

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Henna Huittinen

Kasvikuitupohjaisten lämmöneristemateriaalien kosteustekninen toiminta

Opinnäytetyö 2017

Tiivistelmä

Henna Huittinen

Kasvikuitupohjaisten lämmöneristemateriaalien kosteustekninen toiminta, 68 sivua, 4 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2017

Ohjaajat: lehtori Timo Lehtoviita, Saimaan ammattikorkeakoulu, asiantuntija

Pauli Sekki, Vahanan Rakennusfysiikka Oy

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä rakenteiden sekä tiettyjen kasvikuitueristemateriaalien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan ja koota aiheesta kirjallisuusselvitys tukemaan opinnäytetyön toisena osana toimivaa laskentaa. Kasvikuitueristeiden toiminnan perustana on materiaalien suuri hygroskooppisuus, minkä avulla rakenne tasaa kosteutta huokosrakenteeseensa ja mukautuu näin ollen vallitseviin ilmaston kosteusrasituksiin. Käytännössä useimmat kasvikuitueristetyt rakenteet on todettu toimiviksi tavanomaisissa kosteusolosuhteissa, kun rakenteista on tehty kosteusmittauksia sekä rakenneavauksia. Laskennallisella tarkastelulla on toisaalta havaittu kosteuden aiheuttamia riskejä, kuten kohtalaisen korkeaa homehtumisriskiä rakenteen ulkokerroksissa. Näin ollen laskentatulokset ovat osittain ristiriitaisia käytännön kokemuksiin sekä kokeellisesti mitattuihin arvoihin verrattaessa.

Kirjallisuusselvityksen lisäksi opinnäytetyössä perehdyttiin WUFI Pro 1D -simulointiohjelmalla tuotettuihin laskelmiin kahdesta eri kasvikuitueristeisestä ulkoseinä-rakenteesta sekä vertailurakenteista. Rakenteiden reunaehtoina simulointilaskennassa käytettiin olemassa olevista rakenteista tuotettuja 7 ja 12 kuukauden mittausdatoja rakenteiden lämpötiloista sekä suhteellisista kosteuksista. Mitatun ilmastotiedon avulla rakenteista selvitettiin mitattujen ja laskennalla tuotettujen arvojen lämpö- ja kosteusteknisiä eroavaisuuksia sekä tutkittiin rakenteiden mahdollista homehtumisriskiä suomalaisen homemallin avulla.

Olki- sekä puukuitueristeisen rakenteen toiminta perustuu tarkkaan kosteuden hallintaan rakentamisen aikana ja sen jälkeen. Laskennan mukaan olki- sekä puukuitueristeisen seinän homehtumisriski on olemassa, mitä korkeammat rakenteiden alkuolosuhteiden suhteelliset kosteudet ovat. Tutkittaessa laskennallisesti rakenteiden toimivuutta on kuitenkin huomioitava laskennan ja mittauksen tuomat rajoitteet sekä virhetekijät, jotka vaikuttavat vertailtaviin tuloksiin. Laskennallisen tarkastelun perusteella voidaan varmistua rakenteen kosteusteknisestä toimivuudesta vain, jos rakenteessa käytettyjen materiaalien ominaisuudet ovat riittävän hyvin tiedossa. Laskelmia tuleekin pitää lähinnä suuntaan antavana, joiden avulla pystytään arvioimaan rakenteiden kosteusteknisen toiminnan riskitekijöitä. Laskennalla tulisi varmistaa rakenteiden kosteustekninen toimivuus, etenkin kun rakenne eroaa yleisistä ohjeistuksista, tai kun rakenteen toimivuudesta ei ole käytännön kokemuksia.

Asiasanat: Hygroskooppisuus, kasvikuitu, lämmöneriste, WUFI

Abstract

Henna Huittinen

Moisture technology of organic thermal insulation materials, 68 Pages, 4 Appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Civil and Construction Engineering

Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2017

Instructors: Lecturer Mr. Timo Lehtoviita, Saimaa University of Applied Sciences, Mr. Pauli Sekki, Vahanen Rakennusfysiikka Oy

The purpose of the research was to study and gather existing information about the moisture physical behavior of structures, and investigate moisture condensation and mold growth of two organic thermal insulation structures. The purpose was to find the differences between the measured values and the results of the calculation for the heat and moisture behavior of the structures. The study was commissioned by Vahanen Rakennusfysiikka Oy.

In this research, the simulation of heat and moisture transference for the two different structures were made by using WUFI Pro 1 -dimensional transient heat and moisture modeling program and mold growth with Finnish mold index program. The moisture physical behaviors of selected structures were analyzed numerically under the climate conditions of Finland and using typical interior conditions of living spaces. The starting point of the calculation was to find the differences between the measurements result by using a variety of material properties and by changing the initial conditions of the structures.

The results of this research show, that structures which thermal insulations has used plant-fibre based materials are sensitive to biological damage by moisture. The use of porous thermal insulation materials is based on moisture equilibrium of the structure. Excess moisture in a structure causes condensation to structural layers, like the inside surface of the air barrier or wind protection if the moisture cannot evaporate out of the structure simultaneously. In order that the moisture content of the porous structure stays in balance, the structure's water vapor resistance should decrease from the inside out. Calculations can only be used as direction of moisture behavior because of calculation error factors. Computational insurance should be done for the structures that differ from the general instructions and for the structures which have no practical experience.

Keywords: Hygroscopic, plant-fibre material, thermal insulation, WUFI

Sisällys

Käsitteet.....	6
1 Johdanto.....	8
2 Rakenteiden kosteustekninen toiminta	9
2.1 Kosteuden lähteet.....	9
2.2 Ilmasto-olosuhteiden vaikutus.....	10
2.2.1 Ulkoilman olosuhteet.....	10
2.2.2 Sisäilman olosuhteet.....	12
2.3 Lämmön ja kosteuden vuorovaikutus.....	14
2.4 Kosteuden siirtyminen rakenteisiin.....	16
2.4.1 Diffuusio	16
2.4.2 Kosteuden konvektio.....	17
2.4.3 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen.....	18
2.5 Kosteuden tiivistyminen rakenteeseen.....	20
3 Kasvikuitupohjaiset eristemateriaalit.....	25
3.1 Lämmöneristeet.....	26
3.1.1 Sahanpuru.....	26
3.1.2 Pellavaeriste.....	27
3.1.3 Puukuitueriste.....	28
3.1.4 Olkieriste	29
3.2 Materiaalien vaurioituminen	30
4 Rakenteiden laskennallinen tarkastelu.....	34
4.1 Laskennan taustaa.....	34
4.2 WUFI Pro 1D –kosteussimulointiohjelma	35
4.2.1 Ohjelman kuvaus.....	35
4.2.2 Mitoituksen reunaehdot.....	35
4.2.3 Laskentaverkko.....	37
5 Barönsalmen kesämökki.....	39
5.1 Kohteen kuvaus	39
5.2 Reunaehdot ja tarkastelujakso.....	42
5.3 Laskentatulokset ja tulosten tarkastelu	43
5.4 Homekasvun tarkastelu	47
5.5 Johtopäätökset.....	48
6 Ritaharjun passiivitalo	50
6.1 Kohteen kuvaus	50
6.2 Reunaehdot ja tarkastelujakso.....	51
6.3 Laskentatulokset ja tulosten tarkastelu	52
6.4 Homekasvun tarkastelu	57
6.5 Johtopäätökset.....	58
7 Yhteenveto ja pohdinta	60
Kuvat.....	64
Kuviot.....	65
Taulukot.....	66
Lähteet.....	67

Liitteet

- Liite 1 Laskennassa käytettyjen rakennemallien simulointitiedot.
- Liite 2 Laskennassa tutkittujen rakenteiden materiaalitiedot.
- Liite 3 EcoCocon olkirakenteen suomalaisella homemallilla lasketut homeindeksit.
- Liite 4 Ekovilla puukuiturakenteen suomalaisella homemallilla lasketut homeindeksit.

Käsitteet

Homeindeksi	Homeindeksi (M) kuvaa materiaalin pinnalla esiintyvän homeen peittämää pinta-alaa suhteessa pinnan koko alan näköhavaintoon. Indeksiluokittelu määräytyy 0-6.
Ilmanläpäisevyys	Ilmanläpäisevyydellä (Ka) tarkoitetaan ilman tilavuusvirtaa, joka jatkuvuustilassa laminaarisena virtauksena läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen. Yksikkö $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$.
Johtuminen	Johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen, tällöin voidaan myös puhua lämmön virtauksesta. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa lämpimästä kylmempään päin.
Kastepiste	Kastepiste kuvaa lämpötilaa ($^{\circ}\text{C}$), jossa ilmassa oleva vesihöyry muuttuu vedeksi eli kondensoituu. Tällöin ilman kosteus saavuttaa kyllästyskosteuden.
Kondensoituminen	Tarkoittaa ilmiötä, jossa vesihöyry tiivistyy vedeksi ympäröivää ilmaa kylmemmälle pinnalle, jos pinnan lämpötila on alle ympäröivän ilman kastepistelämpötilan.
Kosteusdiffusiviteetti	Kosteusdiffusiviteetti (D_w) kuvaa materiaalin kosteuspiitoisuuden muutos- eli tasoittumisnopeutta, jolla materiaali saavuttaa tasapainokosteuden ympäröivän ilman kosteuden muuttuessa.
Kyllästyskosteus	Tietyn lämpöinen ilma pystyy sisältämään enimmillään tietyn määrän vesihöyryä. Yksikkö kg/m^3 .
Kyllästyspaine	Kyllästyspaine (Pa) on vesihöyryn suurin aikaansaama paine tietyssä lämpötilassa. Mitä suurempi lämpötila on, sitä suurempi on kyllästyspaine. Kyllästyskosteus on suoraan yhteydessä kyseiseen paineeseen.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus (λ) kuvaa lämpömäärää, joka jatkuvuustilassa läpäisee pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen. Yksikkö W/mK .
Lämmönvastus	Lämmönvastus (R) ilmoittaa materiaalin lämmönsiirtomisvastuksen, joka saadaan jakamalla kerroksen pak-

suus sen lämmönjohtavuudella $R = d/\lambda$. Yksikkö m^2K/W .

- Sorptio** Tasapainokosteus ilmaistaan usein sorptioisotermillä eli tasapainokosteuskäyränä, joka kuvaa materiaalin tasapainokosteutta ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Tasapainokosteus on riippuvainen lämpötilan lisäksi siitä, onko kyseessä kastuminen (absorptio) vai kuivuminen (desorptio).
- Suhteellinen kosteus** Ilman suhteellinen kosteus (RH) ilmoittaa prosentteina ilmassa esiintyvän vesihöyrynmäärän tietyn lämpöisen ilman sisältämän enimmäisvesihöyrynmäärästä (g).
- Tasapainokosteus** Kun materiaalin huokoisissa olevan ilman suhteellinen kosteus asettuu samaan arvoon ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa, on saavutettu ns. hygroskooppinen tasapainokosteus.
- TTY** Tampereen teknillinen yliopisto.
- Vesihöyrynläpäisevyys** Vesihöyrynläpäisevyydellä (δ_v tai δ_p) ilmoitetaan vesihöyrynmäärä, joka jatkuvuustilassa läpäisee pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen ainekerroksen, kun vesihöyrypitoisuus ainekerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen.
- Vesihöyrynpaine** Vesihöyrynpaineella (Pa) tarkoitetaan painetta, jonka sisäilman sisältämä vesihöyry aiheuttaa. Vesihöyrynpitoisuuden ja lämpötilan lisäys kasvattavat vesihöyrynpainetta.
- Vesihöyrynvastus** Vesihöyrynvastus kuvaa aineen vesihöyrynpitoisuuden virtausta vastustavaa ominaisuutta, joka saadaan jakamalla ainekerroksen paksuus sen vesihöyrynläpäisevyydellä $Z = d/\delta$.

1 Johdanto

Kasvikuitupohjaisia lämmöneristeitä kutsutaan hygroskooppisiksi materiaaleiksi suuren kosteuden sitomis- ja luovutuskykynsä ansiosta. Tutkimusten perusteella niiden etuna pidetään kykyä vaikuttaa sisäilman tasalaatuun ja ilmankosteuden tasaisuuteen tilan kosteuden tuoton muuttuessa. Hygroskooppisuuden omaavien materiaalien suurin toiminnallinen riski on kuitenkin kosteuden liiallinen kertyminen materiaaliin. Rakenteiden tarkempaa toimintaa tuleekin usein tarkastella dynaamisten simulointimenetelmien avulla, jos rakenteista on vähäisiä kokemuksia tai rakenteet poikkeavat yleisistä ohjeistuksista. Kasvikuitueristeisten rakenteiden toimivuuksia on mitattu Suomen olosuhteissa pitkälläkin aikajänteillä, mutta esimerkiksi VTT:n kehittämien tutkimusten perusteella kasvikuitueristeisten rakenteiden laskennassa on törmätty lähinnä laskennallisiin ongelmiin, jossa laskennallisen tarkastelun perusteella rakenteeseen muodostuva kosteus nousee lähelle kriittistä tasoa muodostaen rakenteeseen mahdollisen kosteuden tiivistymisen ja biologisen vaurioitumisen riskin.

Opinnäytetyön tavoitteena on laatia kattava kirjallisuusselvitys rakenteen kosteus- ja lämpötekniseen toimintaan vaikuttavista tekijöistä, sekä materiaaliominaisuuksista. Työn toisena osana esitetään laskennallinen tutkimus valittujen kasvikuitueristeisten ulkoseinärakenteiden kosteusteknisestä käyttäytymisestä. Työn tilaajana toimii Vahanen Rakennusfysiikka Oy.

Laskennassa tutkitaan Oulussa sijaitsevan Pohjolan Ekotalon Oy:n passiivitalon sekä Etelä-Suomen ilmastossa sijaitsevan olkielementtitalon valittujen rakenteiden dynaamisen laskennan lämpö- ja kosteusteknisen käyttäytymisen tuomia eroavaisuuksia kokeellisesti mitattuihin arvoihin. Valituille kasvikuitueristeistä koostuville ulkoseinärakenteille suoritetaan kosteus- ja lämpösimulointi WUFI Pro 4.2 1D –kosteussimulointiohjelmistolla huomioiden rakennuksista saadut ulkoilman reunaehtoina käytetyt mittausdatat seitsemän ja 12 kuukauden ajalta. Päätelmissä keskitytään WUFI Pro 1D –laskennan tarkasteluun, laskentatulosten ja olemassa olevien rakenteiden kokeellisesti mitattujen arvojen väliseen keskinäiseen vertailuun sekä analysoidaan syitä rakenteiden välisiin käyttäytymiseroihin.

2 Rakenteiden kosteustekninen toiminta

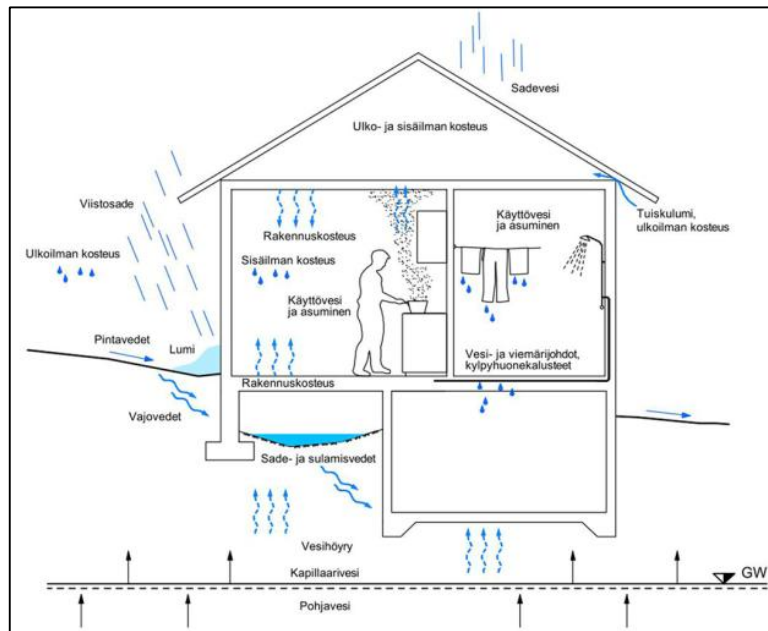
Rakenteiden toiminnassa ja suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota rakenteen ja materiaalien lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen sekä palonkestävyyteen. Huomiota kiinnitetään erityisesti rakenteiden käytön ja kosteuden aiheuttamiin muodonmuutoksiin sekä biologisten tekijöiden, kuten homeen tai lahon kehittymiseen ja näiden pitkäaikaisiin vaikutuksiin sisäilman laadun ja terveellisuuden kannalta. (Kokko ym. 1991.)

Rakenteiden oikeaoppisen toiminnan kannalta sekä laskennallisten tarkastelujen pohjaksi tuleekin yleisesti tuntee lämpö- ja kosteustekniikan teoria, rakenteiden vaurioitumismekanismit sekä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan periaate (Vinha ym. 2013).

2.1 Kosteuden lähteet

Kosteuslähteet, jotka vaikuttavat merkittävästi valmiin rakennuksen ja rakenteiden toimivuuteen, jaetaan rakennuskosteuteen sekä ulko- että sisäpuolisiin lähteisiin (Kuva 1). Rakennuskosteudella tarkoitetaan rakennusmateriaaleihin ennen rakentamista sekä rakentamisen aikana päässyttä kosteutta. Tämä kosteus voi johtua ympäristön olosuhteista, materiaalien omasta alkukosteudesta tai rakennustyönaikaisen kosteudenhallinnan laiminlyönneistä työmaalla. (Siikanen 2014.)

Ulkopuolisia kosteuslähteitä ovat muun muassa vuodenaajoista riippuva sade, rakenteita ympäröivä ilman kosteus sekä maan kosteus. Sisäpuoliset lähteet ovat usein eriaistiset rakennuksen käytöstä riippuen. (RIL 255-1-2014.) Esimerkiksi suurien teollisuushallien tai uimahallien sisäpuoliset kosteuden lähteet ovat selvästi kuormittavampia kuin tavallisten asuinrakennuksien, mikä huomioidaan erityisesti rakenteita suunniteltaessa. Asuinrakennuksissa käytön aikaiset kosteuskuormitukset ovat tavanomaisesti ihmisen ja eläinten tuottama vesihöyry, sekä ruuanlaitosta tai pesuvedestä aiheutuvat sisäilmaa kuormittavat kosteuslisät. (Siikanen 2014.)



Kuva 1. Rakennukseen kohdistuvat kosteuslähteet (RIL 255-1-2014)

Suunnittelussa onkin erityisen tärkeä ennakoida kosteusrasitukset sekä niiden pidempiaikainen vaikutus materiaaleihin ja rakenteisiin, jotta rakenteet voivat toimia niille suunnitellulla tavalla rakennuksen koko käyttöiän ajan. (Siikanen 2014.)

2.2 Ilmasto-olosuhteiden vaikutus

2.2.1 Ulkoilman olosuhteet

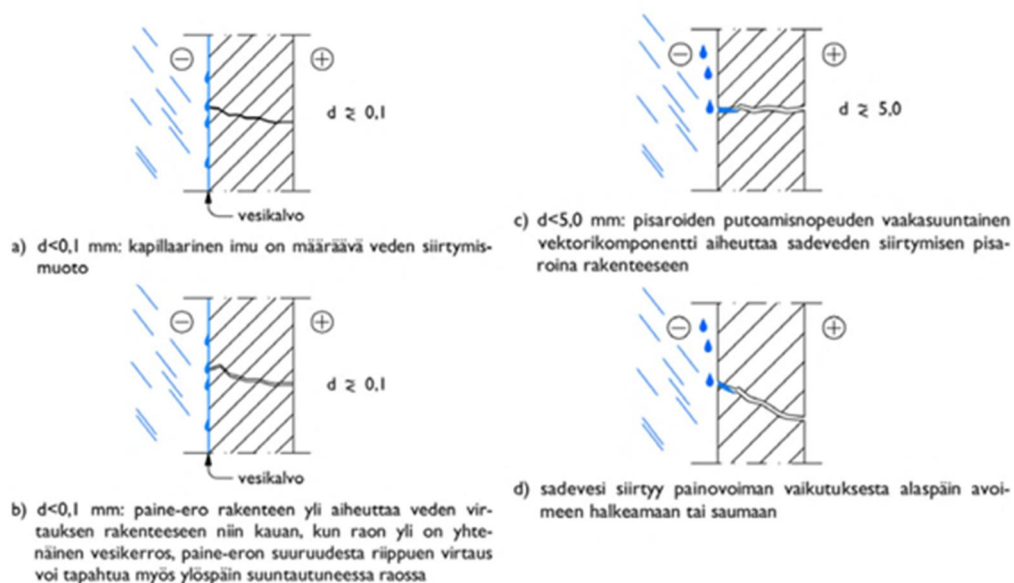
Ulkoilman olosuhteiden vaikutukset rakenteisiin ovat riippuvaisia vuodenajoittain muuttuvasta ilmastosta, johon vaikuttavat lämpötila ja auringonsäteilyn määrä, ilman suhteellinen kosteus ja sademäärät sekä tuulen suunta ja voimakkuudet. Rakennukset altistuvat ulkoilman olosuhteille jatkuvasti, jolloin rakenteisiin kohdistuvien rasitusten suuruuteen voidaan vaikuttaa lähinnä vain rakennuksen lähiympäristön, rakennuksen yksityiskohtien sekä ulkopintojen suojarakenteiden avulla. (RIL 255-1-2014.)

Rakennuksen maantieteellinen sijainti ja rakennusta suojaavat esteet, kuten puusto ja toiset rakennukset vaikuttavat rakennukseen kohdistuvan auringon lämpösäteilyn suuruuteen sekä ilmavirtauksien suuntaan ja voimakkuuteen. Rakenteita lämmittävä auringon lämpösäteilyn määrä on riippuvainen myös ilman pilvisyydestä. Pilvisyys estää päiväsaikaan lämpösäteilyn pääsyn ilmake-

hään ja rakenteisiin sekä estää yöllä tapahtuvaa lämpösäteilyn karkaamista ilmakehästä, jolloin rakenteet eivät myöskään pääse jäähtymään. (Junttila 2014.)

Rakennukseen kohdistuvat ilmavirtaukset vaikuttavat osakseen rakennukseen muodostuviin painesuhteisiin. Ilmavirtauksien on todettu kasvavan rakennuksen reuna-alueilla keskimääräistä suuremmiksi kuin julkisivujen keskiosilla, joten voidaan todeta, että kyseiset rakennuksen osat altistuvat useimmin myös viistosateen rasituksille. (Ojanen & Salonvaara 2002; Mäkitalo 2012.)

Viistosade on sateen vaakakomponentti, jonka osuus vaihtelee 20–30 %:n välillä suoran sateen määrästä ja jonka kokonaismäärästä yli 50 % on etenkin seinän yläosaa rasittava (Mäkitalo 2012). Viistosateen vaikutus rakennuksen vaipparakenteisiin on riippuvainen kuitenkin rakennuksen sijainnista ja sen muodosta sekä sateen ja ilmavirtauksien voimakkuudesta. Viistosade voi suurissa määrin aiheuttaa veden tunkeutumista rakenteisiin, jolloin kosteus kulkeutuu sekä kapillaarisesti että diffuusiolla kohti kuivempia, huokoisia materiaaleja (Kuva 2). Osa viistosateen määrästä kuitenkin valuu seinärakenteita pitkin ja aiheuttaa tällä vain ulkonäöllisiä haittoja rakennusten julkisivuihin. Pitkinä sadejaksoina viistosateen merkitys korostuu, kun julkisivut varastoivat itseensä kosteutta hygroskooppisesti eivätkä välttämättä aina pääse kuivumaan tarkoitetulla tavalla. (Ojanen & Salonvaara 2002; Vinha ym. 2013.)



Kuva 2. Veden tunkeutuminen rakenteeseen viistosateen vaikutuksesta (Pitkäranta ym. 2016)

Ulkoilman olosuhteet voivat vuosittain olla hyvinkin muuttuvia, jolloin rakenteiden laskennallinen tarkastelu hankaloituu. Kosteusteknisen toiminnan kannalta voidaan kuitenkin huomioida eri vuosien kriittisimmät ajankohdat ja muodostaa niistä testivuotia rakenteiden toiminnalle. (Vinha ym. 2013.) Myös ilmatieteellisesti Suomessa on todettu rakennuksien eteläsivujen ja rannikkoalueella rakennuksien lounaanpuoleisten julkisivujen olevan vuosittain alttiimpia säärasituksille, mikä voidaan huomioida jo rakennusta suunniteltaessa. (Mäkitalo 2012.)

2.2.2 Sisäilman olosuhteet

Rakennuksen terveellisyyden ja viihtyvyyden yhtenä tärkeimpänä osana pidetään sisäilman olosuhteiden tasaisuutta muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa. Keskeisimpinä tekijöinä tasaisuuteen vaikuttavat sisäilman vesihöyrynpitoisuus, paine-erot sisä- ja ulkoilman välillä sekä lämpötila. (RIL 255-1-2014.)

Ilman suhteellinen kosteus voidaan laskea kaavalla 1 ja se vaihtelee kesällä suurimmillaan noin 30–60 %:n välillä ja talvella pienimmillään noin 25–45 %:n välillä. Usein alle 30 %:n suhteelliset kosteuspitoisuudet sisäilmassa vaikuttavat heikentävästi ihmisten terveyteen kuivattaen limakalvoja ja aiheuttaen tuntemuksia hengityselimissä. (Koski ym. 1997.)

$$RH = (v/v_k) * 100 \% \quad (1)$$

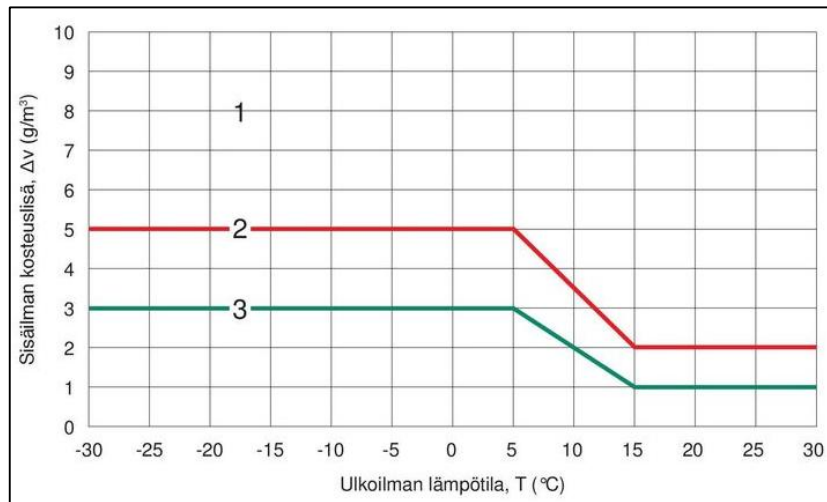
Kaavassa 1, v kuvaa ilman sisältämän vesihöyrynpitoisuutta (g/m^3) ja v_k ilman kyllästysvesihöyrynpitoisuutta (g/m^3), joka saadaan ratkaistua lämpötilan mukaan taulukosta 1.

t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)	t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)	t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)	t (°C)	v _s (g/m ³)	p _s (Pa)
-20	0,88	102	1	5,21	658	22	19,40	2640	43	59,41	8663
-19	0,95	111	2	5,58	708	23	20,54	2805	44	62,40	9128
-18	1,04	122	3	5,98	762	24	21,74	2979	45	65,52	9614
-17	1,14	135	4	6,40	818	25	23,00	3162	46	68,77	10122
-16	1,25	149	5	6,84	878	26	24,32	3355	47	72,15	10653
-15	1,38	164	6	7,31	941	27	25,71	3559	48	75,67	11207
-14	1,52	181	7	7,80	1008	28	27,17	3773	49	79,33	11786
-13	1,67	200	8	8,32	1079	29	28,70	3999	50	83,14	12390
-12	1,83	221	9	8,87	1154	30	30,31	4237	51	87,10	13020
-11	2,01	243	10	9,45	1234	31	31,99	4487	52	91,21	13677
-10	2,20	266	11	10,06	1318	32	33,75	4750	53	95,48	14362
-9	2,40	292	12	10,71	1408	33	35,60	5027	54	99,92	15075
-8	2,61	319	13	11,39	1502	34	37,54	5317	55	104,52	15818
-7	2,84	348	14	12,10	1603	35	39,56	5622	56	109,30	16592
-6	3,08	379	15	12,86	1708	36	41,68	5943	57	114,25	17397
-5	3,33	412	16	13,65	1820	37	43,90	6279	58	119,39	18234
-4	3,60	447	17	14,49	1939	38	46,21	6631	59	124,72	19105
-3	3,89	485	18	15,37	2064	39	48,63	7001	60	130,24	20010
-2	4,19	524	19	16,30	2197	40	51,16	7388	61	135,95	20951
-1	4,51	566	20	17,28	2337	41	53,79	7793	62	141,87	21928
0	4,85	611	21	18,31	2484	42	56,54	8218	63	147,99	22943

Taulukko 1. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus sekä kyllästysosapaine lämpötilan funktiona (Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille: Kosteus 2009)

Rakennuksen käytöstä kuitenkin aiheutuu rakennuksen sisällä hetkellisesti kestäviä lämpökuormituksia, esimerkiksi ruuan valmistuksesta, suihkussa käynnistä tai tilassa oleskelevista ihmisistä, jotka nostavat sisälämpötilan mukavuusrajan ulkopuolelle (Hänninen ym. 1997). Koska lämpötila on suhteessa kosteuteen, nostavat lämpökuormitukset tilassa myös sisäilman kosteutta, jolloin voidaan puhua sisäilman kosteuslisästä. Kylmään vuodenaikaan tämä korostuu, sillä ulkoilma sisältää sisäilmaa vähemmän kosteutta, jonka myötä sisäilman kosteuslisä aiheuttaa suurimmat vesihöyrynpitoisuuserot sisä- ja ulkoilman välille. (RIL 107–2012.)

Sisäilman kosteuslisän mitoitukselle on olemassa standardin SFS-EN ISO 13788 (2013) mukainen luokitus, jonka avulla ilmoitetaan Suomessa käytössä olevat mitoitusarvot rakennuksille eri käyttö-olosuhteissa (Kuvio 1). Asuinrakennukset kuuluvat kosteusluokkaan 2, jolloin talven sisäilman kosteuslisänä voidaan käyttää 5 g/m³ ja kesän 2 g/m³. (RIL 107–2012.)



Kuvio 1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa (1-3) ulkolämpötilan funktiona (RIL 107-2012)

Sisäilman kosteuslisää voidaan laskennallisesti arvioida myös sisäilman kosteuspitoisuuden kaavalla 2 (Björkholtz 1997)

$$v_s - v_u = \frac{G}{n \cdot V} \quad (2)$$

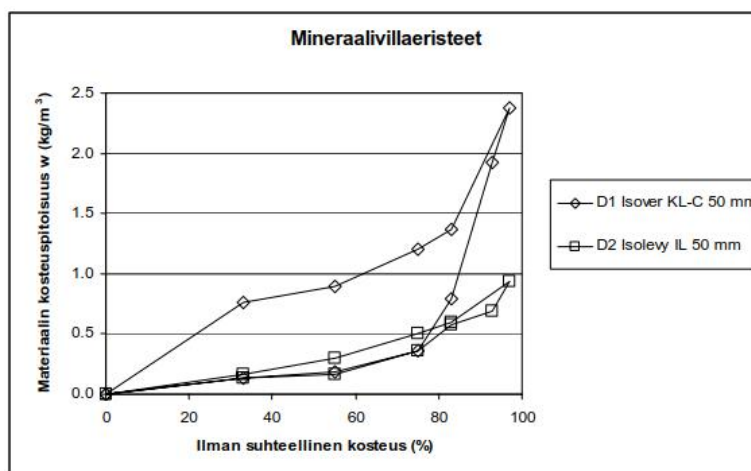
jossa v_s ja v_u kuvaavat sisä- ja ulkoilman kosteuspitoisuutta (g/m^3), G sisätilan kosteustuottoa (g/h), n sisätilan ilmanvaihtuvuutta ($1/\text{h}$) ja V huoneen tilavuutta (m^3)

2.3 Lämmön ja kosteuden vuorovaikutus

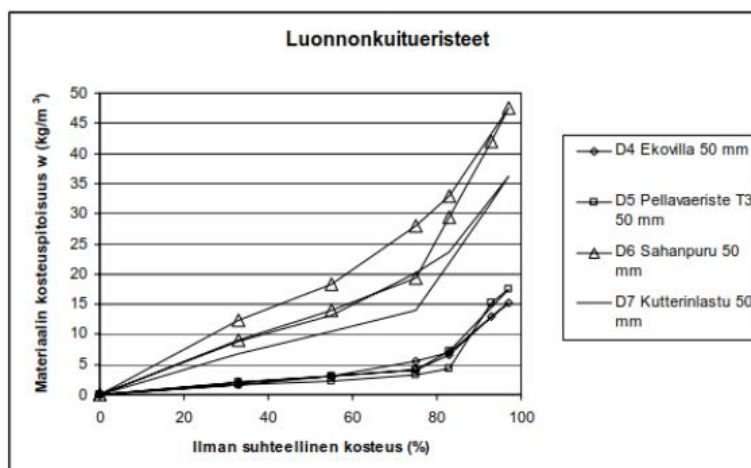
Lämmön- ja kosteudensiirtyminen rakenteessa ovat suorassa suhteessa toisiinsa, ja vaikuttavat hygroskooppisen rakenteen toimivuuteen muuttuvien ilmasto-olosuhteiden myötä merkittävästi. Ilman lämpötilan laskiessa huokosilman suhteellinen kosteus pyrkii nousemaan ja vesihöyryn osapaine vastaavasti laskemaan. Koska materiaalin kosteuspitoisuus riippuu huokosilman suhteellisesta kosteudesta, materiaali pyrkii sitomaan itseensä ilmasta lisää kosteutta ja saavuttamaan tätä huokosilman suhteellista kosteutta vastaavan hygroskooppisen tasapainotilan (Salovaara & Kokko 1996). Huokosilman vesihöyrynpitoisuus laskee pinnalla, jonka lämpötila on kylmempi. Tämän seurauksena diffuusiolla siirtyvä vesihöyry siirtyy yleisesti ottaen rakenteen lämpimältä pinnalta kohti kylmempää pintaa, jonka vesihöyrynpitoisuus on pienempi. (Vinha ym. 2005.)

Rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan voidaan vaikuttaa materiaalien valinnoilla ja rakenneratkaisuilla. Materiaalin ominaisuuksiin kuten lämmönjohtavuuteen, ilman- ja vesihöyrynläpäisevyyteen, ominaislämpökapasiteettiin ja hygroskooppiseen tasapainokosteuteen vaikuttavat usein materiaalien tiheys, mutta myös vallitsevat ilman lämpötilat sekä suhteellinen kosteus. (Junttila 2014.)

Kuviossa 2 ja 3 on esitetty eräiden mineraalivilla- sekä luonnonkuitueristeiden esittävät sorptiokäyrät. Ylempi käyrä kuvaa materiaalin kuivumistilannetta (desorptio) ja alempi kostumistilannetta (absorptio).



Kuvio 2. Mineraalivillaeristeiden tasapainokosteuksia (kg/m^3) (Vinha ym. 2005)



Kuvio 3. Luonnonkuitueristeiden tasapainokosteuksia (kg/m^3) (Vinha ym. 2005)

Vaikka mineraalivillalla kuten muillakin huokoisilla ja ilmaa läpäisevillä materiaaleilla on hygroskooppisia ominaisuuksia, ei mineraalivillaa pidetä hygroskooppisena materiaalina, koska korkeissa suhteellisissa kosteuksissa mineraalivil-

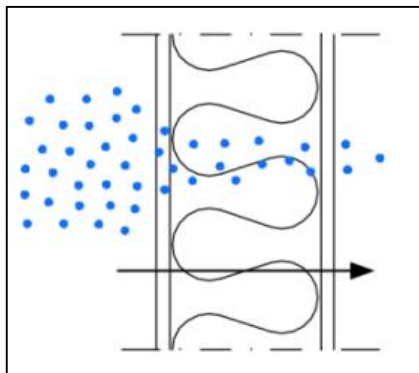
laan sitoutuu vain vähän kosteutta (Kuvio 2). Luonnonkuitueristeisiin sitoutuu merkittävästi enemmän kosteutta huokoisuutensa ansiosta kuin mineraalivillieristeisiin (Kuvio 3).

2.4 Kosteuden siirtyminen rakenteisiin

Rakennuksissa ja rakenteissa esiintyy kosteutta näkyvänä vetenä, vesihöyrynä tai rakenteisiin sitoutuneena rakennekosteutena. Vesi kulkeutuu näissä olo-
muodoissa rakenteisiin joko vesihöyryn diffuusiolla, pakotettuna tai luonnollisena konvektiona tai nestemäisenä kapillaarivirtauksena. (Siikanen 2014.)

2.4.1 Diffuusio

Kahden tilan välinen lämpötila- ja vesihöyrypitoisuusero saa aikaan vesihöyryn siirtymisen diffuusiolla rakenteiden läpi. Sisäilman kosteus pyrkii tasoittumaan kahden tilan välillä kulkeutumalla lämpimästä tilasta vesihöyrynä rakenteisiin ja rakenteen läpi kohti kylmempää pintaa ja lopulta tilaan, missä vesihöyryn osapaine on pienempi (Kuva 3). Vesihöyryn siirtymistä tapahtuu niin kauan, kunnes huokosilman vesihöyrypitoisuus on tasoittunut materiaalissa lämpötilamuutoksen vaikutuksesta. Tasoittumisaika on sitä pidempi mitä huokoisempi materiaali on. Diffuusion suunta voi määräytyä lämpötilan sijasta myös tilan kosteuspitoisuuden mukaan, jolloin diffuusiovirtauksen suunta voi vaihdella kylmemmästä lämpimään, jos kylmemmän tilan kosteuspitoisuus on suurempi kuin lämpimän. (Siikanen 2014; Koski ym. 1997.)



Kuva 3. Esimerkki vesihöyryn diffuusiosta seinärakenteen läpi. Nuoli kuvaa diffuusion suuntaa ja pallot vesihöyryn määrää (Pitkäranta ym. 2016)

Kun rakenne koostuu useammasta ainekerroksesta, saadaan rakenteen läpi diffuusiolla virtaavan kosteusvirran määrä g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) laskettua kaavoilla 3 tai 4 (Björkholtz 1997)

$$g = (v_s - v_u) / \Sigma Z_v \quad (3)$$

$$g = (p_s - p_u) / \Sigma Z_p \quad (4)$$

joissa v_s , v_u kuvaavat vesihöyrynmäärän (kg/m^3) ja p_s , p_u vesihöyrynosapaineen määrää sisä- ja ulkoilmassa (Pa) ja ΣZ_v (s/m), ΣZ_p ($\text{m}^2\text{sPa}/\text{kg}$) kuvaavat rakenteen eri ainekerrosten vesihöyrynvastusten summaa.

Koska rakennuksen sisäinen kosteusrasitus on vähäisempi kesällä kuin talvella, vesihöyry siirtyy diffuusiolla pääosin ulkoa rakenteen sisälle rakennuksen sisäisen ilmanvaihdon ja vähäisen oleskelun seurauksena riippumatta rakenteessa olevasta mahdollisesta sisäpuolisesta höyrynsulusta. (Pitkäranta ym. 2016.)

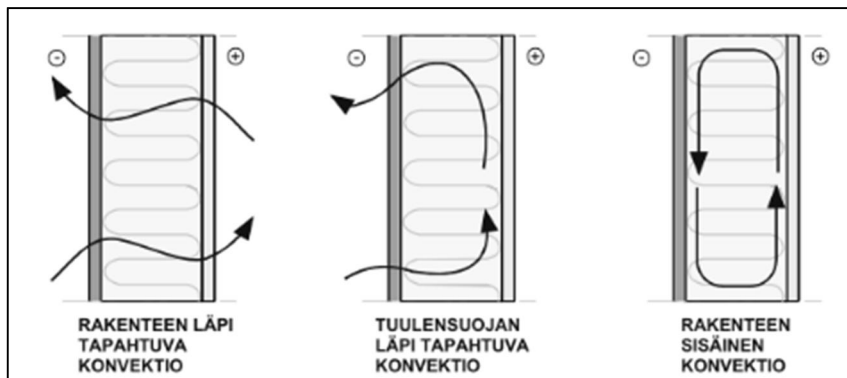
2.4.2 Kosteuden konvektio

Rakenteessa tapahtuva vesihöyryn konvektio voidaan jakaa karkeasti rakenteen läpi tapahtuvaan ja rakenteen sisäiseen konvektioon. Rakenteen läpi tapahtuvassa konvektiossa lämpö ja vesihöyry siirtyvät virtaavan ilman mukana luonnollisena tai pakotettuna konvektiona eri tiloissa vallitsevien kokonaispaineerojen vaikutuksesta. (Siikanen 2014.)

Luonnollisessa konvektiossa ilman virtausta voi esiintyä rakenteissa pystysuorasti lämpötilaerojen aiheuttaman ilman tiheyserojen vaikutuksesta. Mineraalivillojen keveys mahdollistaa rakenteessa luonnollisen konvektion syntymisen, kun taas puupohjaisia lämmöneristemateriaaleja käytettäessä materiaalin tiheys kasvaa, jolloin luonnollisen konvektion merkityskin vähenee. (Siikanen 2014; Niemelä ym. 1996.) Pakotetussa konvektiossa ilma virtaa lähinnä rakenteen läpi ulkopuolisen voiman kuten tuulen, LVI-laitteiden sekä rakenteiden vuotokoh-tien, kuten rakojen ja reikien aiheuttamien paine-erojen seurauksena. (Niemelä ym. 1996.)

Rakenteiden sisäisen konvektion vaikutus rakenteen lämpö- ja kosteustekni- seen toimintaan on pienempi kuin rakenteen läpi tapahtuvassa konvektiossa.

Sisäisessä konvektiossa seinän ylä- ja alaosan välinen lämpötilaero aiheuttaa rakenteessa yksittäisten materiaalikerroksen sisäistä ilman kiertoa, joka kuljettaa mukanaan sekä lämpöä että kosteutta. Sisäiseen konvektioon voidaan vaikuttaa rakenteen tuulensuojan tiiveyden ja lämmöneristekerroksen suhteella. Tällöin paine-eroista johtuvaa ilman kiertoa esiintyy rakenteen sisällä, joko suljetussa tai puoliavoimessa rakenteessa riippuen tuulensuoja- ja lämmöneristemateriaalien ilmanläpäisevyydestä (Kuva 4). (Siikanen 2014; Junntila 2014.)



Kuva 4. Esimerkit rakenteiden läpi tapahtuvista konvektiovirtauksista (Junntila 2014)

Kylmään vuodenaikaan lämpötilojen luomat ilmanpaine-erot sisä- ja ulkoilman välillä ovat suurimmillaan, jolloin rakenteiden vuotokohtien läpi sisältä ulospäin virtaavan konvektiovirtauksen kuljettama kosteusmäärä moninkertaistuu esimerkiksi rakenteiden läpi diffuusiolla siirtyvään vesihöyryn määrään verrattuna. (Siikanen 2014; Niemelä ym. 1996.)

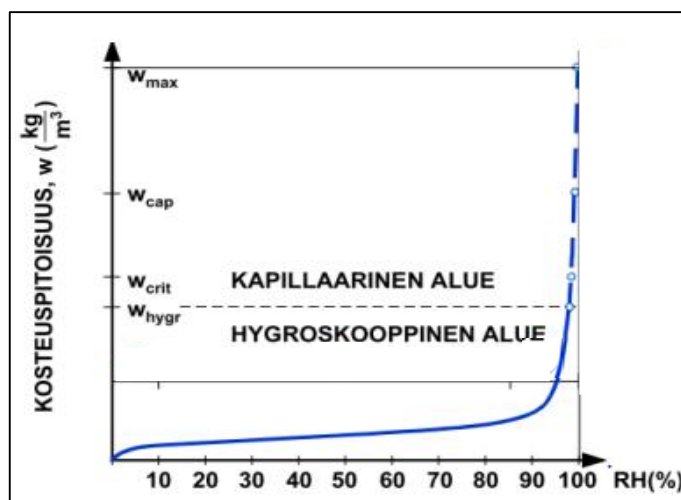
Rakenteen läpi virtaava konvektio vaikuttaa rakenteeseen joko rakennetta kuivattavasti tai kostuttavasti riippuen siitä, lämpeneekö vai jäähtyykö ilma virratessaan rakenteen yli. Lämmitessään ilma sitoo eli kuivattaa rakennetta etenkin talvella, kun taas jäähtyessään alle tietyn materiaalin kastepisteen aiheuttaa se kondensoitumisriskin kyseiseen rakennekerrokseen. (Siikanen 2014; Pitkäranta ym. 2016.)

2.4.3 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Kapillaarisella vedenliikkeellä tarkoitetaan kosteuden siirtymistä materiaalin huokosissa huokosalipaineen tai ulkoisen paineen voimasta aiheutuvana imu-

na. Huokosalipaineen voimakkuus riippuu useimmiten vallitsevasta ilman lämpötilasta ja huokoisen materiaalin huokoskoosta. (Mäkitalo 2012.)

Hygroσκοoppiset materiaalit pyrkivät huokoisuutensa ansiosta hygroskooppiseen tasapainokosteuteen ilman kosteuden tai toisen materiaalin kanssa sitomalla (absorptio) tai luovuttamalla (desorptio) kosteutta. Huokoisen materiaalin kriittisenä kosteuspitoisuutena RH_{crit} (w_{crit}) on tyypillisesti pidetty 98 % suhteellista kosteutta, jolloin materiaali alkaa kapillaarisesti imeä huokosiinsa kosteutta (Kuvio 4). (Mäkitalo 2012.) Kun materiaali on riittävän kauan kosketuksissa vapaan veden kanssa, saavuttaa se lopulta kapillaarisen tasapainokosteuden eli kapillaarisen kyllästymiskosteuden (Kuvio 4, w_{cap}). Kun kyllästymiskosteus on saavutettu, materiaalin huokosalipaine on tasapainossa maan vetovoiman, veden nousun aiheuttaman vastapaineen ja rakenteesta haihtuvan veden kanssa. (Pitkäranta ym. 2016.)



Kuvio 4. Huokoisen materiaalin tasapainokosteuskäyrä (Junttila 2014)

Rakenteissa veden kapillaarista siirtymistä voi tapahtua, vaikka materiaali ei olisi suorassa kosketuksissa veden kanssa. Jos toisen materiaalin kosteuspitoisuus on korkeampi, voi kapillaarista siirtymistä esiintyä kahden materiaalin välillä painovoimaisesti mihin suuntaan materiaalia tahansa. Rakenteellisessa suunnittelussa kahden materiaalin välinen kosteuden siirtyminen kapillaarisesti on estettävä tarvittaessa kapillaarikatkolla, kuten kermillä tai bitumisivelyllä. (Siikanen 2014; Junttila 2014.)

Materiaalin yhtenä kapillaarisena ominaisuutena pidetään kosteusdiffusiviteettiä, jonka määrittämisessä huomioidaan kaikki materiaaliin vaikuttavat kosteuden siirtymismuodot, kun siirtymistä kuvataan kosteuspitoisuuserojen avulla. Kapillaarisen alueen saavutettua materiaalin kosteusdiffusiviteetilla kuvataan veden imeytymisnopeutta materiaaliin, mutta myös kosteuden tasoittumisnopeutta, jolla materiaali saavuttaa uuden tasapainotilan. (RIL 255-1-2014.)

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti voidaan määrittää myös hygroskooppisella alueella (Kuvio 4, w_{hygr}) oleville materiaaleille niiden vesihöyrynläpäisevyyden tasapainokosteuskäyrän avulla. Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys kuitenkin huomioi materiaaliin kohdistuvat vesihöyryn diffuusion vaikutukset, jolloin kosteusdiffusiviteetin arvosta vähennetään diffuusion vaikutukset. Ilman diffuusion vaikutusta puhutaan pelkästä kapillaarisesta kosteusdiffusiviteetistä. (RIL 255-1-2014.)

WUFI Pro –kosteussimulointiohjelma määrittää materiaalien kapillaariselle virtaukselle kosteusdiffusiviteetin arvon veden imeytymiskertoimien avulla. Kyseiset kertoimet perustuvat useisiin tehtyihin laboratoriotutkimuksiin. (Vinha ym. 2013.)

2.5 Kosteuden tiivistyminen rakenteeseen

Suomen rakentamismääräyskokoelman C2 yhtenä vaatimuksena on, että rakenteiden tulee pystyä kuivumaan haittaa aiheuttamatta. Vesihöyryn kulkeutuminen ilmavirtausten mukana ilmanpaine-erojen vaikutuksesta voi suurissa määrin kuitenkin aiheuttaa kosteuden kerääntymisen ja tiivistymisen, eli kondensoitumisen rakenteen sisään eri rakennekerroksiin tai kylmien rakenteiden pinnoille. Paikalliset kosteuskertymät aiheuttavat muun muassa lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden kasvua ja eristeominaisuuksien heikentymistä.

Sisäilman hetkellisesti kestävät, korkeat kosteuslisät lisäävät kosteuden kondensoitumisen riskiä rakenteen sisälle kuten höyrynsulun pinnoille tai tuulensuojan sisäpinnalle, jos vesihöyryn osapaine ylittää kyseisen pinnan lämpötilaa vastaavan kyllästyspaineen. Pintaan tiivistynyt kosteus voi suurina määrinä valua painovoimaisesti ja aiheuttaa kosteuden kertymistä ja mahdollisen jäätymisen rakenteen alaosiin. Paikalliset kosteuskertymät aiheuttavat pitkällä aikavälillä

lä puupohjaisten materiaalien biologista vaurioitumista, kuten homeen muodostumista. Kosteuskertymistä voi syntyä muodonmuutoksia materiaaleihin, kuten tuulensuojalevyyn, jonka seurauksena rakennekerrokseen voi muodostua ilmavirtauksille altistuvia rakoja. (RIL 255-1-2014; Vinha ym. 2013.)

Pinnoille tiivistyvään kosteuteen voidaan kuitenkin vaikuttaa eräillä materiaaliin ruiskutettavilla antikondessipinnoitteilla, pintarakenteen lämmön- ja vesihöyrynvastuksella, sisäilman kosteuspitoisuudella ja rakenteen kokonaislämmönvastuksella sekä vesihöyrynläpäisevyydellä. (Siikanen 2014; Björkholtz 1997.)

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys kuvaa sen ominaisuutta päästää vesihöyryä lävitseen. Materiaalien vesihöyrynvastus on vesihöyrynläpäisevyyden käänteisarvo, jonka avulla voidaan vaikuttaa diffuusiovirtauksen suuruuteen ja estää konvektiovirtausten aiheuttamat haitalliset kondenssivauriot rakenteen sisällä. (Vinha ym. 2013.)

Suomen rakentamismääräyskokoelman C2 mukaan ulkoseinärakenteiden vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen rakenteen ulkopintaa nähden sekä sijaita lähellä rakenteen sisäpintaa, jossa lämpötilan vaihtelut ovat matalat. Jos kyseinen vaatimus ei toteudu eikä rakenteiden toimivuutta voida laskennallisesti todentaa, tulee rakenteen lämpimälle puolelle lisätä höyrynsulku. Höyrynsulkukerroksen tehtävänä on rajoittaa pääasiallisesti sisäilman kaasujen, kuten hiilidioksidin, sekä kosteuden eteneminen ja tiivistyminen rakenteisiin. Rakennukseen asennettava höyrynsulku varmistaa, että seinän kosteuspitoisuus ei muodostu haitalliseksi vesihöyrynläpäisevyyden tai konvektion vaikutuksesta. (RIL 255-1-2014; Mäkitalo 2012.)

Myöhemmin on kuitenkin todettu, ettei kaikkien rakenteiden höyrynsulun ja tuulensuojan vesihöyrynvastussuhteen minimiarvo riitä noudattamaan rakentamismääräyskokoelman ohjearvoa. Taulukossa 2 on esitetty eräiden höyrynsulku- ja tuulensuojatuotteiden vesihöyrynvastussuhteiden minimiarvoja sekä arvoja jotka poikkeavat rakentamismääräyskokoelman C2 yleisestä ohjeistuksesta.

Tuulensuoja	Höyrinsulun ja tuulensuojan vesihöyrynvastussuhteen minimiarvo Z_i/Z_e
Diffuusioavoin muovikuitukalvo 0,2 mm	– ¹⁾
Muovipohjainen tuulensuojakalvo tai – laminaatti 0,2 mm	– ¹⁾
Diffuusioavoin muovikuitukalvo 0,2 mm + mineraalivillalevy 30 mm	15
Mineraalivillalevy 30 mm	15
Huokoinen kuitulevy 12 mm	10
Huokoinen kuitulevy 25 mm	5
Kipsilevy 9 mm	30
Magnesiittilevy 8 mm	15
Kuitusementtilevy 4,5 mm	5
Homesuojattu havuvaneri 9 mm	5

Taulukko 2. Esimerkki rakennustuotteiden vesihöyrynvastussuhteista. ¹⁾ Vesi-
höyrynvastuksen minimiarvo tulee olla vähintään $15 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{sPa/kg}$ ($Z_v =$
 $110 \cdot 10^3 \text{ s/m}$, $S_d = 3 \text{ m}$) (RIL 107–2012)

Taulukossa 2 esitettyjä tuulensuojakalvoja käytettäessä höyrinsulun vesi-
höyrynvastuksen minimiarvon tulee olla vähintään $15 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{sPa/kg}$. Höyrin-
sulun vesihöyrynvastukseksi katsotaan riittävän $15 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{sPa/kg}$ kosteusluo-
kan 2 rakennuksissa, jolloin rakenteiden toiminnalle saadaan lisävarmuutta.
Kasvikuitupohjaisissa eristemateriaaleissa vesihöyrynvastuksen merkitys koros-
tuu, ja sen tulee olla aina vähintään viisinkertainen tuulensuojaan nähden. (RIL
107–2012.)

Laskennassa vesihöyrynvastusta voidaan kuvata myös diffuusionvastuskertoii-
mella μ , joka saadaan ratkaistua kaavalla 5 (Junttila 2014)

$$\mu = S_d/d \quad (5)$$

jossa S_d kuvaa materiaalin suhteellisen vesihöyrynvastuksen ilmakerroksen
paksuutta (m) ja d ainekerroksen paksuutta (m). S_d saadaan laskettua kaavalla
6 (Junttila 2014)

$$S_d = Z_p * \delta_v \quad (6)$$

jossa Z_p kuvaa materiaalin vesihöyrynvastusta (s/m) ja δ_v materiaalin vesi-
höyrynläpäisevyyttä (m^2/s).

Diffuusion aiheuttama vesihöyryn kondensoituminen

Arvioidessa mahdollista diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisään on hyvä tuntea eri ainekerrosten vesihöyrynvastukset, lämpötiloja vastaavat kyllästymispaineet sekä suhteellinen kosteus rakenteen molemmin puolin. Laskennallisesti kosteuden tiivistymisen riskiä voidaan arvioida kaavoilla 7 ja 8, joissa selvitetään vesihöyryn osapaine p_{vx} ja lämpötila t_x rakenteen kohdassa x . (Björkholtz 1997.)

$$p_{vx} = p_s - \left(\frac{\sum Z p x}{\sum Z p} \right) * (p_s - p_u) \quad (7)$$

Kaavassa 7 $\sum Z_{px}$ kuvaa sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summaa (m^2sPa), $\sum Z_p$ koko rakenteen vesihöyrynvastusta (m^2sPa) ja p_s , p_u vesihöyrynosapaineita sisä- ja ulkoilmassa (Pa).

$$t_x = t_s - \left(\frac{\sum R x}{R T} \right) * (t_s - t_u) \quad (8)$$

Kaavassa 8 $\sum R_x$ kuvaa lämmönvastusten summaa sisäpinnasta kohtaan x ja R_T koko rakenteen lämmönvastusta (m^2K/W), sekä t_s ja t_u sisä- ja ulkoilman lämpötiloja (K).

Jos vesihöyryn osapaineet ovat rakenteen kohdissa pienemmät kuin lämpötilaa vastaavat kyllästyspaineet, voidaan todeta, ettei tiivistymistä tapahdu rakenteessa. Jos kuitenkin havaitaan tiivistymistä, voidaan tiivistyvän kosteuden määrä selvittää myös laskennallisesti. (Siikanen 2014.)

Rakenteeseen jäävän kosteuden määrää arvioiden laskennallisesti huomioidaan tiivistymisajanjakso sekä kuivumisajanjakso, jolloin voidaan selvittää tiivistyvän veden määrä suhteessa rakenteesta poistuvan veden määrään. Tiivistymis- ja kuivumisajanjaksojen parametreiksi valitaan yleensä vuoden kahden kylmimmän ja kuumimman kuukauden keskiarvot. (Koski ym. 1997.)

Rakenteeseen jäävä kosteus G_{tiiv} (kg/m^2s) arvioidaan kaavoilla 9 ja 10, joissa t_{tiiv} kuvaa tiivistymisajanjaksoa (s). (Koski ym. 1997.)

$$g_{tiiv} = \frac{p_s - p_x}{\sum Z x} - \frac{p_x - p_u}{\sum Z - \sum Z x} \quad (9)$$

$$G_{\text{tiiv}} = g_{\text{tiiv}} * t_{\text{tiiv}} \quad (10)$$

Vastaavasti rakenteesta poistuvaa kosteutta G_{kuiv} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) voidaan arvioida kaavoilla 11 ja 12, joissa t_{kuiv} kuvaa kuivumisajanjaksoa (s). (Koski ym. 1997.)

$$g_{\text{kuiv}} = \frac{px-pu}{\Sigma Z - \Sigma Zx} - \frac{px-ps}{\Sigma Zx} \quad (11)$$

$$G_{\text{kuiv}} = g_{\text{kuiv}} * t_{\text{kuiv}} \quad (12)$$

Laskelmien tuloksia tulee verrata toisiinsa, jolloin rakenteen oikeaoppisen toiminnan kannalta G_{kuiv} tulee olla kohtuullisesti suurempi kuin G_{tiiv} , jotta rakenteisiin tiivistyvä kosteus pystyy kuivumaan rakenteista laskelmissa käytetyllä kuivumisajanjaksolla. (Björkholtz 1997.)

Konvektion aiheuttama vesihöyryn virtaus rakenteeseen

Kosteuskonvektion aiheuttamien vaurioiden estämiseksi asuinrakennukset suunnitellaan riittävän alipaineisiksi niin, ettei lämmintä ilmaa pääse virtaamaan kylmiin rakennusosiin tai rakenteisiin vuotokohtien kautta. Rakenteen vuotokohtien eli rakojen ja reikien läpi virtaavan konvektion määrä on todettu mitoittavammaksi kuin materiaalin huokosissa tapahtuva konvektio, jolloin kosteusmäärä g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) rakenteen läpi saadaan laskettua kaavalla 13, kun tiedossa on rakenteen vuotokohdista virtaava ilmamäärä Q . Kaava 13 on voimassa kuitenkin vain silloin, kun virtausreitillä ei esiinny vesihöyryn tiivistymistä. (Rakennusfysiikka rakennusinsinöörille: Kosteus 2009.)

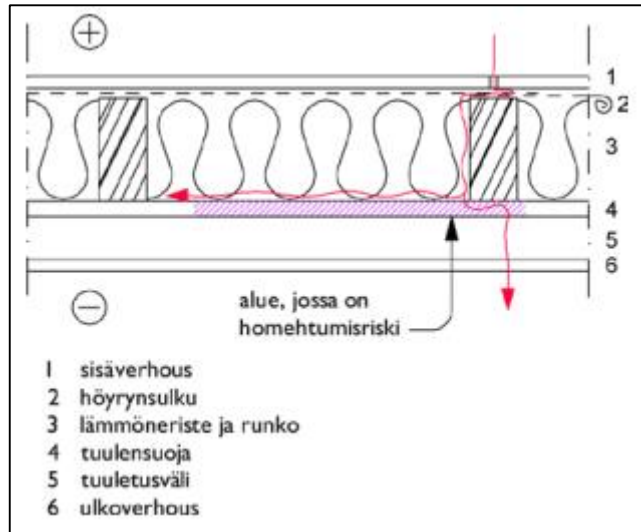
$$g = (v_{\text{sisä}} - v_{\text{ulko}}) * Q \quad (13)$$

Kaavassa 13, v kuvaa sisä- ja ulkoilman vesihöyrynpitoisuuseroa (kg/m^3) ja Q (m^3/s) rakenteen läpi virtaavaa ilmamäärää, joka saadaan laskettua kaavalla 14

$$Q = \frac{b^3 * L * \Delta p}{12 * \eta d} \quad (14)$$

jossa b kuvaa raon leveyttä (m), d raon syvyyttä (m) ja L raon pituutta (m), η ilman dynaamista viskositeettiä (Ns/m^2), sekä Δp ilman paine-eroa raon yli (Pa).

Kuvassa 5 on esimerkki ilman kulkeutumisesta rakenteeseen rakenteen lämpimällä puolella esiintyvän raon seurauksena. Homehtumisriski esiintyy rakenteen kylmällä puolella tuulensuojan sisäpinnassa, kun lämmin ja kostea sisäilma virtaa kohti kyseistä pintaa. (Pitkäranta ym. 2016.)



Kuva 5. Esimerkki kosteuskonvektion aiheuttamasta kosteuden tiivistymisriskistä puurunkoisessa rakenteessa (Pitkäranta ym. 2016)

Materiaalien ilmanläpäisevyyden avulla voidaan kuitenkin selvittää ainekerroksen läpi konvektiolla virtaavan kosteusvirran määrää g ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) kaavalla 11, kun lasketaan rakenteen läpi virtaava ilmamäärä Q kaavalla 15. (Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille: Kosteus 2009.)

$$Q = \frac{B_0 \cdot \Delta p}{12 \cdot \eta \cdot d} * A \quad (15)$$

Kaavassa 15 B_0 kuvaa materiaalin ilmanläpäisevyyttä (m^2), d kerroksen paksuutta (m), sekä A virtauspinta-alaa (m^2).

3 Kasvikuitupohjaiset eristemateriaalit

Hygroskooppisten kasvikuitupohjaisten materiaalien huokosrakenteella ja kemiallisella koostumuksella on merkittävä vaikutus materiaalin kosteuskäyttäytymiselle. Huokoisten materiaalien solurakenne on usein kerroksellinen ja se sisältää paljon pieniä huokosia, joiden avulla materiaali pystyy varastoimaan hygroskooppista kosteutta itseensä. Huokosissa oleva kosteus voi suurina määrinä

vähentää materiaalin huokostilavuutta ja lisätä lämmönsiirtoa rakenteen läpi, jonka seurauksena materiaalin lämmönjohtavuus kasvaa ja materiaalin eristysominaisuudet heikkenevät. (Mäkitalo 2012; Salovaara & Kokko 1999.)

3.1 Lämmöneristeet

Lämmöneristemateriaalin toimivuutta kuvataan sen kyvyllä vähentää lämmön siirtymistä johtumalla ja kyvyllä rajoittaa rakenteessa tapahtuvaa diffuusio- ja konvektiovirtausta. Lämmöneristeiden sisältämä ilmamäärä vaikuttaa niiden eristävytyteen merkittävästi. Ilmamäärä on suhteessa materiaalin huokostilavuuteen, joka pienentyessään vähentää materiaalin lämmöneristävyttä rakenteessa. Huokostilavuus voi pienentyä eristemateriaalin painumisella tai kosteuden vaikutuksesta, jolloin kosteus kertyy materiaalin huokosiin konvektio- tai kapillaarivirtauksen vaikutuksesta. (Rissanen & Viljanen 1998.)

Kasvikuitupohjaisiin lämmöneristemateriaaleihin kuuluvat puukuitueristeet ovat sellaisenaan käytetty sahanpuru sekä lisäksi pidemmälle jalostetut selluvilla ja pellavaeriste, jotka valmistetaan teollisesti lisäämällä materiaaleihin erilaisia palo- ja homehtumissuojalisäaineita. Puukuitu- ja kasvikuitupohjaisilla lämmöneristeillä on hygroskooppisten materiaalien ominaisuus sitoa ja luovuttaa kosteutta. Eristeet pystyvät varastoimaan sisäilmasta rakenteeseen talvella siirtävää kosteutta ja kuivumaan kesällä, jolloin rakenteen kosteusteknisen toimivuuden määrää sen kosteuskapasiteetin riittävyys. (Koski ym. 1997; Niemelä ym. 1996.)

3.1.1 Sahanpuru

Puu on yksi käytetyimmistä kasvikuitupohjaisista luonnonmateriaaleista, jonka ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa sen työstön ja käsittelyn aikana mutta myös puulajien ja puunosien käytön valinnalla. (Rissanen & Viljanen 1998.)

Sahanpuru valmistuu puun sahauksen sivutuotteena ja luetellaan yhdeksi historian käytetyimmäksi eristemateriaaliksi. Eristemateriaali koostuu puun sahauksen hienojakoisista partikkeleista, joiden koot vaihtelevat 0,1 mm:n levyisistä useiden senttimetrien levyisiin kuituihin. Partikkeleiden koon vaihtuvuuden ja

eristeen sullonta-asteen myötä sahanpurun kuivatiheys vaihtelee välillä 130–210 kg/m³. (Rissanen & Viljanen 1998; RIL 255-1-2014.)

Sahanpurun vedenvarastointikyky on hygroskooppisten ominaisuuksiensa ansiosta suuri, jonka takia liiallinen materiaalikosteus saattaa altistaa sen painumiselle ja vähentää näin ollen sen lämmöneristeominaisuuksia. Kosteuden imeytyminen sahanpuruun on nopeaa, eikä se pääse leviämään rakenteissa niin laajalle alueelle kuin esimerkiksi mineraalivillarakenteissa. Kosteus kuitenkin vaikuttaa materiaalin lämmönjohtavuuden kasvuun ja mahdollistaa suurina pitoisuuksina hitaan palamisreaktion syntymisen rakenteen sisässä. Purun lämmönjohtavuusarvot vaihtelevat sen tiheyden ja kosteuspitoisuuksien mukaan välillä 0,052–0,069 W/mK. (Rissanen & Viljanen 1998; RIL 255-1-2014.)

Purueristeinen seinä tasaa ulko-olosuhteiden vaikutuksia sisälämpötilaan paremmin kuin tavalliset mineraalivillaeristeiset rakenteet. Purun kosteuskapasiteettiä voidaan hyödyntää rakenneratkaisuja kehittämällä ja rakenne voidaan suunnitella myös höyrynsuluttomaksi. Höyrynsuluttomat rakenteet eroavat yleisistä rakenneratkaisuista, jolloin niiden tarkempaa toimivuutta tulee tarkastella erillisellä kosteusteknisellä mitoituksella. Ulkopintojen kosteuskondensoitumisen riskiä höyrynsuluttomassa pururakenteessa voidaan kuitenkin vähentää käyttämällä esimerkiksi rakennuspaperia, jonka vesihöyrynvastus on $15 \cdot 10^9$ (m²sPa/kg) ja sijoittamalla se rakenteen lämpimälle puolelle. (Hänninen ym. 1997.)

3.1.2 Pellavaeriste

Pellavaeriste valmistetaan viljellyistä pellavakuiduista. Pellavaeristeen käytön tutkiminen ja kehittäminen rakennusteollisuuden käyttöön alkoi Saksassa vuonna 1985. Pellavaeristeen valmistuksessa huomio kiinnittyy lisä- ja sideaineiden käyttöön, joilla vaikutetaan pellavakuitujen ominaisuuksiin ja parannetaan merkittävästi materiaalin homeenesto- ja palonkestävyysominaisuuksia. (Rissanen & Viljanen 1998; RIL 255-1-2014.)

Pellavan tiheys on esimerkiksi sahanpurua pienempi, jolloin sen hygroskooppiset ominaisuudet ovat pienemmät ja kosteuden sitoutuminen vähäisempää. Sahanpurueristeisiä rakenneratkaisuja ei näin ollen voida soveltaa pellavaeristeil-

le. Pellava itsessään on hygroskooppinen materiaali, jonka kuivatiheys vaihtelee sullonta-asteen vaikutuksesta välillä 35–100 kg/m³. Pellavan tiheydellä on suora vaikutus sen ilmanläpäisevyyteen, joka kasvaessaan altistaa rakenteen luonnolliselle sisäisen konvektion syntymiselle, joka vähentää osakseen materiaalin lämmöneristävyttä. Pellavaeristeen lämmönjohtavuusarvot ovat verrattavissa mineraalivillan lämmöneristävyteen ja ne vaihtelevat välillä 0,036–0,057 W/(mK). (RIL 255-1-2014.)

Pellavan hygroskooppisuuden takia sen korjuun tulee tapahtua kuivaan vuodenaikaan. Pellavaraaka-aineen alkukosteuden tuoma homehtumisherkkyys on jatkuvasti huomioitava tuotantoketjun eri vaiheissa ja varastointikosteuden on pysyttävä ilman suhteellista kosteutta vastaavan tasapainokosteuden alapuolella. (Rissanen & Viljanen 1998.)

3.1.3 Puukuitueriste

Sellu- ja puukuiduista tuotetut sellukuitueristeet kuuluvat vanhimpiin teollisesti tuotettuihin puukuitupohjaisiin lämmöneristeisiin. Sellu- ja puukuitueristeiden valmistus perustuu sanoma- ja aikakauslehtien keräyspaperin sekä kierrätettyjen puukuitujen uudelleen käyttöön. Sellukuidun raaka-aineena käytetty selluloosakuidun erityisen hyvät eristysominaisuudet ja ilmanvastuskertoimet perustuvat kuitujen huokoisuuteen sekä suureen liikkumattoman ilman osuuteen, mikä vähentää osakseen ilmankiertoa rakenteessa. (Kaila 1997.)

Sellu- ja puukuitueristeen tiheys ja lämmönjohtavuus vaihtelevat eristeen asennustavan mukaan. Eristys voidaan asentaa levyinä, saumattomana eristeenä puhaltamalla tai ruiskuttamalla. Sellukuiduista valmistettujen 25–50 mm:n eristelevyjen lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0,037–0,044 W/(mK). Puhaltamalla asennettuna, eristeen tiiveys on jopa 50–80 % pienempi kuin mineraalivillan, jolloin lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0,038–0,041 W/(mK). (Kaila 1997; RIL 255-1-2014.)

Käsittelynä sellukuitueristeen palonkesto-ominaisuudet ovat jopa paremmat kuin mineraalivillaeristeen. Puhallusvillana esimerkiksi yläpohjien lämmöneristeenä usein käytetty sellukuitu käsitelläänkin palonestoaineilla kuten boorimine-

raaleilla, joiden on todettu torjuvan tehokkaasti homeiden ja lahon muodostumista sekä hyönteisiä. (Kaila 1997.)

3.1.4 Olkieriste

Olki syntyy viljelyyn, kuten rukiin ja vehnän sivutuotteena. Olki on monipuolisesti käytettävissä oleva uusiutuva energianlähde ja sitä myöten ekologinen ja energiataloudellinen vaihtoehto myös rakenteiden eristemateriaaliksi. Olkieristeisen rakennuksen mielenkiinto perustuu osittain sen luomaan pieneen hiilijalanjälkeen sekä siihen, että rakennetta kuvataan sisäilmanlaadun perustein terveellisenä rakenteena sen diffuusioavoimuuden ja hengittävyuden ansiosta. (Rakennettu ympäristö 4/2010; Bronsema 2010.)

Rakenteessa esiintyvän oljen eristävyys ei täytä kaikkia rakenneteknisiä vaatimuksia yhtä ohuena eristepaksuutena käytettynä kuin mineraalivilla, vaikka lämmön- ja ääneneristävyys arvot ovatkin vertailukelpoisia. Eristävyyttä tuodaankin paksuntamalla selvästi seinän lämmöneristekerrosta, jolloin rakennukseen tuotetut lämmitys- ja jäähdytyskuormat vähenevät ja sen myötä pienenevät myös rakennuksen energiankulutukset. (Bronsema 2010.)

Kun olki on osana rakennetta, puhutaan usein savirapatuista olkipaalirakenteista, joissa olki on paalattu tiiviiksi paaleiksi puukehikon sisään ja jonka sidosaineena käytetään savilaastia. Savilaasti on hienojakoinen luonnonmateriaali, jonka palonkestävyyssominaisuudet ja kyky sitoa ilmasta epäpuhtauksia ja kosteutta suojaavat olkea biologisilta vaurioitumisilta. Savilaastia käytetään myös rakenteessa vesihöyryn diffuusiovastuksena. (Rakennettu ympäristö 4/2010; Bronsema 2010.)

Olkien paalauksessa vaikutetaan muodostuvan paalin tiheyteen ja varmistetaan samalla paalille myös riittävä rakenteellinen kantavuus. Tyypillisesti olkipaalien tiheydet vaihtelevat välillä 60–160 kg/m³, riippuen käytetystä paalauskalustoista, jotka pystyvät tuottamaan parhaimmillaan yli 350 kg/m³ tiheyden omaavia paaleja. Kantavuuden takia olkipaalien tiheydeksi suositellaan kuitenkin vähintään tiheyttä 100–112 kg/m³. (Bronsema 2010.)

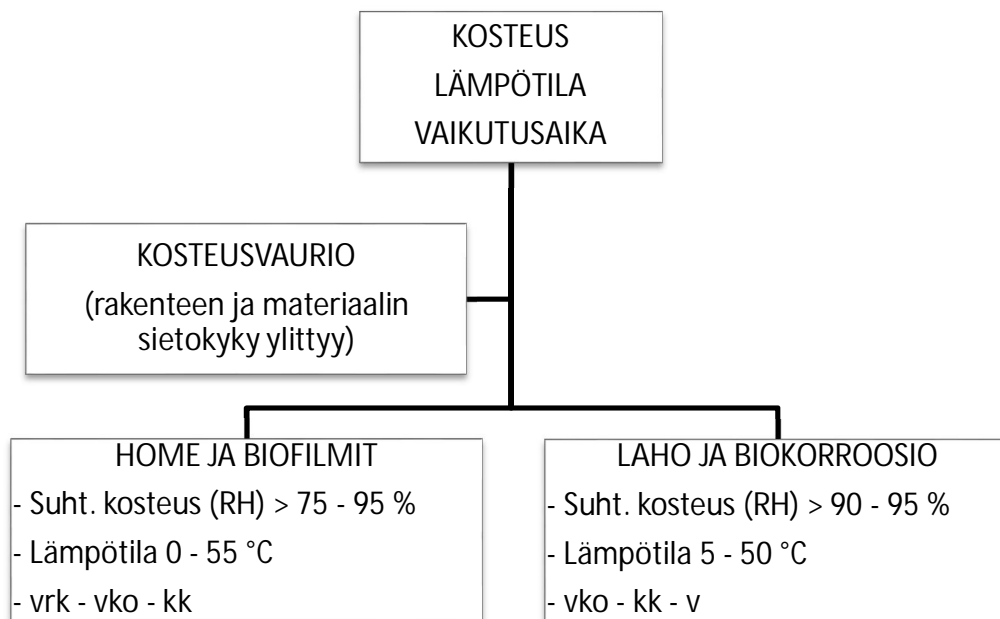
Oljen käyttöön eristemateriaalina liittyy riski materiaalin vaurioitumisesta kosteuden vaikutuksesta. Suurten hygroskooppisten ominaisuuksiensa ansiosta olkirakenteissa kiinnitetäänkin erityistä huomiota rakenteiden kosteudelle altistuviin yksityiskohtiin, kuten rakenneliittymiin ja maaperästä kapillaarisesti nousevaan kosteuteen, sekä rajoitetaan vesihöyryn pääsyä rakenteeseen riittävän tiiviillä sisäpuolisella vesihöyrynvastuksella. (Bronsema 2010.)

Liettuassa sijaitseva olkielementtien valmistukseen erikoistunut EcoCocon toimii maailmanlaajuisesti yhteistyössä suomalaisen Natural Building Companyn kanssa. Nämä kaksi yritystä yhdessä ovat pystyneet tuottamaan olkielementtien avulla arkkitehtuurisesti ja rakenteellisesti toimivia olkirakennuksia myös Suomeen. Kuitenkin olkielementtirakenteiden toiminnan laskennallinen tarkastelu on ollut vasta vähäistä, sillä olkirakenteisia asuinrakennuksia on Suomessa vasta vain muutamia. Tulevaisuudessa olkieristeisten talojen uskotaan yleistyvän, kun rakenteista saadaan riittävän vahvoja näyttöjä niiden ympärivuotiselle toimivuudelle etenkin Suomen vaihtelevissa olosuhteissa. (Etelä-Uusimaa 71/2016.)

3.2 Materiaalien vaurioituminen

Rakennusmateriaalien ulkopintoihin kohdistuvat biologiset, kemialliset ja fyysiset rasitukset ovat luonteeltaan erilaisia riippuen materiaaliominaisuuksista, rakennusta ympäröivästä ympäristöstä sekä rakennuksen käytöstä. Useimpia kasvikuutumateriaaleja pinnoitetaan ja käsitellään eri yhdistein kosteudensietokyvyn ja biologisen vaurioitumisen sietokyvyn parantamiseksi. (Kokko ym. 1991.)

Materiaalien kosteus, ilmaston lämpötila ja useimmiten kriittisten olosuhteiden kesto aika, kuten rakenteiden kuivumisen pitkittyminen tai riittävän pitkään kestävä rakenteiden kosteussietokyvyn ylittävä kosteusrasitus altistavat orgaanisen materiaalin eriasteisille biologisille vaurioille ja rasituksille kuten homesienten, lahosienten ja eri bakteerien kehittymiselle (Kuvio 5). (Kokko ym. 1991.)



Kuvio 5. Homeen ja lahon kehittymiselle vaadittavat olosuhteet (Kokko ym. 1991)

Homeen kasvua on pidetty ensimmäisenä merkinä materiaalin liian korkeasta kosteuspitoisuudesta. Materiaalien altistumista homeen kasvuille on kuitenkin tutkittu ja tuloksena on kehitetty homemalliluokittelu, joka hyödyntää ilmasto-olosuhteissa mitattujen materiaalien lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Ensimmäinen versio homeen kasvun mallinnuksesta perustui kuusen ja männyn pintapuun homehtumisriskin arviointiin muuttuvissa olosuhteissa ajan funktiona sekä laajoihin laboratoriotutkimuksiin. Nykyinen VTT:n ja TTY:n kehittämä paranneltu suomalainen homemalliluokittelu perustuu homeen visuaaliseen havainnointiin homeindeksien avulla useiden eri herkkyysluokiteltujen materiaalien pinnoilta. Taulukossa 3 on esitetty homeindeksien luokitusastot materiaalissa esiintyvälle homekasvustolle. (Junttila 2014.)

Home- indeksi 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

Taulukko 3. Suomalaisen homemallin homeindeksin luokitustasot (Junttila 2014)

Homeindeksin maksimi M_{\max} saadaan myös tarkemmin laskettua kaavalla 16, kun tiedetään materiaalien homehtumisherkkyysluokka. Kahden materiaalin rajapinnassa homehtuminen määräytyy herkemmän materiaalin mukaan. Puu-pohjaiset luonnonkuitumateriaalit luokitellaan suomalaisen homemalliluokituksen mukaisesti HHL2 (herkkä) ja HHL1 (hyvin herkkä) -luokkaan. (Junttila 2014.)

$$M_{\max} = A + B * \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C * \left(\frac{RH_{crit} - RH^2}{RH_{crit} - 100} \right) \quad (16)$$

Kaavassa 16 A, B ja C kuvaavat taulukon 4 mukaisia kertoimia, RH tarkastelu-
hetkellä vallitsevaa suhteellista kosteutta (%) sekä RH_{crit} kriittistä suhteellista
kosteutta, joka ratkaistaan kaavalla 17

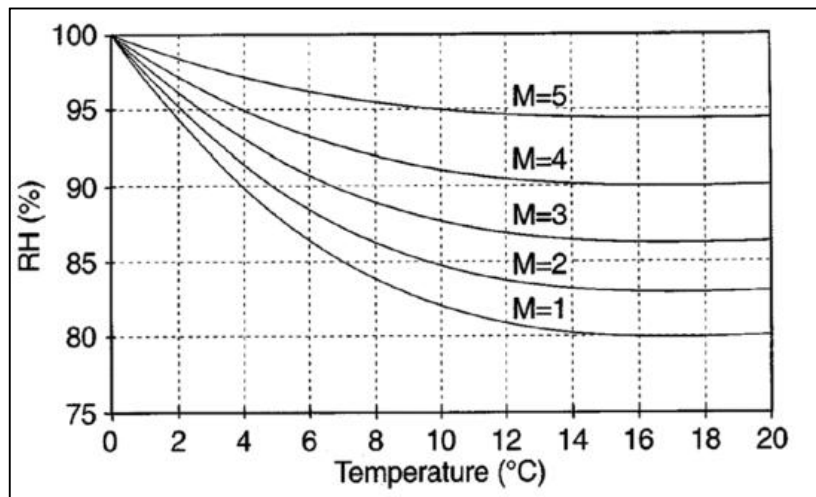
$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100, & \text{kun } T \leq 20^\circ C \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20^\circ C \end{cases} \quad (17)$$

joissa T kuvaa lämpötilaa ($^\circ C$) sekä RH_{min} homekasvun alkamiseen vaadittavaa
suhteellisen kosteuden minimiarvoa, joka saadaan taulukosta 4.

Homehtumisherkkyysluokka	$k_z (M_{max})$			RH _{min}
	A	B	C	
hyvin herkkä	1	7	2	80
herkkä	0,3	6	1	80
kohtalaisen kestävä	0	5	1,5	85
kestävä	0	3	1	85

Taulukko 4. Homeen kasvun kaavassa käytetyt homehtumisherkkyysluokkien kertoimet ja suhteellisen kosteuden minimiarvot (Junttila 2014)

Homeiden kasvun rajana voidaan pitää 80 %:n suhteellista kosteutta sekä saavutettua M1-luokan homeindeksiä. Kylmänä ajanjaksona homeen kehittymiselle vaaditaan yli 95 %:n suhteellinen kosteus, jonka myötä homeen kasvun kehittyminen alkaa pääosin vasta ilman lämmitessä (Kuvio 6).



Kuvio 6. Homeindeksien (1-5) vaaditut lämpötila- ja kosteusolosuhteet (Junttila 2014)

Homesienet aiheuttavat terveyshaittoja ihmisille sekä esteettisiä haittaa materiaalien pinnoille mutta eivät heikennä kasvukuitumateriaalien kuten puun lujuusominaisuuksia. Lahottajasienet kuitenkin käyttävät hyväkseen rakenteellisia ainesosia, kuten selluloosaa ja ligniiniä, ja heikentävät näin ollen puun lujuutta. Homeet ja mikrobit ovat kuitenkin luonnollinen osa ympäristöämme, jonka myötä niiden esiintyminen rakenteissa on kuitenkin normaalia. Rakenteissa esiintyvälle homeelle on tämän myötä hankala määrittellä tarkkoja rajoja. (Kokko ym. 1991.)

4 Rakenteiden laskennallinen tarkastelu

4.1 Laskennan taustaa

Rakenteille suoritettuna laskennan avulla voidaan varmistua niiden oikeaoppisesta kosteusteknisestä toiminnasta ja siitä, että rakenteen kosteustaso pysyy riittävän matalana mahdollisen vaurioitumisen kannalta. Suomen viileissä olosuhteissa rakenteiden kuivuminen tapahtuu pääasiallisesti ulospäin. Tämän seurauksena sekä vesihöyryn siirtymistä heikosti rajoittavan sisäpuolisen kerroksen yhteisvaikutuksesta rakenteiden kuivuminen hidastuu ja rakennekerrokset, kuten tuulensuojan ja ilmansulun sisäpinnat altistuvat yhä herkemmin kosteuden kerääntymiselle. Hygrooskooppisia materiaaleja käytettäessä rakenteiden kehittämiseen liittyvät toimenpiteet tulisikin kohdistaa kuivumiskyvyn parantamiseen sekä rakennekohtaisiin vesihöyrynvastussuhteisiin. (Ojanen & Salovaara 2002.)

Rakenteiden hyvä kuivumiskyky kuvaa osaltaan rakenteiden selviytymistä vaihtelevista kosteusrasituksista. Kuivumiskyky on kuitenkin riippuvainen rakenneratkaisuista sekä materiaaliominaisuuksien yhteistoiminnasta, jonka myötä rakenteiden vaurioitumiset ovat eriasteisia ja voivat erota toisistaan merkittävästi. (Ojanen 2016; Ojanen & Salovaara 2002)

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka on tutkinut rakenteiden kuivumiskykyyn vaikuttavia tekijöitä laskennallisesti sekä kokeellisesti mitoittavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa eri materiaaleista koostuville tuulettuville ja tuulettumattomille rakenteille. Tutkimuksissa onkin todettu, ettei kuivumisnopeus ole ainoa kriteeri, jota rakenteen toiminnalta edellytetään, vaan on otettava huomioon useammat rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat olosuhdetekijät. Rakenteiden kuivumiskyvyn antama täydentävä tieto rakennekerrosten toiminnasta kuivumisen aikana auttaa usein parantamaan myös laskennallisen analyysien tarkkuutta. (Ojanen & Salovaara 2002.)

4.2 WUFI Pro 1D –kosteussimulointiohjelma

4.2.1 Ohjelman kuvaus

Tässä opinnäytetyössä käytetty ja rakennusteollisuudessa selvästi yleisin ja käyttäjäystävällisin WUFI Pro 1D on WUFI Transient Heat and Moisture -sarjan laskentaohjelmien käytetyin kosteussimulointiohjelma. Ohjelmalla voidaan tutkia useista kerroksista koostuvien rakenteiden hygrotermisen käyttäytymisen kehittymistä yksidimensionaalisesti ajasta riippuvana. Ohjelmalla voidaan tunnistaa vuodenajoittain vaihtelevat kriittiset ajanjaksot rakenteille ja rakenneosille sekä paikantaa mahdollista kosteuden kertymistä ja homehtumisriskejä eri rakenteiden rakennekerroksissa. (What is WUFI? 2008; Vinha ym. 2013.)

Rakenteen kosteuskäyttäytyminen on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta ja valituista materiaaliominaisuuksista, jolloin ohjelmiston käyttö perustuu ilmaston säätietojen ja materiaalitietojen todenmukaisuuteen. Materiaaliominaisuudet vaihtelevat vallitsevan ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan, jolloin saman materiaalin ominaisuudet voivat eri olosuhteissa erota toisistaan merkittävästi. Materiaaliominaisuuksista kosteuden ja lämmönsiirtymiseen vaikuttavat ominaisuudet ovat mm. materiaalin irtotiheys ja huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti, kosteusriippuvuus ja materiaalin lämmönjohtavuus sekä vesihöyryn- että ilmanläpäisevyys. (Vinha ym. 2013.)

Rakennustuotannossa lämmön- ja kosteuden siirtolaskennassa WUFI Pro –laskentaohjelma huomioi rakenteessa lämmön johtumisen, kosteuden aiheuttaman faasimuutoksesta johtuvan lämmön sitoutumisen ja siirtymisen sekä auringon aiheuttaman lyhytaaltoisen säteilyn ja yöaikaisen pitkäaaltoisen säteilyjäähdyttymisen. Huokoisten materiaalien hallitsevista kosteuden siirtymismuodoista WUFI Pro –laskentaohjelma tunnistaa mm. vesihöyryn diffuusion, pintadiffuusion sekä kapillaarisen siirtymisen materiaalissa. Ohjelma ei huomioi rakenteessa tai materiaaleissa esiintyvää kosteuskonvektiota. (What is WUFI? 2008.)

4.2.2 Mitoituksen reunaehdot

Laskentaohjelman simulointi aloitetaan määrittelemällä ohjelmaan rakenteisiin kohdistuvat reunaehdot eli tutkittavien rakenteiden alkuolosuhteet. Reunaehdot

käsittelevät luonnossa muuttuvia ja ajasta riippuvaisia lämmön ja suhteellisen kosteuden olosuhteita. Simuloinnin tarkoituksena on määrittellä kuvaajien avulla rakenteen sisäisen sekä rakenteen rajapintojen ja ympäristön välisen lämmön- ja kosteudensiirtymisen tarkastelujaksoittain. (Climate Data 2012.) Liitteessä 1 on koottuna tässä opinnäytetyössä tutkittujen rakenteiden laskennassa käytetyt rakennemallien simulointiarvot.

Ilmasto-olosuhteet

Ilmaston määrittäminen ohjelmistoon voi tapahtua valmiiksi mitatusta ns. laskentajakson ilmastodatasta tai käsin määrittelyistä, mutta todenmukaisista olosuhteista. Ilmastotiedot, joita ohjelmisto käyttää hyväkseen laskennassa, ovat ulko- ja sisäilman suhteelliset kosteudet ja lämpötilat, sademäärät joista huomioidaan viistosateen osuus viistosadekertomella, auringon lyhytaaltainen ja ilmakehän pitkäaaltainen säteily määrä sekä tuulen suunta ja nopeus. (Climate Data 2012.)

Sateen määrästä osa imeytyy kapillaarisesti julkisivupintoihin ja osa kimpoaa tai valuu seinää pitkin pois. Tässä opinnäytetyössä tutkittujen ulkoseinärakenteiden ilmastotiedot eivät sisällä sade- tai säteilytietoja, joten rakenteiden ilmansuuntia, sadeveden absorptiota tai säteilyn vaikutuksia ei huomioida laskennassa. WUFI Pro –ohjelman laskennassa ei myöskään huomioida alle 0 °C:n lämpötilassa tullutta sadetta, koska lumena tuleva vesi ei imeydy kapillaarisesti seinän ulkopintaan eikä näin ollen ole määräävin kosteuden rasisuusmuodoista. (Vinha ym. 2013.)

Sisäilmaston olosuhteet voidaan valita ohjelmaan eri standardien mukaisesti. Tässä opinnäytetyössä tutkittujen ulkoseinärakenteiden sisäilman olosuhteet määritellään standardin EN 13788 mukaisesti, jolloin sisäilman suhteellinen kosteus määräytyy ulkoilman säätiöjen mukaan ja sisälämpötila pysyy vakiona ympäri vuoden. (Dialog: Climate 2009.) Laskennassa sisäilman vakiolämpötilana käytetään tässä tutkimuksessa 21 °C sekä sisäilman kosteuslisänä asuinrakennuksille standardin SFS-EN ISO 13788 (2013) mukaista luokitusta 2, joka määrittelee kosteuslisän kriittisimmäksi arvoksi talvelle 5 g/m³ ja kesälle 2 g/m³.

Opinnäytetyössä tutkitun EcoCoconin olkielementtirakenteen seitsemältä kuu-kaudelta mitatut sekä passiivitalon puukuitueristerakenteen 12 kuukaudelta mi-

tatut ulko-olosuhteita kuvaavat ilmastodatat on tuotettu pr-tiedostomuotoon, jolloin ne voidaan siirtää Excelin kautta WUFI Pro -laskentaohjelmistoon.

Pintojen siirtokertoimet

Rakenteiden pintojen siirtokertoimet määrittelevät sen, miten ulko-olosuhteet vaikuttavat rakenteeseen siirtyvän lämmön ja kosteuden määrään. WUFI Pro -ohjelmaan määritellyt pinnan siirtokertoimet lajitellaan sisä- ja ulkopintojen mukaan ja ne ovat riippuvaisia esimerkiksi tuulen vaikutuksesta. Kun tuulen vaikutus huomioidaan laskennassa, pintojen lämmönvastukset määräytyvät materiaalien sijasta määritelyjen ulkoilman säätietojen mukaisesti. (Details: Surface Coatings 2013.)

Tässä tutkimuksessa rakenteisiin kohdistuvia tuulen vaikutuksia ei huomioida, jolloin lämmönvastusarvoina ulko- ja sisäilmastolle käytetään käsin syötettyjä arvoja, jotka vastaavat Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjearvoja sisäpinnalle (0,13), sekä ulkopinnalle (0,04). Ulkopinnan lämmönvastus määräytyy usein sisäpinnan lämmönvastuksen mukaan, jos rakenne on tuulettuva.

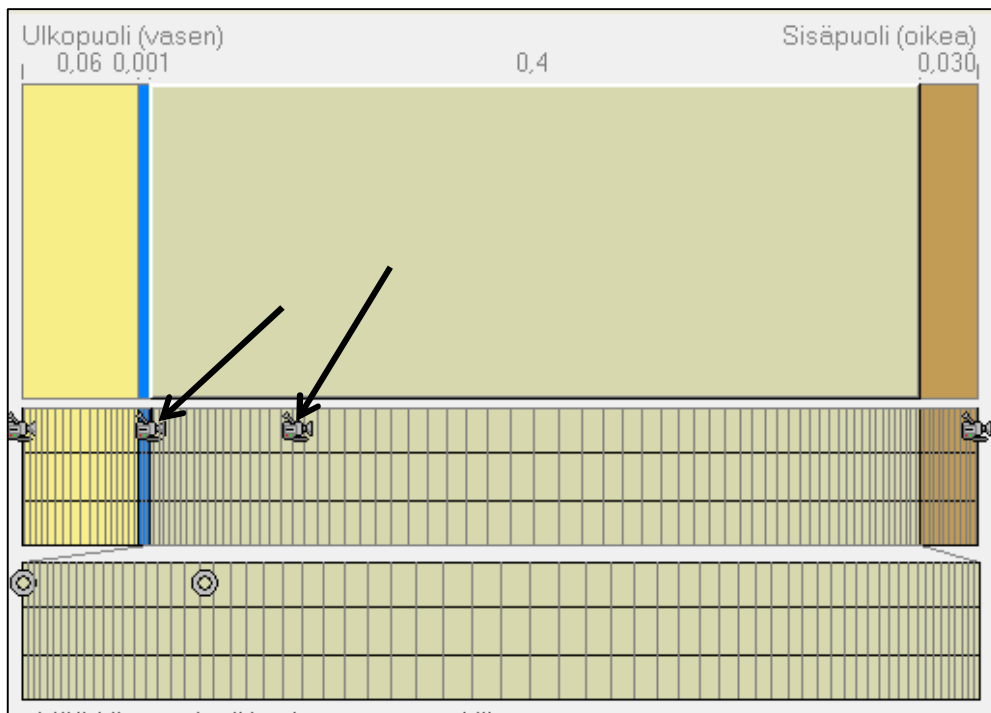
Sisä- ja ulkoilmastolle on mahdollista lämmönvastusarvojen lisäksi määrittellä rakenteen uloimpien pintojen tai pinnoitteiden vesihöyryn diffuusiovastuksia kuvaavat S_d -arvot. S_d -arvon laskennallinen määrittely on käyty aiemmin kappaleessa 2.5.1. Tässä opinnäytetyössä pintamateriaalien, kuten maalipintojen S_d -arvoja ei ole määritetty. Opinnäytetyössä tutkittiin pinnoitteiden S_d -arvojen tuoma vaikutus tietyn vertailurakenteen lämpö- ja kosteustekniselle toiminnalle.

4.2.3 Laskentaverkko

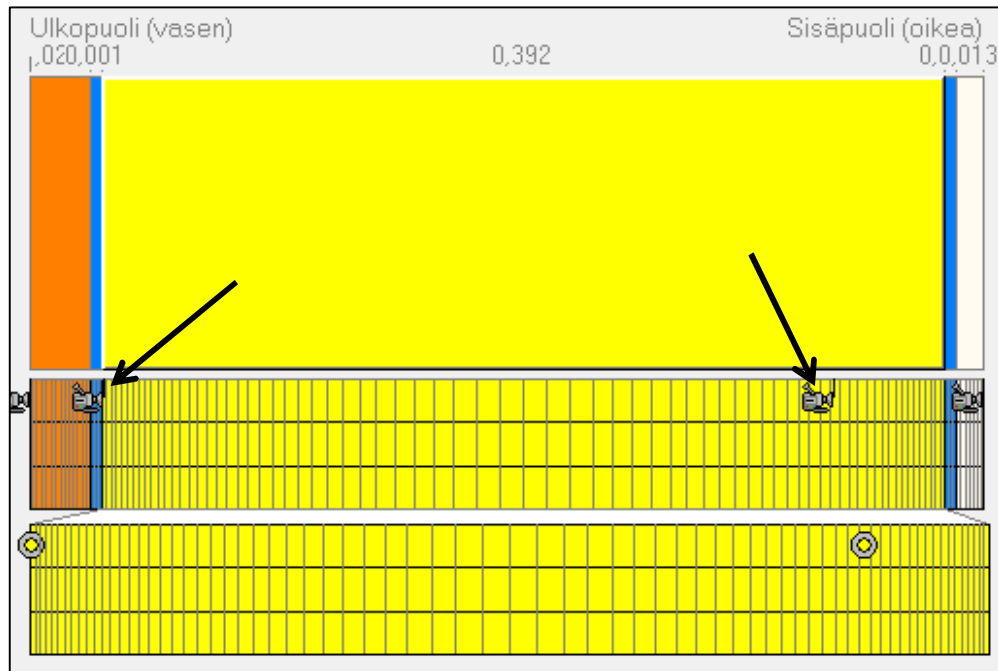
Laskennassa tutkittavan rakenteen geometria eli rakennemalli muodostetaan graafisesti materiaalikerroksittain WUFI Pro -laskentaohjelman materiaalitietokannasta. Materiaalit voidaan luoda myös käsin, kun tiedossa on laskennassa tarvittavat materiaaliominaisuudet. Muodostetut rakennekerrokset voidaan jakaa laskentaverkon eli hilaajaon avulla pienempiin kokonaisuuksiin. Jotta lämmön ja kosteuden siirtymistä rakenteessa voidaan tutkia mahdollisimman tarkasti, on hyvä valita hilaajaaksi kolmesta vaihtoehdoista tiheydeltään pienin tai määrittelyse manuaalisesti.

Laskentaverkkoon yleensä kahden materiaalin liittymäkohtaan lisätään hilajaan mukaisesti monitorointipisteet, joista voidaan seurata tarkemmin kyseisten materiaalien kosteuskäyttäytymistä. Tässä opinnäytetyössä laskennassa käytetyt monitorointipisteet on valittu rakenteiden kriittisimmistä kohdista sekä kohdista, joista rakenteen sisäinen mittausdata on tuotettu, joten tuloksia voidaan verrata toisiinsa.

Kuvassa 6 on esitetty EcoCocon olkirakenteen monitorointipisteiden sijainnit sekä WUFI Pro –laskentaan tuotettu rakennemalli. Monitorointipisteet on sijoitettu olkieristeen ja ilmansulun rajapintaan sekä 350 mm koko rakenteen sisäpinnasta olkieristeen sisään. Kuvassa 7 on vastaavasti esitetty Ekovillan puukuiturakenteen monitorointipisteet ja laskentamalli. Puukuiturakenteen monitorointipisteet ovat sijoitettu myös eristeen ulkopintaan sekä 50 mm koko rakenteen sisäpinnasta eristeen sisään.



Kuva 6. Olkirakenteen rakennemalli ja monitorointipisteet (nuolet)



Kuva 7. Puukuiturakenteen rakennemalli ja monitorointipisteet (nuolet)

Olkirakenteesta mitattu data on tuotettu vain eristeen sisäisestä monitorointipisteestä. Laskennassa on kuitenkin tutkittu myös kosteusteknisesti rakenteen kriittisin piste ilmansulun ja eristeen rajapinnassa.

5 Barönsalmen kesämökki

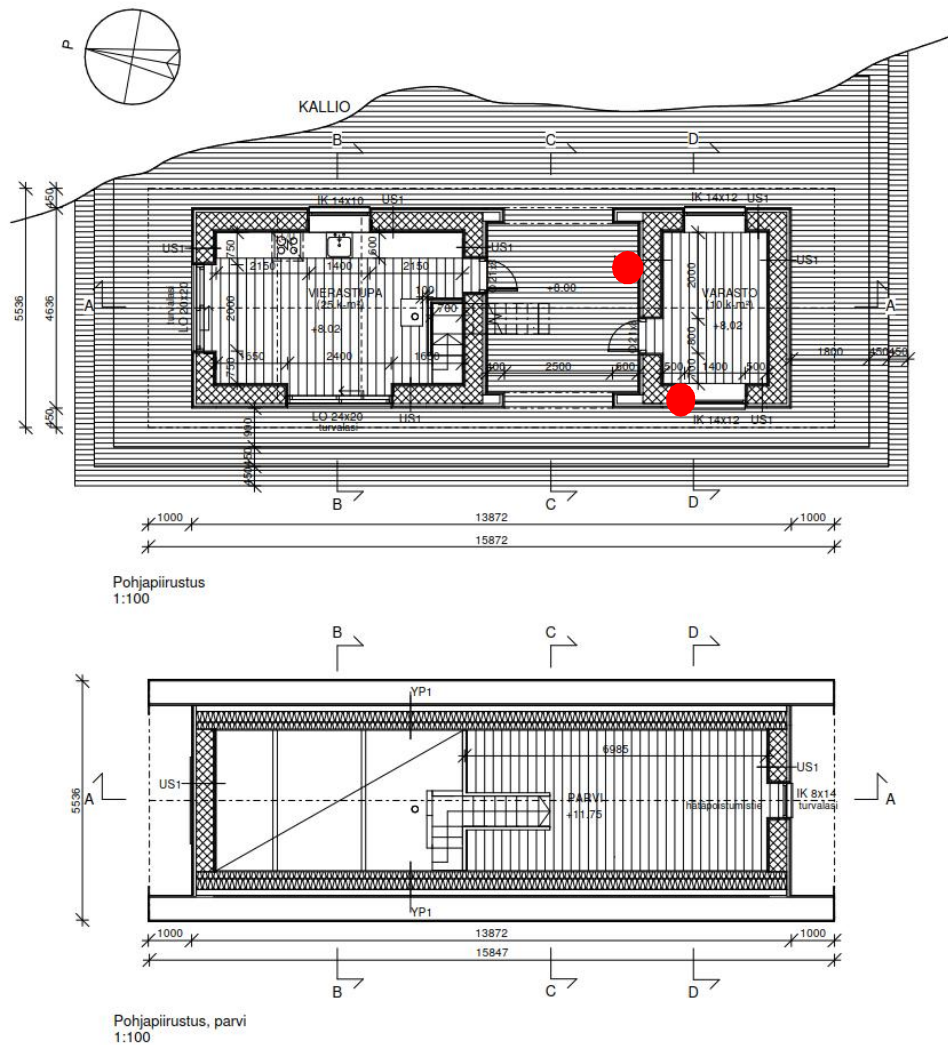
5.1 Kohteen kuvaus

Etelä-Suomen saaristossa, merenrannassa sijaitseva kesämökki on valmistettu osakseen EcoCocon olkielementeistä ja on pinta-alaltaan 50 m². Mökki on ke-säasuttava eli vuodesta noin kolme kuukautta aktiivisessa käytössä. Mökissä on erillinen yhteensä 40 m² parvellinen vierastupa sekä 10 m² suuruinen varasto, joka yhdistyy vierastupaan kyseisellä parvella (Kuva 8). Mökin ulkoseinissä on käytetty lämmöneristeinä EcoCoconin olkielementtejä sekä alapohja- että ylä-pohjarakenteissa selluvillaeristystä.

Tässä opinnäytetyössä olkielementtirakenteisen ulkoseinän laskennallinen tarkastelu on tehty kahdesta kohdasta rakennetta. Laskelmat on tuotettu WUFI Pro 4.2 1D -ohjelmistoa sekä suomalaisen homemalliluokittelun mukaista Excel-laskentapohjaa käyttäen. Laskennan ulkoilmaston reunaehtoina on käytetty Etelä-Suomessa sijaitsevan Barönsalmen rannikko-olosuhteissa mitattuja sää-

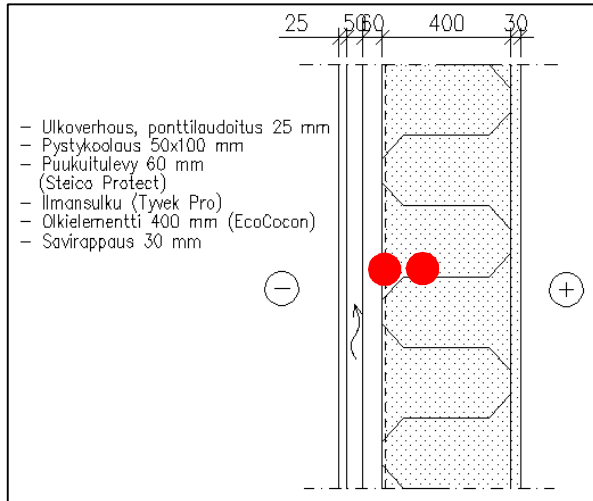
tietoja 12 kuukauden mittausajanjaksolta, josta seitsemän kuukautta on mitattua ilmastodataa.

Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksessa on käytetty valvontajärjestelmänä USB Temperature and Humidity Data Logger langatonta mittauslaitteistoa. Mittauslaitteiston sijainnit on esitetty punaisilla pisteillä kuvassa 8. Ulkoilman olosuhteiden mittaus on suoritettu suojaisesta paikasta, parven muodostaman katoksen alta ja ulkoseinän mittaus varastorakennuksen lännen puoleisesta seinästä. Ulkoseinärakenteen mittaustuloksien muodostumisessa huomioidaan auringon lämmittävä vaikutus, sillä mitattu rakenne ei sijaitse varjonpuoleisella seinällä.



Kuva 8. EcoCocon olkieristeisen kesämökin pohjapiirustus sekä mittauspisteet

Opinnäytetyössä tutkittu EcoCoconin olkieristeinen ulkoseinärakenne on tuuletettava ja sen höyrynsulku on korvattu sisäpinnassa käytetyllä savirappauksella (Kuva 9). Laskennassa tuulensuojan ulkopuolisia rakenteita ei ole huomioitu, joten rakenne vastaa hyvin tuulettuvaa rakennetta, johon ei kohdistu viistosateen tai auringonsäteilyn rasitusta.



Kuva 9. Olkirakenteen rakennetyyppi sekä mittaus- ja laskentapisteet (punaiset pallot)

Tutkimuksessa laskentaohjelmistoon luotiin yhteensä neljä materiaaliominaisuuksiltaan ja alkuolosuhteiltaan eroavaa rakennemallia, joiden ulko- ja sisäilman reunaehdot pysyivät samoina koko laskennan ajan. Tutkituista ulkoseinärakenteista US1.1 ja US1.2 ovat materiaaliominaisuuksiltaan EcoCoconilta saatujen lähtötietojen mukaiset. Rakenteiden US1.3 ja US1.4 olkieristeen lämmönjohtavuus on suurempi sekä S_d -arvo vastaavasti pienempi kuin alkuperäisten rakenteiden. Rakenteet ja materiaaliominaisuudet on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

Rakenteiden alkuolosuhteiden vaikutusta rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen tutkittiin määrittelemällä rakenteille seuraavat arvot:

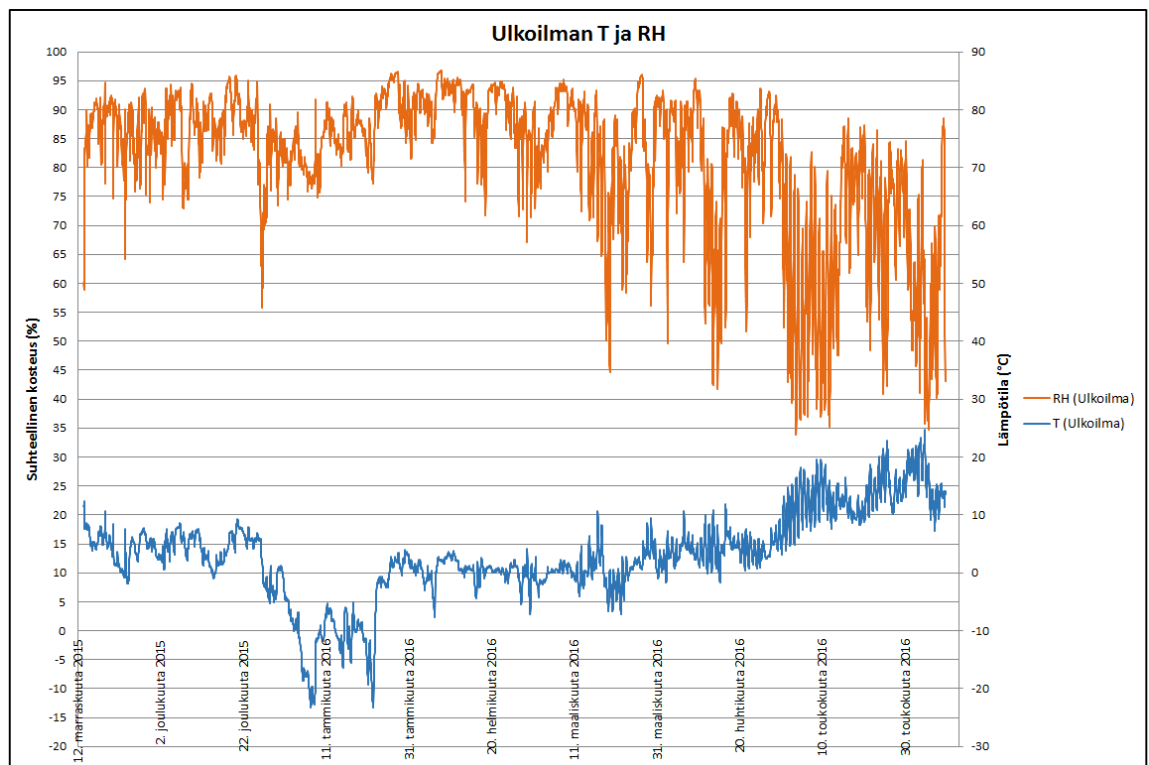
- US1.1, lämpötila + 21 °C, suhteellinen kosteus 80 %
- US1.2, lämpötila + 20 °C, suhteellinen kosteus 70 %
- US1.3, lämpötila + 21 °C, suhteellinen kosteus 80 %
- US1.4, lämpötila + 20 °C, suhteellinen kosteus 70 %

Rakenteille suoritettujen lämpö- ja kosteussimulointien avulla pyritään selvittämään, saavutetaanko laskennallisella tarkastelulla mitattuja arvoja vastaavat tulokset sekä tuloksien välisiin eroihin mahdollisesti vaikuttavat olosuhdetekijät ja materiaaliominaisuudet. Rakenteen US1.2 toimivuutta testattiin myös poistamalla rakenteesta Tyvek Pro –ilmansulku, jolloin rakenteen vesihöyrynvastus- suhteet tasoittuvat ulkopuolisen puukuitulevyn ja sisäpuolisen savirappauksen osalta.

5.2 Reunaehdot ja tarkastelujakso

Barönsalmi sijaitsee Etelä-Suomen rannikolla, jossa merituuli ja myöhään alka- va sekä pitkään kestävä kesäkausi vaikuttavat muuttuvaan ilmastoon. Mitatut ulkoilman olosuhteet vastaavat varjosta sekä suojaiselta paikalta mitattuja arvo- ja. Huhtikuusta alkaen ilman suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat suurempia sään muuttuessa sateisemmaksi ja lämpimämmäksi (Kuvio 7).

Kosteusteknistä käyttäytymistä on selvitetty laskennallisesti 13.11.2015 – 13.6.2016 alkuperäisiä materiaaliominaisuuksia vastaaville rakenteille sekä ver- tailurakenteille.

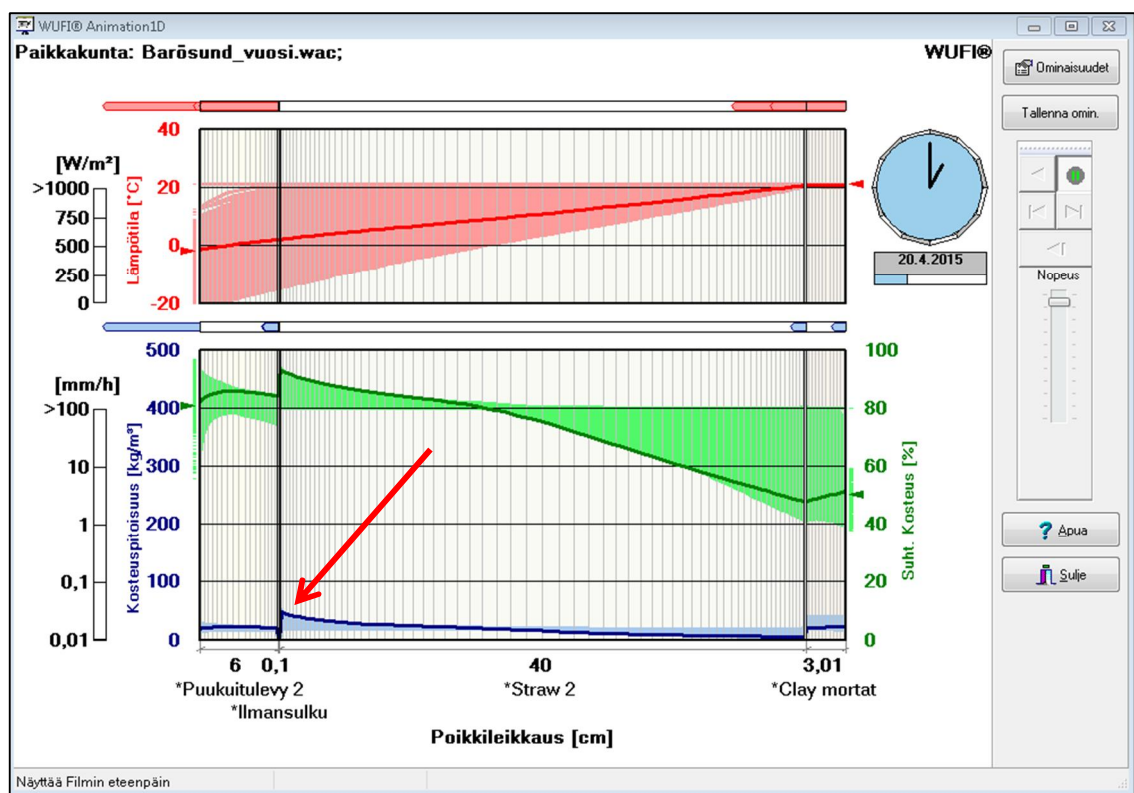


Kuvio 7. Mitatun ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut

Käytössä ei ollut olkirakennuksesta mitattuja sisäilman olosuhdetietoja. Sisäpuolisina reunaehtoina on käytetty sisäilman vakioämpötilana 21 °C sekä sisäilman kosteuslisänä asuinrakennuksille standardin SFS-EN ISO 13788 (2013) mukaista luokitusta 2.

5.3 Laskentatulokset ja tulosten tarkastelu

Kuvassa 10 on esitetty rakenteen US1.1 kosteusjakauma yksittäisellä mittaushetkellä. Suoritetulla laskennalla voidaan olkirakenteessa havaita selvästi kohonneita kosteuspitoisuuksia etenkin ilmansulun sisäpinnassa (punainen nuoli).

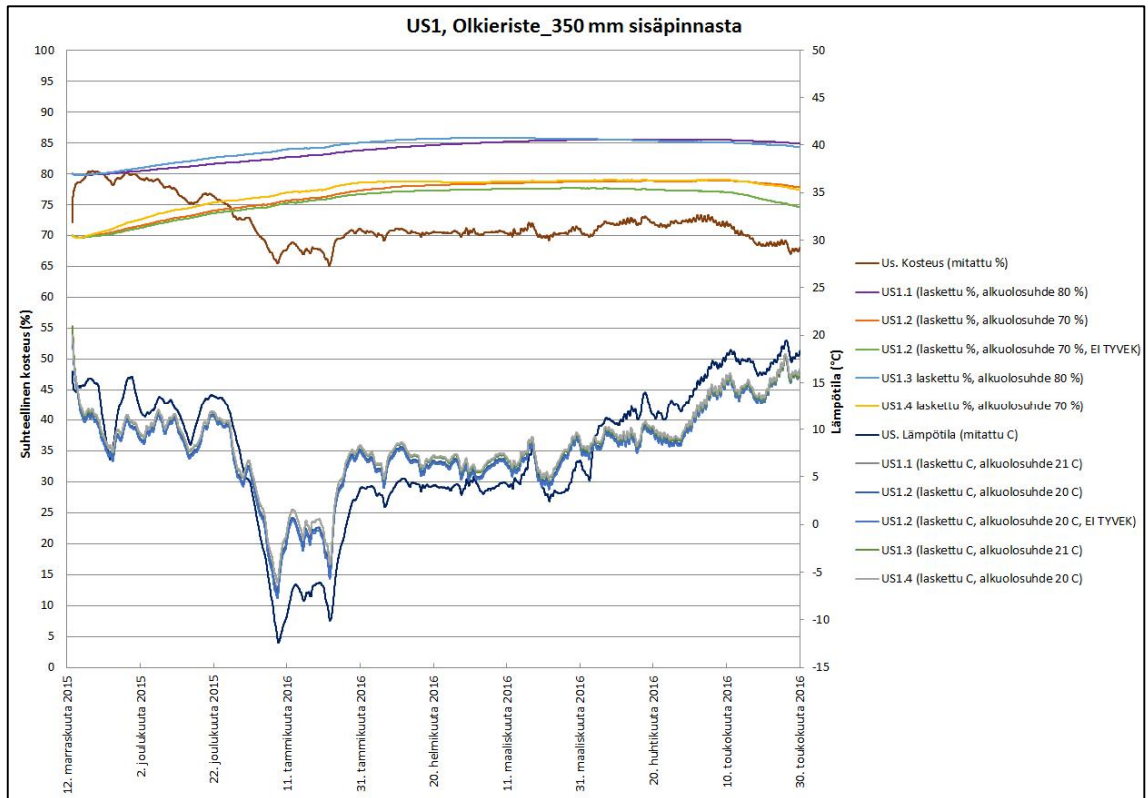


Kuva 10. Olkirakenteen US1.1 laskennallisesta tarkastelusta selviää kohonneita kosteuspitoisuuksia ilmansulun sisäpinnassa (punainen nuoli)

Kylmään vuodenaikaan ulkoilman kosteusmäärä on huomattavasti vähäisempi sisäilmaan nähden, jonka vuoksi ilman virtaussuunta on sisältä ulospäin. Ilman siirtyessä sisältä ulospäin rakenteesta rakenteessa voidaan havaita vesihöyrynpitoisuuseron tasoittumisesta aiheutuvaa kosteuden kertymistä ilmansulun sisäpinnassa (Kuva 10). Vesihöyryn siirtyessä rakenteesta tiheydeltään tiiviimpään materiaaliin saavuttaa se helpommin kyllästymispisteen, jossa se pystyy kondensoitumaan kylmän rakenteen pintaan.

Olkieristeen sisäpuolinen tarkastelu

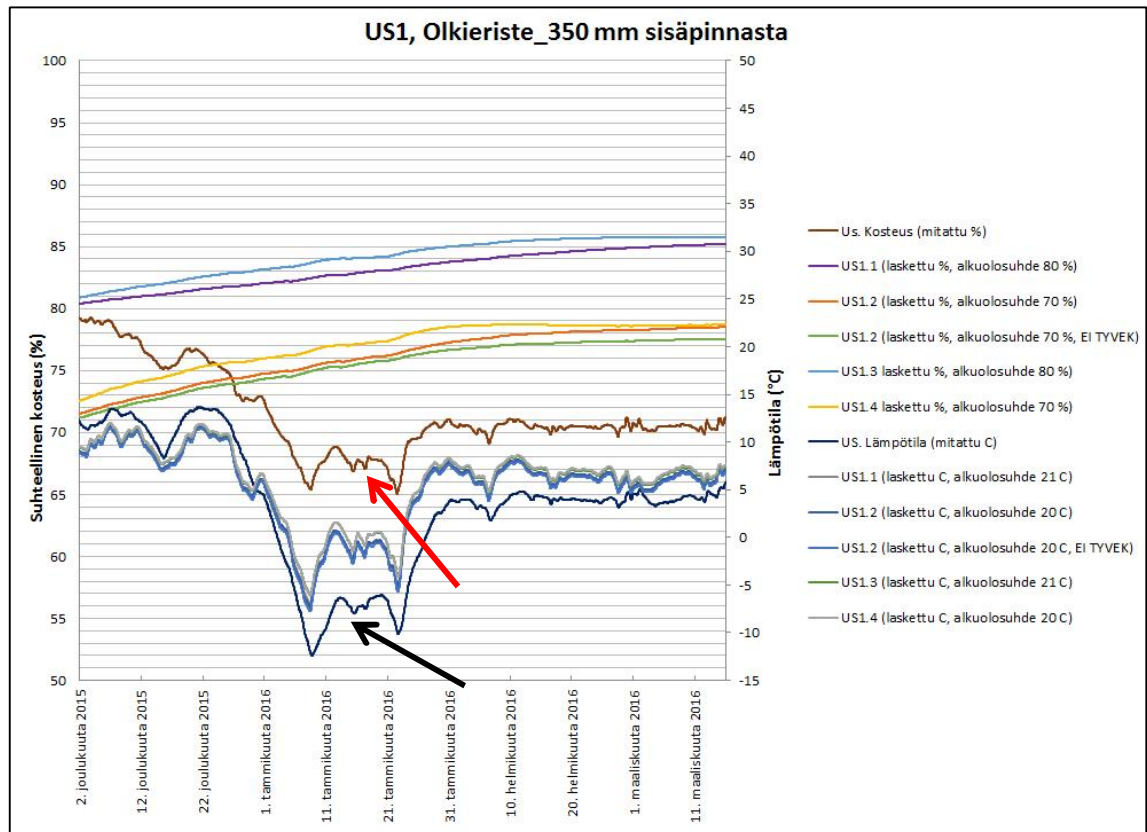
Olkieristeen sisältä, 350 mm rakenteen ulkopinnasta, mitatut ja laskennallisesti tuotetut vertailurakenteiden lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet on esitetty kuvioissa 8.



Kuvio 8. Laskennassa tutkituista rakennemalleista tuotetut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tulokset 350 mm rakenteen sisäpinnasta

Kuviosta 8 selviää, ettei Tyvek Pro –ilmansulun poistaminen rakenteesta vaikuta eristeen sisäpuolella suhteelliseen kosteuden muodostumiseen kylmällä ajanjaksolla, vaan erot korostuvat lähinnä ilman lämmitessä samalla, kun rakenteen kuivuminen ulospäin hidastuu. Rakenteen tässä pisteessä suurta vaikutusta ei myöskään tuo lämmönjohtavuuden kasvattaminen tai S_d -arvon pienentäminen oljen osalta alkuperäisiin rakenteisiin US1.1 ja US1.2 verrattuna. Laskennallisesti kosteustaso on lähempänä mitattua käytettäessä rakenteille matalampaa alkukosteutta.

Kuviossa 9 tarkastellaan lähemmin tutkittujen rakenteiden suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen muodostamia eroja suhteessa mitattuihin arvoihin.



Kuvio 9. Suhteellisen kosteuden (punainen nuoli) ja lämpötilojen (musta nuoli) erot mitattujen ja laskettujen tulosten välillä

Mitattu lämpötila on pääosin korkeampi kuin laskennallinen lämpötila, mutta kylmällä jaksolla ja sen jälkeen mitattu lämpötila laskee laskennallisen lämpötilan alapuolelle. Tämä voi johtua osittain mitatuista ulko-olosuhteista, jotka eivät täysin edusta lännen suuntaisen ulkoseinän ulkopuolisia olosuhteita sekä erityisesti sisäpuolisista olosuhteista, joista ei ollut mitattuja olosuhdetietoja.

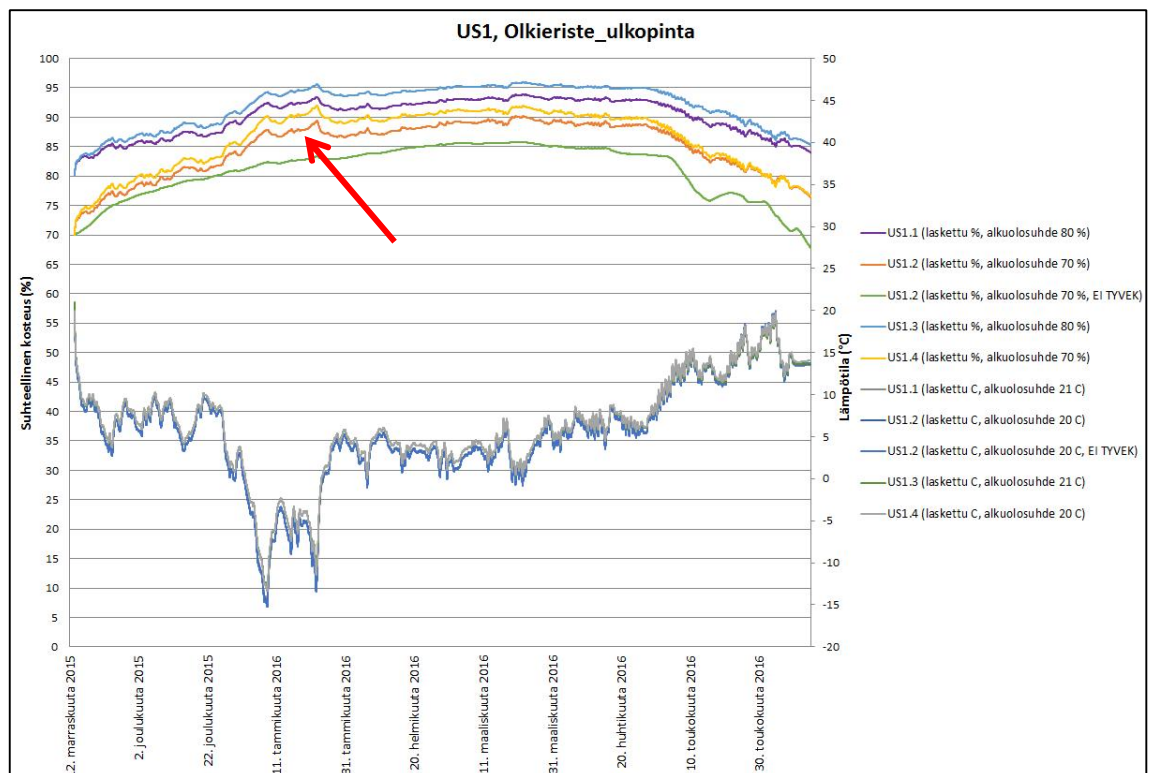
Mitatun suhteellisen kosteuden käyrää verrattaessa mitattuun lämpötilan käyrään, nähdään selvä yhtäläisyys tammikuun kylmällä ajanjaksolla. Tämä voisi osittain johtua materiaalin mahdollisesta jäätymisestä, jolloin suhteellinen kosteus noudattaa lähinnä muodostuneen jään lämpötilaa (Kuvio 9, punainen nuoli). Kyseinen kosteuspitoisuus on kuitenkin vähäinen, jolloin jään muodostumista rakenteeseen voidaan tässä tapauksessa pitää epätodennäköisenä.

Kuviosta 9 selviää myös, että suurimmat lämpötilaerot mitattujen ja laskettujen arvojen välille muodostuvat tammikuun väliselle ajalle (musta nuoli). Tämä näkyy myös matalampana vesihöyrynpitoisuutena, joka mitatun lämpötilan mukaan laskettuna on noin $1,16 \text{ g/m}^3$. Laskennallisesti tuotettujen rakenteiden pi-

toisuudet nousevat tässä tapauksessa välille $1,5 \text{ g/m}^3$ – $1,6 \text{ g/m}^3$. Vesihöyrynpitoisuus ei kuitenkaan anna merkittäviä eroja mitattujen ja laskennalla tutkittujen rakenteiden välille.

Olkieristeen ulkopinnan tarkastelu

Rakenteesta on syytä selvittää laskennallisesti myös rakenteen kosteusteknisesti kriittisin kohta ilmansulun ja eristeen välissä. Olkieristeen ulkopinnasta laskennallisesti tuotetut vertailurakenteiden lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet on esitetty kuvioissa 10.



Kuvio 10. Mitatut ja laskennalla tuotetut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tulokset tutkituista rakennemalleista lämmöneristeen ja ilmansulun rajapinnasta

Kuviossa 10 suhteellinen kosteus kohoaa korkeaksi rakenteen rajapinnassa kaikissa tutkituissa tapauksissa, erityisesti rakenteessa US1.3, jossa eristeen lämmönjohtavuus on alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna huomattavasti suurempi ja S_d -arvo vastaavasti pienempi. Lämmönjohtavuuden ero rakenteissa US1.3 ja US1.4 korostuu kylmään vuodenaikaan, jolloin suhteellinen kosteus kasvaa ja tasoittuu myöhemmin ilman lämpötilan noustessa samalle tasolle rakenteiden US1.1 ja US1.2 kanssa.

Korkeat suhteelliset kosteudet voivat osittain johtua laskentaan käsin määritellyistä sisäpuolisista reunaehdoista sekä mitatuista ulko-olosuhteista. Rakenteiden ja materiaalien viilentyminen ja kosteuden jäätyminen voi mahdollisesti päivällä kevätauringon lämmittäessä seinää vasten höyrystyä rakenteesta. Tämä nostaa rakenteen myös suhteellista kosteutta hetkellisesti tammikuun kylmällä ajanjaksolla (Kuvio 10, punainen nuoli).

5.4 Homekasvun tarkastelu

Tutkittujen rakenteiden homeen kasvua tarkasteltiin 13.11.2015 – 3.11.2016. Homeindeksin laskennassa käytettiin WUFI Pro –laskennasta tuotettuja lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja tutkittaville rakenteille. Laskentamallin reunaehtoina on käytetty WUFI Pro –laskennassa käytettyjä ilmasto-olosuhteita. Rakenteihin muodostuvan homeen kasvun mallinnuksen periaatteita on käsitelty aiemmin luvussa 3.2.

Oljen homehtumisherkkyys on suuri, sillä olki ei sisällä erillisiä homeenestoaineita, joten tarkastelut tehtiin homehtumisherkkyysluokituksella HHL1. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista tarkasteltiin olkieristeen ja ilmasulun rajapinnassa sekä 350 mm rakenteen sisäpinnasta. Liitteessä 3 on esitetty tutkittujen rakenteiden laskennallisesti selvitetty homehtumisindeksikäyrät.

Taulukossa 5 on esitetty tutkittujen rakenteiden homeindeksit mitatulta ajanjaksolta. Tutkittujen rakenteiden US1.1 sekä US1.3 laskennalliset homeindeksit kohosivat silminnähden havaittavalle tasolle 3 ja 4, kun alkuolosuhteiden suhteelliseksi kosteudeksi määriteltiin 80 %. Rakenteen suuren alkukosteuden myötä suhteellinen kosteus on koko kesäjakson korkea, jolloin hometta muodostuu, vaikka lämpötila olisikin alhainen. Materiaalien lämmönjohtavuuden kasvattaminen korkeissa kosteuspitoisuuksissa lisää myös homeenkasvulle otollisia olosuhteita. Laskennalla voidaan todeta, että alkuolosuhteiden alhainen suhteellinen kosteus merkitsee suuresti oljen ja ilmansulun rajapinnalle muodostuvaan homeen kasvun hidastumiseen.

Eristeen sisältä lasketut homeindeksin arvot pysyivät kaikissa tapauksissa hyväksyttävällä rajalla (< 2), kun arvot ovat mitattu läheltä rakenteen ulkopintaa (Taulukko 5). (Ojanen 2016.)

Homeindeksit - Suomalainen homemalli (VTT ja TTY)	
EcoCocon - olkirakenne	
Ulkoseinärakenne (Olkieristeen ulkopinta)	Homeindeksi
Mitattu	-
US1.1	3,014
US1.2	0,684
US1.3	4,593
US1.4	1,400
Ulkoseinärakenne (350 mm olkieristeen sisäpinnasta)	Homeindeksi
Mitattu	0,017
US1.1	1,146
US1.2	0,000
US1.3	1,295
US1.4	0,000

Taulukko 5. Suomalaisella homemallilla tuotetut maksimi homeindeksit tutkituille rakenteille

Laskentatulosten perusteella eristeen ulkopinnassa on odotetusti suurempi homehtumisriski kuin mitatulla 350 mm syvyydellä. Homehtumisriski vaihtelee kuitenkin suuresti laskentatapauksesta riippuen.

Alkuperäisen ulkoseinärakenteen US1.2 olkieristeen ja ilmansulun rajapinnan homeindeksi laski arvosta 0,684 arvoon 0,044, kun rakenteen ilmansulkuna toimiva Tyvek Pro –ilmansulku jätettiin laskennassa huomioimatta (Liite 3). Eristeen sisäpuolella homehtumisindeksi laski kyseisessä tapauksessa nolnaan.

5.5 Johtopäätökset

Rakenteen kuivumiskyvyssä havaittiin laskennallisen tarkastelun perusteella puutteita johtuen rakenteen vesihöyryntiiveyden kasvusta. Savirappaus yksinään ei riitä muodostamaan riittävää höyrynsulkua rakenteen sisäpintaan, jonka vuoksi rakenteen kosteuspitoisuus ei ole tasapainossa. Laskennallisen tarkastelun perusteella rakenteeseen pääsee enemmän kosteutta suhteessa sen kuivumiseen, mikä altistaa olkieristeen sekä ilmansulun rajapinnan kosteuden tiivistymiselle ja homeen kasvulle.

Rakenteen höyrynsulkuna toimivan 30 mm savirappauksen vesihöyrynvastus ($S_d \sim 0,33$ m) on liian pieni suhteessa rungon ulkopuolelle asennettavaan ilmansulun vesihöyrynvastukseen ($S_d \sim 0,2$ m) sekä puukuitulevyn vesihöyrynvastukseen ($S_d \sim 0,18$ m). Tämän myötä rakenteen vesihöyrynvastus ei kasva riittävästi ulkoa sisäänpäin mentäessä eikä näin ollen täytä ohjeistuksen mukaista vaatimusta huokoisen rakenteen vesihöyrynvastussuhteesta (5:1). Rakenteen savirappauskerroksen paksuutta kasvattamalla tai sisäpintaan asennettavalla erillisellä höyrynsululla kasvatettaisiin vesihöyrynvastussuhdetta ulko- ja sisäpinnan välille. Näin ollen vesihöyryn pääsy rakenteeseen rajoittuisi ja tämän myötä tasapainottuisi suhteessa rakenteesta poistuvan kosteuden määrään. Lämmöneristeen lämmönjohtavuuden kasvattaminen rakenteessa mahdollistaa kesäaikana rakenteen nopeamman kuivumisen mutta vaikuttaa kosteuspitoisuuksien nousuna vastaavasti kylmään vuodenaikaan.

Rakenteen suhteellinen kosteus kohoaa laskennallisesti korkeaksi jokaisessa tutkitussa tapauksessa suhteessa mitattuun arvoon etenkin kylmänä vuodenaikana. Tämä voi johtua osittain laskennan virhetekijöistä, kuten siitä, ettei laskentaohjelma huomioi olkieristeen kosteuskapasiteetin lämpötilariippuvuutta tai rakenteeseen kulkeutuvia ilmavirtauksia, jotka vaikuttavat kosteuden jakautumiseen rakenteessa. Erot laskennan ja mittaustulosten välillä voivat johtua myös mittauksen epävarmuustekijöistä, joista useimmat liittyvät mittausten suoritustapaan, olosuhteisiin sekä mittauslaitteiden herkkyyteen. Laskelmien avulla tehtävät havainnot on kuitenkin syytä huomioida, kun kyseessä on homehtumisherkkä materiaali.

Tehdyn laskennallisen tarkastelun perusteella olkieristeinen rakenne on lämpö- ja kosteusteknisesti toimiva, jos rakenteen alkutilanteen suhteellinen kosteus on riittävän matala (< 70 %). Olkirakenteelle ominaisena kriittisenä kosteusraja-arvona pidetään 20 painoprosenttia eli 20 kg/m^3 , joka vastaa noin 80 % suhteellista kosteutta, kun laskennassa oljen tiheytenä käytetään 100 kg/m^3 . Lämpötilan noustessa ja suhteellisen kosteuden pysyessä yli 80 % homeen kasvu rakenteen rajapinnoilla mahdollistuu.

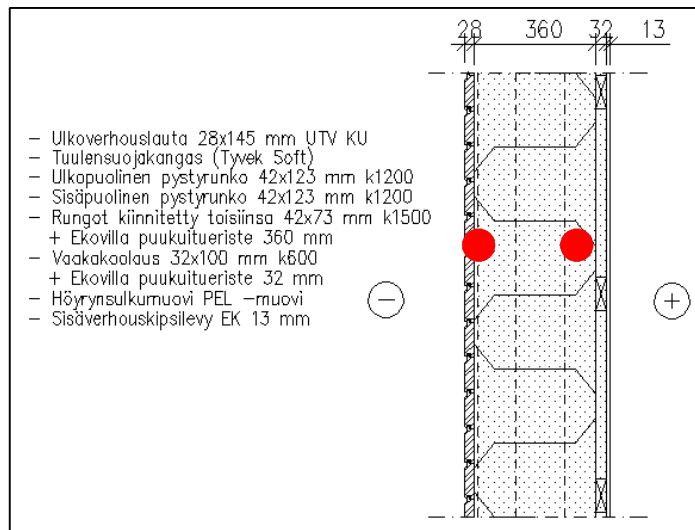
Tutkimuksessa käytetty mittausdata on tässä tapauksessa kuitenkin lyhyt, eikä tarkastelujakso anna kokonaiskuvaa olkieristeen kosteuspitoisuuden muutoksis-

ta, jotta tuloksia voitaisiin yleistää. Yleisesti ottaen uusien rakennratkaisujen toimivuutta tulisikin tarkastella muuttuvissa olosuhteissa riittävän kauan, yleensä useamman vuoden ajan, jotta rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen kehityssuunta voitaisiin todeta.

6 Ritaharjun passiivitalo

6.1 Kohteen kuvaus

Tässä opinnäytetyössä toisena tutkimuskohteena on Oulun Ritaharjussa sijaitseva Pohjolan Ekotalon Oy:n passiivitalon puukuitueristeinen ulkoseinärakenne. Tutkittu rakenne on kyseisen rakennuksen pohjoispuoleinen eli varjon puoleinen ulkoseinä. Rakenteen laskennallinen tarkastelu on tehty kahdesta kohdasta rakennetta, joista on tuotettu myös mitattua datatietoa lämmön ja suhteellisesta kosteuden kehittymisestä rakenteessa (Kuva 11). Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksessa on käytetty Proidualin mittausantureita sekä datatietoa keräävää Ouman laitteistoa. Laskelmat on tuotettu WUFI Pro 1D –ohjelmistoa sekä suomalaisen homemalliluokittelun mukaista Excel-laskentapohjaa käyttäen.



Kuva 11. Puukuiturakenteen rakennetyyppi sekä mittaus- ja laskentapisteet (punaiset pallot)

Tutkimuksessa laskentaohjelmistoon luotiin yhteensä neljä eri materiaaliominaisuuksiltaan ja alkuolosuhteiltaan eroavaa rakennemallia. Rakennemallien ulko- ja sisäilman reunaehdot pysyivät samoina koko laskennan ajan.

Rakenteen US2.1 laskennallisessa rakennemallissa on käytetty Fraunhofer - IBP –materiaalitietokannasta valittuja, lähtötietoihin perustuneita materiaaleja. Rakenteen US2.2 eristemateriaalina on käytetty toisesta materiaalitietokannasta valittua selluvillaeristettä. Rakenteiden US2.1 sekä US2.3 lämmöneristemateriaalina on käytetty alkuperäistä Ekovillan puukuitueristettä ominaisuuksiltaan vastaavaa eristemateriaalia, mutta US2.3 julkisivumateriaalina on käytetty toisen materiaalitietokannan ominaisuuksia vastaavaa ulkoverhouslautaa. Rakenteen US2.4 julkisivu- sekä lämmöneristemateriaali vastaavat ominaisuuksiltaan rakenteissa US2.2 ja US2.3 käytettyjä materiaaleja. Rakenteet ja materiaaliominaisuudet on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

Rakenteiden alkuolosuhteiden vaikutusta rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen tutkittiin määrittelemällä rakenteille seuraavat arvot:

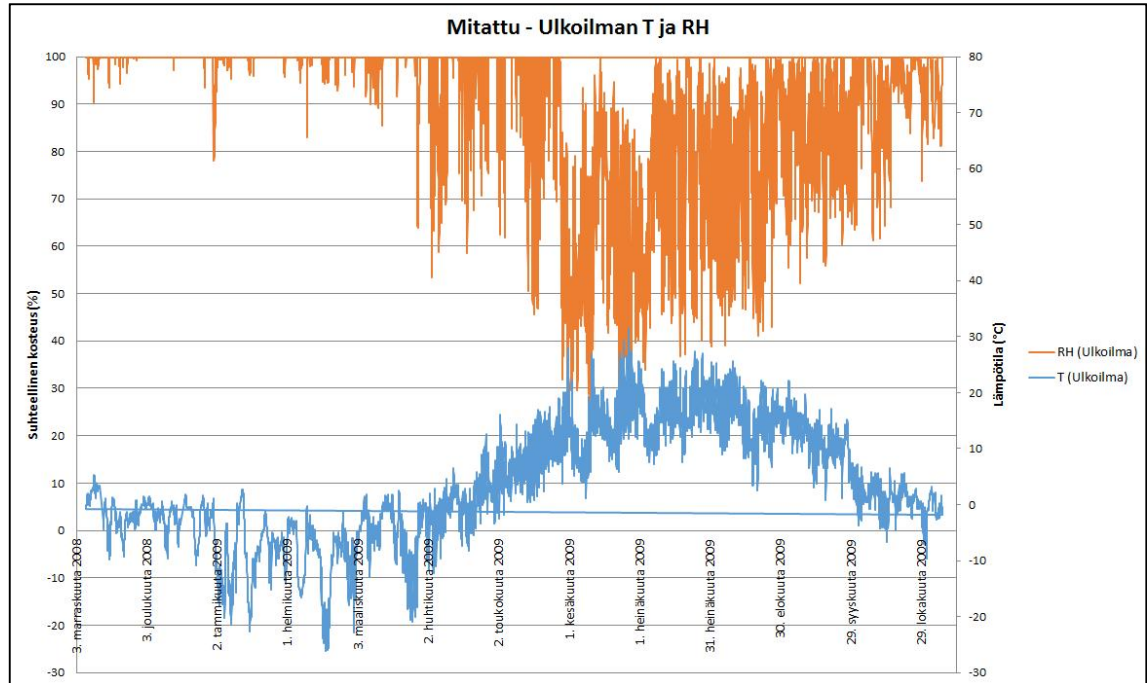
- US2.1, lämpötila + 20/21 °C, suhteellinen kosteus 70/80 %
- US2.2, lämpötila + 20 °C, suhteellinen kosteus 70 %
- US2.3, lämpötila + 20 °C, suhteellinen kosteus 80 %
- US2.4, lämpötila + 21 °C, suhteellinen kosteus 80 %

Rakenteille suoritettujen lämpö- ja kosteussimulointien avulla pyritään selvittämään, saavutetaanko laskennallisella tarkastelulla mitattuja arvoja vastaavat tulokset sekä tuloksien välisiin eroihin mahdollisesti vaikuttavat olosuhdetekijät ja materiaaliominaisuudet.

6.2 Reunaehdot ja tarkastelujakso

Oulu sijaitsee Pohjois-Pohjanmaan maankunnassa, jossa talven kylmä ajanjakso kestää Etelä-Suomen olosuhteisiin verrattuna pidempään. Ilmaston mittausjaksosta voidaankin todeta kylmän ajanjakson kestäneen yöpakkasina huhtikuun puolelle asti, jolloin ilman suhteellinen kosteus on pysytellyt pitkään suhteellisen korkeana (Kuvio 11).

Kosteusteknistä käyttäytymistä on selvitetty laskennallisesti 7.11.2008 – 6.11.2009 alkuperäisiä rakennetta kuvaavalle rakenteelle sekä eri tietokannasta valittujen materiaalien omaaville vertailurakenteille.

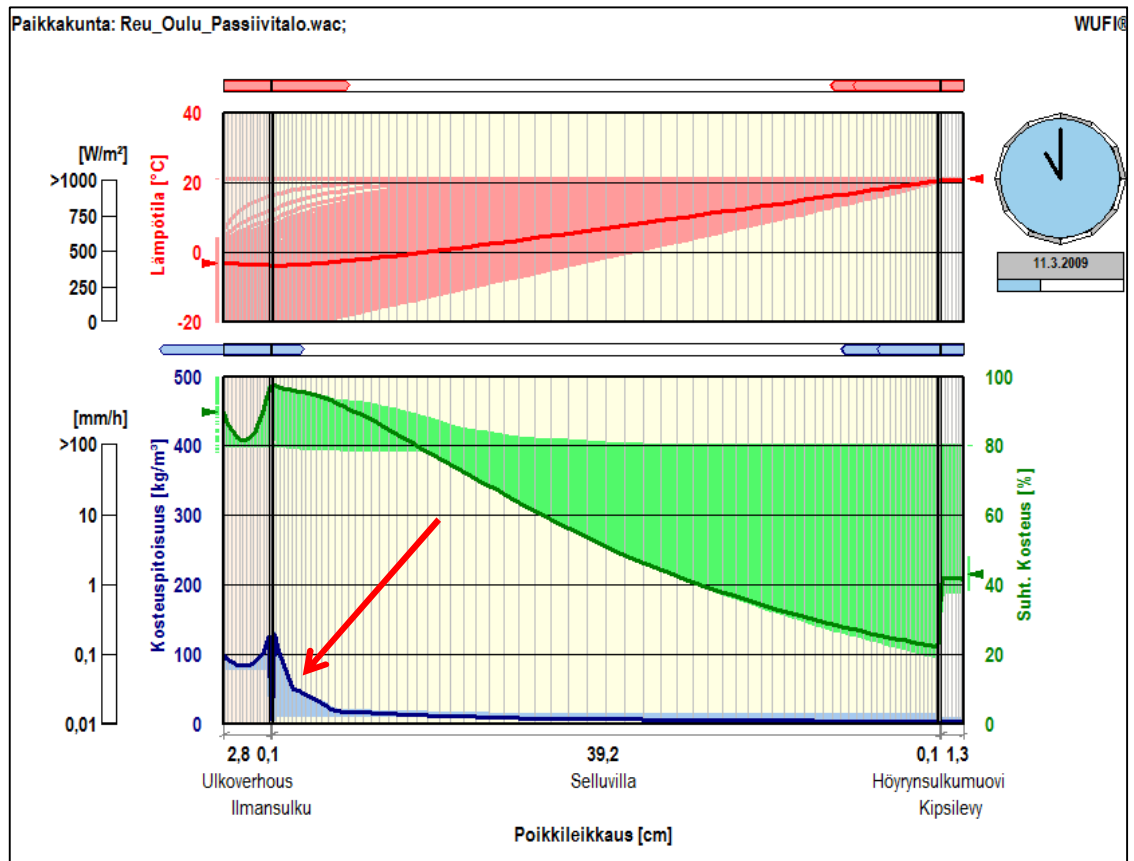


Kuvio 11. Laskennan reunaehtoina käytetyt ulkoilmaston olosuhteet vuoden pituiselta mittausajanjaksolta

Käytössä ei ollut rakennuksesta mitattuja sisäilman olosuhdetietoja. Sisäpuolisina reunaehtoina on käytetty sisäilman vakioämpötilana 21 °C sekä sisäilman kosteuslisänä asuinrakennuksille standardin SFS-EN ISO 13788 (2013) mukaista luokitusta 2.

6.3 Laskentatulokset ja tulosten tarkastelu

Laskennan avulla voidaan rakenteesta US2.1 havaita kohonneita kosteuspituisuuksia ilmansulun sisäpinnassa sekä julkisivuverhouksessa (Kuva 12).

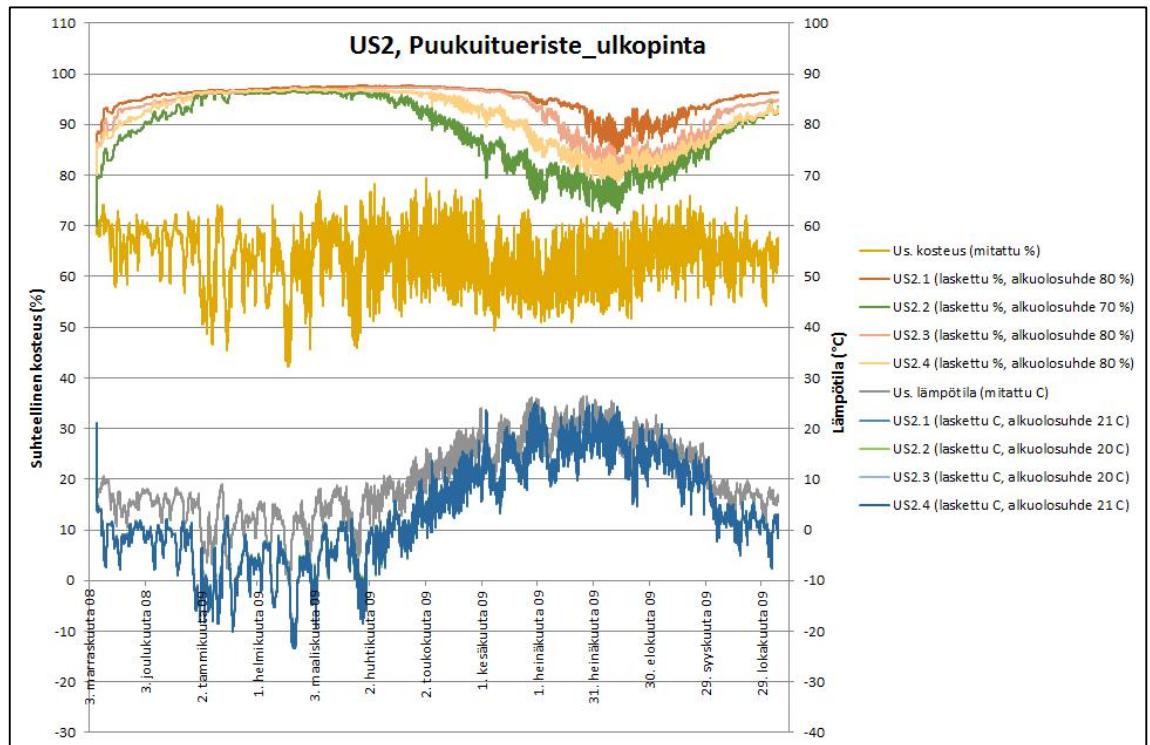


Kuva 12. Puukuiturakenteen US2.1 laskennallisesta tarkastelusta selviää korkeita kosteuspitoisuuksia ilmansulun sisäpinnassa (punainen nuoli)

Kuvasta 12 selviää, että kylmänä vuodenaikana rakenteen korkean suhteellisen kosteuden myötä kosteuspitoisuus kohoaa vähitellen ilmansulun ja eristeen rajapinnassa. Kosteus pyrkii tasoittumaan sisä- ja ulkoilman välillä ja läpäisee ilmansulkuna käytetyn, pienen diffuusiovastuksen omaavan tuulensuojakankaan tässä suhteessa hyvin. Tämän myötä kosteus ei pääse vaikuttamaan liian pitkään rakennekerrosten liittymässä, vaan pystyy laskennan mukaan kuivumaan suurimmaksi osaksi vuoden kestäväällä mittausajanjaksolla.

Puukuitueristeen ulkopinnan tarkastelu

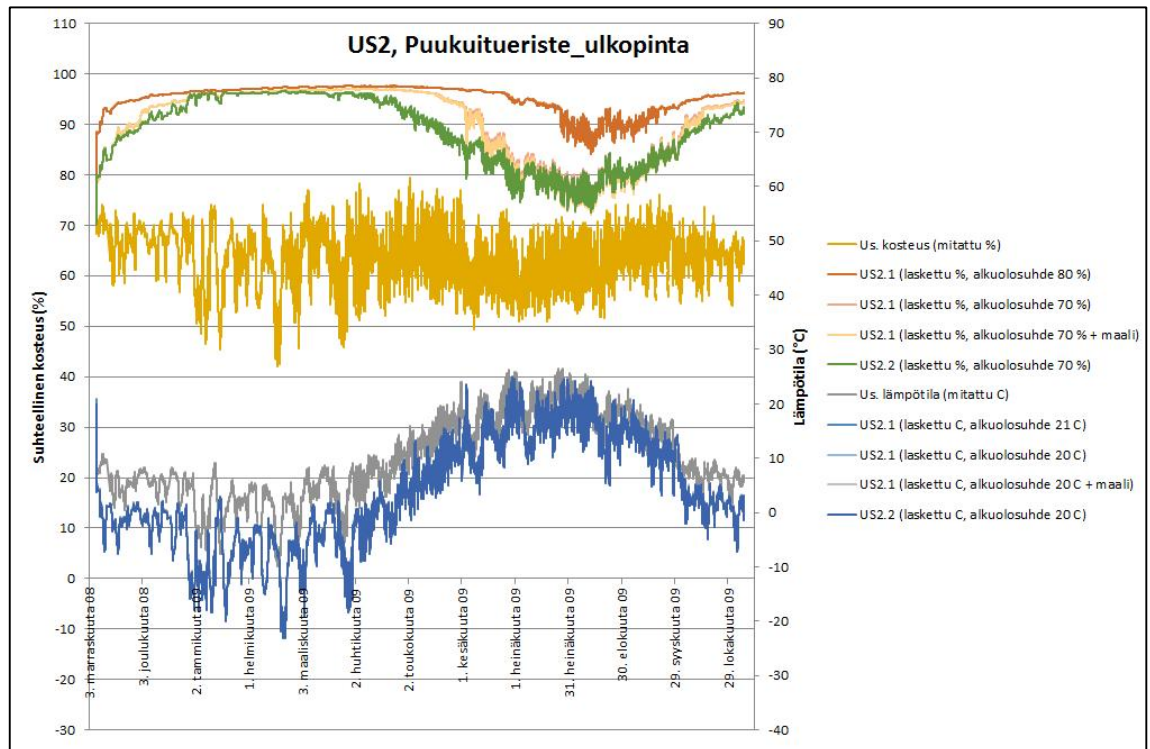
Rakenteen eristeen ulkopinnasta mitatut ja laskennallisesti tuotetut vertailurakenteiden lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet on esitetty kuvioissa 12 ja 13.



Kuvio 12. Laskennalla tuotetut lämpötilat ja suhteelliset kosteudet tutkituista rakennemalleista lämmöneristeen ja tuulensuojan rajapinnasta

Kuviosta 12 huomataan, että tuulensuojan sekä eristeen rajapinnasta mitattu lämpötila mukailee kaikista rakenteista laskennallisesti tuotettujen lämpötilojen muutoksia. Lämpötilaerot mitatun ja laskennan välillä korostuvat kuitenkin kylmänä vuodenaikana, jolloin arvojen välinen ero on huomattavasti suurempi (yli 10 °C) kuin lämpimämpänä vuodenaikana. Alkuolosuhteiden muutokset, sekä eri materiaaliominaisuuksiltaan poikkeavat rakenteet eivät vaikuta merkittävästi laskennallisesti tuotetun lämpötilan jakautumiseen rakenteessa. Suhteellisen kosteuden muutoksien mukaan ulkoseinärakenne US2.2 toimii parhaiten laskennassa käytetyillä reunaehdoilla sekä mukailee parhaiten lämpötilan muutoksia vuoden kestäväällä mittausjaksolla.

Kuviossa 13 tutkitaan tarkemmin rakenteiden US2.1 ja US2.2 suhteellisen kosteuden jakautumisen eroja. Alkuperäistä rakennetta vastaavan rakenteen US2.1 alkuolosuhteita muuttamalla sekä pinnoitemateriaalien S_d -arvojen lisäyksien myötä suhteellinen kosteus muodostuu lähemmäs rakenteen US2.2 kosteutta. Ulko- ja sisäpintoihin lisättyinä S_d -arvoina on käytetty 0,9, mikä vastaa esimerkiksi maalien vesihöyrynvastusta. S_d -arvojen lisäyksellä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä lämmön ja kosteuden jakautumiseen rakenteessa.

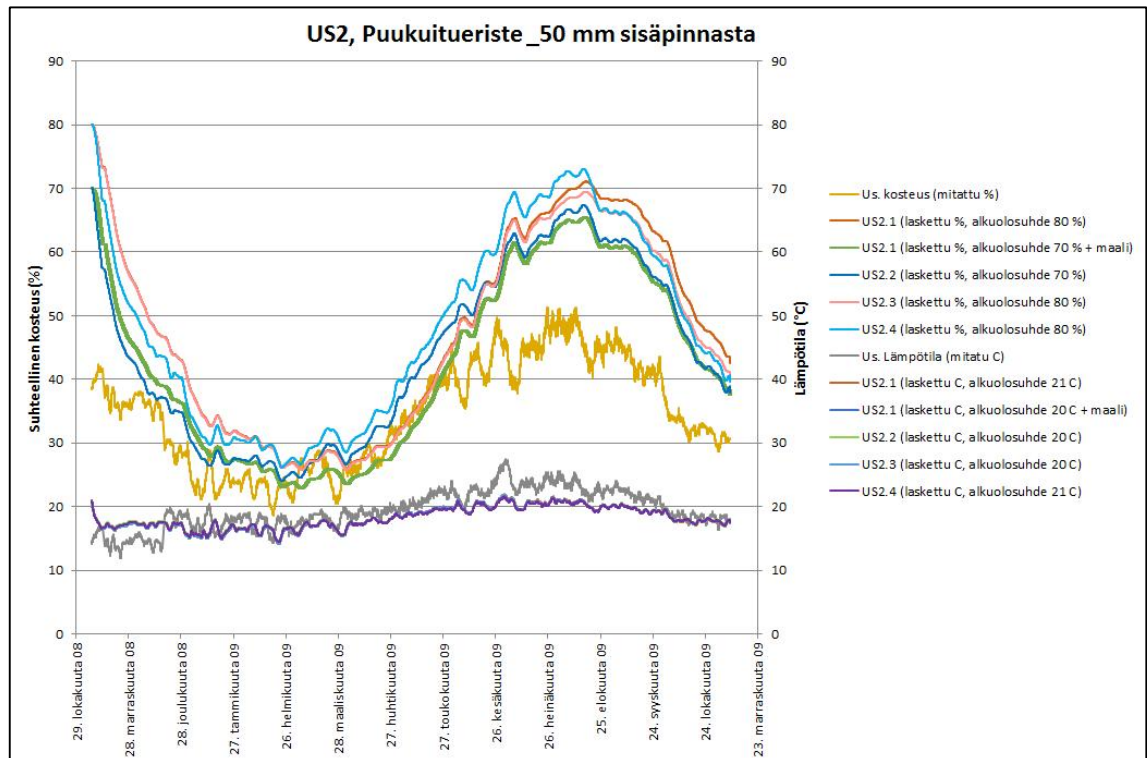


Kuvio 13. Rakenteiden US2.1 ja US2.2 rakennemallien laskentatulokset eri alkuolosuhteilla mitattuina

Eristemateriaalin tiheys vaikuttaa osakseen materiaalin kosteuskapasiteettiin ja kosteudensiirto-ominaisuuksiin. Rakenteen US2.2 eristeenä käytetty puukuitueriste eroaa rakenteen US2.1 eristeestä alkukosteuden sekä tiheydensä puolesta. Tavanomaisten puukuitueristetuotteiden tiheys on noin 40 kg/m^3 luokkaa, joka vastaa paremmin rakenteessa US2.2 käytettyä eristemateriaalia. Rakenteen US2.1 eristeen tiheytenä laskennassa on käytetty 70 kg/m^3 , jonka myötä rakenteen suhteellinen kosteus jää samoilla alkuolosuhteilla laskettuna yhä korkeammaksi kuin rakenteen US2.2 suhteellinen kosteus.

Puukuitueristeen sisäpuolinen tarkastelu

Puukuitueristeen sisältä, 50 mm rakenteen ulkopinnasta mitatut ja laskennallisesti tuotetut vertailurakenteiden lämpötilat sekä suhteelliset kosteudet on esitetty kuvioissa 14.



Kuvio 14. Laskennalla tuotetut lämpötilat ja suhteelliset kosteudet tutkituista rakennemalleista 50 mm rakenteen sisäpinnasta

Kuviossa 14 huomataan, kuinka mittauspisteen laskennallinen kosteus noudattaa mitatun suhteellisen kosteuden muodostumista edellistä tarkastelupistettä paremmin. Rakenteen suhteellinen kosteus kohoaa laskennallisesti kuitenkin korkeaksi jokaisessa tutkitussa tapauksessa suhteessa mitattuun arvoon. Tarkasteltaessa tilannetta heinäkuun lopulla, voidaan laskennallisen tarkastelun kosteusmäärää korjata mitatulla lämpötilalla. Korjauksen avulla päästään suhteellisen kosteuden osalta jopa yli 15 % lähemmäs mitattuja suhteellisen kosteuden arvoja.

Rakenne US2.1 toimii kosteusteknisesti paremmin lämpimämpään vuodenaikaan lähellä rakenteen sisäpintaa kuin rakenne US2.2, kun alkukosteus on riittävän matala ja kun rakenteessa on huomioitu pinnoitteiden tuomat S_d -arvot. Rakennuksen sisäilman lämpötila on pysynyt laskennassa vakiona (+ 21°C) koko mittauksen ajan, jolloin kylmän ajanjakson vaikutus lämpötilaan näkyy tuloksissa selvästi lokakuun ja huhtikuun välisenä aikana (Kuvio 14). Lämpö- ja kosteustekniset olosuhteet rakenteen tässä pisteessä ovat hyväksyttävät ja homeindeksin arvo pysyi kaikissa tapauksissa nollassa. Lämmöneristeen sisä-

puolinen kosteustekninen toimivuus voidaan näin ollen todeta toimivaksi sekä mitatulla että laskennallisella tarkastelulla.

6.4 Homekasvun tarkastelu

Rakenteiden homeen kasvua tarkasteltiin 7.11.2008 – 6.11.2009 tuulensuojan ja eristeen rajapinnassa. Homeindeksin laskennassa on käytetty WUFI Pro – laskennasta tuotettuja lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja tutkittaville rakenteille. Tarkastelussa ei huomioitu selluvillaeristeen sisältämien homeenes-toaineiden vaikutusta eristettä ympäröivien materiaalien homehtumiseen. Homeen kasvun analysoinnissa on tässä työssä käytetty aikaisemmin luvussa 3.2 esitettyä homeindeksin mukaista visuaalista luokittelua.

Puukuitueriste luokitellaan homehtumisherkkyydsluokkaan HHL3 lisättyjen homeenesto-ominaisuuksiensa myötä. Tuulensuojakankaana toimiva Tyvek Soft luokitellaan homeluokittelun mukaisesti herkempään luokkaan kuin puukuitueriste, joten homehtumisherkkyyds materiaalien rajapinnassa määräytyy tuulensuojan mukaan luokkaan HHL2. Liitteessä 4 on esitetty tutkittujen rakenteiden laskennallisesti selvitetty homehtumisindeksikäyrät.

Alkuperäisen Ekovillan puukuitueristeistä rakennemallia vastaavan US2.1 laskennallinen homeindeksiarvo kohosi tuulensuojan sekä lämmöneristeen rajapinnassa mikroskoopilla havaittavalle tasolle 2,343 (Taulukko 6).

Homeindeksit - Suomalainen homemalli (VTT ja TTY)	
Pohjolan Ekotalo Oy - puukuiturakenne	
Ulkoseinärakenne (Puukuitueristeen ulkopinta)	Homeindeksi
Mitattu	0,000
US2.1	2,343
US2.2	0,331
US2.3	1,832
US2.4	1,103

Taulukko 6. Suomalaisella homemallilla tuotetut maksimi homeindeksit tutkituille rakenteille

Rakenteen US2.1 kohonneen homeindeksin vuoksi laskenta suoritettiin samalle rakenteelle, jonka alkuolosuhteiden suhteellisena kosteutena pidettiin aiemmas-
ta laskennasta poiketen 70 % sekä lämpötilana + 20 °C. Rakenteessa huomioi-
tiin myös pinnoitteiden tuomat S_d -arvot, joten homeen kasvuolosuhteet heiken-
tyvät aikaisempaan rakenteeseen verrattuna. Laskennan tuloksista havaittiin
selvä homeindeksin lasku arvosta 2,343 arvoon 1,038 (Liite 4). On myös huo-
mioitava rakenteessa US2.1 käytetyn puukuitueristeen suuremman tiheyden
vaikutus, kun verrataan arvoa 1,038 rakenteen US2.2 homeindeksin arvoon
0,331 (Taulukko 6). Tämän myötä rakennetta US2.2 voidaan pitää yhä lasken-
nallisesti todettuna toimivimpana rakenteena.

6.5 Johtopäätökset

Eristeen sisältä, rakenteen lämpimältä puolelta, tehdyt laskennat vastaavat ra-
kenteista mitattuja tuloksia paremmin kuin eristeen ulkopinnalta tuotetut lasken-
nat. Tähän voi osakseen vaikuttaa laskentaan ja mittaukseen vaikuttavat virhe-
tekijät, jotka saattavat olla seurauksena eri materiaalien kosketuksista mittaus-
laitteistoon tai mittauslaitteiston virheellisestä asennuksesta.

Laskennallisessa tarkastelussa voidaan kuitenkin todeta rakenteen US2.1 suh-
teellisen kosteuden kohoavan muita tutkittuja tapauksia korkeammaksi. Suh-
teellinen kosteus kyseisessä tapauksessa pysyy kriittisellä alueella (> 80 %) lämpötilan ollessa korkeimmillaan kesäkuun ja elokuun välisenä aikana. Tämä
voi johtua osittain siitä, ettei laskentaohjelma tunnista rakenteen läpi kulkeutuvia
ilmavirtauksia, jotka vaikuttavat kosteuden jakautumiseen rakenteessa ja tämän
seurauksena kuivattavat rakennetta. Laskennallisen tarkastelun perusteella ra-
kenne ei pääse kuivumaan tarpeeksi suhteessa rakenteeseen pääsevään kos-
teuteen, sillä kesäkauden kuivuminen on hidasta suhteessa kylmän ajanjakson
kostuttavaan vaikutukseen.

Laskentatulosten perusteella tutkittu puukuitueristeinen ulkoseinärakenne toimii
kuitenkin kokonaisuudessaan kosteusteknisesti hyvin, mikäli rakenteen alkuolo-
suhteiden suhteellinen kosteus on riittävän alhainen (< 70 %), jonka myötä
myös homeen kasvulle otolliset olosuhteet ilmansulun ja eristeen rajapinnassa
heikentyvät. Laskennallisesti todettuna rakenteen oikeaoppiselle toiminnalle

lisävarmuutta tuovat rakenteen ulko- ja sisäpinnoissa käytetyt pinnoitemateriaalit ja niiden vesihöyrynvastusta kuvaavat S_d -arvot, sekä eristemateriaaleissa käytetty alhaisempi ($< 70 \text{ kg/m}^3$) tiheys.

Tarkastelujen perusteella rakenteen sisä- ja ulkopuolinen vesihöyrynvastusten suhteen riittävyys on myös varmistettu käyttämällä ilmansulkuna pienen diffusiovastuskertoimen omaavaa materiaalia kuten ilmansulkupaperia, jolloin rakenne täyttää ohjeistuksen mukaisen vaatimuksen sisä- ja ulkopuolen vesihöyrynvastussuhteesta.

Ekovillan puukuitueristeinen, tuulettumaton ulkoseinärakenne poikkeaa rakenteeltaan yleisistä ohjeistuksista, jonka takia laskennallista tarkastelua kosteus- ja lämpöteknisestä toimivuudesta on suositeltavaa toteuttaa aina rakenteita suunniteltaessa. Vaikka mittaukset eivät sisältäneet sade- tai säteilytietoja voidaan kyseisten rasitusmuotojen olettaa vaikuttavan olemassa olevan tuulettomattoman rakenteen kosteustekniseen toimintaan merkittävästi. Korkeamman alkukosteuden tapauksessa todettu homehtumisriski viittaa siihen, ettei rakenne salli merkittäviä julkisivun vesivuotoja.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Kasvikuitulämmöneristeiden tutkimus

Kasvikuitupohjaisten eristeiden toiminnan perustana on materiaalien suuri hygroskooppisuus, minkä avulla rakenne sitoo- ja luovuttaa kosteutta huokosrakenteeseensa. Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta on kuitenkin tarkasteltava, ettei rakenteeseen kerry liiallista kosteutta pidemmällä ajanjaksolla. Rakenteen kosteustason on pysyttävä toiminnan kannalta riittävän matalana, jottei rakenteen sisäistä vaurioitumista pääse tapahtumaan. Kosteusteknistä toimivuutta voidaan tarkastella laskennallisesti ja tarkastelu onkin suositeltavaa tehdä, jos rakenteen toimivuudesta ei ole olemassa käytännön kokemuksia tai jos rakenne poikkeaa yleisistä ohjeistuksista. Useissa eri tutkimuksissa on kuitenkin selvinnyt, että laskentatulokset eivät vastaa täysin käytännön kokemuksia. Usein laskennallinen tarkastelu osoittaa hygroskooppisella lämmöneristeellä eristetyn rakenteen kosteusteknisesti riskialttiiksi, mutta käytännön tarkasteleissa vastaavissa rakenteissa ei kuitenkaan ole havaittu vaurioita.

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin kahden kasvikuitueristeisen ulkoseinäarakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa. Rakenteille suoritettujen WUFI Pro 1D –laskentaohjelmalla suoritettujen kosteussimulointien avulla pyrittiin selvittämään rakenteisiin vaikuttavat olosuhdetekijät ja materiaaliominaisuudet, joilla saavutettaisiin laskennallisella tarkastelulla rakenteista mitattuja arvoja vastaavat tulokset.

Homeen kasvua rakenteissa tutkittiin suomalaisen homemallin avulla. Homehämähäkkyluokkana oljelle käytettiin herkintä luokkaa HHL1 sekä puukuitueristeisille rakenteille luokkaa HHL2 rakenteissa käytetyn Tyvek Soft –ilmansulkupaperin myötä. WUFI Pro –laskennan herkkyytarkastelussa ei huomioitu kaikkia tutkittuihin rakenteisiin kohdistuvia ilmasto-olosuhteita, kuten viistosateen kastelevaa vaikutusta, josta 1 %:n oletetaan pääsevän julkisivuverhouksen taakse. Myöskään auringon säteilyn aiheuttamaa absorptiota ei huomioitu, mikä Suomen olosuhteissa on yksi merkittävimmistä tekijöistä rakenteiden kuivumisen kannalta. Tuulettuvissa rakenteissa kyseiset vaikutukset eivät julkisivun suojaavan vaikutuksen myötä myöskään korostu.

Tuulettuva olkirakenne

Olkieriste itsessään ei sisällä homehtumisenestoaineita, joten se luokitellaan homehtumisherkkyyssluokassa herkimpään HHL1 –luokkaan. Luokituksen myötä eristemateriaalia pidetään riskialttiina rakenteeseen kertyvälle liialliselle kosteudelle, jonka seurauksena rakenne altistuu helpommin myös biologiselle vaurioitumiselle. Lämmöneristeen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastus tulisi olla lämmityskauden rasituksessa vähintään viisinkertainen rakenteen kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen verrattuna.

Laskennallisen tarkastelun perusteella todettiin, että lämmöneristyksen ulkopuolella oleva suurehko vesihöyrynvastus hidastaa rakenteen kuivumista etenkin lämmityskauden aikana. Hitaan kuivumisen sekä rakenteen suuren alkukosteuden myötä rakenteen eristetilaa rajoittavien kylmien pintojen, kuten tuulensuojan ja ilmansulun sisäpintaan, kohdistuvat kosteusrasitukset altistavat rakennekerrosten liittymät laskennallisen tarkastelun perusteella homeen kasvulle.

Laskennallisella tarkastelulla ei kuitenkaan päästy täysin mittaustuloksia vastaaviin tuloksiin. Tutkittujen rakenteiden korkeisiin suhteellisen kosteuden arvoihin vaikuttaa osakseen se, ettei laskennassa voida huomioida olkieristeen kosteuskapasiteetin lämpötilariippuvuutta, mikä voi olla korkean kosteuskapasiteetin materiaaleja tutkittaessa yksi merkittävimmistä tekijöistä rakenteen kosteuspitoisuuden kannalta. Olkieristeen lämmönjohtavuuden kasvattaminen ja S_d -arvon pienentäminen lisää rakenteen kuivumista kesäkaudella mutta vastaavasti kasvattaa materiaalin rajapinnan kosteuksia kylmään vuodenaikaan. Myös lämpötilat rakenteessa kasvavat eristemateriaalien lämmönjohtavuuden lisäyksen myötä, jolloin rakenteiden altistuminen homeen kasvulle lisääntyy.

Eristemateriaalina olki on todettu kuitenkin käytännössä toimivaksi tavanomaisissa kosteusolosuhteissa. Olkirakenne on kuitenkin herkkä vaurioitumaan vika tilanteiden kuten vesivuotojen seurauksena. Rakenteen kosteusvaurioituneet alueet havaitaan kuitenkin helposti rakennepintojen värimuutoksista, jolloin vaurioituneen alueen laajuus on usein nopeasti paikannettavissa.

Tuulettumaton puukuiturakenne

Tuulettumattoman rakenteen toimivuuden laskennallisen tarkastelun lähtökoh- tana on selvittää, pystyvätkö rakenteen materiaalikerrokset sitomaan rakentee- seen mahdollisen kertyvän kosteuden vauriota aiheuttamatta. Materiaaliin ker- tyneen kosteuden tulee myös vastaavasti pystyä poistumaan rakenteesta esi- merkiksi ulkoverhouksen läpi lämpötila- ja kosteusolosuhteiden muututtua. Las- kennan mukaan kosteusteknisen toiminnan varmuutta rakenteelle voidaan tuo- da esimerkiksi vaikuttamalla eristeen tiheyteen sekä rakenteen alkukosteuteen.

Laskennan perusteella eristeen sisältä, rakenteen lämpimältä puolelta, tehdyt laskennat vastaavat rakenteista mitattuja tuloksia paremmin kuin eristeen ulko- pinnalta tuotetut laskennat. Laskennan huomioitta jättämät vaikutukset, kuten ilmavirtausten ja -vuotojen aiheuttama kuivattava vaikutus, selittää vain osak- seen laskennallisen tarkastelun sekä mittauksen eron rakenteen suhteellisessa kosteudessa. Laskennallisen tarkastelun perusteella materiaalin korkeasta al- kukosteudesta johtuva, rakennekerrosten liittymäpintoihin kerääntynyt kosteus ei kuitenkaan pääse kuivumaan tarpeeksi ulospäin rakenteesta, jolloin homeen kasvulle otolliset olosuhteet kasvavat eristeen ja ilmansulun rajapinnassa. Las- kentatulosten perusteella tutkittu puukuitueristeinen ulkoseinärakenne on kui- tenkin kosteusteknisesti toimiva, mikäli rakenteen alkukosteus on riittävän al- hainen.

Kyseisen rakenteen tapauksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteen vikasietoisuuteen. Rakenteen kuivumiskyky ei salli julkisivuverhouksen taakse kohdistuvaa ylimääräistä ulkopuolista kosteusrasitusta esimerkiksi ikkuna-, räystä- ja läpivientiliittymistä tai pidemmällä aikajänteellä ilmenevistä julkisivu- laudoituksen puutteista. Tutkittua tuulettumatonta rakennetta voidaan mittaustu- loksien sekä laskennallisten tarkastelujen perusteella pitää kosteusteknisesti toimivana huomioiden mittaustuloksiin ja laskentaan vaikuttavat virhetekijät.

Pohdinta

Laskennan rajoitusten takia lämpö- ja kosteustekninen laskenta ei koskaan vas- taa täysin käytännön tilannetta. WUFI Pro –laskenta ei esimerkiksi huomioi ra- kenteisiin vaikuttavan kosteuskonvektion vaikutuksia, joka on yksi merkittävä

tekijä etenkin huokoisen materiaalin kosteusteknisen toiminnan kannalta. Toisaalta rakenteiden toimivuutta tarkasteltaessa kosteusmittauksin on tunnistettava myös mittaukseen liittyvät virhetekijät. Yleisimmät virhetekijät liittyvät usein mittauskaluston stabiiliuteen tai itse mittaajan ammattitaitoon mutta myös vallitseviin olosuhteisiin sekä mitattavan materiaalin tasalaatuisuuteen. Mitattujen ja laskennallisesti tuotettujen lämpötilojen eroavaisuudet voivat johtua eri materiaalien ja mittauslaitteistojen välisistä kontakteista tai laskentaohjelmiston huomioon jättämättömistä tekijöistä. Mitattavan materiaalin homogeenisuus sekä tiheys vaikuttavat muun muassa materiaalin kykyyn johtaa lämpöä. Lämpötilan vaikutusta voidaan pitää merkittävänä virhelähteenä myös suhteellisen kosteuden mittauksille. Rakenteista mitattua lämpötilaa vastaava vesihöyrynpitoisuuden ero on laskentaan verrattuna pieni, mutta esimerkiksi 5 °C lämpötilan mitausvirhe vaikuttaa suhteelliseen kosteuteen yli 20 prosenttiyksikköä, jolla voi olla suuri merkitys arvioitaessa esimerkiksi homehtumisriskiä.

Jatkotutkimuksia varten olemassa olevien rakenteiden toimivuudesta tulee saada luotettavaa mittaustietoa riittävän laajoilla, lyhyt- tai jatkuvakestoilla lämpö- ja kosteusmittauksilla. Koska WUFI Pro –ohjelmisto ei huomioi materiaalien hygroskooppisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuutta, voidaan tätä tarkastella tarkemmin esimerkiksi Comsol Multiphysics –laskentaohjelmalla. Myös materiaaleille tehtävillä viljelykokeilla suoritettuja mikrobikasvustojen analyyseillä voidaan varmistua tarkemmin myös materiaalien mikrobipitoisuudesta.

Vaikka laskelmat eivät vastaa täysin käytäntöä, rakenteille tehtäviä kosteusteknisiä laskelmia voidaan pitää suuntaan antavina arvioitaessa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Kun laskelmien tukena on kokemuspohjaista tietoa eristemateriaalin ja vastaavien rakenteiden toimivuudesta, voidaan varmistua rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta. Rakenteille suoritettuja laskelmia sekä käytännön kokemuksia tuleekin arvioida yhdessä, jotta voidaan tunnistaa rakenteiden mahdolliselle vaurioitumiselle altistuvat rakenneosat sekä saada riittävä varmuus rakenteen ympärivuotiselle kosteustekniselle toiminnalle.

Kuvat

Kuva 1. Rakennukseen kohdistuvat kosteuslähteet, s. 10

Kuva 2. Veden tunkeutuminen rakenteeseen viistosateen vaikutuksesta, s. 11

Kuva 3. Esimerkki vesihöyryn diffuusiosta seinärakenteen läpi, s. 16

Kuva 4. Esimerkit rakenteiden läpi tapahtuvista konvektiovirtauksista, s. 18

Kuva 5. Esimerkki kosteuskonvektion aiheuttamasta kosteuden tiivistymisriskistä puurunkoisessa rakenteessa, s. 25

Kuva 6. Olkirakenteen rakennemalli ja monitorointipisteet (nuolet), s. 38

Kuva 7. Puukuiturakenteen rakennemalli ja monitorointipisteet (nuolet), s. 39

Kuva 8. EcoCocon olkieristeisen kesämökin pohjapiirustus sekä mittauspisteet, s. 40

Kuva 9. Olkirakenteen rakennetyyppi sekä mittaus- ja laskentapisteet (punaiset pallot), s. 41

Kuva 10. Olkirakenteen US1.1 laskennallisesta tarkastelusta selviää kohonneita kosteuspitoisuuksia ilmansulun sisäpinnassa (punainen nuoli), s. 43

Kuva 11. Puukuiturakenteen rakennetyyppi sekä mittaus- ja laskentapisteet (punaiset pallot), s. 50

Kuva 12. Puukuiturakenteen US2.1 laskennallisesta tarkastelusta selviää kohonneita kosteuspitoisuuksia ilmansulun sisäpinnassa (punainen nuoli), s. 53

Kuviot

Kuvio 1. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa (1-3) ulkolämpötilan funktiona, s. 14

Kuvio 2. Mineraalivillaeristeiden tasapainokosteuksia (kg/m^3), s. 15

Kuvio 3. Luonnonkuitueristeiden tasapainokosteuksia (kg/m^3), s. 15

Kuvio 4. Huokoisen materiaalin tasapainokosteuskäyrä, s. 19

Kuvio 5. Homeen ja lahon kehittymiselle vaadittavat olosuhteet, s. 31

Kuvio 6. Homeindeksien (1-5) vaaditut lämpötila- ja kosteusolosuhteet, s. 33

Kuvio 7. Mitatun ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut, s. 42

Kuvio 8. Laskennassa tutkituista rakennemalleista tuotetut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tulokset 350 mm rakenteen sisäpinnasta, s. 44

Kuvio 9. Suhteellisen kosteuden (punainen nuoli) ja lämpötilojen (musta nuoli) erot mitattujen ja laskettujen tulosten välillä, s. 45

Kuvio 10. Mitatut ja laskennalla tuotetut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tulokset tutkituista rakennemalleista lämmöneristeen ja ilmansulun rajapinnasta, s. 46

Kuvio 11. Laskennan reunaehtoina käytetyt ulkoilmaston olosuhteet vuoden pituiselta mittausajanjaksolta, s. 52

Kuvio 12. Laskennalla tuotetut lämpötilat ja suhteelliset kosteudet tutkituista rakennemalleista lämmöneristeen ja tuulensuojan rajapinnasta, s. 54

Kuvio 13. Rakenteen US2.1 ja US2.2 rakennemallien laskentatulokset eri alkuolosuhteilla mitattuna, s. 55

Kuvio 14. Laskennalla tuotetut lämpötilat ja suhteelliset kosteudet tutkituista rakennemalleista 50 mm rakenteen sisäpinnasta, s. 56

Taulukot

Taulukko 1. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus sekä kyllästysosapaine lämpötilan funktiona, s. 13

Taulukko 2. Esimerkki rakennustuotteiden vesihöyrynvastussuhteista. ¹⁾ Vesi-höyrynvastuksen minimiarvo tulee olla vähintään $15 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{ s Pa/kg}$ ($Z_v = 110 \cdot 10^3 \text{ s/m}$, $S_d = 3 \text{ m}$), s. 22

Taulukko 3. Suomalaisen homemallin homeindeksin luokitustasot, s. 32

Taulukko 4. Homeen kasvun kaavassa käytetyt homehtumisherkkyyssuokkien kertoimet ja suhteellisen kosteuden minimiarvot, s. 33

Taulukko 5. Suomalaisella homemallilla tuotetut maksimi homeindeksit tutkituille rakenteille, s. 48

Taulukko 6. Suomalaisella homemallilla tuotetut maksimi homeindeksit tutkituille rakenteille, s 57

Lähteet

Björkholtz, D. 1997. Rakennusfysiikka lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Bronsema, N. 2010. Moisture Movement and Mould Management in Straw Bale Walls for a Cold Climate. University of Waterloo. Canada.

C2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Kosteus. Määräykset ja ohjeet 1998. <http://www.finlex.fi/data/normit/1918-c2.pdf>. Luettu 01.01.2017.

Climate Data 2012. Fraunhofer IBP. <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Climate>. Luettu 20.01.2017.

Dialog: Climate 2009. Fraunhofer IBP. http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/1D:Dialog_Climate. Luettu 21.01.2017.

Details: SurfaceCoating 2013. Fraunhofer IBP. <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:SurfaceCoatings>. Luettu 21.01.2017.

Hänninen, J. & Rissanen, R. & Viljanen, M. 1997. Sahateollisuuden purutuotteet rakennusten eristemateriaalina. Talonrakennustekniikan laboratorion julkaisu 59. Espoo.

Junttila, H. 2014. Pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Kaila, P. 1997. Talotohtori. Rakentajan pikkujättiläinen. Porvoo: WSOY.

Kokko, E. & Ojanen, T. & Salovaara, M. & Hukka, A. & Viitanen, H. 1991. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Espoo.

Koski, T. & Linberg, J. & Vinha, J. 1997. Lisäeristettyjen hirsiseiniä kosteustekninen kunto. Tampereen teknillisen korkeakoulun julkaisu 78. Tampere.

Mäkitalo, M. 2012. Puurunkoisten ulkoseiniä kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Niemelä, T. & Vinha, J. & Lindberg, R. 1996. Puukuitueristeisen seinärakenteen hengittävyys. Tampereen teknillisen korkeakoulu julkaisu 67. Tampere.

Ojanen, T. 2016. Dynaaminen puukuitueristerakenne. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Asiakasraportti CR-00672-16. Espoo.

Ojanen, T. & Salovaara, M. 2002. Kuivumiskykyiset ja sateenpitävät rakenteet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Tiedote 2168. Espoo.

Pitkäranta, M. (toim.) 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Rakennettu ympäristö: Kantavan olkipaalirakenteen pioneerityötä Suomessa. Rakennustieto, Artikkelit 4/2010, s. 29.

Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille: Kosteus 2009. Rafnet – oppimateriaalin teoriaosio K (kosteus). Rafnet-ryhmä.
http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf.
Luettu 15.01.2017

RIL 107–2012 2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

RIL 255-1-2014 2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Rissanen, R. & Viljanen, M. 1998. Kasvikuitupohjaiset materiaalit lämmöneristeinä. Talorakennustekniikan laboratorion julkaisu 77. Espoo.

Salovaara, M. & Kokko, E. 1996. Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Espoo.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Tammisaaren uusi keittiö oljista. Etelä-Uusimaa 71/2016, s. 6

Vinha, J. ym. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto, TTY. Tutkimusraportti 159. Tampere.

Vinha, J. & Valovirta, I. & Korpi, M. & Mikkilä, A. & Käkelä, P. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto, TTY. Tutkimusraportti 129. Tampere.

What is WUFI? <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>. Luettu 15.11.2016.

Liite 1. Laskennassa käytettyjen rakennemallien simulointitiedot.

WUFI Pro:ssa käytetyt simulointiarvot		
	Olkielementtirakenne	Puukuitueristerakenne
Sijainti:	Barönsalmi	Oulu, Ritaharju
Ilmansuunta (rakenteen suunta):	-	-
Lähteet/Nielut:	-	-
Kallistuskulma:	Seinä - 90°	Seinä - 90°
Rakennuksen korkeus:	R1 – < 10 m	R1 – < 10 m
Sateen kerroin:	R2 – 0,07 s/m	R2 – 0,07 s/m
Ulkoilmasto tiedot:	Barönsalmi	Oulu
Sisäilmasto tiedot:	EN 13788	EN 13788
Alkuolosuhteet (vakio):	Kosteus – 80 % Lämpö – 20 °C	Kosteus – 80 % Lämpö – 21 °C
Pinnan siirtokertoimet – Ulkopinta		
Lämmönvastus (m ² K/W):	0,13	0,04
S _d - arvo (m):	Ei pinnoitetta	Ei pinnoitetta
Lyhytaaltainen absorptiokerroin:	-	-
Pitkäaaltainen säteilyn emissiokerroin:	-	-
Sateen absorptiokerroin:	-	-
Pinnan siirtokertoimet – Sisäpinta		
Lämmönvastus (m ² K/W):	0,13	0,13
S _d - arvo (m):	Ei pinnoitetta	Ei pinnoitetta

Liite 2. Laskennassa tutkittujen rakenteiden materiaalitiedot.

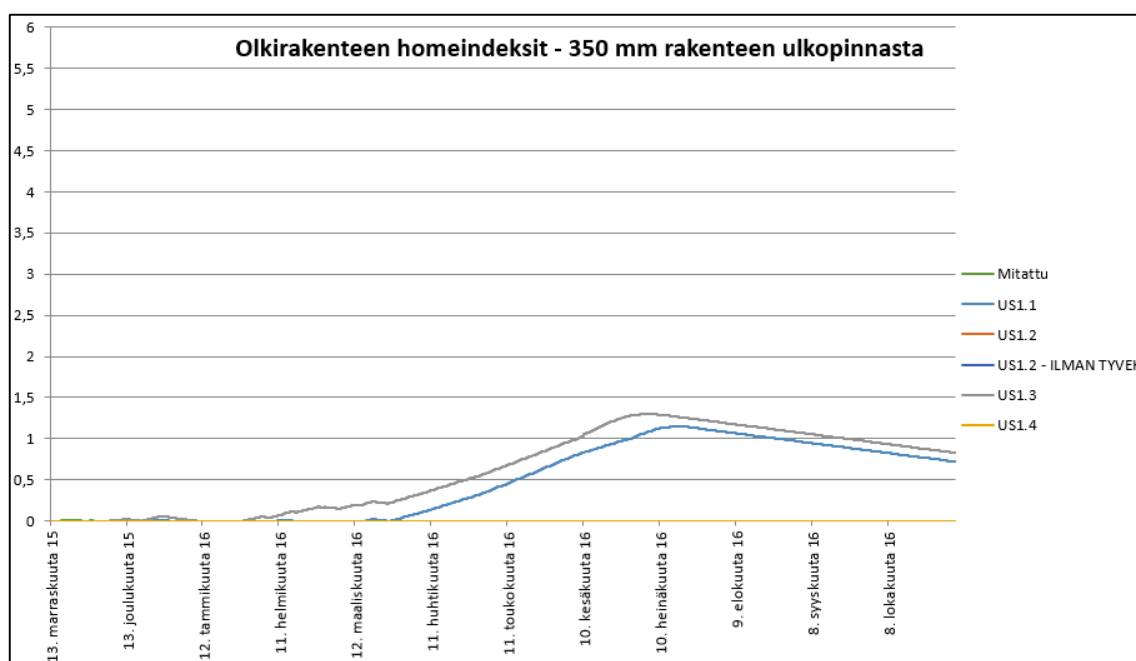
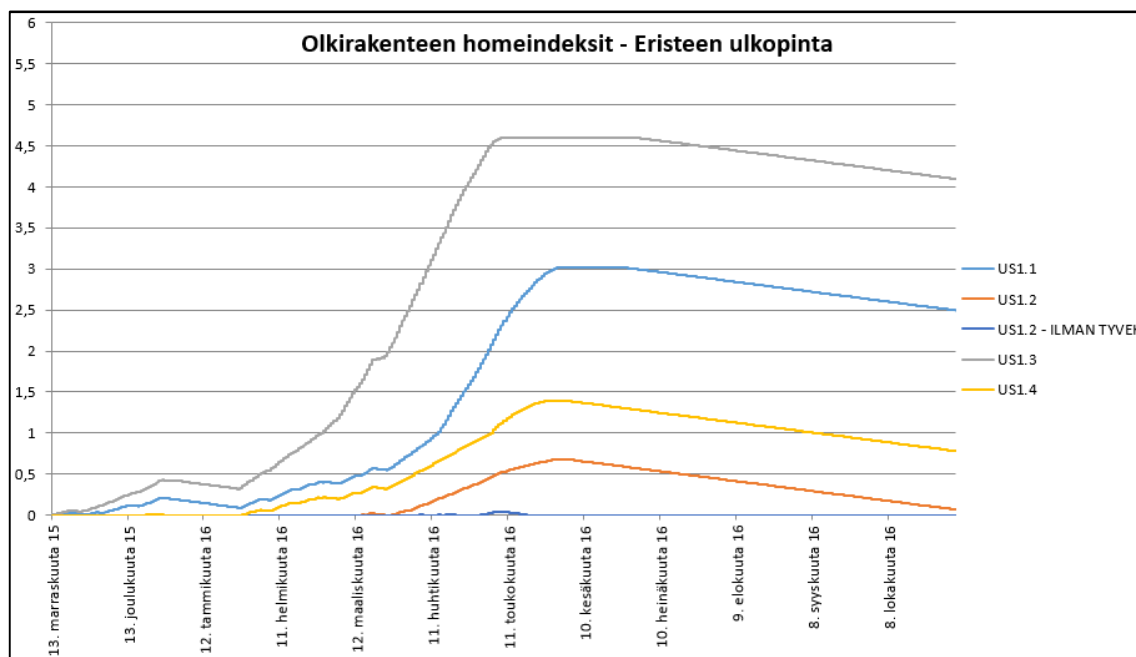
*Rakenteen US1.1 mallinnettujen rakenteiden materiaaliominaisuudet vastaavat lähtötietoja sekä EcoCoconin määrittelemiä arvoja.

Olkielementtirakenne - EcoCocon – Barönsalmi					
US1.1 ja US1.2 (Alkuperäinen rakenne)					
Materiaali (sisältä ulospäin)	Paksuus (m)	Materiaaliominaisuudet			
		Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	Lämmönjohta- vuus (W/mK)	Vesihöyryn diffuusiovas- tuserroin (μ)
Savirappaus*	0,030	1568,0	0,41	0,484	11,0
Olkielementti*	0,4	100,0	0,9	0,044	2,0
Tyvek Pro* (Ilmansulku)	0,001	130,0	0,001	2,3	200,0
Steico Protect* (Puukuitulevy)	0,06	265,0	0,88	0,048	3,0
Pystykoolaus	0,05	-	-	-	-
Ponttilaudoitus	0,025	-	-	-	-
Olkielementtirakenne - EcoCocon – Barönsalmi					
US1.3 ja US1.4					
Materiaali (sisältä ulospäin)	Paksuus (m)	Materiaaliominaisuudet			
		Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	Lämmönjohta- vuus (W/mK)	Vesihöyryn diffuusiovas- tuserroin
Olkielementti	0,4	100,0	0,9	0,06	1,3

*Rakenteen US2.1 rakennemalli vastaa Pohjolan Ekotalo Oy:n Ekovilla ulkoseinärakennetta. Rakenteen US2.1 materiaalit ovat WUFI Pro -ohjelman Fraunhofer-IBP -materiaalitietokannasta. Muissa rakenteissa lämmöneriste- ja/tai ulkoverhousmateriaali vaihtelevat. Vaihtoehtoiset materiaalit ovat peräisin WUFI Pro -ohjelman LTH Lund –materiaalitietokannasta.

Tuulettumaton puukuitueristerakenne – Pohjolan Ekotalo - Ritaharju, Oulu US2.1 (Alkuperäinen rakenne)					
Materiaali (sisältä ulospäin)	Paksuus (m)	Materiaaliominaisuudet			
		Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	Lämmönjohtavuus (W/mK)	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (μ)
Kipsilevy*	0,013	850,0	0,65	0,2	8,3
Höyrynsulkumuovi*	0,001	130,0	0,001	2,3	6600,0
Vaakakoolaus	0,032	-	-	-	-
Pystyrunko	0,032	-	-	-	-
Kiinnityspuu Puukuitueriste*	0,042 0,392	70,0	0,95	0,04	1,5
Pystyrunko	0,032	-	-	-	-
Tyvek Soft (Tuulensuojakangas)*	0,001	130,0	0,6	10,0	11,1
Ulkoverhous, kuusi*	0,028	455,0	0,73	0,09	130,0
Tuulettumaton puukuitueristerakenne – Pohjolan Ekotalo - Ritaharju, Oulu US2.2					
Materiaali (sisältä ulospäin)	Paksuus (m)	Materiaaliominaisuudet			
		Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	Lämmönjohtavuus (W/mK)	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (μ)
Selluvillaeriste*	0,392	55,0	0,93	0,036	2,0
Tuulettumaton puukuitueristerakenne – Pohjolan Ekotalo - Ritaharju, Oulu US2.3					
Materiaali (sisältä ulospäin)	Paksuus (m)	Materiaaliominaisuudet			
		Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	Lämmönjohtavuus (W/mK)	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (μ)
Ulkoverhous, kuusi*	0,028	430,0	0,73	0,14	83,3
Tuulettumaton puukuitueristerakenne – Pohjolan Ekotalo - Ritaharju, Oulu US2.4					
Materiaali (sisältä ulospäin)	Paksuus (m)	Materiaaliominaisuudet			
		Tiheys (kg/m ³)	Huokoisuus (m ³ /m ³)	Lämmönjohtavuus (W/mK)	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (μ)
Ulkoverhous, kuusi*	0,028	430,0	0,73	0,14	83,3
Selluvillaeriste*	0,392	55,0	0,93	0,036	2,0

Liite 3. EcoCocon olkirakenteen suomalaisella homemallilla lasketut homeindeksit.



Liite 4. Ekovilla puukuiturakenteen suomalaisella homemallilla lasketut homeindeksit.

