat} |
|----------------------------|---------------------|-----------|
| HHL 1, Hyvin herkkä | Voimakas taantuma | 0,5 |
| HHL 2, Herkkä | Merkittävä taantuma | 0,25 |
| HHL 3, Kohtalaisen kestävä | Vähäinen taantuma | 0,10 |
| HHL 4, Kestävä | Vähäinen taantuma | 0,10 |

Laskentakaavoja käyttäessä täytyy huomioida, että homeindeksin arvot eivät kuvaa homeen haitallisuutta, vaan homeen kasvun kokonaismäärään eri materiaalien pinnalla. Home-malli ei ota kantaa mahdollisiin terveyshaittoihin, joita ihmisille voi aiheutua homeesta. (RIL 255-1-2014, 65).

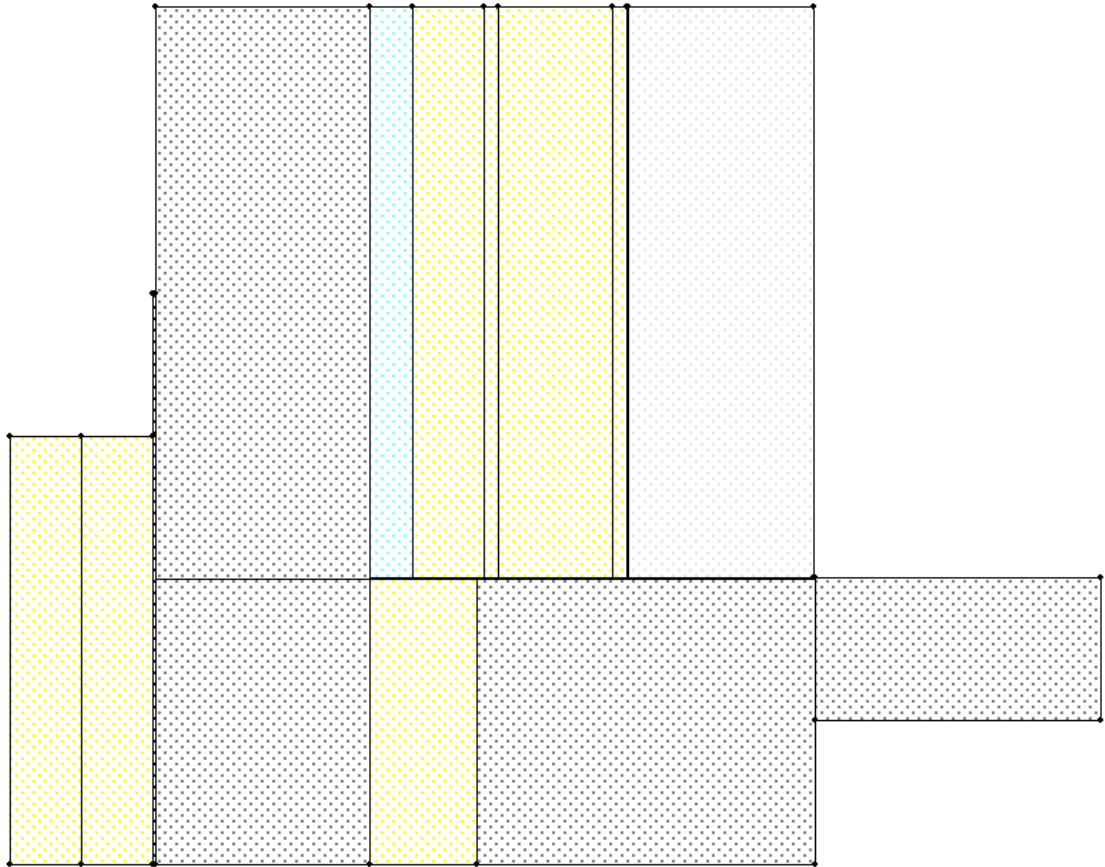
4 LASKENTAMALLI

4.1 Wufi-ohjelma

Tutkimuskohteen valesokkelirakenteen lämpö- ja kosteustekninen tarkastelu tehtiin Wufi Pro ja 2D -ohjelmilla. Wufi on lämpö- ja kosteustekninen laskentaohjelma, jossa rakenteiden lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä voidaan tarkastella muuttuvissa olosuhteissa eli epästationääritilassa (RIL 255-1-2014, 76-77). Wufi Pro -ohjelmalla rakenteita simuloidaan yhdessä ulottuvuudessa ja Wufi 2D -ohjelmalla taas kahdessa ulottuvuudessa. Wufi 2D -ohjelmalla pystytään siis simuloimaan myös rakenneliitosten toimintaa.

Wufi 2D -ohjelman käyttäminen aloitetaan rakenteen mallintamisella, johon se mallinnetaan eri kokoisilla suorakulmioilla. Jokaiselle suorakulmiolle määritetään materiaaliominaisuudet laskentaa varten. Materiaaliominaisuudet voidaan joko valita Wufin valmiista kirjastoista tai luoda ne itse esimerkiksi aikaisempia tutkimuksia tai tuotetoimittajien tietojen pohjalta. Materiaaleille määritetään myös alkulämpötila ja -kosteus, josta laskenta alkaa.

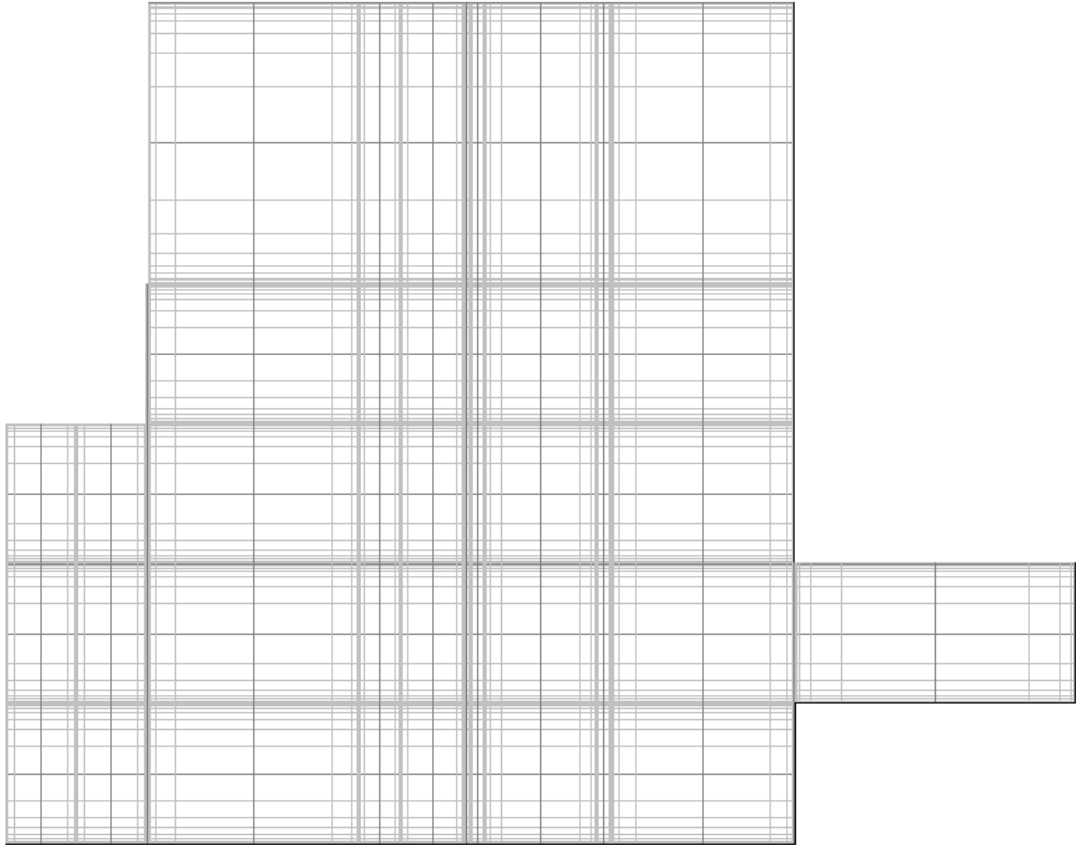
Ohuita materiaalikerroksia mallintaessa on huomioitava, että materiaalikerrosten paksuuden on oltava vähintään 1 mm. Jos materiaalin paksuutta joudutaan muuttamaan laskentamallia varten, on sen diffuusiovastuserrointa muutettava myös. Liian suuri tai pieni diffuusiovastuserroin saattaa aiheuttaa laskentatulosten vääristymistä ja siten johtaa virheellisiin päätelmiin rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta.



KUVA 3. Wufi 2D -ohjelmaan luotu rakenneleikkaus valesokkelirakenteesta

Wufi jakaa eri materiaalikerrokset x- ja y-suunnassa suorakulmisiin elementteihin. Kosteus- ja lämpöolosuhteet pysyvät vakiona aina yhden elementin sisällä eli olosuhteet vaihtuvat vain elementtien rajapinnoilla. Simuloinnin lopputuloksia voidaan tarkastella halutun elementin sisällä. Kuvassa 4 on esitetty rakenneleikkauksen elementtijako.

Elementtijakona voi käyttää laskentaohjelman oletusjakoa tai sen voi määrittää myös itse. Elementtijaon tihentäminen vaikuttaa laskennan tarkkuuteen, mutta samalla pidentää laskenta-aikaa. Tässä työssä käytettiin laskentaohjelman oletusjakoa molemmissa Wufi-ohjelmissa.



KUVA 4. Rakenneleikkauksen elementtijako Wufi 2D -ohjelmassa

Geometrian ja materiaaliominaisuuksien jälkeen rakenteelle luodaan rajapinnat eri olosuhteille, kuten ulko- ja sisäilmalle sekä maaperälle. Loput rajapinnat ovat adiabaattisia rajapintoja, joiden läpi ei kulje kosteus- ja lämpövirtoja.

4.2 Tarkasteltava rakenne

4.2.1 Tarkastelun lähtökohdat

Tässä työssä tarkastellaan peruskorjattavan rakennuksen valesokkelirakenteen kosteusteknistä toimintaa. Ennen rakennuksen peruskorjausta sen kosteusteknisiä puutteita ovat olleet

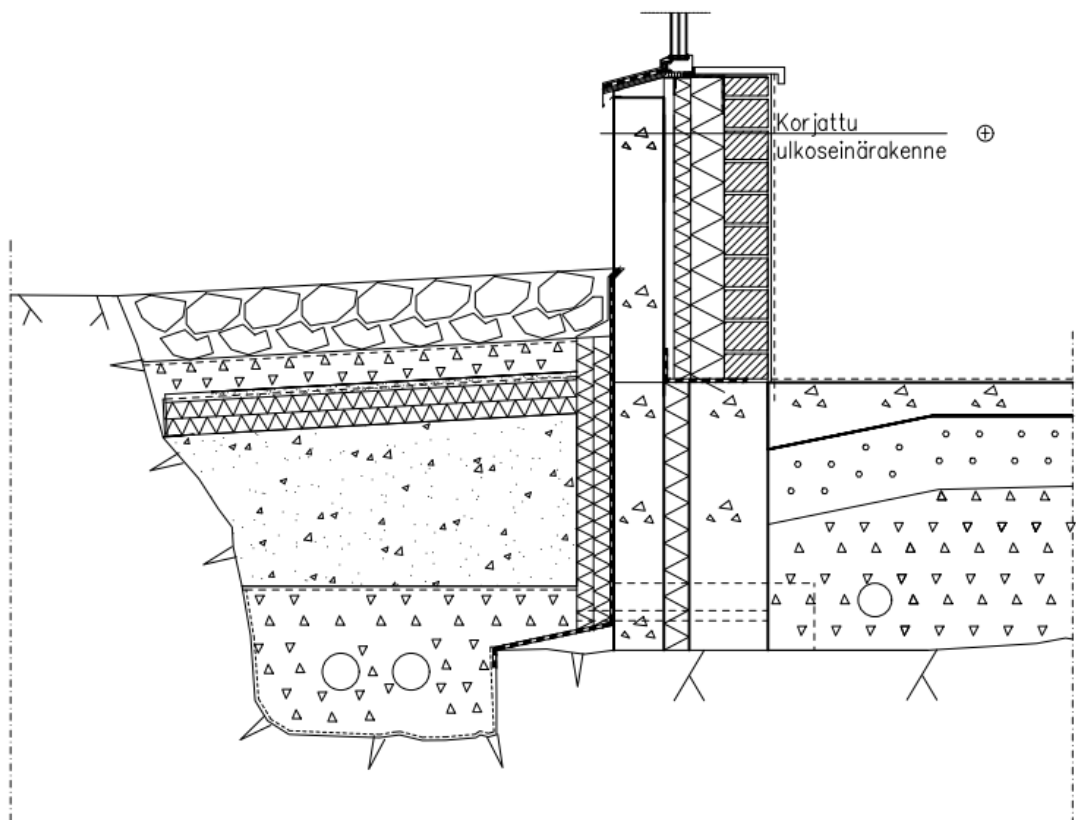
- rakennuksen pintavesien ohjaus
- rakennuksen salaojitus
- sokkelirakenteen vedeneristys
- ulkoseinärakenteen tuuletus
- ulkoseinärakenteen höyrynsulun tiiveys
- kapillaarisen vedennousun katkaiseva kerros.

Rakennus on perustettu suoraan peruskallion varaan. Alkuperäisessä tilanteessa rakennusta ympäröi vain kalliopinta, joten voidaan sanoa, että rakennus on upotettu kalliioon. Ennen rakennuksen peruskorjausta pintavedet olivat paikoitellen kerääntyneet suoraan sokkelirakennetta vasten ja siten lisänneet rakenteen kosteusrasitusta. Kuntotutkimuksen yhteydessä tehdyissä rakenneavauksissa havaittiin, että seinärakenteen eristeet ovat olleet paikoin pahoin kastuneita sekä niissä havaittiin mikrobikasvustoa.

Peruskorjauksen yhteydessä rakennuksen pintamaata louhitaan siten, että toimivan sala-oituksen asentaminen on mahdollista. Muita peruskorjauksen aikana valesokkelirakenteeseen kohdistuvia töitä ovat

- sokkelirakenteen vedeneristys
- ulkoseinärakenteen eristeiden uusiminen
- kapillaarisen vedennousun katkaiseminen sokkeliä pitkin bitumikermillä
- rakenneliittyminen tiivistäminen.

Tässä työssä tutkittava valesokkelirakenne on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Tarkasteltava valesokkelirakenne, korjattu rakenne

4.2.2 Tarkastelun toteutus ja raja-arvot

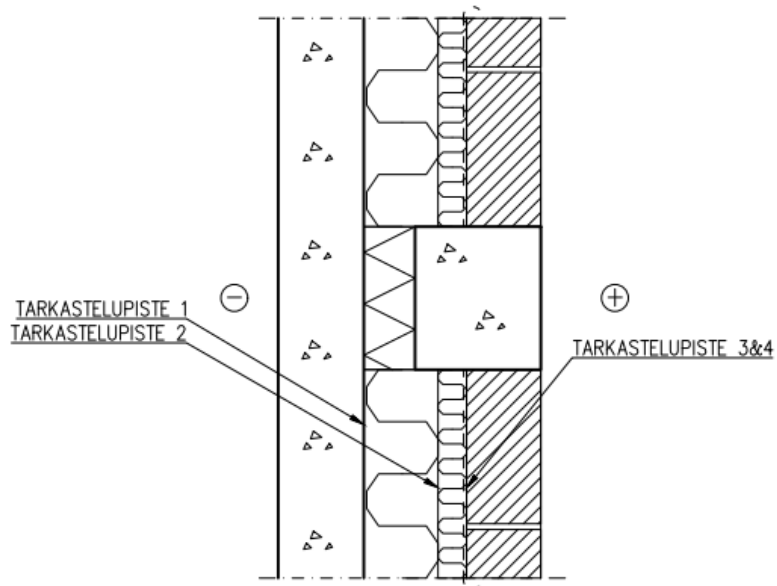
Valesokkelirakenteen kosteustekninen tarkastelu tehdään kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan rakenteen toimintaa vain ulkoseinärakenteesta tehdyillä laskentamalleilla. Laskentamallit luodaan sekä alkuperäisestä että korjatusta seinärakenteesta. Seinärakenteen toimintaa tarkastellaan myös teräsbetonipilarin kohdalla. Toisessa osassa tarkastellaan koko valesokkelirakenteen toimintaa, jossa huomioidaan myös maaperän olosuhteiden vaikutus rakenteeseen. Mallinnukset jaetaan osiin, jotta rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittiset pisteet saadaan tutkittua mahdollisimman tarkasti.

Ulkoseinän rakenneleikkaukset simuloidaan Wufi Pro -ohjelmalla. Korjattuja ulkoseinärakenteita simuloidaan niin nykyilmastossa kuin tulevaisuuden ilmasto-olosuhteilla. Alkuperäistä ulkoseinärakennetta tarkasteltiin vain nykyilmastossa. Valesokkelirakenteen simuloinnit tehdään Wufi 2D -ohjelmalla nykyilmastossa. Rakennetta simuloidaan myös tuulettavana rakenteena, koska peruskorjauksen yhteydessä ulkoseinän tuulettusta ajateltiin parannettavan esimerkiksi tuuletuspaalujen avulla.

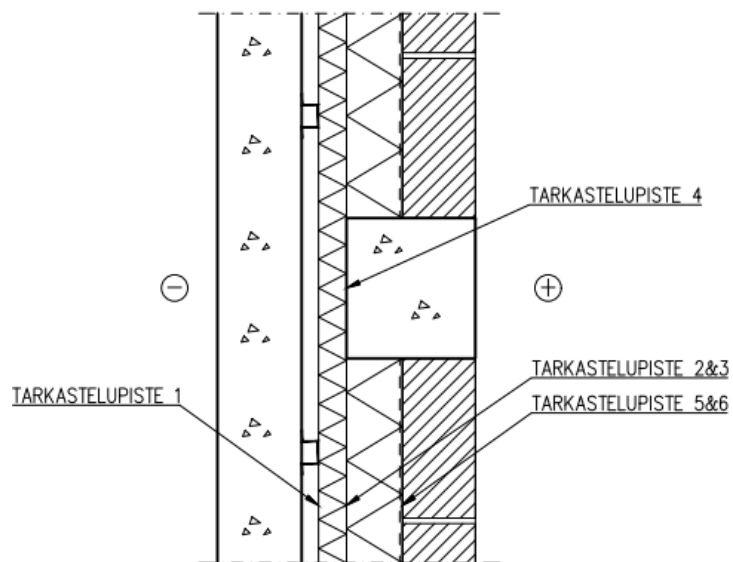
Kosteustekninen tarkastelu tehdään aina ideaaliselle rakenteelle, jolloin rakenteisiin ei pääse vaikuttamaan ylimääräisiä kosteusvuotoja laskentamallissa (RIL 255-1-2014, 65). Tästä syystä on erittäin tärkeää, että rakenteelle toteutettavat tiiveyden merkkiainekokeet peruskorjauksen yhteydessä täyttävät määräyksien mukaiset raja-arvot, jolloin kosteusteknisen mallinnuksen tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia todellisten mitauksien kanssa. Tässä työssä homeindeksin sallittuna maksimiarvona käytetään $M < 1$ (RIL 255-1-2014, 64).

4.2.3 Tarkastelupisteet

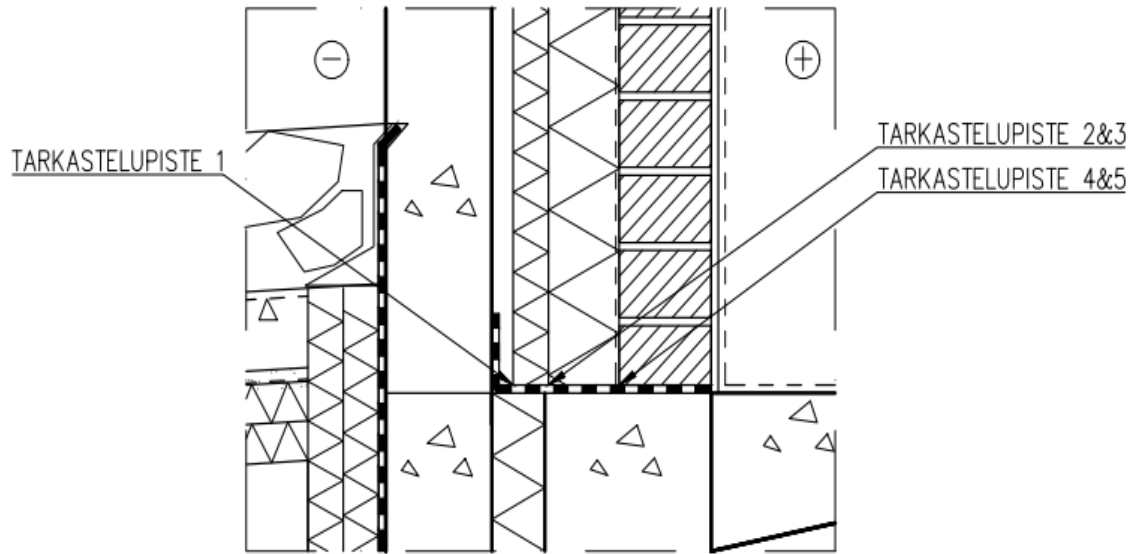
Ulkoseinärakenteessa tarkastelupisteet valittiin eri materiaalikerrosten rajapintoihin (RIL 255-1-2014, 84). Valesokkelirakenteeseen tarkastelupisteet valittiin sokkelirakenteen ja seinärakenteen rajapintaan. Maanvaraisen laatan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltiin betonilaatan pintakerroksessa. Tarkastelupisteitä valittiin runsaasti, jotta rakenteen kosteusteknistä toimintaa pystyttäisiin arvioimaan varmalla puolella. Tarkastelupisteet on esitetty kuvissa 6, 7 ja 8.



KUVA 6. Alkuperäinen rakenne, tarkastelupisteet, vaakaleikkaus



KUVA 7. Korjattu rakenne, tarkastelupisteet, vaakaleikkaus



KUVA 8. Valesokkelirakenne, tarkastelupisteet, pystyleikkaus

4.3 Ulko- ja sisäilman olosuhteet

Valesokkelirakenteen simuloinneissa ulkoilman olosuhteina käytetään TTY:n ja Ilmatieteenlaitoksen yhteistyössä kehittämiä rakennusfysikaalisia testivuosia. Testivuodet on kehitetty Frame -projektissa vuonna 2011. Sisäilman olosuhteina sekä kosteuslisänä käytetään ohjeen RIL 107-2012 mukaisia arvoja.

4.3.1 Ulkoilman olosuhteet

Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa ulkoilman olosuhteeksi tulee valita rakenteen toiminnan kannalta riittävän kriittinen olosuhde. Frame -projektissa määritettiin vaipparakenteille mitoittavia testivuosia sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastoissa. Näitä mitoittavia testivuosia kutsutaan rakennusfysikaaliksi testivuosiksi. Rakennusfysikaalisten testivuosien toimintakriteerit olivat homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen rakenteen sisällä. Projektissa määritetyt testivuodet ovat, Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Näistä testivuosista on tehty myös muunnokset ilmaston muutoksen vaikutukset huomioiden. (RIL 255-1-2014, 67 – 70.) Muunnokset on tehty kasvihuoneskenaarion A2-mukaisesti, joka edustaa pessimististä tulevaisuuden näkymää (Vinha ym. 2013, 99). Kriit-

tisten olosuhteiden käyttäminen laskentaohjelmassa on tärkeää, koska rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ei käytetä ulkoilman olosuhteiden osalta lisävarmuuksia tai varmuuskertoimia (RIL 255-1-2014, 67).

Jokioisen testivuotia käytetään tarkasteluissa niille vaipparakenteille, joiden toimintaa vaikuttaa ulkoilman kosteusolosuhteiden lisäksi lähinnä suhteellinen kosteus. Vantaan testivuotia taas käytetään vaipparakenteille, joiden sisäosien kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa suhteellisen kosteuden lisäksi myös sade. Esimerkkirakenteita molemmille testivuosille on esitetty taulukossa 7. (RIL 255-1-2014, 68 – 69.) Tässä työssä kosteus- ja lämpötekniisiin tarkasteluihin käytettiin Vantaan testivuotia, jolloin tarkasteltava ilman-suunta on etelä.

TAULUKKO 6. Rakennusfysikaalisten testivuodet (Vinha ym. 2013, 45)

| Rakennetyypit | Testivuosi | | |
|---|---|---|---|
| | Nykyilmasto | 2050 ilmasto | 2100 ilmasto |
| Rakenteet, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. <u>Esimerkkirakenteita:</u> - puu- ja metalliverhotut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet - yläpohjat, joissa on vesikate - ryömintätillaiset alapohjat | <i>Jokioinen 2004</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: pohjoinen ² | <i>Jokioinen 2050</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: pohjoinen ² | <i>Jokioinen 2100</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: pohjoinen ² |
| Rakenteet, joissa sade ja ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttavat niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan <u>Esimerkkirakenteita:</u> - tiiliverhotut ulkoseinät - eristerapatut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - käännetyt katot | <i>Vantaa 2007</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: etelä | <i>Vantaa 2050</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: etelä | <i>Vantaa 2100</i> ilmansuunta seinärakennetarkasteluissa: etelä |

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

² Rakenteen ulkopinnan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa kriittisin ilmansuunta voi olla myös joku muu kuin pohjoinen (ks. luku 4.5.3).

Testivuotia käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon, että ne eivät yleensä ole rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kaikkein kriittisimpiä. Esimerkiksi rakennuksen ympärillä oleva mikroilmasto voi synnyttää rakennuksen ympärille olosuhteita, jotka ovat huomattavasti kriittisempiä rakennuksen kannalta kuin testivuosissa esitetyt olosuhteet. Tämä pitää huomioida myös laskentatuloksia tarkasteltaessa. (RIL 205-1-2014, 69.)

4.3.2 Viistosade

Viistosade syntyy tuulen ja sateen yhteisvaikutuksessa. Viistosade on yksi suurimmista rakennuksen ulkovaippaan kohdistuvista rasisitustekijöistä sekä kosteusvaurioiden aiheuttajista (Siikanen 2011, 67). Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta erilaiset ilmaston ääri-ilmiöt tulevat lisääntymään ja samalla viistosateen aiheuttama rasisitus rakennuksien julkisivuille tulee kasvamaan entisestään. Ilman lämmitessä myös talviaikaiset vesisateet alkavat yleistyä. (Ilmasto-opas, 2016.)

Laskennallisesti viistosade otetaan huomioon Wufi-ohjelmassa kaavan 4.1 mukaisesti (Mäkitalo 2012, 29). Kaavassa viistosademäärä lasketaan tuulen nopeuden ja viistosadekerroimen avulla. Viistosadekerroin määritetään rakennuksen korkeuden mukaan. Taulukossa 8 on esitetty laskennassa käytetyt viistosadekerroimet.

$$W_s = r_a \cdot r_s \cdot W_n \quad (4.1)$$

missä,

| | | |
|-------|----|---|
| W_s | on | viistosade seinäpinnalle ($\text{kg/m}^2\text{s}$) |
| r_a | on | tuulen nopeus (m/s) |
| r_s | on | viistosadekerroin (s/m) |
| W_n | on | vaakapinnalle tuleva sateen intensiteetti ($\text{kg/m}^2\text{s}$) |

TAULUKKO 7. Viistosadekerroimet Wufi-ohjelmassa

| | |
|--|------------------------|
| matala rakennus, $h < 10\text{m}$ | $r_s=0,07 \text{ s/m}$ |
| korkeaa rakennuksen alaosa, $h < 10\text{m}$ | $r_s=0,05 \text{ s/m}$ |
| korkean rakennuksen keskiosa, $h = 10\text{-}20\text{m}$ | $r_s=0,10 \text{ s/m}$ |
| korkean rakennuksen yläosa, $h > 20\text{m}$ | $r_s=0,20 \text{ s/m}$ |

Osa julkisivuun kohdistuvasta viistosateesta ei imeydy rakenteeseen. Wufi laskee tämän viistosateen ja pinnan adsorptiokerroimen tulona

$$g_w = \alpha_r \cdot W_s \quad (4.2)$$

missä,

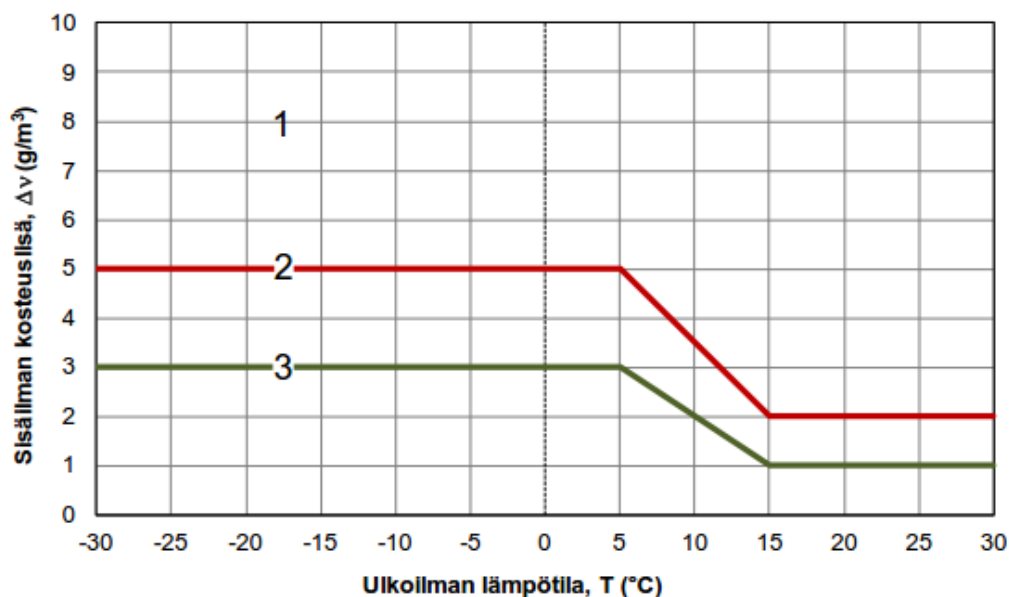
g_w on julkisivuun imeytyvä sademäärä (kg/m²s)
 α_r on pinnan adsorptiokerroin (-)

Pinnan adsorptiokertoimeen vaikuttaa materiaalin karkeus, suunta ja kaltevuus (Mäkitalo 2012, 30). Täysin vaakasuorille pinnoille käytetään kerrointa 1, koska pintaan satava sade ei pääse roiskumaan pois alustasta. Yleisesti voidaan käyttää sadekerrointa 0,7 seinäpinnoille (Wufi-Wiki, 2008). Lumisade ei rasita seinärakennetta, joten oletetaan pinnan adsorptiokertoimen olevan silloin lähellä nollaa (Vinha ym. 2013, 99). Säädataa muokattiin ennen simulaatioita siten, että viistosadetta ei oteta laskennassa huomioon, jos tarkasteluhetkeä edeltävien kolmen tunnin lämpötilakeskiarvo on alle 0 °C (Mäkitalo 2012, 30). Tässä työssä viistosadekertoimena käytetään 0,10 s/m ja pinnan adsorptiokertoimena 0,7.

4.3.3 Sisäilman olosuhteet

Rakennuksen sisäilmassa on lähes aina lisäkosteutta, joka synnyttää vesihöyrypitoisuus-eron sisä- ja ulkoilman välille. Ero johtuu rakennuksen käyttöön ja asumiseen liittyvistä toiminnoista, kuten peseytymisestä, pyykinkuivatukselta ja siivoamisesta. Sisäilmassa kosteuslisä on suurin talvella, koska silloin kosteuden tuotto on suurinta. Kesäaikana kosteuslisä on pienempi, koska rakennuksen käyttäjät ovat vähemmän sisätiloissa ja tiloja tuuletetaan enemmän. (RIL 107-2012, 23.)

Sisäilman kosteuslisälle on olemassa kansainvälinen SFS-EN ISO 13788 standardi, mutta tehtyjen tutkimusten mukaan Suomessa suositellaan käytettäväksi taulukon 8 ja kuvion 2 mukaisia arvoja. (RIL 107-2012, 23.)



KUVIO 2. Sisäilman kosteuslisä eri kosteusluokille (RIL 107-2012, 24)

TAULUKKO 8. Rakennuksien jakaantuminen eri kosteusluokkiin (RIL 107-2012, 24)

| Kosteusluokka | Kosteuslisän mitoitus arvo talvella ($T \leq 5 \text{ °C}$) | Rakennustyyppi |
|---------------|---|--|
| 1 | $> 5 \text{ g/m}^3$ | 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, kokoon-tumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväko-dit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat, kylmä- ja pakkashuoneet, talviasuttavat vapaa-ajan asunnot |
| 3 | 3 g/m^3 | Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneu-vo-suojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset |

Tässä työssä kosteus- ja lämpöteknisissä tarkasteluissa käytetään kosteusluokan 2 mukaista kosteuslisää. Sisälämpötilana laskennassa käytetään ympärivuotisesti 21 °C :lta asu-misterveysohjeen mukaisesti (Asu-misterveysohje, 13).

Rakennusaikana sisäilman kosteuslisä voi olla pitkiä aikoja suurempi kuin taulukossa 8 ja kuviossa 2 esitetyt arvot. Lisäkosteutta tuottavat esimerkiksi rakennusaikaiset työvaiheet, kuten betonivalut ja muuraustyöt. Rakennustyömaan kosteudenhallinnan tulisi olla sillä tasolla, että sisäilman kosteuslisä ylittäisi suurimmillaankin vain lyhytaikaisesti suunnitellun kosteuslisän. (RIL 107-2012, 25.) Rakennusaikainen kosteus tulee huomioida myös tulkittaessa rakenteeseen asennettavien jatkuvan kosteus seurannan tuloksia.

4.4 Maaperän olosuhteet

Maaperässä vettä esiintyy kolmessa olomuodossa: kaasuna, nesteinä ja kiinteinä vuoden ajasta riippuen. Lumi- ja vesisade, pohjavesi, routa ja sulamisvedet pitävät maaperän aina kosteana. Kosteusteknisissä tarkasteluissa oletetaan, että maaperässä vallitseva suhteellinen kosteus on aina 100 %. (Sisäilmayhdistys ry. Maanvastainen betonilaatta, 2008.) Rakenteen eripuolilla sijaitsevilla maa-aineksille luotiin omat olosuhdetiedostot Wufi-simulointia varten.

Sokkelin ulkopuolisen salaojituserroksen maaperän ominaisuuksia arvioitiin aikaisempien tutkimuksien ja mittausten avulla. Maaperän keskilämpötilaksi oletetaan 6°C ja suhteellisen kosteuden arvoksi 100 % (Lylykangas ym. 2015, 210). Todellisuudessa pintaan lämpötila vaihtelee vuodenajan mukaan ulkoilman olosuhteiden mukaisesti, mutta suhteellinen kosteus pysyy maaperässä aina lähellä 100 %. Laskentamallissa oletetaan, että sokkelin vedeneristys on yhtenäinen ja tiivis.

Tavanomaisissa lämpöeristetyissä maanvaraisissa rakenteissa pohjamaan lämpötila on yleensä 12°C – 15°C. Tarkastelukohteessa maanvaraisen laatan alla ei ole riittävää eristekerrosta, joten pohjamaan lämpötila seuraa sisäilman lämpötilaa. Alapuolisen maapohjan lämmitessä vesihöyryn diffuusion suunta on ylöspäin sisäilmaan. Eristämättömässä maanvaraisessa rakenteessa tulee yläpinnan pinnoitteen olla hyvin vesihöyryäläpäisevä, jotta kosteus voi kulkeutua vapaasti huoneilmaan. Toisaalta kapillaarinen nousuveden määrä voi olla jopa kymmenkertainen vesihöyryn diffuusion nähden, joten kapillaarikatkolla on suuri merkitys maanvaraisen alapohjan kosteustekniseen toimintaan. (Leivo & Rantala 2002, 8-9.) Tässä työssä maanvaraisen laatan alapuoliseen maaperään keskilämpötilaksi oletetaan 19°C ja suhteelliseksi kosteudeksi 100 %.

4.5 Rakennusmateriaalien ominaisuudet ja alkuolosuhteet

Tarkasteluissa käytettävät rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet valitaan ensisijaisesti Wufi:n omasta materiaalitietokannasta. Materiaalitietokannan ominaisuuksia verrattiin aikaisemmissa tutkimuksissa ja julkaisuissa käytettyihin materiaaliominaisuuksiin. Käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty liitteessä 1.

Laskentaohjelmaan määritetään jokaiselle rakennusmateriaalille alkukosteus ja -lämpötila, josta laskenta lähtee liikkeelle. Rakennusmateriaalit pyrkivät tasapainoon lämpö- ja kosteusominaisuuksiltaan ympäristönsä kanssa. Lämpötilan osalta tämä tapahtuu melko nopeasti, mutta alkukosteutta määrittäessä on otettava huomioon, että kosteus tasapainotuu paljon hitaammin kuin lämpötila (RIL 255-1-2014, 83 – 84). Tutkimuskohteen peruskorjaus sijoittuu kesäajalle ja laskennassa on oletettu, että rakennusmateriaalit on sääsuojattu hyvin ja säilytys on tapahtunut kuivana ajankohtana. Rakennusmateriaalien alkulämpötilaksi valittiin 15 °C ja suhteelliseksi kosteudeksi 80 %. Laskenta-ajanjaksoksi valittiin kolme vuotta, jotta rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusolosuhteet vakioituvat käyttötilannetta vastaavaksi (RIL 255-1-2014, 84).

Rakenteen toimintaa tarkasteltiin kahdella eri lämmöneristevaihtoehdolla. Ensimmäinen vaihtoehto on PU-eriste, joka on pinnoitettu molemmin puolin alumiinilaminaatilla. Toisena vaihtoehtoa lämmöneristeeksi tarkasteltiin XPS-levyä erillisellä höyrynsululla. Alumiinilaminaattipinnoitteet mallinnettiin ohjelmaan eristekerroksen molemmin puolin erillisiksi tiiviiksi kerroksiksi. Tämä saattaa jossain tapauksissa antaa jopa liian kriittisiä laskentatuloksia, joissa rakenteeseen muodostuu teoreettinen kondenssipiste. Todellisuudessa mahdollinen kondensoituva kosteus on kuitenkin hyvin vähäistä tai sitä ei muodostu ollenkaan. (Viitanen, 2016.) Alumiinilaminaattipinnoitteet voidaan huomioida laskentamallissa myös syöttämällä koko PU-eristeelle korkeampi diffuusiovastuskerroin esimerkiksi kirjallisuudesta löytyvien arvojen mukaan. Lopulliset laskentatulokset on esitetty vaihtoehdolle XPS-levy ja erillinen höyrynsulku.

Tutkittavassa rakenteessa ilmaväli sijaitsee uloimman betonikuoren sekä lämmöneristekerroksen välissä. Ilmaväliin asennetaan teräsprofiilit peruskorjauksen yhteydessä, joita vasten uloin lämmöneristekerros kiinnitetään. Ilmaväli ei ole tällä hetkellä tuuletettu, koska ulkoseinärakenne on sijainnut ennen peruskorjausta suurimmassa osassa raken-

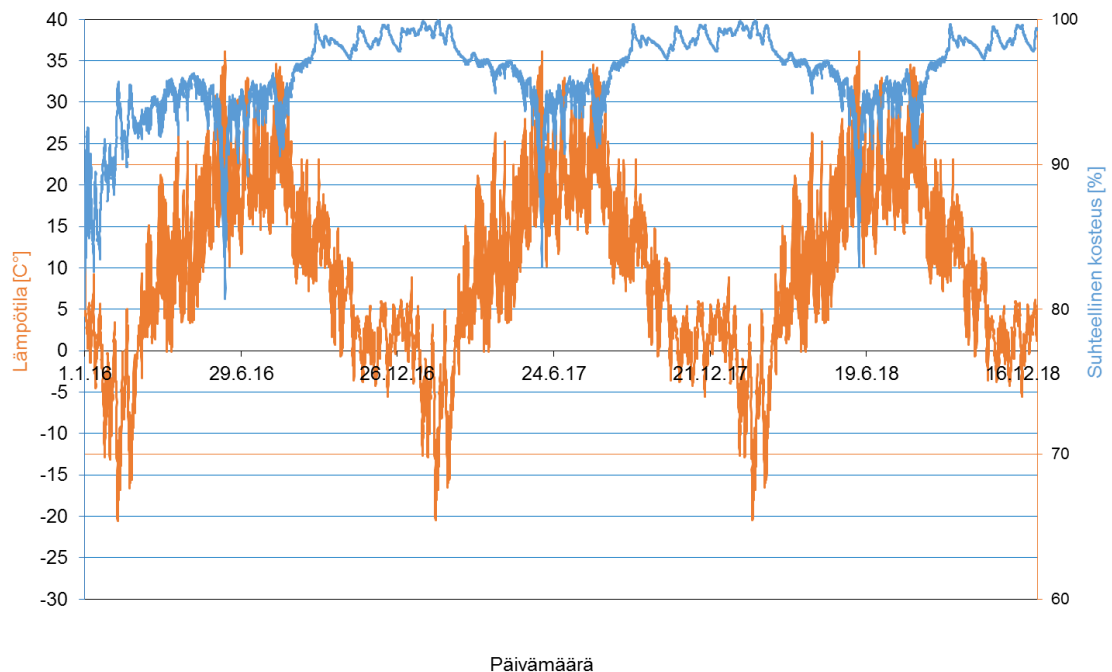
nusta osaksi maanpinnan alapuolella. Ilmaväliä tutkitaan tarkasteluissa sekä tuulettumattomana että tuuletettuna. Rakenteen tuuletusta on mahdollista parantaa esimerkiksi tuuletuspaalujen avulla, mutta se vaatisi kuitenkin sokkelirakenteen yhtenäisen vedeneristyksen rei'ittämistä, joka voi pahimmassa tapauksessa jopa heikentää rakenteen toimintaa. Tuuletuspaalut vaikuttavat myös aina rakennuksen arkkitehtoniseen ulkonäköön, joka on myös huomioitava korjausrakentamisessa.

Tuuletetun ilmavälin ilmanvaihtuvuuden kertoimena käytetään aikaisemmassa tutkimuksessa määritettyä kerrointa 10 1/h, joka vastaa muuratun rakenteen (joka kolmas sauma auki) ilmanvaihtuvuutta (Mäkitalo 2012, 53). Tuloksia tulkittaessa on kuitenkin huomioitava, että käytetty kerroin ei välttämättä vastaa rakenteen, vaikka rakenteen tuuletusta parannettaisiin.

5 LASKENTATULOSTEN TARKASTELU

5.1 Alkuperäinen ulkoseinärakenne

Alkuperäisessä ulkoseinärakenteessa kriittisimmäksi pisteeksi muodostui betoniulkokuoren sisäpinta (tarkastelupiste 1). Eristetilaan siirtyvä kosteus ei pääse tuulettumaan tehokkaasti rakenteesta vaan suhteellinen kosteus pysyy erittäin korkealla rakenteen ulkopinnassa vuodenajasta riippumatta. Jatkuva suuri kosteuspitoisuus mahdollistaa homeelle otolliset kasvuolosuhteet rakenteen ulko-osissa, jossa maksimihomeindeksi on tarkastelujen perusteella kolme Vantaa 2007 -testivuoden ilmasto-olosuhteilla. Kuviossa 3 on esitetty tarkastelupisteen lämpötila ja suhteellinen kosteus kolmen vuoden laskenta-ajaksolla.



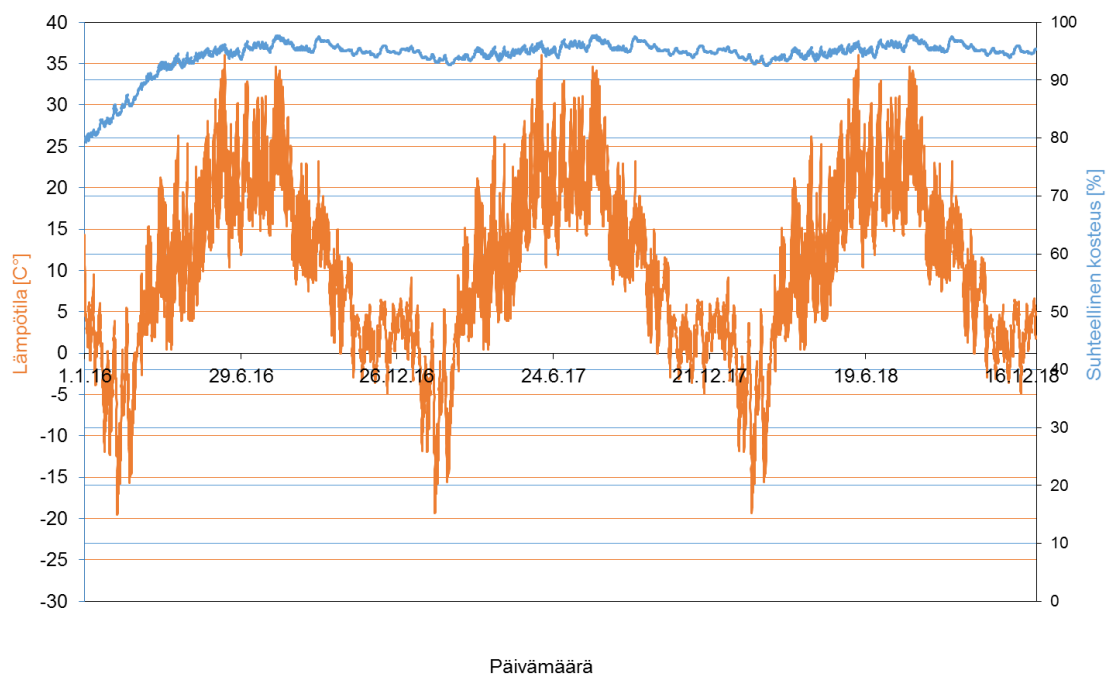
KUVIO 3. Alkuperäinen rakenne, tarkastelupiste 1, Vantaa 2007

Alkuperäisen rakenteen laskentatuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että pelkät laskentatulokset eivät kuvaa alkuperäisen rakenteen kosteusteknistä toimintaa riittävän kriittisesti, koska tarkasteluun ei lisätty esimerkiksi ylimääräisiä kosteuslähteitä. Todellisuudessa alkuperäinen rakenne on altistunut paljon suuremmalle kosteusrasitukselle kuin mitä pelkässä ulkoseinän tarkastelussa voidaan huomioida. Rakennusta ei ole kiertänyt toimiva salaojitus ennen peruskorjausta sekä pintavedet on ohjattu suoraan sokkelirakennetta vasten, mikä on lisännyt sen kosteusrasitusta entisestään. Myöskään kapillaarista

vedennousua ei ole katkaistu bitumikermikaistalla alkuperäisessä rakenteessa sokkelin ja seinärakenteen liittymässä. Höyrynsulun reikien sekä epätiiviyden rakenneliittymien kautta rakenteeseen on päässyt kulkeutumaan haitallista kosteutta konvektiolla, mikä kylminä vuodenaikoina on tiivistynyt rakenteen ulko-osiin.

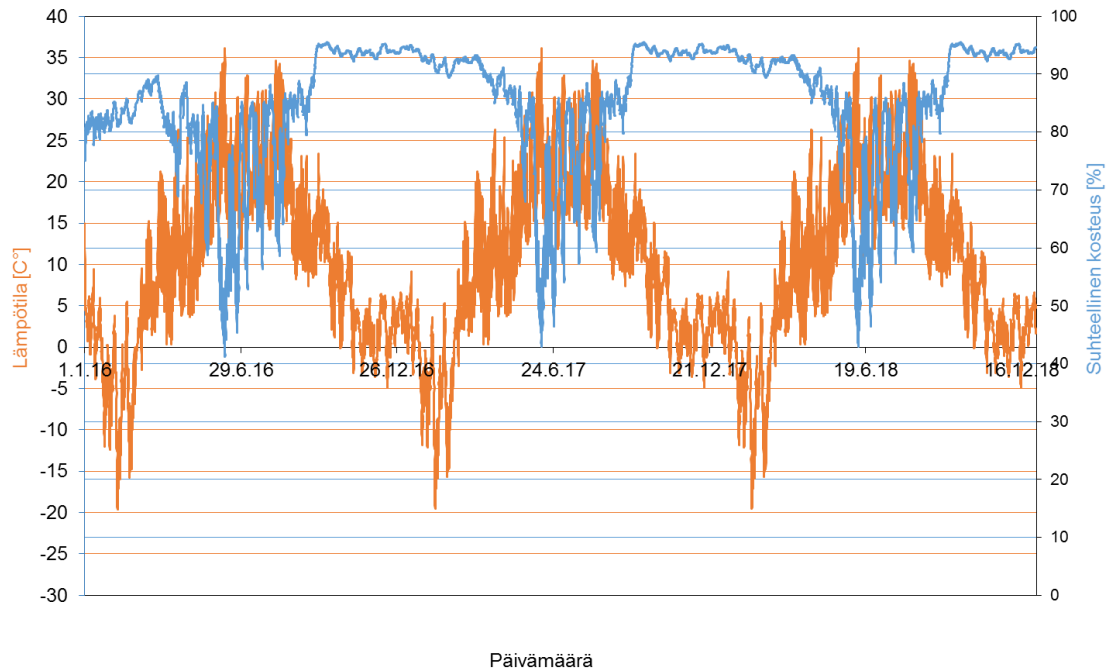
5.2 Korjattu ulkoseinärakenne

Korjatun rakenteen kriittisimmäksi tarkastelupisteeksi osoittautui betoniulkokuoren ja eristeen välinen tuulettumaton ilmaväli. Tarkastelujen perusteella ilmaväliin pääsee tiivistymään kosteutta, eikä se puutteellisen tuuletuksen vuoksi pääse kuivumaan riittävän tehokkaasti kuvion 4 mukaisesti. Kosteuden tiivistyminen lisääntyy ilmastonmuutoksen vaikutuksesta ja siten lisää homeen kasvun riskiä rakenteen ulko-osissa etenkin, jos rakennetta ei tuuleteta.



KUVIO 4. Korjattu rakenne, ilman tuuletusta, tarkastelupiste 1, Vantaa 2007

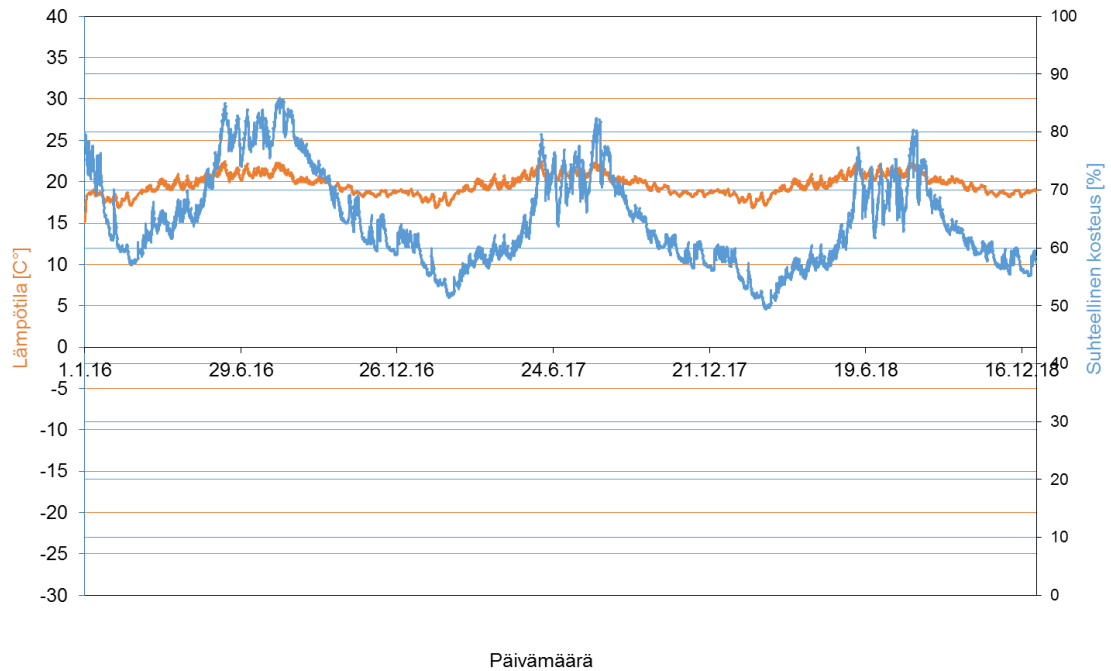
Tarkasteluissa havaittiin, että jo vähäinen tuuletus parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa ja vähentää merkittävästi kosteuden tiivistymistä sekä parantaa rakenteen kuivumista (kuvio 5).



KUVIO 5. Korjattu rakenne, tuuletus, tarkastelupiste 1, Vantaa 2007

Sisäpuolisen lämmöneristykseen tarkasteltiin kahta eri eristevaihtoehtoa: alumiinila-minaatilla pinnoitettua PU-eristettä sekä XPS-eristettä. PU-eristeen tiiviit pinnat mallinnettiin ohjelmaan erillisinä materiaalikerroksina. Talviaikana ulompi tiivis pinta jää liian kylmäksi, jolloin eristekerroksien rajapintaa muodostuu laskennallinen kondenssipiste. Käytännössä laskennallinen kondenssipiste ei kuitenkaan vaikuta rakenteen toimintaan tai sitä ei välttämättä edes muodostu sekä mahdollinen kondensoituvan kosteuden määrä on hyvin pientä. Kondensoituvan kosteuden kokonaismäärää ei tutkittu tämän työn yhteydessä. XPS-eristeessä ei ole erillisiä tiiviitä pinnoitetta, joten eristekerrosten rajapintaan ei muodostu laskennallista kondenssipistettä talviaikana.

Teräsbetonipilarin kohdalla eristekerroksen ja pilarin välinen rajapinta pysyy riittävän lämpimänä ympäri vuoden, jolloin kosteutta ei pääse kondensoitumaan rakenteeseen. Teräsbetonipilarit katkaisevat sisäpuolisen lämmöneristeen ja muuraukseen. Sisäpuolen eristekerroksen liitos teräsbetonipilariin tulee olla täysin tiivis, jotta haitallisia ilmavirtauksia ei pääse rakenteisiin tai rakenteista sisäilmaan.

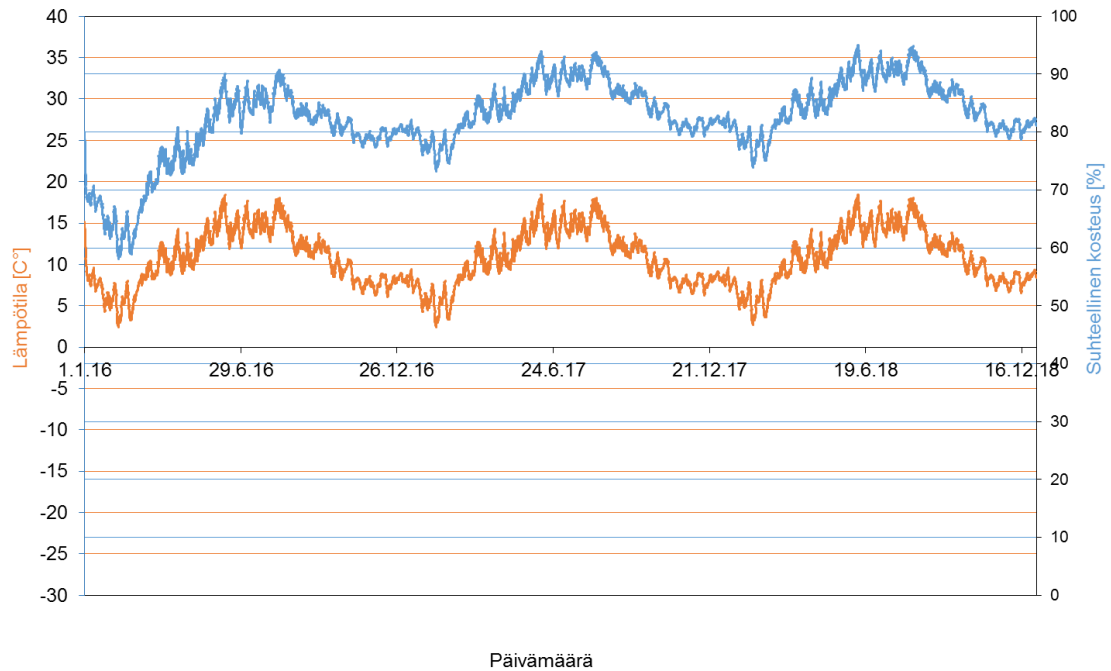


KUVIO 6. Korjattu rakenne, tarkastelupiste 4, Vantaa 2007

Wufi-ohjelma olettaa rakennekerrokset aina tiiviiksi ja yhtenäisiksi, eikä se siten ota huomioon esimerkiksi höyrönsulussa mahdollisesti olevaa reikää. Peruskorjauksen yhteydessä rakenneliittymät tulee toteuttaa mahdollisimman hyvin, jotta rakenteeseen ei pääse kulkeutumaan ylimääräistä kosteutta mahdollisista epätiiviyksistä.

5.3 Korjattu valesokkelirakenne

Valesokkelin ulkopuolinen lämmöneristys parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa, koska rakenne pysyy lämpimämpänä ja pystyy siten sitomaan itseensä suuremman määrän absoluuttista kosteutta. Tämän vaikutus on kuitenkin hyvin vaikea arvioida käytännön rakenteessa, koska sokkelin lämmöneristys on vain paikallista, eikä vaikuta ulkoseinä rakenteeseen kuin maanpinnan alapuolella. Bitumikermikaistale katkaisee sokkeliä pitkin nousevan kapillaarisen kosteuden eli toimii kosteussulkuna rakenteessa.



KUVIO 7. Valesokkelirakenne, korjattu rakenne, Vantaa 2007

Maanvarainen laatta on valettu paikoitellen suoraan perusmaan päälle ilman eristekerrosta tai kapillaarikatkoa. Alapuolisen täyttömaan lämpötila on lähes sama sisäilman kanssa. Maaperän suhteellinen kosteus on aina lähellä 100 %, jolloin kosteusolosuhteet pyrkivät tasoittumaan diffuusiolla maaperästä sisäilmaan. Korjaamisen yhteydessä on huomioitava, että maanvarainen laatta pinnoitetaan hyvin vesihöyryä läpäisevällä pinnoitteella.

5.4 Yhteenveto laskentatuloksista

Yksi korjausrakentamisen periaatteista on parantaa alkuperäisen rakenteen toimintaa ja taata rakennuksen käyttäjille turvallinen ja terveellinen lopputulos. Laskentatuloksien perusteella rakenteeseen muodostuu kondenssipiste tuulettumattomaan ilmatilaan. Valesokkelin kosteusrasitus tulee kuitenkin pienentymään huomattavasti alkuperäiseen verrattuna peruskorjauksen yhteydessä tehtävien salaojituksen ja sokkelin veden- sekä lämmöneristyksen vaikutuksesta. Ulkoseinärakenteen tuuletuksen parantaminen vaatisi sokkelin vedeneristeen systemaattista rei'ittämistä, joka saattaisi pahimmassa tapauksessa jopa heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa.

6 LÄMPÖ- JA KOSTEUSMITTAUKSET RAKENTEESSA

6.1 Jatkuvan kosteudenseurannan laitteisto

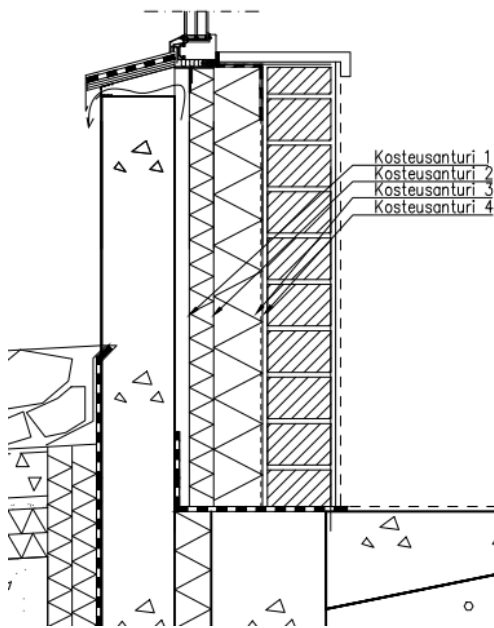
Tutkimuskohteeseen asennetaan peruskorjauksen yhteydessä jatkuva kosteudenseuranta-laitteisto ulkoseinärakenteeseen. Jatkuva kosteus seuranta tehdään RF SensIT -jatkuvan kosteuden seurantajärjestelmällä. Järjestelmä on kehitetty yhteistyössä VTT:n ja Aalto yliopiston kanssa (RF SensIT jatkuva kosteudenseuranta, 2016).

Järjestelmään kuuluu anturimoduuli, jossa on kiinni neljä kosteusanturia. Anturit tallentavat kosteusantureiden lukemat yhden tunnin välein ja lähettävät tiedon etäpalvelimelle. Etäpalvelin tallentaa tulokset tuotetoimittajan palveluun, josta ne ovat suoraan luettavissa. Järjestelmä mahdollistaa rakenteen kosteusteknisen seurannan ilman, että kohteessa tarvitsee käydä paikan päällä tekemässä mittauksissa (RF SensIT jatkuva kosteudenseuranta, 2016).

Todellisia lämpö- ja kosteusmittaustuloksia on tarkoitus verrata myöhemmin tämän opinäytetyön lopputuloksiin ja päätelmiin rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta. Mittaustulokset ovat vertailukelpoisia laskentatulosten kanssa vasta kun rakennuksen kosteuspiitoisuus on tasaantunut vastaamaan käytönaikaisia kosteuspiitoisuuksia.

6.2 Mittauspisteet ja antureiden asennus

Kosteusantureiden paikat rakenteeseen määritettiin Wufi-ohjelman tarkastelupisteiden perusteella. Anturat sijoitetaan rakennuksessa tiloihin, joissa on aikaisemmin todettu kosteusongelmia. Rakennukseen sijoitetaan kolme anturimoduulia, jolloin mittaustuloksia on mahdollisuus saada myös eri ilmansuunnista ulkoseinärakenteesta. Tällöin mittaustuloksista nähdään myös auringon säteilyn vaikutukset rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Anturit asennetaan seinärakenteen peruskorjauksen yhteydessä. Kosteusantureiden paikat rakenteessa on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. Kosteusantureiden paikat rakenteessa

Tarkemmat kosteusantureiden paikat on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9 Kosteusantureiden paikat rakenteessa

| KOSTEUSANTURI | SIJAINTI |
|---------------|---------------------------------|
| 1 | Tuuletusrako |
| 2 | Eristeiden välissä |
| 3 | Sisäpuolisen eristeen sisäpinta |
| 4 | Tiilen ja höyrynsulun välissä |

6.3 Todellisten mittaustulosten arvioiminen

Mahdollisia poikkeavuuksia todellisten ja laskennallisten tulosten välille aiheuttavat

- laskentamallin yksinkertaistaminen
- laskentamallissa käytettyjen materiaaliarvojen poikkeavuudet todellisesti käytettyjen materiaalien materiaaliarvoihin
- mikroilmaston mahdolliset vaikutukset
- rakenneliittymien tiiveys.

Poikkeavuuksien lopullista merkitystä rakenteen toimintaan on vaikea arvioida, mutta oletettavasti sekä todellisista että laskennallisista mittaustuloksista voidaan tehdä samansuuntaisia johtopäätöksiä rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta.

Odotettavasti myös mittaustulosten perusteella rakenteen kriittisin tarkastelupiste tulee olemaan tuulettumaton ilmapäli. Laskentatuloksista havaittiin, että jo pienikin tuuletus rakenteessa vähentää kosteuden kondensoitumista. Jos ilmapälin suhteellinen kosteus pysyy liian korkealla rakennuksen käyttöaikana, voidaan rakenteen tuuletusta parantaa vielä peruskorjauksen jälkeenkin. Toisaalta, koska ulkoseinärakenne on ikkunaliittymästä auki, rakenteessa saattaa esiintyä pientä ilmanvaihtuvuutta. Tämä voi riittää rakenteen tuulettamiseen, mutta vaikutukset selviävät vasta pidemmän yhtenäisen mittausjakson jälkeen.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tarkastella valesokkeli- ja ulkoseinrakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Kosteustekninen tarkastelu tehtiin Wufi-ohjelman eri versioilla. Laskentatulosten analysoinnin apuvälineenä käytettiin VTT-TTY homemallin laskentakaavoja. Tarkastelun materiaaliarvot saatiin rakennustekniikan julkaisuista, loppu-
töistä, kirjallisuudesta, tuotetoimittajalta sekä Wufi:n omasta materiaalikirjastosta. Tarkastelussa käytetyt ulko- ja sisäilma sekä maaperän olosuhteet määritettiin rakennustekniikan julkaisuiden ja kirjallisuuden avulla.

Valesokkelirakenteen tutkiminen aloitettiin tarkastelemalla pelkän ulkoseinärakenteen kosteusteknistä toimintaa sekä alkuperäisillä että peruskorjauksen yhteydessä uusituilla rakennusmateriaaleilla. Korjatussa vaihtoehdossa rakennetta tarkasteltiin kahdella erillisellä sisäpuolisella eristevaihtoehdolla. Wufi-mallin rakentamisessa erityisen haasteelliseksi osoittautui alumiinilaminaattipinnoitteen PU-eristeen mallintaminen. Pinnoitteet mallinnettiin erillisinä kerroksina, jolloin rakenteeseen muodostui laskennallinen kondenssipiste. Laskennalliseen kondenssipisteeseen tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, koska kondensoituvan kosteuden määrä on hyvin pieni tai sitä ei ole ollenkaan.

Laskentatuloksista havaittiin, että kosteuden kondensoitumisen kannalta kriittisin piste muodostuu betoniulkokuoren sisäpinnan lähellä, koska rakenteen tuuletus on puutteellinen. Toisaalta, peruskorjauksen aikana rakenteen alkuperäistä kosteusrasitusta pienennetään huomattavasti muilla korjaustoimenpiteillä esimerkiksi salaojituksella sekä sokkelin vedeneristämällä. Peruskorjauksen yhteydessä on erittäin tärkeää kiinnittää huomiota rakenneliittymien tiiveyteen, jotta rakenteeseen ei pääse ylimääräistä kosteutta sisäpuolelta tai ulkopuolelta. Tutkimuskohteeseen asennettiin myös peruskorjauksen yhteydessä jatkuva kosteudenmittausjärjestelmä. Todennäköisesti järjestelmän mittaamat lämpötilat ja suhteellisen kosteuden arvot johtavat samoihin johtopäätöksiin rakenteen toiminnasta kuin tämän työn tulokset.

Rakennusfysikaaliset simulaatiot korjausrakentamisessa ovat hyvä apuväline rakenteiden tutkimisessa sekä suunnittelussa. Simulaatiot vaativat kuitenkin tekijältä aina syvää perehtymistä rakennusfysiikan teoriaan, rakennusmateriaalien toimintaan, toimiviin käytännön sovelluksiin sekä simulointiohjelman toimintaan. Simulaatioiden tuloksiin tulee aina suhtautua suuntaa antavina. Laskentamallit sisältävät aina oletuksia, jotka eivät täysin

vastaa todellista tilannetta ja saattavat siten johtaa pahimmassa tapauksissa jopa väärin johtopäätöksiin rakenteen tai jonkun rakennusmateriaalin kosteusteknisestä toiminnasta.

8 LÄHTEET

- Björkholtz D. 1997. Lämpö ja kosteus – rakennusfysiikka. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- Helsingin, Espoon ja Vantaan Terveelliset tilat. Sisäilmayhdistys ry. 2008. Maanvastainen betonilaatta. Luettu: 12.5.2016 <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Maanvastaiset-rakenteet/Maanvastainen-betonilaatta>
- Hens H. 2012. Building Physics Heat, Air and Moisture, Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. Berliini. Ernst and Sohn.
- Hänninen P., Sutinen R., Suomi T., Äikää O., Penttinen S., Majaniemi J., 2002. GTK:n maaperän seuranta-asetat 2000-2002. Haettu: 12.5.2016. http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/p31_4_035.pdf
- Ilmasto-opas. Luettu: 9.11.2016. <http://ilmasto-opas.fi/fi/>
- Laine K. 2010. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Leivo V., Rantala J, Maanvastaiset alapohjarakenteet – Kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. 2002. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Talonrakennustekniikka. Tutkimusraportti 121.
- Lylykangas K., Andersson A., Kiuru J., Nieminen J., Päättalo J, 2015. Rakenteellinen Energiatohokkuus -opas. Rakennusteollisuus. Ympäristöministeriö
- Mäkitalo M. 2012. Puurunkoisen ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- RF SensIT jatkuva kosteuden seuranta. Luettu: 21.9.2016. <http://rfsensit.fi/>
- RIL 107-2012. Rakennuksen veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- Siikanen U. 2014. Rakennusfysiikka, Perusteet ja Sovellukset. Helsinki. Rakennustieto Oy
- Sisäilmayhdistys ry – Puolueetonta tietoa sisäilmasta. Luettu: 23.3.2017 <http://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Terveysvaikutukset>
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 2003. Asumisterveysohje. Haettu: 12.5.2016 http://www.finlex.fi/pdf/normit/14951-asumisterveysohje_pdf.pdf
- Viitanen, A. Tuotantopäällikkö, Kingspan. 2016. Sähköpostikeskustelu. Luettu: 4.4.2016

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. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 159.

Wufi-Wiki. Rain water absorption factor. 2008. Luettu: 12.5.2016 <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:RainWaterAbsorptionFactor>

LIITTEET

Liite 1. Materiaaliominaisuudet

TAULUKKO 1. Mallinuksissa käytetyt materiaaliominaisuudet

| Kerros | d (m) | Tiheys (kg/m ³) | Huokoi- suus (m ³ / m ³) | Ominaislämpö- kapasiteetti (J/kgK) | Lämmönjoh- tavuus (W/mK) | Vesi- höyryndiffuu- siokerroin |
|--|-------|--------------------------------|---|--|--------------------------------|--------------------------------------|
| Betoni ¹⁾ | 0,15 | 2220 | 0,18 | 850 | 1,6 | 248 |
| Ilmakerros ¹⁾ | 0,030 | 1,3 | 0,999 | 1000 | 0,18 | 0,46 |
| PU-eriste ¹⁾ | 0,050 | 40 | 0,95 | 1500 | 0,025 | 50 |
| Alumiinilami- naattipinnoite ²⁾ | 0,001 | 40 | 0,95 | 1500 | 0,025 | 1 200 000 ²⁾ |
| PU-eriste ¹⁾ | 0,100 | 40 | 0,95 | 1500 | 0,025 | 50 |
| Kalkkihiekkatiili Kahi NKH, väli- seinätiili ¹⁾ | 0,130 | 1900 | 0,30 | 850 | 1 | 28 |
| Bitumikermi ³⁾ | 0,001 | 1000 | 0,6 | 1000 | 0,23 | 50 000 |
| Höyrynsulku ³⁾ | 0,001 | 980 | 0,001 | 2300 | 0,4 | 89 000 |
| Mineraalivilla ¹⁾ | 0,125 | 60 | 0,95 | 850 | 0,040 | 1,3 |
| XPS Ydin ¹⁾ | 0,100 | 40 | 0,95 | 1500 | 0,030 | 100 |
| XPS Pintanahka ¹⁾ | 0,010 | 40 | 0,95 | 1500 | 0,030 | 450 |

¹⁾ = Wufin oma materiaalikirjasto

²⁾ = Tuotetoimittajalta saatu arvo (Viitanen, 2016)

³⁾ = Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet (Laine, 2010)

Liite 2. VTT-TTY homemallin laskentakaavojen tulokset

Alkuperäinen rakenne, ilman tuuletusta

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Vantaa 2007, ho- meindeksit |
|-----------------|--------------------|-----|--------------------------------|
| 1 | Mineraalivilla | 3 | 2,97 |
| 2 | Mineraalivilla | 3 | 0,86 |
| 3 | Mineraalivilla | 3 | 1,16 |
| 4 | Kalkkiahiekkatiili | 3 | 0 |

Korjattu rakenne, ilman tuuletusta

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Vantaa 2007, ho- meindeksit |
|-----------------|-------------------------|-----|--------------------------------|
| 1 | PU-eriste | 3 | 2,82 |
| 2 | PU-eriste | 3 | 0,27 |
| 3 | XPS | 3 | 0,14 |
| 4 | PU-eriste | 3 | 0 |
| 5 | XPS | 3 | 0 |
| 6 | Kalkkiahiekka- tiili | 3 | 0 |

Korjattu rakenne, tuuletus, n=10 1/h

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Vantaa 2007, homeindeksit | Vantaa 2050, homeindeksit |
|-----------------|--------------------|-----|---------------------------|---------------------------|
| 1 | PU-eriste | 3 | 0,15 | 0,62 |
| 2 | PU-eriste | 3 | 0 | 0 |
| 3 | XPS | 3 | 0 | 0 |
| 4 | PU-eriste | 3 | 0 | 0 |
| 5 | XPS | 3 | 0 | 0 |
| 6 | Kalkkiahiekkatiili | 3 | 0 | 0 |

Valesokkelirakenne, ilman tuuletusta

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Vantaa 2007, homeindeksi |
|-----------------|--------------------|-----|--------------------------|
| 1 | PU-eriste | 3 | 0,27 |
| 2 | PU-eriste | 3 | 0 |
| 3 | XPS | 3 | 0 |
| 4 | XPS | 3 | 0 |
| 5 | Kalkkiahiekkatiili | 3 | 0 |

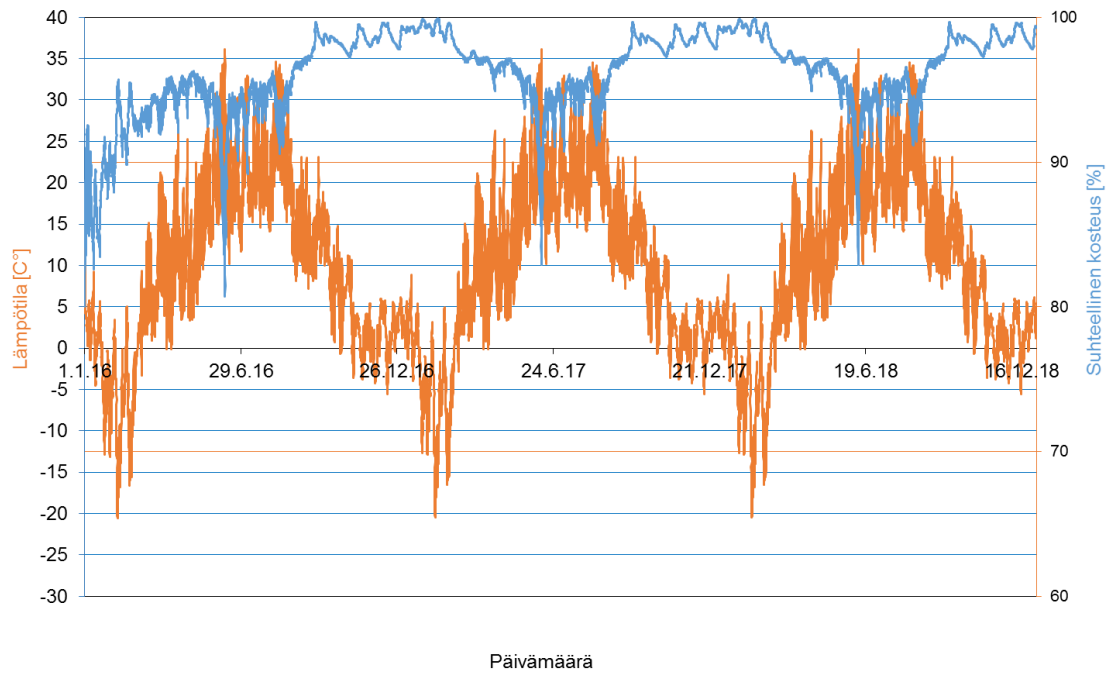
Valesokkelirakenne, tuuletus, n=10 1/h

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Vantaa 2007, homeindeksit |
|-----------------|--------------------|-----|---------------------------|
| 1 | PU-eriste | 3 | 0,01 |
| 2 | PU-eriste | 3 | 0 |
| 3 | XPS | 3 | 0 |
| 4 | XPS | 3 | 0 |
| 5 | Kalkkiahiekkatiili | 3 | 0 |

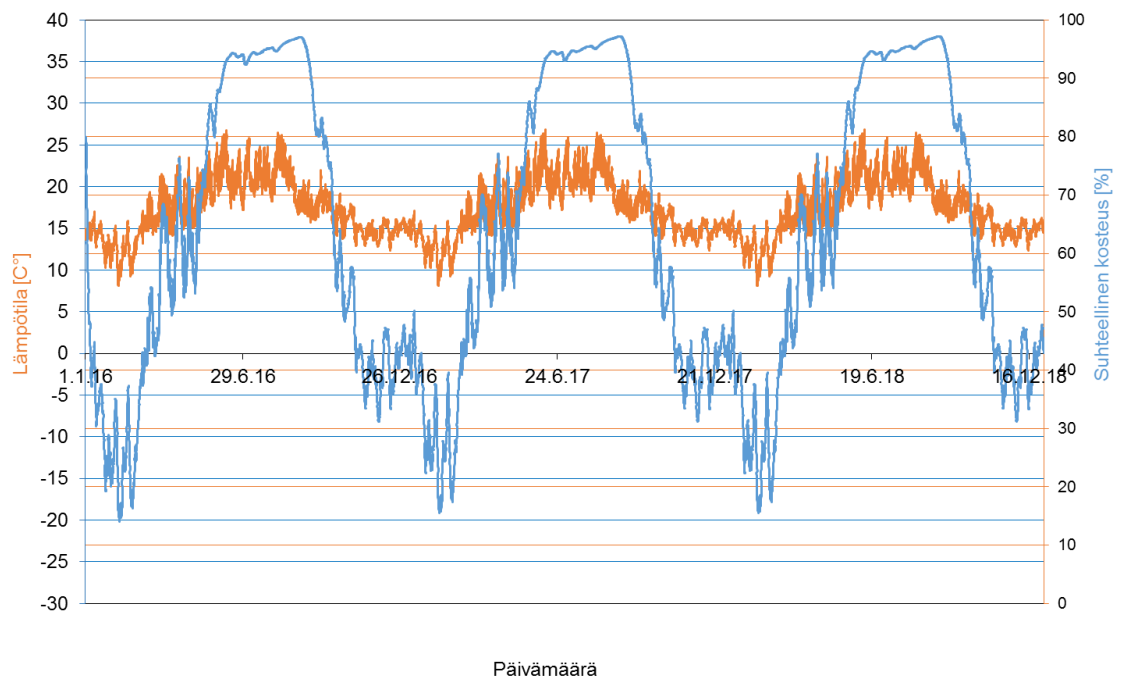
Liite 3. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat

Alkuperäinen rakenne, Vantaa 2007

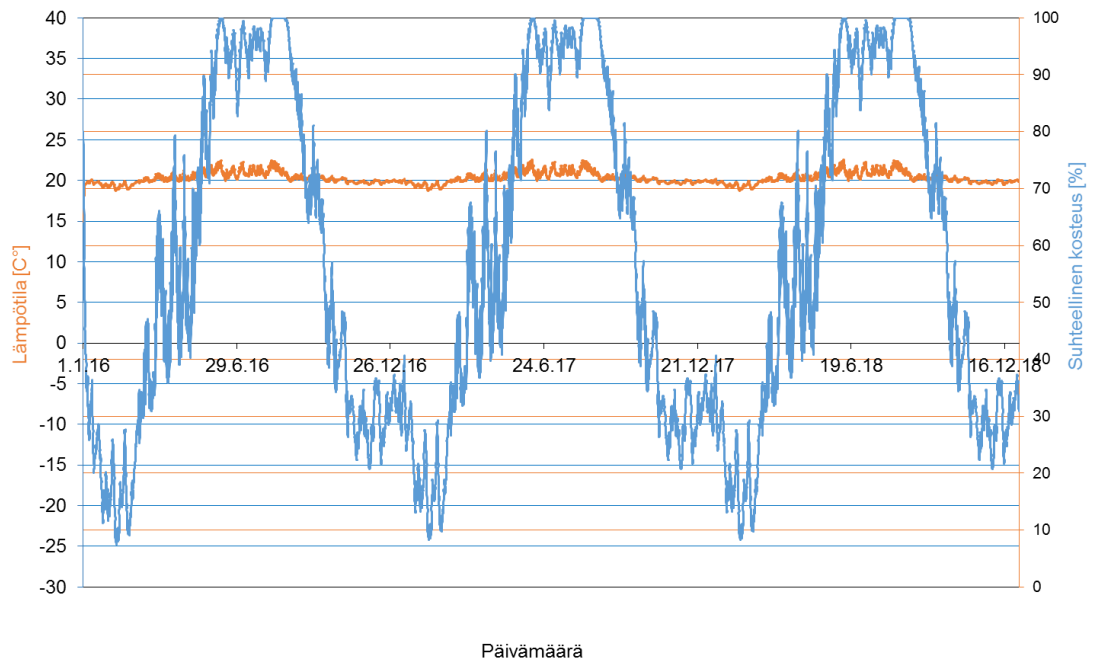
Tarkastelupiste 1



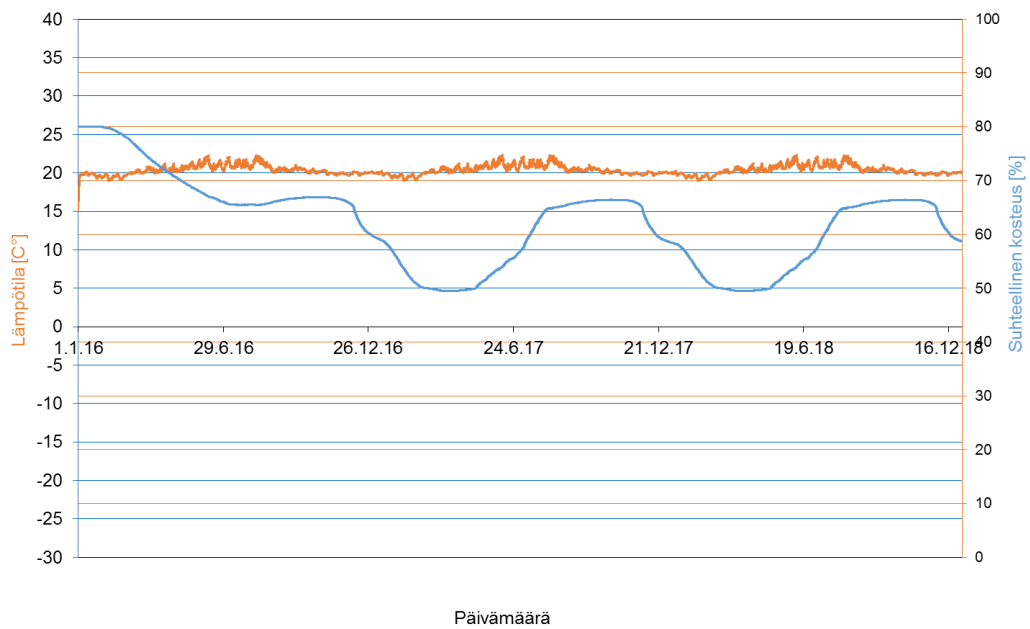
Tarkastelupiste 2



Tarkastelupiste 3

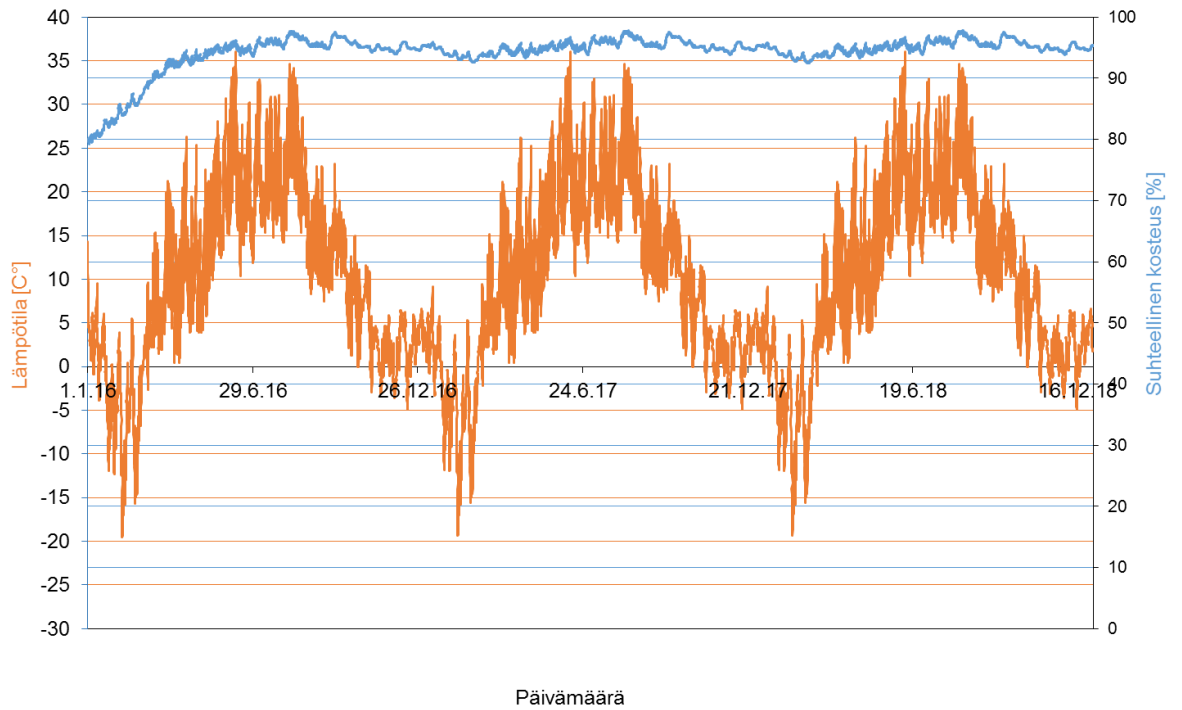


Tarkastelupiste 4

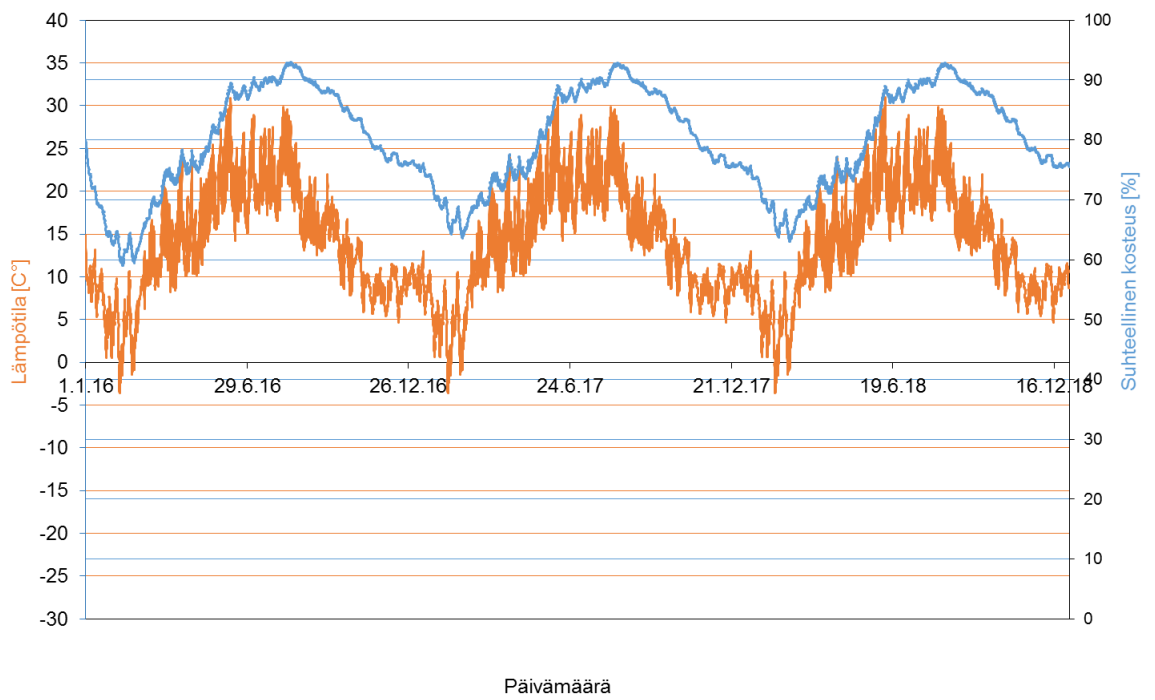


Korjattu rakenne, Vantaa 2007

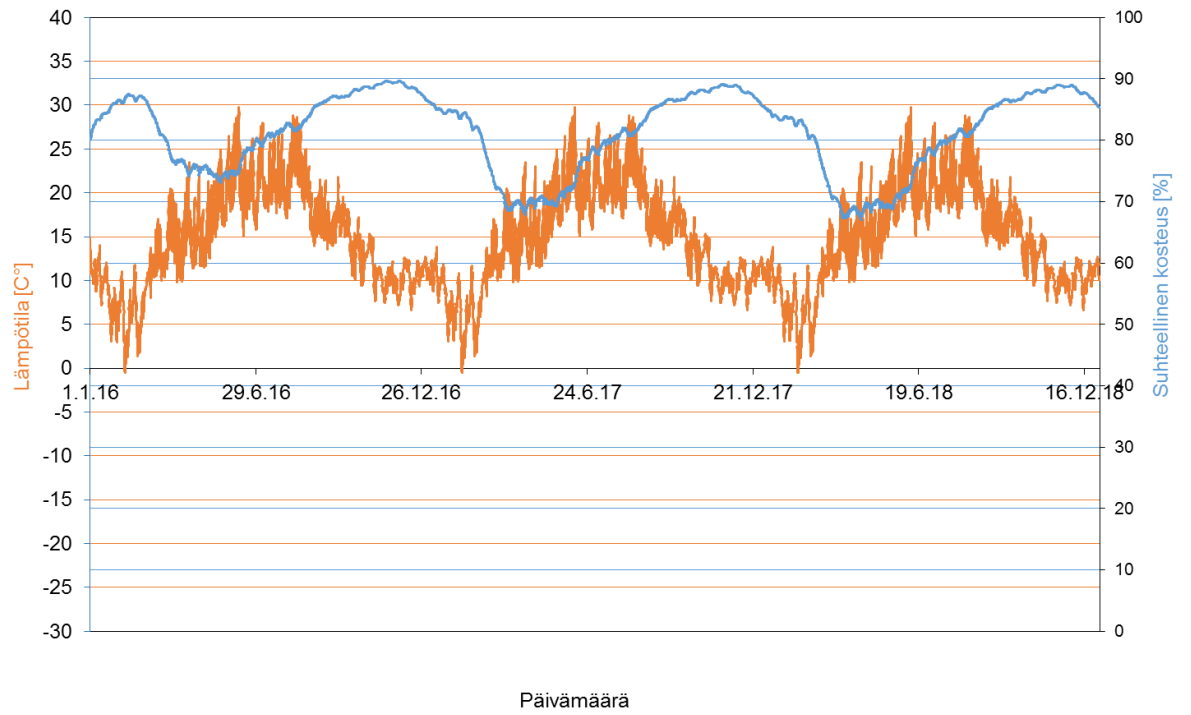
Tarkastelupiste 1



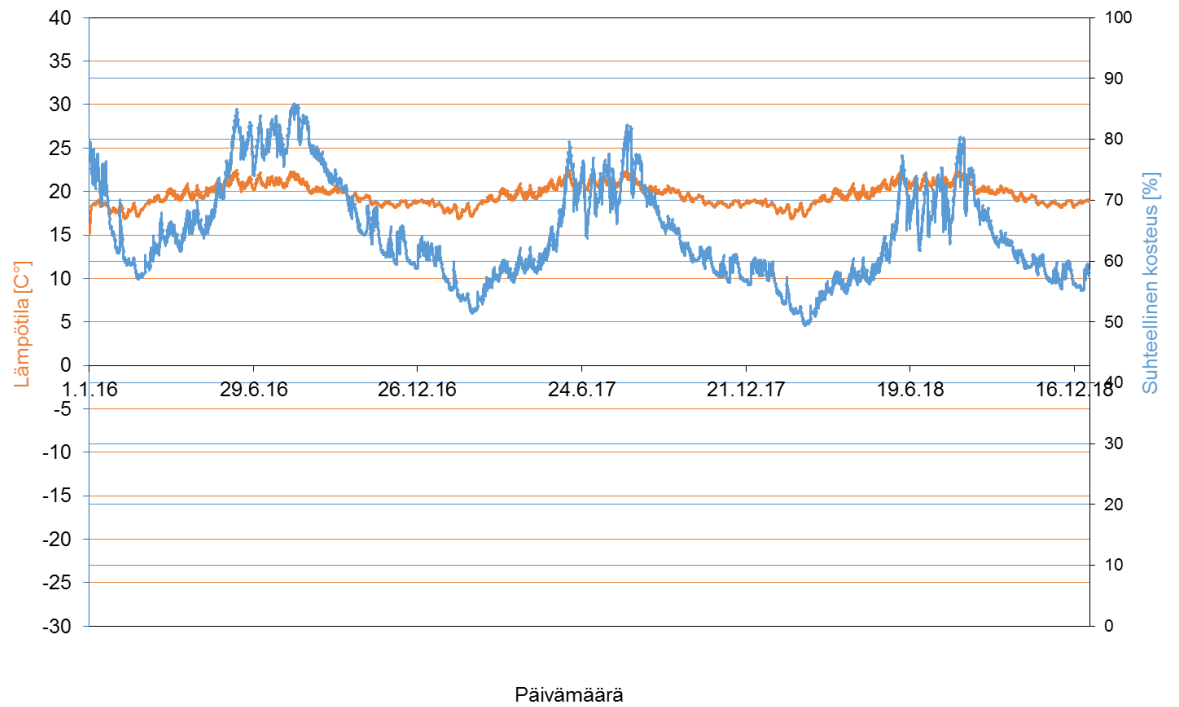
Tarkastelupiste 2



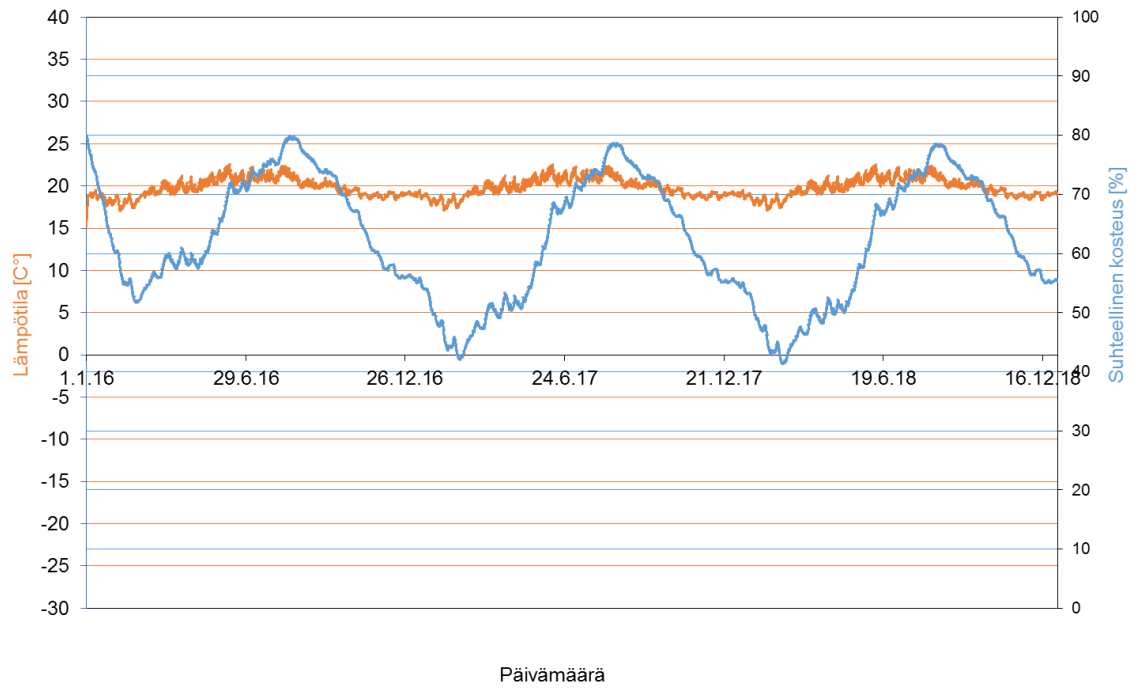
Tarkastelupiste 3



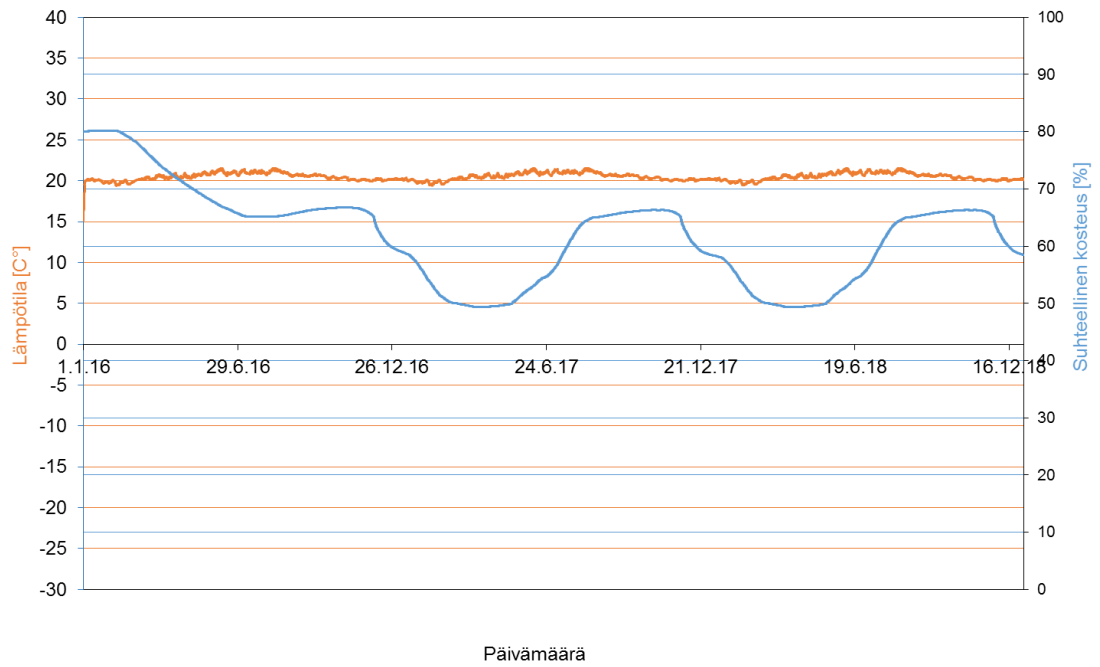
Tarkastelupiste 4



Tarkastelupiste 5

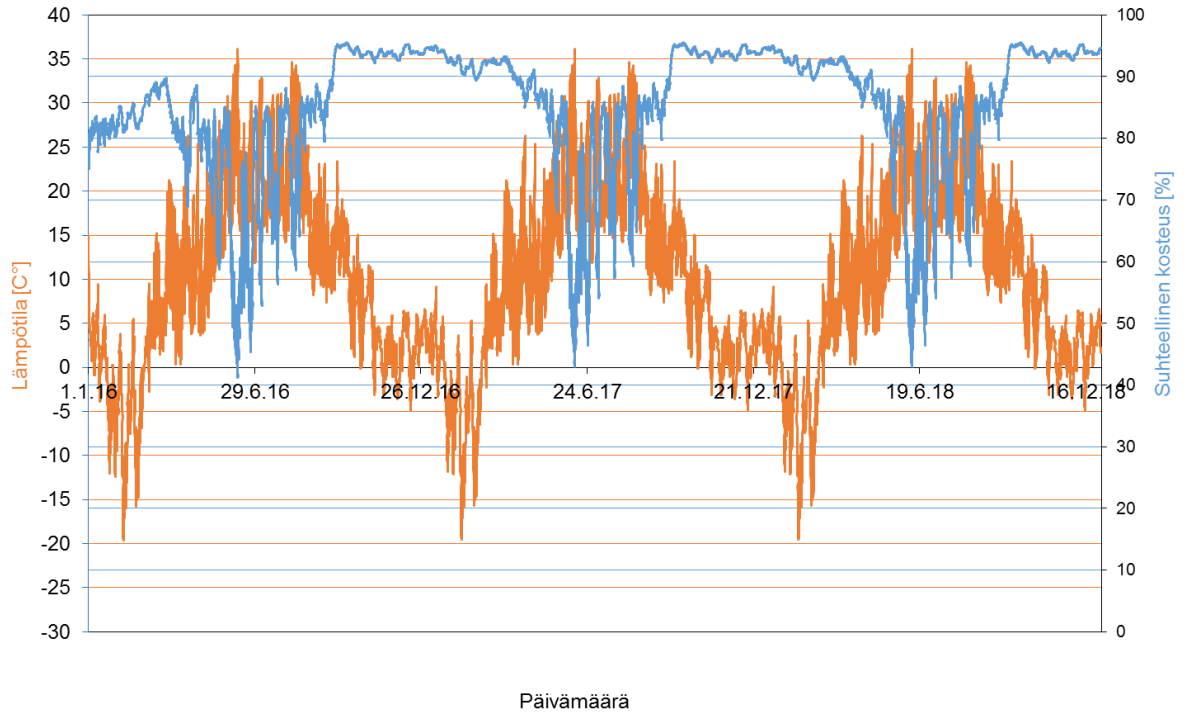


Tarkastelupiste 6

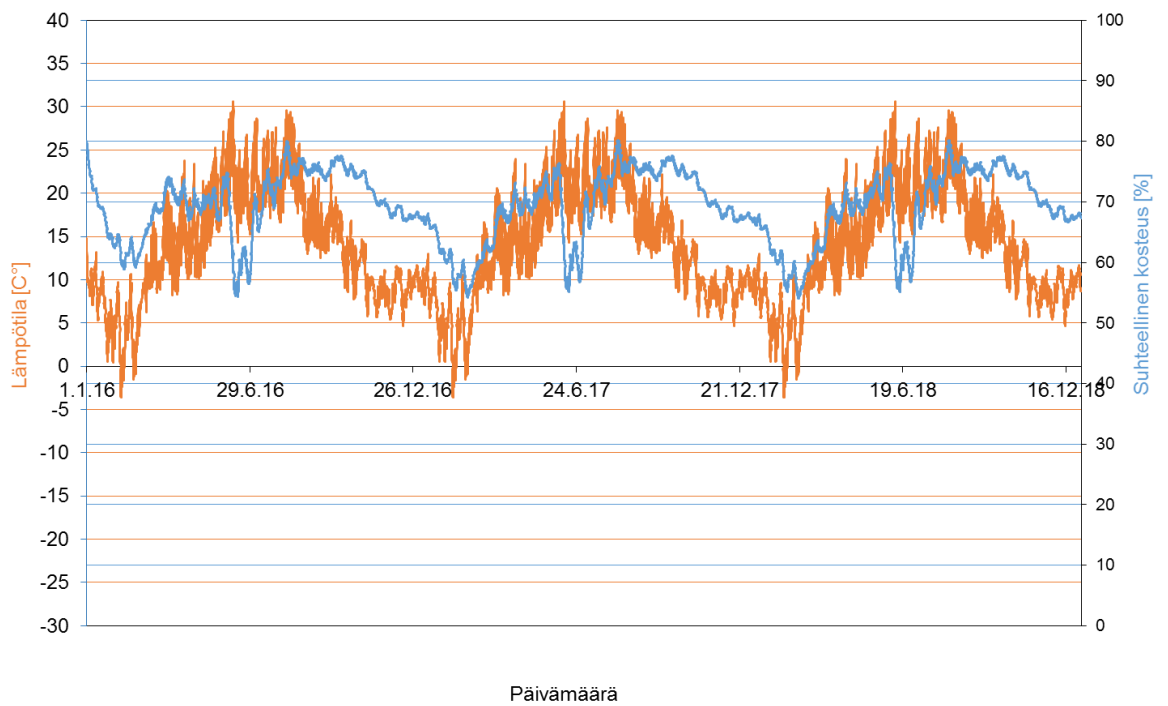


Korjattu rakenne, Vantaa 2007, ilmanvaihtuvuus 10 1/h

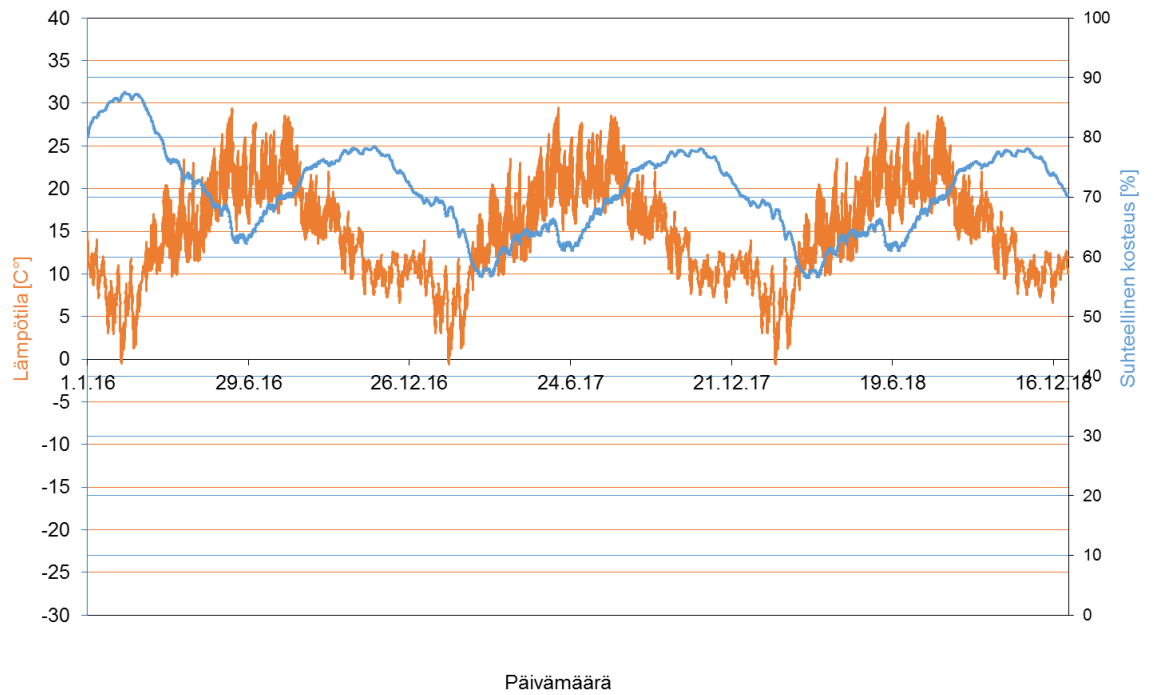
Tarkastelupiste 1



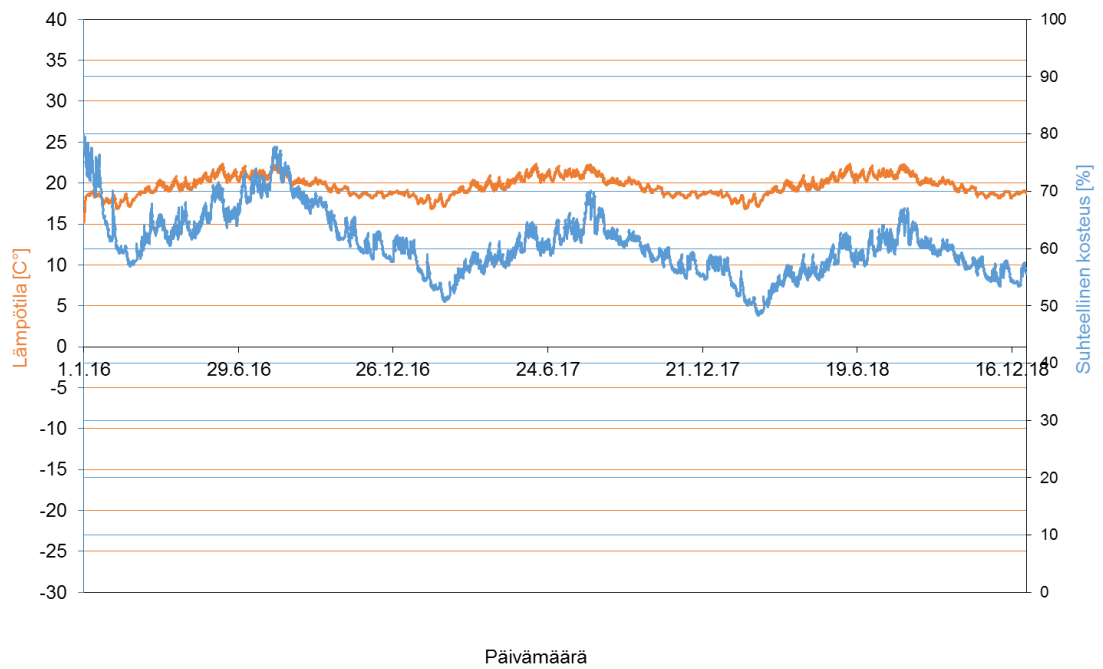
Tarkastelupiste 2



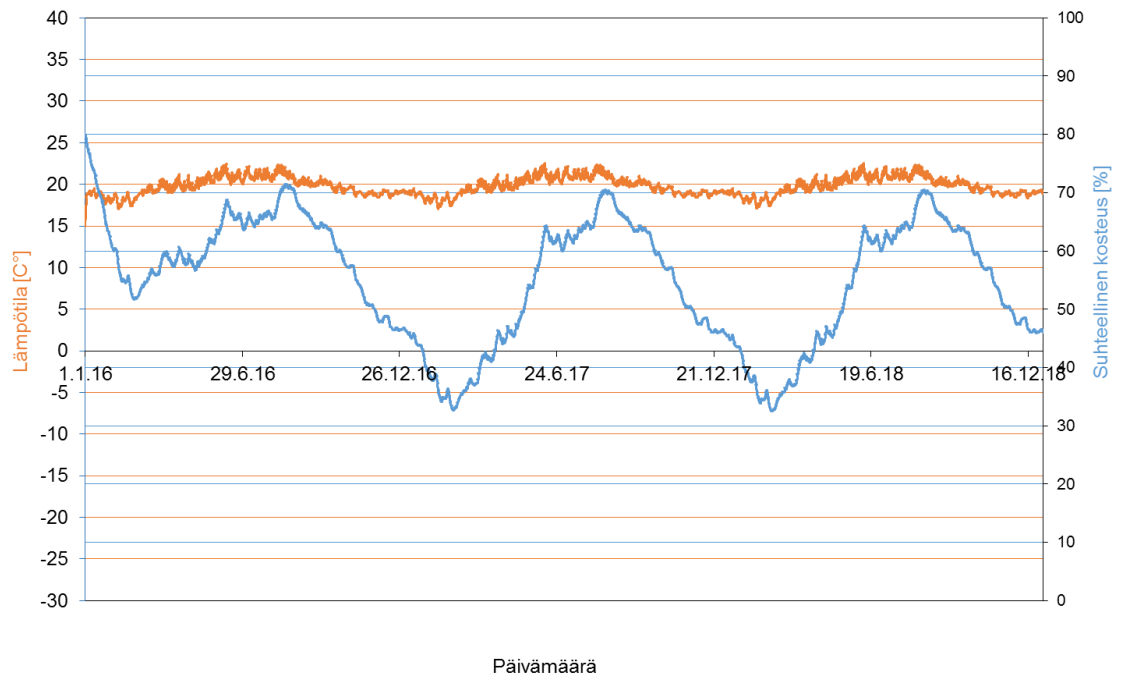
Tarkastelupiste 3



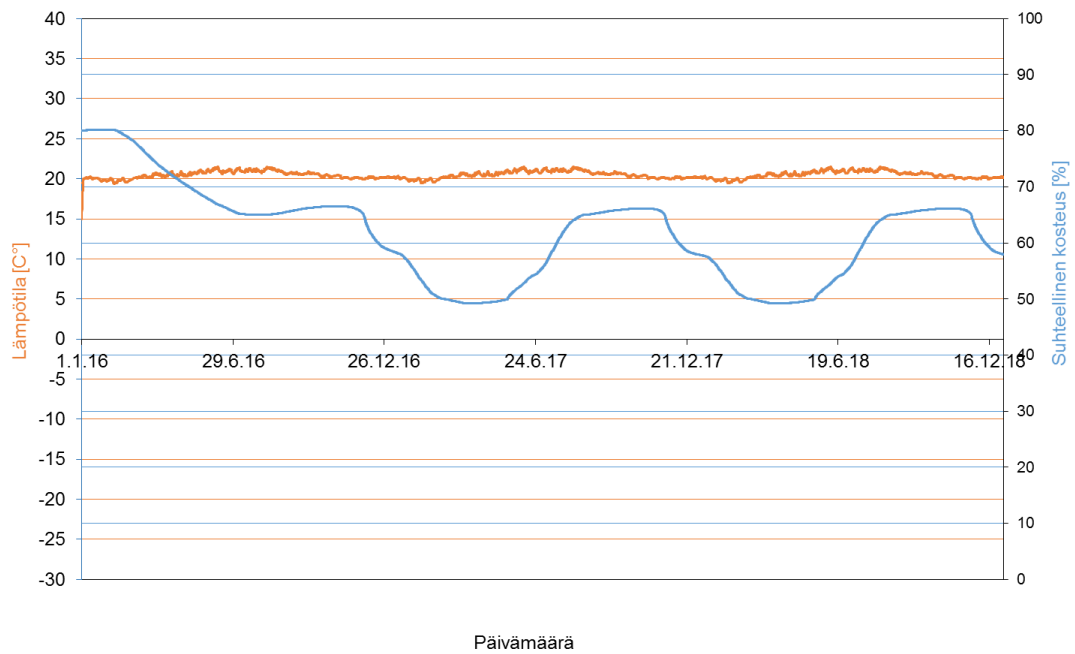
Tarkastelupiste 4



Tarkastelupiste 5

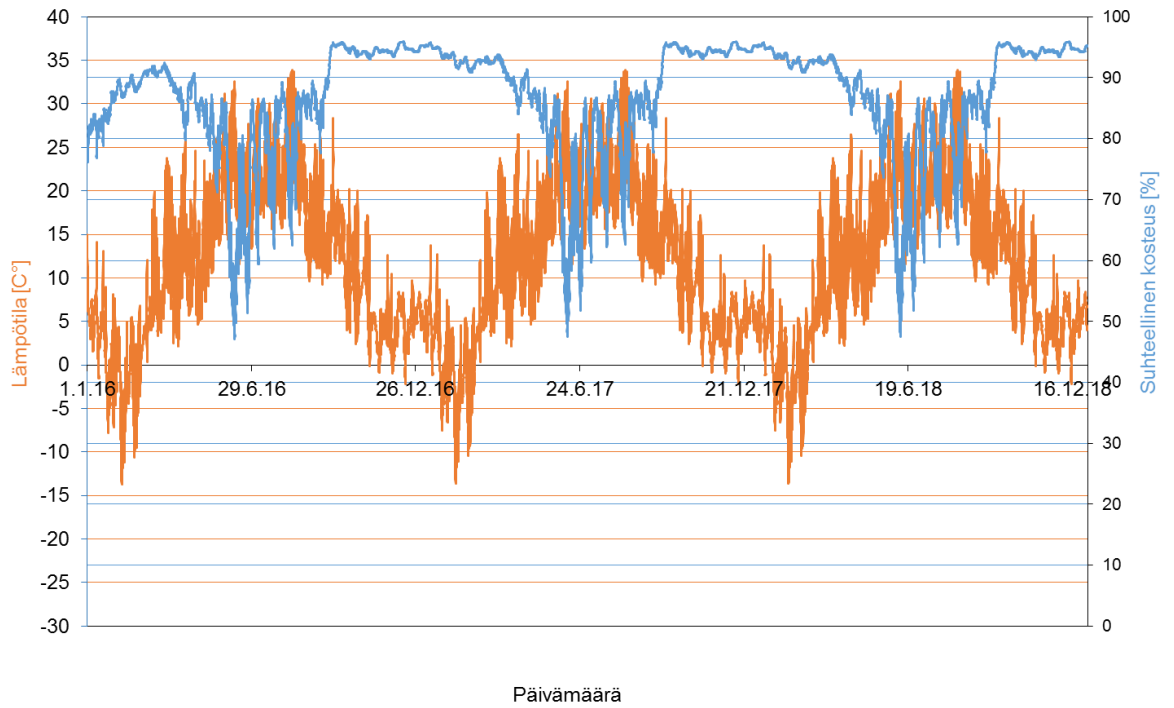


Tarkastelupiste 6

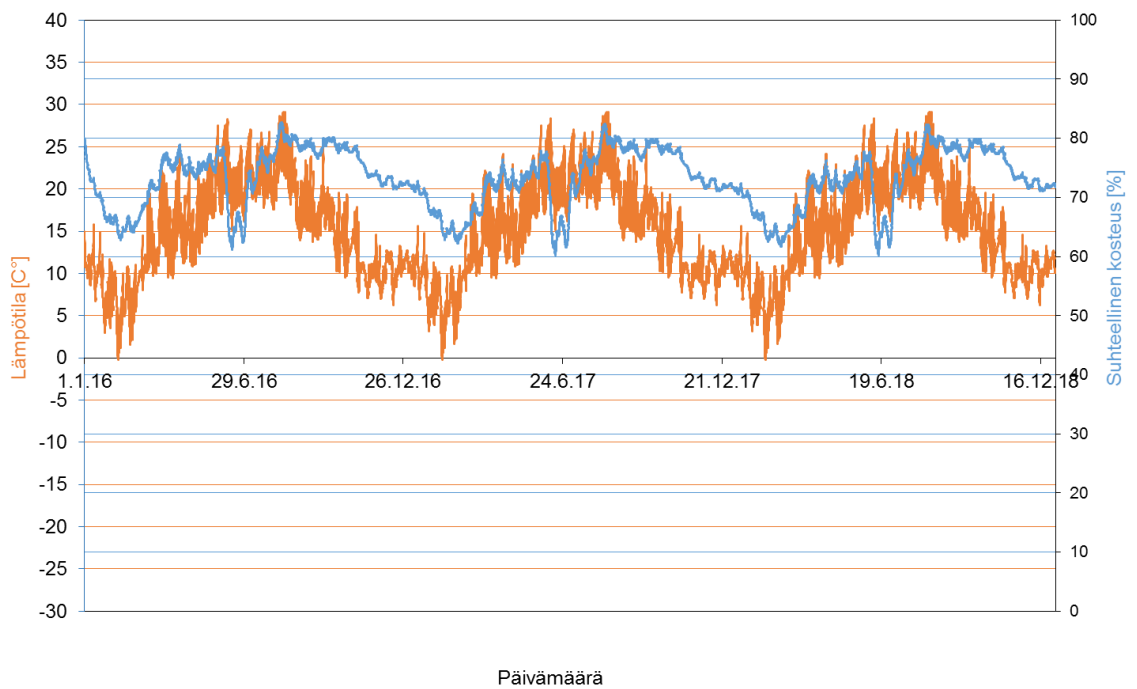


Korjattu rakenne, Vantaa 2050, ilmanvaihtuvuus 10 1/h

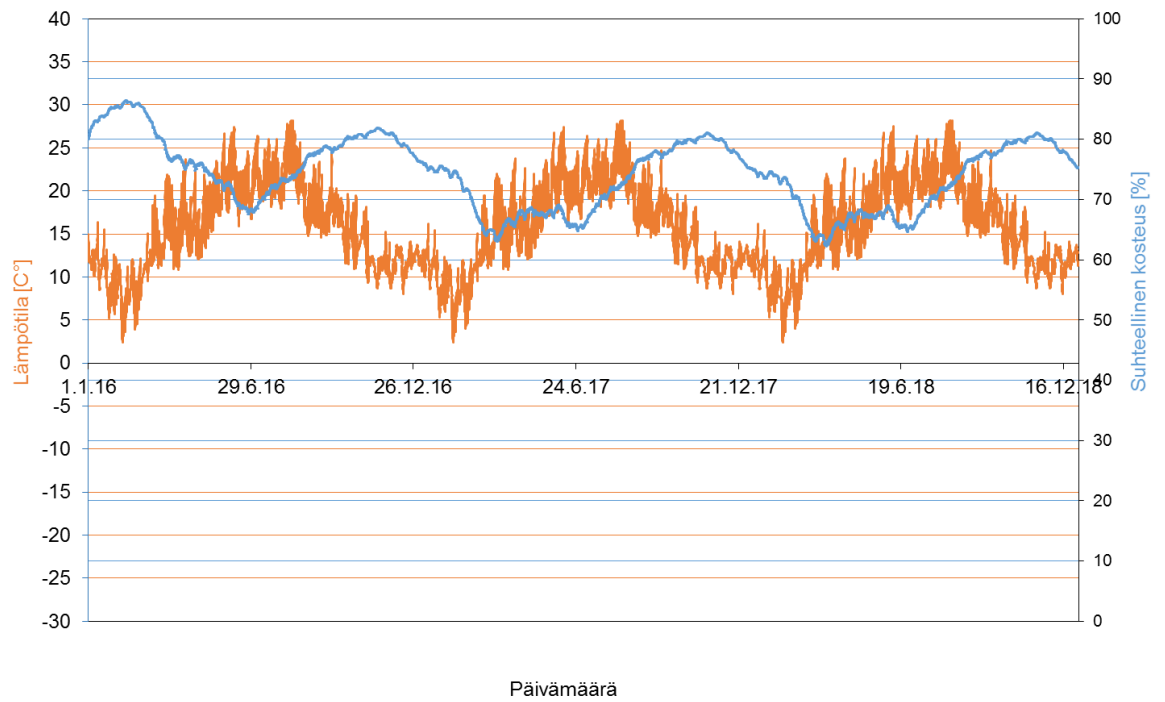
Tarkastelupiste 1



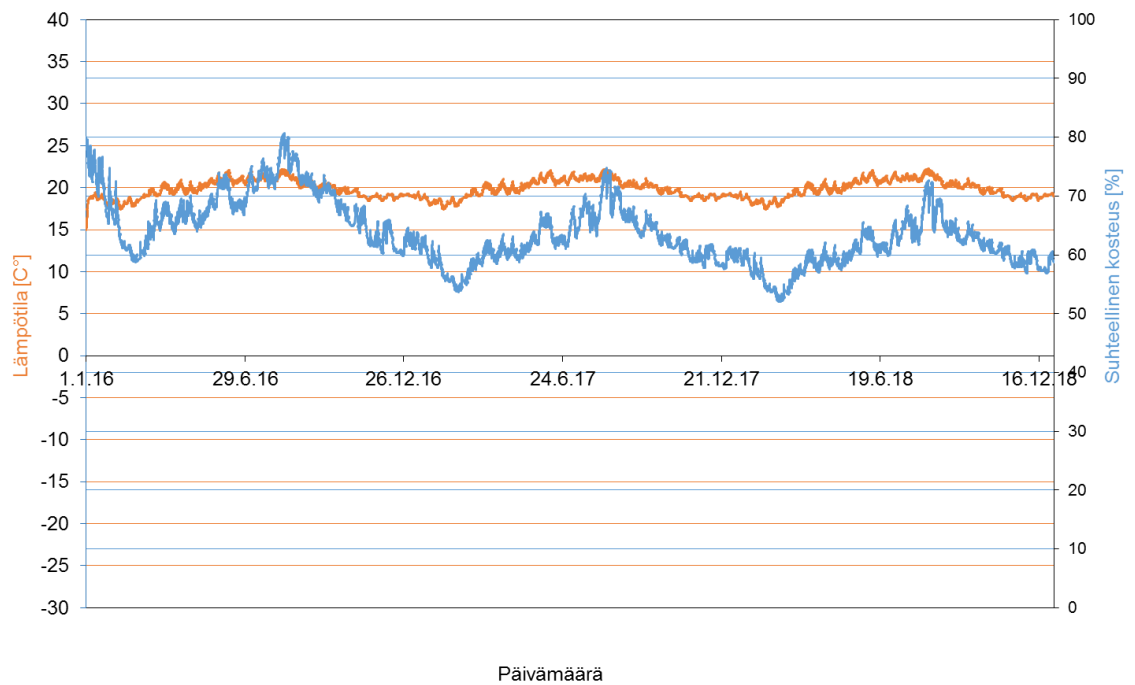
Tarkastelupiste 2



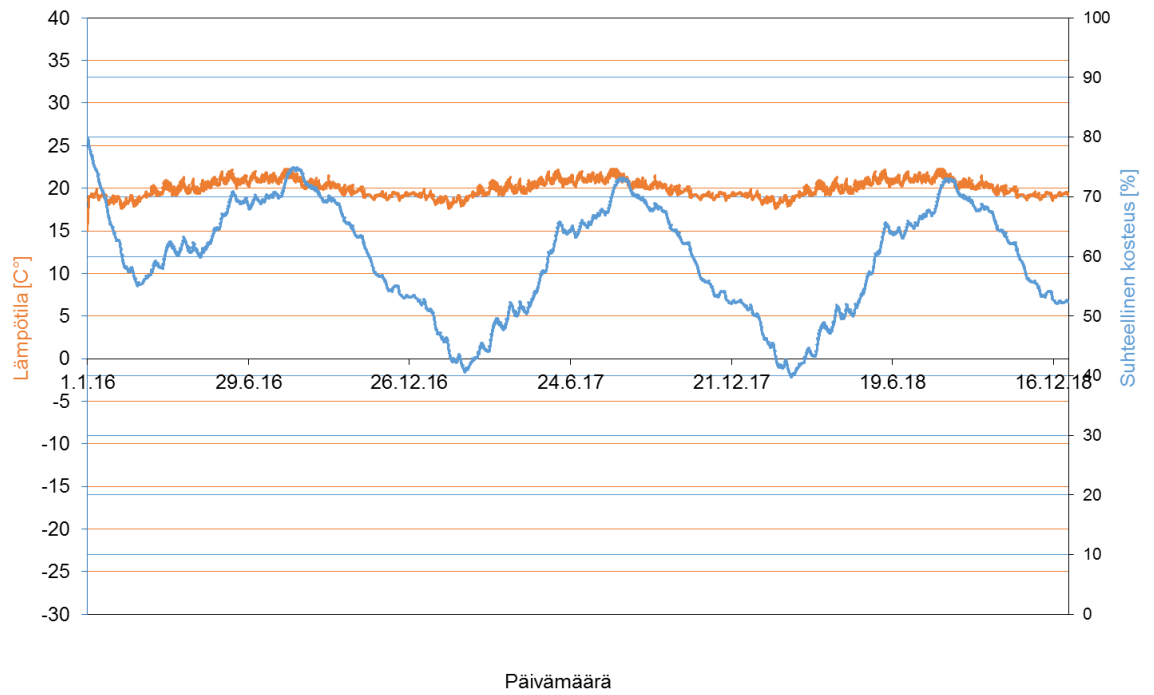
Tarkastelupiste 3



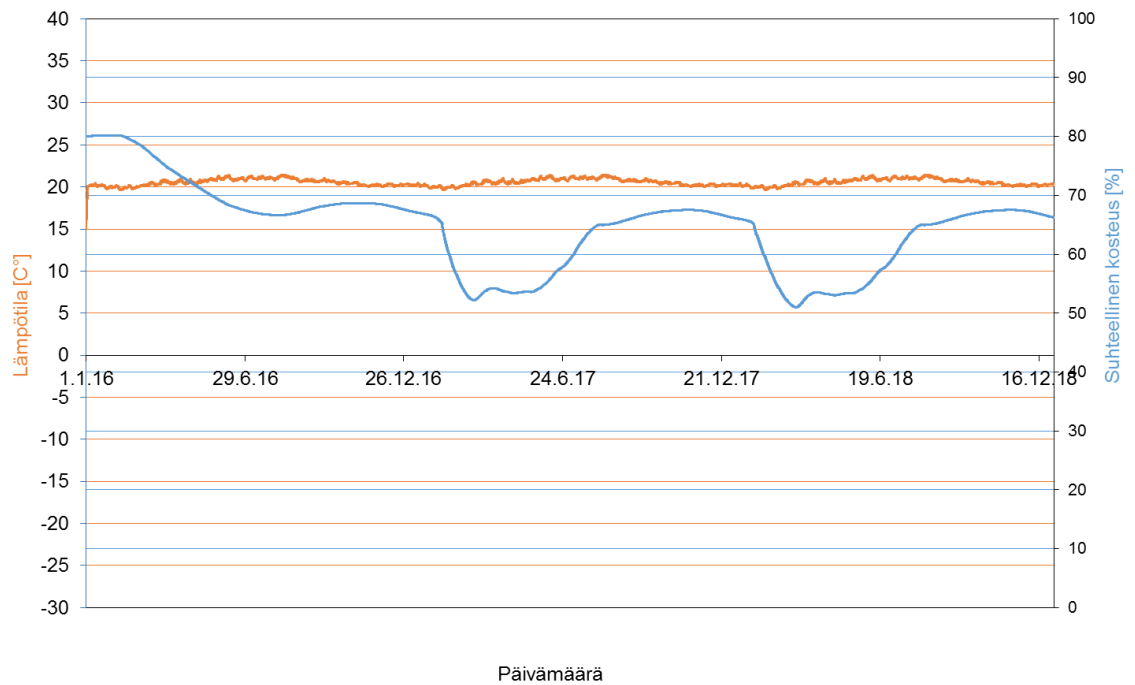
Tarkastelupiste 4



Tarkastelupiste 5

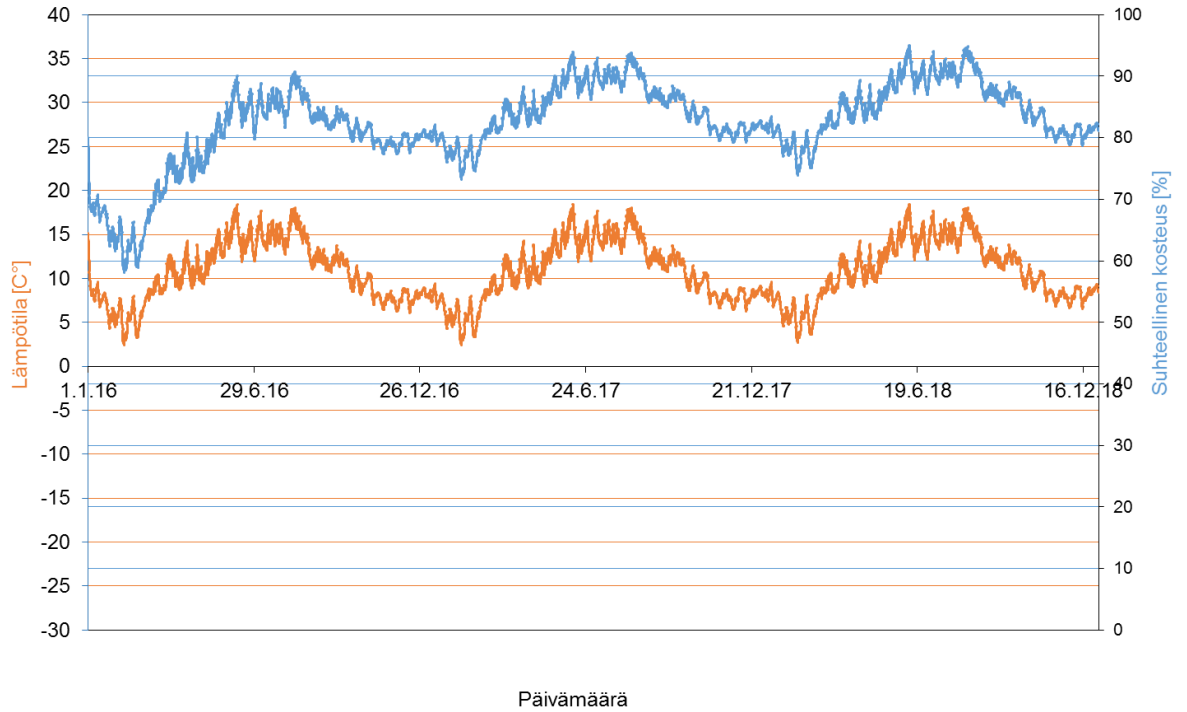


Tarkastelupiste 6

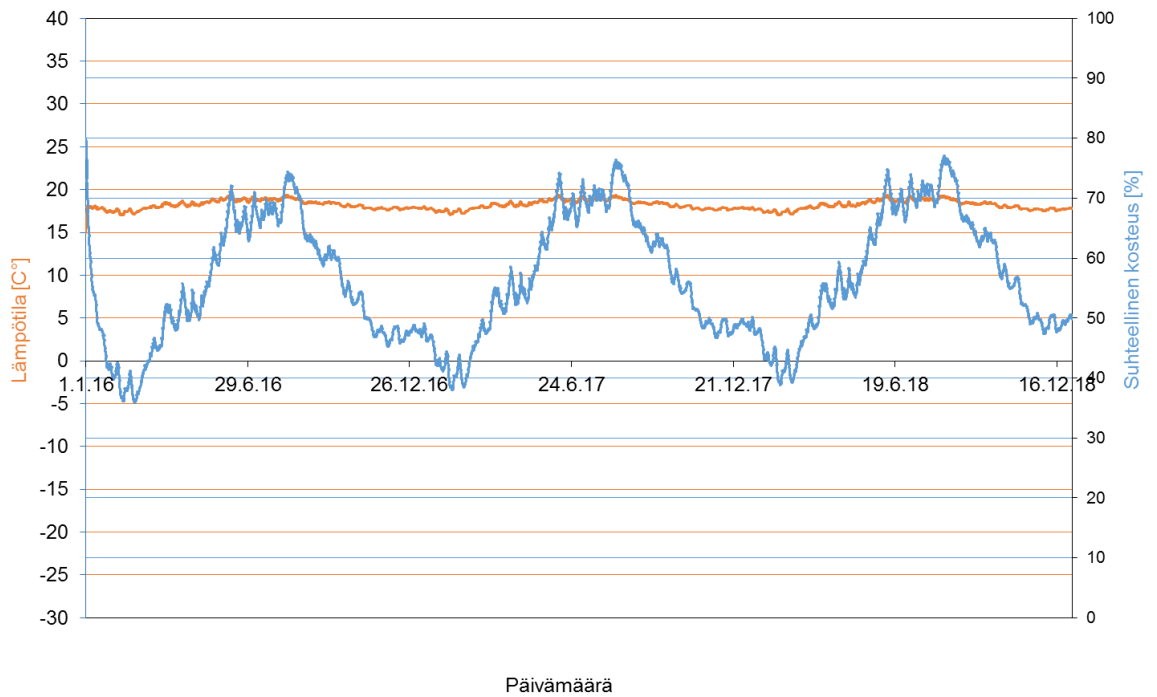


Valesokkelirakenne, Vantaa 2007

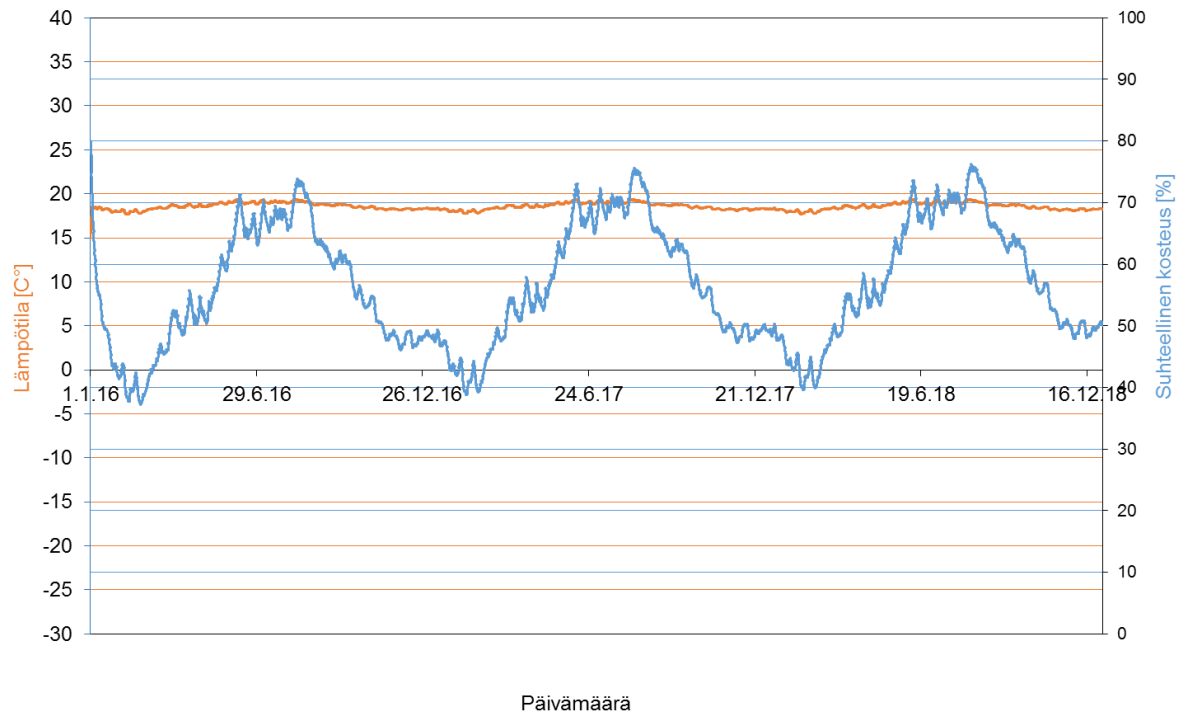
Tarkastelupiste 1



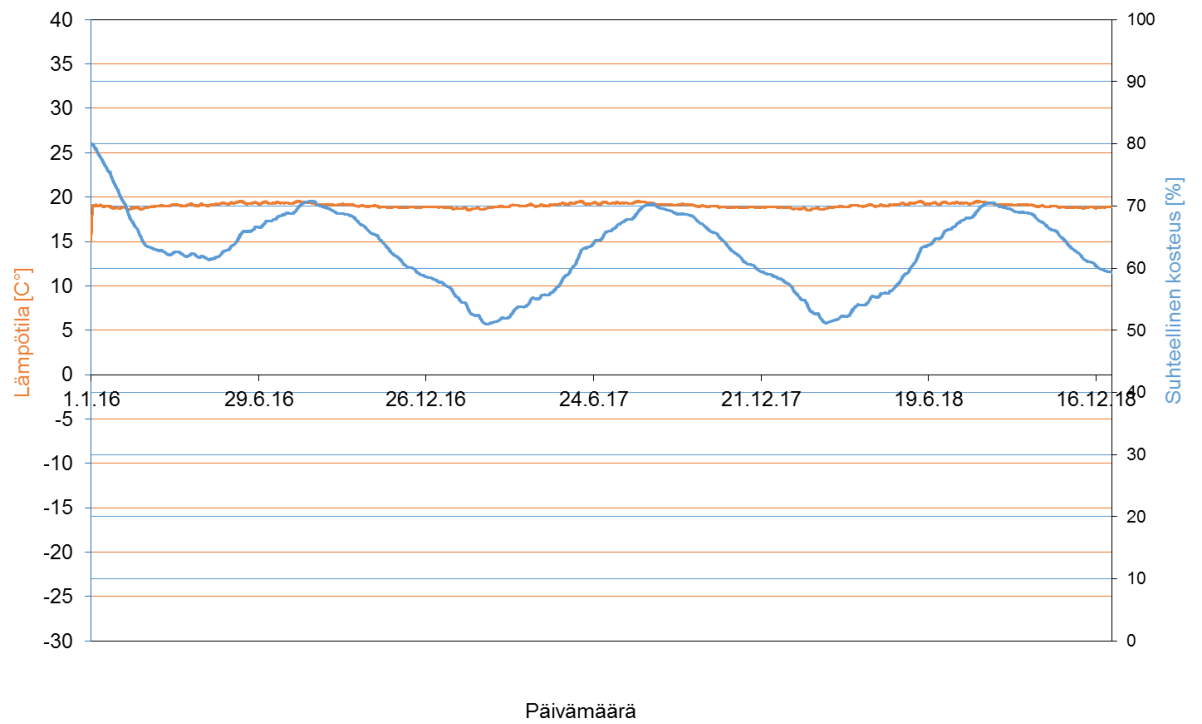
Tarkastelupiste 2



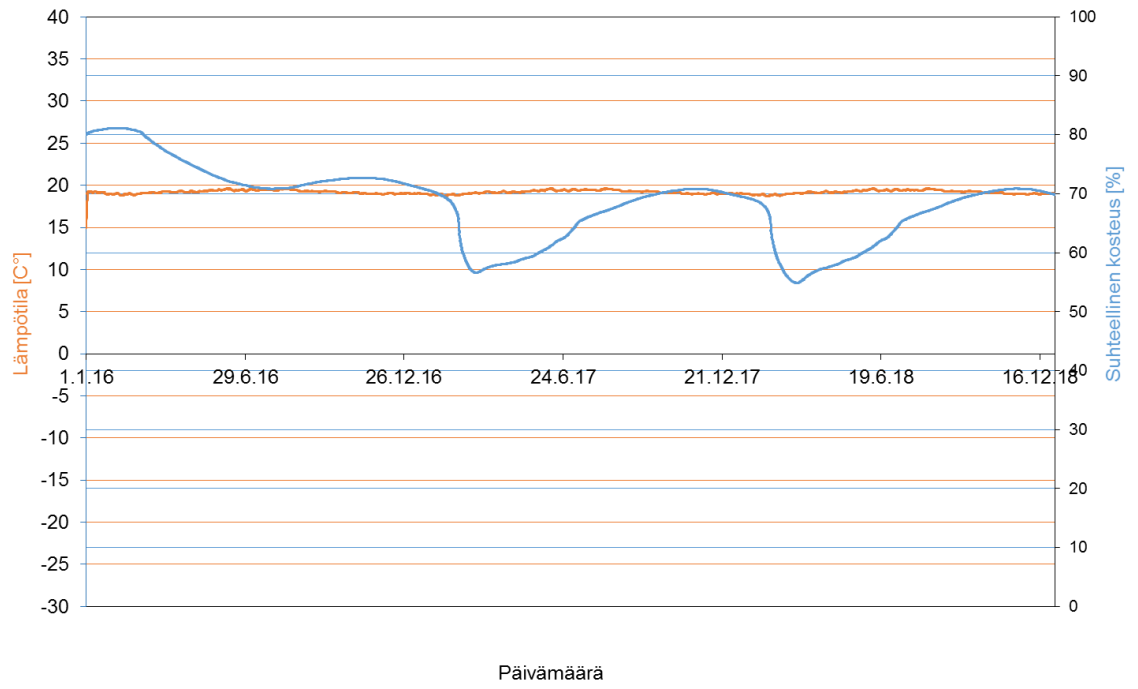
Tarkastelupiste 3



Tarkastelupiste 4

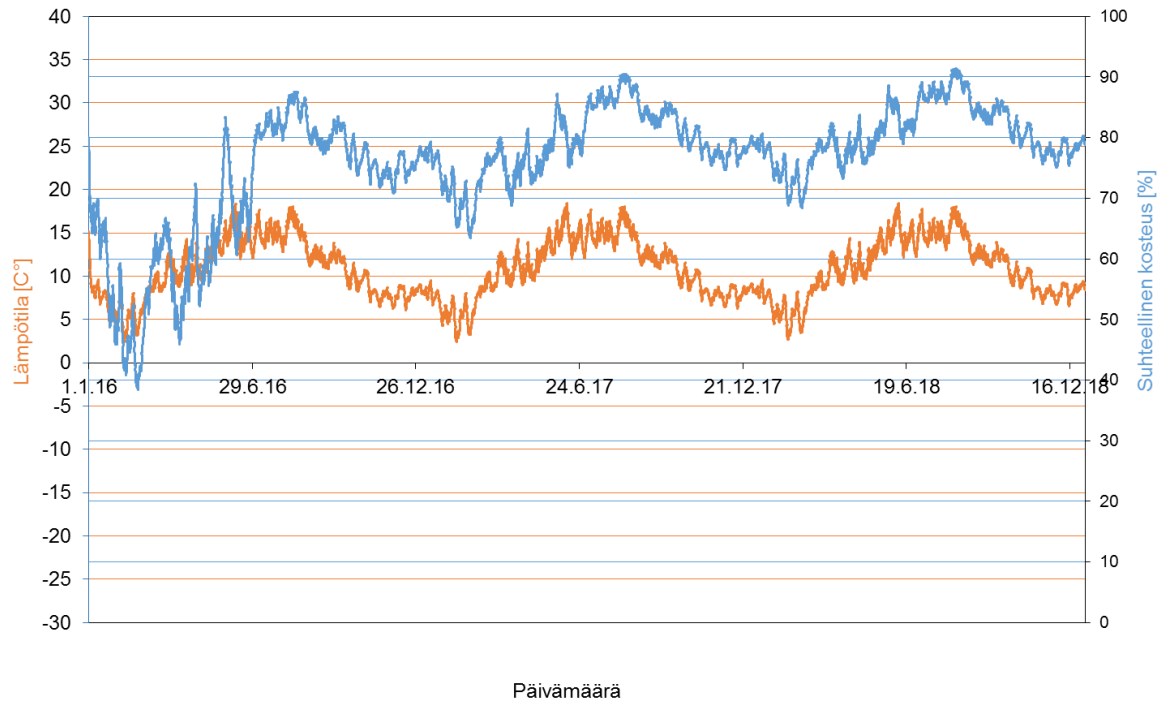


Tarkastelupiste 5

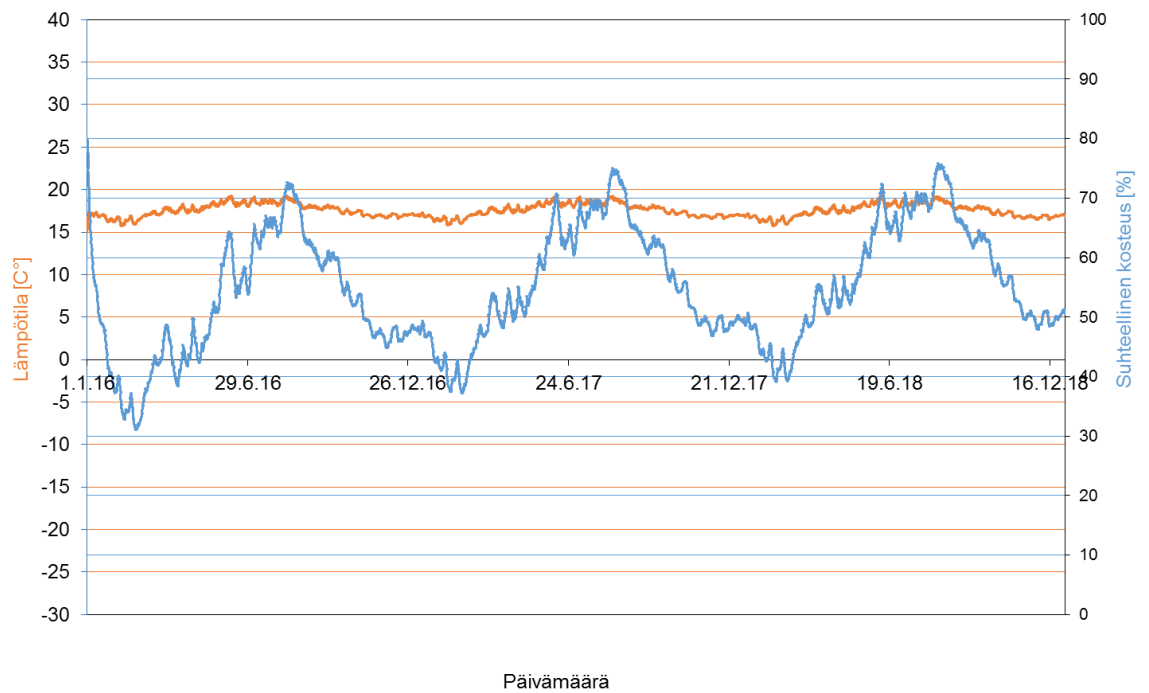


Valesokkelirakenne, Vantaa 2007, ilmanvaihtuvuus 10 1/h

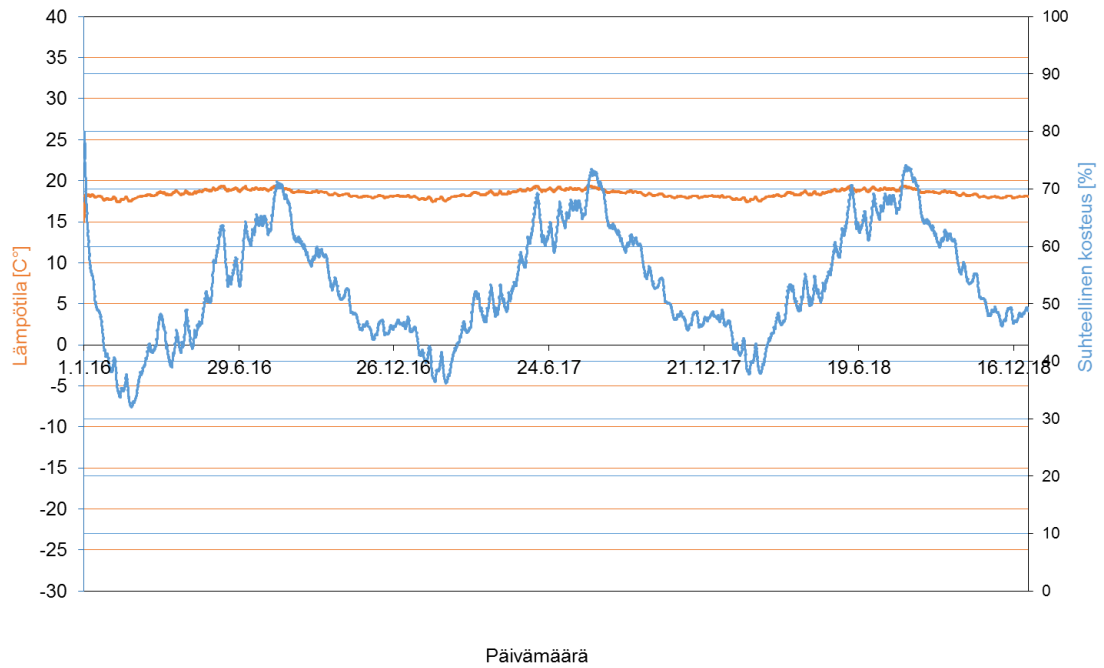
Tarkastelupiste 1



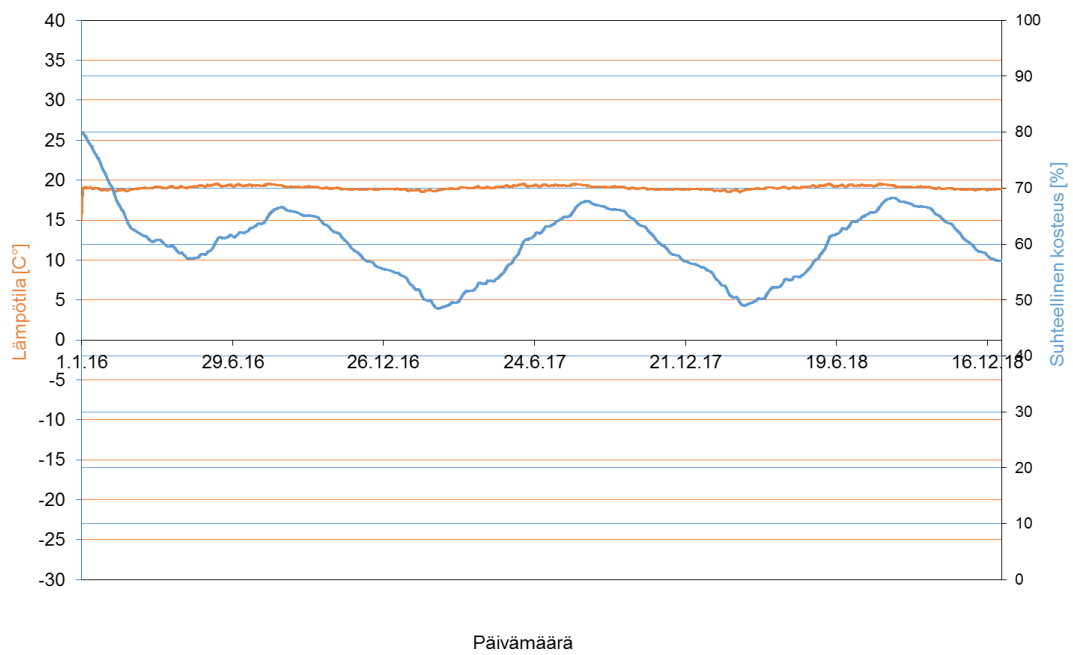
Tarkastelupiste 2



Tarkastelupiste 3



Tarkastelupiste 4



Tarkastelupiste 5

