

Janne Laukkanen

Rakennusfysikaalinen simulointi korjausrakentamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

30.11.2018

Tekijä Otsikko	Janne Laukkanen Rakennusfysikaalinen simulointi korjausrakentamisessa
Sivumäärä Aika	42 sivua + 3 liitettä 30.11.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	rakennetekniikka
Ohjaajat	Varatoimitusjohtaja Joni Sundström Yliopettaja Hannu Hakkarainen
<p>Opinnäytetyö tehtiin Insinööritoimisto Konstru Oy:n toimeksiannosta. Yrityksen päätoimialana on korjausrakennesuunnittelu, jonka lisäksi yritys tekee jonkin verran uudisrakennesuunnittelua sekä kuntotutkimuksia.</p> <p>Korjausrakentamisen kohteet ovat haastavia, koska vanhoissa rakennuksissa on usein rakennusfysikaalisesti huonosti toimivia riskirakenteita. Rakenteiden korjaaminen nykypäivän vaatimuksen mukaiseksi vaatii laajaa tuntemusta niin rakenteiden toiminnasta, rakennusmateriaalien ominaisuuksista kuin rakennusfysiikasta. Työn tavoitteena oli selvittää onko rakennusfysikaalisen simuloinnin käyttöönotto mielekästä korjausrakennesuunnittelussa, sekä kuinka paljon se vaatii resursseja suhteessa saatavaan hyötyyn nähden. Simulointiohjelmistoina käytettiin WUFI:n eri versioita.</p> <p>Työssä tutkittiin korjauskohteena olevan rakennuksen seinä- ja lattiarakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Tarkasteltavien tilojen olosuhteet ovat rakennusfysikaalisesti haastavat, koska lämpötilavaihtelut ovat merkittäviä. Lisäksi tiloissa on avonaisia merivesialtaita, jotka voivat nostaa ilman suhteellisen kosteuden varsin suureksi aiheuttaen rakenteille suolarasitusta.</p>	
Avainsanat	WUFI, korjausrakentaminen, rakennusfysikaalinen simulointi

Author Title	Janne Laukkanen Structural Physics Simulation in Rrepair Construction
Number of Pages Date	42 pages + 3 appendices 30 November 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Joni Sundström, Executive Vice President Hannu Hakkarainen, Principal Lecturer
<p>This thesis was conducted as a research study for Konstru Oy. The company's main field of work is structural design of repair construction, along with aspects of new construction and condition surveys.</p> <p>When it comes to structural physics, repair construction projects are challenging since old buildings often have poorly functioning as well as risky building structures. Rebuilding such structures to meet modern standards requires wide knowledge of the function of the structure, the features of the building materials and structural design.</p> <p>The goal of implementing structural physics simulation during the planning process of repair is to quantify the resources needed in respect to the benefits gained. Different versions of WUFI were used as simulation software.</p> <p>In this assessment, wall and floor structures of the target building were studied. Since there are high temperature variations, the conditions of the researched areas were challenging from the structural physics perspective. Additionally, some areas have open sea-water pools that can greatly increase humidity levels, thus causing salt burden.</p>	
Keywords	WUFI, repair construction, building physics simulation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Rakennusfysikaalinen suunnittelu	2
2.1	Yleisiä periaatteita	2
2.2	Rakenneratkaisut	3
2.3	Rakennusfysikaalinen suunnittelu korjausrakentamisessa	4
3	Lämmön ja kosteuden siirtyminen rakenteissa	5
3.1	Lämpö	5
3.1.1	Johtuminen	5
3.1.2	Säteily	7
3.1.3	Konvektio	7
3.2	Kosteus	7
3.2.1	Diffuusio	7
3.2.2	Vesihöyryn konvektio	8
3.2.3	Kondensoituminen	9
4	Rakennusfysikaalinen mallintaminen	9
4.1	Yleistä	9
4.2	Epästationäärinen lämpö- ja kosteuslaskenta	10
4.3	Stationäärinen laskenta	11
4.4	Rakenteen tai rakennuksen mallintaminen	11
4.5	Tulosten arviointi	12
5	Työssä käytetyt ohjelmistot	12
5.1	WUFI Pro	12
5.2	WUFI 2D	13
5.3	WUFI Plus	14
5.4	Dof-lämpö	14
6	Simuloitavat rakenteet	14
7	Simuloinnin lähtötiedot	18
7.1	Ilmasto	18

7.2	Tutkimustilat	20
7.3	Lämmin huonetila	21
7.4	Kantavan rakenteen ja sandwich-elementin välinen ilmarako	21
7.5	Maaperä	23
7.6	Tiiviit pinnat rakenteissa	23
8	Lämmön ja kosteuden huomioiminen simuloitavissa rakenteissa	24
8.1	Lämmön johtuminen	24
8.2	Lämpösäteily	24
8.3	Lämmön siirtyminen konvektiolla	25
8.4	Kosteuden diffuusio	25
8.5	Kosteuden siirtyminen konvektiolla	25
8.6	Kosteuden kondensoituminen	25
8.7	Kosteuden raja-arvot	25
9	Tulokset	26
9.1	WUFI 2D	26
9.1.1	WUFI 2D motion	27
9.1.2	WUFI Graph	29
10	Vertailulaskenta	31
10.1	Välipohjan kuivuminen	31
10.2	Välipohjarakenne, lämpötila 5 °C RH 100 %	33
10.3	Välipohjarakenne, lämpötila 15 °C RH 90 %	36
10.4	Kylmäsilta WUFI 2D:llä	38
11	Johtopäätökset	40
	Lähteet	43

Liitteet

Liite 1. Simuloinnissa käytetyt rakennetyypit (vain työn tilaajan käyttöön, ei sisälly kirjalliseen raporttiin)

Liite 2. WUFI 2D tulokset

Liite 3. Olosuhdemittaukset

Lyhenteet

Epästationäärinen laskenta	Ajasta riippuva, sekä materiaalien kosteus- ja lämpökapasiteetin, ja ulkoiset olosuhteet huomioon ottava rakennusfysikaalinen simulointi.
Gelcoat	Lasikuidun pintaan levitettävä pinnoite. Gelcoat-pinnoitteella saadaan viimeistelty pinta, joka on helppo puhdistaa ja estää kosteuden imeytymisen rakenteeseen. Käytetään tyypillisesti esimerkiksi veneen pohjassa.
Hygroskooppisuus	Materiaalin kyky sitoa ja luovuttaa ilman vesihöyryä.
Sandwich-elementti	Kylmätilaelementti, jossa sisällä solumuovieriste johon on molemmin puolin laminoitu lasikuitukerros jossa on gelcoat-pinnoite.
Sd-arvo	Suhteellinen diffusiovastus. Diffusiovastuskertoimen suhde materiaalikerroksen paksuuteen.
Stationäärinen laskenta	Yksinkertainen, yleensä käsinlaskukaavoihin perustuva ohjelmallinen lämpötila- ja kosteuslaskenta.
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär, Fraunhoferin rakennusfysiikan instituutin kehittämä sovellus lämmön ja kosteuden siirtymisen simulointiin rakenteissa.
μ	Materiaalin diffusiovastuskerroin.

1 Johdanto

Tämän työn tavoitteena on selvittää rakennusfysikaalisen simuloinnin mahdollisuuksia haastavassa korjauskohteessa. Työssä tutkitaan, kuinka mielekäästä ja tarpeellista simulointi on, ja millaisia tuloksia on mahdollista saavuttaa. Lisäksi tavoitteena on arvioida simulointiohjelman etuja verrattuna siihen, että rakenteet suunnitellaan käyttäen hyvää rakennustapaa sekä yrityksellä olevaa rakennusfysiikan osaamista, mutta käyttäen yksinkertaisempaa laskentaohjelmaa. Työ keskittyy pääasiallisesti rakennusfysikaalisen mallintamisen mahdollisuuksiin, rakennusfysiikan teoriaosuuden tarjotessa taustaa tulosten arviointiin. Tavoitteena on saada mallinnettua mahdollisimman laaja kokonaisuus yksittäisen rakennetyypin sijaan, sekä arvioida rakenteen kokonaistoimintaa saatujen tulosten perusteella.

Kohteena olevaan rakennukseen tulee tutkimustiloja, joissa tehdään kokeita avoimissa merivesialtaissa, tilojen lämpötilan ollessa +5...+20 °C. Rakenteen haasteet liittyvät merivedestä tulevaan suolarasitukseen, sekä tiloissa vallitsevaan kosteuspitoisuuteen. Toinen merkittävä haaste on, että tilat rajoittuvat osin ulkoilmaan, lämpimään huonetilaan ja alimmassa kerroksessa maanvaraiseen laattaan. Pisimmillään jopa kuusi kukaudesta kestävien kokeiden aikainen kylmyys ja kosteus eivät saa levitä tutkimustiloista rakenteisiin, joka voisi aiheuttaa ongelmia erilaisissa rajapinnoissa. Koska kyseessä on peruskorjauskohde, asettavat olemassa olevat rakenteet rajoituksia mahdollisille rakenneratkaisuille.

Rakenteita lähdettiin tutkimaan kosteus- ja lämpösimulointiin tarkoitetulla WUFI-ohjelmistolla, joka on saksalaisen Fraunhoferin rakennusfysiikan instituutin kehittämä sovellus. Tarkoitus oli selvittää, mikä simulointitapa ja ohjelmiston versio on tehokkain ja järkevin rakennesuunnittelun tukena, kun halutaan arvioida rakenteen lämpö- ja kosteusteknisestä toimintaa.

Rakennusfysikaalisen mallintamiseen on tarjolla useita muitakin ohjelmistoja. Opintojen aikana olen kuitenkin käyttänyt WUFI:a, sekä Comsol Multiphysics ohjelmaa, joten oli luontevaa valita toinen näistä. WUFI:n keskittyminen pelkästään rakennusfysiikkaan, selkeä käyttöliittymä ja mahdollisuus vertailla eri versioiden ominaisuuksia saivat valinnan kallistumaan kyseiseen ohjelmistoon.

Vertailulaskentaa tehtiin Dof-lämpö-ohjelmistolla, jolla on mahdollista arvioida yksittäisen rakennetyypin lämpö- ja kosteuskäyriä, kondensaatiomäärää, U-arvoa sekä energiankulutusta. Ohjelma tekee laskennan kuitenkin stationäärisesti, eli laskenta perustuu käsinlaskentamenetelmissäkin käytettyihin kaavoihin. Tämä tarkoittaa yksinkertaistuksia liittyen esimerkiksi ulko-olosuhteisiin ja kosteuden kapilaariseen nousuun. Dynaamisissa, eli muuttuvissa olosuhteissa, laskenta tehdään yleensä WUFI:n kaltaisilla laskentaohjelmilla, jotka pystyvät paremmin huomioimaan esimerkiksi materiaalien hygroskooppiset ominaisuudet ja ilmaston vaikutuksen rakenteeseen.

2 Rakennusfysikaalinen suunnittelu

2.1 Yleisiä periaatteita

Rakennusten kosteusteknistä toimintaa käsittelevässä asetuksessa määrätään seuraavaa:

Sisäisistä ja ulkoisista kosteuslähteistä peräisin oleva vesihöyry, vesi, lumi tai jää ei saa haittaa aiheuttaen kulkeutua rakenteisiin. Sadevesi tai lumi ei saa kulkeutua eikä kosteus saa kerääntyä vaipparakenteeseen myöskään ikkunoiden, ovien tai muiden vaippaan liittyvien rakenteiden, rakennusosien ja laitteiden kautta. Rakennuksen vaipan ja sen rakennekerrosten ja liitosten on muodostettava kokonaisuus, joka estää tuulta, viistosadetta ja tuulenpainetta kuljettamasta vettä vaipan pintaa pitkin rakenteisiin.

Rakennuskosteuden ja rakenteisiin ulko- tai sisäpuolelta satunnaisesti kulkeutuvan kosteuden on voitava poistua haittaa aiheuttamatta. Pinnoiltaan kastuvien rakenteiden on kestävä veden vaikutus. [6.]

Rakennusfysikaalisessa suunnittelussa otetaan huomioon lämmön, ilman ja kosteuden siirtyminen, ja niiden vaikutus rakenteiden suunnitteluun. Tarkoituksena on tarkastella niin rakenteiden toimintaa, kuin niiden vaikutusta rakennuksen olosuhteisiin ja ominaisuuksiin. Rakennusfysikaaliseen suunnitteluun kuuluu rakenteellinen suunnittelu, sekä laskennalliset tarkastelut. [2 s.17.]

Yleensä rakennusfysikaalinen suunnittelu keskittyy rakenteen toiminnan suunnitteluun, mutta yhä enenevässä määrin halutaan tehdä koko rakennuksen toimintaan liittyviä tarkasteluja. Energiatohokkuuden kiristyvät vaatimukset ja sisäilman laadun vaatimukset, sekä ilmastomuutos tekevät rakennusfysikaalisesta suunnittelusta jatkuvasti vaativampaa, joten erilaisten simulointiohjelmien käyttö on perusteltua.

Lähtökohta suunnittelussa on aina se, että rakennus täyttää vähintään lainsäädännön edellyttämät olennaiset tekniset vaatimukset. Viranomais määräykset ja ohjeet, sekä eri yhdistysten ohjeet sisältävät erilaisia malliratkaisuja, joiden pohjalta suunnittelua voidaan lähteä tekemään. Rakennusfysikaalisesti hyvin toimivilla ratkaisuilla onkin merkittävä vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen ja ympäristövaikutuksiin, sisäilman laatuun ja hallittavuuteen, rakennuksen terveellisyyteen, viihtyvyyteen ja käyttökelpoisuuteen sekä sen käyttökään ja elinkaaritallouteen. Huomattavaa on kuitenkin se, että normien ja vaatimusten täytyminen ei vielä osoita rakenteen olevan lämpö- ja kosteusteknisesti varmatoiminen, ja toisaalta taas ohjeista poikkeaminen ei tarkoita, että rakenne ei toimi. [2 s.17,18.]

Rakennukselle on yleensä monia vaatimuksia, jotka voivat olla keskenään ristiriidassa. Vaatimukset voivat liittyä lujuteen ja vakauteen, paloturvallisuuteen, käyttöturvallisuuteen, hygieniaan, energiatehokkuuteen, kestävyteen jne. Kun näihin lisätään mahdollisimman helppo rakennettavuus ja taloudelliset tavoitteet, hyvä lopputulos vaatii laaja-alaista osaamista rakentamisesta. [2 s.17.]

Erittäin tärkeässä osassa, varsinkin vaativissa kohteissa, on riskitarkastelu, jonka avulla voidaan valita sopivia toimenpiteitä laadunvarmistukseen. Riskitarkastelu tulee tehdä olemassa olevien lähtötietojen perusteella, mitkä ovat rakennuttajan tavoitteet liittyen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. [2 s.17.]

2.2 Rakeneratkaisut

RIL 255 -1-2014 Rakennusfysiikka 1 toteaa suunniteltavista rakenteista seuraavaa:

Rakennusfysikaalisen suunnittelun tulee pohjautua varmatoimisiin ja vikasietoiisiin ratkaisuihin, joilla varmistetaan rakennuksen käyttäjien turvallisuus ja terveellisyys. [2 s.22.]

Kun valitaan rakeneratkaisua kohteeseen, hyvä tavoite on mahdollisimman selkeä rakenne, jolloin sen toimivuutta on helppo arvioida. Hyviä periaatteita suunnitteluun ovat esimerkiksi:

- kosteuslähteiden minimointi
- kosteuden pääsyn ja kertymisen minimointi rakenteeseen
- kosteuden tulee päästä poistumaan rakenteesta

- rakenne ei ole herkkä työ- ja ylläpitovirheille
- rakenne suunnitellaan helposti rakennettavaksi ja korjattavaksi
- rakenne kestää tavanomaisesta poikkeavia rasituksia, esimerkiksi rakennusaikaista kosteusrasitusta tai vuotovesiä. [2 s.17,18.]

Rakenteiden toimintavarmuutta voidaan parantaa soveltamalla vastaavaa varmuuskerroinajattelua kuin kantavien rakenteiden suunnittelussa, kun määritetään esimerkiksi lämpö- ja kosteuskuormia. Lisäksi vaadittavat raja-arvot voidaan valita riittävän tiukoiksi. [2 s.22.]

Rakenteita suunniteltaessa tulee ottaa huomioon myös niiden vikasietoisuus. Materiaaleissa voi olla laatueroja, ikääntyminen voi aiheuttaa ongelmia sekä rakentamisessa, huollossa ja käytössä voidaan tehdä virheitä. Rakennuksen tulisi kestää järkevissä rajoissa näistä johtuvat lisärasitukset. Rakennusaikaisia virheitä voidaan vähentää myös hyvällä detaljien suunnittelulla. Kaikki liitoskohdat on suunniteltava, eikä ratkaisuja saa jättää työmaan ratkaistavaksi. [2 s.18,22.]

Yleensä on hyvä käyttää rakenneratkaisuja, joista on pitkäaikaisia kokemuksia. Tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista, joten uusien rakennetyyppien ja materiaalien suunnittelu ja toteutus vaatii poikkeuksellisen huolellista suunnittelua sekä toteutusta. Yleensä ainakin liitoksissa ja yksityiskohdissa joudutaan vakioratkaisuja muokkaamaan kohteen mukaan. Joissain tapauksissa voidaan tehdä myös täysimittaisia toimintakohteita. [2 s. 18,23,24.]

2.3 Rakennusfysikaalinen suunnittelu korjausrakentamisessa

Toisin kuin uudisrakentamisessa, korjausrakentamisessa joudutaan toimimaan jo olemassa olevien rakenteiden puitteissa. Usein korjattavat rakenteet voivat olla kosteustekniseltä toiminnaltaan virheellisiä, tai vähintäänkin riskirakenteita. Varsinkin jos vaipparakenteissa on vaikeasti uusittavia massiivirakenteita, voi olla tarpeen tehdä lämpö- ja kosteusteknisiä tarkasteluja, jotka voivat edellyttää myös laskennallista analyysiä. [2 s.50.]

Tyypillinen kosteustekninen tarkastelu liittyy kastepisteen määrittämiseen tai pitkäaikaiseen kosteuden kerääntymiseen rakenteeseen. Esimerkiksi massiivinen kivirakenne, johon lisätään eristystä sisäpuolelle on rakenne, joka vaatii tarkastelua. Riskinä

kyseisessä ratkaisussa on kosteuden kerääntyminen massiivirakenteen ja lämmöneristeen rajapintaan. [2 s.51.]

3 Lämmön ja kosteuden siirtyminen rakenteissa

3.1 Lämpö

3.1.1 Johtuminen

Johtuminen, eli konduktio, esiintyy kiinteissä aineissa ja nesteissä. Siinä molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen, toisin sanoen tapahtuu lämmön virtaamista. Lämpö pyrkii aina tasoittumaan väliaineessa, virraten lämpimästä kylmempään suuntaan. [1 s.40.]

Lämmön johtumista käsitellään tässä myös kaavojen muodossa, koska simuloinnin lähtöarvoihin tarvitaan mm. pinnan lämpövastuksia sekä materiaalin lämmönjohtavuutta.

$$q = \frac{\theta_{su}}{R_{su}} \quad (1)$$

missä

θ_{su}	= kokonaislämpötilaero	[K]
R_{su}	= rakenteen lämmönvastus	[(m ² °C)/W]

Rakenteen kokonaislämmönvastus saadaan jakamalla kokonaislämpötilaero kaikkien rakennekerrosten, sekä pintavastusten yhteenlasketulla lämmönvastuksella. Yksittäisen kerroksen lämmönvastus saadaan laskettua jakamalla rakennekerroksen paksuus materiaalin lämmönjohtavuudella λ . Sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset on eritelty taulukossa 1. [3 s.468.]

Rakenteen lämmönvastus:

$$R_{su} = R_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{si} \quad (2)$$

missä

λ	materiaalin lämmönjohtavuus	$[W/mK]$
d	rakennekerroksen paksuus	$[m]$

Taulukko 1. Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus R_{si} ja R_{se} [15 s.20.]

Pintavastus m^2K/W	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaaka-suoraan	Alaspäin
Sisäpuolen pintavastus R_{si}	0,1	0,13	0,17
Ulkopuolen pintavastus R_{se}	0,04	0,04	0,04

Usein esiintyvä lämmönläpäisykerroin, eli U-arvo, on materiaalikerroksen lämmönvastuksen käänteisarvo:

$$U = \frac{1}{R_{su}} \quad (3)$$

Missä

U	lämmönläpäisykerroin	$[W/m^2K]$
R_{su}	rakenteen yhteenlaskettu lämmönvastus	$[(m^2K)/W]$

Materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluarvona λ voidaan käyttää ensisijaisesti SFS-EN-standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan määritettyä lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa. Lisäksi voidaan käyttää taulukkoarvoja, joita löytyy eri julkaisuista, esimerkiksi ”RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1” kirjasta. Viimeisenä vaihtoehtona voi olla jollakin muulla menetelmällä määritetty lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo. Mikäli samalla aineelle on annettu eri lämmönjohtavuuden arvoja, tulee valita parhaiten kyseiseen kohteeseen soveltuva arvo. [7 s.15.]

3.1.2 Säteily

Säteilyssä eli emissiossa, energiaa siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Mikä tahansa kappale, jonka lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettää eli emittoi säteilyä. Eniten lämpösäteilyä emittoi musta kappale. [8 s.13.]

Säteilylämpö esiintyy rakennustekniikassa lyhytaaltoisena auringonsäteilynä, sekä pitkäaaltoisina kappaleiden säteilemänä lämpönä. Pitkäaaltoisella säteilyllä on vaikutusta esimerkiksi tarkasteltaessa ikkunan lämmönläpäisyä. Lasi läpäisee hyvin auringon lyhytaaltoisen säteilyn, mutta läpäisee huonosti sisältä ulospäin suuntautuvaa pitkäaaltoista säteilyä. [1 s.40.]

3.1.3 Konvektio

Konvektiossa eli virtauksessa, lämpöä siirtyy kaasun tai nesteen mukana joko pakotetuna tai luonnollisesti. Konvektio voi tapahtua pakotetusti, kun kaasua tai nestettä liikutetaan ulkopuolisen voiman avulla. Pakotettu konvektio voi tapahtua esimerkiksi tuulen, koneellisen ilmanvaihdon tai ihmisten liikkumisen johdosta. Luonnollisessa konvektiossa lämpöä voi siirtyä virtauksen mukana esimerkiksi paksussa eristetilassa. [8 s.14.]

3.2 Kosteus

3.2.1 Diffuusio

Kun rakennustekniikassa puhutaan diffuusiosta, sillä tarkoitetaan yleensä kosteuden liikkumista vesihöyryn muodossa rakenteen läpi. Lähes kaikki rakennusmateriaalit läpäisevät jonkin verran vesihöyryä. Vaikka materiaalin vesihöyrynläpäisevyys todellisuudessa muuttuu aineen kosteuden muuttuessa, niin se määritellään ainekohtaiseksi vakioksi, jonka arvo on kg/msPa. [1 s.70–72.]

Suomessa diffuusioliikettä tapahtuu tyypillisesti talviaikaan, jolloin sisäilmassa on enemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa. Sisäilman vesihöyry pyrkii diffusoitumaan ulkoilmaan ulkovaipan rakenteiden läpi, jota rakenne pyrkii estämään. [9 s.27.]

Rakenteissa diffuusio on yleensä hyvä ottaa huomioon siten, että vesihöyryn tunkeutuminen eristekerrokseen estetään sijoittamalla sisätilan ja eristekerroksen väliin riittä-

vän vesihöyrytiivis kerros. Lisäksi rakenteen vesihöyryvastuksen tulee pienentyä kylmään suuntaan mennessä. [1 s.71.]

3.2.2 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektiossa kaasuseoksen sisältämä vesihöyry siirtyy kaasuseoksen, esimerkiksi ilman, mukana sen liikkeessä kokonaispaine-eron vaikutuksesta. Jos rakennuksessa on huokoisia tai ilmaa hyvin läpäiseviä aineita, ilma virtaa niiden läpi. Virtauksia syntyy, koska rakenteen eri puolilla on kokonaispaine-eroja, ja huonetiloissa ilmanpainesuhteet vaihtelevat. [1 s.71.]

Konvektio, jonka mukana liikkuu kosteutta, voi esiintyä ns. luonnollisena seinän sisällä, johtuen ilman tiheuseroista. Mikäli rakenteessa on reikiä tai rakoja, ilmanpaine-eroista johtuen konvektio tapahtuu näiden kautta pakotettuna. [1 s.72.]

Konvektio vaikuttaa rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan erityisesti kylminä vuodenaikoina. Kun ilmanpaine-erojen johdosta rakenteissa oleviin rakoihin, halkeamiin, reikiin yms. syntyy ilmavirtauksia, ne voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisesti kosteutta verrattuna diffuusioon, ja voi aiheuttaa kosteuden tiivistymistä rakenteisiin. [1 s.72.]

Tyypillisen riskin vesihöyryn konvektiovirtaukseen aiheuttaa sisätilojen ylipaine suhteessa ulkoilmaan, yläpohjaan tai ryömintätilaan. Tällöin kostea sisäilma virtaa yleensä rakenteiden epäjatkuvuuskohdista rakenteisiin, esimerkiksi saumoista, raoista, läpivienneistä tai rei'istä, rakenteisiin. Nämä ilmavirtaukset voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisesti kosteutta verrattuna diffuusioon, ja voivat aiheuttaa kosteuden tiivistymistä rakenteisiin [9 s.34, 1 s.72.]

Vesihöyryn konvektiota voidaan käyttää myös hyväksi rakenteiden tuuletuksessa ja kuivatuksessa. Esimerkiksi yläpohjarakenteita saadaan harvoin niin tiiviiksi, että kosteuskonvektio voidaan täysin välttää. Tällöin yläpohjaan tulee järjestää tuuletus, jolla liiallinen vesihöyry saadaan pois rakenteista. [9 s.34.]

3.2.3 Kondensoituminen

Kun ilman suhteellinen kosteus saavuttaa 100 %:n rajan, voi rakenteen pinnalla tai sen sisällä tapahtua vesihöyryn tiivistymistä vedeksi. Tiivistyminen tapahtuu ympäröivää ilmaa kylmemmälle pinnalle, kun vesihöyryn kyllästymiskosteus eli kastepiste, saavutetaan.

Tyypillisiä kondensoitumista aiheuttavia rakenteita ovat esimerkiksi:

- Liian kylmä lämpimään huonetilaan rajautuva pinta, esim. ikkunalasi.
- Kylmäsilta
- Puutteellinen tai virheellisesti sijoitettu höyrynsulku.
- Höyrynsulun reiät jotka mahdollistavat ilmavirtauksen sisältä ulos.

Kondenssivaurioita voidaan ehkäistä suunnittelemalla rakenteet lämpimältä puolelta riittävän vesihöyryntiiviiksi. Kylmään päin mentäessä rakenteen vesihöyryvastuksen tulee pienentyä. Lämpimällä puolella käytetään yleensä diffuusiotiivistä kerrosta, esimerkiksi muovia, vuorauspaperia tai tiivistä rakennuslevyä. Tiiviillä kerroksella saadaan estettyä myös rakenteen läpi tapahtuvat ilmavuodot, jolloin saadaan estettyä myös konvektion mukana liikkuvan kosteuden tiivistyminen rakenteisiin. [1 s.72.]

4 Rakennusfysikaalinen mallintaminen

4.1 Yleistä

Rakenteita mallinnettaessa rakennusfysikaaliset ilmiöt kuvataan matemaattisten yhtälöiden avulla. Yksinkertaiset mallit voidaan ratkaista analyyttisesti, mutta koska ilmiöt ovat monimutkaisia ja toisistaan riippuvaisia, joudutaan usein käyttämään laskentamalleja, jotka ratkaistaan erilaisilla laskentamenetelmillä tai -ohjelmilla. [2 s.82.]

Rakennusfysiikan eri ilmiöt ovat lähtökohtaisesti ajasta riippuvia, epälineaarisia ja kolmiulotteisia. Ilmiössä on mukana lämmön, kosteuden ja ilman liikkeet ja varastoituminen sekä erilaiset mikrobiologiset ja kemialliset prosessit. Tyypillisesti eri ilmiöitä joudutaan kuvaamaan yksinkertaistettuna, mikä toisaalta voi helpottaa laskentatarkasteluja mutta myös aiheuttaa tuloksiin merkittäviä virheitä. [2 s.82.]

Nykyään on tarjolla useita eri laskentaohjelmia, ja niillä saatavien tuloksien laajuus vaihtelee suuresti. Yksinkertaisimmillaan niillä voidaan tarkastella yhtä rakenneosaa

vakio-olosuhteissa, eli stationääritilassa. Laajimmillaan ohjelmilla voidaan tarkastella koko rakennusta muuttuvissa, eli dynaamisissa olosuhteissa. [2 s.73.]

Kun valitaan ohjelmistoa rakennusfysikaaliseen mallintamiseen, tulee sen valinnassa ottaa huomioon useita seikkoja, esimerkiksi hinta, tarvittava sovellusalue, kuinka moni henkilö opettelee käyttämään ohjelmistoa, ohjelmiston helppokäyttöisyys jne. Usein rajoittavaksi tekijöiksi asettuvat kuitenkin hinta ja käyttäjien osaaminen. Yksinkertaisimmillaan ohjelmat ovat varsin helposti omaksuttavia, mutta mikäli halutaan laajempia tuloksia tai monimutkaisempien rakenteiden tai koko rakennuksen simulointia, vaatii se huomattavasti laajempaa osaamista käyttäjältä. Esimerkiksi WUFI:n verkkosivuilla on maininta, että yksiulotteinen versio ohjelmistosta on yleensä riittävä, ja huomattavasti helppokäyttöisempi kuin laajemmat versiot. Lisäksi laajat simuloinnit ovat laskennallisesti varsin raskaita, joten simulointiin kuluva aika tulee myös huomioida. [2 s.73,74 12.]

Käyttäjällä tulee myös olla osaamista ja ymmärrystä niin käytännön rakennusfysiikasta ja fysikaalisista ilmiöistä, kuin myös käytettävän ohjelmiston ominaisuuksista ja rajoitteista, jotta laskennasta saatavia tuloksia voidaan tulkita oikein. [2 s.73,74.]

4.2 Epästationäärinen lämpö- ja kosteuslaskenta

Epästationääriseen laskentaan kykenevä ohjelma pystyy ottamaan huomioon materiaalin lämpö- ja kosteuskapasiteetin. Laskentaohjelma pystyy ottamaan huomioon myös esimerkiksi säteilyn, ilman vaihtuvuuden rakenteen onteloissa, lämmön- ja kosteudenlähteet, kosteuden eri siirtymismuodot sekä täydelliset ulkoilman olosuhteet. Tyypillisille laskentatapauksille on tehty valmiiksi materiaali- ja ilmastokirjastoja. [2 s.77.]

Esimerkiksi tässä työssä käytetään sisäilman olosuhteiden simuloinnissa standardia EN 1506, joka käyttää yhtätoista materiaaleihin ja ilmastoon liittyvää muuttujaa. Kun rakenne simuloidaan standardin mukaan annetuissa ilmasto-olosuhteissa, niin voidaan arvioida rakenteen lämpötilaa, rakenteen läpi menevä lämpövirta ja sen jakautumista, rakenteen sisältämää vesimäärää, suhteellista kosteutta sekä vesihöyryn liikkumista rakenteessa. [16 s.4.]

Simulointia voidaan tehdä laskentakapasiteetin puitteissa jopa usean vuoden ajalle, joten on mahdollista tutkia ovatko rakenteet kuivuvia, vai kerääntykö rakenteisiin lisää kosteutta ajan saatossa.

4.3 Stationäärinen laskenta

Stationäärisellä laskennalla voidaan määrittää kuukausitason lämpö- ja kosteusolosuhteita standardin SFS-EN ISO 13788, eli ns. Glaser-menetelmän, mukaan. Menetelmä ei ota huomioon materiaalin kosteus- ja lämpökapasiteettia, joten laskenta olettaa lämpötilan ja ilman vesihöyrypitoisuuden muuttuvan rakennekerrosten lämmön- ja vesihöyryvastuksen suhteessa. Glaser-menetelmä yksinkertaistaa muutenkin laskentaa, jättäen pois muun muassa sateen, kosteuden kapilaarisen siirtymisen, ilmavuodot, auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn. [2 s.76.]

Laskentamenetelmää voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi kastepisteen tai rakenteeseen kondensoituvan tai haihtuvan kosteuden arviointiin. Lisäksi laskennalla saadaan selville rakenteen U-arvo. [2 s.76.]

4.4 Rakenteen tai rakennuksen mallintaminen

Kun rakennusfysikaalista laskentamallia luodaan, keskeisiä seikkoja ovat:

- tarkasteltavan rakenteen kuvaaminen
- lämmön- ja kosteudensiirtymismuotojen valinta
- ulko- ja sisäympäristön olosuhteiden kytkeminen malliin
- materiaaliominaisuuksien kytkeminen malliin
- kosteusvuotojen ja virheiden huomioon ottaminen tarkasteluissa
- laskennan tarkkuuteen ja laskenta-aikaan vaikuttavien tekijöiden valinta
- alkuolosuhteiden ja tarkastelujakson pituuden valinta
- seurattavien suureiden ja tarkastelupisteiden valinta. [2 s.82.]

4.5 Tulosten arviointi

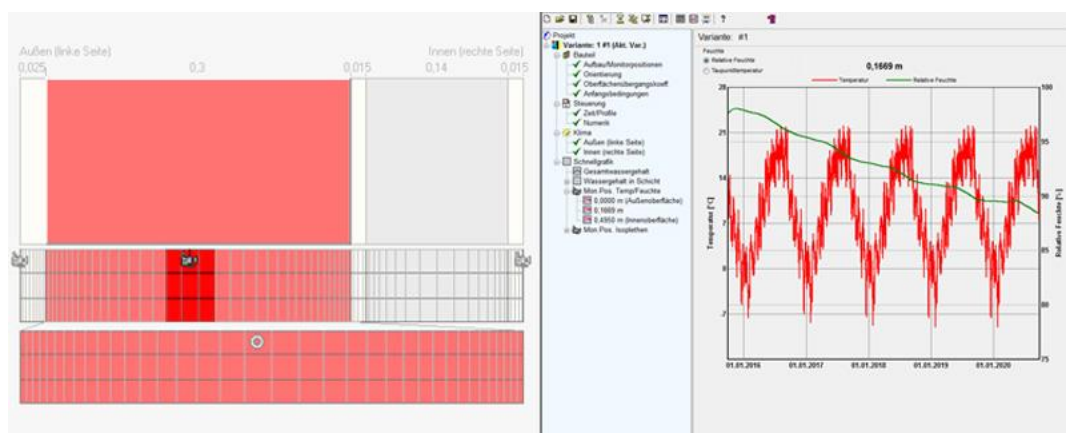
Yleisesti ottaen rakennusfysikaalisessa suunnittelussa kaikki vaiheet voivat sisältää virheitä, mukaan lukien simulointi. Näin ollen laskennan tuloksia tulee arvioida niin aikaisempien tulosten, kuin odotettavissa olevien tulosten perusteella. Tulosten järkevyyttä voi arvioida esimerkiksi tekemällä laskentaa erilaisilla lähtöarvoilla. Mikäli muutokset ovat loogisia, ja tapahtuvat oikeaan suuntaan, saadaan tällä varmuutta tuloksien oikeellisuudesta. [2 s.84–85.]

Simuloinnin tuloksia ei voi pitää siis täydellisenä kuvauksena rakenteiden toiminnasta, mutta jos tuloksia arvioidaan kirjallisuudessa esitettyihin samantyyppisiin rakenteisiin, tulokset ovat sisäisesti johdonmukaisia, sekä tulokset ovat loogisia ja yhteneviä tunnettujen fysikaalisten ilmiöiden perusteella, voidaan simuloinnin tuloksia hyödyntää rakenteiden suunnittelussa. [2 s.84–85.]

5 Työssä käytetyt ohjelmistot

5.1 WUFI Pro

WUFI Pro on perustyökalu nopeaan yksilutoteeseen simulointiin, kun halutaan tutkia esimerkiksi seinä- tai lattiarakenteen kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa. Se on myös selvästi helppokäyttöisin ja yksinkertaisin versio ohjelmasta, ja on tällä hetkellä ainoa suomeksi käännetty versio. [11.]

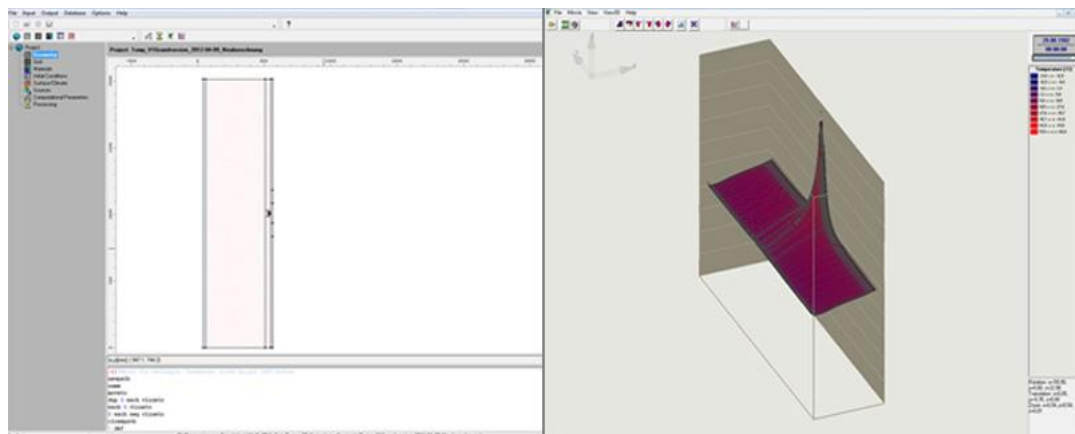


Kuva 1. WUFI Pro [11.]

WUFI Pro ottaa laskennassa huomioon kosteuden, sateen, auringonsäteilyn, pitkäaaltoisen säteilyn, kosteuden kapilaarisen siirtymisen ja kondensoitumisen todellisissa ilmasto-olosuhteissa. Näin ollen ohjelmalla saadaan monissa tapauksissa varsin tarkkoja tuloksia rakenteen toiminnasta, mikäli ei ole tarvetta mallintaa esimerkiksi kylmäsiltoja tai liitosdetaljeja. [11.]

5.2 WUFI 2D

WUFI 2D tuo yhden ulottuvuuden lisää simulointiin, ja sen avulla voidaan simuloida monimutkaisempia rakenteita, kuten rakennuksen kulmia, ikkunoiden liitoksia, perustuksen liittymiä ja muita vastaavia rakenteita. [12.]

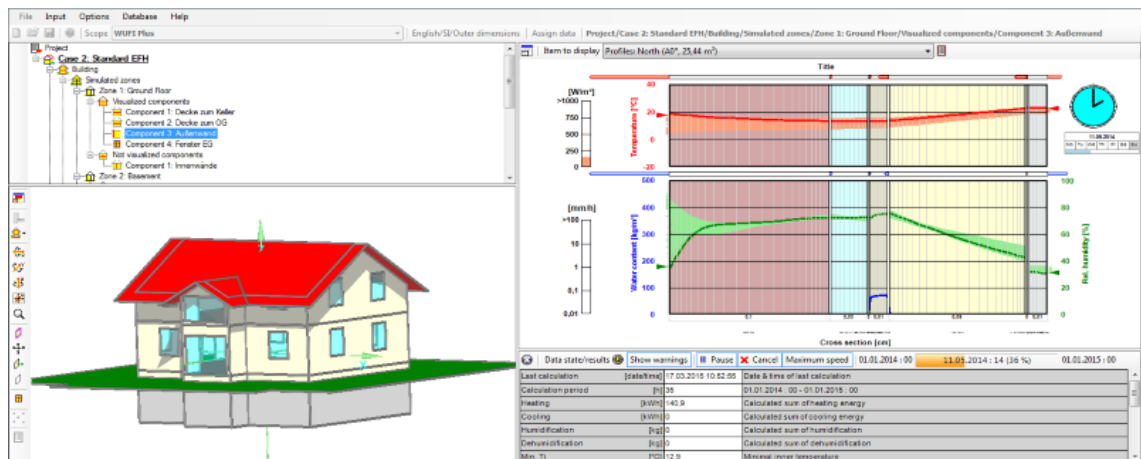


Kuva 2. WUFI 2D [12.]

Yhden ulottuvuuden lisääminen tekee kuitenkin ohjelman käyttämisestä huomattavasti monimutkaisempaa. Lähtötietojen ja geometrian syöttäminen on hitaampaa, sekä laskenta-ajat voivat kasvaa huomattavasti. Esimerkiksi tässä työssä simuloitavan kohteen laskenta-ajat olivat tarkkuudesta riippuen muutamasta tunnista aina reilusti yli kymmenen tuntiin. WUFI 2D:tä suositellaankin Pro-version laajennukseksi, ei niinkään vaihtoehtona sille. 2D-version kohderyhmänä ovatkin ennen kaikkea suunnittelijat ja konsultit, joiden on tarve tehdä laajempia analyysejä. [12.]

5.3 WUFI Plus

WUFI Plus on laajin versio ohjelmasta. WUFI Plus pystyy pelkän yksittäisen rakenteen lisäksi mallintamaan kokonaisen rakennuksen sisäilman olosuhteita, sekä olosuhteiden vaikutusta energian kulutukseen ja käyttömukavuuteen. Sen avulla voidaan myös arvioida laajemmin miten rakennuksen lämmitys ja jäähdytys vaikuttavat rakenteiden vaurioherkkyyteen. Ohjelmasta saatavien tulosten avulla voidaan lisäksi myös määrittää, täyttääkö suunniteltu rakenne passiivitalolle asetetut vaatimukset. [13.]



Kuva 3. WUFI Plus [13.]

Johtuen siitä että WUFI 2D:llä saatiin riittävän laajoja tuloksia, eikä Plus-version mahdollistamaan erittäin laajaan kokonaissimulointiin ollut resursseja työn puitteissa, jäi ohjelmaan tutustuminen varsin pintapuoliseksi.

5.4 Dof-lämpö

Dof-lämpö mahdollistaa rakenteiden nopean mallintamisen statiönääritilassa, ja sen avulla laskettiin vertailuarvoja rakenteille.

6 Simuloitavat rakenteet

Simuloitavaksi rakenteeksi valittiin rakennuksen eteläsivulla oleva ulkoseinä. Kyseisen seinän kohdalla rakennuksessa sijaitsee monia simuloinnin kannalta kriittisiä kohtia,



Kuva 6. Rakenne ulkoapäin. Oikeassa laidassa oleva ikkuna tullaan poistamaan, ja rakenne tulee olemaan muuta seinää vastaava.

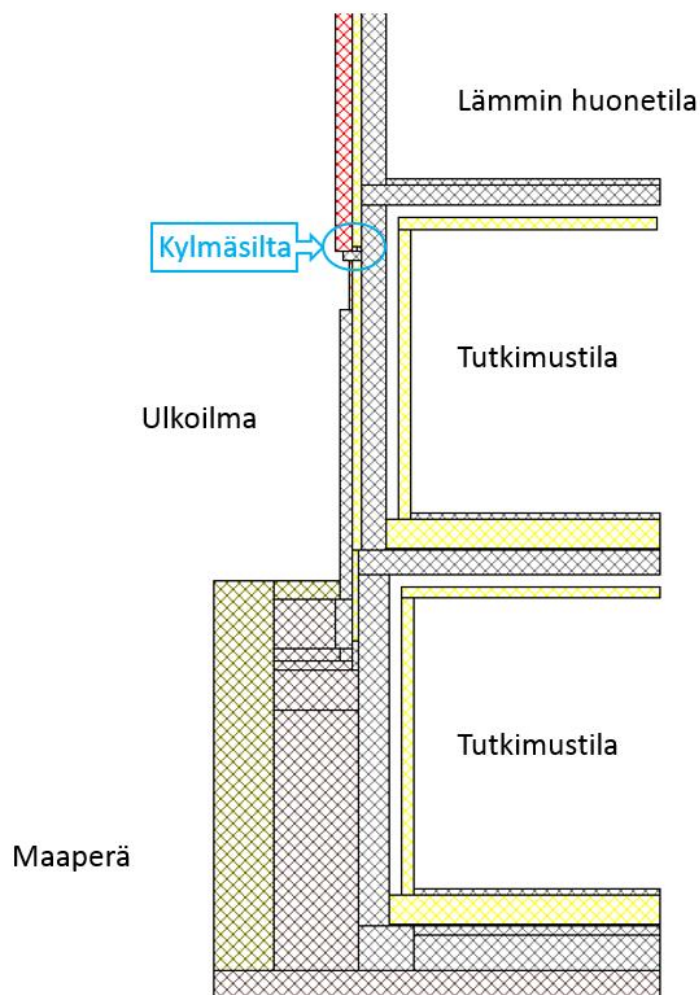
Lähtökohdaksi oletettiin, että vanhat sisäpuoliset rakenteet ja eristeet puretaan kantavaan runkoon saakka, myös vanhassa piirustuksessa näkyvä sisäpuolinen muuraus ja eriste tullaan poistamaan. Uusi lattiarakenne koostuu höyrysulkukermistä, solumuovie-risteestä ja pintavalusta, seinät ja katto rungosta ilmaraolla erotetuista kylmätila-elementeistä.

Uusi seinä- ja kattorakenne tehdään solumuovielementeistä, joihin on molemmin puolin liimattu gelcoatilla pinnoitettu lasikuitulevy. Kantavan rungon ja elementtien väliin tulee koneellisesti tuuletettu ilmarako. Ilmarako tuuletetaan siten, että olosuhteet olisivat mahdollisimman lähellä sisäilman olosuhteita. Tämä varmistetaan syöttämällä tuuletusilma omalla kanavallaan tuuletusrakoon.

Lasikuitupintaiseen sandwich-elementtiin päädyttiin, koska vastaavissa tiloissa siitä on saatu hyviä kokemuksia. Merivesi rasittaa rakenteita, tarvikkeiden siirrosta voi aiheutua iskuja rakenteisiin, ja tiloissa tullaan käyttämään painepesuria. Näin ollen lasikuitupintainen elementti on hyvä valinta korroosiokestävyyden takia ja mikäli pinta vaurioituu, se on helppo korjata. Myös elementin rakennusfysikaaliset ominaisuudet soveltuvat hyvin vaikeisiin olosuhteisiin. Lisäksi pinta on helppo pitää puhtaana, ja elementteihin voidaan jo tehtaalla tehdä tarvittavat varaukset ja vahvikkeet esimerkiksi sähköistystä, valaistusta tai hyllyjä varten. Lasikuitu tuo myös etuja liitosten tiivyyteen. Elementtien

liitokset voidaan laminoida lasikuidulla ja pinnoittaa gelcoatilla, jolloin saavutetaan vastaava tiiveys kuin muuallakin elementissä.

Rakennus on perustettu kalliolle, joten alimmaksi maakerrokseksi valittiin graniitti ja maanvaraisen laatan ja graniitin väliin kevytsoratäyttö. Reunatäyttö on tehty masuunikuonalla, jonka ominaisuuksia jouduttiin arvioimaan saatavissa olevien tietojen ja kokemusten perusteella. Masuunikuonan todellisten ominaisuuksien arvioiminen on haastavaa, mutta paikalla tehtyjen havaintojen perusteella kerros on tiivistynyt niin kovaksi että sitä on ollut lähes mahdoton kaivaa. Lisäksi kerros on todennäköisesti estänyt kosteuden pääsyn kellarin seinärakenteeseen, koska kellarikerroksessa tehtyjen havaintojen perusteella rakenteet ovat kuivia. [17 s.6, 18 s.518.]



Kuva 7. WUFI:iin mallinnettu rakenne.

Alkuperäisen leikkaukseen on lisätty ylemmän kerroksen välipohja ja huonetila, julkisivumuuraus sekä muurauksen leuka joka aiheuttaa kylmäsilan rakenteeseen. Wufi:ssa huomioitavaa on se, että rakenne pitää mallintaa suorakulmioista, jolloin vinoja pintoja pitää yksinkertaistaa huomattavasti, tai mallintaa varsin työläästi pienemmistä suorakulmioista. Rakenteessa näkyy harmaalla betonirakenteet, keltaisella lämmöneristeet, punaisella muuraus, punaruskealla kallio ja masuunikuona sekä vihreällä maaperä. Rakenne tehtiin alun perin Autocadilla ja tuotiin ohjelmaan, jossa sitä jouduttiin vielä muokkaamaan.

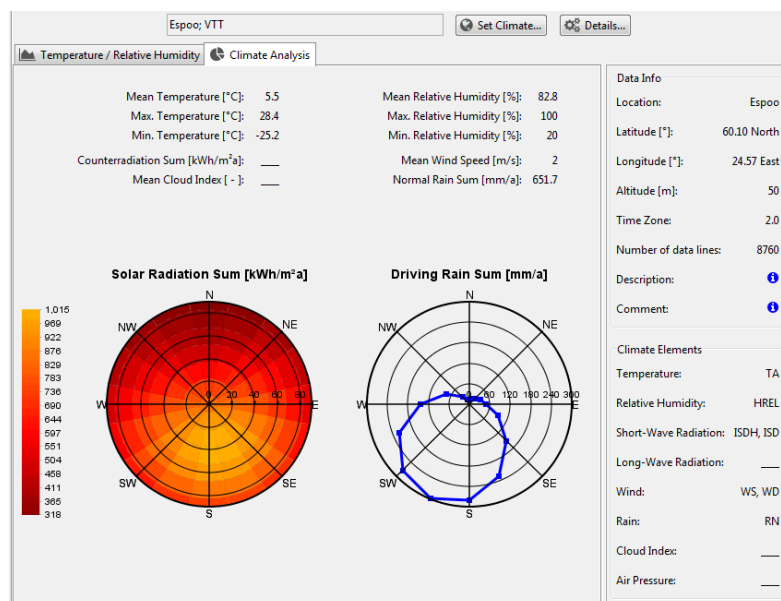
7 Simuloinnin lähtötiedot

7.1 Ilmasto

Kohde sijaitsee Etelä-Suomessa rannikko-alueella, joten simuloinnissa käytettiin WUFI:sta löytyvää VTT:n tuottamaa säätiedostoa Espoon Otaniemen mittauspisteeltä. Otaniemen mittauspiste on hieman suojaisammassa paikassa kuin tutkittava rakennus, mutta kuitenkin meren välittömässä läheisyydessä, joten olosuhteet ovat kuitenkin vertailukelpoiset. Säätiedostoja voi tehdä myös itse, mutta luotettavan tiedoston tekeminen on varsin työlästä.



Kuva 8. VTT:n tuottama säätieto.



Kuva 9. Auringonsäteilyn ja viistosateen suuntautuminen. Rakennuksen tutkittu ulkoseinä on kohti etelää, joten sekä sade että auringonsäteily rasittavat seinää varsin voimakkaasti.



Kuva 10. Etelän puoleinen paikoin rapautunut tiiliseinä.

7.2 Tutkimustilat

Tiloissa suoritettiin kuukauden ajan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksia todellisissa olosuhteissa, ja näiden mittausten perusteella määriteltiin lähtöarvot sisäilman olosuhteille. Käytössä oli Vaisala HMI41 lämpötila- ja kosteusmittari, sekä Testo-pintalämpömittari.

Johtuen siitä, että nykyiset rakenteet ovat varsin huonosti eristettyjä, eivät mittaustulokset ole täysin vastaavia kuin peruskorjatulla rakenteella. Kuitenkin mittausten perusteella saadaan käsitys siitä, millainen varsinkin kosteusrasitus tulee olemaan.

Taulukko 2. Simuloidut olosuhteet.

Simuloitavat olosuhteet				
Nro	Alkamisajankohta	Kesto [h]	T [°C]	RH [%]
1	1.10.2018	4000	22,0	60
2	1.4.2018	4000	22,0	60
3	1.10.2018	4000	15,0	90
4	1.4.2018	4000	15,0	90
5	1.10.2018	4000	5,0	100
6	1.4.2018	4000	5,0	100
7	1.10.2018	4000	EN 15026	
8	1.4.2018	4000	EN 15026	

Simuloinnit tehtiin sekä talvi- että kesäkautena. Lisäksi tutkittiin onko rakenne kuivuva normaaleissa sisäilmaolosuhteissa, mikäli pintalaatan kosteus on päässyt nousemaan. Lähtöarvoksi pintalaatan kosteudelle asetettiin tällöin RH 95 %. Mittauksen ja simuloinnin epävarmuustekijöistä johtuen, mitattuja arvoja pyöristetään rakennusfysikaalisesti haastavampaan suuntaan. Täydelliset mittaustulokset löytyvät liitteestä 3.

7.3 Lämmin huonetila

Tutkimustilojen yläpuolella on huonetila, jossa pyritään pitämään normaalit sisäilmaolosuhteet huolimatta tutkimustilojen lämpötilavaihteluista. WUFI 2D:ssä on mahdollista käyttää kolmea eri standardia sisäilman olosuhteiden määrittämiseen, joissa määritellään sisäilman olosuhteet valitun ilmastotiedoston perusteella. Standardit ovat EN 15026/WTA 6-2, ISO 13788 sekä ASHRAE 160. Lisäksi lämpötila ja kosteus voidaan määrittää käsin, joko stabiileiksi tai sinikäyrällä valitun vaihteluvälin sisälle.

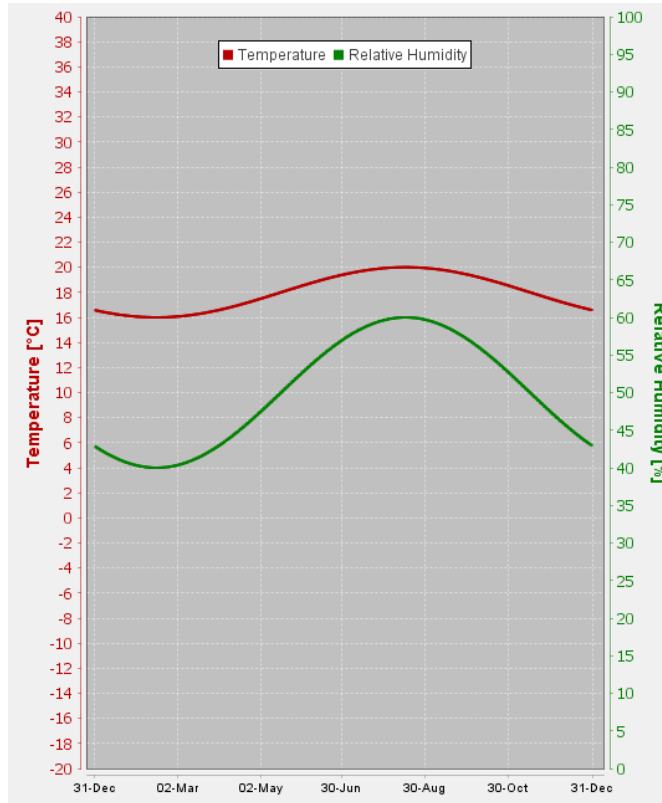
Tässä simuloinnissa laskenta tehtiin EN 15026 standardiin perustuvalla laskennalla. Yksinkertaistettuna ohjelma olettaa, että sisälämpötila on vakio 20 °C, kun ulkolämpötila on alle 10 °C. Kun ulkolämpötila ylittää 10 °C, sisälämpötila muuttuu lineaarisesti ulkolämpötilan mukaan, ylittämättä kuitenkaan 25 °C. [10.]

Kosteusrasituksen on neljä eri asetusta. Low, medium, medium +5 % sekä high. Laskentaan valittiin medium +5 %, joka vastaa normaaleja olosuhteita lisättynä viiden prosentin lisävarmuudella. Suhteellisen kosteuden vaihteluväli riippuen ulkolämpötilasta on tällä asetuksella 35 % - 65 %. [10.] Kuitenkin, kuten aiemmin todettiin, EN 15026 ottaa huomioon olosuhteet huomattavasti laajemmin.

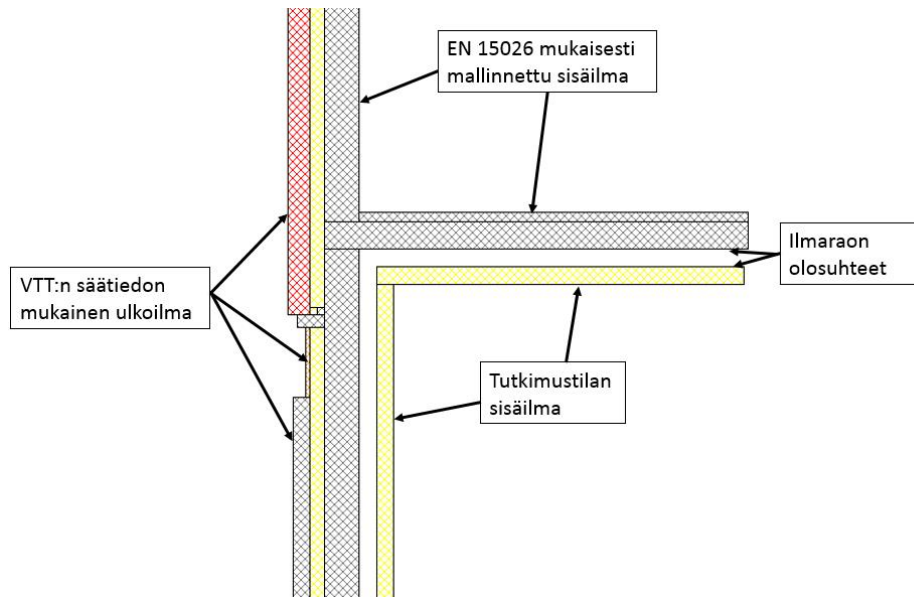
7.4 Kantavan rakenteen ja sandwich-elementin välinen ilmarako

Jos ilmarako mallinnetaan WUFI:ssa ilmakerroksena, sitä käsitellään suljettuna ilmatilana, eikä oteta ilmavirtausta huomioon. Kuitenkin, mikäli ilmaraon tuuletus voidaan olettaa riittävän suureksi, WUFI:n ohje suosittelee määrittelemään ilmaraon omana ilmasto-olosuhteena. [10.]

Koska ilmaraossa ei esiinny lyhytaaltoista auringon säteilyä, määritetään ilmaraon sisäpinnan olosuhteeksi sisäilman olosuhteet. Lisävarmuuden saamiseksi lämpötila oletetaan hieman pienemmäksi ja kosteus taas korkeammaksi kuin oletettu.



Kuva 11. Ilmaraon lämpötila- ja kosteuskäyrät määriteltynä sinikäyrällä.



Kuva 12. Jokaiselle pinnalle joka ei ole kiinni toisessa rakenteen osassa, määritellään reunaehto. Pinnalle voidaan määrittää olosuhteet ilmastotiedoston tai käsin syötettyjen arvojen perusteella. Pinnan valinta voi olla myös "adiabatic", jolloin rakenteen oletetaan jatkuvan samanlaisena rajapinnasta eteenpäin.

7.5 Maaperä

Kellarikerros on maanvarainen, joten laatan alapuoliset täyttömaat ovat lämpimiä ja kosteita. Täyttökerroksen lämpötilaksi voidaan olettaa vähintään +15 °C. [4 s.26.]

Täyttökerroksissa huokosten suhteellinen kosteus on yleensä 100 %, mikä ei kuitenkaan tarkoita sitä että rakenne ei toimisi, tai että siinä olisi kosteusvaurio. Mikäli kapilaarista nousua ei tapahdu, vesipitoisuus on varsin alhainen, luokkaa 0,5...1,0 painoprosenttia. Mikäli kapilaarista nousua toisaalta pääsee tapahtumaan, vesipitoisuus voi olla moninkertainen, 10...20 painoprosenttia. 4 s.10.]

7.6 Tiiviit pinnat rakenteissa

Rakenteiden välissä olevat ohuet kosteus- tai höyrynsulut voidaan määrittellä joko materiaalin ominaisuuksissa diffuusiovastuskertoimella μ , jonka arvon voi useimmiten saada taulukkokirjoista tai materiaalin valmistajalta. Vaihtoehtoisesti rakenteen rajoituksessa huonetilaan voidaan pinnalle asettaa s_d -arvo, joka tarkoittaa materiaalin suhteellista diffuusiovastusta. Kun tiedetään materiaalin paksuus, voidaan suhteellinen dif-

fuusiovastus määrittää. s_d -arvolla tarkoitetaan kuinka paksu ilmakerros tarvittaisiin vastaavan diffuusiovastuksen aikaansaamiseksi.

$$s_d = \mu \cdot d \quad (4)$$

missä

d materiaalikerroksen paksuus [m].

Kermin diffuusiovastus μ määritettiin materiaalin ominaisuuksissa arvoon 50 000 [2, s. 446.], ja sen perusteella s_d -arvoksi tulee 250 m, kun mallinnettu rakennepaksuus on 5 mm. Sandwich-elementeissä olevan gelcoat-pintaisen lasikuidun oletettiin olevan jonkin verran suurempi diffuusiovastukseltaan, joten sen s_d -arvoksi määriteltiin pinnan ominaisuuksissa 400 m. Lattiapinnoitteeksi valitaan hyvin vesihöyryä läpäisevä pinnoite, jonka s_d -arvo on 5 m. Valitsemalla lattiaan suhteellisen pienen diffuusiovastuksen omaava pinnoite, pyritään välttämään betonilaatan joutuminen kahden tiiviin kerroksen väliin, koska se valetaan solumuovieristeen päälle.

8 Lämmön ja kosteuden huomioiminen simuloitavissa rakenteissa

8.1 Lämmön johtuminen

Simuloitavan kohteen runko on yhtenäinen paikallavalettu teräsbetonirakenne. Betonilla on varsin korkea lämmönjohtavuus, luokkaa 1...3 W/(mK). [2 s.424.] Vertailun vuoksi, jos rakennuksessa olisi puurunko, on puun lämmönjohtavuus luokkaa 0,09...0,13 W/(mK). [2 s.432.] Lisäksi koska rakenteesta ei pystytä poistamaan täysin kaikkia kylmäsiltoja, on johtuminen varsin merkittävä ilmiö rakenteiden toiminnan kannalta.

8.2 Lämpösäteily

Tarkasteltavassa kohteessa suurin vaikutus on lyhytaaltoisella auringon lämpösäteilyllä, koska rakenteessa on etelään päin olevat tiili- ja betonijulkisivut, joiden auringonsäteilyn absorptiokerroin on varsin suuri. Näin ollen pitkäaaltoista säteilyä ei oteta simuloinnissa huomioon, vaikka se WUFI:ssa olisikin mahdollista.

8.3 Lämmön siirtyminen konvektiolla

Esimerkkikohteessa pakotetun konvektion mallintaminen on yksi suurimmista haasteista. Rakennuksen kantavien rakenteiden ja seinäelementin väliin jäävän ilmaraon lämpötilan ja kosteuden hallinta tehdään pakotetun konvektion avulla, kun ilmaraon ilmanvaihto tapahtuu IV-koneella. Se, että ilmaraossa saadaan pysymään halutut olosuhteet, on ensiarvoisen tärkeää jotta pystytään estämään kantavien rakenteiden jäähtyminen, sekä varmistamaan ettei rakenteiden kosteus nouse liian korkeaksi.

8.4 Kosteuden diffuusio

Kohteessa diffuusion vaikutus huomioidaan valitsemalla tiloihin joissa on korkea suhteellinen kosteus, pintamateriaaliksi korkean vesihöyrynvastuksen omaava gelcoat-pinnoitteinen lasikuitu, sekä varmistamalla huolellisella detaljien suunnittelulla rakenteiden tiiveys.

8.5 Kosteuden siirtyminen konvektiolla

Kosteuden siirtyminen konvektion välityksellä pyritään ehkäisemään rakenteellisesti, ensisijaisesti suunnitelmalla rakenne mahdollisimman tiiviiksi. Erityistä huomiota tulee kiinnittää detaljien suunnitteluun.

8.6 Kosteuden kondensoituminen

Kosteuden kondensoituminen on riski erityisesti ilmaraossa, varsinkin kylmään vuodenaikaan, jos ilmarako betonin ja sandwich-elementin välissä pääsee jäähtymään. Riski kasvaa edelleen, mikäli tutkimustiloissa on lämpimät ja kosteat olosuhteet ja rakenteessa on kylmäsiltoja tai ilmavuotoja.

8.7 Kosteuden raja-arvot

VTT on tehnyt tutkimuksia materiaalien homehtumisherkyydestä vuonna 2004. Tutkimuksien perusteella havaittiin, että ilmaan rajoittuvissa rakenteissa joissa on puhdas

betonipinta, homeen muodostumiselle otolliset olosuhteet vaativat 88–90 %:n suhteellisen kosteuden. Mikäli pintaan on kertynyt orgaanista ainetta, joka muodostaa homeen kasvun kannalta kriittisen rajapinnan, suhteellinen kosteus jossa homeetta alkaa muodostua on 78–80 %. [5 s.24.]

Tiiviissä rakennekerroksessa, kuten lattiassa, on raja-arvo puhtaalla betonilla 97–98 %. Puhtaiden EPS- ja mineraalivillaeristeiden homehtuminen on mahdollista, kun kosteus on pitkään yli 97–98 %. Altistusajan tulee kuitenkin olla hyvin pitkä, jopa useita kuukausia. [5 s.24.]

Tutkimustilojen lattiapinnoitteena on esimerkkinä käytetty Nanten HM W epoksinnoitetta, jonka asennusohjeissa annetaan suhteellisen kosteuden raja-arvoksi 98 %. [20.]

Johtuen siitä, että ilmarakoon pääsee ajan saatossa pölyä, jonka johdosta pinnat eivät ole täysin puhtaat, tavoitteena pidetään alhaisempia kosteusarvoja. Tuloksissa on taukkoon lisätty ilmaan rajoittuville pinnoille vertailuarvo RH 80 %, ja lattiarakenteisiin RH 95 %.

9 Tulokset

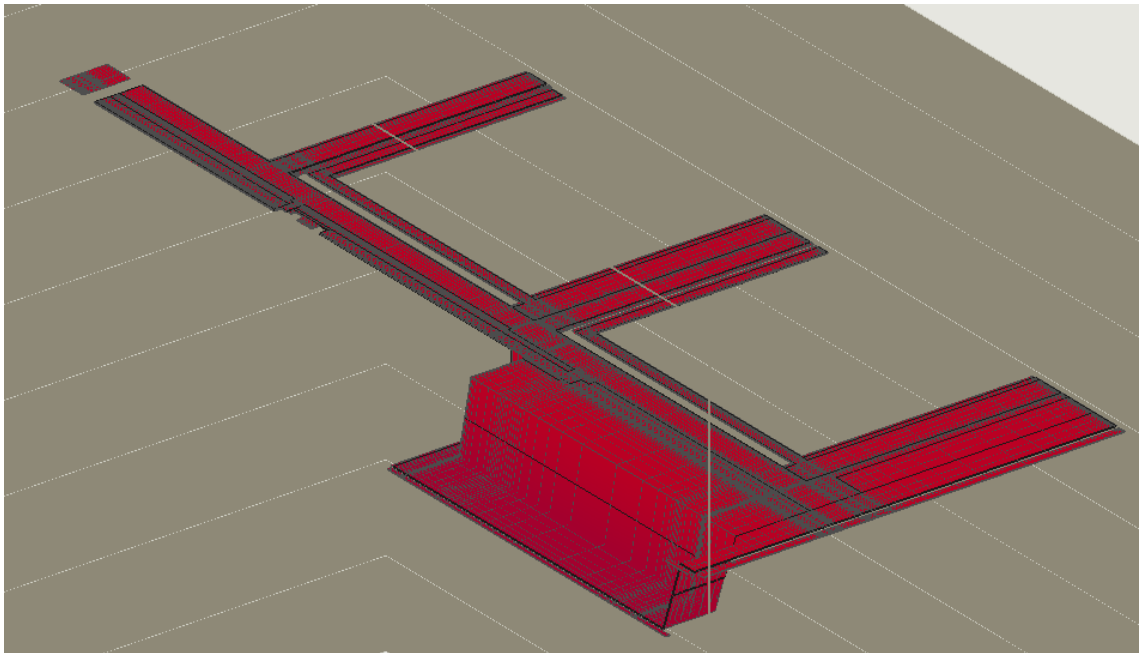
9.1 WUFI 2D

WUFI 2D:ssä tuloksia voidaan tarkastella kahdella tapaa. Rakenteesta saadaan malli, jossa voidaan tarkastella lämmön ja kosteuden jakautumista koko rakenteesta WUFI 2D motionin avulla. Mikäli halutaan tarkastella tuloksia yksittäisestä rakenteen kohdasta, voidaan tulokset avata WUFI i graph:issa, jolloin rakenteesta voidaan valita piste tai alue jota halutaan tarkastella. Pienin yksittäinen piste määräytyy laskentahilan tarkkuuden perusteella.

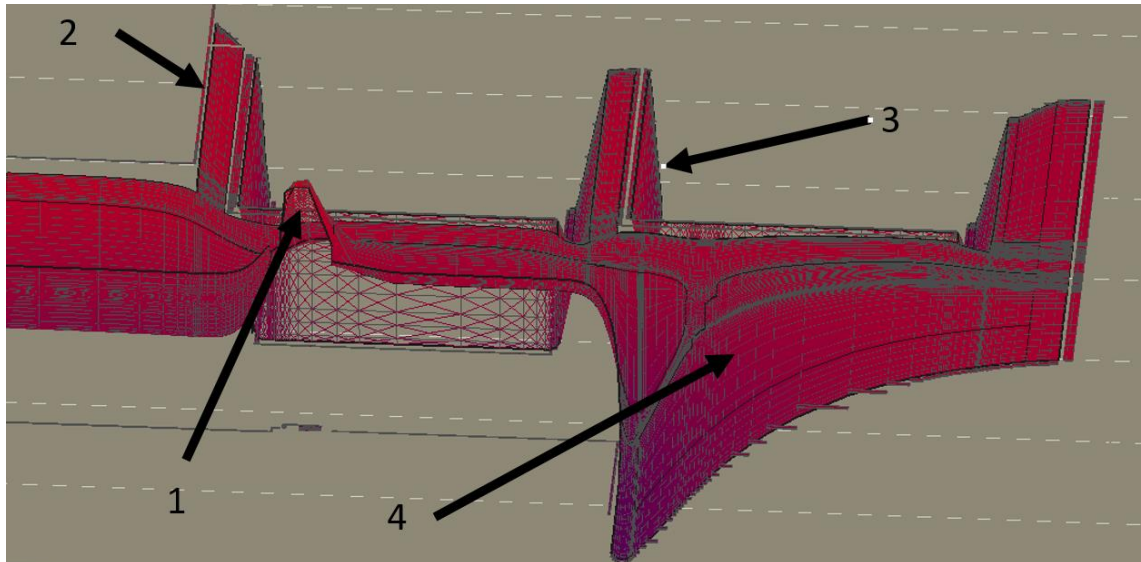
Ohessa on esitelty tulokset kun simulointi on tehty siten, että tutkimustilojen lämpötila on +5 °C, suhteellinen kosteus 100 % ja simulointiaika 4000 tuntia alkaen 1.10.2018. Muiden simulointien tulokset ovat liitteessä 3. Liitteessä olevissa kuvaajissa näkyvät monitorointipisteen sijainti sekä tutkimustiloissa vallinneet olosuhteet. Simuloinnit tehtiin erikseen talvi- ja kesäkuukausina.

9.1.1 WUFI 2D motion

WUFI 2D motionissa tuloksia voidaan tarkastella havainnollisella mallilla, jossa saadaan näkyviin koko rakenteen lämpötila- tai kosteusjakauma. Kun osoitinta kuljetetaan pitkin mallia, niin samalla näytön alakulmassa näkyvät koordinaatit, sekä lämpötila kyseisessä kohdassa.



Kuva 13. Simuloinnin lähtötilanne. Vaakasuunnassa näkyy mallinnettu rakenne ja pystysuunnassa lämpötilan jakauma rakenteessa. Alkutilanteessa rakenteiden lämpötila on 20 °C ja etureunassa alempana näkyvä osuus on maaperän lämpötila 15 °C.



Kuva 14. Lopputuloksena näkyvä lämpötilan jakauma simuloinnin päätyttyä 16.3.2019. 3D-näkymästä on selkeästi nähtävillä rakenteiden perustoimintaa, sekä minne monitorointipisteitä kannattaa sijoittaa tarkemmassa tarkastelussa.

Kuvaan nuolilla merkityt kohdat:

1. Tiilimuurauksen leuan kylmäsilta näkyy selkeästi lämpimämpänä kuin muu ulkoseinä-rakenne.
2. Ohut viiva näyttää alkuolosuhteet huoneilmalle. Mallista voidaan nähdä, että lämpötila on hieman laskenut rakenteen pinnassa.
3. Sandwich-elementin kohdalla lämpötila muuttuu jyrkästi, josta voidaan arvioida että eristekerros toimii tehokkaasti.
4. Simulointi tehdään kylmimpään talvi-aikaan. Ulkoseinän viereen ei ole mallinnettu routaeristystä, joten lämpötila muuttuu tasaisesti syvemmälle maaperään mennessä.

```

Rotation: x=-48,20,
y=0,00, z=40,00
Translation: x=0,00,
y=0,00, z=0,00
Zoom: x=0,14, y=0,14,
z=0,02

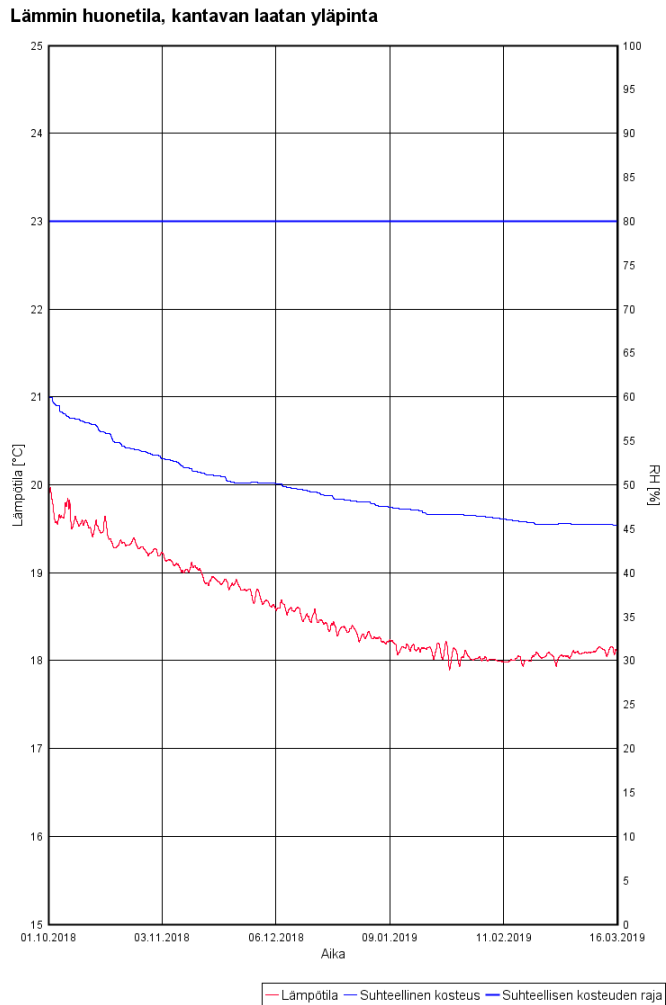
(131,141)=(2,072m,6,665
18,29 [°C]

```

Kuva 15. Ohessa näkyvät koordinaatit ja lämpötila ovat kuvassa 14 näkyvästä kohdasta 2, jossa on havaittavissa lämpötilan muutos alkuolosuhteisiin nähden. Voidaan havaita että lämpimässä huonetilassa olevan pintavalun lämpötila on laskenut n. 2 °C verrattuna lähtötilanteeseen, joka on 20 °C.

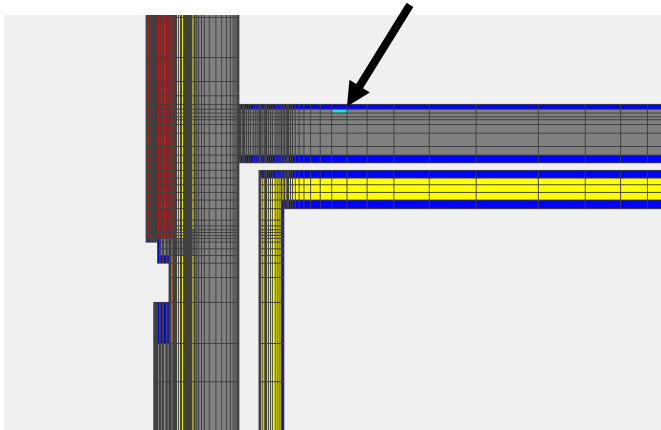
9.1.2 WUFI Graph

WUFI Graph:ssa valitaan geometriasta yksittäinen piste tai alue, josta saadaan halutut tiedot.



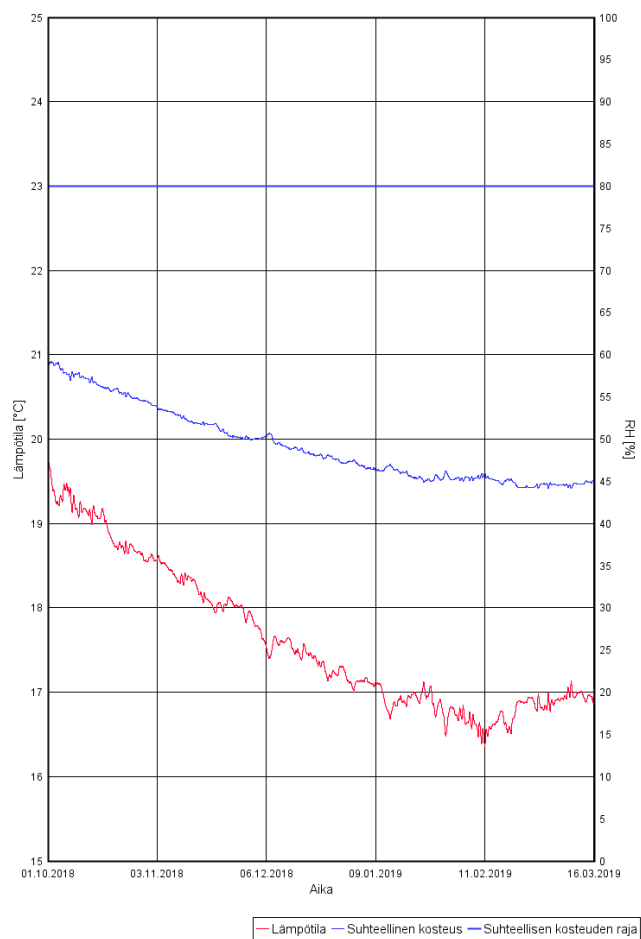
Kuva 16. Lämpötila- ja kosteuskäyrä lämpimän huonetilan pintavalusta.

Kuvassa 16 oleva monitorointipiste on valittu pintalaatan yläpinnasta, läheltä kuvassa 14 olevaa kohtaa 2. Lämpötilakuvaajasta voidaan arvioida että lattian pinta viilenee n. 2 °C. Vanhan kantavan rungon suhteelliseksi kosteudeksi asetettiin simuloinnin alussa 60 %, josta se laskee arvoon 45 %. Simuloinnin perusteella voidaan arvioida, että huolimatta lievästä viilenemisestä, rakenne on kuitenkin kuivuva eikä riskiä kosteuden tiivistymiseen ole.



Kuva 17. Kuvan 16 monitorointipisteen valinta. Hilajaon perusteella voidaan valita yksittäinen ruutu, tai vaihtoehtoisesti alue jolta lasketaan keskiarvo. Valinnan tulee kuitenkin kohdistua samaan materiaaliin.

Ilmarako kylmäsiilan kohdalla



Kuva 18. Lämpötila- ja kosteuskäyrä ilmarakossa kylmäsiilan kohdalla.

Kuvasta 18 voidaan simuloinnin avulla havaita, että talviaikaan lämpötila laskee ilma-
raossa kylmäsillan kohdalla useita asteita. Monitorointipiste on valittu pintakerroksesta.
Toisaalta suhteellinen kosteus ei pääse nousemaan lähelle olosuhteita joissa homeen
muodostuminen tai kosteuden tiivistyminen on mahdollista.

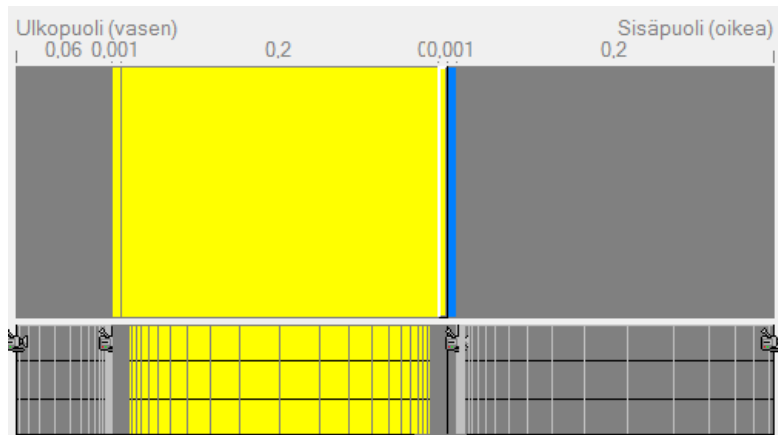
10 Vertailulaskenta

Vertailulaskentaa tehtiin WUFI Pro- sekä DOF-lämpö-ohjelmilla. Vertailun tekemisessä
jouduttiin tekemään jossain määrin yksinkertaisuuksia. Tämä johtui pääosin tuulettuvan
ilmaraon mallintamisen haastavuudesta, jonka vaikutus tutkittavassa kohteessa on
merkittävä. Koska WUFI 2D:ssä ilmarako mallinnettiin sisäilmaolosuhteita vastaaviksi,
voitiin lattiarakenteita simuloida jättämällä sandwich-elementti pois ja rajaamalla raken-
ne päätymään ilmaraon pintaan.

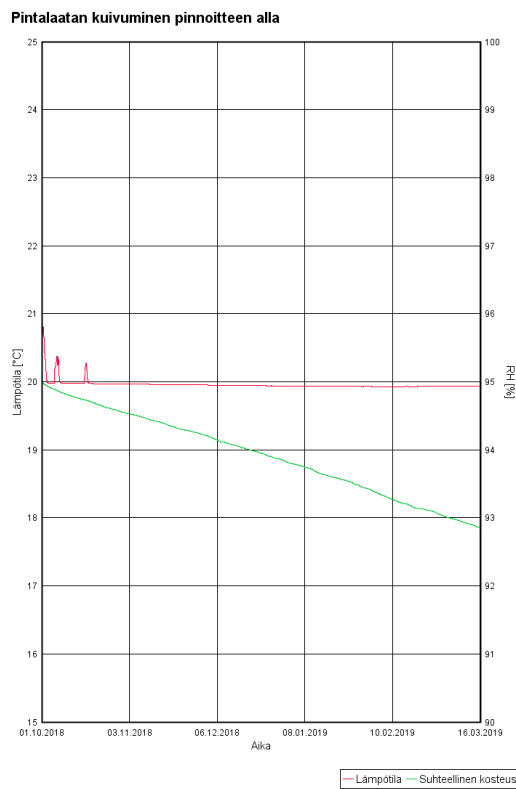
Lisäksi WUFI 2D:llä tehtiin laskentaa pelkästä muurausleuan aiheuttamasta kylmäsil-
lasta, koska kylmäsillat ja rakenteiden liitoskohdat ovat yleensä tyypillisiä simulointikoh-
teita kokonaisen rakennuksen sijaan.

10.1 Välipohjan kuivuminen

WUFI Pro:lla tutkittiin pintalaatan kuivumista mallintamalla välipohja ilman sandwich
elementtiä ja ilmarakoa, sekä asettamalla pintalaatan suhteellinen kosteus liioiteltuun
arvoon 95 %. Vasemmalle, eli yläpinnalle asetettiin EN 15026 mukainen ilmasto ja pin-
nan siirtokerroin 0,1. Oikealle, eli ilmaraon puolelle vastaava sinikäyrän mukainen läm-
pötila kuin WUFI 2D simuloinnissa, sekä pinnan siirtokerroin 0,04. Rakennetta mallin-
nettaessa WUFI Pro näyttää koko ajan rakenteen U-arvon, joten vertailu eri rakenne-
ratkaisujen välillä on helppoa. Kyseisen rakenteen U-arvoksi WUFI määritteli 0,143
W/(m²K).

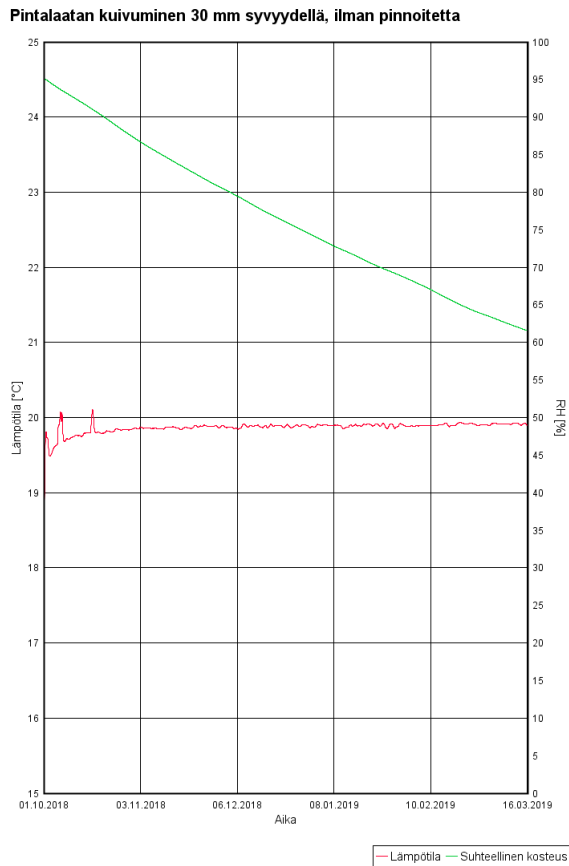


Kuva 19. Yksinkertaistettu välipohjarakenne. Alareunassa näkyvät laskentahilan tiheys, valitut monitorointipisteet ja mahdolliset lämmön- tai kosteudenlähteet.



Kuva 20. Pintavalun kuivuminen kun pinnassa on s_d -arvon 5 m omaava pinnoite.

Huomattavaa on, että pintavalun kuivuminen on erittäin hidasta pinnoituksen alla. Talven yli kestävänsä simulointijakson aikana suhteellinen kosteus laskee vain n. 2 %, vaikka sisäilman olosuhteet mahdollistavat hyvät kuivumisolosuhteet.

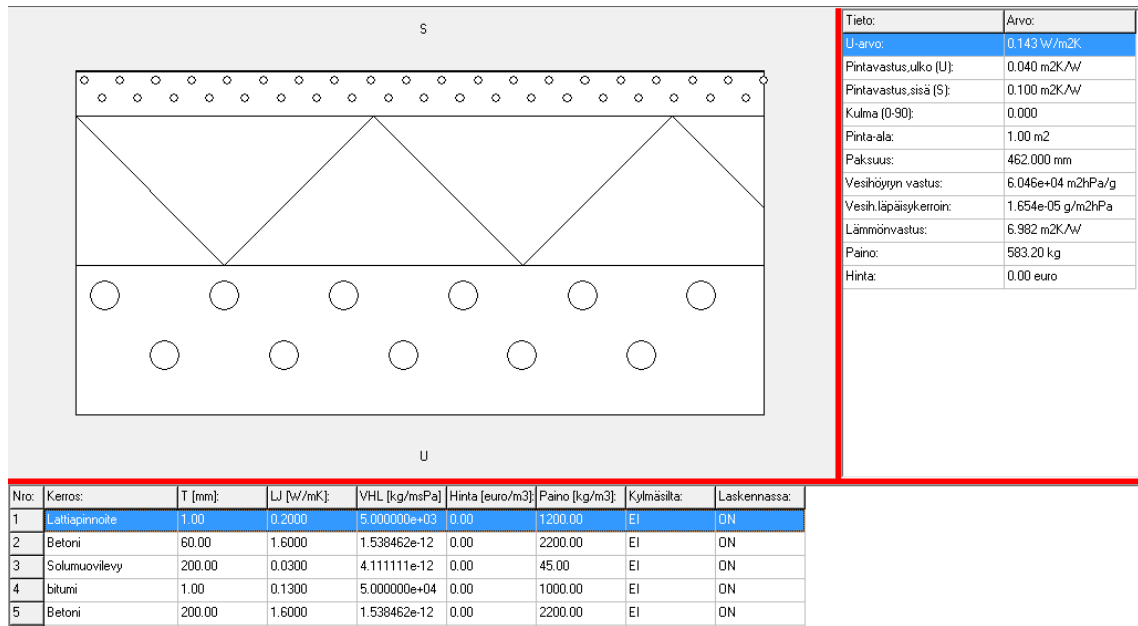


Kuva 21. Pintalaatan kuivuminen ilman pinnoitetta.

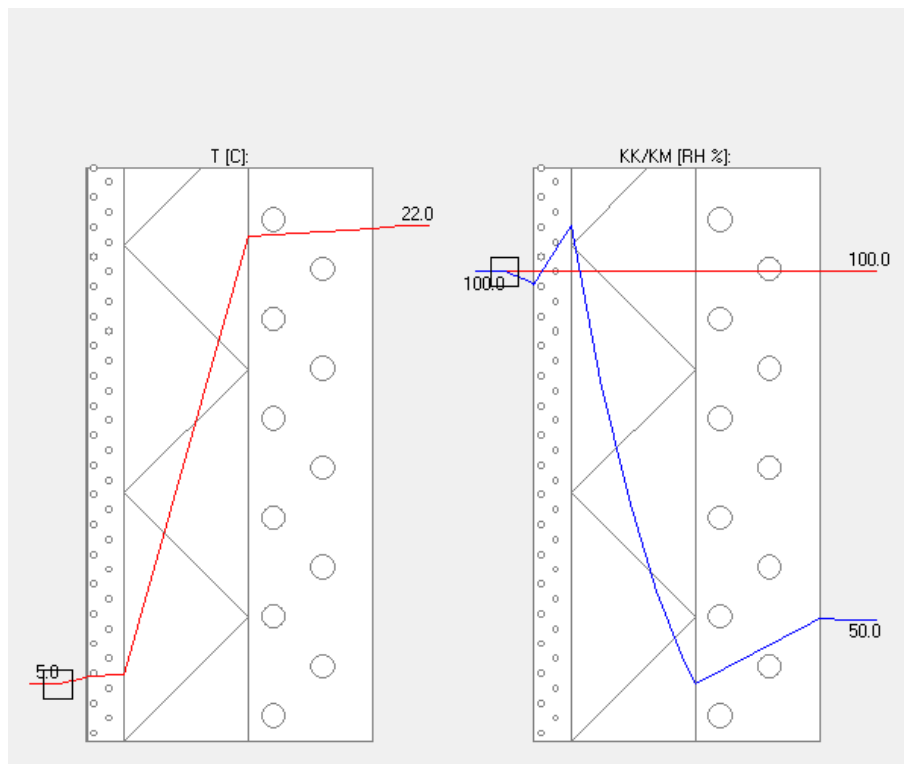
Vertailemalla tuloksia pinnoitetun ja pinnoittamattoman laatan välillä, voidaan havaita, että jopa hyvin höyryä läpäisevän pinnoitteen alla betonin kuivuminen on erittäin hidasta, eron ollessa kymmeniä prosentteja.

10.2 Välipohjarakenne, lämpötila 5 °C RH 100 %

Välipohjaa tutkittiin mallintamalla rakenne Dof-lämpöön vastaavalla tavalla kuin kohdassa 10.1. Dof antaa reaaliaikaisesti tulokset rakenteen U-arvosta, lämmönvastuksesta, vesihöyryn vastuksesta ja läpäisykertoimesta, sekä rakenteen painosta ja hinnasta, mikäli nämä arvot ovat syötettyinä oikein tietokantaan.



Kuva 22. Rakenne mallinnettuna DOF-ohjelmalla.

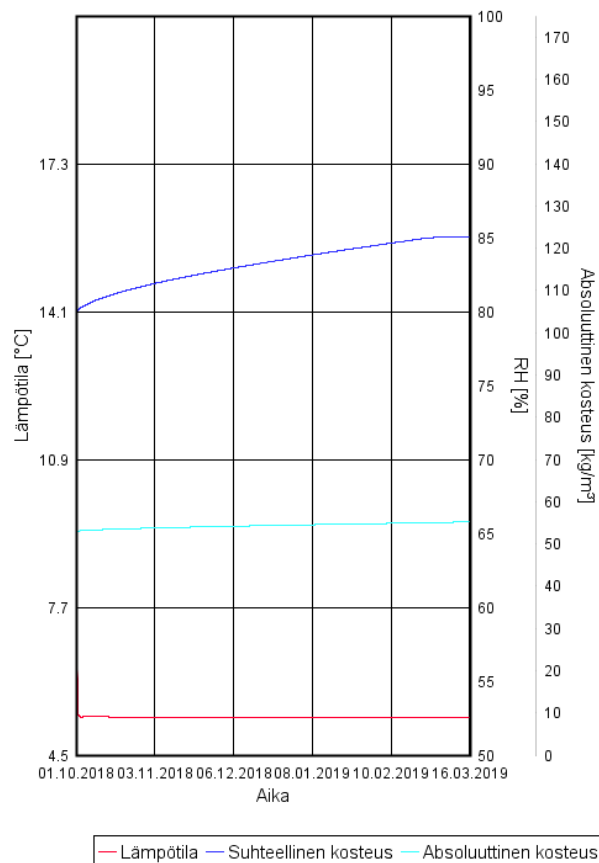


Kuva 23. Dof-lämpö tulokset. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa lämpötila, oikeanpuoleisessa suhteellinen kosteus. Rajapintojen tulokset tulostuvat myös taulukkona.

Tuloksista voidaan havaita, että pintalaatan ja lämmöneristekerroksen rajapinnassa on riski kosteuden tiivistymiseen. Dof-lämpö ei kuitenkaan pysty ottamaan huomioon rakenteissa jo olevaa kosteutta, eikä materiaalien kykyä sitoa kosteutta.

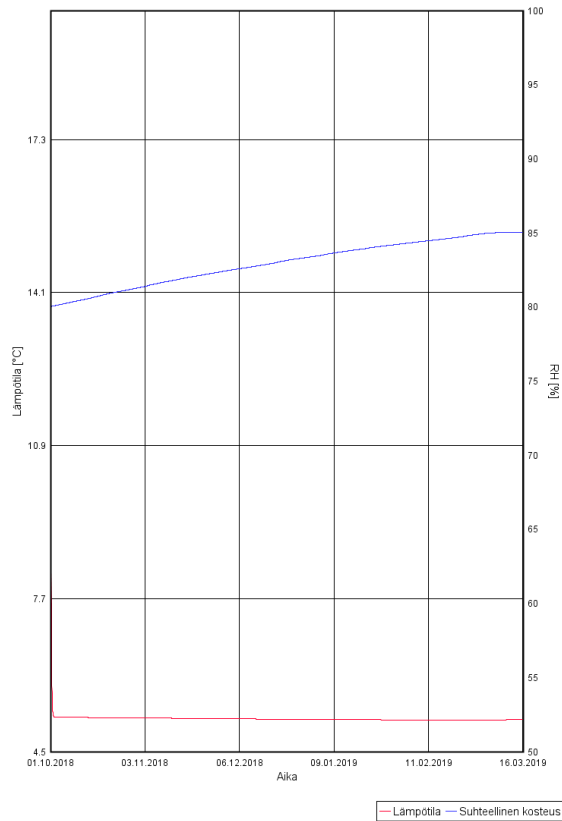
Koska yksinkertaisella laskennalla havaittiin ongelmakohta, tehtiin samasta kohdasta lisätarkasteluja WUFI:lla, jolloin havaittiin sama ilmiö. WUFI pystyy ottamaan huomioon betonin hygroskooppiset ominaisuudet, joten havaittiin että suhteellinen kosteus rajapinnassa nousee n. 4 %, kun simulointiaika on n. 4000 tuntia ja betonin suhteellinen kosteus lähtötilanteessa 80 %. WUFI Pro:ssa mallinnettiin pelkkä rakennetyyppi, WUFI 2D:ssä monitorointipiste valittiin koko simuloidusta rakenteesta, tulosten ollessa käytännössä identtisiä.

Lämpötila ja suhteellinen kosteus pintavalun ja lämmöneristeen rajapinnassa



Kuva 24. WUFI Pro:lla mallinnettu suhteellisen kosteuden, absoluuttisen kosteuden ja lämpötilan kehitys pintavalun ja lämmöneristeen rajapinnassa.

Lämpötila ja suhteellinen kosteus pintavalun ja lämmöneristeen rajapinnassa

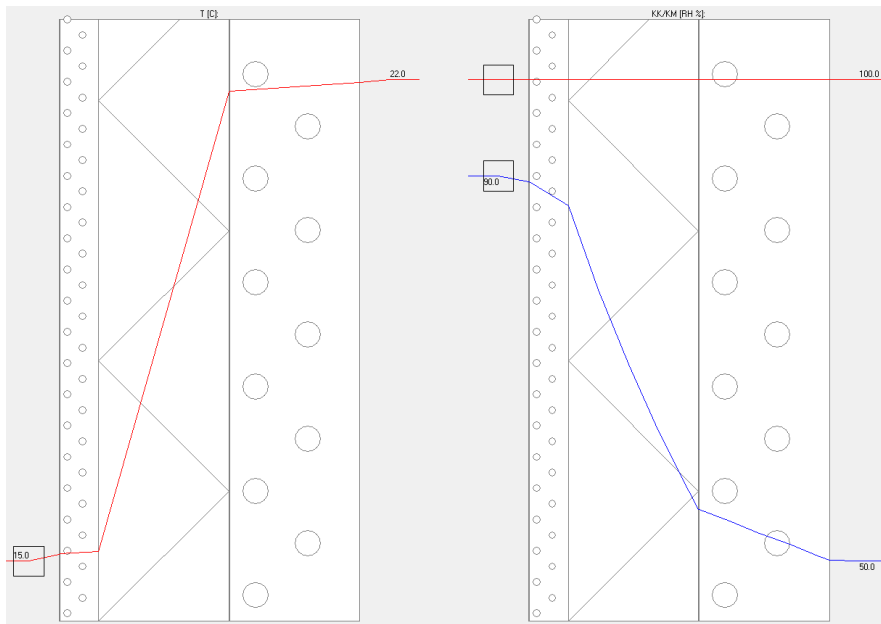


Kuva 25. WUFI 2D:lla mallinnettu suhteellisen kosteuden, ja lämpötilan kehitys pintavalun ja lämmöneristeen rajapinnassa.

Huomattavaa on, että betonilaatan suhteellinen kosteus nousee simulointiaikana. Näin ollen tilojen käytössä tulee ottaa huomioon, että pitkien ja kylmien tutkimusjaksojen välillä tulee tiloissa olla myös lämpimiä ja kuivia jaksoja jotka mahdollistavat laatan kuivumisen.

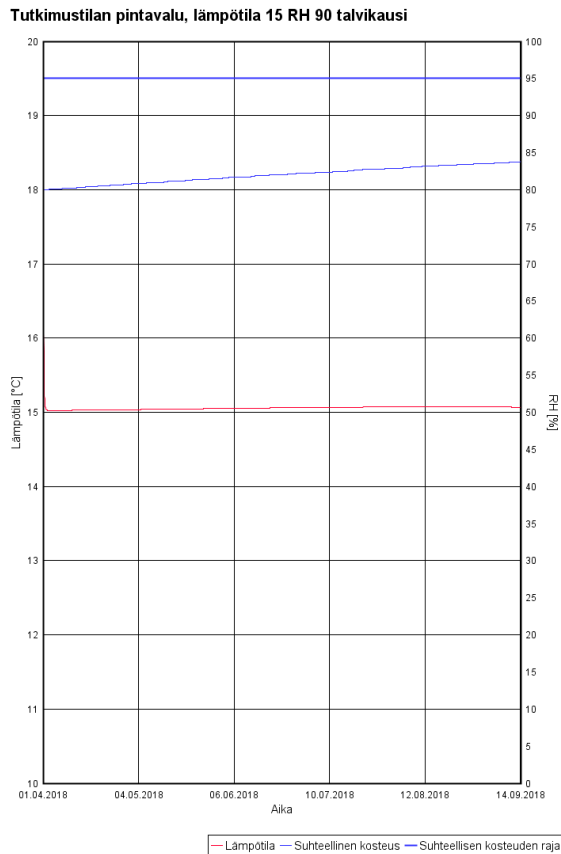
10.3 Välipohjarakenne, lämpötila 15 °C RH 90 %

Toinen tarkastelu tehtiin samasta välipohjarakenteesta kuin edellisessä kohdassa, mutta nyt valittiin tutkimustilan lämpötilaksi 15 °C, ja suhteellisen kosteuden arvoksi 90 %.



Kuva 26. Dof-lämpö tulokset. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa lämpötila, oikeanpuoleisessa suhteellinen kosteus.

Suhteellisen kosteuden käyrästä voidaan havaita, että rakenteen suhteellinen kosteus ei nouse yli 100 %:iin. Näin ollen riskiä kosteuden tiivistymiseen ei ole, kun tarkastelu tehdään Dof-lämmöllä.

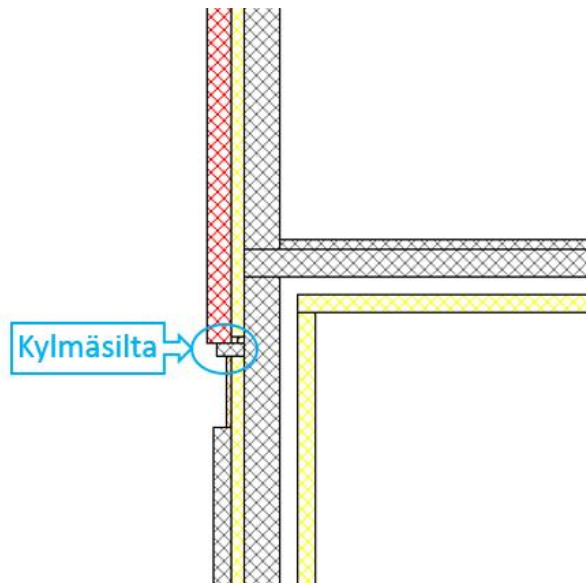


Kuva 27. Simulointitulokset WUFI 2D:stä

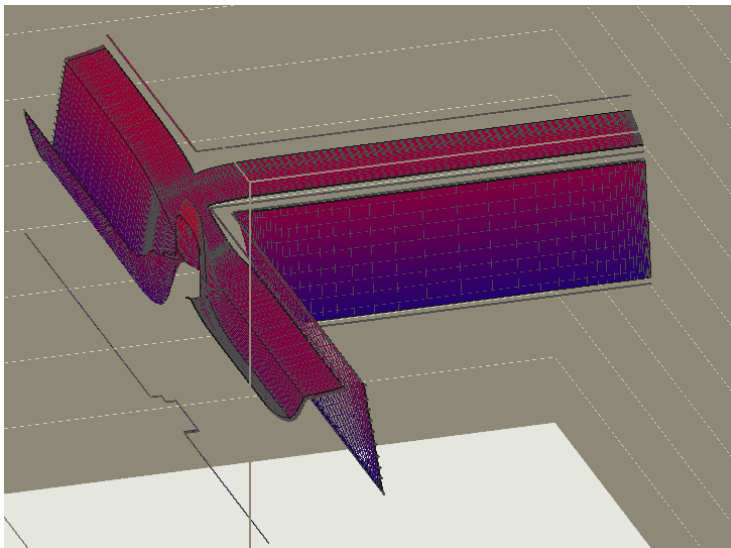
Tässä tapauksessa kun simulointitulosta tarkastellaan WUFI:ssa, saadaan erilainen tulos. Voidaan havaita, että pintavalun suhteellinen kosteus lähtee nousemaan kohti ilman suhteellista kosteutta, joka on myös rakennusfysikaalisesti loogista. Näissä olosuhteissa voidaan havaita että, stationäärilaskennalla ja laajemmalla simuloinnilla voi olla merkittäviäkin eroja lopputuloksen kannalta.

10.4 Kylmäsilta WUFI 2D:llä

Koska tyypillinen tarkasteltava rakenne on esimerkiksi rakenteiden liittymä tai kylmäsilta, tehtiin myös rakenteesta olevasta kylmäsilta simulointi, jolloin koko muu rakenne jätettiin pois laskennasta. Pelkän yksittäisen kohdan simuloinnin tarkoituksena oli tutkia, kuinka kauan yksittäisen rakenteen simulointiin kuluu aikaa verrattuna koko rakenteeseen.



Kuva 28. Rakenteessa oleva kylmäsilta.



Kuva 29. Lämpötilajakauma kylmäsilan kohdalla.

Vaikka simuloitavana oli vain rakenteen yksi osa, kesti laskenta yli seitsemän tuntia. Laskennan keston arviointi etukäteen osoittautuikin varsin vaikeaksi. Selvästi oli kuitenkin havaittavissa, että monimutkaiset rakenteet hidastavat merkittävästi laskentaa verrattuna yksinkertaisiin, esimerkiksi pelkkää rakennetyyppejä, kuvaaviin malleihin.

11 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko korjausrakentamisessa hyötyä rakenteiden simuloinnista, ja antaako se rakennesuunnittelijalle riittävän paljon lisätietoa suhteessa simuloinnin vaatimiin resursseihin.

Merkittäväksi asiaksi työn aikana havaittiin rakenteiden mallintamisen vaatima aika, sekä simuloinnin vaatima laskentateho. Kun mallinnusta ja laskentaa tehtiin Dof-lämpö ja WUFI Pro ohjelmilla, oli rakenteiden syöttäminen ja muokkaaminen nopeaa. Dof-lämpö antaa tulokset reaaliaikaisesti, ja WUFI Pro:lla laskenta-ajat olivat muutamista sekunneista muutamiin minuutteihin. Tämän myötä eri rakennetyyppien ja niiden toiminnan vertailu on nopeaa. Lisäksi ohjelmien käyttöliittymät ovat selkeitä, joten kynnys käyttää ohjelmia on varsin matala.

Koska tavoite oli tutkia kokonaisen rakenteen toimintaa, mallinnettiin WUFI 2D:hen koko ulkoseinärakenteet poikkileikkaus. Ohjelmassa rakenne mallinnetaan joko ohjelman omalla editorilla tai Autocadillä, jolla luotu tiedosto voidaan tuoda WUFI:iin. Molemmilla tavoilla rakenne pitää mallintaa suorakaiteista, mikä tekee varsinkin vinojen pintojen mallintamisesta työlästä, sekä yksinkertaistaa rakennetta. Kuitenkin merkittävien ero yksinkertaisimpiin ohjelmiin tulee laskenta-ajassa. Koko rakenteen laskentaan meni aikaa yleensä vähintään 3 tuntia, monesti jopa yli 10 tuntia. Lisäksi vaadittavan ajan arvioiminen etukäteen oli hankala, ja pienetkin muutokset mallissa tai olosuhteissa vaikuttivat merkittävästi laskenta-aikaan. Ohjelma näyttää arvion laskenta-ajasta, mutta siinä oli suuria heittoja. Näin ollen kun simuloidaan kokonaista rakennetta, tulee käyttää harkintaa onko tarpeellista simuloida koko rakenne tarkasti. Vaihtoehtoja voi olla esimerkiksi rakenteen mallintaminen ja laskeminen pienemmällä tarkkuudella, jolloin voidaan etsiä riskikohtia. Valituista kohdista voi sen perusteella tehdä tarkempia analyysyjä. Toisaalta kokenut suunnittelija pystyy arvioimaan riskirakenteita, jotka vaativat tarkastelua. Mikäli kuitenkin on tarvetta simuloida laajempia kokonaisuuksia, eräs vaihtoehto on selvittää pilvipalveluiden käyttöä laskennassa. Erään palveluntarjoajan mukaan testauksien jälkeen olisi mahdollista saada käyttöön moninkertaisesti laskentatehoa verrattuna tavalliseen työasemaan. Aloituskulujen jälkeen laskenta on esimerkiksi Microsoft Azure:n kautta tuntihinnoiteltua, ollen edullisimmillaan joitain senttejä per tunti, riippuen vaadittavasta tehosta. [19.]

Simuloinnin avulla voidaan arvioida rakenteen toimintaa erityisesti pitkällä aikavälillä. Usein rakenteisiin kertyy kosteutta osan aikaa vuodesta, jolloin simuloinnilla voidaan arvioida koko vuoden kertymää. Saatavien tulosten perusteella voidaan arvioida esimerkiksi kuinka kauan rakenteessa on korkea kosteuspitoisuus, ja onko rakenne kuivuva pitkällä ajanjaksolla. Mikäli laskentaan on käytettävissä riittävästi resursseja, voi simulointia tehdä usean vuoden ajalle.

Tämän työn aikana saadut tulokset olivat johdonmukaisia. Erityisesti simulointi on hyvä työkalu kun tutkitaan riskirakenteita tai kylmäsiltojen vaikutusta. Esimerkkikohteessa eräs riskipaikka on kosteiden tilojen betonin päällystys. Simuloinnilla voitiin havaita paljon julkisuudessakin olleet betonin pinnoittamisen riskitekijät. Koska lattiarakenteet kuivuvat pääosin ylöspäin, pysähtyy betonin kuivuminen lähes täysin, vaikka lattia päällystettäisiin hyvin vesihöyryä läpäisevällä pinnoitteella.

Simulointien perusteella voitiin arvioida, että tutkimustilojen pintavalussa suhteellinen kosteus nousee muutamia prosentteja, kun tiloissa tehdään pitkäkestoisia kokeita viileissä tai kylmissä olosuhteissa. Tämä tulee ottaa huomioon jo rakennusvaiheessa, jolloin tulee varmistaa, että lattian pintavalu on riittävän kuiva ennen pinnoittamista. Lisäksi tutkimuksia tulee jaksottaa siten, että tiloissa on riittävän pitkiä jaksoja olosuhteet jotka mahdollistavat kuivumisen. Rakenteeseen voidaan myös lisätä ratkaisuja jotka edesauttavat betonin kuivumista, esimerkiksi salaojamatto eristeen ja valun väliin tai lattialämmitys.

Kokemusten perusteella rakennusfysiikan simulointiohjelmat ovat hyvä työkalu riskirakenteiden arviointiin. Kuitenkin aina simulointiohjelmistoja käytettäessä tuloksiin tulee suhtautua jossain määrin kriittisesti, ja pitää niitä suuntaa-antavina. Esimerkiksi todelliset olosuhteet eivät käytännössä useinkaan vastaa täysin sitä mitä ohjelmaan on syötetty. Lisäksi tilojen käyttö voi poiketa suunnitellusta, materiaaleissa on laatupoikkeamia ja mallinnus on monesti yksinkertaistettu versio todellisesta rakenteesta.

Se millä laajuudella simulointia tehdään, on päätettävä tapaus- ja yrityskohtaisesti, koska ohjelmistojen väliset erot käytettävyydessä ja niiden vaatimissa resursseissa ovat varsin suuret. Loppujen lopuksi ohjelmiston valinta on kiinni siitä millä tasolla rakennetta halutaan ohjelmallisesti tutkia.

Mikäli tarve on tutkia ainoastaan rakennetyyppejä, nopean arvion saa yksinkertaisella stationääriohjelmalla, jolla voidaan rakenteen lämmöneristävyyden lisäksi nähdä onko rakenteessa riskiä esimerkiksi kosteuden kondensoitumiseen. Mikäli rakennetyypin toiminnasta halutaan lisätietoa ottamalla huomioon muuttuvat ulko- ja sisäilmaolosuhteet sekä materiaalien todelliset ominaisuudet, silloin valinta on WUFI Pro, tai vastaava ohjelma.

Omasta mielestäni tehokkain simulointityökalu rakennesuunnittelun tueksi työssä käytetyistä ohjelmista oli WUFI 2D. Ohjelmassa on edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi mahdollisuus mallintaa kylmäsiltoja ja nurkkarakenteita, jotka ovat usein ongelmallisempia kuin yksittäiset rakennetyypit.

WUFI Plus tarjoaa taas huomattavasti enemmän mahdollisuuksia esimerkiksi energialaskentaan, joka tekee siitä myös huomattavasti työläämmän ohjelman käyttää. Mielestäni sen hyödyt tulevat enemmän esille esimerkiksi talotekniikkaa tai uudisrakennuksia suunniteltaessa, ollen tyypilliseen Konstrun korjauskohteeseen liian laaja.

Lopputuloksena havaittiin, että rakennusfysikaalisen simuloinnin käytöstä on hyötyä rakennesuunnittelun tukena, ja yrityksessä ollaan harkitsemassa ohjelmiston hankkimista. Näin ollen työn tavoitteena ollut simulointiohjelmiston tarpeellisuuden arviointi Insinööritoimisto Konstrun tyypillisissä kohteissa täyttyi.

Lähteet

- 1 Siikanen, Unto. 2017. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto.
- 2 RIL 255-1-2014. 2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.
- 3 Suvanto, Kari. 2012. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing.
- 4 Leivo, Virpi & Rantala, Jukka. 2006. Maanvastaisten alapohjarakenteiden lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennusteollisuus RT.
- 5 Viitanen, Hannu. 2004. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet - betonin homeenkesto. Espoo: VTT.
- 6 Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. 2017. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 7 Lämmöneristysohjeet. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C4 Luonnos 16.03.1012. Helsinki: Ympäristöministeriö
- 8 RAFNET-oppimateriaali. 2004. Lämpö.
<http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/lampoosio27092004.pdf> Luettu 7.11.2018.
- 9 RAFNET-oppimateriaali. 2004. Kosteus.
http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf Luettu 7.11.2018
- 10 WUFI 2D online help. WUFI – ohjelmiston sisäinen ohje.
- 11 WUFI Pro esittelysivu.
<https://wufi.de/en/software/wufi-pro/> Luettu 8.11.2018.
- 12 WUFI 2D esittelysivu.
<https://wufi.de/en/software/wufi-2d/> Luettu 8.11.2018.
- 13 WUFI Plus esittelysivu.
<https://wufi.de/en/software/wufi-plus/> Luettu 8.11.2018.
- 14 WUFI Passive esittelysivu.
<https://wufi.de/en/software/wufi-passive/> Luettu 8.11.2018.

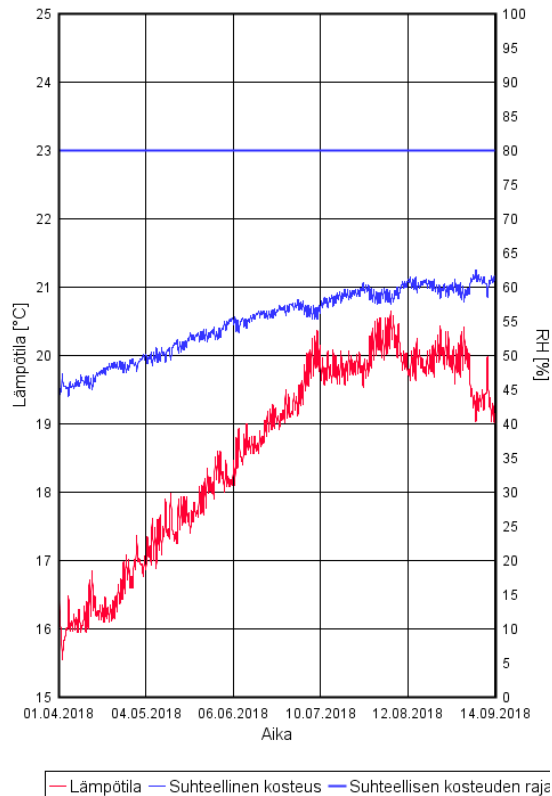
- 15 SFS-EN ISO 6946
- 16 SFS-EN ISO 15026
- 17 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. 1989. Helsinki: Tie- ja vesirakennuslaitos.
- 18 Eerola Martti. Uusiomateriaalien käyttö maanrakentamisessa. Helsinki: Tieliikelaitos.
- 19 <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/> Luettu 20.11.2018.
- 20 Tuoteseloste. 2018. Nanten HM W Epoksi 1/2018. Nanten Coatings.

Simuloinnissa käytetyt rakennetyypit

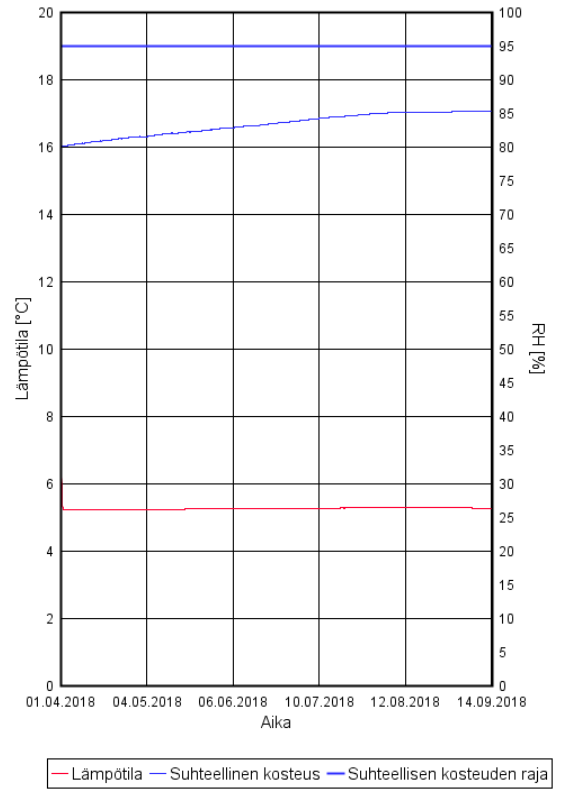
Vain työn tilaajan käyttöön, ei sisälly kirjalliseen raporttiin.

WUFI 2D tulokset

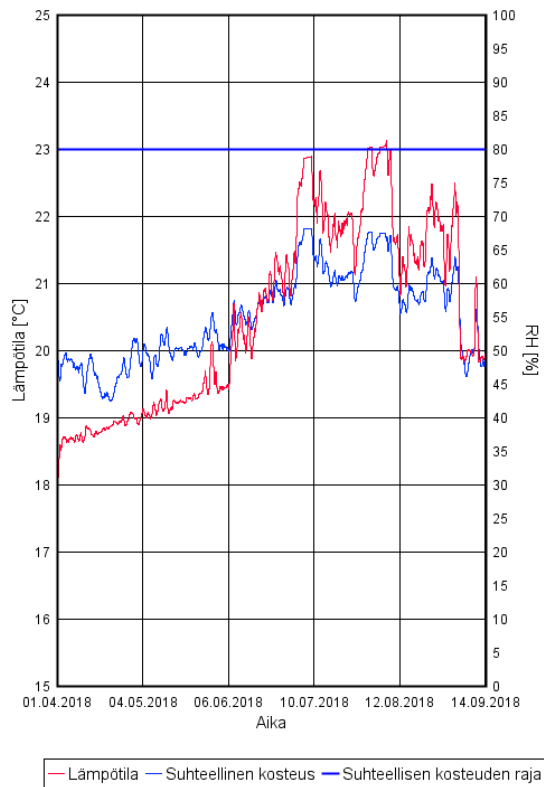
Ilmarako kylmäsillan kohdalla. Lämpötila 5, RH 100 kesäkausi.



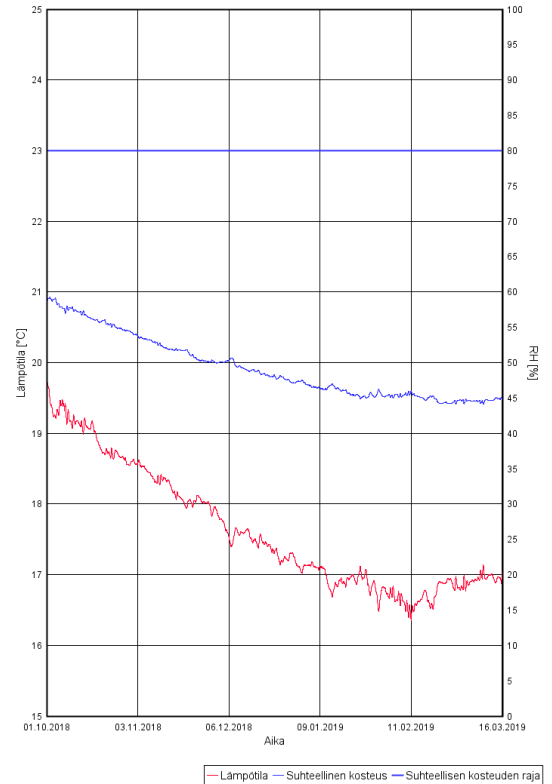
Tutkimustilan pintavalu. Lämpötila 5, RH 100 kesäkausi.



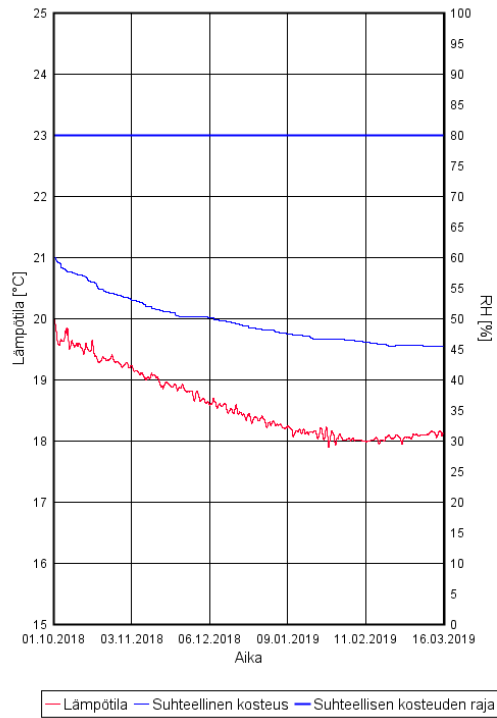
Lämmin huonetila, pintavalun yläpinta. Lämpötila 5, RH 100 kesäkausi



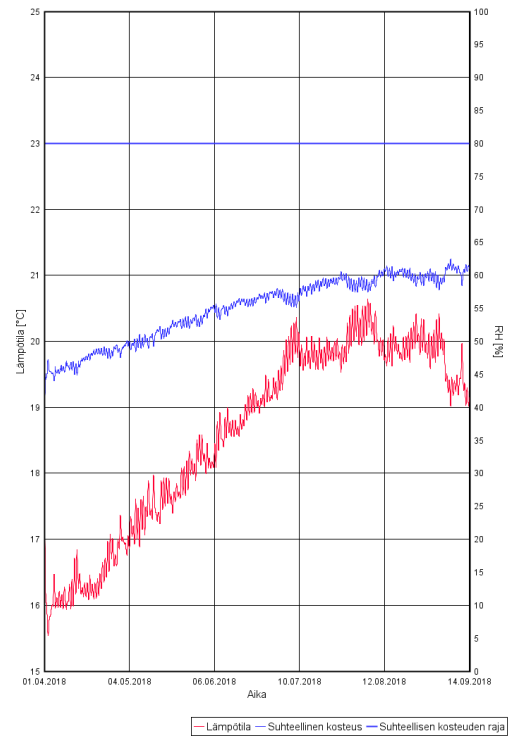
Ilmarako kylmäsillan kohdalla. Lämpötila 5, RH 100 talvikausi.



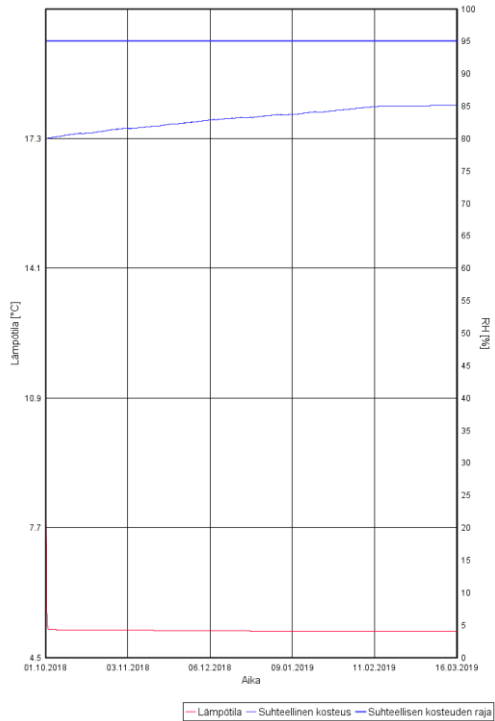
Lämmin huonetila, pintavalun yläpinta. Lämpötila 5, RH 100 talvikausi.



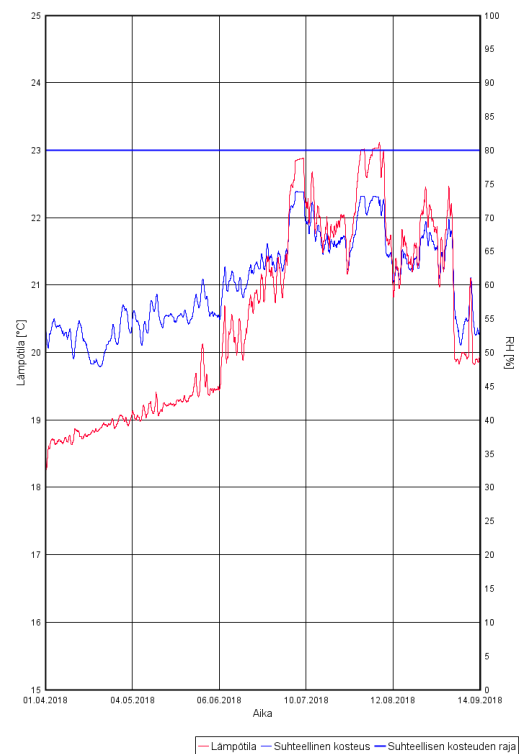
Ilmarako kylmäsiilan kohdalla. Lämpötila 15 RH 90 kesäkausi



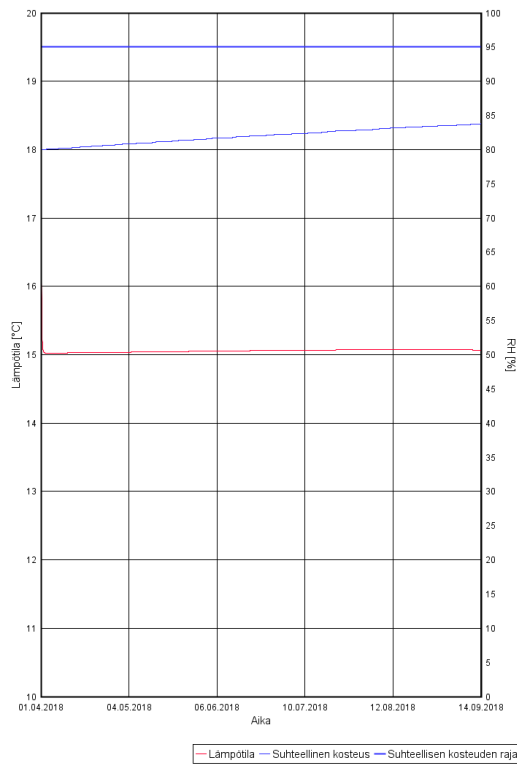
Tutkimustilan pintavalu. Lämpötila 5, RH 100 talvikausi.



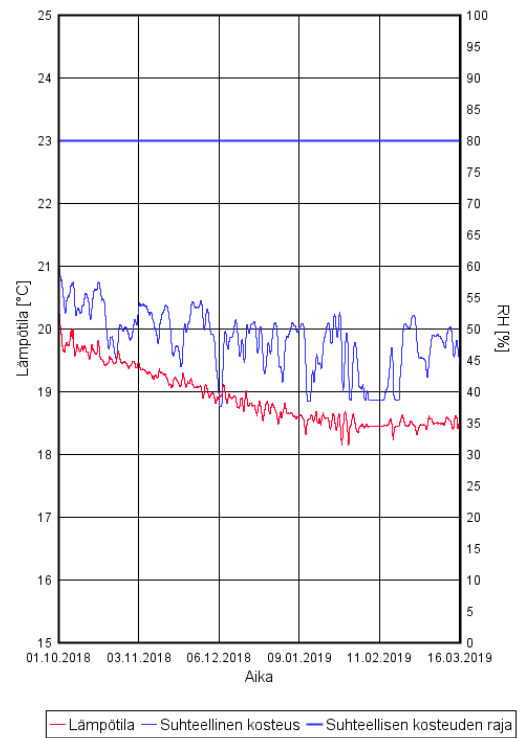
Lämmin huonetila, pintavalun yläpinta. Lämpötila 15 RH 90 kesäkausi



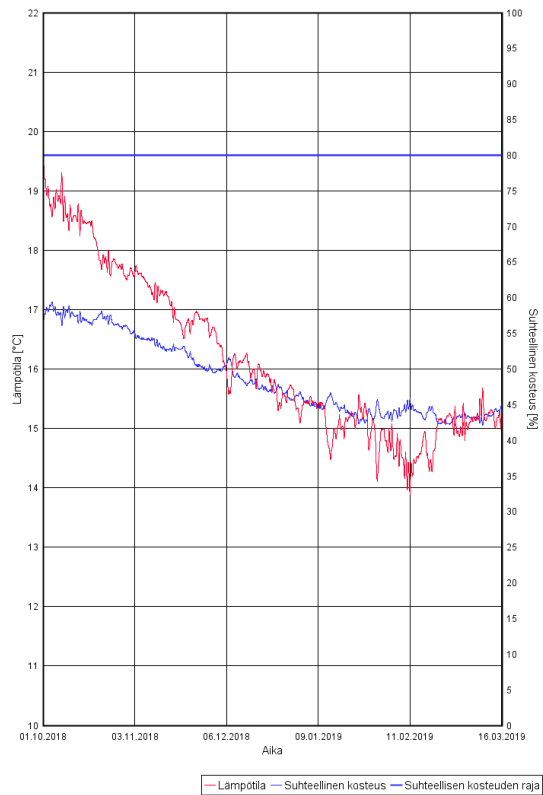
Tutkimustilan pintavalu, lämpötila 15 RH 90 talvikausi



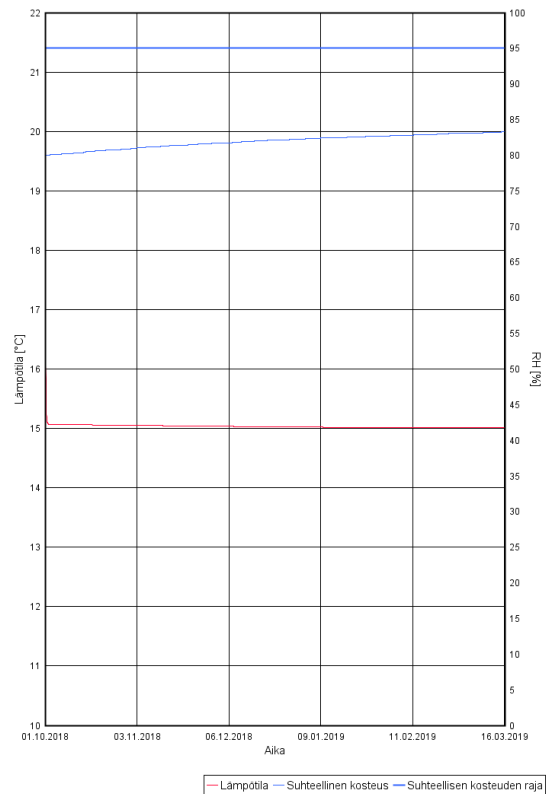
Lämmin huonetila, pintavalun yläpinta. Lämpötila 15 RH 90 talvikausi



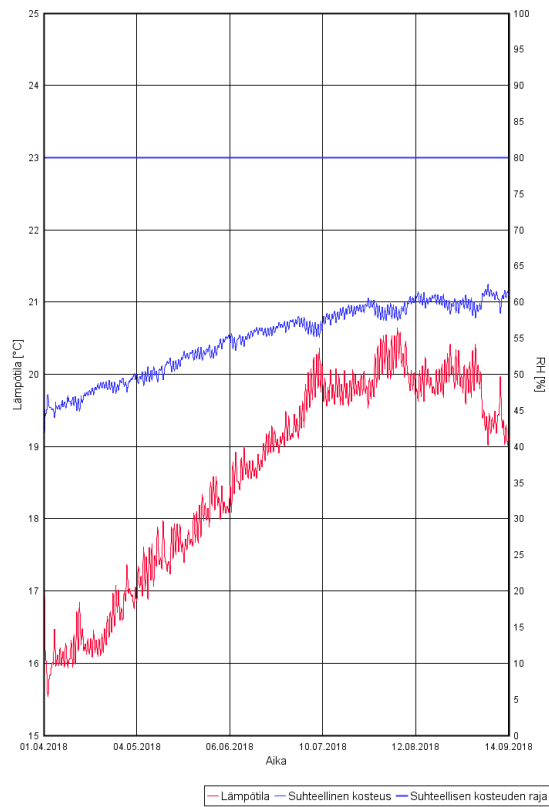
Ilmarako kylmäsillan kohdalla. Lämpötila 15 RH 90 talvikausi



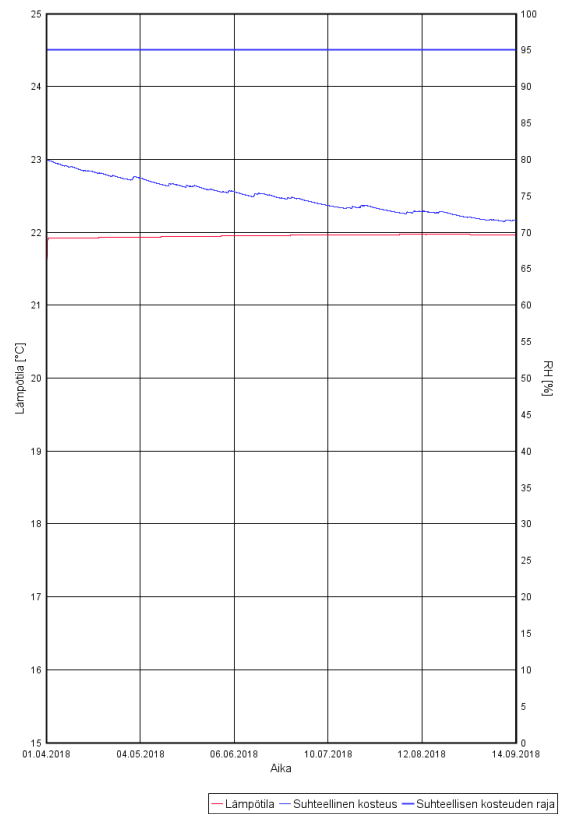
Tutkimustilan pintavalu, lämpötila 15 RH 90 talvikausi



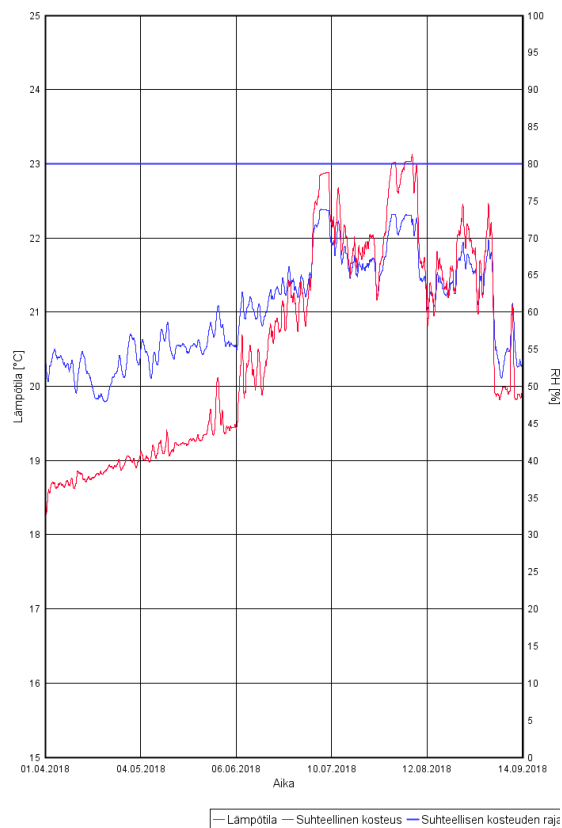
Ilmarako kylmäsillan kohdalla. Lämpötila 22, RH 60 kesäkuusi



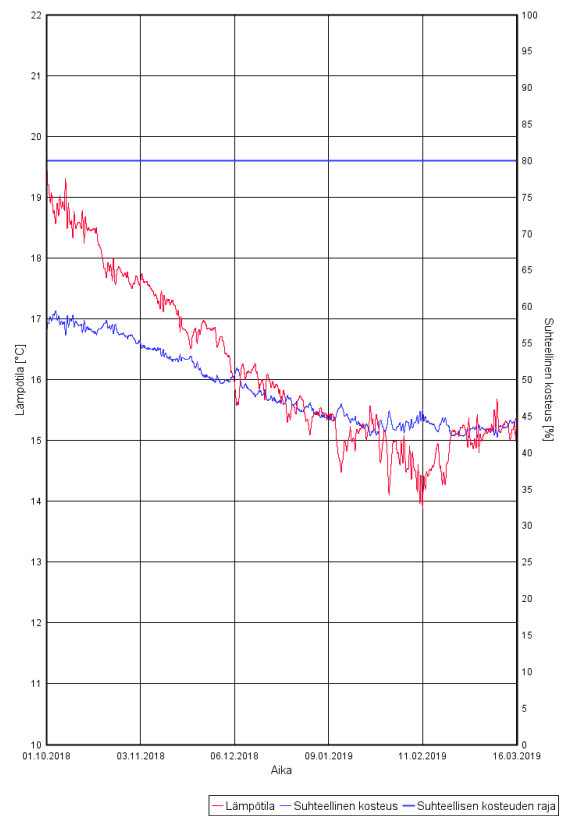
Tutkimustilan pintavalu. Lämpötila 22, RH 60 kesäkuusi



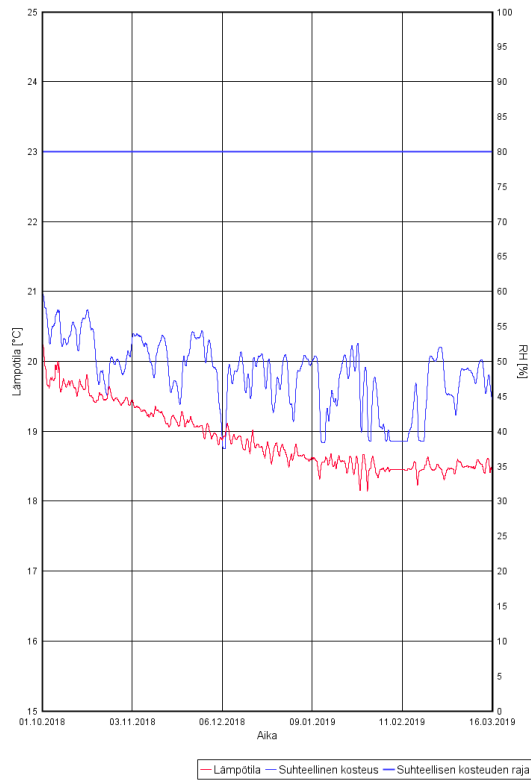
Lämmin huonetila, pintavalun yläpinta. Lämpötila 22 RH 60. kesäkuusi



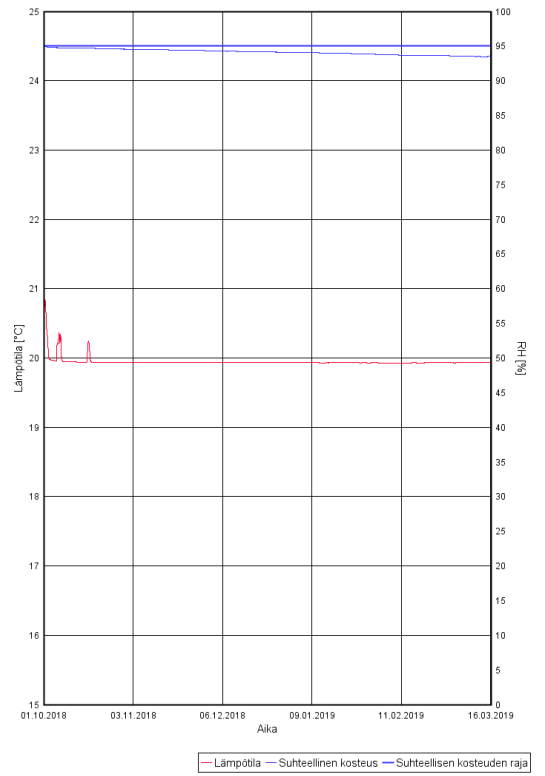
Ilmarako kylmäsillan kohdalla. Lämpötila 22, RH 60 talvikausi



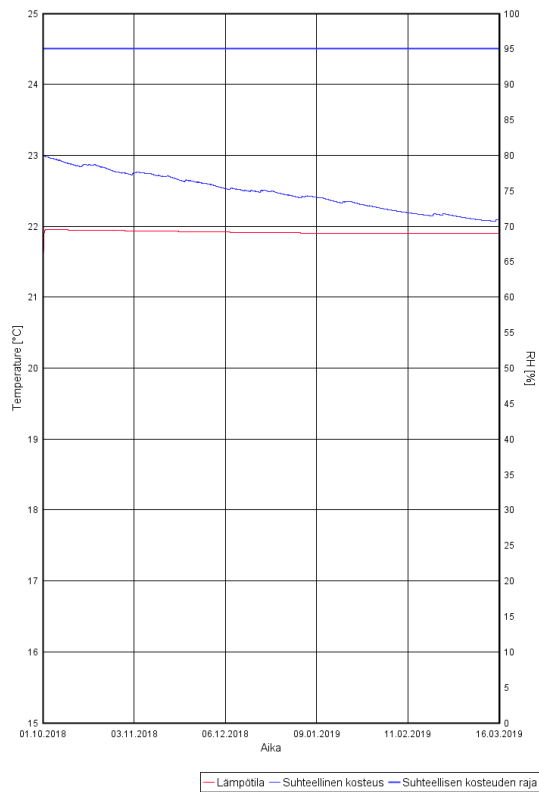
Lämmin huonetila, pintavalun yläpinta. Lämpötila 22 RH 60. talvikausi



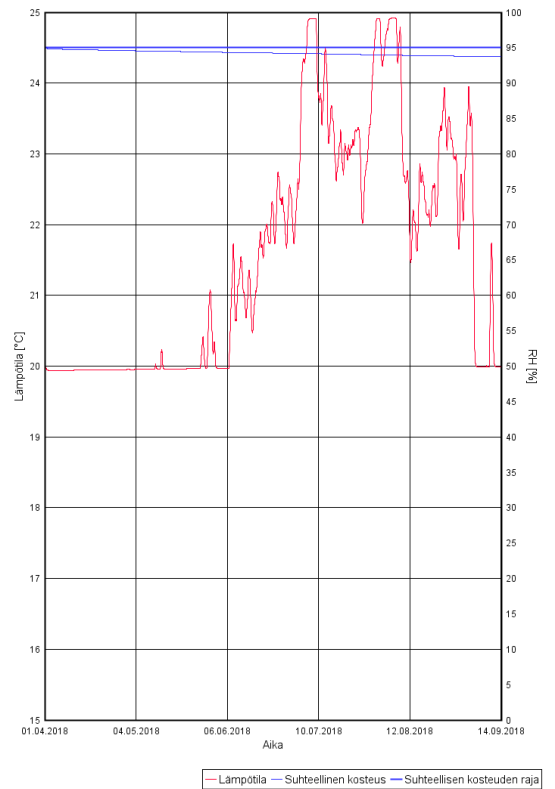
Maanvaraisen lattian pintavalun kuivatus. Talvikausi.



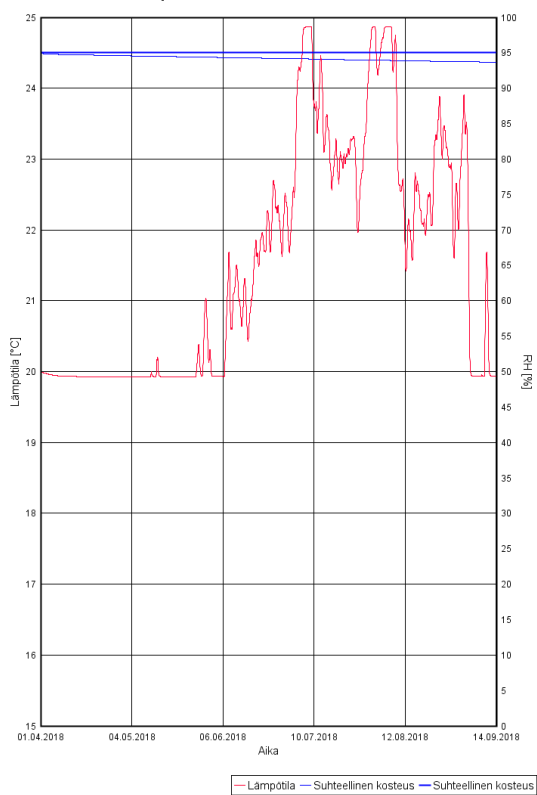
Tutkimustilan pintavalu. Lämpötila 22, RH 60 talvikausi



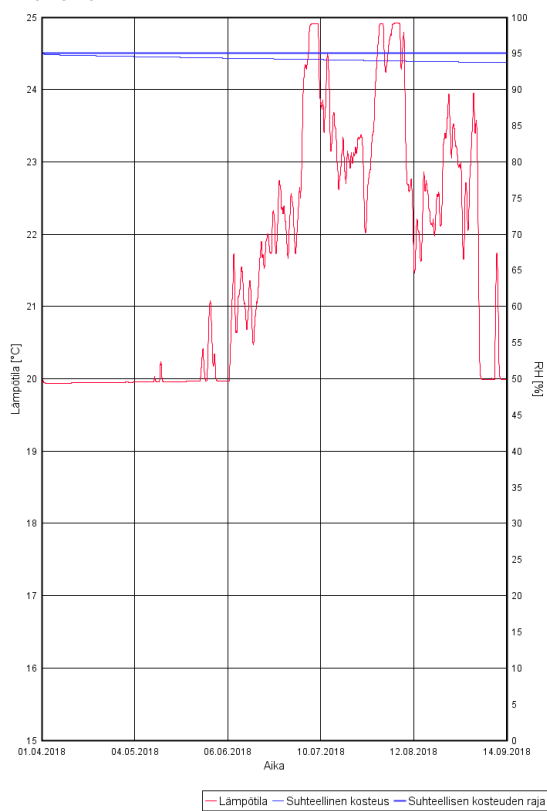
Välipohjan pintavalun kuivatus. Kesäkausi



Maanvaraisen lattian pintavalun kuivatus. Kesäkausi.



Väli pohjan pintavalun kuivatus. Kesäkausi



Olosuhdemittaukset

Tutkimustilojen olosuhdeseuranta										
1. kerros huone 149b, mittauspisteiden sijainnit:										
1	Lämpötila ja kosteus tutkimusaltaan päällä									
2	Lämpötila ja kosteus huonetilan keskellä									
3	Katon pintalämpötila									
4	Katon pintalämpötila									
5	Lattian pintalämpötila									
6	Alemman tilan katon pintalämpötila									
7	Ylemmän tilan lattian pintalämpötila									
8	Ylemmän tilan lattian pintalämpötila									
Mittauspisteet 1 ja 2 Vaisala HMI41, erilliset anturit. Mittauspisteet T3-T7 Testo pintalämpömittari.										
Pvm	T 1 [°C]	RH 1 [%]	T 2 [°C]	RH 2 [%]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]
1.loka	21,2	52	20,7	52	21,5	20,0	15,5	12,0		
2.loka	20,5	45	20,7	48	21,5	20,0	15,5	13,5		
3.loka	20,8	48	20,6	48	21,0	19,5	15,5	13,0		
Lämpötila laskettu										
4.loka	11,9	51	10,8	55	15,5	12,0	11,0	12,5	20,0	20,5
5.loka	13,1	62	12,2	66	15,0	13,5	11,0	12,0	19,0	19,5
8.loka	14,4	62	13,4	62	16,0	15,5	12,5	13,0	20,0	22,0
9.loka	14,5	66	13,1	66	17,0	15,5	12,5	13,0	20,5	22,5
10.loka	13,4	63	12,3	59	16,5	15,0	12,0	13,5	21,0	21,0
11.loka	12,8	62	11,7	59	15,5	13,5	12,0	12,5	20,5	22,0
12.loka	13,1	62	12,0	63	15,5	13,5	11,5	12,5	20,0	18,0
15.loka	13,7	64	12,4	62	16,0	14,0	11,5	12,0	20,0	19,0

Tutkimustilojen olosuhdeseuranta									
Alin kerros huone 125c, mittauspisteiden sijainnit:									
1	Lämpötila ja kosteus tutkimusaltaan päällä								
2	Lämpötila ja kosteus huonetilan keskellä								
3	Katon pintalämpötila								
4	Katon pintalämpötila								
5	Lattian pintalämpötila								
6	Ylemmän tilan lattian pintalämpötila								
7	Ylemmän tilan lattian pintalämpötila								
Mittauspisteet 1 ja 2 Vaisala HMI41, erilliset anturit. Mittauspisteet T3-T7 Testo pintalämpömittari.									
Pvm	T 1[°C]	RH 1 [%]	T 2 [°C]	RH 2 [%]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T7 [°C]
15.loka	14,1	90	13,8	85	13,0	12,8	11,5	12,0	12,0
16.loka	14,0	90	13,9	85	12,5	11,5	11,5	12,0	12,0
Lämpötila laskettu									
17.loka	12,9	88	12,8	83	12,5	12,0	11,5	12,5	12,5
18.loka	5,7	85	5,6	81	7,0	4,5	5,0	10,0	10,0
19.loka	5,7	84	5,5	80	6,5	4,0	4,5	9,0	9,0

Tutkimustilojen olosuhdeseuranta									
Alin kerros huone 125c, mittauspisteiden sijainnit:									
1	Lämpötila ja kosteus huonetilan keskellä								
2	Lämpötila ja kosteus tutkimusaltaan päällä								
3	Katon pintalämpötila								
4	Katon pintalämpötila								
5	Lattian pintalämpötila								
6	Ylemmän tilan lattian pintalämpötila								
7	Ylemmän tilan lattian pintalämpötila								
Mittauspisteet 1 ja 2 Vaisala HMI41, erilliset anturit. Mittauspisteet T3-T7 Testo pintalämpömittari.									
Pvm	T 1[°C]	RH 1 [%]	T 2 [°C]	RH 2 [%]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T7 [°C]
22.loka	4,9	83	6,8	73	5,0	12,0	4,5	14,5	15,5
23.loka	5,9	83	7,0	72	4,5	12,0	5,5	14,5	16,0
24.loka	6,7	86	7,6	74	5,5	12,5	5,0	15,5	17,0
Lämpötila nostettu									
25.loka	17,7	56	14,7	51	14,5	1,5	10,5	17,5	18,0
28.loka	15,9	47	16,1	42	16,0	17,0	17,0	19,5	20,5