




HENGITTÄVÄ PUUKUITURAKENNE
Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan





HENGITTÄVÄ PUUKUITURAKENNE



Hengittävä puukuiturakenne
Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan

Teksti:

Erkki Kokko

Taitto:

Mikko Lahikainen

Copyright:

Wood Focus Oy, tekijät

Kustantaja:

Wood Focus Oy

Kirjapaino:

Vammalan Kirjapaino Oy 2002

ISBN 951-97377-7-4



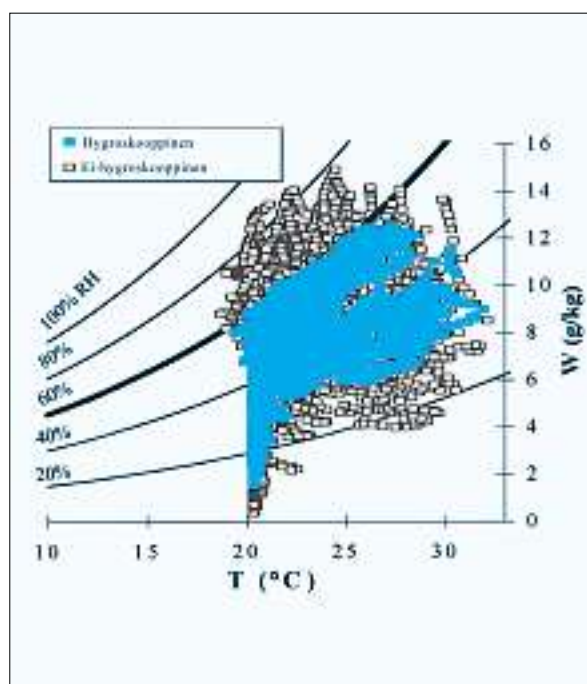
HENGITTÄVÄ PUUKUITURAKENNE
Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan

Erkki Kokko Rakennusneuvonta Kokko Ky

ALKUSANAT

Hengittävästä rakenteista on puhuttu ja kirjoitettu paljon Suomessa. Asialla ovat olleet sekä rakennusalan ammattilaiset että kansalaiset yleisemminkin. Käyty keskustelu osoittaa selvästi, että ihmiset ovat kiinnostuneita sisäilman laadusta sekä asunnoissa että työpaikoilla. Viettäähän ihminen enimmänsä aikansa juuri sisätiloissa. Keskustelulle on valitettavasti ollut ominaista myös se, ettei ole tarkoin määritely mitä itse kukin ”hengittävällä rakenteella” oikein tarkoittaa. Seurauksena on väärinkäsityksiä, puhumista toistensa ohitse ja hedelmätöntä eipäsujuupas kinastelua. Tällainen informaation sekamelska jättää valistuneenkin kansalaisen epä-tietoiseksi siitä, mistä oikein on kysymys.

Muutaman viime vuoden aikana on Suomessa tutkittu määrätietoisesti hengittävien rakenteiden toimintaa ja vaikutuksia huoneilmaan. Tuloksena on tiedon tason nousu ja käsitteiden sekä rakenteiden toimintaperiaatteiden selkiytyminen. Edellytykset julkiseen keskusteluun uudella tasolla ovat olemassa. Käsitteet voidaan nyt määritellä täsmällisesti. Keskustelussa voidaan hengittävän rakenteen argumentit perustella tutkimustuloksien. Myös kansainvälisen tiedeyhteisön ja teollisuuden kiinnostus on herännyt. Tutkimus ja sovellusten kehittäminen tulee jatkumaan.



Kuva 1. Huoneilman kosteus sekä lämpötila tunneittain, kaksi aikuista, makuuhuone, Helsingin sää.

Eräs keskeinen ongelma on tiedottaminen. Kuinka asioista tulisi kertoa, jotta viesti ymmärretään oikein? Hengittävän rakenteen fysikaalinen toiminta on verraten monimutkaista ja vaikeiden asioiden havainnollinen esittäminen on tunnetusti hankalaa. Tämä kirjanen on eräs yritys ratkaista tiedottamisen ongelma. Kohderyhmänä ovat rakentamisen ammattilaisten lisäksi kaikki rakentamista tai rakennuttamista suunnittelevat. Perusasiat pyritään esittämään yleistajuisesti tinkimättä kuitenkaan fysikaalisesta täsmällisyydestä. Aiheen laajuudesta johtuen rajataan tarkastelu Suomessa tavanomaisiin levyverhottuihin puurunkorakenteisiin, joissa sovelletaan hengittävän rakenteen toimintaperiaatteet mahdollistavia rakennusaineita ja rakenneratkaisuja.

Heinäkuussa 2002

Erkki Kokko

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	6
2 KOSTEUSFYSIKAN KÄSITTEITÄ	7
3 HENGITTÄVÄN RAKENTEEN KÄSITE JA TOIMINTAPERIAATE	9
4 KOSTEUDEN VAIKUTUKSET HUONEILMAN LAATUUN	11
5 YHTEENVETO HENGITTÄVÄN RAKENTEEN TUTKIMUSTULOKSISTA	12
6 HENGITTÄVÄN RAKENTEEN ARGUMENTIT	18
7 HENGITTÄVÄ RAKENNE JA RAKENTAMISMÄÄRÄYKSET OSA C2 KOSTEUS	19
8 HENGITTÄVÄN RAKENTEEN SUUNNITTELU JA MITOITUS	25
9 AINEKERROSTEN HÖYRYNVASTUKSIA	33
LÄHDELUETTELO	36

1 JOHDANTO

Huoneilman kosteus vaikuttaa sekä suoraan että monin tavoin välillisesti huoneilman laatuun. Sisäilmastoasiantuntijoiden lisäksi ihmiset yleisesti alkavat olla tietoisia siitä, että liian kostea tai liian kuiva huoneilma aiheuttaa ongelmia. Suomen ilmastossa huoneilman kosteus on suurimmillaan kesällä, kun ulkoilma on kosteaa ja vastaavasti kuivimmillaan talvipakkasilla. Tyypillistä on, ettei huoneilman kosteuspitoisuus ole vakaa ja tasainen, vaan muuttuu nopeasti sisätiloissa tapahtuvan kosteuden tuoton vaihdellessa. Ilmanvaihdon toiminnasta, rakenteiden ominaisuuksista ja rakennuksen käytöstä riippuen sisäilman kosteus ja laatu vaihtelee rakennuksittain ja niissä jopa huoneittain. Ikäviä esimerkkejä ovat rakennukset ja tilat, joissa liian korkean suhteellisen kosteuden seurauksena esiintyy epäviihtyisyyttä ja jopa terveydellisiä haittoja.

On olemassa hyvät perusteet sille, että huoneilman lämpötilaa ja kosteutta tulisi voida hallita. Suomessa koneellinen ilmastointi on kuitenkin harvinaisuus asunnoissa eikä yleinen työpaikoillakaan. Pohjoisessa ilmastossa tarvitaan jäähdtyystä niin harvoin, etteivät kosteutta säättävät ilmastointiratkaisut ole tulleet yleiseen käyttöön. Tarve ilman kosteuden hallintaan on kuitenkin olemassa.

Suomalainen rakennus- ja rakennesuunnittelu on perinteisesti ollut rakentamista kylmiin oloihin. Ratkaisut ovat energiatehokkaita, mikä sinänsä on hyvä asia. Rakennusten sisäilmaston suunnittelua hallitsee ilman puhtauden ja riittävän talviaikaisen lämpöviihtyvyyden saavuttaminen. Kesän lämpöolojen ja huoneilman kosteuden hallintaan ei suunnittelussa juurikaan panosteta. Seurauksena on lämpöviihtyvyyden ja sisäilman laadun kannalta ajoittain epätyytyttävästi toimivia ratkaisuja.

Rakennusten sisäilmaston suunnittelussa ja hyvän sisäilman tuottamisessa pitää pyrkiä hyödyntämään rakenneratkaisujen ja rakennusaineiden mahdollistamia passiivisia keinoja. Tällaisia ovat mm. hyvä lämmöneristys, ilmanpitävyys, rakenteiden lämpö-



Kuva 2. Puu tasoittaa huoneilman hetkellisiä kosteusvaihteluita ja tekee siitä näin ollen hyvän materiaalin esim. julkisiin tiloihin.

kapasiteetti ja kosteudenvarauskyky eli kosteuskapasiteetti. Koska passiiviset keinot eivät Suomen ilmastossa yksin riitä hyvän sisäilmaston tuottamiseen, tarvitaan talotekniikan järjestelmiä tukemaan näitä.

Tässä kirjassessa tarkastellaan ”hengittävän rakenteen” käsitettä ja toimintaa viimeisten tutkimustulosten valossa. Rakenteen hengittävyydellä, niin kuin se jäljempänä määritellään, vaikutetaan merkittävästi huoneilman kosteuteen ja jossakin määrin myös huonelämpötilaan. Hengittävyyteen liittyy muitakin myönteisiä piirteitä, joita jäljempänä tarkastellaan. Julkisessa keskustelussa esiintyneiden väärinkäsitysten johdosta täsmennetään myös joitakin seikkoja, jotka eivät kuulu hengittävän rakenteen ominaisuuksiin.

2 KOSTEUSFYSIKAN KÄSITTEITÄ

Hengittävän rakenteen toiminnan ymmärtäminen edellyttää muutaman kosteuteen liittyvän käsitteen tuntemisen. Nämä käsitteet on pyritty seuraavassa määrittelemään havainnollisesti ja yleistajuisesti.

Kosteus on yleisnimitys vedelle, joka voi olla jäätä, nestettä tai höyryä ja fysikaalisesti aineeseen sitoutuneena. (Jäljempänä määriteltävä hygroskooppisesti sitoutunut kosteus on fysikaalisesti sitoutunutta kosteutta.)

Vesihöyry on näkymätöntä kaasumaista kosteutta, jota on kaikkialla ilmassa ja huokoisten aineiden huokosissa. (Useimmat rakennusaineet ovat huokoisia aineita.)

Ilman suhteellinen kosteus tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyrymäärän suhdetta kyllästys-tilassa olevan ilman sisältämään höyrymäärään. Yksikkönä on % R.H. (Ilma voi sisältää lämpötilasta riippuvan enimmäismäärän vesihöyryä, jolloin ilma on kyllästynyt höyryllä. Suhteellinen kosteus on tällöin 100 %. Ilman suhteellinen kosteus kasvaa, kun lämpötila laskee tai ilman höyrypitoisuus kasvaa. Vastaavasti suhteellinen kosteus pienenee lämpötilan noustessa tai ilman höyrysisällön aletessa.)

Ilman absoluuttinen kosteus tarkoittaa ilman vesihöyrypitoisuutta. Yksikkönä on g/m^3 .

Vesihöyryn osapaineella tarkoitetaan vesihöyryn osuutta ilman kokonaispaineesta. Yksikkönä on Pa (Pascal eli N/m^2).

Vesihöyryn diffuusio on höyrymolekyylien itsenäistä ja satunnaista liikkumista ilmassa tai huokoisen aineen huokosissa. (Yhden molekyylin liikesuuntaa on mahdoton ennustaa, mutta suuressa joukossa diffuusio pyrkii tasoittamaan vesihöyrypitoisuuden ja vesihöyryn osapaineen paikallisia eroja. Ts. höyryä siirtyy sinne, missä vesihöyryn osapaine on pienempi. Diffuusiota ei voi aistinvaraisesti havaita.)

Vesihöyryn läpäisevyydellä tarkoitetaan aineen kykyä läpäistä vesihöyryä diffuusiolla. Yksikkönä on $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$. (Mitä suurempi on aineen vesihöyryn läpäisevyys, sitä helpommin vesihöyry voi siirtyä diffuusion välityksellä.)



Kuva 3. Puun pieni lämmönjohtavuus tekee siitä erinomaisen materiaalin kylpylärakenteisiin.

Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan ilman sisältämän vesihöyryn liikkumista ilmavirtauksen (aistinvaraisesti havaittavissa) mukana. (Esim. huoneilman vesihöyryä voi päästä rakenteisiin niiden kylmiin osiin ilmavirtauksen välityksellä. Ilma virtaa aina alenevan kokonaispaineen suuntaan.)

Kosteuden faasimuutos tarkoittaa kosteuden olomuodon muutosta (höyrystyminen / lauhtuminen, sulaminen / jäätyminen). (Esim. vesihöyry tiivistyy rakenteissa niiden kylmiin osiin, jos höyrypitoisuus on paikallisesti kyllästynyt. Suhteellinen kosteus on tällöin 100% ja ylimääräinen höyry tiivistyy vedeksi.)

Kosteuden faasimuutosenergia tarkoittaa sitä energiaa, joka sitoutuu, kun jää sulaa, vesi höyrystyy tai hygroskooppisesti sitoutunut kosteus vapautuu aineesta vesihöyrynä. Vastaavasti sama energiamäärä vapautuu prosessin suunnan ollessa päinvastainen.



Kuva 4. Kokoontumistilojen rakenteiden on kestävä hyvin erilaisia kosteusolosuhteita.

Aineen hygroskooppisuus tarkoittaa aineen kykyä sitoa itseensä ilman vesihöyryä tai luovuttaa hygroskooppisesti sitoutunutta kosteutta höyrynä takaisin ilmaan, silloin kun ilman suhteellinen kosteus muuttuu. (Aineiden hygroskooppisuutta kuvataan tasapainokosteus- eli sorptiokäyrillä. Käyrä ilmoittaa kuinka paljon kosteutta aine voi hygroskooppisesti sitoutuneena tasapainotilassa sisältää eri suhteellisissa kosteuksissa.)

Sorptiokapasiteetilla (kosteuskapasiteetti) tarkoitetaan vesihöyrymäärää, jonka hygroskooppisessa tasapainotilassa oleva ja hygroskooppiseen tasapainotilaan päätyvä rakenne ja siinä olevat aineet kykenevät vastaanottamaan tai luovuttamaan, kun ympäristön suhteellinen kosteus muuttuu tietyn määrän. (Rakenne ja sen aineet ovat alku- ja lopputilanteessa sorptiokäyrien mukaisissa tasapainotiloissa.)

Tehollisella sorptiokapasiteetilla (tehollinen kosteuskapasiteetti) tarkoitetaan sitä vesihöyrymäärää, jonka rakenne ja siinä olevat hygroskooppiset aineet kykenevät vastaanottamaan tai luovuttamaan, kun ympäristön suhteellinen kosteus muuttuu kulloinkin erikseen määriteltävällä tavalla. (Tehollisen sorptiokapasiteetin käsite on tarpeen siksi, etteivät rakenteet ja niissä olevat aineet yleensä ehdi saavuttaa hygroskooppista tasapainokosteutta, kun ympäristön suhteellisessa kosteudessa tapahtuu jo seuraava muutos. Tyypillisesti huoneilman kosteuden muutokset tapahtuvat vuorokausirytmillä (esim. asunnot, toimistot, koulut jne.), mutta myös muita rytmejä esiintyy. Tehollinen sorptiokapasiteetti on siten vain osa tasapainotilan sorptiokapasiteetista ja sitä suurempi, mitä suurempi on aineen hygroskooppinen tasapainokosteus ja vesihöyryn läpäisevyys. Hengittävän rakenteen peruselementti on suuri tehollinen sorptiokapasiteetti, joka vastaa joustavasti huonetilan kosteuskuormitusten nopeisiin muutoksiin.)

3 HENGITTÄVÄN RAKENTEEN KÄSITE JA TOIMINTAPERIAATE

Hengittävällä rakenteella tarkoitetaan rakennetta, johon voi helposti siirtyä ympäristöstä diffuusiolla vesihöyryä ja jossa vesihöyry voi sitoutua hygroskooppiseen aineeseen tai vapautua siitä ja siirtyä helposti takaisin ympäristöön.

Hengittävään rakenteeseen ja sen läpi voi diffuusoitua vesihöyryn lisäksi myös muita kaasuja kuten hiilidioksidia.

Edellä olevan määritelmän mukaan hengittävällä rakenteella on *suuri tehollinen kosteuskapasiteetti*, joka vastaa hyvin sisäilmaan tuotetun kosteuskuorman ajalliseen vaihteluun. Tällä tarkoitetaan yksinkertaisesti sitä, että kosteuskuormituksen aikana huoneilmasta siirtyy vesihöyryä hengittävään rakenteeseen ja sitoutuu siihen turvallisesti hygroskooppisena kosteutena. Kun huoneilman kosteuskuormitus päättyy, kuivuu huoneilma nopeasti ilmanvaihdon ansiosta. Tällöin hengittävään rakenteeseen varastoitunutta kosteutta vapautuu höyrynä ja siirtyy takaisin huoneilmaan. Ilmiön seurauksena on huoneilman suhteellisen kosteuden vaihtelun merkittävä vaimeneminen, jolloin vältetään kosteat ja kuivat ääritilanteet. Jäljempänä käsitellään erityisesti huoneilman korkean suhteellisen kosteuden aiheuttamia haittoja. Esitettyssä määritelmässä ympäristöllä tarkoitetaan sekä sisä- että ulkoilmaa. Hengittäviä rakenteita voivat olla ulkoseinien ja yläpohjan ohella myös väliseinät ja välipohjat. Itse asiassa paras tulos saavutetaan, kun kaikki rakennusosat toimivat yllä esitetyn määritelmän mukaisesti.

Hengittäviä rakenteita on kaksi perustyyppiä. Rakenne voi koostua vesihöyryä diffuusiolla läpäisevistä ainekerroksista, jolloin esim. hygroskooppinen lämmöneriste on vuorovaikutuksessa huoneilmaan ja sen kosteuteen. Toisessa tyypissä tehollinen kosteuskapasiteetti on suoraan rakenteen sisäpinnassa, jolloin ohut pintakerros on vuorovaikutuksessa huoneilman kosteuden kanssa. Tällainen tehokas pintamateriaali on esim. puu ja



Kuva 5. Liikuntatilat ovat toistuvasti alttiina äkillisille ilman kosteuden vaihteluille.

vaneri. Tässä kirjassa tarkastellaan teholliselta kosteuskapasiteetiltaan hyviä rakennusaineiden yhdistelmiä, joissa rakenteen pintaverhoukset ja lämmöneristys ovat hygroskooppisia ja läpäisevät hyvin vesihöyryä. Täten hirsiseinät, puun käyttö sisustukseen, tehollinen kosteuskapasiteetti korjausrakentamisessa jne. jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Ne kukin ovat aiheena oman käsittelynsä arvoisia.

Rakennuksen vaipassa hengittävän rakenteen ilmanpitävyyden tulee olla hyvä kuten minkä tahansa muun rakenteen. Hataruus ei ole hengittävyttä, vaan rakennuksen laadullinen heikkous, josta on useita haitallisia seurauksia, kuten:

- rakennuksen painesuhteiden huono hallittavuus
- ilmanvaihdon hallitsematon toiminta ja vuotoilmanvaihdon lisääntyminen
- paikallinen vetoisuus
- huoneilman vesihöyryn kulku rakenteisiin vuotoilman mukana ja kosteusongelmat sen seurauksena
- energiankulutuksen lisääntyminen
- ääneneristävyyden heikkeneminen.



Kuva 6. Hygroσκοoppinen aine voi olla rakenteissa, sisäpintana tai näiden yhdistelmä.

Mikäli jossakin esitetään ajatus, että hengittävyys tarkoittaa ilman vuotamista hataran vaipparakenteen läpi, jolloin korvausilman tuloa ei tarvitse enempää miettiä, on ajatuksen esittäjä ymmärtänyt asian virheellisesti. Toki tunnetaan sovelluksia, joissa rakennusosa on integroitu ilmanvaihtojärjestelmän osaksi, mutta tässä ei ole kyse hengittävyydestä nyt määritellyllä tavalla vaan ilmanvaihdoista ja lämmön talteenotosta.

Hengittävä rakenne ei korvaa ilmanvaihtoa, mutta lievittää merkittävästi sen puutteista aiheutuvia haittoja. Huoneilman kosteuteen hengittävällä rakenteella on hallitseva merkitys.

Kaasut, kuten hiilidioksidi yms. eivät voi sitoutua rakenteeseen vesihöyryn tavoin, koska ei ole olemassa vesihöyryn hygroskooppista sitoutumista vastaavaa ilmiötä. Huoneilman epäpuhtauksiksi katsottavien kaasujen pitoisuuksien laimeneminen tapahtuu sekä ilmanvaihdon avulla että hengittävän rakenteen läpi diffuusiolla poistuen. Esim. kahden hengen makuuhuoneessa, jonka seinät ja yläpohja

ovat hengittäviä, jää hiilidioksidipitoisuuden yöaikainen huippuarvo noin 25 % pienemmäksi kuin sisäpinnaltaan diffuusiotiiviillä rakenteella silloin, kun ilmanvaihto on määräysten mukainen 0,5 vaihtoa tunnissa, kts. viitteet ^{1,2/}

Tässä on syytä korostaa, että hengittävän rakenteen tärkein ominaisuus – vesihöyryn ja muiden kaasujen pääsy diffuusiolla huoneilmasta rakenteeseen ja takaisin huoneilmaan menetetään, jos rakenteen sisäpinta päällystetään diffuusiotiiviillä ainekerroksella. Toistaiseksi suositellaan maalikalvon tai tapetin höyrynvastuksen enimmäisarvoksi arvoa 3×10^9 (m^2sPa) / kg. Tämä arvo on 5–10 kertainen verrattuna tavanomaisiin tuulensuojatuotteisiin.

Rakennesuunnittelun yleisperiaatteena tulee kuitenkin olla se, että sisäpuolisen pinnoitteen höyrynvastus on mahdollisimman pieni ja että rakenteen kosteustekninen toimivuus varmennetaan muilla rakennekerroksilla – ei sisäpuolisella pinnoitteella.

4 KOSTEUDEN VAIKUTUKSET HUONEILMAN LAATUUN

Koska hengittävän rakenteen keskeinen tehtävä on vaikuttaa myönteisesti huoneilman kosteuteen, on syytä tarkastella tutkimus- ja muita julkaisuja huoneilman kosteuden vaikutusten ymmärtämiseksi. Tutkimus on osoittanut, että huoneilman kosteus vaikuttaa mm.:

- lämpö- ja oleskeluviihtyvyyteen
- ilman laadun aistinvaraiseen havaitsemiseen (hajut, tunkkaisuus)
- oleskelijoiden terveyteen
- materiaalien kestävyys
- energian kulutukseen.

Lämpö- ja oleskeluviihtyvyys

Lämpöviihtyvyydellä tarkoitetaan ihmisen lämpöaistimusten aiheuttamaa miellyttävyyden tai epämiellyttävyyden tunnetta. Koska ihmiset ovat yksilöitä ja aistimuksiltaan erilaisia, on kehitetty menetelmiä arvioida lämpöviihtyvyyttä suuren ihmisjoukon aistimusten perusteella ^{/8, 13, 14/}. Menetelmistä ja viihtyvyyden perusteista sekä ilman kosteuden vaikutuksista niihin voidaan todeta seuraavaa:

- viihtyvyyden mittarina on tyytymättömien osuus kaikista vastaajista (PD eli Percent dissatisfied, %).
- tyytymättömyyttä aiheuttaa liiallinen kylmyyden ja lämpimyyden tunne.
- huoneilman lämpötilan ollessa yli 22 °C aiheuttaa suhteellisen kosteuden nousu tyytymättömyyden lisääntymisen.
- 50 % koehenkilöistä aisti hengitysilman lämpöviihtyvyyden tunteen epätydyttäväksi, kun ilman lämpötila oli 24 °C ja suhteellinen kosteus 80 %.
- suositellaan, että hengitysilman lämpöviihtyvyyteen tyytymättömien määrä saisi olla enintään 15 %. Tämä toteutuu, kun lämpötila on 24 °C ja ilman suhteellinen kosteus 40 % R.H. tai lämpötilan ollessa 22 °C ja suhteellisen kosteuden 55 % R.H.

Aistinvaraisesti havaittava ilman laatu (puhtaus, tunkkaisuus)

Ilman laadun aistinvaraisella havaitsemisella tarkoitetaan ihmisen tuntemusta siitä, kuinka raikas (puhdas) tai tunkkainen (epäpuhdas) ilma on. Tässäkin testissä ihmiset ovat erilaisia yksilöinä, joten kriteerit perustuvat suureen joukkoon ihmisiä ja heidän tuntemuksiinsa ^{/8, 15, 16/}. Menetelmistä, kriteereistä ja kosteuden vaikutuksista voidaan lyhyesti todeta seuraavaa:

- ilman laadun mittarina käytetään hyväksyttävyyden asteikkoa, jossa 1 = selvästi hyväksyttävä, 0 = hyväksyttävän ja epätydyttävän raja ja -1 = selvästi epätydyttävä.
- suhteellisen kosteuden nousu aiheuttaa huoneilämpötiloissa 20...24 °C siirtymää epätydyttävään suuntaan riippumatta ilman todellisesta puhtausasteesta.
- hyväksyttävyydellä arvioituna ilman lämpötilan muutos 1 °C vastaa karkeasti vaikutukseltaan suhteellisen kosteuden muutosta 5 % R.H. Hyväksyttävyys alenee kun lämpötila tai suhteellinen kosteus nousevat.

Ilman kosteuden muita vaikutuksia

Huoneilman kosteudella on erilaisia välillisiä vaikutuksia, joista mainittakoon seuraavat: ^{/8, 10/}

- bakteerit ja virukset viihtyvät kuivassa ja kosteassa ilmanalassa.
- homeet ja sienet viihtyvät kosteassa.
- pölypunkit viihtyvät kosteassa.
- hengitystieinfektiot yleistyvät kuivassa.
- allergiset reaktiot ja astma yleistyvät sekä kuivassa että kosteassa.
- rakennusaineiden emissiot lisääntyvät kosteassa.

Mainitut tekijät liittyvät sekä oleskelijoiden terveyteen että rakenteiden toimivuuteen. Huoneilman suhteellisen kosteuden optimaalinen alue on 28 % R.H. - 55 % R.H. ^{/8/}. Mitä kauempana ollaan optimaal alueesta, sitä haitallisemmaksi tilanne muodostuu.

Kostean ilman energiasisältö on suurempi kuin kuivan. Kosteus lisää ilmastoinnin energiankulutusta, kun huoneilmaa jäähdytetään koneellisesti ^{/8/}.

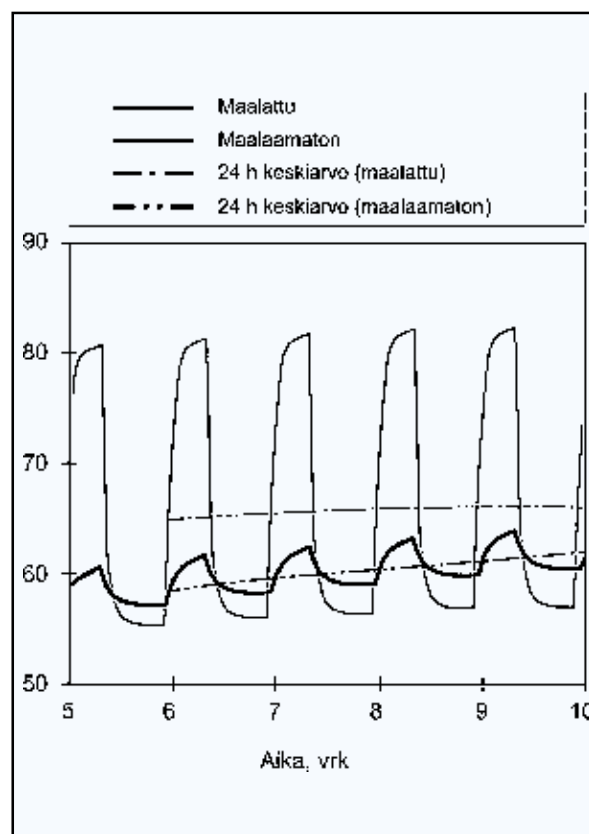
5 YHTEENVETO HENGITTÄVÄN RAKENTEEN TUTKIMUSTULOKSISTA

Hengittävän rakenteen toimintaa ja vaikutuksia huoneilman kosteuteen on tutkittu laskennallisesti ja kokeellisesti sekä laboratoriossa että todellisessa rakennuksessa ^{/1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8/}. Tulokset ovat toisiaan tukevia ja saman suuntaisia menetelmästä riippumatta. Syventävä tutkimus ja tuotekehitys on nyt käynnissä ja tuottaa tulevaisuudessa myös uusia hengittävän rakenteen sovelluksia. Tässä kappaleessa esitetään yhteenveto viimeisistä tutkimustuloksista.

Kuvissa 7 ja 8 esitetään laskennallisesti saatuja tuloksia, jotka havainnollistavat suuren tehollisen kosteuskapasiteetin merkityksen huoneilman kosteusvaihtelun vaimentajana (Kuva 7) ja rakenteisiin tapahtuvan diffuusion merkityksen ilman hiilidioksidipitoisuuden kannalta (Kuva 8). Tarkastelun kohteena on tavanomaisen kokoinen makuuhuone, jonka ilmanvaihto on määräysten mukainen 0,5 vaihtoa tunnissa eli puolet huoneen tilavuudesta tunnissa. Huoneessa nukkuu kaksi aikuista klo 23 – 07 välisen ajan. Heidän oletetaan tuottavan yhdessä vesihöyryä 60 g/h ja hiilidioksidia 430 ml/min. Ulkolämpötila +20 °C ja ulkoilman suhteellinen kosteus 55 % sekä hiilidioksidipitoisuus 350 ppm ovat muuttumattomia. Tämä ei vastaa todellista ulkoilmastoa, mutta lisää laskentatulosten havainnollisuutta.

Makuuhuoneen kaikki seinät ja yläpohja on rakennettu materiaaleista, jotka läpäisevät kaasuja diffuusiolla ja joilla on suuri tehollinen kosteuskapasiteetti. Rakenteet ovat sisäpinnasta lukien kerroksittain: huokoinen puukuitulevy 12 mm, rakennuspaperi, puukuitueristys 150 mm, huokoinen puukuitulevy (yläpohjassa tuulettuva ilmaväli). Lattian yläpinta on diffuusiotiivis.

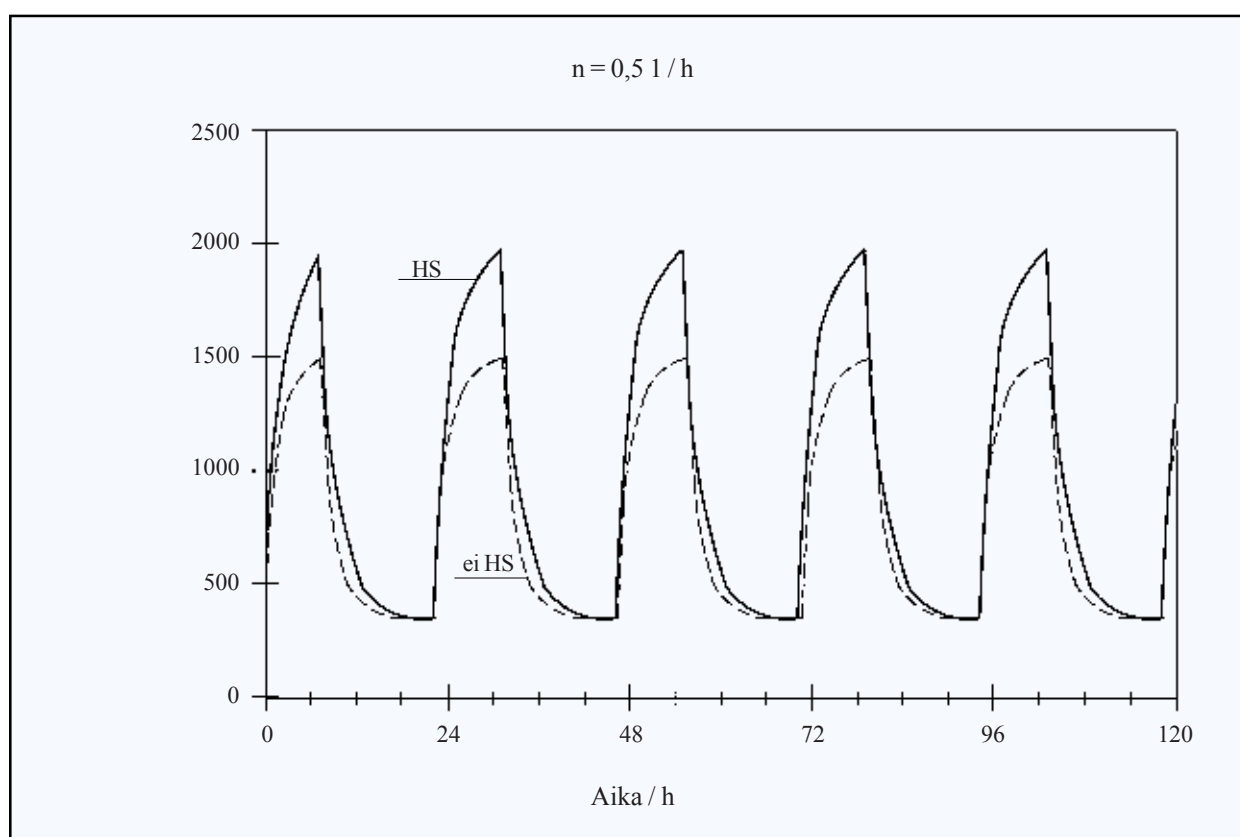
Laskentatapauksia on kaksi. Edellä kuvattu rakenne toteutuu sellaisenaan ja toisessa tapauksessa rakenne on maalattu sisäpinnaltaan diffuusiotiiviiksi. Kuvasta 1 nähdään, että suuri tehollinen kosteuskapasiteetti vaimentaa olennaisesti huoneilman suh-



Kuva 7. Sisäilman suhteellinen kosteus ajan funktiona maalaamattomassa ja sisäpinnaltaan diffuusiotiiviiksi maalatussa makuuhuoneessa. Henkilökuormitus 2 henkilöä klo 23-07 välisenä aikana ^{/1,2/}.

teellisen kosteuden vaihtelua. Korkea suhteellisen kosteuden yöaikainen huippuarvo madaltuu merkittävästi ja päiväaikainen minimiarvo nousee jonkin verran. Selitys on yksinkertainen. Yöllä kuormitusvaiheessa huoneilman suhteellisen kosteuden noustessa merkittävä osa tuotetusta vesihöyrystä sitoutuu rakenteisiin hygroskooppisesti ja kuormituksen loppuessa sitoutunut kosteus vapautuu höyrynä ja osa siitä palaa takaisin huoneilmaan. Kuvan merkitys on siinä, että se ilmaisee hyvin teholliseen kosteuskapasiteettiin liittyvän potentiaalin. Kuvassa 8 on makuuhuoneen seinä- ja yläpohjarakennetta muutettu edelläkuvatusta siten, että diffuusiotiiviin maalikalvon sijaan rakenteessa on rakennuspaperi korvattu PE-muovikalvolla.

Kuvasta 8 voidaan havaita, että yöaikainen hiilidioksidipitoisuuden nousu on läpäisevillä rakenteilla n. 70 % läpäisemättömällä rakenteella tapahtuneesta noususta ja että läpäisevyyden takia enimmäisarvo putoaa arvosta 2000 ppm tasolle 1500 ppm.



Kuva 8. Hiilidioksidipitoisuuden kehittyminen 12 m²:n makuuhuoneessa, kun ilmanvaihto on n=0,5 1/h. HS = höyrynsulullinen rakenne (polyeteenikalvo), Ei HS = rakenne, jossa höyrynsulku on korvattu rakennuspaperilla ^{1,2}.

Lähteissä ^{3,5} esitetään tuloksia täysimittakaavaisessa rakennuksessa tehdyistä kokeista. Koe-tulokset vahvistavat em. laskennalliset tulokset. Mittauksia tehtiin huoneessa, jossa kolme seinää ja yläpohja olivat diffuusion läpäiseviä. Rakenteet olivat sisäpinnasta lukien: diffuusiota läpäisevä maali, kipsilevy, ilmansulkupaperi, puukuitueriste, huokoinen puukuitulevy, tuuletusväli. Neljäs seinä oli maalatusta tiilestä tehty väliseinä. Huoneessa oli keinotekoinen yöaikainen kosteuskuormitus ja säädettävä koneellinen poistoilmanvaihto. Huoneessa tehtiin myös kaasujen kuten hiilidioksidipitoisuuden laimenemisen mittauksia. Kokeita tehtiin, kun rakenteet olivat diffuusiota läpäiseviä tai verhottu sisäpinnaltaan muovikalvolla. Lähteen ³ kohdassa 7.1 ”Johtopäätökset” todetaan mm. seuraavaa :
Tämän julkaisun tulokset osoittavat, että aineensiiirtoa huoneilman ja huokoisen rakennusvaipan välillä voidaan soveltaa sisäilman ja sen laadun parantamiseen. Jälki-aine-kaasujen siirtyminen on merkittävää vain pienillä ilmanvaihtomäärillä, mutta kosteuden

siirtyminen oli merkityksellistä kaikilla kokeissa käytetyillä ilmanvaihtomäärillä (aina arvoon 1 1/h asti).

Ilmanvaihdon suunnitteluarvolla 0,5 1/h hiilidioksidin diffuusio lisäsi tehollista ilmanvaihtuvuutta määrällä n. 10 %. Toisaalta kosteuden siirtyminen sisäilman ja rakenteen välillä alentaa kesäaikaista sisäilman suhteellisen kosteuden maksimiarvoa 20 % R.H. ja nostaa huoneilman suhteellisen kosteuden minimiarvoa talvella 10 % R.H., kun ilmanvaihto on lähellä suunnitteluarvoa (0,5 1/h).

Lähteessä^{/8/} raportoidaan laajan laskennallisen tutkimuksen tulokset. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää tehollisen kosteuskapasiteetin hyödyntämisen mahdollisuuksia Suomen, Keski- ja Etelä-Euroopan ilmastoissa. Laskentatapauksena oli jäljempänä määritelty makuuhuone kahden aikuisen kuormittamana. Tässä esitetään yhteenveto kaikkia ilmastoja koskevista tuloksista.

Analysoitu makuuhuone

- makuuhuone, jota ympäröivissä huoneissa on sama lämpötila ja höyrynpaine kuin ko. makuuhuoneessa
- koko 4 m x 3 m x 2,7 m, ainoa ulkoseinä suuntautuu länteen pituudeltaan 3 m
- ulko- ja väliseinien rakenne on sama
- katto osallistuu kosteudensiirtoon mutta ei lattia
- ulkoseinällä on 1,2 m x 1,5 m kokoinen 3-lasinen ikkuna
- rakennus sijaitsee avoimessa maastossa ja ulkopinnan absorptiokerroin on auringon säteilyn suhteen 0,8
- ilmanvaihto on yleensä 0,5 vaihtoa tunnissa.
- ei ole koneellista jäähdytystä
- sisälämpötila on lämmityskaudella vähintään 20 °C
- lämmityskausi on Suomessa 1.9 – 31.5 ja 1.10 – 30.4 Keski-Euroopassa. Välimerellä ei ole lämmityskautta
- sisäinen kuormitus on 2 aikuista 9 h päivässä ja valaistusteho 100 W ensimmäisen tunnin aikana.

Keskeiset rakennevaihtoehdot

Rakenne 1.

- sisäpinta hyvin vesihöyryä läpäisevä ($5 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$)
- sisäverhouslevy hygroskooppinen ja vesihöyryä läpäisevä (huokoinen puukuitulevy)
- ilmansulku hyvin vesihöyryä diffuusiolla läpäisevä rakennuspaperi
- lämmöneriste hygroskooppinen ja vesihöyryä läpäisevä puukuitueriste.

Rakenne 2.

- kuten rakenne 1, mutta sisäpinta vesihöyryn diffuusion suhteen tiivis ($5 \times 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$)

Rakenne 3.

- kuten rakenne 1, mutta lämmöneristeenä ei hygroskooppinen mineraalivilla

Rakenne 4.

- kuten rakenne 1, mutta ilmansulku diffuusiotiivis

Rakenne 5.

- kuten rakenne 1, mutta sisäverhouslevy ei-hygroskooppinen

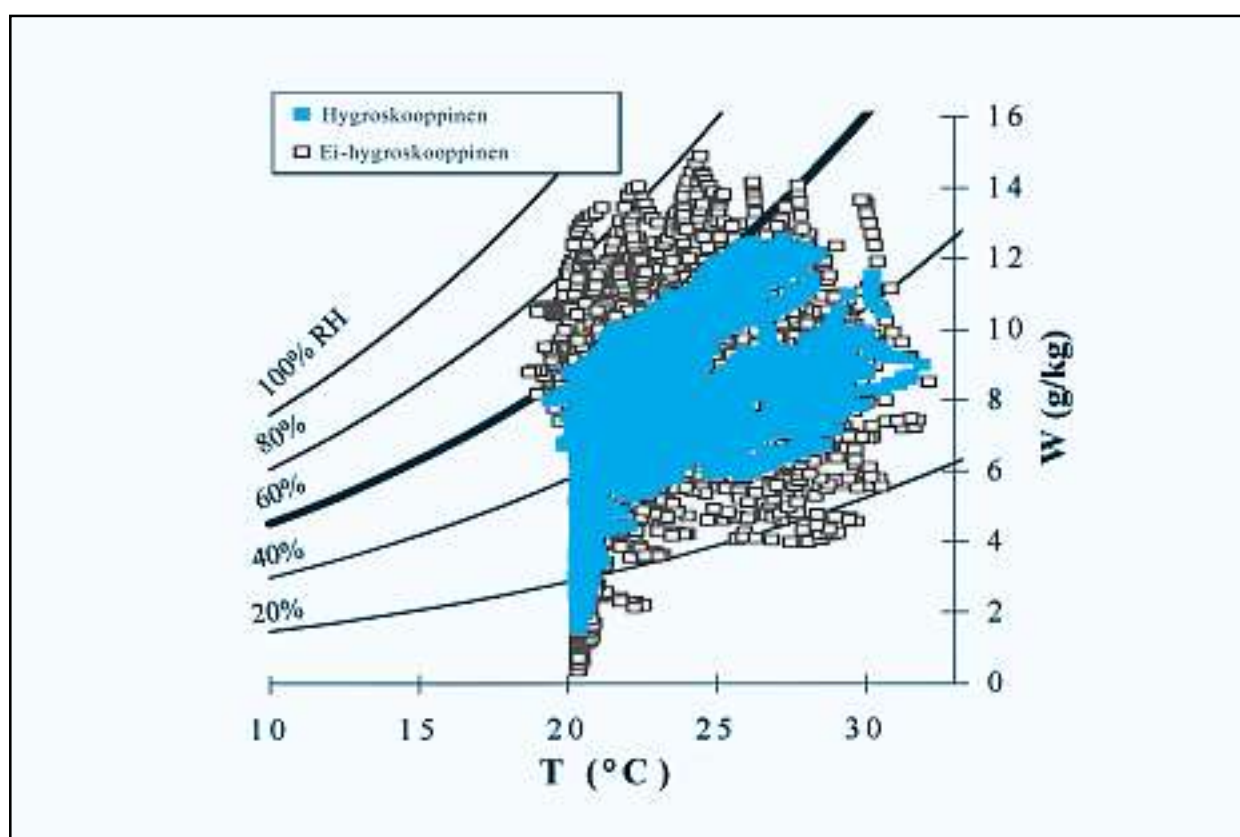
Rakenne 6.

- kuten rakenne 1, mutta sisäverhouslevy hygroskooppinen ja vesihöyryä diffuusiolla huonosti läpäisevä puupaneeli

Yhteenveto laskentatuloksista

Kuvassa 9 esitetään yhden vuoden ajalta makuuhuoneen ilman tunneittain laskettu suhteellinen kosteus, höyrypitoisuus ja lämpötila Helsingin ilmastossa, kun rakenteina ovat sisäpinnaltaan diffuusiivisesti läpäisevä (rakenne 1) ja läpäisemätön rakenne (rakenne 2).

Kuvan 9 viesti on selkeä. Kun rakenteiden tehollinen sorptiokapasiteetti on käytössä (sininen alue), pysyy suhteellinen kosteus alueella 30 % R.H. – 60 % R.H. kevään, kesän ja syksyn aikana. Ainoastaan keskitalvella ilma on ajoittain kuivempaa. Vastaavasti, kun tehollinen sorptiokapasiteetti ei ole käytössä (punainen alue), ylittää huoneilman suhteellinen kosteus varsin usein arvon 80 % R.H. lämmityskauden ulkopuolella. Myös kaikkein pienimmät suhteellisen kosteuden arvot sekä lämmityskaudella että sen ulkopuolella ovat punaisella alueella. Lähteen^{/8/} mukaan suhteellisen kosteuden optimialue on 28 % R.H. – 55 % R.H., joten kuvan 9 mukaan on aivan ilmeistä, että rakenteiden suuri tehollinen kosteuskapasiteetti lisää aikaa, jolloin ollaan suhteellisen kosteuden optimialueella.



Kuva 9. Makuuhuoneen ilman suhteellinen kosteus, höyrysisältö ja lämpötila tunneittain yhden vuoden ajalta Helsingin ilmastossa. Yöaikaisena miehityksenä on kaksi aikuista. Ilmanvaihto on jatkuvasti 0,5 l/h. Seinien ja yläpohjan sisäpinnat ovat diffuusiotiiviitä (punainen alue, rakenne 2) tai diffuusiolla vesihöyryä läpäiseviä (sininen alue, rakenne 1).

Yhteenvetona esittäen vesihöyryä diffuusiolla läpäisevän ja suuren tehollisen kosteuskapasiteetin rakenteen tärkeimmät edut verrattuna tiivispintaiseen rakenteeseen (rakenteet 1 ja 2) ovat seuraavat:

Suhteellinen kosteus

- enimmillään 35 % R.H. matalampi huoneilman suhteellisen kosteuden enimmäisarvo kesällä, kun miehitys päättyy (tyypillistä on, että tiivispintaisella rakenteella huoneilman suhteellinen kosteus alkaa nopean nousun miehityksen alkaessa. Korkeimmat suhteellisen kosteuden arvot saavutetaan juuri miehityksen aikana, mikä on jo lämpöviihtyvyyden ja ilman raikkauten tunteen kannalta kielteistä.)
- enimmillään 15 % R.H. korkeampi suhteellinen kosteus talvella miehityksen alkuehtäällä
- keskimäärin matalampi suhteellinen kosteus miehityksen päättyessä (kesällä 20 % R.H. ja talvella 10 % R.H.)
- kaikki aika huomioonottaen keskimäärin 7 % R.H. pienempi suhteellinen kosteus kesällä.

Huonelämpötila

- enintään 2 °C asti viileämpi sisälämpötila ulkolämpötilan noustessa nopeasti kesällä.

Lämpöviihtyvyys

- ilmastosta riippuen enimmillään 11 %–15 %-yksikköä vähemmän hengitysilman lämpömiellyttävyyteen tyytymättömiä (PD) (Tarkoittaa sitä, että sadasta ihmisestä 11–15 henkilöä enemmän tuntee lämpöviihtyvyyden tyydyttäväksi.)
- 2–3 %-yksikköä vähemmän tyytymättömiä (PD) otettaessa huomioon kukaussittainen keskimääräinen tilanne.

Huoneilman laadun aistinvarainen hyväksyttävyyden

- sisäilman laadun aistinvaraisen hyväksyttävyyden lisäys enimmillään 0,2 korkeampi (asteikko -1...+1)
- korkeampi sisäilman laadun keskimääräinen vuosittainen hyväksyttävyyden (0,06).

Huoneilman energiasisältö (enthalpia)

- miehityksen aikana keskimäärin 2 kJ/kg matalampi sisäilman energiasisältö

Epättydyttävän ajan pituus

- 7–11 viikkoa vähemmän vuosittaista aikaa, jolloin sisäilman tila on epättydyttävä (suhteellinen kosteus 60 % tai korkeampi)
- vähemmän vuosittaista aikaa, jolloin hengitysilman lämpövihtyvyyden hylättävyys (PD) on suurempi kuin 15 % ja ilman laadun hyväksyttävyyden negatiivinen (1–3 viikkoa).

Yhteenvedona läpäisevän rakenteen haitoista verrattuna tiivispintaiseen (rakenteet 1 ja 2) voidaan todeta seuraavaa:

- enimmillään 20 % R.H. korkeampi suhteellinen kosteus miehityksen alussa (Tyypillisesti näin käy silloin, kun ulkoilman kosteuspitoisuus on nopeasti laskenut. Tällöin myös huoneilma pyrkii ilmanvaihdosta johtuen kuivumaan, joten rakenteisiin sitoutunutta kosteutta vapautuu huoneilmaan ja estää sen nopean kuivumisen ulkoilman mukana. Haitallista tämä on silloin, kun huoneilman suhteellinen kosteus on korkea. Kuvan 9 mukaan Helsingin ja Suomen ilmastossa haitallinen tilanne on harvinainen.)
- talvella keskimäärin 5 % R.H. matalampi huoneilman suhteellinen kosteus
- hetkittäin jopa 2 °C korkeampi huoneilman lämpötila silloin, kun huoneilman kosteus absorboituu rakenteisiin (Ilmiö johtuu vesihöyryn hygroskooppisen sitoutumisen yhteydessä vapautuvasta faasimuutosenergiasta, joka pitää rakenteet lämpimämpänä. Ilmiö voi olla haitallinen hellekaudena, mutta ei muuna aikana.)
- tiivispintaisella rakenteella on ilmastosta riippuen hetkittäin 6 %–14 %-yksikköä matalampi hengitysilman lämpövihtyvyyden hylättävyys (PD) ja ilman laadun aistivarainen hyväksyttävyyden verrattuna läpäisevään rakenteeseen (Tämä on tyypillistä silloin, kun ollaan miehityksen alkuvaiheessa ja ulkoilman kosteuspitoisuus nopeasti laskee. Tämän

ajoittaisen haitan merkitys on Helsingissä olennaisesti pienempi kuin Keski- ja Etelä-Euroopassa.)

- enemmän kuivan huoneilman aikaa talvella (0–4 viikkoa alle 25 % R.H.).

Todettakoon lopuksi, että rakenteiden hengittävyydellä saavutettavat edut (huoneilman liian korkean suhteellisen kosteuden ja sen seurausten välttäminen) ovat merkittäviä. Suomen ilmastossa edut korostuvat lämpimänä vuodenaikana. Huoneilman keskimääräinen suhteellinen kosteus on hengittävällä rakenteella matalampi, mutta kaikkein kuivimmat aikajaksot saadaan tiivispintaisella rakenteella myös talvella.

Lämmöneristyksen vaikutus

Laskennallisessa analyysissä oli vertailukohtana rakenne 1, jossa oli sekä hygroskooppinen lämmöneriste että hygroskooppinen sisäverhouslevy.

- kun sisäverhouslevy pidettiin hygroskooppisena ja eriste muutettiin ei-hygroskooppiseksi, oli vuodessa 2–4 viikkoa enemmän aikaa, jolloin huoneilman kosteus oli yli 60 % R.H.
- kun sisäverhouslevy muutettiin ei-hygroskooppiseksi ja eriste pidettiin hygroskooppisena, oli vuodessa 2–4 viikkoa enemmän aikaa, jolloin huoneilman kosteus oli yli 60 % R.H.
- esimerkiksi Saksassa (Holzkirchen) on em. tapauksissa vuosittain 38–40 yötä, jolloin huoneilman suhteellinen kosteus on yli 60 % R.H. Kun sekä eriste että sisäverhouslevy ovat hygroskooppisia, on vastaavasti öiden lukumäärä vain 15.

Sisäverhouslevyn vaikutus

Vertailukohtana on huokoinen puukuitulevy sisäverhouslevynä ja hygroskooppinen lämmöneriste (rakenne 1).

- puupaneelin (pinnoittamaton) ja huokoisen puukuitulevyn välillä ei ole merkittävää eroa. (Puupaneelin pintakerros antaa rakenteelle suuren tehollisen kosteuskapasiteetin.)
- kipsilevy antaa 1–2 viikkoa enemmän aikaa, jolloin suhteellinen kosteus on yli 60 % R.H.

Aktiivisen pinta-alan vaikutus

Aktiivisella pinta-alalla tarkoitetaan sitä pinta-alaa, joka osallistuu huoneilman ja rakenteiden väliseen kosteudensiirtoon. Vertailukohtana on tapaus, jossa kaikki neljä seinää ja kattopinta ovat aktiivisia.

- aktiivisen pinta-alan vaikutus huoneilman absoluuttiseen kosteuteen on verrannollinen aktiivisen pinta-alan neliöjuureen.
- aktiivisella pinta-alalla on suuri vaikutus aikaan, jolloin suhteellinen kosteus on yli 60 % R.H. tai alle 25 % R.H.
- aktiivisen alueen suurentaminen vähentää aikaa, jolloin suhteellinen kosteus miehityksen aikana on yli 60 % R.H., mutta lisää aikaa, jolloin suhteellinen kosteus on alle 25 % R.H.

Sisäpinnan höyrynvastuksen vaikutus

- vertailutapauksena on hyvin vesihöyryä läpäisevä pinnoite.
- monilla käytännön pinnoitteilla höyrynvastus on 30–2000 kertainen vertailutapaukseen nähden.
- höyrynvastuksen lisääminen vertailutapaukseen nähden vaikuttaa olennaisesti heikentäen mahdollisuutta hyödyntää sorptiokapasiteettia.

Ilmanvaihdon vaikutus

- 0,5 vaihtoa tunnissa ilmanvaihto siirtää yöaikaisesta kosteudentuotosta ulos 75 % tiivispintaisessa huoneessa ja 50 % läpäisevällä rakenteella (rakenteet 2 ja 1)
- ilmanvaihdon ollessa 0,1 vaihtoa tunnissa hengittävä rakenne antaa suunnilleen saman hetkittäisen R.H. maksimin kuin ilmanvaihto 0,5 1/h tiivispintaisessa tapauksessa.
- ilmanvaihto 0,5 vaihtoa tunnissa antaa hengittävällä rakenteella suunnilleen saman hetkittäisen hengitysilman lämpöviiltyvyyden hylättävyyden enimmäisarvon kuin ilmanvaihto 1 1/h tiivispintaisilla rakenteilla.
- ilmanvaihto 0,1 1/h antaa hengittävällä rakenteella saman ilman kosteuslisäyksen vuosikeskiarvon kuin ilmanvaihto 0,9 1/h tiivispintaisella rakenteella.

Kosteuden tuoton vaikutus

- kosteuden tuoton vaikutus sisäilmaan kosteuspitoisuuteen on merkittävä
- Hetkittäinen sisäilman suhteellisen kosteuden maksimiarvo on sama maaliskuussa kosteuden tuoton ollessa hengittävällä rakenteella 180 g/h ja tiivispintaisella 60 g/h. Hengittävä rakenne sietää kolminkertaisen kosteuden tuoton.
- hengitysilman lämpöviiltyvyyden hylättävyys (PD) ja ilman aistinvarainen hyväksyttävyyys on sama, kun kosteuden tuotto hengittävällä rakenteella on 180 g/h ja tiivispintaisella 90 g/h.
- aika vuodessa, jolloin olosuhteet ovat huonot (R.H. yli 60 % ja PD yli 15 %) on sama, kun hengittävällä rakenteella kosteuden tuotto on 90 g/h ja tiivispintaisella 60 g/h.
- miehityksen aikainen huoneilman kosteuden nousu on suunnilleen yhtä nopea, kun hengittävällä rakenteella kosteuden tuotto on 180 g/h ja tiivispintaisella 60 g/h.

6 HENGITTÄVÄN RAKENTEEN ARGUMENTIT

Tässä kohdassa esitetään yhteenvetona lähes luettelonomaisesti hengittävän rakenteen edut verrattuna sisäpuolelta tiivispintaiseen ja kaasuja diffuusiolla läpäisemättömään rakenteeseen. Kaikki argumentit on perusteltu edellä tässä kirjassa ja lähdeluettelossa mainituissa tutkimusjulkaisuissa.

Vaikutukset huoneilman kosteuteen

- vaimentaa olennaisesti huoneilman kosteuden vaihtelua, kun kosteuskuormitus huoneessa vaihtelee.
- alentaa miehityksen ja kosteuskuormituksen aikana olennaisesti huoneilman suhteellisen kosteuden enimmäisarvoa verrattuna tiivispintaiseen rakenteeseen. Tällä on merkitystä erityisesti lämpimänä vuodenaikana, kun ilmanvaihdon tuloilman kosteuspitoisuus on korkea.
- nostaa sekä kesällä että myös talvella miehittämättömänä ja kosteuskuormittamattomana aikana jonkin verran huoneilman suhteellista kosteutta verrattuna tiivispintaiseen rakenteeseen.
- alentaa huoneilman keskimääräistä suhteellista kosteutta, millä on positiivista merkitystä kesällä.

Huoneilman kosteudesta seuraavat välilliset vaikutukset

- parantaa termistä oleskeluviihtyisyyttä ja vähentää tyytymättömien määrää, kun perusteena on termisen viihtyvyyden aistinvarainen havaitseminen.
- parantaa ilman laadun (tunkkaisuus, puhtaus) hyväksyttävyyttä, kun laatu havaitaan aistinvaraisesti.

- antaa mahdollisuuden vähentää ilmastonin koneellisen jäädytyksen energiankulutusta ja kustannuksia kesäaikana, sillä ilman energiasisältö on pienemmästä höyrypitoisuudesta johtuen matalampi kuin tiivispintaisella rakenteella.
- lyhentää merkittävästi aikaa (7–11 viikkoa vuodessa), jolloin rakennuksen huoneilman kosteutta voidaan pitää haitallisen korkeana ($\geq 60\%$ R.H.). Tällöin korkean suhteellisen kosteuden välilliset haitat (virukset, bakteerit, homeet, sienet, pölypunkit, rakennuaineiden emissiot) voivat estyä tai vähetä.

Muita vaikutuksia

- alentaa huoneilman lämpötilaa tilanteessa, jossa ulkolämpötila nousee voimakkaasti (sitoo faasimuutosenergiaa, kun hygroskoopipinen kosteus vapautuu höyrynä). Tällä on merkitystä lyhytaikaisten helteiden aikana sekä tilanteissa, joissa rakenteiden lämpötila pyrkii nousemaan auringon säteilyn vaikutuksesta.
- läpäisee hiilidioksidia ja muita huoneen sisäisiä kaasumaisia epäpuhtauksia ja alentaa näiden huippuarvoja kuormitustilanteissa.
- lievittää erityisesti puutteellisen ilmanvaihdon haitallisia seuraamuksia.

7 HENGITTÄVÄ RAKENNE JA RAKENTAMISMÄÄRÄYKSET OSA C2 KOSTEUS

Euroopan Unionin Rakennustuotedirektiiviin (89/106/ETY) ja Suomen Rakentamismääräyskoelman Osaan C2 ”Kosteus, Määräykset ja ohjeet 1998 sisältyy seuraava olennainen vaatimus:

Olennainen vaatimus 1.2.1

Rakennus on suunniteltava siten, ettei siitä aiheudu sen käyttäjille tai naapureille hygienia- tai terveysriskiä kosteuden kertymisestä rakennuksen osiin tai sisäpinnoille. Rakennuksen näiden ominaisuuksien tulee normaalilla kunnossapidolla säilyä koko taloudellisesti kohtuullisen käyttöajan ajan.

Olennaisessa vaatimuksessa on korostettu erityisesti ongelman paikantumista a) rakennusosien sisään ja b) rakennusosien sisäpintaan. Jälkimmäinen ongelma-kohta on suoraan kontaktissa sisäilmaan ja alttiina ilman kosteuden vaikutuksille. Täten ratkaisut, jotka alentavat huoneilman kosteuden huippuarvoa, toimivat olennaisen vaatimukseen edellyttämällä tavalla, mitä tulee rakenteiden sisäpintoihin.

Liiallinen kosteus rakennusosien sisällä on myös haitallista. Jos tällaista esiintyy, on yleensä kyseessä jokin seuraavista syistä:

- rakennusaikainen kastuminen (rakennuskosteus)
- maaperän kosteuden ja pintaveden tunkeutuminen ja kapillaarinen siirtyminen rakenteissa
- sadeveden ja lumen tunkeutuminen tuulen paineen vaikutuksesta ja valuminen rakenteiden sisään
- Ulkoilman vesihöyryn tiivistyminen viileisiin pintoihin (ryömintätilat, lämpösäteilyn takia jäähtyneet pinnat esim. yläpohjan tuuletusvälissä)
- kostean huoneilman vuotaminen rakojen kautta rakenteiden kylmiin osiin (vesihöyryn konvektio)
- veden pääsy märkätiloista rakenteiden sisään
- vesivahingot
- virheellinen veden käyttö sisätiloissa.

Huoneilman vesihöyryn diffuusio rakenteisiin on otettava suunnittelussa myös huomioon, jotta diffuusio hallitaan ja sitä voidaan käyttää hyväksi. Diffuusion aiheuttamat vahingot ovat edellmainittuihin syihin verrattuna harvinaisia ja kyseessä on yleensä tällöin perustavaa laatua oleva suunnitteluvirhe.

Osassa C2 rakennuksen kosteusteknistä toimintaa koskeva ensimmäinen yleinen määräys 1.4.1 on seuraava:

Määräys 1.4.1

Rakenteet ja LVI-järjestelmät on tehtävä siten, ettei sisäisistä ja ulkoisista kosteuslähteistä peräisin oleva vesihöyry, vesi tai lumi tunkeudu haitallisesti rakenteisiin ja rakennuksen sisätiloihin. Tarvittaessa rakenteen on kyettävä kuivumaan haittaa aiheuttamatta tai rakenteen kuivattamiseen on esitettävä suunnitelma.

Määräys 1.4.1 pitää sisällään kaksi periaatteellista vaatimusta, jotka molemmat täytyvät oikein suunnitellulla hengittävällä rakenteella. Rakenteen tulee olla suunnitelmien mukaisessa käytössä kosteusteknisesti toimiva ja turvallinen. Toisaalta varaudutaan poikkeustilanteeseen. Jos rakenne kuitenkin kastuu, sen tulee olla kuivumiskykyinen.

Hengittävän puurunkorakenteen perusidea on se, että suhteellinen kosteus rakenteen sisällä pidetään turvallisella alueella valitsemalla sisäverhous ja tuulensuoja ominaisuuksiltaan oikein. Sisäverhouksen höyrynvastus on pieni mutta tarpeeseen nähden riittävä. Tuulensuojan höyrynvastus on toimintaoloissa hyvin pieni ja tuulensuojalla saa mielellä olla myös lämmöneristyskykyä. Viimeksi mainittu alentaa suhteellista kosteutta lämmöneristyksen kylmässä osassa talvisin ja lisää rakenteen kuivumiskykyä^{17/}.

C2:n ohje 1.4.11.1 varoittaa suunnittelemasta ja tekemästä rakenteisiin kahta höyrytiivistä ainekerrosta, joiden väliin jää kuivumista vaativia materiaaleja. Hengittävää rakennetta käytettäessä tällainen riskiratkaisu on helppo välttää.

C2:n toinen yleinen määräys 1.4.2 on seuraava:

Määräys 1.4.2

Sisäilman vesihöyryn haitallisen konvektion estämiseksi tulee rakennuksen vaipan ja sen yksityiskohtien olla niin tiiviitä läpi kulkevien ilmapuotojen suhteen, että syntyy edellytykset pitää rakennus pääsääntöisesti alipaineisena. Rakennuksen ulkopinnan ja sen yksityiskohtien tulee estää veden ja lumen haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin myös tuulen vaikutuksesta.

Määräyksessä on aivan oikein kiinnitetty huomio hataruuden aiheuttamaan kosteusriskiin. Rakenteen läpi sisältä ulos kulkeva ilmapuoto kuljettaa vesihöyryä, jota voi verraten nopeasti tiivistyä vuotoreitit kylmiin osiin. Tutkimuksin on osoitettu, ettei jatkuvaa vähäistäkään vuotoa ulospäin voida hyväksyä^{2/}. Hengittävän rakenteen (niinkuin kaikkien muidenkin) tulee olla ilmanpitävä ja sisältää määräyksen edellyttämä ilmansulkuratkaisu.

Yleinen määräys 1.4.11 ja ohje 1.4.11.1 pitävät sisällään mielenkiintoisen periaatteen. Määräys ja ohje kuuluvat:

Määräys 1.4.11

Suunnitelmassa esitettävien rakenteiden ja rakennusosien kosteusteknisestä toimivuudesta on varmistuttava luotettavaan selvitykseen perustuen.

Ohje 1.4.11.1

Kosteusteknisestä toimivuudesta annettava selvitys voi olla laskennallinen, kokeellinen tai näiden yhdistelmä. Pitkäaikaiseen kokemukseen perustuva tieto hyvästä kosteusteknisestä toiminnasta voi korvata selvityksen.

Mainitut määräys ja ohje toimivat ikäänkuin kahden suuntaan. Yhtäältä edellytetään luotettavaa tietoa hyvästä kosteusteknisestä toimivuudesta. Toisaalta, kun luotettava selvitys mainitussa asiassa

esitetään, on mm. viranomaisilla velvollisuus ottaa se huomioon. Hengittävien rakenteiden toiminnasta on runsaasti hyviä kokemuksia sekä tutkimustuloksia hyvän toiminnan edellytyksistä.

Hengittävinä rakenteina klassikkoja ovat massiivinen hirsiseinä ja 40-luvun purueristetty puurunkoseinä. Näistä rakenteista on siinä määrin pitkäaikaisia ja hyviä kokemuksia, ettei niitä kyseenalaisteta eikä selvityksiä toimivuudesta edellytetä.

Puukuitueristetty hengittävä puurunkorakenne on purueristetyn rakenteen nykyaikainen sukulainen, josta siitäkkin on jo runsaasti käyttökokemuksia. Perusratkaisut ovat olleet Suomen markkinoilla jo lähes 30 vuotta. Tekijän tiedossa ei ole mitään sellaista palautetta kentältä, joka viestisi perustavaa laatua olevista suunnitteluvirheistä ja systemaattisesti esiintyvistä ongelmista niiden seurauksena. Päin vastoin kokemukset ovat yleensä hyviä.

Pitkäaikaisen kokemuksen lisäksi hengittävien puukuitueristettyjen rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta on olemassa myös laskennallista että kokeellista tutkimustietoa^{1,2,3,7,8/}. Mm.lähteessä^{3/} esitetään puukuitueristetyn hengittävän rakenteen puurungon kosteuspitoisuuden mittaustuloksia kahden vuoden ajalta. Lähteessä^{3/} tarkastellaan myös hengittävän rakenteen eri kerrosten höyrynvastuksille asetettavia vaatimuksia. Lyhyesti on todettu mm. seuraavaa:

Tapanilan ekotalon huokoisen ja vesihöyryä läpäisevän vaipan kosteusteknistä toimintaa seurattiin mittauksin yli kahden vuoden ajan rakennusvaiheen jälkeen ja mittaustulokset osoittivat, että vaippa on fyysikaalisesti turvallinen. Laskennalliset simuloinnit osoittavat, että lämmöneristyksen sisäpuolisten ainekerrosten höyrynvastus voi olla merkittävästi alle PE-muovikalvon edustaman tason ja rakenne on silti turvallinen jopa kylmässä ilmastossa. Mittausten ja simulointilaskelmien perusteella voidaan suositella, että lämmöneristyksen sisäpuolisten ainekerrosten yhteenlasketun

höyrynvastuksen tulisi olla 3–5 -kertainen verrattuna ulkopuolisen ainekerroksen höyrynvastukseen. Tulos on soveltuva vain, mikäli vesihöyryn konvektio on eliminoitu, rakennuskosteus on vähäinen eivätkä muut kosteusvaurioita aiheuttavat mekanismit ole merkittäviä (lähde 3, sivu 128).

Todettakoon, että PE-muovikalvon höyrynvastus on tavanomaiseen tuulensuojaan (huokoinen puukuitulevy, kipsilevy, läpäisevällä kuitukankaalla pinnoitettu mineraalivillatuulensuoja jne.) verrattuna suuruusluokaltaan 500-kertainen, joten yllimitoitus tarpeeseen nähden on suuri^{2/}. Edellämainitut varaukset vesihöyryn konvektion, rakennuskosteuden ja muiden kosteusvaurioita aiheuttavien mekanismien suhteen koskevat yleisesti kaikkia rakennetyyppejä. Hengittävät rakenteet eivät ole tässä suhteessa mikään erityisryhmä.

Edellä esitetyn perusteella voidaan yksiselitteisesti todeta, että hengittävistä puukuitueristetyistä rakenteista on olemassa sekä tutkimustietoa että kokeuksia, jotka täyttävät määräyksen 1.4.11 sisältämän vaatimuksen. Hengittävän rakenteen kosteusteknisen turvallisuuden edellytykset tunnetaan.

Määräys 4.1.1

Ulkoseinän ja sen eri kerrosten sekä ulkoseinään liittyvien rakenteiden ja ulkoseinän liitosten vesihöyrynvastuksen ja ilmatiiviiden on oltava sellainen, ettei seinän kosteuspitoisuus sisäilman vesihöyryn diffuusion tai konvektion johdosta muodostu haitalliseksi. Sekä rakennuskosteuden että seinään ulko- tai sisäpuolelta satunnaisesti tunkeutuvan veden on voitava poistua vahinkoa ja terveystriskiä aiheuttamatta.

Määräys 4.1.1 soveltaa edellä käsiteltyä yleistä määräystä 1.4.1 ulkoseiniin. Hengittävästä puukuitueristetyistä ulkoseinärakenteesta voidaan tässä lyhyesti todeta ja toistaa edellä esitettyä:

- sisäilman vesihöyryn diffuusion haitat on estetty, kun sisäverhouskerroksen ja tuulensuojan höyrynvastusten suhde on oikea.
- sisäilman vesihöyryn konvektio on estetty toimivalla ilmansulkuratkaisulla.
- rakenteen kuivumiskyky on varmistettu sillä, että tuulensuojan höyrynvastus on pieni ja että kuivumista voi tarvittaessa tapahtua myös sisäilmaan. Rakenteessa ei ole kuivumista estäviä diffuusiotiiviitä ainekerroksia, joiden väliin kosteus voi jäädä.

Ohje 4.1.1.1

Jos seinärakenne voi läpäistä haitallisessa määrin sisäilman vesihöyryä tai ilmaa, varmistetaan seinän höyry- ja ilmatiiviys asentamalla rakenteeseen tarkoituksenmukaisiin kohtiin höyrynsulkuna, ilmansulkuna tai tuulensuojana toimivat ainekerrokset.

Tämä ohje velvoittaa suunnittelijaa ottamaan huomioon vesihöyryn diffuusion ja konvektion sekä tuulen aiheuttamien ilmavirtausten mahdolliset haitat. Myös puukuitueristetyssä hengittävässä rakenteessa tarvitaan huoneilman vesihöyryn diffuusion hallittua rajoittamista, ilmanpitävyyttä ja eristyksen suojaamista tuulelta. Diffuusion rajoittamisesta vastaa sisäverhouskerroksen ja ilmansulun yhteinen höyrynvastus, jonka tulee olla riittävän suuri verrattuna tuulensuojan höyrynvastukseen. Joskus hengittävästä rakenteesta käytetty ilmaisu ”höyrynsuluton rakenne” ei ole lainkaan kuvaava, koska se viittaa siihen, ettei vesihöyryn diffuusiota tarvitsisi suunnittelussa ottaa huomioon. Päin vastoin diffuusio tulee suunnitella ja hallita, jotta sen mahdollistamat edut voidaan hyödyntää.

Ohje 4.1.1.2

Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen. Muussa tapauksessa seinärakenteeseen lisätään erillinen höyrynsulku lämmöneristyksen lämpimälle puolelle. Tästä voidaan poiketa, mikäli kokemukseen perustuen tai tutkimuksin on osoitettu, että rakenne on kosteusteknisesti toimiva.

Ohje 4.1.1.2 on hengittävän puukuitueristetyn rakenteen kannalta merkittävä. Tässä ohjeistetaan määrällisesti sisäverhouksen ja tuulensuojan höyrynvastusten suhde. On syytä muistaa, että huokoisten hygrokoooppisten materiaalien höyrynvastus riippuu suhteellisesta kosteudesta. Vastus pienenee suhteellisen kosteuden kasvaessa^{12/}. Kylmänä vuodenaikana huoneilman suhteellinen kosteus on matalimmillaan ja ulkoilman vastaavasti korkea. Vastaavasti on tyypillisen hengittävän rakenteen sisäverhouksen höyrynvastus suurimmillaan ja tuulensuojan pienimmillään. Tämä riippuvuus voidaan ottaa huomioon suunnittelussa, jos ainekerrosten höyrynvastukset tunnetaan suhteellisen kosteuden funktiona.

Ohjetta 4.1.1.2 laadittaessa on lähtökohtana ollut se, ettei tuulensuojalla ole lainkaan lämmöneristyskykyä. Tällöin lämmöneristyksen ja puurungon ulkopinta ovat lähellä ulkoilman lämpötilaa ja suhteellinen kosteus mainitussa kohdassa on syksyisin ja talvella korkea ilman sisäilman vesihöyry diffuusiotakin. Höyrynvastusten viisinkertaisuussäännön toteutuminen takaa tässäkin tilanteessa rakenteen turvallisen toiminnan.

Tuulensuojan lämmöneristyskyvyn merkitystä on tutkittu^{12,17/} ja sen vaikutus kosteusturvallisuuteen on havaittu suureksi.

Tilanne paranee kahdella tavalla:

- lämmöneristyksen ja puurungon ulkopinnan lämpötila nousee kylmänä vuodenaikana. Tällöin suhteellinen kosteus alenee ja korkean suhteellisen kosteuden riski pienenee.
- määrän rakenteen kuivumiskyky ulospäin kasvaa olennaisesti. Lämmöneristyksessä oleva vapaa vesi on korkeammassa lämpötilassa ja vastaavasti höyrynpaine tuulensuojan sisäpinnassa nousee, mikä lisää merkittävästi vesihöyry diffuusiota tuulensuojan läpi.

Ohjeessa sallitaan poikkeama viisinkertaisuussäännöstä, kunhan rakenteen kosteusturvallisuus on selvitetty ja hyväksi todettu. Käytännössä kolminkertaisuuskin riittää, kun käytetään lämpöä eristäviä tuulensuojatuotteita^{13/}.

Ohje 4.1.1.3

Tuuletusvälillä varustetuissa ulkoseinissä asennetaan ilmaa hyvin läpäisevän lämmöneristyksen kylmään pintaan tai tarkoituksenmukaiseen kohtaan eristyksen sisään erillinen tuulensuoja. Tuulensuojan vesihöyrynvastuksen tulee olla riittävän pieni sisäpuolelta tunkeutuvan vesihöyry, rakennuskosteuden ja mahdollisten satunnaisten kosteuskuormien kuivumiseksi haittaa aiheuttamatta.

Hengittävän puukuitueristetyn ulkoseinän ja vinon yläpohjan tuulensuojana tulisi käyttää tuotteita, jotka:

- läpäisevät vesihöyryä diffuusiolla mahdollisimman hyvin,
- tai edellisen lisäksi eristävät myös lämpöä,
- ja joiden ilmanläpäisykerroin on enintään $10 \times 10^{-6} \text{m}^3 / (\text{m}^2 \text{s Pa})$.

Kosteuden pääasiallisen siirtymismuodon ollessa vesihöyry (kaasu) diffuusio, ei tuulensuojan lämpötilan aleneminen pakkapuolelle pienennä juurikaan höyrynvastusta.

Määräys 4.1.2

Ilmansulun ja ilmansulkuna toimivan höyrynsulun saumat, reunat ja läpivientikohdat on tiivistettävä huolellisesti.

Ohje 4.1.2.1

Ilmansulun ja myös tuulensuojan tulee olla tiiviit ikkunoiden ja ovien karmien kohdalla sekä seinän ala-, väli- ja yläpohjien liittymissä. Ilmansulun lävistyksiset tuuletusaukkojen, sähkörasioiden, putkien jne. kohdalla tiivistetään huolellisesti.

Määräys 4.1.2 ja siihen liittyvä ohje korostavat hyvän ilmanpitävyyden merkitystä ja täydentävät yleistä määräystä 1.4.2, joka on käsitelty edellä. Suunnittelijalle ja työn valvojalle seuraa velvoitteita:

- rakennesuunnitelmissa (kuvat, työselitykset) tulee esittää suunnitelma ilmansulukuksi.
- toteutus tulee valvoa oikea-aikaisesti ja verrata suunnitelmaan.

Hengittävän puurunkoisen ulkoseinän ja yleisesti koko rakennusvaipan toiminnan kannalta on olennaista, että määräyksiä 1.4.2 ja 4.1.2 noudatetaan. Kuten aikaisemmin on jo todettu, hataruus ei ole hengittävyyttä vaan rakennuksen laadullinen heikkous. Hataruudesta seuraa monia ongelmia – ei pelkästään vesihöyryä konvektion muodostamaa riskiä.

Määräys 5.1.1

Ulkoilmaan rajoittuvat seinärakenteet on liitettävä sokkeliin ja maanvastaiseen lattia-rakenteeseen siten, että kosteuden haitallinen siirtyminen ja kertyminen seinärakenteeseen sokkelin tai viereisen lattiarakenteen kautta on estetty ja seinän alareunan kuivuminen on tarvittaessa mahdollista.

Ohje 5.1.1.2

Sokkelin päällä olevan puurunkoisen seinän aluspuun tulee olla kokonaan sen ulkopuolella olevan toimivan tuuletusvälin kohdalla niin, ettei mikään rakenneosasta estä aluspuun kuivumista tuuletusilmaan.

Hengittävissä puukuitueristetyissä rakenteissa toteutuu helposti seinän alareunan ja aluspuun hyvä kuivumiskyky tuuletusväliin. Tämä johtuu siitä, että tuulensuojan höyryvastuksen tulee yleisesti olla mahdollisimman pieni.

Kuivumista haittaavalla rakenneosalla tarkoitetaan ohjeessa lähinnä tiiliverhouksen taakse seinän alareunaan tehtävää kermikaistaa, jolla tuuletusväliässä alaspäin valuva vesi viemäroidään takaisin ulkopuolelle. Kourumaista kermikaistaa ei saa laskea painumaan tuulensuojaa vasten aluspuun kohdalla. Tällöin aluspuu on usein kolmelta puolen ympäröity kuivumisen estävällä kerroksella, mikä muodostaa riskin. Tarvittaessa ongelma voidaan ratkaista porrastamalla aluspuun ja alimman tiilikerroksen korkeusasemat.

Määräys 6.2.1

Yläpohjan eri kerrokset ja katon tuuletus on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei kattoon kerry vesihöyryn diffuusion tai ilmavirtausten vuoksi haitallisessa määrin kosteutta ja että rakenteisiin mahdollisesti pääsevä kosteus voi kuivua.

Määräys 6.2.1 siihen liittyvine ohjeineen koskee yläpohjaa ja siinä toistetaan niitä asioita, jotka on mainittu ulkoseiniä koskevassa vastaavassa määräyksessä 4.1.1. Hengittävän puukuitueristetyin yläpohjan vesihöyryn diffuusion tulee olla hallittua ja ilmanpitävyys varmistetaan ilmansulkuratkaisulla tiivistettyine läpivienteineen. Ilmansulun tarve on jopa suurempi kuin ulkoseinissä johtuen talvikauden termisen ylipaineen uhasta. Tällöin sisäilmaa voi vuotaa rakenteisiin – niiden kylmiin osiin jatkuvasti, jolloin kosteuden keräytyminen on todennäköistä.

Höyrynvastusten ns. viisinkertaisuussääntö pätee myös vaakasuorassa tai kallistetussa rakenteessa (painovoima ei vaikuta mitenkään diffuusion – ainoastaan vesihöyryn konvektioon). Jos rakenteessa ei ole tuulensuojaa, toteutuu viisinkertaisuussääntö käytännössä aina. Muutoin noudatetaan samoja periaatteita kuin ulkoseinien suunnittelussa.

Kattorakenteiden tuulettumisesta on huolehdittava niin, että koko yläpohjan alue on tuulettuva. Erityisesti on varmistettava, että tuuletusväli on reilusti avoin matalimmassakin kohdassa. Esim. lämmöneristystä ei saa asettaa kiinni tai liian lähelle yläpuolista aluskatetta tai ruodelaudoitusta. Aluskatteen yläpuolinen tila tulee myös tuulettaa tai kosteuden poistuminen tilasta on varmistettava muulla tavoin.

Edellä on käsitelty Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan C2 ”Kosteus” ne määräykset ja ohjeet, jotka ovat olennaisia hengittävän ulkoseinän ja yläpohjarakenteen toiminnan ja kosteusturvallisuuden kannalta. Täysin yksiselitteistä on se, että määräykset ja ohjeet eivät ole ristiriidassa hengittävän rakenteen periaatteiden kanssa. Päin vastoin ne mahdollistavat hengittävien rakenteiden käytön. Erityisesti kaiken yläpuolella oleva olennainen vaatimus suorastaan edellyttää ratkaisuja, joilla vähennetään rakenteista ja rakennuksesta aiheutuvia terveydellisiä uhkia.

8 HENGITTÄVÄN RAKENTEEN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Kuten aikaisemmin on jo todettu, hengittävien rakenteiden käytöllä on Suomessa pitkät perinteet johtuen ennen muuta puurakentamisen yleisyydestä. Puu ja puupohjaiset materiaalit, kuten puukuitulevyt, puukuitueristeet, vanerit, lastulevyt jne. soveltuvat erinomaisesti hengittävän rakenteen ratkaisuihin. Myös kipsilevyillä on käyttökelpoisia ominaisuuksia. Lisäksi tarvitaan ilmansulkuratkaisuja sekä sisäpuolisia pinnoitteita, jotka mahdollistavat huoneilman vesihöyryn ja muidenkin kaasujen kontrolloidun pääsyn puukuitueristykseen.

Rakennusaineista ja tarvikkeista tarvitaan joitakin tietoja, jotka normaalissa suunnittelussa jäävät vähälle huomiolle. Tällaisia ovat aineiden sorptiokäyrät (tasapainotilassa hygroskooppisesti sitoutunut kosteuspitoisuus suhteellisen kosteuden funktiona), vesihöyrynläpäisevyydet ja ohuiden ainekerrosten vesihöyrynvastukset mielellään myös suhteellisen kosteuden funktiona. Joitakin aineominaisuustietoja esitetään jäljempänä tässä julkaisussa.

Puukuitueristeellä lämmöneristettävien ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden suunnittelussa tulisi noudattaa jäljempänä esitettäviä periaatteita, jotka mahdollistavat sekä lämmöneristeen että hygroskooppisten pintamateriaalien osallistumisen huoneilman kosteuden hallintaan ja jotka varmentavat rakennuksen vaipan kosteusturvallisuuden.

Lämmöneristykseen mitoitus ja eristäminen

Lämmöneristykseen paksuuden määrää rakenteelta vaadittava lämmönläpäisykerroin (U-arvo) sekä lämmöneristeen lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo eli normaalin lämmönjohtavuus (λ_n).

Huomautus: Lähiaikoina tulevat käyttöön rakennusten lämmöneristeiden eurooppalaiset tuotestandardit sekä lämmöneristämisen suunnittelu-standardit. Näiden mukaan lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo (λ_{Design}) saadaan muuntamalla kansallisesti vahvistettavalla tavalla tuotestandardin mu-

kaan määritettävä lämmönjohtavuuden ilmoitettu arvo ($\lambda_{Declared}$) suunnittelu-arvoksi. Täten λ_n ja λ_{Design} ovat yhtäläisesti suunnittelukäyttöön tarkoitettuja arvoja.

Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa C3 ”Lämmöneristys, Määräykset” esitetään suurimmat sallitut lämmönläpäisykerroimen arvot rakennusosittain. Määräykseen sisältyvä kompensatioperiaate sallii vaatimusarvon ylittämisen jossakin rakennusosassa, kunhan kompensatiolaskelma osoittaa ettei vaipan lämmöneristyskyky (keskimääräinen U-arvo) heikkene määräsarvojen mukaisesta tasosta. Tällöin lämmöneristystä on vastaavasti parannettava vaatimustasosta jossakin muussa vaipan osassa.

Koska Suomen Rakentamismääräyskokoelman osat C3, C4 ja D2 ovat tätä kirjoitettaessa uudistustyön kohteena, ei tässä esitetä lämmönläpäisykerroimen vaatimusarvoja. Odotettavissa on vaatimustason tiukkeneminen aikaisemmasta ja kompensatiomenettelyn uudistus. Lämmönläpäisykerroimen laskenta ohjeistetaan osassa C4. Uudistetussa ohjeessa tullee laskentastandardit muutoksia verrattuna voimassaolevaan ohjeeseen. Myös vastaavat eurooppalaiset laskentastandardit tullaan ottamaan lähitulevaisuudessa käyttöön. Tällöin mitoitus tarkentuu nykyisestäään, mikä vaikuttaa myös laskennallisiin rakennevahvuuksiin.

Rakennusaineiden normaaliset lämmönjohtavuudet esitetään Rakentamismääräyskokoelman osassa C4 sekä yksilöidyille lämmöneristeille erillisissä Ympäristöministeriön antamissa tyyppi-hyväksyntäpäätöksissä. Rakennuspuun, jonka tiheys on 450 kg/m^3 , normaalisenä lämmönjohtavuutena voidaan käyttää arvoa $0,12 \text{ W/(m K)}$. Mainittu arvo on esitetty lausuntokierroksella olleessa ympäristöministeriön ehdotuksessa 16.5.2001 ”Osa C4 Lämmöneristys, Ohjeet 2003”.

Puukuitueristeiden voimassaolevissa tyyppihyväksyntäpäätöksissä sekä ympäristöministerölle toimitetuissa tyyppihyväksyntähakemuksissa esiintyy seuraavia normaalisen lämmönjohtavuuden arvoja:

Puukuitueristys	λ_n W / (m K)
puhallusasennettu kuivana	
- vapaaseen tilaan vaakasuorassa tai loivasti kallistettussa yläpohjassa, tiheys 26–35 kg/m ³	0,041¹⁾
- suljettuun onteloon, kallistus enintään 60°, tiheys 43–48 kg/m ³	0,041
- suljettuun pystysuoraan onteloon, tiheys 58...63 kg/m ³	0,041
Puukuitueristys ruiskuasennettuna, tiheys 30...35 kg/m³	
- seinään molemmin puolin kiinni ilmavirtausten kannalta tiiviissä ainekerroksessa	0,041
- seinään, kun ulkopuolella on tavanomainen tuulensuoja	0,045
- seinään, kun lämmöneristyksen toisella puolen on ilmaväli	0,050

¹⁾ Vapaaseen tilaan puhallusasennettu, tiheydel-tään pieni irtoeristys painuu eristämisen jälkeen n. 15...20 % suunnitellusta paksuudesta, mikä tulee ottaa huomioon määräämällä puhallettava eristyspaksuus vastaavasti suunniteltua suuremmaksi.

Puukuitueristeen normaalin lämmönjohtavuus on aina aiheellista varmentaa voimassaolevasta tyyppi-hyväksyntäpäätöksestä, sillä muutkin kuin edellä-esitetyt arvot voivat tulla kyseeseen tulevissa päätöksissä. Jossakin vaiheessa tulevaisuudessa otetaan käyttöön puukuitueristeiden eurooppalainen tuotestandardi sekä standardi lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määräämisestä. Tällöin on odotettavissa muutoksia myös lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoihin.

Puukuitueristeen asentaminen rakennusosan eristetilaan on ammattitaitoa ja kokemusta vaativaa työtä. Voimassaoleva normaalin lämmönjohtavuuden tyyppihyväksyntä edellyttää, että asennustyön suorittaa eristeen valmistaja tai hänen valtuuttamansa asennusurakoitsija, joka noudattaa kokemukseen perustuvaa hyvää asentamistapaa. Asennustyössä on olennaista valmiin eristyksen oikea tiheys ja tiheyden tasaisuus. Eristetilan täyttyminen kontrolloidaan työn suorittamisen yhteydessä. Yläpohjan vapaaseen tilaan puhallusasennettavan eristyksen puhallettu paksuus ja painumavaran riittävyys todetaan mittauksin. Lämmöneristyksen keskimääräinen tiheys määritetään laskennallisesti ainemenekin ja lämmöneristyksen tilavuuden perusteella ja sen tulee vastata tyyppihyväksyntäpäätöksessä ko. sovellukselle esitettyä tiheyttä. Ruiskuasennuksessa puukuitueriste ruiskutetaan sumuttamalla sekaan vettä tai vettä ja liima-aineen seosta oikeassa suhteessa. Lämmöneristys asennetaan rakennuspaikalla rakennusosan eristetilaan, joka yleensä on ruiskutuspuolelta avoin ja toiselta puolen levytetty (esim. tuulensuoja) tai varustettu jäykällä pinnalla, johon eriste tarttuu. Ruiskutuksen jälkeen lämmöneristyksen pinta tasataan ruiskutuspuolelta erikoistyökalulla seinän puurungon etupinnan tasaan. Tämän jälkeen eristys saa kuivua, kunnes kuitujen liimautuminen on tapahtunut. Lopputuloksena on levymainen eristys, joka on liimautunut kiinni eristetilan pintoihin ja jossa kuidut ovat kiinnittyneet toisiinsa muodostaen painumattoman huokosrakenteen.

Ruiskuasennettavan eristeen tulee kuivua asettamisen jälkeen. Koska hengittävissä rakenteissa tuulensuojan vesihöyrynvastus on pieni, tapahtuu kuivumista heti asentamisen jälkeen sekä sisään että ulospäin. Vesihöyryä diffuusiolla läpäisevä ilmansulku ja sisäverhous voidaan asentaa heti, kun eristys on liimautunut niin, ettei se tärinän johdosta mekaanisesti vaurioidu. Vaatimukset lämmöneristystyön suoritusoloille, eristämistyölle sekä valmiin eristyksen jälkihoidolle esitetään valmistajien ohjeissa.

Ilmanpitävyys ja ilmansulkuratkaisut

Rakennuksen vaipan ilmanpitävyys mitataan ns. painekokeella, jonka tuloksena esitetään vaipan läpi rakojen kautta tapahtuva ilmapuoto 50 Pa paineeron vallitessa (n_{50}). Yksikkönä on 1/h eli kuinka monta rakennuksen tilavuuden edustamaa ilmamäärää vuotaa tunnissa vaipan läpi. Suomessa ei ole toistaiseksi esitetty rakennuksen ilmanpitävyydelle määrällistä tiiviysvaatimusta. Ympäristöministeriön ehdotuksessa 16.5.2001 ”C3 Rakennuksen lämmöneristys ja tilojen lämmityksen tehon- ja nettoenergiantarve, Määräykset 2003” esitetään kuitenkin tavoitteellisenä suosituksena arvo $n_{50} = 3$ 1/h. Voimassaoleva rakentamismääräyskokoelman osa C2 ”Kosteus, Määräykset ja ohjeet 1998” edellyttää yksiselitteisesti rakennuksen vaipan ilmanpitävyyden suunnittelun ja ilmansulkuratkaisun toteuttamisen rakennuksen vaippaan. Puurunkoisessa puukuitueristetyssä rakenteessa ilmansulku voidaan tehdä asentamalla ilmanpitävä ainekerros (esim. tarkoitukseen soveltuva rakennuspaperi, -pahvi tms.) lämmöneristykseen sisäpintaan sisäverhouksen alle. Ilmansulkukerroksen ilmanläpäisykertoimen tulisi olla suuruusluokkaa $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s Pa})$. Tällöin voidaan saavuttaa C2:ssa asetettu tavoite rakennuksen pitämisestä pääsääntöisesti alipaineisena ulospäin suuntautuvien ilmapuotojen ja vesihöyryn konvektion estämiseksi.

Ilmansulun tulee olla systeeminä ilmanpitävä. Tämä tarkoittaa sitä, ettei ilmansulkuun saa jättää tiivistämättömiä rakoja, aukkoja tai läpivientejä. Ilmansulun ilmanpitävyys varmennetaan seuraavasti:

- ilmansulun saumat limitetään ja asetetaan puristuksiin jäykkien pintojen väliin.
- vaipan eri rakennusosien ilmansulut liitetään toisiinsa ilmanpitävästi rakennusosien liittymäkohdissa, joita ovat yläpohjan, ulkoseinien ja alapohjan kaikki nurkkaukset.
- rakennuksen vaipassa ilmansulun olisi hyvä jatkaa ehjänä väliseinien ja välipohjien liittymäkohdissa. Rakenne suunnitellaan ja työjärjestys valitaan niin, että ilmansulku asennetaan ko. kohtaan ennen väliseinän ja välipohjan rakentamista. Ellei tämä ole mahdollista, tiivistetään ilmansulku rakenteen läpivientikohdassa huolellisesti.
- ilmansulku liitetään ilmanpitävästi ikkuna- ja oviaukkojen kehyspuuhun niin, että liitoskohta kauttaaltaan jää puristuksiin jäykkien pintojen väliin.
- mikäli ilmansulkuun tehdään läpivientejä sähkö-, puhelin ja antennivetojen takia, tiivistetään kukin läpivientikohta erikseen. Sähköasennuksissa tulisi mahdollisimman paljon hyödyntää väliseiniä ja välipohjia.
- ilmansulku tiivistetään ilmanvaihtokanavien ja hormien läpivientikohdissa.

Ilmansulun läpivientien tiivistämiseen on suositeltavaa käyttää tähän tarkoitukseen kehitettyjä tiivistämistarvikkeita ja tuotteita, joilla on pitkä käyttöikä ja joilla helpotetaan tiivistystyötä. Helpon monistettavilla ratkaisuilla saadaan laadullisesti hyvä tulos ja säästetään työkustannuksissa.

Kosteustekninen mitoitus ja tuulensuojaus

Hengittävä puurunkoinen, puukuitueristetty rakenne on asuntojen, toimistojen, koulujen yms. rakennusten perusratkaisu, jolla tasataan huoneilman kosteuden vaihtelua ja estetään ajoittain korkea huoneilman suhteellinen kosteus. Hengittävän rakenteen käytön lähtökohtia ovat:

- huoneiden kosteuskuormitus vaihtelee jaksottaisesti. Huoneessa voi olla lyhytaikaisia (tunteja kestäviä) runsaitakin kosteuskuormituksia, kun vastaavasti vuorokausittain on myös kosteuskuormittamatonta aikaa.
- rakennuksen ilmanvaihto toimii ja on käytössä. Hengittävää rakennetta ei tule ilman erillistä selvitystä sen toimivuudesta käyttää kohteissa, joissa on pitkäkestoisia ja suuria huoneilman kosteuskuormituksia. Tällaisia kohteita ovat mm.:

- uimahallit ja uima-allashuoneet
- yleiset saunat märkätiloihin
- runsaasti käytetyt työpaikkojen, hotellien, majoitusliikkeiden yms. märkätilat
- tilat, joissa tuotantoprosessista tai vastaavasta vapautuu jatkuvasti runsaasti vesihöyryä huoneilmaan
- kylmä- ja pakkasvarastot.

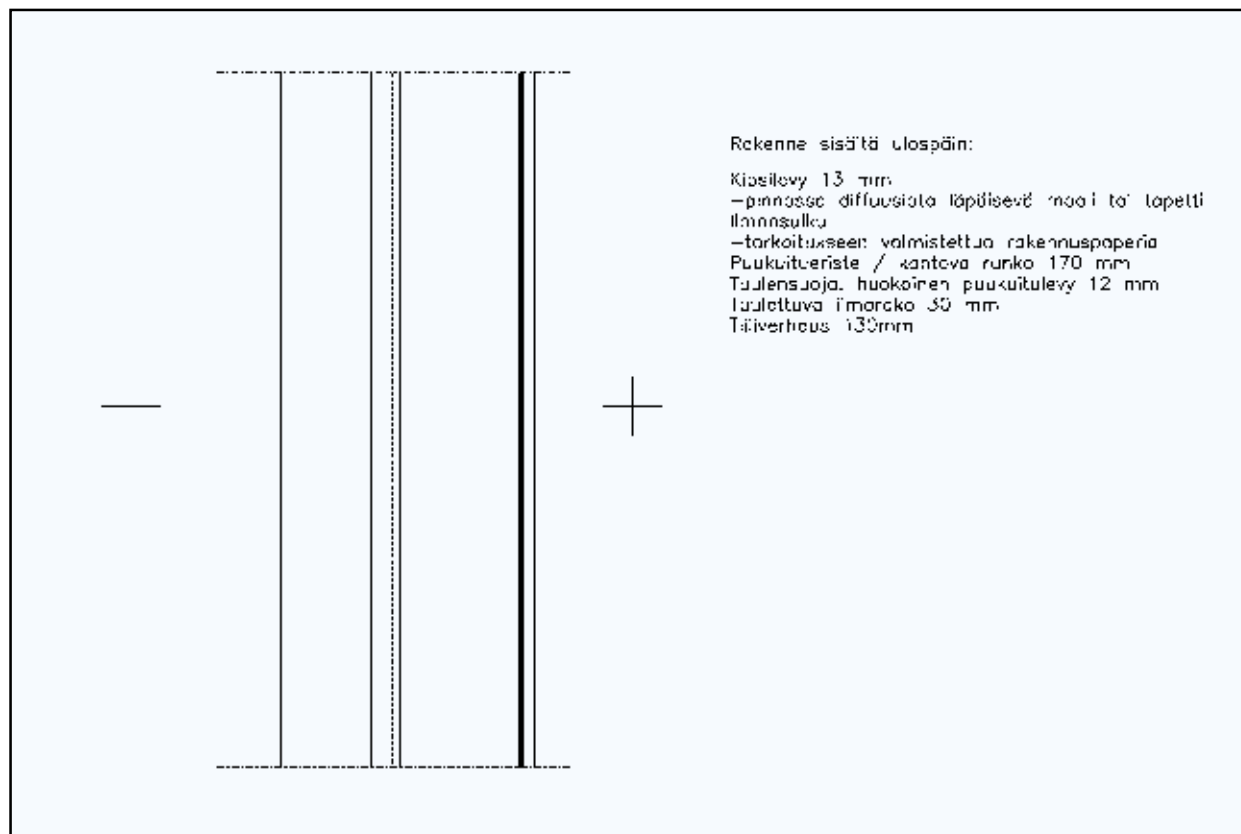
Kosteusturvallisen hengittävän rakenteen suunnittelussa ja mitoituksessa tulee ottaa huomioon kolme näkökohtaa.

- 1) Puukuitueristetyt rakenteen huoneen puolella olevan rakennekerroksen höyrynvastuksen tulisi olla pienimmillään lämpimänä vuodenaikana, jolloin huoneilman suhteellinen kosteus on korkeimmillaan. Tällöin rakenne tasaa tehokkaasti huoneilman kosteuden vaihtelua ja estää ilmanvaihdosta riippumattomasti suhteellisen kosteuden nousun haitallisen korkeaksi.
- 2) Kylmänä vuodenaikana huoneilman vesihöyryn diffuusio puukuitueristettyyn vaippaan ei saa aiheuttaa haitallista kosteuden keräytymistä rakenteeseen, erityisesti tuulensuojan sisäpintaan. Kylmänä vuodenaikana on sisäilman suhteellinen kosteus matalimmillaan ja ulkoilman korkeimmillaan.

- 3) Puun ja puupohjaisten rakennusaineiden kuten vaneri, puukuitulevyt, lastulevy, rakennuspaperit, pahvit jne. höyrynläpäisevyys kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa. Tätä ilmiötä voidaan hyödyntää rakennesuunnittelussa. Kesällä, kun tehollista sorptiokapasitettia tarvitaan eniten, se myös on suurimmillaan. Talvella nettöhöyryvirran kasvua huoneilmasta rakenteeseen vaimentaa huoneilman kuivuminen ja sisäverhouskerroksen höyrynvastuksen kasvaminen. Vastaavasti tuulensuoja on lämmityskaudella korkeassa suhteellisessa kosteudessa, mikä lisää rakenteen kuivumiskykyä ulospäin. Esimerkiksi tavanomaisilla rakennuspapereilla on 3 – 5 kertaa suurempi höyrynvastus matalassa suhteellisessa kosteudessa verrattuna korkeaan kosteuteen (Taulukko 1). 9 mm:n havuvanerilla vastaava suhde on jopa 18-kertainen (Taulukko 3).

Hengittävän puukuitueristetyn ulkoseinä- ja yläpohjarakenteen suunnittelussa lämmöneristyksen sisäpuolisten (huoneen puoleisten) ainekerrosten höyrynvastuksina käytetään testaustuloksia, jotka on mitattu standardin mukaisella kuppikokeella enintään 35 % R.H. keskimääräisessä suhteellisessa kosteudessa. Vastaavasti ulkopuolisen ainekerroksen (tuulensuoja) höyrynvastuksena käytetään testaustulosta, joka on mitattu standardin mukaisella kuppikokeella vähintään 75 % R.H. keskimääräisessä suhteellisessa kosteudessa. Keskimääräinen suhteellinen kosteus tarkoittaa testauksessa koekappaleen eri puolilla olevien ilmatilojen suhteellisten kosteuksien keskiarvoa. Koska rakennuspapereiden ja -levyjen höyrynvastukset vaihtelevat tuotekohtaisesti, tulee ensi sijassa käyttää tuotteita, joista on olemassa luotettavat testitulokset.

Hengittävä puukuitueristetty rakenne tulee mitoittaa kosteusteknisesti seuraavien vaatimusten mukaan.



Kuva 10. Esimerkki hengittäväksi seinärakenteeksi, jossa tuulensuojan lämmönvastus on pieni.

b) Seinässä on vesihöyryä hyvin läpäisevä tuulensuoja, jonka lämmönvastus on pieni (Kuva 10).

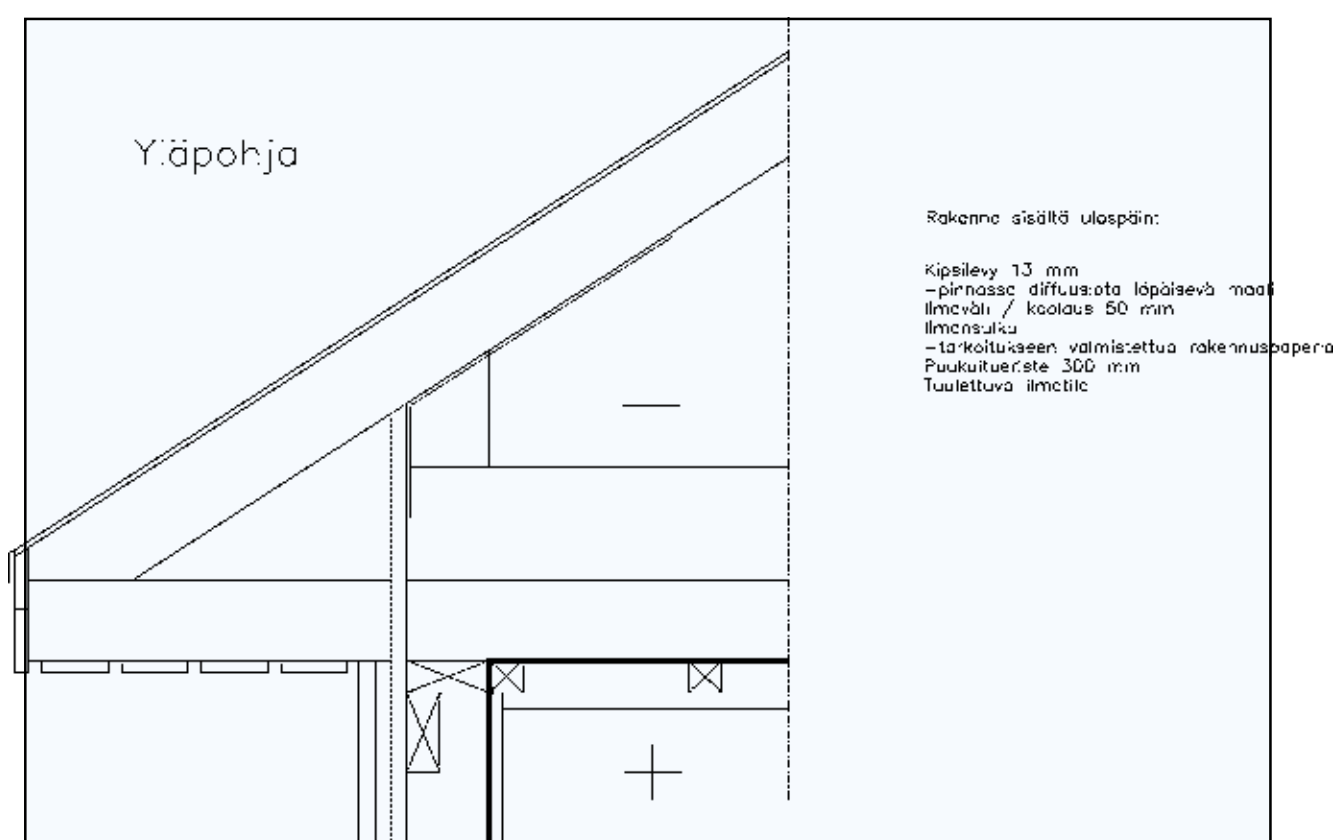
Ilmansulun ja sisäverhouskerroksen yhteenlaskettu höyrynvastus tulee olla lämmityskauden toimintaoloissa vähintään viisinkertainen verrattuna tuulensuojan höyrynvastukseen (C2).

Kuvan 10 rakenteessa ovat lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevien ainekerrosten ja tuulensuojan höyrynvastukset seuraavat:

- kipsilevy 13 mm, höyrynvastus kuivissa oloissa $Z_p = 0,8 \times 10^9 \text{ (m}^2 \text{ s Pa) / kg}$
- ilmansulku rakennuspaperia, höyrynvastus kuivissa oloissa $Z_p \geq 0,7 \times 10^9 \text{ (m}^2 \text{ s Pa) / kg}$
- huokoinen puukuitulevy, höyrynvastus kosteissa oloissa $Z_p = 0,3 \times 10^9 \text{ (m}^2 \text{ s Pa) / kg}$.

Kun tuulensuojan lämmönvastus on kuvan 10 rakenteella pienempi kuin $0,4 \text{ (m}^2 \text{ K) / W}$, on vaadittava höyrynvastusten suhde (5:1). Tämä toteutuu, kun ilmansulku valitaan höyrynvastukseltaan oikein. Tällöin ulkoseinän sisäpuolisen pinnoitteen höyrynvastukselle ei ole tarpeen asettaa mitään vähimmäisvaatimusta, vaan seinä voidaan pinnoittaa diffuusiota läpäiseväksi vapaasti valittavin ratkaisuin.

Jos kipsilevyn (kuiva olosuhde) ja huokoisen puukuitulevyn (kosteaa olosuhde) tuotekohtaisesti testatut höyrynvastukset poikkeavat edellä esitetystä, muuttuu ilmansulun höyrynvastuksen vähimmäisvaatimus vastaavasti. On huolehdittava vain höyrynvastusten suhteen vaatimusravon (5:1) täyttymisestä.



Kuva 11. Esimerkki puukuitueristystä yläpohjasta, jossa lämmöneristys on asennettu puhaltamalla vapaaseen tilaan ilmansulun päälle.

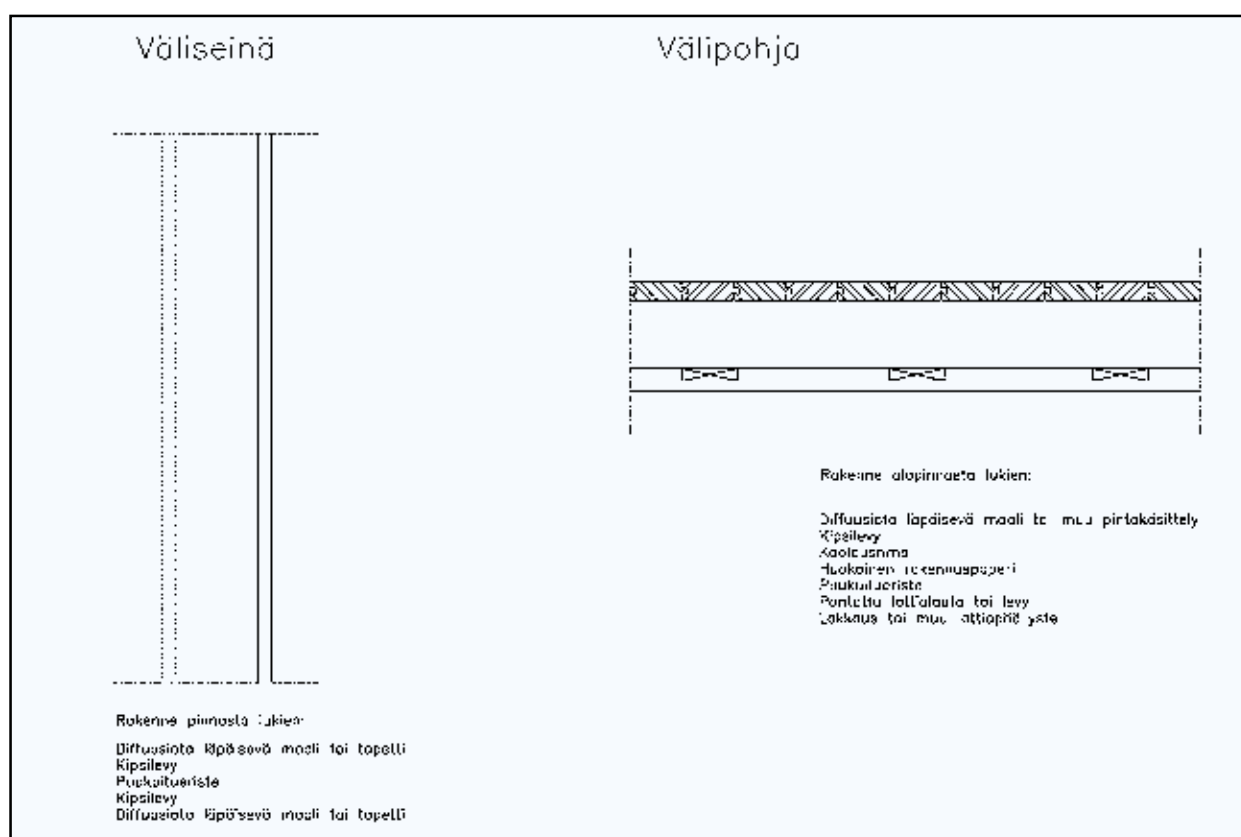
YLÄPOHJA

Vaakasuoraan tai kallistettuun yläpohjaan sovelletaan ulkoseinän mitoitussääntöjä, mikäli lämmöneristykseen ulkopinnassa on tuulensuoja.

Lämmöneristykseen yläpuolella on hyvin tuulettuva ilmaväli tai ilmatila.

Höyrynvastusten viisinkertaisuussääntö toteutuu aina, kun lämmöneristykseen lämpimälle puolelle asennetaan toimiva ilmansulku, joten rakenne on tässä suhteessa aina C2:n mukainen (Kuva 11).

Koska lämmöneristykseen kylmällä puolella ei ole tuulensuojasta aiheutuvaa höyrynvastusta, ei ilmansulun höyrynvastukselle aseteta C2:ssa mitään vaatimusta. Käytännössä ilmansulkuna voidaan käyttää samaa materiaalia kuin ulkoseinissä. Rakenne on vesihöyryn diffuusion suhteen turvallinen.



Kuva 12. Esimerkkirakenteet hengittäväksi väliseinäksi ja -pohjaksi.

VÄLISEINÄT JA VÄLIPOHJAT

Väliseinissä ja välipohjissa ei vesihöyryn diffuusio muodosta normaalisti kosteusteknistä uhkaa. Nämä rakennusosat tarjoavatkin erinomaisen mahdollisuuden suuren tehollisen sorptiokapasiteetin rakentamiseen. Suunnittelussa pyritään vain mahdollisimman pieneen höyrynvastukseen lämmöneristyksen ja huoneilman välissä. Rakenteet voivat olla kuvan 12 kaltaisia.

SISÄMAALIT JA TAPETIT

On luonnollista, että rakenteen sisäpinnan maalaaminen tai tapetointi vaikuttavat rakenteen teholliseen sorptiokapasiteettiin, joten maalien ja tapettien valinnassa on pyrittävä vesihöyryä diffuusiolla mahdollisimman hyvin läpäiseviin ratkaisuihin. Tällaisten tuotteiden kysyntä on johtanut tuotekehitykseen ja myös uusien tuotteiden tuloon markkinoille. Valmistaja vastaa tuotteiden teknisistä tiedoista, jotka myyjän tulee voida ilmoittaa. Hengittävän rakenteen hyödyntämisen kannalta pintakäsittelystä aiheutuva höyrynvastus tulee olla mahdollisimman pieni eikä se saa olla suurempi kuin $3 \times 10^9 \text{ (m}^2 \text{ s Pa) / kg}$.

Jos maalikerroksen tai tapetin höyrynvastus pienee suhteellisen kosteuden kasvaessa, voidaan tämä ominaisuus hyödyntää kesäaikana. Tällöin huoneilman kosteus on korkeimmillaan ja rakenteen hengittävyys merkitys siten suurimmillaan.

9 AINEKERROSTEN HÖYRYNVASTUKSIA

Ohuiden ainekerrosten ja rakennuslevyjen höyrynvastukset vaihtelevat sekä tuotetyypeittäin että valmistajakohtaisesti. Lisäksi höyrynvastukset muuttuvat suhteellisen kosteuden funktiona – yleensä niin, että höyrynvastus pienenee suhteellisen kosteuden kasvaessa. Mainituista syistä johtuen hengittävissä puukuitueristetyissä rakenteissa tulee pyrkiä käyttämään tuotteita, joiden höyrynvastukset on luotettavasti testattu. Testitulosten oikeellisuudesta vastaa tällöin tuotteen valmistaja.

Kosteusteknisessä mitoituksessa lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevien ainekerrosten höyrynvastuksena käytetään aikaisemmin mainittua ”kuivien olojen” testitulosta ja kylmällä puolella olevien ainekerrosten höyrynvastuksena vastaavasti ns. ”kosteiden olojen” testitulosta.

Jäljempänä esitetään eräiden rakennuspaperien ja -levyjen sekä ilman- ja höyrynsulkutuotteiden höyrynläpäisykertoimia ja vesihöyrynvastuksia. Taulukossa olevat arvot ovat peräisin kirjallisuusluetteloissa mainituista lähteistä – lähinnä VTT:n tutkimusjulkaisuista. Taulukossa esiintyviä lukuarvoja ei tule käyttää mitoituksessa, jos käytettävissä on tuotekohtaisia höyrynvastuksen testituloksia. Taulukoiden tehtävänä on ennen muuta antaa esimerkinomaisesti tietoa höyrynvastuksen ja suhteellisen kosteuden välisestä riippuvuudesta sekä eri tuotetyyppien höyrynvastuksen suuruusluokista ja suhteesta toisiinsa.

Puukuitueristeen vesihöyrynläpäisevyys (δ_p) on $5 \times 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$, kun suhteellinen kosteus on 30 % R.H. ja $12 \times 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$, kun suhteellinen kosteus on 80 % R.H. ^{/8/}.

AINEKERROSTEN HÖYRYNVASTUKSIA

Materiaali / tuote	Paksuus d, mm	Vesihöyrynläpäisykerroin W_p $kg/(m^2 \times s \times Pa)$ 3) Vesihöyrynvastus Z_p $(m^2 \times s \times Pa)/kg$ 4)	Olosuhteet 23 °C 50% / 0%	Olosuhteet 23 °C 97% / 65%	Olosuhteet 5 °C 97% / 65%
ulkovuoraushuopa 1)	0,44	W_p Z_p	0,29 3,5	1,4 0,73	1,5 0,69
ulkovuorauspaperi 2)	0,20	W_p Z_p	0,69 1,4	2,6 0,38	2,4 0,42
ulkovuorauskreppi 2)	n. 0,20	W_p Z_p	0,46 2,2	2,3 0,43	2,5 0,41
tuulensuojapaperi, kuumasaumattu MW:aan	0,12	W_p Z_p	0,80 1,2	3,3 0,31	4,0 0,25
voimapaperi	0,17	W_p Z_p	3,1 0,32	8,5 0,12	8,4 0,12
oksamassapahvi	0,36	W_p Z_p	2,1 0,48	5,9 0,17	6,3 0,16
raitabitumipaperi	0,34	W_p Z_p	1,6 0,63		6,3 0,16
suojapaperi	0,33	W_p Z_p	2,2 0,45		
ilmansulkukartonki 5) "95+15+95"	0,21	W_p Z_p	0,24 4,18		

1) Tuotteesta käytetään myös nimeä tervapahvi.

2) Tuotteesta käytetään myös nimeä tervapaperi.

3) Vesihöyrynläpäisykerroimen W_p ilmoitettujen lukuarvojen perään on lisättävä kerroin 10^{-9} .

4) Vesihöyrynvastuksien Z_p ilmoitettujen lukuarvojen perään on lisättävä kerroin 10^{-9} .

5) KCL-Services testaustulos

Taulukko 1. Huokoisten rakennuspapereiden vesihöyrynläpäisyominaisuudet kosteassa ja kuivassa ympäristössä sekä kahdessa lämpötilassa ^{2,18/}.

PAPERIT JA HÖYRYNSULKUTUOTTEET

Taulukoiden 1 ja 2 perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- huokoiset rakennuspaperit läpäisevät vesihöyryä diffuusiolla 100–1000 kertaa paremmin kuin höyrynsulkutuotteiksi nimetyt tuotteet.
- huokoisten rakennuspapereiden höyrynvastus on kuivissa mittausoloissa 3–5 -kertainen verrattuna kosteisiin mittausoloihin.
- testauslämpötilan alentaminen 23 °C asteesta 5 °C asteeseen ei muuttanut merkittävästi huokoisten rakennuspapereiden höyrynvastuksen arvoa.

On ilmeistä, että useiden kaupallisten höyrynsulkutuotteiden höyrynvastus on tarpeeseen nähden moninkertainen, mikäli rakenteet ovat ulospäin hyvin kuivuvia. Huokoisten rakennuspapereiden höyrynvastuksen voimakas riippuvuus suhteellisesta kosteudesta on mielenkiintoinen ilmiö höyrynsuluttomien seinärakenteiden toiminnan kannalta. Lämmityskaudella huoneilman suhteellinen kosteus on verraten matala ja vastaavasti ulkoilman korkea. Tällöin ulkopuolisen paperikerroksen toimintaoloja vastaava höyrynvastus on sisäpuolista pienempi ainakin leudolla säällä.

AINEKERROSTEN HÖYRYNVASTUKSIA

Materiaali / tuote	Paksuus d, mm	Vesihöyrynläpäisykerroin W_p $kg/(m^2 \times s \times Pa)$	Vesihöyrynvastus Z_p $(m^2 \times s \times Pa) / kg$
al-pintainen tiivistyspaperi	0,13	W_p Z_p	$< 1 \times 10^{-13}$ $> 1 \times 10^{-13}$
polyetyleenimuovikelmu	0,15	W_p Z_p	$2,6 \times 10^{-12}$ $0,38 \times 10^{-12}$
höyrynsulkupaperi (UPM)	0,21	W_p Z_p	$9,2 \times 10^{-12}$ $0,11 \times 10^{-12}$
sisäpuolinen tiivistyspaperi (UPM)	0,14	W_p Z_p	14×10^{-12} $0,07 \times 10^{-12}$
sahakääre	0,26	W_p Z_p	18×10^{-12} $0,057 \times 10^{-12}$

Taulukko 2. Höyrynsulkutuotteiden vesihöyrynläpäisyominaisuudet 23 °C lämpötilassa ja 50 % / 0 % suhteellisessa kosteudessa ².

Levytuote	Paksuus d, mm	Vesihöyrynvastus Z_p (25 % R.H.) $(m^2 \times s \times Pa) / kg$	Vesihöyrynvastus Z_p (80 % R.H.) $(m^2 \times s \times Pa) / kg$
havuvaneri	9	14	0,8
havuvaneri	12	18	1,0
huokoinen puukuitulevy, 215 kg/m ³	12	0,3	0,2
puukuitulevy, 610 kg/m ³	12	1,0	0,7
puukuitulevy, 870 kg/m ³	3,4	1,2	0,7
lastulevy, 560 kg/m ³	12	3,4	1,6
kipsilevy, 730 kg/m ³	10	1,8	0,6

Taulukko 3. Eräiden levymäisten rakennustuotteiden höyrynvastuksen arvoja (2). Z_p -arvojen perään on lisättävä kerroin 10⁹.

RAKENNUSLEVYT

Rakennuspaperien ja höyrynsulkutuotteiden ohella tarpeen tuntee myös tavanomaisten rakennuslevyjen ja tuulensuojatuotteiden höyrynvastukset. Taulukossa 3 esitetään joitakin kirjallisuustietoihin perustuvia vesihöyrynvastuksia ^{2/}. Annetut luvut on katsottava ennen muuta suuruusluokkatiedoiksi, sillä tiedot vaihtelevat valmistaja- ja tuote-kohtaisesti sekä valmistusteknisestä syistä aiheutuvan hajonnan takia.

LÄHDELUETTELO

- ^{/1/} Mikael Salonvaara & Erkki Kokko. Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta. VTT Tiedotteita No 1946. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1999. 51 s.
- ^{/2/} Erkki Kokko, Tuomo Ojanen, Mikael Salonvaara, Antti Hukka & Hannu Viitanen. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT Tiedotteita No 1991. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1999. 160 s
- ^{/3/} Carey. J. Simonson. Moisture, Thermal and Ventilation Performance of Tapanila Ecological House. VTT Research notes 2069. Espoo 2000. 141p.
- ^{/4/} Mikael Salonvaara, Carey Simonson ja Erkki Kokko. Rakenteiden ja sisäilman välisen aineensiirron vaikutus sisäilmastoon. Sisäilmastoseminaari 2000. Sisäilmayhdistyksen raportti 14, ss353 – 358.
- ^{/5/} Simonson C. J. and Salonvaara, M. H., Mass transfer between indoor air and a porous building envelope: Part I – Field measurements, Proceedings of Healthy Buildings 2000, vol.3, Espoo, August 6-10. 2000, pp 117 - 122.
- ^{/6/} Salonvaara, M. H. and Simonson, C. J., Mass transfer between indoor air and a porous building envelope: Part II – Validation and numerical studies, Proceedings of Healthy Buildings 2000, vol.3, Espoo, August 6-10. 2000, pp 123 - 128.
- ^{/7/} Simonson, C. J. and Ojanen, T., Moisture performance of buildings with no plastic vapour retarder in cold climates, Proceedings of Healthy Buildings 2000, vol.3, Espoo, August 6-10. 2000, pp 477 - 482.
- ^{/8/} Simonson, Carey J.; Salonvaara, Mikael; Ojanen, Tuomo. Improving indoor climate and comfort with wooden structures. Espoo, VTT Publications 431 VTT Building Technology, 2001.200 s.+ liitt. 91 s. ISBN 951-38-5847-2
- ^{/9/} Sisäilmastoluokitus, versio 4.4. Sisäilmayhdistys. 5.12.2000.
- ^{/10/} Sterling & al. Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings. ASHRAE Transactions 1985, Vol 91, Part 1.
- ^{/11/} Tuomo Ojanen, Erkki Kokko & Marja-Liisa Pallari, Tuulensuojan toimintaperusteet. VTT Tiedotteita 1478. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1993.
- ^{/12/} Tuomo Ojanen, Erkki Kokko, Mikael Salonvaara & Hannu Viitanen, Havuvaneri-rakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. VTT Tiedotteita 1870. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1997.
- ^{/13/} ISO 7730-1994, Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort,
- ^{/14/} ANSI/ASHRAE Standard 55 – 1992, Thermal environmental conditions for human occupancy.
- ^{/15/} Fang, L., Clausen, G. and Fanger, P. O., 1998a, Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality, Indoor Air, 8, 80-90.
- ^{/16/} Fang, L., Clausen, G. and Fanger, P. O., 1998b, Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposures, Indoor Air, 8, 276-284.
- ^{/17/} Ojanen, T., 1998, Improving the drying efficiency of timber frame Walls by using exterior insulation. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII, ASHRAE/DOE/ORNL/BETEC/NRCC/CIBSE Conference, Clearwater Beach, Florida, Pp 155 – 164.
- ^{/18/} KCL Services, Paperin testaus. Testausraportti 6.4.2001 Eltete Oy:n toimeksiannosta.

