



Opinnäytetyö

Insinööritoimisto SRT Oy:n käyttämien ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden
lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen

Henri Humala

Rakentamisen koulutusohjelma

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakentamisen koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Henri Humala	
Työn nimi Insinööritoimisto SRT Oy:n käyttämien ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen	
Päiväys	21.4.2014
Sivumäärä/Liitteet	75/11
Ohjaaja(t) Harry Dunkel, lehtori	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Insinööritoimisto SRT Oy, DI Pauli Oksman	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Kiristyneet lämmöneristysmääräykset ja muuttuneet materiaalit vaikuttavat rakennetyyppien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, eikä muuttuneista vaipparakenteista ole pitkäaikaisia kokemuksia. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä muuttuneista rakenteista mahdollisesti aiheutuvia ongelmia laskennallisten menetelmien näkökulmasta. Ensisijaisena tavoitteena oli kuitenkin lämpö- ja kosteusteknisen tietämyksen kasvataminen Insinööritoimisto SRT Oy:ssä. Opinnäytetyön aiheen rajaus tehtiin Insinööritoimisto SRT Oy:n käyttämiin ulkoseinä- ja yläpohjien rakennetyyppeihin.</p> <p>Tutkimus keskittyi rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen konvektion sekä diffuusion kautta. Tutkimuksessa käytettiin yksinkertaisia laskennallisia menetelmiä, jollaisia rakennesuunnittelijat voivat käyttää päivittäisessä työssään suuntaa-antavina työkaluina. Lähteinä käytettiin alan julkaisuja ja aiheesta tehtyjä tutkimuksia.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin Insinööritoimisto SRT Oy:lle selkeä opas ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä laskemisesta. Laskentamenetelmien todettiin olevan käyttökelpoisia jos mitoitettavat ilmiöt ymmärretään ja lähtötietoja sekä tuloksia tarkastellaan kriittisesti. Insinööritoimisto SRT Oy:n rakenteiden laskennan osuus työstä on salainen.</p>	
Avainsanat konvektio, diffuusio, kondensaatio, kosteuspitoisuus, suhteellinen kosteus,	
vesihöyryn vastus, vesihöyryn läpäisevyys, ilman läpäisevyys, tiivistyminen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Henri Humala			
Title of Thesis Heat and Moisture Behavior in Exterior Wall and Roof Structures			
Date	21 April 2014	Pages/Appendices	75/11
Supervisor(s) Mr. Harry Dunkel, Lecturer			
Client Organisation /Partners Insinööritoimisto SRT Ltd, Mr. Pauli Oksman, MEng			
<p>Abstract</p> <p>The tightened thermal insulation regulations and new materials are affecting heat- and moisture behavior in different types of structures and there is no long term experience about changes in building envelopes. The aim of this thesis was to examine heat- and moisture physics and possible problems with different structures considering the calculation methods. The primary goal was to expand heat and moisture knowledge of the engineers working in Insinööritoimisto SRT Ltd. The topic of the thesis was limited to the structural types used by the structural design office Insinööritoimisto SRT Ltd.</p> <p>This thesis was focused on water vapour condensation and drying of structures through convection and diffusion. Theoretical examinations were made by simplified calculation methods which structural engineers can use in every day work. Publications and other researches were used as a reference.</p> <p>As a result of this thesis Insinööritoimisto SRT Ltd was offered a clearly written guide about calculating heat and moisture behavior of wall and roof structures. The calculating methods were found to be useful if engineers understand the examined phenomena. The criticism was directed to the initial data and results.</p>			
<p>Keywords convection, diffusion, condensation, absolute humidity, relative humidity</p>			
<p>water vapour resistance, water vapour permeability, air permeability</p>			

ESIPUHE

Hakeuduin opiskelemaan rakentamisen koulutusohjelmaan koska tavoitteenani oli pitkään ollut opiskella ylempi AMK-tutkinto. Tavoite selkeytyi minulle jo aiempien rakennusinsinööri opintojeni aikana. Tuolloin totesin, että koska koulu tuntui maistuvan, miksipä en opiskelisi vielä vähän pidemmälle. Ensin piti kuitenkin opetella rakennusinsinöörin työ.

Pääsin työskentelemään rakennesuunnittelijaksi Insinööri SRT Oy:n palvelukseen. Työskentely rakennesuunnittelutoimistossa oli mukavaa. Työtä tehtiin muutaman hengen ryhmissä ja työpaikan henki oli loistava. Pääasialliset suunnittelukohteemme olivat betonirakenteiset toimistorakennukset ja teollisuushallit. Rakennusfysikaalista suunnittelua tehtiin silloin tällöin.

Selailin keväällä 2012 rakentamisen koulutusohjelman jatko-opintojen kurssikuvauksia ja miltei kaikki aiheista tuntuivat mielenkiintoisilta. Syventävät opinnot energiatehokkuuden ja varsinkin rakennusfysiikan osalta tuntuivat eniten omilta. Hakeuduin opiskelijaksi ja opinnot alkoivat syksyllä 2012.

Tämä opinnäytetyö tehtiin syksyn 2012 ja kevään 2014 välisenä aikana. Aihealueen valinta oli helppoa. Rakennusfysiikka olin kiinnostanut minua pitkään ja rakennusfysiikan erikoisjakso syvensi tietämystäni aiheesta. Olin havainnut, että erilaiset rakennusfysiikan ilmiöt olivat mielenkiintoisia ja niiden periaatteet suhteellisen helppoja käsittää. Valitsin aiheeksi työpaikkani rakennetyypit ja rajasin työtäni ulkoseinä- ja yläpohjarakenteisiin. Näissä esiintyvät lämpö- ja kosteustekniset ilmiöt ovat selkeitä ja jopa maallikon ymmärrettävissä. Tarkoitukseni oli luoda Insinööritoimisto SRT Oy:n työntekijöille ohjeistus lämpö- ja kosteusteknisen teoreettisen laskennan perusteista sekä erilaisten rakennetyyppien kosteus- ja lämpöteknisestä toiminnasta. Itselleni aihe oli jäänyt liian vähälle huomiolle rakennesuunnittelijan päivittäisessä työssä. Insinööritoimisto SRT Oy:n toimitusjohtaja diplomi-insinööri Pauli Oksman kannusti kuitenkin minua tekemään aiheesta opinnäytetyön. Erääksi tavoitteeksi asetettiin työn helppolukuisuus ja selkeys siten, että lopputulos ei siitä kärsi.

Työpaikan vaihtaminen juuri opintojen ja opinnäytetyön tekemisen alussa tuli minullekin yllättäen. Erään Kuopion kaupungin virkatehtävän hakukriteerit kohtasivat niin hyvin osaamiseni ja työkokemukseni suhteen, että virkaa oli käytännössä pakko hakea. Ennen hakemuksen jättämistä keskustelin asiasta Pauli Oksmanin kanssa joka osoitti suurta ymmärrystä tilannetta kohtaan. Sovimme, että kävi miten kävi, teen opinnäytetyöni Insinööritoimisto SRT Oy:lle, koska tunnen yrityksen toimintatavat. Työpaikkani vaihtui ja tässä yhteydessä onkin oikea hetki kiittää entistä työnantajaani. Suuri kiitos! Työskentely Insinööritoimisto SRT: Oy:ssä oli hienoa aikaa ja toivon, että opinnäytetyöstäni on aidosti hyötyä entisessä työpaikassani!

Paulin lisäksi kiitän Savonia-ammattikorkeakoululta Harry Dunkelia, jonka rakennusfysikaalinen osaaminen ja luennointi innoitti minua tekemään työn tästä aiheesta. Harry Dunkel on myös ansainnut kiitokset opinnäytetyön ohjaamisesta. Kiitän myös DOF-Tech Oy:n Marko Saikkosta, joka on ohjeistanut minua DOF-lämpö ohjelman suhteen.

Kuopiossa 14.4.2015

Henri Humala

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
1.1	Tausta ja tavoitteet	8
1.2	Aineiston hankinta.....	8
1.3	Yhteistyö yritys Insinööritoimisto SRT Oy	9
2	VESIHÖYRYN JA LÄMPÖTILAN VÄLINEN SUHDE	10
3	KOSTEUS MATERIAALEISSA	13
4	SISÄ- JA ULKOILMAN VESIHÖYRYN MÄÄRÄ.....	15
5	RAKENNUKSEN KOSTEUSLÄHTEET	18
6	DIFFUUSIO JA KONVEKTIO	21
6.1	Diffuusio	21
6.2	Konvektio	22
7	KONVEKTIOLASKENNAN PERIAATTEET JA LASKENTAESIMERKIT	25
7.1	Luonnollinen konvektio ja Rayleighin luku	25
7.2	Pakotettu konvektio	27
7.3	Konvektio materiaalin ilmanvastuksen suhteen	32
7.4	Konvektion kuivattava vaikutus tuuletuksessa	33
8	DIFFUUSIOKOSTEUDEN LASKENNAN PERIAATTEET.....	38
9	VESIHÖYRYN LÄPÄISEVYYDEN ARVOT.....	43
10	VAIPPARAKENTEIDEN DIFFUUSIOLASKURI	47
10.1	Diffuusiolaskurin toiminnan periaatteet	47
10.2	Diffuusiolaskurin lämpötilalaskennan esittely.....	48
10.3	Diffuusiolaskurin kosteuslaskennan esittely.....	52
11	DIFFUUSIOLASKENNAN ESIMERKKI: PERUS SANDWICH-RAKENNE	59
11.1	DOF-lämpö ohjelman ja Diffuusiolaskurin vertailuesimerkki	60
11.2	Diffuusioikosteuden käsin laskenta	63
11.3	Passiivirakenteinen perus sandwich-rakenne.....	65
11.4	Rakenteen kuivuminen diffuusion avulla	66
12	YHTEENVETO.....	69
13	LOPPUSANAT	71
	LÄHTEET	73
	LIITTEET	76
	Liite 1: Luonnollisen konvektion Rayleigh laskuri	76

Liite 2: Pakotetun konvektion laskuri.....	77
Liite 3: Vaipparakenteen kosteyslaskuri.....	78
Liite 4: Lämpimän tilan U-arvolaskuri I.....	79
Liite 5: Lämpimän tilan U-arvolaskuri II.....	80
Liite 6: Lämpimän tilan U-arvolaskuri III	81
Liite 7: Diffuusiolaskuri, perus sandwich-rakenne	83
Liite 8: Perus sandwich-rakenne, DOF-lämpö ohjelma	84
Liite 9: Diffuusiolaskuri, perus sandwich-passiivirakenteena	85
Liite 10: Perus sandwich-passiivirakenteena, DOF-lämpö ohjelma.....	86

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoitteet

Rakennesuunnittelijan rakennusfysikaaliseen osaamiseen kuuluu erilaisten rakennetyyppien lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan ymmärtäminen. Jos rakenteet eivät aiheuta ongelmia, ei rakennusfysikaaliselle tarkastelulle ole yleensä tarvetta. Uudisrakennuksia suunnitteleva rakennesuunnittelutoimisto käyttääkin suunnitelmissaan hyväksi todettuja rakenteita. Kiristyneet lämmöneristysmääräykset ja muuttuneet materiaalit vaikuttavat rakennetyyppien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, eikä muuttuneista vaipparakenteista ole pitkäaikaisia kokemuksia. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä muuttuneista rakenteista mahdollisesti aiheutuvia ongelmia laskennallisten menetelmien näkökulmasta. Ensisijaisena tavoitteena on kuitenkin lämpö- ja kosteusteknisen tietämyksen kasvattaminen Insinööritoimisto SRT Oy:ssä.

Tutkimus keskittyy rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen konvektion sekä diffuusion kautta. Tutkimuksessa käytetään yksinkertaisia laskentamenetelmiä, jollaisia rakennesuunnittelijat voivat käyttää päivittäisissä töissään suuntaa-antavina työkaluina. Tutkimuksessa perehdytään Insinööritoimisto SRT Oy:n käyttämien rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Kyseinen osuus työstä on salainen.

Tutkimuksen aiheen rajaus tehdään Insinööritoimisto SRT Oy:n käyttämiin rakenneratkaisuihin ja niidenkin osalta vain huolta aiheuttaviin ulkoseinä- ja yläpohjarakenteisiin. Aihetta rajataan myös rakennesuunnittelijan päivittäistä työtä silmällä pitäen. Rakennusfysiikka on vain yksi rakennesuunnittelun osa.

1.2 Aineiston hankinta

Tutkimuksen aineisto perustuu alan kirjallisuuteen ja aiheesta tehtyihin tutkimuksiin sekä Insinööritoimisto SRT Oy:ssä käytettyihin rakenneratkaisuihin. Rakenneratkaisujen toimivuutta tarkastellaan teoreettisesti, perehdytään erilaisiin laskentamenetelmiin ja tarkastellaan rakenteita laskentamenetelmien antamien tulosten pohjalta. Myös ulkomaalaisia tutkimuksia ja laskentamenetelmiä tutkitaan.

1.3 Yhteistyö yritys Insinööritoimisto SRT Oy

Tutkimus tehdään rakennesuunnittelua tekeväälle Insinööritoimisto SRT Oy:lle, jossa olen työskennellyt vuosina 2007 – 2012. Yrityksen päätoimialaa on rakennesuunnittelu sekä siihen liittyvä kehitys- ja tutkimustoiminta. Lisäksi yritys toteuttaa rakennuttamis- palveluita, kustannuslaskentaa ja rakennusteknisten töiden valvontaa. Rakennesuunnittelu ja esi- ja jälkijännitetyt rakenteet ovat yrityksen keskeisintä osaamisaluetta.

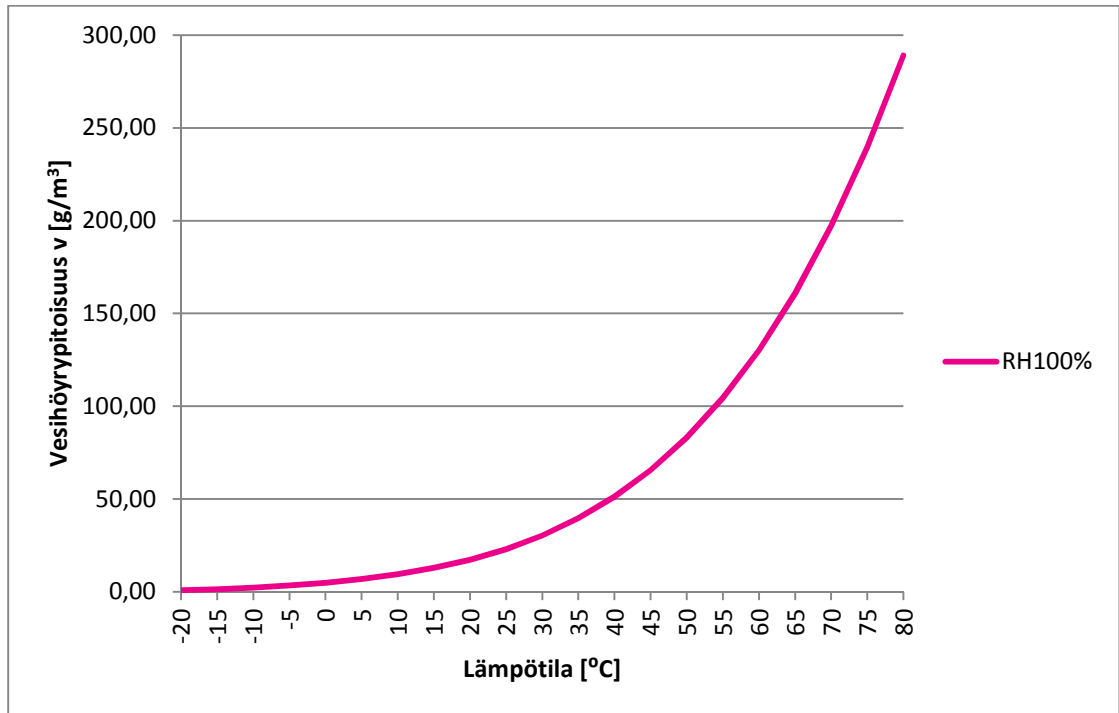
Opinnäytetyö toimii Insinööritoimisto SRT Oy:n työntekijöiden oppaana erilaisten käytettyjen rakennetyyppien kosteus- ja lämpöteknisestä toiminnasta. Eräänä tutkimuksen päätavoitteena on Insinööritoimisto SRT Oy:n suunnittelijoiden lämpö- ja kosteusteknisen tietämyksen kasvattaminen. Kosteusteknisen toiminnan hahmottaminen luo pohjaa rakennusfysiikan ymmärtämiselle ja antaa edellytyksiä parantaa työn ja suunnitelmien laatua.

2 VESIHÖYRYN JA LÄMPÖTILAN VÄLINEN SUHDE

Veden määrää ilmassa voidaan kuvata suhteellisena kosteutena RH [%], vesihöyrypitoisuutena v [g/m³] tai vesihöyryn osapaineena p_v [Pa]. Suhteellinen kosteus kertoo sen, miten paljon ilmassa on kosteutta suhteessa ilman kosteuden sitomiskykyyn. Suhteellista kosteutta voi havainnollistaa tunteesta, onko ilma kostean vai kuivan tuntuista. Vesihöyrypitoisuudella ja vesihöyryn osapaineella kuvataan samaa asiaa; kuinka paljon vesihöyryä ilma sisältää. Vesihöyrypitoisuus kertoo, kuinka monta grammaa vettä ilma konkreettisesti sisältää. Vesihöyryn osapaine kuvaa vesihöyryn paineen osuutta koko ilmanpaineesta. Vesihöyrypitoisuuden ja vesihöyryn osapaineen välillä on yhteys joka on esitetty kuviossa 1 ja taulukossa 1 (Björkholtz 1987, 55; Dunkel 2012, 6).

Lämmin ilma sitoo itseensä enemmän kosteutta kuin kylmä ilma. Tästä johtuen kylmä kellari saattaa tuntua kosteammalta kuin ulkoilma. Suhteellinen kosteus viileässä kellarissa on korkeampi kuin ulkona samalla kun molemmissa tiloissa on sama grammamäärä kosteutta. Koska lämmin ilma sitoo itseensä enemmän kosteutta kuin kylmä ilma, ilma tuntuu kuivuvan kun sitä lämmitetään. Hiukset kuivavat nopeammin kun niihin puhalletaan lämmintä ilmaa hiusten kuivaimella. Jos ilma jäähtyy, tulee tuntemus että kosteus lisääntyy. Tällöin suhteellinen kosteus RH kasvaa (Björkholtz 1987, 43 - 46).

Kun ilma jäähtyy tarpeeksi, suhteellinen kosteus kasvaa lähelle 100 %:a ja saavutetaan ns. kastepiste. Tällöin ilmassa oleva vesihöyry alkaa tiivistymään nesteeksi. Sisäilmassa oleva kosteus tiivistyy kylmille silmälaseille, kun siirrytään sisälle pakkasesta. Kosteus tiivistyy kylmään pintaan. Sama ilmiö tapahtuu ulkoseinärakenteissa, jossa sisäilmassa oleva kosteus pyrkii tasoittumaan ulkopuolella olevan ilman kanssa ja tiivistyy nesteeksi ensimmäiseen kiinteään, kylmään pintaan jossa kastepiste voidaan saavuttaa (Björkholtz 1987, 64,65; Siikanen 1996, 55 - 57).



Kuvio 1: Vesihöyryn kylläisyyspitoisuuden ja lämpötilan suhde taulukon 1 mukaisesti (Björkholtz 1987, 44)

Talvella ilma sisältää määrällisesti vähän vesihöyryä mutta johtuen kylmän ilman heikosta kyvystä sitoa kosteutta, suhteellisen kosteuden arvot ovat korkeita (RH=80...90 %). Keväällä ilmojen lämmitessä suhteellinen kosteus on pienimmillään (RH=40...50 %). Tästä johtuen puutavara kuivuu keväällä parhaiten. Kesällä ilmassa on enemmän kosteutta kuin talvella ($v=8...11 \text{ g/m}^3$) mutta suhteellinen kosteus on kuitenkin pienempi (RH=65...80 %; Dunkel 2012, 9).

Kosteaa ilmaa on kahden kaasun, kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Kuivan ilman moolipaino on $28,96 \text{ kg/kmol}$ ja vesihöyryn vastaavasti $18,02 \text{ kg/kmol}$. Vastoin kuin yleisesti uskotaan, *vesihöyryä sisältävä ilma on kuivaa ilmaa kevyempää*. Mitä kosteampaa ilma on, sitä kevyempää se on suhteessa kuivempaan ilmaan (Björkholtz 1987, 43).

Vesihöyrypitoisuuden muuttaminen vesihöyryn osapaineeksi voidaan tehdä kaavan 1 mukaisesti (Dunkel 2012, 6).

$$p_v = v * 461,4 \left(\frac{J}{kgK} \right) * 0,001 * T \quad (1)$$

p_v = vesihöyryn osapaine [Pa]

v = vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

T = ilman lämpötila [K]

Vesihöyryn osapaineen muuttaminen vesihöyrypitoisuudeksi voidaan tehdä kaavan 2 mukaisesti (Björkholtz 1987, 43).

$$v = \frac{pv}{461,4 \left(\frac{J}{kgK} \right) * 0,001 * T} \quad (2)$$

v = vesihöyry pitoisuus [g/m³]

p_v = vesihöyryn osapaine [Pa]

T = ilman lämpötila [K]

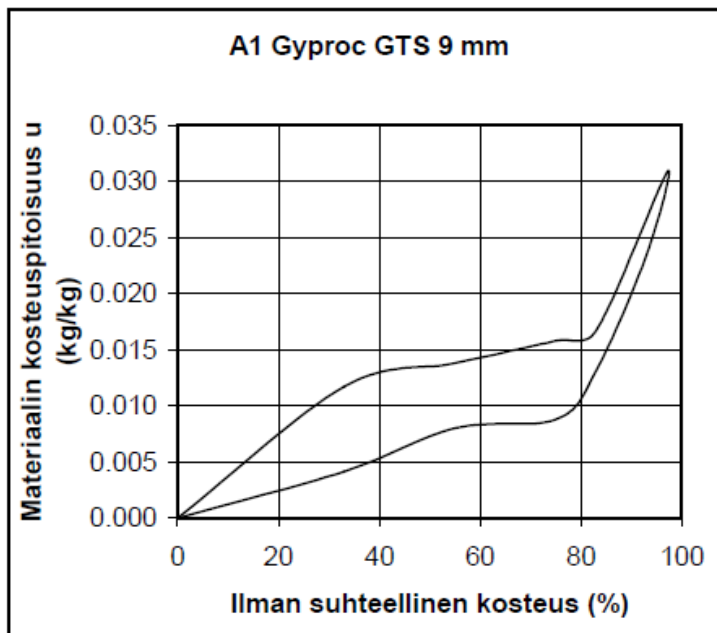
Taulukko 1: Vesihöyryn kylläisyypitoisuuksia ja -osapaineita eri lämpötiloissa (Björkholtz 1987, 44)

t [°C]	v_k [g/m ³]	P_k [Pa]	t [°C]	v_k [g/m ³]	P_k [Pa]	t [°C]	v_k [g/m ³]	P_k [Pa]
-20	0,88	102	14	12,10	1603	48	75,67	11213
-19	0,95	112	15	12,86	1709	49	79,33	11792
-18	1,04	122	16	13,65	1821	50	83,14	12396
-17	1,14	135	17	14,49	1940	51	87,10	13026
-16	1,25	149	18	15,37	2065	52	91,21	13683
-15	1,38	164	19	16,30	2198	53	95,48	14368
-14	1,52	182	20	17,28	2338	54	99,92	15082
-13	1,67	200	21	18,31	2486	55	104,52	15825
-12	1,83	221	22	19,40	2642	56	109,30	16599
-11	2,01	243	23	20,54	2806	57	114,25	17405
-10	2,20	267	24	21,74	2980	58	119,39	18242
-9	2,40	292	25	23,00	3164	59	124,72	19114
-8	2,61	319	26	24,32	3357	60	130,24	20019
-7	2,84	348	27	25,71	3561	61	135,95	20960
-6	3,08	379	28	27,17	3775	62	141,87	21938
-5	3,33	412	29	28,70	4001	63	147,99	22953
-4	3,60	448	30	30,31	4239	64	154,33	24007
-3	3,89	485	31	31,99	4489	65	160,88	25101
-2	4,19	525	32	33,75	4753	66	167,66	26236
-1	4,51	567	33	35,60	5029	67	174,67	27413
0	4,85	611	34	37,54	5320	68	181,90	28633
1	5,21	659	35	39,56	5625	69	189,38	29898
2	5,58	709	36	41,68	5945	70	197,11	31208
3	5,98	762	37	43,90	6282	71	205,08	32565
4	6,40	818	38	46,21	6634	72	213,31	33970
5	6,84	878	39	48,63	7004	73	221,80	35425
6	7,31	942	40	51,16	7391	74	230,56	36931
7	7,80	1009	41	53,79	7797	75	239,60	38488
8	8,32	1080	42	56,54	8222	76	248,91	40099
9	8,87	1155	43	59,41	8667	77	258,51	41765
10	9,45	1235	44	62,40	9132	78	268,40	43487
11	10,06	1319	45	65,52	9618	79	278,59	45266
12	10,71	1409	46	68,77	10127	80	289,08	47104
13	11,39	1503	47	72,15	10658			

3 KOSTEUS MATERIAALEISSA

Kosteus voi olla sitoutuneena materiaaleihin kaasuna, nesteinä eli vetenä tai kiinteänä jäänä. Vesi voi olla sitoutuneena materiaaleihin kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi on osa materiaalia ja se on vahvemmin kiinni materiaalissa kuin fysikaalisesti sitoutunut vesi. Fysikaalisesti sitoutunut vesi on esimerkiksi adsorptiovettä tai kapillaarisesti sitoutunut materiaaliin. Vesihöyrynä rakenteiden huokosissa olevaa vettä ei voida pitää aineeseen sitoutuneena koska se pääsee liikkumaan konvektion ja diffuusion avulla (Pentti, Hyypöläinen 1999, 27).

Joillain materiaaleilla on hygroskooppisia ominaisuuksia. Tällä tarkoitetaan materiaalin fysikaalista kykyä sitoa kosteutta itseensä ilmasta. Puupohjaisilla materiaaleilla, betonilla ja kevytbetonilla on suuri hygroskooppisuus. Mineraalivilloilla ja poltetulla tiilellä hygroskooppisuus on pieni (Viljanen, 2012, 45; Siikanen 1996, 53).



Kuva 1: Adsorptio- ja desorptiokäyrät Gyproc tuotteelle. Adsorptio on käyristä alempi (Vinha, Valovirta, Korpi, Mikkilä, Käkelä 2005, liite2: materiaalien tasapainokosteuskäyriä, 1).

Hygroskooppinen materiaali pyrkii tasapainottamaan oman kosteuspitoisuutensa ympäristön kanssa. Ympäristön kosteuden muuttuessa materiaali sitoo tai luovuttaa kosteutta itseensä suoraan ilmasta ja pyrkii saavuttamaan hygroskooppisen tasapainokosteuden. Aineen hygroskooppista kosteuden sitoutumista kutsutaan adsorptioksi ja

kuivumista desorptioksi. Adsorption ja desorption väliset käyrät eivät ole yhtenevät. Materiaalin ja sen ympäristön välillä tapahtuu koko ajan joko kostumista tai kuivumista tai tila on tasapainossa (Viljanen, 2012, 46; Siikanen 1996, 53; Pentti, Hyyppläinen 1999, 28 - 30).

Termillä kriittinen kosteus tarkoitetaan kosteuspitoisuuden ylärajaa, jossa rakennusmateriaali toimii tyydyttävästi pitkiäkin aikoja. Kriittisen kosteuden ylittyessä rakenteseen alkaa vaikuttaa turmeltumisilmiöt kuten pakkasrapautuminen, muodonmuutokset, homeen kasvu, lahoaminen ja korroosio. Esimerkiksi hometta voi syntyä minkä tahansa rakennusmateriaalin pintaan kun lämpötila on yli 0°C ja suhteellinen kosteus yli 70 % (Pentti, Hyyppläinen 1999, 47 - 48).

4 SISÄ- JA ULKOILMAN VESIHÖYRYN MÄÄRÄ

Sisäilman vesihöyryn määrään vaikuttaa pääasiassa ulkoilman kosteuspitoisuus, sisällä kehittyneen kosteuden määrä ja ilmanvaihdon tehokkuus. Lämpimään sisäilmaan syntyy rakennusten normaalin käytön yhteydessä vesihöyryn muodossa olevaa kosteutta. Sisäilman kosteuslähteitä ovat mm. ihmiset ja eläimet, ruoan laitto, peseytyminen, huonekasvit ja ilman kostutus. Kaikkia edellä mainittuja tekijöitä voidaan kutsua kosteuslähteiksi. Ihmisten asuin tavat vaihtelevat erittäin paljon, joten yleisesti käytössä olevia kosteuslähteitä ovat:

- toimistotilat 2g/m^3
- asuinrakennukset 3g/m^3
- ahtaat ja huonon ilmanvaihdon omaavat rakennukset 4g/m^3 .

Taulukko 2: Sisäilman kosteuslähteen perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyytit RIL 107 2012:n mukaan (Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet, 2012)

Kosteusluokka	Kosteuslähteen mitoitusarvo talvella ($T \leq 5 \text{ °C}$)	Rakennustyyppi ^{3,4}
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ ¹	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat ^{5,6} , kylmä- ja pakkahuoneet ^{5,6} , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3 ²	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

¹ Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslähteen ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslähteen voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä $6\text{--}20 \text{ g/m}^3$.

² Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslähteen arvoa 3 g/m^3 , ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslähteen riittää tarkasteltavassa kohteessa.

³ Eri rakennustyyppien kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012).

⁴ Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

⁵ Jäähdytettävien tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslähteen voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

⁶ Jäähdytettävien tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvuun otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

Kosteuslisä lisätään ulkoilman kosteuspitoisuuteen. Tällöin termi ei suoraan kerro, että asuinrakennuksissa voidaan katsoa olevan vesihöyryä $3\text{g}/\text{m}^3$, vaan lisäys tehdään ulkoilman kosteuspitoisuuteen. Käytännössä ulko- ja sisäilman kosteudet kuitenkin eroavat toisistaan kosteuslisän verran (Dunkel, 2012, 11; Pentti, Hyypöläinen 1999, 25).

Erityisen suuren kosteuslisän omaavia tiloja ovat esimerkiksi uimahallit ja erilaiset paperia käsittelevät tehtaat. Yleensä sisäpuolella vaippaa on suurempi kosteus, jolloin kosteusvirta on ulospäin. Poikkeuksena tähän voivat olla mm. laajan pinta - alan omaavat maanvaraiset lattiarakenteet, maanalaiset kellarin seinät sekä kylmät rakennukset tiettyinä vuodenaikoina (Dunkel, 2012, 11 - 13,17).

Ulkoilman kosteuspitoisuuden voi selvittää mm. meteorologisten palveluiden kautta. Muun muassa ilmatieteenlaitos ja Foreca Oy tarjoavat www-sivuillaan paikkakuntakohtaisia tietoja suhteellisesta kosteudesta sekä lämpötiloista. Koska tiedossa on erilaisten lämpötilojen kylläisyyspitoisuudet, voidaan lämpötilan mukainen vesihöyrypitoisuus tai -osapaine kertoa suoraan suhteellisen kosteuden prosentilla. Tuloksena saadaan ulkoilman kosteuden määrä.

<http://www.foreca.fi> (saatavilla 24.4.2014)

<http://www.ilmatieteenlaitos.fi> (saatavilla 24.4.2014)

Ulkolämpötilojen ja suhteellisen kosteuden keskiarvot on saatavissa myös taulukoista 4 ja 5. Rakennusfysiikan laskentaa ajatellen olisi tärkeää ymmärtää millainen ilmasto on rakenteen käyttöiän loppupuolella. Aiheeseen liittyvä erityisen mielenkiintoinen web-artikkeli ”Rakennusfysiikan testivuodet tulevaisuuden ilmastossa” löytyy Ilmatieteen laitoksen sivuilta:

<http://ilmatieteenlaitos.fi/Rakennusfysiikan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa>

(saatavilla 21.4.2014)

Artikkelissa kuvatut ilmastoskenaariot perustuvat tällä hetkellä käytössä olevien ilmastomallien tuloksiin. Tulevaisuuden testivuosien sääaineisto voi pitää sisällään suurta epätarkkuutta vaikka tulokset on annettu desimaalien tarkkuudella. Sään ennustaminen vuosikymmeniksi eteenpäin on hankalaa.

Taulukko 3: Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot kuukausittain (Helsinki; DOF-LÄMPÖ ohjelmiston ohjekirja, 2003)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
t °C	-6.1	-6.6	-3.5	2.6	8.9	14.0	17.2	16.0	11.1	5.4	1.0	-2.6
RH %	88	87	82	76	66	64	71	78	84	86	89	89

Taulukko 4: Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot kuukausittain (Jyväskylä; DOF-LÄMPÖ ohjelmiston ohjekirja, 2003)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
t °C	-8.8	-8.7	-4.8	2.0	8.7	13.9	16.9	15.0	9.8	3.8	-0.8	-5.0
RH %	89	87	81	75	68	65	72	80	86	88	91	90

5 RAKENNUKSEN KOSTEUSLÄHTEET

Nesteen muodossa oleva vesi aiheuttaa yleensä rakennusten suurimman kosteuslähteen. Vettä joutuu rakennuksen sisälle ja rakenteisiin muun muassa sateen ja huolimattoman veden käsittelyn aiheuttamina. Suuret betonivalut aiheuttavat suoraan rakenteiden kastumista ja lisäksi ne luovuttavat sisäilmaan suuria määriä vesihöyryä. Veden aiheuttamia haittavaikutuksia on mahdollista vähentää esimerkiksi suojaamalla rakenteita ja rakennusosia sateen vaikutuksilta. Kastuminen pyritään estämään etukäteissuunnittelulla ja valmisteluilla. Jos vahinkoja sattuu, katsotaan mitä asialle voidaan tehdä. Kastuneiden eristeiden vaihtaminen on hyvä vaihtoehto. Yleisesti ottaen rakenteita ja rakennuksia ei kannata päästää kastumaan missään vaiheessa (Siikanen 1996, 52; Björkholtz 1987, 40).

Sade on ilmeisin rakennukseen kohdistuva kosteuslähde. Kastelevin sadetyyppi on räntä, joka jää pitkiksi ajoiksi vaikuttamaan rakenteen loiville ja vaakasuorille pinnoille. Suomessa yleinen pystysade kastelee lähinnä vaakasuoria ja vinoja pintoja ja räystäättömissä taloissa myös pystysuoria seinäpintoja. Sateen aiheuttamia haittoja seinärakenteille onkin helppoa vähentää tarpeeksi leveillä räystäillä. Rakentamisen aikainen sade on yleinen rakenteiden kastelija ja rakennekosteuden aiheuttaja (Siikanen 1996, 52).

Kapillaarisuus tarkoittaa rakennusfysikaalisesti ajatellen rakennusaineiden ja maaperän kykyä imeä ja siirtää vettä itseensä niiden ollessa kontaktissa nestemäisen veden kanssa. Kapillaarisuus tunnetaan myös nimellä hiusputki-ilmiö. Maatyypin ominaiset kapillaarivoimat imevät ja nostavat vettä pohjavesipintaa korkeammalle. Kapillaarisuus on helposti hallittavissa suunnitelmissa ja työmaalla. Normaalisti kapillaarisuuden vaikutusta rakenteisiin ei tarvitse ottaa huomioon, koska rakenteen ja maaperän väliin tulee kapillaarisuuden katkaiseva kerros. Lisäksi käytetään myös kapillaarikatkoa esim. betonisten perustusten ja yläpuolisen rungon välissä (Björkholtz 1987, 53).

Kapillaarisuutta esiintyy myös rakenteissa, jotka ovat päässeet kastumaan. Esimerkiksi sateessa kastunut tiiliseinä siirtää kosteutta rakenteensa sisällä kapillaarisesti. Jos pinta kuivuu, kosteus voi siirtyä kapillaarisesti tiilen sisältä pintaan. Rakennuskosteudella tarkoitetaan sitä vesimäärää, joka rakenteeseen on jäänyt rakentamisvaiheessa vähennettynä ympäristön tasapainokosteustilanteesta. Rakentamisvaiheen ra-

kennekosteuksien aiheuttajia ovat mm. materiaalien tuotantoprosessit, varastointi, kuljetus ja rakenteiden suojaus ulkopuolisilta kosteuslähteiltä. Esimerkiksi tiili on valmistuessaan hyvin kuiva materiaali, mutta betonissa voi olla suuria määriä prosessin mukana tuomaa kosteutta. Rakennusaineiden rakennuskosteuksia löytyy taulukosta 6. Myös rakenteiden altistuminen rakentamisen aikaiselle sateelle aiheuttaa rakennuskosteutta (Björkholtz 1987, 61; Pentti, Hyypöläinen 1999, 15,23,24,43).

Taulukko 5: Muutamien rakennusaineiden ja rakenteiden rakennuskosteuksia (Pentti, Hyypöläinen 1999, 24)

Aine	Kosteus rakennusvaiheessa (kg/m ³)	Poistuva kosteus eli rakennuskosteus (kg/m ³)
Betoni K25	180	90
Betoni K30	180	85
Betoni K35	180	70
Karkaistu kevytbetoni	100...200	80...180
Kalkkilaasti	300	320
Kalkkisementtilaasti	300	250
Poltettu tiili	10	0
Tiilimuuri	80	70
Puu	60...80	20...40
Kalkkiahiekkatiili	50	20
Kalkkiahiekkatiilimuuri	90	60

Betonirakenteiden rakennuskosteus on merkittävä kosteuslähde. Tavalliset rakennebetonit sisältävät paljon vettä minkä vuoksi näiden rakenteiden kuivumisaikataulu on suhteellisen pitkä verrattuna nykyisiin rakentamisaikatauluihin. Poistuvan kosteuden määrä voi olla kymmeniä litroja vettä kuutiometristä betonia. Esimerkiksi betonisandwich-elementistä voi poistua valun jälkeen vielä noin 80kg kosteutta betonikuutiota kohden (Pentti, Hyypöläinen 1999, 24).

Märkätiloissa lattia- ja seinäpinnat joutuvat kosketuksiin veden kanssa. Tällaisia tiloja voivat olla kylpyhuoneet, WC:t, suihkut, saunat ja keittiöt. Näissä tiloissa ulkoseinä-rakenteita rasittaa korkea sisäilman kosteuspitoisuus (esim. peseytyminen ja ruoan laitto), roiskevedet, lattialta haihtuva vesi ja kylmiin pintoihin tiivistyvä vesi (kylmät putket ja ikkunat). Myös uima-hallien, teollisuuden prosessitilojen ja kosteutettujen sisätilojen ilma voi pitää sisällään korkeita vesihöyrypitoisuuksia. Edellä mainittujen tilojen

ulkoseinärakenteisiin tulee kiinnittää erityistä huomiota pintarakenteiden tiiveyden ja tarvittaessa rakenteiden tuulettamisen kautta (saunan ulkoseinä tai uimahallin yläpohja). Tällaisten tilojen kosteusteknisen toimivuuden perusta on kuitenkin toimiva ja riittävä ilmanvaihto. Jäähdytettyjen tilojen suunnittelussa tulee huomioida rakenteen toimiminen kesäkuukausina. Viileä tila on tällöin kuin talvinen ulkotila, jonka suuntaan kosteus pyrkii diffuusion avulla tasoittumaan (Pentti, Hyyppöläinen 1999, 25).

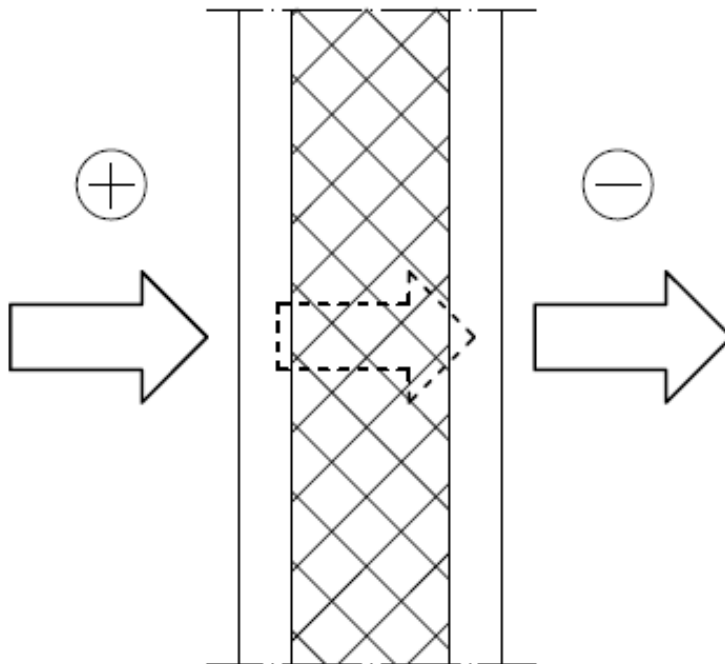
6 DIFFUUSIO JA KONVEKTIO

6.1 Diffuusio

Molekyyleillä on taipumus siirtyä väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan tasoittaen mahdolliset pitoisuuserot ajan mittaan. Tätä kutsutaan diffuusioksi. Diffuusio vaikuttaa myös kosteus- ja lämpötilaeroihin. Kosteuspitoisuudet tasoittuvat suuremmasta pienemmän suuntaan (Siikanen 1996, 56).

Rakennustekniikassa diffuusio tarkoittaa yleensä vesihöyryn siirtymistä rakenteen läpi. Miltei kaikille materiaaleille on ominaista päästää lävitseen vesihöyryä. Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä kylmään päin. Tärkein diffuusion aiheuttaja on ilman kosteuspitoisuuden erot rakenteen eri puolilla. Ilmankosteus pyrkii diffuntoitumaan rakenteen läpi tilaan, missä vesihöyrypitoisuus on pienempi. Yleensä sisätiloissa vesihöyryä on enemmän ja ulkona vähemmän (Siikanen 1996, 56).

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vaipparakenteita, jossa tilanne on edellä mainittu.



Kuva 2: Diffuusiovirta rakenteen läpi

Maanvaraisissa alapohjarakenteissa diffuusiovirran suunta voi kuitenkin olla sisälle päin. Maaperä on pohjimmiltaan märkää ja kosteutta maaperässä on loputtomasti mm.

pohjaveden muodossa. Maan huokosissa olevan ilman voidaan katsoa olevan kylläinen vesihöyrystä. Huokosilman suhteellinen kosteus on tällöin ~100 %. Diffuusiokosteus voi aiheuttaa ongelmia, jos kostea maaperä pääsee lämpenemään huonosti toteutetun alapohjarakenteen ansiosta (Dunkel 2012, 13; Leivo, Rantala, 2002, 30).

6.2 Konvektio

Kostea ja lämmin ilma liikkuu myös konvektion avulla. Konvektio on lämmön siirtymistä kaasussa tai nesteessä. Konvektiota aiheuttaa paine-ero vaipan yli. Paine-eroa ja siten konvektiota rakenteisiin voivat aiheuttaa mm. tuuli ja ilmanvaihtojärjestelmät. Konvektiossa vesihöyry liikkuu ilmavirran mukana. Konvektiossa lämmön siirtyminen tapahtuu aineen välityksellä ja konvektion suuruus riippuu voimakkaasti olosuhteista (Viljanen, 2012, 28,29; Björkholtz, 1987, 57,58).

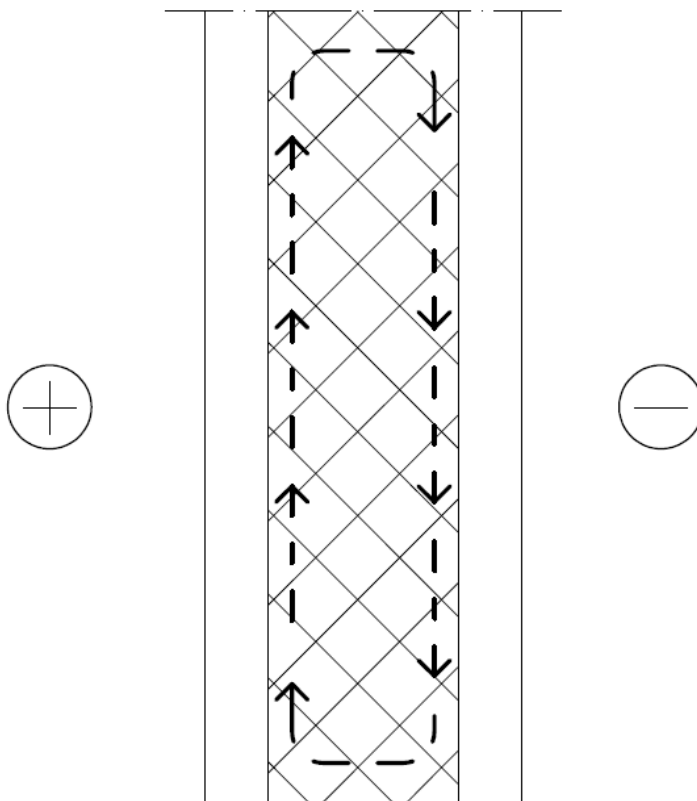
Tyypilliset rakenteiden konvektiovirtaus reitit ovat rakenteiden epäjatkuvuuskohdissa kuten saumoissa, raoissa ja läpivienneissä. Jos rakenne ei luontaisesti ole tarpeeksi ilmatiivis, on siinä oltava ilmasulku. Yläpohjarakenteet ovat tyypillisesti alueita joissa ilmavuotoja ilmenee. Tällöin on syytä kiinnittää erityistä huomiota rakenteen tuuletukseen jotta ylimääräinen kosteus saataisiin pois yläpohjasta (Dunkel, 2012, 20).

Tutkimusten mukaan jopa noin puolet tasakattojen vuodoista olisi selitettävissä sisäpuolisen höyrynsulun puutteellisuudesta ja siitä johtuvasta tiivistymisestä. Konvektiovirtauksista johtuen kattorakenteeseen siirtyy runsaasti lämmintä ja kosteaa ilmaa joka kondensoituu lämpötilan laskiessa eristeessä. Konvektion rakenteissa mahdollistavat mm. huokoiset materiaalit sekä raot ja reiät ilmasulussa (Siikanen 1996, 56; Björkholtz, 1987, 58).

Konvektio voi myös siirtää kuivempaa, viileää ulkoilmaa rakenteisiin, jolloin se kuivattaa rakennetta. Tällaisen ilmiön voi aiheuttaa esim. tuuli tai jos yläpohja on koneellisesti ylipaineistettu eli ns. ylipainekatto (Viljanen, 2012, 29; Turunen 2012).

Konvektiota tapahtuu huokoisten materiaalien sisällä ilman tiheyseroista johtuvana luonnollisena konvektiona. Tällöin eristeen sisällä oleva ilma liikkuu ja kuljettaa mukanaan kosteutta eristeen eri osien välillä. Luonnollista konvektiota tapahtuu myös mm. ikkunalasien välisessä ilmatilassa, jossa lämmennyt ja viileä ilma kiertävät pystysuuntaisesti lasien välissä (Siikanen 1996, 31,56).

Lämmöneristekerroksissa ei saa tapahtua haitallissa määrin luonnollista konvektiota. Asia voidaan tarkastaa laskemalla rakenteelle ns. muunnettu Rayleighin luku. Lämmöneristeen sisällä tapahtuvia ilmavirtauksia voidaan vähentää rakenteellisilla ratkaisuilla ja myös huolellisella asentamisella ja laadunvarmistuksella työmaalla (Lämmöneristys, Suomen RakMK C4, Ohjeet 2012, 13,14; ISO/FDIS 10456, 7).

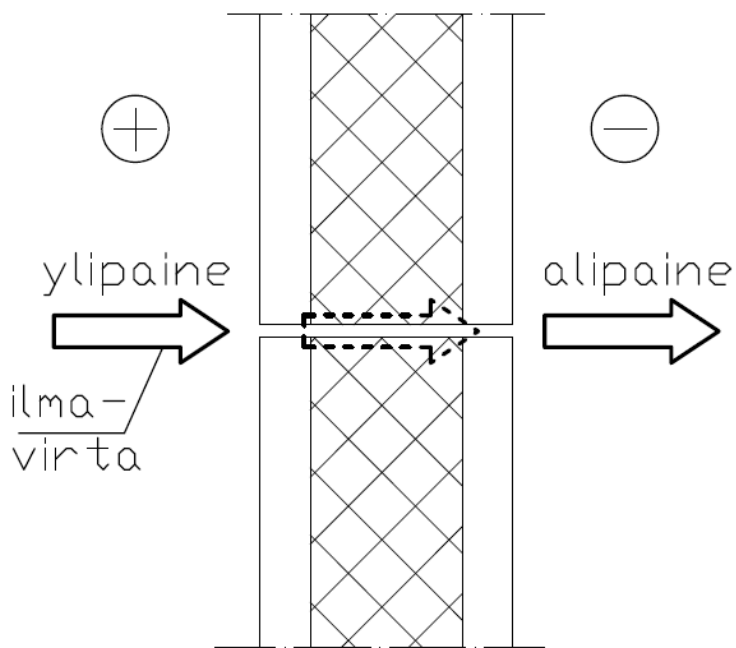


Kuva 3: Luonnollinen konvektio huokoisessa eristeessä (Siikanen 1996, 31)

Huokoiset materiaalit kuten villaeristeet laskevat helpommin ilmaa lävitseen. Materiaalien ilmatiiveys on alhainen. Rakennuksen sisä- ja ulkopuolen paine-eroista johtuen kostea sisäilma pyrkii tunkeutumaan rakenteisiin varsinkin seinien yläosassa ja yläpohjassa. Yleisesti ottaen rakennuksen yläosissa on taipumusta ylipaineeseen ja alaosissa alipaineeseen ulkoilman suhteen (Vinha 2012, 4).

Muun muassa ilmanvaihto (koneellinen tai painovoimainen), lämmitys, tuuli ja korkeissa tiloissa tapahtuvan hormivaikutus aiheuttavat ilmanpaine-eroja rakennuksen sisä- ja ulkopuolten kesken. Jos rakenteessa on reikiä tai rakoja tai vaipan ilmatiiveys

on alhainen, pyrkii ilma virtaamaan näiden alueiden kautta. Tällaista konvektiota kutsutaan pakotetuksi konvektioksi. Konvektiovirtauksen suunta määräytyy ilmanpaineerojen suhteen. Rakojen ja reikien kautta tapahtuva konvektio on merkityksellisempi suhteessa huokoisissa materiaaleissa tapahtuvaan konvektioon (Björkholtz, 1987, 58; Siikanen 1996, 31 - 33).



Kuva 4: Pakotettu konvektio raon läpi (Siikanen 1996, 32)

7 KONVEKTIOLASKENNAN PERIAATTEET JA LASKENTAESIMERKIT

7.1 Luonnollinen konvektio ja Rayleighin luku

Yläpohjien ja ulkoseinien huokoisissa lämmöneristekerroksissa tapahtuu aina luonnollista konvektiota. Luonnollinen konvektio voi aiheuttaa ongelmia jos ilmiö on liian voimakas. Asian selvittämiseksi voidaan laskea ns. muunnettu Rayleighin luku (Ra_m) kaavan 3 mukaisesti ja verrata saatua tulosta määritettyihin raja-arvoihin taulukossa 6 (Lämmöneristys, Suomen RakMK C4, Ohjeet 2012, 13; ISO/FDIS 10456, 7).

$$Ra_m = k * \frac{d * \kappa * \eta * \Delta T}{\lambda_U} \quad (3)$$

Ra_m = muunnettu Rayleighin luku

k = kerroin, jonka arvo on $3 * 10^6$

d = lämmöneristeen paksuus [m]

κ = lämmöneristeen ilmanläpäisevyys [$m^3/(msPa)$]

η = ilman dynaaminen viskositeetti $10^\circ C$ lämpötilassa = $0,0175 * 10^{-3}$ [Pa s]

ΔT = lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero [K]

λ_U = lämmöneristeen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [W/(mk)].

Taulukko 6: Muunnetun Rayleighin luvun raja-arvot yläpohja- ja ulkoseinärakenteille (ISO/FDIS 10456, 7)

Rakennusosa	Lämpövirran suunta	Ra_m
Ulkoseinä	Vaakasuuntaan	2,5
Yläpohja	Ylöspäin, lämmöneristeen yläpinta avoin	15
	Ylöspäin, lämmöneristeen yläpinnassa tuulensuoja	30

Saatu tulos on likimääräinen. Kaavan lähtöarvojen, kuten eristeen ilmanläpäisevyyden arvon etsiminen on laskennan hankalin tehtävä. Luotettava arvo tulisi kuitenkin löytää esim. valmistajan www-sivuilta. Jos luotettavaa arvoa ei löydy, lasketaan likimääräisellä arvolla likimääräinen tulos ja arvioidaan laskennan tulosta ja merkittävyyttä ylipäänsä.

Lasketaan esimerkkinä 240 mm paksun PAROC eXtra -eristeen muunnettu Rayleighin luku ja todetaan ylittyvätkö raja-arvot. Sisä- ja ulkopuolten lämpötilaero ΔT on 50K.

PAROC eXtra eriste:

- paksuus 240 mm
- $\lambda_U = 0,036 \text{ W/mK}$
- $\kappa = 120 * 10^{-6} [\text{m}^3/\text{msPa}]$
- $\Delta T = | +20^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C}) | = 50\text{K}$

$$Ra_m = 3 \times 10^6 * \frac{0,24\text{m} * 120 * 10^{-6} \text{m}^3 \text{msPa} * 1,75 * 10^{-6} \text{Pa s} * 50\text{K}}{0,033 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 2,1$$

Lämpövirran suunta on vaakaan, eikä raja-arvo 2,5 ylity. Luonnollista konvektiota ei siis esiinnyt eristeessä haitallisissa määrin. Jos rakennepaksuutta kasvatettaisiin reilusti 360 mm:iin, saataisiin tulokseksi :

$$Ra_m = 3 \times 10^6 * \frac{0,36\text{m} * 120 * 10^{-6} \text{m}^3 \text{msPa} * 1,75 * 10^{-6} \text{Pa s} * 50\text{K}}{0,033 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 3,15$$

Tällöin raja-arvo 2,5 ylittyy ja haitallinen luonnollinen konvektio tulisi estää esim. rakenteellisesti tai lämmöneriste on vaihdettava osittain tai kokonaan vähemmän ilmaa läpäisevään eristetyyppiin.

Myös lämpötilaeron kasvattaminen nostaa muunnellun Rayleighin luvun arvoa. Määritetään $\Delta T = 56\text{K}$:

$$Ra_m = 3 \times 10^6 * \frac{0,24\text{m} * 120 * 10^{-6} \text{m}^3 \text{msPa} * 1,75 * 10^{-6} \text{Pa s} * 56\text{K}}{0,033 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 2,35$$

Raja-arvo ei ylity. Se, kuinka paljon tulokset 2,35 ja 3,15 eroavat käytännössä toisistaan ja minkälaisia ongelmia raja-arvon ylittänyt rakenne aiheuttaa suhteessa raja-arvon alittaneeseen rakenteeseen jää suunnittelijan arvioitavaksi. Raja-arvo 2,5 vaakasuuntaiselle lämpövirralle on vain määritelty lukuarvo.

Tarvittaessa Rayleighin luku voidaan määrittää kahden materiaalin yhdistelmälle. Tällä tarkoitetaan vierekkäisiä tai päällekkäisiä eristekerroksia, ei niinkään samassa rakenekerroksessa olevia runko- ja eristeyhdistelmiä. Laskentatapa on mainittu mm. RakMK C4 luonnos 16.3.2012:ssa, mutta kaavaa ei suoranaisesti ole esitetty. C4 luonnoksessa sanotaan:

Jos lämmöneristyskerros toteutetaan kahdesta tai useammasta erilaisesta ilmaa läpäisevästä lämmöneristeestä, joita ei ole erotettu toisistaan erillisellä ilmansululla (esimerkiksi yläpohjaan päällekkäin laitettavalla levyvilla- tai puhalluseriste), lasketaan tällaiselle kerrokselle yhdistetty modifioitu Rayleighin luku. Tätä varten lasketaan eri eristeistä koostuvien kerrosten yhdistetty lämmönjohtavuus ja ilmanläpäisevyys kerrosten paksuuksien suhteen painotettuna keskiarvona).

Laskennan tulos on edellistä likimääräisempi, koska se ei ota huomioon eristeiden rajapinnoissa tapahtuvia ilmiöitä (Lämmöneristys, Suomen RakMK C4, Ohjeet 2012, 14).

Rayleighin luvun laskennan avuksi on tehty Excel-laskuri, jolla voi laskea sekä yksittäisen materiaalin Rayleighin luvun. Laskurista löytyy kuvankaappaus tämän opinnäytetyön liitteistä (liite 1).

7.2 Pakotettu konvektio

Rakenteessa olevien reikien tai rakojen kautta tapahtuva pakotettu konvektio aiheutuu ilmanpaine-eroista rakenteen eri puolien välillä. Ilmanpaine-ero voidaan mitata tai laskea. Laskennassa voidaan käyttää kaavoja 4 ja 5. (Vinha 2013, 2,3).

Lämpötilaerojen aiheuttama ilmanpaine-eron rakennuksen sisä- ja ulkopuolten välillä voi laskea kaavan 4 mukaisesti (Vinha 2012, 2)

$$\Delta p_g \approx 0,043 * (T_{sisä} - T_{ulko}) * h \quad (4)$$

Δp_g = lämpötilaerojen aiheuttama ilmanpaine-ero [Pa]

$T_{sisä}$ = sisäilman lämpötila [K]

T_{ulko} = ulkoilman lämpötila [K]

h = ilmatilan korkeus (esim. huonekorkeus, porrashuoneen korkeus).

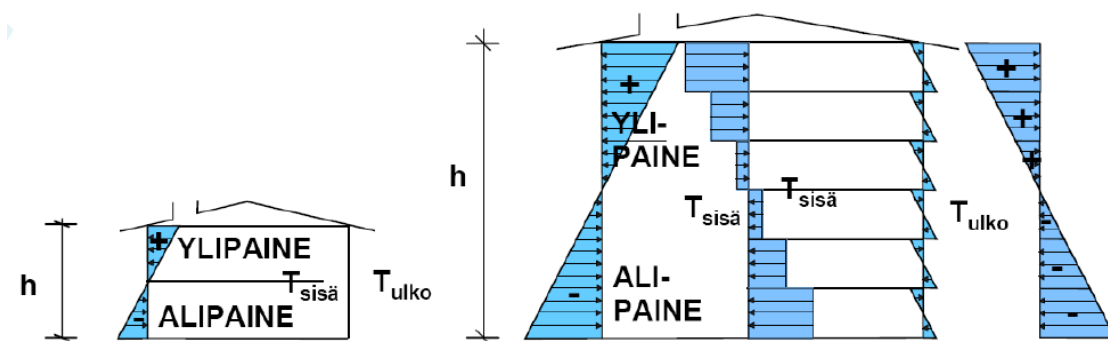
Kokonaispaine-eron rakennuksen sisä- ja ulkopuolten välillä voi laskea kaavan 5 mukaisesti (Vinha 2012, 3)

$$\Delta P = \Delta p_g + \Delta p_{tuuli} + \Delta p_{ilmastointi} \quad (5)$$

Δp_g = lämpötilaerojen aiheuttama ilmanpaine-ero [Pa]

Δp_{tuuli} = tuulenpaineen aiheuttama ilmanpaine-ero [Pa]

$\Delta p_{ilmastointi}$ = ilmastoinnin aiheuttama ilmanpaine-ero [Pa].

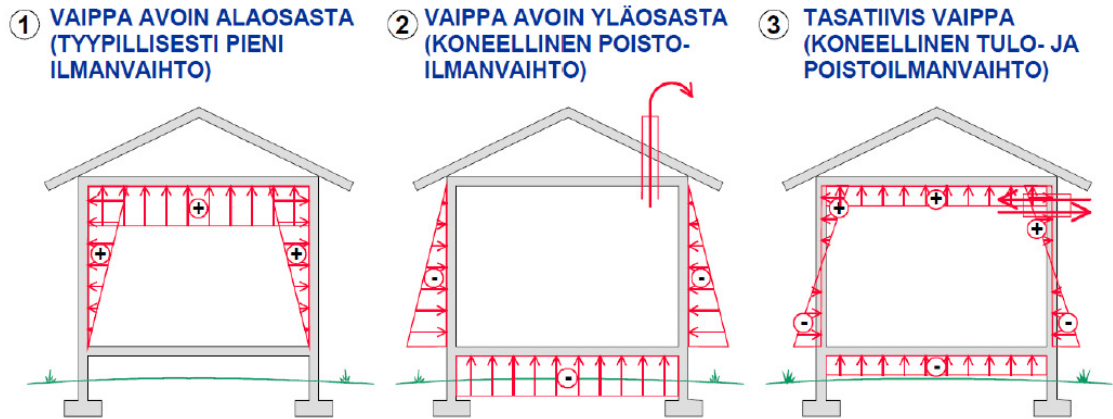


Kuva 5: Rakennuksen paine-erot (Vinha 2012, 2)

Esimerkiksi kerrostalo asunnon oveen kohdistuva 10 Pa alipaine tarkoittaisi 10M oven pinta-alalla 21 Pa voimaa, jota vastaan ovea yritetään avata. Kilogrammoissa tämä vastaa noin 2,1 kg voimaa. Jos paine-erot kasvavat kovin suuriksi, voi ovien aukaiseminen tuottaa hankaluuksia. Paine-erot ulkoilman suhteen voivat olla paljon suurempiakin. Suuri paine-ero rasittaa rakennetta varsinkin kun sen ilmasulussa on reikiä. Taulukossa 7 on annettu tavoitteellisia paine-eroja rakennusten eri osille.

Taulukko 7: Tavoitteelliset paine-erot rakennuksessa (Seppänen 2007, 11; Asumisterveysopas 2009)

Ilmanvaihtotapa	Paine-ero	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0...-5 Pa ulkoilmaan 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan.
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5 ... -20 Pa ulkoilmaan 0...-5 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan.
Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, ilmanvaihtolämmitys	0...-2 Pa ulkoilmaan 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan.



Kuva 6: Rakennuksen paine-erot talvitilanteessa (Vinha 2012, 4)

Kun paine-ero on selvillä, voidaan rakojen ja reikien kautta siirtyvän kosteusvirran suuruuden ratkaista matemaattisesti kaavan 6 mukaisesti (Björkholtz 1987, 58).

$$g_{konv} = v * Q \quad (6)$$

g_{konv} = konvektion aiheuttama kosteusvirta [kg/s]

v = ilman vesihöyrypitoisuus [g/m³]

Q = läpi virtaavan ilman määrä [m³/s].

Kaavassa tarvittavan läpi virtaavan ilmamäärän Q määrittäminen on hankalaa koska todellista raon suuruutta ei tiedetä ja sen vaikutus lopputulokseen on suuri. Matemaattisesti asia voidaan ratkaista kaavojen 7, 8 ja 9 avulla (Björkholtz 1987, 58).

Konvektion aiheuttaman ilmavirran määrä paksuissa rakenteissa jossa on rako virtauksen ollessa laminaarinen (Björkholtz 1987, 58).

$$Q_{paksu_rako} = A * \frac{b^2}{12 * \eta} * \frac{\Delta p}{l} \quad (7)$$

Q = konvektion aiheuttaman ilmavirran määrä [m³/s]

$A = b * d$ [m²], jossa d on raon pituus [m]

b = raon leveys [m]

η = ilman viskositeetti [Pa s] = $\eta = (17,1 + 0,049 * t) * 10^{-6}$, jossa t on lämpötila [°C]

Δp = ilman paine-erot rakenteen eri puolilla [Pa]

l = raon syvyys [m]

Konvektion aiheuttaman ilmavirran määrä paksuissa rakenteissa jossa on reikä virtauksen ollessa laminaarinen (Björkholtz 1987, 58).

$$Q_{paksu_reikä} = A * \frac{d^2}{32 * \eta} * \frac{\Delta p}{l} \quad (8)$$

Q = konvektion aiheuttaman ilmavirran määrä [m^3/s]

$A = \frac{\eta * d^2}{4}$ [m^2], jossa d on reiän halkaisija [m]

η = ilman viskositeetti [Pa s] = $\eta = (17,1 + 0,049 * t) * 10^{-6}$, jossa t on lämpötila [$^{\circ}C$]

Δp = ilman paine-erot rakenteen eri puolilla [Pa]

l = reiän syvyys [m]

Konvektion aiheuttaman ilmavirran määrä ohuissa rakenteissa (Björkholtz 1987, 58).

$$Q_{ohut} = 0,8 * A * \sqrt{\Delta p} \quad (9)$$

Q = konvektion aiheuttaman ilmavirran määrä [m^3/s]

A = reiän pinta-ala [mm^2]

Δp = ilman paine-erot rakenteen eri puolilla [Pa]

Lasketaan esimerkiksi paljonko vesihöyryä pääsee läpi haljenneen betonisandwich-elementin sisäkuoren läpi. Elementin sisäkuoren paksuus on 80 mm, halkeaman leveys on 0,2 mm ja pituus 1000 mm. Sisäilman kosteus on $5g/m^3$, ulkoilman kosteus $2g/m^3$ ja kosteuspitoisuuksien ero on $3g/m^3$. Sisäkuoren sisä- ja ulkopinnan väliseksi ilmanpaine-eroksi on arvioitu 5Pa. Lämpötila sisällä on $+20^{\circ}C$.

$$Q_{paksu_rako} = (0,0002m * 1m) * \frac{0,0002^2m}{12 * 18,08 * 10^{-6}} * \frac{5Pa}{0,08m} = 2,3 * 10^{-6} m^3/s$$

$$g_{konv} = 0,003 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * 2,3 * 10^{-6} \left(\frac{m^3}{s} \right) = 6,91 * 10^{-9} (kg * s)$$

Muunnettuna viikon aikana tapahtuvaksi kosteusvirraksi saadaan tulokseksi:

$$\Rightarrow 6,91 * 10^{-9} (kg * s) * 604800 s/vko = 0,00418 kg/vko = \mathbf{4,18 g/vko}$$

Kasvatetaan raon leveyttä kaksinkertaiseksi 0,4 mm suuruiseksi.

$$Q_{paksu_rako} = (0,0004m * 1m) * \frac{0,0004m^2}{12 * 18,08 * 10^{-6}} * \frac{5Pa}{0,08m} = 1,84 * 10^{-5} m^3/s$$

$$g_{konv} = 0,003 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * 1,84 * 10^{-5} \left(\frac{m^3}{s} \right) = 5,53 * 10^{-8} (kg * s)$$

$$\Rightarrow 5,53 * 10^{-8} (kg * s) * 604800 s/vko = 0,033451 kg/vko = \mathbf{33,45 g/vko}$$

Raon läpi virtaava ilmamäärä kasvaa todella paljon. Tämä korostaa sitä, että tiiveys myös yksityiskohtien osalta on erittäin tärkeä rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden osalta. On huomioitava, että kyseessä on rakenteeseen siirtyvän kosteusvirran määrä, ei suoranainen kondenssin määrä. Konvektiolla paikkaan x siirtyvän ja siitä poistuvan kosteuden määrä voidaan määrittää kaavan 10 avulla (Viljanen 2012, 29).

Konvektion aiheuttaman kosteusvirran suuruus paikassa x (Viljanen, 2012, 29)

$$g_{konv_x} = (v_{sis_x} - v_{ulos_x}) * Q \quad \begin{array}{l} jos g_{konv_x} > 0, rakenne kastuu \\ jos g_{konv_x} < 0, rakenne kuivuu \end{array} \quad (10)$$

g_{konv_x} = konvektion aiheuttama kosteusvirta paikassa x [kg/s]

v_{sis_x} = paikkaan x tulevan ilman vesihöyrypitoisuus [g/m³]

v_{ulos_x} = paikasta x lähtevän ilman vesihöyrypitoisuus [g/m³]

Q = läpi virtaavan ilman määrä [m³/s].

Tuloksia analysoidessa tulee myös muistaa, että todellinen raon suuruus rakenteessa on vain arvio. Pakotetun konvektion aiheuttaman ilmavirran määrittely olevassa rakenteessa on todellisuudessa hankalaa. Ilmavirran määrittelyssä tulisi tietää, millainen konvektion aiheuttama vuoto on suuruudeltaan, eli minkä kokoinen reikä ilmasulussa on suhteessa paine-eroihin. Tällaisen reiän voi suunnitella tarkoituksella ja saada laskennasta luotettava tulos. Todellisuudessa ilmavuodot ovat kuitenkin aina puutteita suunnittelussa ja toteutuksessa eikä vuotokohtien suuruutta voida tarkasti tietää.

Matemaattisen tarkastelun sijaan onkin järkevää kiinnittää rakenteiden ja liitosten ilmatiiveyteen. Ilmavuotojen hallitseminen osana laadukasta rakentamista on suhteellisen yksinkertaista. Teoreettisen konvektio laskennan sijaan onkin pyrittävä minimoimaan ilmavuotojen aiheuttama konvektio rakenteiden sisälle jo suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa. Rakennesuunnittelijan näkökulmasta tämä tarkoittaa hyvää detaljisuunnittelua ilmatiiveyttä ajatellen. Koko rakennushanketta ajatellen tärkeintä on kuitenkin nykyaikainen ilmanvaihto, jonka avulla sisätila saadaan tehtyä lievästi alipaineiseksi, jolloin paine-ero on ulkoa sisälle päin. Tällöin kostea sisäilma ei pyri ulospäin rakenteisiin. Jos rakenteessa kuitenkin esiintyy selkeää konvektiota, on diffuusion tarkastelu yleensä turhaa. Selkeä konvektio on rakennusfysikaalisena ilmiönä voimakas lämmön ja kosteuden siirtäjä ja diffuusiolaskenta ilmaa vuotavien vaippojen osalta on merkitykseltöntä. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta onkin hyvin tärkeää, että ilma- vuodot olisivat minimoitu. Ilmavuotojen ollessa hallinnassa voidaan keskittyä rakenteiden läpäisevän diffuusion tutkimiseen ja järkevien rakenneratkaisuiden suunnittelemiseen. Pakotetun konvektion Excel-laskurista löytyy kuvankaappaus tämän opinnäytetyön liitteistä (liite 2).

7.3 Konvektio materiaalin ilmanvastuksen suhteen

Rakenteen läpi voi virrata ilmaa johtuen rakenteen aineosien alhaisesta ilmatiiveydestä jolloin vesihöyry siirtyy ilmavirran mukana rakenteisiin. Ilmiötä ei pidä sotkea diffuusiioon jossa vesihöyry pyrkii tasoittumaan pitoisuuseroista johtuen vaipan toiselle puolelle. Konvektio ja diffuusio voivat tapahtua samassa rakenteessa yhtä aikaa ja niiden vaikutussuunta voi olla eri.

Jos rakenne muodostuu yhdestä homogeenisestä materiaalista, jonka läpi ilma virtaa konvektion avulla, saadaan kosteusvirran kaava ratkaistua kaavan 11 avulla. Useammasta homogeenisestä materiaalista muodostuvan rakenteen läpäisevä kosteusvirta voidaan ratkaista kaavan 12 avulla (Björkholtz 1987, 58).

Konvektion aiheuttaman kosteusvirran suuruus yhden homogeenisen materiaalin muodostaman rakenteen läpi (Björkholtz 1987, 58).

$$g_{konv_1_materiaali} = v * K_a * \frac{\Delta p_i}{\Delta x} \quad (11)$$

$g_{konv_1_materiaali}$ = konvektion aiheuttama kosteusvirta [kg/s]

v = sisä- ja ulkoilman kosteuspitoisuuksien ero (kg/m³)

k_a = aineen ilmanläpäisevyys [m²/s*Pa]

Δp_i = ilman paine-ero matkalla x [Pa]

Δx = ilman virtausmatka [m]

Konvektion aiheuttaman kosteusvirran suuruus usean homogeenisen materiaalin muodostaman rakenteen läpi (Björkholtz 1987, 58).

$$g_{konv_n_materiaali} = v * \frac{p_{is} - p_{iu}}{\Sigma R} \quad (12)$$

$g_{konv_n_materiaali}$ = konvektion aiheuttama kosteusvirta [kg/s]

p_{is} = sisäilman ilmanpaine [Pa]

p_{iu} = ulkoilman ilmanpaine [Pa]

$R = \frac{d}{k_a}$ rakenteessa olevan ainekerroksen ilmanvastus [s*Pa/m]

d = ainekerroksen paksuus [m]

k_a = aineen ilmanläpäisevyys [m²/s*Pa]

7.4 Konvektion kuivattava vaikutus tuuletusurissa

Konvektio ei ole pelkästään rakennetta kasteleva ilmiö. Rakenteiden tuuletus ja sitä seuraava kosteuden siirtyminen on hallittua konvektiota. Rakenteen tuuletusreitit sijaitsevat yleensä rakenteen ulkopinnan läheisyydessä. Esimerkkinä tällaisesta ovat sandwich-elementtien uritettu ulkopinta tai vesikaton yläpinnan tuuletusurat. Urat on yleensä suojattu kankaalla tai eristekerroksella jotta ne pysyisivät avoimina.

Riski rakenteiden kastumiselle diffuusion tai konvektion aiheuttaman kondenssin suhteen on talvella. Tällöin tuuletusuria huuhdellaan viileällä ulkoilmalla joka viilentää rakennetta ja eristeen ulkopintaa, mutta pitää sisällään hyvin vähän kosteutta. Klaus Viljasen diplomityön (Viljanen 2012, 123) mukaan uratuuletus vaikutti katon lämpöhävi-

öön laskennallisesti vain noin 1,5 %. Lämpöhäviö ei siis tuota suurta ongelmaa tuule-
tuksesta saatavaan hyötyyn nähden. Ongelmana on, että kylmä ilma ei pysty sitomaan
itseensä juurikaan lisää kosteutta. Paras tilanne on keväällä kun ilma on talven jäljiltä
kuivaa mutta lämpötila alkaa nousemaan. Ilman kosteuden sitomiskyky kasvaa merkit-
tävästi. Esimerkiksi -20°C ilma voi sisältää kosteutta maksimissaan 0,88g/m³ kun pak-
kasilman RH=100 %. -5°C ilma voi taas sisältää kosteutta 3,33g/m³ ja +10°C ilma 9,45
g/m³. Keväällä rakenteet kuivuvat parhaiten.

Uratuuletuksen konvektion aiheuttama kosteuden siirtyminen katossa voidaan laskea
kaavasta 10 sovelletun kaavan 13 mukaisesti (Viljanen 2012, 44).

$$g_{\text{kuiv_urat}} = (v_{k(T_{\text{ura}})} - v_u) * v_{\text{ura}(t)} * A_{\text{ura}} \quad (13)$$

$g_{\text{kuiv_urat}}$ = konvektion aiheuttama kosteuden siirtyminen metrin leveydellä [g/s*m]

$v_{k(T_{\text{ura}})}$ = tuuletusuran lämpötilan [°C] suhteen laskettu kriittinen vesihöyryyn määrä [g/m³]

v_u = ulkoilman absoluuttinen vesihöyryyn kosteuspitoisuus [g/m³]

$v_{\text{ura}(t)}$ = tuuletusuran ilman nopeus ajanhetkellä t [m/s]

A_{ura} = tuuletusurien yhteenlaskettu pinta-ala metrin leveydellä [m²/m]

Kaavassa tarvittava tuuletusuran ilman nopeus on Klaus Viljasen arvion mukaan noin
0,05 m/Viljanen mainitsee, että muissa lähteissä uran ilman nopeudeksi on arvioitu
0,01 – 0,3 m/Virtausnopeus ei ole vakio vaan se vaihtelee vuorokauden- ja vuodenajan
mukaan (Viljanen 2012, 44).

Koska virtausnopeus on keskeinen tekijä tuloksen uskottavuuden kannalta, tulee ky-
seinen lähtötieto varmentaa niin tarkasti etukäteen kuin mahdollista.

Kaavan 13 mukaan laskettaessa huomioidaan vain metrin leveän kaistaleen urituksen
kyky siirtää kosteutta. Jotta saataisiin laskettua rakenteen urien todellinen kyky siirtää
kosteutta rakenteen pintaneliötä kohden, tarvitsee tietää miten kaukana katon kokoo-
jakanavat tai nauhaelementin ylä- ja alareuna on. Tällä haetaan etäisyyttä urassa ole-
van ilman tuuletuspisteeseen, eli minne uritus itsessään pääsee tuulettumaan. Asia
voidaan laskea kaavan 14 mukaisesti.

Uratuuletuksen konvektion aiheuttama kosteuden siirtyminen neliön suhteen (Viljanen 2012, 44)

$$g_{kuiv_urat_m2} = \frac{g_{kuiv_urat}}{l_{tuul}} \quad (14)$$

$g_{kuiv_urat_m2}$ = konvektion aiheuttama kosteuden siirtyminen neliön suhteen [g/s*m²]

g_{kuiv_urat} = konvektion aiheuttama kosteuden siirtyminen metrin leveydellä [g/s*m]

l_{tuul} = tuuletuspisteiden välinen etäisyys [m]

Samaa kaavaa voidaan soveltaa myös ulkoseinien urissa. Esimerkiksi betoni sandwich-elementeissä käytettävä Isover OL-E 35 US eristeessä tuuletusurien jako on k150 ja urien koko 25x25 mm². Urat on suojattu urasuojakankaalla, jotta ne pysyisivät avoimina betonivalun aikana. Lisäksi levyjen molemmissa päissä on kokoojaurat, jolloin päällekkäisten elementtien eristeurien ei tarvitse osua kohdakkain jotta urat toimisivat (Isover OL-E 35 US tuotesivusto).

Erona sandwich-elementtien eristeurien ja kattoeristeiden urien kesken on se, että sandwich-elementtien tuuletus toimii passiivisesti. Koneellista imua ei ole. VTT:n tutkimuksen "Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristys" (Salonvaara, Nieminen, 2003) mukaan pienikin ilmavirta on riittävä poistamaan eristetilaan betonista diffuusiolla tulevan kosteuden. Virtaus on kuitenkin tärkeää, koska tuulettamattomassa betonisandwich-rakenteessa eristetilaan talvella kerääntyvä kosteus pystyy muutoin poistumaan vain diffuusiolla ulkokuoren läpi. Toteamus vahvistaa teoriaa, jonka mukaan konvektion teho kosteuden siirtäjänä on huomattavasti diffuusiota parempi (Salonvaara, Nieminen 2003, 23; Björkholtz 1987, 58).

Saman tutkimuksen mukaan tuuletusuran laskennallinen tuuletusilmavirtaus lisäsi lämpöhäviötä n. 3 % kun ilmavirtauksen nopeus oli alle 0,2m/s. Ilmavirtauksen ollessa 0,06 - 0,09m/s laskennallinen lämpöhäviö oli 1 % luokkaa. Sen sijaan 30 mm tuuletusväli rakenteessa paransi rakenteen U-arvoa, mikäli rakenteessa ei ole ilman läpivirtausta jonka virtausnopeus on suurempi kuin 0,5 m/s. Vasta tätä suuremmilla virtausmäärillä ilmavälin U-arvoa parantava vaikutus kumoutuu ilmavirtauksen aiheuttaman lämmönjohtavuuden pienenemisen kautta (Salonvaara ja Nieminen 2003, 57).

Tuuletuksen nopeutena urassa ei kannattane käyttää liian isoa arvoa. Esimerkiksi VTT:n tutkimuksessa käytetty 0,05 m/s vaikuttaisi tässäkin tapauksessa hyvältä likimääräiseltä arvolta. Toki tätäkin arvoa kohtaan tulee olla kriittinen ja asiaa on pohdittava ennen laskemista.

Lasketaan esimerkiksi miten 1,5m korkean ulkokuoren taakse joutunut 100g vesiannos saadaan poistumaan pelkästään OL-E 35 US eristeen tuuletusurien avulla. Urien jako on k150 ja urien koko 25x25 mm². Ilmavirran nopeudeksi arvioidaan 0,05m/Uran lämpötilaksi määritellään +2°C, joka vastaa suunnilleen huhtikuun keskilämpötilaa. Ulkoilman suhteellinen kosteus RH = 50 %, jolloin absoluuttinen kosteuspitoisuus on 2,79g/m³. 100g vesiannos on jakautunut tasaisesti 1m levyiselle seinän alueelle.

Vesihöyryn kylläisyyspitoisuuden eri lämpötiloissa voi laskea kaavan 15 mukaisesti (Björkholtz 1987, 43).

$$v_k = 4,85 + 3,47 * \left(\frac{t}{10}\right) + 0,945 * \left(\frac{t}{10}\right)^2 + 0,158 * \left(\frac{t}{10}\right)^3 + 0,0281 * \left(\frac{t}{10}\right)^4 \quad (15)$$

v_k = vesihöyryn kylläisyyspitoisuus [g/m³]

t = lämpötila [K, kelvin]

$$v_k = 5,58 \text{ g/m}^3 \approx v_{k(Tura)}$$

$$g_{kuiv_urat} = (5,58 \text{ g/m}^3 - 2,79 \text{ g/m}^3) * 0,05 \text{ m/s} * (0,025 * 0,025 * \left(\frac{1000}{150}\right))$$

$$\Rightarrow g_{kuiv_urat} = 5,8125 * 10^{-4} \text{ g/s} * m = 2,0925 \text{ g/h} * m = 351,54 \text{ g/vko} * m$$

$$g_{kuiv_urat_m2} = \frac{2,0925 \text{ g/h} * m}{1,5m} = 1,395 \text{ g/h} * m^2$$

$$\Rightarrow \frac{100 \text{ g}}{1,395 \text{ g/hm}^2} = 71,7 \text{ h}$$

Jos lähtötiedot ovat uskottavat, kuivuu pieni kosteusmäärä tasaisella 0,05m/s ilmavirralla hyvin nopeasti, muutamassa vuorokaudessa. Huhtikuussa olosuhteet ovat hyvät lämpötilan ja ulkopuolisen ilmankosteuden suhteen. Tästä huolimatta laskentaan on

syytä suhtautua kriittisesti. Voiko olla mahdollista, että 100g vesimäärän saa poistumaan 1m x 1,5m alueelta betonikuoren alta muutamassa vuorokaudessa? Viljasen Diplomityössä puhutaan uratuuletuksen siirtämän kosteuden määrästä, ei varsinaisesta kuivatustehosta.

Täytyy huomioida, että jos ilmankosteus ulkona on korkea, ei tuuletusuraan tuleva ilma ole juurikaan urassa olevaa kuivempaa, eikä kuivumista välttämättä pääse tapahtumaan. Jos kosteuspiitoisuus on suurempi, rakenne kastuu. Tämä tilanne voi tulla eteen kun tuuletusuraan virtaa tuuletuksen pintoja kylmempää ilmaa. Jos kosteuspiitoisuus on sama ulkona ja tuuletusurassa, ei kuivumista voi tapahtua (Viljanen 2012, 44).

Tuuletusuraan tuleva ilma kuitenkin lämpenee hieman rakenteen lämpövuodoista johtuen. Tällöin ilmankosteuden sitomiskyky paranee. Vastavuoroisesti tulee huomioida tuuletuksien pituuden merkitys kuivumisnopeuteen. Tuuletusuriin menevän ilman kosteuspiitoisuus kasvaa mitä pidemmälle se urassa liikkuu. Samalla ilmankosteuden sitomiskyky pienenee. Onkin hyvä tuulettaa myös tuuletuksurats esimerkiksi elementtien vaakasaumoissa (Viljanen, 2012, 44; Pentti, Hyppöläinen 1999, 102).

Betonisandwich-rakenteissa on suositeltava käytettäväksi vähintään tuuletusurittua eristettä. Tuuletusraolliset ratkaisut ovat kuitenkin uritusta toimivampia. Betonisandwich-rakenteen kosteusteknisen toimivuuden minimivaatimuksena tulee pitää vähintään uritetun lämmöneristeen käyttöä. Voimakkaalle viistosateelle altistuviin sekä tiiviin laattapinnan omaaviin betonijulkisivuihin on suositeltava tehdä yhtenäinen tuuletusrako (Pentti, Hyppöläinen 1999, 102).

Tässä esimerkissä otettiin huomioon vain uratuuletuksen vaikutus kuivumiseen. Tuuletuksen lisäksi diffuusio kuivattaa rakenteita keväisin. Kaava ei huomioi urassa olevan ilman kasvanutta kosteuspiitoisuutta eikä ilman nousutta lämpötilaa.

8 DIFFUUSIOKOSTEUDEN LASKENNAN PERIAATTEET

Ilmankosteudella on taipumus tiivistyä tiiviiseen pintaan. Rakennekerrosten rajapinnat ovatkin selkeitä paikkoja diffuusion tarkastelulle. Jotta voidaan selvittää, tiivistyykö diffuusion kuljettama vesihöyry rajapinnassa nesteeksi, tulee selvittää seuraavat tekijät:

- rakennekerrosten lämpötilat T [°C]
- sisä- ja ulkopuoliset vesihöyryn määrät [g/m³]
- vesihöyryn kylläisyyspitoisuudet eli kastepisteet eri lämpötiloissa
- rakennekerrosten vesihöyryn vastukset Z_v [s/m].

Eri vaipparakenteiden sisäisiä lämpötiloja voidaan selvittää laskemalla jokaisen rakennesosan lämmönvastus R koko rakenteen lämmönvastuksen RT suhteen. Tällöin vaipparakenne tulee ”viipaloitua” osiksi, jossa vaipparakenteen muodostavien kerrosten pintojen lämpötilat ovat selvillä. Lämpötilat saadaan selville kun tiedetään ulkolämpötila, sisälämpötila ja vaipparakenteessa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvot, eli lambda-arvot (Lämmöneristys, Suomen RakMK C4, Ohjeet 2003).

Rakenteiden lämmönvastusten laskenta on rakennesuunnittelijan perusosaamista. Paras ohjeistus laskentaan on Suomen rakentamismääräyskokoelma osa C4 lämmöneristys ohjeet vuodelta 2003. Ohjeesta löytyy lambda-arvoja tavallisille rakennusosille. Eristeiden osalta tieto on jo vanhentunutta. Ympäristöministeriön sivuilla oli vielä vuonna 2013 C4 ohjeiden luonnos vuodelle 2012, joka piti sisällään tarkentavaa laskentaa mm. kylmäsiltojen osalta. Suoraa linkkiä luonnokseen ei sivuilta enää ole, mutta luonnos löytyy google-haulla ”rakentamismääräyskokoelma c4 16.3.2012” ympäristöministeriön tiedostopalvelimelta [viitattu 26.3.2014] (Lämmöneristys, Suomen RakMK C4, Ohjeet 2012).

Materiaalien lambda-arvoja löytyy melko kattavasti materiaalivalmistajien www-sivuilta. Joidenkin erikoistuotteiden, kuten ontelolaattojen lambda-arvoja ei välttämättä ole saatavilla. Lujabetonin ontelo- ja kuorilaattojen suunnitteluohjeessa on annettu lämmönvastusten arvot eli R -arvot kaikille yrityksen ontelolaatoille. Lambda-arvot voidaan tarvittaessa laskea käänteisesti näistä arvoista (Lujabetoni Oy 2007, 18).

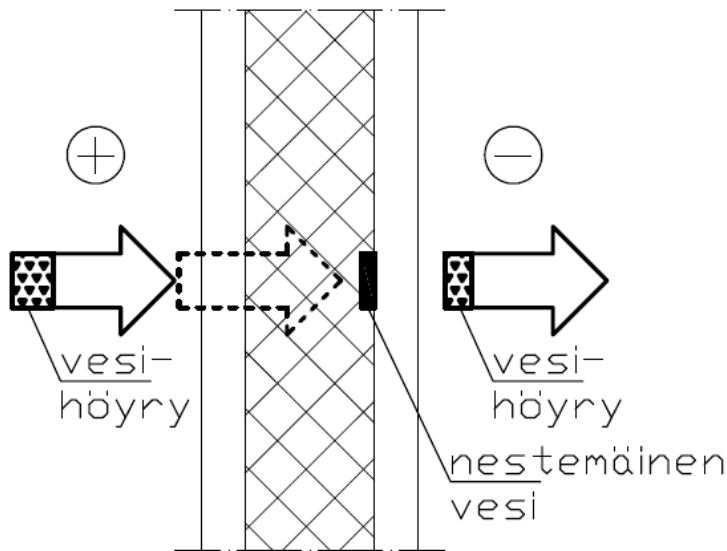
Diffuusiokosteuden laskennassa materiaalin vesihöyryn vastuksen arvon määrittely on yksi suurimmista epätarkkuutta aiheuttavista tekijöistä. Tämä korostuu varsinkin korjausrakentamisen yhteydessä, jossa käytetyt materiaalit ja niiden ominaisuudet ovat epäselviä. Vesihöyryn vastus riippuu myös mm. lämpötilasta ja aineosan kosteuspitouudesta. Eri lähteiden arvoissa voi olla suuriakin eroja. Laskelmia tulee pitää aina likimääräisiä ja niiden tarkoituksena on antaa suuntaa rakennusfysikaaliselle suunnittelulle ja rakennetyyppien virheiden etsinnälle. Lisäksi tulee muistaa, että yleensä laskelmissa esitetään yksinkertaisia rakenteita ilman epäjatkuvuuskohtia.

Kun tiedetään lämpötilat eri rakennekerrosten rajoilla, tulee selvittää vaipparakenteessa käytettyjen aineosien vesihöyryn vastukset Z . Vesihöyryn vastuksella tarkoitetaan aineosan paksuutta d aineen vesihöyryn läpäisevyyden δ suhteen. Vesihöyryn läpäisevyys on materiaalin ominaisuus ja vesihöyryn vastus rakenteessa käytetyn aineosan ominaisuus. Vesihöyryn vastus kertoo miten paljon aineosa hidastaa vesihöyryn etenemistä lävitseen. Mitä enemmän aineosa hidastaa vesihöyryn etenemistä, sitä vähemmän kosteutta siirtyy sen läpi vakioajassa.

Vesihöyryn läpäisevyyden arvo voi vaihdella ilman lämpötilan mukaan ja myös vallitsevan kosteustilan mukaan. Hyvän vesihöyrynvastuksen omaavan materiaalin on hyvä sijaita siellä, missä vesihöyryä on enemmän. Yleensä vesihöyryä on enemmän vaipan sisäpuolella johtuen rakennuksen käyttötarkoituksen tuomista kosteuslisistä.

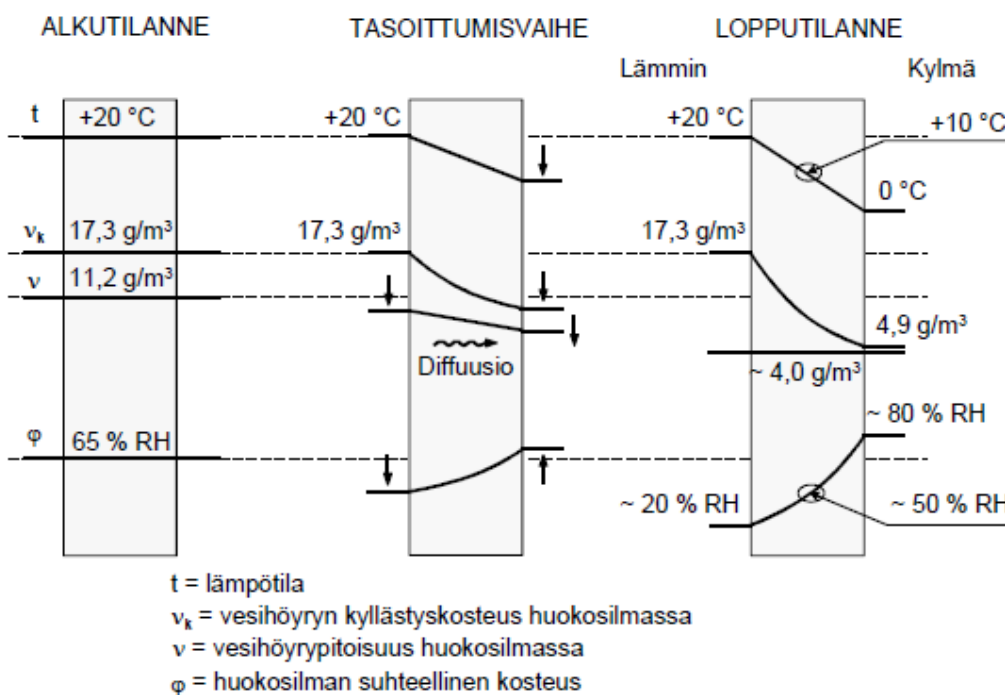
Tällainen aineosa alueella, jonka lämpötila on alhainen (lähellä seinän ulkopintaa) mutta jonne kosteutta pääsee siirtymään runsaasti, voi aiheuttaa vesihöyryn tiivistymistä. Vesihöyry ei ehdi poistumaan rakenteesta ennen tiivistymistä. Toisaalta jos sama materiaali on lämpimämmällä alueella (lähempänä sisäpintaa), hidastaa materiaali läpi menevää vesihöyryä siten, että kosteutta ei pääse siirtymään kylmempiin rakenteisiin.

Rakenteiden aineosia valittaessa tulee huomioida vesihöyrynvastuksen lisäksi myös lämmöneristävyys. Miten aineosan lämmöneristävyys vaikuttaa rajapinnan lämpötilaan, kastepisteeseen ja tätä kautta mahdolliseen vesihöyryn tiivistymiseen?



Kuva 7: Vesihöyryn diffuusion tiivistyminen. Osa vesihöyrystä tiivistyy ja osa haihtuu ulkokuoren läpi

Rakenteen läpäisevässä diffuusiosta kosteus etenee rakenneosien läpi eri nopeudella riippuen osien vesihöyryn vastuksesta. Vesihöyry etenee niin kauan, kunnes se läpäisee rakenteen kokonaan tai kunnes kastepiste saavutetaan joissain rajapinnoista. Tällöin osa vesihöyrystä tiivistyy vedeksi rajapintaan. Ilma sisältää edelleen sen verran vesihöyryä, kuin mitä rajapinnan lämpötila mahdollistaa. Esimerkiksi lämpötilan ollessa 5°C, voi ilma sisältää maksimissaan 6,84g/m³ vesihöyryä. Loppuosa tiivistyy nesteeksi.

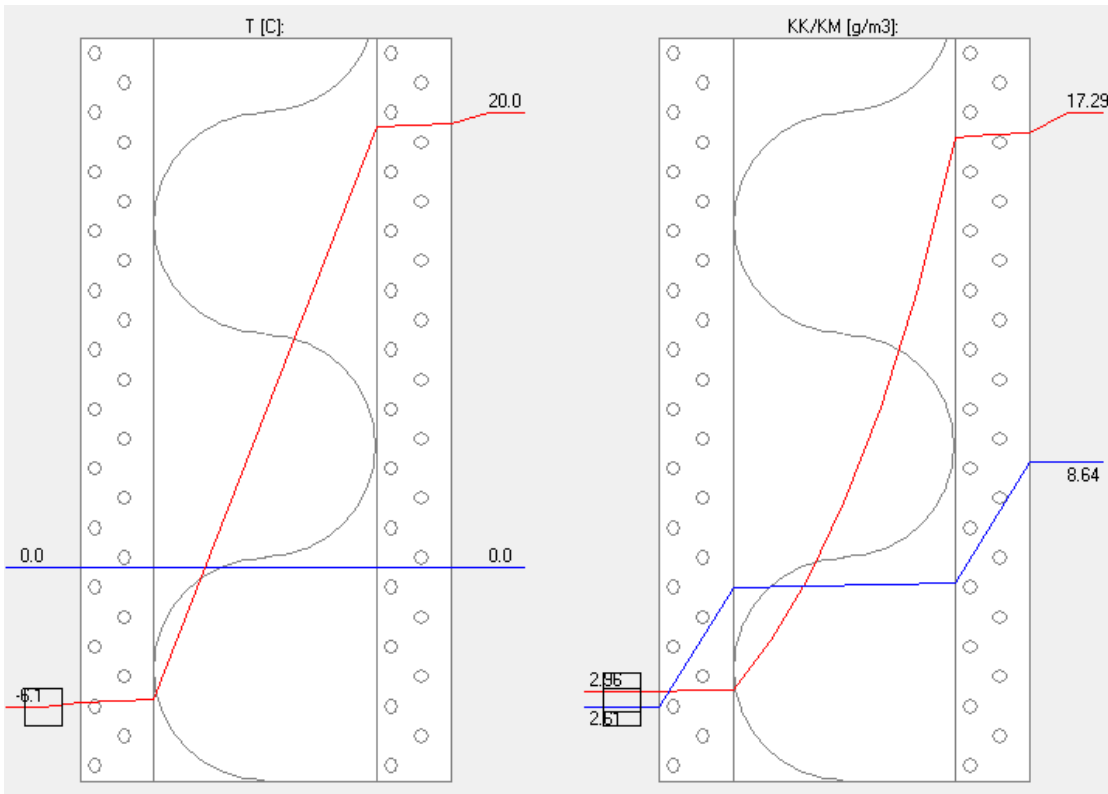


Kuvio 1: Periaatekuva lämpötila- ja kosteusolosuhteiden muutoksista, kun lämpötila vaipan toisella puolella laskee. Tiivistymistä ei tapahdu, koska myös sisäpuolinen kosteuspitoisuus laskee ja tasapainokosteus saavutetaan vaipan eri puolien välillä (Vinha ym. 2005, 28).

Kastepisteen saavuttaneesta rakennekerroksesta siirtyy kosteutta eteenpäin vain sen verran, kuin mitä sitä on vesihöyryn muodossa. Jos rakenneosan lämpötila nousee, mahtuu ilmaan jälleen enemmän kosteutta ja tiivistyminen vähenee tai lakkaa kokonaan. Tiivistymisen lakattua rakenne voi alkaa kuivumaan. Jos rakenneosan lämpötila laskee, kiihtyy tiivistyminen. Myös kosteuskuorman kasvaminen tai pienentyminen vaikuttaa kosteuden tiivistymiseen samalla periaatteella (Björkholtz 1987, 66,67).

Teoriassa kosteus tiivistyy heti, kun kastepiste saavutetaan. Tämä saattaa tapahtua eristeen ulkopinnan alueella, kun eristeessä oleva lämpötila laskee tarpeeksi. Tällöin voidaan puhua tiivistymisalueesta ja sen alku- ja loppupinnasta. Käytännössä tiivistyminen tapahtuu usein miten kahden eri materiaalin yhtymäkohdassa. Tällöin tiivistymisalueen alku ja loppupinnat yhdistyvät (Björkholtz 1987, 67).

Vaikka tiivistymispinnassa oleva kosteus varmasti vaikuttaa eristeeseen ja muihin alueella oleviin rakenteisiin syvemmälle, kuin pelkkään tiivistymispintaan, rakennesuunnittelijan on turhaa käyttää päivittäistä työtehoa tämän miettimiseen. Keskeisempää on, tapahtuuko tiivistymistä ja miten sitä voidaan vähentää.



Kuvio 2: Lämpö- ja kosteuskäyrät DOF-lämpö ohjelman laskelman mukaisesti.

Kuvassa vasemmalla esitetään lämpötilan lasku vaipan sisä- ja ulkopuolten välillä. Oikealla on esitetty samassa tilanteessa kylläisyyskosteuden (punainen) ja absoluuttisen kosteuden (sininen) muutos diffuusiosta rakenteen yli. Tiivistymisalue alkaa eristeen sisällä lämpötilakäyrien leikkauskohdassa ja päättyy ulkokuoressa toisessa leikkauskohdassa. Tällaisessa tilanteessa kosteutta tiivistyy niin kauan, kun olosuhteet ovat kuvatus kaltaiset.

9 VESIHÖYRYN LÄPÄISEVYYDEN ARVOT

Järkevin tapa oikean vesihöyryn läpäisevyyksien löytämiseksi on valita tuote, jonka teknisiin tietoihin läpäisevyys on määritelty. Toisena hyvänä vaihtoehtona on perehtyä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) tutkimusraporttiin 129: ”Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja kosteuden funktiona” (Vinha ym. , 2005). Tutkimus on usean sadan sivun mittainen ja siinä on esitelty muutamana kymmenenä Suomessa käytetyn materiaalin rakennusfysikaalista toimintaa. Kolmantena vaihtoehtona on hakea vesihöyryn läpäisevyyden arvoja ISO/FDIS 10456:2007 standardista. Standardi on englanninkielinen, mutta melko selkeästi esitetty. Kosteuslaskentaa tekevät ohjelmat kuten DOF-lämpö, pitävät sisällään omia materiaalikirjastojaan, joihin vesihöyryn läpäisevyyden arvoja on määritetty (ISO/FDIS 10456 2007).

Suunnittelutoimiston kannattaa koota eri lähteistä löytyvistä tiedoista omaa taulukkoaan, johon vesihöyryn vastuksia on määritelty. Lisäksi samaan taulukkoon on hyvä koota tuotteiden lambda-arvoja sekä ilmanvastuksia. Taulukkoon on syytä merkitä lähteet, josta arvot on saatu. Tällöin pystytään seuraamaan, mikä tieto on tuoretta ja mikä vanhaa.

Taulukko 8: Vesihöyryn läpäisevyyden arvoja (Pentti & Hyyppöläinen 1999). δ_v arvot laskettu lähteen arvoista kaavan 21 mukaisesti.

Aine	Tiheys [kg/m ³]	Vesihöyryn läpäisevyys δ_p (+20°C) [10 ⁻¹² * kg/m ² sPa]	Vesihöyryn läpäisevyys δ_v (+20°C) [10 ⁻⁶ * m ² /s]
Graniitti	2700	0,4	0,054
Betoni K35	2300	10...2	1,353...0,271
S-laasti	2000	10...2	1,353...0,271
KS-laasti	1800	17...6,5	2,300...0,879
K-laasti	1700	20...15	2,705...2,029
Kevytbetoni	400...650	42...15	5,681...2,029
KevytSORabetoni	500...700	42...20	5,681...2,705
Kalkkikiiekkatiili	1600...1900	20...10	2,705...1,353
Poltettu tiili	1100...1600	42...20	5,681...2,705
Ilma	1,25	185	25,023
Mineraalivilla	200...17	60...200	8,115...27,052
Solupolystyreeni (EPS)	60...15	1,2...7	0,162...0,947
Solupolyuretaani, pinnoittamaton	60...37	0,1...1,2	0,014...0,162
Puukuitueriseet			
levyt	40...20	25...40	3,381...5,410
puhallettavat/ruiskutettavat	65...25	80...130	10,821...17,583
Kuusi, mänty	500	1...3	0,135...0,406
Kuitusementtilevy	1600...1300	2...5	0,271...0,676
Bitumilla kyllästetty huokoinen kuitulevy	350...270	15...23	2,029...3,111
Lastulevy	800...600	3...7	0,406...0,947
Huokoinen puukuitulevy	<350	30...120	4,058...16,231
Puolikova puukuitulevy	800...350	3,6...4,5	0,487...0,609
Kova puukuitulevy	>800	2,7...3,4	0,365...0,460
Vanerilevyt	700...520	0,7	0,095
Kipsilevy	770	10...20	1,353...2,705

Taulukko 9: Vesihöyryn vastusten arvoja (Pentti & Hyypöläinen 1999)

Aine	Paksuus [mm]	Vesihöyryn vastus Z_p (+20°C) [$10^9 \cdot \text{m}^2 \text{sPa/kg}$]	Vesihöyryn vastus Z_v (+20°C) [$10^3 \cdot \text{s/m}$]
Muovikalvo, polyeteeni	0,09	n. 200	n. 1480
Muovikalvo, polyeteeni	0,15	n. 345	n. 2550
Muovikalvo, polyeteeni	0,2	n. 450	n. 3330
Muovikalvo, polyeteeni	0,3	n. 700	n. 5175
Kattohuopa		500...10000	3700...73900
Bitumikerros		500...1000	3700...7390
PVC-matto	2	n. 70...270	520...2000
Maaleja:			
Akryylilatem	0,1...0,2	2,5...4,0	18...30
PVA-latex	0,1...0,2	1,0...1,4	7...10
Alkydi	0,09...0,12	9,5...16,0	70...120
Kloorikautsu	0,04...0,05	4,7...8,0	35...60
Polyuretaani	0,03...0,04	11,5...16,0	85...120
PVC	0,03...0,04	6,0...9,0	45...70
Silikaatti	0,08...0,1	0,7...0,8	5...6
Kalkkimaali		n. 0,5	n. 4
Sementtimaali		n. 0,5	n. 4
Kolmikerrosrappaus	20	0,9...2,7	7...20
K-rappaus	10	0,6...1,4	4...10
Paperi	1	0,1	0,7
Bitumipahvi, tuulensuoja		25	185
Erittäin tiiviit rakennuspaperit		min. 1000	min. 7400
Tiiviit rakennuspaperit		min. 250	min. 1850
Vesihöyryä pitävät rakennuspaperit		min. 50	min. 370
Heikosti läpäisevät rakennuspaperit		1,5...10	11...75
Läpäisevät rakennuspaperit		max. 1,5	max. 11

Joissain lähteissä (esim. ISO/FDIS 10456:2007) on esitetty myös materiaalille vesihöyryn diffuusiovastuskerroin μ . Diffuusiovastuskerroin kuvaa kuinka paljon materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen samassa lämpötilassa. PAROC käyttää diffuusiovastuskertoimesta nimeä "vesihöyryn läpäisyvastus" (PAROC FAS-1 eristeen tuotesivu).

Termillä ei ole yksikköä [-]. Esimerkiksi erilaisilla muovikalvoilla kerroin on suuri, eli ne toimivat höyrynsulkuina. Polyeteenillä kerroin $\mu=100000$. Standardin mukaan erilaisilla metalleilla kerroin μ on ääretön (ISO/FDIS 10456 2007, 3).

Ilman diffuusiovastuskerroin on $\mu=1$ ja vesihöyryn läpäisevyys on $\delta_v = 26,76 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$. Esimerkiksi bitumilla diffuusiovastuskerroin on 50000, eli bitumi vastustaa vesihöyryn läpäisyä 50000 kertaa ilmaa paremmin. Bitumin vesihöyryn läpäisevyys on tällöin

50000 ilman vesihöyryn läpäisevyyttä pienempi (vastus vs. läpäisevyys) eli $\delta_v = 0,0005352 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (ISO/FDIS 10456 2007, 9)

Taulukko 10: Joitain ISO/FDIS 10456:2007 standardin mukaisia diffuusiovastuskertoimen arvoja (ISO/FDIS 10456 2007, 9).

Material group or application	Density ρ kg/m ³	Design thermal conductivity λ W/(m·K)	Specific heat capacity c_p J/(kg·K)	Water vapour resistance factor μ	
				dry	wet
Asphalt	2 100	0,70	1 000	50 000	50 000
Bitumen					
Pure	1 050	0,17	1 000	50 000	50 000
Felt / sheet	1 100	0,23	1 000	50 000	50 000
Concrete^a					
Medium density	1 800	1,15	1 000	100	60
	2 000	1,35	1 000	100	60
	2 200	1,65	1 000	120	70
High density	2 400	2,00	1 000	130	80
Reinforced (with 1 % of steel)	2 300	2,3	1 000	130	80
Reinforced (with 2 % of steel)	2 400	2,5	1 000	130	80
Floor coverings					
Rubber	1 200	0,17	1 400	10 000	10 000
Plastic	1 700	0,25	1 400	10 000	10 000
Underlay, cellular rubber or plastic	270	0,10	1 400	10 000	10 000
Underlay, felt	120	0,05	1 300	20	15
Underlay, wool	200	0,06	1 300	20	15
Underlay, cork	<200	0,05	1 500	20	10
Tiles, cork	>400	0,065	1 500	40	20
Carpet / textile flooring	200	0,06	1 300	5	5
Linoleum	1 200	0,17	1 400	1 000	800
Gases					
Air	1,23	0,025	1 008	1	1
Carbon dioxide	1,95	0,014	820	1	1
Argon	1,70	0,017	519	1	1
Sulphur hexafluoride	6,36	0,013	614	1	1
Krypton	3,56	0,009 0	245	1	1
Xenon	5,68	0,005 4	160	1	1
Glass					
Soda lime glass (including "float glass")	2 500	1,00	750	∞	∞
Quartz glass	2 200	1,40	750	∞	∞
Glass mosaic	2 000	1,20	750	∞	∞

Kertoimen kautta on helppoa vertailla eri materiaalien vesihöyryn vastuksia keskenään. Tämä onkin suotavaa, jotta saadaan käsitys millaisia eri materiaalien vesihöyryn vastukset ovat. Esimerkiksi mineraalivillan vesihöyryn vastuskerroin on $\mu=1$ eli sama kuin ilmalla. Mineraalivilla ei ole hygroskooppinen materiaali, eli se ei varastoi tai luovuta kosteutta. Villassa olevan kosteuden katsotaan diffusoituvan kuten liikkumattomassa ilmassa. Asia on todettu sekä ISO/FDIS 10456:2007 standardissa, että mineraalivilla valmistajien tuoteselosteissa. Tämä tarkoittaa sitä, että paksukin mineraalivil-laeriste päästää vesihöyryn helposti läpi.

10 VAIPPARAKENTEIDEN DIFFUUSIOLASKURI

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on ollut selvittää Insinööritoimisto SRT Oy:n työntekijöille vaipparakenteiden kosteuskäyttäytymistä teoreettisesti tarkastellen. Rakenteiden diffuusiokosteuden laskenta on yksi käyttökelpoisimmista laskentatavoista, joita rakennesuunnittelija voi käyttää työssään. Hyvin pitkälle riittää pelkästään se, että on jossain vaiheessa perehtynyt diffuusiolaskennan periaatteisiin ja osaa tarvittaessa selvittää opittua tietoa ja tarjolla olevia laskentatyökaluja. Rakenteiden diffuusiolaskenta käsin on täysin mahdollista. Lisäksi opinnäytetyön mukana on kehitetty käsin laskentaan pohjautuva ”vaipparakenteen diffuusiokosteus laskuri”. Laskuri on toteutettu Excelillä ja opinnäytetyössä siitä käytetään tästä eteenpäin nimeä ”Diffuusiolaskuri” tai ”Laskuri”. Laskurilla voi laskea pääasiassa ulkoseinä- ja yläpohjarakenteita.

Diffuusiolaskuri on ollut apuna perehdyttäessä diffuusiokosteuden käsin laskentaan rakenteissa. Se on myös toiminut hyvänä linkkinä käsin laskennan ja DOF-lämpö ohjelman tulosten kanssa. Diffuusiolaskurin tarkoituksena ei ole ollut laskennan tarkentaminen vaan sillä saa tuotettua helposti ja luotettavasti vastauksen kysymykseen: ”Kuinka paljon kosteutta tiivistyy tiettyyn rakenteen osaan tietynlaisissa olosuhteissa”. Diffuusiolaskuria voi myös käyttää pelkkään U-arvolaskentaan, koska laskuri laskee eri rakennekerrosten väliset lämpötilat aineosien R-arvojen kautta. Laskurilla saa myös helposti todettua eri rakennekerrosten lämpötilat ja tätä kautta hahmotettua millaiset olosuhteet rakenteessa voisi olla. Kuten käsin laskennassa, myös Diffuusiolaskuria käytettäessä tulee ymmärtää laskennan eteneminen ja periaatteet. Myös lähtötietojen oikeellisuus on hyvin keskeinen asia.

Diffuusiolaskurin on tarkoitus olla helppokäyttöinen työkalu kun käsin laskennan perusteet ovat hallinnassa. Sillä voi haarukoida mm. erilaisten eristevaihtoehtojen aiheuttamia muutoksia rakenteiden diffuusiokosteuskäyttäytymisessä. Laskurista löytyy kuvankaappaus tämän opinnäytetyön liitteistä (liite 3).

10.1 Diffuusiolaskurin toiminnan periaatteet

Diffuusiolaskuriin on merkitty keltaisella ne kentät joihin lähtötietoja voi syöttää. Muut kentät ovat lukittuja ja niihin muodostuu laskentatuloksia syötettyjen arvojen pohjalta. Poikkeuksena tästä ovat nimiökentän solut, joita voi täyttää vapaasti, mutta joita ei ole

merkattu keltaisella selkeyden vuoksi. Laskurissa on mukana myös ohjeita, jotka tulevat näkyviin siirtämällä hiiren kursori halutun solun päälle.

Diffuusiolaskuri sijaitsee Excel-työkirjan ensimmäisellä sivulla. Seuraavalla sivulla laskurin alapuolella on muutama muuntolaskuri, joilla pystyy muuntamaan laskennassa tarvittavia arvoja toisiksi. Muuntolaskurit tulostuvat omalle sivulleen, eivätkä niiden tulokset vaikuta suoraan muun laskennan tuloksiin.

Laskurissa vaipan rakenne muodostetaan pystysarakkeisiin. Sisäpuoli rakenteesta sijaitsee laskurin vasemmalla ja ulkopuoli oikealla reunalla. Laskurin tärkein osa rajoittuukin näiden sarakkeiden väliselle alueelle. Eri aineosat on merkitty tunnuksilla Mat1 ... Mat5. Aineosien väleissä on harmaita sarakkeita, jotka kuvaavat aineosien rajapintoja. Sarakkeisiin on laskettu rajapinnoissa vaikuttavia olosuhteita. Lisäksi laskurin oikeassa reunassa on soluja, jonne on laskettu erilaisia tuloksia kuten rakenteen kokonaispaksuus ja U-arvo.

Diffuusiolaskurin eri toimintojen esittelyn helpottamiseksi olen jakanut esittelyn kahteen osaan. Ensin käsitellään laskurin lämpötilojen, R- sekä U-arvojen laskentaa. Toisessa osassa laskentaa jatketaan diffuusiokosteuden laskentaan saakka.

10.2 Diffuusiolaskurin lämpötilalaskennan esittely

Diffuusiolaskurin ylimmille riveille on mahdollista määrittää viisi erilaista rakenteen aineosaa Mat1:stä Mat5:een. Näiden lisäksi huomioon on otettu myös vaipparakenteen sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset R_{si} ja R_{su} jotka vaikuttavat rakenteen lämpötilaan. Pääasiallinen eriste olisi hyvä sijoittaa aineosan Mat3 kohdalle, koska siinä tapahtuvat suurimmat lämpötilan ja tätä kautta myös olosuhteiden muutokset. Tällöin molemmille puolille eristettä jää mahdollisuus käyttää kahta erilaista aineosaa. Aineosat ovat kuitenkin sijoitettavissa vapaasti mihin tahansa viidestä vaihtoehdosta. Muistin virkistämiseksi aineosille on suositeltavaa kirjoittaa tuotetta kuvaava nimi. Lämpötilan laskennalla pelkällä lambda-arvolla saa helposti kuvan, millaisesta eristeestä voisi olla kyse. Kuitenkin materiaalin vesihöyryn läpäisevyyttä laskettaessa tuotevalmistajan tarjoamilla tiedoilla voi olla iso merkitys jolloin tietyn tuotteen valitseminen rakenteeseen voi olla perusteltua. Ennen laskentaa onkin syytä hakea eri tuotteiden ominaisuustietoja laskennan tueksi ja liitettäväksi laskennan tulosten liitteeksi. Muistin virkistämiseksi myös rakennetyypin nimi on hyvä kirjata laskuriin.

Siirryttäessä laskurissa alemmille riveille voidaan määritellä valituille aineosille paksuudet. Paksuudet merkitään metreinä, koska käsin laskennassakin käytetään metrejä laskettaessa R-arvoja. Oikean reunan kenttään laskuri laskee koko rakenteen paksuuden kuitenkin millimetreissä.

VAIPPARAKENTEEN DIFFUUSIOKOSTEUS LASKURI v.22.3.201

4

Copyright: Henri Humala 5.1.2014. Ei saa käyttää tai kopioida ilman tekijän suostumusta. Tekijä ei vastaa laskennan tai tulosten oikeellisuudesta.

Pyri valitsemaan R₃ rakenteen pääasiallisiksi lämmöneristeiksi

= Täytettävissä oleva kenttä. Voi myös jättää kentän tyhjäksi tai nolaksi

Materiaalin nimi ja tyyppi	Sisäp.	R _{si}	Mat1	Betoni SK	Paroc COS Sggt	Betoni UK	Ulkop.	LAMPOLASKENTA
Rakennetyyppi Perus SW								U-arvo= 0,145
Materiaalin paksuus [m]			0,000	0,080	0,240	0,080		400 mm
Materiaalin lambda [W/(mK)]			0,000	2,000	0,036	2,000		
Aineosan R-luku [m ² K/W]		0,13	0,000	0,040	6,667	0,040	0,04	6,917
Lämpötila aineosan eri pinnoilla [°C]	20,0	0,42	19,51	0,00	19,51	0,15	19,36	25,16
Lämpötilojen erot merkattu pienellä [°C]							-5,80	0,13
							-5,95	0,00
							-5,95	0,15
							-6,10	0,15
Kosteus RH% (Jos tuloksena yli 100% kosteus, tiivistymistä tapahtuu)	50,0	51,4	51,4	34,4	179,6	86,9	86,9	88,0
Materiaalin vesihöyryn läpäisevyys [10 ⁻⁹ m ² /s]			0,0000	0,2081	14,0410	0,2081	0,0000	
Z _v Aineosan vesihöyryn vastus [s/m]			0	384452	17093	384452	0	785997
g Kosteusvirta (aineosan läpäisevän kosteuden määrä) [g/m ² /vko]				4,58	4,58	4,58		4,58
v _k Kastepiste eli vesihöyryn kylläisyyspitoisuus [g/m ³]	17,28	16,80	16,80	16,65	3,13	3,09	3,09	3,05
v _r Rakennevälin vesihöyrypitoitus [g/m ³] (Pitoitusten väliset erot -ilvxi pienellä)	8,64	8,64	0,00	8,64	2,91	5,73	0,13	5,60
							2,91	2,69
							0,00	2,69
							2,69	2,69
g _{tiiv} Vesihöyryn mahdollinen tiivistyminen [g/m ² /vko]					7,61			
g _{ant_kuv} Vesihöyryn mahdollinen kuivuminen [g/m ² /vko]								
HUOM! Maksimi kuivumisnära on 100g/m ² /vko)								

Kuva 8: Diffuusiolaskurin lämpötilalaskenta (rajattu punaisella)

Seuraavalle riville määritetään aineosien lambda-arvot. Lambda arvoista laskuri laskee kaavan 16 mukaisesti jokaisen rakenneosan R-luvun. Sisä- ja ulkopuolisille pintavastuksille on määriteltävä pelkät R-luvut ja ne voi merkitä keltaisiin soluihin. On huomioitava, että sisä- ja ulkopuoliset pintavastukset ovat erilaisia riippuen lämpövirran suunnasta. Jos rakenneosasta on tiedossa pelkkä R-luku, voi kyseisen luvun haarukoida vapaasti muuttamalla lambda-arvoa sellaiseksi, jolla R-luku täsmää tiedossa olevan R-luvun kanssa. Haarukointia ei suositella tehtäväksi aineosan paksuudella, koska paksuuden muokkaaminen antaa mahdollisesti virheellisen tuloksen kosteuskalkennan puolella. Paksuus ja lambda-arvo eivät vaikuta laskurissa muihin osiin, kuin rakenteen kokonaispaksuuteen ja R-arvoihin. Loput laskelmat lasketaan käyttäen esim. R-arvoja suoraan.

Aineosan lämmönvastus R voidaan laskea kaavan 16 mukaisesti (Lämmöneristys 2002, 5)

$$R = \frac{d}{\lambda_U} \quad (16)$$

λ_U = ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo [W/(mk)]

d = ainekerroksen paksuus [m]

R = ainekerroksen lämmönvastus [m²K/W]

Koko rakenteen R -luku on laskettu kaavan 17 mukaisesti laskurin oikean reunan kenttään samalle riville. Tästä luvusta lasketaan vielä koko rakenteen U -arvo kaavan 18 mukaisesti. (Lämmöneristys 2002, 5)

Rakennusosan kokonaislämmönvastus R_T laskenta kaavan 17 mukaisesti (Lämmöneristys 2002, 5)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 \dots R_n + R_{se} \quad (17)$$

R_T = rakenteen kokonaislämmönvastus [m²K/W]

R_{si} = sisäpuolen pintavastus [m²K/W]

R_1 = rakenteen aineosa 1 [m²K/W]

R_2 = rakenteen aineosa 2 [m²K/W]

R_n = rakenteen viimeinen aineosa [m²K/W]

R_{se} = ulkopuolen pintavastus [m²K/W]

Rakennusosan lämmönläpäisykerroin U laskenta kaavan 18 mukaisesti (Lämmöneristys 2002, 5)

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (18)$$

U = rakenteen lämmönläpäisykerroin [W/m²K]

R_T = rakenteen kokonaislämmönvastus [m²K/W]

Tarkasteltaessa lämpötiloja rakenteen eri osissa tulee sisä- ja ulkolämpötilat määritellä seuraavan vaakarivin keltaisiin soluihin. Laskuri laskee rakenneosien väleissä olevat

lämpötilat R-arvojen kautta käyttäen kaavaa 19. Lisäksi pienellä on merkitty kuinka paljon lämpötila muuttuu rakenneosan sisällä. Lämpötilan voidaan olettaa muuttuvan tasaisesti rakenneosan sisällä. Koko rakenteen sisällä tapahtunut lämpötilojen muutos eli sisä- ja ulkolämpötilojen erotus, on merkitty rivin oikeaan reunaan.

Lämpötilan laskenta sisältä ulospäin aineosan x jälkeen

$$T_x = T_{si} - ((T_{si} - T_{ul}) * \left(\frac{\sum R_x}{R}\right)) \quad (19)$$

T_x = Lämpötila aineosan x jälkeen sisältä päin laskien. [°C]

T_{si} = Sisäpuolen lämpötila [°C]

T_{ul} = Ulkopuolen lämpötila [°C]

$\sum R_x$ = Kaikkien ainekerrosten R-arvot aineosan x jälkeen sisältä päin laskien [m²K/W]

R = Koko rakenteen R-arvo [m²K/W]

Laskurin lämpölaskennan osuus toimii omana kokonaisuutenaan huolimatta siitä, mitä laskurin alemmille, kosteuskäyttäytymistä laskeville riveille on kirjoitettu. Toisaalta kosteyslaskennan osuus käyttää nyt määriteltyjä tietoja laskennan pohjana. Lämpölaskelmien on siis syytä olla oikein jotta saadaan oikeat tulokset myös kosteyslaskennasta.

Jos U-arvojen laskentaan on tarve perehtyä tarkemmin, löytyy tämän opinnäytetyön mukana myös Excelillä toteutettuja U-arvo laskureita, joilla pystyy laskemaan tavanomaisen rakenteen U-arvon lisäksi myös heterogeenisiä rakenteita sekä kylmäsiltojen, kuten ansaiden vaikutuksia. Laskelmat on tehty rakennusfysiikan erikoisjakson oppitunneilla yhdessä tämän opinnäytetyön valvojan Harry Dunkelin kanssa. Lähteenä laskelmissa on ollut Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 6.3.2012 päivätty luonnos, jossa laskentamenetelmät on esitelty. Laskurin sivuista löytyy myös kuvankaappaukset liitteistä 4,5 ja 6 (Lämmöneristys, Suomen RakMK C4, Ohjeet 2012).

10.3 Diffuusiolaskurin kosteuskalkennan esittely

VAIPPARAKENTEEN DIFFUUSIOKOSTEUS LASKURI v.22.3.201

4

Copyright: Henri Humala 5.1.2014. Ei saa käyttää ta
Tekijä ei vastaa laskennan tai tulosten oikeellisuudesta.Pyri valitsemaan R₃ rakenteen pääasialliseksi lämmöneristeeksi

= Täytettävissä oleva kenttä. Voi myös jättää kentän tyhjäksi tai nolllaksi

Materiaalin nimi ja tyyppi	Sisäp.	R _{si}	Mat1	Mat2	Mat3	Mat4	Mat5	R _{su}	Ulkop.	LAMPOLASKENTA
Rakennetyyppi Perus SW										U-arvo= 0,145
Materiaalin paksuus [m]			0,000	0,080	0,240	0,080	0,000			400 mm
Materiaalin lambda λ [W/(mK)]			0,000	2,000	0,036	2,000	0,000			
Aineosan R-luku [m ² /K/W]		0,13	0,000	0,040	6,667	0,040	0,000	0,04		6,917
Lämpötila aineosan eri pinnoilla [°C]	0,0	9,51	9,51	9,36	5,80	9,95	9,95	9,95	9,10	RT= 26,1
Kosteus RH% (Jos tuloksena yli 100% kosteus, tiivistymistä tapahtuu)	50,0	51,4	51,4	34,4	179,0	86,9	86,9	86,9	88,0	KOSTEUSLASKENTA
Materiaalin vesihöyryn läpäisevyys [10 ⁻⁶ m ² /s]			0,0000	0,2081	14,0410	0,2081	0,0000			
Z _v Aineosan vesihöyryn vastus [s/m]			0	384452	17093	384452	0			g= 785997
g Kosteusvirta (aineosan läpäisevän kosteuden määrä) [g/m ² /vko]				4,58	4,58	4,58				g= 4,58
V _k Kastepiste eli vesihöyryn kyläisyyspitoisuus [g/m ³]	17,28	16,80	16,80	16,65	3,13	3,09	3,09	3,05	3,05	
V _r Rakennevälin vesihöyrypitoisuus [g/m ³] (Pitoisuuksien väliset erot -ilv:pienellä)	8,64	8,64	0,00	2,91	0,13	2,91	0,00	2,69	2,69	v= 5,96
g _{iv} Vesihöyryn mahdollinen tiivistyminen [g/m ² /vko]					7,61					
g _{akt} Vesihöyryn mahdollinen kuivuminen diffuusiolla [g/m ² /vko]										

Kuva 9: Diffuusiolaskurin kosteuskalkenta (rajattu punaisella)

Rakenteiden sisällä vaikuttavan diffuusiokosteuden määrää laskettaessa tulee määrittellä sisä- ja ulkopuolisen ilman kosteusprosentit eli RH %. Tämä on yleisesti käytetty kosteuden mittaamistapa. Jos tiedossasi ei kuitenkaan ole kosteusprosenttia vaan esimerkiksi vesihöyrypitoisuus, voit käyttää "RH % ja vesihöyrypitoisuuden muuntolaskuri":a, joka löytyy Diffuusiolaskurin alapuolelta.

RH% :N JA VESIHÖYRYPITOISUUDEN MUUNTOLASKURI v.5.1.2014		
	RH% -> v	v -> RH%
Lämpötila [°C]	-6,1	
Suhteellinen kosteus RH%	50,0	85,5
v Vesihöyrypitoisuus [g/m ³]	1,53	2,61

Kuva 10: RH %:n ja vesihöyrypitoisuuden muuntolaskuri

Laskuriin määritellään lämpötila ja vesihöyrypitoisuus, jolloin saadaan tulokseksi suhteellinen kosteusprosentti. Toisin päin laskettaessa määritellään lämpötila ja suhteellinen kosteus, jolloin saadaan tulokseksi vesihöyrypitoisuus. Laskuri käyttää laskennassa kaavoja 15 ja 20.

Suhteellisen kosteusprosentin laskenta kaavan 20 mukaisesti (Björkholtz 1987, 44)

$$RH = \frac{v}{v_k} * 100 \% \quad (20)$$

v_k = vesihöyrypitoisuuden kylläisyyspitoisuus [g/m³]

v = aineen vesihöyrypitoisuus [g/m³]

RH = suhteellinen kosteus [%]

Jos tiedossasi on sisä- ja ulkopuoliset vesihöyryn osapaineet, tulee osapaineet muuttaa ensin vesihöyrypitoisuuksiksi ja sitä kautta suhteellisiksi ilman kosteusprosentteiksi. Voit käyttää apuna "Vesihöyrypitoisuuden ja osapaineen muuntolaskuri":a, joka käyttää laskennassa kaavoja 1 ja 2.

VESIHÖYRYPITOISUUDEN JA OSAPAIINEEN MUUNTOLASKURI 2.3.2014			
	v -> p	p -> v	
Lämpötila [°C]	20		
v Vesihöyrypitoisuus [g/m ³]	2,0		2,0
p Vesihöyryn osapaine [Pa]	270,5		270,5

Kuva 11: Vesihöyrypitoisuuden ja osapaineen muuntolaskuri

Diffuusiolaskuri laskee jokaisen rakenneosan välissä olevan suhteellisen kosteusprosentin kaavan 20 mukaisesti. Suhteellinen kosteus ei koskaan voi olla enempää kuin 100 %. Laskuri kuitenkin ilmoittaa lukeman sellaisenaan, mutta merkitsee yli 100 % suhteellisen kosteuden punaisella. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseiseen rakenneosien väliin tiivistyy kosteutta näissä olosuhteissa. Tiivistymisen suuruus on arvioitavissa punaista prosenttilukua tarkastellen siten, kuinka paljon yli 100 % lukema on. Tiivistyvän kosteuden määrä lasketaan tarkemmin kuitenkin laskurin alemmilla riveillä. Jos punaista prosenttilukua ei näy tällä rivillä, ei tiivistymistä tapahdu. Lähellä 100 % olevat lukemat kuitenkin enteilevät tiivistymisen mahdollisuutta muissa olosuhteissa.

Sisä- ja ulkopuolisten suhteellisten kosteusprosenttien määrittelyn jälkeen tulee määriteltäväksi aineosien vesihöyryn läpäisevyydet δ_v . Vesihöyryn läpäisevyyden arvoja voi etsiä luvussa 9.1 esitetyistä lähteistä. Jos annettu vesihöyryn läpäisevyys on esitetty osapaineen δ_p kautta, voidaan arvo muuttaa vesihöyrypitoisuuden läpäisevyyden arvoksi δ_v käyttämällä "Vesihöyryn läpäisevyyksien muuntolaskuri":a. Muuntolaskuri käyttää laskennassa kaavoja 21 ja 22.

VESIHÖYRYN LÄPÄISEVYYKSIEN MUUNTOLASKURI v.9.3.2014				
	$\delta_v \rightarrow \delta_p$	$\delta_p \rightarrow \delta_v$		
Lämpötila [°C]	-5,5			
δ_v [$10^{-6} \cdot \text{m}^2/\text{s}$]	0,0005352	0,18998746	=	1,90E-01
δ_p [$10^{-12} \cdot \text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$]	0,0043340	1,53846200	=	1,54E+00

Kuva 12: Vesihöyryn läpäisevyyksien muuntolaskuri

Vesihöyryn läpäisevyyden muuntaminen osapaineesta vesihöyrypitoisuudeksi (Björkholtz 1987, 55).

$$\delta_v = 461,4 \left(\frac{J}{\text{kgK}} \right) * t * \delta_p \quad (21)$$

δ_v = vesihöyryn läpäisevyys [m^2/s]

T = lämpötila kelvineinä [K], absoluuttinen nollapiste on $-273,15^\circ\text{C}$

δ_p = vesihöyryn läpäisevyys [kg/msPa].

Vesihöyryn läpäisevyyden muuntaminen vesihöyrypitoisuudesta vesihöyryn osapaineeksi (Björkholtz 1987, 55)

$$\delta_p = \frac{\delta_v}{461,4 \left(\frac{J}{\text{kgK}} \right) * t} \quad (22)$$

δ_v = vesihöyryn läpäisevyys [m^2/s]

t = lämpötila kelvineinä [K], absoluuttinen nollapiste on $-273,15^\circ\text{C}$

δ_p = vesihöyryn läpäisevyys [kg/msPa].

Joskus tuotteiden teknisissä tiedoissa on mainittu vain vesihöyrynvastus Z. Termissä on sisällään aineosan paksuustieto. Pelkkä vesihöyryn vastus annetaan tyypillisesti ohuille kalvoille, joille paksuuden kautta määritelty vesihöyryn vastus voisi antaa suuruusluokassaan kohtuuttomia virheitä. Diffuusiolaskuri käyttää laskennassaan vesihöyrynvastuksen Z_v arvoja. Jos vesihöyrynvastus Z_v on tiedossa, voit haarukoida sen laskuriin muuntamalla vesihöyryn läpäisevyyksien arvoa δ_v sellaiseksi, että vesihöyrynvastus täsmää tiedossa olevan arvon kanssa. Myös vesihöyryn vastuksille löytyy ”Vesihöyryn vastusten muuntolaskuri”, jonka laskenta käyttää samaa lämpötila riippuvaista muuntosuhdetta, kuin vesihöyryn läpäisevyyksienkin muuntolaskuri.

VESIHÖYRYN VASTUSTEN MUUNTOLASKURI v.25.3.2014			
	$Z_v \rightarrow Z_p \cdot 10^6$	$Z_p \cdot 10^6 \rightarrow Z_v$	
Lämpötila [°C]	20,0		
Z_v [s/m]	1000000	7393314,8	= 7,39E+06
$Z_p \cdot 10^6$ [m ² sPa/kg]	135257	1000000,0	= 1,00E+11

Kuva 13: Vesihöyryn vastusten muuntolaskuri

Laskurin seuraava rivi laskee aineosien vesihöyryn vastukset Z_v kaavan 23 mukaisesti. Lisäksi laskuri laskee koko rakenteen vesihöyryn vastuksen rivin oikeaan reunaan.

Vesihöyrynvastus voidaan laskea käyttämällä vesihöyrypitoisuuksia kaavan 23 mukaisesti (Björkholtz 1987, 57).

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (23)$$

Z_v = vesihöyrynvastus [s/m]

d = aineosan paksuus [m]

δ_v = vesihöyryn läpäisevyys [m²/s].

Jos RH % laskennassa ei ole ilmennyt tiivistymistä rakenteessa, lasketaan aineosien ja koko rakenteen läpi menevän kosteuden määrä eli kosteusvirta g .

Kosteusvirta g rakenteen läpi käytettäessä vesihöyrypitoisuuksia lasketaan kaavan 24 mukaisesti (Björkholtz 1987, 56).

$$g = \frac{v_s - v_u}{\Sigma Z_v} \quad (24)$$

g = kosteusvirta rakenteen läpi [g/m²/vko]

v_s = sisäpuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m³]

v_u = ulkopuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m³]

ΣZ_v = koko rakenteen vesihöyryn vastus [m²/s].

Tällöin rakenteen kosteuden läpäisykyky on suurempi kuin kosteuden määrä, joka sen läpi pyrkii kulkemaan. Jokainen aineosa ja koko läpäisee tässä tilanteessa saman kosteusmäärän. Koko rakenteen läpäisevä kosteusmäärä näkyy rivin oikeassa reunassa vihreällä. Jos tämä lukema on yliviivattu ja RH % näkyy punaisena, tiivistyy kosteutta johonkin rakenneväliin, eikä kosteusvirran lukema pidä paikkaansa. Kosteusvirran yksiköksi on valittu g/m²/vko, jotta läpi virtaavan kosteuden määrä saataisiin helpommin hahmotettavalle tasolle.

Kastepiste, eli vesihöyryn kylläisyyspitoisuus lasketaan kaavan 15 mukaisesti rakenteiden välissä vaikuttavien lämpötilojen suhteen. Lukema osoittaa, montako grammaa kosteutta kyseisen lämpöinen ilma voi sisältää maksimissaan.

Rakenevälin vesihöyrypitoisuus v_x laskenta tehdään kaavojen 25 ja 26 mukaisesti jokaisessa rakenneväliässä. Vesihöyrypitoisuus v_x kuvaa kuinka paljon kosteutta siirtyy aineosien läpi tarkastelukohtaan x. Vesihöyrypitoisuuden ja vesihöyryn kylläisyyspitoisuuden suhde on esitetty suhteellisen kosteusprosentin laskennan yhteydessä. Vesihöyrypitoisuus v_x on kosteusprosenttiin verrattavissa oleva teoreettinen luku joka pitää paikkaansa kun tiivistymistä ei tapahdu.

Vesihöyrypitoisuuden muutos rakenteen kohdassa x voidaan laskea kaavan 25 mukaisesti (Björkholtz 1987, 56)

$$\Delta v_x = \frac{Z_{vx}}{\Sigma Z_v} * (v_s - v_u) \quad (25)$$

Δv_x = vesihöyrypitoisuuden muutos rakenteen kohdassa x [g/m³]

Z_{vx} = sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa [m²/s]

v_s = sisäpuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m³]

v_u = ulkopuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m³]

ΣZ_v = koko rakenteen vesihöyryn vastusten summa [s/m]

Vesihöyrypitoisuuden määrä rakenteen kohdassa x voidaan laskea kaavan 26 mukaisesti (Björkholtz 1987, 67)

$$v_x = v_s - (\Delta v_x) \quad (26)$$

v_x = tiivistyvän vesihöyryn määrä rakenteen kohdassa x [g/m^3]

v_s = sisäpuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

Δv_x = vesihöyrypitoisuus rakenteen kohdassa x [g/m^3]

Jos tiivistymistä tapahtuu, ilmaantuu tiivistyvän kosteuden määrä g_{tiiv} toiseksi alimmalle riville. Tiivistyvä kosteus ilmoitetaan yksikössä $\text{g}/\text{m}^2/\text{vko}$ ja lukema on väriltään turkoosi. Tiivistymismäärän laskennassa sovelletaan kaavaa 27. Soveltamista tehdään yksinkertaistamalla tiivistymisvyöhykkeen alku- ja loppu samaksi tiivistymispinnaksi.

Vesihöyryn diffuusion aiheuttama tiivistymismäärä rakenteen kohdassa x voidaan laskea kaavan 27 mukaisesti (Björkholtz 1987, 67).

$$g_{\text{diff_tiiv}} = \frac{v_s - v_{x_s}}{Z_{x_s}} - \frac{v_{x_u} - v_u}{Z_{x_u}} \quad (27)$$

g_{tiiv} = tiivistyvän vesihöyryn määrä rakenteen kohdassa x [g/m^3]

v_s = sisäpuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

v_{x_s} = tiivistymisvyöhykkeen sisäpinnan puoleinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

v_{x_u} = tiivistymisvyöhykkeen ulkopinnan puoleinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

v_u = ulkopuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

Z_{x_s} = tiivistymisvyöhykkeen sisäpintaan olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa [m^2/s]

Z_{x_u} = tiivistymisvyöhykkeen ulkopinnasta olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa [m^2/s].

Alimmalle riville voi ilmestyä rakennetta kuivattavan diffuusiovirran suuruus. Tämä esitetään oranssilla värillä. Kuivattavan diffuusiovirran tuloksia voidaan hyödyntää vain, jos rakenteessa tiedetään olevan nestemäistä kosteutta. Tällöin arvoa voidaan käyttää hyödyksi kuivumislaskennassa ja tällöinkin vain sen rakennevälän suhteen, jossa kosteutta tiedetään olevan. Viereisessä rakennevälissä oleva kuivaava diffuusiovirta kuivattaa vain kyseistä väliä. Koska kuivaminen on mahdollista niin sisä- kuin ulkopuolelle

vaippaa, on sen suuruus yleensä suurempi kuin tiivistyvän kosteuden määrä. Arvo tarkoittaa, kuinka monta vesi grammaa per neliö diffuusiovirta kuivattaa viikossa. Kuivatavan diffuusiovirran suuruus lasketaan kaavan 28 mukaisesti.

Vesihöyryn kuivumisen määrä rakenteen tiivistymisvyöhykkeen kohdassa x voidaan laskea kaavan 28 mukaisesti (Dunkel 2012, 17).

$$g_{diff_kuiv} = \frac{v_{xu} - v_u}{Z_{xu}} + \frac{v_{xs} - v_s}{Z_{xs}} \quad (28)$$

g_{kuiv} = tiivistymisvyöhykkeen kohdassa x diffuusiolla kuivuvan vesihöyryn määrä [g/m^3]

v_s = sisäpuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

v_{xs} = tiivistymisvyöhykkeen sisäpinnan puoleinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

v_{xu} = tiivistymisvyöhykkeen ulkopinnan puoleinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

v_u = ulkopuolinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]

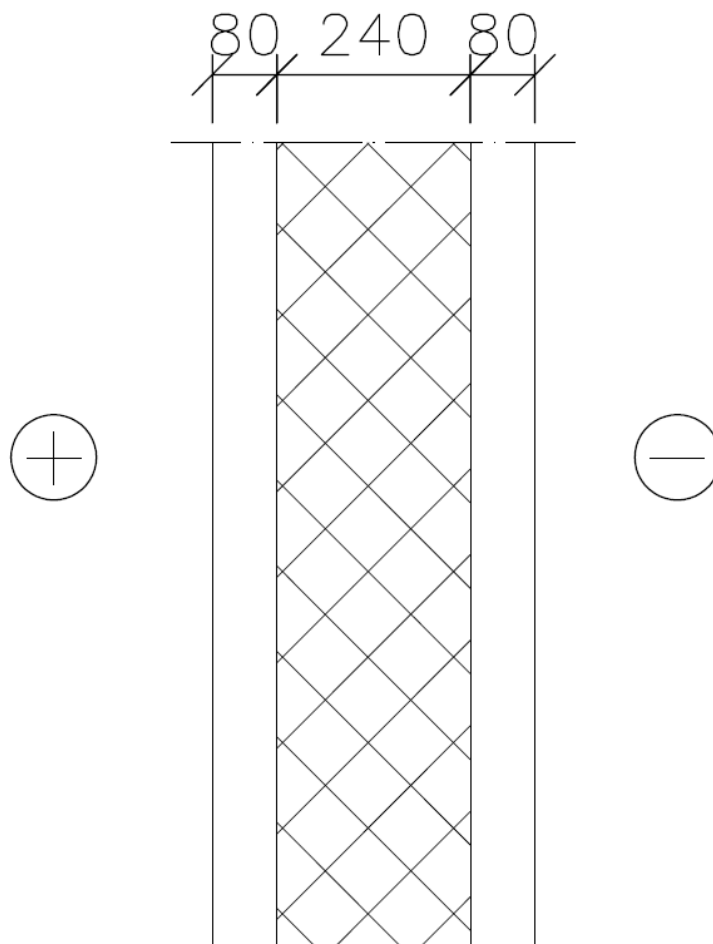
Z_{xs} = tiivistymisvyöhykkeen sisäpintaan olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa [m^2/s]

Z_{xu} = tiivistymisvyöhykkeen ulkopinnasta olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa [m^2/s]

On huomionarvoista, että rakenteen läpäisevä kosteusvirta g ja tiivistyvän tai kuivatavan kosteuden määrä g_{tiiv} eivät ole saman suuruisia.

11 DIFFUUSIOLASKENNAN ESIMERKKI: PERUS SANDWICH-RAKENNE

Laskentaesimerkki on toteutettu siten, että rakenne laskettiin ensin DOF-lämpö ohjelmalla ja sen jälkeen uudelleen käsin laskentaa hyödyntävällä ”Ulkoseinän diffuusiokosteus laskurilla”. Lopuksi diffuusiokosteuden laskentaa havainnollistettiin vielä käsin lasketulla esimerkillä. Laskentajärjestys on valittu siten että käsin laskennassa ja Diffuusiolaskuria käytettäessä voidaan käyttää laskenta-arvoja vapaasti. DOF-lämpö ohjelma määrittelee kosteus- ja lämpötilaolosuhteet vuodenajan mukaan. Tästä syystä laskennassa käytetään DOF-lämpö ohjelman mukaisia lähtöarvoja. Laskentaesimerkissä saamme kuitenkin samanlaisen lopputuloksen laskemalla vertailevat laskut miten päin tahansa.



Kuva 14: Perus sandwich- rakenne

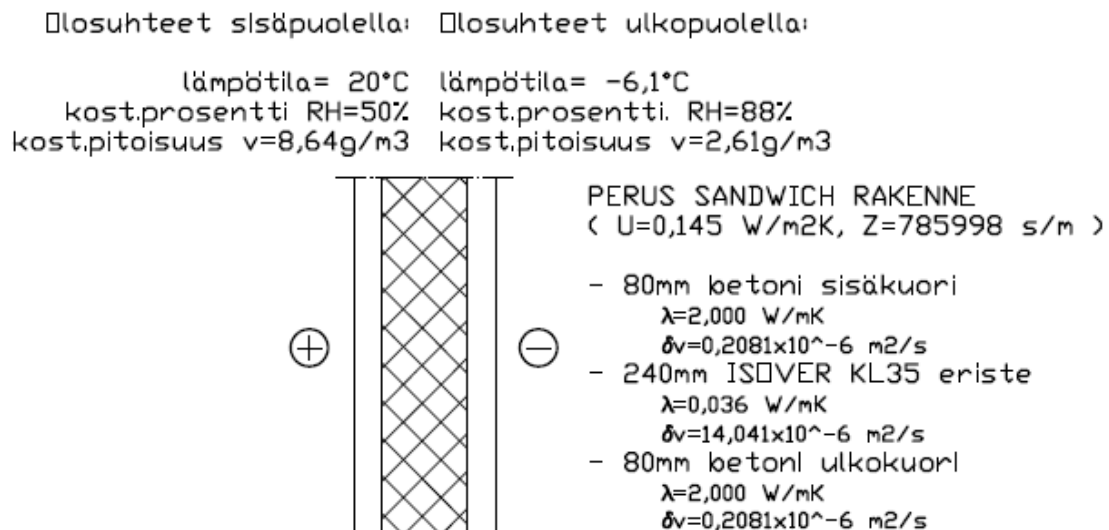
Mitoitusohjelmia käytettäessä suunnittelijan tulee varmistua siitä, että hänellä on riittävä tietotaito ohjelmien käyttöön ja mitoitusmenetelmien tuntemiseen. DOF-

lämpö ohjelma on hyvä työkalu etsittäessä eri vuodenaikoina rakenteissa esiintyvää kosteuden tiivistymistä. DOF-lämpö ohjelman laskenta-arvojen käyttökelpoisuus jää käyttäjän harkinnan varaan. Muun muassa eristeiden lambda-arvot ovat kasvaneet viime vuosien aikana selvästi ja vesihöyryn vastusten arvoissa saattaa olla paljonkin tarkennettavaa. DOF lämpö ohjelma ehdottaa sisäpuoliseksi kosteuden määräksi melko korkeita arvoja. Kaikissa säätilanteissa sisäpuolinen lämpötila on 20°C ja suhteellinen kosteusprosentti RH=50 %. Tästä saadaan sisäpuoliseksi kosteuspitoisuudeksi 8,64g/m³, joka on paljon. Verrattessa esim. Helsingin tammikuun ulkoilman kosteuspitoisuuteen 2,61 g/m³ arvoa, saadaan kosteuslisäksi 6,03 g/m³. Suunnittelija voi luoda oman materiaali- tai sää tietokirjastonsa ohjelmassa käytettäväksi.

Tämän laskentaesimerkin tarkoituksena on havainnollistaa miten DOF-lämpö ohjelman, Diffuusilaskurin ja käsin laskentamenetelmän tulokset ovat yhteneväisiä kun lasketaan mahdollisimman samanlaisilla lähtöarvoilla.

11.1 DOF-lämpö ohjelman ja Diffuusiolaskurin vertailuesimerkki

DOF-lämpö ohjelmaan määriteltiin ensin perus sandwich-rakenne, joka muodostuu 80 mm sisä- ja ulkokuorista sekä 240 mm lasivilla eristeestä. Erillistä höyrysulkua ei käytetty. Tiedoilla saatiin laskettua automaattisesti rakenteelle eri vuodenaikojen mukaisia lämpötila ja kosteustilanteita. Otin esimerkiksi DOF-lämpö ohjelman määrittelemät arvot tammikuulle (yht. 744.0h) :



Kuva 15: Perus sandwich-rakenteen laskennan lähtötiedot

- Sisä- ja ulkoilman lämpötilojen välinen ero tammikuussa = 26,1K
- Sisä- ja ulkoilman kosteuspitoisuuksien välinen ero tammikuussa
= (8,64 - 2,61) g/m³ = 6,03 g/m³
- Ei kantava sandwich-ulkoseinä :
 - o Sisäkuori 80 mm betoni
 - tiheys 2400kg/m³
 - $\lambda=2,0$ W/mK
 - $\bar{\delta}_p=1,538462 \cdot 10^{-12} \Leftrightarrow \bar{\delta}_v=0,20808826 \cdot 10^{-6}$
 - o 240 mm Isover KL 35 eriste
 - $\lambda=0,035$ W/mK
 - $\bar{\delta}_p=1,050000 \cdot 10^{-10} \Leftrightarrow \bar{\delta}_v=14,20201941 \cdot 10^{-6}$
 - o 80 mm betoni
 - tiheys 2400kg/m³
 - $\lambda=2,0$ W/mK
 - $\bar{\delta}_p=1,538462 \cdot 10^{-12} \Leftrightarrow \bar{\delta}_v=0,20808826 \cdot 10^{-6}$

Arvot ovat käytettävissä miltei sellaisenaan Diffuusiolaskurissa, mutta materiaalien vesihöyrynläpäisevyydet tulee muuttaa osapainearvoista $\bar{\delta}_p$ vesihöyrypitoisuuksiksi $\bar{\delta}_v$. Muunnoksessa voi käyttää apuna muuntolaskuria, joka löytyy samasta tiedostosta diffuusiolaskurin kanssa. Muunnoksen voi myös laskea käsin käyttämällä kaavaa 21. Muunnoksessa tulee huomioida, että syötettyjen arvojen eksponenttikertoimet ovat oikein. Muuten aineosan vesihöyrynvastuksen arvoon voi tulla moninkertainen virhe.

Jos vesihöyryn läpäisevyyden arvoihin haluaa suhtautua erityisen tarkasti, voi huomata, että eristeen eri puolilla on selkeästi erilaiset lämpötilaolosuhteet jotka vaikuttavat vesihöyryn vastuksen suuruuteen. Tällöin vesihöyryn läpäisevyyden arvot, jotka DOF-lämpö näyttää antavan samoiksi molemmille puolille rakennetta, eivät voi pitää tarkalleen paikkaansa. Toisena huomioitavana seikkana on eristeessä tapahtuva samanlainen lämpötilan ja vesihöyryn läpäisevyyden arvon laskeminen. DOF-lämpö laskee arvon lämpötilan suhteen jakamalla rakenteen kymmeneen osaan. Tämä on todettavissa ohjelman antaman tulosteen poikkileikkauksesta KK/KM [g/m³]. Arvo ei muutu lineaarisesti vaan siinä on havaittavissa pientä käyryyttä. Asiaan voidaan huomioida Diffuusiolaskurilla jakamalla pääasiallinen eriste esim. kolmeen osaan. Tällöin

voidaan laskea jokaiselle osalle oma vesihöyryn läpäisevyyden arvo suhteessa lämpötilaan. Tällaisten epätarkkuuksien huomioiminen käsilaskentamenetelmällä, jollaiseksi Diffuusiolaskurikin voidaan katsoa, on pilkun viilaamista eikä sillä ole suurta merkitystä laskennan kanssa.

Tuloksia vertaillen voidaan todeta, että laskennan arvot ovat miltei yhtenevät Diffuusiolaskuria ja DOF-lämpöä käyttäen. DOF-lämpö laskee tiivistymismäärän koko Tammikuulle, eli yhteensä 744 tunnille. Diffuusiolaskuri taas tarkkailee viikon aikana tiivistyvää kosteuden määrää. Kun saatuja tuloksia vertaillaan keskenään, saadaan tulokset:

Diffuusiolaskurin tulokset : **7,61g/m²/vko**

$$\Rightarrow 744\text{h/Tammikuu} / (7\text{vrk/vko} * 24\text{h/vrk}) = 4,429 \text{ vko}$$

$$\Rightarrow 7,62\text{g/m}^2/\text{vko} * 4,429\text{vko} = \mathbf{33,71\text{g/m}^2/\text{tammikuu}}$$

DOF-lämpö ohjelman tulokset : **36,44g/m²/tammikuu**

$$\Rightarrow 36,44\text{g/m}^2/\text{Tammikuu} / 744\text{h} = 0,04898\text{g/m}^2/\text{h}$$

$$\Rightarrow 0,04898\text{g/m}^2/\text{h} * 7\text{vrk/vko} * 24\text{h/vrk} = \mathbf{8,23 \text{ g/m}^2/\text{vko}}$$

Suuruusluokka on siis sama. Havaitaan että vettä tiivistyy samaan pintaan molemmissa rakenteissa ja tiivistymisen määrät ovat jokseenkin yhtenevät. Todetaan että eri rakennekerrosten lämpötilat ovat täsmälleen samat molemmilla laskuohjelmilla. DOF-lämpö käyttää laskennassaan prEN ISO 13788 mukaista kylläisyyskosteuden ja kondenssin laskennan kaavaa (DOF-LÄMPÖ ohjelmiston ohjekirja 2003, 27). Asiaan ei näytä vaikuttavan se, että DOF-lämpö ohjelmassa valitaan laskettavaksi ”RakMK:n mukaisia U-arvoja ja kosteuskäyttäytymistä”. Tämä aiheuttaa pientä eroavaisuutta tulosten välillä. DOF-lämpö ohjelman antama ulkoilman suhteellisen kosteusprosentti ja kosteuspitoisuus poikkeavat käsin laskennan tuloksista tästä syystä. Kylläisyyskosteuden laskennalle on useita erilaisia laskentakaavoja joiden tulokset ovat hyvin saman suuntaisia. Käsin laskennassa ja Diffuusiolaskurissa käytettyjä kaavoja 15 ja 27 on käytetty myös mm. Klaus Viljasen diplomityössä.

Perus sandwich- rakenteen Diffuusiolaskurin ja DOF-lämpö ohjelman laskentatulokset löytyvät liitteistä 7 ja 8.

11.2 Diffuusiokosteuden käsin laskenta

Diffuusiolaskuri-ohjelma käyttää käsin laskennassa käytettyjä laskukaavoja pohjanaan sellaisenaan. On oletettavaa että Diffuusiolaskurin tulos on hyvin pitkälle sama kuin käsin laskennan tulo

Muutetaan aluksi aineosien vesihöyryn läpäisevyyksien arvot osapaineista pitoisuuksiksi kaavan 21 mukaisesti. Samalla lasketaan aineosille vesihöyryn vastukset Z_v kaavan 23 mukaisesti :

80mm betonisisäkuori :

$$T = 293,15 \text{ K (+20°C)}$$

$$\lambda_U = 2,00 \text{ W/mK}$$

$$\delta_p = 1.538462 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa}$$

$$\Rightarrow \delta_v = 461,4 \cdot 293,15 \text{ K} \cdot 1.538462 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa} = \mathbf{2,081 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\Rightarrow Z_v = 0,08 \text{ m} / 2,081 \text{ m}^2/\text{s} = \mathbf{384446 \text{ s/m}}$$

240 mm mineraalivilla ISOVER KL 35 :

$$T = 293,15 \text{ K (+20°C)}$$

$$\lambda_U = 0,035 \text{ W/mK}$$

$$\delta_p = 105.0000 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa}$$

$$\Rightarrow \delta_v = 461,4 \cdot 293,15 \text{ K} \cdot 105,0000 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa} = \mathbf{1,420 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\Rightarrow Z_v = 0,24 \text{ m} / 1,420 \text{ m}^2/\text{s} = \mathbf{16899 \text{ s/m}}$$

80 mm betoniulkokuori :

$$T = 293,15 \text{ K (+20°C)}$$

$$\lambda_U = 2,00 \text{ W/mK}$$

$$\delta_p = 1.538462 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa}$$

$$\Rightarrow \delta_v = 461,4 \cdot 293,15 \text{ K} \cdot 1.538462 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa} = \mathbf{2,081 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\Rightarrow Z_v = 0,08 \text{ m} / 2,081 \text{ m}^2/\text{s} = \mathbf{384446 \text{ s/m}}$$

Tässä vaiheessa emme huomioi tosiasiaa, että ulkokuoren lämpötila on todennäköisemmin paljon lähempänä ulkolämpötilaa kuin sisälämpötilaa. Lämpötila vaikuttaa vesihöyryn läpäisevyyden arvoon. Tarkastetaan seuraavaksi tiivistyminen ulkokuoren sisäpintaan. Tämä on todennäköisin paikka vesihöyryn tiivistymiselle sillä se on tiivis ja

kylmä pinta. Lasketaan paljonko kosteutta menee sisäkuoren ja eristeen läpi:

Betonisen sisäkuoren vesihöyryn vastuksen vaikutus lasketaan kaavan 25 mukaan:

$$\Delta v_{bet} = \frac{384452 \text{ s/m}}{(384452 \frac{\text{s}}{\text{m}} + 16899 \frac{\text{s}}{\text{m}} + 384452 \frac{\text{s}}{\text{m}})} * 6,03 \text{ g/m}^3 = 2,950 \text{ g/m}^3$$

Eriste vesihöyryn vastuksen vaikutus lasketaan kaavan 25 mukaan:

$$\Delta v_{eriste} = \frac{16899 \text{ s/m}}{(384452 \frac{\text{s}}{\text{m}} + 16899 \frac{\text{s}}{\text{m}} + 384452 \frac{\text{s}}{\text{m}})} * 6,03 \text{ g/m}^3 = 0,130 \text{ g/m}^3$$

Betonisen sisäkuoren ja eristeen läpäisevän vesihöyryn määrä lasketaan kaavan 26 mukaan:

$$v_{bet+eriste} = 8,64 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - \left(2,95 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} + 0,13 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \mathbf{5,56 \text{ g/m}^3}$$

Lasketaan seuraavaksi, mikä on lämpötila ulkokuoren sisäpinnassa kaavojen 16 ja 17 avulla:

$$R_T = 0,13 + \frac{0,08 \text{ m}}{2,0 \text{ W/mK}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,035 \text{ W/mK}} + \frac{0,08 \text{ m}}{2,0 \text{ W/mK}} + 0,04 = 7,107 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{bet+eriste} = 0,13 + \frac{0,08 \text{ m}}{2,0 \text{ W/mK}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,035 \text{ W/mK}} = 7,027 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\Leftrightarrow R = \frac{7,027 \text{ m}^2\text{K/W}}{7,107 \text{ m}^2\text{K/W}} * 100 \% = 98,9 \%$$

$$\Leftrightarrow 20^\circ\text{C} - (0,989 * 26,1\text{K}) = \mathbf{-5,81^\circ\text{C}}$$

Lasketaan saadun lämpötilan vesihöyryn kylläisyyspitoisuus kaavan 15 avulla.

$$v_k = 4,85 + 3,47 * \left(\frac{-5,81^\circ\text{C}}{10} \right) + 0,945 * \left(\frac{-5,81^\circ\text{C}}{10} \right)^2 + 0,158 * \left(\frac{-5,81^\circ\text{C}}{10} \right)^3 + 0,0281 * \left(\frac{-5,81^\circ\text{C}}{10} \right)^4 = \mathbf{3,13 \text{ g/m}^3}$$

Betonisen sisäkuoren ja eristeen läpäisseen vesihöyryn määrän ja vesihöyryn maksimumimäärän suhteen laskenta kaavojen 20 ja 27 mukaan :

$$RH = \frac{5,56 \text{ g/m}^3}{3,13 \text{ g/m}^3} * 100 \% = \mathbf{178 \%}$$

$$g_{tiiv} = \frac{\left(8,64 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 3,13 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right)}{\left(384452 \frac{\text{s}}{\text{m}} + 16899 \frac{\text{s}}{\text{m}}\right)} - \frac{\left(3,13 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 2,69 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right)}{\left(384452 \frac{\text{s}}{\text{m}}\right)} * 604800 \text{ s} = \mathbf{7,611 \text{ g/m}^2/\text{vko}}$$

Tulokset ovat miltei täsmälleen samat käsin laskennan ja Diffuusiolaskurin kesken. Pientä eroavaisuutta on havaittavissa, joka selittyyne laskentatarkkuuden eroilla. Käsin laskennassa ei otettu huomioon mm. lämmön sisä- ja ulkopuolisia pintavastuksia.

11.3 Passiivirakenteinen perus sandwich-rakenne

Vertailun vuoksi lasketaan Excel-laskurilla läpi passiivirakenteeksi muutettu perus sandwich-rakenne. Passiivirakenteesta voidaan puhua, kun rakenteen laskennallinen lämpöhäviö on enintään 60 % rakennukselle määritetystä vertailulämpöhäviöstä. Ulko-seinän vertailulämpöhäviö on $U=0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Passiivirakenteen tulee täyttää U-arvo $0,17 * 0,6 = 0,102 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Tällöin perus sandwich-rakenteen eristettä tulee kasvattaa 340 mm saakka, jolloin U-arvoksi saadaan $0,10 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$.

Passiivirakenteisen perus sandwich-rakenteen Diffuusiolaskurin ja DOF-lämpö ohjelman laskentatulokset löytyvät liitteistä 9 ja 10.

Passiivi perus sandwich-rakenne:

Diffuusiolaskurin tulokset : **7,53g/m²/vko**

$$\Rightarrow 744\text{h}/\text{Tammikuu} / (7\text{vrk}/\text{vko} * 24\text{h}/\text{vrk}) = 4,429 \text{ vko}$$

$$\Rightarrow 7,62\text{g}/\text{m}^2/\text{vko} * 4,429\text{vko} = \mathbf{33,35\text{g}/\text{m}^2/\text{tammikuu}}$$

DOF-lämpö ohjelman tulokset : **36,04g/m²/tammikuu**

$$\Rightarrow 36,04\text{g}/\text{m}^2/\text{Tammikuu} / 744\text{h} = 0,04844\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$$

$$\Rightarrow 0,04844\text{g}/\text{m}^2/\text{h} * 7\text{vrk}/\text{vko} * 24\text{h}/\text{vrk} = \mathbf{8,14 \text{ g}/\text{m}^2/\text{vko}}$$

Verrattuna perus sandwich-rakenteeseen, passiivirakenteessa tiivistymisen määrä vähenee hieman. Paksumpi eristekerros hidastaa vesihöyryn diffuusiota ohuempaa enemmän.

Perus sandwich-rakenne :

Diffuusiolaskurin tulos = **33,71g/m²/tammikuu**

DOF-lämpö ohjelman tulos = **36,44g/m²/tammikuu**

Diffuusiovirta heikkenee, kun eristepaksuus kasvaa tavanomaisesta passiivirakenteiden paksuuteen. Tästä johtuen myös tiivistyvän kosteuden määrä pienenee hieman. Toisaalta keväällä rakenteen kuivuminen sisäänpäin hidastuu. Diffuusiokondenssin määrän väheneminen ei tarkoita sitä, että paksummat eristekerrokset eivät tuota kosteusongelmia. Jos kosteutta pääsee rakenteeseen muutoin kuin diffuusion kautta (ilmavuodot, sade) kuivaa passiivirakenne diffuusiolla tavallista rakennetta hitaammin.

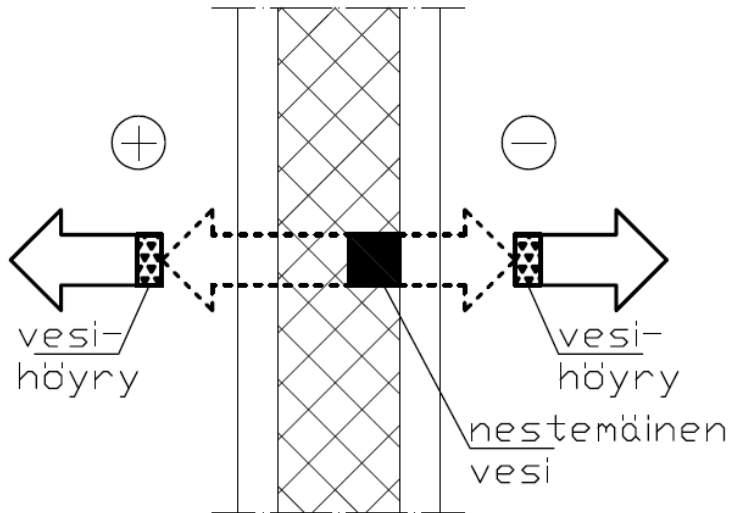
Joissain olosuhteissa kesäisin diffuusiovirran suunta on ulkoa sisälle. Tällöin ulkopuolella on enemmän kosteutta kuin jäähdetytyssä sisätilassa. Tiivistymistä voi tapahtua sisäkuoreen. Kun diffuusiovirta muuttuu jälleen sisältä ulos, tulee tiivistyneen veden päästä kuivumaan. Hankala tilanne voi muodostua, kun rakenteessa on eloperäistä materiaalia kuten puurunko. Jos eriste on huokoista, on mahdollista, että eristeen sisäinen luonnollinen konvektio kasvaa liian suureksi paksummassa rakennekerroksessa. Eristekerroksen paksuntaminen vaikuttaa luonnollisen konvektion määrään selvästi.

Tästäkin huolimatta on todettava että villaeristeillä, joilla on laskennallisesti hyvin pieni vesihöyryn vastus, ei eristepaksuuden muutos näyttäisi vaikuttavan diffuusion aiheuttamaan vesihöyryn liikkumiseen suuresti.

11.4 Rakenteen kuivuminen diffuusion avulla

Vesihöyry kondensoituu rakenteisiin, kun kylläisyyskosteus saavutetaan. Muina aikoina rakenne kuivuu diffuusion avulla. Se, kuinka paljon kuivumista tapahtuu riippuu rakenteen sisä- ja ulkopuolisista olosuhteista. On mahdollista, että seinä kuivuu yhtä aikaa sisään- ja ulospäin tai pelkästään toiseen suuntaan. Seinärakenteiden kuivumisen otollisin ajankohta on kevät ja kesä. Kuivumismäärä diffuusiolla saadaan ratkaistua kaavalla 28. Jotta saadaan selville paljonko kuivatettavaa kosteutta rakenteessa on,

lasketaan koko tiivistymiskauden kondenssit yhteen. Kun tiivistyminen lakkaa, alkaa kuivumiskausi. Tiivistyneestä määrästä vähennetään kuivumismäärä. Kun kaikki kosteus on kuivunut, katsotaan kauanko aikaa on kulunut kuivumisen alkamisesta.



Kuva 16: Rakenteen kuivuminen diffuusiolla sisälle ja ulos

Esimerkiksi lasketaan aiemmin lasketun ”perus sandwich” rakenteen kastuminen ja kuivuminen diffuusiolla. Otetaan tarkkailujaksoksi yksi tiivistymiskausi ja haetaan tiivistymistiedot DOF-lämpö ohjelmasta. Todetaan, että teoreettisesti tarkasteltuna tiivistyminen lakkaa huhtikuun lopussa ja kuivuminen alkaa toukokuussa. Todellisuudessa asiaan vaikuttavat rakenteen todelliset olosuhteet oikeassa ympäristössään.

Lasketaan toukokuun kuivumismäärä käsin kaavan 28 mukaisesti:

$$g_{diff_kuiv} = \frac{(8,89 - 5,82)g/m^3}{384452 s/m} + \frac{(8,89 - 8,64)g/m^3}{(384452 + 17094)s/m} * 604800s = 5,20g/m^2/vko$$

Muutkin kuukaudet voidaan laskea läpi samalla tavalla. Helpompi tapa on sijoittaa lähtötiedot kuukausittain Diffuusiolaskuriin. Koska kosteus tiivistyi rakenteen ulkokuoren ja lämmöneristeen väliin, laskemme kuivumisen vain tämän rakennevälin suhteen. Muunnetaan saatu arvo viikkotunneista kyseisen kuukauden tunneiksi.

Laskentaa jatketaan niin kauan, kunnes kuivumisen määrä on kondensoitunutta kosteutta suurempi. Tämä tapahtuu vasta elokuun alussa.

Taulukko 11: Diffuusiokosteuden tiivistyminen ja kuivuminen vuoden aikana

Kuukausi	Diffuusiolla tiivistyvän kosteuden määrä	Diffuusiolla kuivuvan kosteuden määrä
syyskuu (720h)		
lokakuu (744h)	0,64g/m ² /vko= 2,83g/m ² /kk	
marraskuu(720h)	4,02g/m ² /vko= 17,23g/m ² /kk	
joulukuu (744h)	6,04g/m ² /vko= 26,75g/m ² /kk	
tammikuu (744h)	7,61g/m ² /vko= 33,70g/m ² /kk	
helmikuu (672h)	7,80g/m ² /vko = 31,2g/m ² /kk	
maaliskuu (744h)	6,07g/m ² /vko = 26,88/m ² /kk	
huhtikuu (720h)	1,81g/m ² /vko = 7,76g/m ² /kk	
toukokuu (744h)		5,20 g/m ² /vko = 23,03 g/m ² /kk
kesäkuu (720h)		12,22 g/m ² /vko = 52,37 g/m ² /kk
heinäkuu (744h)		15,85 g/m ² /vko = 70,19 g/m ² /kk
elokuu (720h)		
yhteensä	146,35 g/m ² /kk	145,59 g/m ² /kk

Tulosta tarkastellessa tulee mieleen, että kuluu melko pitkä aika rakenteen kuivumiseen diffuusion avulla. Tuuletusratkaisu ulkokuoren ja villan rajalle olisi varmasti hyvä ratkaisu. Sisäpinnan vesihöyryn vastusta parantamalla rakenteeseen ei pääsisi diffusoitumaan niin paljon kosteutta. Toisaalta keväällä tapahtuva kuivuminen sisälle päin hidastuisi.

Edellä mainittu tilanne on esimerkiksi puurunkoisissa rakennuksissa, joissa on tehokas höyrynsulkukalvo sisäpinnassa. Kuivuminen diffuusiolla sisälle päin on hyvin hidasta ja rakenteen kuivattaa käytännössä ulospäin suuntautuva diffuusio sekä tuuletus. Jos tuuletus on heikko ja höyrynsulussa on reikiä, voi ongelmia olla tulossa.

12 YHTEENVETO

Diffuusion tai konvektion aiheuttama rakenteita kasteleva vaikutus ei ole niin suuri, kuin suoranainen veden aiheuttama kastuminen. Diffuusio ja konvektio ovat kuitenkin merkityksellisiä rakenteiden kastelijoita, joiden vaikutus tulee ottaa huomioon. Varsinkin rakennesuunnittelijan näkökulmasta diffuusion ja konvektion hallinta on olennainen osa suunnittelua. Konvektion vaikutus on yleensä suurempi kuin diffuusion jos ilmiöt tapahtuvat samassa rakenteessa. Diffuusio tulee kuitenkin huomioida, koska pitkällä aikavälillä sen merkitys on selkeä.

Työnaikaisen suojaamisen ja rakenteiden kastumisen estämisen lisäksi ilmavuotojen hallinta ja tiivis rakentaminen on varmasti helpoin, halvin ja tehokkain tapa vähentää rakenteissa ilmenevän kosteuden määrää. Sisäpinnaltaan tiivis, ulkoa tuuletettu rakenne vähentää vesihöyryn pääsemistä rakenteeseen ja poistaa sinne joutunutta kosteutta. Tuuletuksen kuivattava teho suhteessa lämpöhukkaan vaikuttaisi olevan niin suuri, että sitä kannattaa käyttää kaikissa ulkoseinä- ja yläpohjarakenteissa.

Yleisesti tulee pyrkiä välttämään tilanteita, jotka aiheuttavat kosteuden pääsyä rakenteisiin. Suoranaisen kastumisen estäminen on teoriassa selvää, mutta työmaalla asiaan ei välttämättä kiinnitetä huomiota. Konvektion ja diffuusion ymmärtäminen ilmiöinä on heikommalla tasolla. Periaatteet saatetaan hahmottaa, mutta asiaan tulisi pystyä kiinnittämään huomiota koko rakentamisprosessin ajan huomiota. Rakennesuunnittelijan tulee pystyä vaikuttamaan asiaan. Suunnittelijan rakennusfysikaalinen työ on yhdenmukaista jos rakenteet ovat märät jo rakentamisvaiheessa. Tämä on hyvä pitää kirkkaana mielessä!

Rakennusfysiikka lämpö- ja kosteuskäyttäytymisen osalta ei aina ole yksiselitteistä. Teoreettiset kaavat voivat olla apuna rakennusfysiikan ilmiöiden hahmottamisessa. Laskennan oikeellisuuteen tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti. Laskenta on aina yksinkertaistettua ja varmempia tuloksia saadaan käytännön kokeilla. Asiaan perehtymättömän suunnittelijan saattaa luulla yksittäisen laskennan lopputuloksen koskevan kaikkia samankaltaisia rakenteita. Pelkästään lämpötilan ja ilman suhteelliseen kosteuden välinen yhteys aiheuttaa hyvin erilaisia kondenssilanteita. Eristeen vesihöyryn ja lämmönvastusten muutokset voivat muuttaa kondenssilanteita huomattavasti. Eristeitä, detaljeita ja rakentamisratkaisuita on erilaisia. Teoreettinen tilanne ei välttämättä toteudu rakenteessa koskaan.

Teoreettinen rakenteiden kosteuden tutkiminen tarjoaa suuntaa-antavia tuloksia. Rakenteeseen tiivistyvä kosteus aiheutuu monista muuttujista ja laskennallisesti tarkasteltuna voidaan huomioida vain selkeät ilmiöt. Tulokset eivät kerro tarkasti todellista rakenteessa vallitsevaa tilannetta, vaan ovat toimivia indikaattoreita ongelmallisten rakenteiden havaitsemisessa. Teoreettinen tarkastelussa havaittu kosteuden tiivistymisongelma saa suunnittelijan hyvin todennäköisesti muokkaamaan rakennetta paremmin toimivaksi ja ongelmien mahdollisuus vähenee. Teoreettisella tutkimisella saadaan myös todettua jo havaitun kastuneen rakenteen toimimattomuus laskennallisesti.

Lukijan on osoitettava kritiikkiä niin tämän työn laskentatuloksia kuin muitakin kosteuslaskennan tuloksia kohtaan. Asia on ymmärrettävä, jotta pystytään hahmottamaan teoreettisen laskennan puutteet ja ottaa ne huomioon. On myös hyvä ymmärtää, mitä todellisuudessa ei tiedä. Vaikka teoreettiset laskentamenetelmät antavat suuntaa antavia tuloksia, ovat laskentamenetelmät kuitenkin käyttökelpoisia rakennusfysikaalisen suunnittelun apuvälineitä. Jotta voidaan oikeasti tutkia rakenteita, tulee monen ilmiön yhtäaikainen toiminta ymmärtää ja huomioida luotettavasti.

13 LOPPUSANAT

Opinnäytetyön ensisijaisena tavoitteena oli lämpö- ja kosteusteknisen tietämyksen kasvattaminen Insinööritoimisto SRT Oy:ssä. Tässä on onnistuttu, koska palaute Insinööritoimisto SRT Oy:ltä on ollut positiivista. Opinnäytetyön tuloksena saatiin Insinööritoimisto SRT Oy:lle selkeä opas ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä laskemisesta.

Toisena tavoitteena oli selvittää rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä muuttuneista rakenteista mahdollisesti aiheutuvia ongelmia laskennallisten menetelmien näkökulmasta. Tutkimus keskittyi rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen konvektion sekä diffuusion kautta. Tutkimuksessa käytettiin yksinkertaisia laskennallisia menetelmiä, jollaisia rakennesuunnittelijat voivat käyttää päivittäisessä työssään suuntaa-antavina työkaluina. Laskentamenetelmien todettiin olevan käyttökelpoisia jos mitoitettavat ilmiöt ymmärretään ja lähtötietoja sekä tuloksia tarkastellaan kriittisesti.

Tämän kaltaisen opinnäytetyön työmäärä paisuu helposti valtavaksi. Opinnäytetyön aiheen jatkaminen Insinööritoimisto SRT Oy:ssä olisi ollut mielenkiintoista. Työ tuntuu jäävän raakileeksi ja laskelmia olisi ollut syytä päästä käyttämään osana rakennesuunnittelijan työtä. Tällöin opinnäytetyön sisältö olisi saanut myös osuvampaa kritiikkiä ja toisten rakennesuunnittelijoiden näkökulmia. Myös Excel-laskureiden kehittäminen eteenpäin olisi ollut antoisaa.

Tämän opinnäytetyön jatkeeksi löytyy monia mielenkiintoisia aiheita, joita Insinööritoimisto SRT Oy toivoi tuotavan esille työn edetessä:

1. Rakennetyypit ovat uudistuneet myös muiden vaipparakenteiden osalta. Jatko-tutkimuksen aiheena voisi olla mm. kellarin seinien kosteus- ja lämpötutkimus teoreettisesti ja käytännössä.
2. Pelti-villa-pelti elementtien diffuusio- ja konvektio käyttäytyminen varsinkin elementtien liitosten osalta olisi mielenkiintoinen aihe. Pelti-villa-pelti elementit saattavat vuotaa merkittävästi sisäilmaa ja vesihöyryä elementtien liitoksista. Onko hypoteesi oikea ja aiheuttaako tämä ongelmia tulevina vuosina?

3. Kylmäsiltojen tutkiminen kosteuslaskennan näkökulmasta, jossa esimerkiksi tutkittaisiin kylmäsiltoja aineiden termisen diffusiviteetin kautta.
4. Pelti-villa-pelti elementtejä käytetään myös muissa ratkaisuissa, kuin perinteisissä ulkoseinissä. Tutkimalla erikoistapauksia, kuten kylmiöiden rakentaminen ja lisäeristämistä pelti-villa-pelti elementeillä, voitaisiin saada mielenkiintoisia ja haastavia jatkotutkimusaiheita.
5. Vesihöyrynvastusten ja ilmanläpäisevyyksien arvojen kokoaminen materiaali-kirjastoksi eri lähteistä.
6. Vaipparakenteiden teoreettisen tarkastelun jatkaminen elementtien lämpö- ja kosteusmittauksiin voisi toimia jatkotutkimuksen aiheena. Tämän kaltaisia tutkimuksia on tehty tavanomaisten rakenteiden osalta useita ja aiheen kartoittaminen olisi hyvä tehdä.
7. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toimivuus tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Ilmasto lämpenee ja jäädytyksen tarve kasvaa. Rakenteiden toimivuus niin lämpimämmässä kuin jäädytetyissä olosuhteissa olisi tarvittava tieto jo nyt, kun tulevaisuudessa käytössä olevia rakenteita suunnitellaan. Työ voi olla hyvin laaja ja sen soveltuvuus sellaisenaan opinnäytetyöksi voi olla huono. Aihetta kannattaisi jakaa pienempiin osiin.

LÄHTEET

ASUMISTERVEYSOPAS 2009. Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysohjeen soveltamisopas. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö

BJÖRKHOLTZ, Dick. 1987. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka.
Rakennustieto Oy

DOF-LÄMPÖ versio 2.2, ohjelmiston ohjekirja, D.O.F. tech Oy 2003
[verkkoaineisto]. [viitattu 24.3.2014]. Saatavissa: <http://www.dof.fi/www/files/DOF-lampo.pdf>

DUNKEL, Harry. 2012. ERY1220 Rakennusfysiikka/ oppimateriaali,
osa 2 Kosteus versio 1.0/4.10.2012 [opintomoniste]. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu

ISO/FDIS 10456. 2007. Building materials and products – Hygrothermal properties – tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. [standardi]. Geneve: ISO

ISOVER OL-E 35 US betonisandwich-eristeen tuotesivusto.
[verkkoaineisto]. [viitattu 3.3.2014]. Saatavilla :
<http://www.isover.fi/tuotteet/rakennuseristeet/betonielementieristeet/2527/isover-ol-e-35>

LEIVO, Virpi ja RANTALA, Jukka. 2002. Maanvastaiset alapohjarakenteet – kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen, julkaisu 120 talonrakennustekniikka. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu

LUJABETONI OY. 2007. Lujabetoni – suunnitteluohje, Luja ontelolaatta, Luja kuorilaatta. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.3.2014]. Saatavilla :
http://www.lujabetoni.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/luja/embeds/lujabetoniiwwstructure/17554_luja-ontelo-ja_kuorilaatat_suunnitteluohje.pdf

LÄMMÖNERISTYS. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. 2003. Ohjeet 2003. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.

LÄMMÖNERISTYS. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. 2012. Ohjeet 2012
Luonnos 16.3.2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto.

PAROC FAS-1 eristeen tuotesivu [verkkoaineisto]. [viitattu 12.3.2014]

Saatavilla: [http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/tuotteet/pages/rappausaluseris-
teet/paroc-fas-1](http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/tuotteet/pages/rappausaluseris-
teet/paroc-fas-1)

PENTTI, Matti ja HYYPPÖLÄINEN Tarja. 1999. Ulkoseinärakenteiden kosteustekni-
nen suunnittelu. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

RAKENNUSTEN VEDEN- JA KOSTEUDENERISTYSOHJEET 2012: RIL 107-2012,
Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

SALONVAARA, Mikael ja NIEMINEN, Jyrki. 2003.

Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristys. Espoo: VTT

SEPPÄNEN, Kim. 2010. Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli,
Koulutus ja kehittämisspalvelu Aducate. Kuopio: Itä-Suomen yliopisto

SIIKANEN, Unto. 1996. Rakennusfysiikka perusteet ja sovellukset.

Helsinki: Rakennustieto

TURUNEN, Timo. 2012. ERY1220 Rakennusfysiikan erikoisjakso Syksy 2012, 2.kou-
lutuspäivä 17.11.2012. [opintomoniste]. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu

VILJANEN, Klaus. 2012. Katon polyvinyylidikloridikatteen kosteusteknisen toiminnan tar-
kastelu kenttäkokeella ja laskennallisesti. Espoo: Aalto Yliopisto, insinööritieteiden kor-
keakoulu, diplomityö

VINHA, Juha, VALOVIRTA, Ilkka, KORPI, Minna, MIKKILÄ, Antti ja KÄKELÄ, Pasi.
2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteel-
lisen kosteuden funktiona. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekni-
kan laitos

VINHA, Juha. 2012. Rakennusten ilmanpitävyys ja ilmatiiviiden rakenteiden toteutus. [opintomoniste]. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos

VINHA, Juha, LAUKKARINEN, Anssi, MÄKITALO, Mikael, NURMI, Sakari, HUTTUNEN, Petteri, PAKKANEN, Tomi, KERO, Paavo, MANELIUS, Elina, LAHDENSIVU, Jukka, KÖLIÖ, Arto, LÄHDESMÄKI, Kimmo, PIIRONEN, Jarkko, KUNHO, Vesa, PIRINEN, Matti, AALTONEN, Anu, SUONKETO, Jommi, JOKISALO, Juha, TERIÖ, Olli, KOSKENVESA, Anssi ja PALOLAHTI, Tuomas. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto

LIITTEET

Liite 1: Luonnollisen konvektion Rayleigh laskuri

LUONNOLLINEN KONVEKTIO - MUUNNETUN RAYLEIGHIN LUVUN LASKENTA
YHDEN ERISTETYYPIN KONVEKTIOLASKURI 28.2.2014

$$Ra_m = k \frac{d \kappa \eta \Delta T}{\lambda_U}$$

Materiaali		Laskuri	Esimerkki
κ = Lämmöneristeen ilmanläpäisevyys	=	0,00012	0,00008 m ³ / msPa
d = Lämmöneristeen paksuus	=	0,36	0,7 m
η = Ilman dynaaminen viskositeetti 10°C lämpötilassa	=	0,0000175	1,75E-05 Pa s
ΔT = Lämmöneristeen sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero	=	50	50 K
λ_U = Lämmöneristeen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo	=	0,036	0,05 W/(m K)
k = kerroin, jonka arvo on 3×10^6	=	3000000	3000000 kg/(m ² s ³ K ²)
Ra_m = Muunnettu Rayleighin luku	=	3,15	2,94
Muunnetun Rayleighin luvun raja-arvot			
(Muunnetun Rayleighin luvun tulisi alittaa raja-arvot.			
Arvon ylittyessä konvekktiota esiintyy haitallisissa määrin)			
Lämpövirran suunta rakenteessa :			
Vaakasuuntaan		2,5	2,5
Lämmöneristeen yläpinta avoin		15	15
Lämmöneristeen yläpinnassa tuulensuoja		30	30

Liite 2: Pakotetun konvektion laskuri

Pakotetun konvektion laskuri 9.3.2014

Konvektio raon läpi (paksu rakenne, virtaus laminaarinen)

Ilman lämpötila raossa	20	C	
Sisäpuolen kosteuspitoisuus v_{si}	5	g/m^3	
Ulkopuolen kosteuspitoisuus v_{ul}	2	g/m^3	
Sauman leveys b	0,0002	m	(esim. 0,5mm=0,0005m)
Sauman pituus d	1	m	
Ilman viskositeetti	1,808E-05		
Ilmanpaineiden ero ΔP	5	Pa	
Raon syvyys l	0,08	m	
Q_{paksu_rako}	2,30E-06		
\dot{G}_{konv}	6,91E-09	kg/s	
\dot{E}_{konv}	4,181	g/vko	

Konvektio reiän läpi (paksu rakenne, virtaus laminaarinen)

Ilman lämpötila raossa	20	C	
Sisäpuolen kosteuspitoisuus v_{si}	5	g/m^3	
Ulkopuolen kosteuspitoisuus v_{ul}	2	g/m^3	
Reiän halkaisija d	0,01	m	
Ilman viskositeetti	1,808E-05		
Ilmanpaineiden ero ΔP	10	Pa	
Reiän syvyys l	0,08	m	
$Q_{paksu_reikä}$	9,77E-07		
\dot{G}_{konv}	2,93E-09	kg/s	
\dot{E}_{konv}	1,8	g/vko	

Konvektio reiän läpi (ohut rakenne)

Sisäpuolen kosteuspitoisuus v_{si}	5	g/m^3	
Ulkopuolen kosteuspitoisuus v_{ul}	2	g/m^3	
Reiän pinta-ala A	4	mm^2	(esim. 2mm*2mm = 4mm ²)
Ilmanpaineiden ero ΔP	10	Pa	
Q_{ohut}	1,01E-05		
\dot{G}_{konv}	3,04E-08	kg/s	
\dot{E}_{konv}	18,4	g/vko	

Liite 3: Vaipparakenteen kosteyslaskuri

VAIPPARAKENTEEN DIFFUUSIOKOSTEUS LASKURI v.22.3.2014

Copyright: -Henri Humala 5.1.2014. Ei saa käyttää tai kopioida ilman tekijän suostumusta.
Tekijä ei vastaa laskennan tai tulosten oikeellisuudesta.

Pyyri valitsemaan R_3 rakenteen pääasialliseksi lämmöneristeeksi

= Täytettävissä oleva kenttä. Voi myös jättää kentän tyhjäksi tai nolllaksi

Materiaalin nimi ja tyyppi	R_{si}	R_{su}	Mat1	Betoni SK	Villa	Betoni UK	Mat5	Ulkop.	LÄMPÖLASKENTA
Rakennetyyppi US1									U-arvo= 0,141
Materiaalin paksuus [m]			0,000	0,080	0,240	0,080	0,00		400 mm
Materiaalin lambda λ [W/(mK)]			0,000	2,000	0,035	2,000	0,000		
Aineosan R-luku [m ² K/W]	0,13		0,000	0,040	6,857	0,040	0,000	0,04	$\Sigma = 7,107$
Lämpötila aineosan eri pinnoilla [°C] <small>(Lämpötilojen erot merkattu pienellä ΔT)</small>	20,0	19,52	19,52	19,52	25,18	19,52	19,52	19,52	$\Delta T = 26,1$
Kosteus RH% (Jos tuloksena yli 100% kosteus, tiivistymistä tapahtuu)	50,0	51,4	51,4	51,4	179,1	87,0	87,0	88,0	KOSTEUSLASKENTA
δ_v Materiaalin vesihöyryn läpäisevyys [10 ⁻⁶ m ² /s]			0,0000	0,2081	14,2020	0,2081	0,0000		
Z_v Aineosan vesihöyryn vastus [s/m]			0	384452	16899	384452	0		$\Sigma = 785804$
g Kosteusvirta (aineosan läpäisevän kosteuden määrä) [g/m ² /vko]				4,58	4,58	4,58			g= 4,58
v_k Kastepiste eli vesihöyryn kylläisyyspitoisuus [g/m ³]	17,28	16,81	16,81	16,81	3,13	3,09	3,09	3,05	
v_x Rakennevälin vesihöyrypitoisuus [g/m ³] <small>(Pohjauksien väliset erot Δv_x pienellä)</small>	8,64	8,64	8,64	8,64	5,60	5,60	2,89	2,89	$\Sigma \Delta v_x = 5,96$
g_{riv} Vesihöyryn mahdollinen tiivistyminen [g/m ² /vko]					7,62				
$g_{diff,kuiv}$ Vesihöyryn mahdollinen kuivuminen diffuusiolla [g/m ² /vko] <small>(HUOM! Maksimi kuivumismäärä on 500g/m²/vko)</small>									

KOHTEEN NIMI:	Päivämäärä	Revisio ja pvm.	Allekirjoitus
PIIRR. NUMERO:			
SUUNNITTELIJA:			
TARKASTAJA:			
YRITYS:			

Liite 4: Lämpimän tilan U-arvolaskuri I

LÄMPIMÄN TILAN U-ARVOLASKURI 24.10.2012

Täytä taulukosta tarvitsemasi keltaiset ruudut. Jos et tarvitse jotain tiettyä materiaalikerrosta, merkkää paksuus nollassi.

US1								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_{se}	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,16	0,16	0,00	0,09	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,045	5,000	0,500	-		
R	0,13	0,1333	3,5556	0,0000	0,1700	0,04	4,0289	0,2482

US2								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_{se}	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,08	0,16	0,00	0,09	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,045	5,000	0,500	-		
R	0,13	0,0667	3,5556	0,0000	0,1700	0,04	3,9622	0,2524

US3								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_{se}	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,300	0,160	0,000	0,085	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,045	5,000	0,500	-		
R	0,13	0,2500	3,5556	0,0000	0,1700	0,04	4,1456	0,2412

US4								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_{se}	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,08	0,16	0,00	0,16	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,045	5,000	1,200	-		
R	0,13	0,0667	3,5556	0,0000	0,1333	0,04	3,9256	0,2547

US5								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_{se}	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,08	0,16	0,00	0,09	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,045	5,000	1,200	-		
R	0,13	0,0667	3,5556	0,0000	0,0708	0,04	3,8631	0,2589

YP1								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_{se}	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,2	0,35	0,15	0,00	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,037	0,100	5,000	-		
R	0,1	0,1667	9,4595	1,5000	0,0400	0,04	11,2661	0,0888

AP1								
	R_{si}	R_1	R_2	R_3	R_4	$R_{pohjamaa}$	R_T	U
Materiaali							[m ² K/W]	[W/(m ² K)]
Paksuus [m]	-	0,10	0,10	0,00	0,00	-		
λ [W/(mK)]	-	1,200	0,045	5,000	5,000	-		
R	0,17	0,0833	2,2222	0,0000	0,2000	2	4,6756	0,2139

Liite 5: Lämpimän tilan U-arvolaskuri II

LÄMPIMÄN TILAN U-ARVOLASKURI, EPÄHOMOGEENINEN RAKENNE 29.10.2012

Täytä taulukosta tarvitsemasi keltaiset ruudut. Jos et tarvitse jotain tiettyä materiaalikerrosta, merkkää paksuus nollassi.

ULKOSEINÄRAKENNE		Lohkon leveys	
Rakennelohko 1 pinta-alan leveys	550	mm	<i>esim. villan leveys</i>
Rakennelohko 2 pinta-alan leveys	50	mm	<i>esim. runkorakenteen leveys</i>
Rakennelohkojen yhteisleveys	600	mm	

Rakennelohko 1		Täyden eristeen alue						
US yläikiarvo	R _{si}	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R _{se}	R _T
Materiaali	-	kipsi	villa	kipsi				[m ² K/W]
Paksuus [m]	-	0,013	0,150	0,009	0,000	0,000	-	
λ [W/(mK)]	-	0,210	0,055	0,210	0,210	0,500	-	
R	0,13	0,0619	2,7273	0,0429	0,0000	0,0000	0,04	3,0020

Rakennelohko 2		Vajaan eristeen alue						
US yläikiarvo	R _{si}	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R _{se}	R _T
Materiaali	-	kipsi	puu	kipsi				[m ² K/W]
Paksuus [m]	-	0,013	0,150	0,009	0,000	0,000	-	
λ [W/(mK)]	-	0,21	0,120	0,120	0,210	0,500	-	
R	0,13	0,0619	1,2500	0,0750	0,0000	0,0000	0,04	1,5569

US Yläikiarvo	R _T =	2,7865 m ² K/W
---------------	------------------	---------------------------

US Alalikiarvo	R _{si}	R _{Eriste}	R _{Runko}	R _{se}
Materiaali	-	villa	puu	-
Paksuus [m]	-	0,15	0,15	-
λ [W/(mK)]	-	0,055	0,210	-
R	0,13	2,7273	0,7143	0,04

US Alalikiarvo	R _T =	2,2086 m ² K/W
----------------	------------------	---------------------------

$R_T = \frac{R_T^{\sim} + R_T^{\wedge}}{2}$	R _T =	2,4975 m ² K/W
	U _T =	0,4004 W/(m ² K)

Liite 6: Lämpimän tilan U-arvolaskuri III

U-ARVOJEN KORJAUSKERTOIMET 23.10.2012

$$\Delta U = U + \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r + \Delta U_\psi$$

U = Rakennusosan lämmönläpäisykerroin	0,09	W/(m ² K)
ΔU = Rakennusosan korjattu lämmönläpäisykerroin	0,111	W/(m ² K)

ΔU_f = ERISTEEN KOKONAAN TAI OSITTAIN LÄVISTÄVÄ KIINNIKE (esim. ANSAAT)		
	Laskuri	Esimerkki
d₀ = Lämmöneristeen kokonaispaksuus	= 0,2	0,2 m
α = Eristeessä osittain olevan lävistäjän kerroin	= 0,8	0,8 m
Huom! Jos kiinnike läpäisee eristeen kokonaan, on kerroin 0,8		
$\alpha = 0,8x \frac{d_{f0}}{d_0}$		
d_{f0} = Kiinnikkeen pituus eristeessä	= 0,2	0,2 m
λ_F = Kiinnikkeen lämmönjohtavuus	= 17	17 W/(mK)
Teräs	50	W/(mK)
Ruostumaton teräs	17...30	W/(mK)
Alumiini	160	W/(mK)
Puu, tiheys 450	0,12	W/(mK)
Puu, tiheys 500	0,13	W/(mK)
Puu, tiheys 700	0,18	W/(mK)
Muovi, polyeteeni HD	0,5	W/(mK)
A_F = Yhden kiinnikkeen pinta-ala [mm ² -> m ²]	= 0,000020	0,000020 m ²
Yhden kiinnikkeen pinta-ala [mm ²]	= 19,634	19,634 mm ²
n_F = Lävistäjien lukumäärä / m ²	= 11	11 kpl/m ²
R₁₀ = Lämmöneristeen lämmönvastus ilman korjauskertoimia (Hae "U-arvo laskuri"-sta)	= 2,220	2,220 m ² K/W
R_{TH} = Koko rakenteen kokonaislämmönvastus ilman korjauskertoimia (Hae "U-arvo laskuri"-sta)	= 2,430	2,430 m ² K/W
ΔU_f =	0,012	0,012 W/(m ² K)

$\Delta U_g =$ ILMARAOISTA AIHEUTUVA KORJAUSTEKIJÄ

$$\Delta U_g = \Delta U \cdot \left(\frac{R_1}{R_{TH}} \right)^2$$

	Laskuri	Esimerkki
ΔU^* = Ilmaraoista aiheutuva korjauskerroin =	0,01	0,04 W/(m ² K)
0 Eristeessä vähäisiä tai olemattomia ilmarakoja	0,00	W/(m ² K)
1 Eristeen läpäiseviä ilmarakoja jotka eivät aiheuta ilman kiertoa	0,01	W/(m ² K)
2 Eristeessä ilmarakoja ja ilmankiertoa lämpimän ja kylmän välillä	0,04	W/(m ² K)
R_1 = Lämmöneristeen lämmönvastus ilman korjauskertoimia =	3,560	3,56 m ² K/W
R_{TH} = Koko rakenteen kokonaislämmönvastus ilman korjauskertoimia =	3,860	3,86 m ² K/W
ΔU_f =	0,009	0,034 W/(m ² K)

Liite 7: Diffuusiolaskuri, perus sandwich-rakenne

VAIPPARAKENTEEN DIFFUUSIOKOSTEUS LASKURI v.22.3.2014

Copyright: Henri Humala 5.1.2014. Ei saa käyttää tai kopioida ilman tekijän suostumusta.
Tekijä ei vastaa laskelman tai tulosten oikeellisuudesta.

Pyri valitsemaan R₃ rakenteen pääasialliseksi lämmöneristeeksi = Täytettävissä oleva kenttä. Voi myös jättää kentän tyhjäksi tai nolllaksi

Materiaalin nimi ja tyyppi	R _{si}	-	Betoni SK		Paroc COS 5ggt	Betoni UK		-	R _{su}	Ulkop.	LÄMPÖLASKENTA
			Mat1	Mat2		Mat3	Mat4				
Rakennetyyppi Perus SW											400 mm
Materiaalin paksuus [m]											
Materiaalin lambda λ [W/(mK)]											
Aineosan R-luku [m ² K/W]	0,13								0,04		Σ= 6,917
Lämpötila aineosan eri pinnoilla [°C]											ΔT= 26,1
(Lämpötilojen erot merkattu pienellä ΔT)	20,0	19,51	19,51	19,51	19,36	25,18	19,80	0,15	5,95	5,10	
Kosteus RH% (Jos tuloksena yli 100% kosteus, tiivistymistä tapahtuu)	50,0	51,4	51,4	51,4	34,4	179,0	86,9	86,9	86,9	88,0	KOSTEUSLASKENTA
δ _v Materiaalin vesihöyryn läpäisevyys [10 ⁻⁶ m ² /s]											
Z _v Aineosan vesihöyryn vastus [s/m]											Σ= 785997
g Kosteusvirta (aineosan läpäisevän kosteuden määrä) [g/m ² /vko]											g= 4,58
v _k Kastepiste eli vesihöyryn kyläisyypitoisuus [g/m ³]	17,28	16,80	16,80	16,80	16,65	4,58	4,58	3,09	3,09	3,05	
v _x Rakennevälin vesihöyrypitoisuus [g/m ³] (Piloituksien väliset erot äx: pienellä)	8,84	8,84	8,84	8,84	5,73	0,13	2,91	2,69	2,69	2,69	ΣΔv= 5,96
g _{irv} Vesihöyryn mahdollinen tiivistyminen [g/m ² /vko]											
g _{diff,kuiv} Vesihöyryn mahdollinen kuivuminen diffuusiolilla [g/m ² /vko]											
(HUOM! Maksimi kuivumismäärä on 500g/m ² /vko)											

KOITTEEN NIMI:	Perus sandwich rakenne	Päivämäärä	Revisio ja pvm.	Allekirjoitus
PIIRR. NUMERO:		23.3.2014		
SUUNNITTELIJA:	HH			
TARKASTAJA:				
YRITYS:				

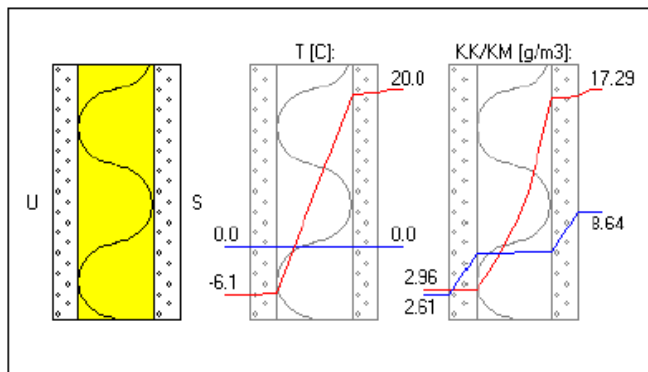
Liite 8: Perus sandwich-rakenne, DOF-lämpö ohjelma

Rakennuskohde:	Sisältö: Perus Sandwich rakenne	
Suunnittelija: HH	Päiväys: 23.3.2014	Tunnus:

Rakenteen päätiedot:

U-arvo: 0.141 W/m²K
Paksuus: 400.000 mm
Pinta-ala: 1.00 m²
Paino: 384.00 kg
Hinta: 0.00 euro

Vesihöyryn vastus: 2.952e+04 m²hPa/g
Vesih. läpäisykerroin: 3.387e-05 g/m²hPa
Lämmönvastus: 7.107 m²K/W
Pintavastus, ulko: 0.040 m²K/W
Pintavastus, sisä: 0.130 m²K/W
Kulma (0-90): 90.000

**Rakenteen kerrostiedot:**

Kerrokset ulkoa (U) sisälle (S)

KERROS:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [kg/msPa]	Hinta [e/m ³]:	Paino [kg/m ³]:
1 Betoni	80.00	2.0000	1.538462e-12	0.00	2400.00
2 ISOVER KL 35	240.00	0.0350	1.050000e-10	0.00	0.00
3 Betoni	80.00	2.0000	1.538462e-12	0.00	2400.00

T = Paksuus, LJ = Lämmönjohtavuus, VHL = Vesihöyryn läpäisevyys

Lämpötilat ja kosteudet:

Tammikuu (744.0 h)

Piste:	T [C]:	KK [g/m ³]:	KM [g/m ³]:	SK [%]:	C [g/m ²]:
U	-6.10	2.96	2.61	88.0	0.00
1	-5.95	3.00	2.61	86.9	0.00
2	-5.81	3.04	5.56	100.0	36.44
3	19.38	16.67	5.69	34.1	0.00
4	19.52	16.81	8.64	51.4	0.00
S	20.00	17.29	8.64	50.0	0.00

Lisätiedot:**Tiivistymisvaara! (SK_max = 100.0 %)**

T=Lämpötila, KK=Kyllästymiskosteus, KM=Kosteusmäärä, SK=Suhteellinen kosteus

Liite 9: Diffuusiolaskuri, perus sandwich-passiivirakenteena

VAIPPARAKENTEEN DIFFUUSIOKOSTEUS LASKURI v.22.3.2014

Copyright: Henri Humala 5.1.2014. Ei saa käyttää tai kopioida ilman tekijän suostumusta.
Tekijä ei vastaa laskennan tai tulosten oikeellisuudesta.

Pyri valitsemaan R₃ rakenteen pääasiallisiksi lämmöneristeeksi = Täytettävissä oleva kenttä. Voi myös jättää kentän tyhjäksi tai nolllaksi

Materiaalin nimi ja tyyppi	R _{si}				Betoni SK	Paroc COS 5ggt	Betoni UK			R _{su}	Ulkop.	LÄMPÖLASKENTA
Rakennetyyppi												
Perus SW												
Materiaalin paksuus [m]					Mat1	Mat3	Mat4	Mat5				U-arvo= 0,103
Materiaalin lambda λ [W/(mK)]					0,000	0,340	0,080	0,00				500 mm
Aineosan R-luku [m ² K/W]					0,000	0,036	2,000	0,000				
					0,000	9,444	0,040	0,000				Σ= 9,694
Lämpötila aineosan eri pinnoilla [°C]												
(Lämpötilojen erot merkattu pienellä ΔT)					0,00	25,43	0,11	0,00				ΔT= 26,1
Kosteus RH% (Jos tulosena yli 100% kosteus, tiivistymistä tapahtuu)					51,0	34,2	87,2	87,2				
δ, Materiaalin vesihöyryn läpäisevyys [10 ⁻⁶ m ² /s]					0,0000	179,4	0,2081	0,0000				KOSTEUSLASKENTA
Z _v Aineosan vesihöyryn vastus [s/m]					0	24215	384452	0				Σ= 793119
g Kosteusvirta (aineosan läpäisevän kosteuden määrä) [g/m ² /vko]						4,54	4,54					g= 4,54
v _k Kastepiste eli vesihöyryn kyläisyyspitoisuus [g/m ³]					16,94	16,83	3,08					
v _x Rakennevälin vesihöyrypitoitus [g/m ³] (Pitoisuuden väliset erot Δv _x pienellä)					8,64	5,76	2,89	0,00				ΣΔv= 5,96
g _{iv} Vesihöyryn mahdollinen tiivistyminen [g/m ² /vko]												
g _{diff_kuiv} Vesihöyryn mahdollinen kuivuminen diffuusiolla [g/m ² /vko]						7,53						
(HUOM! Maksimi kuivumis määrä on 500g/m ² /vko)												

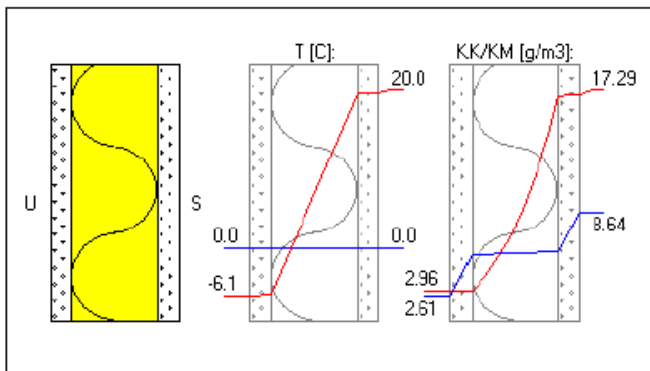
KOHTEN NIMI:	"Passiivi" perus sandwich rakenne	Päivämäärä	Revisio ja pvm, Allekirjoitus
PIIRR. NUMERO:		23.3.2014	
SUUNNITTELIJA:	HH		
TARKASTAJA:			
YRITYS:			

Liite 10: Perus sandwich-passiivirakenteena, DOF-lämpö ohjelma

Rakennuskohde:	Sisältö: "Passiivi" perus Sandwich rakenne	
Suunnittelija: HH	Päiväys: 23.3.2014	Tunnus:

Rakenteen päätiedot:

U-arvo:	0.100 W/m2K
Paksuus:	500.000 mm
Pinta-ala:	1.00 m2
Paino:	384.00 kg
Hinta:	0.00 euro
Vesihöyryn vastus:	2.979e+04 m2hPa/g
Vesih. läpäisykerroin:	3.357e-05 g/m2hPa
Lämmönvastus:	9.964 m2K/W
Pintavastus, ulko:	0.040 m2K/W
Pintavastus, sisä:	0.130 m2K/W
Kulma (0-90):	90.000

**Rakenteen kerrostiedot:**

Kerrokset ulkoa (U) sisälle (S)

KERROS:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [kg/msPa]	Hinta [e/m3]:	Paino [kg/m3]:
1 Betoni	80.00	2.0000	1.538462e-12	0.00	2400.00
2 ISOVER KL 35	340.00	0.0350	1.050000e-10	0.00	0.00
3 Betoni	80.00	2.0000	1.538462e-12	0.00	2400.00

T = Paksuus, LJ = Lämmönjohtavuus, VHL = Vesihöyryn läpäisevyys

Lämpötilat ja kosteudet:

Tammikuu (744.0 h)

Piste:	T [C]:	KK [g/m3]:	KM [g/m3]:	SK [%]:	C [g/m2]:
U	-6.10	2.96	2.61	88.0	0.00
1	-6.00	2.99	2.61	87.2	0.00
2	-5.89	3.02	5.53	100.0	36.04
3	19.55	16.84	5.72	33.9	0.00
4	19.66	16.95	8.64	51.0	0.00
S	20.00	17.29	8.64	50.0	0.00

Lisätiedot:**Tiivistymisvaara! (SK_max = 100.0 %)**

T=Lämpötila, KK=Kyllästymiskosteus, KM=Kosteusmäärä, SK=Suhteellinen kosteus