

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelu

Mauri Huttunen

WUFI-laskentaohjelmien käyttöön liittyvien oppi- materiaalien kehittäminen

Opinnäytetyö 2017

Tiivistelmä

Mauri Huttunen

WUFI-laskentaohjelmien käyttöön liittyvien oppimateriaalien kehittäminen, 33 sivua, 5 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelu

Opinnäytetyö 2017

Ohjaaja: lehtori Timo Lehtoviita, Saimaan ammattikorkeakoulu

Tässä opinnäytetyössä kehitettiin WUFI-laskentaohjelmien käyttöön liittyviä oppimateriaaleja luoden edellytykset itsenäiselle opiskelulle. Lisäksi opinnäytetyössä perehdytään rakennusfysikaalisiin perusilmiöihin sekä ohjelmien laskennan ja simuloinnin perustaan.

Oppimateriaalissa esitetään ohjelmien peruskäyttö: ohjelmien toiminnot, laskelmien kulku sekä yksityiskohtaisia laskentaesimerkkejä. Laskentaesimerkeissä tehtiin mallinnus WUFI Pro 5.3 -ohjelmalla betonisen sandwich-ulkoseinäelementistä ja puurunkoisesta tuuletusraollisesta ulkoseinäarakenteesta. WUFI 2D 3.4 -ohjelmalla tehtiin mallinnus tiiliseinän ja paikallavaletun betonilaatan välipohjaleikkauksesta sekä betonisokkelin ja maanvaraisen alapohjan perustusleikkauksesta. Opinnäytetyössä luotiin myös yksi englanninkielinen laskentaesimerkki.

Opinnäytetyössä havainnollistettiin tarkasti tavanomaisten komponenttien simulointia ja ohjelman käyttöä. Työn esimerkkilaskelmia käytetään Saimaan ammattikorkeakoulussa itsenäisen opiskelun perustana. Laskentaesimerkeistä tehtiin siksi mahdollisimman selkeitä ja yksinkertaisia, ja niissä käytettiin vain perusparametreja.

Jos oppimateriaalin laskentaesimerkkejä halutaan laajentaa ammattimaisiksi, tulee tutustua tarkemmin ohjelman laskentametodeihin ja -parametreihin. Laskennan suorittajan tulee aina varmistua laskentatulosten loogisuudesta ja laskennan puutteista sekä verrata tuloksia todellisiin olemassa oleviin rakenteisiin.

Asiasanat: rakennusfysiikka, hygroterminen, kosteus, lämpö, wufi

Abstract

Mauri Huttunen

Development of educational materials related to the use of WUFI calculation programs, 33 pages, 5 appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Construction and civil engineering

Civil engineering

Bachelor's Thesis 2017

Instructor: Mr Timo Lehtoviita, lecturer, Saimaa University of Applied Sciences

The main purpose of this thesis was to create a learning material for WUFI Pro 5.3 and WUFI 2D 3.4 to help engineering students in Saimaa university of applied sciences learn the use of the programs themselves. In addition the thesis takes a look at the basic building physics and foundation of WUFI's calculations.

The created learning material describes the basic use of the programs with detailed guidance and calculation examples.

Use of the programs and calculation for basic building components was illustrated in detail and accurately. Created example calculations and guides can be used as a basis for independent learning in civil engineering education. One WUFI Pro -example case was created also in English.

Example cases in learning material are made for basic use only. If the calculation examples are expanded for more experienced use it is necessary to ensure the accuracy of the results.

Keywords: building physics, hygrothermal, vapor, heat, wufi

Sisältö

1	Johdanto.....	5
2	Rakennusfysikaalinen suunnittelu.....	5
2.1	Kosteustekninen suunnittelu.....	6
2.1.1	Kosteuden painovoimainen siirtyminen.....	7
2.1.2	Kosteuden kapillaarinen siirtyminen.....	7
2.1.3	Kosteuden siirtyminen diffuusiolla.....	8
2.1.4	Kosteuden siirtyminen konvektiolla.....	9
2.1.5	Kosteuden kondensoituminen.....	9
2.1.6	Ulkopuoliset kosteusrasitukset.....	9
2.1.7	Viistosade.....	10
2.1.8	Maapohja.....	11
2.1.9	Sisäpuoliset kosteusrasitukset.....	12
2.2	Lämpötekniikka suunnittelu.....	12
2.2.1	Lämmön siirtyminen johtumalla (konduktio).....	13
2.2.2	Lämmön siirtyminen virtauksella (konvektio).....	13
2.2.3	Lämmön siirtyminen säteilyinä (emissio).....	14
2.2.4	Pintojen säteilyominaisuudet.....	14
2.3	Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen toteutus.....	16
3	Hygroterminen analysointi.....	18
3.1	WUFI.....	18
3.1.1	Laskentamalli.....	19
3.1.2	WUFI Pro.....	20
3.1.3	WUFI 2D.....	20
4	Laskennan kulku WUFI-ohjelmilla.....	20
4.1	Laskentaesimerkit.....	22
4.2	Laskentatulokset WUFI-ohjelmilla (Pro ja 2D).....	25
5	Tulosten analysointi.....	25
5.1	Laskennan virheet WUFI-ohjelmilla.....	25
5.2	Tulosten analysointi WUFI Pro:ssa.....	26
5.3	Tulosten analysointi WUFI 2D:ssä.....	27
6	Yhteenveto ja pohdinta.....	29
	Kuvat.....	31
	Kaaviot.....	31
	Taulukot.....	31
	Lähteet.....	32

Liitteet (ei julkaistu tämän raportin liitteinä)

- Liite 1 WUFI Pro 5.3, ohjelman peruskäyttö
- Liite 2 WUFI Pro 5.3, esimerkkilaskentaa
- Liite 3 WUFI Pro 5.3, example case (English)
- Liite 4 WUFI 2D 3.4, ohjelman peruskäyttö
- Liite 5 WUFI 2D 3.4, esimerkkilaskentaa

1 Johdanto

WUFI-laskentaa on hyödynnetty Saimaan ammattikorkeakoulussa jo 2000-luvun alusta lähtien. Opinnäytetyö syntyi tarpeesta päivittää rakennusfysikaalisen laskennan ohjelmistoa Saimaan ammattikorkeakoulussa kokonaan uudella ohjelmalla (WUFI 2D) sekä jo olemassa olevan ohjelman (WUFI Pro) uusilla versioilla.

Opinnäytetyön päätarkoituksena oli luoda laskentaesimerkkejä ja ohjeita WUFI-ohjelmien peruskäyttöön. Opinnäytetyö ei käsittele laajasti ohjelmien teoreettista pohjaa eikä saatujen laskentatulosten analysointia. Oppimateriaalia käytetään itsenäisen opiskelun tukena Saimaan ammattikorkeakoulussa rakennusfysiikan opinnoissa.

Tämän opinnäytetyö koostuu kahdesta osasta: raporttiosasta ja kehitetystä oppimateriaalista WUFI Pro- ja WUFI 2D -ohjelmiin. Tämä osa käsittelee rakennusfysikaalista suunnittelua, hygrotermistä analysointia, WUFI-laskentaohjelmien laskentatapaa, rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen toteutusta ja laskentatulosten analysointia. Näiden asioiden ymmärtäminen on edellytys rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen suorittamiselle. Itse laskennan kulku ja vaiheet WUFI-ohjelmilla kuvataan yksityiskohtaisesti oppimateriaalissa.

2 Rakennusfysikaalinen suunnittelu

Rakennusfysiikalla tarkoitetaan yleisesti rakennusten ja rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä akustiikkaa. Tässä opinnäytetyössä rakennusfysiikka käsittää vain lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan. Rakennusfysikaalissa suunnittelussa tarkastellaan sekä rakenteiden toimintaa että niiden vaikutusta rakennuksen olosuhteisiin ja ominaisuuksiin. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 17.)

Rakennusfysikaalinen suunnittelu kokonaisuudessaan edellyttää sekä rakenteellista suunnittelua että laskennallista tarkastelua. Todellisuudessa suurin osa rakennusfysikaalisesta suunnittelusta tapahtuu kuitenkin rakenteellisella suunnittelulla. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 17.)

Rakennusfysikaalisen suunnittelun tehtävä lämpötekniikan osalta on pienentää rakennuksen lämpöenergian kulutusta sekä parantaa rakennuksen lämpöviihtyvyyttä. Kosteusteknisellä suunnittelulla taas pyritään estämään ylimääräistä kosteutta rakenteissa, varmistetaan rakenteiden tarvittava kuivumis- kyky ja parannetaan rakennuksen kosteusviihtyvyyttä. (Vinha 2012, 343.)

Rakennusfysikaalisella suunnittelulla halutaan myös parantaa sisäilman laatua, rakennusvaipan ilmanpitävyyttä ja ehkäistä ilmavirtausten haittavaikutuksia rakennuksessa ja vaipparakenteissa. Lisäksi rakennusfysikaalisella suunnittelulla halutaan ehkäistä lämmöstä ja kosteudesta johtuvaa rakenteiden ja materiaalien pilaantumista. (Vinha 2012, 343.)

Laskentatarkasteluja voidaan tehdä esimerkiksi tässä opinnäytetyössä käytettä- viä WUFI-ohjelmia käyttäen. Laskentaohjelmista saatujen tulosten avulla voidaan tarkastella rakennetta halutulla ajanjaksolla halutuissa olosuhteissa. Tässä opin- näytetyössä rakennusfysikaaliset ilmiöt laskennallisessa tarkastelussa kuvataan niiltä osin, kun ne WUFI-ohjelmissa otetaan huomioon.

2.1 Kosteustekninen suunnittelu

Valtaosa rakennuksen kosteusteknisestä suunnittelusta on vaipparakenteiden kosteustekniikan toiminnan analysointia (Vinha 2012, 349). Suomen rakentamis- määräyskokoelmassa kosteutta käsittelevässä osassa C2 olennaisena vaati- muksena todetaan:

Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei siitä aiheudu sen käyttä- jille tai naapureille hygienia- tai terveysriskiä kosteuden kertymisestä rakennuk- sen osiin tai sisäpinnoille. Rakennuksen näiden ominaisuuksien tulee norma- lilla kunnossapidolla säilyä koko taloudellisesti kohtuullisen käyttöajan ajan. (Ym- päristöministeriö 1998, 3.)

Rakenteeseen kosteus- ja mikrobivaurioita syntyy, kun rakenteet ja materiaalit eivät kestä niihin kohdistuvia kosteusrasituksia. Se, missä rakenteen kosteusra- situksien sietokyvyn raja menee, ei ole yksiselitteinen. Hyvänä nyrkkisääntönä voidaan ainakin pitää sitä, että rakenteeseen ei saisi kertyä kosteutta pitkällä ai- kavälillä. (Ympäristöministeriö 2016, 101.)

Rakenteiden kosteusteknisen käyttäytymisen analysointi käsittää rakenteisiin kohdistuvien kosteusrasitusten ja rakenteiden kuivumisnopeuksien arvioinnin. Rakenteiden kosteusrasitukset ja kuivumiskyky perustuvat erilaisiin fysikaalisiin kosteuden siirtymismuotoihin ja niiden yhdistelmiin. Rakenteet tulee suojata painovoimaisesti, kapillaarisesti, konvektiolla sekä diffuusiolla siirtyvältä kosteudelta. Vaipparakenteen kuivumisen kannalta olennaista on tuuletusväli tai tuuletustila. Jos rakenteessa ei tällaista ole, täytyy tiiviiden pintojen välissä olla kosteutta kestäviä ja kuivia rakennusmateriaaleja. (Vinha 2012, 349.)

WUFI-ohjelmilla kosteuden painovoimaista siirtymistä tai sähkökentistä ja osmoottisista paineista syntyvää vesimolekyylien liikettä ei voida kuitenkaan vielä laskea tyydyttävällä tavalla. Samoin konvektion vaikutukset jätetään WUFI-laskennassa huomiotta. (WUFI-Wiki 2009.)

2.1.1 Kosteuden painovoimainen siirtyminen

Vesi kulkeutuu alaspäin rakennuksen pystysuorilla ja kaltevilla pinnoilla sekä rakennuksen viereisen maan pinnalla painovoiman vaikutuksesta. Kapillaarisilta ominaisuuksiltaan heikoissa materiaaleissa, esim. karkeassa sorassa, painovoimainen siirtyminen on hallitseva siirtymismuoto. Lisäksi ei-kapillaaristen materiaalien pinnoilla vesi valuu alaspäin. Veden painovoimainen siirtyminen mahdollistaa veden hallitun johtamisen pois rakenteiden ulko- ja sisäpinnoilta sekä rakennuksen vierustoilta. Lisäksi se mahdollistaa rakennuksen kuivattamisen salaojituksella. Haitallista painovoimaista siirtymistä esiintyy yleensä raoissa, saumoissa ja halkeamissa. (Ympäristöministeriö 2016, 112-113.)

WUFI-ohjelmat eivät huomioi tätä ilmiötä laskennassa.

2.1.2 Kosteuden kapillaarinen siirtyminen

Veden kapillaarista siirtymistä esiintyy rakennustekniikassa aina, kun huokoinen rakenne on kosketuksessa veteen tai kapillaarisessa kontaktissa toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan aineeseen tai maaperään. Myös kosteuden kondensoituminen rakenteeseen tai sen pinnoille mahdollistaa veden kapillaarisen siirtymisen rakenteissa. Kapillaarinen siirtyminen johtuu kapillaaristen voimien aiheuttamasta huokosalipaineesta. Huokosalipaineen suuruuteen vaikuttaa

huokosen koko. Mitä pienempi huokonen on, sitä suurempi huokosalipaine on. Vesi voi siirtyä huokoisissa materiaaleissa kapillaarisesti pysty- sekä vaakasuunnassa. (Ympäristöministeriö 2016, 111.)

WUFI käyttää laskennassa kahta erillistä kapillaaristen ominaisuuksien kerrointa (liquid transport coefficient) kapillaarisille materiaaleille. Näitä arvoja käytetään riippuen reunaehdoista (sade / ei sadetta). Nämä kertoimet ovat:

- kapillaariset ominaisuudet, absorptiota ($DWS [m^2/s]$), joka kuvaa veden kapillaarista imeytymistä, kun imevä pinta on kokonaan kastunut
 - kapillaariset ominaisuudet, uudelleen jakautuminen ($DWW [m^2/s]$), joka kuvaa absorptoituneen veden jakautumista, kun absorptio on loppunut.
- (WUFI Online help 2016, 15.)

2.1.3 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla

Diffuusiossa kosteus siirtyy suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempää pitoisuuteen ilman vesihöyryn osapaine-erojen vaikutuksesta. Vesihöyryn kulkuun vaikuttaa vesihöyrypitoisuuseron lisäksi rakennusmateriaalin vesihöyrynvastus. Rakennusmateriaalien suurten vesihöyrynläpäisevyyserojen takia kerroksellisen rakenteen kosteustekninen toiminta on syytä tutkia tapauskohtaisesti. (Ympäristöministeriö 2016, 113-115.)

WUFI käyttää laskennassa kahta suuretta kuvaamaan vesihöyryn diffuusiota. Nämä suureet ovat:

- vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (μ), kosteudesta riippuva, joka on määritetty kaikille materiaaleille
 - höyryn diffuusiopakkuus (S_d -arvo [m]). Arvo saadaan kertomalla diffuusiovastuskerroin μ materiaalin paksuudella metreinä. S_d -arvo kuvastaa vesihöyryn vastusta ilmakerroksen läpi. WUFI-ohjelmilla S_d -arvo määrittyy ulomman ja sisimmän rakennekerroksen pinnoitteen mukaan.
- (WUFI Online help 2016, 17.)

2.1.4 Kosteuden siirtyminen konvektiolla

Konvektiossa kosteus siirtyy ilmavirran mukana, joka syntyy ilman kokonaispaine-eron vaikutuksesta. Ilma virtaa suuremmasta paineesta pienempään. Virtauksen saavat aikaan ilmanvaihto, lämpötilaerot ja tuuli tai näiden yhteisvaikutus. Virtauksen määrä riippuu paine-eron lisäksi rakennusmateriaalin ilmanläpäisevyydestä ja rakenteessa olevien rakojen virtausvastuksesta. (Ympäristöministeriö 2016, 115.)

WUFI-ohjelmat eivät huomioi tätä ilmiötä laskennassa.

2.1.5 Kosteuden kondensoituminen

Kondensoituminen on ilmiö, jossa ilman sisältävä vesihöyry tiivistyy vedeksi. Kondensoituminen tapahtuu, kun tiivistymiskohdan lämpötila on alhaisempi kuin ilman kastepistelämpötila. Diffuusio siirtää kosteutta alemman vesihöyrypitoisuuden suuntaan, ja kun kylmempi ilma ei voi kosteutta sitoa, se tiivistyy.

WUFI-laskennassa veden kanssa kosketuksissa oleva kapillaarinen materiaali absorptoi tätä vettä, kunnes se saavuttaa vapaan vesikyllästykseen (w_f [kg/m^3]). Tämä vesipitoisuus w_f vastaa kosteuskapasiteettifunktiota suhteellisessa kosteudessa 1 (100%). Huokoisen materiaalin ilmataskuista johtuen vapaa vesikyllästys on huokoisessa kuitenkin pienempi kuin materiaalin suurin mahdollinen vesipitoisuus (w_{max} [kg/m^3]). Kosteuspitoisuus voi ylittää vapaan vesikyllästyspisteen esimerkiksi lämpötilavaihteluille alttiissa materiaalissa. (WUFI Online help 2016, 14.)

Vapaa vesikyllästys w_f on tunnettu useimmille materiaaleille ja on määritetty WUFI-ohjelmien materiaaliominaisuuksiin. Materiaaliominaisuuksiin luetaan myös "kosteuspitoisuus, 80%-rh" (W_{80} [kg/m^3]), joka vastaa kosteuspitoisuutta suhteellisen kosteuden ollessa RH 80 %. (WUFI Online help 2016, 14)

2.1.6 Ulkopuoliset kosteusrasitukset

Rakennuksen ulkovaipan tulee suojata sisätiloja ulkoilman kosteusrasituksilta sekä eristää lämpöä ja ääntä. Rakennuksen ulkopuolelta rakennukseen kohdis-

tuu maaperän kosteusrasitus sekä sade- ja sulamisvesien rasitus. Vaipparakenteen ulommaisen rakennekerroksen tulee suojata rungon kantavia rakenteita liialliselta kosteudelta. Kantavuuden säilymisen lisäksi rungon pitäisi säilyä puhtaana mikrobikasvusta, jottei siitä aiheudu epäpuhtauksia sisäilmaan. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 39.)

2.1.7 Viistosade

Viistosaderasituksen määrään ulkoseinärakenteessa vaikuttavat vapaan viistosateen määrä, rakennuksen muoto, koko sekä tarkasteltavan kohdan sijainti rakennuksessa, rakennuksen maantieteellinen sijainti sekä paikalliset olosuhteet, kuten tuuli, maastonmuodot, kasvillisuus ja ympäröivät rakennukset. Korkeisiin rakennuksiin kohdistuu matalia rakennuksia suurempi viistosademäärä. Saderasituksen määrää voidaan pienentää rakennuksen suojaavilla yksityiskohdilla, kuten räystäillä ja katoksilla. (Betoniteollisuus ry 2016.)

Tuulesta johtuvat ilmavirtaukset kuljettavat seinärakenteen pinnalla valuvaa vettä myös sivuille ja jopa ylöspäin esimerkiksi räystäsrakenteisiin, saumoihin, rakoihin ja halkeamiin, joista taas vesi kulkeutuu konvektiolla rakenteiden sisään (Betoniteollisuus ry 2016).

WUFI -laskennassa viistosateen kertoimia käytetään arvioitaessa viistosateen aiheuttama kuormitus rakennusosaan. Viistosateen kertoimet ovat R1 ja R2. Kertoimiin vaikuttaa suunta, kaltevuus, normaali sade, tuulen nopeus ja keskimääräinen tuulen suunta. Viistosateen aiheuttama kuormitus saadaan kaavalla 1, jossa "sade" on normaali sade ja "tuulen nopeus" on keskimääräinen tuulen nopeus (10 m korkeudessa, avoimella alueella), joka on kohtisuorassa rakennuksen pintaan.

$$\text{viistosateen kuormitus} = \text{sade} * (R1 + R2 * \text{tuulen nopeus}) \quad (1)$$

Tuulen nopeus määritetään keskimääräisen tuulen nopeuden ja keskimääräisen tuulen suunnan avulla. Tiedot normaalista sateesta, tuulen nopeudesta ja tuulen suunnasta luetaan yksityiskohtaisista valitun sijainnin paikallisista sää tiedoista. (WUFI Online help 2016, 62.)

R1 ja R2 ovat riippuvaisia rakenteen kallistuskulmasta sekä rakenteen sijainnista rakennuksen julkisivulla. Pystypinnoille R1 on nolla. R2 on noin 0,2 s/m avoimella alueella ilman ympäröivien rakennusten vaikutusta, esimerkiksi korkean rakennuksen yläosassa. R2 on selvästi vähemmän matalassa rakennuksessa ja korkean rakennuksen matalalla osalla. (WUFI Online help 2016, 62.)

Sateen adsorptiokerroin otetaan huomioon se, että osa kaltevalle pinnalle osuneesta sadevedestä kimpoaa seinäpinnasta pois osuessaan siihen. Sateen absorptiokerroin riippuu pinnan karheudesta, suunnasta ja kaltevuudesta sekä siitä, minkä tyyppistä sade on (vesi / lumi). (WUFI Online help 2016, 27.)

Vaakasuorille pinnoille sateen absorptiokerroin on yleensä 1, sillä vaakasuoralta pinnalta kimmonnut pisara putoaa takaisin pinnalle. Pystypinnoille kerroin on lähes 0 lumelle ja rakeille, vedelle kerroin täytyy arvioida. Arvo 0,7 on toimiva lähtökohta. (WUFI Online help 2016, 27.)

2.1.8 Maapohja

Maanvastaisia rakenteita rasittaa maapohjan kosteus. Tämä kosteus johtuu pohjavedestä tai sade- ja sulamisvesistä. Maapohjan kosteusrasitusta perustuksiin hillitään rakennusta ympäröivän maanpinnan kallistuksilla, salaojituksella sekä veden- ja kosteudeneristyksellä. Maanvastaisten rakenteiden suunnittelussa tulee huomioida myös maaperän sisältämän huokosilman korkea suhteellinen kosteus. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 40.)

WUFI-laskennassa komponentin ollessa kosketuksissa maahan (esimerkiksi kellarin seinä) voi olla hyödyllistä käyttää mitattuja maaperän lämpötiloja reunaehtoina. Lämmönsiirtokerroin tälle komponentin pinnalle tulee määrittää suureksi. WUFI lukee asetettua lämpötilaa vastaavan lämpötilan ilmastotiedostosta ja käyttää sitä ympäröivän lämpötilan laskennassa; suuri lämmönsiirtokerroin huolehtii siitä, että pinnan lämpötila on sama kuin maa-aineksen. (WUFI Online help 2016, 66.)

Maaperässä, jossa on kasvillisuutta, on yleensä vähintään RH 99 %:n suhteellinen kosteus. Maahan kosketuksissa olevien komponenttien simuloinnissa WUFI käyttää suhteellisen kosteuden vakiota reunaehtona, jonka arvo voidaan

syöttää halutunlaiseksi. Jos pohjaveden (paineeton) vaikutusta halutaan simuloida, on syytä käyttää tätä varten sopivaksi muokattua ilmastotiedostoa. (WUFI Online help 2016, 66.)

2.1.9 Sisäpuoliset kosteusrasitukset

Rakennuksen vaipparakenteita rasittaa sisäpuolelta sisäilman kosteus, joka pyrkii tasaantumaan diffuusiolla ulkoilmaan. Vaipparakenteita rasittaa myös kosteuden kulkeutuminen konvektiovirtausten mukana rakennuksen sisältä ulos ja märkätiloista aiheutuva suora kosteusrasitus. Rakenteet tulee suojata vesihöyryn diffuusiolta ja konvektiolta, esimerkiksi höyrynsulkumuovilla. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 40.)

WUFI-laskennassa sisäilman olosuhteiden simuloinnille on neljä tapaa:

- Sinikäyrillä simulointi, jos lyhyen aikavälin ilmastovaihtelut eivät ole tärkeitä. Lämpötila ja suhteellinen kosteus mallinnetaan keskiarvoilla.
- EN 13788 –standardi. WUFI johtaa suhteellisen kosteuden annetusta ulkoilman säätiedostosta, mutta pitää sisälämpötilan vakiona ympäri vuoden.
- EN 15026 –standardi. Sisälämpötila ei ole vakio vaan nousee kesäisin ulkolämpötilan tasolle ja pysyy lämmityskaudella 20 °C:ssa. Sisäilman suhteellinen kosteus määräytyy ulkoilman mukaan, mutta sisäilman kosteuskuorma voidaan valita normaaliksi tai korkeaksi.
- ASHRAE 160 –standardi perustuu ulkoilman säätietoihin, mutta ottaa huomioon simuloinnissa ilmastointijärjestelmän (lämmitys ja jäähdytys), suhteellisen kosteuden tuotot, ilmanvaihtokertoimen ja rakennustilavuuden. (WUFI Online help 2016, 63.)

2.2 Lämpötekniinen suunnittelu

Vaipparakenteen lämpötekniiseen toimintaan vaikuttavat sisäiset, rakenteelliset sekä ulkoiset tekijät. Sisäisiä tekijöitä ovat muun muassa käytettyjen rakennusaineiden lämmönjohtavuus, vesihöyryn- ja ilmanläpäisevyys sekä muodonmuutosominaisuudet. Rakenteellisia tekijöitä ovat muun muassa rakenne- ja liitosrat-

kaisut, rakenteen osien koko ja työn laatu. Ulkoisia tekijöitä ovat esimerkiksi lämpötila-, kosteus- ja tuuliolosuhteet, rakennuksen painesuhteet sekä auringon säteily. (Betoniteollisuus ry 2016.)

Vaipparakenteen lämpöteknisessä analysoinnissa tulee tuntee lämmön siirtymismuodot ja pintojen säteilyominaisuudet. Lämpöenergia siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmön siirtymisen kolme eri tapaa huokoisessa aineessa ovat johtuminen, konvektio ja säteily.

2.2.1 Lämmön siirtyminen johtumalla (konduktio)

Lämpö siirtyy kiinteässä aineessa korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Siirtymiseen vaikuttavat väliaineen ominaisuudet, paksuus sekä lämpötilaero. Johtuminen on rakenteen sisällä tapahtuvista lämmönsiirtymisilmiöistä oleellisin. Siirtyvään lämpöenergiaan vaikuttaa materiaalin lämmönjohtavuus. (Sisäilmayhdistys ry 2016.)

WUFI-laskennassa lämmönjohtavuudet (kosteudesta ja lämpötilasta riippuva) saadaan materiaalitiedoista.

2.2.2 Lämmön siirtyminen virtauksella (konvektio)

Konvektiota tapahtuu sekä luonnollisesti että pakotetusti. Luonnollinen konvektio johtuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista. Lämpimän pinnan lähellä ilma lämpenee, ja koska lämmin ilma on kylmää ilmaa kevyempää, lämmin ilma nousee ylöspäin. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Erityisesti ulkoseinärakenteissa on yleensä kyse molempien konvektiotapojen yhteisvaikutuksesta. Yleensä lämpö siirtyy konvektiolla rakenteen läpi, lämmöneristeen sisällä sekä tuuletusraossa. (Siikanen 2012, 78; Betoniteollisuus ry 2016.)

WUFI Pro -laskennassa lämmönvastus (m^2K/W) kuvaa konvektiosta ja pitkäaaltoisesta säteilystä aiheutuvaa lämmönsiirtoa rakenteen ja ympäristön välillä. Lämmönvastus valitaan mallinnettavan rakennetyypin mukaan (ulkoseinä, katto, kellari) tai määritetään käsin. Lämmönvastus on WUFI 2D -laskennassa käytettävän konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen käänteisluku. (WUFI Online help 2016, 21.)

WUFI 2D -laskennassa lämmön siirtyminen konduktiolla on liitetty konvektioon yhdeksi parametriksi. Numeerinen arvo konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle on monimutkainen määrittää. Se on riippuvainen lämpötilasta, mahdollisen ilmavirtauksen suuruudesta ja suunnasta sekä seinäpinnan luonteesta. Vain karkeat arvot voidaan antaa yleisistä tapauksista. Luonnollisessa konvektiossa lämmönsiirtokerroin on 3–10 W/m²K, pakotetussa konvektiossa (esimerkiksi tuuli) noin 10–100 W/m²K. (WUFI Online help 2016, 21.)

2.2.3 Lämmön siirtyminen säteilynä (emissio)

Säteily on rakenteen ulkopuolella tapahtuvista lämmönsiirtymisilmiöistä oleellisin. Säteily tarkoittaa hiukkasten tai energian siirtymistä säteilevästä kohteesta ympäristöön tai toiseen kohteeseen ilman väliainetta. Lämpösäteily on kappaleen pinnalta lähtevää sähkö-magneettista säteilyä. Tavallisimmat rakennusmateriaalit ottavat lämpösäteilystä vastaan keskimäärin 90 %, loput 10 % heijastuu. Musta pinta vastaanottaa lähes 100 % lämpösäteilyä, kun taas kiiltävä alumiini vain 3 %. Lämpösäteily jaetaan pitkä- ja lyhytaaltoiseen säteilyyn. Kaikki aineet ja materiaalit lähettävät pitkäaaltoista lämpösäteilyä, kun niiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen (0 kelviniä eli –273,15 celsiusastetta) yläpuolella. Hehkuvan kuumat kappaleet, esimerkiksi Aurinko, lähettävät myös lyhytaaltoista lämpösäteilyä. (Sisäilmayhdistys ry 2016; Tampereen teknillinen yliopisto 2013, 22.)

WUFI-laskennassa lämpösäteily simuloidaan pinnan säteilyominaisuuksilla.

2.2.4 Pintojen säteilyominaisuudet

Rakennuksen pintojen säteilyominaisuudet vaikuttavat lyhyt- ja pitkäaaltoisen lämpösäteilyn absorptoitumiseen (vastaanottamiseen), heijastumiseen ja läpäisevyyteen sekä pintojen emittoimaan (lähettämään) pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 34.)

Pinnan vaikutusta sen emittoimaan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrään kuvataan emissiviteetillä. Mitä suurempi pinnan emissiviteetti on, sitä enemmän pinta emittoi lämpösäteilyä. Tällä on sitä suurempi merkitys, mitä enemmän pinnan lämpötila poikkeaa ympäröivien pintojen lämpötilasta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa voidaan olettaa, että pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetti on sama

kuin säteilyn absorptiokerroin, eli pinnan absorboiman pitkäaaltoisen säteilyn osuus. Pinnan absorptiokertoimen maksimiarvo on 1,0, joka voidaan saavuttaa ainoastaan teoreettisella mustalla kappaleella. Valtaosalla rakennusmateriaaleista pinnan emissiviteetti on suuri absorptiokertoimen vaihdellen tyypillisesti välillä 0,8–0,9. Alhainen emissiviteetti on esimerkiksi kirkailla ja kiiltävillä alumiini- ja kuparipinnoilla. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 34.)

Esimerkki pitkäaaltoisen säteilyn vaikutuksesta on rakennuksen ulkopinnoista tai-vaalle lähtevä säteily. Tästä johtuen rakennusten ulkopinnat ovat ajoittain ulkoil-maa kylmempiä, jolloin homehtumis- ja kondensoitumisriski rakenteiden ulko-osissa kasvaa. Tätä ilmiötä voidaan vähentää ulkopintojen emissiviteettiä pienen-tämällä, esimerkiksi lisäämällä puurunkoisen ulkoseinän puuverhouksen taustan tuuletusta. Sisäpintojen pienellä emissiviteetillä voidaan taas vähentää lämmön siirtymistä ulkovaipan rakenteiden läpi, esimerkiksi saunatiloissa alumiinipintai-sen höyrynsulun käytöllä. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 35.)

Lyhytaaltoisen auringosta tulevan lämpösäteilyn absorptiokerroin eroaa pitkäaal-toisen säteilyn absorptiokertoimesta huomattavasti. Lyhytaaltoisen lämpösäteilyn absorptiokertoimeen vaikuttaa pinnan väritys. Vaalean värisillä materiaaleilla ly-hytaaltoisen lämpösäteilyn absorptiokerroin on alhainen ja tumman värisillä ma-teriaaleilla korkea. Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin sijoittuu yleensä vä-lille 0,4–0,9. Tummia pintoja käytetään yleensä silloin, kun auringonsäteilyn ab-sorptoitumista halutaan tehostaa. Käytännön sovelluksena tästä esimerkiksi au-rinkopaneelit. Tummat pinnat toisaalta nopeuttavat muun muassa puupintojen ikääntymistä, halkeilua ja maalien irtoamista, pinnan voimakkaasta lämpenemi-sestä ja suurista lämpötilavaihteluista johtuen. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 35.)

WUFI-laskennassa pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin ohjaa säteilyn emittoi-tumista ja absorptoitumista. WUFI yleensä jättää tämän kertoimen huomiotta ja sille voidaan turvallisesti asettaa arvo 0. Jos käytettävä ilmastotiedosto on muo-toa .TRY tai .DAT, WUFI käyttää emissiokerrointa arvioidakseen yöaikaisen sä-teilyjäähdytyksen. Ilmiön tarkka arviointi voi kuitenkin edellyttää tarkkoja vas-tasäteilyn säätietoja, eikä ilmiön huomiointia laskennassa yleensä suositella. (WUFI Online help 2016, 61.)

Lyhytaaltoisen säteilyn vaikutukset WUFI-ohjelmissa huomioidaan lyhytaaltoisella absorptiokertoimella. Kerroin indikoi sitä osaa auringon säteilyn kokonaismäärästä (näkyvä ja ei-näkyvä), joka absorptoituu. WUFI laskee säteilystä johtuvan pystysuoran rasituksen pinnalle ilmastotiedoston datasta, kertoo sen lyhytaaltosäteilyn säteilyn absorptiolla ja soveltaa tulosta lämmönlähteenä komponenttiin. (WUFI Online help 2016, 25.)

2.3 Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen toteutus

Rakennusfysikaalisessa laskennassa mallinnetaan lämmön, ilman- ja kosteusensiirron ilmiöitä ja niiden vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, sisäilman olosuhteisiin ja rakennusten energiankulutukseen. Kuitenkaan kaikkia seikkoja ei voida kuvata laskennassa laskentaohjelmien yksinkertaistuksien ja puutteiden vuoksi, vaan laskennan tulokset eroavat todellisesta tilanteesta erojen voidessa olla merkittäviäkin. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 54.)

Sama pätee myös rakennusfysikaalisiin tutkimuksiin. Rakennusfysikaalisen laskennan mallinnus on noussut merkittävään asemaan rakennusfysikaalisissa tutkimuksissa. Mallinnuksen avulla voidaan arvioida rakennusmateriaalien, rakenteiden ja rakennusten toimintaa nopeasti ja helposti esimerkiksi laboratoriokokeisiin verrattuna. Lopulta luotettavia tuloksia saadaan tarkastelemalla tutkittavaa asiaa sekä laskennallisesti että kokeellisesti. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 54.)

Rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun yleinen toteutusperiaate on esitetty taulukossa 1. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 55) Yksinkertaisimmassa laskentatarkasteluissa taulukossa 1 esitettyjä periaatteita sovelletaan.

<p>1. LASKENTATEHTÄVÄN JA TARKASTELUPERIAATTEIDEN MÄÄRITTELY</p> <ul style="list-style-type: none"> — tarkasteltavan rakenteen tai rakennuksen määrittely — tarkasteltavien ilmiöiden ja tarvittavien lähtötietojen määrittely — tulosten tarkkuuden määrittely — varmuuden huomioon ottaminen laskentatarkasteluissa
<p>2. TOIMINTAKRITEERIEN JA NIIHIN LIITTYVIEN RAJA-ARVOJEN VALINTA</p> <ul style="list-style-type: none"> — kriittisimmät tekijät, jotka aiheuttavat terveys- ja viihtyvyyshaittoja ja lisäävät rakenteen vaurioitumisriskiä — muu tavoiteltu ominaisuus (esim. U-arvo tai energiankulutus) — käytettävissä olevat vertailusuureet ja matemaattiset mallit toimintakriteerin mukaisen ilmiön kuvaamiseen — toimintakriteerejä kuvaaville vertailusuureille asetettavat raja-arvot
<p>3. ULKO- JA SISÄYMPÄRISTÖN OLOSUHEIDEN MÄÄRITYS</p> <ul style="list-style-type: none"> — ulkoilman testivuosien valinta valittujen toimintakriteerien mukaisesti — ulkoilman säätietoihin tehtävät tarkennukset ja mikroilmaston vaikutukset — ilmastomuutoksen vaikutukset — tarkasteltavat ilmansuunnat — sisäilman olosuhteet — rakennusaikaiset olosuhteet — pitkäaikaistarkasteluissa (osin käyttöikä- ja kuivumistarkastelut) käytettävät olosuhteet — maaperän olosuhteet
<p>4. LASKENTAMENETELMÄN TAI -OHJELMAN VALINTA</p> <p>Menetelmän tai ohjelman valintaan vaikuttavat mm:</p> <ul style="list-style-type: none"> — tarkasteltava rakenne tai rakennus — tarkasteltava ilmiö tai vaurioitumisriski — käytettävissä olevat lähtötiedot ulko- ja sisäympäristön olosuhteista — halutut tulokset ja niiltä vaadittava tarkkuus — menetelmän tai ohjelman ominaisuudet, käytettävyys ja laskentanopeus — kokemukset ja tiedot menetelmän tai ohjelman toiminnasta
<p>5. MATERIAALIOMINAISUUKSIEN MÄÄRITYS</p> <ul style="list-style-type: none"> — tärkeimmät ominaisuudet — kehittyneemmillä testimenetelmillä saadut uusimmat mittauserot — käytettävien materiaalien omat mittaustulokset — materiaaliominaisuuksien vaihtelu (valmistuserät, lämpötila, suhteellinen kosteus, ikä) — laskentaohjelmassa käytettävät oletuserot
<p>6. TARKASTELTAVAN RAKENTEEN TAI RAKENNUKSEN MALLINTAMINEN</p> <ul style="list-style-type: none"> — tarkasteltavan rakenteen tai rakennuksen kuvaaminen — tarkastelussa käytettävien lämmön- ja kosteudensiirtymismuotojen valinta — ulko- ja sisäympäristön olosuhteiden kytkeminen malliin — materiaaliominaisuuksien kytkeminen malliin — kosteusvuotojen ja virheiden huomioon ottaminen laskentatarkasteluissa — laskennan tarkkuuteen ja laskenta-aikaan vaikuttavien tekijöiden valinta — alkuolosuhteiden ja tarkastelujakson pituuden valinta — seurattavien suureiden ja tarkastelupisteiden valinta
<p>7. TARKASTELTAVIEN SUUREIDEN RATKAISEMINEN</p>
<p>8. LASKENTATULOSTEN ANALYYSINTI</p> <ul style="list-style-type: none"> — laskennan yksinkertaistuksien ja muiden puutteiden huomioon ottaminen — laskentaohjelman virheilmoitukset ja laskennan epäloogisuudet — herkkyystarkastelut, vertailu ja tarkistuslaskelmat — stokastiset tarkastelut

Taulukko 1. Rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun toteutus (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 55)

3 Hygroterminen analysointi

Rakennusfysikaalisen suunnittelun onnistumiseksi on välttämätöntä ymmärtää kosteusominaisuudet ja kosteuden vaikutukset. Pitkäaikainen altistuminen korkeille kosteusolosuhteille voi vaurioittaa rakennuksen osia ja aiheuttaa merkittäviä terveys- ja hygieniaongelmia, esimerkiksi homekasvusta johtuvia sairauksia. (WUFI 2016.)

Lämpö- ja kosteusolosuhteet sekä lämmön ja kosteuden siirtyminen rakennuksissa ja rakenteissa ovat yhteydessä toisiinsa. Tiedetään, että korkeat kosteuspitoisuudet johtavat lämpöhäviöihin, kun taas lämpötilaolosuhteet vaikuttavat kosteuden siirtymiseen. Lämmön ja kosteuden yhteistoiminnan tutkintaa kutsutaan hygrotermiseksi analysoinniksi. (WUFI 2016.)

Aiemmin komponenttien hygrothermistä soveltuvuutta on arvioitu ns. Glaser-menetelmällä, joka analysoi vesihöyryn diffuusion liikettä komponentissa. Tämä menetelmä ei ota kuitenkaan huomioon kapillaarista kosteuden siirtymistä eikä komponentin sorptiokykyä, jotka molemmat vähentävät vahinkojen syntymisen riskiä vesihöyryn kondensoituessa. Glaser-menetelmä antaa vain karkean arvion kerrosrakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta, eikä sillä voi simuloida lämpö- ja kosteusolosuhteita komponentissa, joka altistuu halutun yksittäisen sijainnin todellisille ilmasto-olosuhteille. Hygrotermisten simulointiohjelmien kehitys on luonut uusia mahdollisuuksia realistiselle analysoinnille. (Stora Enso 2013.)

3.1 WUFI

WUFI-laskentaohjelmat ovat tarkoitettu rakennusten osien hygrotermisen toiminnan tarkasteluun epästationäärisissä (ajasta riippuvissa) tilanteissa. WUFI-ohjelmien ajasta riippuvassa laskennassa ympäristön olosuhteet muuttuvat ajan mukana. Olosuhteiden muutokset tulevat paikallisista arkistoiduista ilmastotiedoista. Ohjelma käyttää kontrollitulavuusmenetelmää (FVM) numeerisessa laskennassa. WUFI-ohjelmaperheen on kehittänyt Fraunhofer-instituutin rakennusfysiikan tutkimuslaitos (IBP). (Rafnet-ryhmä 2004, 6.)

3.1.1 Laskentamalli

WUFI-laskentaohjelmissa käytetään kytkettyjä differentiaaliyhtälöitä 2 (lämpö) ja 3 (kosteus) lämmön- ja kosteudensiirron laskennassa,

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) \quad (3)$$

joissa D_w [m²/s] = "kapillaariset ominaisuudet"

H [J/m³] = kostean materiaalin entalpia

h_v [J/kg] = veden höyrystymisentalpia

p [Pa] = vesihöyryn osapaine

u [m³/m³] = vesipitoisuus

δ [kg/msPa] = vesihöyryn diffuusiokerroin ilmassa

ϑ [°C] = lämpötila

λ [W/mK] = kostean materiaalin lämmönjohtavuus

μ [-] = kuivan materiaalin vesihöyryn diffuusiovastuskerroin

ρ_w [kg/m³] = veden tiheys

φ [-] = suhteellinen kosteus

(WUFI-Wiki 2009).

3.1.2 WUFI Pro

WUFI Pro (yksiulotteinen) on tarkoitettu rakennusten vaipan osien hygrotermiseen tarkasteluun epästationäärisissä tilanteissa. WUFI:lla voidaan tutkia rakenteeseen joutuneen kosteuden tai alkukosteuden kuivumisaikoja, sisäisen kondenssin riskiä erityyppisissä rakenteissa, rakenteiden kosteuspitoisuuksia pitkällä aikavälillä ja viistosateen merkitystä rakennekomponentteihin. (WUFI 2016.)

Ohjelma käyttää arkistoituja säätietoja paikallisten olosuhteiden simulointiin. WUFI sisältää laajan kirjaston materiaaleja ja säätietoja ympäri maailmaa. Simuloinnin tuloksena saadaan rakenneleikkauksen kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus tunneittain muuttuvissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa: kaavioita kosteuspitoisuudesta koko mallinnetun komponentin sekä kunkin komponentin yksittäisen kerroksen osalta. Tuloksena saadaan lisäksi kuvaajia lämpötiloista ja suhteellisesta kosteudesta. (Parker & Lozinsky 2009, 7.)

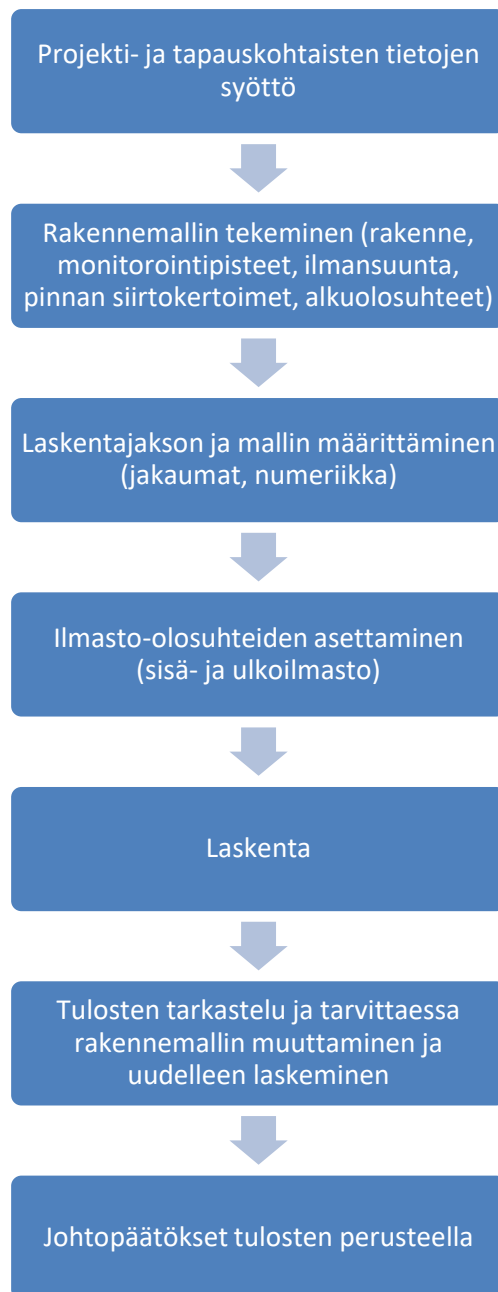
3.1.3 WUFI 2D

WUFI 2D laajentaa WUFI-laskennan kaksiulotteiseen analyysiin. Erityisesti kaksiulotteinen analyysi on välttämätöntä monimutkaisissa geometrioissa, kuten rakennusten kulmissa, ikkunoiden sijainneissa ja perustuksissa, ja jos kyse on erilaisista lämmön ja kosteuden lähteistä. (WUFI 2016.)

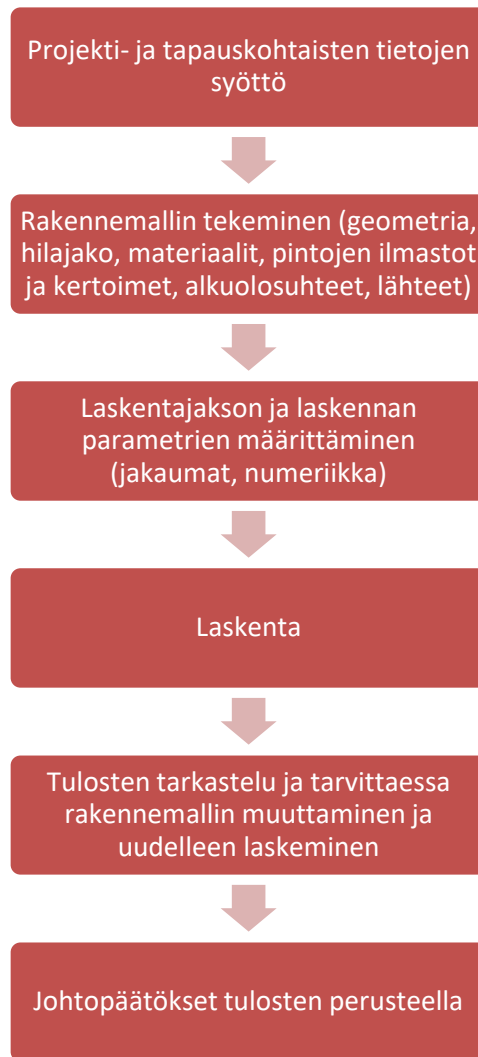
Simuloinnin tuloksena saadaan rakenneleikkauksen kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus tunneittain muuttuvissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa WUFI Pron kaltaisesti.

4 Laskennan kulku WUFI-ohjelmilla

Ohjeita, laskennan kulku ja esimerkkilaskentaa WUFI Pro- ja WUFI 2D -ohjelmilla on esitelty yksityiskohtaisemmin tämän opinnäytetyön oppimateriaaliosassa. Laskennan kulku kuvataan lyhyesti seuraavissa kuviossa 1 (WUFI Pro) ja 2 (WUFI 2D).



Kuvio 1. WUFI Pro –laskennan kulku.



Kuvio 2. WUFI 2D –laskennan kulku

4.1 Laskentaesimerkit

Tässä opinnäytetyössä tehtiin neljä erilaista laskentaesimerkkiä WUFI-ohjelmilla. Ensimmäinen WUFI Pro –laskuesimerkki tehtiin myös englanninkielisenä. Laskentaesimerkeissä suoritettiin laskennallinen mallinnus WUFI Pro 5.3 -ohjelmalla betonisen sandwich-ulkoseinäelementistä (Kuva 1) ja puurunkoisesta tuuletusrakenteesta (Kuva 2). WUFI 2D 3.4 -ohjelmalla suoritettiin laskennallinen mallinnus tiiliseinän ja paikallavaletun betonilaatan välipohjaleikkauksesta (Kuva 3) sekä betonisokkelin ja maanvaraisen alapohjan perustusleikkauksesta (Kuva 4). Kaikkien laskentaesimerkkien tulokset olivat loogisia ja uskottavia.

ESIMERKKILASKENTA 1

BETONINEN SANDWICH -ULKOSEINÄRAKENNE

- Tehtävänä on tarkastella betonisen sandwich-ulkoseinäelementin kosteusteknistä toimintaa, erityisesti sisäisen kondenssin riskiä rakenteessa ja rakenteen kuivumista kesäkauden aikana.
- Lähtötiedot

Rakenne:

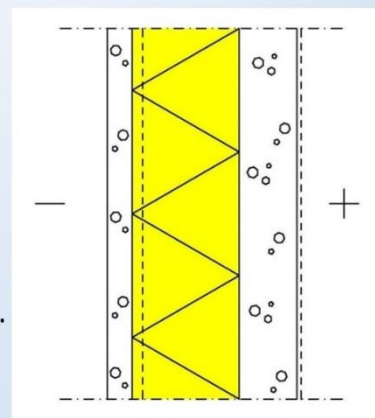
80 mm ulkokuori

160 mm mineraalivilla-lämmöneriste

150 mm sisäkuori

Sijainti: Espoo

Ulkopintana ikääntynyt mineraalirappaus.



Kuva 1. WUFI Pro, esimerkkilaskenta 1.

ESIMERKKILASKENTA 2

Puurunkoinen tuuletusraollinen ulkoseinä

- Tehtävänä on tarkastella puurunkoisen tuuletusraollisen ulkoseinän kosteusteknistä toimintaa
- Lähtötiedot

Rakenne:

20 mm ulkoverhous (kuusi, säteen suunta)

25 mm tuuletusrako

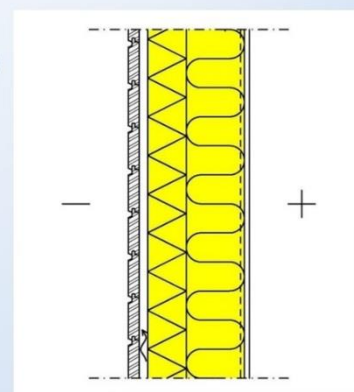
50 mm tuulensuojalevy

150 mm mineraalivilla

1 mm höyrönsulku (ISOVER VARIO KM Duplex)

13 mm kipsilevy

Sijainti: Espoo



Kuva 2. WUFI Pro, esimerkkilaskenta 2.

ESIMERKKILASKENTA 1

VÄLIPOHJALEIKKAUS: TIILISEINÄ JA PV BETONILAATTA

- Tehtävänä on tarkastella komponentin kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa, erityisesti betonilaatan kuivumisaikaa.
- Lähtötiedot

Seinärakenne:

10 mm rappaus

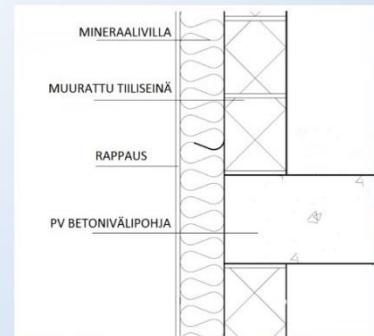
100 mm mineraalivilla-lämmöneriste

240 mm tiiliseinä

Välipohja:

200 mm betonilaatta

Sijainti: Espoo



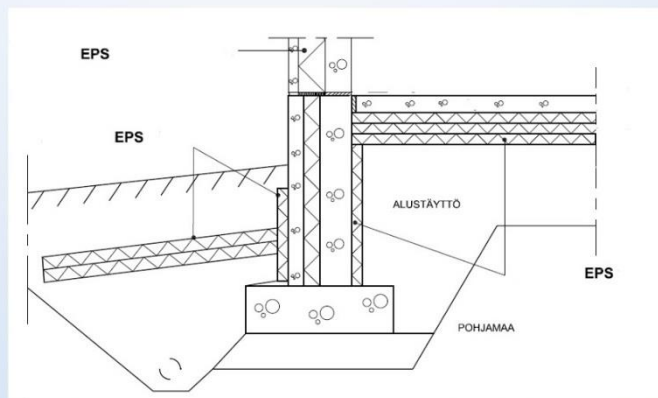
Simuloitava rakenne on keskeneräinen, seinässä eikä välipohjassa ole pintarakenteita. Betonilaatan RH 100 %.

Kuva 3. WUFI 2D, esimerkkilaskenta 1.

ESIMERKKILASKENTA 2

PERUSMUURIA NTURA PERUSTUSLEIKKAUS: MAANVASTAINEN ALAPOHJA (BETONISOKKELI), ELEMENTTISEINÄ

- Tehtävänä on tarkastella komponenttien kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa.
- Lisätietoja seuraavassa diassa



Sijainti: Espoo

Simuloitava rakenne on keskeneräinen, seinässä eikä alapohjassa ole pintarakenteita.

Kuva 4. WUFI 2D, esimerkkilaskenta 2.

4.2 Laskentatulokset WUFI-ohjelmilla (Pro ja 2D)

WUFI-ohjelmilla saadaan tuotettua simuloinnilla muun muassa seuraavia tuloksia:

- hygrotermisten olosuhteiden jakauma (aika ja paikka) esimerkiksi animoitu WUFI-filminä
- kokonaisvesipitoisuudet kosteustasapainon laadulliseen arvioimiseen
- vesipitoisuudet yksittäisissä kerroksissa
- kosteusprofiilit tiettyinä ajankohtina
- lämpötila ja suhteellisen kosteus kriittisissä asemissa (WUFI 2016).

5 Tulosten analysointi

Laskennan tuloksia tulee arvioida aikaisempien tulosten ja tulosten odotusarvojen perusteella. Myös erilaisia herkkyystarkasteluja tulee tehdä laskennan tulosten tulkinnan helpottamiseksi. Herkkyystarkasteluilla tarkoitetaan yksinkertaisimmillaan lähtötietojen muuttamista ja laskennan toistamista tulosten muuttumisen analysoimiseksi. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 84.)

Tuloksia arvioitaessa on tärkeää varmistua siitä, että ne ovat loogisia ja että herkkyystarkasteluissa nähtävien muutosten suunta on oikea. Olosuhteissa tapahtuvat voimakkaat äkilliset tai hetkittäiset muutokset voivat olla seurausta erilaisista virheistä laskennassa. Erityisen tärkeää on myös tiedostaa laskentamallissa tehtyjen erilaisten yksinkertaistuksien ja puutteiden vaikutukset laskentatuloksiin. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014, 84-85.)

5.1 Laskennan virheet WUFI-ohjelmilla

Laskennan problematiikkana WUFI:ssa on, että kaksi siirtymisyhtälöä on ratkaistava: lämpö ja kosteus. Ne voidaan ratkaista vain itsenäisesti yksi toisensa jälkeen, vaikka todellisuudessa ne vaikuttavat jatkuvasti toisiinsa. Siksi laskennan ratkaisuaskeleella lämpötilalle ei voida sallia muutosta kosteuspitoisuuteen, joka todellisuudessa tapahtuu samalla laskennan aika-askeleella. Lämpötilan tulos ei

siis ole täysin tarkka. Näin ollen myös tätä seuraavalla kosteuden ratkaisuaskeleella on sama ongelma. (WUFI Online help 2016.)

Toistamalla ratkaisuvaiheen lämpötilalle, nyt ottaen uuden ratkaistun kosteuskentän tämän perustaksi, (joka on hieman epätarkka, mutta varmasti parempi kuin alkuperäinen kosteuskenttä) saadaan parempi tarkkuus lämpötilakenttään. Jatkuva vuorotteleva toisto näistä vaiheista (iteraatio/iteration) johtaa lopulta tulokseen, joka on riittävän lähellä haluttua ratkaisua lämpötilan ja kosteuden kenttien siirtymisyhtälöistä (lähentyminen/convergence). (WUFI Online help 2016.)

Tietyissä olosuhteissa tämä lähentyminen voi olla niin hidasta, että WUFI pysäyttää iteroinnin (convergence failure). Täten toistaiseksi saavutetut lämpö- ja kosteuskentät täyttävät yksittäin niiden tasapainoyhtälöt, mutta niiden keskinäinen riippuvuus ei ole vielä täysin kehittynyt. (WUFI Online help 2016.)

WUFI 2D:ssä laskennan valmistumisen jälkeen voidaan avata Convergence Analyzer, josta nähdään kaikki laskennalliset virheet. Tällä ominaisuudella voidaan myös perehtyä tarkemmin virheiden laatuun. Esimerkiksi laskentavirheen tiedoissa ϕ_{in} arvo $1E-02$ (= 0,01) tarkoittaa, että tässä kohdassa suhteellisen kosteuden kuuluisi olla 80 %, mutta laskennan jälkeen se on 81 % tai 79 %. Thetan arvo tarkoittaa lämpötilan heittoa samalla periaatteella. (Bludau 2011.)

Lähes kaikissa näissä tapauksissa syntyvä virhe on rakennusfysikaalisesti merkityksetön. Tästä huolimatta laskennan virheisiin tulee aina suhtautua varauksella. (WUFI Online help 2016.)

5.2 Tulosten analysointi WUFI Prossa

Laskennan jälkeen voidaan tuloksia tarkastella pintapuolisesti WUFI:n luomassa raportissa (viimeisen laskennan tilanne). Siitä ilmenevät kosteuspitoisuudet laskennan alussa ja lopussa kerroksittain sekä näiden suurimmat ja pienimmät arvot laskennan aikana. Lisäksi raportista selviää laskennan aika, kesto, ilmenneet virheet laskennassa sekä kosteusvirrat sisä- ja ulkopintojen läpi. Laskennan kulkua voidaan myös tarkastella filmiltä laskennan aikana reaaliaikaisesti tai laskennan jälkeen.

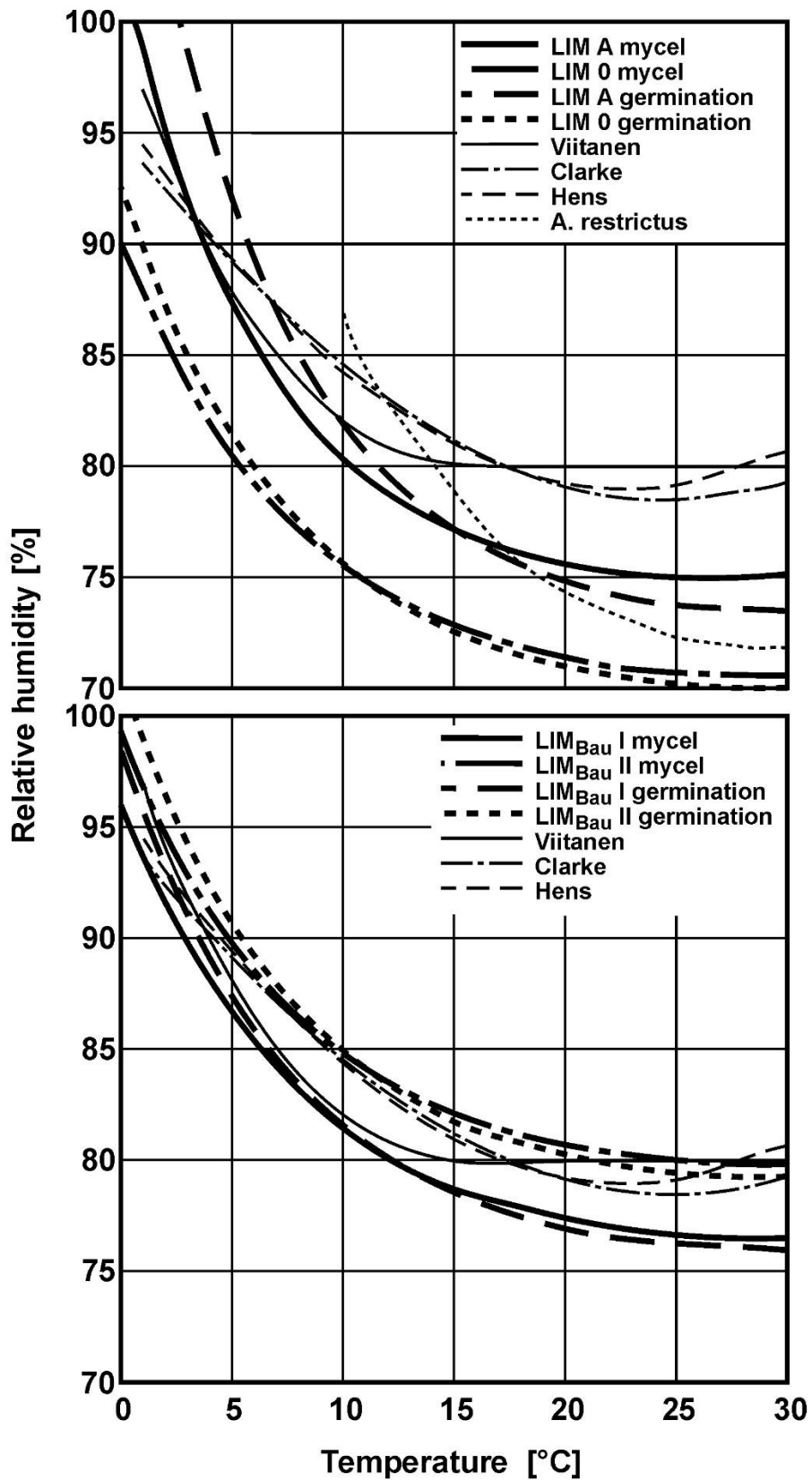
Tuloksia voidaan yksityiskohtaisemmin tarkastella graafisesti. Kuvaajia saadaan ulkoilmastosta (sade, säteily), ulko- ja sisäilmastosta (lämpötila, suhteellinen kosteus), rakenteen kokonaiskosteudesta, yksittäisten materiaalien kosteuspitoisuuksista sekä eri monitorointiasemien lämpötiloista ja kokonaiskosteuksista.

Komponentin sisäpinnan grafiikka näyttää lisäksi rakennusmateriaalien rajoittavat käyrät, LIM (Lowest Isopleth for Mould) B I ja LIM B II, joiden alapuolella ei materiaalin heikkenemistä ole tavallisesti odotettavissa. Jos olosuhteet ovat käyrien yläpuolella pidemmän aikaa, heikkeneminen (esim. laho, home) voi olla mahdollista, mutta myös muita kriteerejä tarvitaan todelliseen analyysiin. LIM-käyrät perustuvat Klaus Sedlbauerin keräämään dataan homeen kasvusta ja ominaisista olosuhteista. Käyrät noudattavat yleistä suurpiirteistä nyrkkisääntöä homeen muodostumiselle ominaisista olosuhteista (lämpötila > 20 °C, suhteellinen kosteus > RH 80 %). Tarkempia arvoja LIM-käyrille on esitetty kuvassa 5 (Sedlbauer 2000, 230). LIM B I-käyrä on tarkoitettu biohyödynnettäville materiaaleille, esimerkiksi tapeteille ja kipsilevyille. LIM B II-käyrä on tarkoitettu huokoisille materiaaleille, esimerkiksi laastit, mineraaliset rakennusmateriaalit ja jotkut puumateriaalit. Tämä ominaisuus mahdollistaa nopean arvioinnin heikkenemisen todennäköisyydestä. (Sedlbauer 2000, 230; Parker & Lozinsky 2009, 7; WUFI Online help 2016, 74.)

5.3 Tulosten analysointi WUFI 2D:ssä

Tulosten analysointi voidaan suorittaa WUFI 2D:ssä WUFI2DMotion-ohjelmalla, josta nähdään koko komponentin vesihöyryn osapaine, vesipitoisuus, lämpötila ja suhteellinen kosteus kaikissa laskennan aika-askeleissa – joko filminä tai hyp-päämällä suoraan haluttuun ajanhetkeen.

Tulosten graafinen esitys saadaan ohjelmalla WUFI Graph 2.5.2. Tällä ohjelmalla voidaan luoda halutun laisia kuvaajia halutuista ominaisuuksista halutulla hetkellä halutussa kohdassa helposti. Laskennan alussa määritetyn gridin tarkkuudella voidaan valita komponentista hyvinkin pieni alue tarkasteltavaksi. Lisäksi Isopleths-grafiikka luomalla halutun kohdan kuvaaja näyttää lisäksi rakennusmateriaalien rajoittavat LIM -käyrät WUFI Pron lailla.



Kuva 5. Minimum growth conditions (LIM curves). (Sedlbauer 2000, 230)

6 Yhteenveto ja pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda edellytykset WUFI-ohjelmien (WUFI Pro ja WUFI 2D) itsenäiseen käyttöön. Opinnäytetyönä kehitetty oppimateriaali luo lisäksi mahdollisuuden WUFI-ohjelmien yksityiskohtaisempaan käyttöön rakennusinsinöörikoulutuksessa Saimaan ammattikorkeakoulussa. Tämän lisäksi opinnäytetyössä perehdyttiin rakennusfysiikan perusilmiöihin ja niiden huomioimiseen WUFI-laskentaohjelmilla sekä rakennusfysikaaliseen suunnitteluun rakennusfysikaalisen laskentaan ja näiden ongelmakohtiin. Luotu oppimateriaali on Saimaan ammattikorkeakoulun ja opinnäytetyön tekijän omaisuutta.

Ohjelmien monimutkaisuudesta ja yksityiskohtaisuudesta johtuen kaikkien mahdollisten asetusten ja parametrien vaikutusta laskennan lopputulokseen ei selvitetty. Kokenut rakennusfysiikan tuntija osaa hyödyntää ohjelmien monipuolisia laskentaominaisuuksia ja -parametreja saaden laskennalla tarkempia tuloksia. Kaikista laskentaesimerkeistä pyrittiin luomaan mahdollisimman selkeitä itsenäisen oppimisen helpottamiseksi. Luotuja laskentaesimerkkejä WUFI Pro-ohjelmalle testattiin Saimaan ammattikorkeakoulussa rakennusfysiikan opintojaksolla. Kokeilun tulokset olivat positiivisia ohjeiden toimivuuden kannalta. WUFI 2D-ohjelmateriaalia ei testattu.

WUFI 2D:ssä käyttöliittymän kielenä on englanti. WUFI Prota voidaan käyttää suomenkielisellä käyttöliittymällä. Opinnäytetyön lähdeaineisto näiden ohjelmien osalta on lähes kokonaan englanninkielistä. Tukiaineiston luomista hankaloitti aiemman ohjeaineiston vähyyys. Tukiaineiston laskentaesimerkit ovat luotu joiltain osin kokeilemalla eri parametrien vaikutusta ja vertailemalla tuloksia. Ohjelman keskustelufoorumi on ainoa lähde, josta löytyy tietoa tietyistä laskennan parametreista. Keskusteluista löytyvä tieto on kuitenkin hyvin suurpiirteistä ja perustuu ohjelmien kehittäjien arvioihin.

Tukiaineisto luotiin kattamaan ohjelmien peruskäyttö. Ohjelman uuden käyttäjän on syytä arvioida saatuja laskentatuloksia aina kriittisesti. Tuloksia arvioitaessa on tärkeää varmistua siitä, että ne ovat loogisia, ja laskennan parametreja muuttamalla uusissa simuloinneissa nähtävien muutosten suunta on oikea. Erityisen

tärkeää on myös tiedostaa laskentamallissa tehtyjen erilaisten yksinkertaistuksien ja puutteiden vaikutukset laskentatuloksiin.

Kuvat

Kuva 1. WUFI Pro, esimerkkilaskenta 1. s. 23

Kuva 2. WUFI Pro, esimerkkilaskenta 2. s. 23

Kuva 3. WUFI 2D, esimerkkilaskenta 1. s. 24

Kuva 4. WUFI 2D, esimerkkilaskenta 2. s. 24

Kuva 5. Minimum growth conditions (LIM curves). s. 28. (Sedlbauer, K. 2000, 230)

Kuviot

Kuvio 1. WUFI Pro –laskennan kulku. s. 21

Kuvio 2. WUFI 2D –laskennan kulku. s. 22

Taulukot

Taulukko 1. Rakennusfysikaalisen laskentatarkastelun toteutus. s.17 (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014. RIL 255-1-2014.)

Lähteet

Betoniteollisuus ry 2016. Lämpö- ja kosteustekniikka. <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/lampo-ja-kosteustekniikka>. Luettu 15.10.2016

Bludau, C. 2011. Convergence analyzer. <https://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=439>. Luettu 21.11.2016

Parker, P. & Lozinsky, K. 2009. Thermal and hygrothermal analysis in bulding envelope commissioning, 7. https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/BEST/BEST2_006_WB3-3.pdf. Luettu 5.10.2016

Rafnet-ryhmä 2004. Wufi 3.3 – Pro Käyttöohje ja esimerkkilaskelmat.

Sedlbauer, K. 2000. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/ibp/publikationen/dissertationen/ks_dissertation_e.pdf. Luettu 21.12.2016

Siikanen, U. 2012. Rakentajain kalenteri 2012.

Sisäilmayhdistys ry 2016. Rakenteiden lämpötekniikka. <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Rakenteiden-lampotekniikka>. Luettu 15.10.2016

Stora Enso 2013. WUFI laajentaa CLT:n suunnittelumahdollisuuksia. <http://www.clt.info/fi/media-ladattavat/aufnahme-von-clt-in-wufi/>. Luettu 3.10.2016

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2014. RIL 255-1-2014.

Tampereen teknillinen yliopisto 2013. Tutkimusraportti 159. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. https://tutcris.tut.fi/portal/files/956015/vinha_ilmastonmuutoksen_ja_lammoneristyksen_lisayksen_vaikutukset.pdf. Luettu 7.11.2016

Vinha, J. 2012. Rakentajain kalenteri 2012.

WUFI 2016. WUFI® Pro. <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>. Luettu 4.10.2016

WUFI 2016. WUFI® 2D. <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/>. Luettu 12.10.2016

WUFI 2016. What is WUFI®?. <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>. Luettu 3.10.2016

WUFI Online help 2016. WUFI -ohjelman sisäinen ohje.

WUFI-Wiki 2009. Details:Physics. <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>. Luettu 19.12.2016

Ympäristöministeriö 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma. C2 Kosteus.

Ympäristöministeriö 2016. Ympäristöopas 2016, Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus.