

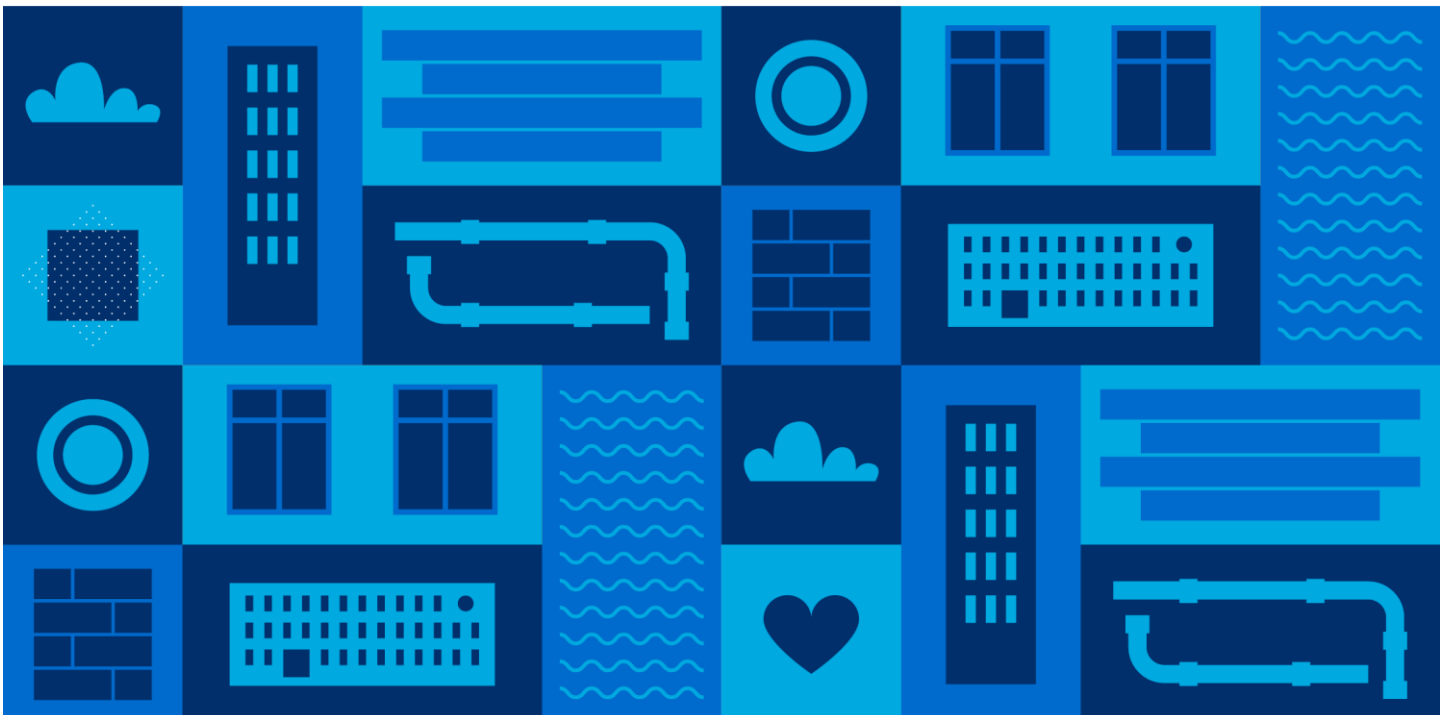


**TERVEET
TILAT 2028**

Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille

Kosteus

Rafnet 2020 -oppimateriaalin teoriaosan osio K (Kosteus)



Terveet tilat 2028 -ohjelma
Ympäristöministeriö

Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille

Kosteus

Rafnet 2020 -oppimateriaalin teoriaosan osio K (Kosteus)

LAB-
ammattikorkeakoulu

Oulun
ammattikorkeakoulu

Lapin
ammattikorkeakoulu

Karelia
ammattikorkeakoulu

Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Savonia
ammattikorkeakoulu

Jyväskylän
ammattikorkeakoulu

Hämeen
ammattikorkeakoulu

ALKUSANAT

Tämä oppimateriaali on osa RAFNET 2020 -projektin tuottamaa rakennusfysiikan oppimateriaalia, joka on suunnattu lähinnä ammattikorkeakoulujen rakennusinsinööriopiskelijoille ja jo alalla toimiville rakennusinsinööreille. Tavoitteena on antaa pohja rakenteiden rakennusfysikaaliseen suunnitteluun ja toimivaan rakenteiden toteutukseen. Oppimateriaalia voidaan käyttää soveltuvin osin myös rakennusmestari- ja rakennusarkkitehtikoulutuksen rakennusfysiikan opinnoissa.

RAFNET-oppimateriaali koostuu kirjallisesta teoriaosasta ja oheismateriaalista. Teoriaosa jakautuu viiteen osioon:

V	Virtaukset
L	Lämpö
K	Kosteus
S	Sisäilma
M	Mittaukset

Teoriaosan osioissa V, L ja K tarkastellaan rakennusfysiikan perusteorioita rakenteiden ja eri rakenneosien rakennusfysikaalisen toiminnan perusteita ja niihin liittyviä fysiikan perusilmiöitä lämpö- ja kosteusteknisen suunnittelun näkökulmasta. Apuna käytetään runsaasti kuvia ja laskentaesimerkkejä. Sisäilma-osiossa annetaan perustieto rakennuksen sisäilmaan vaikuttavista tekijöistä ja sisäilmaston laatukriteereistä. Mittausosiossa tarkastellaan lämpöön ja kosteuteen sekä ilmavirtauksiin liittyviä mittauksia. Oppimateriaalin sisältö ja vaatimustaso on suunniteltu vastaamaan vaativan luokan mukaista insinööripintojen rakennusfysiikan perusjakson vaatimuksia (5 op). Vaadittava kokonaislaajuus saavutetaan teoriaosaan ja siihen liittyvään oheismateriaaliin pohjautuvilla harjoitustehtävillä ja tätä oppimateriaalia täydentävillä oppimateriaaleilla, jotka käsittelevät rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, rakennusten kosteudenhallintaa hankkeen eri vaiheissa sekä äänitekniikan perusteita. Rakennusfysiikan opintojen osana on käsiteltävä myös Ympäristöministeriön laatimat asetukset ja ohjeistukset, jotka liittyvät rakennusten energiatehokkuuteen, rakennusten kosteustekniseen toimivuuteen ja rakennusten ääniympäristöön.

RAFNET 2020 -materiaali on laadittu siten, että sitä voi käyttää myös verkkopohjaisten rakennusfysiikan kurssien ja opintojaksojen oppimateriaalina. Sitä voidaan soveltaa myös rakennusfysiikan täydennyskoulutuksessa. RAFNET-materiaali ei ole varsinainen suunnitteluohje eikä määräyskokoelma. Se pyrkii auttamaan opiskelijaa ymmärtämään rakennusfysiikkaa ja soveltamaan sitä rakennusfysikaalisessa suunnittelussa ja rakenteiden toteutuksessa hyödyntäen Suomessa käytössä olevia rakennusfysiikkaan liittyviä asetuksia ja ohjeita.

Tässä kosteusosiossa tarkastellaan rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liittyvät peruskäsitteet ja perusteoria. Laskentaesimerkeissä rajoitetaan pitkälti jatkuvuustilataarkasteluihin ja niillä pyritään valaisemaan eri tekijöiden vaikutusta rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Kosteusosion kappaleet 1–5 ja 7 on kirjoittanut Timo Lehtoviita ja kappaleen 6 Ensio Laine ja Timo Lehtoviita. Osion lopussa esitetyt laskentaesimerkit ovat tuottaneet Timo Lehtoviita ja Sanna Alitalo. Kosteusosion opiskelun tukena on oltava Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017) ja siihen liittyvät Ympäristöministeriön ohjeistukset sekä Ympäristöopas 2016.

RAFNET 2020 -materiaali on tuotettu yhteishankkeena usean eri ammattikorkeakoulun kanssa. Hankkeeseen ovat osallistuneet LAB-ammattikorkeakoulu, Savonia ammattikorkeakoulu, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Karelia ammattikorkeakoulu, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Oulun ammattikorkeakoulu, Lapin ammattikorkeakoulu ja Hämeen ammattikorkeakoulu. Hankkeen rahoittajana hankeosallistujien lisäksi on toiminut Ympäristöministeriö. Hanke on osa Terveet tilat 2028 -ohjelmaa.

Kiitämme kaikkia hankkeissa mukana olleita, rahoittajia sekä tahoja, jotka antoivat mahdollisuuden käyttää omien julkaisujensa osia osana tuotettua materiaalia.

Tekijät

Sisällysluettelo

Merkinnät.....	7
K.1 Johdanto	8
K.2 Peruskäsitteet.....	9
K.3 Veden olomuodot ja olomuotojen muutokset.....	12
K.4 Kosteuslähteet ja kosteusrasitukset.....	19
K.4.1 Rakennuksien ja rakenteiden kosteuslähteet.....	19
K.4.2 Ulkoilman vesihöyry	19
K.4.3 Sisäilman vesihöyry.....	21
K.4.4 Sade	28
K.4.5 Rakennuskosteus.....	31
K.4.6 Maaperän kosteus.....	32
K.4.7 Vesivuodot putkista ja laitteista	32
K.5 Kosteuden siirtyminen.....	33
K.5.1 Veden kapillaarinen siirtyminen.....	33
K.5.2 Veden painovoimainen siirtyminen.....	38
K.5.3 Tuulenpaineen aiheuttama veden siirtyminen.....	39
K.5.4 Vesihöyryn diffuusio	40
K.5.5 Vesihöyryn konvektio	47
K.5.6 Kosteuden siirtymisen numeerinen laskenta.....	51
K.6 Materiaalien kosteuskäyttäytyminen	52
K.6.1 Yleistä	52
K.6.2 Veden sitoutumismuodot materiaalissa.....	52
K.6.3 Kosteuspitoisuuden määrittäminen	53
K.6.4 Hygroskooppisuus.....	54
K.6.5 Materiaalien tasapainokosteuskäyrät.....	54
K.6.6 Rakennuskosteus.....	55
K.6.7 Materiaalien kosteuskapasiteetti	56
K.6.8 Kastuminen ja kuivuminen	57
K.6.9 Betonirakenteiden kuivumisen arviointi.....	64

K.7	Kosteusvauriot ja kosteuden aiheuttamat haitat	68
K.7.1	Biologinen turmeltuminen.....	68
K.7.2	Kemialliset vaikutukset.....	77
K.7.3	Terveysvaikutukset.....	77
K.7.4	Muut vaikutukset	77
K.8	Laskentaesimerkit	78
	Kirjallisuus ja lähteet	83

Merkinnät

ν	ilman vesihöyrypitoisuus	g/m^3
δ_p	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys	$\text{kg m} / \text{m}^2 \text{ s Pa} = \text{s}$
δ_v	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys	m^2/s
p_v	vesihöyryn osapaine	Pa
Z_p	kerroksen vesihöyrynvastus	$\text{m}^2\text{sPa/kg}$
Z_v	kerroksen vesihöyrynvastus	s/m
w	materiaalin vesipitoisuus suhteessa tilavuuteen	kg/m^3
RH	suhteellinen kosteus	%
ϕ	suhteellinen kosteus	-
B	veden tunkeutumiskerroin	$\text{m/s}^{0.5}$
g	kosteusvirran tiheys	$\text{kg/m}^2\text{s}$
G	kosteusvirran määrä	kg/m^2
G	kosteustuotto	g/h
n	ilmanvaihtoluku	1/h

K.1 Johdanto

Kosteudella tarkoitetaan vettä eri olomuodoissaan. Näitä ovat

- jää
- vesi
- vesihöyry

Kosteuden hallinta rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa sekä rakennuksen käyttöaikana on erittäin tärkeää, koska hallitsematon kosteus voi aiheuttaa vakavia vaurioita rakennusmateriaaleille, rakenteille sekä terveyshaittoja rakennuksen käyttäjille. Myös korjausrakentamisessa on kosteuden ja kosteusvaurioiden hallinta olennaista, usein tärkeimpänä tehtävänä on kosteusvaurioiden syiden selvittäminen.

Kosteuden hallinta rakentamisessa edellyttää seuraavien osatekijöiden osaamista:

- Veden olomuodot ja olomuodon muutokset
- Kosteuslähteet ja kosteusrasitukset
- Kosteuden siirtymismekanismit
- Rakennusmateriaalinen kosteustekninen käyttäytyminen
- Kosteusvauriot ja niiden syntymekanismit
- Kosteuden torjunta ja kosteuden eristäminen
- Kosteuden ja lämpötilan välinen yhteys
- Kosteustekniset mittaukset

Kosteuden hallinta edellyttää aina myös muiden rakennusfysiikan perusteiden kuten lämmön ja ilmavirtausten hallintaa.

Rakennuksen suunnitteluprosessissa kosteusteknistä osaamista tarvitaan rakennussuunnittelussa, rakenteiden suunnittelussa ja pohjarakenteiden suunnittelussa. Kosteus on otettava huomioon myös rakennuksen LVI-suunnittelussa.

Rakennuksen toteuttamisvaiheessa kosteus on olennainen tekijä. Rakenteiden on annettava kuivua riittävästi ennen lopullista pinnoittamista ja rakentamisen aiheuttamat lisäkosteuslähteet ja rakennuskosteus on otettava huomioon.

K.2 Peruskäsitteet

Tässä esitetyt peruskäsitteet on koottu pääosin Ympäristöministeriön asetuksesta, joka käsittelee rakennusten kosteusteknistä toimivuutta (782/2017).

Muut peruskäsitteet on merkitty kursivilla.

Höyrynsulku

Ainekerros, joka estää haittaa aiheuttavan vesihöyryn diffuusion rakenteeseen tai rakenteessa.

Hygroskooppinen tasapainokosteus

Aineen kosteuspitoisuus jatkuvuustilassa ympäristön tietyssä lämpötilassa ja vesihöyryn osapaineessa.

Ilmansulku

Ainekerros, joka estää haittaa aiheuttavan ilmavirtauksen rakenteen läpi puolelta toiselle.

Kapillaarinen tasapainokosteus

Aineen kosteuspitoisuus tasapainotilassa, kun aineen ja sitä ympäröivän aineen huokosalipaineen ero on tasoittunut.

Kapillaarivirtaus

Huokosalipaineen paikallisten erojen aiheuttamaa nesteen siirtyminen huokoisessa aineessa.

Kosteudeneristys

Ainekerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen kosteuden siirtyminen kapillaarivirtauksena tai vesihöyryn diffuusiona rakenteeseen tai rakenteessa.

Kosteus

Kemiallisesti sitoutumaton vesi kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa.

Kosteuspitoisuus

Kappaleessa olevan kosteuden massan tai tilavuuden suhde kappaleen kuivaan massaan tai tilavuuteen.

Märkätila

Huonetilaa, joka ei ole asuinhuone ja jonka lattiapinta on tilan käyttötarkoituksen vuoksi vedelle alttiina ja jonka seinäpinnoille voi normaalissa käyttötilanteessa roiskua tai tiivistyä vettä.

Rakennuskosteus

Rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusmateriaaleihin joutunut rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka on poistuttava.

Ryömintätila

Rakennuksen alapohjan, perusmuurin ja perusmaan rajoittamaa tarkoituksellisesti järjestettyä ulkoilmaan tuulettuva ilmatila.

Tekninen käyttöikä

Aikaa, jonka rakenne tai rakennusosa teknisesti kestä.

Tuuletusaukko tai -rako

Ulkopuolelta rakenteen tuuletusväliin tai -tilaan johtavaa tuuletusilmavirran sisäänmeno- tai poistumisaukkoa tai -rako.

Tuuletustilalla

Rakenteessa olevaa yhtenäinen ilmatila, jonka kautta rakennetta tuulettava ilmavirtaus kulkee ja jonka korkeus tai paksuus ilmavirran suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on yli 0,2 metriä.

Tuuletusväli

Rakenteessa olevaa yhtenäinen ilmapäli, jonka kautta rakennetta tuulettava ilmavirtaus kulkee ja jonka korkeus tai paksuus ilmavirran suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on enintään 0,2 metriä.

Vedeneristys

Ainekerros, joka kestää jatkuvaa kastumista ja estää nestemäisen veden haitallisen tunkeutumisen rakenteeseen.

Vedenpaineeneristys

Ainekerros, joka saumoineen ja tukirakenteineen kestää rakenteelle asetetun jatkuvan vedenpainevaatimuksen ja estää veden haitallisen tunkeutumisen rakenteeseen vedenpaineen vaikutuksesta.

Vesihöyryn diffuusio

Kaasuseoksessa (esimerkiksi ilma) vakiokokonaispaineessa tapahtuva vesimolekyylien liike, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksen höyrypitoisuus- tai höyryn osapaine-eroja.

Vesihöyryn konvektio

Kaasuseoksen sisältämän vesihöyryn siirtyminen kaasuseoksen mukana sen liikkuesssa kokonaispaine-eron vaikutuksesta.

Vesihöyrynvastus

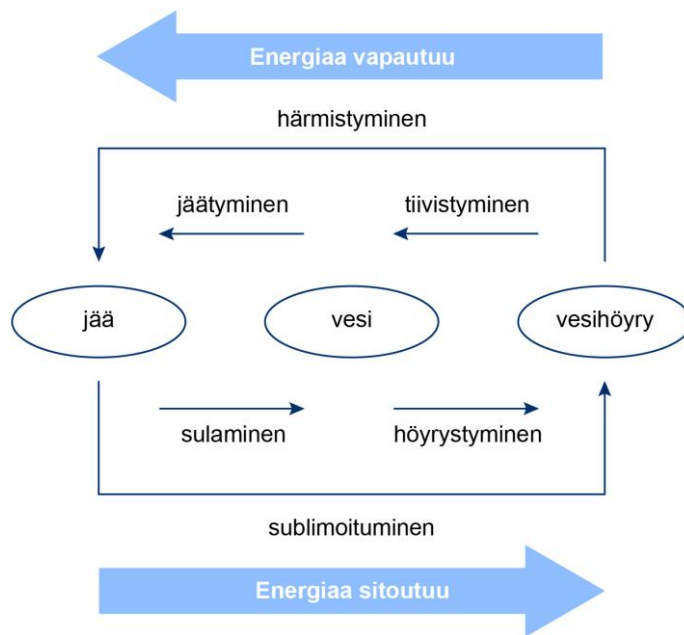
Tasapaksun ainekerroksen tai tällaisista muodostuvan tasapaksun kerroksellisen rakenteen pinnoilla eri puolilla vallitsevien vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden eron ja ainekerroksen tai rakenteen läpi jatkuvuustilassa pinta-alayksikköä kohti diffusoituvan vesihöyryvirran suhde.

Vesikatto

Katteen ja mahdollisen aluskatteen ja näitä välittömästi kannattavien rakenneosien muodostamaa rakenne.

K.3 Veden olomuodot ja olomuotojen muutokset

Veden olomuotoja ovat kiinteä jää tai lumi, nestemäinen vesi ja kaasumainen vesihöyry. Veden muuttaessa olomuotoaan energiaa sitoutuu tai vapautuu. Jään sulaessa vedeksi ja veden höyrystyessä vesihöyryksi tarvitaan energiaa. Kiinteä aine voi myös suoraan muuttua kaasuksi, eli aine voi sublimoitua. Myös tällöin tarvitaan energiaa. Vesihöyryn tiivistyessä vedeksi ja veden jäätyessä jääksi vapautuu energiaa. Vesihöyry voi myös suoraan muuttua kiinteäksi jääksi härmistymällä, jolloin myös vapautuu energiaa. Kuvassa K.3.1 on esitetty veden olomuotojen muutokset ja energian sitoutuminen sekä vapautuminen.



Kuva K.3.1. Veden olomuodot ja niiden muutokset.

Vesi muuttuu vesihöyryksi joko veden kiehuessa tai suoraan veden pinnalta haihtumalla. Haihtumisen määrään vaikuttaa ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuus. Mitä pienempi on ilman vesihöyrypitoisuus, sitä tehokkaampaa on haihtuminen.

Ilman vesihöyrypitoisuutta kuvataan joko todellisena vesihöyrypitoisuutena v (g/m^3) tai suhteellisenä kosteutena RH (%).

Suhteellinen kosteus RH (%) määritellään

$$RH = \frac{v}{v_k} 100\% \quad (\text{K.3.1})$$

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan siis ilmassa olevan todellisen vesihöyrypitoisuuden v suhdetta ilman kyllästysvesihöyrypitoisuuteen v_k .

Suhteellinen kosteus voidaan ilmoittaa myös suhdelukuna

$$\phi = \frac{v}{v_k} \quad (\text{K.3.2})$$

Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus on riippuvainen lämpötilasta. Mitä korkeampi on ilman lämpötila, sitä korkeampi on ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus.

Kyllästysvesihöyrypitoisuuden riippuvuutta lämpötilasta voidaan kuvata kokeellisilla matemaattisilla funktioilla.

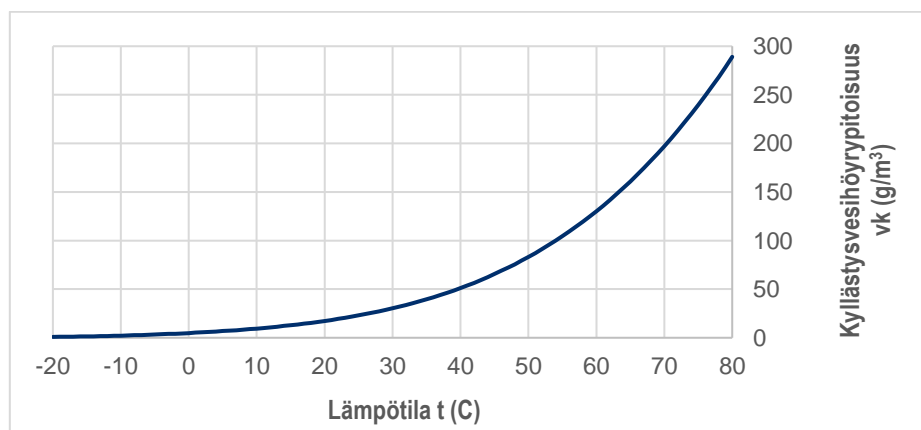
Lämpötila-alueella $-20\text{ }^\circ\text{C} \dots +80\text{ }^\circ\text{C}$ pätee lauseke

$$v_k = 4,85 + 3,47(t/10) + 0,945(t/10)^2 + 0,158(t/10)^3 + 0,0281(t/10)^4 \quad (\text{K.3.3})$$

v_k = ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus (g/m^3)

t = ilman lämpötila ($^\circ\text{C}$)

Kuvassa K.3.2 on esitetty kaavan (K.3.3) mukaan ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona.



Kuva K.3.2. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona.

Ilman vesihöyrypitoisuutta kuvataan myös ilman vesihöyryn osapaineen p_v (Pa) avulla. Vesihöyrypitoisuuden ja vastaavan vesihöyryn osapaineen välillä vallitsee yhteys

$$p_v = 461,4 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot v \quad (\text{K.3.4})$$

T = ilman lämpötila (K)

v = ilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)

Esimerkki K.3.1

Ilman lämpötila on $+22\text{ }^\circ\text{C}$ ja vesihöyrypitoisuus $6\text{ g}/\text{m}^3$. Mikä on ilman suhteellinen kosteus?

Mikä on vastaava vesihöyryn osapaine?

Ratkaisu

Lämpötila $t = +22\text{ }^\circ\text{C}$, $T = 273 + 22 = 295\text{ K}$

Sijoitetaan lämpötila t kaavaan

$$v_k = 4,85 + 3,47(t/10) + 0,945(t/10)^2 + 0,158(t/10)^3 + 0,0281(t/10)^4$$

Saadaan

$$\begin{aligned} v_k &= 4,85 + 3,47(22/10) + 0,945(22/10)^2 + 0,158(22/10)^3 + 0,0281(22/10)^4 \\ &= 19,4\text{ g}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Suhteellinen kosteus

$$RH = \frac{v}{v_k} 100\%$$

$$RH = \frac{6\text{ g}/\text{m}^3}{19,4\text{ g}/\text{m}^3} \cdot 100\% = 31\%$$

Vastaava vesihöyryn osapaine

$$p_v = 461,4 \cdot 10^{-3} \cdot 295 \cdot 6 = 817\text{ Pa}$$

Esimerkki K.3.2

Ilman suhteellinen kosteus on 90 % ja lämpötila

-20 °C

+20 °C

Mitkä ovat vastaavat ilman vesihöyrypitoisuudet ja vesihöyryn osapaineet?

Ratkaisu

Lämpötilan ollessa -20 °C saadaan sisäilman kyllästysvesihöyrypitoisuus kaavasta

$$v_k = 4,85 + 3,47(t/10) + 0,945(t/10)^2 + 0,158(t/10)^3 + 0,0281(t/10)^4$$

$$V_k = 0,88 \text{ g/m}^3$$

Ilman vesihöyrypitoisuus on siten $v = \phi v_k = 0,90 \cdot 0,88 \text{ g/m}^3 = 0,79 \text{ g/m}^3$

Vastaava vesihöyryn osapaine

$$p_v = 461,4 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 0,79 = 92 \text{ Pa}$$

Lämpötilan ollessa +20 °C on sisäilman kyllästysvesihöyrypitoisuus kaavan K.3.3 perusteella

$$v_k = 17,3 \text{ g/m}^3$$

Ilman vesihöyrypitoisuus on siten

$$v = \phi v_k = 0,90 \cdot 17,3 \text{ g/m}^3 = 15,6 \text{ g/m}^3$$

Vastaava vesihöyryn osapaine

$$p_v = 461,4 \cdot 10^{-3} \cdot 293 \cdot 15,6 = 2109 \text{ Pa}$$

Vesihöyryn kyllästysosapaine p_{vk} voidaan laskea kaavojen (K.3.3) ja (K.3.4) avulla tai kaavalla

$$p_{vk} = 101,325 \cdot 10^3 \cdot e^{(70,4347 - 7362,7/T + 6,95208 \cdot 10^{-3} \cdot T - 9 \cdot \ln T)} \quad (\text{K.3.5})$$

Esimerkki K.3.3

Ilman lämpötila on 22 astetta. Mikä on tätä lämpötilaa vastaava vesihöyryn kyllästysosapaine?

Ratkaisu

Lämpötila kelvinasteina $T = 273,15 + 22 = 293,15 \text{ K}$

Sijoitetaan lämpötila $T = 293,15 \text{ K}$ kaavaan

$$p_{vk} = 101,325 \cdot 10^3 \cdot e^{(70,4347 - 7362,7/T + 6,95208 \cdot 10^{-3} \cdot T - 9 \cdot \ln T)}$$

$$p_{vk} = 101,325 \cdot 10^3 \cdot e^{(70,4347 - 7362,7/293,15 + 6,95208 \cdot 10^{-3} \cdot 293,15 - 9 \cdot \ln 293,15)}$$

$$p_{vk} = 2643 \text{ Pa}$$

Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuuksia ja kyllästysosapaineita on myös taulukoitu eri kirjallisuuslähteissä. Taulukko K.3.1 perustuu kaavoihin K.3.3 ja K.3.4.

Taulukko K.3.1. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus ja kyllästysosapaine lämpötilan funktiona.

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

Kaavalla K.3.3 ei siis voi laskea kyllästysvesihöyrypitoisuuksia lämpötilan ollessa alle -20 astetta ja siksi taulukko K.3.1 ei kata kyseistä lämpötila-aluetta. Kirjallisuudesta löydettävien muiden lähteiden perusteella voidaan tällöin arvioida alle -20 asteen lämpötiloilla seuraavia kyllästysvesihöyrypitoisuusarvoja:

- Lämpötila -32 °C: Kyllästysvesihöyrypitoisuus $0,38$ g/m³
- Lämpötila -30 °C: Kyllästysvesihöyrypitoisuus $0,45$ g/m³
- Lämpötila -25 °C: Kyllästysvesihöyrypitoisuus $0,70$ g/m³

Jos käsinlaskennassa lämpötila ei tarkalleen ole juuri taulukossa tai edellä esitetystä luettelossa oleva lämpötila, voidaan vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus arvioida kohtuullisella tarkkuudella lineaarisen interpoloinnin avulla.

Kastepiste on lämpötila, jossa ilman vesihöyry tiivistyy vedeksi. Esimerkiksi, jos huonetilassa on paljon vesihöyryä, voi se tiivistyä vedeksi esimerkiksi riittävän viileään ikkunalasin sisäpintaan.

Esimerkki K.3.4

Sisätilan suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila $+20$ °C. Mikä on kastelämpötila?

Ratkaisu

Lämpötilaa 20 °C vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus on $17,3$ g/m³, joten ilman vesihöyrypitoisuus on $0,6 \cdot 17,3$ g/m³ = $10,4$ g/m³. Kyseinen vesihöyrypitoisuus vastaa $+11,5$ asteen kyllästysvesihöyrypitoisuutta, joten kastepistelämpötila on $+11,5$ astetta. Eli esimerkiksi, jos ikkunan sisäpinnan lämpötila on $+11,5$ astetta, vesihöyry tiivistyy vedeksi ikkunan sisäpinnassa.

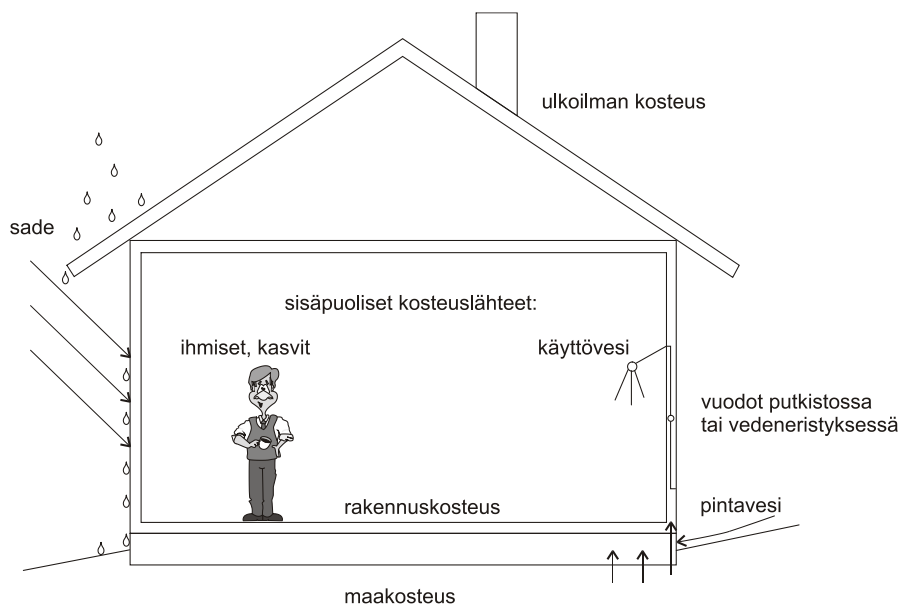
K.4 Kosteuslähteet ja kosteusrasitukset

K.4.1 Rakennuksien ja rakenteiden kosteuslähteet

Rakennuksen ja rakenteiden kosteuslähteitä ja kosteusrasituksia ovat:

- Ulkoilman vesihöyry
- Sisäpuoliset kosteuslähteet, kuten ihmiset, käyttövesi, kasvit, teollisuusprosessien tuottama kosteus, kuivuvien materiaalien tuottama kosteus jne.
- Sade
- Rakennuskosteus
- Maaperän kosteus
- Vesivuodot putkista ja laitteista

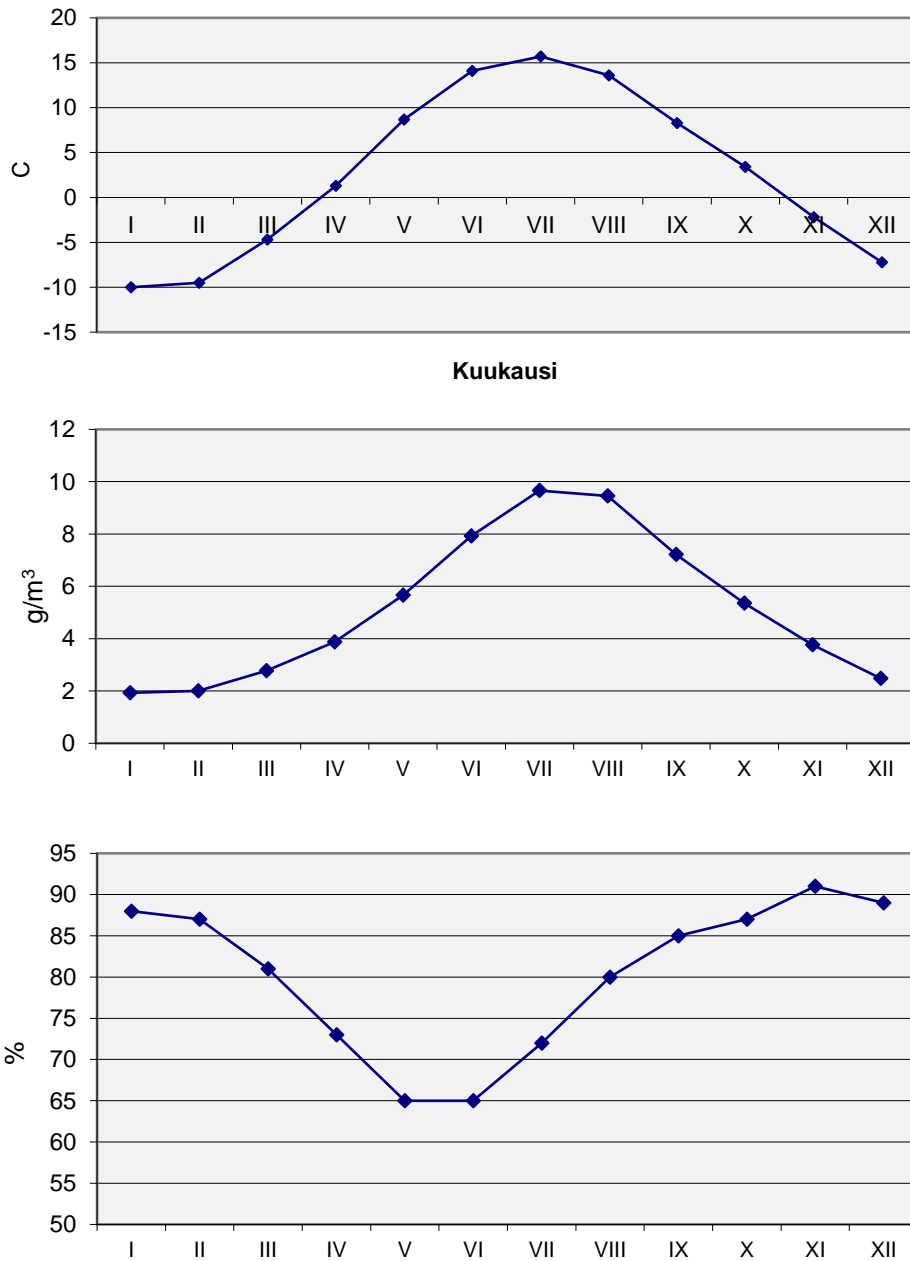
Rakennuksen ja rakenteiden kosteuslähteet on esitetty kuvassa K.4.1.



Kuva K.4.1. Rakennuksen ja rakenteiden kosteuslähteet.

K.4.2 Ulkoilman vesihöyry

Ulkoilman vesihöyrypitoisuus vaihtelee paljon vuoden aikana. Suomessa ulkoilman vesihöyrypitoisuus on suurimmillaan kesä kautena ja pienimmillään talvella. Kuvassa K.4.2 on esitetty keskimääräinen vuotuinen ulkoilman lämpötilan, ilman vesihöyrypitoisuuden sekä suhteellisen kosteuden vaihtelu Jyväskylässä. Eri paikkakuntien väliset erot Suomessa ovat melko pieniä.



Kuva K.4.2. Ulkoilman lämpötilän, vesihöyrypitoisuuden ja suhteellisen kosteuden vaihtelu Jyväskylässä yhden vuoden aikana.

Suhteellinen kosteus on alhaisimmillaan alkukesänä. Absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on korkeimmillaan tasolla 9,5 g/m³ heinä-elokuussa ja alhaisimmillaan tasolla 2 g/m³ tammi-helmikuussa.

K.4.3 Sisäilman vesihöyry

Sisäilman vesihöyrypitoisuuteen vaikuttavat ulkoilman vesihöyrypitoisuus, sisätilan kosteuslähteet, sisätilan ilmanvaihto, poistuvan vesihöyryn määrä rakenteiden läpi sekä vesihöyryn sitoutuminen rakennusaineisiin. Kahden viimeksi mainitun tekijän merkitys on yleensä melko pieni.

Sisäilman vesihöyryn riippuvuutta merkittävimmistä tekijöistä voidaan jatkuvuustilassa kuvata sisäilman vesihöyryn taseyhtälöllä:

$$v_s = v_u + \frac{G}{nV} \quad (\text{K.4.1})$$

v_s = sisäilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)

v_u = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)

G = sisätilan kosteustuotto (g/h)

n = sisätilan ilmanvaihtoluku ($1/\text{h}$)

V = sisätilan tilavuus (m^3)

Ajanhetkellä t voidaan sisäilman vesihöyryn määrää laskea lausekkeella

$$v_s = v_u + \frac{G}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad (\text{K.4.2})$$

Kaavasta saadaan kaavan K.4.1 mukainen jatkuvuustilan lauseke, kun aika t lähestyy ääretöntä.

Tarkasteltaessa tapausta, jossa ajanhetkellä $t=0$ tarkasteltavassa tilassa on vesihöyrypitoisuus $v_s = v_s' + v_u$, voidaan sisäilman vesihöyrypitoisuus laskea hetkellä t

$$v_s = v_u + \frac{G}{nV} (1 - e^{-nt}) + v_s' e^{-nt} \quad (\text{K.4.3})$$

Sisätilan kosteustuottoa aiheuttavat rakennuksen käyttäjät ja rakennuksen käyttö.

Taulukossa K.4.1 on koottu tietoa kosteuden tuotosta asuinrakennuksissa.

Sisätilan ilmanvaihtolukujen minimivaatimukset uudisrakentamisessa on määritetty Ympäristöministeriön asetuksessa (Ympäristöministeriö 2017), joka käsittelee uuden rakennuksen sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa. Sen mukaan esimerkiksi koko asunnon ulkoilmavirrat mitoitetaan siten, että seuraavat vähimmäisvaatimukset toteutuvat (Finvac 2019 a):

- koko asuinpinta-alaa kohden laskettu ulkoilmavirta on vähintään $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$ (vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ 1/h}$ $2,5 \text{ m}$ huonekorkeudella)
- koko asunnon ulkoilmavirta on vähintään $18 \text{ dm}^3/\text{s}$
- jokaisen asuinhuoneen ulkoilmavirta on vähintään $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$

Muissa rakennuksissa vaaditut ilmanvaihtuvuudet voivat olla huomattavasti suurempia kuin asuinrakennukselle vaaditut arvot (Finvac 2019 b). Esimerkiksi opetustilalle vaadittu ulkoilmavirta on 6 litraa/s/hlö ja 3 litraa/s/m^2 (valitaan määräävä). Luokkatilan mittojen ollessa $10\text{m} \times 8\text{m} \times 3\text{m}$ ja henkilömäärä 30 on vaadittu ilmanvaihtoluku $3,6 \text{ 1/h}$.

Kaavoissa K.4.1.– K4.3. ei ole otettu huomioon sitä, että ulkoa sisälle virtaavan ilman lämpötilan muuttuessa muuttuu myös virtaavan ilman tilavuus ja näin muuttuu myös sisälle virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus ilmakuutiota kohden. Tämä voidaan korjata kertomalla v_v -arvo korjauskertoimella T_u/T_s . Käytännön laskelmissa voidaan useimmiten kuitenkin olettaa, että tämä korjauskerroin on likimäärin 1. (Nevander 1994).

Taulukko K.4.1. Asuinrakennuksen sisätilan kosteudentuottoarvoja (RIL 107-2000).

Kosteuslähde	Kosteustuotto
Ihminen	40...300 g/h riippuen aktiviteetista (keskimäärin 90 g/h)
Kylpy	700 g/h
Suihku	2600 g/h
Keittiötoiminta	600... 1500 g/h (päivittäinen keskiarvo noin 100 g/h)
Avoin vesipinta	40 g/m ² h
Kasvit	
- pienet kasvit	7...15 g/h
- keskikokoiset	10...20 g/h
Vaatteiden pesu ja kuivaus	
- lingottu pyykki	10...50 g/h /kg kuivaa pyykkiä
- vettä tippuva	20...100 g/h /kg kuivaa pyykkiä

Teollisuus- ja tuotantorakennuksissa tuotantoprosessien aiheuttama kosteustuotto voi olla moninkertainen verrattuna asuinrakennusten kosteuslähteisiin. Tällaisia rakennuksia ovat esimerkiksi pesulat, kuivaamot ja selluteollisuuden rakennukset. Myös muissa erikoistiloissa, kuten vedenkäsittelylaitoksissa ja uimahalleissa esiintyy suuria kosteustuottoja. Yleensäkin tiloissa, joissa käsitellään paljon vettä, on suuri sisätilan kosteustuotto.

Rakennusten valmistusvaiheessa voivat sisätilan kosteustuotot olla huomattavan suuret. Tyypillisiä tapauksia ovat lattiarakenteiden betonointi ja kuivumista vaativat pintakäsittelyt.

Joissakin tapauksissa rakennuksen sisätilassa käytetään keinotekoista kostutusta, joka voi olla merkittävä sisätilan kosteudentuottotekijä.

Esimerkki K.4.1

Sisätilan tilavuus on 400 m^3 ja ilmanvaihtoluku $0,5 \text{ 1/h}$. Sisätilan kosteustuotto on 450 g/h . Huonelämpötila on 22 astetta. Mikä on huoneen suhteellinen kosteus tasapainotilanteessa, jos

- Ulkolämpötila on -10 °C ja suhteellinen kosteus 85% (talviaika) ?
- Ulkolämpötila on $+10 \text{ °C}$ ja suhteellinen kosteus 85% (kesäaika) ?

Lähtötiedot

Huonetilan tilavuus	$V =$	$400,0 \text{ m}^3$
Ilmanvaihtoluku	$n =$	$0,5 \text{ 1/h}$
Huonetilan lämpötila	$t_s =$	$22,0 \text{ °C}$
Sisätilan kosteustuotto	$G =$	$450,0 \text{ g/h}$
Sisälämpötilaa vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus	$v_{sk} =$	$19,4 \text{ g/m}^3$
a.		
Ulkolämpötila	$t_u =$	$-10,0 \text{ °C}$
Ulkoilman suhteellinen kosteus	$RH_u =$	$85,0 \%$
Ulkolämpötilaa vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus	$v_{uk} =$	$2,2 \text{ g/m}^3$
Ulkoilman vesihöyrypitoisuus	$v_u = RH_u * v_{uk} / 100 =$	$1,9 \text{ g/m}^3$
Lasketaan kaavalla	K.4.1	$v_s =$
Vastaava suhteellinen kosteus	$RH_s =$	$21,2 \%$
b.		
Ulkolämpötila	$t_u =$	$10,0 \text{ C}$
Ulkoilman suhteellinen kosteus	$RH_u =$	$85,0 \%$
Ulkolämpötilaa vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus	$v_{ku} =$	$9,5 \text{ g/m}^3$
Ulkoilman vesihöyrypitoisuus	$v_u = RH_u * v_{ku} / 100 =$	$8,0 \text{ g/m}^3$
Lasketaan kaavalla	K.4.1	$v_s =$
Vastaava suhteellinen kosteus	$RH_s =$	$53,0 \%$

Esimerkki K.4.2

Luokkatilan tilavuus on 500 m^3 ja sen ilmanvaihtoluku on $1,2 \text{ 1/h}$. Ulkoilman lämpötila on $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 90% . Sisätilan lämpötila on $+ 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Mikä on sisätilan suhteellinen kosteus 2 tunnin kuluttua, jos ajanhetkellä $t = 0$ alkaa luokassa vaikuttamaan opiskelijoiden aiheuttama kosteustuotto 2000 g/h ?
- Hetkellä $t = 2 \text{ h}$ luokkatilan ilmanvaihtolukua nostetaan tasolle $2,0 \text{ 1/h}$. Mikä on sisätilan suhteellinen kosteus 1 tunnin kuluttua muutosajankohdasta, jos kosteustuotto pysyy vakiona?
- Mikä olisi ollut luokkatilan suhteellinen kosteus kohdan b tarkasteluhetkellä, jos ilmanvaihtolukua ei olisikaan muutettu?
- Mille tasolle luokkatilan RH-arvo olisi voinut suurimmillaan nousta alkuperäisessä tilanteessa? Esitä RH:n arvo ajan funktiona alkuperäisessä tilanteessa.

Ratkaisu

a. $v_u = 0,90 \cdot 4,85 \text{ g/m}^3 = 4,37 \text{ g/m}^3$.

Kaavan K.4.2 mukaan saadaan ajanhetkellä $t = 2 \text{ h}$

$$v_s = 7,4 \text{ g/m}^3$$

Tällöin sisäilman suhteellinen kosteus $\text{RH} = 7,4 \cdot 100\% / 17,3 = 42,8 \%$

b. Nyt $v'_s = v_s - v_u = 7,4 - 4,37 \text{ g/m}^3 = 3,03 \text{ g/m}^3$

Kaavan K.4.3 mukaan saadaan ajanhetkellä $t = 1 \text{ h}$ $v_s = 6,5 \text{ g/m}^3$

Eli nyt sisätilan suhteellinen kosteus $\text{RH} = 6,5 \cdot 100\% / 17,3 = 37,6 \%$

c.

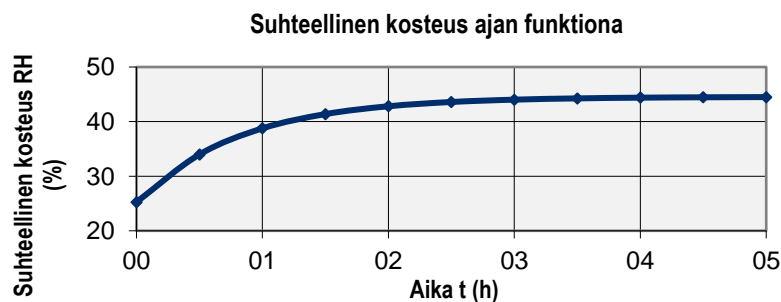
Kaavan K.4.2 mukaan ajanhetkellä $t = 3 \text{ h}$ saadaan

$$v_s = 7,6 \text{ g/m}^3 \text{ ja edelleen } \text{RH} = 7,6 \cdot 100\% / 17,3 = 44 \%$$

d.

Tulos saadaan kaavan K.4.1 mukaan

$$v_s = 7,70 \text{ g/m}^3 \text{ ja edelleen } \text{RH} = 7,7 \cdot 100\% / 17,3 = 44,5 \%$$

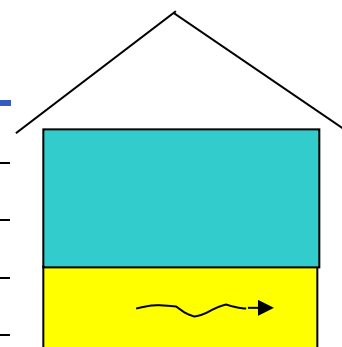


Esimerkki K.4.3

Lasketaan ryömintätilan tarvittava ilmanvaihtuvuus, jotta ryömintätilan suhteellinen kosteus saataisiin alle tavoitetason

Lähtötiedot

Ryömintätilan lämpötila	t_s	20	°C
Ulkolämpötila	t_u	19	°C
Ryömintätilan suht.kosteus	RH_r	95	%
Ulkoilman suht. kosteus	RH_u	80	%
Ryömintätilan ilmanvaihtoluku	n_r	1	1/h
Ryömintätilan tilavuus	V_r	100	m ³
Tavoiteltava suhteellinen kosteus	RH_{tav}	80	%



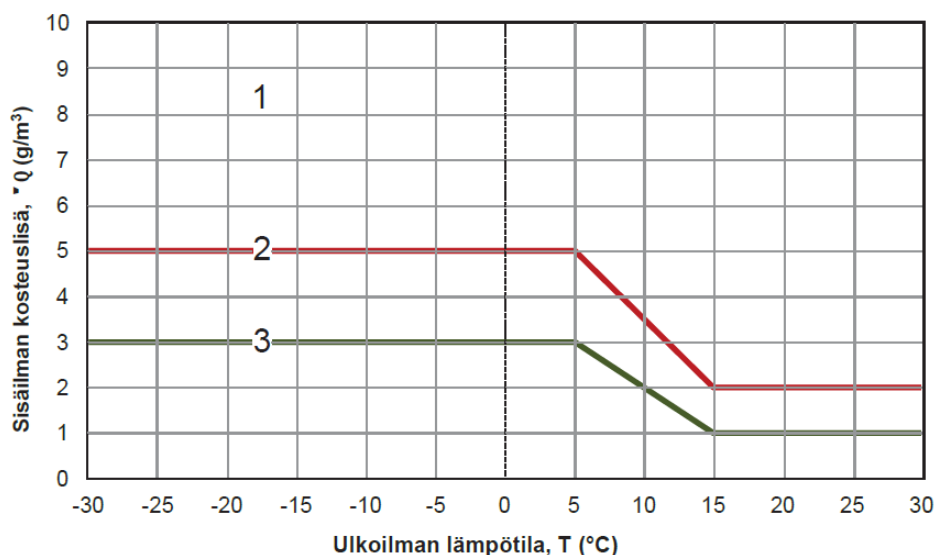
Laskenta

Alin mahdollinen suht.kosteus	$R_{Hmin} =$	75,5	%
Ryömintätilan kyllästyskosteus	$v_{kr} =$	17,3	g/m ³
Ulkoilman kyllästyskosteus	$v_{ku} =$	16,3	g/m ³
Ryömintätilan kosteus	$v_r =$	16,4	g/m ³
Ulkoilman kosteus	$v_u =$	13	g/m ³
Kosteuslisä	$v_r - v_u =$	3,38	g/m ³

Lasketaan lähtötietojen perusteella kosteustuotto $G = (v_r - v_u)nV$

Kosteustuotto	$G =$	338	g/h
Tavoiteltava vesihöyrypitoisuus	$v_{rtav} =$	13,8	g/m ³
Ratkaistaan tarvittava	$n_{vaad} = \frac{G}{(v_{rtav} - v_u)V} =$	4,31	1/h
Tarvittava ilmanvaihtuvuus	$Q_{vaad} = n_{vaad}V =$	431	m ³ /h

Sisäilman vesihöyryn merkitystä kosteuslähteenä voidaan kuvata sisäilman kosteuslisällä v_s-v_u , joka kaavan K.4.1 mukaan vastaa termiä G/nV. Mitä suurempi on sisäilman kosteuslisä, sitä suurempia ovat vesihöyryn diffuusiovirtauksesta ja mahdollisesta sisäilman ylipaineesta aiheutuvasta kosteuskonvektiosta syntyvät kosteusrasitukset ulkovaipan rakenteille. Kosteuslisä voidaan laskea arvioimalla tilan kosteustuotto, ilmanvaihtoluku ja tilavuus. Olemassa olevassa rakennuksessa kosteuslisää voidaan arvioida mittaamalla vesihöyrypitoisuuserotusta v_s-v_u . Rakennesuunnittelussa käytetään sisäilman kosteuslisälle luokiteltuja mitoitusarvoja, jotka ovat riippuvaisia rakennustyyppistä ja vuodenajasta. Erilaisia sisäilman kosteuslisäluokituksia on esitetty esimerkiksi standardissa SFS-EN ISO 13788 ja julkaisussa RIL 107-2012, jossa on esitetty Suomessa suositeltava luokitus, jonka mukaan rakennustyytit jaetaan kolmeen kosteusluokkaan 1, 2 ja 3. Kyseinen luokitus on kuvattu tarkemmin kuvassa K.4.3 ja taulukossa K.4.2. Kosteusluokkaan 1 kuuluvat esimerkiksi uimahallit ja pesulot, kosteusluokkaan 2 asuinrakennukset ja liikerakennukset sekä kosteusluokkaan 3 varastot ja vapaa-ajan asunnot. Luokassa 1 sisäilman kosteuslisä talvella on vähintään 5 g/m^3 , luokassa 2 sisäilman kosteuslisä on talvella 5 g/m^3 ja luokassa 3 kosteuslisä on talvella 3 g/m^3 . Kesäaikaan kosteuslisän arvot ovat pienempiä.



Kuva K.4.3. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107-2012)

Taulukko K.4.2. Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyypit (RIL107-2012)

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitusarvo talvella ($T :: 5\text{ °C}$)	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 pakkashuoneet ^{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 kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä 6–20 g/m³.

²⁾ Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisän arvoa 3 g/m³, ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisä riittää tarkasteltavassa kohteessa.

³⁾ Eri rakennustyyppeihin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa.

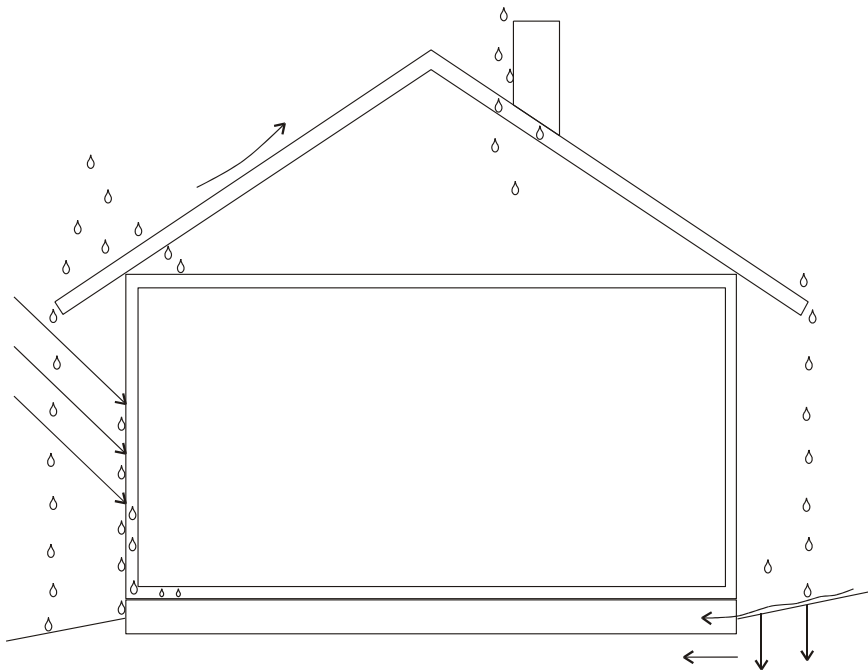
⁴⁾ Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

⁵⁾ Jäähdytettyjen tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslisä 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⁾ Jäähdytettyjen tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

K.4.4 Sade

Sateen aiheuttama rasitus esiintyy vetenä, lumena ja jäänä. Sateen aiheuttama kosteusrasitus on suurin syksyllä, jolloin rakenteiden kuivuminen on vähäistä sadejaksojen yleisyyden vuoksi. Tuuli lisää sateen aiheuttamaa rasitusta etenkin ulkoseiniin. Kuvassa K.4.4 on esitetty sadeveden aiheuttamia kosteusvaurioriskejä rakennuksen ulkovaippaan.



Sadeveden kosteusrasitus kohdistuu rakennuksen vaipan ulkopintoihin, joista se voi edelleen tunkeutua rakenteisiin

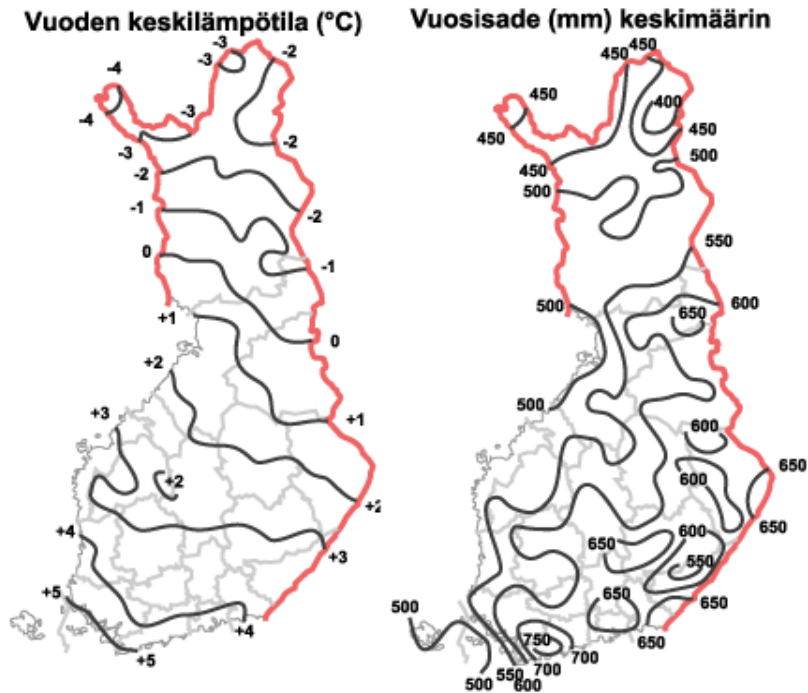
- 1 vesikaton epätiiviyistä läpiviennistä
- 2 vesikaton epätiiviyistä saumasta tai rikkoutuneesta katteesta
- 3 seinässä olevasta epätiiviyistä saumasta tai halkeamasta
- 4 pintavetenä
- 5 tuulen vaikutuksesta kатteen limitysten alle

Kuva K.4.4. Sadeveden rakennukseen aiheuttamia kosteusvaurioriskejä.

Pystysuora sade rasittaa rakennuksen vaakapintoja, kuten kattoja ja terasseja. Viistosade rasittaa vaakapintojen lisäksi pystysuoria vaipan osia, kuten julkisivuja. Sade voi aiheuttaa räsitystä myös roiskevetenä ja pintoja pitkin siirtyvänä valumavetenä esimerkiksi ikkunapinnasta alaspäin rakenteisiin sekä valumavetenä ja vajovetenä perustuksiin. Joskus sadevesi voi siirtyä myös ylöspäin rakenteiden pinnoissa tuulenpaineen vaikutuksesta.

Lumi voi tunkeutua sellaisiin rakenteisiin, joihin vesi ei tunkeudu. Esimerkiksi lumi voi tuiskuta yläpohjaan räystäsrakenteiden kautta. Lumen ja jään sulamisvedet voivat aiheuttaa myös merkittäviä lisärasituksia. Veden jäätyminen rakenteen pintaan voi aiheuttaa myös vaurioita. Lisäksi veden jäätyessä se voi padottaa nestemäistä vettä esimerkiksi syöksytorviin.

Kuvassa K.4.5 on esitetty keskimääräinen vuosisade (mm) Suomessa vuosina 1961–1990.



Kuva K.4.5. Keskimääräinen lämpötila ja vuosisade Suomessa 1961–1990 (Ilmatieteenlaitos).

Sateen mittaus- ja tilastoyksikkö on millimetri (mm). Sataessa neliömetrin pinta-alalle tasaisesti yhden millimetrin paksuinen kerros vettä kertyy yhden neliömetrin pinta-alalle yksi litra vettä, jos se ei pääse virtaamaan tai valumaan pois.

Esimerkki K.4.4

Rakennuksen vesikaton vaakaprojektion pinta-ala on 200 m². Rakennus on Kotkassa jossa vuosisade on 700 mm. Kuinka suuri vesimäärä ohjautuu katolta sadevesijärjestelmään vuodessa, jos katolle tulevasta vedestä haihtuu ja siirtyy muuta kautta pois 20 %?

Ratkaisu

Haihtuva osuus on $0,20 \cdot 700 \text{ mm} = 140 \text{ mm}$, jolloin jäljelle jää 560 mm.

Yhden millimetrin sademäärä tuottaa yhdelle neliölle yhden litran, joten katolta ohjautuu vettä sadevesijärjestelmään $560 \text{ litraa} \cdot 200 \text{ m}^2 = 112000 \text{ litraa} = 112 \text{ m}^3$

Suomessa sademäärät ovat suurimmillaan loppukesällä, kun taas vähiten sataa kevätkuukausina. Loppukeväästä alkaen kuurosateet yleistyvät ja rankatkin sateet ovat mahdollisia. Lumisadepäivien osuus kaikista sadepäivistä on Etelä-Suomessa hiukan alle, Lapissa hiukan yli puolet.

K.4.5 Rakennuskosteus

Rakennuskosteus tarkoittaa rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusaineisiin joutunutta rakennuksen käytön aikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka tulee poistua. Rakennuskosteus on siis rakennusaineisiin ja -tarvikkeisiin valmistuksen, varastoinnin tai rakentamisen aikana joutunutta ylimääräistä kosteutta, joka pyrkii poistumaan. Rakennuskosteus voidaan ilmaista

$$W_{\text{rakennuskosteus}} = W_0 - W_{\text{tasapaino}} \quad (\text{K.4.4})$$

missä w_0 on rakentamisvaiheessa rakenteessa oleva vesimäärä (kg/m^3) ja $W_{\text{tasapaino}}$ rakenteen tasapainokosteus ympäristön kanssa (kg/m^3), joka on riippuvainen ympäristön suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta.

Rakennusmateriaalien rakennuskosteuksien arvot vaihtelevat pääosin välillä $0 \dots 320 \text{ kg}/\text{m}^3$. Suurimmat arvot esiintyvät laasteilla ja betoneilla, pienimmät arvot ovat tiileillä, kalkkikiiekkakivellä ja puulla. Kosteusarvot vaihtelevat huomattavasti esim. betonin ja laastin koostumuksen mukaan. Myös säilytysolosuhteet ja kuivumismahdollisuudet vaikuttavat rakennuskosteuden arvoihin.

Rakennuskosteus on merkittävä kosteuslähde erityisesti rakentamisen aikana ja rakennuksen valmistumisen jälkeen joskus jopa joitakin vuosia. Rakenteet on pinnoitettava vasta sitten, kun rakennuskosteus on päässyt poistumaan riittävästi rakenteista. Usein on rakenteita kuivatettava, jotta rakennuskosteus saadaan riittävästi poistumaan rakenteista. Tyypillisiä kuivatusta vaativia rakenteita ovat valetut betonirakenteet ja yleensäkin sellaiset kiviainespohjaiset rakenteet, joiden valmistuksessa on käytetty paljon vettä.

Rakennuskosteuden poistamista ja eri materiaalien rakennuskosteuksien arvoja on käsitelty kohdassa K.6 Materiaalien kosteuskäyttäytyminen.

K.4.6 Maaperän kosteus

Maaperässä esiintyvä kosteus voidaan jakaa seuraavasti:

- Pintavedet
- Vajovesi rakennuksen vieressä
- Pohjavesi
- Kapillaarivesi

Maaperän kosteusolosuhteet rakennuksen alla ja sen lähiympäristössä arvioidaan kussakin tapauksessa paikallisten olosuhteiden perusteella. Maaperän kosteusolosuhteisiin vaikuttavat maanpinnan muodot, vesistöt, pohjaveden korkeus, maalajikerrostumat ja niiden kosteustekniset ominaisuudet sekä kuivatusjärjestelyt maan pinnalla ja rakennuksen ympärillä.

Kosteus voi esiintyä maassa myös huokosilman vesihöyryinä. Ohutta kuivakuorikerrosta lukuun ottamatta maakerrosten huokosilma oletetaan yleensä täydellisesti vesihöyryllä kyllästetyksi, eli huokosilman suhteellinen kosteus on 100 %. Joissakin kosteusteknisissä tarkasteluissa, esimerkiksi maanvaraisen laatan diffuusiotarkasteluissa, on käytettävä oletusarvona myös alhaisempia suhteellisen kosteuden arvoja.

K.4.7 Vesivuodot putkista ja laitteista

Nykyisissä rakennuksissa suurimpia ja pahimpia äkillisten kosteusvaurioiden aiheuttajia ovat paineellisten vesiputkien ja vettä käsittelevien laitteiden, kuten pesukoneiden vesivuodot. Yleensä putkivuoto on niin suuri ja näkyvä, että vuoto havaitaan nopeasti. Kuitenkin jo vuotaneen veden määrä rakenteisiin näissä tapauksissa on yleensä niin suuri, että joudutaan merkittäviin kuivatus- ja korjaustoimenpiteisiin. Joissakin tapauksissa putkivuoto voi olla vaikeasti havaittava ja vuodon määrä niin pieni, että vaurio havaitaan vasta pitkän ajan kuluttua vuodon alkamisesta.

Kiinteistöjen vesi- ja viemärilaitteistot sekä ilmanvaihto-, lämmitys- ja jäähdytinlaitteistot niihin liittyvine laitteineen on suunniteltava, rakennettava ja varustettava niin, että mahdollinen vesivuoto voidaan havaita niin aikaisin, ettei se ehdi aiheuttaa laajaa vesi- tai kosteusvahinkoa.

Sisäilman vesihöyry voi tiivistyä kylmien putkien ja laitteiden pintaan vedeksi, joka voi aiheuttaa kosteusvaurioita.

K.5 Kosteuden siirtyminen

Kosteus voi siirtyä eri olomuodoissaan. Kiinteänä lumena kosteus siirtyy painovoimaisesti alaspäin tai ilmavirtausten mukana eri suunnissa. Nesteinä eli vetenä kosteus siirtyy kapillaarisesti, painovoimaisesti alaspäin ja tuulenpaineen vaikutuksesta eri suunnissa. Vesihöyrynä kosteus siirtyy diffuusion tai konvektiovirtausten avulla, joissakin tapauksissa myös effuusion tai termodiffuusion vaikutuksesta, jotka ovat diffuusion erikoismuotoja.

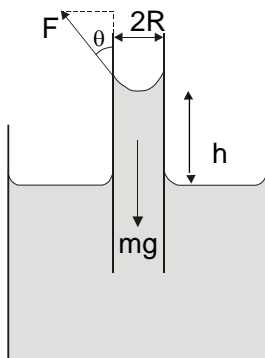
Kosteus voi siirtyä samanaikaisesti sekä vesihöyrynä että vetenä.

K.5.1 Veden kapillaarinen siirtyminen

Vesi imeytyy kapillaarisesti huokoiseen materiaaliin, jos se on kosketuksissa vapaaseen veteen tai materiaaliin, jonka huokosissa on vettä. Kapillaarinen siirtyminen johtuu kapillaaristen voimien aiheuttamasta huokosalipaineesta, jonka suuruus riippuu huokosen koosta siten, että mitä pienempi huokonen on, sitä suurempi on huokosalipaine.

Kapillaarinen voima ja huokosalipaine voidaan selittää seuraavasti (kuva K.5.1):

Tarkastellaan vettä lasiputkessa. Putken ja veden rajapinnassa lasin molekyylit aiheuttavat adheesiovoimia ja nesteessä molekyylien välillä vaikuttavat koheesiovoimat. Veden ja lasin rajapinnassa koheesiovoimat ovat pienempiä kuin adheesiovoimat. Tämän takia veden pinta pyrkii kaareutumaan ylöspäin (kuva K.5.1), jolloin veden pintajännityksen σ pystysuuntainen komponentti pyrkii nostamaan putkessa olevaa vettä ylöspäin. Tätä nostavaa voimaa kutsutaan kapillaarivoimaksi.



Kuva K.5.1. Kapillaariputkessa vaikuttavat voimat. Putki on lasia ja nesteenä on vesi.

Kuvan K.5.1 tapauksessa on voima

$$F = \sigma 2 \pi R \quad (\text{K.5.1})$$

Edelleen voidaan kirjoittaa pystysuunnassa voimien tasapainoyhtälö pystysuunnassa:

$$\sigma 2 \pi R \cos \theta - \pi R^2 h \rho g = 0 \quad (\text{K.5.2})$$

Tästä seuraa, kun vedelle $\cos \theta \sim 1$,

$$h = 2 \sigma / \rho g R \quad (\text{K.5.3})$$

h = kapillaarinen nousukorkeus

Huokosalipaineella ymmärretään kapillaariputkessa vallitsevaa paine-eroa veden rajapinnan eri puolilla.

Laplacen yhtälön perusteella voidaan huokosalipaineen lausekkeeksi kirjoittaa

$$dp = 2\sigma / r \quad (\text{K.5.4})$$

jossa r on pinnan kaarevuussäde. Veden tapauksessa $R \sim r$, jolloin

$$dp = 2\sigma / R \quad (\text{K.5.5})$$

Huokosalipaine voidaan kirjoittaa siis muotoon

$$dp = \rho g h \quad (\text{K.5.6})$$

Eli kapillaariputkessa huokosalipaine vastaa nousseen vesipatsaan aiheuttamaa hydrostaattista painetta kapillaariputken alapinnan tasossa.

Veden pintajännitys σ on noin $73 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ + 20 asteessa.

Tarkasteltaessa rakennusmateriaalien ja maa-ainesten kapillaarisia nousukorkeuksia laskennallisesti kuvitellaan huokoisen materiaalin koostuvan ohuista kapillaarilasiputkista. Huokosten säde vastaa tällöin kapillaariputken sädettä.

Rakennusmateriaalit ja maa-ainesten huokokset käyttäytyvät samaan tapaan kuin ohuet lasiputket, joten huokoisessa aineessa vesi pyrkii nousemaan ylöspäin kapillaarivoimien takia. Mitä pienempiä huokokset ovat, sitä korkeampi on kapillaarinen nousu.

Esimerkki K.5.1

Hiekan huokosten säteeksi arvioitiin 0,02 mm. Kuinka korkealle pohjavedenpinnan yläpuolelle vesi voi nousta kapillaarisesti, jos veden lämpötila on +20 °C?
Kuinka suuri on huokosalipaine?

Ratkaisu

Veden pintajännitys + 20 asteessa on $73 \cdot 10^{-3}$ N/m

Saadaan kapillaariseksi nousukorkeudeksi kaavalla

$$h = \frac{2 \sigma}{\rho g R} = \frac{2 \cdot 73 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}}{(1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,02 \cdot 0,001 \text{ m})} = 0,744 \text{ m}$$

Huokosalipaine

$$dp = \frac{2\sigma}{R}$$

$$dp = \frac{2 \cdot 73 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}}{(0,02 \cdot 0,001 \text{ m})} = 7300 \text{ Pa}$$

Laskelmin ei voida arvioida riittävän tarkasti todellista maassa tapahtuvaa kapillaarista nousua, vaan se on erikseen mitattava kapillaarimetrillä.

Kapillaarinen siirtyminen voi tapahtua myös vaakasuunnassa tai alaspäin, jolloin myös painovoima tai tuulenpaine vaikuttaa veden siirtymiseen. Esimerkiksi sadeveden kohdatessa julkisivun vesi voi imeytyä rakenteeseen kapillaarivoimien vaikutuksesta tai samaan aikaan myös painovoiman ja tuulenpaineen vaikutuksesta. Myös materiaalin pintaan tiivistynyt vesi voi imeytyä kapillaarisesti materiaalien huokosiin. Myös perustusrakenteissa kapillaarista siirtymistä voi esiintyä eri suunnissa.

Huokoskoon aiheuttamien huokosalipaine-erojen takia vesi voi siirtyä kapillaarisesti myös suurempihuokoisesta materiaalista pienempihuokoiseen materiaaliin ja suuremmista huokosista pienempiin huokosiin materiaalin sisällä.

Veden kapillaarinen siirtymisnopeus riippuu huokosalipaineesta ja veden virtausta vastustavista kitkavoimista, jotka kasvavat huokoskoon pienetessä tai virtausmatkan kasvaessa. Sitä syvyyttä X veden kanssa kosketuksissa olevasta materiaalin pinnasta, johon asti huokokset ovat vedellä täyttyneet ajassa t , sanotaan veden tunkeutumissyvyydeksi. Ajan t ja veden tunkeutumissyvyyden X välillä vallitsee yhteys

$$t = m \cdot X^2 \quad (\text{K.5.7})$$

m = kapillaarivastus (s/m^2)

Tästä voidaan ratkaista syvyys X , kun merkitään

$$B = \sqrt{1/m} \quad (\text{K.5.8})$$

$$X = B\sqrt{t} \quad (\text{m}) \quad (\text{K.5.9})$$

jossa B on veden tunkeutumiskerroin ($\text{m/s}^{0.5}$).

Veden kanssa kosketuksissa olevasta pinnasta vesi imeytyy materiaaliin kapillaarisesti nopeudella

$$g = A/(2 \cdot \sqrt{t}) \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (\text{K.5.10})$$

jossa A on kapillariteettikerroin eli veden imeytymiskerroin ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$).

Imeytyneen veden määrä pinnassa on

$$G = A \cdot \sqrt{t} \quad (\text{kg/m}^2). \quad (\text{K.5.11})$$

Taulukossa K.5.1 on esitetty eri rakennusmateriaalien kapillaarisuusominaisuuksia.

Taulukko K.5.1. Materiaalien kapillaarisuusominaisuuksia.

Materiaali	Kapillariteetti- kerroin A (kg/m ² s ^{0,5})	Veden tunkeutumiskerroin B (m/s ^{0,5})
Tiili (tiheys 1700 kg/m ³)	0.4	1.4* 10 ⁻³
Tiili (tiheys 1900 kg/m ³)	0.1	0.7* 10 ⁻³
Kevytbetoni	0.1	0.4* 10 ⁻³
Betoni (vesisementtisuhte =0.3)	0.01	0.1* 10 ⁻³
Betoni (vesisementtisuhte =0.5)	0.02	0.2* 10 ⁻³
Betoni (vesisementtisuhte =0.7)	0.03	0.3* 10 ⁻³
Sementtilaasti	0.03	0.5* 10 ⁻³
Kalkkilaasti	0.3	1.0* 10 ⁻³
Puu (syiden suunnassa)	0.02	-
Puu (syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa)	0.004	-

Esimerkki K.5.2

Betonilattian vesisementtisuhte on 0,5 ja paksuus 80 mm. Laatan alapuolinen maapohja on vedellä kyllästynyt. Kuinka nopeasti vesi siirtyy kapillaarisesti laatan läpi?

Ratkaisu

$$X = B\sqrt{t} \Rightarrow t = \frac{X^2}{B^2} = \frac{(0.08m)^2}{(0.2 \cdot 10^{-3} m/s^{0.5})^2} = 160000s = 44.4h$$

Rakenteissa vesi ei nouse yleensä koskaan suurinta nousukorkeutta vastaavaan korkeuteen, vaan vesirintaman korkeus asettuu tasapainoon rakenteen pinnoilla kosteuden haihtumisen kanssa. Haihtumisnopeus on riippuvainen haihtumisenergian saannista ja rakenteen pinnoitteen vedenläpäisevyydestä. Kapillaarisesti nousevan veden korkeus on sitä suurempi, mitä pienempi on pinnoitteen vedenläpäisy tai mitä suurempi on rakenteen poikkileikkaus. Esimerkiksi paksussa tiiliseinässä kapillaarinen nousu on suurempi kuin ohuessa tiiliseinässä ja vastaavasti esimerkiksi tiiviisti pinnoitetussa betoniseinässä kapillaarinen nousu on suurempi kuin pinnoittamattomassa seinässä.

Veden kapillaarista siirtymistä tapahtuu, kun rakenne on kosketuksissa vapaaseen veteen tai kun rakenne on kiinni toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan rakennusaineeseen tai maaperään. Kapillaarista nousua rakenteessa estetään vesitiiviillä kapillaarikatkolla. Rakenteen pinnalla kapillaarista imeytymistä, kuten kellarin perusmuurin ulkopinnassa, estetään vedeneristeellä. Maanvaraisen laatan alla käytetään kapillaarikatkona riittävän karkeaa salaojasoraa tai -sepeliä, jossa kapillaarinen nousu on niin pieni, että vesi ei pääse nousemaan lattiarakenteisiin.

Veden kapillaarinen siirtyminen on myös oleellinen osa rakenteiden kastumista ja kuivumista, joita käsitellään kohdassa K.6.

Veden kapillaarista siirtymistä esiintyy rakennustekniikassa aina, kun rakenne on kosketuksessa vapaaseen veteen tai kapillaarisessa kontaktissa toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan rakennusaineeseen tai maaperään. Lisäksi kosteuden kondensoituminen rakenteeseen tai sen pinnoille mahdollistaa veden kapillaarisen siirtymisen rakenteissa. Rakenteet toimivat yleensä kosteusteknisesti sitä luotettavammin, mitä vähemmän niissä esiintyy veden kapillaarista siirtymistä. Kapillaarisuudesta on toisaalta joissain tapauksissa myös hyötyä. Esimerkiksi yöllä kattotiilien viilentyessä on vastasäteilyllä, niiden alapintaan kondensoituu vesihöyryä vedeksi ja se imeytyy tiileen kapillaarisesti. Päivällä vesihöyry haihtuu katon tuuletusväliin tiilen lämpötilan noustessa. (Ympäristöopas 2016)

K.5.2 Veden painovoimainen siirtyminen

Vesi valuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin rakennuksen ja rakenteiden pystysuorilla ja kaltevilla pinnoilla sekä rakennuksen ympärillä maan pinnalla. Valuva vesi on otettava huomioon rakenteiden suunnittelussa niin, että vesi ei pääse tunkeutumaan haitallisesti rakenteisiin. Jos vettä pääsee painovoimaisesti rakenteisiin, ovat siirtyvät vesimäärät yleensä niin suuria, että ne aiheuttavat nopeasti suuria kosteusvaurioita rakenteisiin.

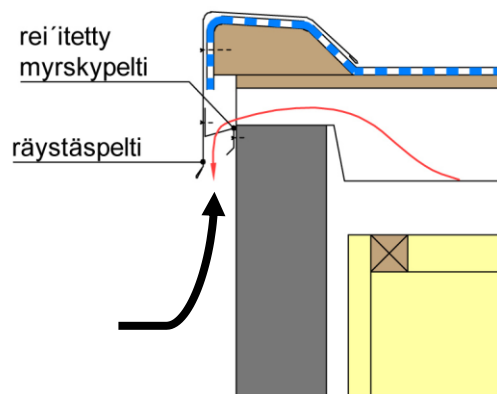
Kapillaarisesti vettä imevissä rakennusmateriaaleissa, esimerkiksi betonissa ja tiilessä, veden painovoimaisen siirtymisen merkitys on kosteuden kokonaissiirtymisessä melko vähäinen. Kapillaarisesti heikosti vettä imevissä materiaaleissa, esimerkiksi karkeassa sorassa, painovoimainen siirtyminen itse materiaalissa on hallitseva siirtymismuoto.

Painovoimainen siirtyminen mahdollistaa myös veden hallitun poisjohtamisen pois rakenteiden ulko- ja sisäpinnoilta sekä rakennuksen viereltä. Myös rakennuksen kuivatuksessa salaojituksella hyödynnetään painovoimaista siirtymistä.

Painovoima voi aiheuttaa rakenteisiin pysyvää vedenpainetta, esimerkiksi vesialtaiden rakenteisiin tai pohjaveden alaisiin rakenteisiin. Myös tulvatilanteissa rakenteet voivat joutua täysin veden alle ja vedenpainelle alttiiksi ja vesi siirtyy nopeasti rakenteisiin kyllästäen ne vedellä.

K.5.3 Tuulenpaineen aiheuttama veden siirtyminen

Tuulenpaineen ja viistosateen yhteisvaikutuksesta vesi voi siirtyä vaipan pinnoilta rakojen kautta sisälle seinärakenteisiin vaakasuunnassa ja joskus jopa ylöspäin. Tätä haitallista veden tunkeutumista rakenteisiin voidaan estää räystäsrakenteilla, suojaPELLITYKSILLÄ, saumojen tiivistämisellä ja sopivilla verhoursrakenteilla sekä tuuletusväleillä, joista mahdollinen vesi on johdettava pois. Tuuli voi heikentää suojaPELLITYSTEN vedeltä suojaavaa vaikutusta, jos PELLITYKSET on kiinnitetty niin, että ne pääsevät nousemaan tuulen vaikutuksesta, kuva K.5.2.



Kuva K.5.2. Räystäspelti on kiinnitettävä, että tuulenpaine ei pääse sitä nostamaan ylös, jolloin viistosade pääsee tunkeutumaan rakenteeseen. (Ympäristöministeriö 2020)

K.5.4 Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio on kaasun molekyylien liikettä kaasun suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Molekyylien liike johtuu niiden keskinäisistä törmäyksistä. Tyypillinen vesihöyryn diffuusioliirto esiintyy Suomessa talviaikana, kun sisäilmassa on enemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa. Sisäilman vesihöyry pyrkii diffuntoitumaan ulkoilmaan ulkovaipan rakenteiden läpi. Rakenne pyrkii estämään diffuusiiovirtausta.

Diffuusiota tarkasteluissa ilman vesihöyrypitoisuutta voidaan kuvata joko vesihöyrypitoisuutena ja vesihöyryn osapaineena. Laskelmien lähtökohdaksi on valittava joko vesihöyrypitoisuuksiin v (g/m^3) perustuva tai vesihöyryn osapaineisiin p_v (Pa) perustuva tarkastelu.

Käytettäessä pitoisuutena vesihöyrypitoisuutta läpi voidaan vesihöyryn diffuusiiovirtaus g ($\text{g/m}^2\text{s}$) ainekerroksen läpi esittää Fickin lakiin perustuen

$$g = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (\text{K.5.12})$$

δ_v = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys (m^2/s)

dv = vesihöyryn pitoisuusero matkalla dx (g/m^3)

dx = tarkasteltava matka (m)

Kun tarkastellaan materiaalikerrosta, jonka paksuus on d ja vesihöyrypitoisuudet eri puolilla kerrosta ovat v_1 ja v_2 sekä $v_1 > v_2$, on vesihöyryn diffuusiiovirtaus kerroksen läpi

$$g = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (\text{K.5.13})$$

Jos vesihöyrypitoisuutta kuvataan vesihöyryn osapaineena, voidaan kirjoittaa

$$g = \delta_p \frac{p_{v1} - p_{v2}}{d} \quad (\text{K.5.14})$$

Vesihöyrynläpäisevyyksien δ_v ja δ_p välillä vallitsee yhteys

$$\delta_v = \frac{R \cdot T}{M} \cdot \delta_p \quad (\text{K.5.15})$$

R = kaasuvakio = $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

$M = M_w$ = veden molekyylipaino = $0,018 \text{ kg mol}^{-1}$

T = lämpötila (K)

Rakennekerroksen vesihöyrynvastus lasketaan rakennekerroksen paksuuden ja vesihöyrynläpäisevyyden perusteella

$$Z = \frac{d}{\delta} \quad (\text{K.5.16})$$

Laskettaessa vesihöyrypitoisuuksilla on vesihöyrynvastus Z_v

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (\text{K.5.17})$$

Tehtäessä diffuusiolaskelmat vesihöyryn osapainelaskelmina on vesihöyrynvastus Z_p

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (\text{K.5.18})$$

Vesihöyrynvastuksen Z_p -arvoja on taulukoitu lähteissä RIL107-2000 ja RIL107-2012.

Kerroksellisen rakenteen kokonaisvesihöyrynvastus lasketaan kerrosten vesihöyrynvastusten summana $\sum Z$.

Tarkastellaan seuraavaksi vesihöyryn osapaineisiin perustuvaa laskentamenettelyä. Vaihtoehtoinen, vesihöyrypitoisuuksiin perustuva laskentatapa on periaatteiltaan täysin sama, mutta käytettävät vastusarvot ovat Z_v -arvoja. Molemmat laskentamenettelyt on periaatteessa hallittava, koska joissain materiaalitapauksissa on käytettävissä vain Z_v -arvoja ja vastaavia materiaalien vesihöyrynläpäisevyysarvoja. Toinen vaihtoehto on muuntaa nämä arvot vastaamaan Z_p -arvoja edellä esitettyjen kaavojen avulla. Vastaavat kaavat on esitetty myös taulukossa K.x, jossa on esitetty myös muita vaihtoehtoisia diffuusiolaskentaan liittyviä parametreja, joita käytetään kirjallisuudessa.

Taulukko K.5.2. Rakennusfysikaalisten materiaaliominaisuuksien muunnoskaavoja.

 Tarvittava ilman vesihöyrynläpäisevyysarvo $\delta_p = 195 \cdot 10^{-12}$ kg/(msPa) (RIL 255-1-2014)

Ominaisuus	Kaava	Yksikkö
Absorptiokerroin, α Heijastuskerroin, ρ Tunkeutumiskerroin, τ	$\alpha + \rho + \tau = 1$	- - -
Emissiviteetti, ε (pitkäaalton lämpösäteily)	$\varepsilon = \alpha$	-
Lämmönvastus, R	$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{1}{h}$	m ² K/W
Ilmanläpäisyvastus, S_a	$S_a = \frac{d}{k_a} = \frac{1}{K_a}$	m ² sPa/m ³
Vesihöyrynläpäisevyys, δ_v	$\delta_v = \delta_p (R/M_w) (273,15 + t)$	m ² /s
Vesihöyrynläpäisevyys, δ_p	$\delta_p = \frac{\delta_v}{(R/M_w)(273,15 + t)}$	kg/(msPa)
Vesihöyrynläpäisykerroin, W_v	$W_v = W_p (R/M_w) (273,15 + t)$	m/s
Vesihöyrynläpäisykerroin, W_p	$W_p = \frac{W_v}{(R/M_w)(273,15 + t)}$	kg/(m ² sPa)
Vesihöyrynvastus, Z_v	$Z_v = \frac{d}{\delta_v} = \frac{1}{W_v}$	s/m
Vesihöyrynvastus, Z_p	$Z_p = \frac{d}{\delta_p} = \frac{1}{W_p}$	m ² sPa/kg
Diffuusiovastuskerroin, μ	$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v} = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p}$	-
Suhteellinen diffusiovastus, s_d	$s_d = \mu \cdot d$	m

Laskettaessa osapaine-eroilla voidaan määritellä kerroksellisen rakenteen siirtyvä diffusiovirtaus

$$g = \frac{p_{vs} - p_{vu}}{\sum Z_p} \quad (\text{K.5.19})$$

Kaavan (K.5.19) tilanteessa oletetaan, että vesihöyry ei tiivisty rakenteeseen.

Diffuusiolaskennalla on laskettavissa myös diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn aiheuttama vesihöyrypitoisuusjakauma tai vesihöyryn osapainejakauma. Vesihöyryn osapaine ja lämpötila rakenteen kohdassa x voidaan arvioida seuraavien kaavojen avulla.

$$p_{vx} = p_{vs} - \frac{\sum Z_{px}}{\sum Z_p} (p_{vs} - p_{vu}) \quad (\text{K.5.20})$$

$$\text{tai analogisesti } v_x = v_s - \frac{\sum Z_{vx}}{\sum Z_v} (v_s - v_u) \quad (\text{K.5.21})$$

$$t_x = t_s - \frac{\sum R_x}{R_T} (t_s - t_u), \text{ missä} \quad (\text{K.5.22})$$

p_{vx} = vesihöyryn osapaine kohdassa x (Pa),

$\sum Z_{px}$ = sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa ($\text{m}^2\text{sPa/kg}$),

$\sum Z_p$ = koko rakenteen vesihöyryvastus ($\text{m}^2\text{sPa/kg}$),

p_{vs}, p_{vu} = vesihöyryn osapaineet sisä- ja ulkoilmassa (Pa),

t_x = lämpötila kohdassa x ($^{\circ}\text{C}$),

$\sum R_x$ = lämmönvastus sisäpinnasta kohtaan x ($\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C/W}$),

R_T = koko rakenteen lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$),

t_s, t_u = sisä- ja ulkoilman lämpötilat ($^{\circ}\text{C}$).

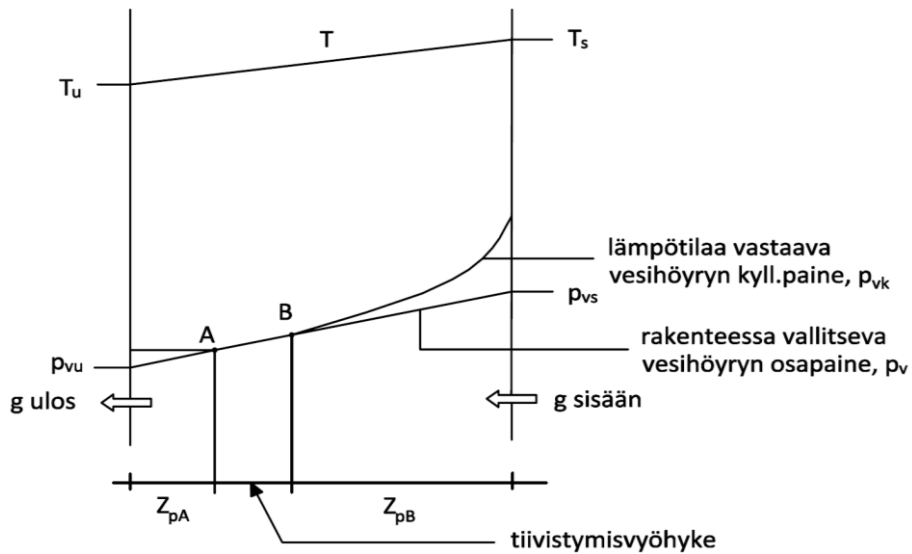
Laskelmilla voidaan tutkia mm. vesihöyryn tiivistymismahdollisuutta rakenteeseen. Samoin voidaan tarkastella rakenteen suhteellista kosteutta eri kohdissa ja arvioida rakenteen homehtumisriskiä vesihöyryn diffuusiovirtauksen seurauksena.

Tutkittaessa tiivistymisriskiä kerroksellisessa rakenteessa jatkuvuustilassa laskenta etenee osapaine-eroilla laskettaessa seuraavasti:

- Selvitetään tarvittavat reunaehdot eli vesihöyryn osapaineet rakenteen molemmiin puolin lämpötilatietojen ja suhteellisen kosteuden avulla.
- Ratkaistaan rakenteen lämpötilajakauma kerrosten lämmönvastusten avulla.

$$t_x = t_s - \frac{\sum R_x}{R_T} (t_s - t_u)$$

- Lasketaan rakenteen kyllästysosapainejakauma lämpötilojen perusteella.
- Ratkaistaan rakenteen vesihöyryn osapainejakauma kerrosten vesihöyryvastusten avulla.
- Tarkastetaan, pyrkiikö vesihöyryn osapaine ylittämään jossain kohdassa rakennetta kyllästysosapaineen kuvan K.5.3 mukaisesti. Jos näin on, on kyseisessä pisteessä tiivistymisvaara.



Kuva K.5.3. Vesihöyryn tiivistyminen rakenteeseen.

Kun tiivistymistä tapahtuu rakenteen sisällä alueella A–B, (Kuva K.5.3.), on aikayksikössä tiivistynyt vesimäärä

$$g = \frac{D_{vs} - D_{vB}}{z_{pB}} - \frac{D_{vA} - D_{vu}}{z_{pA}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (\text{K.5.23})$$

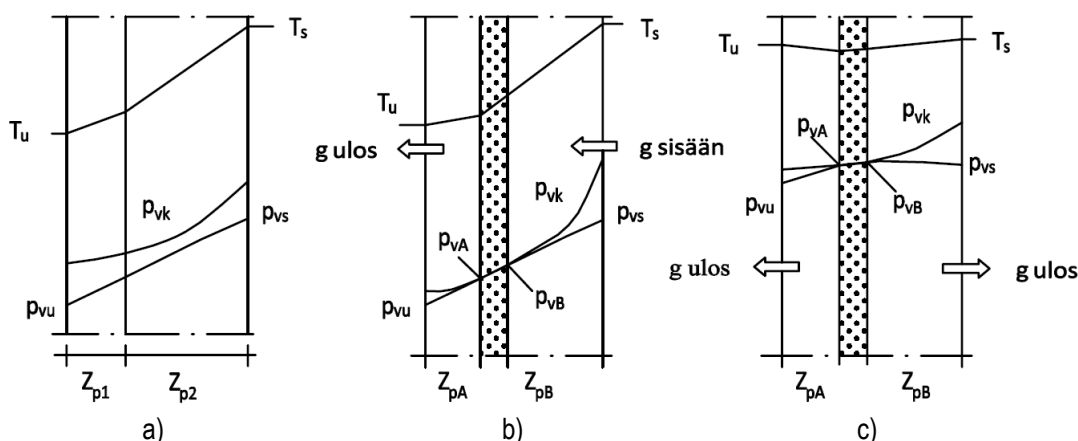
Ensimmäinen termi kuvaa sisältä rakenteeseen tulevaa ja tiivistyvää kosteutta. Toinen termi kuvaa samanaikaisesti tiivistymiskohdasta ulos diffundoituvaa kosteusmäärää. Termien erotus kuvaa seinärakenteeseen jäävää kosteusvirtaa.

Rakenteessa voi tapahtua kuivumista myös sekä ulos- että sisäänpäin. Aikayksikössä poistuva kosteus saadaan kaavasta

$$g = \frac{D_{vA} - D_{vu}}{z_{vA}} - \frac{D_{vB} - D_{vs}}{z_{pB}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (\text{K.5.24})$$

Ensimmäinen termi kuvaa kuivumista tiivistymiskohdasta ulospäin ja toinen termi kuivumista tiivistymiskohdasta sisäänpäin.

Kuvassa K.5.4 a) vesihöyryn osapainekäyrän arvo on joka kohdassa seinää pienempi kuin kylläisen vesihöyryn osapainekäyrän arvo vastaavassa kohdassa, joten tiivistymistä ei siis voi tapahtua, b) vesihöyryn osapainekäyrä leikkaa kylläisen vesihöyryn osapainekäyrän ja tiivistymistä tapahtuu alueella A–B ja c) tapahtuu alueen A–B olevan nestemuodossa olevan kosteuden kuivumista sekä ulospäin, koska p_{vu} on pienempi kuin p_{vk} alueella A-B.



Kuva K.5.4. Vesihöyryn osapainejakaumia eri tilanteissa a) Ei tiivistymistä, b) tiivistymistä ja c) kuivumista.

Tiivistymis- tai kuivumisaikana t rakenteeseen kertyneen tai poistuneen kosteuden määrä on

$$G = g t \quad (\text{kg/m}^2) \quad (\text{K.5.25}).$$

Kerroksellisen rakenteen tiivistymis- ja kuivumistarkasteluissa usein oletetaan, että tiivistymisvyöhyke on kerroksen pinta, jossa tiivistyminen tapahtuu. Tällöin $p_{vA} = p_{vB} =$ kerroksen kyllästysosapaine p_{vk} .

Ratkaistaessa rakenteessa esiintyviä suhteellisia kosteuksia etenee laskenta kuten tiivistymistarkastelussa. Todellisten osapaineiden ja kyllästysosapaineiden avulla voidaan laskea suhteellinen kosteus eri kohdissa.

Laskelmissa tarvittavia materiaalikerrosten vesihöyrynvastusarvoja sekä materiaalien vesihöyrynläpäisevyysarvoja on taulukoitu lähteissä RIL107-2000 ja RIL107-2012. Taulukko K.5.3 on lähteestä RIL107-2012.

Taulukko K.5.3. Vesihöyrynvastuksia 23 °C:n lämpötilassa ja 50 %:n suhteellisessa kosteudessa. $Z_v = Z_w$. (RIL107-2012)

Tuote tai materiaalikerros	Vesihöyrynvastus			
	$Z_p \cdot 10^9$ m ² sPa/kg	$Z_w \cdot 10^3$ s/m	μ -	S_d m
Kalvomaiset höyrynsulut				
Muovitiivistyspaperi 0,2 mm	15–50	110–370	15000–50000	3,0–10
Hygrokalvot 0,05 – 0,4 mm ¹⁾				
RH < 90 %	15–500	110–3700	60000–250 000	3,0–100
RH > 90 %	0,50–250	3,7–1800	2000–120 000	0,10–50
Höyrynsulkumuovi (LDPE) 0,2 mm	100–500	730–5900	100000–500000	20–100
Höyrynsulkumuovi (LDPE) 0,4 mm, verkkovahvistettu	200–1000	1500–12000	200000–500000	40–200
Alumiinipaperi 0,4 mm	50	370	25000	10
Alumiinimuovilaminaatti 0,4 mm	2000	15000	1000000	400
Vedeneristemassa 0,3–1 mm	3,0–30	22–220	600–20000	0,6–6,0
Kosteussulkusively, kaksinkertainen n. 0,1 mm	20	150	40000	4,0
Kumibitumikermi 3 mm	800–1500	5900–11000	53000–100000	160–300
Kumibitumikermi 3 mm, alumiinilaminoitu	2000–4000	15000–29000	130000–260000	390–780
Muovimatto (PVC) 3 mm	55–80	400–590	3600–5300	11–16
Teräsohutlevy 1 mm ²⁾	10000	73000	2000000	2000
Muita höyrynsulkuna tai sen osana käytettyjä tuotteita ja materiaalikerroksia				
EPS-eriste 30 mm	3,0–9,0	22–66	20–60	0,60–1,8
XPS-eriste 30 mm	23	170	150	4,5
Polyuretaanieriste (PUR tai PIR) 30 mm, paperipintainen	6,0–28	44–200	40–180	1,2–5,6
Polyuretaanieriste (PUR tai PIR) 30 mm, alumiinilaminaattipintainen	4000	29000	26000	800
Keraaminen laatta 150x150x6, saumattu	10	73	250	2,0
Kipsilevy 13 mm	0,45	3,3	6,9	0,090
Kuitusementtilevy 12 mm	3,3	24	54	0,65
Havuvaneri 12 mm	14	100	230	2,8
Filmivaneri 12 mm	63	460	1000	12
Lastulevy 12 mm	2,5	18	41	0,50
Kosteutta kestävä lastulevy 12 mm	9,0	66	150	1,8
OSB-levy 12 mm	10	73	160	1,9
Puu (mänty, kuusi) 12 mm	5,0	37	83	1,0
Poltettu tiili, muurattu 130 mm	11	77	16	2,1
Kalkkihiekkatiili, muurattu 130 mm	13	96	20	2,6
Kevytbetoniharkko, muurattu 200 mm	10	74	10	2,0
KevytSORabetoniharkko, muurattu 200 mm	8,0	59	8,0	1,6
Betoni 200 mm	140–210	1000–1600	140–210	28–42
Ontelolaatta 265 mm	33	240	25	6,6
Tasoite 3 mm	0,15	1,1	10	0,030

¹⁾ Suhteellisen kosteuden mukaan muuttuva vesihöyrynvastus.

²⁾ Teräsohutlevyn vesihöyrynvastuksen arvot on arvioitu.

Edellä esitettyjen kaavojen mukaiseen diffuusiovirtauslaskentaan perustuva rakenteen kosteustekninen laskenta on myös standardoitu kansainväliseksi standardiksi EN ISO 13788:2012. Menetelmää kutsutaan ns. Glaser-menetelmäksi, jonka periaatteet on kehitetty jo vuonna 1958. Alun perin menetelmää on kehitetty kevyiden rakenteiden kosteustekniseen tarkasteluun. Standardin periaatteet ovat seuraavat:

- Kosteuden siirtyminen rakenteen läpi tapahtuu ainoastaan vesihöyryn diffuusiovirtauksena.
- Laskenta tehdään kuukausitason sisätilan ja ulkotilan lämpötila- ja vesihöyry-arvoilla
- Jos kosteuskonvektio ja kapillaarinen kosteudensiirtyminen ovat tarkasteltavassa tapauksessa merkityksettömiä, antaa standardin mukainen laskentamenettely suhteellisen varmalla puolella olevan tuloksen.
- Jos standardin mukainen laskentamenetelmä osoittaa rakenteen olevan kosteusteknisesti toimimaton, on kuitenkin mahdollista tarkemmilla menetelmillä osoittaa rakenteen olevan kosteusteknisesti toimiva.
- Standardin mukaan tarkastellaan rakenteen homehtumisriskejä pinnoilla sekä vesihöyryn tiivistymisriskiä sekä rakenteen kuivumismahdollisuutta
- Standardin mukaiset laskentatulokset ovat luotettavimpia sellaisille rakenteille, jonka materiaalikerrokset ovat kevyitä, käytetyt materiaalit eivät kykene varastoimaan vettä ja rakenne on ilmatiivis.
- Standardin mukaiset laskentatulokset ovat epäluotettavia rakenteille, joilla on suuri lämpö- ja kosteuskapasiteetti ja jotka ovat alttiita merkittäville ilmapuodoille.

Markkinoilla tarjolla oleva ja laajasti käytössä oleva Doflämpö-laskentaohjelma perustuu lähtökohdiltaan Glaser-menetelmään. Sen avulla voi laskea esimerkiksi rakenteen lämpötilajakaumat, vesihöyrypitoisuusjakaumat, vesihöyryn osapainejakaumat ja tiivistyvän kosteuden määrän esimerkiksi kuukausittain. Lähteessä (Björkholz 1997) on myös esitetty laskentaesimerkkejä Glaser-menetelmän käytön periaatteista.

K.5.5 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektiolla eli kosteuskonvektiolla tarkoitetaan vesihöyryn siirtymistä ilmapirran mukana. Kosteuskonvektion aiheuttamaa kosteusvaurioriskiä arvioidaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla. Jotta vesihöyryn konvektiota voitaisiin arvioida, on kyettävä arvioimaan ilmapirtausien määrää ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Ilmapirtauksia ja sen laskentaa on käsitelty laajemmin Virtaukset- osiossa.

Ilman konvektiovirtauksen mukana siirtyvää vesihöyryn määrää voidaan arvioida lausekkeella

$$g = Q \cdot v \quad (\text{K.5.25})$$

missä v on siirtyvän ilman vesihöyrypitoisuus,

Tarkastellaan rakennetta, jonka toisella puolella vallitsee ilman vesihöyrypitoisuus v_1 ja toisella puolella vesihöyrypitoisuus v_2 ja $v_1 > v_2$. Jos ilman lämpötila on rakenteessa virtausmatkalla vakio, on rakenteen läpi siirtyvän vesihöyryn kosteuskonvektiovirtaus puolelta toiselle (Hagentoft 2001):

$$g = Q(v_1 - v_2) \quad (\text{K.5.26})$$

Tarkastellaan tapausta, jossa rakenteen läpi siirtyvä ilmavirtaus tapahtuu rakenteen lämpimämmältä vyöhykkeeltä kylmemmän vyöhykkeen suuntaan, eli virtaava ilma jäähtyy. Jos kylmällä vyöhykkeellä lämpötilaa vastaava kyllästysvesihöyrypitoisuus on pienempi kuin virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus, tapahtuu vesihöyryn tiivistymistä rakenteessa kyseisellä vyöhykkeellä. Poistuvan ilman vesihöyrypitoisuus puutoaa poistuvan ilman lämpötilaa vastaavan kyllästysvesihöyrypitoisuuden tasolle v_{2k} . Tällöin rakenteeseen voi jäädä kosteutta (Hagentoft 2001):

$$g = Q(v_1 - v_{2k}) \quad (\text{K.5.27})$$

Toisin sanoen vesihöyry tiivistyy rakenteeseen, jos ilma jäähtyy virtausreitillään rakenteessa alle kastepistelämpötilan.

Vesihöyryn siirtyessä ilmavirtauksen mukana rakenteessa kylmemmälle vyöhykkeelle suhteellinen kosteus rakenteessa siis nousee ja pahimmillaan esiintyy vesihöyryn tiivistymistä vedeksi.

Tapauksessa, jossa virtaava ilma siirtyy rakenteen läpi kylmältä vyöhykkeeltä lämpimälle vyöhykkeelle, rakenne kuivuu. Toisin sanoen kosteuskonvektiolla on rakennetta kuivattava vaikutus, kun ilmassa on kyllästysvajausta tai ilma lämpenee virratessaan rakenteen läpi.

Ilmavirtaus huokoisen materiaalikerroksen läpi voidaan laskea kaavalla

$$Q = \frac{B_0 \Delta p}{\eta d} A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (\text{K.5.28})$$

B_0 = materiaalin ilmanläpäisevyys, m^2

η = ilman dynaaminen viskositeetti = $(17,1 + 0,0049 \cdot t) 10^{-6}$, Ns/m^2

Δp = ilmanpaine-ero kerroksen yli, Pa

d = kerroksen paksuus, m

A = virtauspinta-ala, m^2

Em. kaavassa oletetaan, että virtaus on laminaarista. Normaalisti tämä ehto toteutuu ilmavirtauksissa materiaalin läpi. Materiaalin ilmanläpäisevyyksiä on taulukoita esimerkiksi lähteessä/Nevander. Fukthandbok/. Betonin ilmanläpäisevyys on luokkaa 10^{-17} . 10^{-15} m², kevytbetonin arvot ovat luokkaa 10^{-13} . 10^{-11} m² ja kevytsoraharkkojen 10^{10} m².

Raon läpi siirtyvä ilmavirtaus voidaan laminaarisen virtauksen tapauksessa laskea kaavalla

$$Q = \frac{b^3 L \Delta p}{12 \eta d} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (\text{K.5.28})$$

b = raon leveys, m

L = raon pituus, m

Δp = ilmanpaine-ero raon yli, Pa

d = raon syvyys, m

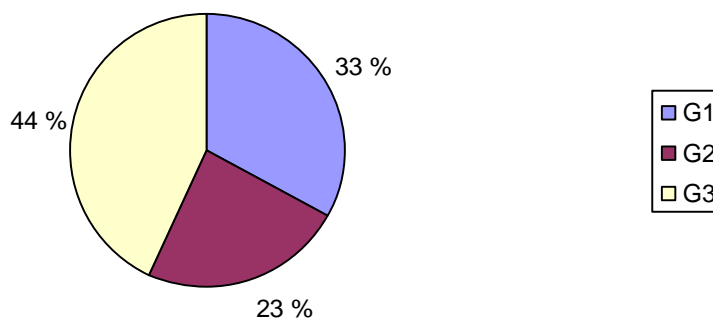
Ilmavirtausten laskentaa on tarkasteltu laajemmin ilmavirtaukset-osiossa.

Esimerkki K.5.3

Tarkastellaan sahatavaravarastoa, jonka yläpohja on tehty kevytbetonielementeistä paksuudeltaan 400 mm. Elementtien päällä on 100 mm paksuinen pehmeä mineraalivilla. Hallin pinta-ala on 1200 m². Ulkona lämpötila on 10 °C ja suhteellinen kosteus 70 %, sisällä lämpötila on 20 °C. Laske yläpohjaan siirtyvä vesihöyry yhteensä (kg) 30 vrk aikana diffuusion ja kosteuskonvektion yhteisvaikutuksesta, jos yläpohjan lämpötilaksi ja suhteelliseksi kosteudeksi oletetaan ulkoilman arvot. Sisätilan ja yläpohjan välillä on 10 Pa ylipaine. Ilman viskositeetti on $16 \cdot 10^{-6}$ Ns/m². Sisäilman suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila +20 °C. Laskettaessa kosteuskonvektiota voidaan olettaa, että 10 Pa ylipaine vaikuttaa kevytbetonielementtikerroksen yli, eli ei oteta huomioon mineraalivillaa. Kevytbetonin ilmanläpäisevyys $B_0 = 10^{-11}$ m². Ota huomioon myös yhteensä 50 metriä 2 mm levyistä halkeamaa kevytbetonielementtien saumoissa.

Ulkoilman vesihöyryn osapaine	Pa	863,86	
Osapaine-ero	Pa	538,08	
<u>Diffuusiovirta</u>			
Mineraalivillan vesihöyrynvastus	Zp1	5,00E+08	m2sPa/kg
Kevytbetonin vesihöyrynvastus	Zp2	6,00E+09	m2sPa/kg
Rakenteen kokonaishöyrynvastus	Zp1+Zp2	6,50E+09	m2sPa/kg
Diffuusiovirta		8,28E-08	kg/m2s
		357,62	g/h
Diffuusiovirta yläpohjaan 30 vrk:ssa	G1	257,48	kg
<u>Kosteuskonvektio yläpohjan läpi</u>			
Kevytbetonin ilmanläpäisevyys		1,00E-11	m2
Konvektiovirta yläpohjan läpi yhteensä		1,56E-05	m3/sm2
Kosteuskonvektio yläpohjan läpi		5,87E-08	kg/m2s
		253,42	g/h
Kosteuskonvektio yhteensä 30 vrk:ssa	G2	182,46	kg
<u>Kosteuskonvektio rakojen kautta</u>			
Paine-ero	Δp	10 Pa	
Raon leveys	b	2 mm	
Raon syvyys virtaussuunnassa	L	400 mm	
Raon kokonaispituus	a	50 m	
Ilman dynaaminen viskositeetti		1,60E-05 Ns/m2	
Virtauspinta-ala		0,1 m2	
Virtausnopeus	v	0,52 m/s	
Virtaava ilmamäärä	Q	5,21E-02 m3/s	
Virtaava ilmamäärä	Q	187,50 m3/h	
Rakovirtauksen kosteuskonvektio		703,95	g/h
Rakovirtauksen kosteuskonvektio yhteensä 30 vrk:ssa	G3	337,90	kg
Kosteutta siirtyy yläpohjaan yhteensä 30 vrk:ssa	G1+G2+G3	777,84	kg

Eri kosteusvirtojen osuudet



Tyypillinen vesihöyryn konvektiovirtausriski rakenteeseen on olemassa, kun sisätila on ylipaineinen ulkoilmaan nähden tai sisätila on ylipaineinen esimerkiksi yläpohjaan tai ryömintätilaan nähden. Virtausreiteinä ovat yleensä rakenteiden epäjatkuvuuskohdat, kuten saumat, raot, reiät ja läpiviennit. Jos varsinainen rakenne ei ole riittävän ilmatiivis, varmistetaan sen ilmatiiveys erillisellä ilmansululla. Rakennuksen tyypillisten painesuhteiden perusteella erityisesti yläpohjarakenteet voivat olla ylipaineisia esimerkiksi lämmityskaudella, ja siksi ne ovat alttiita kosteuskonvektiolle.

Vesihöyryn siirtymistä konvektiovirtauksen mukana hyödynnetään rakenteiden tuuletuksessa ja kuivatuksessa. Esimerkiksi yläpohja saadaan harvoin niin tiiviiksi, että kosteuskonvektio sisätilasta yläpohjaan voidaan täysin välttää. Tällöin yläpohja on tuuletettava, jotta liiallinen vesihöyry saadaan pois rakenteesta. Myös ryömintätilan kosteustekninen toiminta perustuu riittävään tuuletukseen. Sellaisina vuodenaikoina, jolloin ulkoilman vesihöyrypitoisuus on korkea ja tuuletettavan rakenteen lämpötila on alhaisempi kuin ulkoilman, on rakenteiden tuulettaminen ulkoilmalla kuitenkin tehottomaa.

K.5.6 Kosteuden siirtymisen numeerinen laskenta

Edellä esitettyjä kosteuden siirtymismuotoja on tietyissä tapauksissa tarvetta tarkastella ns. numeeriseen laskentaan perustuvilla laskentaohjelmilla. Niiden avulla kytetään ottamaan huomioon mm. seuraavia tekijöitä, joita ns. analyttisillä laskentamenetelmillä on vaikeampi ottaa huomioon:

- Rakenteissa tapahtuva samanaikaiset kapillaari-, diffuusio- ja konvektiovirtaukset.
- Virtausten ja olosuhteiden riippuvuus ajasta, eli laskentatapaus on epästationäärinen.
- Materiaaliominaisuuksien riippuvuus lämpötilasta ja kosteudesta.
- Rakenteiden moniulotteisuus.
- Säättekijöiden vaikutus: Sateen kohdistuminen rakenteen pintoihin ja auringon säteily.
- Pinnoilla tapahtuvat ilmiöiden tarkka analyysi, kuten haihtuminen, tiivistyminen ja lämmönsiirtyminen.
- Materiaalien kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta.

Numeeriseen laskentaan perustuvia kosteuden siirtymisen laskentaohjelmia ovat mm. Wufi ja Comsol Multiphysics.

K.6 Materiaalien kosteuskäyttäytyminen

K.6.1 Yleistä

Lähes kaikki materiaalit vuorovaikuttavat jollakin tavalla kosteuden kanssa. Jo ympäröivän ilman kosteuden vaihtelu saattaa tuottaa häiriöitä tai muutoksia. Ilman liiallinen kosteus voi aiheuttaa mm. teräksen ja muiden metallien korroosiota. Korkea ilman kosteus edistää myös mikrobien tuhovaikutusta, joka ei merkitse ainoastaan mätänemistä, pahaa hajua jne, vaan myös mekaanista heikentymistä. Useiden materiaalien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet muuttuvat kosteuden vaikutuksesta. Ne voivat saada joitain lisäominaisuuksia tai menettää jonkun ominaisuutensa kosteuden vaikuttaessa. Kosteuden imeytyminen materiaaliin tai poistuminen siitä on erilaista materiaalista riippuen. Jotkut materiaalit imevät itseensä enemmän kosteutta kuin toiset. Myös nopeus, jolla materiaali imee tai luovuttaa kosteutta, vaihtelee materiaalien välillä. On hyvin tärkeätä tuntea materiaalin kosteuskäyttäytyminen, jotta voitaisiin säilyttää materiaali halutun kaltaisena ja laatusena.

K.6.2 Veden sitoutumismuodot materiaalissa

Vesi voi sitoutua usealla tavalla kiinteässä materiaalissa. Kiteisissä materiaaleissa vesi voi olla fysisorboituneena vetenä materiaalin pinnalla joko 1- tai monimolekyläärisenä kerroksena. Tietyillä aineilla voi fysisorption jälkeen tapahtua kemisorptio, jolloin vesimolekyyli reagoi kemiallisesti aineen kanssa. Tällöin puhutaan kemisorboituneesta vedestä. Jos materiaali on huokoista, voi pinnalle absorboitunut vesi täyttää aineen huokosia kapillaari-ilmion vaikutuksesta. Tämä kapillaarivesi voi siis kondensoitua huokosiin, jolloin puhutaan vapaasta vedestä tai bulk-vedestä. Vesi voi myös alkaa liuottaa ainetta. Toisaalta se voi absorboitua (diffundoitua) sisälle aineeseen. Amorfisissa materiaaleissa vesi absorboituu suoraan aineen sisälle ja sen määrä on verrannollinen amorfisen aineen massaan. Vesi voi esiintyä kiteisessä materiaalissa myös stökiometrisenä tai ei-stökiometrisenä kidevetenä. Kidevesi on niin lujasti aineen molekyyliin sitoutunut, että sitä ei lasketa yleensä kosteudeksi.

K.6.3 Kosteuspitoisuuden määrittäminen

Kiinteiden materiaalien kosteudella eli vesipitoisuudella tarkoitetaan materiaalissa olevan veden kemiallisesti sitoutumatonta osuutta. Rakennusaineissa oleva kosteuden määrä ilmaistaan monella eri tavalla. Täysin vakiintunutta tapaa ei ole. Materiaalien vesipitoisuuden yhteydessä käytetään seuraavia käsitteitä:

1. **Kuiva-aine** tarkoittaa ainetta, josta kaikki vesi on poistettu.
2. **Absoluuttinen vesipitoisuus f_a** (tai kosteusosuus u) on:

$$f_a = \frac{m_v}{m_t} \quad \text{tai} \quad u = \frac{m_v}{m_t} \quad (\text{K.6.1})$$

missä m_t = kuiva-aineen massa ja m_v = aineessa olevan veden massa.

3. **Suhteellinen vesipitoisuus f_r** on:

$$f_r = \frac{m_v}{m_t + m_v} \quad (\text{K.6.2})$$

4. **Suhteellinen kuiva-ainepitoisuus f_t** on:

$$f_t = \frac{m_t}{m_t + m_v} \quad (\text{K.6.3})$$

Yksikkönä edellä esitetyissä ilmaisutavoissa on g/kg, kg/kg tai %.

5. **Kosteuspitoisuus w** on:

$$w = \frac{m_v}{V}, \quad [w] = \text{kg/m}^3 \quad (\text{K.6.4})$$

missä m_v = kappaleessa olevan kosteuden massa ja V = kappaleen tilavuus.

Kappaleen kosteuspitoisuus w voidaan yksinkertaisesti laskea, jos tiedetään sen kosteusosuudesta u materiaalin tiheyden ρ avulla

$$w = \rho u. \quad [w] = \text{kg/m}^3 \quad (\text{K.6.5})$$

Esimerkki K.6.1

Puupaneelinäyte (tiheys 400 kg/m^3) painaa $1,6 \text{ kg}$. Näyte kuivataan $105 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, jonka jälkeen se painaa $1,2 \text{ kg}$. Mikä on alkuperäisen puupaneelinäytteen kosteusosuus?

Ratkaisu

Näytteen kosteussisältö oli $1,6 \text{ kg} - 1,2 \text{ kg} = 0,4 \text{ kg}$, jolloin kosteusosuudeksi (tai absoluuttiseksi vesipitoisuudeksi f_a) tulee $u = 0,4/1,2 = 0,33$ tai 33% .
Kosteuspitoisuus on tällöin $w = 0,33 \times 400 \text{ kg/m}^3 = 132 \text{ kg/m}^3$.

K.6.4 Hygroskooppisuus

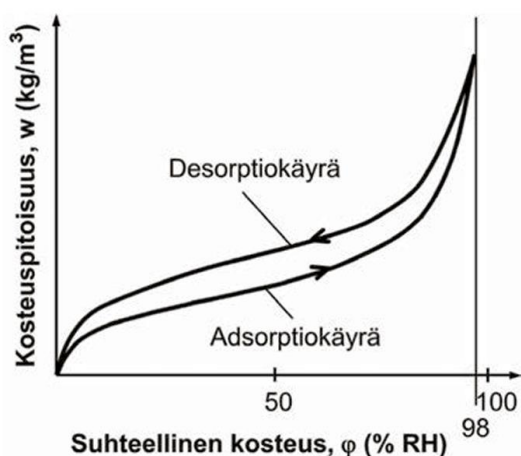
Hygroskooppisuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä sitoa kosteutta ilmasta ja luovuttaa kosteutta ilmaan. Ympäristön suhteellisesta kosteudesta ja materiaalin kosteuspitoisuudesta riippuu, sitooko vai luovuttaako materiaali kosteutta. Materiaali on ns. hygroskooppisella alueella, kun sen kosteuspitoisuus vastaa ympäröivän ilman suhteellista kosteutta $0...98 \%$. Materiaalin kosteuspitoisuuden ja ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden riippuvuutta kuvataan tasapainokosteuskäyrillä, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Aineen kosteuspitoisuuden ja ympäröivän ilman välille asettuu ns. hygroskooppinen tasapainokosteus. Tämän suuruus vaihtelee suuresti eri aineilla. Puupohjaisilla aineilla se on suurin ja mineraalivilloilla lähes olematon. Hygroskooppinen tasapainokosteus voi vaihdella samalla aineella ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona sekä riippuen siitä, onko tasapainokosteus saavutettu absorptio- tai desorption kautta. Materiaalin tasapainokosteuden ohella myös materiaalin absorptio- ja desorptionopeus eli millä nopeudella se absorboi kosteutta ympäröivästä ilmasta tai luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan, on tärkeä materiaalin kosteuskäyttäytymistä kuvaava parametri. Sorptionopeus riippuu materiaalin lisäksi ympäristön ja materiaalin välisten vesihöyryn osapaineiden erotuksesta, lämpötilasta, materiaalin pinta-alasta ja kostean ilman liikkeestä. Tarkkaan ottaen aineen hygroskooppisuus kuvaa sekä hygroskooppista tasapainokosteutta, että kosteuden imeytymisen tai luovuttamisen nopeutta.

K.6.5 Materiaalien tasapainokosteuskäyrät

Aineen kosteuden ja ympäröivän ilman välille asettuu tasapaino, jota kuvaa aineelle ominainen tasapainokosteuskäyrä, kuva K.6.1. Siinä esitetään materiaalin kosteuspitoisuus w (kg/m^3) suhteellisen kosteuden RH funktiona. Adsorptioisotermi määritetään

mittaamalla aineeseen sitoutunut tasapainotilaa vastaava kosteus siirryttäessä portaittain ympäristön kosteudesta suhteellisesta kosteudesta 0 % ympäristön kosteuteen suhteelliseen kosteuteen 98 %, joka vastaa hygroskooppisen alueen ylärajaa. Desorptioisotermi määritetään mittaamalla tasapainokosteudet portaittain ympäristön suhteellisesta kosteudesta 98 % ympäristön suhteelliseen kosteuteen 0 %. Materiaaliin siis voi sitoutua vettä ja siitä voi poistua vettä. Materiaalin kastumisen ja kuivumisen tasapainokosteuskäyrät ovat usealla materiaalilla erilaiset, eli samalla ilman suhteellisella kosteudella materiaalin kosteuspitoisuus kuivumisvaiheessa (desorptio) on suurempi kuin kastumisvaiheessa (adsorptio). Ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. Materiaalin kosteuspitoisuuden muutokset kastumis- ja kuivumisvaiheessa voivat aiheuttaa aineen fysikaalisten ominaisuuksien ja ulkonäön muuttumista. Kuvassa K.6.1 on esitetty periaatekuva tyypillisestä materiaalin tasapainokosteuskäyrästä, jossa näkyy hystereesi-ilmiö.



Kuva K.6.1. Materiaalin tyypillinen tasapainokosteuskäyrä. (RIL 255-1-2014)

Lähteen (RIL 255-1-2014) liitteessä 8 on esitetty laajasti erilaisten rakennusmateriaalien tasapainokosteuskäyriä ja osin myös niiden matemaattisia approksimaatioita.

K.6.6 Rakennuskosteus

Rakennuskosteudelle tarkoitetaan rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusmateriaaleihin joutunutta rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka on poistuttava. Rakennuskosteus voidaan ilmaista

$$W_{\text{rakennuskosteus}} = W_0 - W_{\text{tasapaino}} \quad (\text{K.6.6})$$

missä w_0 on rakentamisvaiheessa rakenteessa oleva vesimäärä (kg/m^3) ja $W_{\text{tasapaino}}$ rakenteen tasapainokosteus ympäristön kanssa (kg/m^3).

Rakenteessa rakentamisvaiheessa oleva vesimäärä voi vaihdella suuresti riippuen rakennusaineesta, varastoinnista, kuljetuksesta, rakenteen suojauksesta jne. Kosteusvaurioiden välttämiseksi on rakenteet suunniteltava kosteusteknisesti oikein ja rakennus ja rakenteet tuuletettava ja kuivattava hyvin ennen rakennuksen käyttöönottoa. Rakentamisaikaista rakennuskosteuden kertymistä voidaan välttää mm. oikealla varastoinnilla, suojaamalla rakennusmateriaalit sateelta ja maan kosteudelta sekä tarvikkeiden oikea-aikaisella toimittamisella rakennustyömaalle. Taulukossa K.6.1 on koottu kirjallisuudesta eräiden rakennusmateriaalien rakennuskosteuksia, kun ne ovat ympäristössä, jossa $\text{RH} = 50\%$. Tämä vastaa hyvin ns. normaalia huoneilmaa.

Taulukko K.6.1. Eräiden rakennusmateriaalien ja rakenteiden normaaleja rakennuskosteuksia.

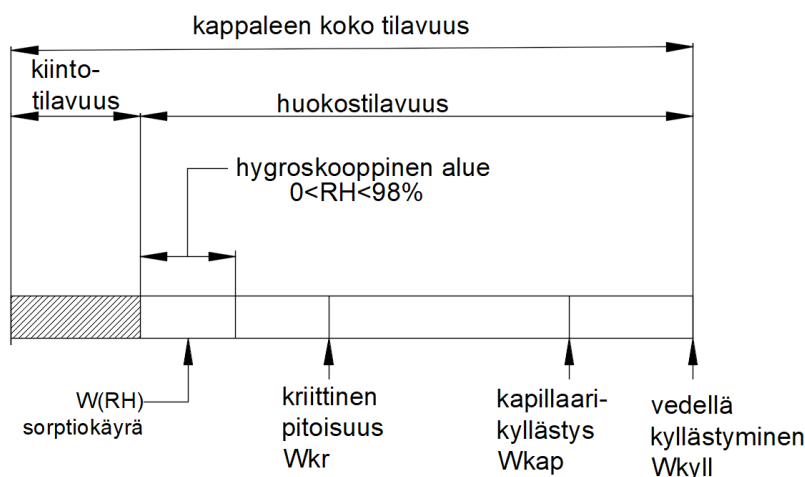
Materiaali	Rakennusvaiheen kosteus, kg/m^3	Kemiallisesti sidottu kosteus, kg/m^3	Tasapaino kosteus, kg/m^3	Rakennuskosteus, kg/m^3
Betoni K 15	180	40	25	115
Betoni K 25	180	60	30	90
Betoni K 40	180	70	40	70
Kevytbetoni	100 – 200		20	80 – 180
Kalkkisementtilaasti	300	20	30	250
Tiili	10		10	0
Tiilimuuri	80		10	70
Puu	60		40	20

K.6.7 Materiaalien kosteuskapasiteetti

Kosteuskapasiteetilla tarkoitetaan materiaalin kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta. Kosteuskapasiteetin merkitys korostuu erityisesti puurakenteissa. Puun kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta voidaan käyttää rakenteellisesti hyödyksi mm. sijoittamalla puuperäisiä lämmöneristeitä seinämärakenteisiin tasaamaan kosteuden kulkua rakenteissa ja vähentämään kosteusvauriovaaraa.

K.6.8 Kastuminen ja kuivuminen

Rakennuksissa ja rakenteissa esiintyvä kosteus voi olla näkyvää vettä, näkymätöntä vesihöyryä tai rakenteisiin sitoutunutta rakennekosteutta. Jos kuiva huokoinen materiaali joutuu kosketuksiin kostean ilman, märän materiaalin tai veden kanssa, alkaa kuiva materiaali kastua. Ensiksi materiaalin pinta kastuu vesimolekyyleistä, jonka jälkeen vesimolekyylit alkavat tunkeutua materiaalin sisään diffuusion, kapillaari-ilmiön tai konvektion avulla. Vesimolekyylit voivat myös tiivistyä vedeksi materiaalin pinnalle tai huokosseinämiin. Kuva K.6.2 esittää kaaviona rakennusaineen eri kosteusalueet täysin kuivasta täysin märkään.



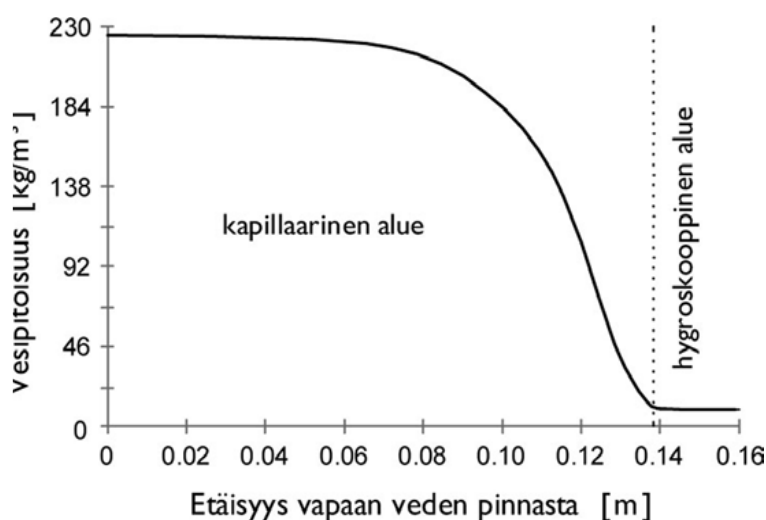
Kuva K.6.2. Kaaviokuva eri alueista ja määristä rakennusmateriaaliin varastoituneesta vedestä. (Nevander 1994)

Tarkastellaan huokaisen materiaalin kastumista täysin kuivasta tilanteeseen, jossa materiaali on vedellä kyllästynyt. Materiaalin ollessa aluksi kuiva ja sen ympärillä vesihöyrypitoisuus on alhainen, siirtyy kosteus vesihöyrymuodossa huokosissa vain diffuusiolla. Suhteellisen kosteuden noustessa huokosissa alkaa esiintyä kapillaarikondensaatiota (Nevander 1995). Tällöin huokosten pinnoille tiivistyy vettä, vaikka huokosissa ei ole olosuhteita $RH=100\%$ eli huokosissa vallitseva vesihöyryn osapaine ei ole kyllästysosapaineen tasolla. Näin kosteus siirtyy huokosissa osin jo myös kapillaarisesti. Materiaalin kosteuspitoisuuden noustessa huokokset täyttyvät yhä enemmän vedellä ja kapillaarisen siirtymisen osuus nousee. Saavutettaessa ns. kriittinen materiaalin kosteuspitoisuus w_{kr} tilanne on se, että huokokset ovat täyttyneet vedellä niin, kapillaarinen siirtyminen on hallitseva kosteuden siirtymisen muoto huokoisessa materiaalissa. Tällöin suhteellinen kosteus on lähellä tasoa 100% .

Kun kapillaarinen siirtyminen on täysin hallitseva eli kosteus siirtyy vain nestemäisessä muodossa, saavutetaan materiaalin kosteuspitoisuudessa kapillaarikyllästyksen taso, joka on yleensä selvästi suurempi kuin hygroskooppisella alueella saavutettava materiaalin kosteuspitoisuuden taso. Materiaalin kosteuspitoisuus voi nousta tasolle W_{kyl} , jolloin materiaali on täysin vedellä kyllästynyt. Tätä tasoa on kuitenkin käytännössä vaikea saavuttaa, koska huokosissa on myös ilmaa.

Kapillaarisella kosteustasapainolla tarkoitetaan sitä kosteuspitoisuutta, johon materiaali asettuu ollessaan kosketuksessa vapaaseen veteen. Vesi imeytyy huokosalipaineen vaikutuksesta ja kosteus nousee sille korkeudelle, jossa huokosalipaine ja painovoima ovat tasapainossa. Kapillaarinen tasapaino voidaan saavuttaa myös siten, että materiaali on kosketuksessa toiseen kapillaarisella alueella olevaan materiaaliin, esim. maaperään. Materiaalin kosteuspitoisuus voi olla kapillaarisella kosteusalueella myös silloin, kun siinä on rakennuskosteutta. Kapillaariselle kosteustasapainolle on ominaista, että kosteuspitoisuus on korkeampi kuin hygroskooppisella alueella.

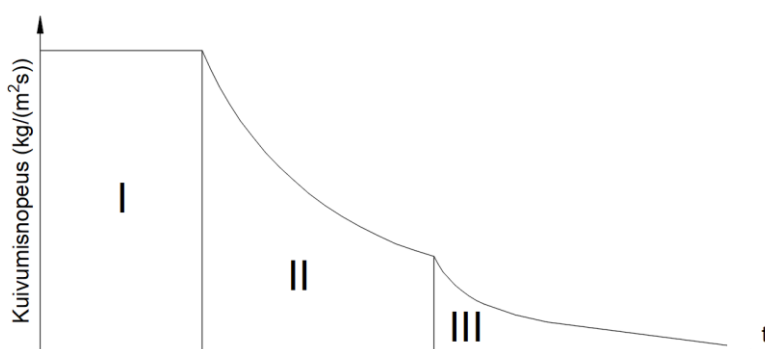
Materiaalin huokosjakaumasta riippuu, kuinka paljon materiaali imee kapillaarisesti itseensä kosteutta. Esimerkiksi tiilen kapillaarisesti imemä vesimäärä voi olla korkeintaan 7...25 % kuivapainosta, jolloin materiaaliin sitoutunut vesimäärä on 120...420 kg/m³. Tiilen hygroskooppisesti sitoma kosteus tiilen laadusta riippuen on selvästi alhaisempi, suuruusluokkaa 15 kg/m³. Kuvassa K.6.3 on esitetty esimerkkitapaus siitä, miten veteen kosketuksessa olevan tiilikappaleen materiaalin kosteuspitoisuus voi vaihdella riippuen siitä, miten kaukana ollaan vapaasta vedenpinnasta (Ympäristöopas 2016)



Kuva K.6.3. Erään tiilikappaleen materiaalin kosteuspitoisuuden vaihtelu sen ollessa kosketuksessa vapaaseen vedenpintaan. (Ympäristöopas 2016)

Kuvan tapauksessa lähellä vedenpintaa saavutetaan materiaalin kapillaarikyllästystaso W_{kap} , joka on lähes 230 kg/m^3 .

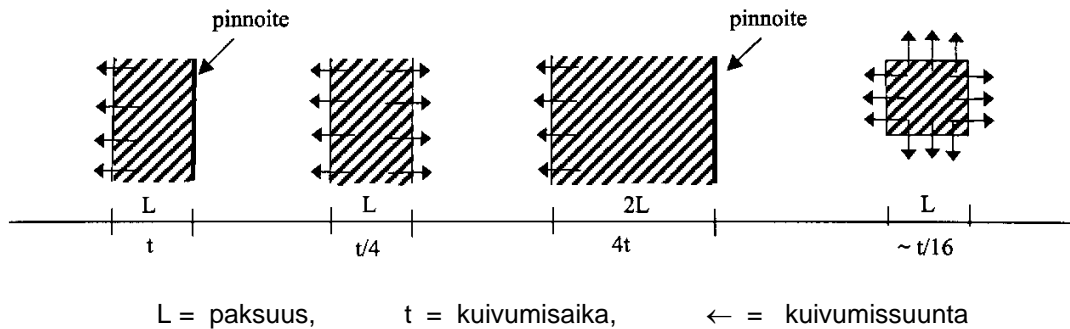
Tarkastellaan märän kappaleen, jonka kosteus on suuri, yli ns. kriittisen kosteuden, kuivumista. Vesi alkaa ensiksi poistua kapillaareista yhtä nopeasti kuin pinta ehtii haihduttaa. Tämä riippuu ulkoisista tekijöistä. Kappaleen kuivumisnopeus ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) on tällöin vakio (ks. kuva K.6.4 vaihe I). Kun kappaleen pinnan kosteus laskee alle kriittisen kosteuden, kapillaarinen nousu katkeaa pinnassa.



Kuva K.6.4. Huokoisen kappaleen kuivuminen ajan funktiona.

Tämän jälkeen kuivumisnopeus pienenee ajan funktiona, koska diffuusio alkaa olla ainoa kosteuden siirtymismuoto yhä syvemmältä kappaleesta (kuva K.6.5 vaihe II). Betonin kuivuminen tapahtuu lähes täysin tämän vaiheen mukaisesti. Lopulta koko kappale saavuttaa kriittisen kosteuden arvon ja kuivumisnopeus alkaa laskea kohti nollaa (kuva K.6.5 vaihe III). I- ja II-vaiheen kuivuminen eli ns. vapaan veden poistaminen onnistuu aika hyvin huoneenlämpötilassa ja kosteudessa, koska kapillaariputkista vesi haihtuu jo, kun suhteellinen kosteus on alle 98 %. Viimeiseksi materiaaliin jää kemiallisesti sitoutunut vesi ja pintoihin fysisorboitunut vesi, joka on korkeintaan muutaman molekyylikerroksen paksuinen. Tällä tavalla materiaaliin sitoutuneen veden saa vain lämmittämällä pois. Käytännössä vaihetta II ja vaihetta III on vaikea erottaa toisistaan ja niitä kuvataan yhdellä laskevalla käyrällä.

Kuvassa K.6.5 on esitetty pelkistetysti kosteuden poistumismatkan pituuden vaikutus materiaalin kuivumisaikaan. Materiaalin paksuuden kaksinkertaistuessa kuivumisaika nelinkertaistuu. Paksuuden puoliintuessa tai jos kuivuminen voi tapahtua molemmin puolin kuivumisaika putoaa neljäsosaan.



Kuva K.6.5. Lyhyet kosteuden poistumisetäisyydet vähentävät kuivumisaikoja. (Petersson 2001)

Rakenteen pinta

Konvektio

Kosteusvirta g ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$) ympäröivästä ilmasta pinnalle voidaan esittää

$$g = \beta (v_{\text{ymp}} - v_p) \quad (\text{K.6.7})$$

missä β (m/s) on kosteuden siirtymiskerroin, v_{ymp} vesihöyrypitoisuus ympäröivässä ilmassa (g/m^3) ja v_p vesihöyrypitoisuus pinnassa (g/m^3). β :n arvo riippuu ilman nopeudesta pinnan läheisyydessä. Lewisin kaava antaa pinnan konvektiivisen lämmönsiirtymiskertoimen α_{kon} ja β :n välille seuraavan yhteyden

$$\beta = \frac{\alpha_{\text{kon}}}{\rho c} \quad (\text{K.6.8})$$

missä α_{kon} ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$) on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin, ρ ilman tiheys (g/m^3) ja c ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) ilman ominaislämpökapasiteetti. Pinnan vesihöyrynvastusta Z_{vp} on usein käytetty β -arvon sijasta. Se määritellään

$$Z_{vp} = \frac{1}{\beta} \quad (\text{K.6.9})$$

Seuraavia oletusarvoja käytetään usein rakennusfysiikan sovelluksissa:

$$Z_{vs} = 360 \text{ s/m} \quad (\text{sisäpinta})$$

$$Z_{vu} = 60 \text{ s/m} \quad (\text{ulkopinta})$$

Tarkemmissa laskelmissa on otettava huomioon pinnan kosteudensiirtymiskertoimen β riippuvuus ilman virtausnopeudesta pinnan läheisyydessä. Esimerkiksi lähteessä Sandin 2017 on esitetty tämä riippuvuus epälineaarisenä käyränä. Sen mukaan ilman virtausnopeudella 5 m/s kosteudensiirtymiskerroin on noin $20 \cdot 10^{-3}$ m/s, nopeudella 10 m/s kerroin on noin $36 \cdot 10^{-3}$ m/s ja nopeudella 20 m/s kerroin on $60 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Tiivistyminen ja haihtuminen

Jos vesihöyrypitoisuus ympäröivässä ilmassa v_{ymp} on suurempi tai yhtä suuri kuin pinnan lämpötilaa vastaava kyllästyskosteus alkaa pintaan tiivistyä kosteutta. Pintaan, jonka lämpötila on T , tiivistyvä kosteusvirta voidaan esittää

$$g = \beta (v_{ymp} - v_p(T)) \quad (K.6.10)$$

Veden tiivistyminen pintaan on lämpöä luovuttava reaktio (eksoterminen reaktio) ja voi aikaansaada pinnan lämpötilan nousun ja täten pienentää pintaan tiivistyvän vesihöyryn määrää.

Analogisesti määristä pinnasta haihtuvalle vesihöyryn määrälle saadaan

$$g = \beta (v_p(T) - v_{ymp}) \quad (K.6.11)$$

Haihtuminen on lämpöä tarvitseva reaktio (endoterminen reaktio) ja aiheuttaa puolestaan pinnan jäähtymisen.

Rakenteen sisäosa

Kosteuspitoisuudet rakenteen sisällä eri kohdissa vaihtelevat jatkuvasti. Tämä johtuu ympäröivien olosuhteiden suurista muutoksista (vuodenajat, sateet, auringonpaiste jne). Kosteutta rakenteeseen voi tulla sekä ulkoa että sisältä. Sisältä tuleva kosteus voi tiivistyä vedeksi jossakin rakenteen kohdassa, mikäli vesihöyryn osapaine ylittää tämän kohdan lämpötilaa vastaavan kyllästyspaineen.

Diffuusiovirtauksen tapauksessa rakenteessa vallitsevaa vesihöyryn osapainetta ja lämpötilaa rakenteen eri kohdissa laskea kappaleen K.5.4. kaavojen mukaan. Voidaan laskea myös rakenteen kuivumisnopeutta diffuusion perusteella seuraavan esimerkin mukaisesti.

Esimerkki K.6.2

Rakennuskostea maanvastainen betonilaatta on valettu 12 cm paksujen, jäykkien mineraalivillalevyjen päälle. Levyjen alla on kunnollinen salaojitussorakerros, joka estää kapillaari-imun. Maaperän lämpötila koko konstruktion alapuolella on 14 °C. Betonilaatan yläpuolella sisätilassa lämpötila on 22 °C ja suhteellinen kosteus 45 %. Betonin pinnalla on 2,5 mm paksu PVC-matto, jonka vesihöyrynvastus on 75000 s/m. Mineraalivillan vesihöyryn läpäisevyys $\delta = 8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Salaojitus-sorakerroksen vesihöyrynvastus on nolla. Laske betonilaatan kuivumisnopeus diffuusion perusteella.

Ratkaisu

Koska betonilaatta on hyvin lämpöeristetty, sen voidaan katsoa olevan sisätilan lämpötilassa 22 °C. Vesihöyrypitoisuus rakennuskosteassa betonilaatassa vastaa kyllästyskosteutta 22 °C lämpötilassa eli taulukosta $v_{\text{kyll}} = 19,41 \text{ g/m}^3$. Absoluuttinen kosteus sisätilassa $v_s = 0,45 \times 19,41 \text{ g/m}^3 = 8,73 \text{ g/m}^3$. Vesihöyrypitoisuus mineraalivillalevyjen alapinnalla on sama kuin kyllästyskosteus lämpötilassa 14 °C, joka saadaan taulukosta ja on 12,07 g/m³.

Vesihöyrynvastus mineraalivillalle $Z_{\text{min.villa}} = \frac{d}{\delta} = 0,12/(8 \times 10^{-6}) = 15000 \text{ s/m}$.

Vesihöyrynvastus PVC-matolle $Z_{\text{matto}} = 75000 \text{ s/m}$, joka oli annettu yllä.

Täten kosteusvirtatiheydet ovat:

$$g_{\text{matto}} = 1/75000 \times (19,41 - 8,73) 3600 = 0,51 \text{ g/m}^2\text{h.}$$

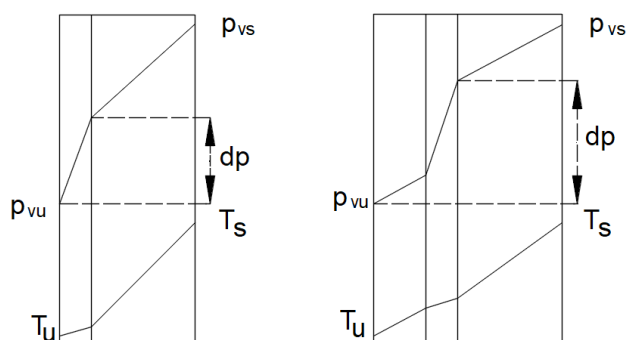
$$g_{\text{min.villa}} = 1/15000 \times (19,41 - 12,07) 3600 = 1,76 \text{ g/m}^2\text{h.}$$

Eli betonilaatasta kosteutta poistuu molemmilta pinnoilta ja kuivumisnopeus

$$g = g_{\text{matto}} + g_{\text{min.villa}} = 0,51 + 1,76 = 2,27 \text{ g/m}^2\text{h.}$$

Rakenteen kuivumiskyky

Seinärakenteen kuivumiskykyä voidaan olennaisesti parantaa lisäämällä varsinaisen tuulensuojakerroksen ulkopuolelle vesihöyryn diffuusiota hyvin läpäisevä lämmöneristyskerros. Tällöin kuvan K.6.6. mukaisesti vesihöyryn osapaine-ero dp kasvaa ja kappaleen K.5.4 kaavojen perusteella saadaan lisättyä diffuusiokuivumista ulospäin. Kohonneen lämpötilan takia tuulensuojaan kondensoituneen vesihöyryn diffuusiota rajoittavan jäätymiskerroksen ajanjakso myös lyhenee (kuva K.6.9).



Kuva K.6.6. Seinän ulkopuolisen eristyksen vaikutus tuulensuojan kuivumiskykyyn. Lämpötilan nousu tuulensuojan sisäpinnalla kasvattaa vesihöyryn osapaine-eroa dp ja näin diffuusiokuivuminen ulospäin lisääntyy.

Lähtökohtana kosteusteknisesti toimivien rakenteiden suunnittelussa on kosteusriskien tunnistaminen, niiden vaikutusten rajoittaminen ja rakenteen kuivumiskyvyn lisääminen. Kosteustekninen mitoitustapa on mitoitusta riskin varalle. Mitoitusperiaatteen toimivuus myös normaalista poikkeavissa ilmasto-oloissa. Lisävarmuutta kosteustekniseen toimintaan saadaan edellyttämällä rakenteelta hyvää kuivumiskykyä. Rakenteen eri osille voidaan esittää toiminta-arvoja, joilla päästään kosteusteknistä toimivuutta lisääviin ratkaisuihin.

K.6.9 Betonirakenteiden kuivumisen arviointi

Betonirakenteiden kuivuminen on suhteellisen hidasta ja riippuu monista eri tekijöistä, kuten betonin ominaisuuksista, rakenneratkaisuista ja kuivumisolosuhteista.

Sisätiloihin rajoittuvat betonirakenteet, kuten lattiat ja seinät päällystetään tai pinnoitetaan useimmiten jollakin toisella materiaalilla (muovimatolla, laatoilla, parketilla, maalilla jne.). Betonirakenteen tulee kuivua päällystemateriaalikohtaisen kosteusraja-arvon alapuolelle ennen kuin päällystys- tai pinnoitustöihin voidaan ryhtyä. Jos betonirakenne ei ole riittävästi kuivunut voi ennenaikaisesta pinnoituksesta olla seurauksena monenlaisia kosteusvaurioita ja -haittoja.

Yleisimmille betonirakenteille voidaan laatia kuivumisaika-arviot, kun rakenneratkaisu ja tavoitekosteus ovat tiedossa. Keskeisimmät muuttujat, joita käytetään kuivumisaika-arvioissa ovat: vesi-sementtisuhte, rakenneratkaisu ja kuivumisolosuhteet.

Kuivumisaika-arviot ovat aina suuntaa-antavia ja ne on tarkoitettu käytettäväksi rakennusaikataulujen ja kuivatuksen suunnitteluun. Todellinen varmuus rakenteen riittävästä kuivumisesta saadaan vain mittaamalla betonin suhteellinen kosteus. Betonin kosteuden mittausten menetelmiä on käsitelty rakennusfysikaalisia mittauksia käsittelevässä osiossa M.

Betonirakenteiden kuivuminen tasapainokosteuteen ympäristön kanssa voi rakenneratkaisusta riippuen kestää jopa vuosia. Betonirakenteiden ei kuitenkaan tarvitse rakennusaikana saavuttaa tätä tasapainokosteutta. Kuivumisvaatimuksia on lähinnä sellaisille rakenteille, jotka päällystetään kosteusherkillä materiaaleilla ja tällöinkin vaatimuksena on yleensä suhteellisen kosteuden arvo 80–90 RH%.

Suomen Betoniyhdistys on aikanaan kehittänyt laskentamenetelmän (BY1021), jolla voidaan tehdä erilaisten betonirakenteiden kuivumisaika-arvioita. Menetelmässä tarkastellaan rakenteiden kuivumista yleisellä tasolla vakiokuivumisolosuhteissa, jolloin voidaan verrata eri rakenteiden tai olosuhteiden vaikutusta kuivumisaika-arviioon.

Yhtenä rakenteena voidaan tarkastella esimerkiksi maanvaraista betonilaatta, jolloin laskennassa varten tarvitaan 7 parametria: maanvaraisen laatan peruskuivumisaika viikkoina (saadaan kokeellisesta käyrästä halutun tavoitekosteuden avulla), vesisideainesuhde, rakenteen paksuus, alustan kosteus, kastumisaika, ympäristön suhteellinen kosteus RH% ja lämpötila. Kuivumisaikaan vaikuttavat eniten vesisideainesuhde ja rakenteen paksuus.

Esimerkki K.6.3

80 mm paksu maanvastainen teräsbetonilaatta, betonin vesisideainesuhde 0,7, alusta kuiva, kuivatusvaiheen olosuhteet 20 °C ja 50 RH%. Tavoitekosteus 85 %. Muut parametrit näkyvät laskurissa.

Ratkaisu

Sijoitetaan parametrit laskentamenetelmän mukaiseen laskuriin. Peruskuivumisaika saadaan peruskuivumiskäyrästä tavoitekosteuden avulla. Muut parametrit on annettu kuvassa esimerkissä. Laskuri antaa arvioiduksi kuivumisajaksi 16,5 viikkoa.

Jos vesiside-ainesuhde olisi 0.5, saataisiin kuivumisaika-arvioksi 7,2 viikkoa.

Jos vain laatan paksuutta muutettaisiin arvoon 120 mm, saataisiin kuivumisaika-arvioksi 30 viikkoa.

Betonirakenteiden kuivuminen

"Tarja Merikallio. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi. Betonikeskus 2002."

Kohde: **Kiinteistö Oy**

Maanvastainen teräsbetonilaatta

Kun olet ensin valinnut haluamasi rakennetyypin sivun alareunan taulukoista, syötä sitten arvot tavoitekosteudelle, vesi-sideainesuhteelle ja rakenteen paksuudelle. Valitse lisäksi vaihtoehdoista alusta, kastumisaika sekä kuivumisolosuhteista kosteus ja lämpötila. Kuivumisaika ilmoitetaan viikkoina. Kuivumisaikaan lasketaan alkavan siitä kun rakenne ei enää saa lisäkosteutta. Jos jälkihoito tehdään kastelemalla, lasketaan aika kastelun lopettamisen jälkeen. Jos jälkihoito tehdään peittämällä, lasketaan aika valusta.

	Syöttöarvot	Raja-arvo	Peruskuivumisaika
Tavoitekosteus	85,0 %	"80-100"	17,0
Vesi-sideainesuhde	0,70	"0,4-0,7"	Kerroin 1,00
Rakenteen paksuus	80,0 mm	"70-150"	Kerroin 1,15

BY1021

Alusta

Kuiva

Muovi

Märkä

Kastumisaika

Kuivassa

Kosteassa yli 2 viikkoa

Kastunut yli 2 viikkoa

Kuivumisolosuhteet

Kosteus

35 %

50 %

60 %

70 %

80 %

Lämpötila

10 C

15 C

20 C

25 C

30 C

Kuivumisaika viikkoina:

16,5

Kuva K.6.7. Esimerkin K.6.4. Maanvastaisen betonilaatan kuivumisaika-arvion laskenta. (BY 1021)

Esimerkissä saatu tulos on vain suuntaa antava.

Kuivumisaikalaskurin BY1021 tilalle Suomen betoniyhdistys on kehittänyt uuden kuivumisaika-arvion laskentamenetelmän by2020, joka tulee käyttöön vuoden 2020 aikana. Se on tarkoitettu rakennusprojektien kosteudenhallinnan suunnitteluun ohjaamaan betoni- ja päällystemateriaalivalintoja sekä työmaan aikataulutusta ja olosuohallintaa. Ohjelmalla voidaan tehdä betonirakenteiden kuivumisaika-arviota sekä päällystettävien rakenteiden riskiarviota. Ohjelman antaman arvion perusteella ei tule kuitenkaan tehdä päällystettävyyuspäätöksiä. Betonirakenteen todellinen kuivuminen ja päällystettävyyuspäätös edellyttävät aina rakenteesta tehtäviä kosteusmittauksia (Merikallio).

Uusi FEM-pohjainen by2020 Betonin kuivumisaika-arvio -ohjelma mahdollistaa huomattavasti monipuolisemman arvioinnin. Kuivumisaika-arvio voidaan tehdä valusta todellisen aikataulun mukaisesti, sisältäen mahdolliset pintavalut ja tasoitukset. Päällystettävyyden riskiarvioinnissa ohjelmaan syötetään mahdollisimman hyvin arvioitavaa kohdetta vastaavat rakenne-, olosuohde- ja aikataulutiedot sisältäen päällysteen arvioidun asennusajankohdan. Riskiarviossa tarkastellaan päällysteen alapuolelle tasaantuvaa suhteellisesta kosteutta verrattuna pintamateriaalin kosteudensietokykyyn. Riskiarvioissa voidaan tarkastella, miten suhteellinen kosteus uudelleen jakaantuu päällystämisen jälkeen ja millä vaihtoehdoilla on olemassa ilmeinen riski, että kosteus päällysteen välittömässä läheisyydessä nousee vaurioitumisen kannalta kriittisen korkeaksi (Merikallio).

K.7 Kosteusvauriot ja kosteuden aiheuttamat haitat

Kosteus eli vesi eri olomuodoissaan voi aiheuttaa rakenteille ja rakennuksille merkittäviä vaurioita ja ongelmia, jotka estävät tai heikentävät rakennuksen käyttöä. Pahimmillaan kosteuden aiheuttamat vauriot voivat aiheuttaa vakavia terveysriskejä, joista tyypillisin on liiallisen kosteuden aiheuttaman homealtistuksen aiheuttamat sairaudet. Liiallisen kosteuden aiheuttamia terveysriskejä käsitellään tarkemmin sisäilmaosiossa. Kosteuden aiheuttamat vauriot kuten puurakenteiden lahovauriot ja teräsrakenteiden korroosio voivat vaarantaa myös kantavien rakenteiden kantokyvyn.

K.7.1 Biologinen turmeltuminen

Mikro-organismit, kuten sienet ja bakteerit, tarvitsevat elääkseen suotuisat olosuhteet, joihin kuuluvat sopiva kosteus, happi, lämpötila ja orgaaninen aines. Oleellista on myös, että olosuhteet ovat voimassa riittävän pitkän ja jatkuvan ajanjakson, jotta vaurioita ehtii syntyä.

Mikro-organismeihin kuuluvat mm. puun erilaiset lahottajasienet ja homesienet.

Puu itsessään toimii lahottajasienten orgaanisena ravintona. Puun lahoamisvaara riippuu puun kosteudesta ja ympäristön lämpötilasta. Suomalaisten tutkimusten mukaan lahon synty on mahdollista, kun mikroilmaston tai materiaalien huokosilman kosteus on pitkäaikaisesti, viikkoja - kuukausia yli 95 % ja lämpötila yli +5 °C. Laho ei ole havaittu kehittyvän olosuhteissa, jotka vastaavat alle RH 90 % kosteusoloja missään lämpötilassa. Yleensä merkittävät lahovauriot kehittyvät vasta silloin, kun materiaalit ovat märkiä eli puun kosteus yli 25-30 % kuivapainosta. Silloin ollaan selvästi materiaalin kapillaarisella alueella, eli puun on oltava kosketuksissa veteen.

On esitetty myös arvioita, että lahoaminen voi jo teoriassa alkaa, jos puun kosteuspitoisuus on suurempi kuin 20 % kuivapainosta ja lämpötila on yli 0 °C. Jos puuta ympäröi +20 asteen lämpötilassa ilma, jonka suhteellinen kosteus on noin 85–90 %, saavuttaa puu jo 20 % kosteuspitoisuuden tasapainokosteuskäyrien perusteella. Jo alkanut lahoaminen saattaa jatkua vielä puun kosteuden ylittäessä 17 % kuivapainosta. Jotkut lahottajasienet, kuten lattiasieni leviävät vielä kuivemmissakin olosuhteissa.

Lahoamisriski nousee puun lämpötilan ja kosteuden noustessa. Kuitenkin puun lahoaminen pysähtyy, kun puun kosteuspuiteisuus on yli 100 % kuivapainosta. Tällöin puun on oltava jatkuvassa kosketuksessa veteen ja vesi ei pääse pois puusta. Käytännössä näin voidaan olettaa, kun puu on täysin veden ympäröimä, kuten esimerkiksi pohjavedenpinnan alapuolella oleva puupaalu. Lahoaminen pysähtyy myös silloin, kun puun lämpötila ylittää 30 °C.

Homesientien kasvu on mahdollista, kun materiaaleja välittömästi ympäröivän ilman (mikroilmaston) tai materiaalien huokosilman suhteellinen kosteus on viikkoja - kuukausia yli 75–80 % RH ja lämpötila 5–50 °C. Homesientien kasvu on yli 20–25 °C lämpötilassa selvästi nopeampaa kuin alemmissä lämpötiloissa (alle 10 °C). Sienille otollisissa oloissa, RH yli 95 % ja lämpötila 20–40 °C, homeet voivat kasvaa silmin nähtäviksi kasvustoiksi muutamassa vuorokaudessa. Alle 5 °C:n lämpötiloissa homesientien kasvu on mahdollista, kun materiaalien pinnan suhteellinen kosteus on jatkuvasti tai pitkäaikaisesti yli 90–95 % suhteellista kosteutta vastaava.

Homesienet kasvavat myös muissa orgaanisissa materiaaleissa kuin puussa. Tyypillisiä kasvualustoja rakenteissa ovat pölyä keräävät pinnat, orgaaniset levyt ja levyjen orgaaniset pintakerrokset. Home voi esiintyä myös kivipinnoissa, jos pintaan on kertynyt orgaanisia aineksia kuten pölyä tai muita epäpuhtauksia.

Homeen kasvua voidaan tarkastella laskennallisesti VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän Suomalaisen homemallin avulla. Suomalainen homemalli (engl. Finnish mould growth model) pohjautuu aiemmin VTT:n puumateriaaleille kehittämään homemalliin. Mallin avulla homeen kasvua voidaan arvioida eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona.

Suomalaisessa homemallissa käytetään materiaalin homehtumista kuvaavana vertailusuurena homeindeksiä M, joka vaihtelee välillä 0–6 ja kuvaa homeen määrän lisääntymistä materiaalin pinnalla (taulukko K.7.1.).

Taulukko K.7.1. Suomalainen homemallin mukainen homeindeksiluokitus.
(Suomalainen homemalli)

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

Homeindeksi lasketaan tunnin välein määritettyjen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. Mallissa otetaan huomioon myös homeen taantuminen liian kuivissa tai kylmissä olosuhteissa, jolloin homeindeksin arvo pienenee. Homeindeksi ei ota kantaa eri homelajien esiintymiseen materiaalissa, vaan kuvaa homeen kasvua materiaalien pinnoilla. Sen avulla ei voida arvioida, kuinka terveydelle vaarallisia homeita materiaalissa kasvaa.

Homemallissa rakennusmateriaalit on jaettu niiden homehtumisherkkyyden perusteella neljään homehtumisherkkyydsluokkaan ja neljään homeen taantumaluokkaan taulukoiden K.7.2. ja K.7.3. mukaisesti.

Taulukko K.7.2. Rakennusmateriaalien luokittelu eri homehtumisherkkyyssuokkiin. (Suomalainen homemalli)

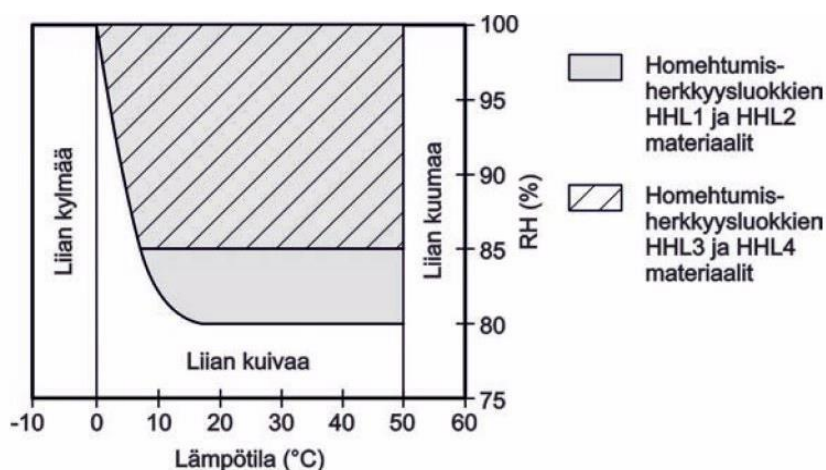
Homehtumisherkkyyssuokka		Rakennusmateriaalit
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitalistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, kipsilevy, vaneri, lastulevy, bitumoidut/käsitellyt huokoiset kuitulevyt
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni*, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiili
HHL4	Kestävä	Alkalinen uusi betoni, lasi ja metallit, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

* Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssuokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyyssuokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssuokan HHL3 tasolle.

Taulukko K.7.3. Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyssuokkaa tyypillisesti vastaava homeen taantumaluokka suomalaisessa homemallissa. (Suomalainen homemalli)

Homehtumis-herkkyyssuokka	Homeen taantumaluokka
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma

Kuvassa K.7.1. on esitetty mallissa käytetyt suotuisat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot eri homehtumisherkkyyssuokan materiaaleille.



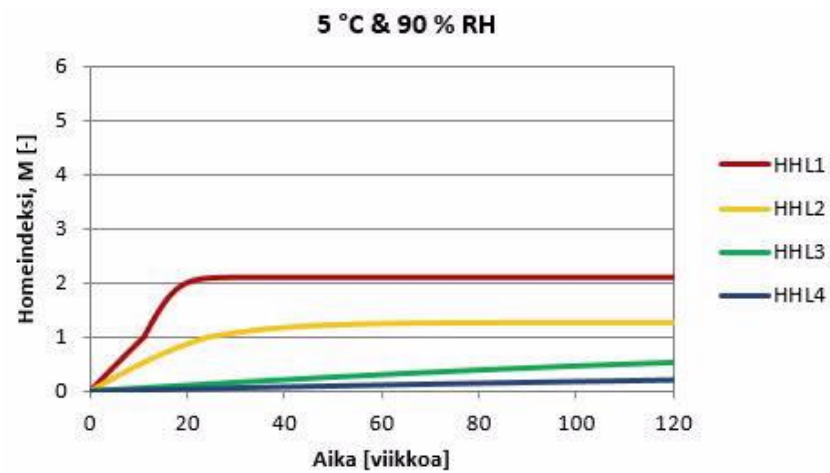
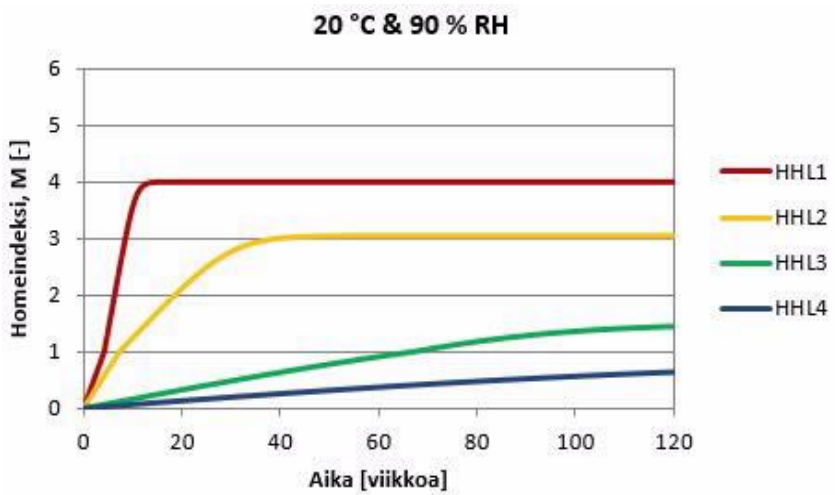
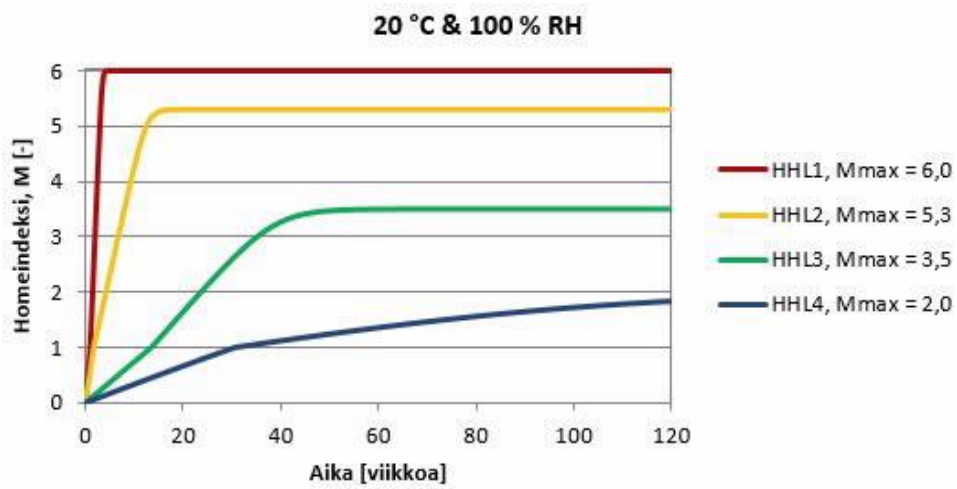
Kuva K.7.1. Homeen kasvun kannalta suotuisat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet eri homehtumisherkkyyssuokissa. (Suomalainen homemalli)

Kuvan K.7.1. mukaan esimerkiksi homehtumisherkkyyssuokkaan HHL1 kuuluva karkeasahattu kuusi ei homehdu 20 asteen lämpötilassa ja 76 %:n suhteellisessa kosteudessa. Jos samassa lämpötilassa ympäröivän ilman suhteellinen kosteus onkin 82 %, on homeen kasvu mahdollista. Vastaavasti homehtumisherkkyyssuokkaan HHL3 kuuluvan kevytsorabetonin pinnassa ei homeen kasvu ole mahdollista edellä mainituissa olosuhteissa. Edelleen kuvan mukaan homehtuminen ei missään tapauksessa ole mahdollista, jos joku seuraavista olosuhteista pelkästään on voimassa:

- suhteellinen kosteus on alle 80 %
- lämpötila on alle 0 C tai yli 50 C

Homemallin mukaisessa homeindeksilaskennassa otetaan huomioon eri materiaalien homehtumisherkkyyssuokat ja vastaavat homeen taantumaluokat.

Kuvassa K.7.2. on esitetty homemallin mukaisia homeindeksien laskentatuloksia erilaisissa vakio-olosuhteissa.



Kuva K.7.2. Homemallin mukaan laskettuja homeindeksin arvoja vakio-olosuhteissa. (Suomalainen homemalli)

Homemallin mukaisen homeindeksin Excel-pohjainen laskentataulukko on ladattavissa lähteen Suomalainen homemalli-lähteen sivuilta.

Rakenteessa homeen kasvua esiintyy tyypillisesti kahden materiaalin välisessä rajapinnassa. Rajapinnan homehtumisriskiä tulee tarkastella yleensä herkemman materiaalin mukaan. Lisäksi herkemmin homehtuva materiaali lisää homeen kasvua tyypillisesti myös vähemmän herkässä materiaalissa. Poikkeuksena edellä mainittuun ovat homesuoja-aineita sisältävät materiaalit sekä alkalinen uusi betoni. Näiden materiaalien ja herkemmin homehtuvien materiaalien välisessä rajapinnassa homeen kasvua voidaan tarkastella HHL4 luokan mukaan edellyttäen, että rajapinnassa olevat materiaalit ovat kauttaaltaan kontaktissa toisiinsa. Puukuitueristeiden kanssa homeindeksin määrittäminen tulee tehdä herkemman rajapintamateriaalin mukaisesti, koska sitä käytettäessä kontakti toiseen materiaaliin ei voida olettaa olevan täydellinen. Kuitenkin eristeen sisältämä homesuoja-aine vähentää käytännössä homehtumisriskiä. (Suomalainen homemalli)

Yleensä homeen kasvu tapahtuu ainoastaan materiaalien pinnoilla, mutta avohuokosissa lämmöneristeissä, kuten esimerkiksi mineraalivilloissa, hometta voi kasvaa myös eristeiden sisällä. Tällöin homeen kokonaismäärä voi olla huomattavasti suurempi kuin materiaalissa, jossa homehtuminen tapahtuu vain pinnalla. Tämä on otettava huomioon arvioitaessa rakenteen homehtumisriskiä.

Suomen ilmasto-olosuhteissa homeindeksin maksimiarvon raja-arvo on suositeltavaa valita niin, että homeen kasvua ei sallita kantavissa rakenteissa eikä lämmöneristekerroksessa tai sen sisäpuolella olevissa materiaalikerroksissa. Toisin sanoen homeindeksin sallittu maksimiarvo näissä kohdissa on <1,0. Tähän päästään homemallin mukaan kaikissa tapauksissa rakenteessa, jos lämpötila on alle 0 C tai yli 50 C tai suhteellinen kosteus on alle 80 %.

Vakio-oloissa pienillä männyn ja kuusen pintapuun koekappaleilla on saatu homeen kasvun alkamisen (homeindeksi M=1) kriittistä aikaa kuvaava regressiomalli

$$t_m = e^{(-0,68 \cdot \ln(T) - 13,9 \cdot \ln(RH) + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} \quad (\text{K.7.1})$$

missä

t_m = homeen kasvun alkamiseen tarvittava aika (vko)

T = lämpötila (C) (0,1...45 °C)

RH = suhteellinen kosteus (%)

W = puulaji (0=mänty, 1=kuusi)

SQ = pinnan ravinteikkaus (0=sahapinta, 1=kuivaamossa vallinnut puun pinta)

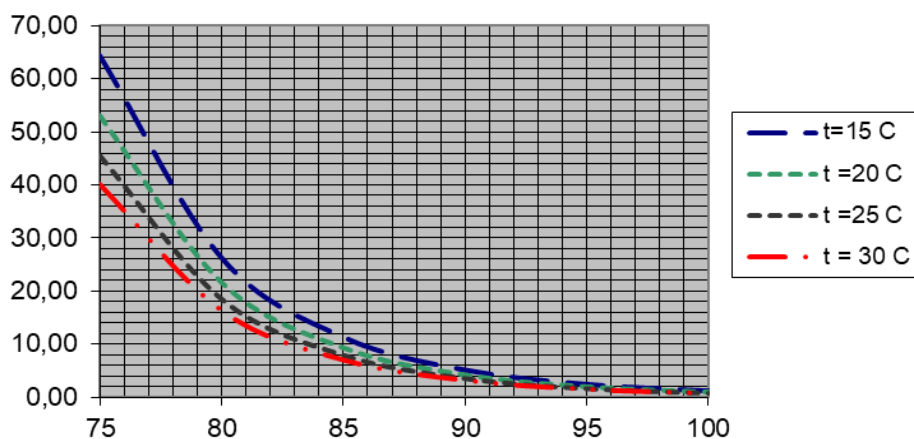
Esimerkki K.7.1

Sahapintaista mäntypuuta ympäröivän ilman suhteellinen kosteus on 80 % ja lämpötila on 20 °C. Kuinka kauan saa kulua aikaa, että homeen kasvu alkaa mäntypuussa?

Tulokseksi saadaan $t = e^{(-0,68 \ln(20) - 13,9 \ln(80) + 66,02)} = 21,6$ viikkoa

Jos suhteellinen kosteus olisi 90 %, saadaan tulokseksi 4,2 viikkoa

Kuvassa K.7.3 on esitetty tarvittava aika sahapintaisen mäntypuun homehtumisen alkamiseen suhteellisen kosteuden funktiona eri lämpötiloissa. Esimerkiksi ilman suhteellisen kosteuden arvolla 80 % 15 asteen lämpötilassa tarvittava aika on noin 26 viikkoa ja 30 asteen lämpötilassa noin 16 viikkoa.



Kuva K.7.3. Tarvittava aika (vko) puun homehtumisen alkamiseen suhteellisen kosteuden funktiona ilman eri lämpötiloissa. Tarkasteltavana materiaalina sahapintainen mäntypuu.

Ympäristöoppaan 2016 taulukossa 7.1. (taulukko K.7.4.) on esitetty kootusti ohjeelliset arvot materiaalin kosteuspitoisuuden, lämpötilan ja ajan merkityksestä rakenteen homehtumisriskiin.

Taulukko K.7.4. Ohjeelliset arvot materiaalin kosteuspitoisuuden, lämpötilan ja ajan merkityksestä rakenteen homehtumisriskiin. (Ympäristöopas 2016)

Rakennusosa	Homehtumisriski ¹⁾		
	RH 70...80 % ²⁾	RH 80...90 %	RH > 90 % ja kapillaarialue
Rakennuksen ulkovaipan sisäosat, väliseinät ja välipohjat	Vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy vuositasolla lähinnä lyhyinä jaksoina	Vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina ³⁾	Rakenne on pääsääntöisesti korjattava, ellei kosteuspitoisuus esiinny vain lyhyinä jaksoina esim. kosteiden tilojen sisäpinnoilla. ^{4) 5)}
Rakennuksen ulkovaipan ulko-osat	Vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy vuositasolla lyhyinä jaksoina tai pidempiaikaisesti vuoden kylmimpänä aikana	Vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai kylminä vuodenaikoina ³⁾	Rakenne on pääsääntöisesti korjattava, jos kosteuspitoisuudet esiintyvät pitkinä jaksoina, ellei rakenteen lämpötila ole samanaikaisesti alle 0 °C. ³⁾
Rakennuksen maakosketuksessa olevat perusrakenteet (kiviainespohjaiset materiaalit, solumuovit, solulasit yms.)	Rakenteen toimivuutta/vaurioitumista ei arvioida suhteellisen kosteuden mukaan. Sen sijaan on arvioitava onko kosteudesta haittaa niille materiaaleille, jotka ovat kosketuksissa ko. rakenteeseen, siirtyykö kosteus ko. rakenteesta sisäänpäin sekä arvioitava tapahtuuko maanvastaisen rakenteen kautta ilmavuotoja sisätiloihin.		
Rakennuksen kapillaarikatko-kerros, alustäyttö ja maapohja	Rakennusosassa esiintyy yleisesti home- ja mikrobikasvua, joten homehtumisriskin arviointi ei ole tarkoituksenmukaista. ⁶⁾		

¹⁾ Joissain tapauksissa voi olla tarpeen arvioida rakenteessa vallitsevan kosteustason lisäksi tarkastelupisteessä olevan, mikrobien ravintona toimivan orgaanisen aineksen määrää.

²⁾ Materiaalin kosteuspitoisuudessa RH ≤ 75 % homehtumisriski on vain hyvin herkillä materiaaleilla, yli 20 °C lämpötilassa kosteusrasituksen esiintyessä tasaisena useiden kuukausien ajan. Vertaa luku 6, kuva 6.5 ja taulukko 6.5.

³⁾ Edellyttää kokonaistilanteen huomioimista perustuen yleensä kokemukseräiseen tietoon rakenteen toiminnasta.

⁴⁾ Vesivuototapauksissa korjaukselta voidaan joissain tapauksissa välttyä, jos rakenne kuivatetaan riittävän nopeasti.

⁵⁾ Lukuun ottamatta poikkeustapauksia, joissa kosteuspitoisuus voi olla >90 % tai kapillaarialueella pitkiä aikoja. Näitä ovat mm. märkätilan vedeneristeen päällä olevat rakenteet eli laatan kiinnityslaasti, saumalaasti ja keraaminen laatta, märkätilan bitumivedeneristeen päällä oleva betoninen pintalaatta sekä huoneistojen välinen märkätilan betoniseinä, jossa on suihkutila seinän molemmilla puolin.

⁶⁾ Maaperässä oletetaan olevan suunnittelun lähtökohtana huokosilman suhteellinen kosteus 100 %, mutta kosteus voi olla ajoittain jopa kapillaarialueella. Alapohjarakenteen toimivuutta ei voida arvioida pelkästään rakenteiden alapuolisen kosteustason perusteella.

K.7.2 Kemialliset vaikutukset

Rakenteen kosteus vaikuttaa materiaaleissa kemiallisten reaktioiden määrään ja nopeuteen eri tavoin.

Metallien sähkökemiallisen korroosion edellytyksenä on elektrolyytti, joka voi olla vesi. Ohut metallin pintaan tiivistynyt vesikalvo tai jopa riittävän kostea ilma on korroosion kannalta riittävä. Esimerkiksi suojaamaton teräs alkaa ruostua 60 % suhteellisessa kosteudessa.

Kosteus voi kiihdyttää materiaalien haitallisia emissioita. Esimerkiksi kaseiinipohjaisesta tasoitteesta syntyy ammoniakkia liiallisen kosteuden seurauksena.

Vesi sinänsä heikentää monia materiaaleja ja kiihdyttää materiaalien kemiallisia vanhenemisreaktioita. Esimerkiksi puun lujuusominaisuudet heikkenevät puun kosteuden lisääntyessä. Liiallinen kosteus voi heikentää pinnoitteiden kiinnittymistä rakenteisiin. Esimerkiksi maalipinnat irrota tai hilseillä kosteuden takia.

Vesi voi liuottaa aineiden liukenevia ainesosia ja kuljettaa ne pois rakenteesta, esimerkiksi betonista ja tiilirakenteista liukenee ainesosia liiallisen veden seurauksena.

K.7.3 Terveysvaikutukset

Sisäilman suhteellinen kosteus vaikuttaa ihmisen sairastumisalttiuteen. Ilma ei saa olla liian kuivaa eikä liian kosteaa. Sopiva sisäilman suhteellinen kosteus on luokkaa 30-40 %.

Kosteus vaikuttaa välillisesti ihmisen terveyteen. Tyypillisin ongelma on materiaalien liiallisen kosteuden aiheuttama homekasvu ja edelleen homeitiöiden aiheuttamat terveyshaitat.

K.7.4 Muut vaikutukset

Kosteus vaikuttaa rakenteiden ulkonäköön. Tyypillisiä esteettisiä haittoja ovat materiaalien värimuutokset ja kosteuden aiheuttama likaantuminen, kuten pölyn keräytyminen kosteisiin pintoihin ja julkisivujen vesivalumiin mukana siirtyvät epäpuhtaudet.

Kosteus vaikuttaa myös asumisen kannalta haitallisten hyönteisten esiintymiseen rakennuksissa ja rakenteissa. Esimerkiksi muurahaiset ja sokeritoukat viihtyvät paremmin riittävän kosteissa olosuhteissa.

K.8 Laskentaesimerkit

K.1

Sisäilman lämpötila on +22 °C ja suhteellinen kosteus 40 %. Kuinka paljon on ilmassa vesihöyryä? Mikä on kastepistelämpötila?

K.2

Pesuhuoneen ilman suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila +23 °C. Lämpötila laskee pesuhuoneessa tasolle +18 °C. Mikä on pesutilan suhteellinen kosteus lämpötilan laskun jälkeen?

K.3

Maanvaraisen betonilaatan vesipitoisuus on valun jälkeen 180 kg/m³. Kuivumisen seurauksena betonista poistuu kosteutta 50 kg/m³.

- Kuinka paljon vettä (m³) poistuu laatasta, kun laatan paksuus on 160 mm ja pinta-ala 120 m²?
- Mikä on laatan keskimääräinen kosteustuotto G (g/h) sisätilaan, jos betoni kuivuu vain sisätilan suuntaan ja kuivumisaika on 30 vrk?
- Mikä on sisätilan keskimääräinen suhteellinen kosteus sisätilassa, jos ulkona lämpötila on +5 °C ja suhteellinen kosteus 80 % ja sisälämpötila on +20 °C. Laatan kosteustuoton lisäksi sisälle tuotetaan kosteutta muista lähteistä 300 g/h. Sisätilan ilmanvaihtoluku $n = 0,4$ 1/h ja sisätilavuus on 500 m³.

K.4

Ulkoilman suhteellinen kosteus on 90 % ja ulkolämpötila -10 °C. Rakennuksen sisälämpötila on +25 C ja suhteellinen kosteus 60 %. Rakennuksen sisätilavuus on 1000 m³ ja ilmanvaihtoluku $n = 0,3$ 1/h.

- Mikä on sisätilan kosteustuotto G (g/h)?
- Suhteellinen kosteus halutaan laskea arvoon 30 %. Sisätilan kosteustuotto pysyy vakiona. Mihin arvoon on saatava sisätilan ilmanvaihtoluku n (1/h)?
- Mikä on sisätilan ns. kastepistelämpötila?

K.5

Luokkahuoneen lämpötila on 22 °C. Ulkolämpötila on –10 °C ja ulkoilman suhteellinen kosteus 90 %. Luokkahuoneen tilavuus on 1500 m³.

- Laske luokkahuoneen suhteellinen kosteus aamulla ennen kuin opiskelijat ovat saapuneet luokkaan.
- Opiskelijoiden (50 kpl) saapuessa luokkaan ilmastointi laitetaan päälle (3 litraa/s/hlö). Laske luokkahuoneen suhteellinen kosteus tunnin kuluttua, jos jokainen opiskelija tuottaa kosteutta 120 g/h.
- Laske luokkahuoneen suhteellinen kosteus kahden tunnin kuluttua.
- Laske luokkahuoneen suhteellinen kosteus kolmen tunnin kuluttua.
- Laske luokkahuoneen korkein suhteellinen kosteus.

K.6

Tarkastellaan uimahallia, jonka sisämitat $A*B*H=30*50*15$ m³. Sisätilan ilmanvaihtoluku $n=0,5$ 1/h. Sisätilan suhteellinen kosteus $RH_s=65$ % ja lämpötila $t_s=+22$ °C. Ulkoilman suhteellinen kosteus $RH_u=80$ % ja lämpötila $t_u=0$ °C.

- Laske sisätilan kosteustuotto G (kg/h).
- Kuinka suureksi on ilmanvaihtoluku n saatava, jotta sisäilman suhteellinen kosteus saataisiin tasolle $RH_s=40$ %. Lämpötilat, kosteustuotto G ja ulkoilman suhteellinen kosteus pysyvät samoina.
- Tiivistyykö vesihöyry ikkunan pintaan b)-kohdan tapauksessa, jos ikkunan valoaukon U -arvo on 2,2 W/m²K ja sisäpinnan pintavastus $R_{si}=0,16$ m²K/W? Perustele laskelmin.

K.7

Sisäilman suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila + 22 °C. Tiivistyykö vesihöyry ikkunan sisäpintaan, jos ikkunassa on kaksi erillistä 3 mm:n lasia ja ilmaväli on 100 mm? Ulkona lämpötila on –20 °C.

K.8

Tuuletetun ryömintätilan lämpötila on +10 °C. Ulkoilman lämpötila on +20 °C ja suhteellinen kosteus 70 %. Mikä voi olla ryömintätilan pienin mahdollinen suhteellinen kosteus?

K.9

Ryömintätilan korkeus on 0,8 m, pituus 12 m ja leveys 8,5 m. Ryömintätalassa on koneellinen poistoilmanvaihto. Tilasta mitattiin suhteellinen kosteus 95 % ja lämpötila +17 °C. Ilmaa poistetaan ryömintätalasta $Q=120 \text{ m}^3/\text{h}$. Ulkoilman suhteellinen kosteus on 80 % ja lämpötila 19 °C.

- a) Mikä on ryömintätalilan ilmanvaihtoluku n (1/h)?
- b) Mikä on ryömintätalilan kosteustuotto G (g/h)?
- c) Mihin tasoon on ryömintätalilan ilmanvaihtuvuus Q (m^3/h) saatava, jotta suhteellinen kosteus saataisiin tasolle 80 % ? Kosteustuotto on vakio.

K.10

Maanvaraisen betonilaatan paksuus on 120 mm. Betonin vesisementtisuhde on 30 %. Laatan alla huokostilassa on 100 % suhteellinen kosteus. Kuinka paljon siirtyy vettä laatan läpi kapillaarisesti (g/m^2)?

K.11

Seinä on tehty betonista paksuudeltaan 200 mm. Sisäilman suhteellinen kosteus on 50 % ja lämpötila +22 °C. Ulkoilman suhteellinen kosteus on 70 % ja lämpötila +5 °C. Kuinka suuri on diffuusion avulla kulkeva kosteusvirta g/h seinän läpi, jos sen pinta-ala on 100 m^2 ?

K.12

Tarkastellaan ulkoseinän läpi diffuusion vaikutuksesta siirtyvää vesihöyryä. Ulkoseinän (sandwich-elementti) kerrokset ovat sisältäpäin lukien seuraavat: Betoni 150 mm, mineraalivilla 150 mm, betoni 80 mm. Betonin normaalin lämmönjohtavuus on 1,7 W/mK, mineraalivillan normaalin lämmönjohtavuus on 0,050 W/mK. Sisätalilan suhteellinen kosteus on 50 % ja lämpötila +23 °C. Ulkoilman lämpötila on -10 °C ja suhteellinen kosteus 90 %. Tiivistyykö vesihöyry seinärakenteeseen? Jos tiivistyy, laske yhdessä kuukaudessa tiivistyvän veden määrä litroina, kun tarkasteltava seinän pinta-ala on yhteensä 300 m^2 .

K.13

Ulkoseinärakenteen kerrokset ovat sisältä ulospäin seuraavat: kipsilevy 13 mm, vaakakoolaus 50*50 k 600 + mineraalivilla 50 mm, höyrynsulkumuovi: polyeteenikalvo 0,2 mm, pystykoolaus 150*50 k 600 + mineraalivilla 150 mm, tuulensuojalevy: kipsilevy 9 mm, hyvin tuuletettu ilmarako 30 mm, puuverhous. Ulkoilman lämpötila on -20 °C ja suhteellinen kosteus 90 %, sisäilman lämpötila on +23 °C ja suhteellinen kosteus 90 % (pesuhuone). Tiivistyykö vesihöyry seinärakenteeseen? Perustele laskelmin. Tarkastellaan diffuusiosiiirtymistä. Laske myös mahdollinen tiivistyvä vesimäärä 30 vuorokauden aikana. Etsi tarvittavat materiaaliarvot taulukoista, mineraalivillan normaalin lämmönjohtavuus on 0,041 W/mK.

K.14

Ulkoseinärakenteen kerrokset ovat sisältä ulospäin seuraavat: kipsilevy 13 mm, polyeteenikalvo 0,2 mm, pystykoolaus 200*50 k 600 + mineraalivilla 200 mm, tuulensuojalevy: kipsilevy 9 mm, hyvin tuuletettu ilmarako 30 mm, puuverhous. Ulkoilman lämpötila on +15 °C ja suhteellinen kosteus 90 %, sisäilman lämpötila on +23 °C ja suhteellinen kosteus 90 % (pesuhuone). Tiivistyykö vesihöyry seinärakenteeseen? Perustele laskelmin. Tarkastellaan diffuusiosiiirtymistä. Etsi tarvittavat materiaaliarvot taulukoista, mineraalivillan lämmönjohtavuus on 0,041 W/mK.

K.15

Tiivistyykö vesihöyry alapohjaan? Perustele laskelmin. Sisällä RH=30 % ja lämpötila 20 °C, maan huokosilmassa RH=95 % ja lämpötila maassa olevan kaukolämpöputken takia +40 °C. Alapohjassa on ylinnä 80 mm paksuinen betonilaatta, jonka alla on 100 mm solupolystyreeni. Laskelmissa ei oteta huomioon pintavastuksia. Solupolystyreenin lämmönjohtavuus 0,041 W/mK. Etsi muut tarvittavat arvot taulukoista.

K.16

Tiivistyykö vesihöyry alapohjaan? Perustele laskelmin. Sisällä RH=70 % ja lämpötila 23 °C, laattarakenteen alla salaojakerroksen huokosilmassa RH=90 % ja lämpötila +5 °C. Alapohjassa on ylinnä 50 mm paksuinen betonilaatta, jonka alla on 50 mm solupolystyreeni ja vielä lämmöneristeen alla 100 mm paksuinen betonilaatta. Laskelmissa ei oteta huomioon pintavastuksia. Solupolystyreenin lämmönjohtavuus 0,041 W/mK. Etsi muut tarvittavat arvot taulukoista.

K.17

Tarkastellaan sahatavaravarastoa, jonka yläpohja on tehty kevytbetonielementeistä paksuudeltaan 400 mm. Elementtien päällä on 100 mm paksuinen pehmeä mineraalivilla. Hallin pinta-ala on 1200 m^2 ja korkeus 6 metriä, ilmanvaihtoluku $n=1,2 \text{ 1/h}$. Ulkona lämpötila on $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteus 70 %, sisällä lämpötila on $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

- a) Aluksi halli on tyhjä, mikä on tällöin hallin sisäilman suhteellinen kosteus?
- b) Halliin tuodaan sahatavaraa yhteensä 200 m^3 , 1 m^3 sahatavaraa tuottaa kosteutta kuivuessaan 800 g/h . Mikä on hallin suhteellinen kosteus 3 tunnin kuluttua alkutilanteesta? Mikä on hallin suhteellinen kosteus jatkuvuustilassa? Puun kosteus painoprosentteina on aluksi 22 % suhteessa kuivapainoon. Puun kuivatiheys on 450 kg/m^3 . Mikä on puun kosteus painoprosentteina 24 tunnin kuluttua alkutilanteesta? Puun kuivumisen tuottama kosteus ympäröivään ilmaan oletetaan vakioksi koko tarkasteluajan.
- c) Miten paljon kosteutta siirtyy (g/h) yläpohjarakenteen läpi yläpohjaan sisäilman suhteellisen kosteuden ollessa 80 %, jos yläpohjan yli vallitsee ylipaine $dp=10 \text{ Pa}$? Ota huomioon sekä diffuusio että konvektio. Ota huomioon konvektiossa myös yläpohjassa olevat vuotavat saumat (yhteensä pituutta 50 metriä) leveydeltään 1 mm ja syvyydeltään 500 mm. Yläpohjan olosuhteiden oletetaan vastaavan ulkoilman olosuhteita. Mineraalivillan ilmanläpäisevyys on $B_0=10^{-10} \text{ m}^2$ ja kevytbetonin ilmanläpäisevyys $B_0=10^{-12} \text{ m}^2$. Ilman viskositeetti on $17 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$. Arvioi muut materiaaliarvot taulukoiden perusteella.

Kirjallisuus ja lähteet

Björkholz, Dick 1997. Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka. Rakennustieto. Helsinki. 150 s.

BY 1021. 2002. Betonirakenteiden kuivumisaikalaskuri. Suomen Betoniyhdistys.

Finvac 2019 a. Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen, Finvac ry. 14 s.

Finvac 2019 b. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa, Finvac ry. 25 s.

Hagentoft, Carl-Eric. 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur. Lund. 422 s.

Hagentoft, Carl-Eric & Sandin Kenneth. 2017. Byggnadsfysik -så fungerar hus. Studentlitteratur. Lund. 279 s.

Ilmatieteenlaitos: Ilmatieteenlaitoksen internet-sivut: www.ilmatieteenlaitos.fi.

Merikallio Tarja: Tiedonanto 1.6.2020

Nevander Lars Erik – Elmarsson Bengt 1994. Fukthandbok, Praktik och teori. Svensk Byggtjänst. Tukholma. 538 s.

Petersson Bengt-Åke 2001. Tillämpad Byggnadsfysik. Studentlitteratur. Lund. 480 s.

RIL 107-2000, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Tummavuoren Kirjapaino Oy. 211 s.

RIL 107-2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 250-2020. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki. 500 s.

Sandin, Kenneth. 2017. Praktisk Byggnadsfysik. Studentlitteratur. Lund. 205 s.

Sandin, Kenneth. 2017. Praktisk Byggnadsfysik. Övningsbok. Studentlitteratur. Lund. 74 s.

Suomalainen homemalli 2019.

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>

Ympäristöministeriö. Ympäristöopas 2016. Helsinki. 238 s.

Ympäristöministeriö 2017. 1009/2017 Ympäristöministeriön asetuksen rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 16 s.

Ympäristöministeriö 2018. Asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Helsinki 8 s.

Ympäristöministeriö 2020. Rakennusten kosteustekninen toimivuus.

Ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Helsinki. 53 s.



VALTIONEUVOSTO
STATSRÅDET

Valtioneuvoston kanslia

Statsrådets kansli

Opetus- ja kulttuuriministeriö

Undervisnings- och kulturministeriet

Sosiaali- ja terveysministeriö

Social- och hälsovårdsministeriet

Ympäristöministeriö

Miljöministeriet

