



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# ALALAATTAPALKISTON JA MASSIIVITIILISEINÄN LIITOKSEN SIMULOINTI WUFI2D 4.1 -OHJELMALLA

TEKIJÄ: Daniel Nikki

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Daniel Nikki			
Työn nimi Alalaattapalkiston ja massiivitiiliseinän liitoksen simulointi WUFI2D 4.1 -ohjelmalla			
Päiväys	6.4.2020	Sivumäärä	47
Ohjaaja Lehtori Matti Mikkonen, tuntiopettaja Teppo Houtsonen			
Toimeksiantaja Sweco Rakennetekniikka Oy			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa. Tavoitteena oli tutkia WUFI2D 4.1 -ohjelmalla korjatun alalaattapalkiston liittymistä massiivitiiliseinään. Alalaattapalkisto on yleinen rakenne korjausrakentamisessa, joten simuloinnille korjauksen jälkeiselle ajalle on tarvetta. Yksi tärkeä opinnäytetyön tavoite oli WUFI:n käyttöön perehtyminen, jotta Swecolle töihin jäädessäni opinnäytöprosessissa saatua WUFI-osaamista voitaisiin hyödyntää tulevaisuudessa sekä korjaus- että uudisrakennesuunnittelussa.</p> <p>Opinnäytetyössä simuloitiin kahta erilaista alalaattapalkiston ja massiivitiiliseinän liitosrakennetta. WUFI2D 4.1 -ohjelmalla simulointi rakenteiden toiminnasta tehtiin kolmen vuoden ajalle siitä alkaen, kun alalaattapalkisto on korjattu asentamalla uudeksi täyttömateriaaliksi vaahtolasimurske, jonka päällä on EPS-eriste ja valamalla sen päälle pintabetonilaatta. Simuloinneissa kiinnitettiin huomiota kosteuden imeytymiseen ja siirtymiseen rakenteessa, sekä tutkittiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta eri tarkastelupisteissä ja eri rakennusfysikaalisten testivuosien ilmasto-olosuhteilla simuloitaessa. Lisäksi tutkittiin, millainen vaikutus rakenteen ilmansuunnaalla on suhteelliseen kosteuteen ja lämpötilaan.</p> <p>Lopputuloksena saatiin tietoa alalaattapalkiston ja massiivitiiliseinän liitoksen rakennusfysikaalisesta toiminnasta korjauksen jälkeiselle ajalle simuloitaessa eri rakennusfysikaalisten testivuosien ilmasto-olosuhteissa ja eri ilman-suunnissa. Lisäksi perehdyin WUFI-ohjelman käyttöön hyvin laajasti ja tutustuin ohjelman ominaisuuksiin, sekä tulosten analysointiin.</p>			
Avainsanat WUFI, simulointi, kuivuminen, kosteus, kosteusrasitus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Engineering			
Author Daniel Nikki			
Title of Thesis Simulation of the Connection of a Beam-and-Slab Floor and Masonry Brick Wall with WUFI2D 4.1 Program			
Date	April 6, 2020	Pages	47
Supervisor Mr Matti Mikkonen, Senior Lecturer, Mr Teppo Houtsonen, Lecturer			
Client Organisation Sweco Rakennetekniikka Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final project was to study how beam-and-slab floor for masonry brick wall. Beam-and-slab floor is a common structure in renovation, so there was a need for simulation for the time after repairing. One important aim of the project was to master to use of WUFI program that could be profited in future as well as in the repair planning and structural engineering. The thesis was made in cooperation with <i>Sweco Rakennetekniikka Ltd</i>.</p> <p>In the project, two different connecting structures of beam-and-slab floor and masonry brick wall. The functioning of structures was simulated by the WUFI2D 4.1 program for three years starting from repairing the beam-and-slab floor by installing crushed foam glass as a new filling material with EPS-insulate on top and casting a surface slab on it. In the simulation attention was paid to the absorption and transfer of moisture in the structure. The temperature and relative humidity were studied at different observation points and when simulating the climatic conditions during different construction physical test years. In addition, the effect of the cardinal point on relative humidity and temperature was investigated.</p> <p>As a result of the project there was information on the construction physical behavior of the connecting structure of beam-and-slab floor and masonry brick wall during the period after repair. In addition, the use of the WUFI program and the features of the program were extensively studied, as well as the analysis of the results.</p>			
Keywords WUFI, simulation, dry, moisture, moisture stress			

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
2	KOSTEUS RAKENTEESSA.....	6
2.1	Kosteuden esiintymismuodot .....	6
2.1.1	Jää.....	6
2.1.2	Nestemäinen vesi.....	6
2.1.3	Vesihöyry.....	6
2.2	Kosteuden kulkeutuminen rakenteissa .....	6
2.2.1	Painovoimainen siirtyminen.....	6
2.2.2	Kapilaarinen siirtyminen.....	7
2.2.3	Diffuusio .....	7
2.2.4	Konvektio.....	7
2.3	Kosteuslähteet rakenteissa .....	8
2.3.1	Ulkoiset kosteuslähteet.....	8
2.3.2	Sisäiset kosteuslähteet .....	9
3	KUIVUMINEN .....	10
3.1	Betonin kosteus .....	10
3.1.1	Valmistuksen mukana tuleva kosteus .....	10
3.1.2	Käytön aikainen kosteus .....	10
3.2	Betonin kuivuminen.....	10
3.3	Betonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät .....	11
3.3.1	Ympäröivät olosuhteet.....	11
3.3.2	Rakeneratkaisut.....	12
3.3.3	Käytettävän betonin ominaisuudet .....	12
4	TUTKITTAVA RAKENNE.....	13
4.1	Alalaattapalkisto.....	13
4.1.1	Vaahtolasimursketäyttöisen alalaattapalkiston liittyminen tiiliseinään.....	14
5	WUFI-SIMULOINTI .....	16
5.1	Laskennan eteneminen vaihe vaiheelta .....	16
5.1.1	Geometrian luonti .....	16
5.1.2	Laskentaverkko .....	17
5.1.3	Materiaalit.....	17

5.1.4	Alkuolosuhteet.....	23
5.1.5	Pintojen reunaehdot.....	24
5.1.6	Laskentaparametrit .....	28
5.1.7	Laskenta.....	28
5.1.8	Tulosten tarkastelu .....	29
6	RAKENNE 1 SIMULOINTITULOKSET .....	32
6.1	Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa pohjoiseen .....	33
6.2	Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa etelään .....	35
6.3	Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa etelään .....	36
6.4	Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa pohjoiseen .....	38
7	RAKENNE 2 SIMULOINTITULOKSET .....	39
7.1	Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa pohjoiseen .....	40
7.2	Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa etelään .....	41
7.3	Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa pohjoiseen .....	41
7.4	Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa etelään .....	42
8	HUOMIOITA JA YHTEENVETO.....	43
	LÄHTEET .....	46

Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Sweco Rakennetekniikka Oy:n kanssa. Sweco Rakennetekniikka Oy on rakennetekniikan ja rakennesuunnittelun alalla toimiva Sweco AB konserniin kuuluva kohtalaisen suuri yritys. Opinnäytetyön aihe muotoutui yhtiön tarpeiden mukaan lopulliseen muotoonsa.

Opinnäytetyössä simuloidaan WUFI2D 4.1 -ohjelmalla korjatun alalaattapalkiston liittymistä tiiliseinäen. Erityisesti korjausrakennesuunnittelussa törmätään usein alalaattapalkistoon, joka oli yleinen välipohjan rakennetyyppi 1910 - 1950 luvuilla. Korjausrakennesuunnittelussa kaikki tieto alalaattapalkiston korjauksen jälkeisestä kosteusteknisestä käyttäytymisestä ja toimivuudesta on hyödyllistä ja mahdolliset riskikohdat olisi hyvä tietää jo ennakkoon.

Tässä opinnäytetyössä simuloidaan kahta erilaista rakennetta. Molemmat simuloivat rakenteet ovat pystyleikkauksia alalaattapalkiston ja massiivitiiliseinän liitoksesta. Ensimmäisessä rakenteessa alalaattapalkiston reunapalkki on upotettu tiiliseinän sisään. Lisäksi reunapalkin ja tiiliseinän välissä on korkkilevy. Toisessa rakenteessa alalaattapalkiston reunapalkki on kiinni massiivitiiliseinän sisäpinnassa, eikä välissä ole mitään. Rakenteen simuloinnin aloitustilanteessa välipohjarakenne on korjattu niin, että vanhat täyttömateriaalit on poistettu, uudet täytöt on tehty vaahtolasimurskeella, uusi EPS-eriste on asennettu ja uusi pintalaatta on valettu.

Yhtenä tärkeänä opinnäytetyön tarkoituksena on erehtyä ja syventyä WUFI2D 4.1 -ohjelman käyttöön. Sweco Rakennetekniikalla on tarvetta WUFI:n käytölle sekä korjausrakennesuunnittelussa, että uudisrakennesuunnittelussa. Valmistuttuani jään töihin Sweco Rakennetekniikka Oy:lle, jolloin WUFI-osaamistani voidaan hyödyntää tulevaisuuden projekteissa.

## 2 KOSTEUS RAKENTEESSA

### 2.1 Kosteuden esiintymismuodot

Rakennusfysiikassa kosteudella tarkoitetaan yleensä vettä joko nesteenä tai vesihöyrynä. Vedellä on kolme olomuotoa: kiinteä (jää), neste (vesi) ja kaasu (vesihöyry). Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa jää jätetään kuitenkin yleensä vähemmälle huomiolle, sillä sellaisenaan sillä ei ole suoranaista vaikutusta rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Olisi väärin kuitenkin todeta, että jäällä ei ole mitään vaikutusta rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan, sillä jää muuttuu sulaessaan vedeksi, joka taas voi aiheuttaa väärässä paikassa rakenteiden kosteusvaurioita (Teräväinen).

#### 2.1.1 Jää

Kiinteässä olomuodossa olevaa vettä kutsutaan jääksi. Yleensä jäällä tarkoitetaan luonnossa esiintyvää kiderakenteista kuusikulmaista vettä. Myös lumi ja rakeet ovat jäätä. Vesi jäätyy normaalissa paineessa, kun lämpötila laskee alle 0 °C:en. (Veden ominaisuudet 2013)

#### 2.1.2 Nestemäinen vesi

Vesi on nestemäisessä olomuodossa normaalipaineessa lämpötilan ollessa 0 - 100 °C. Suurin osa maapallon vedestä on nestemäisessä olomuodossa. Rakennusfysikaalisessa mielessä nestemäisen veden rooli on suuri, sillä rakenteiden kosteusrasitukset tulevat usein nestemäisestä vedestä. (Veden ominaisuudet 2013)

#### 2.1.3 Vesihöyry

Vesihöyry on veden kaasumainen olomuoto. Normaalipaineessa veden lämpötilan noustessa yli 100 °C:en vesi höyrystyy ja muuttuu vesihöyryksi. Vesihöyry on rakennusfysikaalisessa tarkastelussa merkittävä tekijä, sillä se kulkeutuu diffuusiolla rakenteiden läpi. Vesihöyry on kosteustekninen riskitekijä, sillä se voi kondensoitua kylmiin pintoihin ja muodostaa nestettä, joka aiheuttaa rakenteeseen kosteusvaurion. Vesihöyry voi siis muuttua nestemäiseksi rakenteen sisällä. (Veden ominaisuudet 2013)

### 2.2 Kosteuden kulkeutuminen rakenteissa

Kosteus kulkeutuu rakenteissa painovoimaisesti siirtymällä, kapilaarisesti siirtymällä, difuusion avulla tai konvektion avulla. Kaikki edellä mainitut ovat hyvin yleisiä kosteuden siirtymistapoja.

#### 2.2.1 Painovoimainen siirtyminen

Kosteuden painovoimaisessa siirtymisessä kosteus siirtyy maapallon painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Veden painovoimainen siirtyminen on rakennuksen kosteusteknisessä toiminnassa merkittävässä roolissa. Painovoimaista veden siirtymistä tapahtuu pystysuorilla pinnoilla, kuten seinien ulkopinnoilla ja syöksytörmäissä, sekä kaltevilla pinnoilla, kuten vesikatolla, räystäskouruissa, viemäri- ja

salaojaputkissa ja kylpyhuoneen lattioilla. Veden painovoimainen siirtyminen voi olla vähäistä kapilaarisesti vettä imevissä aineissa, koska kapilaarivoimat ovat usein painovoimaa suurempia, jolloin hallitsevana voimana on kapilaarinen voima. Kuitenkin hyvin karkearakeisissa kapilaarisesti vettä imevissä aineissa painovoimainen veden siirtyminen on mahdollista. (Sisäilmayhdistys.fi)

### 2.2.2 Kapilaarinen siirtyminen

Vesi voi siirtyä kapilaarisesti kaikkiin suuntiin. Kapilaari-ilmiö johtuu veden pintajännitysvoimien aiheuttaman huokosalipaineen vaikutuksesta materiaalin ollessa kosketuksessa vapaaseen veteen tai toiseen kapilaariseen kosteusalueella olevaan materiaaliin. Vesi nousee kapilaarisesti siihen korkeuteen, jossa kapilaarinen tasapaino on saavutettu. Tämä tarkoittaa sitä, että huokosalipaineesta johdettu voima ja maan vetovoima ovat tasapainossa. Kapilaarinen tasapainotilanne muodostuu esimerkiksi maanvaraisen lattian alapuolella olevaan salaojasorakerrokseen.

Kapilaarinen kosteustasapaino saattaa muodostua myös rakenteesta kapilaarisesti siirtyvän ja haihtumalla poistuvan kosteuden välille. Tällöin rakenteen paksuudella on suurempi rooli, sillä paksumpi rakenne voi siirtää ohutta rakennetta enemmän kosteutta. Rakenteen ympärillä olevan ilman kosteus on myös merkittävä tekijä, sillä jos ympäröivän ilman kosteus on 100 %, ei ilma voi ottaa vastaan haihtuvaa kosteutta ja kapilaarinen siirtyminen rakenteessa jatkuu.

Kaikilla materiaaleilla on oman lainen kykynsä siirtää kosteutta kapilaarisesti. Tämä on otettava eri rakennusvaiheissa huomioon. Esimerkiksi rakennusten perustusten täytöissä käytetään nykyään kapilaarikatkoepeliä, jotta maaperästä kapilaarisesti nouseva kosteus ei nousisi perustuksiin saakka. (Sisäilmayhdistys.fi)

### 2.2.3 Diffuusio

Vesihöyryn diffusiolla tarkoitetaan kosteuden siirtymistä suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempään vesihöyrypitoisuuteen. Diffuusio on sitä voimakkaampi, mitä suurempi rakenteiden välinen vesihöyrypitoisuusero on. Rakennuksissa yleensä vesihöyryn diffuusion suunta on rakennuksen sisältä ulospäin, koska yleensä ulkoilman vesihöyrypitoisuus on sisäilman vesihöyrypitoisuutta pienempi.

Diffuusion voimakkuuteen vaikuttaa myös materiaalin vesihöyrynläpäisevyys. Eri materiaalit läpäisevät vesihöyryä eri tavalla. Esimerkiksi seinärakenteissa käytettävillä höyrynsulkumuoveilla on erittäin pieni vesihöyrynläpäisevyys. Toisin sanoen niiden diffuusiovastuskerroin on suuri. Siksi niitä käytetään seinärakenteessa estämään vesihöyryn kulkeutuminen seinärakenteen läpi. (Sisäilmayhdistys.fi)

### 2.2.4 Konvektio

Vesihöyry on yksi ilman kaasuista, joten vesihöyry kulkeutuu konvektiolla ilmavirtausten mukana. Rakenteet saavat kosteusrasitusta konvektiolla kulkeutuvasta ilmavirrassa olevasta vesihöyrystä, kun



kylmänä ajanjaksona kosteaa ilmaa virtaa rakenteisiin ja vesi alkaa kondensoitua rakenteiden sisään. (Sisäilmäyhdistys.fi)

## 2.3 Kosteuslähteet rakenteissa

Kosteusteknisestä näkökulmasta kosteuslähteet voidaan jakaa sisäisiin ja ulkopuolisiin kosteuslähteisiin. Sisäisiin kosteuslähteisiin kuuluvat sisäilmaan kosteutta tuovat kosteuslähteet, kuten siivoaminen, peseytyminen, ruuan laitto ja muut normaalit arkiaskareet, jotka tuottavat kosteutta. Ulkoiisiin kosteuslähteisiin kuuluvat kosteuslähteet, jotka tuovat kosteutta rakenteiden ulkopinnoille ja sitä kautta mahdollisesti syvälle rakenteisiin.

### 2.3.1 Ulkoiset kosteuslähteet

#### 2.3.1.1 Sade

Sade on ulkopuolisista kosteuslähteistä voimakkain. Suomessa vuosittainen sademäärä on noin 600 mm ja tästä määrästä suurikin osa voi tulla syksyllä hyvin lyhyessä ajassa. Suomessa suurimmat päivittäiset sademäärät ovat olleet noin 80 mm luokkaa.

Sade on painovoiman vaikutuksen ansiosta pystysuuntainen ilmiö, mutta lähes aina tuuli vaikuttaa sateeseen niin, että vesi kulkeutuu myös sivusuunnassa. Tätä kutsutaan viistosateeksi. Viistosade rasittaa vaakapintojen lisäksi myös pystypintoja ja tuulenpaineen vaikutuksesta vesi voi siirtyä jossain määrin myös ylöspäin. Talvella tuuli vaikuttaa lumisateeseen samalla tavalla ja tuuli voi puhalttaa lunta myös ylöspäin rakenteita pitkin. Tämä on huomioitava muun muassa vesikatoilla olevien seinällenostojen suunnittelussa. (Sisäilmäyhdistys.fi)

#### 2.3.1.2 Maaperän kosteus

Maaperästä kapilaarisesti nouseva kosteus rasittaa perustusrakenteita, jos rakennuksen pohjatöitä ei olla tehty tarpeeksi hyvin. Rakennuksen pohjatöissä tehdään yleensä massanvaihtoa niin, että perustusrakenteiden ympärillä oleva materiaali ei pääse johtamaan maaperästä kapilaarisesti nousevaa vettä perustusrakenteille asti. Perustusrakenteiden ympärillä käytetään yleensä karkearakeista kapilaarikatkosepeliä, jossa kapilaari-ilmiö ei toimi. Lisäksi perustusten alla tulisi olla salaojat, jotka johtavat maaperässä olevan veden pois rakennuksen luota. (Sisäilmäyhdistys.fi)

#### 2.3.1.3 Pintavedet

Tontin maanpinta tulisi muotoilla niin, että pintavedet eivät pääse valumaan rakennuksen seinustalle. Maanpinnan tulisi kaataa rakennuksesta pois päin 1:20 kaltevuudella vähintään 3 metrin matkalla. Lisäksi maanpinnan tulisi pystyä ohjaamaan lumien sulamisvedet pois rakennuksen seinän vierustalta. Pintavedet aiheuttavat ongelmia usein rakennuksissa, joissa lattiapinta on maanpintaa alempana. Esimerkiksi rinnetaloissa ja valesokkelirakenteissa pintavedet voivat aiheuttaa ongelmia. (Sisäilmäyhdistys.fi)

## 2.3.2 Sisäiset kosteuslähteet

### 2.3.2.1 Rakennekosteus

Rakennekosteudella tarkoitetaan vesimäärää, joka on poistuttava rakenteista rakennuksen valmistuttua, jotta rakenteet ovat kosteustasapainossa ympäristönsä kanssa. Rakennekosteuden määrä riippuu käytetyistä materiaaleista ja niiden laadusta, valmistuksesta ja varastoinnista. Osa materiaaleista jää valmistusprosessin myötä paljon kosteutta. Esimerkiksi betonirakenteisiin jää rakentaessa paljon kosteutta ja sen on päästävä poistumaan rakenteen valmistumisen jälkeen. Rakentaessa on erittäin tärkeää huomioida, että esimerkiksi betonirakenteita ei pinnoiteta liian nopeasti rakenteen valmistuttua, vaan rakenteelle annetaan tarpeeksi pitkä kuivumisaika ennen pinnoitusta. (Sisäilmayhdistys.fi)

### 2.3.2.2 Sisäilman kosteus

Rakennuksen sisäpuoliset kosteuslähteet nostavat sisäilman kosteutta. Siivoaminen on yksi rakennuksen sisäpuolisista kosteuslähteistä. Siivoaminen aiheuttaa rakenteille ylimääräistä kosteuskuormaa ja kosteuden pitäisi siivoamisen jälkeen päästä poistumaan ennen kuin rakenteet vaurioituvat. Esimerkiksi lattiapesuvedet tuottavat lattiarakenteille ylimääräistä kosteuskuormaa. Lisäksi siivoaminen tuottaa vesihöyryä sisäilmaan.

Peseytymisen tuo myös paljon kosteutta sisäilmaan. Ihmiset käyttävät päivittäin satoja litroja vettä peseytymiseen, joten kosteusmäärä on merkittävä. Suurin osa peseytymisvesistä valuu viemäriin, jotka johtavat vedet pois. Pieni osa peseytymisvesistä höyrystyy sisäilmaan, joka nostaa sisäilman kosteutta. Merkittävä peseytymisvesien riskitekijänä voidaan pitää vedeneristyksen puutteita. Jos märkätilojen vedeneristeet ovat puutteelliset, pääsee vesi tunkeutumaan rakenteisiin ja aiheuttaa kosteuvaurion lähes varmasti. (Sisäilmayhdistys.fi)

### 3 KUIVUMINEN

Lähes kaikki sisätiloissa olevat betonirakenteet pinnoitetaan tai päällystetään jollakin toisella materiaalilla, kuten maalilla, keraamisilla laatoilla, laminaatilla, parketilla tai muovimatolla. Ennen betonirakenteen pinnoitustyötä on erittäin tärkeää varmistua siitä, että pinnoitettava betonirakenne on kuivunut päällystemateriaalikohtaisen kosteusraja-arvon alapuolelle. Jos betonirakenteen ei anneta kuivua tarpeeksi paljon, vaan se pinnoitetaan liian kosteana, voi seurauksena olla päällystemateriaalissa, tasoitteessa tai liimassa havaittava kosteusvaurio. Kosteusvaurio voi ilmentyä pinnoitteen irtoamisena, värjäytymisenä, hajuhaittana tai terveydelle haitallisten mikrobin määrän kasvamisena.

Betonirakenteet ovat suhteellisen hitaita kuivumaan muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna. Kuivumisnopeuteen vaikuttaa merkittävästi muun muassa betonin ominaisuudet, kuivumisolosuhteet ja rakenneratkaisut. Kuivumisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä on tarkasteltu tarkemmin luvussa 3.3. Betonirakenteiden kuivumisajat on otettava huomioon suunniteltaessa rakennustyömaan aikatauluja. Jos betonirakenteiden kuivumisaikoja ei ole huomioitu, voi seurauksena olla aikataulukien viivästyminen tai pahimmillaan märän betonirakenteen pinnoittamisesta aiheutuva kosteusvaurio. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 432)

#### 3.1 Betonin kosteus

##### 3.1.1 Valmistuksen mukana tuleva kosteus

Tuoreesta betonimassasta noin 120 - 240 litraa/m<sup>3</sup> on vettä riippuen mitä reseptiä betonimassan valmistuksessa käytetään. Tästä vesimäärästä noin 100 - 140 litraa/m<sup>3</sup> sitoutuu betonin kovettuessa eli kuivuu kemiallisesti. Loppu vesimäärä jää betoniin muodostaen samalla kapilaarihuokoisuutta. Betonin kapilaarisuuden vähentämiseksi on suositeltavaa käyttää alhaisen vesi/sementtisuhteen betonireseptejä, mutta alhainen vesi/sementtisuhte hankaloittaa betonimassan työstettävyyttä. Jos vesi/sementtisuhte on yli 0,6, muodostuu betoniin yhtenäinen kapilaarihuokosverkosto. (Betonirakenteiden korjaaminen 2019)

##### 3.1.2 Käytön aikainen kosteus

Betonin käytön aikainen kosteus tulee luvussa 2.3 mainituista kosteuslähteistä rakennekosteutta lukuun ottamatta. Näitä ovat sääolosuhteiden aiheuttama kosteus, maaperän kosteus ja rakennuksen käytöstä tuleva kosteus.

#### 3.2 Betonin kuivuminen

Betoni on hygroskooppinen aine eli se pyrkii pääsemään kosteustasapainon ympäristönsä kanssa. Betonin hydrataatioon kuluu vain osa betoniseokseen sekoitetusta vedestä, joten betoniin jää paljon vapaata vettä, joka voi vielä haihtua. Tämä vesi on sitoutunut betonin huokosrakenteeseen niin, että kun betoni pyrkii saavuttamaan ympäristön kanssa kosteustasapainon, vettä poistuu huokosista ympäristöön, eli betoni kuivuu. Vettä poistuu ympäristöön niin kauan, että betonin huokosissa olevan

ilman suhteellinen kosteus on sama kuin betonirakennetta ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Saavutettua tilaa kutsutaan hygroskooppiseksi tasapainoksi.

Betonin kuivuminen eli kosteuden poistuminen betonista on riippuvainen haihtumisesta, kapilaarijoh- tumisesta ja diffuusiosta. Betonin kuivuessa sen pintakerroksen kosteus poistuu haihtumalla. Tällöin pintakerroksen kosteuspitoisuus laskee ja betonirakenteen sisästä alkaa siirtyä kosteutta pintaa koh- den niin kauan, että rakenteen sisästä pintaan siirtyy vähemmän kosteutta kuin siitä haihtuu. Tällöin betonirakenne kuivuu.

Kuivamisprosessin alussa kosteutta betonirakenteen sisästä pintaa kohti siirtävä voima on kapilaari- voima. Jotta kapilaari-ilmä on mahdollinen, täytyy betonissa yhtenäinen vedellä täyttynyt huokos- verkosto. Kun hydrataatio etenee, alkavat kapilaarihuokokset vähitellen täyttyä ilmalla, jolloin yhte- näinen huokosverkosto katkeaa. Tässä vaiheessa kosteus alkaa siirtyä rakenteen sisästä pintaa kohti lähinnä diffuusiovoiman avulla. Kosteuden siirtyminen diffuusiolla perustuu siihen, että huokoisen rakenteen eri osissa on erisuuret vesihöyryn osapaineet, jolloin kosteus siirtyy suuremmasta osa- paineesta pienempää vesihöyryn osapainetta kohti. Koska betonirakenteen pinnassa on kosteuden haihtumisen myötä pienempi vesihöyryn osapaine kuin rakenteen keskiosassa, siirtyy kosteus edel- leen rakenteen keskeltä pintaa kohti. Pintaan tullessaan kosteus haihtuu ilmaan, jolloin pinnan vesi- höyryn osapaine taas laskee ja diffuusioreaktio jatkuu. Diffuusiolla kosteutta siirtyy huomattavasti kapilaarista siirtymistä vähemmän, joten betonirakenteen kuivuminen hidastuu huomattavasti kapi- laarisen kuivamisen päätyttyä. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 432 - 433)

### 3.3 Betonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Betonin ominaisuuksilla, rakenneratkaisulla ja ympäröivillä olosuhteilla on merkittävä vaikutus siihen, miten nopeasti betoni saavuttaa tavoitetason eli miten nopeasti betoni kuivuu. Hyvissä olosuhteissa nopeimmat betonit kuivuvat tavoitekosteuteen jopa viikossa, kun taas epäedullisissa tapauksissa kuivuminen saattaa kestää jopa vuosia. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 433)

#### 3.3.1 Ympäröivät olosuhteet

Betonirakennetta ympäröivät olosuhteet vaikuttavat rakenteen kuivumisnopeuteen merkittävästi. Ne vaikuttavat betonin pinnasta haihtuvan kosteuden nopeuteen ja määrään, joka taas vaikuttaa raken- teen sisästä pintaa kohti siirtyvän kosteuden siirtymisnopeuteen. Lisäksi olosuhteet vaikuttavat beto- nin hydrataatioon eli sitoutumiskuivumiseen. Mitä lämpimämpi ja kosteampi betoni on, sitä nopeam- min ja täydellisemmin sementti hydratoituu. Tällöin veden kemialliseen reaktioon perustuva kuivumi- nen nopeutuu.

Normaaleilla betoneilla pinnasta haihtuvan kosteuden merkitys on suurempi kuin sitoutumiskuivumi- sella. Rakennetta ympäröivän ilman kosteus vaikuttaa pinnasta haihtuvaan kosteuteen eri tavalla kuin sitoutumiskuivumisessa. Mitä matalampi on ilman suhteellinen kosteus, sitä suurempi on beto- nirakenteen sisäosan ja pintaosan välinen suhteellisen kosteuden ero. Tällöin sekä haihtuminen, että

kosteutta betonin sisältä pintaan tuova voima ovat voimakkaampia ja haihtumisprosessi on tehokkaampi kuin korkeassa ilmakosteudessa. Suhteellisen kosteuden laskiessa kuitenkin betonin vesihöyrynläpäisevyys kuitenkin laskee jyrkästi, jolloin betonin kuivumisprosessi hidastuu. Betonirakenteen kuivumisen kannalta optimaalisena ilman suhteellisenä kosteutena pidetään noin 50 %.

Lämpötilalla on myös merkittävä vaikutus betonin kuivumisnopeuteen. Kun betonin lämpötilaa nostetaan, sen huokosissa olevan vesihöyryn osapaineet kasvavat. Tällöin kosteutta siirtävät voimat kasvavat. Mitä korkeampi betonin lämpötila on, sitä nopeammin kosteus siitä poistuu. Betonirakenteen riittävän kuivumisnopeus edellyttää yleensä vähintään +20 °C:en lämpötilaa, mutta jos lämpötila nostetaan 25 - 30 °C:seen nopeutuu kuivuminen huomattavasti. Betonirakennetta ympäröivän ilman lämpötilan noustessa sen suhteellinen kosteus laskee. Samalla myös ilman kyky vastaanottaa betonista haihtuvaa kosteutta kasvaa. Ilman ja betonin lämpötilan nostaminen siis nopeuttaa kuivumisprosessia. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 434)

### 3.3.2 Rakennerratkaisut

Betonin kuivamisessa kuivumisnopeuteen vaikuttaa betonirakenteen koko ja paksuus eli rakennerratkaisut. Paksu betonirakenne kuivuu hitaammin kuin ohut betonirakenne, sillä paksussa betonirakenteessa kosteudella on pitempi matka haihtumiskykyiseen pintaan kuin ohuessa betonirakenteessa. Kuivumisnopeuteen vaikuttaa merkittävästi myös haihduttavien pintojen määrä. Jos haihtuminen on mahdollista vain yhteen suuntaan, kuten esimerkiksi tiiviin eristeen päälle valetussa betonirakenteessa, on haihtuminen hitaampaa. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 433 - 434)

### 3.3.3 Käytettävän betonin ominaisuudet

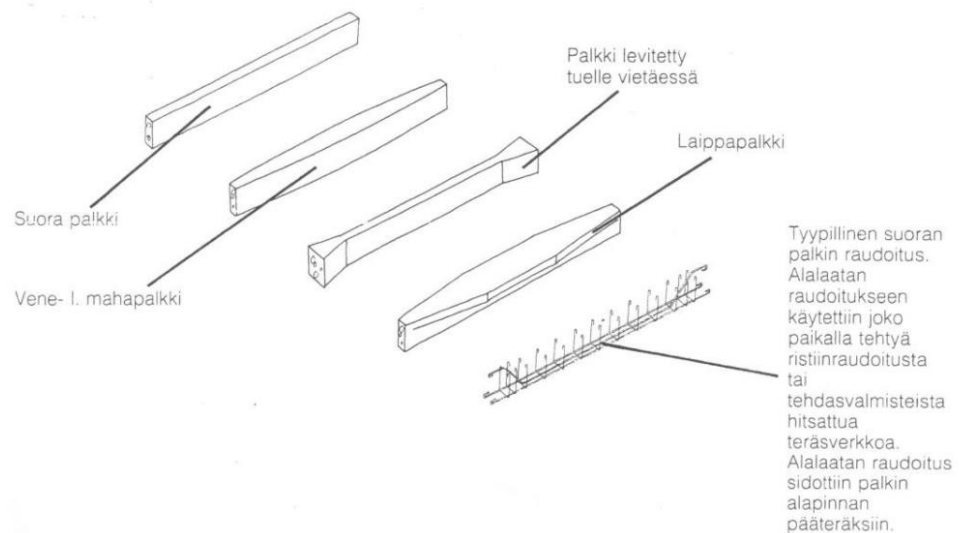
Betonin kuivumisnopeuteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat muun muassa betonin vesi/sementtisuhte ja käytettävät lisäaineet. Mitä pienempi betonin vesi/sementtisuhte on, sitä hitaampaa kuivuminen on. Vesi/sementtisuhteen ollessa alhainen betoni on tiiviimpää ja huokostilavuus on pienempi. Hydrataation edetessä betonin yhtenäinen huokosverkko myös katkeaa nopeammin ja betonin kuivuminen hidastuu, kun kosteus alkaa siirtyä kapilaari-ilmion sijaan diffuusiolla. Tällöin kosteuden siirtyminen betonirakenteen pintaan hidastuu, minkä ansiosta myös pinnasta haihtuvan kosteuden haihtuminen hidastuu. Alhaisen vesi/sementtisuhteen betonissa kuitenkin haihdutettavan veden määrä jää suhteellisen pieneksi. Tarpeeksi alhaisen vesi/sementtisuhteen betonissa sitoutumiskuivumisen rooli on niin suuri, että betonin suhteellinen kosteus voi laskea jopa 90 %:iin ennen kuin vettä alkaa haihtua betonista. Jos halutaan päästä tätä alemmille kosteuspitoisuuksille nopeasti, joudutaan käyttämään erilaisia lisäaineita. Betonin kuivumista nopeuttavia lisäaineita ovat muun muassa erilaiset huokostimet ja notkistimet. Alhaisen vesi/sementtisuhteen betonissa ympäröivillä olosuhteilla ja rakennerratkaisuilla ei ole niin merkittävä rooli kuivumisnopeudessa kuin tavallisissa betoneissa. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 434 - 435)

## 4 TUTKITTAVA RAKENNE

### 4.1 Alalaattapalkisto

Alalaattapalkisto oli yleisin asuinkerrostalojen välipohjarakenne sota-aikoina rakennetuissa taloissa. Sitä esiintyy vuosien 1910 - 1950 välillä rakennetuissa rakennuksissa yläpohjarakenteina, mutta yleisemmin se esiintyy välipohjarakenteena. Suunnilleen 1950-luvun puolivälissä alalaattapalkisto korvattiin massiivisella betonilaatalla eli massiivilaatalla. Alalaattapalkistoa käytettiin jonkin verran vielä massiivilaatan rinnalla lähinnä ensimmäisen kerroksen ja kellarin välisenä välipohjarakenteena, mutta vähitellen se jätettiin kokonaan pois. (Mäkiö 1990, 123)

Alalaattapalkiston kantavana rakenteena toimivat teräsbetonipalkit, joiden jänneväli oli 5 - 6 metriä ja k-jako 1 - 1,3 metriä. Palkkityyppejä on useita erilaisia (KUVA 1), joista yksinkertaisin on suorakaiteen muotoinen tasapaksu palkki. Tasapaksun suorakaiteen muotoisen palkin korkeus on useinmiten 300 - 400 mm ja leveys 100 - 150 mm. Muita palkkimuotoja ovat muun muassa vene- eli mahapalkki, laippapalkki ja palkki, joka on levitetty tuelle vietäessä. Vene- eli mahapalkki on jännevälin keskeltä leveämpi koko paksuudeltaan ja laippapalkki on leveämpi ylälaidastaan. Palkkia leventämällä jännevälin keskikohtaan päin mentäessä pyrittiin saamaan palkille suurempi puristuslujuuden kestävyys. (Neuvonen 2002, 100). Kuvassa 1 on muutamia alalaattapalkiston palkkimalleja.



KUVA 1. Alalaattapalkiston palkkimalleja (Mäkiö 1990, 123)

Alalaattapalkiston teräsbetonipalkkien toinen pää liittyy ulkoseinään, joka on hyvin usein massiivitiili-seinä. Liitoksissa ei tarvittu erillisiä ankkuriinnikkeitä, mutta vielä 1920-luvun puolella palkkien päät saatettiin valaa lohenpyrstön muotoon. Ikkunan kohdalla ulkoseinässä palkit liittyivät usein ikkunaukkojen päälle valettuihin aukkopalkkeihin. Joissakin tapauksissa välipohjapalkkeihin liittyi yhtenäisen, rakennuksen pitkän sivun mittainen kuormantasauspalkki. (Neuvonen 2002, 101)

Kantavien teräsbetonipalkkien alapintaan valettiin alalaatta, jonka alapinta yleensä rapattiin. Alalaattalla ei ollut muuta kuormaa, kuin välipohjarakenteen täyttömateriaali, joten sen paksuus oli usein vain noin 40 mm ja se raudoitettiin melko kevyesti. Ainoastaan jatkuvien palkkien tukien läheisyydessä ja kylpyhuoneissa, joissa välipohjan täyttöjen päälle valettiin teräsbetonilaatta, käytettiin noin 60 mm paksua alalaattaa. (Neuvonen 2002, 101)

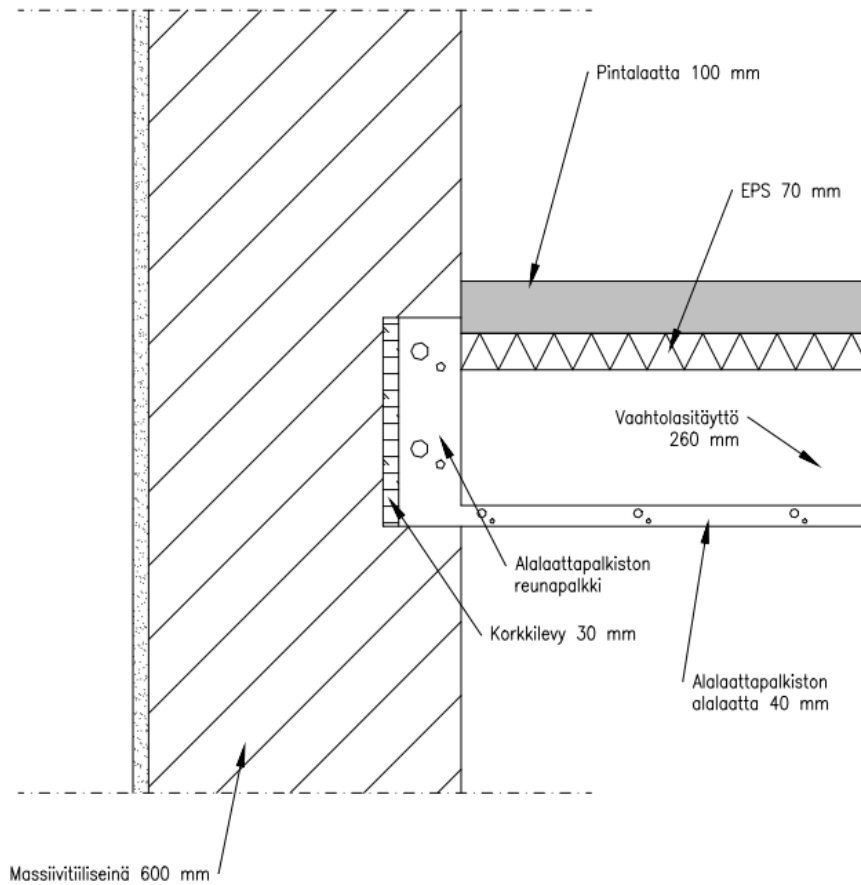
Välipohjarakenne täytettiin ääneneristyksen parantamiseksi. Täytteinä käytettiin tuolle aikakaudelle tyypillisesti joko kutterinlastua, jonka seassa oli joskus sahanpurua, tai turvepehkoa, jonka päälle oli laitettu painotäytteeksi yli 30 mm kerros koksikuonaa, masuunikuonaa, hiekkaa tai ruukinporoa. Painotäytteen tehtävänä oli pitää kevyt täyte paikallaan ja suojata palavaa täytemateriaalia. (Neuvonen 2002, 101)

#### 4.1.1 Vaahtolasimursketäyttöisen alalaattapalkiston liittyminen tiiliseinään

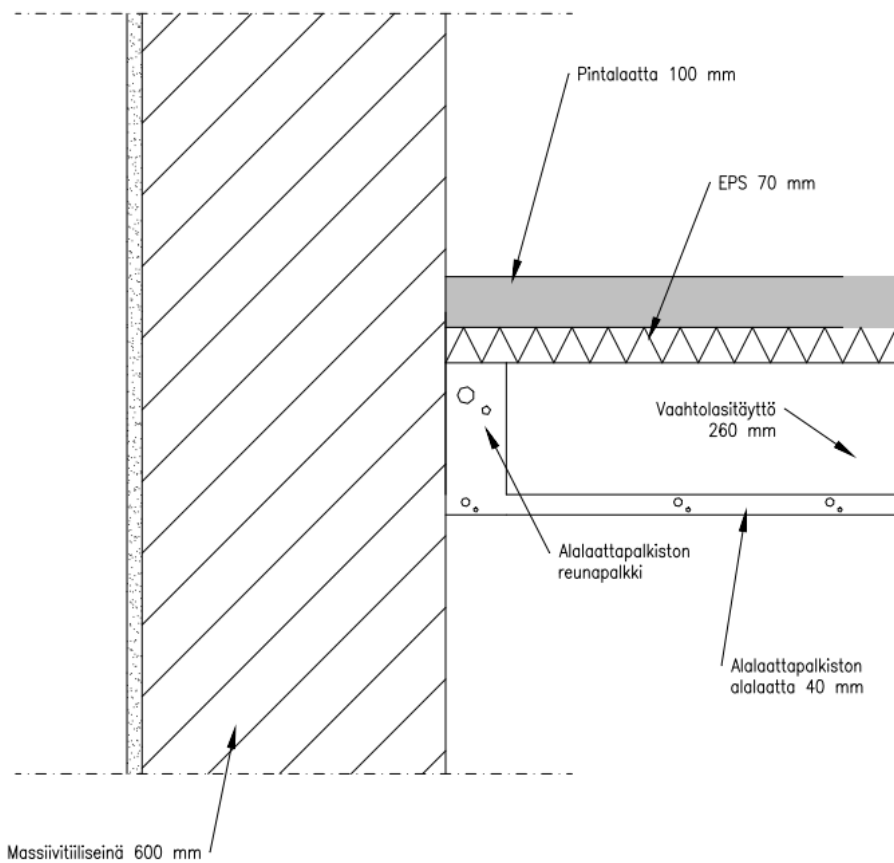
Tutkittava rakenne on vaahtolasimursketäyttöinen alalaattapalkisto, joka liittyy massiivitiiliseinään. Korjausrakennesuunnittelussa törmätään usein alalaattapalkistoon, sillä se on hyvin yleinen välipohjarakenne 1910 - 1950 -luvulla rakennetuissa kerrostaloissa. Alalaattapalkistoja on korjattu poistamalla vanhat täyttömateriaalit ja asentamalla tilalle vaahtolasimursketta. Vaahtolasimurkseen päälle on asennettu EPS-eriste ja sen päälle valettu betonilaatta.

Tutkittavat rakenneliitokset ovat vanhassa 1920-luvulla rakennetussa kerrostalossa. Seinän korkeus on noin 15 metriä ja rakennuksen kattona on loiva harjakatto. Massiivitiiliseinä on rapattu sementtipohjaisella rappauksella.

Rakennetta tutkitaan niin, että alalaattapalkiston reunapalkki on tiiliseinän sisässä (KUVA 2) ja niin, että reunapalkki on tiiliseinän pinnassa (KUVA 3). Lisäksi seinän sisässä olevan reunapalkin ja tiiliseinän välissä on korkkilevy.



KUVA 2. Rakenne 1. Alaattapalkiston reunapalkki on seinän sisässä ja välissä on korkkilevy.



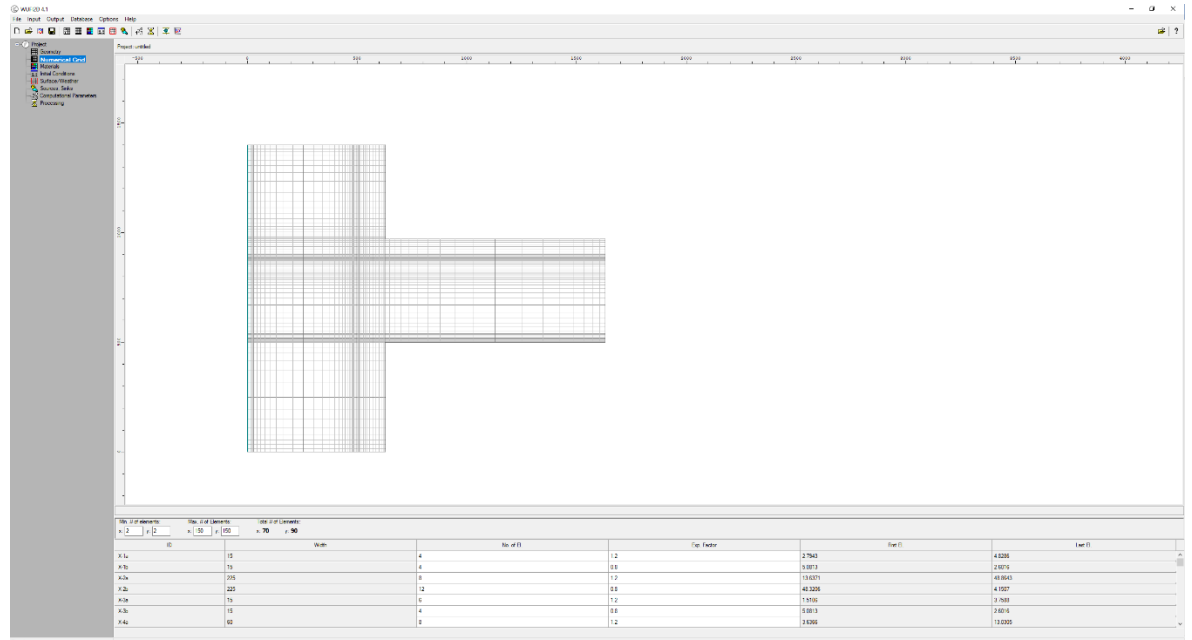
KUVA 3. Rakenne 2. Alaattapalkiston reunapalkki on kiinni tiiliseinässä.





## 5.1.2 Laskentaverkko

Laskentaverkkoa muokataan välilehdellä "numerical grid" (KUVA 5). Laskentaverkon tiheys vaikuttaa laskennan lopputuloksen tarkkuuteen. Ohjelma luo automaattisesti kohtalaisen hyvän laskentaverkon, mutta sitä kannattaa kuitenkin muokata, jotta voidaan varmistua siitä, että haluttujen tarkastelupisteiden alueella on tarpeeksi tiheä laskentaverkko.



KUVA 5. Laskentaverkko muokataan rakennemallille sopivaksi "numerical grid" -välilehdellä

Laskentaverkkoa muokataan painamalla alapaneelissa olevia lukuja hiiren oikealla näppäimellä ja valitsemalla "manual". Sen jälkeen verkkojen tiheyksiä voi vapaasti muokata. Kun hiirtä liikutetaan riviltä toiselle, muuttuu mallissa sen kohdan laskentaviivat vihreiksi, joihin kyseinen rivi vaikuttaa. Niissä kohdissa, joihin laskenta halutaan keskittää, kannattaa lisätä laskentaelementtejä kohdasta "no. of el.". Vastaavasti kohdissa, joissa laskennan tarkkuus ei ole niin merkittävä, kannattaa elementtejä vähentää laskenta-ajan hillitsemiseksi.

Kohdasta "exp. factor" voidaan muokata laskentaverkon tihentymistä reunoja kohti. Siinä voidaan periaatteessa käyttää mitä lukuja tahansa, mutta itse olen havainnut 0,8 ja 1,2 välillä olevat luvut hyviksi, sillä niitä käyttäessä laskentaverkosta saadaan tarpeeksi tarkka, eikä mallista kuitenkaan tule liian raskas, joten laskenta-aikakin pysyy järkevän mittaisena.

## 5.1.3 Materiaalit

Rakenteen materiaalit määritellään välilehdellä "materials". Ohjelmassa on jonkun verran erilaisia rakennusmateriaaleja WUFI:n omassa kirjastossa, mutta ne ovat ulkomaalaisia ja vastaavat vain joiltakin osin Suomessa käytettäviä rakennusmateriaaleja. Materiaaleja lisättäessä on hyvä käydä huolellisesti läpi materiaalin ominaisuudet. Tässä opinnäytetyössä olen muokannut jokaisen materiaalin ominaisuudet vastaamaan suomalaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia. Materiaalien ominaisuuksien lähteenä minulla oli Tampereen teknillisessä yliopistossa, Rakennetekniikan laitoksella tehty

Frame loppuraportti, jossa tutkittiin ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennuksen energiankulutuksessa. Lisäksi osa materiaaliarvoista on otettu RIL-255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 – Rakennusfysiikallinen suunnittelu ja tutkimukset -kirjasta.

Rakennemallissa uutena betonina on käytetty FRAME -loppuraportista otettua korkealujuista betonina (C35/45). Vanhana betonina eli alalaattapalkiston betonina on käytetty heikkolujuista betonina (C12/15), joka on otettu suoraan WUFI:n omasta materiaalikirjastosta. Vaahtolasimurkse ja korkki-levy on myös otettu WUFI:n omasta kirjastosta. Loput materiaalit, eli sementtipohjainen rappaus, tiili ja EPS on otettu Frame -loppuraportista.

Layer/Material Name: \*Frame\_Betoni\_2

Bulk density [kg/m<sup>3</sup>]: 2220

Porosity [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]: 0.18

Spec. Heat Capacity [J/kgK]: 850

Thermal Conductivity [W/mK]: 1.6

Water Vapour Diffusion Resistance Factor [-]: 248

Typical Built-In Moisture [kg/m<sup>3</sup>]:

Thermal Conductivity, Design Value [W/mK]:

Color:

Hygrothermal Functions | Material Information

Moisture Storage Function

- Liquid Transport Coefficient, Suction
- Liquid Transport Coefficient, Redistribution
- Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-d
- Thermal Conductivity, moisture-dependent
- Thermal Conductivity, temperature-dependent
- Enthalpy, temperature-dependent

Approximate

No.	RH [-]	Water Cont... [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0	0
2	0.33	37
3	0.43	38
4	0.63	65
5	0.8	75
6	0.83	76
7	0.93	104
8	1	147

Water Content [kg/m<sup>3</sup>]

Relative Humidity [-]

Paste into Database Import Export OK Cancel Help

KUVA 6. Materiaalin tietoja muokataan "layer/material data" -ikkunassa

Materiaalia luodessa syötetään ensin materiaalin nimi ja sen jälkeen seuraavat perustiedot (KUVA 6):

Bulk density eli kuivatiheys [kg/m<sup>3</sup>]. Kuivatiheys vaikuttaa yhdessä ominaislämpökapasiteetin kanssa siihen, kuinka paljon lämpöä materiaali voi varastoida.

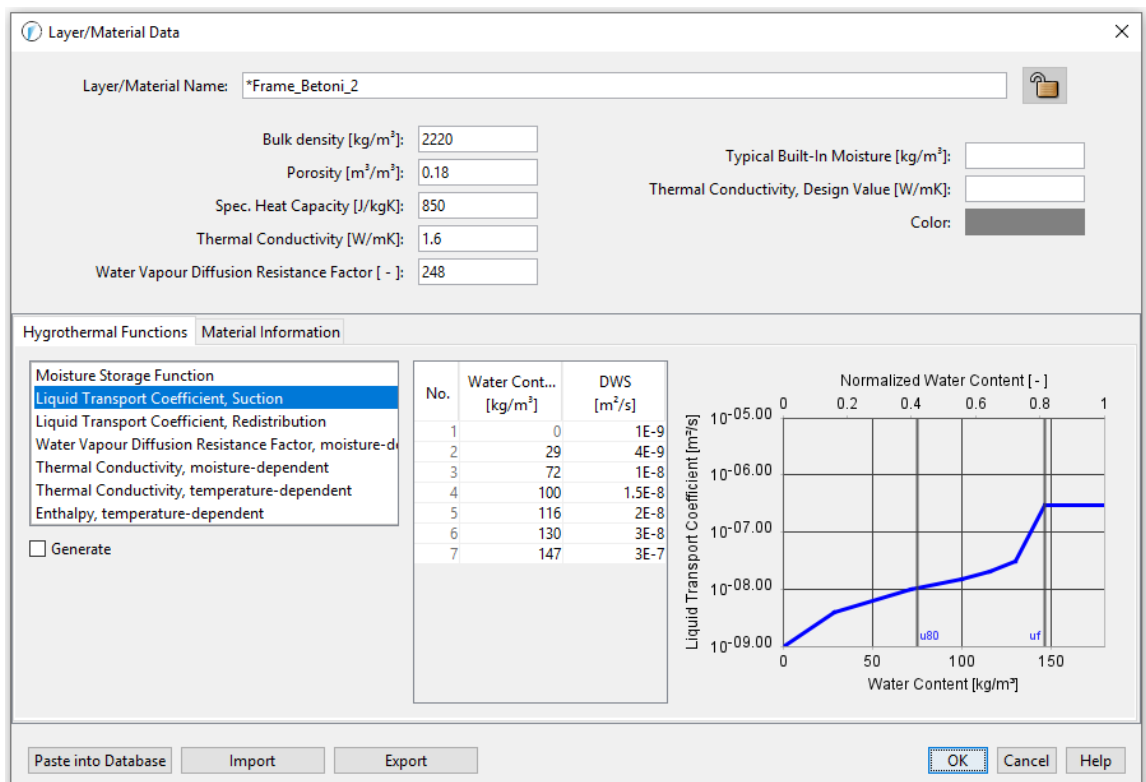
Porosity eli huokoisuus [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]. Huokoisuutta tarvitaan ylikyllästyneen tilan laskennassa. Materiaalin kosteuspitoisuus voi olla suurempi kuin tasapainokosteuskäyrän arvo  $w$  (RH 100 %). Maksimikosteuspitoisuus  $w_{\max}$  saavutetaan, kun huokokset ovat täynnä vettä, eli  $w_{\max} = \text{huokoisuus} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3$ .

Specific heat capacity eli ominaislämpökapasiteetti [ $J/(kg \cdot K)$ ]. Ominaislämpökapasiteetin arvo vaikuttaa yhdessä tiheyden kanssa siihen, kuinka paljon lämpöä materiaali voi varastoida.

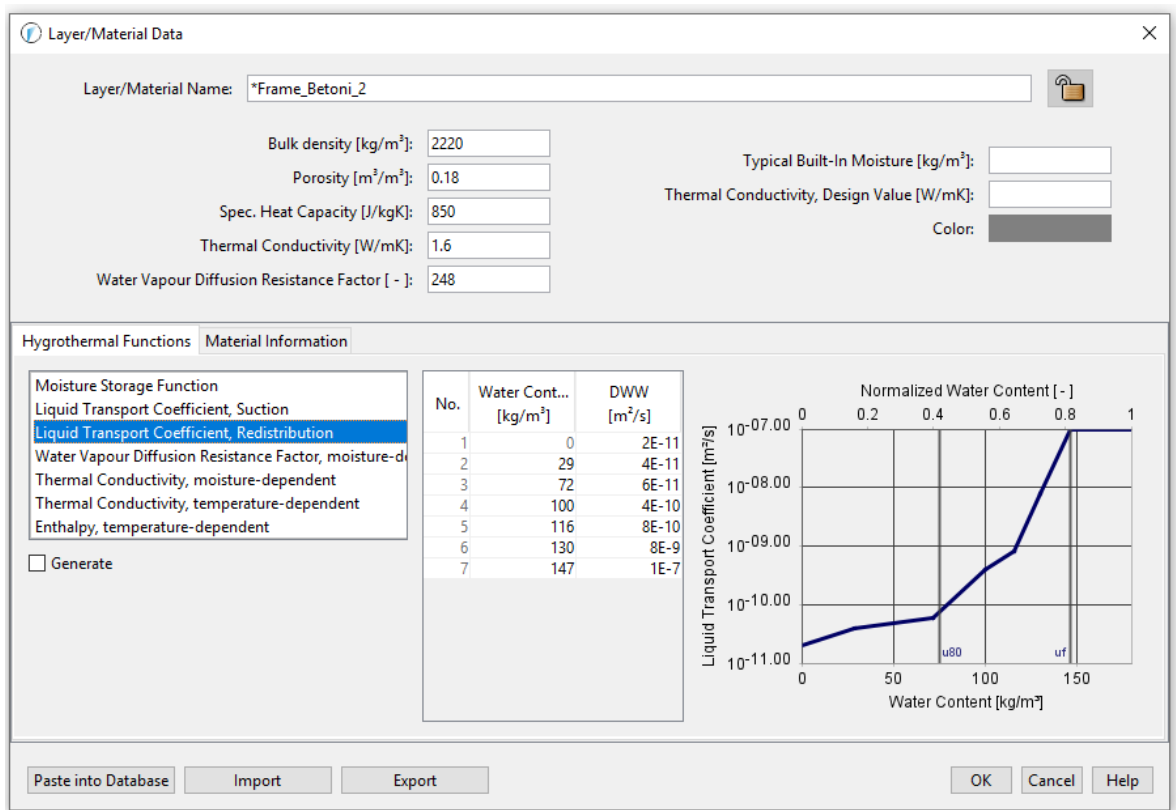
Thermal conductivity eli lämmönjohtavuus [ $W/(m \cdot K)$ ]. Vaikuttaa siihen, kuinka hyvin materiaali johdtaa lämpöä. Lämmönjohtavuuden arvo voidaan antaa materiaalille myös kosteuspitoisuuden funktiona.

Water vapour diffusion resistance factor eli vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-]. Vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen tunnuksena käytetään tunnusta  $\mu$ . Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-] kuvaa, kuinka moninkertaisen vesihöyryn diffuusiovastuksen materiaali antaa verrattuna yhtä paksuun kerrokseen seisovaa ilmaa. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin saadaan kaavasta  $\mu = d \cdot S_d$ , jossa  $d$  on ainekerroksen paksuus ja  $S_d$  vesihöyryn suhteellinen diffuusiovastuskerroin. (Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa 2013)

Perusominaisuuksien jälkeen siirrytään "hygrothermal functions" kohtaan ja muokataan kohtaa "moisture storage function" eli tasapainokosteuskäyrää. Tasapainokosteuskäyrä kuvaa sitä, kuinka monta kilogrammaa vettä on kuutiossa missäkin rakenteen suhteellisessa kosteudessa. Tasapainokosteuskäyrässä esitetään materiaalin vesipitoisuus suhteellisen kosteuden funktiona. RH eli suhteellinen kosteus syötetään niin, että esimerkiksi 25 % = 0,25 ja 80 % = 0,80. "Water content" eli materiaalin vesipitoisuus syötetään yksikössä [ $kg/m^3$ ].

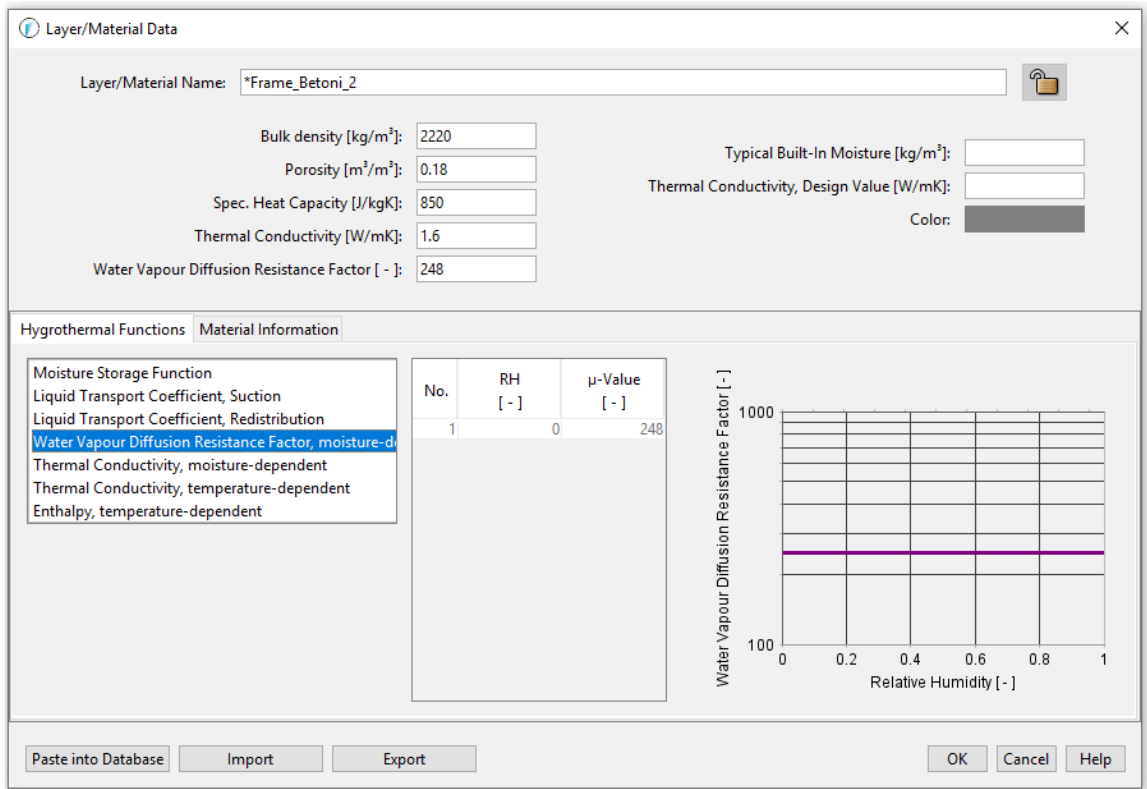


KUVA 7. Imeytymisen kosteusdiffusiviteettikäyrä



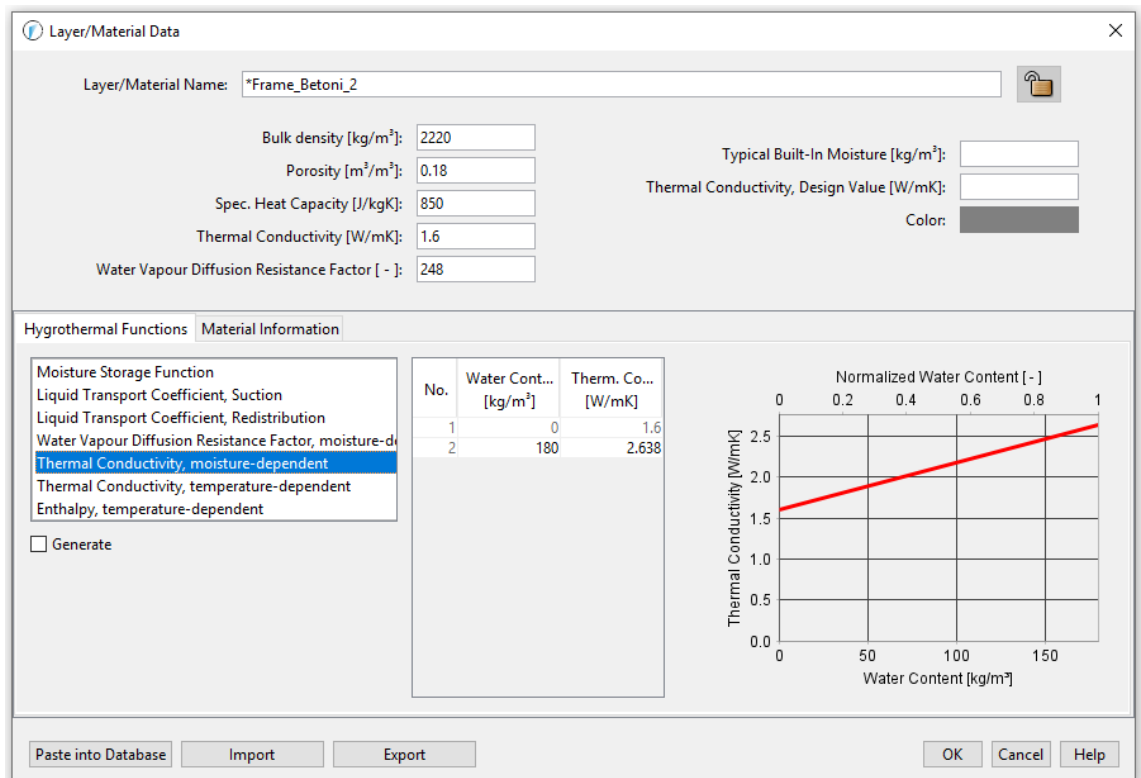
KUVA 8. Uudelleen jakautumisen kosteudiffusiviteetikäyrä

Seuraavaksi siirrytään kohtiin "liquid transport coefficient, suction" ja eli kosteudiffusiviteetit, imeytyminen (KUVA 7) ja "liquid transport coefficient, redistribution" eli kosteudiffusiviteetit, uudelleen jakautuminen (KUVA 8) [m²/s]. Näitä käytetään kapillaarisuudesta aiheutuvan kosteuvirran laskemiseen. Imeytyminen/uudelleenjakautuminen -erottelu on jossain määrin kritisoitu tapa ottaa huomioon kapillaari-ilmiön mallintamiseen liittyviä monimutkaisuksia. Ohjelma käyttää kaikille materiaalille asetettua imeytymisen (suction) kosteudiffusiviteettia, kun rakenteen jonkun pinnan saderasitus on yli 0,1 mm/h. Kun mikään pinta ei saa saderasitusta, ohjelma käyttää uudelleenjakautumisen (redistribution) kosteudiffusiviteetteja. WUFI:n ohjeistuksen mukaan uudelleenjakautumisen kosteudiffusiviteettien tulisi olla pienempiä kuin imeytymisen kosteudiffusiviteettien.



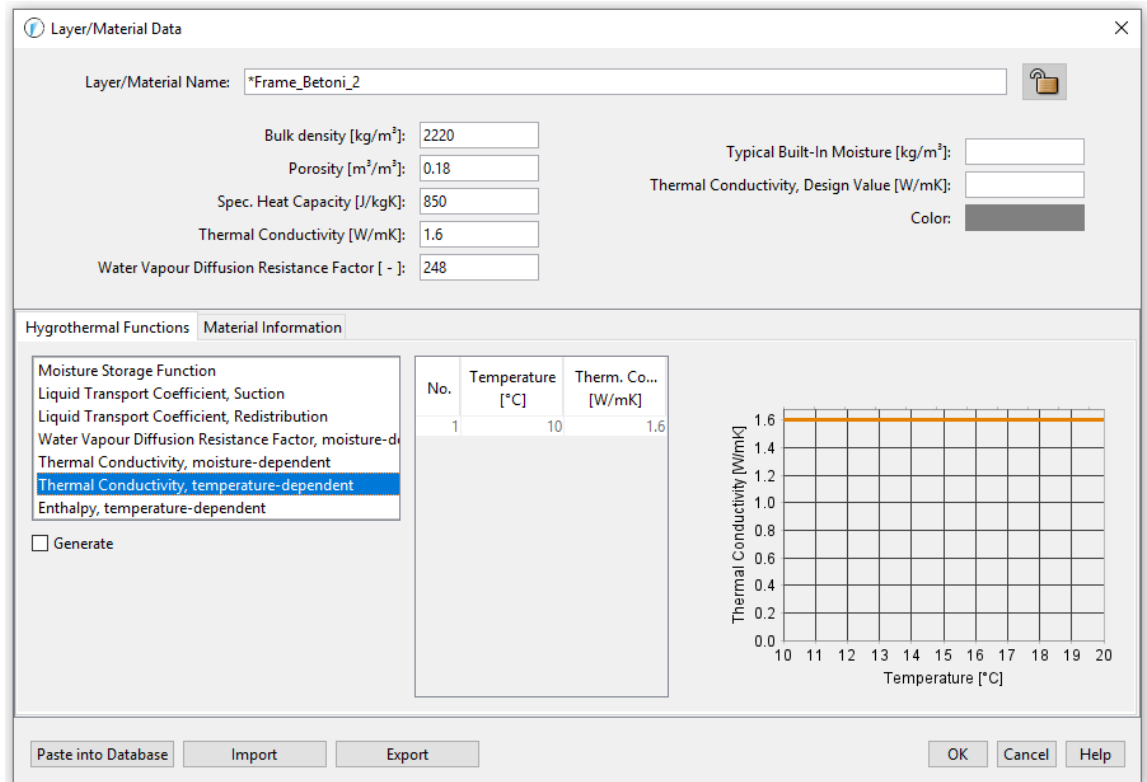
KUVA 9. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin kosteuspitoisuuden funktiona

Water vapour diffusion resistance, moisture dependent eli vesihöyryn diffuusiovastuskerroin kosteuspitoisuuden funktiona (KUVA 9). Kuvaajaa voidaan käyttää kapillaarisuudesta johtuvan kosteuden siirtymisen huomioon ottamisessa. Tätä ei kuitenkaan kuulu käyttää, jos materiaalille on jo asetettu kosteusdiffusiviteetit.

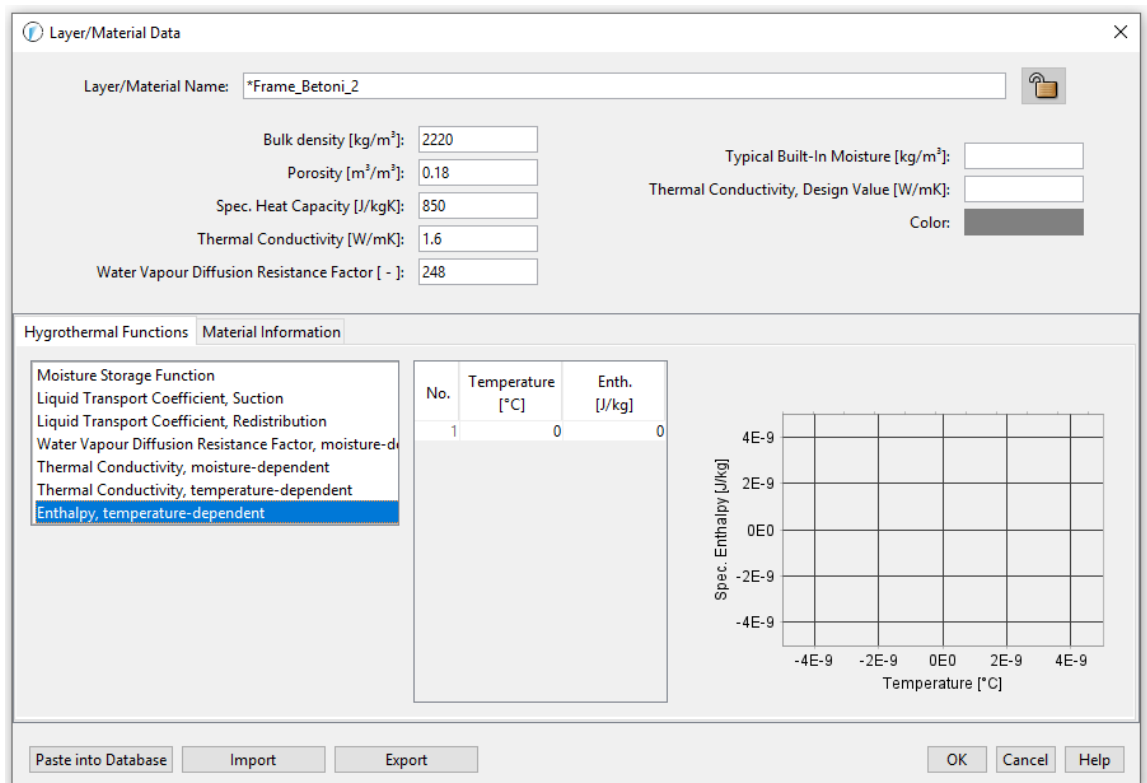


KUVA 10. Lämmönjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona

Thermal conductivity, moisture dependent eli lämmönjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona (KUVA 10) ja Thermal conductivity, temperature-dependet eli lämmönjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona (KUVA 11). Kuvaajaajia käytetään, jos on tiedossa materiaalin mahdolliset lämmönjohtavuuden muutokset materiaalin kosteuspitoisuuden tai lämpötilan muuttuessa.



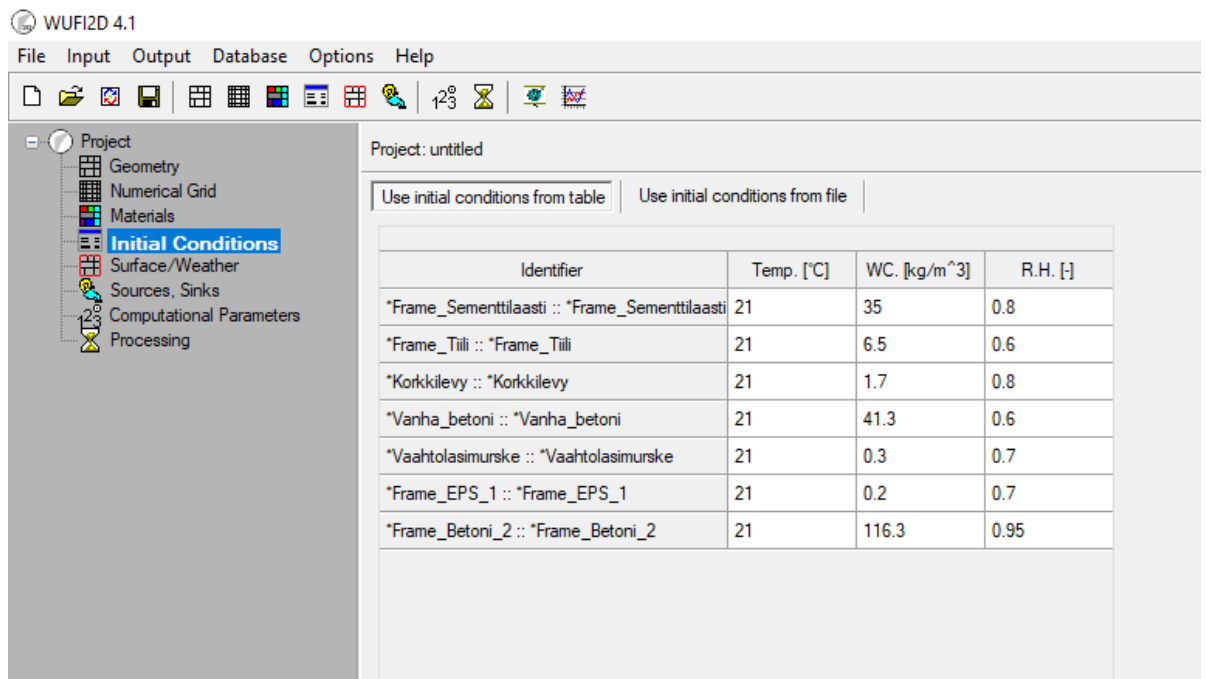
KUVA 11. Lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona



KUVA 12. Faasimuutoksista tai kemiallisista reaktioista aiheutuvat entalpiamuutokset

Enthalpy, temperature-dependent eli esimerkiksi faasimuutoksista tai kemiallisista reaktioista aiheutuvat entalpiamuutokset (KUVA 12). Kuvaajaa ei tarvita tässä opinnäytetyössä.

#### 5.1.4 Alkuolosuhteet



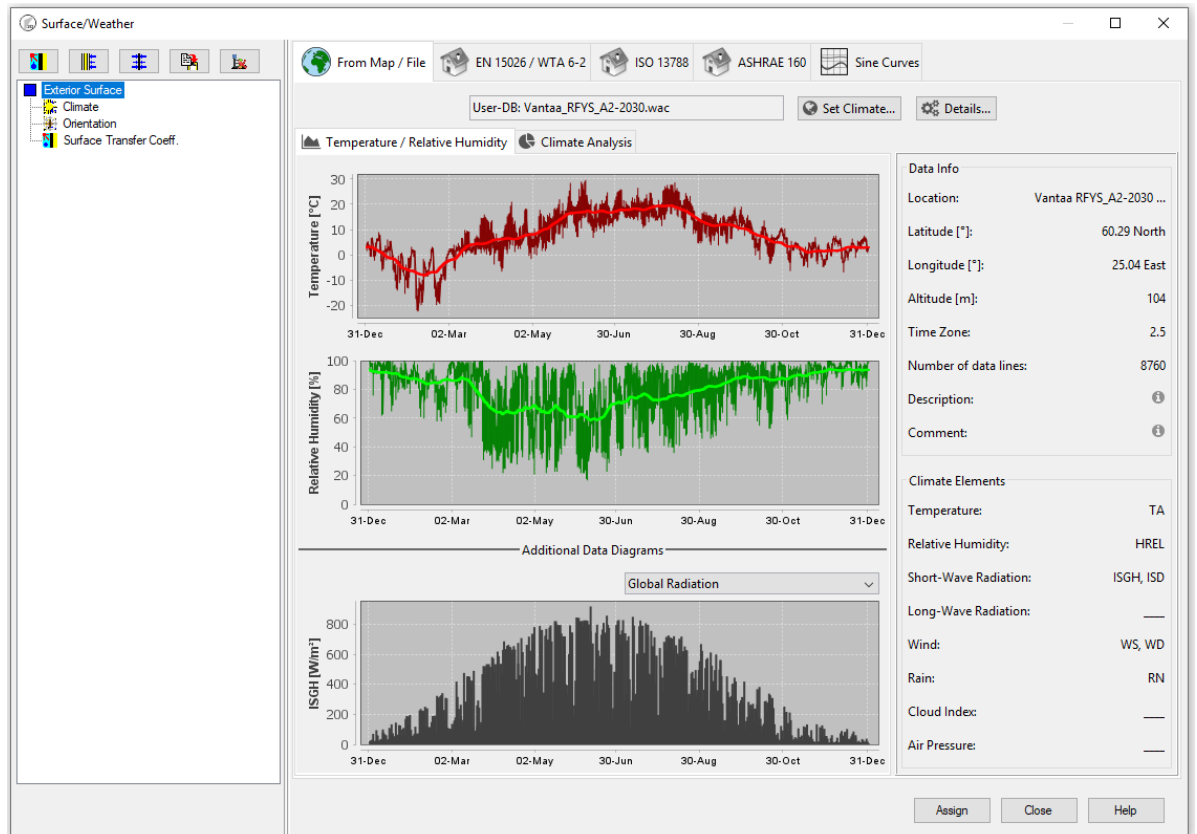
KUVA 13. "Initial Conditions from table" kohdasta muokataan materiaalien alkulämpötila ja -kosteus

Alkuolosuhteita voidaan muokata sivulla "Initial Conditions" (KUVA 13). Taulukkoa käytetään tekstin "Use initial conditions from table" alapuolella". Taulukossa on jokainen mallissa käytettävä materiaali. Tässä voidaan muuttaa esimerkiksi RH [-] niin, että materiaalien kosteuspitoisuudet simuloinnin alussa ovat halutun suuruiset. Kun RH [-] saraketta muutetaan, muuttuu kosteuspitoisuus W [kg/m<sup>3</sup>] samalla tasapainokosteuskäyrän mukaiseen arvoon.

Annetaan korkkilevyn ja sementtipohjaisen rappauksen RH:n olla 80 %. Vanhan betonin eli alalaat-tapalkiston ja massiivitiiliseinän suhteelliset kosteudet muutetaan arvoon 60 %. EPS-eristeen ja vahtolasimurskeen RH-arvot muutetaan arvoon 70 %. Tuoreelle pintalaatalle annetaan arvo RH 95 %, sillä simuloiti aloitetaan tilanteesta, jossa pintalaatta on vasta valettu, mutta laatta on kuitenkin ehtinyt kuivaa vähän aikaa.



## 5.1.5 Pintojen reunaehdot



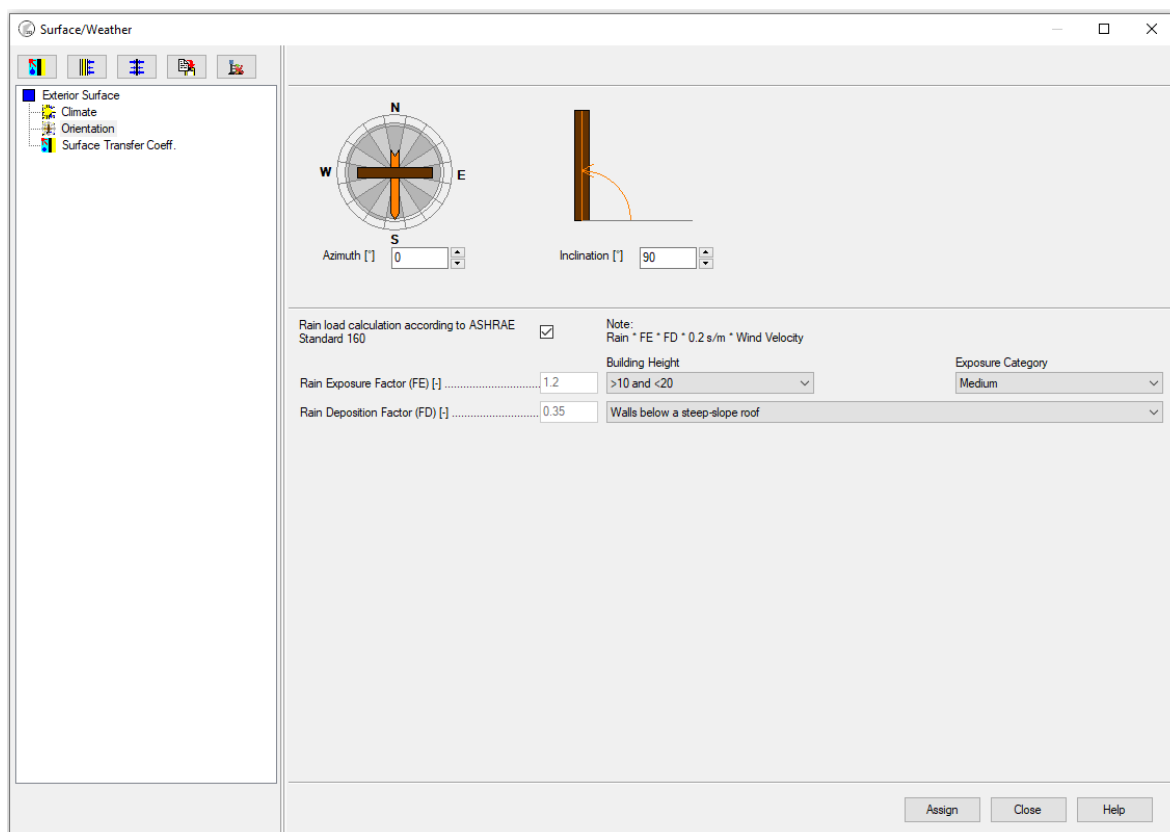
KUVA 14. Pintojen reunaehdot välilehdellä "Surface / Weather"

Pintojen reunaehdot muokataan välilehdellä "Surface / Weather" (KUVA 14). Hiirellä klikataan haluttua materiaalin ulkopintaa, jolloin avautuu ikkuna, josta voidaan muokata pintaan vaikuttavia tekijöitä. Pintojen reunaehdot on käytännössä kolme eri tyyppiä. Niitä ovat rakenteen kontakti ulkoilmaan, rakenteen kontakti sisäilmaan ja adiabaattinen, eli lämmön ja kosteuden virtausta ei tapahdu kyseisen pinnan yli lainkaan. Adiabaattista reunaehdot käytetään, kun halutaan rajata mallia.

"Exterior surface" eli rakenteen kontakti ulkoilmaan valitaan massiivitiiliseinän pinnassa olevan sementtipohjaisen rappauksen vasemmanpuoleiselle sivulle. "Exterior surface" valitaan kaikkiin kohtiin, jotka ovat kosketuksessa ulkoilmaan. "Set climate" -kohdasta valitaan säädatapaketti, jonka mukana tulevat ulkoilman suhteellinen kosteus, lämpötila, viistosateen ja auringonpaisteen määrä sekä säteilyt ja muut seinän kosteusrasituksiin ja kuivumiseen vaikuttavat tekijät.

Tässä opinnäytetyössä käytetään ulkoilmaolosuhteina rakennusfysikaalisia testivuotia. Rakennusfysikaaliset testivuodet määritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen FRAME-hankkeessa. Vuosien 1980 - 2009 välillä kerättiin Jokioisissa, Jyväskylässä, Vantaalla ja Sodankylässä paljon säädataa, joiden pohjalta FRAME-hankkeessa määritettiin kaksi rakennusfysikaalista testivuotta. Nämä vuodet olivat Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Valittuina vuosina ilmasto-olosuhteet olivat tavallista otollisempia home- ja mikrobikasvulle. Näiden tietojen pohjalta laadittiin Ilmatieteenlaitoksen hankkeessa "Rakennusfysiikan ilmastollisten referenssivuotien sääaineistot" tulevaisuuden ilmaston testivuotia, joissa on huomioitu ilmastonmuutoksen ja ilmaston lämpenemisen

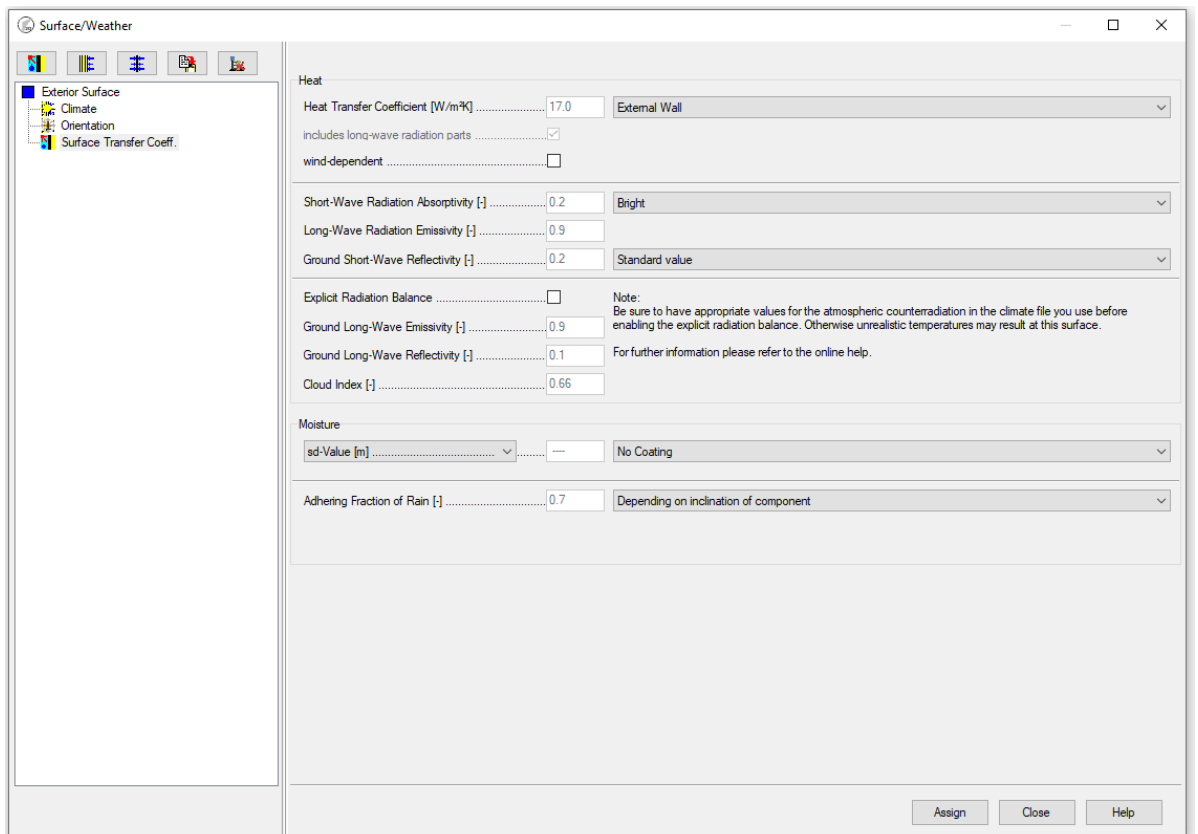
vaikutukset. Tulevaisuuden rakennusfysikaalisia testivuosia ovat Jokioinen 2030, Jokioinen 2050, Jokioinen 2100, Vantaa 2030, Vantaa 2050 ja Vantaa 2100. Tässä opinnäytetyössä käytetään rakennusfysiikan testivuosia Vantaa 2030 ja Vantaa 2100. (Ilmatieteenlaitos.fi)



KUVA 15. "Orientation" välilehdellä muokataan seinän sijaintia ja muita oleellisia tietoja

Kun säädatapaketti on ladattu, siirrytään kohtaan "Exterior surface" alakohtaan "Orientation" (KUVA 15). Tällä välilehdellä voidaan muuttaa seinän oletussuuntaa ja kulmaa, sekä muokata muita oleellisia tietoja. Kohdasta "Azimuth" muutetaan ilmansuuntaa, johon päin seinän vaikutuspinta on. Kun kulma on 0°, seinän vaikutuspinta on etelään päin. Tällöin seinä saa eniten viistosadetta ja se on aurinkoisimmalla ilmansuunnalla. "Inclination" kohtaan laitetaan arvo 90°, jolloin simuloitava seinä on suorassa kulmassa.

Ruutuun "Rain load calculation according to ASHRAE Standard 160" laitetaan rasti, jolloin sadekuorma ja viistosateen määrä lasketaan kyseisen standardin mukaan. "Building height" kohdasta määritetään rakennuksen korkeus. Rakennus on kerrostalo, jonka korkeus on 10 - 20 metriä, joten valitaan ">10 and <20". "Exposure category" kohdasta määritetään altistumisloukka, johon on "medium". "Rain Deposition Factor (FD) [-]" kohtaan valitaan "Walls below a steep-slope roof", jolloin simuloitava seinä on jyrkän katon alla.

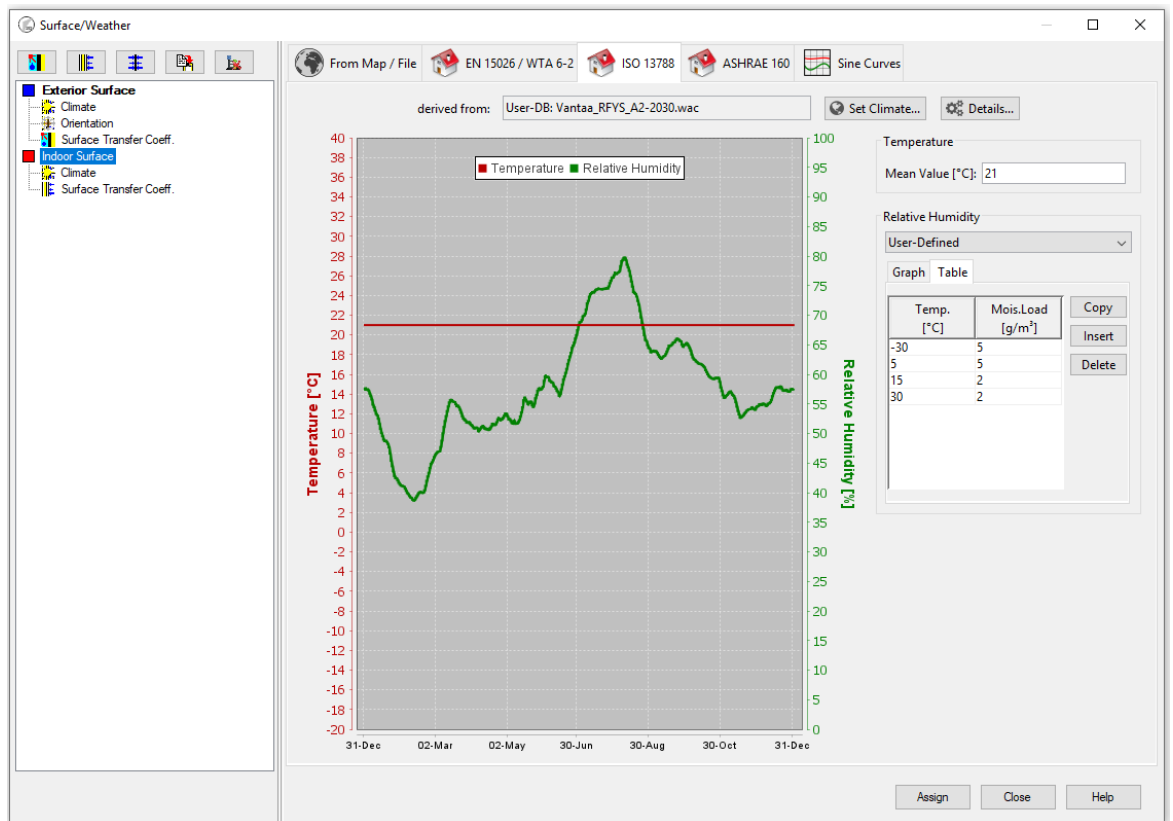


KUVA 16. "Surface Transfer Coeff." välilehdellä muokataan säteilyä ja pinnan kertoimia

Seuraavaksi siirrytään kohtaan "Surface Transfer Coeff" (KUVA 16). Ensimmäisenä on "Heat Transfer Coefficient [W/m<sup>2</sup>K]", josta määritetään pinnan lämmönsiirtokerroin sisäilmaan nähden. Siinä annetaan olla "External Wall", jolloin arvona on 17,0. "Wind-dependent" kohtaan ei laiteta rastia, jolloin kerroin ei ole tuulesta riippuvainen.

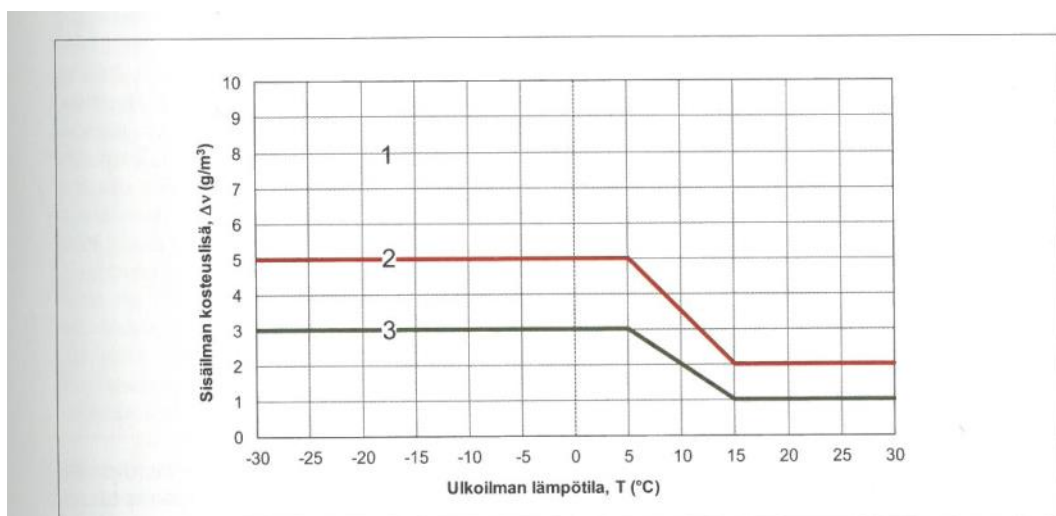
Kohdissa "Short-Wave Radiation Absorptivity", "Long-Wave Radiation Emissivity", "Ground Short-Wave Reflectivity", "Ground Long-Wave Emissivity" ja "Ground Long-Wave Reflectivity" annetaan olla niiden oletusarvot. Ne käsittelevät lyhyt- ja pitkäaaltoista säteilyä ja maaperästä tulevaa säteilyä, eikä niitä ole syytä muuttaa tässä simuloinnissa.

Kohdan "Moisture" alla olevassa "sd-Value (m)" kohdassa annetaan olla "---" ja "no coating", sillä simuloitavassa rakenteessa ei ole maalia eikä tällöin ole maalipinnan aiheuttamaa diffuusiovastustakaan. "Adhering Fraction of Rain" kohdassa annetaan olla 0,7, joka on simuloinnissa sadeveden imeytymiskerroin. Se tarkoittaa sitä, että 70 % seinään osuvasta sademäärästä on mahdollista imeytyä seinän sisään. Loput 30 % seinään osuvasta sateesta ikään kuin kimpoaa pois seinästä.



KUVA 17. Sisäilman lämpötila ja kosteuslisä

Kun rakenne on kontaktissa sisäilmaan, valitaan "Indoor Surface" reunaehto (KUVA 17). Siitä päästään muokkaamaan sisäilman tietoja. Tässä opinnäytetyössä valitaan sisäilman välilehti ISO 13788, jolloin voidaan itse määrittää sisäilman kosteuslisä RIL:in rakenusfysiikkakirjan mukaan (KUVA 18). (Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysiikalinen suunnittelu ja tutkimukset: RIL 255-1-2014) "Set Climate" kohdasta valitaan jälleen ulkoilmaksi sama säädätapaketti, joka oli "Exterior Surface" kohdassa. "Relative Humidity" kohdasta valitaan "User-Defind", jolloin voidaan lisätä sisäilman kosteuslistä tietyissä lämpötiloissa.



Kuva 2.9. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona /19/.

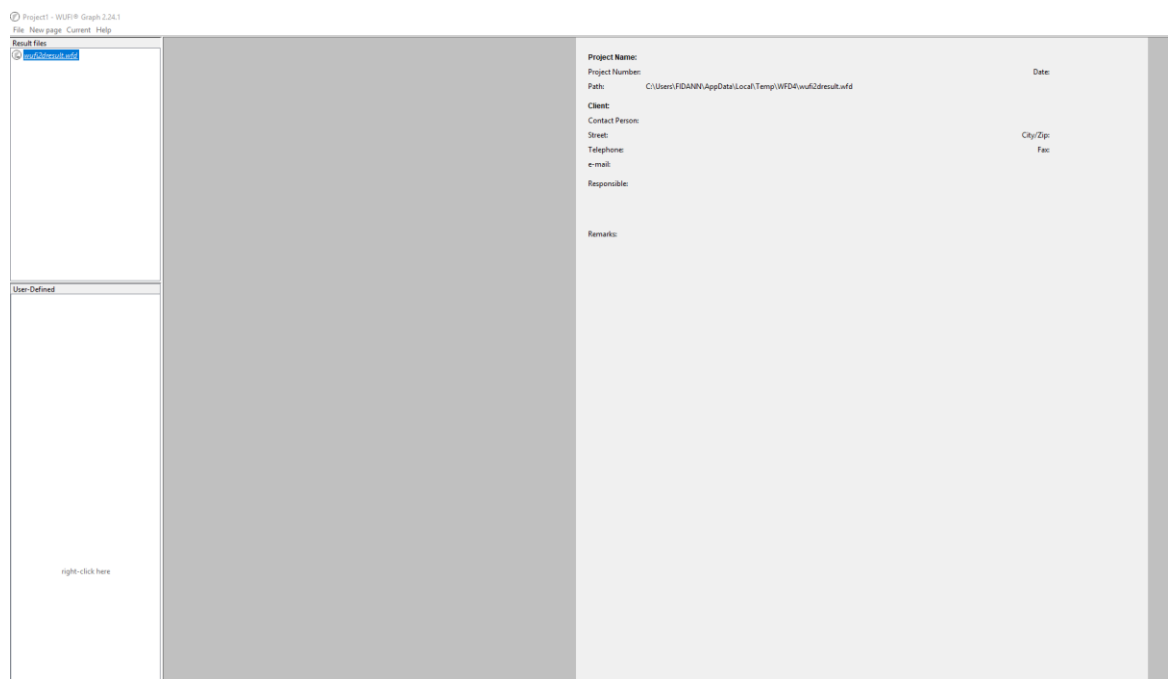
KUVA 18. Sisäilman kosteuslisä (Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysiikalinen suunnittelu ja tutkimukset: RIL 255-1-2014)



Laskenta suoritetaan "Processing" kohdassa (KUVA 20). Kun kaikki edellä läpikäytyt tiedot on asetettu, voidaan laskenta aloittaa kohdasta "Start". Laskenta kestää mallin raskaudesta riippuen muutamista minuuteista jopa kymmeneen tuntiin. Laskenta-ajan pituudessa oleellista on kohdassa "numerical grid" määritettyjen laskentaelementtien määrä eli laskentaverkon tiheys.

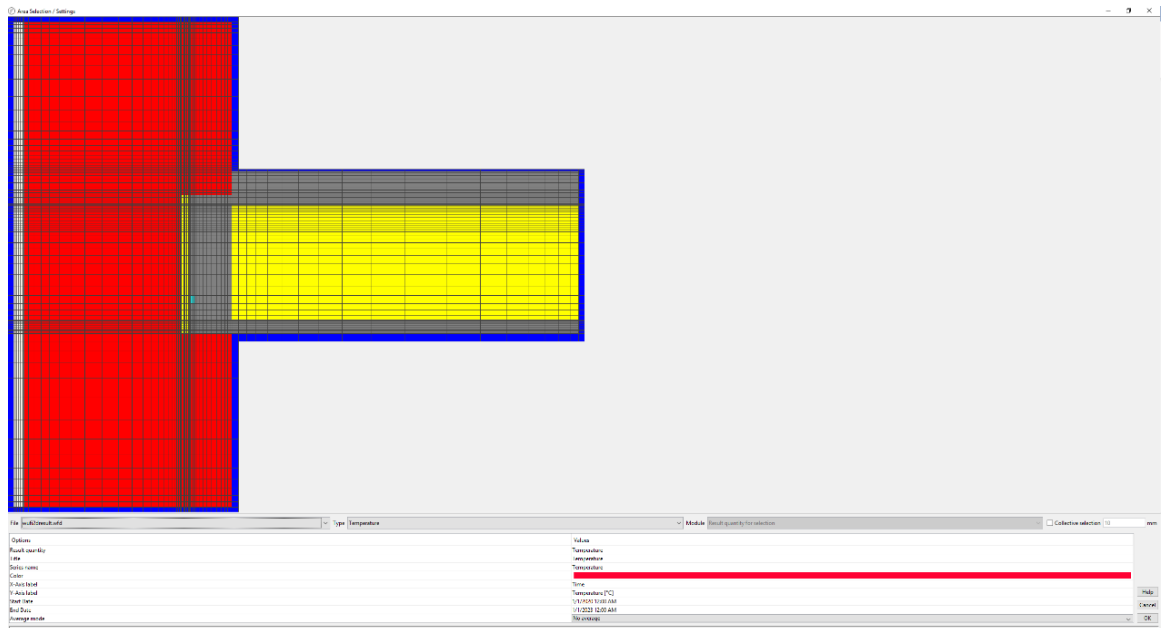
### 5.1.8 Tulosten tarkastelu

Tuloksia voidaan tarkastella, kun ohjelma on suorittanut laskennan. Tuloksiin päästään painamalla ylhäällä työkalupalkissa olevaa kuvaa, jossa on kaksi kuvaajaa. Siitä avautuu sivu "Wufi Graph 2.24.1" (KUVA 21).



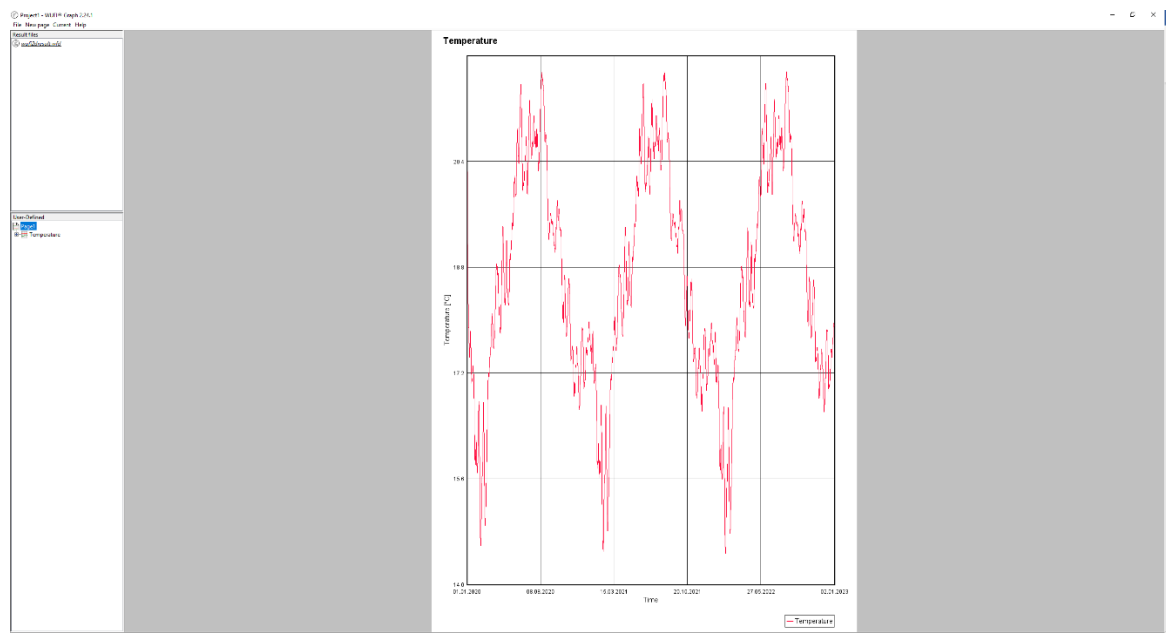
KUVA 21. Tulosten analysoinnin etusivu

Etusivulta valitaan kohdasta "New page". Riippuen siitä, tarkastellaanko lämpötilaa vai suhteellista kosteutta, valitaan joko "Temperature" tai "Relative humidity". Valintapalkissa on myös muutamia mahdollisesti laskettavia arvoja ja käyriä, jotka on valittu tai jätetty valitsematta laskentaparametreja valittaessa. WUFI 2D 4.1 -ohjelmassa voidaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lisäksi halutessa laskea rakenteen vesimäärä sekä vesihöyryn määrä.



KUVA 22. Grafiikasta valitaan tarkasteltava elementti

Rakennemallin grafiikasta valitaan elementti, jota halutaan tarkastella (KUVA 22). Elementtejä voidaan valita useampiakin, mutta tarkin tulos tulee, kun valitaan vain yksi elementti halutusta kohdasta. Jos valitaan useampi laskentaelementti, ohjelma laskee niiden keskiarvon. Erityisen tarkkana on oltava, ettei valitse kahden eri aineen laskentaelementtiä. Ohjelma varoittaa, jos on valittuna kaksi eri ainetta. Kun haluttu/halutut elementit on valittu, painetaan oikeasta alakulmasta "ok".



KUVA 23. Valitun elementin/elementtien lämpötiläkäyrä.

Ohjelma piirtää kuvaajan valitusta/valituista elementeistä (KUVA 23). Lämpötila- tai RH-tiedot saa ohjelmasta tekstitiedostomuodossa, jotta niitä voidaan hyödyntää muun muassa homeindeksin laskemiseen. Tekstitiedostossa on laskenta-ajan jokaiselle tunnille sen hetkinen lämpötila tai suhteellinen kosteus. Tiedosto saadaan ulos klikkaamalla kuvaajaa oikealla hiiren näppäimellä ja valitsemalla "Export".

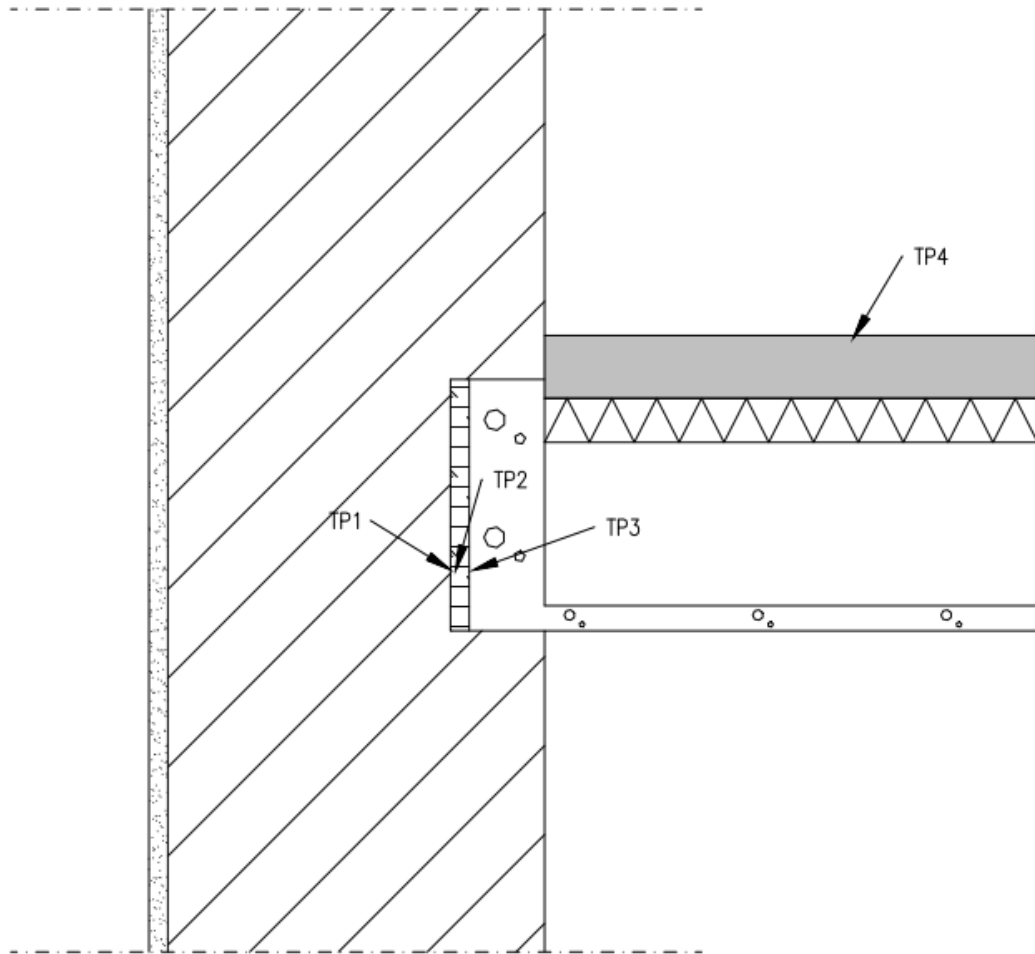
Homeindeksiä voidaan tutkia VTT-TTY:n kehittämällä homemallilla. Homemallissa materiaalit on jaettu neljään eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Tutkittavassa rakenteessa uusi betoni kuuluu homehtumisherkkyyssluokkaan 4, vanha karbonatisoitunut betoni, tiili, vaahtolasi ja EPS homehtumisherkkyyssluokkaan 3 ja korkkilevy homehtumisherkkyyssluokkaan 2. Kun homemalliin syötetään materiaalin homehtumisherkkyyssluokka ja WUFI:sta otettu tekstiedosto, joka sisältää materiaalin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tunnin välein, antaa VTT-TTY-homemalli homeindeksin välillä 0 - 6.

Homeindeksi M	Havaittu homekasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla), Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmillä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

KUVA 24. VTT-TTY-homemallin homeindeksin luokitusperusteet. (Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa 2013)



## 6 RAKENNE 1 SIMULOINTITULOKSET



KUVA 25. Rakenteen 1 tarkastelupisteet

Tarkastelupiste 1 – Tiiliseinän sisäpinta korkkilevyä vasten

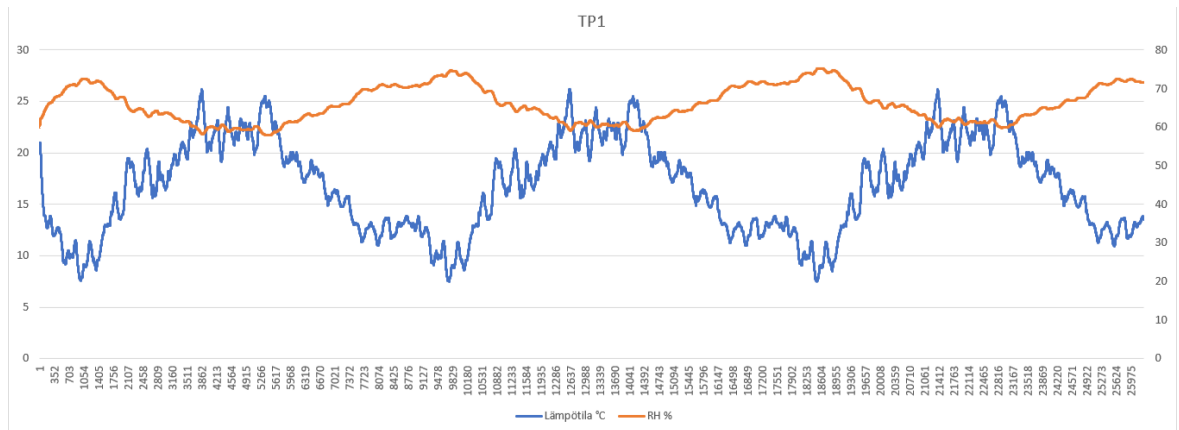
Tarkastelupiste 2 – Korkkilevyn ulkopinta tiiliseinää vasten

Tarkastelupiste 3 – Alalaattapalkiston reunapalkin ulkoreuna korkkilevyä vasten

Tarkastelupiste 4 – Pintalaatan pinta

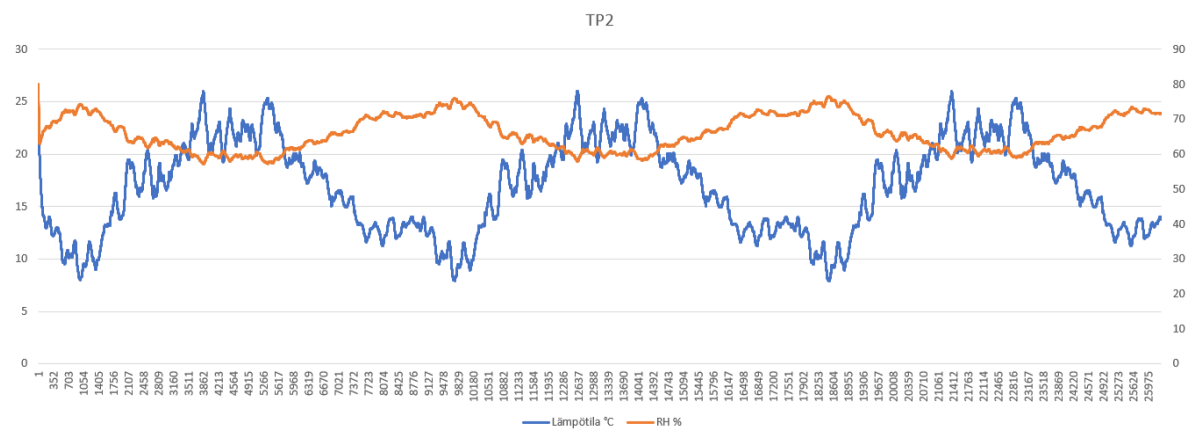
Tarkastelupisteiksi on valittu kohdat (KUVA 25), joissa todennäköisimmin suhteellinen kosteus nousee simuloinnin edetessä. Etenkin tarkastelupistettä 2 voidaan pitää riskinä paikkana, sillä korkkilevyn homeutumisherkkyysluokka on 2 eli se homehtuu muita rakenteita helpommin. Tarkastelupiste 4 ei todennäköisesti homehdu, sillä uusi betoni kuuluu alkaalisuutensa ansiosta homeutumisherkkyysluokkaan 4.

## 6.1 Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa pohjoiseen



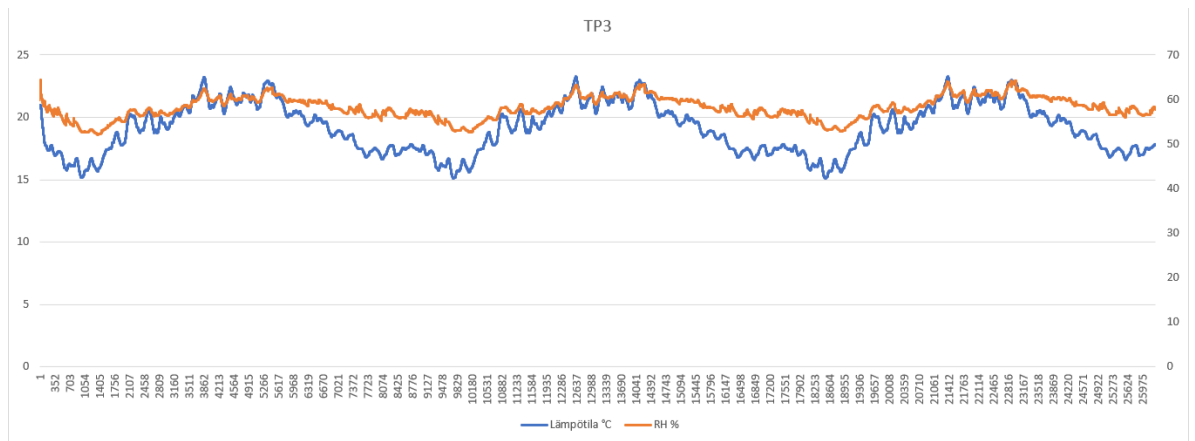
KUVA 26. Tarkastelupisteen 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteessä 1 lämpötila laskee talviaikana kylmimmillään  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen (KUVA 26). Kesällä lämpötila on korkeimmillaan noin  $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä on korkeimmillaan aina talviaikana, kun lämpötila laskee  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ :en alapuolelle. Suhteellinen kosteus käy korkeimmillaan vain noin 76 %. VTT-TTY-homemalli antaa homeindeksiärvoksi 0, joten voidaan todeta, että rakenteella ei ole ainakaan tässä tarkastelupisteessä mikrobivaurion riskiä näissä olosuhteissa.



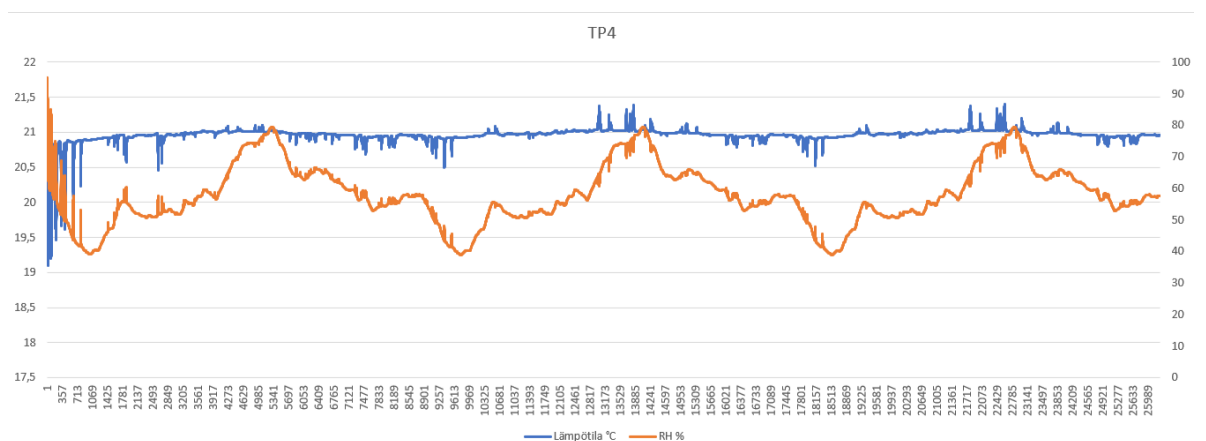
KUVA 27. Tarkastelupisteen 2 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupiste 2 on alalaattapalkiston reunapalkin ja tiiliseinän välissä olevassa korkkilevyssä. Korkkilevyn lämpötila liikkuu  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ :en ja  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$ :en välillä (KUVA 27). Suhteellinen kosteus liikkuu 60 - 80 % välillä. VTT-TTY-homemalli näyttää homeindeksin arvoksi 0 myös korkkilevyllä, vaikka sen homeutumisherkkyysluokka on 2. Korkkilevy on kuitenkin huomattavasti riskimpi paikka mikrobikasvun kannalta korkeamman homeutumisherkkyysluokkansa ansiosta, kuin vieressä olevat betoni tai tiili. Korkkilevyllä on mikrobivaurioitumisen vaara, jos tarkasteltava kohta esimerkiksi saisi keskimääräistä enemmän viistosadetta ja sen kuivumisolosuhteet olisivat tavallista huonommat. Jos korkkilevyn RH nousee hieman nykyisestään, alkaa VTT-TTY-homemalli heti reagoida ja homeindeksi lähtee nousemaan.



KUVA 28. Tarkastelupisteen 3 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupiste 3 sijaitsee korkkilevyä vasten olevassa alalaattapalkiston reunapalkin betonipinnassa. Lämpötila tarkastelupisteessä ei laske talvellakaan alle +15 °C:en ja suhteellinen kosteus pysyy 55 % ja 65 % välissä (KUVA 28). Olosuhteet rakenteen kuivumiselle sen saadessa mahdollista kosteutta ovat hyvät, joten mikrobivaurioitumisen riskiä voidaan pitää matalana.



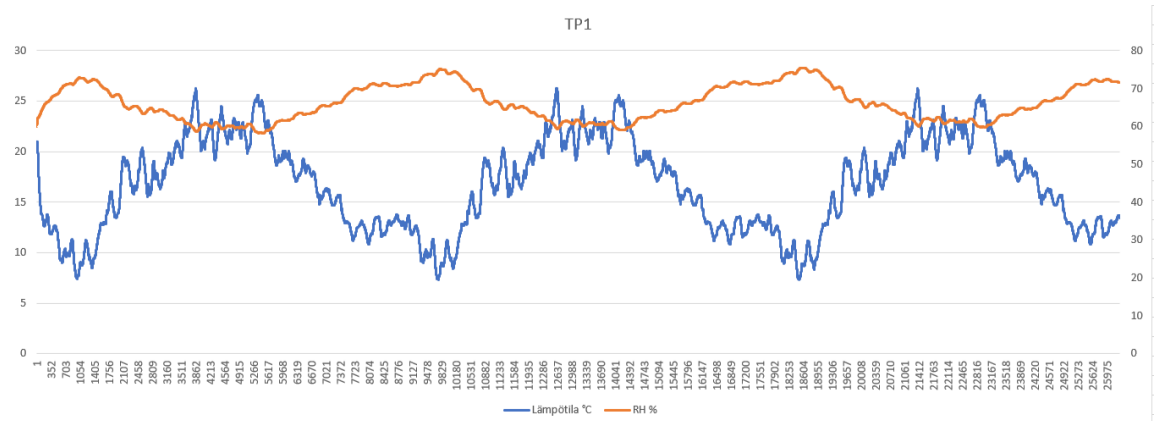
KUVA 29. Tarkastelupisteen 4 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupiste 4 on tuoreen betonilaatan pintakerroksessa. Sisäilman lämpötilaksi oli määritelty +21 °C ja tarkastelupisteen lämpötila myötäilee sisäilman lämpötilaa. Betonilaatan kuivuessa lämpötilassa on pientä vaihtelua. Suhteellinen kosteus betonilaatan pintakerroksissa laskee noin 40 % 1000 - 1100 tunnissa eli noin 6 - 7 viikossa (KUVA 29). Sen jälkeen suhteellinen kosteus lähtee nousuun ja nousee noin 80 % syksyä kohden. Suhteellinen kosteus betonilaatan pintakerroksessa jää vaihtelevaan 40 - 80 % välille, jota voidaan pitää suhteellisen suurena vaihteluvälinä. Suuressa suhteellisen kosteuden vaihteluvälissä on kuitenkin huomioitava se, että tarkastelupiste on aivan betonilaatan pinnassa, jolloin tarkastelupisteen suhteelliseen kosteuteen vaikuttaa hyvin voimakkaasti sisäilman kosteus. Todennäköisesti kuitenkin betonilaatta päällystetään jollain lattiamateriaalilla, kun betonilaatan suhteellinen kosteus arvostelusyvyydellä täyttää päällysteen kosteusvaatimukset, jolloin sisäilma ei pääse vaikuttamaan betonilaatan pintakerrosten suhteelliseen kosteuteen samalla tavalla kuin tässä simuloinnissa.

## 6.2 Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa etelään

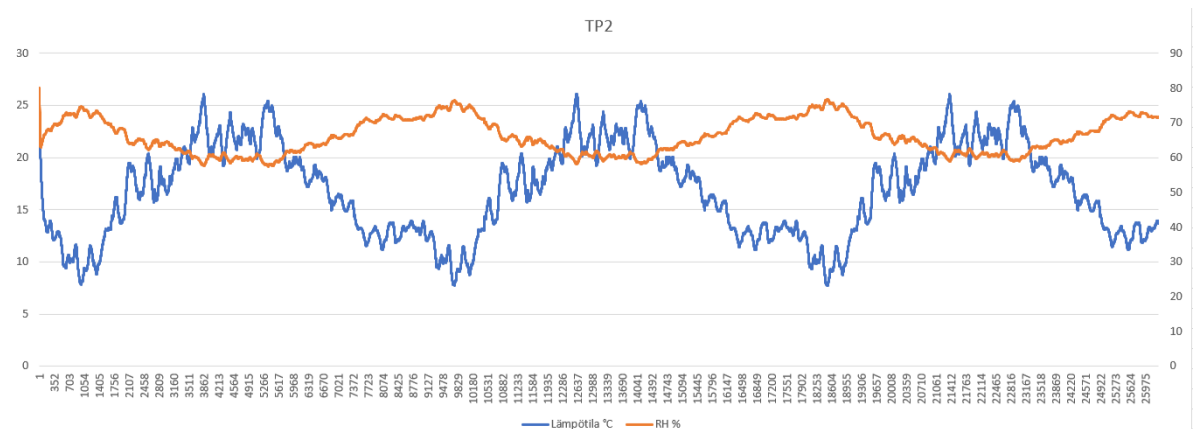
RIL:in rakennusfysiikkakirjan mukaan Vantaan rakennusfysiikkaisia testivuotia käytettäessä rakenteen kannalta kriittisin ilmansuunta on etelä, sillä siellä viistosade on voimakkainta ja auringonsäteily voimistaa ulkoseinärakenteeseen sitoutuneen kosteuden siirtymistä rakenteen sisäosiin diffuusiolla. (Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysiikkainen suunnittelu ja tutkimukset: RIL 255-1-2014)

Vantaan rakennusfysiikkaiset testivuodet on tarkoitettu rakenteille, joissa sade ja ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttavat niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Vantaan rakennusfysiikkaisia testivuotia käytetään esimerkiksi tiiliverhotuille ulkoseinille, eristerapatuille ulkoseinille, betonisandwich-rakenteille, harkkorakenteille ja käänteille katoille. (Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysiikkainen suunnittelu ja tutkimukset: RIL 255-1-2014)



KUVA 30. Tarkastelupisteen 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteen 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus Vantaa 2030 etelään simuloitaessa eivät juuri erotu Vantaa 2030 pohjoiseen simuloitaessa (KUVA 30). Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluväli on hyvin samanlainen, eikä eroa ole suhteellisessa kosteudessa kuin korkeintaan yksi prosenttiyksikkö. Tarkastelupisteestä 1 tarkasteluna ilmansuunnalla ei ainakaan Vantaa 2030 ilmastossa ole käytännön vaikutusta suhteelliseen kosteuteen.

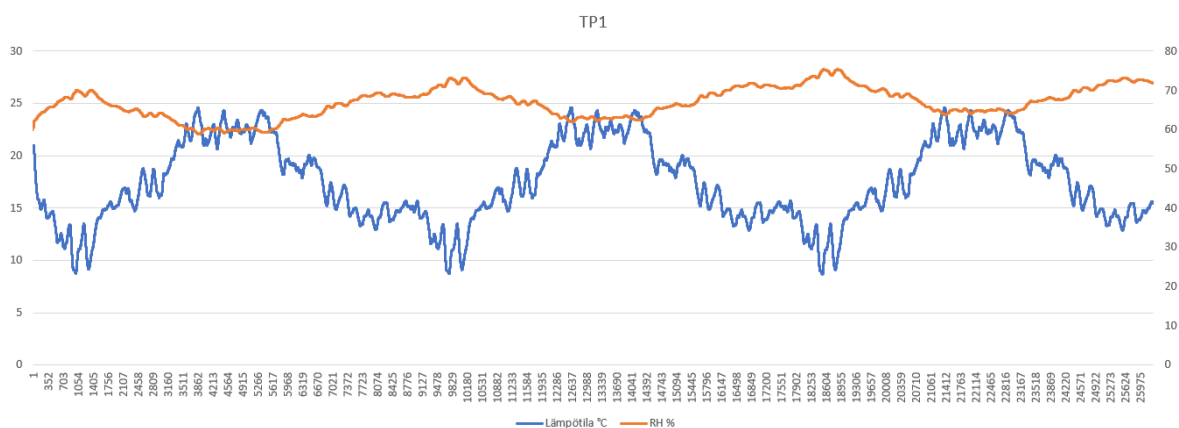


KUVA 31. Tarkastelupisteen 2 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Myös tarkastelupisteissä 2, 3 ja 4 suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat lähes identtisiä pohjoiseen päin olevan seinän suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kanssa (KUVA 31). Kaikissa tarkastelupisteissä lämpötila on identtinen ja suhteellinen kosteus on lähes identtinen. Suhteellisessa kosteudessa erot ovat korkeintaa yhden prosenttiyksikön luokkaa.

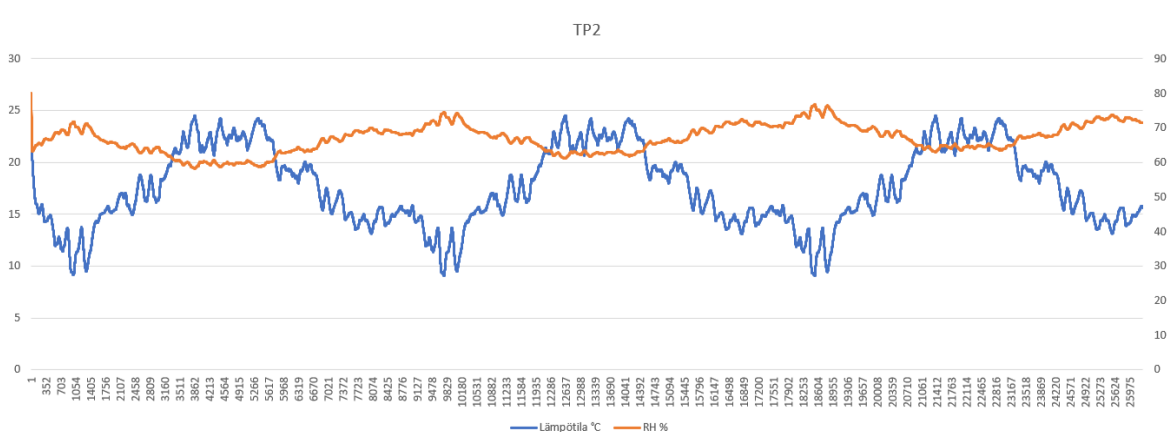
### 6.3 Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa etelään

Vantaa 2100 ilmaston voidaan olettaa olevan kriittisempi ilmasto rakenteille, kuin Vantaa 2030. Vantaa 2100 ilmastossa on otettu huomioon ilmastonmuutoksen vaikutus tulevaisuudessa ja sen myötä talvet ovat leudompia ja ulkoilman suhteellinen kosteus korkeammalla. Etelään päin olevalle seinälle tulee enemmän viistosadetta kuin pohjoiseen päin olevalle seinälle, joten oletuksena Vantaa 2100 ilmasto etelään päin simuloituna pitäisi olla tämän opinnäytetyön kriittisin simulointi.



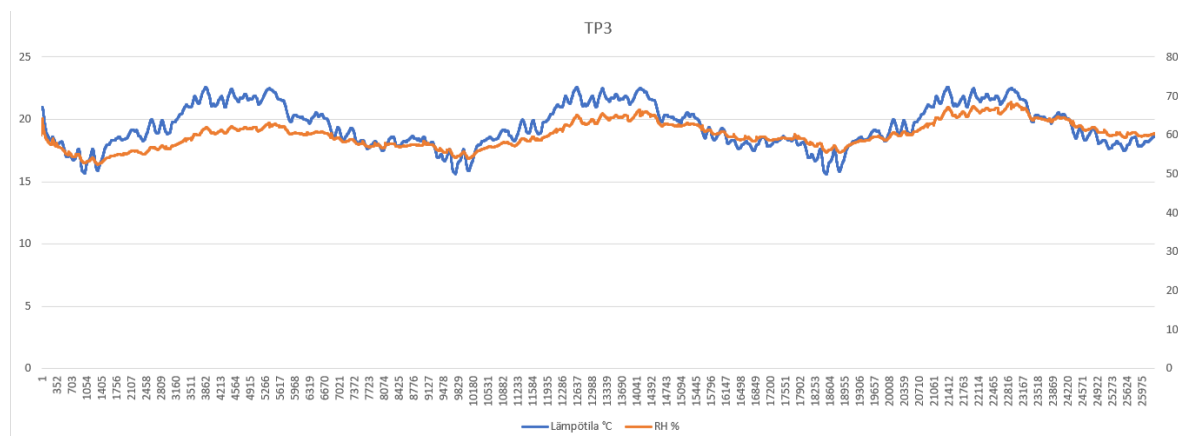
KUVA 32. Tarkastelupisteen 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteessä 1 lämpötila liikkuu +9 °C:en ja +25 °C:en välillä (KUVA 32). Suhteellinen kosteus liikkuu 67 % ja 77 % välillä. Näillä arvoilla VVT-TTY-homemalli antaa homeindeksiarvon 0, joten mikrobivaurion vaaraa ei ole. Suhteellisen kosteuden trendi on kuitenkin joka vuosi lievästi nouseva, joten useamman vuoden päästä trendin jatkuessa suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä voi nousta tasolle, jolloin mikrobivaurio on mahdollinen. Jos haluttaisi saada täysi varmistuu siitä, että homeindeksi ei nouse rakenteessa näissä olosuhteissa, tulisi simulointiaikaa jatkaa useammalla vuodella.



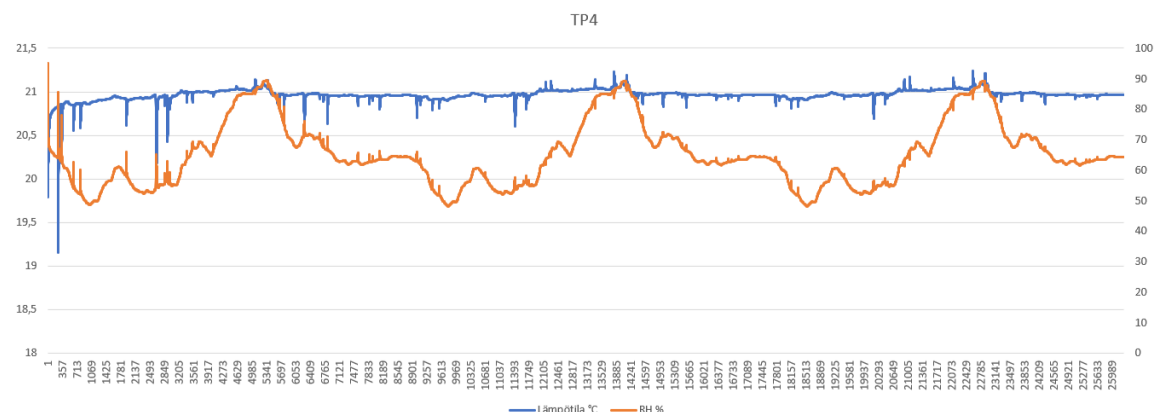
KUVA 33. Tarkastelupisteen 2 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteessä 2 lämpötila liikkuu samoissa arvoissa kuin tarkastelupisteessä 1. Suhteellinen kosteus liikkuu 65 - 80 % välissä (KUVA 33). Suhteellisen kosteuden huippu osuu aina talven kylmimpään kohtaan, kun lämpötila tarkastelupisteessä on alhaisimmillaan. VVT-TTY-homemalli antaa myös tässä tapauksessa homeindeksi-arvon 0, mutta kuten Vantaa 2030 ilmastolla simuloitaessa, homeindeksi-arvo alkaa nousta, jos korkkilevyn suhteellinen kosteus pääsee nousemaan.



KUVA 34. Tarkastelupisteen 3 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteessä 3 lämpötila liikkuu +16°C:en ja +23°C:en välillä (KUVA 34). Suhteellinen kosteus liikkuu 55 % ja 70 % välillä. Kuten muissakin simuloinneissa, tässäkin tarkastelupiste 3 on hyvissä olosuhteissa ilman mikrobivaurion riskiä.



KUVA 35. Tarkastelupisteen 4 lämpötila ja suhteellinen kosteus

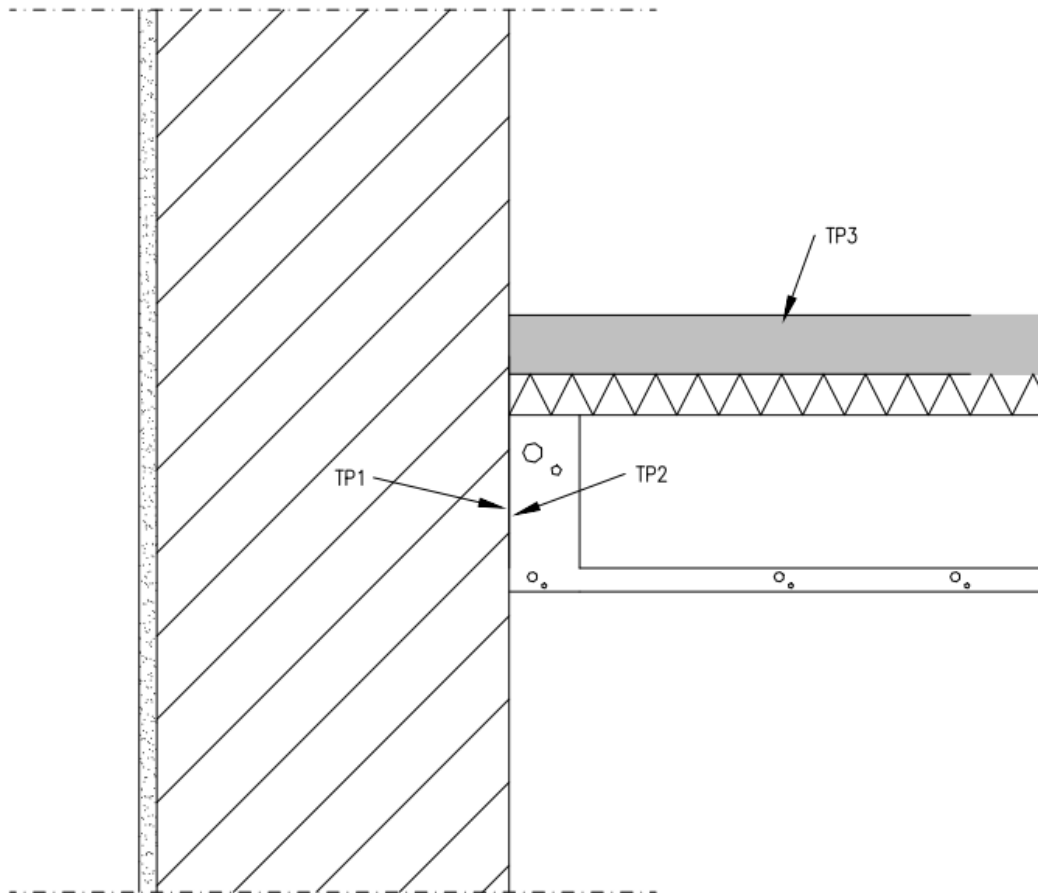
Tarkastelupisteessä 4 lämpötila pysyy kutakuinkin sisäilman lämpötilassa, mutta suhteellisen kosteuden vaihteluväli on suuri. Simuloinnin alkaessa betonilaatta kuivuu noin 1000 - 1100 tunnissa eli 6-7 viikossa RH 50 %, jonka jälkeen suhteellinen kosteus alkaa nousta kesän ja syksyn tullessa (KUVA 35). Korkeimmillaan suhteellinen kosteus on aina elokuussa, jolloin se käy jopa RH 90 %. Vaihteluväli on aika suuri, mutta se on kuitenkin samansuuruinen kuin Vantaa 2030 ilmastolla simuloitaessa.

Vantaa 2100 ilmastolla simuloitaessa suhteellinen kosteus on matalimmillaan ja korkeimmillaan 10 prosenttiyksikköä suurempi kuin Vantaa 2030 ilmastolla simuloitaessa. Tämä selittyy sillä, että sisäilman kosteuslisä on suhteessa ulkoilman suhteelliseen kosteuteen. Vantaa 2100 ilmastolla simuloitaessa ulkoilman suhteellinen kosteus on korkeampi kuin Vantaa 2030 ilmastolla simuloitaessa, joten sisäilman kosteus on kosteuslisän kanssa korkeampi Vantaa 2100 ilmastossa. Tässä simuloinnissa betonilaatan sisäpinta eli tarkastelupiste on jatkuvasti kosketuksessa sisäilmaan, joten sisäilman kosteus vaikuttaa tarkastelupisteen suhteelliseen kosteuteen. Kuitenkin betonilaatan pintaan asennetaan todennäköisesti joku pintamateriaali, joten sisäilma ei pääse vaikuttamaan betonilaatan pintakerrokseen oikeasti niin voimakkaasti, kuin tässä simuloinnissa.

#### 6.4 Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa pohjoiseen

Simuloitaessa Vantaa 2100 ilmastolla pohjoiseen, olivat tarkastelupisteiden 1, 2, 3 ja 4 lämpötilat ja suhteellisen kosteuden käyrät lähes identtiset Vantaa 2100 ilmastolla etelään päin simuloitaessa. Lämpötilakäyrät olivat täysin identtiset ja suhteellisen kosteuden erot olivat prosenttiyksikön sisällä. Ilmansuunnalla ei siis huomattu olevan vaikutusta näissä simuloinneissa.

## 7 RAKENNE 2 SIMULOINTITULOKSET



KUVA 36. Rakenteen 2 tarkastelupisteet

Tarkastelupiste 1 – Tiiliseinän sisäpinta

Tarkastelupiste 2 – Tiiliseinän sisäpinta korkkilevyä vasten

Tarkastelupiste 3 – Alalaattapalkiston reunapalkin ulkoreuna korkkilevyä vasten

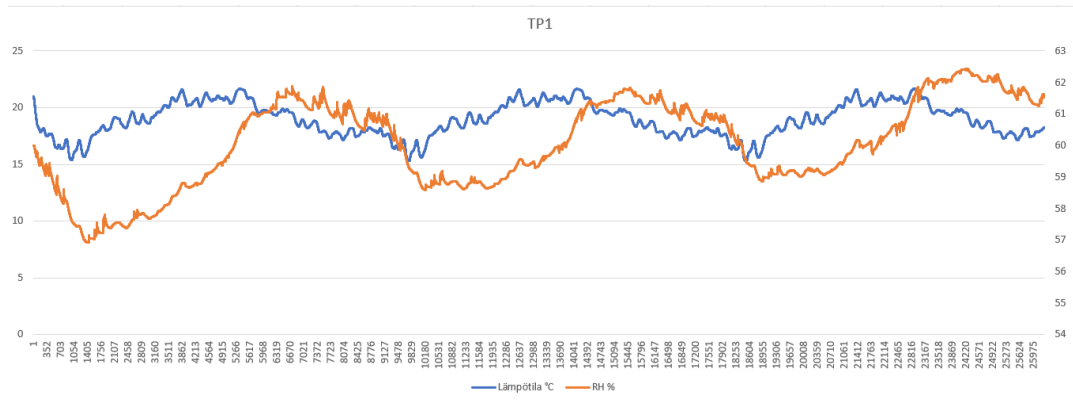
Tarkastelupiste 4 – Pintalaatan keskikohta noin 20-30 mm syvyydellä

Tarkastelupiste 5 – Pintalaatan tiiliseinän vastainen reuna noin 20-30 mm syvyydellä

Tarkastelupisteiksi on valittu kohdat (KUVA 36), joissa todennäköisimmin suhteellinen kosteus nousee simuloinnin edetessä. Tarkastelupisteet 1 ja 2 ovat materiaaleiltaan homeutumisherkkyydsluokkaa 3 eli ne eivät ole kovin herkkiä homehtumaan. Tarkastelupiste 3 ei todennäköisesti homehdu, sillä uusi betoni kuuluu alkaalisuutensa ansiosta homeutumisherkkyydsluokkaan 4.

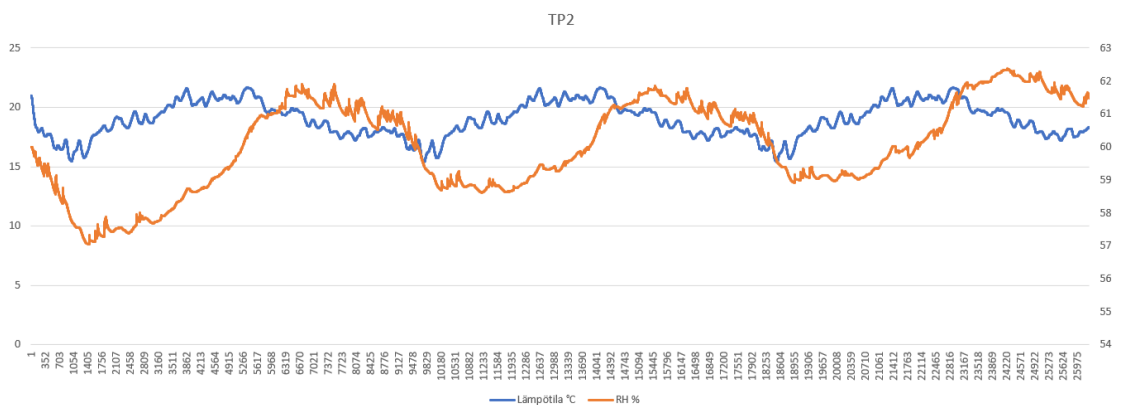


## 7.1 Simulointi Vantaa 2030 ilmastossa pohjoiseen



KUVA 37. Tarkastelupisten 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupiste 1 sijaitsee tiiliseinän sisäpinnassa alalaattapalkiston reunapalkin takana. Erona rakenteessa 1 olevaan tarkastelupiste 1 on se, että tässä tapauksessa reunapalkkia ei ole upotettu tiiliseinään ja näin ollen ulkoilman ja tarkastelupisteen välillä on 600 mm massiivitiiliseinää 480 mm sijaan. Tämä näkyy tarkastelupisteen lämpötilassa, sillä lämpötila laskee alimmillaan vain +15 °C:seen (KUVA 37). Suhteellinen kosteus käy tarkasteluajana alhaisimmillaan 57 % ja korkeimmillaan lähes 63 %. Suhteellisen kosteuden vaihteluväli on kohtalaisen pieni, mutta RH-käyrän trendi on nouseva. Suhteellinen kosteus on kuitenkin sen verran matala, että mikrobivaurion riskiä ei ole. Pidemmällä simulointiajalla voitaisiin tutkia, kuinka pitkään RH-käyrän nousutrendi jatkuu.



KUVA 38. Tarkastelupisteen 2 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteessä 2 (KUVA 38), eli alalaattapalkiston reunapalkissa tarkastelupisteen 1 vieressä, lämpötila on samoissa arvoissa kuin tarkastelupisteessä 1. Suhteellisen kosteuden käyrä liikkuu myös samalla tavalla kuin tarkastelupisteessä 1, eli myöskään tarkastelupisteessä 2 ei ole mikrobivaurion riskiä.

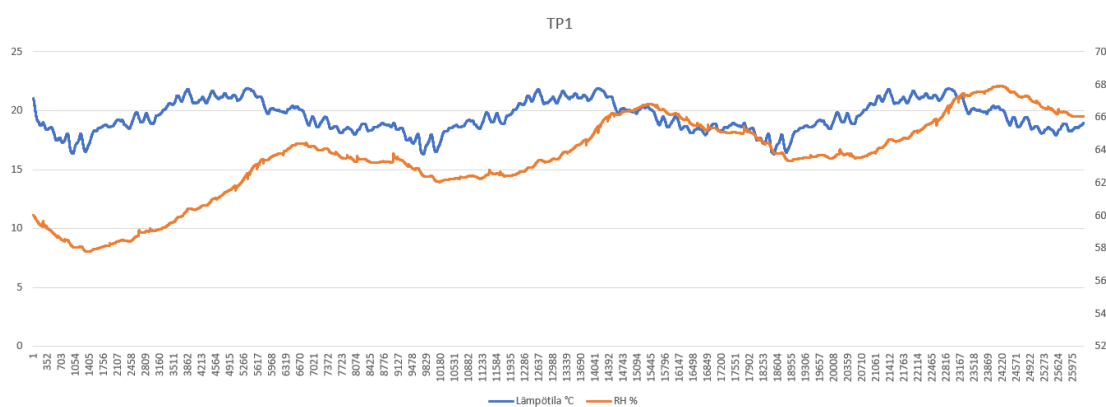
Tarkastelupiste 3 on samassa kohdassa kuin molemmissa tutkittavissa rakenteissa. Rakenteessa 1 alalaattapalkiston reunapalkki on upotettu seinän sisään ja sen takana on korkkilevy, kun taas ra-

kenteessä 2 reunapalkki on tiiliseinän sisäpinnassa ja seinä on yhtä paksu sen takana kuin muuallakin. Nämä rakenteiden erot eivät vaikuta tarkastelupisteeseen 3. Näin ollen lämpötila- ja RH-käyrät ovat identtiset samoilla ilmastoilla ja ilmansuunnilla simuloitaessa.

## 7.2 Simulinti Vantaa 2030 ilmastossa etelään

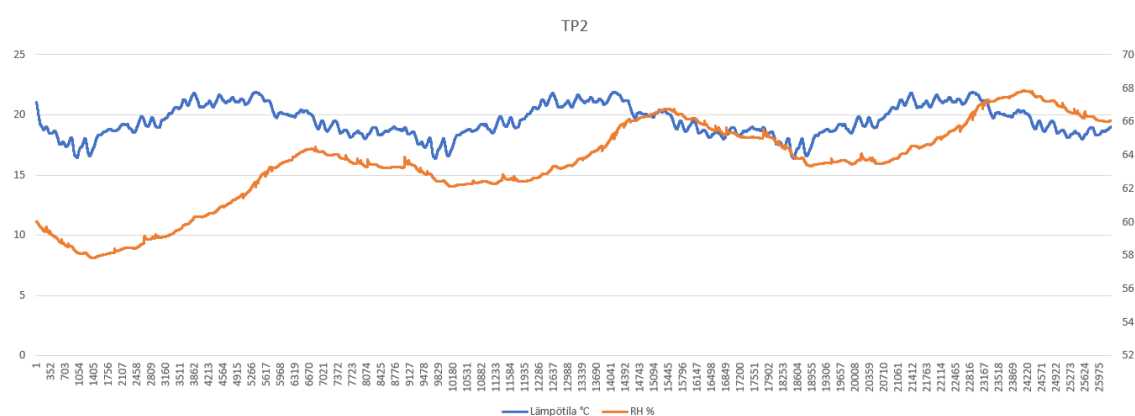
Kuten rakenteessa 1, simuloitavan rakenteen ilmansuunnalla ei ole käytännössä vaikutusta simulointituloksiin. Kaikissa rakenteen tarkastelupisteissä lämpötila ja suhteellinen kosteus olivat samanlaisia Vantaa 2030 etelään simuloitaessa ja Vantaa 2030 pohjoiseen simuloitaessa. Lämpötiloissa ei ollut eroja lainkaan ja suhteellisessa kosteudessa erot olivat prosenttiyksikön luokkaa.

## 7.3 Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa pohjoiseen



KUVA 39. Tarkastelupisteen 1 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Simuloitaessa Vantaa 2100 ilmastolla pohjoiseen, tarkastelupisteessä 1 lämpötila pysyttelee +16°C:en ja +22°C:en välillä (KUVA 39). Suhteellinen kosteus on matalimmillaan simuloinnin aloituksen jälkeen ensimmäisenä keväänä, jolloin se on noin 58 %. Korkeimmillaan se on simulointiaikana viimeisinä eli kolmantena syksynä, jolloin se käy 68 %. Suhteelliset kosteudet ovat sen verran matalia, että mikrobivaurion vaaraa ei ole, mutta RH-käyrän trendi on selvästi nouseva ja nousua tapahtuu vuosittain 2 - 3 prosenttiyksikköä. Jos halutaan varmistua siitä, ettei mikrobivauriota tule tulevaisuudessa, täytyisi simulointiajan olla pitempi, jolloin voitaisiin tutkia, jatkuuko RH-käyrän nousutrendi.



KUVA 40. Tarkastelupisteen 2 lämpötila ja suhteellinen kosteus

Tarkastelupisteessä 2 (KUVA 40) lämpötila- ja RH-käyrä ovat samanlaiset kuin tarkastelupisteessä 1. Tässä tapauksessa, kun betonin ja tiilen välillä ei ole korkkilevyä kuten rakenteessa 1, käyttäytyvät tiili ja betoni hyvin samalla tavalla.

Tarkastelupisteen lämpötila- ja RH-käyrä ovat samanlaiset, kuin rakenteessa 1 vastaavalla ilmastolla simuloitaessa. Rakenteiden eroavaisuuksilla ei ole vaikutusta tarkastelupisteen 3 lämpötilaan tai suhteelliseen kosteuteen.

#### 7.4 Simulointi Vantaa 2100 ilmastossa etelään

Kuten luvussa 7.1 ilmaistiin, ilmansuunnilla ei huomattu näissä simuloinneissa olevan vaikutusta rakenteiden suhteelliseen kosteuteen tai lämpötilaan. Lämpötila pysyi käytännössä identtisenä ilmansuunnasta riippumatta ja suhteellisessa kosteudessa eroa oli alle prosenttiyksikkö.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia korjatun alalaattapalkiston ja massiivitiiliseinän liitosten rakennusfysikaalista toimivuutta korjauksen jälkeisellä ajalla. Tarkoituksena oli tutkia, nouseeko potentiaalisissa ongelmakohtissa suhteellinen kosteus niin korkealle, että homekasvu on mahdollista. Tavoitteena oli myös tutkia simulointi-ilmansuunnan ja käytettävien ulkoilmaolosuhteiden vaikutusta simulointituloksiin. Lisäksi tavoitteena oli perehtyä WUFI:n käyttöön.

Simuloinneissa käytettiin Vantaa 2030 ja Vantaa 2100 rakennusfysikaalisia testivuotia. Molempien rakennusfysikaalisten testivuotien säädät on tehty todellisten tietojen ja ilmastonmuutoksen vaikutusten pohjalta. Vantaa 2100 testivuodessa talvet ovat leudompia ja ulkoilman suhteellinen kosteus on korkeampi kuin Vantaa 2030 testivuodessa.

Rakennetta 1 simuloitaessa Vantaa 2100 testivuodella huomattiin, että tarkastelupisteissä 1, 2 ja 3 keskilämpötilat olivat keskimäärin noin 1 - 2 °C korkeampia kuin Vantaa 2030 ilmastolla simuloitaessa. Rakenteessa 2 huomattiin sama ilmiö tarkastelupisteissä 1 ja 2. Tuoreen betonilaatan pinnan lämpötilaan simulointi-ilmastot eivät vaikuttaneet, sillä se pysyi koko ajan rakennuksen sisäilman lämpötilan tasolla.

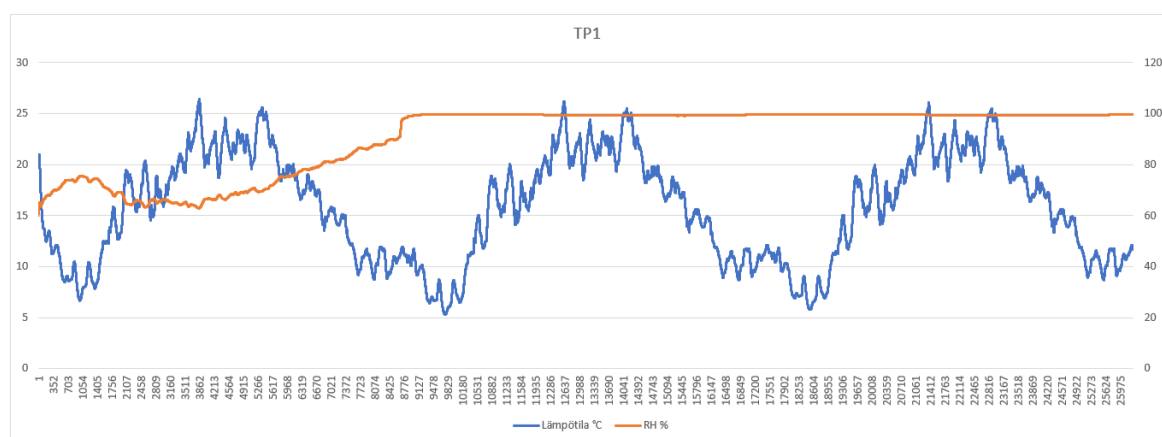
Simulointi-ilmastolla oli myös vaikutusta tarkastelupisteiden suhteelliseen kosteuteen. Rakenteessa 1 tarkastelupisteissä 1, 2 ja 3 suhteellinen kosteus oli keskimäärin 2 - 5 prosenttiyksikköä korkeampi Vantaa 2100 testivuodella simuloitaessa kuin Vantaa 2030 testivuodella simuloitaessa. Rakenteessa 1 tarkastelupisteessä 4 pintabetonilaatassa suhteellinen kosteus oli noin 10 prosenttiyksikköä korkeammalla Vantaa 2100 testivuodella simuloitaessa kuin rakenteen 2 tarkastelupisteessä 3 Vantaa 2030 testivuodella simuloitaessa. Tämä voidaan selittää sillä, että sisäilmaan määritetty sisäilman kosteuslisän määrään vaikuttaa ulkoilman suhteellinen kosteus. Niimpä ulkoilman ollessa kosteampaa Vantaa 2100 testivuodella simuloitaessa sisäilman kosteuslisäkin oli suurempi ja betonilaatan pintakerroksen suhteellinen kosteus kävi sen ansiosta korkeammalla. Kuitenkin betonilaatta todennäköisesti päällystetään jollakin päällystemateriaalilla, jolloin sisäilman kosteus ei pääse vaikuttamaan betonilaatan pintaan samalla tavalla kuin tässä simuloinnissa.

Jos alalaattapalkiston ja massiivitiiliseinän liitoksen rakennusfysikaalista toimivuutta halutaan parantaa ja varmistaa korjaustöiden yhteydessä, voidaan alalaattapalkiston reunapalkin viereen asentaa lämmityskaapelit. Tällä saadaan rakenneliitoksen lämpötila tavallista korkeammalle, jolloin rakenteeseen mahdollisesti tuleva kosteus haihtuu helpommin ja mikrobivaurioitumisen riski on hyvin pieni. Lämmityskaapeleiden asentamista kannattaa harkita ainakin silloin, jos massiivitiiliseinän paksuus on pienempi kuin tässä työssä simuloidun rakenteen paksuus (600 mm) tai alalaattapalkiston reunapalkki on syvällä seinän sisässä.

Toinen asia, jolla voidaan varmistaa ja parantaa rakenteiden toimivuutta, on ilmanvaihtoputkiston asentaminen vaahtolasimurskekerrokseen. Silloin voidaan varmistua siitä, että vaahtolasimurskeen välissä olevan ilman suhteellinen kosteus ei pääse nousemaan liian korkeaksi. Valettava betonilaatta

kuivuu eristettä vasten valettaessa periaatteessa vain yhteen suuntaan eli ylöspäin, mutta asentamalla ilmanvaihtoputket vahtolasimurskekerrokseen varmistetaan myös se, että jos betonilaatan kuivumisesta tulevaa kosteutta pääsee vahtolasimurskekerrokseen, saadaan se kuljetettua pois ilmanvaihtoputkien avulla.

Merkittävänä huomiona Wufi-laskennoissa huomattiin ulkopuolella olevan rappauksen vaikutus veden imeytymiseen rakenteissa. Wufi-laskenta tehtiin myös niin, että massiivitiiliseinä oli ulospäin pelkällä tiilipinnalla. Kun massiivitiiliseinän ulkopinnassa ei ole rappausta, Wufi simuloi rakennetta niin, että koko tiiliseinä imeytyy täyteen vettä (KUVA 41).



KUVA 41. Lämpötila ja suhteellinen kosteus niin, että rakenne on puhtaalla tiilipinnalla

Yllä oleva kuvaaja on rakenteen 1 simuloinnista niin, että ulkopuolen rappaus on poistettu ja viistosade pääsee satamaan suoraan tiiliseinän pintaan. Simuloinnin säädätänä on käytetty Vantaa 2030 ilmastoa ja seinän simulointisuunta on etelään, eli viistosaderasitus on suurin. Sadeveden imeytymiskerroin on 0,7, eli sama kuin muissakin simuloinneissa.

Kuvaajasta huomataan, että ensimmäisen vuoden aikana seinä imeytyy täyteen vettä niin, että suhteellinen kosteus on 100 %. Tarkastelupiste on 480 mm syvyydellä seinässä ulkoa päin katsottuna. Simulointiohjelma laskee siis niin, että seinän ulkopintaan osuva viistosade imeytyy kapilaarisesti seinän sisään aina seinän sisäpintaan asti, eikä pääse missään vaiheessa kuivumaan. Tällä tavalla paljaspintainen massiivitiiliseinä ei kuitenkaan oikeasti käyttäydy, eikä kapilaarinen imeytyminen ulotu koko seinän läpi.

Tiilipintaista massiivitiiliseinää simuloitaessa WUFI ei anna luotettavia tuloksia 0,7 sadevedenimeytymiskertoimella. Yleisesti ottaen 0,7 sadevedenimeytymiskerrointa pidetään normaalina lähtökohdaksi muille materiaaleille kuin tiilille. Työn aikana tein koemielessä simulointeja rakenteelle 1, josta oli poistettu rappauskerros. Kun sadeveden imeytymiskerroin oli luokkaa 0,2 - 0,3, antoi ohjelma samaa luokkaa olevia tuloksia kuin rapatulle tiiliseinälle sadeveden imeytymiskertoimen ollessa 0,7. Kuitenkin simuloitaessa tiilipintaista massiivitiilirakennetta, tulee kiinnittää erityistä huomiota kosteuden imeytymiseen.

Yhteenvedon voidaan todeta, että molemmat tutkittavat rakenteet ovat Vantaa 2030 ja Vantaa 2100 testivuosi-  
simuloituna suhteellisen turvallisia rakenteita. Vantaa 2100 testivuodella simuloita-  
essa rakenteen suhteellinen kosteus on hieman korkeammalla kuin Vantaa 2030 testivuodella simu-  
loitaessa, mutta kuitenkin sellaisella tasolla, ettei välitöntä mikrobivaurion riskiä ole. Rakenteessa 1  
olevaa korkkilevyä voidaan pitää riskisimpänä kohtana, sillä varsinkin Vantaa 2100 testivuodella si-  
muloitaessa kosteusrasitusten suhteellisen kosteuden nostettaessa VTT-TTY-homemallin homein-  
deksi lähti nousuun. Huomionarvoista on, että simuloitavat rakenteet ja niiden olosuhteet ovat kes-  
kiarvoja, joten vastaavanlaisen rakenteen ollessa huonommissa olosuhteissa esimerkiksi suurem-  
massa kosteusrasituksessa ja kylmemmässä paikassa homeindeksi varsinkin korkkilevyssä nousee  
niin, että mikrobivaurion riski on olemassa.

Tutkittavien rakenteiden tulokset on saatu simuloimalla, joten niiden luotettavuuteen on suhteudut-  
tava kriittisesti. Simulointiolosuhteet ovat keskiarvoja, joten rakenteen joku osa voi olla todellisu-  
udessa huonommissa olosuhteissa kuin tässä simuloinnissa. Lisäksi on huomiotava, että tässä tutki-  
muksessa materiaaliarvoiksi on valittu yhdet tietyt materiaalit ja todellisessa rakenteessa materiaalit  
voivat poiketa merkittävästikin tämän simuloinnin materiaaleista. Tämän opinnäytetyön laskentatu-  
loksia voidaan pitää suuntaa antavina.

## LÄHTEET

BETONIRAKENTEIDEN KOSTEUS. Betonirakenteiden korjaaminen. 2019. [verkkoaineisto] [Viitattu 28.1.2020] Saatavissa: [http://www.betonyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2019/luento2.kolio\\_betonirakenteiden\\_kosteus\\_2019-03-19.pdf](http://www.betonyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2019/luento2.kolio_betonirakenteiden_kosteus_2019-03-19.pdf)

ILMASTONMUUTOKSEN ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. 2013. [verkkoaineisto] [Viitattu 28.2.2020] Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittamisen/frame-loppuraportti.pdf>

Ilmatieteenlaitos.fi [verkkoaineisto] [Viitattu 10.2.2020] Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>

MÄKIÖ Erkki, Malinen Maarit, Neuvonen Petri, Sinkkilä Jyrki, Tuunanen Anna-Maija, Saarenpää Jukka, 2016. Kerrostalot 1940-1960. 2. painos. Rakennustieto Oy.

NEUVONEN Petri, Malinen Maarit, Mäkiö Erkki, 2002. Kerrostalot 1880-1940. Rakennussäätiö RTS ja Rakennustieto Oy.

NEUVONEN Petri (toim.), 2006. Kerrostalot 1880-2000 – arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustekniikan keskus -säätiö ja Museovirasto.

RAKENNUSFYSIKKA 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. RIL 255-1-2014. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Sisäilmayhdistys.fi [verkkoaineisto]. [Viitattu 22.1.2020] Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Kosteuslahteet>

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2004. By 201 Betonitekniikan oppikirja 2004. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy

TERÄVÄINEN, Veikko. Mitkä ovat veden kolme olomuotoa? [verkkoaineisto] [Viitattu 13.1.2020] Saatavissa: <https://peda.net/p/Veikko%20Tapio%20Ter%C3%A4v%C3%A4inen/efyke5-6/3/18/movko>

VEDEN OMINAISUUDET. Jyväskylän yliopisto 11.4.2013. [verkkoaineisto] [Viitattu 13.1.2020] Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/ako/Veden%20ominaisuudet>