

# SISÄILMAN KOSTEUSOLOJEN PARANTAMINEN PUURAKENTEILLA





# **Sisäilman kosteusolojen parantaminen puurakenteilla**

## **Sisäilman kosteusolojen parantaminen puurakenteilla**

Raportin toimitustyö: Erkki Kokko

Taitto: Juhani Keppo

Copyright: Wood Focus Oy, tekijä

Kustantaja: Wood Focus Oy

# **SISÄILMAN KOSTEUSOLOJEN PARANTAMINEN PUURAKENTEILLA**



## Tiivistelmä

Puu ja puupohjaiset rakennusmateriaalit ovat hygroskooppisia aineita, jotka sitovat itseensä ympäröivän ilman vesihöyryä tai luovuttavat sitä takaisin, kun ympäröivän ilman suhteellinen kosteus vaihtelee. Ollessaan vuorovaikutuksessa huoneilman kanssa puulla on huoneilmaan kosteuden puskurivaikutus. Tällä tarkoitetaan puun kosteudensitomiskykyyn perustuvaa huoneilman suhteellisen kosteuden vaihtelun vaimenemista, kun vertailukohtana on sama huonetila, sama huoneen sisäinen ajallisesti vaihteleva kosteuskuormitus ja sama ilmanvaihto, mutta ilman hygroskoopista kosteuden sitoutumista rakenteisiin. Huoneilman kosteus vaikuttaa sekä suoraan että välillisesti sisäilman laatuun. Vaikutukset kohdistuvat lämpöviihtyvyyden tunteeseen, ilman aistinvaraisesti havaittavaan raikkauteen sekä erilaisiin biologisiin, kemiallisiin ja fysikaalisiin tekijöihin, joilla on yhteys hygieniaan ja terveellisuuteen. Suhteellisen kosteuden pitäminen pitkään alueella 30 %...60 % RH on suositeltavaa.

Tavoitteena oli analysoida eri fysikaalisten tekijöiden merkitys kosteuden puskurivaikutuksen kannalta sekä osoittaa sitovasti puskurivaikutuksen esiintyminen sekä kontrolloiduissa laboratorio-oloissa että myös asutuissa rakennuksissa. Lisäksi tavoitteena oli tuottaa menetelmiä ja ohjeita suunnittelijan ja tuotekehityksen tarpeisiin kosteuden puskurivaikutuksen hyödyntämiseksi.

Tutkimusmenetelminä olivat huoneilojen kosteuskäyttäytymisen ja kosteuden puskurivaikutuksen laskennallinen simulointi, materiaalien ja rakenteiden laboratoriokokeet, mittaukset koehuoneissa sekä seurantamittaukset asutuissa pientaloissa. Tutkitut puu- ja puupohjaiset materiaalit sitoivat laboratoriokokeissa runsaasti kosteutta pinnoittamattomina. Kosteuden sitoutuminen puuhun rungon suunnassa oli erityisen suurta. Tutkitut pinnoitteet vähensivät kosteuden sitoutumista, mutta joukossa oli myös hyvin läpäiseviä tuotteita, joiden höyrynvastus käyttöoloissa on pienempi kuin  $1 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa) / kg. Tämä höyrynvastuksen raja-arvo säilyttää puulla vielä noin puolet sen tehollisesta kosteuskapasiteetista ja puskurivaikutuksesta verrattuna pinnoittamattomaan puuhun.

Rakenteiden hygroskooppisuuteen perustuva huoneilman kosteuden puskurivaikutus osoitettiin käytännössä merkittäväksi sekä laskennallisesti että kokeellisesti niin koehuoneessa kuin todellisessa rakennuksessa. Osoitettiin myös, että puskurivaikutuksella on myönteinen vaikutus rakenteiden sisäpintojen kosteusturvallisuuteen ja että puurunkoseinässä

tuulensuojan ominaisuuksilla on olennainen merkitys kosteusturvallisuuteen lämmöneristyksen sisällä. Tuulensuojan lämmönvastuksen suurentaminen ja hygroskooppisuus parantavat kosteusturvallisuutta lisäämällä rakenteen kykyä kuivua ulospäin ja sietää kosteuskuormitusta.

Aineiden ja rakenteiden kosteuden sitomis-kyvyille (tehollinen kosteuskapasiteetti) kehitettiin testausmenetelmä, jota sovellettiin eri rakenteisiin. Tulokset osoittivat, että vesihöyryä hyvin läpäisevän levyn takana oleva hygroskooppinen aine lisää rakenteen tehollista kosteuskapasiteettia. Testituloksille laadittiin luokittelu käytännön suunnittelun tarpeisiin.

Rakenteiden tehollinen kosteuskapasiteetti ja puskurivaikutus huoneilman kosteuteen tulisi sisällyttää käytännön rakenne- ja rakennussuunnitteluun kohteissa, missä huoneilojen kosteuskuormitus vaihtelee jaksottaisesti. Tämä edellyttää kosteuden hallinnan suunnittelumenetelmien ja sisäilman kosteuden kriteereiden ja luokituksen tarkentamista. On mahdollista kehittää uusia tehokkaita rakenneratkaisuja kosteuden puskurointiin ja soveltaa niitä sekä uudis- että korjausrakentamisessa.

# Alkusanat

Projekti ”Lämpö- ja kosteusoloiltaan miellyttävä puutalo” on kansainvälinen tutkimushanke, joka toteutettiin yrityshankkeena ”Terve talo” tutkimusohjelmassa ja jonka rahoittajia olivat suomalaiset yritykset sekä Teknologian kehittämiskeskus TEKES. Rahoitukseen osallistuneita yritysosapuolia olivat: Wood Focus Oy, Tikkurila Paints Oy, Hirsitaloteollisuus ry, Suomen Kuitulevy Oy, Puhosboard Oy, Suomen Selluvilla-Eriste Oy ja Termex-Eriste Oy.

Tämä julkaisu on tarkoitettu henkilöille, jotka toimivat rakennus- ja rakennesuunnittelun, sisustamisen sekä tuotekehityksen tehtävissä. Lähdeluetteloon sisältyvät projektissa tuotetut tutkimusjulkaisut, joissa esitetään saadut tulokset. Tämä yhteenveto sisältää vain keskeisimmät tulokset. Kun lukija haluaa laajempaa ja yksityiskohtaisempaa tietoa jostakin tämän yhteenvedon aiheesta, tietoa voi hankkia asiaa käsittelevästä projektin julkaisusta. Tiedon hakemista helpotetaan viittauksin lähdeluetteloon. Tutkimustulosten ohella julkaisussa esitetään näkökohtia ja johtopäätöksiä, jotka palvelevat tiedon soveltamista käytäntöön. On olemassa selkeä tarve kehittää rakennusratkaisuja sekä rakennus- ja rakennesuunnittelua suuntaan, jossa hygroskooppisten puumateriaalien potentiaali hyödynnetään nykyistä tietoisemmin ja tehokkaammin huoneilman kosteuden hallitsemiseksi. Ratkaisujen kehittäminen voi perustua vain fyysikaalisten ilmiöiden ymmärtämiseen ja sitä kautta tutkimustulosten oikeaan tulkintaan ja soveltamiseen.

Tutkimuksen johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut Keijo Kolu UPM-Puu-

tellisuus. Muita jäseniä ovat olleet Markku Rantama (ohjelmapäällikkö), Maria Tallsten-Lindh Tikkurila Paints Oy, Eino Hekali Hirsitaloteollisuus ry, Jaakko Lehto UPM-Puu-teollisuus, Jan Löfhjelm Suomen Kuitulevy Oy, Sonja Martikainen Finnforest Oy, Jukka Prähl Suomen Selluvilla-Eriste Oy, Keijo Rautiainen Termex-Eriste Oy, Minna Hämläinen Wood Focus Oy, Pekka Tuunanen Puhosboard Oy ja Reijo Louko Ekovilla Oy.

Tutkimus suoritettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen vaiheen suorittaja oli VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Päätökijoina toimivat Erkki Kokko ja Carey Simonson sekä muina tutkijoina Tuomo Ojanen ja Mikael Salonvaara. Tutkimuksen toinen vaihe suoritettiin neljänä osaprojektina. Tutkimuslaitokset, osaprojektien päälliköt ja päätutkijat olivat:

Fraunhofer Institut Bauphysik, Holzkirchen Saksa, Dr-ing. Hartwig Künzel ja Dr-ing Andreas Holm. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka Simo Koponen ja LVI-tekniikan laboratorio Jarek Kurnitski, Miimu Airaksinen sekä Jari Palonen, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Tuomo Ojanen, Mikael Salonvaara.

Projektipäällikkönä toimi Pekka Nurro Wood Focus Oy ja projektin koordinaattorina sekä johtoryhmän sihteerinä Erkki Kokko Rakennusneuvonta Kokko Ky. Tämän yhteenvetoraportin on koonnut Erkki Kokko. Projektiorganisaation puolesta kiitän johtoryhmää ja kaikkia niitä henkilöitä ja tahoja, jotka ovat aktiivisesti vaikuttaneet projektin sisältöön ja toteutumiseen.

Vantaa, marraskuu 2004

Erkki Kokko

# Sisällys

<b>1. Johdanto</b>	7
<b>2. Kosteuden vaikutus huoneilman laatuun</b>	10
2.1 Lämpöviihtyvyys	10
2.2 Aistinvaraisesti havaittava ilman laatu	11
2.3 Ilman kosteuden muita vaikutuksia	13
<b>3. Hygroskooppisten puumateriaalien ja huoneilman kosteuden vuorovaikutus fysikaalisena ilmiönä</b>	13
3.1 Käsitteet ja määritelmät	13
3.2 Kosteuden tuotto huoneilmaan ja huoneilman kosteuden vaihtelu	15
3.3 Puurakenteet huoneilman kosteusvaihtelun tasaajana	16
<b>4. Yhteenveto projektin tutkimustuloksista</b>	20
4.1 Puun ja puumateriaalien kosteustekniset ominaisuudet	20
4.1.1 Tutkimuksen tarkoitus ja koe-menetelmät	20
4.1.2 Koemateriaalit ja niistä valmistetut koekappaleet	22
4.1.3 Tärkeimmät tutkimus- ja koetulokset	22
4.2 Tehollisen kosteuskapasiteetin testausmenetelmä	35
4.3 Huoneilman kosteuden puskurivaikutuksen laskennallinen analyysi	37
4.3.1 Rakennetyypit ja ulkoilmastot	37
4.3.2 Eri tekijöiden vaikutus huoneilman kosteuteen - yhteenveto laskentatuloksista	40
4.4 Huoneilman kosteuden puskurivaikutuksen mittaustuloksia	44
4.4.1 Mittaukset koehuoneessa	44
4.4.2 Tulokset kenttäkohteissa	50
<b>5. Rakenteiden kosteusturvallisuus</b>	51
5.1 Olennainen vaatimus	51
5.2 Tuulensuojan ominaisuudet ja höyrynsulun vaatimukset	52
5.3 Hygroskooppinen puskurivaikutus ja rakenteen sisäpinnan kosteusolot	56
<b>6. Tulosten käytännöllinen merkitys</b>	58
6.1 Rakenne- ja rakennussuunnittelun uusi konsepti	58
6.2 Tehollisen kosteuskapasiteetin rakentamisperiaatteet	59
6.3 Rakenteiden tehollinen kosteuskapasiteetti - luokitteluperiaatteet	60
6.4 Sisäpuolisen pinnoitteen merkitys	62
6.5 Suunnittelun ja tuotekehityksen näkymät	63
LÄHDELUETTELO	64
LIITE 1: Pinnoitteiden vesihöyrynvastukset ja -läpäisykertoimet eri lähteiden mukaan.	66



# 1. Johdanto

Lämpötilan ohella ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa sekä suoraan että välillisesti huoneilman laatuun. Suorat vaikutukset kohdistuvat sekä lämpöihtiisyyteen että aistivaraaisesti havaittavaan huoneilman laatuun (raikkaus / tunkkaisuus). Epäsuorat vaikutukset ilmenevät monin tavoin kuten vaikutuksina virusten, bakteerien, sienien ja pölypunkkien kasvuoloihin, hengitystieinfektioihin, astmaan ja allergisiin reaktioihin sekä rakennus- ja muiden aineiden kemialisiin reaktioihin sekä epäpuhtauksien päästöihin /1,10, 11, 14, 15, 20, 21/. Kosteuden vaikutuksia sisäilman laatuun tarkastellaan tämän julkaisun luvussa 2.

Pohjoisen vyöhykkeen ilmastossa lämpimien huoneiden ilman suhteellinen kosteus on korkeimmillaan kesällä, kun ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus on korkea, ja vastaavasti matalimmillaan talvella. Siirryttäessä etelämmäksi huoneilman suhteellinen kosteus nousee yleisesti pohjoiseen verrattuna ja korkeita suhteellisen kosteuden arvoja saavutetaan myös kylmänä vuodenaikana etenkin, jos ylläpidetään matalahkoa sisälämpötilaa. Tyyppillistä on, ettei huoneilman kosteuspitoisuus ole vakaa ja tasainen, vaan vaihtelee nopeasti ajan funktiona huoneessa tapahtuvan kosteuden tuoton vaihdellessa. Sisäilman kosteuspitoisuus vaihtelee myös rakennuksittain ja niissä huonetiloittain, vaikka huoneiden kosteuskuormitus olisi sama. Tämä johtuu ilmanvaihtomäärien ja huoneiden tilavuuksien eroista sekä rakenteiden ja sisustusratkaisujen hygroskooppisuuteen perustuvan kosteuden sitomiskyvyn ja ilman kosteuden vaihtelua

vaimentavan puskurivaikutuksen eroista. Puskurivaikutusta ja siihen vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan tämän julkaisun luvussa 3.

Huoneilman laadun kriteerit muodostavat hyvät perusteet sille, että ilman lämpötilaa ja kosteutta tulisi voida hallita. Tämä voi tapahtua joko täysin koneellisesti, käyttäen hyväksi rakenteiden ja sisustusten hygroskooppista kosteudensitomiskykyä tai yhdistämällä molempia keinoja sopivasti. Maantieteellisesti laajoilla alueilla, kuten Keski-Euroopassa, koneellinen ilmastointi on kuitenkin harvinaisuus asunnoissa eikä kovin yleinen työpaikoillakaan. Tarve ilman kosteuden hallintaan on kuitenkin olemassa, sillä lämpötila- ja kosteusolot ovat sisätiloissa ajoittain epätyytyttäviä.

Pohjoisen ilmaston rakennus- ja rakennesuunnittelu on perinteisesti ollut varautumista kylmiin oloihin. Ratkaisut ovat energiatehokkaita, mikä sinänsä on hyvä asia. Rakennusten sisäilmaston suunnittelu hallitsee ilman puhtauden ja riittävän talviaikaisen lämpöihtiivyyden saavuttaminen. Kesän lämpöolojen ja huoneilman kosteuden ympärivuotiseen hallintaan ei suunnittelussa juurikaan panosteta. Seurausena on lämpöihtiivyyden ja sisäilman laadun kannalta ajoittain epätyytyttävästi toimivia ratkaisuja.

Siirryttäessä etelämmäksi tarve huoneilman kesäaikaisten lämpöolojen hallintaan kasvaa, mikä ilmenee monin tavoin rakennusten suunnittelussa. Erityisesti vältetään auringon säteilyn aiheuttamaa tarpeetonta lämpökuormitusta sekä pyritään hyödyntämään rakenteiden lämmönvarauskyvyn sisälämpötilaa tasaava vaikutus. Sen sijaan kosteuden hallinta on usein puutteellisesti toteutunut, mikä ilmenee mm. rakennuk-

sen vaipan sisäpintojen paikallisena kondenssina tai haitallisen korkeana suhteellisenä kosteutena pinnan tuntumassa, kun ulkolämpötila on riittävän matala.

Tämän julkaisun luvuissa 4 ja 5 esitetään yhteenveto projektin ”Lämpö- ja kosteusoloiltaan miellyttävä puutalo” tärkeimmistä tuloksista. Projektissa on selvitetty saksalaisten ja suomalaisten tutkijoiden yhteistyönä puun ja puupohjaisten rakennusaineiden hygroskooppisuuden merkitystä huoneilman suhteellisen kosteuden ajallisen vaihtelun vaimentamisen ja rakenteiden kosteusturvallisuuden kannalta. Tutkimusmenetelminä olivat laskennallinen simulointi, laboratorikokeet ja mittaukset koehuoneissa sekä kentällä todellisissa asu-tuissa rakennuksissa. Projekti on toteutettu kahdessa vaiheessa. Vaihe I käsitti laajan laskennallisen selvityksen, jonka tuloksena saatiin teoreettinen tieto eri tekijöiden vaikutuksesta puurakenteiden ja materiaalien puskurivaikutukseen huoneilman kosteuden suhteen neljällä paikkakunnalla Euroopassa. Vaihe II painottui kokeelliseen tutkimukseen tavoitteena laskennallisten tulosten varmentaminen sekä puskurivaikutuksen todentaminen mittauksin myös todellisissa rakennuksissa.

Lähdeluetteloön sisältyvät tässä projektissa tuotetut tutkimusjulkaisut, joissa esitetään saadut tulokset. Tämä yhteenveto sisältää vain keskeisimmät tulokset ja on suunnattu erityisesti rakentamisen ammattilaisille ja tulosten soveltajille teollisuuden tuotekehityksessä. Kun lukija haluaa laajempaa ja yksityiskohtaisempaa tietoa jostakin tämän yhteenvedon aiheesta, voi tietoa hankkia asiaa käsittelevästä projektin julkaisusta. Tiedon hakemista helpotetaan viittauksin lähdeluetteloon. Todettakoon

vielä, että päättynyt projekti on osaltaan vaikuttanut siihen, että alueen kansainvälinen tutkimusaktiiviteetti on lisääntynyt projektin aikana merkittävästi.

Tutkimustulosten ohella julkaisun luvussa 6 esitetään näkökohtia ja johtopäätöksiä, jotka palvelevat tiedon soveltamista käytäntöön. On olemassa selkeä tarve kehittää rakenneratkaisuja sekä rakennus- ja rakennesuunnittelua suuntaan, jossa hygroskooppisten puumateriaalien potentiaali hyödynnetään nykyistä tietoisemmin ja tehokkaammin huoneilman kosteuden hallitsemiseksi. Ratkaisujen kehittäminen voi perustua vain fysikaalisten ilmiöiden ymmärtämiseen ja sitä kautta tutkimustulosten oikeaan tulkintaan ja soveltamiseen.

## 2. Kosteuden vaikutus huoneilman laatuun

### 2.1 Lämpöviihtyvyys

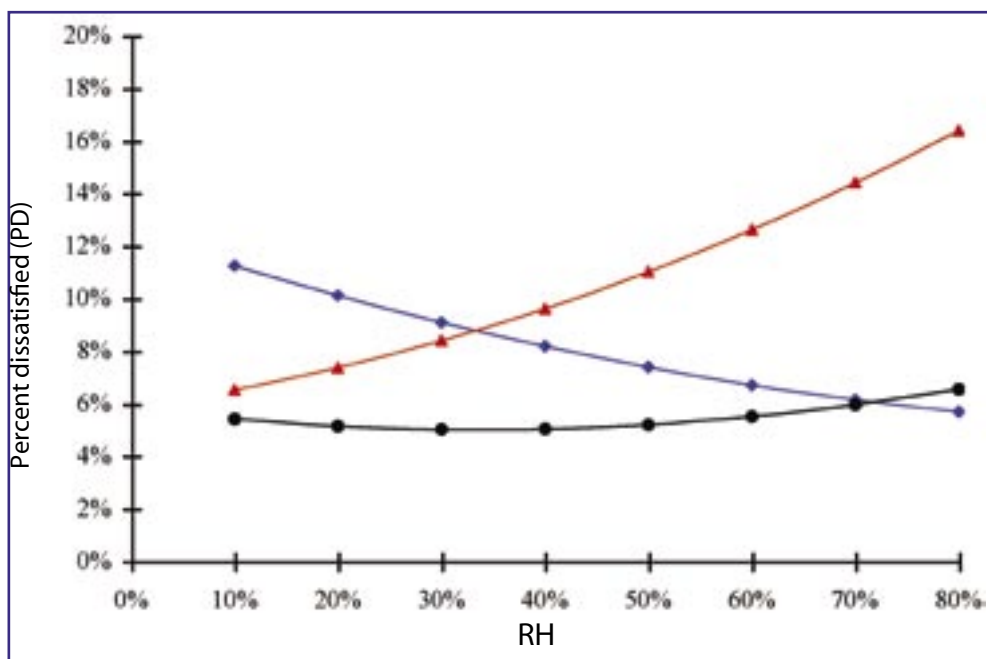
Lämpöviihtyvyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka miellyttävänä tai epämiellyttävänä ihminen aistii välittömän ympäristönsä lämpöolot. Koska ihmiset ovat yksilöitä ja aistimuksiltaan erilaisia, on kehitetty menetelmiä arvioida lämpöviihtyvyyttä aistinvaraisesti suurehkon koehenkilöryhmän tuntemusten perusteella. Viihtyvyyden mittarina on lämpöoloihin tyytymättömien osuus kaikista vastaajista (PD, Percent dissatisfied, %) /1, 20/.

Yleisellä lämpöviihtyvyydellä tarkoitetaan ihmisen kehon lämpötila-aistimuksen miellyttävyyttä tai epämiellyttävyyttä silloin, kun koko keho altistuu tietyssä lämpö- ja kosteustilassa olevalle ilmalle. Ilman lämpötilan, keskimääräisen säteilylämpötilan ja ilman kosteuden lisäksi kehon tuntemuksiin vaikuttavat sekä vaatetus että ihmisen toimintojen aktiviteetti.

Paikallisella lämpöviihtyvyydellä tarkoitetaan ihmisen kehon paikallisen lämpötila-aistimuksen miellyttävyyttä tai epämiellyttävyyttä silloin, kun tämä kehon osa altistuu muusta kehosta poikkeavasti kuumalle, kylmälle tai ilman liikkeelle.

Ilman kosteus vaikuttaa sekä yleiseen että paikalliseen lämpöviihtyvyyteen. Vaikutus yleiseen lämpöviihtyvyyteen on lievä, kun ilman lämpötila on alueella 20... 24 °C (Kuva 1). Tätä korkeammassa lämpötilassa suhteellisen kosteuden nousu lisää tyytymättömien määrää.

Kuva 1. Yleiseen lämpöviihtyvyyteen tyytymättömien osuus (PD) ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihdellessa /1, 20/.



## 2.2 Aistinvaraisesti havaittava ilman laatu

Ilman laadun aistinvaraisella havaitsemisella tarkoitetaan ihmisen tuntemusta siitä, kuinka raikas (puhdas) tai tunkkainen (epäpuhdas) ilma on. Tässäkin arvioinnissa havaintojen tekijät ovat yksilöinä erilaisia, joten kriteerit perustuvat ryhmän antamaan arviointiin (tyytymättömien %-osuus PD). Kuvan 2 mukaan voidaan todeta, että ilman lämpötilalla ja kosteudella on merkittävä vaikutus ilman laadun hyväksyttävyyteen ja tyytymättömien prosentuaaliseen osuuteen /11/:

- Tyytymättömien osuus kasvaa lämpötilan noustessa lämpötila-alueella 20 °C... 30 °C.
- Tyytymättömien osuus kasvaa suhteellisen kosteuden noustessa.
- Suhteellisen kosteuden nousu aiheuttaa tyytymättömien osuuteen nopeamman kasvun lyhytaikaisessa al-

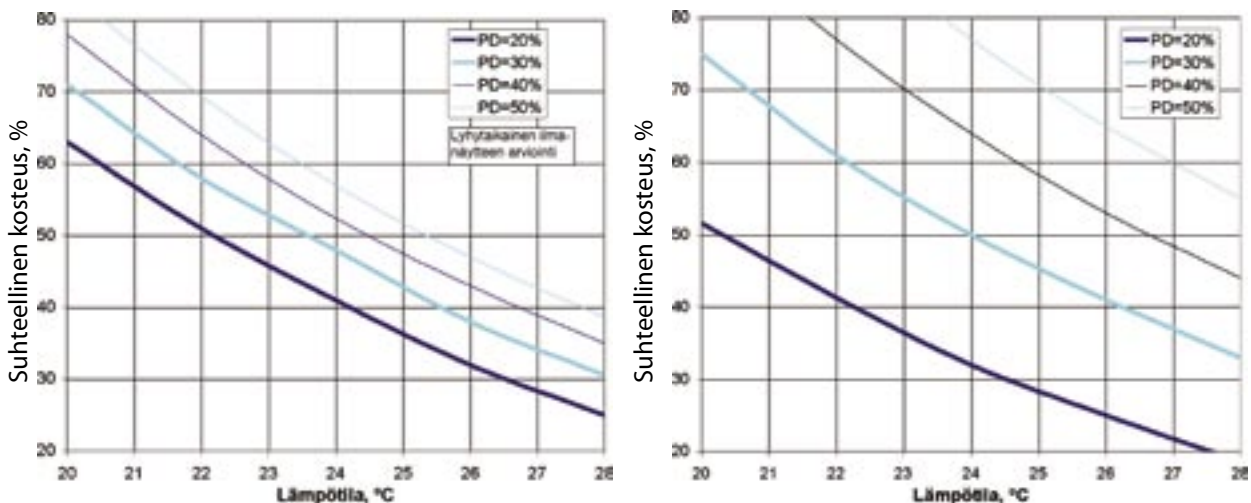
tistumisessa kuin pitkäaikaisessa oleskelussa.

Tanskalaisten tulosten perusteella /1, 10/ voidaan lisäksi todeta seuraavaa:

- Ilman epäpuhtauksien pitoisuuden ollessa vakio alenee ilman laadun hyväksyttävyyden lineaarisesti suhteellisen kosteuden kasvaessa.
- Puhtaan ja epäpuhtauksia sisältävän ilman laadun hyväksyttävyyden alenee ja lähestyy toisiaan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kasvaessa.

Sisäilman lämpötilalla ja kosteuspitoisuudella on voimakas vaikutus ilman laadun hyväksyttävyyteen silloin, kun ihmisen hajuaisti ei ole tottunut ko. oloihin. Koska ihmisen hajuaistimus adoptoituu voimakkaasti ihmisperäisille hajuille, asuinympäristössä lienee aiheellista soveltaa hyväksyttävyyden kriteereitä, jotka perustuvat pitkäaikaiseen oleskeluun.

Kuva 2. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutus ilman laadun hyväksyttävyyteen (PD) pitkäaikaisessa oleskelussa (kuva vasemmalla) ja lyhytaikaisessa altistumisessa (kuva oikealla) /11/.



**Sisäilmastoluokitus 2000 /21/** on tarkoitettu käytettäväksi Suomessa rakennus- ja taloteknisen suunnittelun ja urakoinnin sekä laite- ja materiaalivalmistuksen apuna rakennettaessa entistä terveellisempiä ja viihtyisämpiä rakennuksia. Luokitusta voidaan käyttää uudisrakentamisen lisäksi soveltuvan osin myös korjausrakentamisessa. Luokituksessa on asetettu tavoitearvoja koskien sisäilman laatua ja terveellisyyttä. Luokitus on kolmitasoinen:

#### **Luokka S1: Yksilöllinen sisäilmasto**

Tilan sisäilman laatu on erittäin hyvä ja lämpöolot ovat viihtyisät kesällä ja talvella. Tilan käyttäjä pystyy yksilöllisesti hallitsemaan lämpöoloja ja tarvittaessa parantamaan sisäilman laatua tehostamalla ilmanvaihtoa. Lämpöolot ja ilman laatu täyttävät pääsääntöisesti myös loppukäyttäjien erityisvaatimukset (esim. vanhusväestö, allergikot, hengityselinsairaat, ym.).

#### **Luokka S2: Hyvä sisäilmasto**

Tilan sisäilman laatu on hyvä ja lämpöolot vedottomat. Kesän kuumimpina päivinä lämpötila nousee viihtyisän tason yläpuolelle.

#### **Luokka S3: Tyydyttävä sisäilmasto**

Tilan sisäilman laatu ja lämpöolot täyttävät lainsäädännön tarkoittamat vähimmäisvaatimukset. Ilma saattaa ajoittain tuntua tunkkaiselta ja vedon tunnetta saattaa esiintyä. Ylilämpeneminen on yleistä kuumina kesäpäivinä.

Sisäilmastoluokitus sisältää tavoitearvot sisäilman aistinvaraiselle laadulle seuraavasti /15, 21/:

Sisäilmaluokka	Tyytymättömien osuus % arviointiryhmästä
S1	25
S2	35
S3	50

Kuvasta 2 voidaan todeta, että pitkäaikaisessa oleskelussa huonelämpötilan ollessa 22 °C suhteellisen kosteuden nousu 50 %:sta arvoon 75 % aiheuttaa tyytymättömyyden osuuden nousun noin 25 %:sta arvoon noin 39 %. Tämä merkitsee siirtymistä luokan S1 sisäilman tilanteesta luokan S3 vaatimustasolle. Lyhytaikaisessa altistumisessa tyytymättömien osuus kasvaa suhteellisen kosteuden noustessa vielä nopeammin.

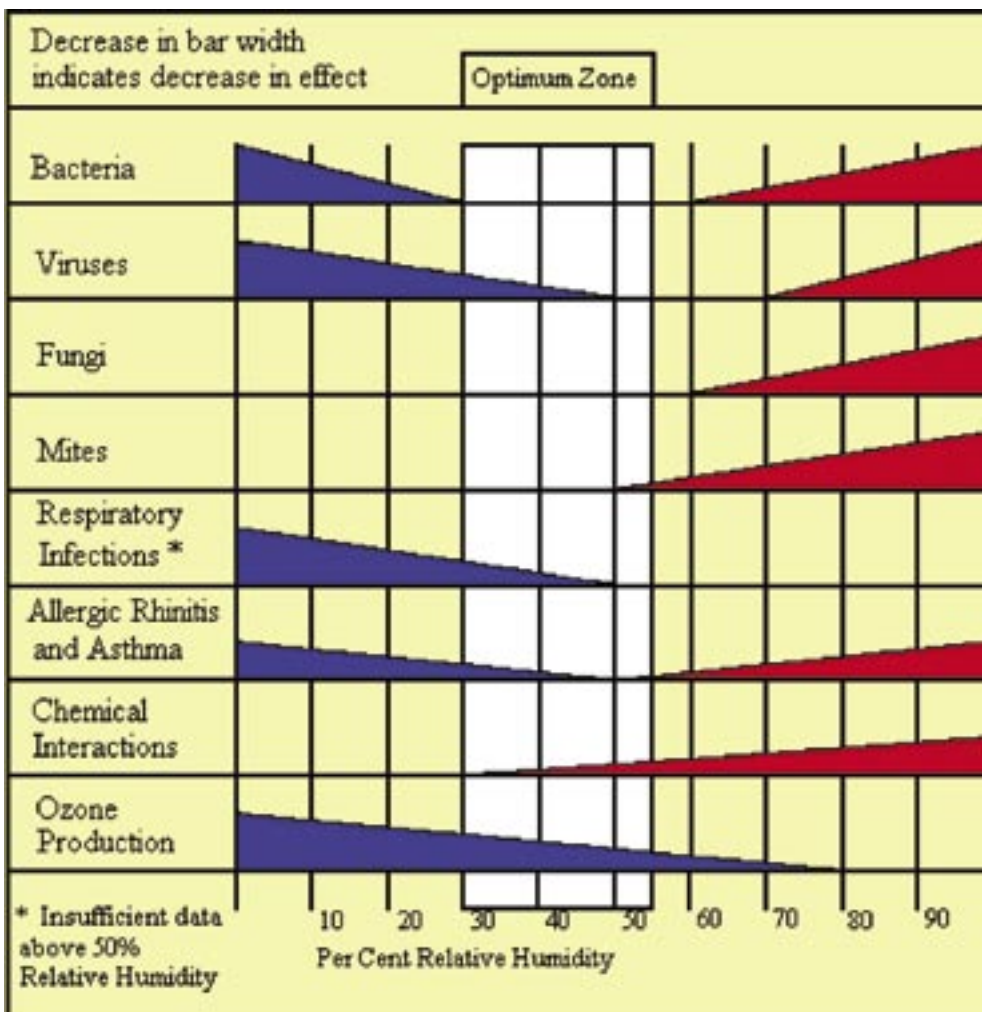


## 2.3 Ilman kosteuden muita vaikutuksia

Huoneilman kosteudella on lämpöviihtyvyyden ja aistinvaraisesti havaittavan laadun lisäksi yhteys lukuisiin muihin parametreihin, joilla on vaikutuksia tilan käyttäjiin. Kuvassa 3 esitetään yhteenveto erilaisista vaikuttavista tekijöistä /1/. Jotkut tekijöistä muuttuvat ongelmallisiksi matalassa suhteellisessa kosteudessa ja vastaavasti toiset korkean suhteellisen kosteuden alueella.

Esim. sienten ja pölypunkkien kasvun estämiseksi sisäilman suhteellisen kosteuden tulisi olla alle 60 % ja hengitystieinfektioiden ehkäisemiseksi vastaavasti yli 28 %.

Kuva 3. Ilman kosteuden vaikutus eräisiin terveyteen ja ilman laatuun vaikuttaviin tekijöihin. Suhteellisen kosteuden suositusalue (kuvassa valkoinen alue) on 28 %...55 % /1/.



# 3. Hygroskooppisten puumateriaalien ja huoneilman kosteuden vuorovaikutus fysikaalisena ilmiönä

## 3.1 Käsitteet ja määritelmät

Rakennusaineiden ja -osien kosteuden ja ilman siirtymistä koskevat suureet esitetään määritelmineen lähteessä /9/. Jäljempänä esitetään eräitä kosteusfysiikan käsitteitä, jotka ovat tarpeen tarkasteltaessa puumateriaalien hygroskooppisuuteen liittyvää huoneilman kosteuden vaihtelua vaimentavaa puskurivaikutusta.

**Kosteus** on yleisnimitys vedelle, joka voi olla jäätä, nestettä, höyryä tai fysikaalisesti aineeseen sitoutunutta kosteutta.

Jäljempänä määriteltävä hygroskooppisesti sitoutunut kosteus on fysikaalisesti sitoutunutta kosteutta.

**Ilman suhteellinen kosteus** tarkoittaa ilman vallitsevan vesihöyrypitoisuuden suhdetta samassa lämpötilassa ja vesihöyryn suhteen kyllästystilassa olevan ilman vesihöyrypitoisuuteen. 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 alenee lämpötilan noustessa tai ilman höyröisällön aletessa.*

**Vesihöyryn osapaineella** tarkoitetaan vesihöyryn osuutta ilman kokonaispaineesta. Yksikkönä on Pa (N/m<sup>2</sup>).

**Vesihöyrynläpäisevyydellä** tarkoitetaan aineen kykyä läpäistä vesihöyryä diffuusiolla. Yksikkönä on kg/(m s Pa).

**Vesihöyryn konvektiolla** tarkoitetaan kaasuseoksen (ilman) sisältämän vesihöyryn liikkumista kaasuseoksen virtauksen mukana.

*Esim. huoneilman vesihöyryä voi siirtyä konvektiolla vaipan vuotorakojen kautta rakenteiden kylmiin osiin ilmavirtauksen mukana.*

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

**Aineen hygroskooppisuus** tarkoittaa aineen kykyä sitoa itseensä ilman vesihöyryä ja 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 alkuperä- 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 ajan funktiona tunnetulla tavalla.

*Tehollisen sorptiokapasiteetin käsite on tarpeen siksi, etteivät rakenteet ja niissä olevat aineet yleensä ehdi saavuttaa tasapainotilan hygroskooppista kosteuspitoisuutta, 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.*

**Kosteuden puskurivaikutuksella** tarkoitetaan huonetilaa rajoittavien hygroskooppisten rakenteiden teholliseen kosteuskapasiteettiin perustuvaa huoneilman kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden vaihtelun vaimenemista, kun vertailu-

kohtana on sama huonetila, sama vaihteleva kosteuskuormitus ja sama ilmanvaihto ilman rakenteiden tehollisen kosteuskapasiteetin vaikutusta.

### **3.2 Kosteuden tuotto huoneilmaan ja huoneilman kosteuden vaihtelu**

Huoneilman kosteuspitoisuus tietynä ajankohtana riippuu useista tekijöistä kuten:

- huoneen ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirrat,
- huoneen tilavuus,
- huoneen sisäinen kosteuden tuotto (kosteuskuormitus),
- ilmanvaihdon tuloilman kosteuspitoisuus (yleensä ulkoilma),
- kosteuden hygroskooppinen sitoutuminen huonetilaa ympäröiviin rakenteisiin ja huoneen sisustusmateriaaleihin ja vapautuminen näistä takaisin huoneilmaan.

Huoneen tilavuutta lukuunottamatta kaikki muut mainitut tekijät ovat tai voivat olla ajallisesti vaihtelevia, minkä seurauksena huoneilman kosteuspitoisuus vaihtelee myös ajallisesti. Lisäksi huoneilman suhteellinen kosteus muuttuu ilman lämpötilan muuttuessa. Huoneen sisäinen kosteuskuormitus tarkoittaa tilan käyttöön liittyviä huoneen sisäisiä vesihöyryä tuottavia prosesseja, joiden seurauksena huoneilmaan siirtyy vesihöyryä.

Huoneen sisäinen kosteuskuormitus toistuu jaksottain yleensä vuorokausirytmillä (esim. makuuhuoneen yöaikainen miehitys). Kuormitusvaiheen aikana ilman kosteuspitoisuus sekä suhteellinen kosteus

nousevat ja vastaavasti kuormituksen päättyessä ilma kuivuu. Voidaan siis puhua kostumis- ja kuivumisjaksoista, joiden pituus ja jaksottuminen määräytyvät huoneen käytön perusteella.

Ilman kyky vastaanottaa vesihöyryä on rajallinen. Tämän havainnollistamiseksi tarkastellaan esimerkkinä suljettua huonetilaa, jonka ilmaa ei vaihdeta ja jossa kaikki tuotettu vesihöyry siirtyy pelkästään huoneilmaan eikä sitoudu hygroskooppisiin aineisiin. Huone on kahden aikuisen makuuhuone, joka on miehittetty 9 h vuorokaudesta yöaikaan. Vesihöyryn tuotto on miehityksen aikana 60 g/h. Huoneen tilavuus on 30 m<sup>3</sup> ja ilman lämpötila on 22 °C. Ilman suhteellinen kosteus on miehityksen alussa 40 %, joka vastaa höyrysisältöä noin 7,9 g/m<sup>3</sup>. Kun 100 % suhteellista kosteutta vastaava höyrysisältö on noin 19,8 g/m<sup>3</sup>, on huoneilmaan tuotettava miehityksen aikana 356 g vesihöyryä kyllästystilan saavuttamiseksi. Aikaa tähän tarvitaan em. vesihöyryn tuotolla lähes 6 tuntia eli yön miehitysaika riittää kyllästystilan saavuttamiseen.

Esimerkkilaskelma havainnollistaa sen, että huoneilman suhteellisen kosteuden pitäminen halutulla alueella edellyttää käytännössä säännönmukaisesti liian kosteuden poistamista. Tämä tapahtuu sekä ilmaa vaihtamalla että sitomalla vesihöyryä tilapäisesti huoneilman kanssa vuorovaikutuksessa oleviin hygroskooppisiin aineisiin (kosteuden puskurivaikutus). Huoneilman kosteusvaihtelun kannalta voidaan saavuttaa tyydyttävä tilanne ilman puskurivaikutustakin, kun ilmanvaihto suunnitellaan oikein ja se toimii suunnitellulla tavalla. Nopeisiin vuorokausirytmien kosteusvaihteluihin puskurivaikutus on kuitenkin tehokas, vaikutukseltaan ilmanvaihtoon verrattavisi-

sa oleva tekijä, joka tukee ilmanvaihdon toimintaa.

### 3.3 Puurakenteet huoneilman kosteusvaihtelun tasaajana

Huoneilman kanssa vuorovaikutteisen hygroskooppisen aineen ja rakenteen aiheuttamalla kosteuden puskurivaikutuksella tarkoitetaan huoneilman kosteuden vaihtelun vaimentumista, mikä perustuu aineen ja rakenteen kykyyn vastaanottaa ja luovuttaa vesihöyryä. Ts. merkittävä puskurivaikutus perustuu aineen ja rakenteen suureen teholliseen kosteuskapasiteettiin huoneilman vesihöyryn suhteen. Aineen ja rakenteen tehollisen kosteuskapasiteetin suuruus riippuu ennen muuta neljästä päätekijästä:

- aineen hygroskooppisuudesta eli tasapainokosteudesta ja sitä kuvaavan sorptiokäyrän muodosta,
- aineen vesihöyrynläpäisevyydestä,
- hygroskooppisen aineen ja huoneilman kosketuspinta-alan suuruudesta ja
- hygroskooppisen aineen pintakäsittelyn höyrynvastuksesta.

Hygroskooppisen aineen ja rakenteen tehollinen kosteuskapasiteetti kasvaa, kun:

- aineen hygroskooppinen tasapainokosteus on suuri ja muuttuu jyrkästi suhteellisen kosteuden funktiona sen laajalla alueella,
- hygroskooppisen aineen vesihöyrynläpäisevyys kasvaa,
- hygroskooppisen aineen ja huoneilman kosketuspinta-ala kasvaa ja
- rakenteen sisäpuolisen pintakäsittelyn höyrynvastus on pieni.

## Hygroσκοoppisuus

Puu ja puupohjaiset rakennusaineet ja tuotteet kuten vaneri, lastulevy, puukuitulevy, puukuitueriste jne. ovat hygroskooppisia aineita, jotka pystyvät sitomaan itseensä vesihöyryä ympäröivästä ilmasta. Hygroskooppisuutta kuvataan tasapainokosteuskäyrillä (adsorptiokäyrä kostumissuuntaan ja desorptiokäyrä kuivumissuuntaan), jotka ilmaisevat aineen tasapainokosteuden ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden funktiona tietyssä lämpötilassa.

Suomalaiselle havupuulle on ominaista, että adsorptio- ja desorptiokäyrä on nouseva suhteellisen kosteuden koko alueella 0...100 % ja jyrkästi nouseva suuren suhteellisen kosteuden alueella. Tällainen käyrän muoto on hygroskooppisuuteen liittyvän puskurivaikutuksen kannalta edullinen, koska materiaali voi sitoa ja luovuttaa runsaasti vesihöyryä suhteellisen kosteuden laajalla vaihtelualueella. Käyrien poikkeaminen toisistaan aiheutuu ns. hysteresis-ilmiöstä.

## Vesihöyrynläpäisevyys

Mänty- ja kuusipuun vesihöyrynläpäisevyys on rungon suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa verraten pieni, suuruusluokkaa  $2...3 \cdot 10^{-12}$  kg / (m s Pa). Tämä merkitsee sitä, että vain ohut pintakerros puusta (suuruusluokkaa 1...2 mm) osallistuu vuorokausirytmien tehollisen kosteuskapasiteetin muodostamiseen. Saavutettava tehollinen kosteuskapasiteetti on kuitenkin käytännössä merkittävä, mikä johtuu puun suuresta hygroskooppisuudesta ja tiheydestä ( $400...450$  kg/m<sup>3</sup>).

Männyn ja kuusen vesihöyrynläpäisevyys on rungon suuntaan enemmän kuin kertaluokkaa edellä mainittua suurempi. Näin ollen vuorokausirytmien tehollinen kosteuskapasiteetti ja vastaava aktiivisen pintakerroksen paksuus ovat rungon suunnassa moninkertaiset verrattuna runkoa vastaan kohtisuoraan suuntaan.

Suomalaisen havuvanerin ja lastulevyn höyrynläpäisevyys on suuruusluokkaa  $1...2 \cdot 10^{-12}$  kg / (m s Pa). Tämä tarkoittaa vuorokautisen tehollisen kosteuskapasiteetin kannalta sitä, että näillä tuotteilla on mahdollista saavuttaa käytännössä merkittävä puskurivaikutus, joka perustuu ohuen aktiivisen pintakerroksen suureen hygroskooppisuuteen ja tiheyteen.

Huokoisen puukuitulevyn vesihöyrynläpäisevyys on suuruusluokkaa  $2...3 \cdot 10^{-11}$  kg / (m s Pa), mikä on kertaluokkaa suurempi kuin puun runkoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Täten vuorokausirytmien tehollinen kosteuskapasiteetti perustuu puuhun verrattuna paksuun kerrokseen (esim. 12 mm levy koko paksuudelta). Sorptiokäyrän muoto on edullinen, mutta tiheys on puuta pienempi.

Täysin avohuokoisen puukuitulämmöneristeen (tiheys  $30...60$  kg/m<sup>3</sup>) vesihöyrynläpäisevyys on suuri,  $5...10 \cdot 10^{-11}$  kg / (m s Pa). Tällaisen tuotteen vuorokausirytmien tehollinen kosteuskapasiteetti perustuu eristeen suureen hygroskooppisuuteen ja paksuhkoon aktiiviseen pintakerrokseen (n. 30 mm). Eriste on kuitenkin normaalisti rakenteissa sisäverhouksen takana ja voi tällöin osallistua teholliseen kosteuskapasiteetin muodostamiseen vain, jos sisäverhouks on vesihöyryä läpäisevä. Käytettäessä tällaista ratkaisua rakennuksen vaipassa, on hyvä noudattaa tämän raportin kohdassa



5.2 esitettyjä periaatteita rakenteiden kosteusturvallisuuteen liittyvissä kysymyksissä. Väliseinissä ja välipohjissa voidaan käyttää vaipan rakenteista poikkeavia ratkaisuja.

Kaikkien edellä mainittujen tuotteiden vesihöyrynläpäisevyydet kasvavat suhteellisen kosteuden noustessa erityisesti korkean suhteellisen kosteuden alueella. Esim. havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys on noin 20-kertainen 90 % suhteellisessa kosteudessa verrattuna vastaavaan arvoon alle 50 % suhteellisessa kosteudessa.

### **Huoneilman ja hygroskooppisen aineen kosketuspinta-ala**

Normaalisti huoneilman ja hygroskooppisen aineen potentiaalisena kosketuspinta-ala toimivat seinien ja katon sisäpinnat. Näiden hyödyntäminen mahdollisimman täysimääräisesti kasvattaa puskurivaikutuksen tehokkuutta. Pelkkä kattopinta on jo verraten tehokas, mutta puskurivaikutus putoaa edelliseen verrattuna likimain puoleen.

Hygroskooppisen aineen ja huoneilman välistä kosketuspintaa voidaan lisätä myös rakenteellisin keinoin kuten vaikuttamalla:

- hygroskooppisen aineen pinnan muotoon pinta-ala lisäävästi,
- sallimalla huoneilman vapaa kierto hygroskooppisessa rakenteessa olevan ilmvälän kautta,
- käsittelemällä verhoukerroksen puuta siten, että hyödynnetään normaalia paremmin rungon suuntainen suuri vesihöyrynläpäisevyys jne.

On mahdollista kehittää ja tunnistaa rakenneratkaisuja, joissa suhteellisen pienellä

pinta-alalla saadaan tavoiteltu puskurivaikutus, jolloin sisustusratkaisujen suunnitteluun saadaan lisää vapausasteita. Voidaan ajatella jopa kokonaan uusia tuotteita rakennuksen sisäilmastosuunnitteluun, kuten passiivinen kosteus- ja lämpövaraaja huoneilman kosteuden ja lämpötilan pitämiseksi tasaisempaan - kaikki tämä yhdistettynä tilojen sisustus- ja huonetilasuunnitelmaan.

### **Sisäpuolisen pintakäsittelyn höyrynvastus**

Hygroskooppisten aineiden ja rakenteiden huoneilmaa vasten olevan sisäpinnan pintakäsittely (maali, lakka, tapetti jne.) on puskurivaikutuksen kannalta kriittinen yksityiskohta. Pinnoitteen suuri höyrynvastus, joka estää kosteusteknisen vuorovaikutuksen huoneilman ja rakenteen välillä, tuhoaa tavoitellun puskurivaikutuksen. Tällöin ilmanvaihto jää ainoaksi keinoksi sisäilman kosteuden hallintaan, ellei kosteuden tuottoa ryhdytä säännöstelemään tai ilmaa kuivattamaan.

Suuri joukko markkinoilla olevista pintakäsittelyratkaisuista on kohtuullisesti vesihöyryä läpäiseviä, mutta ne muodostavat kuitenkin ”jarrun”, jolla leikataan puskurivaikutusta merkittävästi. Rakenteelle jää siten jonkinlainen tehollinen kosteuskapasiteetti, mutta se voisi olla rakennusaineiden ominaisuuksien perusteella selvästi suurempi. Pahimmassa tapauksessa suunnitellussa asetetun tavoitteen saavuttaminen voidaan vesittää lähes merkityksettömäksi.

Jotkut markkinoilla olevat pintakäsittelyt ovat vesihöyryä hyvin läpäiseviä ja sellaisenaan soveltuvia puskurivaikutuksen

säilyttäväksi pinnoitusratkaisuksi. On kuitenkin selvää, että tietoisuus pintakäsittelyn kriittisyydestä ja sopivista pintakäsittelyratkaisuista ei ole rakennusten suunnittelijoiden ja käyttäjien keskuudessa riittävää. Näin voidaan päätellä myös tämän projektin tulosten perusteella. Kun kehitetään kosteuden puskurivaikutuksen omaavia rakentamisen ja sisustamisen konsepteja ja rakenneratkaisuja, on kysymys pintakäsittelyistä ratkaistava samassa yhteydessä. Tämä johtanee myös pinnoitusratkaisujen tuotekehitykseen.

# 4. Yhteenveto projektin tutkimustuloksista

## 4.1 Puun ja puumateriaalien kosteustekniset ominaisuudet /6, 8/

### 4.1.1 Tutkimuksen tarkoitus ja koemenetelmät

Puumateriaalien ja pinnoitettujen materiaaliyhdistelmien tutkimuksen tarkoituksena oli määrittää kokeellisia tuloksia ja kerätä kirjallisuudesta tietoa sekä puumateriaalien että niiden pinnoitteiden kosteusfysikaalisista ominaisuuksista. Kiinnostuksen kohteina olivat erityisesti teholliseen kosteuskapasiteettiin vaikuttavat ominaisuudet, jotka ovat:

- Materiaalien vesihöyrynläpäisevyydet ja ainekerrosten vesihöyrynvastukset.
- Hygroskoopisten materiaalien sorptiokapasiteetti ja vesihöyryn sitoutumisen sekä vapautumisen nopeus suhteellisen kosteuden muutostilan teissa.
- Hygroskoopisen kosteuden määrällinen sitoutuminen ja vapautuminen vuorokausisyklillä vaihtelevassa kosteuskuormitustilanteessa.

Jäljempänä kuvataan lyhyesti käytetyt koemenetelmät. Koeolot valittiin silmällä pitäen käytännön huonetilojen kosteusoloja. Tämä lisää tulosten käytännöllistä merkitystä sillä kaikki edellämainitut materiaaliominaisuudet riippuvat voimakkaasti kosteusoloista.

### Vesihöyrynvastuksen ( $Z_p$ ) ja diffuusiokertoimen ( $D$ ) määritykset jatkuvuustilassa kuppikokein

Kuppikokeessa koekappale oli mittausastias- tiassa olevan ilman ja ympäristön ilman välissä. Suhteellinen kosteus mittausastian sisällä ja ympärillä pidettiin vakiona taulukon 1 mukaisissa arvoissa.

Taulukko 1. Kuppikokeiden koelosuhteet

Suhteellinen kosteus, R.H., % Kupissa	Ympäristössä	Lämpötila T, °C
43...44	25	22
43...44	63	24...26
43...44	65	21
75,5	25	22
75,5	44	21
75,5	65	22

### Vesihöyryn sorptiokokeet

Sorptiokokeet suoritettiin säähuoneissa ja sääkaapissa hyödyntäen taulukon 1 "ympäristön" oloja. Koekappaleet ilmastoitiin ensin yhdessä vakioilmastossa tasapainotilaan. Tämän jälkeen ne siirrettiin toiseen vakioilmastoon koejakson ajaksi, jolloin koekappaleiden painon muutosta seurattiin punnitukseen. Koeolot esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Koetta edeltäneen ilmastoinnin ja kokeen aikaiset olot sorptiokokeissa.

Suhteellinen kosteus, R.H., % edeltänyt ilmastointi	koekausi	Lämpötila T, °C
22...24	42...45	23
43...45	63...65	22...23
63...65	42...45	20...24

### **Vesihöyryn sorptiokokeet syklisesti vaihtelevissa oloissa**

Suhteellista kosteutta vaihdeltiin kokeissa syklisesti vuorokausirytmillä. Etukäteen vakio-oloissa ilmastoidut koekappaleet olivat 8 tuntia korkeammassa ja 16 tuntia matalammassa suhteellisessa kosteudessa. Kokeet suoritettiin samoilla koekappaleilla kuin edellä sorptiokokeet käyttäen taulukon 2 sallimia suhteellisen kosteuden vaihtelumahdollisuuksia.

Kaikki koemenetelmät kuvataan yksityiskohtaisesti lähteessä /6/.

#### **4.1.2 Koemateriaalit ja niistä valmistetut koekappaleet**

Tutkitut puumateriaalit olivat 12 mm paksuinen kuusi- ja mäntypaneli. Kuusen ominaisuuksia mitattiin sekä rungon kasvusuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa että rungon suunnassa (jäljempänä poikki- ja pituussuunta). Männyn mittaustulokset suoritettiin rungon pituussuunnassa. Kokeiden puumateriaalit ja materiaaliyhdistelmät olivat:

- pinnoittamaton kuusi poikkisuuntaan, keskitiheys  $425 \text{ kg/m}^3$  ja tiheyden vaihteluväli  $334\text{...}539 \text{ kg/m}^3$ , standardipoikkeama  $44 \text{ kg/m}^3$

- pinnoittamaton kuusi pituussuuntaan
- pinnoittamaton mänty pituussuuntaan
- kuusi poikkisuuntaan + Paneeli-Ässä
- kuusi poikkisuuntaan + Jalo himmeälakka
- kuusi poikkisuuntaan + Novaplast 2
- kuusi poikkisuuntaan + Novaplast 7
- kuusi poikkisuuntaan + Osmo Color
- mänty pituussuuntaan + Osmo Color
- lastulevy P2 pinnoittamaton
- lastulevy P5 pinnoittamaton
- lastulevy Seinä Wilhelmi + palosuojamaali
- puukuitulevy 9 mm pinnoittamaton
- puukuitulevy Huokoleijona 22 mm pinnoittamaton
- puukuitulevy Lämpöleijona 22 mm + palonsuojamaali

Kun tuotteen vastakkaisten pintojen ominaisuudet poikkesivat toisistaan tehtiin sekä sorptiokoe että syklinen sorptiokoe kummankin pinnan puolelle erikseen.

Taulukossa 3 esitetään yksityiskohtaisemmat tiedot kuusen koekappaleista ja pinnoitteista, taulukossa 4 männyn koekappaleista, taulukossa 5 lastulevyjen koekappaleista ja taulukossa 6 puukuitulevyn koekappaleista.

Taulukko 3. Kuusen koekappaleiden eri pinnoitteet kuppi- ja sorptiokokeissa.

Pinnoite	Pinnoitteen levitystapa	Pinnoitekerroksen paksuus, $\mu\text{m}$	Koekappaleiden numero
Paneeli-Ässä ph	sively	40	1, 6, 15, 22
Jalo Himmeälakka	sively	60	2, 7, 16, 23
Novaplast 7	Mohair tela	100	3, 8, 17, 24
Novaplast 2	Mohair tela	110	4, 9, 18, 25
Pinnoittamaton	-	-	5, 10, 19, 26
Pinnoittamaton	-	-	11, 13, 14, 20, 21
Osmo Color 1)	Kertaalleen sively	ei määritetty	12, 27, 28, 29
Pinnoittamaton	-	-	21

1) Vain sorptiokokeessa.

Taulukko 4. Syklisessä sorptiokokeessa käytetyt männyn pituussuuntaiset koekappaleet.

Pinnoite	Pinnoitteen levitystapa	Pinnoitekerroksen paksuus, $\mu\text{m}$	Koekappaleiden numero
Osmo Color	Kertaalleen sively	ei määritetty	1
Pinnoittamaton	-	-	2

Taulukko 5. Lastulevyn koekappaleet.

Lastulevyn tyyppi	Levyn paksuus, mm	Levyn tiheys, $\text{kg} / \text{m}^3$	Pinnoite
P2	11	730	Pinnoittamaton
P5	12	746	Pinnoittamaton
Seinä Wilhelmi (SW)	12	720	Toinen pinta palosuojamaalattu

Taulukko 6. Puukuitulevyn koekappaleet.

Levyn tyyppi	Levyn paksuus, mm	Levyn tiheys, $\text{kg} / \text{m}^3$	Pinnoite
Rakennelevy	9	744	Pinnoittamaton
Huokoleijona	22	300	Pinnoittamaton
Lämpöleijona	22	300	Toinen pinta palosuojamaalattu



### 4.1.3 Tärkeimmät tutkimus- ja koetulokset

#### Kuppikokeet

Taulukossa 7 esitetään pinnoittamattoman ja eri tavoin pinnoitetun kuusipuun tulokset höyryvirran suunnan ollessa poikisuuntaan. Tuloksina esitetään kokonaishöyrynvastus ( $Z_{P,tot}$ ) kaikille koekappaleille, erikseen pinnoitteille ( $Z_{P,pinnoite}$ ) sekä diffuusiokerroin ( $D_p$ ) pinnoittamattomien koekappaleiden puumateriaalille.

Tuloksien tarkastelussa on otettava huomioon, että pinnoitteiden höyrynvastuksen laskeminen pinnoitetun ja pinnoittamattoman koekappaleen mitatun höyrynvastusten erotuksena on epätarkkaa. Syynä on puun diffuusiokertoimen riippuvuus kosteuspitoisuudesta, pinnoitteen vaikutus puun kosteuspitoisuuteen sekä puukoekappaleiden yksilölliset tiheys- ja muut erot. Täten taulukossa 7 pinnoitteen höyrynvastuksen arvot ovat verraten epätarkkoja erityisesti, kun pinnoitteen höyrynvastus on puunäytteeseen verrattuna pieni. Lukuarvoilla on kuitenkin merkitystä arvioitaessa pinnoitteiden soveltuvuutta puun tehollisen kosteuskapasiteetin säilyttämiseen.

Tutkituista pinnoitteista Novaplast 2 on höyrynvastukseltaan pienin - kaikki höyrynvastuksen arvot ovat alle  $1 \times 10^9$  ( $m^2 \text{ s Pa}$ )/kg eikä usealla koekappaleella pinnoitteen aiheuttamaa lisäystä puun höyrynvastukseen kyetty edes havaitsemaan. Höyrynvastuksen mittaustulosten keskiarvo oli  $0,26 \times 10^9$  ( $m^2 \text{ s Pa}$ )/kg, joten Novaplast 2 ei juurikaan vaimenna puun tehollista kosteuskapasiteettia (kuva 12). Testauksen kosteusolojen vaihtelu alueella 25 %...75 % ei

vaikuttanut havaittavasti tuloksiin (taulukko 7).

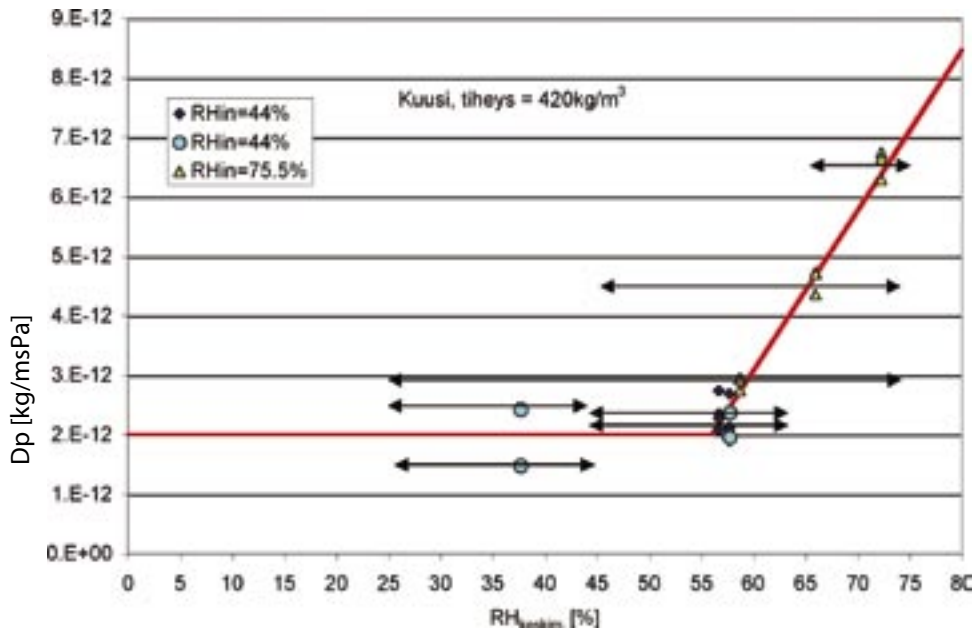
Paneeli-Ässä ph:n keskimääräinen höyrynvastus oli  $1,8 \times 10^9$  ( $m^2 \text{ s Pa}$ )/kg, mikä oli tutkituista pinnoitteista toiseksi pienin. Yksittäisten koekappaleiden mitattu höyrynvastus vaihteli alueella  $0,57...2,9 \times 10^9$  ( $m^2 \text{ s Pa}$ )/kg, mistä päätellen siveltimellä on vaikea aikaansaada tasaisesti haluttua höyrynvastusta. Pienimmät mittaustulokset olivat alueella, jossa puun tehollisen kosteuskapasiteetin vaimentuminen jäi pieneksi, mutta keskimäärin menetettiin tehollisesta kosteuskapasiteetista noin 60 % (kuva 12).

Novaplast 7 vaimensi puun tehollisesta kosteuskapasiteetista keskimäärin noin 70 % ja Jalo Himmeälakka noin 90 %.

Taulukko 7. Kuusen koekappaleiden tulokset vesihöyryn siirtyessä runkoon nähden poikkisuuntaan /6/.

Koekappale Nro:	Pinnoite	Koe Nro	RHin [%]	RHout [%]	t [C]	Zp, tot [m <sup>2</sup> sPa/kg]	Dp [kg/msPa]	Zp, pinnoite [m <sup>2</sup> sPa/kg]
1	Paneeli-Ässä ph	1	44	63	25.5	7.47E+09	-	2.91E+09
2	Jalo Himmeälakka					1.22E+10	-	7.65E+09
3	Novaplast 7					7.51E+09	-	2.95E+09
4	Novaplast 2					5.13E+09	2.48E-12	5.70E+08
5	Pinnoittamaton					4.56E+09	2.74E-12	-
6	Paneeli-Ässä ph					6.53E+09	-	5.72E+08
7	Jalo Himmeälakka					1.18E+10	-	5.82E+09
8	Novaplast 7					8.05E+09	-	2.09E+09
9	Novaplast 2					5.56E+09	2.25E-12	0.00E+00
10	Pinnoittamaton					5.96E+09	2.04E-12	-
1	Paneeli-Ässä ph	2	44	64.5	20.6	7.10E+09	-	2.78E+09
2	Jalo Himmeälakka					1.18E+10	-	7.50E+09
3	Novaplast 7					7.06E+09	-	2.73E+09
4	Novaplast 2					4.87E+09	2.61E-12	5.44E+08
5	Pinnoittamaton					4.32E+09	2.88E-12	-
6	Paneeli-Ässä ph					6.34E+09	-	6.50E+08
7	Jalo Himmeälakka					1.17E+10	-	6.01E+09
8	Novaplast 7					7.78E+09	-	2.08E+09
9	Novaplast 2					5.30E+09	2.36E-12	0.00E+00
10	Pinnoittamaton					5.69E+09	2.14E-12	-
15	Paneeli-Ässä ph	3	44	25	22	8.71E+09	-	2.17E+09
16	Jalo Himmeälakka					1.13E+10	-	4.72E+09
17	Novaplast 7					9.93E+09	-	3.38E+09
18	Novaplast 2					6.54E+09	1.95E-12	0.00E+00
19	Pinnoittamaton					9.49E+09	1.28E-12	-
15	Paneeli-Ässä ph	4	44	64.6	21.3	8.04E+09	-	8.71E+08
16	Jalo Himmeälakka					1.24E+10	-	5.20E+09
17	Novaplast 7					9.00E+09	-	1.83E+09
18	Novaplast 2					6.70E+09	1.90E-12	0.00E+00
19	Pinnoittamaton					7.17E+09	1.70E-12	-
22	Paneeli-Ässä ph	5	75.5	25	22	5.91E+09	-	2.39E+09
23	Jalo Himmeälakka					9.50E+09	-	5.98E+09
24	Novaplast 7					5.41E+09	-	1.90E+09
25	Novaplast 2					3.78E+09	3.32E-12	2.65E+08
26	Pinnoittamaton					3.52E+09	3.45E-12	-
14	Pinnoittamaton					4.24E+09	2.88E-12	-
22	Paneeli-Ässä ph	6	75.5	65.7	21.2	2.95E+09	-	1.42E+09
23	Jalo Himmeälakka					5.52E+09	-	3.98E+09
24	Novaplast 7					2.78E+09	-	1.25E+09
25	Novaplast 2					1.67E+09	7.52E-12	1.35E+08
26	Pinnoittamaton					1.54E+09	7.92E-12	-
14	Pinnoittamaton					1.86E+09	6.59E-12	-
22	Paneeli-Ässä ph	7	75.5	46.8	20.4	4.06E+09	-	2.52E+09
23	Jalo Himmeälakka					8.00E+09	-	6.46E+09
24	Novaplast 7					4.09E+09	-	2.56E+09
25	Novaplast 2					2.36E+09	5.33E-12	8.21E+08
26	Pinnoittamaton					2.21E+09	5.49E-12	-
14	Pinnoittamaton					2.65E+09	4.62E-12	-

Kuva 4. Kuusipuun vesihöyryn diffuusiokerroin rungon poikkisuunnassa, kun muuttujana on koekappaleiden korjattu keskimääräinen suhteellinen kosteus koeloissa /6/.



Kuvassa 4 esitetään eri kosteusoloissa suoritettuihin mittauksiin perustuen kuusipuun vesihöyryn diffuusiokerroin rungon poikkisuunnassa. Alkuperäiset mittaustulokset on muunnettu laskennallisesti vastaamaan puun tiheyttä 420 kg / m<sup>3</sup>. Kuvassa RH<sub>keskim.</sub> tarkoittaa koeloiden perusteella määritettyä koetilanteen suhteellisen kosteuden korjattua keskiarvoa.

Kuusen diffuusiokerroin poikkisuuntaan voidaan laskea seuraavasti:

$$D_p = 2,0 \times 10^{-12} \text{ kg / (m s Pa)}, \text{ kun suhteellinen kosteus } RH \leq 56 \%, \text{ ja}$$

$$D_p = 2,71 \times 10^{-13} \Delta R.H. - 1,31 \times 10^{-11} \text{ kg / (m s Pa)}, \text{ kun suhteellinen kosteus } RH > 56 \%.$$

Taulukossa 8 esitetään puukuitulevyjen ja taulukossa 9 lastulevyjen tulokset

Taulukko 8. Puukuitulevyjen tulokset; kokonaishöyrynvastukset ( $Z_{p, tot}$ ) kaikille koekappaleille sekä erikseen pinnoitteille ( $Z_{p, pinnoite}$ ) ja diffuusiokerroin ( $D_p$ ) pinnoittamattomille koekappaleille /6/.

	Kuitulevytyyppi	RHin [%]	RHout [%]	t [°C]	d [mm]	$D_p$ [kg/msPa]	$Z_{p, tot}$ [m <sup>2</sup> sPa/kg]	$Z_{p, pinnoite}$ [m <sup>2</sup> sPa/kg]
1	9 mm Seinälevy	44	65	22.8	8.96	3.05E-12	2.94E+09	
2					8.98	2.97E-12	3.02E+09	
4	22mm Lämpöleijona, palonsuojamaali				21.19	2.17E-11	9.76E+08	1.49E+08
5					21.43	2.22E-11	9.67E+08	1.10E+08
6	22mm Huokoleijona				22.51	2.62E-11	8.58E+08	
7					22.6	2.73E-11	8.27E+08	

Puukuitulevyjen diffuusiokertoimet ja höyrynvastukset mitattiin oloissa 44 % / 65 %. 9 mm paksun, tiheydeltään 744 kg/m<sup>3</sup> olevan levyn diffuusiokerroin oli  $3 \times 10^{-12}$  kg/(m s Pa) ja 22 mm paksun Huokoleijonan (tiheys 300 kg/m<sup>3</sup>) oli lähes kymmenkertainen ( $27 \times 10^{-12}$  kg/(m s Pa)). Lämpöleijonan palonsuojamaalin höyrynvastus oli n.  $1,3 \times 10^8$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg, joten maalikerros oli erittäin hyvin vesihöyryä läpäisevä eikä juurikaan vaimenna Lämpöleijonan tehollista kosteuskapasiteettia.

Lastulevyn diffuusiokerroin on samaa suuruusluokkaa kuin kuusen poikkisuuntaan ja diffuusiokerroin kasvaa voimakkaasti korkean suhteellisen kosteuden alueella. Seinä Wilhelmin palonsuojapinnoite on höyrynvastukseltaan liian tiivis levyn tehollisen kosteuskapasiteetin hyödyntämiseksi.

Taulukko 9. Lastulevyjen tulokset; kokonaishöyrynvastukset ( $Z_{p, tot}$ ) kaikille koekappaleille sekä erikseen pinnoitteille ( $Z_{p, pinnoite}$ ) ja diffuusiokerroin ( $D_p$ ) pinnoittamattomille koekappaleille /6/.

	Lastulevytyyppi	RHin [%]	RHout [%]	t [°C]	d [mm]	$D_p$ [kg/msPa]	$Z_{p, tot}$ [m <sup>2</sup> sPa/kg]	$Z_{p, pinnoite}$ [m <sup>2</sup> sPa/kg]
1	P2	43	68	25,5		1,65E-12	6,67E+9	
2	Seinä Wilhelmi				1,09E-12	11,2E+9	3,71E+9	
3	P5	43	68	22,5	12,1	1,63E-12	7,42E+9	
4	P5	43	68	23	12,1	1,32E-12	9,12E+9	
5	P5	43	71	21,9	12,1	1,90E-12	6,37E+9	
5	P5	75,5	68	22,5	12,1	5,18E-12	5,32E+9	
6	P5	75,5	68	23	12,1	5,77E-12	2,09E+9	
7	P5	75,5	71	21,9	12,1	6,41E-12	1,88E+9	

## Sorptiokokeet

Sorptiokokeet suoritettiin vakiolämpötilassa. Koekappaleet ilmastoitiin ensin tasapainotilaan yhdessä suhteellisessa kosteudessa, jonka jälkeen ne siirrettiin toiseen suhteelliseen kosteuteen. Siirron jälkeen seurattiin koekappaleiden painon muuttamista ajan funktiona. Kokeiden tarkoituksena oli tuottaa tietoa koekappaleiden erilaisen pinnoitteiden vaikutuksesta kosteuden adsorptio- ja desorptionopeuteen suhteellisen kosteuden muutoksen jälkeen.

Pinnoittamattoman ja eri tavoin pinnoitettujen 12 mm paksujen kuusen koekappaleiden kosteuden adsorptio poikkisuuntaan esitetään koeajan neliöjuuren funktiona (kuva 5). Suhteellinen painonmuutos (E) tarkoittaa ko. koekappaleen

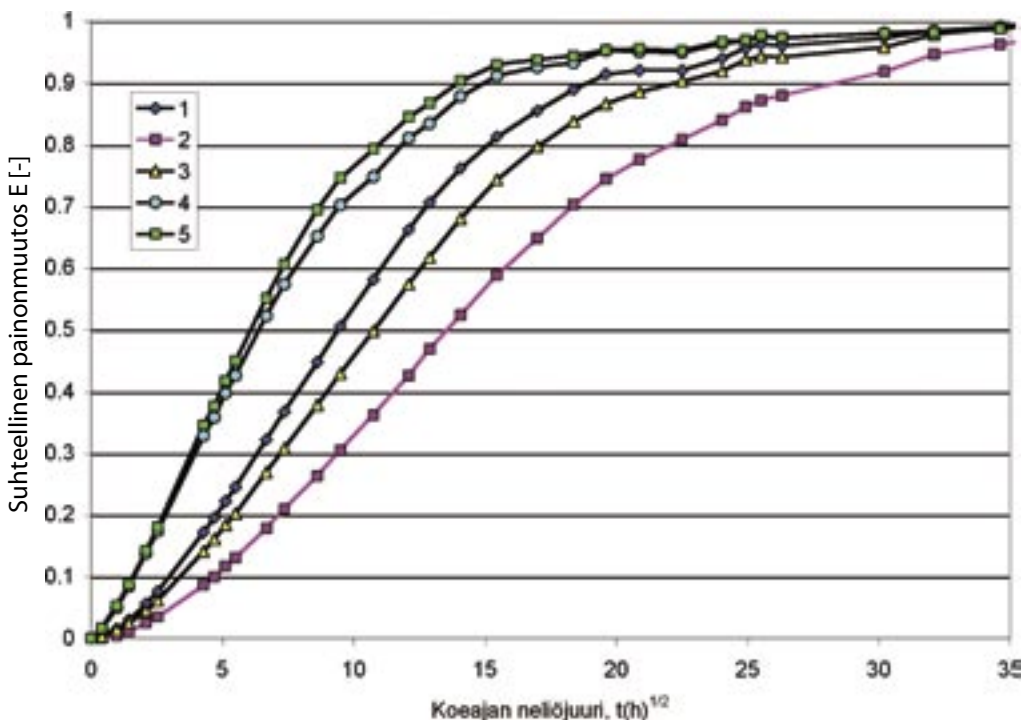
tarkasteluhetkeen mennessä tapahtuneen painonmuutoksen suhdetta kokonaispainonmuutokseen kokeen päättyttyä uuteen tasapainotilaan.

Vaaka-akselilla on koeajan neliöjuuri, kun koeaika ilmoitetaan tunneissa. Tämä esitystapa parantaa kuvan havainnollisuutta, koska tasapainotilan saavuttamiseen kuuluu runsaasti aikaa. Esim. pinnoittamattomien koekappaleiden kosteuspitoisuus oli lähellä uutta tasapainotilaa vasta noin 10 vrk:n (225 h) kuluttua kokeen alkuhetkestä, mikä koeajan neliöjuurena vastaa vaaka-akselilla arvoa 15.

Mikäli suhteellinen kosteus vaihtelee vuorokausirytmillä, on tarkasteltava kuvaa 5 koeajan neliöjuuren ollessa alueella 2,5....4 eli aikaa 6h....16h kokeen alusta.

Kuva 5. Pinnoittamattoman ja eri tavoin pinnoitettujen kuusen koekappaleiden suhteellinen painon lisäys sorptiokokeessa ajan funktiona. Koekappaleen paksuus on 12 mm. Kosteuden siirtymissuunta on poikkisuunta.

1 = Paneeli-Ässä puolihihmeä, 2 = Jalo Himmeälakka, 3 = Novaplast 7, 4 = Novaplast 2, 5 = pinnoittamaton /6/.





Käyrien mukaan koekappaleiden No 4 Novaplast 2 pinnoite ei käytännössä juurikaan hidastanut kosteuden adsorptiota verrattuna pinnoittamattomiin koekappaleisiin No 5. Kumpienkin em. koekappaleryhmien kosteuspitoisuus oli muuttunut määrällä noin 20 % kokeen alku- ja lopputilanteen tasapainokosteuksien erosta. Muut pinnoittevaihtoehdot selvästi hidastivat, mutta eivät kuitenkaan estäneet kosteuden adsorptiota. Esim. Paneeli-Ässä ph ja Novaplast 7 sallivat puolen vuorokauden aikana kosteuden adsorption, joka oli noin 40 % pinnoittamattomien kappaleiden adsorptiosta.

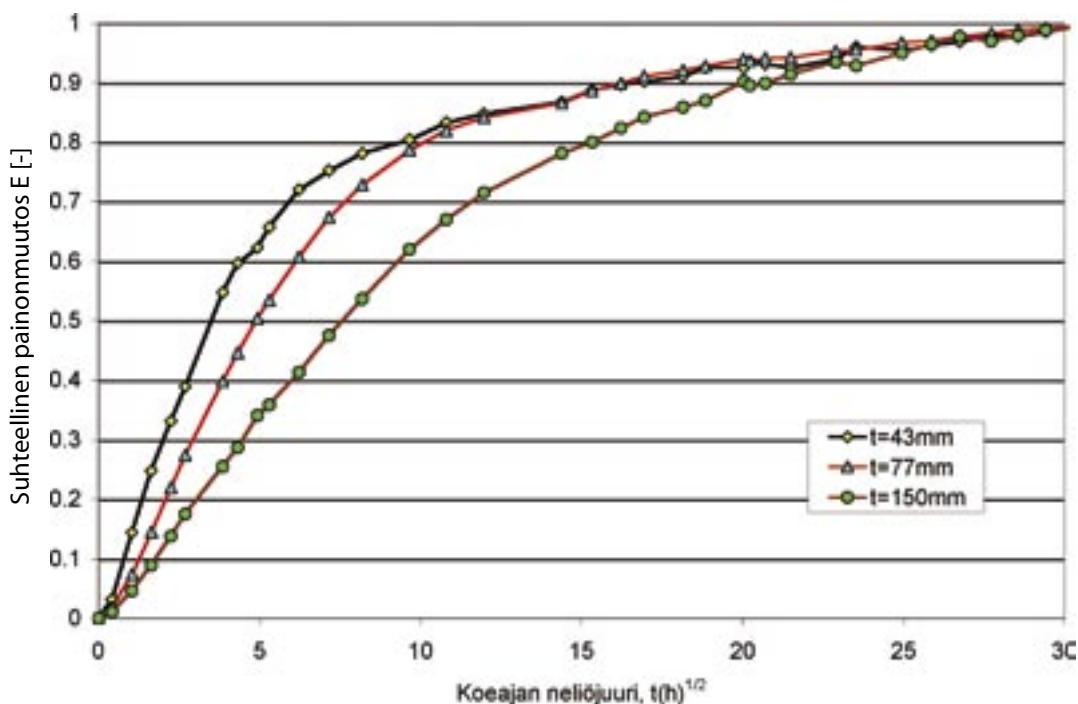
Kuusipaneliin poikkisuunnassa tapahtuvaa kosteuden adsorptiota voidaan kuvata seuraavasti:

- Kosteuden adsorptio siirryttäessä ta-

sapainotilasta toiseen on määrällisesti suuri, mutta tasapainotilan saavuttamiseen kuluu paljon enemmän aikaa verrattuna siihen, että kosteuden adsorption ja desorption tulisi tapahtua suhteellisen kosteuden vaihdellessa jaksottaisesti vuorokausirytmillä. Kosteuden adsorption määrällinen suuruus selittyy puun voimakkaalla hygroskooppisuudella ja tasapainotilan saavuttamisen hitaus puun pienellä vesihöyryn läpäisevyydellä poikkisuunnassa.

- Puun voimakkaasta hygroskooppisuudesta johtuen sen huoneilmaan rajoitettu ohut pintakerros adsorboi kuitenkin lyhyessä ajassa kosteutta määrän, johon huoneilman kosteuden puskuri-vaikutus perustuu kosteuden vaihdel-

Kuva 6. Pinnoittamattoman kuusen koekappaleiden suhteellinen painon lisäys sorptiokokeessa ajan funktiona. Koekappaleen paksuus on 43, 77 ja 150 mm. Kosteuden siirtymissuunta on pituussuunta /6/.



lessa vuorokausirytmillä.

- Pinnoite hidastaa kosteuden adsorpti-  
on ja desorption nopeutta ja suurentaa  
myös tasapainotilan saavuttamiseen  
tarvittavaa aikaa tavalla, joka riippuu  
pinnoitteen höyrynvastuksesta.

Kuvassa 6 esitetään vastaavat sorptio-  
kokeen mittaustulokset kuusen kosteuden  
adsorptiolle pituussuunnassa, kun koekap-  
paleiden paksuus (pituussuunnassa) vaihteli.  
Kuvan mukaan kuusen pinnoittamat-  
toman koekappaleen paksuuden kasvu  
pituussuunnassa hidastaa odotetusti tasa-  
painotilan muodostumista, mutta kuiten-  
kin vähemmän kuin Fick'in lain mukaan  
tapahtuva diffuusio edellyttää. Verrattuna  
pinnoittamattomaan koekappaleeseen No  
5 kuvassa 5 voidaan todeta, että kosteuden  
adsorboituessa pituussuuntaan saavuteti-  
in suhteellinen painonmuutos 0,9 likimain  
samassa ajassa 77 mm paksulla koekappa-

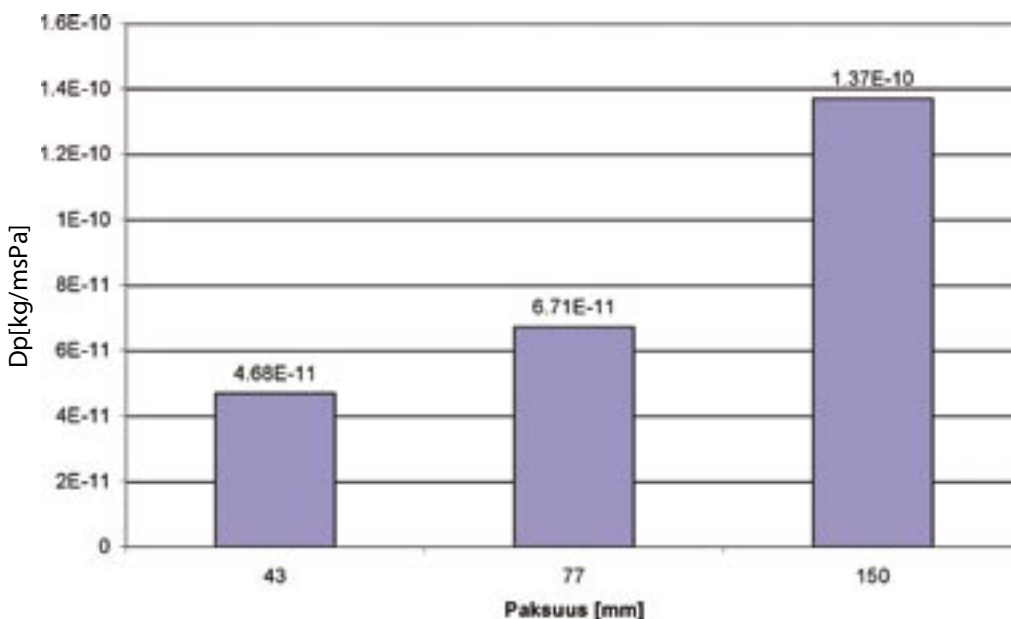
leella pituussuuntaan kuin kosteuden ad-  
sorboituessa poikkisuuntaan 12 mm pak-  
sulla koekappaleella.

Tarkasteltaessa kuvaa 6 todetaan, että  
12 tunnin kuluttua suhteellisen kosteuden  
muutoksesta (vaaka-akselilla kohta n. 3,5)  
43 mm paksun koekappaleen kosteuspi-  
toisuus oli muuttunut määrällä noin 50 %, 77  
mm paksun noin 35 % ja 150 mm paksun  
noin 20 % kokeen alku- ja lopputilanteen  
tasapainokosteuksien erosta. Nämä määrät  
ovat suuria verrattuna kuusen poikkisuun-  
taan samassa ajassa tapahtuneeseen ad-  
sorptioon.

Kuusen pituussuunnassa tapahtuvaa  
kosteuden adsorptiota voidaan kuvata seu-  
raavasti:

- Kosteuden adsorptio on kokeen alku-  
vaiheessa erittäin nopeaa ja määräl-  
lisesti suurta. Tämä selittyy yhtäältä  
puun voimakkaalla hygroskooppisuu-

Kuva 7. Sorptiokokeiden tuloksista määritetyt vesihöyryn diffuusioker-  
toimet kuusen pituussuuntaan, kun koekappaleen paksuus oli 43, 77 ja  
150 mm /6/.



della ja toisaalta puun suurella vesihöyryn läpäisevyydellä pituussuunnassa (kuva 7).

- Puun voimakkaan hygroskooppisuuden ja suuren vesihöyryn läpäisevyyden vuoksi sen huoneilmaan rajoittuva paksuhko pintakerros adsorboi lyhyessä ajassa runsaasti kosteutta, johon vuorokausirytmillä toimiva huoneilman kosteuden puskurivaikutus perustuu.
- Pituussuuntainen kosteuden adsorptio soveltuu käyttöön, kun huonetilan kosteuskuormitus vaihtelee erityisen nopeasti ja määrällisesti laajoissa rajoissa.

Kuusen diffuusiokerroin pituussuuntaan riippuu voimakkaasti koekappaleen paksuudesta kasvaen paksuuden lisäntyessä. 150 mm koekappaleen diffuusiokerroin oli kolminkertainen verrattuna 43 mm paksun koekappaleen tulokseen. Diffuusio kertoimen voimakas riippuvuus koekappaleen paksuudesta ilmaisee sen, ettei kosteuden siirtyminen puussa pituussuuntaan noudata Fick'in lain mukaista yksinkertaista kaasujen diffuusion mekanismia. Tällöin mitattu diffuusiokerroin pätee vain koejärjestelyn mukaisille tilanteille ja se on näennäinen suure. Pituussuuntaiset näennäiset diffuusio kertoimet olivat 1...2 kertaluokkaa suurempia kuin poikkisuuntaan mitatut. Tehollisen kosteuskapasiteetin hyödyntämisen kannalta tulos on merkittävä.

### **Sykliset sorptiokokeet**

Syklisissä sorptiokokeissa ilman suhteellista kosteutta vaihdeltiin vuorokausisyklillä koekappaleen toisella puolella. Kosteutta vaihdeltiin siten, että korkeampaa kosteutta ylläpidettiin 8 tuntia ja tämän jälkeen matalampaa 16 tuntia. Kosteusolot, joiden välillä

vaihtelu tapahtui, on esitetty taulukoissa 1 ja 2.

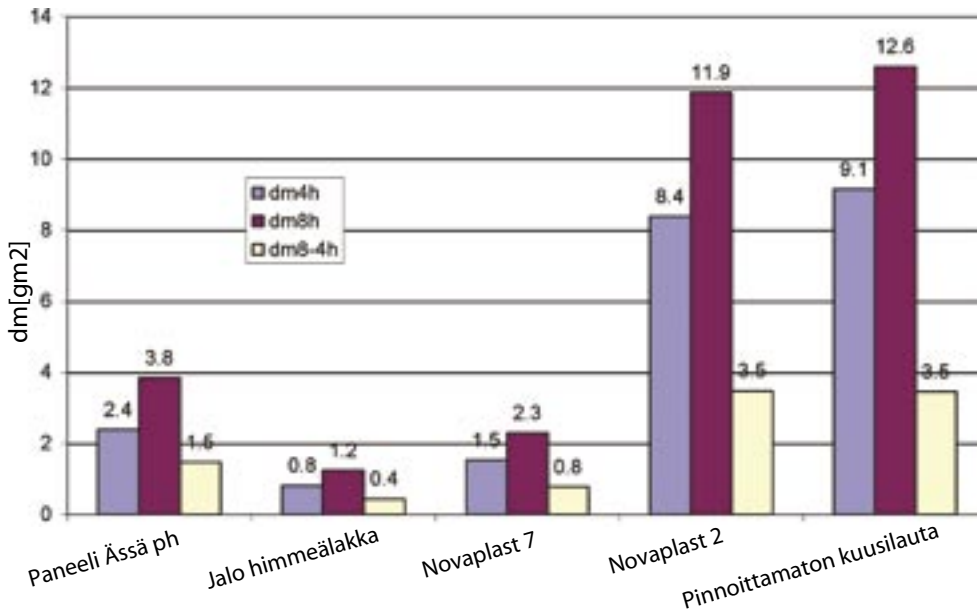
Syklisen kokeen tarkoituksena oli saada mittaustietoa erilaisten materiaalien ja pinnoitettujen materiaaliyhdistelmien kyvystä adsorboida ja luovuttaa ilman vesihöyryä jaksottain muuttuvissa kosteusoloissa - siis koekappaleiden tehollisesta kosteuskapasiteetista. Kaikki koetulokset on esitetty lähteessä /6/. Tässä yhteenvetoraportissa esitetään vain joitakin mielenkiintoisia tuloksia, jotka antavat käsityksen syklisen kokeen mahdollisuuksista tuottaa tehollista kosteuskapasiteettia koskevaa tietoa. Kaikki keskeiset materiaalityypit kuitenkin käsitellään.

Eri tavoin pinnoitettujen kuusen koekappaleiden Nro 1...5 ja Nro 15...19 kosteuden adsorption keskiarvot syklisen sorptiokokeen ensimmäisen vaiheen aikana esitetään kuvassa 8. Suhteellinen kosteus nostettiin koekappaleen toisella puolen arvosta 45 % arvoon 65 % kahdeksan tunnin ajaksi. Ennen syklistä koetta koekappaleet oli ilmastoitu kolmen vrk:n ajan 65 % suhteellisessa kosteudessa. Tulokset kertovat tilanteen neljän ja kahdeksan tunnin kuluttua syklin ensimmäisen vaiheen alusta.

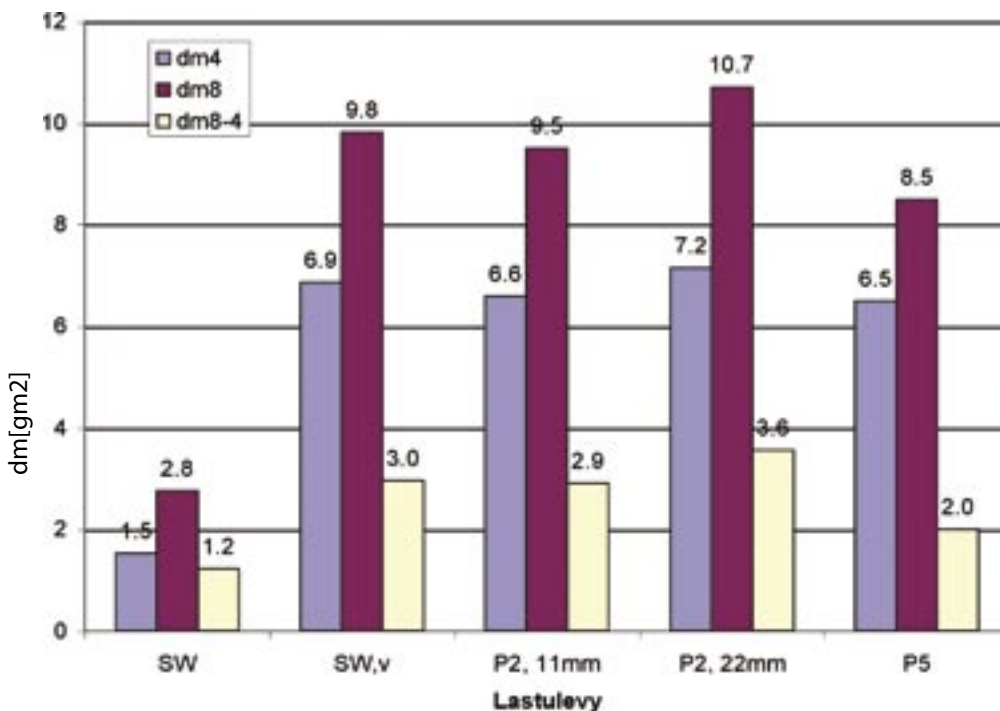
Novoplast 2:lla pinnoitetut ja pinnoittamattomat koekappaleet adsorboivat kosteutta lähes yhtä paljon (kuva 8), kun taas muiden pinnoitettujen koekappaleiden adsorptio jäi edellisiä selvästi pienemmäksi. Tämä on odotettua, sillä muiden pinnoitteiden mitattu vesihöyrynvastus on merkittävästi suurempi kuin Novoplast 2:n.

Kuvissa 9 ja 10 esitetään vastaavat neljän ja kahdeksan tunnin kosteuden adsorptiot kokeissa tutkituille lastu- ja puukuitulevystä valmistetuille koekappaleille. Koesuoritus ja -olot ovat samat kuin edellä on kuvan 8 yhteydessä esitetty.

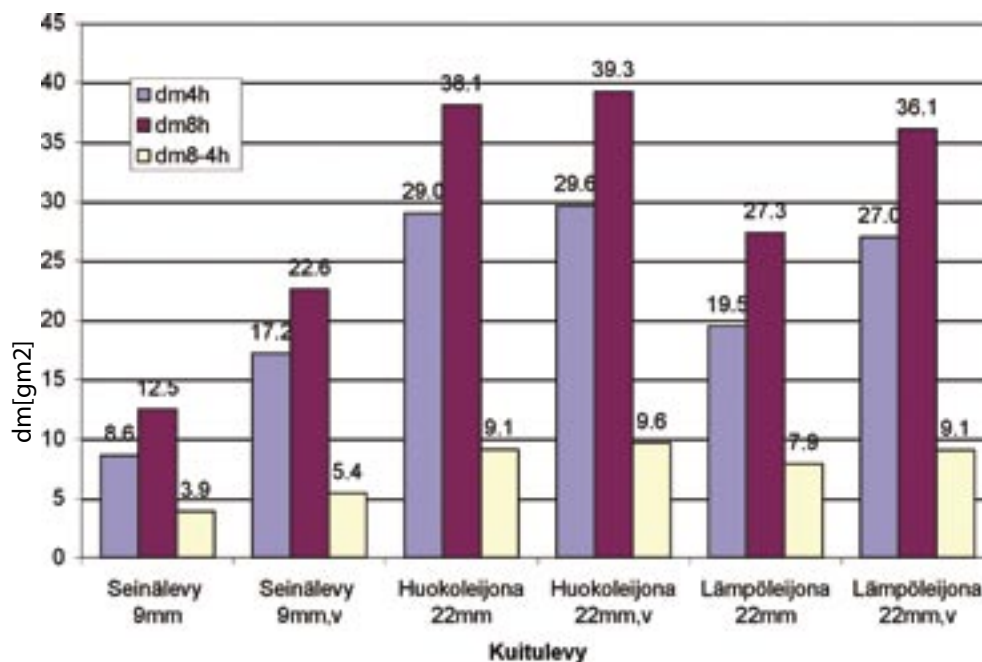
Kuva 8. Kosteuden adsorptio (dm) eri tavoin pinnoitettuihin kuusen koekappaleisiin, kun syklisen sorptiokokeen yhden jakson ensimmäisen kosteusmuutoksen (45 %...65 %) alusta on kulunut 4 h ja 8 h. Kuvassa dm8-4h tarkoittaa kosteuden adsorptiota aikavälillä 4...8 h jakson alusta. Kosteuden siirtymissuunta oli poikkisuunta /6/.



Kuva 9. Kosteuden adsorptio (dm) eri lastulevykoekappaleisiin, kun syklisen sorptiokokeen ensimmäisen kosteusmuutoksen (45 %...65 %) alusta on kulunut 4 h ja 8 h. Kuvassa dm8-4h tarkoittaa kosteuden adsorptiota aikavälillä 4...8 h jakson alusta. Kuvassa tunnus v tarkoittaa, että koekappaleen pinnoittamaton ja läpäisevämpi puoli on alttiina sykliselle kosteusvaihtelulle. Tunnuksat SW, P2 ja P5 ovat taulukon 5 mukaisia tuotetunnuksia /6/.



Kuva 10. Kosteuden adsorptio (dm) kuitulevykoekappaleisiin, kun syklisen sorptiokokeen ensimmäisen kosteusmuutoksen (45 %...65 %) alusta on kulunut 4 h ja 8 h. Kuvassa dm8-4h tarkoittaa kosteuden adsorptiota aikavälillä 4...8 h jakson alusta. Kuvassa tunnus v tarkoittaa, että koekappaleen pinnoittamaton ja läpäisevämpi puoli on alttiina sykliselle kosteusvaihtelulle /6/.



Pinnoittamattoman lastulevyn tehollinen kosteuskapasiteetti on lähes sama kuin kuusen poikkisuuntaan. Seinä-Vilhelm levyn (SW) palosuoja-pinnoite pienensi kosteuden adsorption noin neljäsosaan verrattuna pinnoittamattomiin levyihin (kuva 9).

Huokoisen puukuitulevyn tehollinen kosteuskapasiteetti oli pinnoittamattomana varsin suuri - kuvan 10 mukaan kosteuden adsorptio oli jo neljän tunnin kohdalla lähes 30 g/m<sup>2</sup>. Todettakoon myös, että tuotteiden Huoko- ja Lämpöleijona pinnoite on syklisen sorptiokokeiden mukaan verraten läpäisevä eikä juurikaan pienennä tehollista kosteuskapasiteettia.

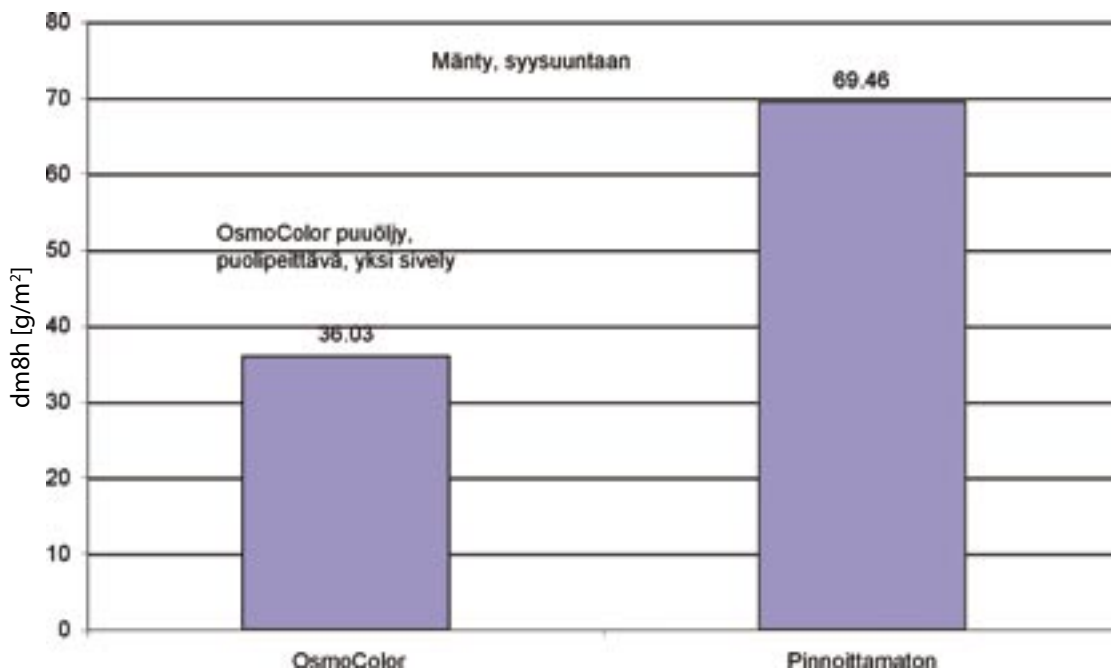
Männyn kosteuden adsorptio määritettiin pituussuuntaan sekä pinnoittamattomilla että pinnoitetuille koekappaleille (Osmo Color). Tulokset kahdeksan tunnin

kohdalla esitetään kuvassa 11. Koeolot ja suoritukset olivat samat kuin määritettäessä kuvan 8 tulokset lukuunottamatta pinnoittamattomien koekappaleiden edeltävää ilmastointia (RH. = 45 %).

Pinnoittamattoman männyn pituussuuntaan tapahtuva kosteuden adsorptio on moninkertainen verrattuna kuusen poikkisuuntaiseen adsorptioon (kuva 8). Osmo Color pinnoite vaimensi adsorptiota, mutta pinnoitetunkin pituussuuntaisen koekappaleen tehollinen kosteuskapasiteetti säilyi suurena verrattuna pinnoittamattoman kuusipuun poikkisuuntaan (kuva 8).

Kuusen pinnoitettujen ja pinnoittamattomien koekappaleiden tulokset kuppi-, sorptio- ja syklisessä sorptiokokeessa osoittavat sen, että puun kyky adsorboida ja luovuttaa vesihöyryä (tehollinen kosteus-

Kuva 11. Kosteuden adsorptio ( $dm$ ) mäännyn pituussuuntaisiin koekappaleisiin, kun syklisen sorptiokokeen ensimmäisen kosteusmuutoksen (45 %...65 %) alusta on kulunut 8 h /6/.



kapasiteetti) suhteellisen kosteuden vaihdellessa syklisesti riippuu huoneilman ja puun välillä olevan pinnoitekerroksen höyrynvastuksesta. Pinnoitteelle ja sen höyrynvastukselle ominainen vaimennuskerroin ( $k_v$ ) voidaan määrittellä kaavalla (1), kun vertailukohtana on kosteuden adsorptio pinnoittamattomaan materiaaliin..

$$k_v = \Delta m_p / \Delta m_o \quad (1)$$

$\Delta m_p$  on pinnoitettuun koekappaleeseen adsorboituneen kosteusmäärän vaihteluväli syklisessä sorptiokokeessa, g/m<sup>2</sup>

$\Delta m_o$  on pinnoittamattomaan koekappaleeseen adsorboituneen kosteusmäärän vaihteluväli syklisessä sorptiokokeessa, g/m<sup>2</sup>

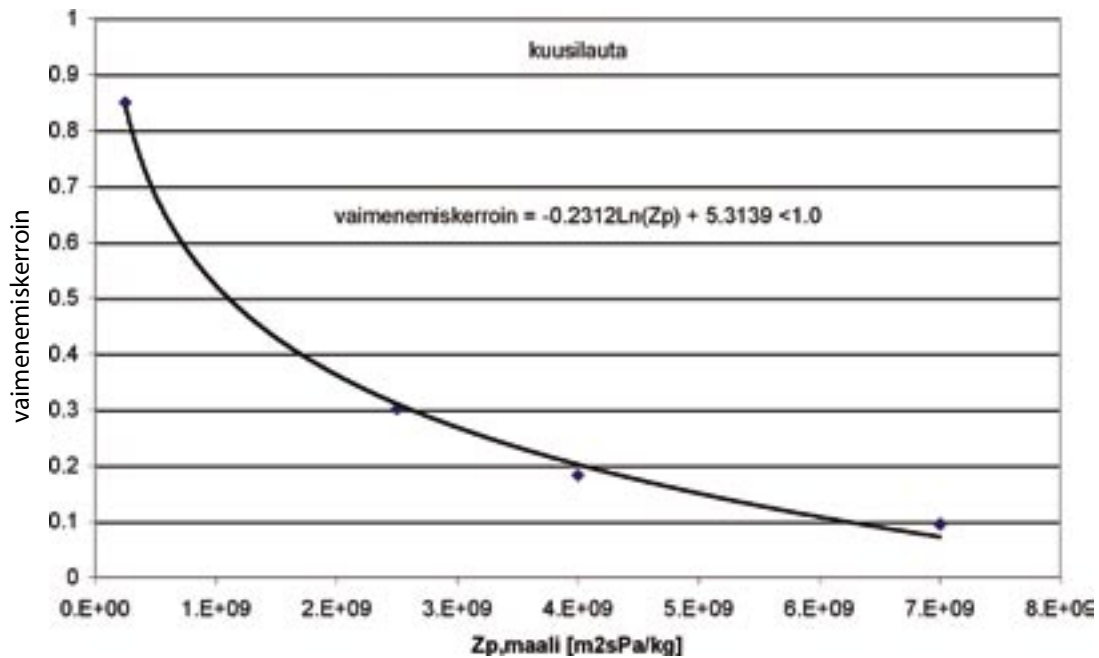
Puolet pinnoittamattoman kuusen tehollisesta kosteuskapasiteetista säilytetään, kun pinnoitteen höyrynvastus on enintään  $1 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg (kuva 12). Kokeellisesti tutkituista maaleista ainoastaan Novaplast 2 sekä huokoisen puukuitulevyn (Lämpöleijona) palosuojauspinnoite täyttää em. ehdon. Muiden maalien höyrynvastuksen testitulokset olivat edellisiä lukuunottamatta alueella  $1,8...7 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg, joten kuusipaneelin tehollisesta kosteuskapasiteetista on niitä käytettäessä jäljellä vain 10 %...40 %.

Liitteessä 1 esitetään kirjallisuudesta kootut erilaisten pinnoitteiden höyrynvastusten arvot.

Liitteessä on mainittu useita pinnoitteita, joille on ilmoitettu verraten pieniä höyrynvastuksen arvoja. Koska läpäisevän pinnoitteen höyrynvastus riippuu kosteusoloista ja yleensä pienenee suhteellisen



Kuva 12. Kuusipanelin tehollisen kosteuskapasiteetin vaimentuminen maalipinnoitteen höyrynvastuksen vaikutuksesta.



kosteuden noustessa, ovat liitteen 1 märkäkuppimenetelmällä (W) mitatut tulokset pienempiä verrattuna vesihöyrynvastukseen pinnoitteen käyttöoloissa. Jotkut liitteen arvot ovat kuitenkin lupaavia.

Kohdassa 6.3 esitetään ehdotus materiaalien ja materiaaliyhdistelmien luokitelemiseksi tehollisen kosteuskapasiteetin suhteen.

## 4.2 Tehollisen kosteuskapasiteetin testausmenetelmä /7/

### Koemenetelmä ja -olot

Hygroskooppisten rakenteiden tehollisen kosteuskapasiteetin määrittämiseen kehitettiin koemenetelmä, joka perustuu vuorokausittain toistuvaan ilmastocykliin /7/. Tässä vaihdellaan jaksottain kahta kosteudeltaan erilaista vakioilmastoa. Koeolojen valinnan taustalla on makuuhuoneen sisäilma, johon yöaikainen miehitys aiheuttaa kahdeksan tunnin kosteuskuormituksen ja jota seuraa 16 tunnin päiväjakson ilman kosteuskuormitusta.

Koekappaleen pinta altistetaan sykli- sille kosteusvaihtelulle. Sekä korkean suhteellisen kosteuden aikainen kosteuden adsorptio että kuivemman jakson aikainen kosteuden kuivuminen määritetään punnituksin. Tuloksena saadaan kappaleen tehollinen kosteuskapasiteetti sekä kostumis- että kuivumisvaiheelle erikseen.

Koska huoneilman kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenajoittain, valittiin koeolosuhteet erikseen kesä- ja talvikausille. Valitut suhteellisen kosteuden arvot perustuvat projektin vaiheen 1 laskentatuloksiin ja ne esitetään taulukossa 10. Testauksen lämpötila on vakio 23 °C.

Taulukko 10. Suhteellisen kosteuden tasot tehollisen kosteuskapasiteetin testauksessa.

Vuodenaika	Kosteuskuormituksen vaihe (8 h) suhteellinen kosteus, % RH	Miehittämätön vaihe (16 h) suhteellinen kosteus, % RH
"Talviaika"	50	23
"Kesäaika"	75	50

### Koetuloksia /7/

Taulukossa 11 esitetään testatut materiaalit ja materiaaliyhdistelmät. Kaikki testit suoritettiin taulukon 10 mukaisissa talvioloissa ja ainoastaan jotkut valitut tapaukset myös kesäoloissa.

Taulukko 11. Tehollisen kosteuskapasiteetin suhteen testatut materiaalit ja materiaaliyhdistelmät.

Koerakenteen tunnus	Koekappaleen materiaali ja ainekerrokset alkaen ilmatilaan kosketuksessa olevasta pinnasta	Tiheys kg / m <sup>3</sup>	Paksuus d, mm
W1	mänty, sileä pinta, adsorptio rungon poikkisuuntaan	420	20
W2	mänty, adsorptio rungon pituussuuntaan	420	45
GRx2	kipsilevy, maalattu kahdesti	700	12
G	kipsilevy, maalaamaton	700	12
pWfb	huokoinen puukuitulevy	280	12
GpMW	maalaamaton kipsilevy, rakennuspaperi, mineraalivilla	700	12
		20	0,2
GpCFI	maalaamaton kipsilevy, rakennuspaperi, puukuitueriste	700	12
		20	100
Ply-CFI	reijitetty vaneri (5 % alasta) lakattu pinta, nylon-verkko, ilmaväli, puukuitueriste	450	6
			2 x 2
			6
		35	100
Ply-pWfb	reijitetty vaneri (5 % alasta) lakattu pinta, nylon-verkko, ilmaväli, huokoinen puukuitulevy	450	6
			2 x 2
			6
		280	24

Testeissä koekappaleisiin adsorboituneen kosteuden kokonaismassan muutos riippui koekappaleen alkukosteudesta, kosteuskapasiteetista sekä vesihöyrynläpäisevyydestä. Mäntykoekappale poikkisuuntaan (W1) ilmastoitiin ennen koetta tasapainotilaan 25 % RH suhteellisessa kosteudessa. Ensimmäisten syklien aikana kosteuden kokonaismassa kasvoi, mutta tämä kasvu pysähtyi kolmannen syklin aikana. Vastaavasti mäntykoekappale pituussuuntaan (W2) ilmastoitiin tasapainoon 50 % RH suhteellisessa kosteudessa ja kosteuden kokonais-

massa väheni ensimmäisen viikon aikana kunnes saavutti vakiotason.

12 mm paksu huokoinen puukuitulevy (pWfb) saavutti ensimmäisen syklin aikana lopullisen kosteustason, joka ei enää muuttunut seuraavien syklien aikana. Sen sijaan rei'itetty vanerilevy yhdessä huokoisen puukuitulevyn kanssa (Ply-pWfb) testattiin vain neljän syklin ajan eikä kosteustaso ehtinyt viiveistä johtuen saavuttamaan lopullista arvoa. Koetulokset esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Koekappaleiden mitattu kosteuden adsorptio 8 tunnin kostumisvaiheen ja desorptio 16 h kuivumisvaiheen aikana. Koeolosuhteet ovat 50 % / 23 % ellei taulukossa toisin mainita /7/.

Koetapauksen tunnus	Kosteuden massan muutos $\Delta m$ , g /m <sup>2</sup>	
	8 h kostumisvaihe	16 h kuivumisvaihe
W1	12	10
W1, 75 / 50 % RH	22	16
W2	90	70
GRx2	< 1	0
G	12	12
pWfb	45	45
pWfb, 75 / 50 % RH	36	32
GpMW	16	15
GpCFI	24	20
Ply-CFI	27	25
Ply-pWfb	35	37

Taulukon 12 tulokset osoittavat seuraavaa:

- "Kesäoloissa" pinnoittamattoman männyn tehollinen kosteuskapasiteetti oli olennaisesti suurempi kuin kuivissa talviololoissa.
- Männyn tehollinen kosteuskapasiteetti pituussuuntaan on moninkertainen verrattuna poikkisuuntaan.
- Tiivis maali kipsilevyn pinnassa eliminoi käytännössä tehollisen kosteuskapasiteetin. Sen sijaan pinnoittamattomalla kipsilevyllä on varteenotettava tehollinen kosteuskapasiteetti.
- Huokoisen puukuitulevyn (12 mm) tehollinen kosteuskapasiteetti on huomattavan suuri ja sama molempiin suuntiin.
- Rakennuspaperi ja kevyt mineraalivilla pinnoittamattoman kipsilevyn takana lisäsivät tehollista kosteuskapasiteettia verrattuna pelkkään kipsilevyyn.
- Rakennuspaperi ja puukuitueriste pinnoittamattoman kipsilevyn takana lisäsivät tehollisen kosteuskapasiteetin noin kaksinkertaiseksi verrattuna pelkkään kipsilevyyn.
- Rei'itetty vaneri ja hygroskooppinen puukuitueriste tai huokoinen puukuitulevy aikaansaivat yhdistelmänä huomattavan tehollisen kosteuskapasiteetin.

## 4.3 Huoneilman kosteuden puskuri-vaikutuksen laskennallinen analyysi

### 4.3.1 Rakennetyypit ja ulkoilmastot

Projektin eri vaiheissa ja osatutkimuksissa on tuotettu runsaasti laskennallisia tuloksia hygroskooppisten rakennus- ja sisustusmateriaalien puskuri-vaikutuksesta huoneilman kosteuteen. Makuuhuonetta koskevat tulokset esitetään lähteissä /1, 2, 3, 4, 13,17, 18 / ja lähteessä /11/ esitetään myös olohuoneen simulointituloksia. Laskentamenetelmät sekä käytetyt lähtötiedot ja reunaehdot kuvataan ao. lähteissä. Tavoitteena oli selvittää rakenteiden teholliseen kosteuskapasiteettiin ja huoneilman kosteusvaihtelun vaimenemiseen vaikuttavien erilaisten fysikaalisten tekijöiden merkitys Suomen sekä Keski- ja Etelä-Euroopan ilmastoissa. Laskentatuloksia on tuotettu runsaasti eikä niitä kaikkia käsitellä tässä yhteenvedossa, joka keskittyy mielenkiintoisimpiin ja käytännön merkitystä omaaviin tuloksiin.

#### Lyhyt kuvaus analysoiduista huonetiloista

Kahden aikuisen makuuhuone /1 /

- koko  $4 \times 3 \times 2,7 \text{ m}^3$ , ainoa ulkoseinä pituudeltaan 3 m,
- ulkoseinän suuntaus on länteen ja seinällä on ikkuna kooltaan  $1,2 \times 1,5 \text{ m}^2$ ,

- ulko- ja väliseinien rakenne on sama,
- katto osallistuu kosteudensiirtoon mutta ei lattia (vesihöyryä läpäisemättömän päällyste),
- ilmanvaihto on yleensä 0,5 vaihtoa tunnissa,
- lämmityskausi Suomessa 1.9. - 31.5. ja Keski-Euroopassa 1.10. - 30.4., Välimerellä ei lämmityskautta,
- sisäinen kuormitus 2 aikuista 9 h päivässä, jolloin kosteuskuormitus on 60 g/h ja valaistusteho 100 W ensimmäisen tunnin aikana.

Makuu- ja olohuoneet /11/

- OH  $5 \times 6,5 \text{ m}^2$ , MH1  $4 \times 3 \text{ m}^2$  ja MH2  $4 \times 3,5 \text{ m}^2$
- OH ulkoseinät etelään ja itään, eteläseinällä ikkuna kooltaan  $4,5 \text{ m}^2$
- MH1 ulkoseinä pohjoiseen, seinällä ikkuna kooltaan  $2,2 \text{ m}^2$
- MH2 ulkoseinät itään ja pohjoiseen, itäseinällä ikkuna kooltaan  $2,2 \text{ m}^2$
- ilmanvaihto kaikissa huoneissa 4, 6 tai 8 l/s,
- makuuhuoneiden ovi olohuoneeseen auki tai suljettu,
- Helsingin säätiedot 1979,
- sisäinen kuormitus, OH 3 henkilöä klo 07 - 08 ja klo 16 - 23, MH1 1 henkilöä ja MH2 2 henkilöä klo 23 - 07.

#### Laskelmissa käytetyt rakennevaihtoehdot

Kahden aikuisen makuuhuone /1/

Laskelmissa analysoitiin kosteuden puskuri-vaikutus kaikkiaan 16 eri rakennevaihto-

ehdolla. Seuraavassa luetellaan mielenkiintoisimmat rakennevaihtoehdot käyttäen rakennevaihtoehtojen numerointina kirjallisuuslähteen /1/ mukaista numerointia:

#### Rakenne 1.

- sisäpinta, hyvin vesihöyryä läpäisevä [höyrynvastus  $0,2 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg],
- sisäverhouslevy, hygroskooppinen ja vesihöyryä läpäisevä (huokoinen puukuitulevy)
- ilmansulku, hyvin vesihöyryä diffuusiolla läpäisevä rakennuspaperi,
- lämmöneriste, hygroskooppinen puukuitueriste.

#### Rakenne 2.

- kuten rakenne 1, mutta sisäpinta diffuusiotiivis [höyrynvastus  $200 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg].

#### Rakenne 3.

- kuten rakenne 1, mutta lämmöneristeenä lievästi hygroskooppinen mineraalivilla.

#### Rakenne 4.

- kuten rakenne 1, mutta ilmansulkuna diffuusiotiivis muovikelmu.

#### Rakenne 6.

- kuten rakenne 1, mutta sisäverhouslevynä hygroskooppinen ja vesihöyryä diffuusiolla huonosti läpäisevä puupaneli.

#### Rakenne 11.

- kuten rakenne 1, mutta lattia ja katto ovat massiivisia ja diffuusiota läpäisemättömiä (200 mm betonilaatta) ja seinät ovat massiivista puuta (125 mm hirsi).

#### Rakenne 12.

- kuten rakenne 11, mutta seinät ovat vähemmän massiivista puuta (hirsi 50 mm).

#### Rakenne 13.

- kuten rakenne 1, mutta sisäverhouslevy on kipsilevy.

#### Rakenne 14.

- kuten rakenne 11, mutta massiivinen katto ja lattia ovat myös puuta (200 mm).

Kaikissa laskentatapauksissa lattian sisäpinta on vesihöyryä läpäisemätön ja ulkoseinän tuulensuojana oli 11 mm huokoinen puukuitulevy.

#### Makuu- ja olohuoneet /11/

#### Ulkoseinät ja katto sisäpinnasta lukien

- huokoinen puukuitulevy 11 mm
- rakennuspaperi
- puukuitueriste 150 mm
- huokoinen puukuitulevy 11 mm

#### Väliseinät

- huokoinen puukuitulevy 11 mm
- rakennuspaperi
- puukuitueriste 75 mm
- rakennuspaperi
- huokoinen puukuitulevy

Kaikissa laskentatapauksissa lattian sisäpinta on vesihöyryä läpäisemätön. Hygroskooppisiksi luokitelluissa laskentatapauksissa seinien ja katon sisäpinoissa ei ollut pintakäsittelyä ja ei-hygroskooppisissa tapauksissa pinnat olivat vesihöyryä läpäisemättömiä.



### 4.3.2 Eri tekijöiden vaikutus huoneilman kosteuteen - yhteenveto laskentatuloksista

Kuvassa 13 esitetään Holzkirchenin ja Helsingin säätiedoilla tunneittain laskettu kahden aikuisen makuuhuoneen ilman lämpötila ja kosteus rakennetapauksille 1 ja 2 /1/. Kuvassa 13 sininen alue edustaa rakennetta 1, jossa hygroσκοoppinen materiaali on vuorovaikutuksessa huoneilmaan. Vastavasti punainen alue edustaa rakennetta 2, jossa seinien ja katon sisäpinta on päällystetty vesihöyrytiivillä pinnoitteella, joka estää huoneilman vesihöyryn pääsyn hygroσκοoppiseen rakenteeseen.

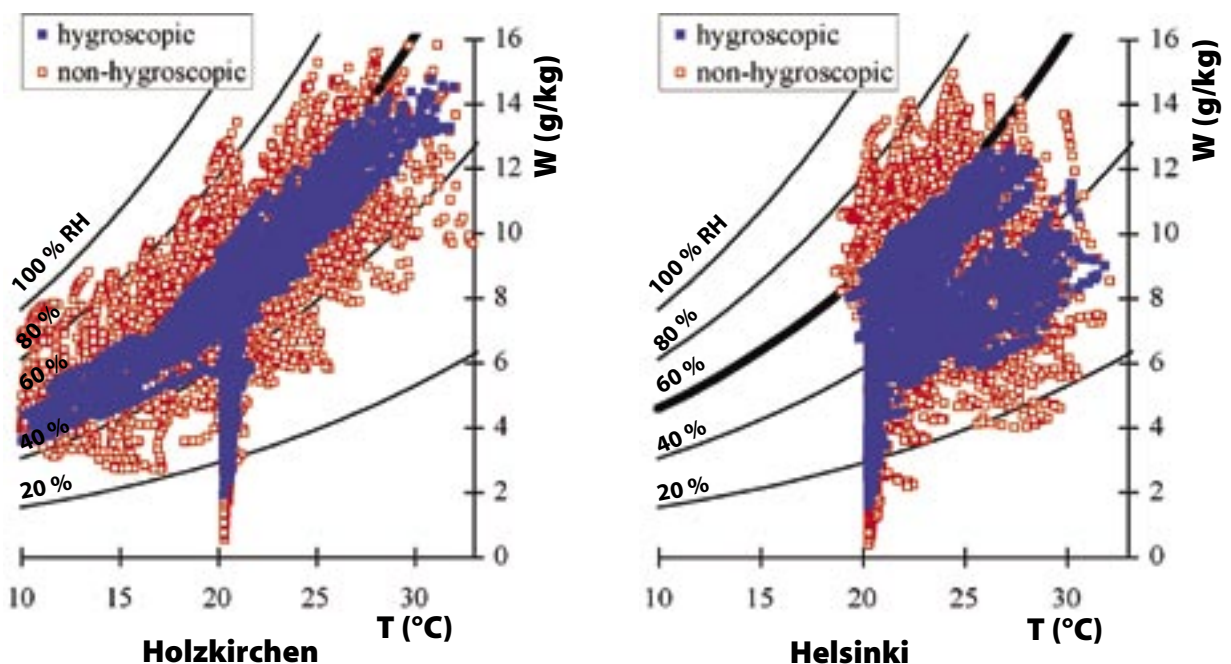
Kuvan 13 mukaan, kun rakenteiden

tehollinen kosteuskapasiteetti on käytössä (sininen alue), pysyy suhteellinen kosteus varsin hyvin alueella 30 % R.H. - 60 % R.H. kevään, kesän ja syksyn aikana. Ainoastaan keskitalvella lämmityksen ollessa päällä ilma on ajoittain kuivempaa. Vastavasti, kun tehollinen kosteuskapasiteetti 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.

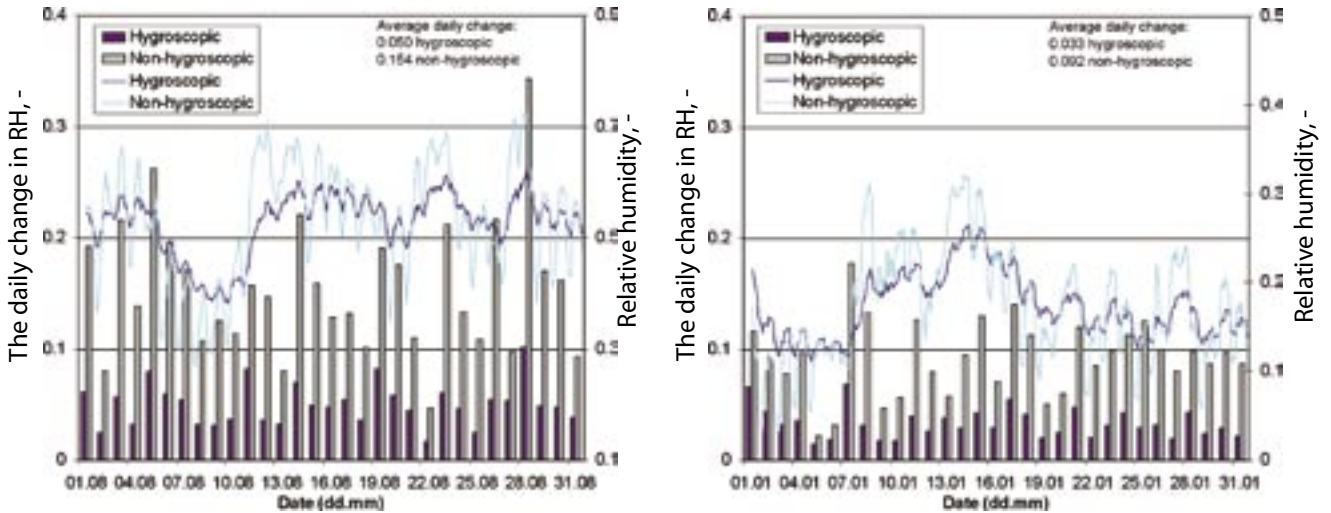
Kuvassa 14 esitetään kahden aikuisen makuuhuoneen ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu elokuussa ja tammikuussa /11/. Ilmanvaihto on 6 l/s ja ovi olohuoneeseen on auki.

Kuva 13. Huoneilman tunnittainen lämpötila ja kosteus yhden vuoden aikana kahden aikuisen makuuhuoneessa, kun ilmanvaihto on puoli vaihtoa tunnissa /1/.

- sininen alue: hygroσκοoppinen rakenne 1, vesihöyryä hyvin läpäisevä sisäpinta
- punainen alue: hygroσκοoppinen rakenne 2, vesihöyryä huonosti läpäisevä sisäpinta



Kuva 14. Huoneilman suhteellisen kosteuden vaihtelu elokuussa (vasemmalla) ja tammi-kuussa (oikealla). Kosteuskuormitus on pelkästään miehityksen aikainen ja kokonaisuudessaan 2,8 kg/vrk. Pylväät osoittavat huoneilman suhteellisen kosteuden päivittäisen vaihteluvälin ja käyrät suhteellisen kosteuden arvon ajan funktiona. Ilmanvaihto on 6 l/s. MH:n ja OH:n väliset ovet ovat auki /11/.



Elokuun aikana oli hygroskooppisten rakenteiden tapauksessa huoneilman absoluuttinen kosteuspitoisuus lukuisia kertoja matalampi kuin ulkoilman. Tämä liittyy säätilanteisiin, joissa ulkoilman absoluuttisen kosteuspitoisuuden nousu aiheuttaa sisäilman suhteellisen kosteuden nousun, jota kosteuden adsorptio rakenteisiin merkittävästi hidastaa /11/.

Kumpikin toisistaan riippumattomasti saatu laskentatulokset (Kuvat 13 ja 14) osoittaa yhtäpitävästi, että hygroskooppisilla sisustus ja rakennusmateriaaleilla materiaaleilla on mahdollista toteuttaa merkittävä tehollinen kosteuskapasiteetti, jolla on puskuri-vaikutus huoneilman suhteellisen kosteuden päivittäiseen vaihteluun.

Taulukossa 13 esitetään kuvan 14 mukaisiin tuloksiin perustuen kahden aikuisen makuuhuoneen ilman suhteellisen kosteuden keskiarvot sekä vuorokautinen suhteellisen kosteuden minimi ja maksimiarvo

elokuussa, kun kosteuden tuotto on pelkästään miehityksen aikainen ja yhteensä 2,8 kg/vrk. Lisäksi taulukossa 13 esitetään vastaavat keskiarvot, kun miehityksen aikaisen henkilökuorman lisäksi kosteutta tuotetaan huoneilmaan vakio pohjakuormituksena 0,3 kg/h. Tällöin vuorokautinen kokonaiskuormitus on 10 kg/vrk.

Taulukko 13. Kahden aikuisen makuuhuoneen ilman suhteellisen kosteuden vuorokautinen keskiarvo sekä minimi- ja maksimiarvo elokuussa, kun kosteuskuormitus on jaksottainen (yhteensä 2,8 kg/vrk) ja tämän lisäksi huoneessa on vakio pohjakuormitus (10 kg/vrk).

Case	RH, %		
	Avg	Min	Max
Hygroscopic, 2.8 kg/d	52.7	38.2	62.3
Non-hygroscopic, 2.8 kg/d	52.8	26.7	72.4
Hygroscopic, 10 kg/d	61.6	47.3	71.7
Non-hygroscopic, 10 kg/d	63.7	38.6	84.0

Yhteenvedona esittäen suuren tehollisen kosteuskapasiteetin tärkeimmät edut ja erät haitat verrattuna ei-hygroskooppiin rakenteeseen ovat /1/:

### **Suhteellinen kosteus**

- Matalampi huoneilman suhteellisen kosteuden enimmäisarvo miehityksen päättyessä. (Tyypillistä on, että ei-hygroskooppiin rakenteella huoneilman suhteellinen kosteus alkaa nousta nopeasti miehityksen alkaessa.)
- Korkeampi suhteellinen kosteus talvella miehityksen alkuhetkellä.

### **Huonelämpötila**

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

### **Huoneilman laadun aistivarainen hyväksyttävyyden**

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

### **Epättydyttävän ajan pituus**

- 7...11 viikkoa vähemmän vuosittaista aikaa, jolloin sisäilman tila on epättydyttävä (suhteellinen kosteus 60% tai korkeampi).

### **Haitat**

- Korkeampi suhteellinen kosteus miehityksen alussa. (Tyypillisesti näin käy kesällä, kun korkea 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.)

- Talvella läpäisevällä vaipparakenteella keskimäärin 5 % R.H. matalampi huoneilman suhteellinen kosteus.
- Läpäisevällä vaipparakenteella enemmän kuivan huoneilman aikaa talvella (0...4 viikkoa alle 25 % R.H.).

### **Lämmöneristyksen vaikutus /1/**

Laskennallisissa analyysissa, joka suoritettiin Holzkirchenin säätiedoilla, oli vertailukohtana rakenne 1, jossa oli sekä hygroskooppiin puukuitulämmöneriste että hygroskooppiin ja vesihöyryä läpäisevä sisäverhouslevy.

- Kun sisäverhouslevy pidettiin hygroskooppiin ja eriste muutettiin lievästi hygroskooppiin mineraalivillaksi, oli seurauksena 2...4 viikkoa enemmän aikaa vuodessa, jolloin huoneilman kosteus oli yli 60 % R.H.
- Kun sisäverhouslevy muutettiin ei-hygroskooppiin ja eriste pidettiin hygroskooppiin, oli vuodessa 2...4 viikkoa enemmän aikaa, jolloin huoneilman kosteus oli yli 60 % R.H.
- Holzkirchenin säässä oli vuosittain 38...40 yötä, jolloin huoneilman suhteellinen kosteus on yli 60 %, kun sisäverhouslevy on hygroskooppiin ja lämmöneriste ei-hygroskooppiin tai päinvastoin. Kun sekä eriste että sisäverhouslevy ovat samanaikaisesti hygroskooppiin, oli vastaava öiden lukumäärä vain 15.

### **Sisäverhouslevyn vaikutus /1/**

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

- Kun huokoisen puukuitulevyn tilalle (rakenne 1) asetettiin yhtäpaksu pinnoittamaton puupanelointi (rakenne 6) ei tulosten välillä ollut eroa. Aika vuodessa, jolloin huoneilman suhteellinen kosteus oli alle 60 % ja jolloin ilman laadun hyväksyttävyyys on asteikolla -1...+1 alle nollan, on kummassakin tapauksessa likimain sama.
- Rakenteeseen 1 verrattuna paneliverhous vähensi noin viikolla vuodessa sitä aikaa, jolloin huoneilman suhteellinen kosteus on alle 25 %.
- Kipsilevy sisäverhouslevynä lisäsi rakenteeseen 1 verrattuna 1...2 viikkoa enemmän aikaa, jolloin suhteellinen kosteus on yli 60 % R.H.
- Vaihdettaessa paksu puuverhous (rakenteet 11 ja 12, 125 mm tai 50 mm) ohuen panelin (rakenne 6, 11 mm) tilalle oli rakenteen kosteuskäyttämisen samankaltaista kuin ohuella paneelilla. Sen sijaan paksun puun termien massiivisuus paransi huoneen termistä käyttäytymistä.

### **Aktiivisen pinta-alan vaikutus /1/**

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 ja vesihöyryä läpäiseviä (rakenne 1).

- Kun aktiivista pinta-alaa lisätään vertailukohdasta, saavutetaan vain vähäinen parannus kosteuden puskurivaikutukseen.

- Kun aktiivista pinta-alaa vähennetään vertailukohdasta, voidaan menettää merkittävästi vertailukohdan puskurivaikutuksesta.
- 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.

### **Sisäpinnan höyrynvastuksen vaikutus /1/**

Vertailutapauksena on hyvin vesihöyryä läpäisevä pinnoite (rakenne 1).

- Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen pienentäminen vertailutapauksesta ei juurikaan paranna kosteuden puskurivaikutusta. Sensijaan vesihöyrynvastuksen suurentaminen heikentää sitä olennaisesti.
- Monilla käytännön pinnoitteilla höyrynvastus on 30...2000 kertainen vertailutapaukseen nähden.
- **Sisäpuolisen pintakäsittelyn höyrynvastus on kriittinen tekijä kosteuden puskurivaikutuksen kannalta.**

### **Ilmanvaihdon vaikutus /1/**

- 0,5 vaihtoa tunnissa ilmanvaihto siirtää yöaikaisesta kosteudentuotosta ulos 75 % tiivispintaissa huoneessa (rakenne 2) ja 50 % läpäisevällä rakenteella 1.
- Ilmanvaihdon ollessa 0,1 vaihtoa tunnissa rakenne 1 antaa suhteelliselle kosteudelle suunnilleen saman hetkitäisen enimmäisarvon kuin ilmanvaihto 0,5 vaihtoa tunnissa tiivispintaisen rakenteen 2 tapauksessa.

- Ilmanvaihto 0,1 vaihtoa tunnissa antaa rakenteella 1 saman ilman kosteuslisäyksen vuosikeskiarvon ulkoilman kosteuspitoisuuteen nähden kuin ilmanvaihto 0,9 vaihtoa tunnissa tiivispintaisella rakenteella 2.

#### **Kosteuden tuoton vaikutus /1/**

- Kosteuden tuoton vaikutus sisäilmaan kosteuspitoisuuteen on merkittävä.
- Hetkittäinen sisäilman suhteellisen kosteuden maksimiarvo on sama maaliskuussa kosteuden tuoton ollessa 180 g/h rakenteella 1 ja 60 g/h tiivispintaisella rakenteella 2. Rakenne 1 mahdollistaa 3-kertaisen kosteuden tuoton verrattuna rakenteeseen 2.
- Ilman aistinvarainen hyväksyttävyyys on sama, kun kosteuden tuotto on 180 g/h rakenteella 1 ja 90 g/h tiivispintaisella rakenteella 2.
- Aika vuodessa, jolloin olosuhteet ovat huonot (R.H. yli 60 %) on sama, kun rakenteella 1 kosteuden tuotto on 90 g/h ja vastaavasti tiivispintaisella rakenteella 60 g/h.
- Miehityksen aikainen huoneilman kosteuden nousu on suunnilleen yhtä nopea, kun rakenteella 1 kosteuden tuotto on 180 g/h ja vastaavasti tiivispintaisella rakenteella 60 g/h.

## **4.4 Huoneilman kosteuden puskurivaikutuksen mittaustuloksia**

### **4.4.1 Mittaukset koehuoneessa**

Mittaukset suoritti Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP) Saksassa /22/. Tutkimuslaitoksella on kaksi identtistä koehuonetta, joissa hygroskooppisten sisustusratkaisujen ja huoneilman välistä kosteusvuorovaikutusta voidaan mitata hallituissa oloissa (kuva15). Kummassakin huoneessa on alumiiniverhottu sisäpinta, joka ei adsorboi kosteutta. Toinen koehuone oli tutkimuksessa vertailuhuoneena. Tutkimuksen aikana vertailuhuoneen alumiininen sisäpinta päällystettiin Saksassa yleisesti käytettävällä kipsilaastilla, joka maalattiin vesihöyryä hyvin läpäisevällä sisäseinämaalilla. Maalikerroksen höyrynvastus vastasi mittausten mukaan 0,15 m paksun liikkumattoman ilmakerroksen höyrynvastusta ( $S_d = 0,15 \text{ m}$ ).

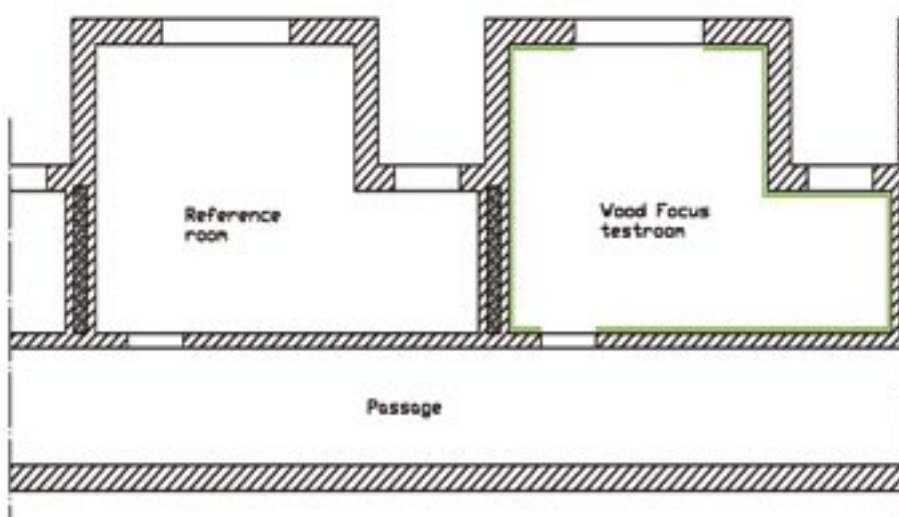
Varsinaiseen koehuoneeseen asennettiin erilaiset puuhun ja puumateriaaleihin perustuvat sisustusrakaisut. Koehuoneen tilavuus oli 50 m<sup>3</sup> ja seinien sekä katon yhteenlaskettu sisäpinnan ala noin 67 m<sup>2</sup>. Koehuoneiden ainoan ulkoseinän suuntaus oli etelään, seinän lämmönläpäisykerroin oli 0,4 W/(m<sup>2</sup> K) ja seinällä oli ikkuna, jonka lämmönläpäisykerroin oli 1,1 W/(m<sup>2</sup> K) ja auringon säteilyn läpäisysuhde 0,57.

Koeolosuhteet olivat:

- sisäilman lämpötila vakio n. 20 °C,
- koneellinen ilmanvaihto vakio 0,5 1/h (puolet huoneen tilavuudesta tunnissa),



Kuva 15. Identtiset koehuoneet IBP:n laboratoriossa. Vasemmalla vertailuhuone ja oikealla koehuone, johon asennettiin tutkittavat sisäverhousrakenteet.



- jaksottain vaihteleva kosteuden tuotto toistui vuorokausittain kuvan 16 mukaisena.

Kuvan 16 kosteuden tuotto jäljittelee asumiskäyttäytymistä. Kosteuskuormitus klo 6.00 ja 8.00 välisenä aikana kuvaa aamutoimien kuten peseytymisen ja keittämisen aiheuttamaa kuormitusta. Toinen kuormitusjakso klo 16.00 ja 22.00 välisenä aikana kuvaa iltatoimien ja oleskelun aiheuttamaa

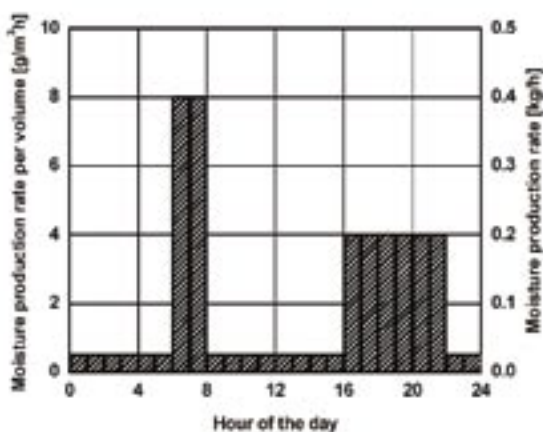
kosteuskuormitusta. Muuna aikana pohjakuormitus oli  $0,5 \text{ g}/(\text{m}^3 \text{ h})$ .

Hirsiseinää lukuunottamatta (rakenne N:o 5) koehuoneessa tutkitut sisustusrakenteet asennettiin alumiinipintaa vasten ja ne peittivät kokonaan koehuoneen seinien ja katon sisäpinnan. Huoneilman kosteuden adsorptio sisustusmateriaaleihin oli mahdollista vain rakenteen ja huoneilman välisen, noin  $67 \text{ m}^2$  kokoisen sisäpinnan läpi.

Hirsiseinät koottiin seinäelementeiksi koehuoneen keskelle. Huoneilmaa vasten olevan hirsiseinien yhteenlaskettu pystysuuntainen projektiopinnan ala oli  $41,4 \text{ m}^2$ . Tämän lisäksi olivat pyöröhirsien päädyt huoneilmaa vasten. Pyöröhirsien muodosta ja halkeamista johtuen todellinen huoneilman ja rakenteen kosketuspinta-ala on em. projektiopinnan alaa n.  $10 \text{ m}^2$  suurempi, mikä suurentaa rakenteen tehollista kosteuskapasiteettia.

Eräissä kokeissa huoneen sisälle sijoitettiin hygroskooppisia villapeitteitä, joiden yhteenlaskettu vapaa kosketuspinta huoneilmaan oli  $16,8 \text{ m}^2$ .

Kuva 16. Vuorokausittain toistuva kosteuden tuotto koe- ja vertailuhuoneen ilmaan.





Tutkitut koerakenteet olivat (rakenteen numero ja rakenteen kuvaus):

1. Kuusipaneli ilman pintakäsittelyä kaikkien seinien ja katon sisäpinnassa, panelin mitat 14 x 120 mm<sup>2</sup> ja yhden panelin hyötyleveys on 110 mm, toimitus esivalmistettuina elementteinä, huoneilman pääsy kosketukseen panelin taustapintojen kanssa estetty.

2. Sisustuslevyksi tarkoitettu 22 mm paksu huokoinen puukuitulevy kaikkien seinien ja katon sisäpinnassa, levyt pinnoitamattomia, huoneilman pääsy kosketukseen levyjen taustapintojen kanssa estetty.

3. Akustinen vaneriverhottu elementti kaikkien seinien ja katon sisäpinnassa, elementin rakenne kerroksittain sisäpinnasta lukien:

- reijitetty (5 % pinta-alasta läpimitaltaan 8 mm reikiä) vaneri 9 mm, sisäpinnassa tiivis lakkaus,
- ilmapäli / rimarunko 18 mm,
- huokoinen puukuitulevy 12 mm,
- huoneilman pääsy kosketukseen levyjen taustapintojen kanssa estetty taustapinnan alumiinipaperilla.

4. Puukuitueristetty elementti kaikkien seinien ja katon sisäpinnassa, elementin rakenne kerroksittain sisäpinnasta lukien:

- maalaamaton kipsilevy 12 mm,
- puukuitueriste / runko 45 mm,
- vanerilevy 12 mm,
- huoneilman pääsy kosketukseen levyjen taustapintojen kanssa estetty taustapinnan PE-foliolla.

5. Pyöröhirsiseinä, läpimitta 160 mm:

- koottu koehuoneen keskilattialle erillisinä seinäkappaleina,
- seinän molemmat pinnat olivat vapaasti huoneilmaa vasten,
- seinien yhteenlaskettu pystysuun-

tainen projektiopinta-ala oli 41,4 m<sup>2</sup> mikä vastaa koehuoneen seinien sisäpinnan yhteenlaskettua alaa 42,6 m<sup>2</sup>,

- hirsien päätypinnat olivat vapaasti huoneilmaa vasten ja myöhemmin ne pinnoitettiin höyrytiivillä alumiinipaperilla,
- koehuoneen omat seinä- ja kattopinnot olivat ei-hygroskooppisia (AI-pinta).

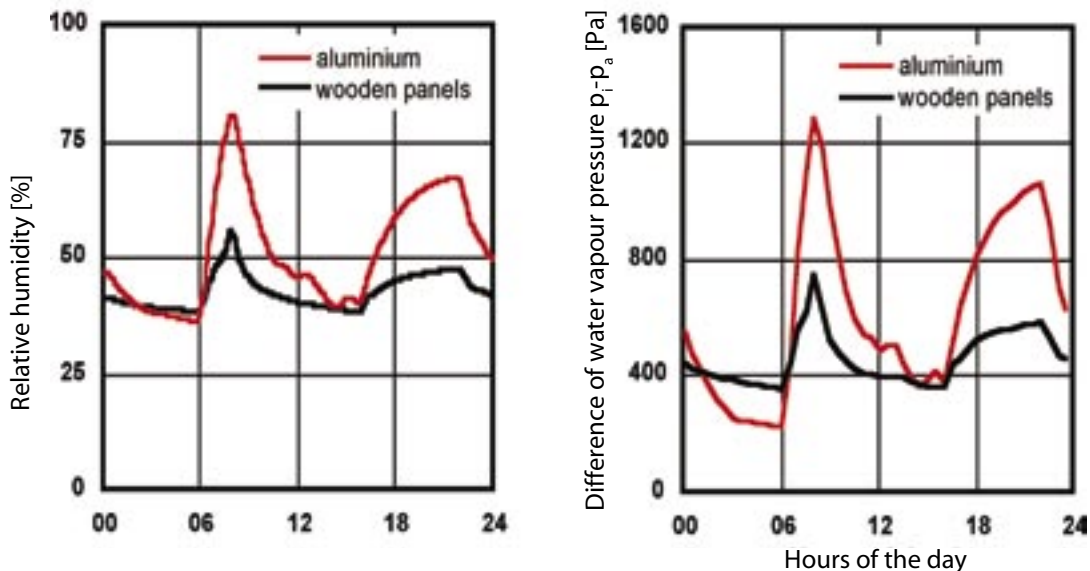
Kaikki kokeisiin toimitettu materiaali ilmastoitiin ennen kokeita 20 °C lämpötilassa ja 50 % suhteellisessa kosteudessa, jonka jälkeen suoritettiin asennus koehuoneeseen. Kuvassa 17 esitetään näkymä kuusipanelilla sisustettuun huoneeseen.

*Kuva 17. Näkymä paneloidusta koehuoneesta.*



Kuva 18. Ilman kosteuden vuorokautinen vaihtelu koehuoneessa, kun seinien ja katon sisäverhouksena on kuusipaneli (musta käyrä) ja alumiiniverhous (punainen käyrä).

### Effect of wooden panels on buffering



Tärkeimmät koetulokset esitetään kuvissa 19 ja 20. Kuvassa 18 esitetään kuusipanelin vaikutus koehuoneen ilman kosteuden vaihteluun, kun vertailukohtana on ei-hygroskooppinen alumiiniverhous.

Kuvan 18 mukaan paneliverhous vähensi huoneilman kosteuden vuorokausivaihtelun noin kolmasosaan verrattuna alumiinipintaan.

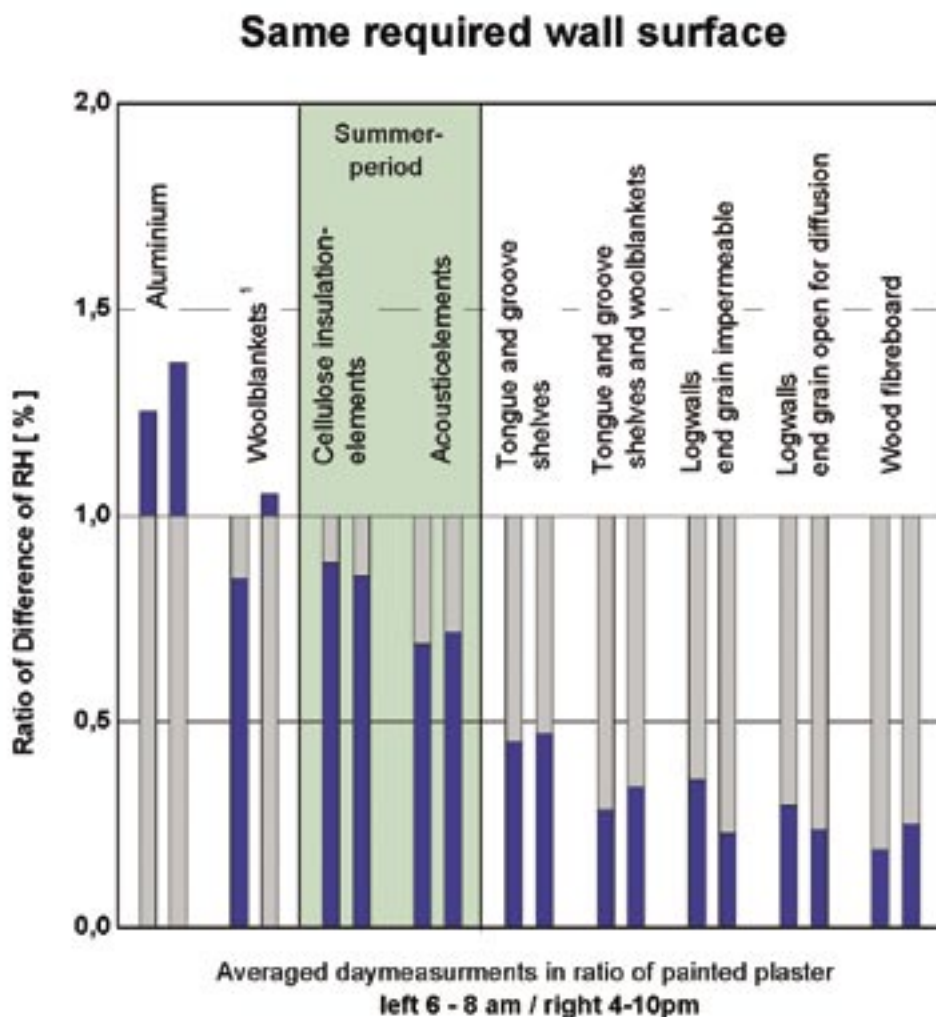
Alumiinipinnan lisäksi tutkittuja sisäverhousrakenteita verrattiin edellä kuvattuun Saksassa yleisesti kivitalojen sisäpinnoissa käytettävään maalattuun kipsilaastikerrokseen. Kuvassa 19 esitetään yhteenveto koehuoneissa suoritettujen mittausten tuloksista, kun vertailukohtana on maalattu kipsilaasti huoneiden sisäpinnoissa. Kuvassa 19 esitetään kullekin koetapaukselle tuloksena kaksi pylvästä, joista vasemmanpuoleinen ilmaisee koehuoneen

ilman suhteellisen kosteuden keskimääräisen nousun aamun klo 6.00 - 8.00 välisen kosteuskuormituksen vaikutuksesta ja vastaavasti oikeanpuoleinen illan klo 16.00 - 22.00 välisen kosteuskuormituksen vaikutuksesta. Kuvassa vertailurakenteella mitatulle suhteellisen kosteuden muutokselle annetaan arvo 1, johon muita koetapauksia verrataan. Koetapaukset olivat kuvan 19 mukaisessa järjestyksessä vasemmalta oikealle:

- koehuoneen sisäpinnat alumiinia,
- koehuoneen sisäpinnat alumiinia, huoneeseen lisätty hygroskooppiset villapeitteet,
- koehuoneen sisäpinnat verhottu koerakenteella No 4 (kipsilevy ja puukuitueriste),
- koehuoneen sisäpinnat verhottu koerakenteella No 3 (reikävaneri ja huo-

- koinen puukuitulevy),
- koehuoneen sisäpinnat verhottu koe- rakenteella No 1 (kuusipaneli),
- koehuoneen sisäpinnat verhottu koe- rakenteella No 1 (kuusipaneli) ja huoneeseen lisätty hygroskooppiset villa- peitteet,
- koehuoneessa hirsiseinärakenteet, joissa hirsien päädyt suojattu alumiini- nipaperilla,
- koehuoneessa hirsiseinärakenteet, joissa hirsien päädyt vapaasti huone- ilman kanssa kosketuksessa,
- koehuoneen sisäpinnat verhottu koe-

Kuva 19. Koehuoneen ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu aamun klo 6.00 - 8.00 (vasemmanpuoleinen pylväs) ja illan klo 16.00 - 22.00 (oikeanpuoleinen pylväs) kosteuskuormituksen aikana verrattuna huoneeseen, jonka sisäpinnoissa on maalattu kipsilaasti. Pystyakselilla esitetään huoneilman suhteellisen kosteuden muutos eri koetapauksissa, kun vertailurakenteella vastaava muutos saa arvon 1/22/.



<sup>1</sup> The surface of the woolblankets is lower (16,8 m<sup>2</sup>) than the other one (67 m<sup>2</sup>)

rakenteella No 2 (22 mm huokoinen puukuitulevy).

Tulosten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Alumiinipintaisena koehuoneen ilman suhteellisen kosteuden vaihteluväli oli n. 35 % suurempi kuin vertailurakenteen (maalattu kipsilaasti) vaihtelu.
- Pelkät hygroskooppiset villapeitteet alumiinipintaisessa koehuoneessa vaimensivat suhteellisen kosteuden vaihtelun lähes samaksi kuin vertailurakenteen vaihtelu.
- Kipsilevypintainen puukuitueristettä sisältävä verhous (rakenne No 4) pienensi suhteellisen kosteuden vaihtelun 85 % - 90 %:iin vertailurakenteen vaihtelusta ja noin 65 %:iin alumiinipintaisen huoneen vaihtelusta.
- Rei'itetty vanerielementti (rakenne No 3) pienensi koehuoneen ilman suhteellisen kosteuden vaihtelun noin 70 %:iin vertailurakenteen vaihtelusta ja noin 55 %:iin alumiinipintaisen huoneen vaihtelusta.
- Puupaneli (rakenne No 1) pienensi koehuoneen ilman suhteellisen kosteuden vaihtelun noin 45 %:iin vertailurakenteen vaihtelusta ja noin kolmannekseen alumiinipintaisen huoneen vaihtelusta.
- Kun puupaneloituun huoneeseen (rakenne No 1) lisättiin hygroskooppista villakuitua sisältäneet peitteet, pieneni ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu noin 30 % - 35 %:iin vertailurakenteen vaihtelusta ja noin neljännekseen alumiinipintaisen huoneen vaihtelusta.
- Pyöröhirsiseinä (rakenne No 5), jossa hirsien päät oli suojattu diffuusiotiiviisti, pienensi suhteellisen kosteuden

vaihtelun aamujaksolla 35 %:iin ja iltajaksolla 22 %:iin vertailurakenteen vaihtelusta.

- Pyöröhirsiseinä avoimin hirsipäädyin pienensi suhteellisen kosteuden vaihtelun vielä jossakin määrin edellisestä erityisesti aamujaksolla. Hirsiseinä oli rakenteen No 4 ohella ainoa tutkituista rakenteista, jossa iltajakson vaimeneminen oli suhteellisesti suurempi kuin lyhytaikaisen aamujakson. Tämä viittaa siihen, että mainituilla rakenteilla on kyky vastaanottaa kosteutta silloinkin kun kosteuskuormitus on pitkäkestoinen.
- Huokoinen puukuitulevy (rakenne No 2) pienensi ilman suhteellisen kosteuden vaihtelun aamujaksolla n. 18 %:iin ja iltajaksolla n. 25 %:iin vertailurakenteen vaihtelusta. Rakenne reagoi erityisen hyvin nopeisiin lyhytaikaisiin kuormitusvaihteluihin, jotka toistuvat vuorokausisyklillä.

Yhteenvedona kuvan 19 tuloksista voidaan todeta, että kaikki tutkitut rakenteet vaimensivat suhteellisen kosteuden vaihtelua paremmin kuin vertailurakenne ja merkittävästi paremmin kuin alumiinipintainen koehuone. Erityisen tehokkaita olivat pinnoittamaton puu ja huokoinen puukuitulevy.

#### 4.4.2 Tulokset kenttäkohteissa

Sisäilman kosteuden ja lämpötilan seurattamittauksia tehtiin asutuissa pientaloissa sekä Saksassa Holzkirchenin ympäristössä /22/ että eteläisessä Suomessa /12/. Saksalaiset mittaukset tehtiin puurakennuksissa sekä vertailun vuoksi myös kivirakenteisis-

sa pientaloissa. Kuva 20 esittää olohuonetta saksalaisessa puutalossa, jonka sisäverhous oli pintakäsittelemätöntä puuta. Talo on valmistunut vuonna 2000 ja siinä asuu viisihenkinen perhe.

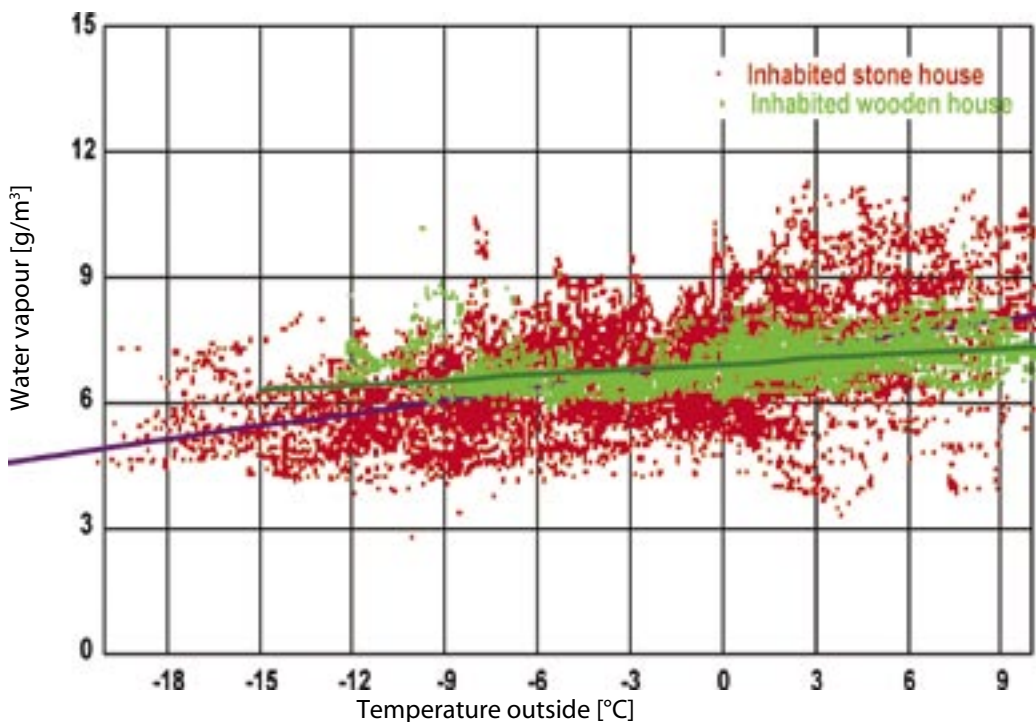
Kuvassa 21 esitetään mittaustulokset kuvan 20 puutalosta sijoitettuna samaan kuvaan vertailukohtana oleva kivitalon vastaavien tulosten kanssa. Kuvasta 21 voidaan todeta seuraavaa:

- Puutalossa sisäilman höyrysisältö vaihteli olennaisesti suppeammissa rajoissa kuin vertailurakennuksessa.
- Puutalossa sisäilman höyrysisältö riippui ulkoilman lämpötilasta lievemmin kuin vertailutalossa. Ulkolämpötilan laskiessa huoneilma ei kuivunut puutalossa niin paljon kuin vertailutalossa.
- Seurantamittauksen tulos on samankaltainen kuin laskentatulokset edellä kuvassa 13.



Kuva 20. Sisäkuva saksalaisen puutalon olohuoneesta, jossa suoritettiin sisäilman seurantamittauksia yhden lämmityskauden aikana.

Kuva 21. Kuvassa 20 esitetyn asutun puutalon ja vertailurakennuksena olevan kivitalon huoneilman vesihöyrysisältö seurantamittauksissa Saksassa yhden lämmityskauden aikana.





Vaikka asuttujen rakennusten sisäilman lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen vaikuttavat tekijät poikkeavat rakennuksittain toisistaan eikä niitä tunneta kovin hyvin, vastaa kuvan 21 mukainen puutalon mittaustulos hyvin simulointituloksia.

Suomalaisessa tutkimuksessa selvitetiin myös kenttämittauksin hygroskooppisten rakenteiden vaikutuksia sisäilman kosteuteen /12/. Mittaukset suoritettiin v. 2002 elokuussa 14 pientalossa helteisen sääjakson vallitessa. Seurantakohteet ryhmiteltiin ulkoseinärakenteiden perusteella massiivisiin ja hygroskooppisiin, massiivisiin ja ei-hygroskooppisiin, kevyihin ja hygroskooppisiin sekä kevyihin ja ei-hygroskooppisiin. Ryhmittelyn perusteena oli ulkoseinien kantavan rungon massiivisuus ja hygroskooppisuus sekä kevyissä rakenteissa lämmöneristeen hygroskooppisuus. Ryhmittelyssä ei selvitetty huoneilman ja hygroskooppisen aineen välissä olevan pinnoitteen tai sisäverhousrakenteen höyrynvastuksia, mikä olisi tämän raportin pinnoitteita koskevien tulosten (kuva 12) mukaan ollut välttämättömästä ryhmittelyn tarkoituksen saavuttamiseen fysikaalisesti oikein perustein. Myöskään väliseinien ja -pohjien rakenteita ei erikseen arvioitu em. kriteereitä käyttäen. Voidaan siis todeta, että suoritettu ryhmittely oli perusteiltaan puutteellinen eikä sillä ole riittävää yhteyttä rakenteiden teholliseen kosteuskapasiteettiin.

Huoneilman suhteellisen ja absoluuttisen kosteuden sekä yleisen lämpöviihtyvyyden pysyvyyden tarkastelut elokuun seurantajaksolla eivät osoittaneet merkittäviä eroja hygroskooppisiksi ja ei-hygroskooppisiksi ryhmiteltyjen rakenteiden välillä. Ryhmittelyn puutteellisuudesta johtuen seurantatuloksien tulkinta ei ole mahdollis-

ta, koska rakenteiden tehollista kosteuskapasiteettia ei ollut luotettavasti arvioitu.

Mielenkiintoinen havainto on, että Suomessa mitatut ei-hygroskooppiset rakennukset käyttäytyivät eri tavalla kuin edellä laboratoriossa ja kentällä mitatut tai laskennallisesti simuloidut tapaukset. Mitatut rakennukset olivat yleensä suhteellisen kosteuden vuorokausivaihtelun perusteella lähempänä hygroskooppisten kuin ei-hygroskooppisten tapausten käyttäytymistä. Yksityiskohtaisten selvitysten puuttuessa voidaan vain olettaa, että sisustuksella, ikkunatuuletuksella, avonaisilla väliovilla, ym. asumiseen liittyvillä tekijöillä, joilla lievittää hellekauden sisäilmahaittoja, on myös ollut suhteellisen kosteuden vaihtelua vaihentava vaikutus tuloksiin.



# 5. Rakenteiden kosteusturvallisuus

## 5.1 Olennainen vaatimus

Euroopan unionin Rakennustuotedirektiivi 89/106/ETY sisältää seuraavan olennaisen vaatimuksen:

**Rakennus on suunniteltava ja rakennettava 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 taloudellisesta kohtuullisen käyttöajan ajan.**

Olennainen vaatimus on EU:n jäsenmaita velvoittava ja se sisältää seuraavat periaatteet:

- Haitallisuuden kriteerinä on rakennuksen käyttäjille tai naapureille aiheutuva hygienia- ja terveysriski. Kosteuden muihin haittoihin kuten rakenteiden vaurioituminen lämmöneristyskyvyn, lujuuden ja kantavuuden tms. ominaisuuden suhteen viitataan vain epäsuorasti vaatimalla rakennukselta kohtuullinen käyttöikä.
- Haitallisen kosteuskeräytymän muodostumispaikkoina nimetään erikseen a) rakennusosien sisäosat ja b) rakennuksen sisäpinnat.
- Rakennuksen ja sen osien ja komponenttien käyttöiät ja huoltovälit tulee suunnitella, jotta rakennuksen koste-

usominaisuuksien säilymistä voidaan yleensä arvioida ja suunnitella.

Rakenteiden kosteusturvallisuutta tarkastellaan luvuissa 5.2 ja 5.3 erityisesti puurakentamisen näkökulmasta. Tarkastelu keskittyy kahteen pääkysymykseen, a) kosteuden haitallisuuden estäminen puurakennuksen sisällä ja b) kosteuden puskurivaikutuksen merkitys vaipan sisäpinnan kosteusturvallisuuden kannalta. Tämä jako noudattaa olennaiseen vaatimukseen sisältyvää jakoa.

## 5.2 Tuulensuojan ominaisuudet ja höyrynsulun vaatimukset

Rankarakenteiset vaipparakenteet, joissa lämmöneristeenä on kuitumainen vesihöyryä hyvin läpäisevä eriste, ovat yleisesti käytettyjä sekä Suomessa että muualla. Tällaisen rakenteen kosteusturvallisuuden kannalta kriittinen tarkastelukohta on tuulensuojana käytettävän ainekerroksen ja lämmöneristyksen rajapinta. Tarkastelukohdassa suhteellinen kosteus riippuu useista tekijöistä kuten:

- lämmöneristyksen ja huoneilman välissä olevien rakennekerrosten yhteenlaskettu höyrynvastus,
- tuulensuojan höyrynvastus,
- tuulensuojan lämmönvastus,
- tuulensuojan hygroskooppisuus,
- sisä- ja ulkoilmasto-olot.

Suomen rakentamismääräyksissä (Osa C2 Kosteus, Ohje 4.1.1.2) esitetään ohje: "Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen

vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen. Tästä voidaan kuitenkin poiketa, mikäli kokemukseen perustuen tai tutkimuksin on osoitettu, että rakenne on kosteusteknisesti toimintavarma.”

Edellinen ohje pätee silloinkin, kun tuulensuojan lämmönvastus on pieni (esim. kipsilevy tai muu ohut tuulensuojatuote) eikä tuulensuoja ole hygroskooppinen. Tuulensuojan lämmönvastuksen suurentaminen suhteessa koko rakennusosan lämmönvastukseen nostaa tarkastelukohdan lämpötilaa ja alentaa vastaavasti suhteellista kosteutta. Tuulensuojan hygroskooppisuus ja siihen perustuva kosteuden sitomiskyky vaimentaa suhteellisen kosteuden muutoksia tarkastelun kohteena olevassa rajakerroksessa.

Tutkimuksessa analysoitiin laskennallisesti mainittujen tekijöiden vaikutuksia homeen kasvuoloihin tuulensuojan sisäpinnassa. Laskelmat suoritettiin käyttäen Hannu Viitasen dynaamista mallia /16/, jolla ratkaistaan homeen kasvun tilanne rakennuspuun pinnalla ko. pinnan lämpötila- ja kosteusolojen perusteella. Tulos

ilmoitetaan taulukon 14 mukaista homeen kasvun tilannetta kuvaavaa homeindeksiä käyttäen.

Tarkasteltavan seinärakenteen lämmöneristyksenä oli 200 mm paksu kerros puukuitueristettä sisäverhouskerroksen ja tuulensuojan välissä. Tuulensuojan ulkopinta oli vapaasti hyvin tuulettuvaa ilmväliä vasten. Taulukossa 15 esitetään tiedot sisäverhouksesta ja tuulensuojasta rakennetapauksittain. Näiden lisäksi esitetään taulukossa 15 laskentatapauksittain seuraavat kaksi rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta keskeistä suhdelukua:

- rakenteen kokonaislämmönvastuksen ja tuulensujan lämmönvastuksen suhde  $R_T : R_{ts}$
- sisäverhouksen ja tuulensuojan höyrynvastusten suhde  $Z_{P_{sis}} : ZP_{ts}$

Taulukko 14. Homekasvun havaintoihin perustuva homeindeksi /16/.

Homeindeksi	Havaittu homekasvu	Huomautus
0	ei kasvua	pinta puhdas
1	mikroskoopilla havaittava kasvu	itiöt itävät, alkavaa homekasvua
2	selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	pinnalla melkoisesti rihmastoja, yli 10 % peitto tutkittavasta alasta
3	ensimmäiset visuaaliset havainnot	uusia itiöitä alkaa muodostua
4	selvä silmin havaittava kasvu	10 % - 50 % peitto tutkittavasta alasta

Taulukko 15. Seinärakenteen sisäverhouksen rakenne ja tuulensuojien laskentatapauksittain.

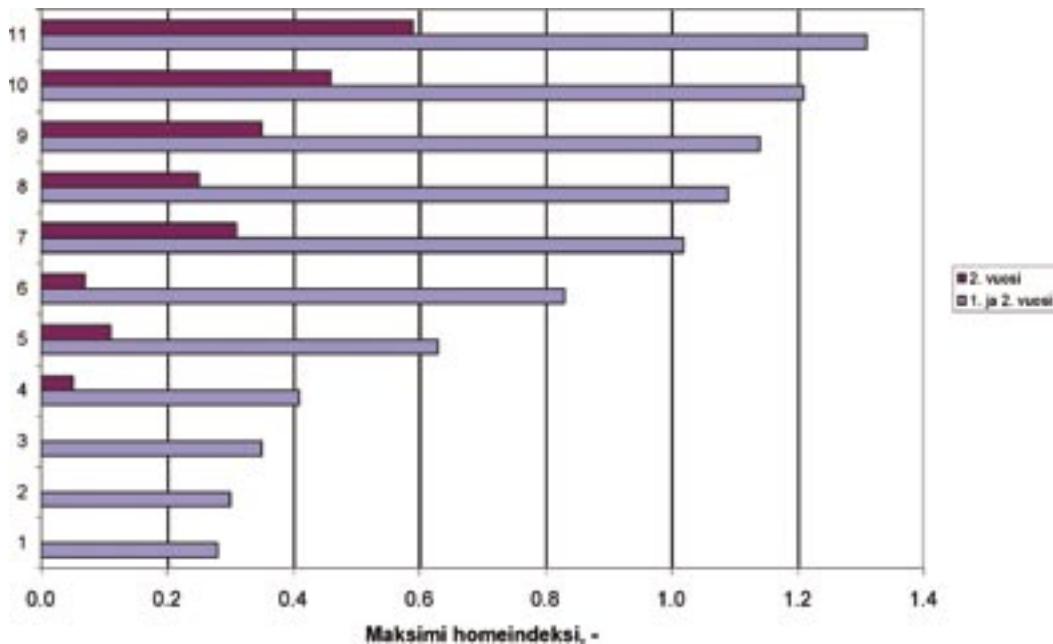
Seinä-rakenteen no	Sisäverhouksen rakenne	Tuulensuoja	$R_T : R_{ts}$	$Z_{P_{sis}} : Z_{P_{ts}}$
1	kipsilevy 11 mm, PE-muovikelmu	huokoinen puukuitul., 25 mm	11,7	161,5
2	kipsilevy 11 mm, PE-muovikelmu 5-kertaisena	huokoinen puukuitul., 25 mm	11,7	801
3	kipsilevy 11 mm, ei höyryn-/ilmansulkua	huokoinen puukuitul., 25 mm	11,7	1,47
4	kipsilevy 11 mm, ei höyryn-/ilmansulkua	huokoinen puukuitul., 12 mm	23,4	3,06
5	kipsilevy 11 mm, ei höyryn-/ilmansulkua	ei-hygroskooppinen <sup>1)</sup> tuulensuoja, 25 mm	11,7	1,47
6	kipsilevy 11 mm, rakennuspaperi 13-kertaisena	kipsilevy 9 mm	87,7	4,92
7	kipsilevy 11 mm, ei höyryn-/ilmansulkua	kipsilevy 9 mm 4-kertaisena	22,7	1,02
8	kipsilevy 11 mm, rakennuspaperi 3-kertaisena	kipsilevy 9 mm	87,7	2,22
9	kipsilevy 11 mm, rakennuspaperi 2-kertaisena	kipsilevy 9 mm	87,7	1,92
10	kipsilevy 11 mm, rakennuspaperi 1-kertaisena	kipsilevy 9 mm	87,7	1,62
11	kipsilevy 11 mm, ei höyryn-/ilmansulkua	kipsilevy 9 mm	87,7	1,02

<sup>1)</sup> Vastaa ominaisuuksiltaan 25 mm paksua huokoista puukuitulevyä, joka laskennassa on käsitelty ei-hygroskooppisena tuotteena.

Kuvassa 22 esitetään taulukossa 15 kuvattujen seinärakenteiden tuulensuojan sisäpinnan homeindeksin lasketut ensimmäisarvot sekä ensimmäisenä että toisena vuotena laskennan alkuhetkestä. Ensimmäisen vuoden tuloksiin vaikuttaa rakenteen ja materiaalien alkukosteus, joka vastasi tasapainokosteutta 80 % suhteellisessa kosteudessa. Laskennassa rakenteiden kos-

teuskuormitus perustuu alkukosteuden lisäksi vesihöyryn diffuusion sisäpinnan ja ajoittain myös tuulensuojan ulkopinnan läpi sisään päin. Sisäilman höyrystisältö on jatkuvasti 4 g/m<sup>3</sup> suurempi kuin ulkoilman. Ulkoilmastona on Helsingin tunnittainen sää.

Kuva 22. Sisäilman kosteuskuorma +4 g/kg. Homeindeksin korkein arvo tuulensuojan sisäpinnalla kahden ensimmäisen vuoden aikana laskennan alusta, kun rakenteen alkukosteus vastasi tasapainokosteutta 80% suhteellisessa kosteudessa. Y-akselin numerointi viittaa taulukon 15 rakennetapauksien numerointiin.



Kuvan 22 perusteella on tehtävissä seuraavat päätelmät:

- Homeindeksi saavutti kaikissa laskennatapauksissa korkeimman arvonsa ensimmäisen vuoden aikana, mikä johtui verraten korkeasta alkukosteudesta ja sen uudelleen jakautumisesta sekä suhteellisen kosteuden noususta tuulensuojan sisäpinnassa. Tuulensuojan ollessa huokoinen puukuitulevy (rakenteet No 1 - 4) oli homeindeksin enimmäisarvo kuitenkin vain 0,4 tai pienempi, mikä tarkoittaa mikroskooppisessa havainnoinnissa lähes homeettomuutta.
- **Toisena vuotena yksikään homeindeksin arvo ei noussut lukemaan 1, mikä on mikroskooppisesti havaittavan kasvun raja-arvo.**

- Tuulensuojan lämmönvastuksen suureneminen parantaa merkittävästi rakenteen kuivumiskykyä ja samalla kosteusturvallisuutta. Höyrynvastusten suhteen  $Z_{P_{sis}} : Z_{P_{ts}}$  arvo noin 1,5 antoi homeindeksillä arvioituna käytännössä saman tuloksen kuin suhteen arvo 161 tai 800 (rakenteet No 1, 2 ja 3), kun tuulensuojana on huokoinen puukuitulevy 25 mm.
- Tuulensuojan hygroskooppisuus parantaa rakenteen kosteusturvallisuutta (vertaa rakenteet No 3 ja 5).
- Tuulensuojan ominaisuuksilla on olennainen merkitys rakenteen kuivumiskyvyn ja lämmöneristyksen sisäisen kosteusturvallisuuden kannalta. Lämmöneristyksen kuivumismahdollisuus ulospäin paranee tuulensuojan höy-

rynvastuksen pienetessä ja lämmönvastuksen kasvaessa. Lämpöä eristävän tuulensuojan höyrynvastus on käytännössä kuitenkin hyvä olla pienempi kuin sisäverhouskerrosten yhteenlaskettu höyrynvastus (ZP<sub>sis</sub> : ZP<sub>ts</sub> vähintään 2:1).

### **Yhteenveto tuulensuojan sisäpinnan kosteusturvallisuudesta**

#### **Sisäilman kosteuden vuorokausivaihtelu**

Huoneilman kosteuden lyhytjaksoinen vaihtelu ei vaikuta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen tuulensuojan sisäpinnassa. Sisäilman keskimääräinen kosteus on merkitsevä tarkastelukohdan kannalta.

#### **Kosteuslähteenä sisäilman kosteuskuorma**

Sisäverhouskerroksen ja tuulensuojan vesihöyrynvastusten suhde, tuulensuojan hygroskooppisuus sekä tuulensuojan lämmönvastus ovat merkittävästi vaikuttavia tekijöitä. Tuulensuojan lämmönvastuksen suurentaminen nostaa sisäpuolisen rakenteen lämpötilaa ja alentaa vastaavasti suhteellista kosteutta sekä lisää rakenteen kykyä kuivua ulospäin. Tuulensuojan on kuitenkin oltava vesihöyrynvastukseltaan pienempi kuin rakenteen sisäverhouskerroksen.

#### **Rakenteen sisäinen kosteuskeräytymä / alkukosteus**

Tuulensuojan vesihöyrynvastus on kriittinen tekijä. Kuivumiskykyä on oltava erityisesti keväällä lämpötilan noustessa tuulensuojan sisäpinnassa.

#### **Tuulensuojan kosteuskapasiteetti parantaa lämmöneristyksen kuivumista**

Hygroskooppinen tuulensuoja kykenee vastaanottamaan eristetilasta/sisäilmasta ja ulkopuolelta tulevaa kosteutta. Suhteellinen kosteus eristetilän ja tuulensuojan rajakerroksessa pysyy keskimäärin matalampana kuin vesihöyry- ja lämmönvastukseltaan samanlaisen ei-hygroskooppisen tuulensuojan tapauksessa.

#### **Rakenteen kosteustekniseen suunnitteluun uusi näkökulma**

Rakenteen hyvä kuivumiskyky on varmin taie kosteusturvallisuudesta. Kuivumiskyky tulee suunnitella ja toteuttaa hyvin, sillä kuivumiskykyinen rakenne pystyy käsittelemään turvallisesti rakennuskosteuden sekä satunnaiset kosteuskeräytymät ja on siten ratkaisuna "vikasietoinen". Kuivumiskyvyn lisäksi on toki tarpeen suunnitella sisä- ja ulkopuolelta tulevien kosteuskuormitusten estäminen, mutta ei siten, että rakenteen kuivumiskyky heikkenee.

## 5.3 Hygroskooppinen puskurivaikutus ja rakenteen sisäpinnan kosteusolot /23/

Kuten edellä tutkimustulokset osoittavat huoneilman suhteellinen kosteus vaihtelee huoneen sisäisen kosteuskuormituksen vaihdellessa. On osoitettu, että rakenteiden suuri tehollinen kosteuskapasiteetti merkitsee puskurivaikutusta, joka tehokkaasti vaihtaa huoneilman suhteellisen kosteuden vaihtelua. Tällä on vaikutusta rakenteiden sisäpintojen kosteusoloihin. Mielenkiintoisia ovat kohdat, joissa sisäpinnan lämpötila on matalampi kuin keskimäärin muualla. Näitä kohtia ovat mm. kylmäsiltojen vaikutusalueet, kalusteiden taustat, ikkunan valoaukon alaosa, nurkkaukset ja rakennusosien liittymät. On mahdollista, että sisäpinta voi paikallisesti ja hetkellisesti olla kosteusteknisen toimivuuden kannalta riskialueella.

Rakenteen paikallinen kokonaislämmönvastus ja sisäpuolinen pintavastus määrää jatkuvuustilassa rakenteen sisäpinnan pintalämpötilan suhteellisen arvon (F) kaavan (2) mukaisesti.

$$F = (T_p - T_u) / (T_s - T_u) \quad (2)$$

$T_p$  on rakenteen sisäpinnan paikallinen lämpötila, K

$T_u$  on ulkoilman lämpötila, K

$T_s$  on sisäilman lämpötila, K

Kaavan (2) mukaan sisäilman lämpötilan suhteellinen arvo on 1 ja ulkoilman 0,

jolloin rakenteen sisäpinnan paikallinen lämpötilan suhteellinen arvo on em. ääriarvojen välillä.

Suhteellista lämpötilaa (F) voidaan käyttää arvioitaessa pintalämpötilaa eri ulkoilman lämpötiloilla. Mikäli pintalämpötila alittaa sisäilman kastepistelämpötilan, voi sisäilman kosteus aiheuttaa kondenssia rakenteen pinnalla tai vastaavasti, jos rakenteen lämpötila alittaa lämpötilan, jossa sisäilman kosteussisältö edellyttää suhteellista kosteutta >80 %, ollaan homeen kasvun kannalta riskirajalla.

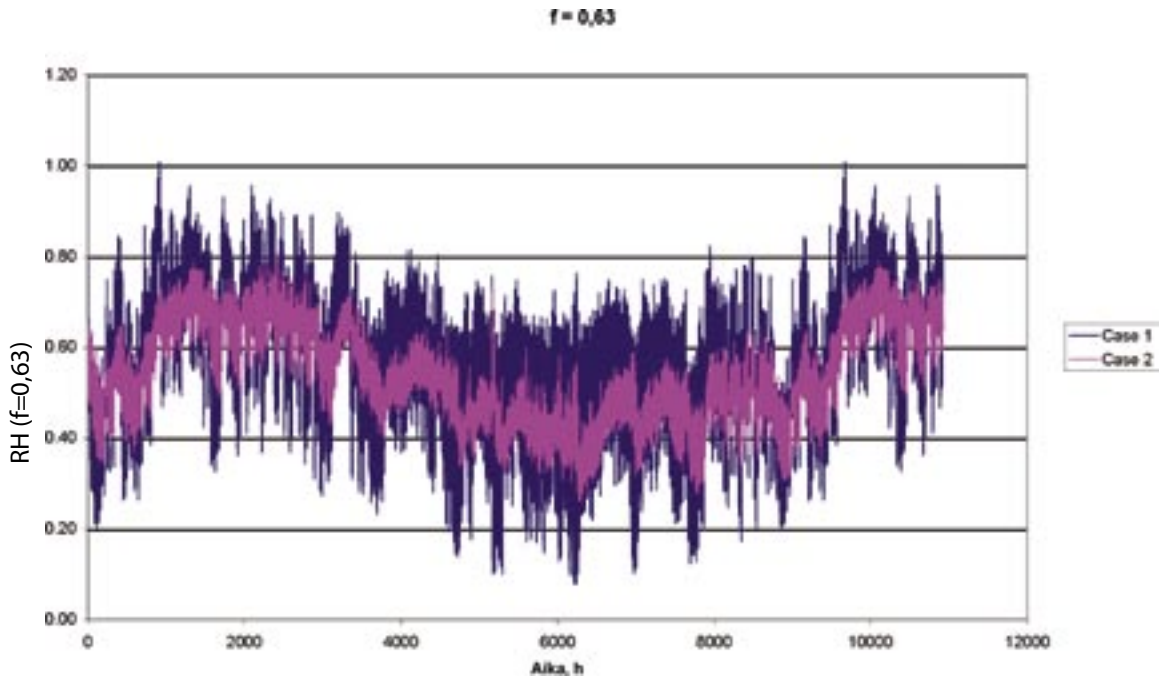
Kuvassa 23 on esitetty pinnoiltaan vesihöyrytiivin, ei-hygroskooppisen huoneen ja muutoin samanlaisen hygroskooppista massaa sisältävässä huoneessa paikallisen kylmäsiltoarakenteen kohdalla rakenteen sisäpinnassa vallitseva suhteellinen kosteus ajan funktiona /23/. Huone on kohdassa 4.4.1 kuvattu kahden aikuisen makuuhuone, jossa rakenteet ovat joko vaihtoehdon 1 (hygroskooppinen) tai 2 (ei-hygroskooppinen) mukaiset. Ilmastona on Helsingin sää ja kylmäsiltojen kohdalla pintalämpötilan suhteellinen arvo  $F = 0,63$ . Esim. jos huoneilman lämpötila on  $22\text{ °C}$  ja ulkoilman  $-10\text{ °C}$ , vastaa arvo  $F = 0,65$  sisäpinnan paikallista lämpötilaa  $10,8\text{ °C}$ .

Höyrytiivin (ei-hygroskooppisen) rakenteen tapauksessa pinnalla esiintyy hetkellisesti jopa kondenssia ja suhteellinen kosteus ylittää 80% ko. pisteessä 7,6 % kokonaisajasta.

Kuvassa 23 esitetyn laskentajakson tulosten mukaan rakenteen sisäpinnan suhteellinen kosteus oli kylmäsiltojen kohdalla yli 80%

- Case 1, ei-hygroskooppinen tapaus: 7,6 % kokonaisajasta
- Case 2, hygroskooppinen tapaus: 0 %

Kuva 23. Suhteellinen kosteus makuuhuoneen seinän sisäpinnassa kylmäsil-  
lan kohdalla, kun rakenteilla on suuri tehollinen kosteuskapasiteetti (case 2)  
tai ei ole kosteuskapasiteettia (case 1) /23/.



Johtopäätöksenä voidaan todeta, että rakenteiden tehollisen kosteuskapasiteetin merkitsemä sisäilman kosteuden puskurivaikutus vähentää olennaisessa vaatimuksessa mainittua uhkaa rakenteiden sisäpintojen kosteushaitoista. Asialla on käytännöllistä merkitystä Suomen oloissa (Esim. ikkunan sisäpinnan yöaikainen kondenssi makuuhuoneessa), mutta merkitys suurenee siirryttäessä etelämmäksi. Syynä ovat yleisesti ylläpidettävät matalat huonelämpötilat talvella esim. makuuhuoneissa, korkeampi ulko- ja sisäilman kosteuspiitoisuus sekä vakavien kylmäsiltojen yleisyys Suomeen verrattuna.



## 6. Tulosten käytännöllinen merkitys

### 6.1 Rakenne- ja rakennussuunnittelun uusi konsepti

Tutkimustulokset osoittavat, että hygroskooppisilla rakennusaineilla kuten puu ja puupohjaiset materiaalit voidaan rakentaa merkittävä tehollinen kosteuskapasiteetti, joka on vuorovaikutuksessa sisäilman kanssa ja joka vaimentaa sisäilman kosteuspiitoisuuden ajallista vaihtelua, kun kosteuskuormitus huoneiloissa on ajan funktiona vaihteleva. Puskurivaikutuksen esiintyminen on osoitettu laskennallisesti ja kokeellisesti sekä laboratoriossa että myös asutussa sisäpuolelta pintakäsittelemättömällä puulla sisustetussa puutalossa.

Kosteuden puskurivaikutuksella voidaan parantaa sisäilman laatua sekä suoraan että välillisesti. Tulosten mukaan asuntojen huoneilman suhteellinen kosteus pysyy hyvin suositusalueella, kun rakenteilla on suuri tehollinen kosteuskapasiteetti. Rakennusalan ammattilaiset tietävät yleisesti, että rakennuksen suuri sisäinen tehollinen lämpökapasiteetti (terminen massiivisuus) pitää sisälämpötilan vakaana. Näillä molemmilla puskurivaikutuksilla on suora yhteys rakennuksen sisäilmastoon, joten ajatus passiivisten keinojen suunnitelmallisesta hyödyntämisestä tuntuu luonnolliselta. Tämän tavoitteen systemaattista toteuttamista rakennussuunnittelussa voidaan kutsua suunnittelun uudeksi konseptiksi.

Itse asiassa sisäilman lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle on asetettu tavoitearvoja sisäilman laatuluokituksessa /21/ siten, että kummankin suureen pysyminen luokituksessa asetetulla tavoitealueella määrittelee sisäilmaluokan.

Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen tarkoittaa monen muun toimenpiteen ohella rakennuksen vaipan ominaislämpöhäviön pienentämistä lämmöneristystä parantamalla. Tällöin rakennus luonnostaan herkistyy erilaisten sisäisten ja ulkoisten lämpökuormien vaikutuksille. Energiatehokkuuden vaatimusten lisäksi rakennussuunnittelun lähtökohdan muodostaa rakennuksen ja tilojen käyttötarkoitus, joka määrää a) vaatimukset sisäilmastolle ja b) pääosan rakennuksen sisäisestä kuormitustekijöistä. Näiden lisäksi lähtökohtina ovat kaikki ulkoiset kuormitustekijät kuten sää, rakennuksen suuntaus ja välitön ympäristö. Passiivisista keinoista on suunnittelussa aina hyötyä, mutta ne soveltuvat erittäin hyvin käytettäväksi, kun

- sisäilman lämpötila ja kosteus pyritään pitämään ympärivuotisesti (myös kesällä) vakaana halutulla alueella,
- sisäiset ja ulkoiset kuormitukset ovat vaihtelevia mutta kohtuullisia niin, ettei koneellinen ilmastointi tai jäähdytys tehostamaan ajoittain ilmanvaihtoa ole täysin välttämätöntä,
- rakennuksen lämpöhäviöt ovat pienet ja rakennus pyrkii tästä syystä herkistämään kuormituksille ja niiden vaihtelulle.

Rakennusten sisälämpötilan suunnitteluun ja laskentaan on olemassa kaupallisia ohjelmistoja ja tulossa on kansainvälinen laskentastandardi (EN ISO 13792). Sen sijaan huoneilman kosteuden suunnittelu-

työkalut toistaiseksi puuttuvat. Tutkimustyöhön soveltuvia laskentaohjelmistoja toki on, mutta ne ovat vaativia käytettäviä. Jotta asiassa tapahtuisi edistymistä, on kohdassa 6.3 esitetty ehdotus uudeksi rakenteiden tehollisen kosteuskapasiteetin luokitteluksi. Luokittelu on tarkoitettu suunnittelijan avuksi helpottamaan rakenneratkaisujen valintaa kosteuden puskurivaikutuksen toteuttamiseksi käytännön rakentamisessa.

## 6.2 Tehollisen kosteuskapasiteetin rakentamisperiaatteet

Rakenteen ja rakennusaineiden hygroskooppisuuden hyödyntäminen perustuu huoneilman ja rakenteen sekä siinä olevien hygroskooppisten aineiden mahdollisimman esteettömään kontaktiin. Ilmassa olevan vesihöyryn tulee voida sitoutua aineeseen ja vapautua siitä takaisin huoneilmaan.

Huoneilmassa olevan vesihöyryn siirtyminen rakenteeseen tai siitä takaisin huoneilmaan voi tapahtua kahdella mekanismilla:

- höyryn diffuusiona rakenteen sisäpinnan läpi ja syvemmälle rakenteeseen vesihöyryä hyvin läpäisevässä aineessa, kuten kipsilevy ja huokoinen puukuitulevy,
- vesihöyryn konvektiona rakenteen ilmapäliin tms. tilaan sisäpuolelta johdetun ilmavirtauksen mukana ja diffuusiona rakenteen sisällä olevien ainepintojen läpi (esim. konvektiona paneliverhouksen takana olevaan ilmapäliin ja diffuusiona panelin taustapinnan läpi).

Vesihöyryn sitoutumisnopeus ja rakenteen tai aineen tehollisen kosteuskapasiteetin suuruus riippuu neljästä päätekijästä, jotka ovat:

- mahdollisen sisäpuolen pinnoitekerroksen höyrynvastus ja hygroskooppisuus,
- huoneilman kanssa vuorovaikuttavien hygroskooppisten aineiden sorptiokäyrän muoto,
- huoneilman kanssa vuorovaikuttavien aineiden vesihöyryn diffuusiokerroin,
- huoneilman ja aineiden vuorovaikutuspinta-alan suuruus.

Suuren tehollisen kosteuskapasiteetin saavuttaminen edellyttää aina, että huoneilman ja hygroskooppisten materiaalin välissä oleva pinnoite läpäisee hyvin vesihöyryä (ks. kohta 6.4).

Rakenteen aktiivinen kosteutta sitova osa voi olla ohut huoneilmaan rajoittuva pintakerros kuten puun tai lastulevyn pintaosa tai paksumpi ainekerros, kun vesihöyryn diffuusiokerroin on suuri (esim. huokoinen puukuitulevy, kipsilevy / puukuitueriste jne.).

Hygroskooppisten aineiden sorptiokäyrän tulisi olla muodoltaan nouseva huoneilman suhteellisen kosteuden koko vaihtelualueella. Nouseva käyrän muoto tarkoittaa sitä, että aine kykenee sitomaan vesihöyryä aina, kun suhteellinen kosteus on nouseva riippumatta suhteellisen kosteuden tasosta. Kuusen ja männyn sorptiokäyrien muoto on kosteuden sitomisen kannalta edullinen.

Aineen suuri diffuusiokerroin vesihöyryn suhteen lisää kosteuden sitomiseen osallistuvan aktiivisen ainekerroksen paksuutta. Esim. 12 mm paksu huokoinen puukuitulevy osallistuu tehollisen kosteuskapasiteetin muodostamiseen koko pak-

suudeltaan.

Huoneilman ja hygroskooppisen aineen luonteva vuorovaikutuspinta-alan suuruus on seinien ja katon yhteenlaskettu sisäpinnan ala. Pinta-alan suurentamisella tästä ei juurikaan paranneta puskurivaikutusta. Sen sijaan pinta-alan olennainen pienentäminen vähentää merkittävästi puskurivaikutusta. Pinta-alaa voidaan kasvattaa vaikuttamalla pinnan muotoon tai antamalla huoneilman kiertää rakenteessa olevan ilmavälin tai tilan kautta. Puun päädyn tehollinen kosteuskapasiteetti rungon pituussuuntaan on noin nelinkertainen verrattuna poikkisuuntaan. Tämä suuntariippuvuus antaa mahdollisuuksia toteuttaa hyvä puskurivaikutus edellämainittua pienemmälläkin pinta-alalla. Puun lastuminen kasvattaa vuorovaikutuspinta-alaa voimakkaasti ja hyödyntää tehollisen kosteuskapasiteetin suuntariippuvuuden. Vanha tuttu sementillä liimattu lastuvillalevy katon sisäpinnassa on tehokas ilman kosteuden tasaaja.

### **6.3 Rakenteiden tehollinen kosteuskapasiteetti - luokitteluperiaatteet**

Tässä luvussa esitetään ehdotus hygroskooppisten materiaalien ja materiaaliyhdistelmien luokittelemiseksi tehollisen kosteuskapasiteetin suhteen. Luokittelu perustuu tehollisen kosteuskapasiteetin testaamiseen vuorokausisyklillä vaihtelevissa kosteusoloissa normaalissa huoneilman lämpötilassa. Suomen ilmastossa ehdote-

taan testausta erikseen sekä kesä- että talvioloihin. Ehdotetut luokkarajat perustuvat tämän tutkimuksen koetuloksiin koskien vesihöyryn sitoutumista erilaisiin koemateriaaleihin sekä tulosten laskennallisesti osoitettuun merkitykseen silmälläpitäen kosteuden puskurivaikutusta asuinhuoneiden vuorokausisyklin kuormitustilanteissa.

#### **Hygroskooppiset materiaalit ja materiaaliyhdistelmät - ehdotus tehollisen kosteuskapasiteetin luokituksiksi**

##### **Luokituksen kohde**

Luokituksen kohteena on materiaalin tai materiaaliyhdistelmän tehollisen kosteuskapasiteetin testaustulos, joka on saatu tämän kirjan luvussa 4.2 kuvatulla vuorokausisyklin testausmenetelmällä, joka käsittää 8 h kostumis- ja 16 h kuivumisjaksot. Tehollinen kosteuskapasiteetti ilmoitetaan pinta-alayksikköä kohti laskettuna ( $\text{g/m}^2$ ), jolloin pinta-ala lasketaan rakenteen ja huoneen välisen projektiopinnan (otsapinta-alan) mukaan. Ts. huoneilman ja rakenteen välinen todellinen kosketuspinta-ala voi olla rakenneratkaisusta ja pinnan muodosta riippuen projektiopinnan alaa suurempi, mutta tulos lasketaan projektiopinnan yksikköä kohti.

##### **Testausolot**

Testauslämpötila on vakio  $22\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ . Koekappaleeseen kosketuksessa olevan ilman kostumis- ja kuivumisvaiheen suhteellinen kosteus pidetään vakiona asetteluarvossaan  $\pm 3\text{ \% RH}$  tarkkuudella. Suhteelliset kosteudet valitaan ottaen huomioon vuodenaikojen vaikutus. Suomen oloissa suositellaan käytettäväksi seuraavilla alueilla

Vuodenaika	Kostumisjakso, RH	Kuivumisjakso, RH	Muutos, RH
Talviolot	50 %...65 %	25 %...45 %	25 ± 2
Kesäolot	65 %...80 %	45 %... 60 %	25 ± 2

olevia suhteellisen kosteuden arvoja:

Kostumis- ja kuivumisjaksojen RH-arvo voidaan valita edellä esitetyissä rajoissa, kunhan valitut arvot pidetään muuttumattomina testin aikana ja niiden erostus täyttää edellä kohdassa "Muutos" esitetyn vaatimuksen.

### Koesuoritus

Koekappaleet ilmastoidaan ennen testausta tasapainotilaan tai, ellei sitä saavuteta, vähintään 5 vrk ajan 22 °C ± 3 °C lämpötilassa ja testauksen kostumis- tai kuivumisjakson valitussa suhteellisessa kosteudessa. Koetulokset määritetään neljännen tai sitä myöhemmän syklin punnitustuloksien perusteella. Koekappaleiden massa punnitaan syklin alkaessa ( $m_0$ ), 8 h kuluttua syklin alusta kostutusvaiheen päättyessä ( $m_{8h}$ ) ja tästä 16 h kuluttua kuivumisvaiheen ja koko syklin päättyessä ( $m_{16h}$ ).

### Koetulosten esittäminen

Koetuloksina lasketaan koekappaleen massan lisäys ( $\Delta m_{8h}$ ) kostumisvaiheen aikana ja vastaavasti massa vähentyminen ( $\Delta m_{16h}$ ) kuivumisvaiheen aikana.

$$\Delta m_{8h} = m_{8h} - m_0 \quad \Delta m_{16h} = m_{8h} - m_{24h}$$

### Tehollisen kosteuskapasiteetin luokat

Luokittelu tapahtuu kostumisvaiheen massamuutoksen perusteella seuraaviin luokkiin:

Luokka	Massan muutos $\Delta m_{8h}$ , g/m <sup>2</sup>
I. Erinomainen	$\Delta m_{8h} > 50$
II. Hyvä	$50 \geq \Delta m_{8h} > 20$
III. Kohtalainen	$20 \geq \Delta m_{8h} > 10$
IV. Heikko	$10 \geq \Delta m_{8h} > 5$
0. Merkityksetön	$5 > \Delta m_{8h}$

Massan muutos  $\Delta m_{8h}$  saa kokeessa poiketa massan muutoksesta  $\Delta m_{16h}$  enintään 25 % laskettuna suuremmasta arvosta.

## 6.4 Sisäpuolisen pinnoitteen merkitys

Kun hygroskooppisen aineen ja huoneilman välinen rakenteen pinta maalataan tai tapetoidaan, voi pinnoitteen höyrynvastus ja hygroskooppisuus vaikuttaa merkittävästi aineen ja rakenteen teholliseen kosteuskapasiteettiin. Kuvan 12 mukaan kuisipanelin tehollinen kosteuskapasiteetti pienenee 50 % pinnoittamattoman panelin vastaavasta arvosta, kun paneli pinnoitetaan ei-hygroskooppisella pintakerroksella, jonka höyrynvastus on  $1 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg. Kun pinnoitteen höyrynvastus on edelliseen verrattuna kolminkertainen, jää tehollisesta kosteuskapasiteetista jäljelle vain 25 %.

Kuivissa tiloissa seinien sisäpinnoissa käytettävien kaupallisten maalipinnoitteiden höyrynvastukset ovat yleisesti alueella

$1...5 \times 10^9$  (m<sup>2</sup> s Pa)/kg (Taulukko 7, Liite 1). Liittettä 1 tarkasteltaessa on otettava huomioon, että useat esitetyt höyrynvastuksen lukuarvot on mitattu ns. märkäkuppimenetelmällä, mikä tarkoittaa korkeaa suhteellista kosteutta verrattuna käyttöoloihin. Normaalisti pinnoitteen höyrynvastus pienenee suhteellisen kosteuden noustessa erityisesti korkean suhteellisen kosteuden alueella. Kuvan 13 mukaan em. pinnoitteen höyrynvastuksen vaihtelu johtaa kuusipanelin tehollisen kosteuskapasiteetin vaimenemisalueeseen 50 %...15 %:iin pinnoittamattoman panelin tehollisesta kosteuskapasiteetista. Tämä on syy siihen, että luvussa 4.4.2 kuvatuissa suomalaisissa seurantamittauksissa kohteiden ryhmitely hygroskooppisiin ja ei-hygroskooppisiin rakenteihin epäonnistui eikä tuloksista ilmennyt selkeitä eroja eri ryhmien välillä. Käytännöllinen johtopäätös on yksinkertainen. Sisäpuolisen pinnoitteen olennaista merkitystä ei ole ymmärretty (tavanomainen suunnittelija, rakentaja ja rakennuksen käyttäjä). Hygroskooppisuuden mahdollistama puskurivaikutus on käytännössä menetetty liian höyrytiivisiin pinnoitteen vuoksi.

Taulukosta 7 ja liitteestä 1 löytyy myös pienen höyrynvastuksen pinnoitteita, joilla hygroskooppisen aineen puskurivaikutus voidaan pääosin säilyttää. Tässä tutkimuksessa testatuista pinnoitteista oli kaksi riittävän läpäiseviä:

- Novaplast 2 (Taulukko 7)
- Lämpöleijonan palosuojamaali (Taulukko 8)

Liitteessä 1 on mainittu useita mielenkiintoisia pinnoitteita, joista eräs on paperitapetti. Tämä on paitsi läpäisevä myös itse hygroskooppinen materiaali. On ilmeis-

tä, että lukuisat liitteen 1 maalit toimivat vähintäänkin tyydyttävästi silmälläpitäen hygroskooppisen alustamateriaalin puskurivaikutuksen säilymistä. Enemmistö on kuitenkin selkeästi liian höyrytiivisiä.

Saatujen tutkimustulosten valossa on aiheellista laatia maalien, tapettien yms. pinnoitteiden valintaa helpottava, suunnittelijoille ja käyttäjille kohdistettu tietopaketti eri ratkaisujen soveltuvuudesta puskurivaikutuksen säilyttämiseen. Esitettävä tekninen ominaisuus voisi olla luvussa 6.3 esitetty tehollisen kosteuskapasiteetin luokka määritettynä samassa kohdassa kuvatulla menetelmällä. Testaustulos pätee alustan ja pinnoitteen muodostamalle materiaaliyhdistelmälle, joten saman pinnoitteen tavallisimmat yhdistelmät on syytä testata erikseen.

## 6.5 Suunnittelun ja tuotekehityksen näkymät

Kuten aikaisemmin on jo todettu, kosteuden puskurivaikutuksen suunnitteluun tarkoitettuja ohjeita ja menetelmiä ei ole valmiina. Niiden tarve ja tarkoituksenmukainen rakenne on arvioitava ennen ohjeiston kehittämistä. Tämän julkaisun kohdassa 6.3 esitetty tehollisen kosteuskapasiteetin luokitteluehdotus on ensimmäinen askel ohjeiston kehittämisessä. Luokittelussa on pyritty esittämään tavoitearvoja, joihin tunnetuilla ratkaisuilla on realistista pyrkiä. Kun lähtökohtana on se, ettei suunnittelumenetelmiä ole tällä hetkellä lainkaan, voidaan luokittelun käyttöönotolla viedä kehitystä oikeaan suuntaan. Ts. tyydytään alkuvaiheessa suunnittelun tasoon, jossa valitaan

tehollisen kosteuskapasiteetin suhteen tunnettuja ratkaisuja, jolloin sisäilman kosteuskäyttäytyminen muuttuu haluttuun suuntaan. Tarkkaa laskelmaa puskurivaikutuksen suuruudesta ei nykyisillä suunnittelutyökaluilla pystytä kuitenkaan tekemään. Tällaisten menetelmien kehittäminen voisi olla suunnittelun kehittämistavoitteena.

Tuotekehityksen näkymät ovat mielenkiintoisia. Kehitystyötä tarvitaan mm. seuraavilla osa-alueilla:

- Uudet vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevät pinnoiteratkaisut, jotka täyttävät halutut muutkin vaatimukset ja jotka soveltuvat erilaisille hygroskooppisille alustoille.
- Uudet sisustusratkaisut, jotka täyttävät arkkitehtuurin vaatimukset ja joissa on lisätty huoneilman ja hygroskooppisen aineen vuorovaikutuspinta-alaa rakenteellisin keinoin, kun vertailukohtana on rakennusosien sisäilmaan rajoittuvat otsapinta-alat.
- Korjausrakentamisen uudet sisustusratkaisut sisäilman laadun parantamiseksi.
- Puun epäisotrooppisuuden hyödyntämiseen perustuvat tehokkaat puskurirakenteet.
- Tehollisen kosteuskapasiteetin määrällinen optimointi eri kosteuskuormituksilla ja huonetilayhdistelmillä, ratkaisut ja optimointimenetelmät.

Kaikkiaan voidaan todeta, että menestyksellinen tuotekehitys perustuu ja myös johtaa uusiin innovaatioihin. On mahdollista kehittää kokonaan uuden tyyppisiä tuotteita ja puumateriaalien käyttösovelluksia, joilla on kysyntää myös vientituotteina. Tarve hallita huoneilman kosteutta on yleinen, ja monilla alueilla kosteuden haitallisuus on Suomen ilmastoon ja rakennuskantaan ver-

rattuna suurta. Tämä antaa osaltaan mahdollisuuden lisätä puun käyttöä rakentamisessa ja erityisesti sisustamisessa.

Päätyneessä tutkimuksessa on selkeästi osoitettu, että tehollinen kosteuskapasiteetti parantaa huoneilojen sisäpintojen kosteusturvallisuutta erityisesti kylmäsiilojen kohdalla sekä viileissä korkean suhteellisen kosteuden tiloissa, joissa kosteuskuormitus ajallisesti vaihtelee. Valitsemalla avoimuuden lämmöneristyksen (mineraalivilla, puukuitueriste jne.) eri puolilla olevat kerrokset ominaisuuksiltaan oikein, voidaan parantaa myös rakenteiden sisäosien kosteusturvallisuutta. Suomen oloissa tavanomaisten puurunkoisten vaipparakenteiden kosteusturvallisuutta voidaan vielä nykyisestään kehittää erityisesti rakenteiden kuivumiskykyä parantamalla. Kosteusturvallisuuden kriteerit tunnetaan paremmin kuin aikaisemmin, joten tuotekehityksessä voidaan huomio kiinnittää olennaisesti vaikuttaviin tekijöihin, kuten tuulensuojan höyrynvastukseen, lämmönvastukseen ja hygroskooppisuuteen. Kun rakennusvaipan ilmanpitävyydestä huolehditaan asianmukaisesti ilmansululla, voidaan sisäverhouksen höyrynvastus valita tuulensuojan ominaisuuksien perusteella. Tässäkin asiassa tulisi suunnittelijoille kehittää nykyistä helppokäyttöisempiä suunnitteluohjeita ja menetelmiä.



# LÄHDELUETTELO

1. Simonson, C. J., Salonvaara, M. & Ojanen, T., Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden Structures, VTT Publications 431, Technical Research Centre of Finland, Espoo 2001, 200 p + Appendixes 91 p.
2. Simonson, C.J., Salonvaara, M. and Ojanen, T., 2001. Moisture content of indoor air and structures in buildings with vapor permeable envelopes, Proceedings (CD) of Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes, 16 pages, Clearwater Beach, Florida, ASHRAE.
3. Simonson, C.J. and Salonvaara, M.H., 2000. Mass transfer between indoor air and a porous building envelope: Part I - Field measurements. Proceedings of Healthy Buildings 2000, Vol. 3, (edited by O. Seppänen and J. Säteri), Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate (FiSIAQ), 117-122.
4. Salonvaara, M.H. and Simonson, C.J., 2000. Mass transfer between indoor air and a porous building envelope: Part II - Validation and numerical studies. Proceedings of Healthy Buildings 2000, Vol. 3, (edited by O. Seppänen and J. Säteri), Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate, 123-128.
5. Simonson, C.J. and Ojanen, T., 2000. Moisture performance of buildings with no plastic vapour retarder in cold climates. Proceedings of Healthy Buildings 2000, Vol. 3, (edited by O. Seppänen and J. Säteri), Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate, 477-482.
6. Koponen, S., Peltola, S. & Tukiainen, P., Moisture Buffering Capacity of Wood in Buildings, Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics Publications TKK-TRT-199, Espoo 2003, 75 p + Appendixes 3 p.
7. Ojanen, T. & Salonvaara, M., A Method to Determine the Moisture Buffering Effect of Structures During Diurnal Cycles of Indoor Air Moisture Loads. VTT Building and Transport, Espoo, Finland. Submitted to the 2nd International Building Physics Conference, Sept. 14. - 18.2003, Leuven, Belgium.
8. Koponen S., Peltola S., Tukiainen P., 2004, Effective Moisture Capacity of Wood in Building Structures, A Wooden Building with Comfortable Temperature and Humidity Conditions, Partial project: HUT, LSEBP. , Helsinki University of Technology Laboratory of Structural Engineering and Building Physics Publications , Espoo, Finland, 80 p.
9. ISO 9346:1987(E), Thermal insulation - Mass transfer - Physical quantities and definitions.
10. Fang, L., Clausen, G: and Fanger, P.O., 1998, Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposures, Indoor Air, 8, 276-284.
11. Kurnitski J, Palonen J, Kalamees T, Seppänen O. Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate - Part I Dynamic simulation. Submitted to Indoor Air, Dec 2003.



12. Kalamees T, Kurnitski J, Vinha J. Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate - Part II Field measurements. Submitted to *Indoor Air*, Dec 2003.
13. Airaksinen, M., Kurnitski, J., Hygroskooppisten materiaalien vaikutus sisäilmaan - kenttämittaukset pientaloissa. Sisäilmastoseminaari 2003, Espoo 19-20.3.2003. SIY Raportti 19, 103-108.
14. Kurnitski J, Suursoho A, Palonen J. The effect of the structures on IAQ and thermal comfort. Accepted for publication in proceedings of *Healthy Buildings 2003*.
15. Palonen J. Lämpö- ja kosteusoloiltaan miellyttävä puutalo - sisäilmastokriteerit. TKK LVI-laboratorio, sisäinen raportti, 2003, 36 s.
16. Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. & Viitanen, H., Puurakenteiden kosteustekninen toiminta, VTT Tiedotteita 1991, Espoo 1999.
17. Simonson, C.J., Salonvaara, M. and Ojanen, T., 2002. The effect of structures on indoor humidity - possibility to improve comfort and perceived air quality, *Indoor Air*, 12, 1-9.
18. Simonson, C.J., Salonvaara, M. and Ojanen, T., 2002. Humidity, comfort and air quality in a bedroom with hygroscopic wooden structures, *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, Trondheim, Norway.
19. Ojanen, T., Salonvaara, M. A Wooden Building with Comfortable Temperature and Humidity Conditions. IEA Annex MOIST-ENG preparation workshop. Trondheim, 14.6.2002. 6 p.
20. ISO 7730-1994. Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
21. Sisäilmaluokitus 2000, Sisäilmayhdistys ry,
22. Kunzel, H., Holm, A., Antretter, F., Ellinger, M., und Vesely, J. Raumklimaversuche in Privathaushalten und auf dem Freigelände des Fraunhofer Instituts. Vorentwurf 20.02.2004. 116 s.
23. Salonvaara, M., Ojanen, T., & Karagiozis, A., Indoor Air Humidity Variations and its effects on the Moisture Performance of Building Envelope, *Building Simulation 2003*, Eindhoven the Netherland, 11 - 14 Aug. 2003. *Proceedings of the Eight IBPSA Conference and Exhibition (CD)*. International Building Performance Simulation Association (IBPSA) (2003) Eindhoven.

## LIITE 1

### Pinnoitteiden vesihöyrynvastukset ja -läpäisykertoimet eri lähteiden mukaan.

Taulukossa sarake Dry/Wet viittaa koemenetelmään (kuiva-/märkäkuppi)

Material/paint type	Dry/ Wet	Resistance m <sup>2</sup> sPa/kg	Permeance kg/m <sup>2</sup> sPa	Substrate	Source
Pressure polymer paint, Novaplast 2	W	2,3E+07	4,3E-08		/9/
Paper wallpaper		1,4E+08	7,4E-09		/7/
Glue paint		1,6...2,2E+8	4,5...6,3E-9		/2/
Wallpaper		3,0E+08	3,3E-09		/3/
Akrylic copolymer paint, Siroplast 20	W	3,7E+08	2,7E-09	permeable film	/9/
1/2" Gypsum wall board (=GWB), no paint	D	4,2...4,6E+8	2,2...2,4E-9		/4/
Water-based acrylic varnish Paneeli-Ässä	W	5,5E+08	1,8E-09	permeable film	/9/
Pressure polymer paint, Novaplast 20	W	5,7E+08	1,7E-09	permeable film	/9/
Pressure polymer paint, Novaplast 7	W	5,8E+08	1,7E-09	permeable film	/9/
Acryl latex paint 50 µm, no primer	RH 90%	6,8E+08	1,5E-09		/7/
Silicate paint 80µm		7,0E+08	1,4E-09		/1/
Acryl latex paint, Harmony	W	7,9E+08	1,3E-09	permeable film	/9/
Acrylic latex paint, Remontti-Ässä	W	8,0E+08	1,3E-09	permeable film	/9/
Silicate paint 100µm		8,0E+08	1,3E-09		/1/
Interior latex paint system = primer +finish coat	D/W	1,0E+09	1,0E-09	gypsum wallboard	/8/
PVA latex paint 100µm		1,0E+09	1,0E-09		/1/
1/2" GWB with JM Textra + 2 coats flat paint*	D	1,1E+09	9,4E-10	gypsum wallboard	/4/
Vinyl Wallpaper		1,4E+09	7,4E-10		/7/
PVA latex paint 120µm		1,4E+09	7,1E-10		/1/
Latex Primer		1,75...2,5E+09	4,0...5,7E-10		/4/
Latex and primer		2,2E+09	4,5E-10	gypsum wallboard	/5/
1/2" GWB + latex Primer	D	1,94...2,5E+09	4,0...5,1E-10	gypsum wallboard	/4/
Latex and primer		2,5E+09	4,0E-10		/5/
Acryl latex paint 100µm		2,5E+09	4,0E-10		/1/

Material/paint type	Dry/ Wet	Resistance m <sup>2</sup> sPa/kg	Permeance kg/m <sup>2</sup> sPa	Substrate	Source
Acryl latex paint 50 µm, no primer	RH 60%	2,7E+09	3,7E-10		/7/
Teknos Aqua Grund Cypress		3,1E+09	3,2E-10		/6/
Alkyd oil paint 50 µm, no primer	RH 90%	3,4E+09	3,0E-10		/7/
Paint for walls, matt		2,0...5,0E+09	0,2...5,0E-10		/3/
1/2" GWB with JM Textra + 2 coats satin paint *	D	3,6E+09	2,8E-10	gypsum wallboard	/4/
Water-based epoxy, Akvacoat 100"new"	W	3,9E+09	2,6E-10	permeable film	/9/
Acryl latex paint 200µm		4,0E+09	2,5E-10		/1/
Chlorinated rubber paint 40µm		4,7E+09	2,1E-10		/1/
PVC paint 30µm		6,0E+09	1,7E-10		/1/
1/2" GWB with JM Textra, latex primer + 2 coats satin paint*	D	6,7E+09	1,5E-10	gypsum wallboard	/4/
Alkyd paint, Pesto	W	7,8E+09	1,3E-10	permeable film	/9/
Chlorinated rubber paint 50µm		8,0E+09	1,3E-10		/1/
PVC paint 40µm		9,0E+09	1,1E-10		/1/
Alkyd paint 90µm		9,5E+09	1,1E-10		/1/
Oil paint		5,4...14E+09	0,7...1,9E-10		/2/
Oil paint		1,0E+10	1,0E-10		/3/
Alkyd oil paint 50 µm, no primer	RH 60%	1,0E+10	9,9E-11		/7/
Polyurethane paint 30µm		1,2E+10	8,7E-11		/1/
Oil lacquer		1,1...1,6E+10	6,2...9,1E-11		/2/
Alkyd paint 120µm		1,6E+10	6,3E-11		/1/
Polyurethane paint 30µm		1,6E+10	6,3E-11		/1/
PVC lacquer		1,4...2,8E+10	3,6...7,1E-11		/2/
Chlorinated rubber paint TEMACOAT RM40	W	2,7E+10	3,7E-11	permeable film	/9/
Chlorinated rubber lacquer		1,4...4,5E+10	2,2...7,1E-11		/2/
Alkyd paint		2,0...4,0E+10	2,5...5,0E-11		/3/
Moisture barrier, Luja-method ks+2xLuja pk	W	3,4E+10	3,0E-11	permeable film	/9/
1/2" GWB + Vinyl Wallcovering	D	2,2...35e+10	2,9E-12	gypsum wallboard	/4/

\* JM Textra on lasikuitutapetti

## **Liitteen 1 lähteet:**

- /1/ Björkholtz D, Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka, Rakennustieto Oy, Helsinki 1997
- /2/ Buss H, Aktuelles Tabellenhandbuch, Feuchte, Wärme, Schall, mit Formeln und Erläuterungen, WEKA Baufachverlage GmbH, 2. Edition, 1994, ISBN 3-8111-3080-3
- /3/The Engineering Tool Box, Moisture Transport through Building Walls and Roofs, [http://www.engineeringtoolbox.com/23\\_163.html](http://www.engineeringtoolbox.com/23_163.html)
- /4/ Gelin L, "Not in my Building" Moisture and Mold Growth and the Specification of Wallcovering, Technical report, Johns Manville Textra(tm) Glass Textile Wallcoverings, P. O. Box 5108, Denver, Colorado 80217-5108, [www.jm.com/textra](http://www.jm.com/textra)
- /5/ Karagiozis A. N, Importance of Moisture Control in Building Performance. Oak Ridge National Laboratory, Building Technology Center, Oak Ridge, TN, 37831-6070, [karagiozisan@ornl.g](mailto:karagiozisan@ornl.g)
- /6/ Koponen S, Lämpö- ja kosteusoloiltaan miellyttävä puutalo, vaihe 2, TKK-TRT osatutkimus, Raportti 1, 2002.
- /7/ Nevander L.E, Elmarsson B, Fukthandbok, Praktik och teori, AB Svensk Byggtjänst, 1994 Stocholm, 2. Edition, ISBN 91-7332-716-6
- /8/ Zarr R, Burch D, Fanney A, Heat and Moisture transfer in Wood-Based Wall Construction: Measured versus Prediction. NIST Building Science Series 173, 1995
- /9/ Value given by the paint producer Tikkurila Oy, 2002e.kokko@kolumbus.fi





