



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Rakennusosien rakennusfysikaalinen toiminta

Ralf Lindberg
Professori, Tampereen teknillinen yliopisto
ralf.lindberg@tut.fi

Rakenneosien rakennusfysikaalisen toiminnan ymmärtämiseksi on välttämätöntä piirtää kolme eri käyrää rakenteen yli. Nämä käyrät ovat lämpötilakäyrä, vesihöyryn kyllästyspitoisuuskäyrä sekä vesihöyryn pitoisuuskäyrä. Näiden käyrien perusteella voidaan arvioida lämpöenergian sekä kosteuden siirtymisen suuntia ja suuruusluokkia.

Koska laskelmien reunaehdoina ovat lämpötilat ja kosteuspitoisuudet rakenteen eri puolilla vaihtelevat jatkuvasti, tarkkojen laskelmien tekeminen on mahdotonta. Tietokoneohjelmilla voidaan laskea tällaista rakenteen dynaamista käyttäytymistä paljon tarkemmin kuin käsinlaskentamenetelmillä. Kuitenkin ohjelmistojen käytössäkin on suurin ongelma löytää luonnon asettamat laskennan reunaehdot mahdollisimman hyvin tilannetta kuvaaviksi.

Tämän artikkelin tavoitteena on esittää yksinkertaiset laskentamallit kolmen rakennusfysikaalisen toiminnan perustana olevan käyrän piirtämiseksi. Tässä yhteydessä tehdään lukuisia yksinkertaistuksia, jotta laskelmat tulisivat helpommin ymmärrettäviksi. Yksinkertaistukset vievät tuloksia entistä kauemmaksi todellisuudesta. Yksinkertaisten laskelmien tekeminen on kuitenkin perusteltua, koska näiden perusteella voidaan verrata eri tapauksia toisiinsa, kun ne on laskettu samoilla reunaehdoilla ja parametreilla. Tarkka mallintaminenkin voi antaa täysin väärä tuloksia, jos ohjelmiston käyttäjä ei ymmärrä olosuhdereunaehtoja tai ohjelman käyttämiä materiaaliominaisuuksia.

Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Lämpötilajakauma

Rakenneosan eri puolilla on tarkasteltavissa tilanteissa usein eri lämpötilat. Ensimmäinen tehtävä on selvittää, miten lämpötila muuttuu rakenteen sisällä. Tämä käyrä kannattaa piirtää tyypillisissä tarkasteluajankohdan olosuhteissa nk. stationääritilassa eli sellaisissa muuttumat-

tomissa olosuhteissa, joissa lämpötilavaihteluja ei oteta huomioon.

Tyypilliset olosuhteet kannattaa valita sellaisiksi, jotka voivat esiintyä pidemmän aikaa luonnossa. Tyypillinen ulkolämpötila talvella eteläisessä Suomessa voisi olla $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, koska tällainen keskimääräinen lämpötila saattaa esiintyä useiden viikkojen ajan. Vastaavasti kesän lämpötilaksi voi ulkona otaksua arvon $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lämmönjohtavuus λ on materiaaliominaisuus, jonka avulla voidaan määrittää rakenneominaisuus lämmönvastus R . Lämpötilaero rakenteen eri pintojen välillä tasoittuu lämmönvastusten suhteissa. Lisäksi tiedämme, että rakenteen pintalämpötila poikkeaa pinnasta kauempana olevan ilman lämpötilasta. Tämä otetaan huomioon erityisellä pintavastuksella.

Lämmönjohtavuus λ :

$$\lambda: \text{n yksikkö on } [\lambda] = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$$

Lämmönjohtavuus kertoo yhden metrin paksuisen ja yhden neliön kokoisen materiaalikerroksen läpi kulkevan lämpötehon, kun lämpötilaero pintojen välillä on yksi aste. Taulukossa 1 on esitetty eräiden materiaalien lämmönjohtavuuksia hyvin karkealla tarkkuudella. Tarkempia arvoja tarvitaan määrittäessä lämmönläpäisykerrointa eli nk. U -arvoa. Lämpötilakäyrää määrittäessä voidaan tulosten liikaa kärsimättä käyttää taulukon 1 arvoja.

Muun muassa rakentamismääräyskokoelmasa on paljon laajempi aineisto eri materiaalien lämmönjohtavuuksia. Materiaalin käyttökohdella on myös merkitystä käytettävän lämmönjohtavuuden arvoon.

Taulukosta havaitaan, että eristeet ja muut tavanomaiset rakennusmateriaalit poikkeavat toisistaan melko paljon. Toinen havainto on, että yksittäisen materiaalin lämmönjohtavuuden vaihteluväli on melko pieni, ainakin verrattaessa sitä myöhemmin materiaalien vesihöyrynvastuusten vaihteluväliin.

Taulukko 1. Materiaalien lämmönjohtavuuksia.

Materiaali	λ	Laskentaan sopiva arvo
	$\frac{W}{m^{\circ}C}$	
Puupohjaiset eristeet		
– sahanpuru	0,08...0,14	0,1
– puukuitulevy	0,05...0,13	0,09
– puukuitueriste	0,05	0,05
– puu	0,12	0,12
Mineraalivillat	0,04...0,05	0,05
Muovipohjaiset eristeet		
– polystyreeni	0,041	0,04
– polyuretaani	0,03	0,03
Muut eristeet		
– kevytsora	0,08...0,1	0,1
– siporex	0,09...0,15	0,12
– vaahtolasi, solulasi	0,05	0,05
Muut materiaalit		
– betoni	1,7	1,7
– kivi	3,5	3,5
– lasi	2,0	2,0
– teräs	50	50

Taulukko 2. Rakennekerrosten lämmönvastuksia.

Materiaalikerros	Paksuus d mm	Lämmönvastus R
		$\frac{m^{\circ}C}{W}$
Mineraalivilla	200	4,0
Puukuitueriste	200	4,0
Polystyreeni	200	4,5
Polyuretaani	100	3,5
Kevytsora	300	3,0
Siporex	300	3,0
Puu	200	1,5
Betoni	100	0,06
Teräs	1	0
Kipsilevy	13	0,06
Huokoinen puukuitulevy	12	0,2
Sisäpinta		0,13
Ulkopinta		0,07
Sisäpinta maanvaraisessa laatussa		0,3

Lämmönvastus R

$$R: n \text{ yksikkö on } [R] = 1 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Kun rakenteessa olevan materiaalikerroksen paksuus jaetaan lämmönjohtavuudella, saadaan tulokseksi lämmönvastus, joka kuvaa hyvin rakenteen lämpötilakäyttäytymistä. Lämmönvastuksen yksikkö on otsikon mukainen. On huomattava, että rakenteen paksuus on sijoitettava kaavaan yksikössä metriä.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

jossa

$$R \text{ on lämmönvastus } \frac{m^{\circ}C}{W} \tag{1}$$

d on materiaalikerroksen paksuus m

$$\lambda \text{ on materiaalin lämmönjohtavuus } \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Rakennekerroksen, jossa on useampaa materiaalia, lämmönvastuksen voi laskea mm. rakentamismääräyskokoelmassa esitetyllä tavalla.

Taulukkoon 2 on laskettu eräiden materiaalikerrosten lämmönvastukset. Laskennassa on käytetty taulukon 1 laskentaan soveltuvia arvoja.

Taulukossa on tiettyä rakennekerroksen paksuutta vastaava lämmönvastus. Jos materiaalikerroksen paksuus poikkeaa taulukon arvosta, muuttuu lämmönvastuskin paksuuksien suhteissa. Esimerkiksi puukerroksen paksuuden ollessa 100 mm sen lämmönvastus on $100/200 \times 1,5 = 0,75$.

Taulukosta havaitaan, että tavanomaisilla eristyspaksuuksilla eristeiden lämmönvastukset ovat suuria ja vastaavasti muiden materiaalikerrosten pieniä. Esimerkiksi 1 mm paksun teräslevyn lämmönvastus on nolla, mikä merkitsee, että lämpötila ei muutu teräslevyn paksuuden matkalla.

Taulukkoon on myös merkitty kokemusperäiset pintavastusten arvot. Arvot 0,13 ja 0,07 soveltuvat käytettäväksi ulkoseinissä ja arvo 0,3 maanvaraiseen laatan sisäpinnassa.

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on koko rakenteen eri kerrosten lämmönvastusten summan käänteisluku. Seinän U-arvon tulee olla

$$\text{luokkaa } 0,25 \frac{W}{m^{\circ}C}.$$

Sen käänteisarvo eli tarvittava lämmönvastus on luokkaa 4,0. Tästä voidaan päätellä, että suomalaisissa ulkoseinissä tarvitaan myös paljon eristettä, pelkät pintavastukset eivät riitä. Lämpötilakäyrää piirrettäessä voidaan usein pintavastusten vaikutus jättää merkityksettömänä pois.

Luokaksi tarvitaan rakenteen eri puolilla vaiuttavien lämpötilojen ero. Tämä **lämpötilaero**

Taulukko 3. Sandwich-elementin lämpötilajakauma.

Materiaalikerros	Paksuus mm	Lämmönvastus $R \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$	Lämmönvastuksen kertymän suhteellinen osuus %	Lämpötila °C
Sisäilma			0	+20
Sisäpinta		0,13	4	+19
Betoni	80	0,05	6	+18
Eriste	140	2,80	96	-9
Betoni, ulkopinta	70	0,04	98	-9
Ulkoilma		0,07	100	-10
Yhteensä		3,09		

tasoittuu eri materiaalikerrosten lämmönvastusten suhteissa. Luonnonlaki on, että lämpöenergia kulkee alemman lämpötilan suuntaan. Olosuhteiden jatkuva vaihtelu voi joissakin olosuhteissa aiheuttaa, että sisällä ja ulkopinnassa on korkeampi lämpötila kuin rakenteen sisäosissa. Tällöin lämpöenergia voi varastoitua rakenteen sisään sekä sisältä että ulkoa päin.

Seuraavassa on laskettu ja piirretty tavalliseen sandwich-elementtiin lämpötilakäyrät. Laskelmat on esitetty taulukossa 3. Tuuletusurien ja ansaiden vaikutusta ei ole otettu huomioon.

Taulukon ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty eri materiaalikerrosten rajapinnat, joissa voi olla erilaiset lämpötilat. Kolmannessa sarakkeessa on esitetty eri materiaalikerrosten läm-

mönvastukset. Ne on laskettu käyttäen hyväksi taulukon 2 tietoja. Seuraavassa sarakkeessa on esitetty lämmönvastuksen kertyminen sisältä ulospäin suhteellisenä osuutena. Esimerkiksi eristeen ulkopintaan mennessä on sisältä päin kertynyt lämmönvastusta $2,98/3,09 \approx 0,96$ eli 96 %. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty lämpötilat rajapinnoissa. Ne saadaan suoraan lämpötilaerosta lämmönvastusten suhteissa. Esimerkiksi eristeen ulkopinnan lämpötila on $20-0,96 \times 30 \approx -9$. Eri kerrosten lämpötilat voidaan esittää myös matemaattisina kaavoina, mutta edellä oleva esitys on myös käyttökelpoinen. Laskennan tarkkuus on hyvin karkea. Tässä artikkelissa käsitelyihin tapauksiin tarkkuus on kuitenkin riittävä.

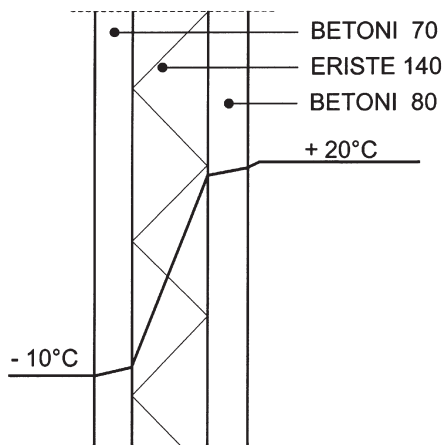
Kuvassa 1 on piirretty lämpötilakäyrät kun pintavastukset on otettu huomioon.

Kuvasta havaitaan, että lämpötila laskee eniten eristeen alueella. Pintavastusten ja betonikerrosten merkitys on vähäinen.

Kyllästyspitoisuuskäyrä

Toinen tarvittava jakauma on kyllästyspitoisuuskäyrä. Kyllästystilalla tai kyllästyspitoisuudella tarkoitetaan, että ilmassa on niin paljon vesihöyryä kuin siihen tiivistymättä mahtuu. Kyllästystila ilmoitetaan usein merkinnällä RH = 100 % (RH on Relative Humidity). Taulukossa 4 on esitetty normaalisti käytössä olevalla lämpötila-alueella kyllästyspitoisuuden arvot eri lämpötiloissa. Kyllästyspitoisuus voidaan ilmoittaa yksiköissä g/m^3 tai vesihöyryn kyllästystilaa vastaavana osapaineena (Pa). Tässä artikkelissa käytetään pitoisuuteen perustuvia yksiköitä, koska ne ovat usein ymmärrettävämpiä. Taulukon 4 tulos on esitetty myös kuvassa 2.

Rakenteiden käyttäytymisen kannalta on tärkeää, että kyllästyspitoisuus riippuu lämpötilasta siten, että kylmään ilmaan mahtuu vähemmän vesihöyryä kuin lämpimään.



Kuva 1. Sandwich-elementin lämpötilajakauma tyypillisenä talvikautena.

Taulukko 4. Vesihöyryn kyllästyspitoisuus v_k ja kyllästystilan osapaine p_k .

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	0,87	102	-3	3,89	485	14	12,10	1602
-19	0,95	111	-2	4,19	524	15	12,86	1708
-18	1,04	122	-1	4,51	566	16	13,65	1820
-17	1,14	135	0	4,85	611	17	14,49	1939
-16	1,25	149	1	5,21	658	18	15,37	2064
-15	1,38	164	2	5,58	708	19	16,30	2197
-14	1,52	181	3	5,98	762	20	17,28	2337
-13	1,67	200	4	6,40	818	21	18,31	2484
-12	1,83	221	5	6,84	878	22	19,40	2640
-11	2,01	242	6	7,31	941	23	20,54	2805
-10	2,20	266	7	7,80	1008	24	21,74	2979
-9	2,40	292	8	8,32	1079	25	23,00	3162
-8	2,61	319	9	8,87	1154	26	24,32	3355
-7	2,84	348	10	9,45	1234	27	25,71	3559
-6	3,08	379	11	10,06	1318	28	27,17	3773
-5	3,33	412	12	10,71	1408	29	28,70	3999
-4	3,60	447	13	11,38	1502	30	30,31	4237

Ilmaan ei voida laittaa kyllästyspitoisuutta suurempia vesihöyrymääriä. Kuvitellaan esimerkiksi tilanne, jossa olisi käytettävissä 1 m³ kuivaa ilmaa astiassa. Olkoon ilman lämpötila -10 °C. Kaadetaan astiaan 5 g vettä. Lopputulos on, että ilmassa on kyllästyspitoisuus (2,2 g) vesihöyryä ja loppu vesi on jäässä.

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan, että ilmassa on esimerkiksi puolet kyllästyspitoisuudesta, on suhteellinen kosteus (RH) 50 %. Suhteellinen kosteus voi vaihdella välillä 0...100 %. Suhteellisella kosteudella on rakennustekniikassa suuri merkitys sekä rakennusten että rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusteknisessä käyttäytymisessä.

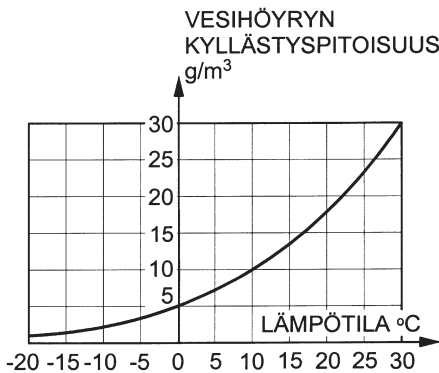
Rakennusmateriaalien vesipitoisuus riippuu pääasiassa huokosilman suhteellisesta kosteudesta nk. hygroskooppisella alueella. Mitä suurempi on suhteellinen kosteus, sitä enemmän on materiaaliin sitoutuneena vettä. Moniin puupohjaisiin materiaaleihin voi sitoutua huomattavia vesimääriä. Vastaavasti toisiin, esimerkiksi mineraalivilloihin, vain vähäisiä. Tähän materiaalien kosteuskäyttäytymiseen palataan seuraavan vuoden kalenterissa.

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan lähtökohdana on usein ulkoilman vesihöyrynpitoisuus, koska ulkoilmaa otetaan rakennuksiin ilmanvaihdolla.

Lämpötilakäyrän perusteella voidaan määrittää kunkin rakenteen osan kyllästyspitoisuus. Näin saadaan rakenteen kyllästyspitoisuusjakautuma. On huomattava, että lämpötilan muuttuessa jossain materiaalikerroksessa suoraviivaisesti kyllästyspitoisuus muuttuu epälineaarisesti. Myöhemmin esitettävissä laskelmissa ja kuvissa on kuitenkin otaksuttu lineaarinen yhteys yksittäisessä materiaalissa lämpötilan ja kyllästyspitoisuuden välille. Virhe on käytännön tapauksissa pieni. Jakaumaa piirrettäessä on hyvä myös piirtää kuviolle origo. Se on tässä tapauksessa vesihöyryn pitoisuus 0 g/m³.

Vesihöyrynpitoisuuskäyrä

Lämpötilakäyttäytymisessä on rakenteen eri puolilla lämpötilaero, joka tasoittuu lämmönvastusten suhteissa. Samoin voi rakenteen eri puolilla ilmassa (tai huokosilmassa) olla vesihöyrynpitoisuusero. Se tasoittuu analogisesti vesihöyryn vastusten suhteissa.



Kuva 2. Vesihöyryn kyllästyspitoisuus lämpötilan funktiona.

Taulukko 5. Materiaalikerrosten vesihöyryn vastuksia Z_v .

Materiaalikerros	Paksuus mm	Z_v 10^3 s/m	Laskentaan sopiva arvo
Polyeteenikalvo	0,2	> 2000	3500
Ilma	100	4	4
Betoni	100	30...1000	150
Puu	100	30...500	400
Siporex	100	10...50	30
Mineraalivilla	100	4...12	8
Polystyreeni	100	70...110	100
Polyuretaani	100	600...7500	1300
Kipsilevy	13	1,6...4,5	4
Huokoinen kuitulevy	12	2,5...3,5	3
Kovalevy	3,2	2,5...3,5	3
Vaneri	13	15...80	50
Maalit		5...120	
Linoleum matto		200	
Muovimatto		500	

Vesihöyryä tarkasteltaessa kutsutaan lämmönjohtavuutta vastaavaa materiaaliominaisuutta vesihöyrynjohtavuudeksi δ . Vastaavasti rakennekerroksen käyttäytymistä kuvaa vesihöyrynvastus Z_v , joka lasketaan ainekerroksen paksuuden ja vesihöyryn johtavuuden suhteena. Tässä yhteydessä esitetään vain eri materiaalikerrosten vesihöyrynvastuksia (Z_v) taulukossa 5. Alaindeksi tarkoittaa, että laadut on ilmoitettu lähtien vesihöyryn pitoisuuksista. Ne voidaan ilmoittaa myös lähtien osapaineista. Tässä yhteydessä ei näitä kuitenkaan esitetä. Materiaalisen vesihöyryn johtavuuksia on esitetty alan kirjallisuudessa.

Taulukossa on tiettyä rakennekerroksen paksuutta vastaava vesihöyryn vastus. Jos kerroksen paksuus on eri kuin taulukossa, korjataan vastuslukuja paksuuksien suhteissa. Esimerkiksi polystyreenin 200 mm vesihöyryn vastus on $200/100 \times 100 = 200 \times 10^3$ s/m.

Taulukosta havaitaan, että vesihöyryn vastuiksi vaihteluväli on suuri. Esimerkiksi 100 mm betonia voi aiheuttaa vastuksen 30...1000 $\times 10^3$ s/m. Vastus riippuu monista materiaalin ominaisuuksista. Lisäksi tiedetään, että suurilla kosteuspitoisuuksilla materiaalikerroksen vesihöyryn vastus pienenee. Siten kuivilla materiaaleilla on suurempi vastus. Taulukosta voidaan tehdä se johtopäätös, että lähes mitkä tahansa laskentatulokset voidaan saada laskelmin aikaan. Tämän vuoksi laskelmiin on suhtauduttava erittäin kriittisesti. Samoilla parametreilla laskettuja tapauksia voi kuitenkin verrata toisiinsa, jolloin voidaan päätellä eri ratkaisujen riskeistä yms.

Lämpötilajakaumaan liittyviä pintavastuksia vesihöyryn yhteydessä ei ole. Oletamus on, että ilmassa on sama määrä vesihöyryä sekä pinnan lähellä että kauempana siitä.

Yliä tarvitaan rakenteen eri puolilla vaikuttavien vesihöyryn pitoisuuksien ero. Vesihöyry kulkeutuu diffuusiioon liittyviin luonnonlain mukaan alemman pitoisuuden suuntaan. **Pitoisuusero rakenteessa tasoittuu eri kerrosten vesihöyryn vastusten suhteissa.**

Rakenteissa voi aivan hyvin olla tilanteita esimerkiksi rakentamisen jälkeen, joissa suurimmat vesihöyryn pitoisuudet löytyvät esimerkiksi betonilaatan sisältä. Tällöin vesihöyry kulkee alemman pitoisuuden suuntaan sekä laatan ylä- että alapuolelle.

Kaikkiaan tätä vesihöyryn pitoisuuserojen tasoittumista alemman pitoisuuden suuntaan kutsutaan vesihöyryn diffuusioksi. Vesihöyryn diffuusiovauhtia voidaan myös arvioida, kuten myöhemmin esitetään.

Taulukkoon 6 on laskettu esimerkki sandwich-elementin lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta. Tulokset on esitetty myös kuvassa 3.

Taulukon tiedot on jatkettu lämpötilakäyrän esimerkistä eteenpäin. Kyllästyspitoisuudet (v_k) eri lämpötiloissa ovat taulukosta 4. Vesihöyryn vastukset (Z_v) on muunnettu taulukon 5 tiedoista rakennekerroksien paksuuksien suhteissa. Seuraavassa sarakkeessa on vesihöyryn vastuslukupien kertymän suhteelliset osuudet samoin kuin lämpötilankin kohdalla.

Vesihöyryn pitoisuus v ulkona on tavanomainen tilanne talvella. Se on siten luonnon asettama reunaehto. Sisätilan suhteelliseksi kosteudeksi on otaksuttu RH 50 %. Tämä on ehkä ta-

Taulukko 6. Sandwich-elementin lämpö- ja kosteustekninen toiminta.

Materiaalikerros	d mm	R $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$	%	t °C	vk $\frac{g}{m^3}$	Zn $\frac{10^3}{s/m}$	%	n $\frac{g}{m^3}$	RH %	Korj. RH %
Sisäilma			0	+20	17,3			8,6	50	50
Sisäpinta		0,13	4	+19	16,3			8,6	56	50
Betoni	80	0,05	6	+18	15,4	120	51	5,2	34	34
Eriste	140	2,80	96	-9	2,4	11	55	5,0	"208"	100
Betoni, ulkopinta	70	0,04	98	-9	2,4	105	100	2,0	90	90
Ulkoilma		0,07	100	-10	2,2			2,0	90	90
Yhteensä		3,09				236				

vanomaista korkeampi arvo, koska kosteuslisäksi muodostuu tällöin $6,6 \text{ g/m}^3$. Tämä puolestaan on liian korkea arvo asuinrakennuksissa talvella. Syynä suureen kosteuslisään on useimmiten uuden rakennuksen rakennusaikaisen kosteuden vaikutus, toimimaton ilmanvaihto tai normaalia poikkeavat asunnon käyttötottu-

mukset. Seinän rasitus muodostuu näillä otaksuilla tavanomaista ankarammaksi.

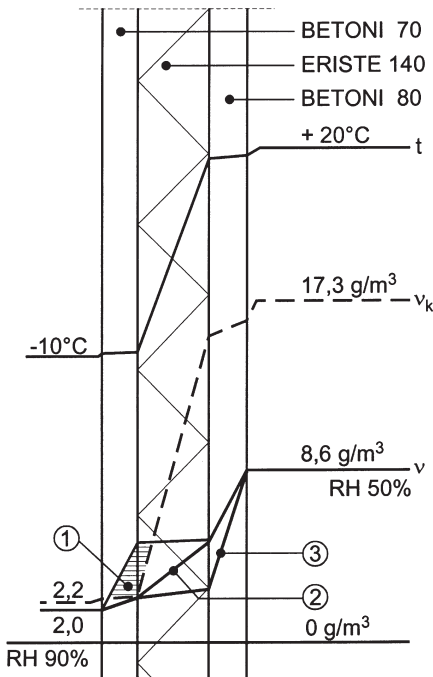
Vesihöyryn pitoisuusero tasoittuu rakenteessa vesihöyryn vastusten suhteissa. Näin voidaan laskea oikealta kolmannen sarakkeen vesihöyryn pitoisuudet. Rakenteen eri osien suhteellinen kosteus voidaan laskea kaavasta $RH = v/v_k$. Nämä arvot on laskettu toiseen sarakkeeseen oikealta.

Eristeen ulkopinnan suhteelliseksi kosteudeksi muodostuu "208" %, mikä ei ole mahdollista. Siksi viimeiseen sarakkeeseen on korjattu suhteelliset kosteudet siten, että suurin mahdollinen arvo on 100 % eli kyllästystila. Viimeisen sarakkeen tilanne on lähellä lopullista jakaumaa.

Kuvaan on piirretty taulukon tiedot. Kuvaan on piirretty vesihöyryn kyllästyspitoisuuskäyrä suoraviivaiseksi, vaikka se on lämpötilan muutoksiin nähden epälineaarinen. Virhe on kuitenkin pieni.

Eristeen ulkopintaan muodostuu kondenssi-alue, koska vesihöyryn pitoisuuskäyrä ylittää kyllästyspitoisuuskäyrän. Tämä näkyy kuvassa viivoitettuna alueena 1. Tilanne ei kuitenkaan ole mahdollinen, vaan eristeen ja ulkokuoren alueella on tehty käyrään korjaus 2, jossa lopullinen kastepiste (RH 100 %) muodostuu ulkokuoren ja eristeen rajapintaan.

Tämäkään ei vielä ole lopullinen tilanne. Sisäkuoren osalla vesihöyry kulkeutuu diffuusiolla paljon hitaammin kuin eristeessä, koska betonikuoren vesihöyryn vastus on yli kymmenkertainen eristeen vastukseen verrattuna. Toisin sanoen betonikuoren läpi tapahtuu diffuusiota paljon hitaammin kuin eristeen läpi. Siksi lopullinen vesihöyryn pitoisuuskäyrä kulkee karkeasti tapauksen 3 mukaisesti.



Kuva 3. Sandwich-elementin lämpö- ja kosteustekninen toiminta.

Diffuusion vauhti

Edellisen esimerkin mukaan talviaikana tiivistyy kosteutta (samalla jäätyen) eristeen ja ulko-kuoren rajapintaan. Tiivistyvän kosteuden määrä on helposti laskettavissa kaavalla 2.

$$g = \frac{\Delta v}{Z_v} \quad (2)$$

jossa

$$g \text{ on vesihöyryn diffuusiovauhti } \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{s}}$$

$$= 3600 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{h}} \approx 6 \cdot 10^5 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{vko}}$$

Δv on kahden pisteen välillä oleva

$$\text{vesihöyryn pitoisuusero } \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Z_v on samojen pisteiden välillä oleva rakenteen vesihöyrynvastus s/m

Kaavan mukaan vesihöyryn diffuusiovauhti kahden pisteen välillä voidaan laskea pisteiden välillä olevien vesihöyryn pitoisuuksien ero jaettuna samojen pisteiden välillä olevan rakenteen osan vesihöyryn vastuksella. Vesihöyryn kulkusuunta on aina alemman pitoisuuden suuntaan.

Jos rakenteessa on kondenssialue (kastepiste), on laskettava kahdessa osassa: kondenssialueelle kulkeutuva ja sieltä ulos kulkeutuva vesihöyry tietyssä aikayksikössä, esimerkiksi viikossa. Näiden erotus on tiivistyvän vesihöyryn määrä.

Edellisen esimerkin tilanteessa saadaan tulokseksi:

Kondenssialueelle tiivistyvän vesihöyryn määrä viikossa (g_1) on

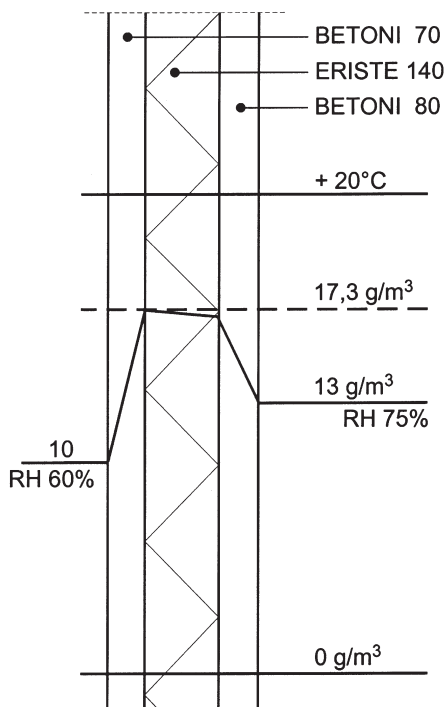
$$g_1 \approx 6 \cdot 10^5 \frac{86 - 2,4}{(120 + 11) \cdot 10^3} \approx 28,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{vko}}$$

Kondenssialueelta poistuvan vesihöyryn määrä viikossa (g_2) on

$$g_2 \approx 6 \cdot 10^5 \frac{2,4 - 2,0}{10^5 \cdot 10^3} \approx 2,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{vko}}$$

Lopullinen tiivistyvän kosteuden määrä viikossa (g) on

$$g \approx 28,4 - 2,3 \approx 26,1 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{vko}}$$



Kuva 4. Sandwich-elementin toiminta kesäolosuhteissa.

Jotta voidaan arvioida esimerkin mukaisen sandwich-elementin toimintaa pidemmällä aikavälillä on taulukkoon 7 laskettu yhden viikon tilanne kesällä. Lähtökohtana on, että kastepisteeseen on talvikautena viikon aikana kertynyt vettä niin, että kastepiste muodostuu kosteuslähteeksi. Olosuhteitten lähtöarvojen perustelu löytyy mm. vuoden 2002 kalenterin artikkelista (ss. 479...483).

Kuvassa 4 on esitetty taulukon tulokset.

Tällä kertaa kosteus kulkee kondenssialueelta sekä sisään että ulos. Kosteuden siirtymismäärät kesäviikon aikana ovat.

$$\text{Sisäänpäin } g_s \approx 6 \cdot 10^5 \frac{17,3 - 13}{(11 + 120) \cdot 10^3}$$

$$\approx 19,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{vko}}$$

$$\text{Ulospäin } g_u \approx 6 \cdot 10^5 \frac{17,3 - 10}{10^5 \cdot 10^3} \approx 41,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{vko}}$$

Taulukko 7. Sandwich-elementin toiminta kesällä.

Materiaalikerros	d mm	R m ² °C W	%	t °C	v _k g/m ³	Z _v 10 ³ s/m	v g/m ³	RH %	Korj. RH %
Sisäilma			0	+ 20	17,3		13,0	75	50
Sisäpinta		0,13	4	+ 20	17,3		13,0	75	50
Betoni	80	0,05	6	+ 20	17,3	120	17,0	98	34
Eriste	140	2,80	96	+ 20	17,3	11	17,3	100	100
Betoni, ulkopinta	70	0,04	98	+ 20	17,3	105	10,0	60	90
Ulkoilma		0,07	100	+ 20	17,3		10,0	60	90
Yhteensä		3,09							

Yhteensä kuivumista tapahtuu 19,7 + 41,7
= 61,4 $\frac{g}{m^2 vko}$ kesäaikana.

Rakenteen kuivumiskyky kesäaikana on noin 2,4-kertainen talven vastaavan pituiseen tiivistymisjaksoon verrattuna. Tämän perusteella sandwich-elementtiä voidaan pitää perusratkaisultaan kosteusteknisesti toimivana. Tämän tyyppisen elementin toimivuus on voitu todeta myös käytännössä, koska Suomessa on kokeumuksia näistä rakenteista jo yli 30 vuoden ajalta. Tuuletusurat ja uusimpien ratkaisujen tuuletusraot vain parantavat tilannetta.

Lämpö- ja kosteustekniset rasitukset rakenteisiin

Ulkoilman ominaisuudet

Ulkoilma on usein rakennuksen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan lähtökohta. Seuraavassa taulukossa on esitetty kuukausittaiset ilman lämpötilan, kosteussisällön ja suhteellisen kosteuden keskimääräiset arvot kolmella eri paikkakunnalla.

On luonnollista, että eri vuodenaikoina saatavaa olla jopa viikkojen jaksoja, jotka poikkeavat ankarampaan suuntaan taulukon keskimääräi-

Taulukko 8. Ulkoilman ominaisuuksia eri paikkakunnilla /1/.

	Helsinki			Jyväskylä			Sodankylä		
	t °C	v g/m ³	RH %	t °C	v g/m ³	RH %	t °C	v g/m ³	RH %
I	-6,1	2,69	88	-8,8	2,17	89	-13,5	1,36	85
II	-6,6	2,55	87	-8,7	2,14	87	-13,5	1,32	83
III	-3,5	3,07	82	-4,8	2,74	81	-8,9	1,94	80
IV	2,6	4,42	76	2,0	4,19	75	-2,2	3,01	73
V	8,9	5,82	66	8,7	5,92	68	4,8	4,52	67
VI	14,0	7,74	64	13,9	7,82	65	11,3	6,67	65
VII	17,2	10,41	71	16,9	10,37	72	14,7	8,72	69
VIII	16,0	10,65	78	15,0	10,29	80	12,0	8,35	78
IX	11,1	8,51	84	9,8	8,03	86	6,2	6,22	84
X	5,4	6,04	86	3,8	5,56	88	-0,5	4,12	88
XI	1,0	4,64	89	-0,8	4,17	91	-5,8	2,79	89
XII	-2,6	3,57	89	-5,0	3,00	90	-9,8	1,99	89

sistä arvoista. Siksi näissäkin esimerkeissä on laskelmissa otaksuttu tavanomaista ankarammat olosuhteet.

Taulukosta voidaan päätellä, että kosteussisältö vaihtelee karkeasti talven arvon 2 g/m^3 ja kesän arvon 10 g/m^3 välillä. Etelässä on ilmassa suurempi kosteussisältö kuin pohjoisessa. Suhteellinen kosteus vaihtelee kesän noin 60 % arvosta talven noin 90 % arvoon. Siten Suomen ulkoilma on suhteellisella kosteudella mitattuna varsin kosteaa ja toisaalta vaihtelua on verrattain vähän.

Maaperän käyttäytyminen

Rakennuksen vaipan yksi keskeinen osa on maata vasten, joko maanvarainen tai ryömintätällainen. Tällöin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on pohdittava sisätilan ja maaperän välillä. Viimeaikaisissa tutkimuksissa (TTY ja muut) on tehty aiemmasta käsityksestä poikkeavia havaintoja rakennusten alla olevan maaperän käyttäytymisestä. Uudet tulokset vaikuttavat myös varsinkin maanvaraisten alapohjien pitkän aikavälin toimintaan. Seuraavat olosuhteet ovat käyttökelpoiset lähtökohdat maaperän ominaisuuksiksi maanvaraisen laatan tapauksessa.

Rakennuksen alla olevan maaperän huokosilman suhteellinen kosteus on lähes kaikissa tapauksissa RH = 100 %. Tämä on hyvä ottaa lähtökohdaksi. Maaperän kostuminen (ei kastuminen) tapahtuu useista eri syistä. Kosteuden kulkusuunta määräytyy maaperän lämpötilan ja sisäilman suhteellisen kosteuden perusteella. Useassa tapauksessa, varsinkin talvella, kosteus kulkee alhaalta ylöspäin ja vastaavasti kesällä vastakkaiseen suuntaan.

Taulukko 9. Rakennusten sisäilman ominaisuuksia.

		Δv g/m^3	Δv_{max}^1 g/m^3	RH %	RH_{max} %
Asunnot ja toimistot, ei kostutusta t on 20...24 °C	Talvi	2...4	7	18...35	55
	Kesä	1...3		50...75	85 ²
Rakennukset, joissa kostutus talvella, toimistot, kirjapainot, museot, yms. t on 20...24 °C	Talvi	5...11		40...60	
	Kesä	1...3		50...75	
Uimahallit ³ t on 22...26	Talvi	6...13		40...60	80 ⁴
	Kesä	5...9		60...80	

¹ Joissakin tapauksissa on asuinrakennuksissa todettu poikkeuksellisen suuria kosteuslisä. Syitä taustalla on usein suuri veden käyttö yhdistettynä heikosti toimivaan ilmanvaihtoon.

² Sisäilman suhteellinen kosteus voi nousta korkealle myös siksi, että ulkoilma on sateiden vuoksi sekä lämmintä että kosteaa, jolloin ulkoilman kosteussisältö on poikkeuksellisen korkea. Näin tapahtuu aika ajoin.

³ Uimahallien tärkein kosteuslähde on yleensä uima-allas, jonka pinnasta haihtuu kosteutta ilmaan. Altaiden lämpötilat ovat nousseet viime aikoina, joten kosteusrasituskin on kasvanut. Tämä asettaa ilmanvaihdon hyvän toimivuuden yhdeksi tärkeimmistä tekijöistä uimahallissa. Toinen tärkeä tekijä on estää kostean ja lämpimän ilman vuotaminen yläpohjaan, jossa ilman kosteus tiivistyy ja myös jäätyy talvella lämpötilan laskun vuoksi.

⁴ Suurimpien suhteellisten kosteuksien taustalta löytyy lähes aina heikosti toimiva ilmanvaihto.

Maaperän lämpötila alapohjaeristeen alla rakennuksen keskellä seuraa vain pienellä viiveellä sisälämpötilan muutoksia. Käytännössä rakennusten keskialueilla maan lämpötila on vain vähän alempi (2...3 °C) kuin sisälämpötila. Ero on vain vähän suurempi, jos eristekerros on paksumpi. Rakennuksen reuna-alueilla maaperän lämpötilaan vaikuttaa huomattavasti enemmän ulkoilman lämpötila, mikä on luonnollista.

Maaperän käyttäytymistä ja alapohjan suunnitteluperiaatteita on laajemmin käsitelty lähteissä /2/ ja /3/. Alapohjarakenteiden toimintaan palataan myöhemmissä Rakentajain kalenterin artikkeleissa.

Sisäilman ominaisuudet erilaisissa rakennuksissa

Rakennuksen vaipan osien lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta on yksi keskeisimpiä tekijöitä kosteuslisä, joka aiheutuu rakennuksen käytöstä tai muista syistä. Ilmanvaihdolla otetaan ulkoilmaa sisään. Sisäilman kosteussisältö kasvaa kosteuslisän johdosta. Rakenteiden kosteustekninen riskialttius on sitä pienempi mitä pienempi on kosteuslisä. Monissa rakennuksissa käyttö edellyttää tavanomaista lämpimämpää ja kosteampaa sisäilmaa, mikä aiheuttaa rakenteiden suunnittelulle ja toteutukselle erityisiä vaatimuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi uimahallit, kirjapainot, taidemuseot yms., joissa on joko suuria kosteuslähdeitä tai sisäilmaa on muutoin kostutettava. Seuraavassa on käsitelty muutamien tavanomaisten ja erikoisrakennusten sisäilman ominaisuuksia, jotka ovat lähtökohdانا lämpö- ja kosteusteknisille tarkastelulle.

Taulukon tiedot ovat vain suuntaa antavia. Ääritilanteissa saattaa olla myös rasittavampia olosuhteita, mutta tällöin on yleensä muita syitä korkeisiin arvoihin. Yksi merkittävä kosteusrasitusta kasvattava tekijä on heikosti toimiva ilmanvaihto.

Taulukossa Δv tarkoittaa kosteuslisää, joka aiheutuu käytöstä, yms. ulkoilmaan.

Ilmanvaihdon vaikutus kosteuslisään

Seuraava esimerkki kuvaa hyvin ilmanvaihdon merkitystä kosteuslisän pienentämiseksi.

Oletetaan, että huoneiston tilavuus on 300 m^3 .

Perhe tuottaa sisäilmaan kosteutta asumistotumustensa mukaan. Kosteuslähteitä ovat ihmiset itse, ruoanlaitto, tiskaus, pyykinpesu, suihkun käyttö yms. Neljä-viisihenkilinen perhe tuottaa vuorokauden aikana kosteutta sisäilmaan jopa 12 l ($12\,000 \text{ g}$). Tämä voidaan perustella helposti.

Otaksutaan, että huoneiston ilmanvaihdon määrä on määräysten mukainen. Tällöin ilma vaihtuu karkeasti kerran kahdessa tunnissa eli yhteensä 12 kertaa vuorokaudessa. Jokaista ilmanvaihtoerää rasitetaan vesimäärällä 1 l (1000 g). Tällöin kosteuslisä on $3,3 \text{ g/m}^3$ ($1000/300$). Tämä kosteuslisä on taulukon 9 mukainen.

Otaksutaan seuraavaksi, että ilma vaihtuu puolet edellisestä eli yhteensä kuusi kertaa vuorokaudessa. Tällöin kuhunkin ilmanvaihtoerään aiheutuu kosteusrasitusta yhteensä 2 l ($12\,000 \text{ g}$). Kosteuslisä on siten $6,6 \text{ g/m}^3$, joka on jo hyvin ankara rasitus rakennukselle nimenomaan talviolosuhteissa. kesällä kosteuslisä on pienempi, koska ilmanvaihtoa tapahtuu avoimien ikkunoiden kautta eikä suurikaan kosteuslisä ole haitaksi rakenteille.

Yhteenvetona voidaan todeta, että toimiva ilmanvaihto on yksi keskeisimmistä tekijöistä rakennusten kosteuslisän pienentämiseksi ja samalla rakennuksen kosteusteknisen toiminnan parantamiseksi.

Rakennusaikainen kosteus ja kosteusvaurio kosteuslähteenä

Moniin rakennusmateriaaleihin kuten betoniin, tiilimuuraukseen ja massiiviseen puuhun jää usein rakentamisen jälkeen kosteutta, joka poistuu sieltä ajan kanssa. Tämä kosteus voi aiheuttaa merkittäviä kosteuslisä sekä myös rakenteiden kosteustekniseen toimintaan uudenlaisia tarkastelunäkökulmia.

Esimerkiksi betonilaataan saattaa tekemisen jälkeen jäädä ylimääräistä vettä useita litroja neliölle. Vesi poistuu diffuusiolla erittäin hitaasti alemman pitoisuuden suuntaan. Jos eristeen alla on käytetty muovikalvoa, suuri osa poistuvasta vedestä kulkeutuu ja tiivistyy muovin päälle. Vasta vuosien kuluttua kulkusuunta vaihtuu muovin päältä sisätilaan päin ja lopullinen kuivuminen voi tapahtua vasta erittäin pitkän ajan kuluttua. Alapohjan erittäin monimutkaiseen kosteustekniseen käyttäytymiseen palataan tulevan vuoden kalenterin artikkelissa.

Samoin voi esimerkiksi rakenteiden sisällä oleva putkivuoto muodostua merkittäväksi kosteuslähteeksi. Rakenteiden kosteustekninen käyttäytyminen voi olla täysin erilainen kuin on alun perin otaksuttu. Jotkin rakennetyypit kestävät ylimääräistä kosteusrasitusta paremmin kuin toiset. Kuitenkin on siten, että kaikille rakenteille on kosteudesta enemmän haittaa kuin hyötyä. Tämän olemme viime vuosien kokeuksista oppineet.

LÄHTEET

- /1/ Björkholtz, D., Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy. Helsinki 1997.
- /2/ Leivo, V., Rantala, J., Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. TTKK 2000. Talonrakennustekniikan tutkimusraportti nro 106.
- /3/ Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. TTKK 2002. Talonrakennustekniikan tutkimusraportti nro 120.