

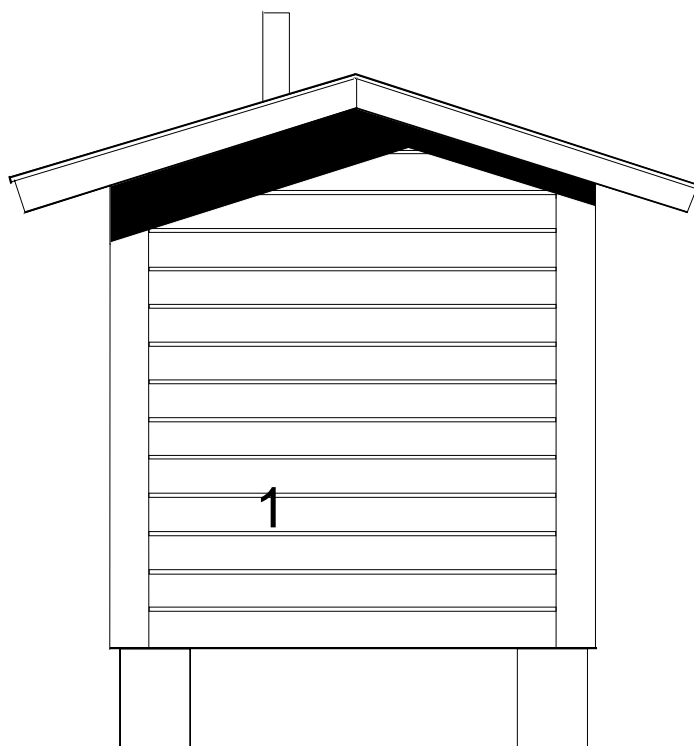
**RAKET**RAKENNUSTEN ENERGIANKÄYTÖN  
TUTKIMUSOHJELMA**Mikael Salonvaara & Erkki Kokko**

# Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiertotekninen toiminta

MATALAENERGIATALO, SELLUKUITURAKENNE  
MITTAUSJÄRJESTELYT

KOEKOPPI ULKOILMAA VASTEN

JULKISIVUT 1:10

L<sup>1</sup> NSI / IT<sup>1</sup>

# **Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta**

Mikael Salonvaara & Erkki Kokko

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5650-X  
ISSN 1235-0605

ISBN 951-38-5651-8 (URL:<http://www.inf.vtt.fi/pdf>)  
ISSN 1455-0865 (URL:<http://www.inf.vtt.fi/pdf>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408, (09) 456 4709

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408, (09) 456 4709

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,  
Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408, 358 9 456 4709

Salonvaara, Mikael & Kokko, Erkki. Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta [Heat and mass transfer in cellulose fibre insulation structures]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1946. 51 s.

**Avainsanat** cellulose fibre insulation, structures, heat transfer, mass transfer, building envelope, construction materials, indoor air, moisture, water vapour, carbon dioxide

## Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sellukuitueristettyjen rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset toimintaperiaatteet sekä tarkastella alustavasti rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutuksia sekä vesihöyry- että hiilidioksidipitoisuuden kannalta.

Muuttuvissa säätilanteissa rakenteiden hygroskooppiset materiaalit sitovat tai luovuttavat vesihöyryä riippuen säämuutoksen suunnasta. Lauhtuva vesihöyry luovuttaa ja höyrystyvä kosteus sitoo faasimuutosenergiaa, joka siirtyy höyryn mukana rakenteessa paikasta toiseen tai tulee ulkopuolelta rakenteeseen tai poistuu sieltä ulkopuolelle. Kosteus ja sen liikkeet vaikuttavat rakenteen lämpötilakentän ja pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden hetkellisiin arvoihin, mutta eivät juurikaan pitkäaikaisiin keskiarvoihin verrattuna vastaavaan ei-hygroskooppiseen rakenteeseen. Auringon säteilyn aiheuttama rakenteen lämpötilan nousu hidastuu hygroskooppisen kosteuden höyrystymisen vaikutuksesta, jos höyry poistuu rakenteesta. Jos höyry siirtyy ja lauhtuu muualle rakenteessa, lämpenee rakenne lauhtumiskohdassa.

Mikäli sellukuitueristetyssä puurunkoisessa vaipparakenteessa on vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevät pinnat, poistuu huoneilman vesihöyryä rakenteisiin ja niiden läpi. Lämmityskaudella - erityisesti keskitalvella seurauksena on puurungon kylmän osan kosteuspuiteisuuden nousu tasolle 20–23 % kuivapainosta, mikäli huoneilman kosteus on alimmillaan 20–25 % R.H. Koerakenteista kosteus kuitenkin kuivui keväällä nopeasti. Tiiviin höyrinsulun kanssa puurungon kylmän osan kosteuspuiteisuus oli enimmillään 16 % kuivapainosta, vaikka sisäilman suhteellinen kosteus oli kokeessa jatkuvasti hyvin korkea (n. 80 % R.H.). Höyrinsuluttoman rakenteen tyydyttävä toiminta edellyttää rakenteen hyvää kuivumiskykyä ulospäin sekä huoneilman kosteustason pysymistä lämmityskaudella kohtuullisena.

Höyrinsuluttomuus kuivattaa sisäilmaa lämmityskaudella verrattuna höyrinsululliseen vaippaan ilmanvaihdon ollessa sama. Toisaalta höyrinsuluton hygroskooppisia materiaaleja sisältävä rakenne tasaa huoneilman kosteuden vaihtelua muuttuvissa kuormitustilanteissa. Ilmiö on hyödyllinen hellekausina, jolloin ilman kosteus on luonnostaan korkealla tasolla. Höyrinsuluton rakenne läpäisee vesihöyryn ohella diffuusiolla myös muita kaasuja. Muuttuvissa kuormitustilanteissa makuuhuoneen ilman hiilidioksidipitoisuuden huippuarvo voi jäädä 25 % pienemmäksi kuin höyrinsulullisessa vaihtoehdossa ilmanvaihtomäärän ollessa 0,5 l/h.

Salonvaara, Mikael & Kokko, Erkki. Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta [Heat and mass transfer in cellulose fibre insulation structures]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1946. 51 p.

**Avainsanat** cellulose fibre insulation, structures, heat transfer, mass transfer, building envelope, construction materials, indoor air, moisture, water vapour, carbon dioxide

## Abstract

The objectives of this study were to determine the principles of hygrothermal (heat and moisture) performance of building envelope structures with cellulose fiber insulation and to preliminarily investigate the interactions between indoor air and building envelope parts in terms of vapor and carbon dioxide concentrations.

In varying environmental conditions hygroscopic materials in building structures absorb or release water vapor depending on the direction of the change in the weather. Condensing water vapor discharges (heat source) and evaporating liquid water charges (heat sink) the latent heat involved in the phase changes of moisture carrying the energy from one place to another, into or out of the structure. Moisture and its movements affect the temperatures and the local instantaneous heat fluxes, whereas the effect is small on the long term average values when compared to similar but non-hygroscopic structures. The rate of increase in temperatures due to solar radiation is slower because of evaporating moisture if that moisture can escape out of the structure. If vapor moves and condenses somewhere else inside the structure, the local temperature at the spot of condensation will increase.

If a wood-framed building envelope structure has interior and exterior layers that are very permeable to water vapor diffusion, water vapor from indoor air can diffuse into and through the building envelope. During the heating season - especially in the middle of winter - this will result in moisture contents as high as 20–23 % by weight in the wood in the cold side of the structure when the indoor air relative humidity is at lowest 20–25% (at approximately 22 °C). Moisture in the experimental test huts dried out fast during the spring, however. In wood frame walls with a vapor retarder the cold side moisture contents were at highest 16 % by weight, even though the indoor air relative humidity was continuously very high (approximately 80 %). In order to achieve satisfactory performance with the walls without a vapor retarder, such walls must have a good drying capability (outwards) and the indoor air humidity must remain at moderate level during the heating season.

The lack of a vapor retarder will result in drier indoor air when the ventilation rate is the same in buildings with or without vapor retarders. On the other hand, building structures without a vapor retarder and with hygroscopic materials can balance the variations in the humidity of indoor air during changes in moisture loads. The phenomena is useful during hot weather when the moisture content of air is high. The structures without a vapor retarder can allow diffusion of other gases too than only vapor through them. During intermittent occupancy in a bedroom the carbon dioxide concentration in the indoor air may remain at 25% lower level when no vapor retarders are used than in a bedroom with vapor retarders, when the ventilation rate is 0.5 changes per hour in both cases.

# Alkusanat

Projekti “Matalaenergiatalon sellukuiturakenne” on osa Teknologian kehittämisskeskuksen Tekesin rahoittamaa Rakennusten energiankäytön tutkimusohjelmaa (RAKET). Projekti kuuluu tutkimusohjelman osa-alueeseen Rakennejärjestelmät. Muita rahoittajia ovat olleet Ekovilla Oy, Termex-Eriste Oy ja Uudenmaan Puhalluseristevilla Oy (nykyisin Suomen Selluvilla-Eriste Oy).

Tässä julkaisussa esitetään hygroskooppisia materiaaleja sisältävän höyrynsulutoman sekä höyrynsulullisen rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan perusteet sekä alustavia tuloksia rakenteiden vaikutuksesta huoneilman kosteuteen sekä hiilidioksidipitoisuuteen.

Tutkimuksen tukiryhmänä toimi RAKET-tutkimusohjelman Rakennejärjestelmät osa-alueen tukiryhmä puheenjohtajana Tapio Kilpeläinen, Isora Oy (nykyisin ThermiSol Finland Oy). Muut jäsenet olivat Heikki Kotila Teknologian kehittämisskeskus (Tekes), Juha Krankka Paroc Oy (nykyisin Partek Paroc Oy Ab), Marja Kuitunen Rakennustuoteteollisuus r.y., Vesa Peltonen Arkkitehtitoimisto Ky Kai Wartainen, Jukka Pråhl Uudenmaan Puhalluseristevilla Oy (nykyisin Suomen Selluvilla-Eriste Oy), Esa Pukki Lemminkäinen Oy, Juha Ryyppö Isover-Ahlström Oy (nykyisin Isover Oy), Jukka Vahtila Fenestra Oy ja Juho Saarimaa VTT Rakennustekniikka.

Tutkimus tehtiin VTT Rakennustekniikassa. Projektipäällikkönä toimi fil. maist. Erkki Kokko ja toisena päätutkijana dipl. ins. Mikael Salonvaara. Koejärjestelyjen rakentamisesta ja mittausten suorittamisesta kantoivat päävastuun rakennusins. Hannu Hyttinen, tutkimusavustaja Reijo Saloranta ja työtekniikko Timo Collanus.

Kiitämme kaikkia tutkimuksen suorittamiseen myötävaikuttaneita tahoja ja henkilöitä. Olemme valmiit yhteistyöhön yritysten ja henkilöiden kanssa, jotka ovat kiinnostuneet huoneilman kanssa vuorovaikutteisten hygroskooppisten rakennusratkaisujen kehittämisestä.

Espoo, helmikuu 1999

Tekijät

# Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT .....	4
ALKUSANAT .....	5
SYMBOLILUETTELO.....	7
1 JOHDANTO .....	8
2 SELLUKUITUERISTEEN HYGROSKOOPPISUUDEN MERKITYS .....	10
2.1 Kosteuden siirtymisen ja sitoutumisen fysikaaliset mekanismit .....	10
2.1.1 Kosteuden lähteet.....	10
2.1.2 Kosteuden siirtyminen ympäristöstä rakenteisiin .....	10
2.1.3 Kosteuden siirtyminen huokoisissa materiaaleissa .....	11
2.2 Laboratoriokokeet ja niiden simulointi.....	11
2.2.1 Suljettu sellukuitueristys .....	11
2.2.2 Puoliavoin sellukuitueristys .....	15
2.2.3 Avoin sellukuitueristys.....	18
2.3 Pienimuotoiset kenttäkokeet.....	20
2.3.1 Koejärjestely ja -rakenteet.....	20
2.3.2 Rakenteiden käyttäytyminen auringon säteilyn alaisena.....	24
2.3.3 Rakenteiden kosteustekninen toiminta talvella.....	27
2.4 Rakenteiden toiminta luonnonsäässä: laskennallinen analyysi .....	30
2.5 Koetalojen vuosisimulointi rakennustason laskentamallilla .....	31
2.6 Kenttämittauksen tulokset .....	36
3 HIILIDIOKSIDIN ABSORPTIO RAKENTEISIIN JA DIFFUUSIO RAKENTEIDEN LÄPI.....	38
3.1 Pienimittakaavainen kenttäkoe ja sen simulointi .....	38
3.2 Täysmittakaavan dynaaminen analyysi .....	41
3.2.1 Huoneen hiilidioksidipitoisuudet.....	42
3.2.2 Kosteustekninen toiminta.....	44
4 PÄÄTELMÄT.....	45
5 YHTEENVETO .....	47
5.1 Tavoitteet.....	47
5.2 Hygroskooppisuuden lämpötekniiset vaikutukset .....	47
5.3 Höyrysuluttoman rakenteen kosteustekninen toimivuus .....	48
5.4 Rakenteiden ja sisäilman välinen aineensierro.....	49
LÄHDELUETTELO .....	51

## Symboliluettelo

$q_M$	kosteuden massavirta, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$
$\rho_0$	huokoisen materiaalin kuivatiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$
$D_l$	(nestemäisen) kosteuden johtavuus (potentiaalina huokosalipaine), s
$D_w$	(nestemäisen) kosteuden johtavuus (potentiaalina kosteuspitoisuus), $\text{m}^2/\text{s}$
$u$	kosteuspitoisuus, $\text{kg-H}_2\text{O}/\text{kg-kuiva-aine}$
$T$	lämpötila, $^\circ\text{C}$
$\delta_p$	vesihöyryn johtavuus, $\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}\cdot\text{Pa}$
$P_v$	vesihöyryn osapaine, Pa
$v_a$	ilmavirran nopeus, $\text{m}/\text{s}$
$\rho_v$	vesihöyryn tiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$
$K$	hydraulinen johtavuus, s
$\rho_w$	veden tiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$
$g$	gravitaatiokerroin, $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ .



# 1 Johdanto

Kosteuden faasimuutokset ovat eräissä olosuhteissa ja rakenteissa merkittäviä tekijöitä rakenteiden lämpö- ja kosteustekniselle toiminnalle. Lämmön- ja kosteudensiirto ovat suorassa vaikutussuhteessa toisiinsa. Kosteuden läsnäolo rakenteissa useimmiten alentaa rakenteen lämmönvastusta ja tehostaa lämmönsiirtoa rakenteen läpi. Liikkumatonkin kosteus kasvattaa huokoisten materiaalien lämmönjohtavuutta, minkä merkitys alhaisilla kosteuspitoisuuksilla on usein kuitenkin vähäinen (riippuu huokosrakenteesta). Kosteuden höyrystyminen ja lauhtuminen ei tapahdu ainoastaan rakenteiden tai materiaalien rajapinnoilla mutta myös huokoisten materiaalien sisällä. Huokosiin materiaaleihin sitoutunut kosteus on nestemäisessä olomuodossa. Sitoutunut kosteus voi liikkua pääasiassa kahdessa muodossa: vesihöyrynä ja nestemäisenä vetenä (kapillaarivirtauksena). Vesihöyrynä liikkuaan kosteuden täytyy ensin höyrystyä paikallisesti, jolloin höyrystymispaikasta siirtyy energiaa veden höyrystymislämmön verran. Tämä lämmönsiirto (faasimuutoksen kuluttama energia) alentaa paikallista lämpötilaa. Vastaavasti huokoisessa materiaalissa kondensoituva vesihöyry luovuttaa höyrystymislämpönsä nostaten huokosmatriisin lämpötilaa. Materiaalien ja rakenteiden lämpöteknisistä ominaisuuksista riippuen lämpötilan nousu ja sen vaikutukset lämpövirtoihin ovat erilaisia eri rakennesysteemeissä. Tässä suhteessa hygroσκοoppiset (kosteutta sitovat) ja ei-hygroσκοoppiset materiaalit käyttäytyvät jossain määrin eri tavoin. Molemmilla materiaalityypeillä on omat hyvät ja huonot puolensa, jotka eivät riipu pelkästään materiaalien vaan myös koko rakenteen ominaisuuksista.

Tässä tutkimuksessa esitetään kosteuden faasimuutosten merkitys kevyiden rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen. Analysoidut rakenteet ovat sekä höyrünsulullisia että höyrünsuluttomia. Laskennalliset tulokset varmistetaan laboratoriokokein ja rakenteiden pitkäaikainen toimivuus luonnon säässä varmennetaan lämmön- ja kosteuden siirron laskentamenetelmien avulla.

VTT Rakennustekniikassa on kehitetty viimeisten 10–15 vuoden aikana useita kosteudensiirron laskentamenetelmiä, joista tässä käytetään viimeisintä mallia nimeltä LATENITE (2), joka on kehitetty yhteistyössä Kanadan (Institute for Research in Construction/National Research Council) kanssa. VTT:n kehittämät laskentamallit ovat saaneet kansainvälistä tunnustusta ja ne luokitellaan IEA Annex 24:n selvityksessä (1) kansainväliseen kärkeen.

Käytetystä laskentamallista on yksityiskohtaisempi kuvaus IEA Annex 24:n raportissa (1), joten tässä tyydytään antamaan vain lukijan kannalta oleellimmat seikat. Potentiaaleina mallissa käytetään lämpötilaa lämmönsiirrolle ja kosteuspitoisuutta sekä vesihöyryn osapainetta kosteudensiirrolle. Malli kykenee ratkaisemaan sekä yksi-, kaksi- että kolmedimensioisia lämmön ja kosteuden siirron ongelmia. Ilmavirtaukset voidaan laskea niin sanotuilla Darcyn yhtälöillä. Determinististen ongelmanratkaisujen lisäksi mallia voidaan käyttää niin sanottuun stochastiseen ongelman ratkaisuun: täsmällisten materiaaliominaisuusfunktioiden lisäksi mallille voidaan antaa syöttötietoina materiaaliominaisuuksien tilastolliset vaihtelurajat mikäli ne ovat saatavilla. Tuloksena saadaan lukuisten laskutoimen-

piteiden jälkeen mm. rakenteen lämpövirtojen, lämpötilojen ja kosteuspitoisuuksi-  
en käyräparvet tai vaihtelurajat yksittäisten lukuarvojen sijaan.

Mallissa materiaaliominaisuudet eivät ole yksittäisiä vakioarvoja vaan ne ovat tai  
voivat olla lämpötilan ja kosteuspitoisuuden suhteen muuttuvia. Kosteuden liik-  
keet nestemäisessä ja höyrymäisessä muodossa lasketaan erillisinä mutta kuitenkin  
yhtäaikaisesti. Reunaehtoina voidaan käyttää luonnonolosuhteita säätiedoston  
kautta: ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, tuulen nopeus ja suunta, auringon  
säteily, ulkopinnan vastasäteily taivaalle ja ympäristöön sekä kosteuden kannalta  
tärkeä viistosade ulkopintaan.

Kosteuden massavirta huokoisessa materiaalissa kuvataan yhtälöllä 1.

$$q_M = -\rho_0 D_w(u, T) \nabla u - \delta_p(u, T) \nabla P_v + v_a \rho_v + K(u) \rho_w \vec{g} \quad (1)$$

missä

$q_M$	kosteuden massavirta, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
$\rho_0$	huokoisen materiaalin kuivatiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$
$D_w$	(nestemäisen) kosteuden johtavuus, $\text{m}^2/\text{s}$
$u$	kosteuspitoisuus, $\text{kg}_w/\text{kg}_d$
$T$	lämpötila, $^\circ\text{C}$
$\delta_p$	vesihöyryn johtavuus, $\text{kg}/\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}$
$P_v$	vesihöyryn osapaine, Pa
$v_a$	ilmavirran nopeus, m/s
$\rho_v$	vesihöyryn tiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$
$K$	hydraulinen johtavuus, s
$\rho_w$	veden tiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$
$g$	gravitaatiokerroin, $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ .

## **2 Sellukuitueristeen hygroskooppisuuden merkitys**

### **2.1 Kosteuden siirtymisen ja sitoutumisen fysikaaliset mekanismit**

Seuraavassa käsitellään hieman kosteuden siirron termistöä ja käsitteitä, joita on esitetty kirjallisuudessa monessa muodossa. Tässä noudatetaan IEA:n Annex 24:ssä sovittua termistöä ja symboleja (3).

#### **2.1.1 Kosteuden lähteet**

Rakennukset ja rakenneosat ovat alttiina ympäristöolosuhteille, jotka voidaan karkeasti jakaa ulko- ja sisäilmastoon. Nämä puolestaan koostuvat useista osatekijöistä, joista seuraavassa tarkastellaan lähemmin kosteutta eri muodoissa ja sen vaikutusta rakenteiden toimintaan.

Rakennuksen ja sen eri rakenteiden kannalta merkittävimpiä kosteuslähteitä ovat sade, ilman kosteus ja sen vaihtelut (mm. ihmiskehon tuottama vesihöyry), maan kosteus, pintavedet, rakennuskosteus (rakentamisen aikana rakenteisiin päässyt kosteus tai materiaalien alkukosteus) sekä rakennuksen eri toiminnoissa käytetty vesi (pesuedet, ruuanlaitto) ja mahdolliset vesivuodot putkistoista.

#### **2.1.2 Kosteuden siirtyminen ympäristöstä rakenteisiin**

Kosteus voi joutua rakenteisiin eri muodoissa: vesihöyrynä diffuusiolla tai kuljetumalla ilmavirtojen mukana, nestemäisenä kapillaarivirtauksena tai maan veto-voiman aiheuttamana nestevirtauksena. Rakennuksen ja ympäristön välinen paineero määrittää rakenteiden vuotoilmavirtojen suunnan ja voimakkuuden. Paine-ero syntyy osittain ulko- ja sisäilman lämpötilaerojen vaikutuksesta, tuulen painevaikutuksista sekä koneellisen ilmanvaihdon kehittämästä paine-erosta. Paine-ero voi olla rakennuksen eri osissa erilainen. Kylmissä ilmastoissa ulkoilman kosteuspiitoisuus on usein alhainen, jolloin ilman sisäänvirtaus harvemmin (paitsi ehkä keuhalla jäähdetytyissä rakennuksissa) tuo kriittiset määrät kosteutta rakenteisiin.

Ulkoilman suhteellinen kosteus on vuodenaajoista suurin talvella, absoluuttinen kosteus ja vesihöyryn osapaine ilmassa on tällöin kuitenkin vuodenaajoista alhaisimmillaan. Huokoiset materiaalit absorboivat kosteutta suhteellisen kosteuden funktiona: mitä suurempi suhteellinen kosteus sitä suurempi materiaalin kosteuspiitoisuus tasapainotilassa. Tästä johtuen rakennusten ulkopinnan materiaalien kosteuspiitoisuus on yleensä suurin talvella, vaikka rakenne olisi suojattu täydellisesti sisäilman kosteudelta.

Sisäilman kosteuspiitoisuus riippuu ulkoilman kosteudesta sekä rakennuksen kosteuskuormista ja ilmanvaihdosta. Diffuusio ulkoilmaan rajoittuneiden rakenteiden läpi voi olla myös merkittävä tekijä, jos rakenteet ovat vesihöyryä hyvin läpäiseviä. Rakenteet ja rakennuksessa olevat materiaalit (kankaat, huonekalut, kirjat) voivat aiheuttaa viiveitä huoneilman kosteuden ajallisessa käyttäytymisessä absorboimalla ja luovuttamalla kosteutta eri aikoina. Sisäilman kosteus voi kulkeutua

rakenteisiin vesihöyryn diffuusiolla tai ilmavirtausten mukana ja kerääntyä kylmempiin materiaalikerroksiin.

### 2.1.3 Kosteuden siirtyminen huokoisissa materiaaleissa

Diffuusion ja ilmavirtojen mukana kuljettumisen lisäksi kosteus voi siirtyä huokoisissa materiaaleissa ja rakenteissa huokosalipaineen aiheuttamana imuna kapillaarivirtauksena tai maan vetovoiman tai paine-erojen (esimerkiksi tuulenpaine) aiheuttamana nestevirtauksena.

Vesihöyryn diffuusiovirta voidaan esittää yhtälöllä 2.

$$q_{M,v} = -\delta_p \nabla P_v \quad (2)$$

Nestemäisen veden virtaus huokosalipaineen ja gravitaation vaikutuksesta voidaan esittää kaavalla 3.

$$q_{M,l} = -D_l \nabla (P_c + \rho_w \vec{g}h) = -\rho_0 (D_l \frac{\partial P_c}{\partial u} \nabla u + \frac{D_l}{\rho_0} \rho_w \vec{g}) = -\rho_0 D_w \nabla u - D_l \rho_w \vec{g} \quad (3)$$

missä nestemäisen kosteuden johtavuus  $D_l$  (potentiaalina huokosalipaine  $P_c$ ) voidaan esittää helpommin mitattavan kosteuden johtavuuden  $D_w$  (potentiaalina kosteuspitoisuus  $u$ ) avulla kaavalla 4.

$$D_l = \rho_0 D_w \frac{\partial u}{\partial P_c} \quad (4)$$

Kosteus saattaa liikkua materiaalin huokosissa nestemäisenä lyhyitä matkoja jo suhteellisen alhaisissa kosteuspitoisuuksissa. Tällöin nestepinnat solujen välillä eivät kuitenkaan ole yhtenäisiä ja kosteus liikkuu osin nestemäisenä mutta edelleen määräävästi vesihöyryn diffuusiolla. Nestemäinen kosteuden siirtyminen voimistuu ja tulee hallitsevaksi, kun huokoisen materiaalin kosteus ylittää ns. kriittisen kosteuspitoisuuden, jolloin huokosiin muodostuu yhtenäinen ja jatkuva vesiverkosto.

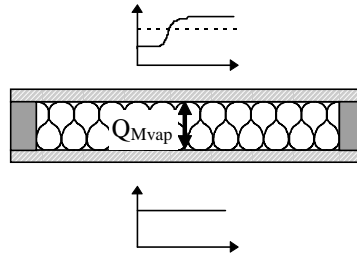
Huokoisten materiaalien kosteuden johtavuudet (erityisesti nestemäisen kosteuden johtavuus) ovat voimakkaasti riippuvaisia materiaalin kosteuspitoisuudesta ja usein myös lämpötilasta.

## 2.2 Laboratoriokokeet ja niiden simulointi

### 2.2.1 Suljettu sellukuitueristys

Kosteuden faasimuutosten ja tässä tapauksessa erityisesti hygroskooppisesti sitoutuneen veden höyrystymisen ja lauhtumisen vaikutus eristekerroksen läpi menevään lämpövirtaan ja rakenteen lämpötiloihin nähdään havainnollisesti seuraavassa laboratoriokokeessa. 23 °C:n lämpötilassa ja eri suhteellisissa kosteuksissa tasapainotilaan ilmastoitu lämmöneristemateriaali (sellukuitueriste, CFI-eriste ja

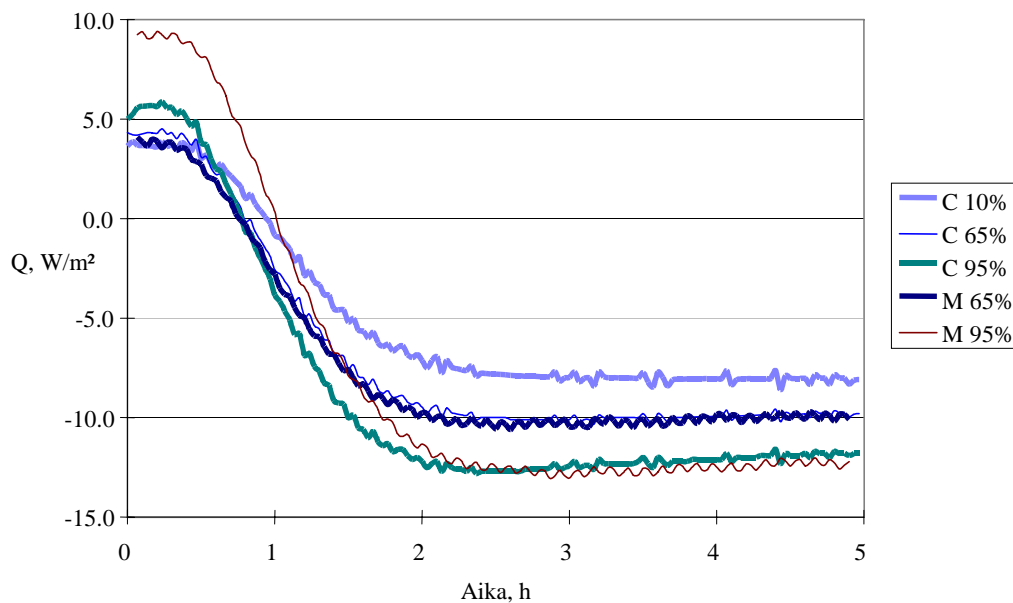
vertailuna mineraalivillaeriste, MW-eriste) asetettiin tasapaksuna ainekerroksena lämpövirtalevylaitteeseen. Tämä oli standardin ISO 8301 mukainen laite, jossa koekappaleen toiseen pintaan voitiin aiheuttaa lämpötilan porrasmuutos jaksottaisesti. Koe-eristykset olivat suljettuna muovikääreeseen, jonka tehtävänä oli estää kosteuden poistuminen eristeestä tai pääsy ympäristöstä eristeeseen.



*Kuva 1. Suljetun rakenteen lämpövirtalevymittauksen rakennekuva. Rakenteen toinen pinta pidetään vakio­lämpötilassa ja toiselle pinnalle aiheutetaan lämpötilan porrasmuutos.*

Rakenteessa kosteus siirtyy yleensä lämpötilagradientin alaisuudessa kylmempään rakenneosaan. Rakenteessa olevien materiaalien hygroskooppiset ominaisuudet määrittävät sen, onko kosteus sitoutunut hyvin ohuelle rajapinnalle vai tasaisesti laajemmalle ja syvemmälle materiaaliin. Samassa suhteellisessa kosteudessa tasapainotilaan ilmastoidussa hygroskooppisessa materiaalissa on merkittävästi enemmän kosteutta kuin ei-hygroskooppisessa (kuten määritelmä - hygroskooppinen = kosteutta sitova - antaa ymmärtää). Huokoisen materiaalin kosteuspitoisuuden ja ilman suhteellisen kosteuden välinen yhteys ilmoitetaan jokaiselle materiaalille ominaisten tasapainokosteuskäyrien avulla.

Esimerkki faasimuutosten vaikutuksesta lämmönsiirtoon on nähtävissä kuvassa 2. Lämpövirtalaitteella mitattiin lämpövirtoja ajan funktiona 90 mm paksun sellukuitu- ja kivivillaeristeen läpi. Lämpövirrat mitattiin eri tasapainokosteuksiin ilmastoiduille eristekerroksille, jotta hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden siirtymisen aiheuttamat vaikutukset eristekerroksen pintojen lämpövirtoihin saataisiin selkeästi esiin. Levypintojen lämpötilat olivat alussa n. +30 °C ja +20 °C. Lämpimän puolen lämpötila laskettiin lähes yhtäkkisesti nol­lälämpötilaan. Kokeesta mitattiin lämpövirtoja ja rakenteen pinta- sekä sisäpisteiden lämpötiloja ajan funktiona. Sama koejärjestely simuloitiin käyttäen reunaehtoina rakenteen pinta­lämpötiloja. Paikallisia kosteuspitoisuuksia ei voitu mitata, joten koekappaleista tunnetaan vain keskimääräinen kosteuspitoisuus. Tästä johtuu ilmeisesti mitattujen ja laskettujen lämpövirtojen erot juuri ennen porrasmuutosta olevassa vaiheessa koekappaleelle, jonka kosteuspitoisuus vastasi noin 95 %:n suhteellista kosteutta. Ero on liian suuri, jotta se selittyisi lämmönjohtavuuden riippuvuudella kosteuspitoisuudesta.

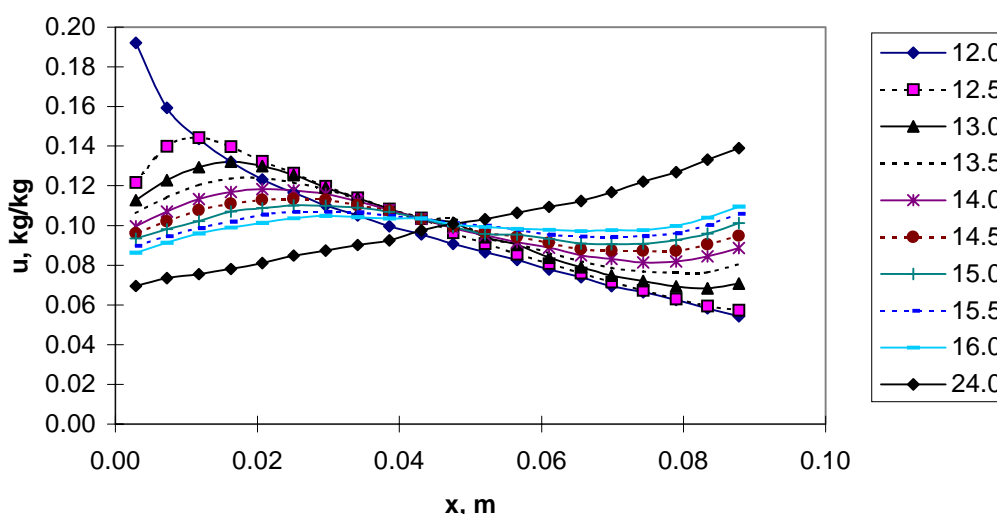


Kuva 2. Lämpövirrat ajan funktiona kostean sellukuitueristekerroksen vakiolämpötilassa 20 °C olleen pinnan läpi, kun toisen pinnan lämpötila muuttui porrasmuutoksena arvosta 30 °C arvoon 0 °C. Eristekerrosten keskimääräistä kosteuspitoisuutta vastaavat suhteelliset kosteudet on esitetty legendoissa. C on laskettu, M on mitattu. Laskennassa käytetty reunaehtoina mitattuja pintalämpötiloja. Sellukuitueristeen lämmönjohtavuutena on käytetty 0.04 W/mK.

Kosteuden siirtyminen laskevan lämpötilan suuntaan eristeen sisällä ja rakenteen pintojen välillä kasvattaa hetkellisesti lämpövirtaa rakenteen läpi. Kosteuden siirtymisen lakattua eli kosteuslähteen ehdyttyä lämpövirta asettuu uuteen jatkuvuus- ja tasapainotilaansa, mikä riippuu mm. kosteuspitoisuusjakaumasta rakenteessa. Materiaalien lämmönjohtavuuksien riippuvuus kosteuspitoisuudesta itsessään on omiaan kasvattamaan lämpövirtaa. Tämän lisäksi on mahdollista, että myös jatkuvuustilassa esiintyy niin sanottu lämpöputkiefekti, missä nestemäinen kosteuden siirto ja vesihöyryn liike ovat toisiaan vastakkain aiheuttamatta kosteuden nettokertymää mihinkään osaan rakennetta. Vesihöyry kuljettaa mukanaan veden höyrystymislämpöä, joka on kymmeniä kertoja suurempi kuin saman kosteusmäärän nestemäisessä liikkeessä kuljettama tuntuva lämpö.

Kuvassa 3 esitetään sellukuitueristykseen laskettu päiväjakson aikainen kosteuskentän muutos eristyskerroksen paksuussuunnassa. Eristyksen alkukosteus vastaa tasapainotilaa 65 %:n suhteellisessa kosteudessa. Laskennassa simuloidaan edellä kuvattu suljetun rakenteen laboratoriokoe, jossa lämmöneristyksen sisäpinta oli vakio lämpötilassa 20 °C ja ulkopinta vaihteli 12 h:n jaksoissa lämpötilan muuttuessa porrasmuutoksena arvojen 0 °C ja 30 °C välillä. Kuvan 3 laskentatulokset koskevat 12 h:n päiväjaksoa viidentenä päivänä simuloinnin alkutilanteesta.

### 65% alkukosteus



Kuva 3. Suljetun sellukuitueristyksen laskettu paksuussuuntaisen kosteusjakautuman muutos 12 h:n päiväjakson aikana (klo 12–24) viidentenä päivänä alkutilanteesta, joka vastasi tasapainokosteutta 65 % suhteellisessa kosteudessa.

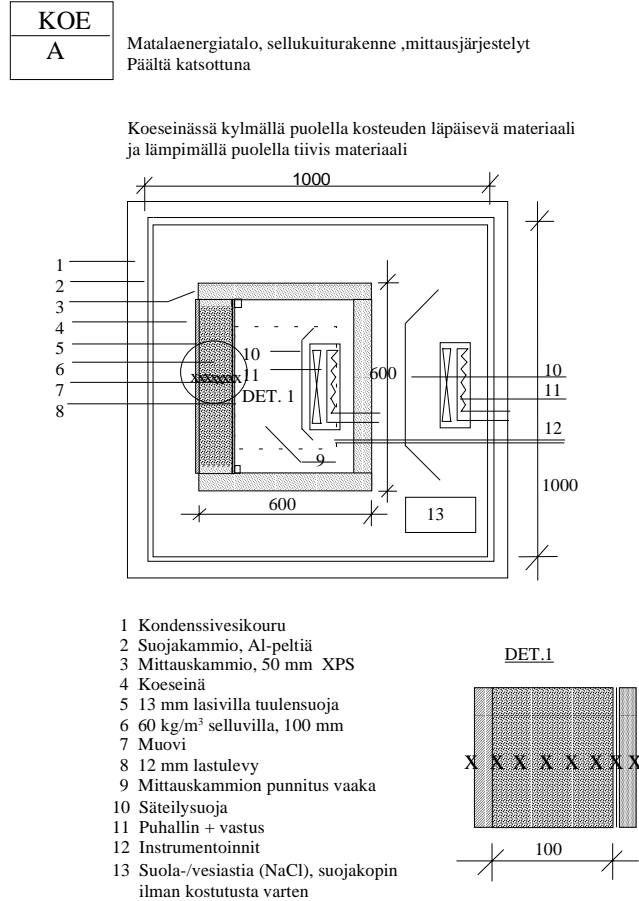
Kuvan 3 mukaan kosteuskenttä muuttuu verraten nopeasti myös eristyksen sisällä. Tämä ilmentää sellukuitueristyksen nopeaa reagoitokykyä vuorokausijakson ilmastomuutoksiin. Myös eristyksen sisäosat ovat aktiivisesti vuorovaikutteisia ympäristön kanssa.

Kosteuden liike rakenteissa yleensä lisää rakennuksen energian kulutusta. Rakenteen lämpöhäviö voi kasvaa ja lämmitysenergian tarve lisääntyä. Kesällä vesihöyryn lauhtuminen rakenteessa lähellä sen sisäpintaa voi aiheuttaa jäähdytyskuormaa ja näin ollen vaikuttaa viihtyisyysoloihin rakennuksessa. Jos taas auringon säteilyn höyrystämä vesi poistuu rakenteesta, toimii ilmiö rakennetta jäähdyttävästi.

Rakenteen hygrotermistä toimintaa tulee käsitellä aikariippuvaisena ottaen huomioon päivittäiset ilmaston rytmit (ulkolämpötila, auringon säteily). Kostealla ja kuivalla rakenteella voi usein olla keskimäärin sama vuorokautinen lämpövirta rakenteen läpi, mutta huomattavat erot hetkittäisissä arvoissa. Rakennuksen käytötarkoituksesta riippuen näillä hetkittäisillä arvoilla voi olla merkitystä. 'Avoimissa' rakenteissa, jotka sallivat kosteuden siirtymisen rakenteen ja ympäristön välillä, vesihöyryn liikkeet voivat sopivissa olosuhteissa olla hyödyllisiä rakennuksen jäähdytys- ja lämmöntarpeen kannalta. Kosteuden haihtuminen alentaa paikallista lämpötilaa faasimuutoksen viemän energian vuoksi ja vastaavasti vesihöyryn kondensoituminen nostaa lämpötilaa luovuttamalla energiaa rakenteeseen. Suljetuissa rakenteissa, joissa ei tapahdu kosteuden siirtoa rakenteen ja ympäristön kanssa, kosteuden nettokertymää tai nettohäviötä ei tapahdu, jolloin kosteus liikkuu yleensä lämpövirran suuntaan ja tätä kasvattaen.

## 2.2.2 Puoliavoin sellukuitueristys

Kevytrakenteisen sellukuitueristetyn seinärakenteen toimintaa analysoitiin sekä laboratoriokokeessa että laskennallisesti. Koerakenteiden yleiskuva ja koejärjestelyt on esitetty kuvassa 4.



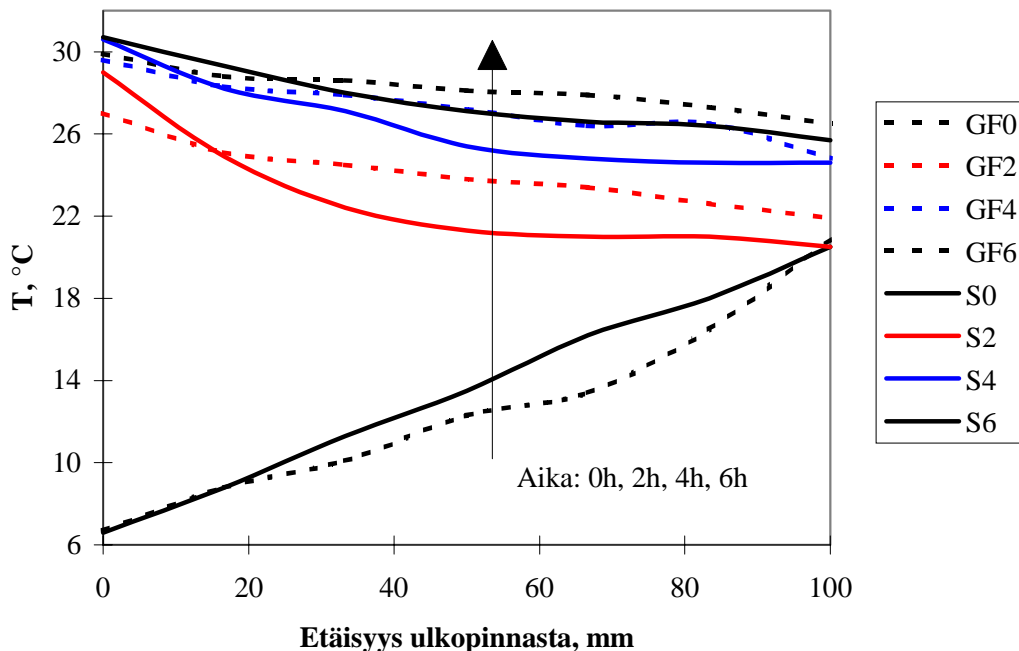
Kuva 4. Laboratoriossa suoritettujen seinärakenteiden yleiskuva. Kuvassa on esitetty puoliavoin höyrinsululla ja sellukuitueristeellä varustettu rakenne.

Koerakenne asetettiin mittauslaitteeseen “sisä- ja ulkoilman” väliin. Sisäilman lämpötila ja kosteus pyrittiin pitämään vakiona (+21 °C, 45 %). Ulkoilman lämpötilaan aiheutettiin porrasmuutos 12 tunnin välein lämpötilojen 0 °C ja +30 °C välillä. Tavoitteena oli saada koeseinän ulkopinnan lämpötila vaihtelevaan tavalla, joka kuvaa päiväaikaista lämpenemistä auringon säteilyn vaikutuksesta ja yöaikaista jäähtymistä. Ulkoilman absoluuttinen kosteus pysyi likimain vakiona, mutta suhteellinen kosteus vaihteli (20 % päivä- ja 60 % yöjakson aikana). Sisäilman kosteus oli n. 3,5 g/kg korkeampi kuin ulkopuolisen ilman kosteus. Tällä seikalla ei kuitenkaan ole puoliavoimessa rakenteessa suurta merkitystä, koska rakenteessa on höyrinsulku.

Tutkittu puoliavoin rakenne koostui seuraavista materiaalikerroksista: ulkopinnassa tiheä lasivillaeriste 13 mm (125 kg/m<sup>3</sup>), sellukuitu- tai lasivillaeriste 100 mm (60 kg/m<sup>3</sup> tai 20 kg/m<sup>3</sup>), 0,15 mm:n PE-höyrinsulku ja sisäpinnassa 12 mm:n vaneri.

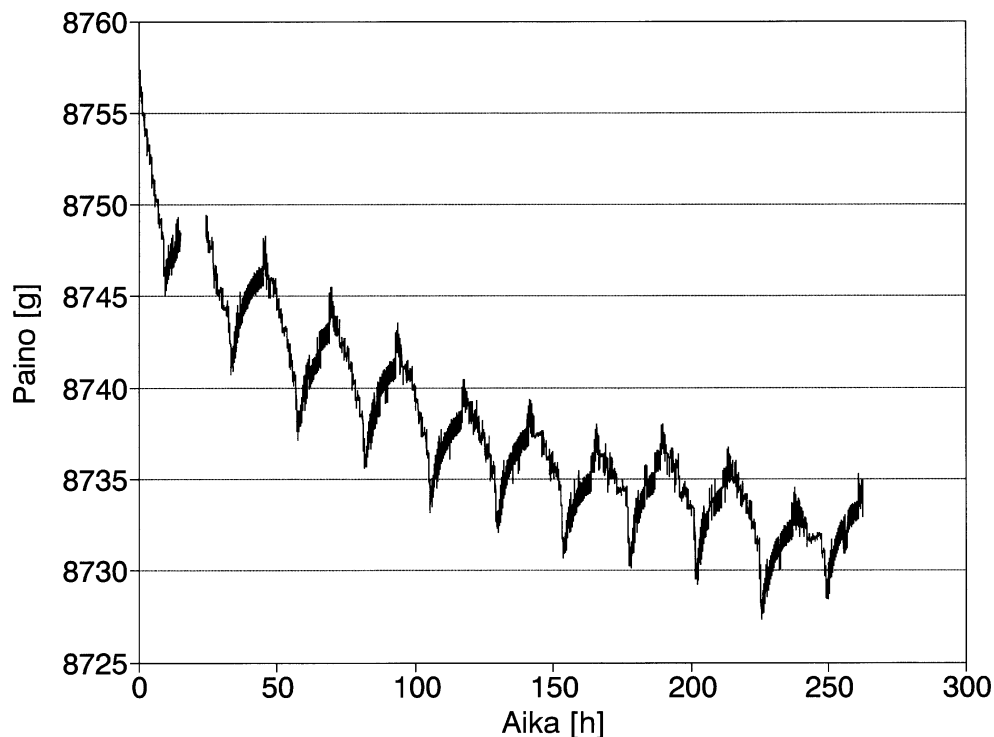


Rakenteen lämpötiloja mitattiin useissa pisteissä ajan funktiona. Kuvassa 5 on esitetty lämpötilajakaumia eri ajan hetkinä ulkoilman porrasmuutoksen 0 °C → 30 °C jälkeen sekä mineraalivilla- että sellukuitueristetylle seinärakenteelle. Sellukuiturakenteen lämpötilajakaumista nähdään selvästi kosteuden paikallisten faasimuutosten vaikutus rakenteen lämpötiloihin. Rakenteessa on höyrynsulku, joka estää kosteuden siirron sisäilman ja eristekerroksen välillä. Kosteuden liikkuminen rakenteen sisäpinnasta ulkotilaan aiheuttaa lämpötilakenttään notkahduksen, joka johtuu kosteuden haihtumisen rakenteesta ottamasta energiasta. Vastaavaa lämpötilakentän taipumista ei ole havaittavissa mineraalivillaeristeisessä rakenteessa. Tämä johtuu mineraalivillan matalasta kosteuskapasiteetista alle 98 %:n suhteellisilla kosteuksilla. Kosteuden haihtuminen aiheuttaa myös selvän viiveen sisäpinnan lämpövirran muuttumiseen, joka on nähtävissä laskentatuloksissa (lämpövirtoja ei saatu mitattua luotettavasti).



Kuva 5. Mitatut lämpötilajakaumat puoliavoimen rakenteen eristekerroksessa ensimmäisten kuuden tunnin aikana porrasmuutoksesta. Yhtenäinen viiva ( $S_{-}$ ) on sellukuiturakenteelle ja katkoviiva ( $GF_{-}$ ) lasivillaeristetylle rakenteelle.

Kokeessa sisäilmaa ympäröivä mittauskoppi siinä olevine koeseinineen oli sijoitettu vaakaan jatkuvaa punnitusta varten. Tavoitteena oli todeta koko systeemin massan muuttuminen ajan funktiona. Koska mittauskoppi oli tehty ei hygroskooppisesta solumuovista (XPS), voidaan katsoa, että massan muutos on seuraus koeseinään hygroskooppisesti sitoutuneen kosteusmäärän vaihtelusta. Punnitustuloksissa on otettu korjauksena huomioon ulkoilman lämpötilavaihtelun seurauksena tapahtunut noston vaihtelu. Kuvassa 6 esitetään punnitun massan muuttuminen ajan funktiona, kun koeseinässä oli sellukuitueristys.



Kuva 6. Puoliavoin höyrynsulullinen sellukuiturakenne. Rakenteeseen hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden vaihtelun seurauksena tapahtunut punnitusmassan vaihtelu.

Kuvan 6 mukaan rakenne alkoi nopeasti kuivua, kun päiväjakson ajaksi ulkoilman lämpötila oli noussut 30 °C:seen ja ulkoilman suhteellinen kosteus alentunut arvoon n. 20 %. Vesihöyryn poistuminen rakenteesta tapahtui ulkopinnan läpi. Samalla rakenteesta poistui myös höyrystymiseen kulunut faasimuutosenergia. Vastaavasti rakenteen massa alkoi kasvaa yöjakson alettua, kun ulkoilman lämpötila aleni n. 2 °C:seen ja suhteellinen kosteus nousi arvoon n. 60 %. Tällöin ulkoilman vesihöyryä sitoutui sellukuitueristykseen takaisin ja rakenteen massa kasvoi. Mainitulla ulkoilman lämpötila- ja kosteusvaihtelulla oli sellukuitueristetyin koerakenteen vuorokautisen kosteusvaihtelun vaihteluväli (amplitudi) n. 20 g/m<sup>2</sup>. Kun ulkoilman kosteuspitoisuutta nostettiin niin, että suhteellinen kosteus oli päiväjakson aikana edelleen n. 20 % ja yöjakson aikana n. 85 %, kasvoi vuorokautisen kosteusvaihtelun vaihteluväli arvoon n. 50 g/m<sup>2</sup>.

Kuvasta 6 havaitaan myös pitkäkestoinen massan aleneminen. Sellukuitueristykseen lähtökosteus on ollut kokeen alussa niin korkea (11,3 % kuivapainosta), että rakenne on kuivunut kosteuden vuorokausivaihtelusta riippumattomasti n. 10 vrk:n ajan ensimmäisen kokeen alusta.

Kuvan 6 koetulokset ilmentävät hyvin hygroskooppisen, ympäristönsä kanssa vuorovaikutuksessa olevan materiaalin käyttäytymistä. Rakenne reagoi sekä lyhytaikaisiin toistuviin ympäristöolojen muutoksiin että myös pitempikestoisiin muutoksiin. Lyhytaikaiset muutokset ovat kiinnostavia lähinnä vuorokausijaksolla

tapahtuvien vaihtelujen kannalta (ulkoilma ja auringon säteilykuorma, huonetilojen kosteuskuormitus). Pitkäkestoiset muutokset ovat kiinnostavia lähinnä erilaisien sääkausien kannalta. Materiaalit kostuvat ja kuivuvat eri tavoin riippuen niiden sijainnista rakenteissa. Pitkäkestoisella viiveellisellä vaihtelulla on merkitystä mm. puun ja puupohjaisten tuotteiden dimensiovaihtelun kannalta.

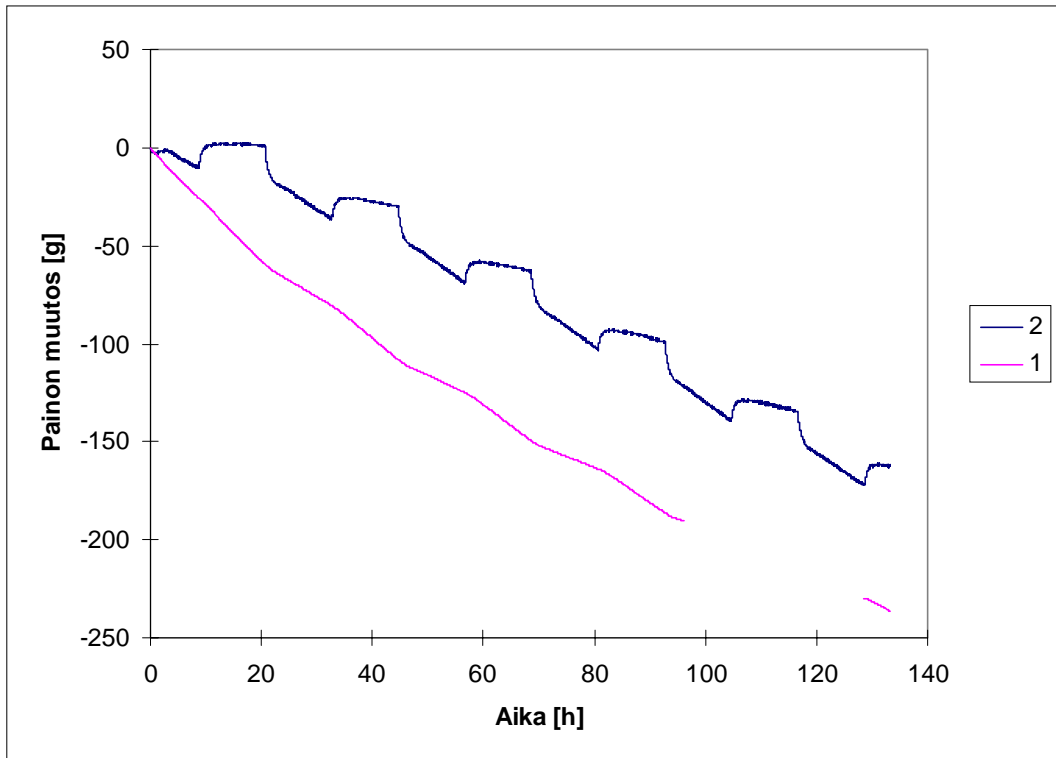
### **2.2.3 Avoin sellukuitueristys**

Avoimella sellukuitueristyksellä tarkoitetaan seuraavassa rakennetta, jossa lämmöneristyksen kummallakin puolella on vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevä pintakerros. Avoimen rakenteen kosteusfysikaalista toimintaa analysoitiin laboratoriotekokein kuvassa 4 esitetyllä laitteistolla.

Sisäilman lämpötila ja kosteus pyrittiin pitämään vakiona (26 °C ja 55 % r.h.). Ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihteli likimain porrasmuutoksena 12 tunnin välein. Lämpötila vaihteli arvojen 21 °C (päiväjakso) ja 4 °C (yöjakso) välillä. Vastaavasti ulkoilman suhteellinen kosteus vaihteli arvojen 25 % (päiväjakso) ja 79 % (yöjakso) välillä.

Koejärjestelyn olennaisin osa käsitti kaksi jatkuvasti suoritettavaa punnitusta. Mittauskoppiin sisäilmaan sijoitettiin vesihöyryn haihdutusallas, jonka painon alenemista seurattiin punniten. Haihdutusaltaan vesimäärän väheneminen ajan funktiona kuvaa koeseinän sisäpinnan läpi diffusoituneen vesihöyrymäärän kumulatiivista kasvua ajan funktiona.

Edellisen lisäksi punnittiin sisäilmaa ympäröivä mittauskoppi laitteineen ja koeseinineen. Punnitus ilmaisee koeseinän ulkopinnan läpi diffuusiolla poistuneen kumulatiivisen vesihöyrymäärän ajan funktiona. Punnitustulokset esitetään ajan funktiona kuvassa 7.



Kuva 7. Avoimen vesihöyryä diffuusiolla läpäisevin pintakerroksin varustetun sellukuitueristetyin koeseinän sisä- ja ulkopinnan läpi kokeessa diffusoitunut kumulatiivinen vesihöyry määrä ajan funktiona. Käyrä 1 koskee sisä- ja käyrä 2 ulkopintaa.

Kuvan 7 ja tunnettujen koeolosuhteiden perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Sisäilman vesihöyryn osapaine oli kokeessa jatkuvasti korkeampi kuin vesihöyryn osapaine ulkoilmassa tai rakenteen sisällä. Tämän seurauksena höyryvirran suunta oli koeseinän sisäpinnassa jatkuvasti ulospäin. Tähän tulokseen vaikutti myös se, että sisälämpötila pysyi vakiona arvossa 26 °C, joten koeseinän sisäpinnan tuntumassa ei esiintynyt lämpötilan vaihtelusta johtuvaa suhteellisen kosteuden vaihtelua eikä näin ollen myöskään kuituihin hygroskooppisesti sitoutuneen kosteusmäärän vaihtelua.
- Ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelun seurauksena on höyrynpaine vaihdellut koeseinän lämmöneristyksen sisällä, mikä on aiheuttanut tietyn jaksollisen vaihtelun sisäpinnan höyryvirtaan sen suuntaa kuitenkin muuttamatta.
- Höyryvirran suunta koeseinän ulkopinnan läpi muuttui aina yöjakson alussa, jolloin suhteellisen kosteuden nousu aiheutti ulkoilman vesihöyryn sitoutumisen lämmöneristyksen uloimpaan osaan. Höyryvirta kuitenkin muuttui ulospäin suuntautuneeksi yöjakson aikana. Päiväjakson alkaessa rakenteen painon aleneminen oli nopeinta, koska sisältä tulevan höyryvirran lisäksi myös rakenteesta poistui kuiduista vapautunutta vesihöyryä.

- Koetulos kuvaa varsin hyvin vesihöyryä diffuusiolla läpäisevän hygroskooppi-  
sen rakenteen toimintaa. Silloin, kun sisäilma on lämpimämpää kuin ulkoilma  
tai seinärakenne ja ulkoilman höyrynpaine on jatkuvasti pienempi kuin sisäil-  
man, siirtyy sisäilman vesihöyryä jatkuvasti rakenteeseen päin. Käytännössä  
tämä tarkoittaa sitä, että lämmityskautena huoneilmaa kuivattaa sekä ilman-  
vaihto että kosteuden poistuminen rakenteeseen.
- Lämmityskaudella vesihöyryä diffuusiolla läpäisevästä sellukuitueristetyistä  
ulkoseinärakenteesta voi tulla vesihöyryä huonetilaan päin vain, jos auringon  
säteily lämmittää ulkoseinän tai kosteuden tuotossa sisäilmaan on nopeita ajal-  
lisia vaihteluita. Seinän lämpeneminen aiheuttaa hygroskooppisesti sitoutuneen  
kosteuden höyrystymistä, jolloin höyrynpaine rakenteessa voi nousta sisäilman  
höyrynpainetta suuremmaksi. Huoneilman nopea kuivuminen kosteuskuormi-  
tuksen loppuessa aiheuttaa hygroskooppisen kosteuden höyrystymisen raken-  
teessa lähellä sisäpintaa, jolloin osa höyrystä voi tulla huoneen puolelle.

## 2.3 Pienimuotoiset kenttäkokeet

### 2.3.1 Koejärjestely ja -rakenteet

Laboratorion kattoterassille rakennettiin 4 kpl pieniä tilavuudeltaan n. 1 m<sup>3</sup> olevia  
puurunkoseinäisiä ”koetaloja”, joissa on toteutettu seuraavat perusratkaisut: CFI-  
eriste/höyrynsulku, CFI/höyrynsuluton, CFI/suotausvirtaus sisään rakenteen läpi ja  
MW/höyrynsulku. Ilmanvaihto oli kaikissa kopeissa koneellinen tavoitearvona 0,5  
ilmanvaihtoa tunnissa. Tuloilma tuli erillisen tuloilma-aukon kautta paitsi läpi  
suotaavan rakenteen tapauksessa. Kuvassa 8 on esitetty koppien yleisrakenne.

Kopeissa mitattiin

- rakenteen ja ilmatilan lämpötiloja
- paikallisia lämpövirran tiheyksiä (höyrynsululliset kopit, epäluotettavia tuloksia)
- rakenteen kosteuspitoisuuksia seinien runkopuun sisä- ja ulko-osassa
- sisäilman suhteellinen kosteus TINYTALK-mittalaitteella
- sisäilmaan haihdutetun vesihöyryn määrä.

Koppien rakenteet olivat seuraavat (ulkoapäin lukien)

Koerakenne no. 1

Seinä:

- ulkopaneeli 18 mm, ulkopinta käsitelty tummanruskeaksi
- ilmarako 18 mm
- huokoinen puukuitulevy 12 mm
- **mineraalivilla** 150 mm, 20 kg/m<sup>3</sup>
- höyrynsulkumuovi 0,2 mm
- huokoinen puukuitulevy 12 mm

Katto:

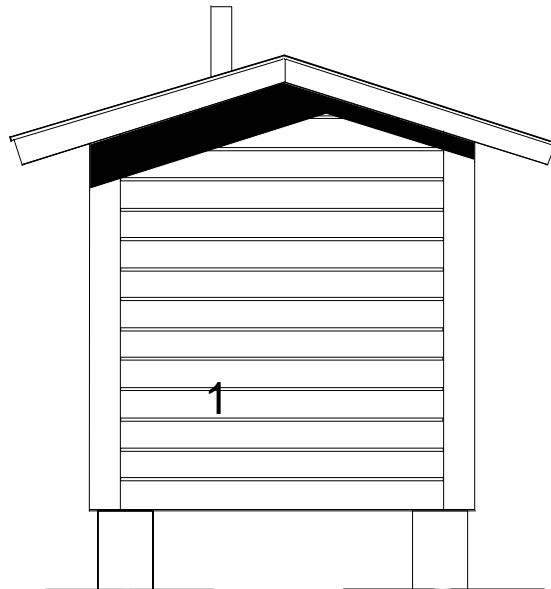
- bitumikermikate / ruodelaudoitus, harjakatto
- tuulettuva ilmaväli
- **mineraalivilla** 200 mm, 20 kg/m<sup>3</sup>
- höyrynsulkumuovi 0,2 mm
- huokoinen puukuitulevy 12 mm

MATALAENERGIATALO, SELLUKUITURAKENNE  
MITTAUSJÄRJESTELYT TERASSILLA

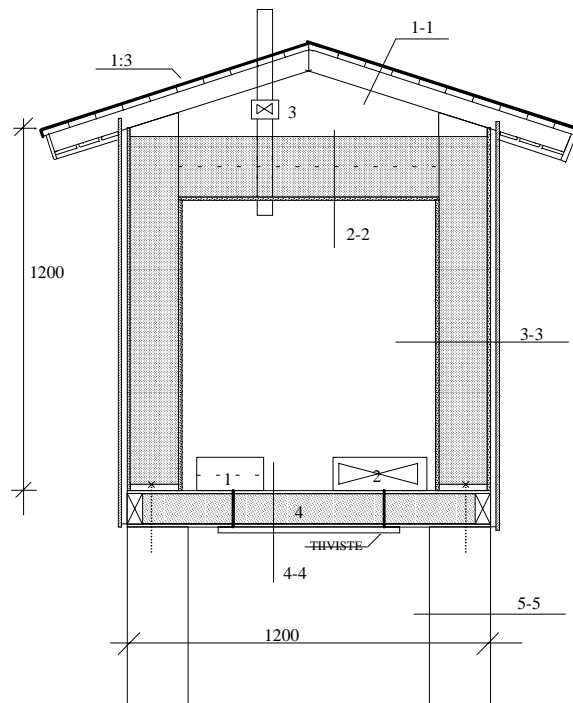
4 PIENIMITTAKAAVAISTA KOERAKENNUSTA

JULKISIVUT 1:10

LÄNSI / ITÄ



LEIKKAUS A-A 1:10



Kuva 8. Pienimittakaavan kenttäkokeen “koetalot”.

### Koerakenne no. 2

#### Seinä:

- kuten koerakenne no. 1, mutta lämmöneristeenä **sellukuitueriste** 150 mm, 55-60 kg/m<sup>3</sup>

#### Katto:

- kuten koerakenne no. 1, mutta lämmöneristeenä **sellukuitueriste** 200 mm, 20 kg/m<sup>3</sup>

### Koerakenne no. 3

#### Seinä ja katto:

- kuten koerakenne no. 2, mutta höyrynsulun tilalla huokoinen rakennuspaperi

### Koerakenne no. 4

#### Seinä:

- ulkopaneeli 18 mm
- ilmaväli 18 mm
- mineraalivillatuulensuoja 13 mm
- **sellukuitueriste** 150 mm, 55–60 kg/m<sup>3</sup>
- Tyvek-kalvo
- jäykkä mineraalivillalevy 30 mm

#### Katto:

- bitumikermikate / ruodelaudoitus, harjakatto
- tuulettuva ilmaväli
- **sellukuitueriste** 200 mm
- Tyvek-kalvo
- jäykkä mineraalivillalevy 30 mm



Merkittävimmit erot koppien 1–4 rakenteissa ovat seuraavat: Kopeissa 1 ja 2 on sisäverhouslevyn takana 0,2 mm paksu höyrinsulkumuovi, kopeissa 3 ja 4 rakennuspaperi tai Tyvek, jotka ovat vesihöyryä varsin hyvin läpäiseviä. Kopissa 1 on lämmöneristeenä mineraalivilla, kopeissa 2–4 sellukuituvilla.

Kunkin koekopin ilmaa kostutettiin seurantajaksojen aikana asettamalla kaikkiin koppeihin haihdutuspinna-alaltaan yhtäsuuret altaat, joista vesi sai vapaasti höyrystyä. Huomattavaa koppien sisäilman kosteuden kannalta oli vesihöyryn tehokas poistuminen diffuusiolla höyrinsuluttoman rakenteen läpi. Tyypillinen höyrinsuluttoman kopin suhteellinen kosteus oli lämmityskaudella n. 40 %, kun taas höyrinsulullisessa se oli niinkin korkea kuin 80 %.

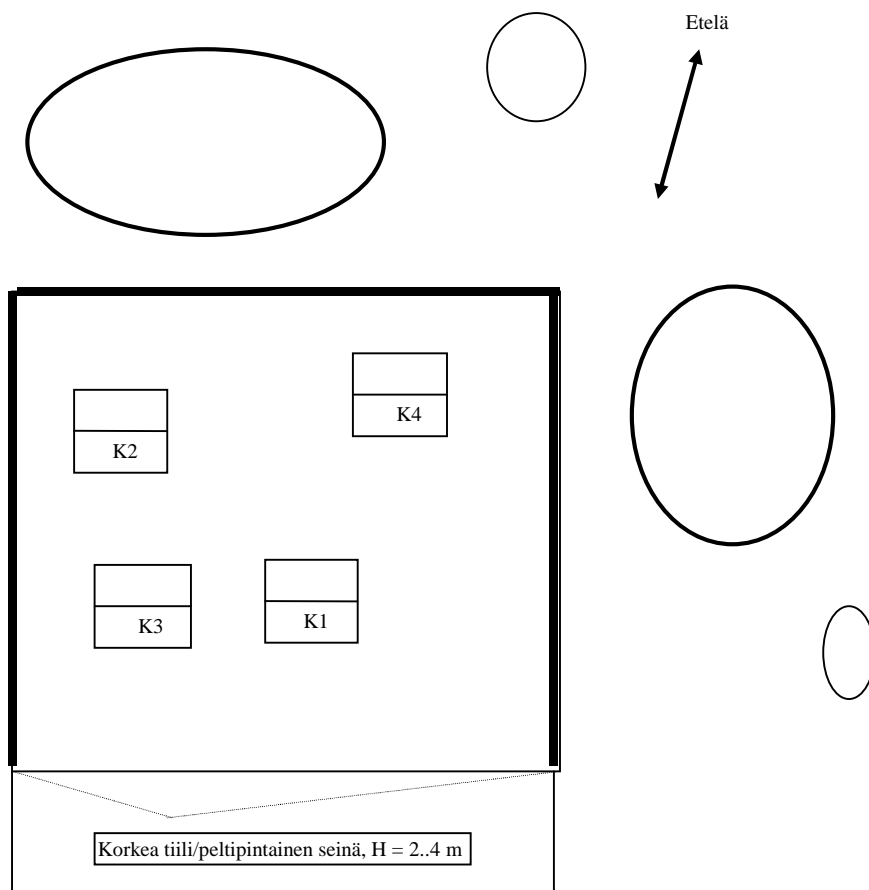
Mittausten päätavoitteena oli selvittää kokeellisesti rakenteiden kosteustekninen toiminta ja kosteuden keräytyminen rakenteisiin lämmityskauden aikana sekä rakenteiden lämpödynaaminen käyttäytyminen tilanteissa, joissa rakenteisiin kohdistuu merkittävä auringon säteilykuorma.

### **2.3.2 Rakenteiden käyttäytyminen auringon säteilyn alaisena**

Koekoppien rakenteiden mittaustulosten keskinäinen vertailu on jonkin verran vaikeaa johtuen siitä, että vaikka kopit ovatkin terassilla avoimessa tilassa, on niiden mikroilmastoissa tästä huolimatta eroja. Terassin vieressä oleva puu aiheutti yhden aikariippuvaisen tekijän erilaisiin ympäristöoloihin: puun kesällä aiheuttama varjo osuu eri ajanhetkellä eri koppien rakenteiden vaippaan. Auringon säteilyn vaikutus rakenteiden pintalämpötiloihin on suuri. Samoin koppien läheisestä sijoittelusta johtuen (tilanahtaus) osa kopeista ‘näkee’ laboratorion seinän ja toisten koppien seinät, kun taas erällä kopeista on pitkäaaltoisen säteilyenergian vaihtoa esteettä ympäristön kanssa. Koekoppien sijainnit terassilla esitetään kuvassa 9.

Kuvassa 10 esitetään kahden eteläpuoleisen koeseinän paksuussuuntaiset lämpötilajakautumat elokuisen helleviikon ajalta. Toinen seinistä on eristetty keveällä mineraalivillalla (a-kuva) ja toinen sellukuitueristeellä (b-kuva). Kummassakin seinässä on höyrinsulkumuovi. Kuvasta 10 voidaan todeta seuraavaa:

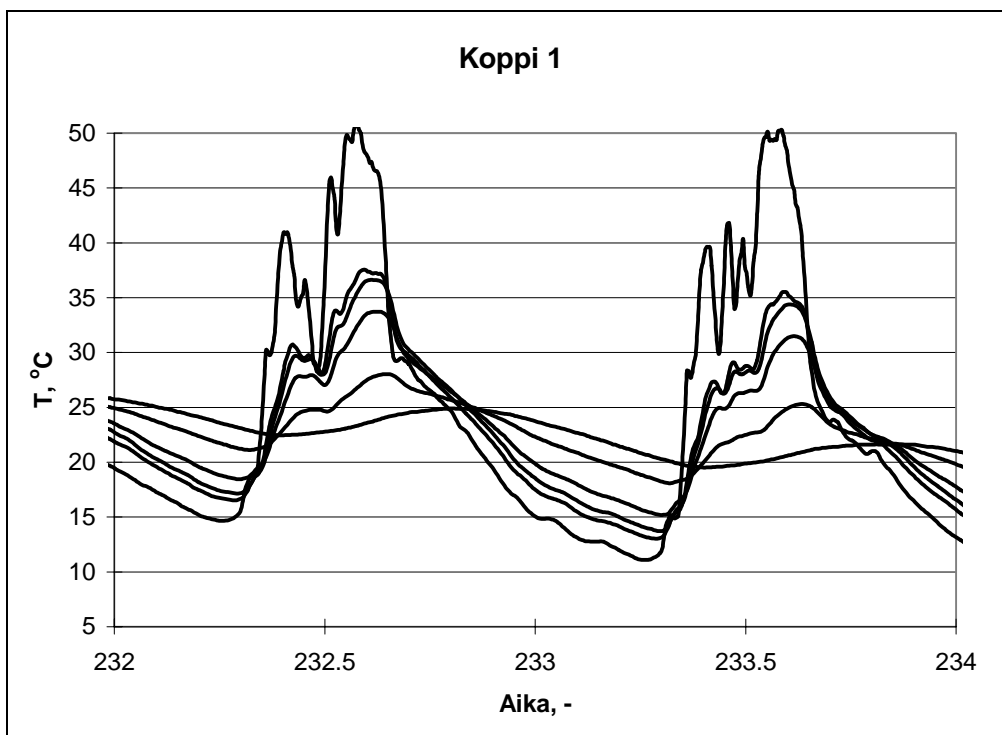
- Kummankin seinän ulkopinnan lämpötila nousi korkeimmillaan arvoon n. 50 °C, kun ulkoilman lämpötila oli samanaikaisesti vajaan 30 °C. Pintalämpötilan nousua edisti pinnan tumma väritys ja toisaalta rakennetta jäähdytti tuuletusvälin pystysuuntainen ilmavirtaus.
- Kun seinän ulkopinnan lämpötila oli n. 50 °C, oli tuulensuojan ulkopinnan lämpötila vastaavalla kohdalla kummassakin seinässä n. 37 °C. Sen sijaan tuulensuojan ja lämmöneristeen rajakerros sekä lämmöneristyksen sisäosat jäivät sellukuitueristetyssä seinässä jonkin verran mineraalivillaseinää alempaan lämpötilaan (Kuva 10 a ja b, käyrät 3, 4 ja 5).



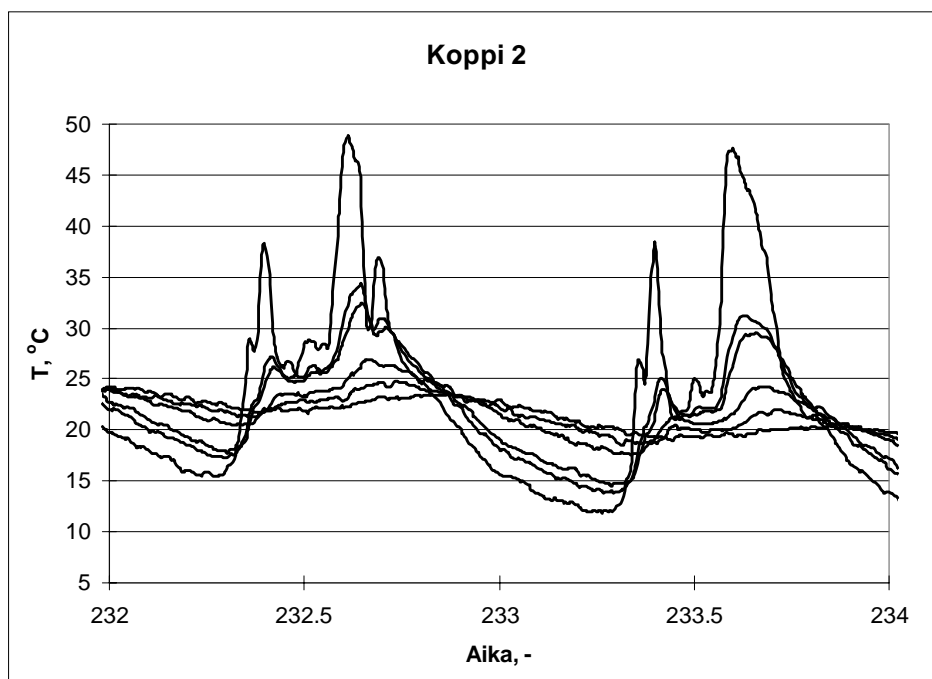
*Kuva 9. Koekoppien sijainti laboratorion kattoterassilla.*

Sellukuitueristuksen ulko- ja sisäosan päiväaikaisen lämpötilahuipun jääminen mineraalivillaseinän vastaavaa huippuarvoa matalammaksi johtuu sekä hygroskooppisesti sellukuituun sisältyneen kosteuden höyrystymisestä (faasimuutosenergia) että sellukuitueristeen korkeammasta tiheydestä (rakenteen massiivisuus). Myös voidaan kuvasta 10 todeta, että seinärakenteen sisäpinnan lämpötila oli sellukuitueristetyssä kopissa hieman mineraalivillaseinää alempana koko mittausjakson ajan. Kaksi edellämainittua tekijää voivat osaltaan selittää tätä eroa, mutta on myös muistettava eri koppien mikroilmastoerojen mahdollinen vaikutus. Yleisesti voidaan todeta, että suoritettu mittaus tukee aikaisempia laboratorionkokeita ja laskelmia, jotka ovat osoittaneet hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden höyrystymisen ja lauhtumisen vaikutukset rakenteiden lämpötilaan. Ilmiö on täten todennettu tämän tutkimuksen eri vaiheissa, mutta sen käytännöllinen merkitys on ilmeisen marginaalinen. Monien muiden huonetilan termisiin oloihin vaikuttavien parametrien (aurion säteily ikkunoista, henkilökuormat, rakenteiden massiivisuus yms.) vaikutus on hygroskooppisen kosteuden höyrystymiseen tai lauhtumiseen verrattuna suurempi.

Jaksoa edeltävänä aikana sekä varsinaisen mittausjakson aikana kopit olivat lämmittämättömiä ja niiden sisälämpötila ohjautui pelkästään mikroilmastoparametrien ohjaamana.



(a)



(b)

Kuva 10. Mineraalivilla- (a) ja sellukuitueristetyin (b) koekopin eteläseinän mitattu lämpötilavaihtelu ajan funktiona eri syvyyksillä rakenteen pinnasta hellekautena 19–20.8.1995. Rakenteissa on polyeteenimuovikalvo höyrynsulkuna.

### 2.3.3 Rakenteiden kosteustekninen toiminta talvella

Koekoppien sisälämpötiloja pyrittiin pitämään lämmityskaudella vakiona ja samana kaikissa kopeissa, mikä ei kuitenkaan täysin onnistunut säätöteknisistä ongelmista johtuen. Lämpötilaerot eri koppien ilmatilojen välillä eivät kuitenkaan olleet olennaisia lämmityskauden mittauksen tavoitteet huomioon ottaen. Koekoppeihin asetettiin myös haihtumisaltaat sisäilman kosteuskuorman aikaansaamiseksi. Haihtumisnopeus riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta, joka jäi höyrinsuluttomissa kopeissa olennaisesti höyrinsulullisia pienemmäksi. Täten höyrinsuluttomissa kopeissa 3 ja 4 haihtui kosteutta huomattavasti enemmän kuin höyrinsulullisissa, mutta rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta höyrinsululliset kopit olivat vaikeampia sisäilman suuren suhteellisen kosteuden takia.

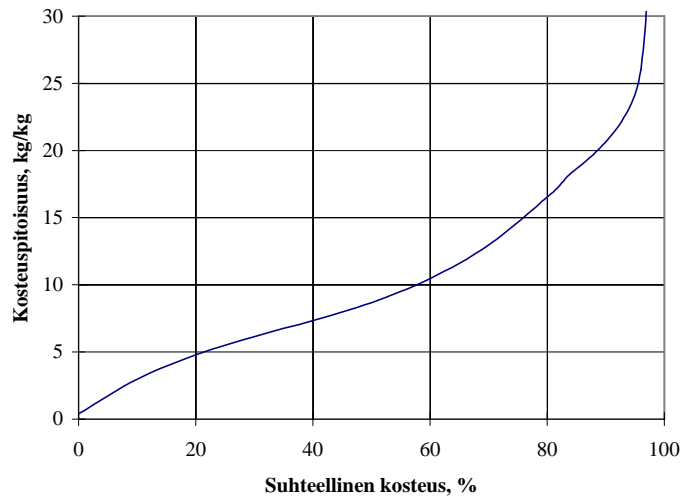
Seinäarakenteiden pystyrunkopuiden kosteuspitoisuuksia mitattiin viikon välein ns. vastusmenetelmällä. Puuhun naulattujen kahden kuparinaulan välisen jännitteen mittaustulos voidaan muuntaa kalibrointikäyrien avulla puun kosteuspitoisuudeksi. Pystyrunkopuiden kosteudet mitattiin seinän keskiosan runkopuun sisä- ja ulkoreunasta (kuva 18) pohjois- ja eteläpuolen seiniltä.

Kuvissa 12–15 esitettyjen mitattujen puun kosteuspitoisuuksien perusteella kaikkien koppien rakenteet toimivat tyydyttävästi. Höyrinsuluttomissa kopeissa puun kosteuspitoisuudet saavuttavat keskitalvella varsin korkeat arvot jopa n. 0,23 kg/kg (noin 93 rh-%), mutta kosteus kuivui nopeasti keväällä lämpötilojen noustessa nollan asteen lähettyville ja auringon säteilyn lämmittäessä rakenteita. Kuivuminen näyttää olevan riittävän nopeaa ja mm. homeen kasvulle suotuisia lämpötiloja ja kosteuspitoisuuksia ei esiinny pitkiä aikoja. Homeen kasvun alkamiseen tarvitaan +20 °C:n lämpötilassa vähintään 80 %:n suhteellinen kosteus. Tarvittava suhteellinen kosteus kasvaa lämpötilan laskiessa ja kasvu hidastuu siten, että alle nollan lämpötiloissa home ei yleensä kasva ollenkaan vaan hitaasti kuolee. Lahon syntymiseen vaaditaan selvästi plussan puolella olevia lämpötiloja sekä erittäin korkeita pitkäaikaisia kosteuspitoisuuksia (vähintään n. 95–97 %-rh useita viikkoja/kuukausia).

Kuvassa 11 on esitetty puun tasapainokosteuskäyrä. Käytännössä tasapainokosteuskäyrät riippuvat jonkin verran lämpötilasta siten, että alhaisemmissa lämpötiloissa huokoinen materiaali voi sitoa enemmän kosteutta kuin korkeammassa lämpötiloissa. Tätä lämpötilariippuvuutta ei kuitenkaan otettu huomioon arvioitaessa puun suhteellista kosteutta mitattujen kosteuspitoisuuksien avulla. Tähän tarvittava informaatio on usein riittämätöntä, eikä jatkossa esitettävissä simulointilaskelmissa käytetyssä laskentaohjelmassa ole näin ollen tätä lämpötilariippuvuutta mallinnettu.

Höyrinsululliset rakenteet pysyvät selkeästi kuivempina läpi talven saavuttaen maksimikosteuden n. 0,16 kg/kg, mikä vastaa noin 80 rh-%.

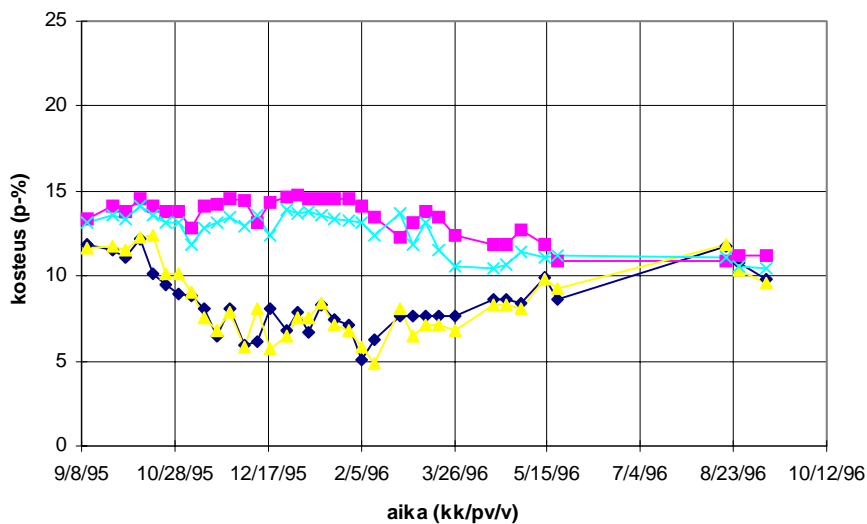
Puurunkojen sisäpuoliset lämpimässä olevat osat kuivuvat talvikaudella lämpötilagradientin ansiosta ulospäin eivätkä näin kerää talvikaudella kosteutta.



Kuva 11. Laskennallisissa analyyseissä puun suhteellisen kosteuden määrittämiseen kosteuspitoisuuksien perusteella käytetty tasapainokosteuskäyrä.

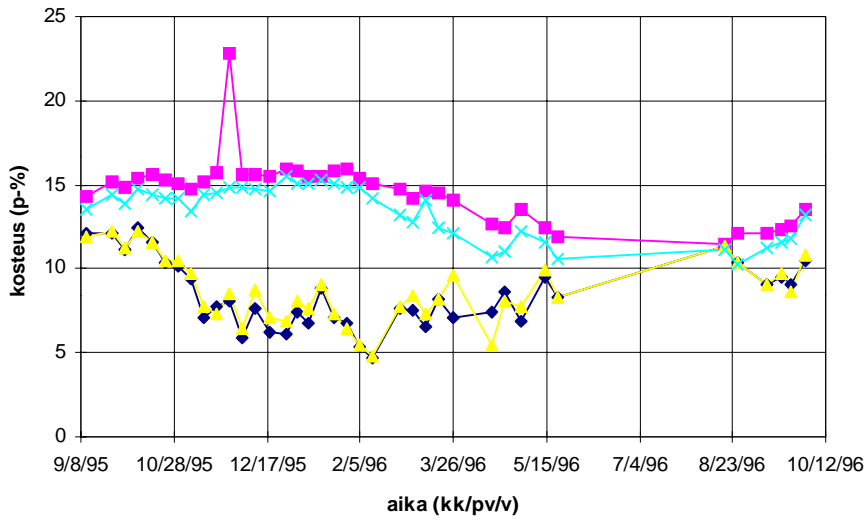
Kopeissa 1–4 esiintyneet runkopuiden kosteuspitoisuudet on esitetty kuvissa 12–15.

#### Koppi 1 Runkopuiden kosteuspitoisuudet



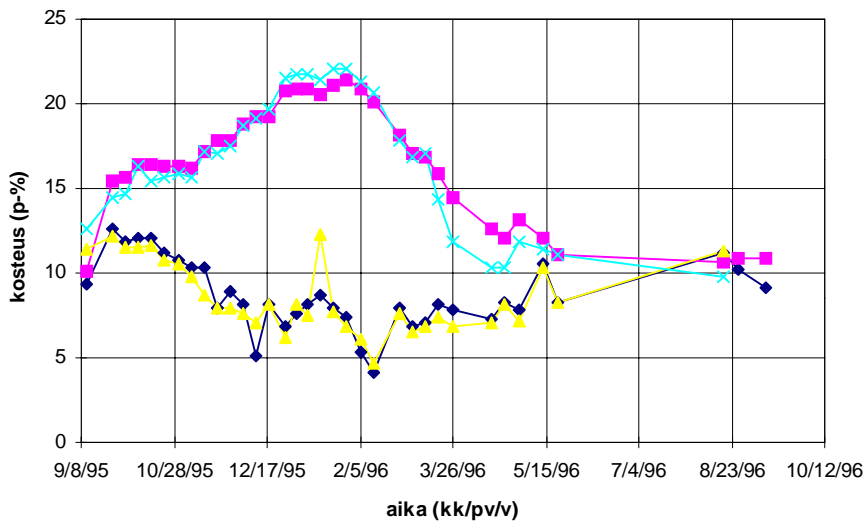
Kuva 12. Höyrynsulullisen mineraalivillaeristeen kopin pohjois- (N) ja eteläseinän (S) runkopuiden ulko- ja sisäpuolisen kerroksen mitatut kosteuspitoisuudet ajan funktiona.

Koppi 2 Runkopuiden kosteuspitoisuudet



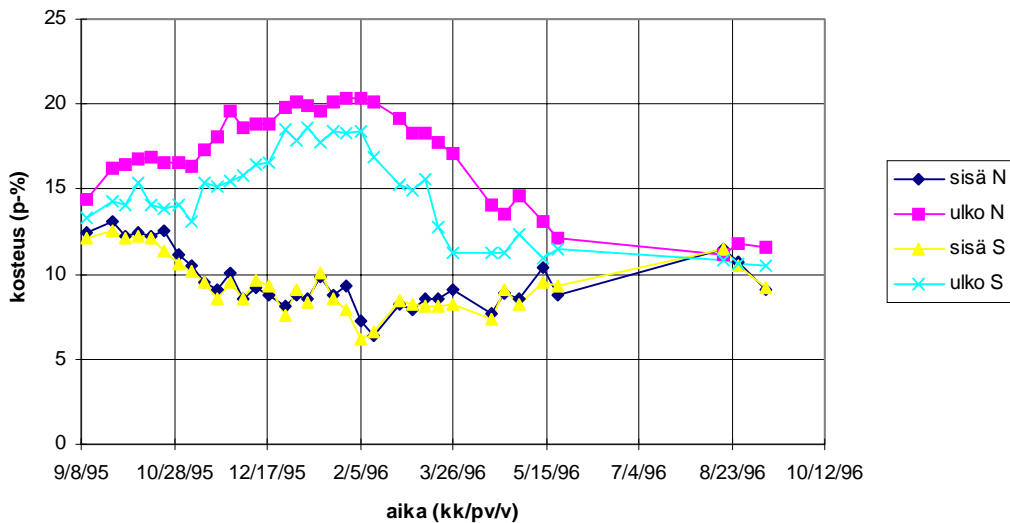
Kuva 13. Höyrynsulullisen sellukuitueristeisen kopin pohjois- (N) ja eteläseinän (S) runkopuiden ulko- ja sisäpuolisen kerroksen mitatut kosteuspitoisuudet ajan funktiona. Yksittäinen muista poikkeava kosteuspiikki loppuvuodesta -95 lienee mittarivirhe.

Koppi 3 Runkopuiden kosteuspitoisuudet



Kuva 14. Kopin 3 (sellukuitueriste, rakennuspaperi) pohjois- (N) ja eteläseinän (S) runkopuiden ulko- ja sisäpuolisen kerroksen mitatut kosteuspitoisuudet ajan funktiona.

Koppi 4 Runkopuiden kosteuspitoisuudet



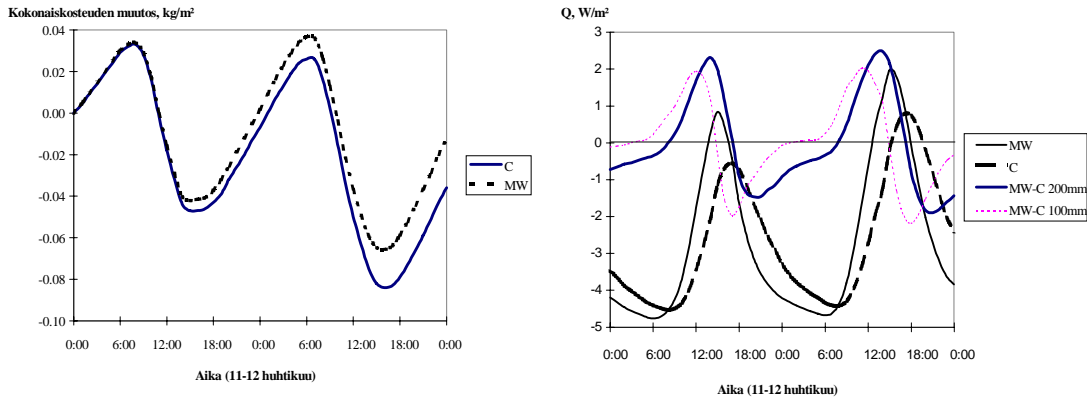
Kuva 15. Kopin 4 (sellukuitueriste, tyvek) pohjois- (N) ja eteläseinän (S) runkopuiden ulko- ja sisäpuolisen kerroksen kosteuspitoisuudet ajan funktiona.

## 2.4 Rakenteiden toiminta luonnonsäässä: laskennallinen analyysi

Kevytrakenteisen puoliavoimen (höyrynsulullisen) seinärakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa arvioitiin vuositasolla käyttäen numeerista laskentaohjelmaa LATENITE. Reunaehto- ja ympäristöolosuhteiden luomiseen käytettiin Helsingin säätiedostoa. Laskennassa tarkasteltiin rakenteen eristekerroksen hygroskooppisuuden merkitystä rakenteen lämpötekniseen käyttäytymiseen laskemalla sekä sellukuitu- että mineraalivillaeristetyn rakenteen vuosikäyttäytyminen. Laskennassa ainoa ero rakenteissa oli eristekerroksen tasapainokosteuskäyrät.

Rakenne koostui neljästä materiaalikerroksesta: ulkopinnassa 12 mm:n huokoinen kuitulevy, 100 mm:n tai 200 mm:n eristekerros, 0,15 mm:n polyeteenikalvo ja sisäpinnassa 12 mm:n vanerilevy. Materiaaliominaisuudet laskentaan otettiin LATENITE-ohjelman omasta tietokannasta (3).

Hetkelliset lämpövirrat käyttäytyivät eri tavoin hygroskooppisella (sellukuitu) kuin ei-hygroskooppisella materiaalilla eristetyssä seinässä. Sellukuitueristetyssä seinässä sisäpinnan lämpövirrat nousivat hitaammin kuin mineraalivillaeristetyssä seinässä, kun rakenteen ulkopinnan lämpötila alkoi nousta aamun tunneilla. Lämpövirrat ja rakenteen kokonaiskosteuspitoisuuden muutos ajan funktiona kahden huhtikuun vuorokauden aikana on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Eteläseinän sisäpinnan lämpövirrat (ja lämpövirtojen ero sellukuitu- ja mineraalivillaseinän välillä) ja kokonaiskosteuden muutos per seinä- $m^2$  huhtikuussa. C= sellukuitueristetty seinä, MW= mineraalivillaeristetty seinä. Eristepaksuus on 200 mm. Vertailun vuoksi on esitetty myös lämpövirtojen erot 100 mm:n mineraalivilla- ja sellukuitueristetyin seinän välillä.

Lämpövirrat saavuttavat maksimiarvonsa iltapäivällä kello 15.00 (mineraalivilla-seinä) ja 17.00 (sellukuituseinä). Lämpövirran päivittäinen amplitudi on pienempi sellukuitueristetyssä seinässä kuin mineraalivillaeristetyssä seinässä. Sellukuituseinässä oli korkeammat lämpöhäviöt (tai pienemmät lämpökuormat) päiväaikaan, mutta vastaavasti pienemmät lämpöhäviöt illalla ja yöaikaan. Huolimatta hetkitäisistä eroista lämpövirroissa vuorokautinen lämpövirtojen keskiarvo oli 1 %:n tarkkuudella sama molemmissa seinissä kuvan 4 osoittamalla aikavälillä. Lämpövirtojen erilaisuus aiheutuu kosteuden liikkeistä ja niistä seuraavista faasimuutoslähteistä ja nieluista rakenteen eri osissa. Rakenteen terminen massiivisuus (kuivat materiaalit) oli sama analysoiduissa rakenteissa. Hetkellisten lämpövirtojen suhteellinen ero on prosentuaalisesti suurempi paksun eristyksen (200 mm) seinässä kuin ohuen 100 mm:n seinässä, kun taas absoluuttiset erot ovat lähes samat riippumatta eristepaksuudesta.

## 2.5 Koetalojen vuosisimulointi rakennustason laskentamallilla

Pienimuotoisten koetalojen käyttäytymistä vuositason arvioitiin laskennallisilla menetelmillä. VTT Rakennustekniikassa on kehitetty koko rakennuksen lämpö- ja kosteustaseen laskentamalli lisäämällä rakenteiden lämmön ja kosteudensiirron laskentaohjelmaan (LATENITE) huonetilan taseyhtälöt.

Koetalot eli terassikopit sijaitsevat VTT Rakennustekniikan Lämpömiehenkuja 3:n kattoterassilla. Kopeissa oli lämpövastus, jota ohjattiin lämpötilasäädöllä pyrkien pitämään koppien lämpötila n. 20–22 °C:ssa asteessa. Kosteuskuormana käytettiin vesiasioita, joiden vapaa vesipinta-ala pyrittiin asettamaan sellaiseksi, että kosteuden tuotto koppeihin vastaisi (kopin koko huomioon ottaen) suuruusluokaltaan normaalia asuinrakennusta. Kostutus vaimeni jostain syystä maaliskuun alusta eteenpäin niin, että huhtikuun aikana sisäilman kosteus asettui ulkoilman kosteuteen. Tämä on ilmeisesti merkki siitä, että kostutusastiasta on loppunut vesi.



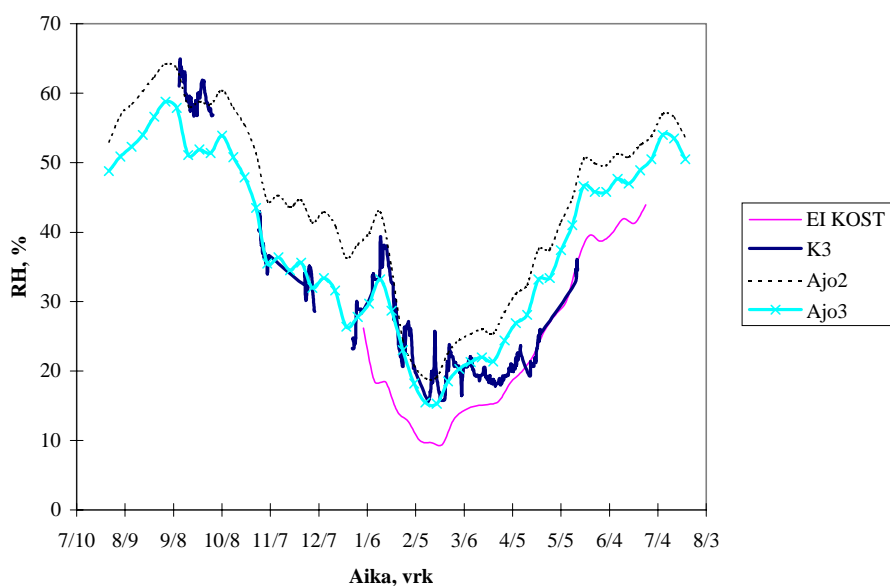
Kopissa 2 ilmanvaihto ei oletettavasti aina toiminut säädetyissä arvoissaan ( $n = 0,5$  l/h) johtuen ilmakehässä esiintyvän kosteuden jäätyemisestä. Samaa ilmiötä esiintyi myös muissa kopeissa ajoittain. Tämän seurauksena kopin 2 (höyrynsulullisen) sisäilman suhteellinen kosteus on hyvin pitkiä aikoja 80–90 %. Tästä huolimatta rakenteen kosteuspitoisuudet pysyttelevät alhaisina (lukuunottamatta sisäpinnan kosteutta). Suuren suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan n.  $+20$  °C vaikutuksesta koppiin alkoi syntyä hometta sisäpintoihin. Ilman suhteellisen kosteuden nousu 10 %:lla  $20$  °C:n lämpötilassa merkitsee n.  $1,7$  g/m<sup>3</sup> lisäkosteutta.

Laskennassa käytettiin ulkoisina reunaehtoina VTT:n koetaloalueella mitattuja tuntikeskiarvollisia säätietoja, joita olivat ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, tuulen nopeus ja suunta, kokonais- ja diffuusi säteily vaakatasolle sekä vaakatason sademäärä. Mitatuissa säätiedoissa oli joitakin lyhyitä mittausongelmista johtuneita katkoksia. Toukokuussa -96 oli yksi kymmenen päivän mittauskatkos, jonka aiheuttama vajoitus säätiedoissa täytettiin kopioimalla vajousta edeltävä vuorokausi puuttuvalle jaksolle.

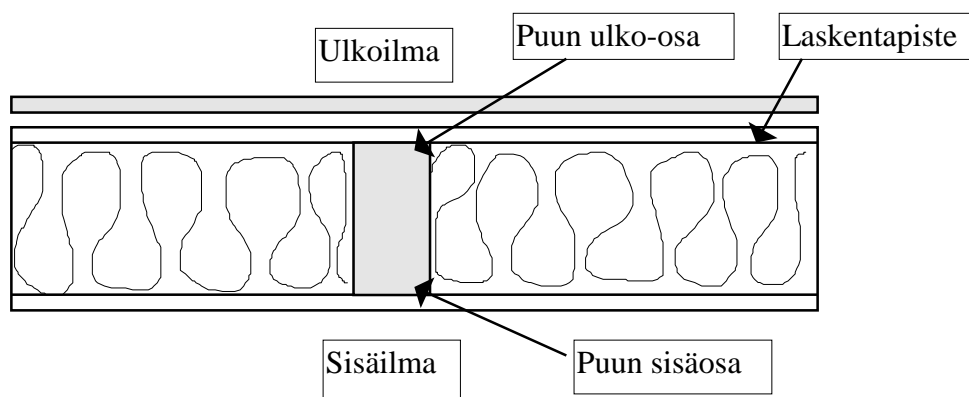
Kuvassa 17 esitetään kopissa 3 (höyrynsuluton) vallinnut sisäilman kosteuspitoisuus ajan funktiona. Kuvassa 19 esitetään mitattu haihtumisesta aiheutunut veden kulutus kopeissa 2 (höyrynsulullinen) ja 3 (höyrynsuluton).

Puun kosteuspitoisuus käyttäytyy hieman eri tavoin kuin huokoisen kuitulevykerroksen, mikä johtuu useista eri syistä: puun vesihöyryn diffuusiokerroin on alhaisempi kuin huokoisella kuitulevyllä ja kosteus puuhun siirtyy osin sivusuunnassa eristekerroksesta ja osin ulko- ja sisäilmasta huokoisten kuitulevykerrosten läpi. Puurakennetta ei voitu yksiulotteisesti käsiteltäessä mallintaa käsiteltäessä koko rakennuksen tasetta. Yksiulotteisista laskelmista on kuitenkin luotu reunaehtotiedosto kaksiulotteiseen rakenneanalyysiin, jossa verrataan puun ja huokoisen kuitulevykerroksen kosteusteknisen käyttäytymisen eroja. Nämä laskelmat ovat vielä tekeillä, eikä niitä ole raportoituna.

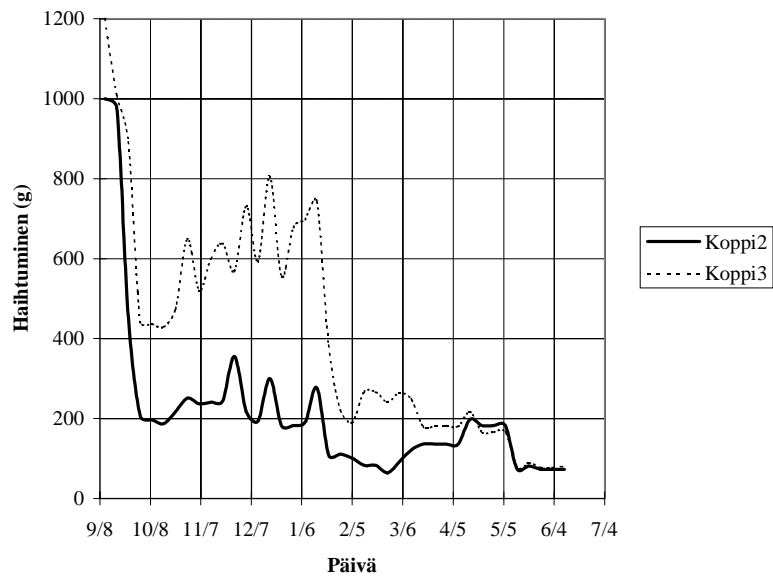
Simuloidun rakenteen rakennekuva on esitetty kuvassa 18. Kuvassa 20 esitetään kopin 3 ulkoseinän puurungon sisä- ja ulko-osan mitatut kosteuspitoisuudet ajan funktiona sekä huokoisen puukuitulevyn yksiulotteisesti lasketut kosteuspitoisuudet.



Kuva 17. Sisäilman mitattu suhteellinen kosteus höyrynsuluttomassa kopissa sekä laskennallisesti tuotettu sisäilman suhteellinen kosteus eri kostutusmalleilla. EI KOST = sisäilman rh-% kostuttamattomassa tilanteessa, K3 = kopista 3 mitattu rh-%, Ajo2 ja Ajo3 eri kostutustapauksissa laskennallisesti esiintyneet sisäilman rh-%. Ajanjakso heinäkuu -95...heinäkuu -96.

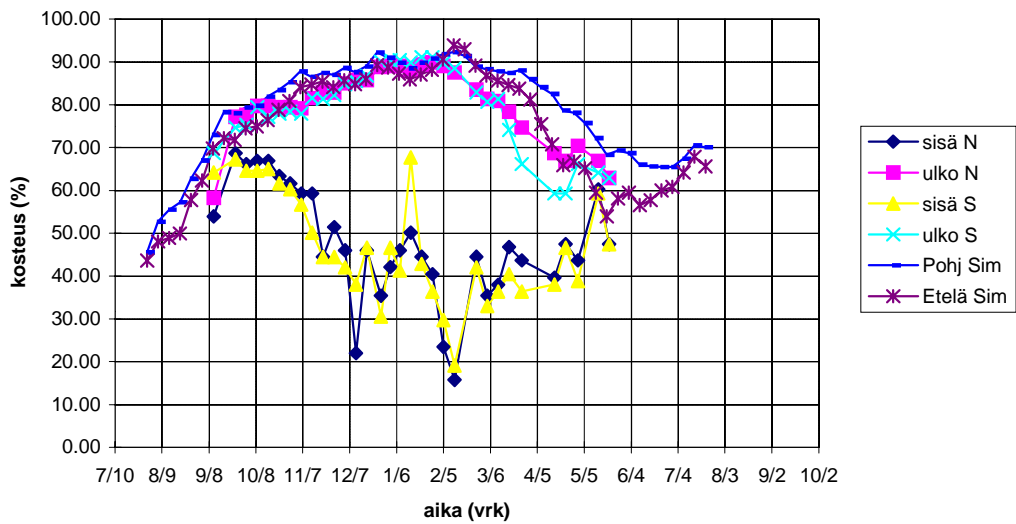


Kuva 18. Kosteuden mittauspisteet ja laskennallisesti määritetyn ja kuvaan 20 tulostetun kosteuspitoisuuden sijainti rakenteissa.



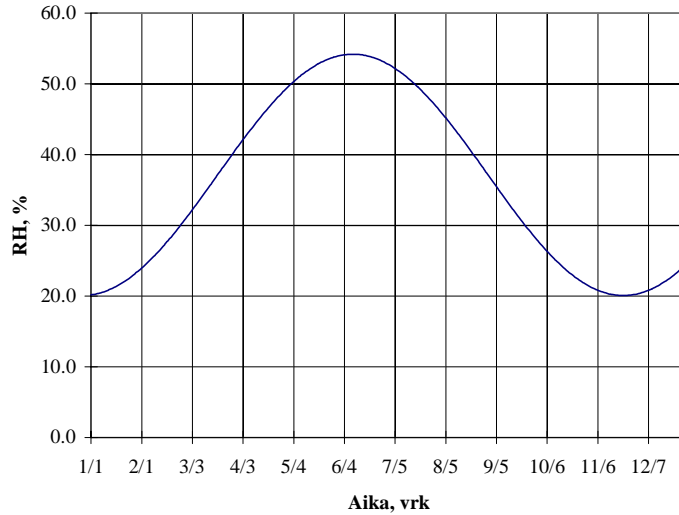
Kuva 19. Mitattu veden kulutus kostutusaltaista höyrynsuluttomassa (koppi 3) ja höyrynsulullisessa (koppi 2) kopissa. Toinen kostutusallas poistettu 22.1.96 ja kostutus pintaa pienennetty 2.2.96. Ajanjakso syyskuu -95...kesäkuu -96.

#### Koppi 3 puidenkosteudet

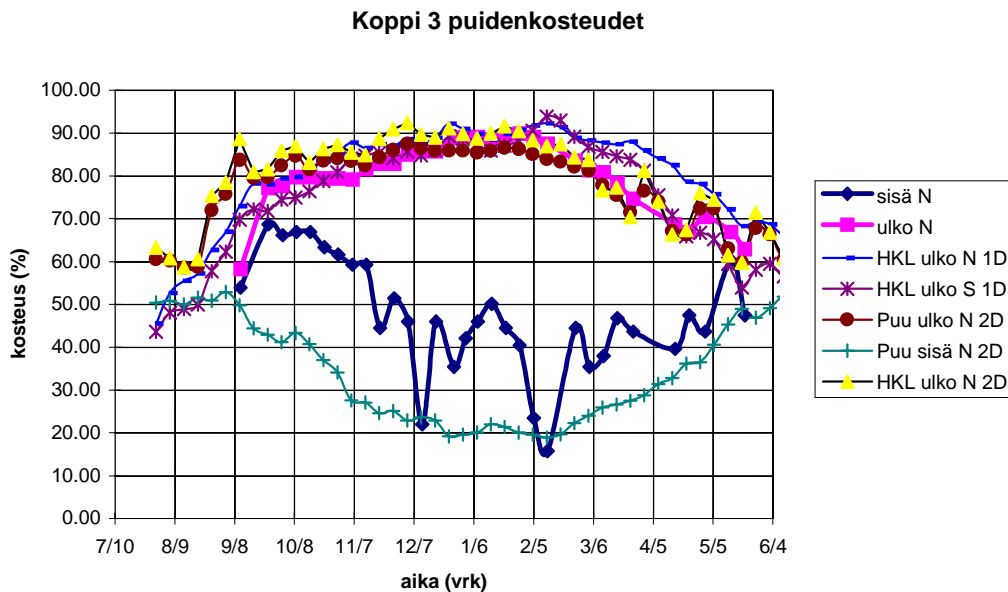


Kuva 20. Mitatut puiden kosteuspitoisuudet rakenteen ulko- ja sisäreunoilla sekä lasketut huokoisen kuitulevyn (sisäpuolinen 2 mm) kosteuspitoisuudet. Mittaus- ja laskentapistet on esitetty kuvassa 18.

Kaksidimensioisessa laskelmassa käytettiin sisäilman reunaehtoina kuvassa 21 esitettyä suhteellista ilman kosteutta. Sisäilman lämpötilaksi asetettiin +21 °C tai ulkoilman lämpötila, jos ulkoilma oli lämpimämpää.



Kuva 21. Sisäilman suhteellinen kosteus ajan funktiona (kk/pv) kaksidimensioisissa kosteyslaskelmissa.



Kuva 22. Kaksidimensioisella rakenteiden lämmön ja kosteudensiirron laskentaohjelmalla LATENITE lasketut puun ja huokoisen kuitulevyn suhteelliset kosteudet yhdessä mitattujen (muunnettu kosteuspitoisuuksista suhteelliseksi kosteudeksi tasapainokosteuskäyrän avulla) ja rakennustason mallilla laskettujen yksidimensioisten tulosten kanssa. Kaksidimensioisessa laskennassa ulkoilma on jätetty mallintamatta.

Kuvan 22 tulosten perusteella voidaan havaita, että tuuletusrako todennäköisesti toimii paremmin (tehokkaampi ilmavirtaus) kuin mitä laskennassa oletettiin. Rakennustason mallissa olevissa tuloksissa on sekä vuoden alussa, että lopussa selkeä viive. Kaksidimensioisena mallinnetun rakenteen toiminta ilman ulkoverhosta ja tuuletusrakoa vastaa hyvin mitattuja tuloksia. Tästä voidaan päätellä, että asetetuilla reunaehdoilla kaksidimensioista mallia voidaan käyttää rakenteen analysoimiseen ja materiaaliparametrien merkityksen arvioimiseen rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta.

## 2.6 Kenttämittauksen tulokset

Kenttämittaukset suoritettiin Marjalan sellukuitueristetyssä puurunkoisessa koetalossa Liperissä alkaen lokakuussa 1994 ja jatkuen helmikuuhun 1996. Täten mittaus kattoi rakennusvaiheen jälkeisen ensimmäisen talven, seuraavan kesän ja toisen talven sydänosan. Koetalon vaipan rakenteet olivat seuraavat:

Ulkoseinät sisäpinnasta lukien

- Maril-maali kolme kertaa
- makulatuuripaperitapetti metylaaniselluloosaliisterillä
- Runkoleijona puukuitulevy 25 mm
- raitabitumilaminaatti
- selluvilla spray-menetelmällä 250 mm / kaksoisrunko
- Runkoleijona 25 mm
- tuuletusrako 22 / 44 mm
- pystyaukko rimoin saumoissa
- keltamultamaalaus

Yläpohja sisäpinnasta lukien

- höylätty paneeli 15 mm
- ilmaväli 22 mm
- raitabitumilaminaatti
- Runkoleijona 25 mm
- sellukuitueristys 450 mm
- Runkoleijona 25 mm
- tuulettuva ilmaväli 100 mm
- ruodelaudoitus
- huopakate

Mittausjärjestely on kuvattu tarkemmin lähteessä (5). Puurungon kosteuspuutisuutta seurattiin hetkellismittauksin pääilmansuuntiin olevissa seinissä, kaltevassa yläpohjassa sekä ryömintätilaisessa alapohjassa. Seinissä oli kaksoisrunko ja mittauskohdat olivat ulomman rungon ulko- ja sisäosassa kolmella eri korkeudella. Kun seinien lämmöneristyksen kokonaispaksuus oli 250 mm, oli sisäosan mittauskohta syvyydellä 125 mm lämmöneristyksen sisäpinnasta.

Yläpohjassa kosteuspuutisuuden mittauskohdat olivat järeän kattopalkin (50 x 200 mm<sup>2</sup>) yläpinnassa ja tuuletusvälissä 50 x 125 mm<sup>2</sup> palkin kyljessä. Alapohjassa puun kosteuspuutisuuden mittauskohdat olivat lattian alemman järeän kannatuspalkin (50 x 200 mm<sup>2</sup>) alapinnassa lämmöneristyksen alareunan tasalla sekä ryömintätilan ilmatilaan asennetuissa puukappaleissa. Alapohja oli ryömintätilainen reunoiltaan avoin hyvin tuuletettava ratkaisu.

Seurantamittausten alkaessa marraskuussa 1994 oli runkopuun kosteuspuutisuus mittauskohdissa varsin vaihteleva - kuivimmillaan n. 14 % kuivapainosta ja kosteimmillaan n. 30 %. Seinien runkotolppien alkukosteus oli suurempi kuin ylä- ja alapohjan. Ilmeinen syy on seinien eristäminen spray-menetelmällä, joka suoritettiin juuri ennen mittausten alkua ja jossa rakenteeseen sumutetaan vettä eristeen seassa. Ensimmäisen talven aikana kosteus säilyi pienin muutoksin em. lähtötasollaan kunnes kuivuminen alkoi maaliskuuhun vaihteessa 1995. Kuivumista jatkui elokuun loppuun, jonka jälkeen kosteuspuutisuudet kääntyivät nousuun.

Elokuussa 1995 oli puun kosteuspuutisuus kaikissa mittauskohdissa välillä 7–13 % kuivapainosta. Ryömintätilassa alapohjan palkeista ja ilmatilaan sijoitetuista puukappaleista mitattu kosteuspuutisuus oli elokuussa tasolla 12 % kuivapainosta ja yläpohjan tasolla 8 % kuivapainosta. Itä- ja länsiseinät olivat kuivempia (7–11 % kuivapainosta) kuin pohjoisseinä (9–14 % kuivapainosta) ja yllättäen myös eteläseinä (8–13 % kuivapainosta). Syytä eteläseinän puurungon suhteellisen korkeaan kosteuspuutisuuteen ei tiedetä, sillä auringon säteily pääsee varsin hyvin kohdistumaan eteläseinään.

Elokuun jälkeen alkoi runkopuun kosteuspuutisuus nousta ja oli helmikuun 1996 alkuun mennessä pohjoisseinässä alueella 12–18 % kuivapainosta, itä- ja länsiseinässä alueella 11–17 % kuivapainosta, yläpohjassa alueella 13–17 % ja alapohjassa alueella 17–20 %.

### 3 Hiilidioksidin absorptio rakenteisiin ja diffuusio rakenteiden läpi

Samoin kuin lämpö ja kosteus myös ilman kaasumaiset epäpuhtaudet voivat diffuusoitua rakenteissa käytettävien huokoisten materiaalien läpi. Yhtenä kriteerinä rakennuksen ilmanvaihdon tarpeeseen käytetään ilman hiilidioksidipitoisuutta. Hiilidioksidi on määrällisesti suurin ihmisen kehon tuottamista kaasumaisista epäpuhtauksista. Ohjaamattomissa ilmanvaihto-järjestelmissä ilmanvaihdon tarpeen määrittäminen perustuu erilaisiin arvioihin.

#### 3.1 Pienimittakaavainen kenttäkoe ja sen simulointi

Hiilidioksidin diffuusio pienimittakaavaisen kenttäkokeen ”koetalojen” eli koppien rakenteiden läpi analysoitiin laskentamallilla, jossa rakenteiden osien lämmön ja kosteuden siirto sekä kaasun diffuusio on yhdistetty rakennuksen ilmanvaihdon taseeseen. Laskentamallin toiminnan verifioimiseksi kopeissa suoritettiin koppien sisäilman hiilidioksidipitoisuusmittauksia. Koppeihin (sekä höyrinsuluttomiin että höyrinsulullisiin) asetettiin hiilidioksidilähde. Pitoisuuden annettiin nousta noin 4 500–5 000 ppm, jonka jälkeen lähde lakkautettiin. Ilman hiilidioksidipitoisuuden muuttumista ajan funktiona mitattiin koko prosessin ajan.

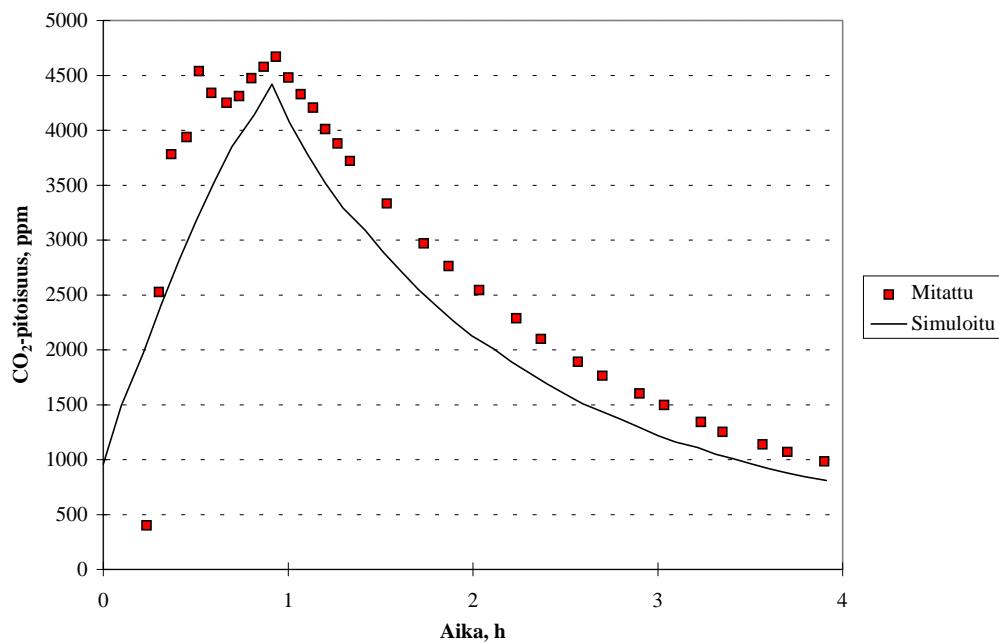
Mallissa tarvittavina hiilidioksidin diffuusiokertoimina käytettiin TTKK:ssa mitattuja arvoja (4).

*Taulukko 1. Laskennassa käytettyjen materiaalikerrosten diffuusiovastukset.*

Materiaalikerros	Diffuusiovastus Z, (s/m)
Maalipinta, himmeä lateksi	$4,1 \cdot 10^3$
Huokoinen kuitulevy, 12 mm	$4,1 \cdot 10^3$
Sellukuitueriste, 150 mm	$15,0 \cdot 10^3$
Mineraalivilla, 150 mm	$15,0 \cdot 10^3$
Rakennuspaperi	$3,3 \cdot 10^3$

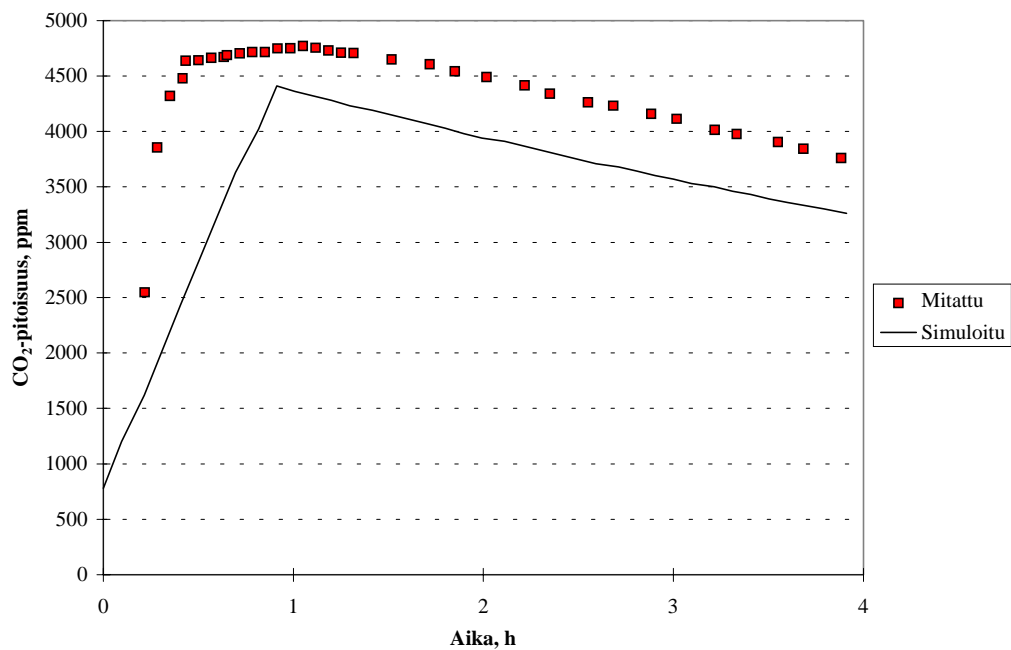
Höyrinsulullisen sellukuitueristeisen kopin hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona on esitetty kuvissa 24 ja 26. Höyrinsuluttoman kopin pitoisuudet on esitetty kuvissa 23 ja 25. Mitatut ja lasketut pitoisuudet täsmäävät hyvin toisiinsa eri ilmanvaihtomäärillä ja mallin voidaan olettaa antavan luotettavat arviot rakenteiden merkityksestä sisäilman hiilidioksidipitoisuuden vaihtelevissa kuormitusoloissa.

**Koppi 3,  $n=0,09$  1/h**



*Kuva 23. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrinsuluttomassa kopissa, jossa ilmanvaihto  $n = 0,09$  1/h.*

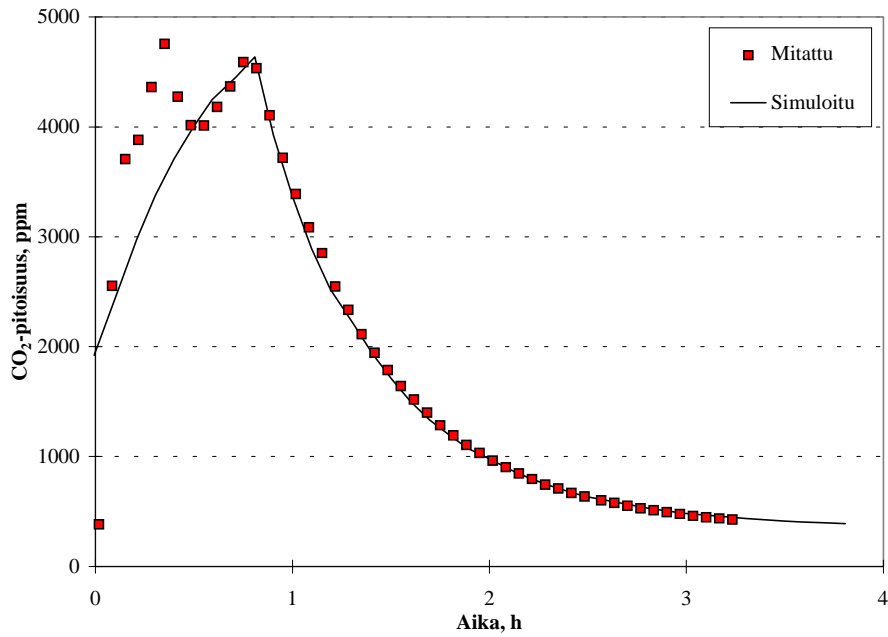
**Koppi 2,  $n=0,09$  1/h**



*Kuva 24. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrinsulullisessa kopissa, jossa ilmanvaihto  $n = 0,09$  1/h.*

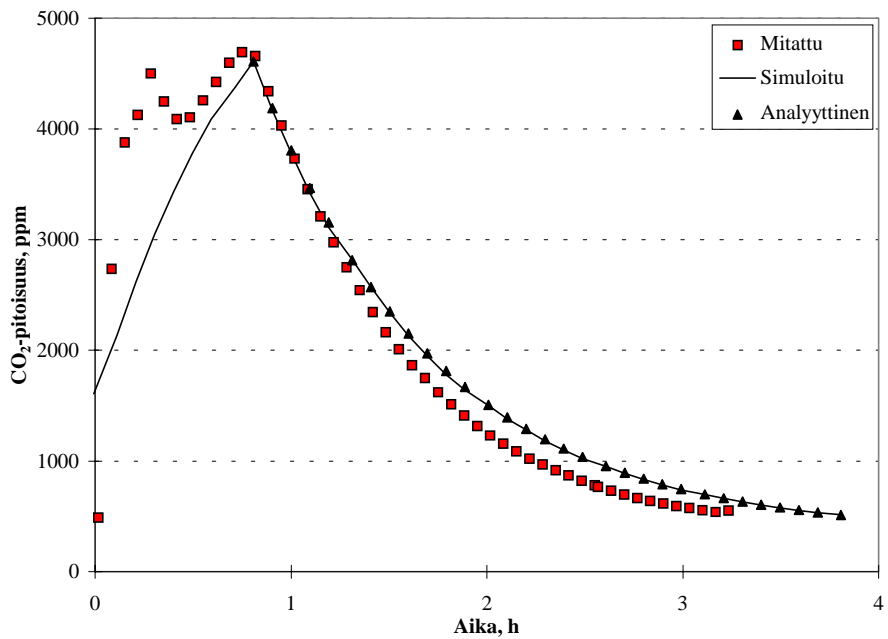


**Koppi 3,  $n=1.09$  1/h**

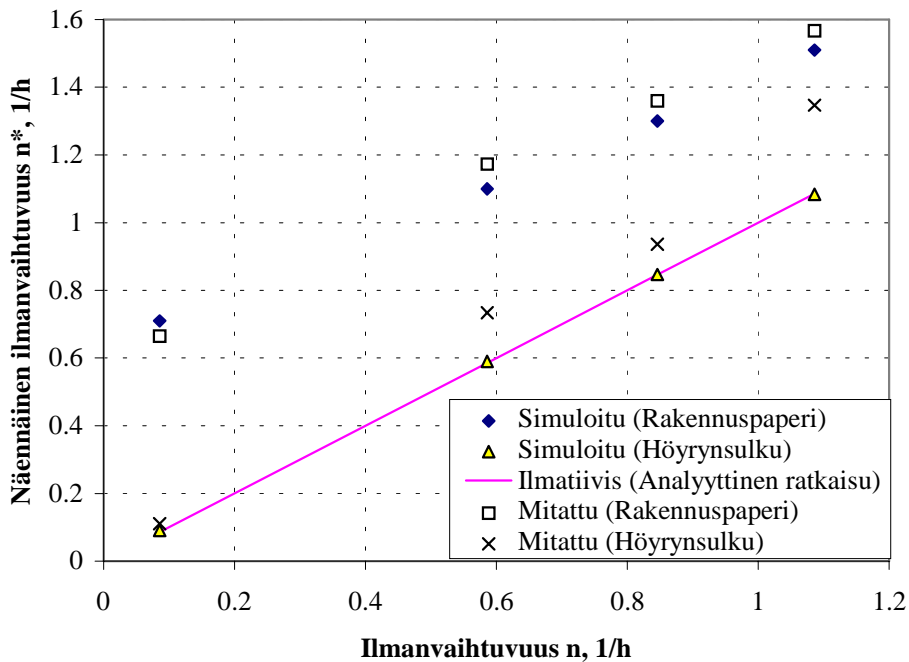


*Kuva 25. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrynsuluttomassa kopissa, jossa ilmanvaihto  $n = 1,09$  1/h.*

**Koppi 2,  $n=1.09$  1/h**



*Kuva 26. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrynsulullisessa kopissa, jossa ilmanvaihto  $n = 1,09$  1/h.*



Kuva 27. Näennäinen ilmanvaihtuvuus todellisen ilmanvaihtuvuuden funktiona, kun ilmanvaihtuvuus lasketaan ilman hiilidioksidipitoisuudesta.

Kuvassa 27 esitetään hiilidioksidipitoisuuden alenemisen perusteella laskettu ja mitattu näennäinen ilmanvaihtuvuus sekä höyrynsululliselle että höyrynsuluttomalle kopille näiden todellisen ilmanvaihtuvuuden funktiona. Höyrynsuluttoman kopin varsin suuri näennäinen ilmanvaihtuvuus johtuu kopin mittasuhteista (paljon rakennepintaa tilavuusyksikköä kohden). Normaalilla huonekoolla tulos olisi alueella 0,1–0,2 vaihtoa suurempi kuin höyrynsulullisessa tapauksessa.

### 3.2 Täysmittakaavan dynaaminen analyysi

Laskentamallin verifiointin jälkeen suoritettiin hiilidioksidin diffuusioanalyysi todellisen kokoiselle huoneistolle. Ensimmäiseksi tarkastelukohteeksi otettiin makuuhuone. Rakennusten ilmanvaihdon tarve oletetaan usein yöaikana pienemmäksi kuin iltaisin. Päivisin ja iltaisin asukkaat oleskelevat ja liikkuvat talossa eri huoneissa ja tuottavat eri toiminnoissa mm. ruoanlaitossa ja peseytymisessä huomattavat määrät kosteutta, jota käytetään arvioitaessa ilmanvaihdon tarvetta. Hiilidioksidin tuotto ei tällöin ole usein ongelmallista sisäilman laadun kannalta, koska ilmanvaihto on riittävä ja CO<sub>2</sub>-tuotto/tilavuus on suhteellisen pieni. Yöaikaan ilmanvaihto kuitenkin saatetaan pistää puoliteholle, koska usein ilmeisesti kuvitellaan, että sille ei ole niin tarvetta. Seuraavassa havainnollistetaan miten makuuhuoneen kosteus- ja hiilidioksidipitoisuudet vaihtelevat yöaikaan ilmanvaihdon ja rakenteiden läpäisevyyden funktiona. Oletuksena on, että makuuhuoneessa ei ole suuria pintoja omaavia materiaaleja (huonekaluja ym.), jotka voimakkaasti absorboisivat kosteutta, toisin sanoen ihmisten tuottama kosteus kehitty huoneilmaan, diffusoituu rakennuksen vaippaan ja kuljettuu ilmavirtojen mukana.

Makuuhuone oletetaan nurkkahuoneistoksi. Ympäröivien tilojen hiilidioksidi- ja kosteuspitoisuudet ja lämpötila ovat samat kuin ulkoilmassa (+20 °C, RH = 50 %,  $C_{CO_2} = 350$  ppm) ja näiden tilojen kapasiteetti (ja ilmanvaihto) oletetaan riittäväksi pitämään pitoisuudet alhaisina, vaikka seinien kautta diffusoituisikin vesihöyryä ja hiilidioksidia ko. tiloihin. Makuuhuoneen koko on 4 m x 3 m x 2,5 m (leveys, syvyys, korkeus). Havainnollistetaan höyrynsuluttoman ja -sulullisen rakenteen toimintaa olettamalla kaikkien seinien rakenne samaksi kussakin laskentatapauksessa. Todellisen makuuhuoneen toiminta asettunee näiden kahden tuloksen väliin (nurkkahuone: höyrynsululliset ulkoseinät, höyrynsuluttomat väliseinät).

Rakenteet ovat seuraavanlaiset:

#### Seinät

HKL 13 mm, PE/RP, Eriste 150 mm, HKL 13 mm, Ilmaväli 18 mm, Puuverhous 18 mm

#### Katto

HKL 13 mm, PE/RP, Eriste 150 mm, Ilmaväli, Kattohuopa

#### Lattia

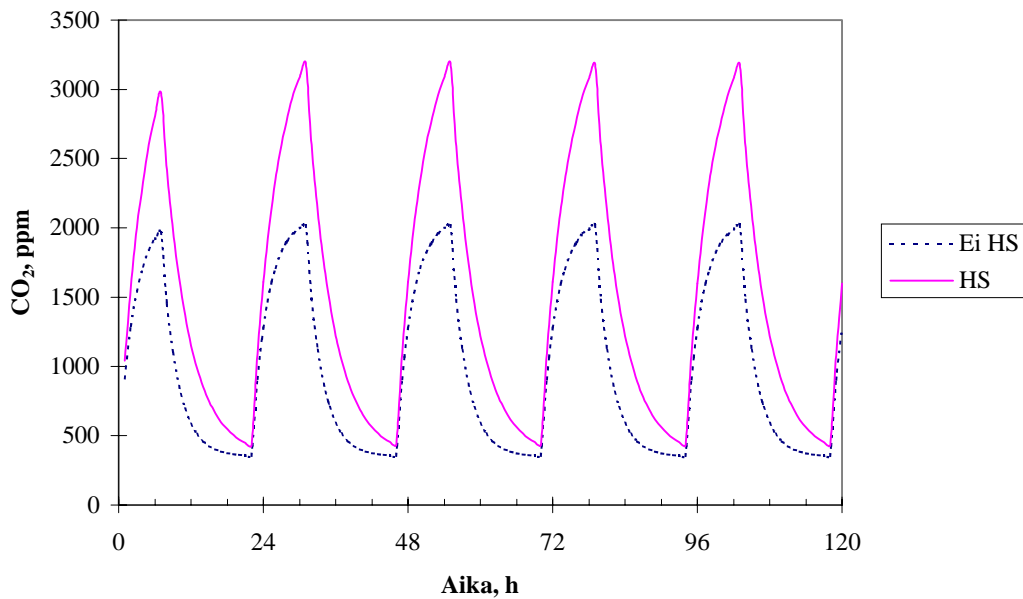
Läpäisemätön

Ilmanvaihtomäärinä käytetään  $n = 0,25$  1/h ja  $n = 0,5$  1/h. Huoneessa nukkuu kaksi aikuista klo 23–07. Heidän oletetaan tuottavan yhteensä vesihöyryä 60 g/h ja hiilidioksidia 430 ml/min.

### **3.2.1 Huoneen hiilidioksidipitoisuudet**

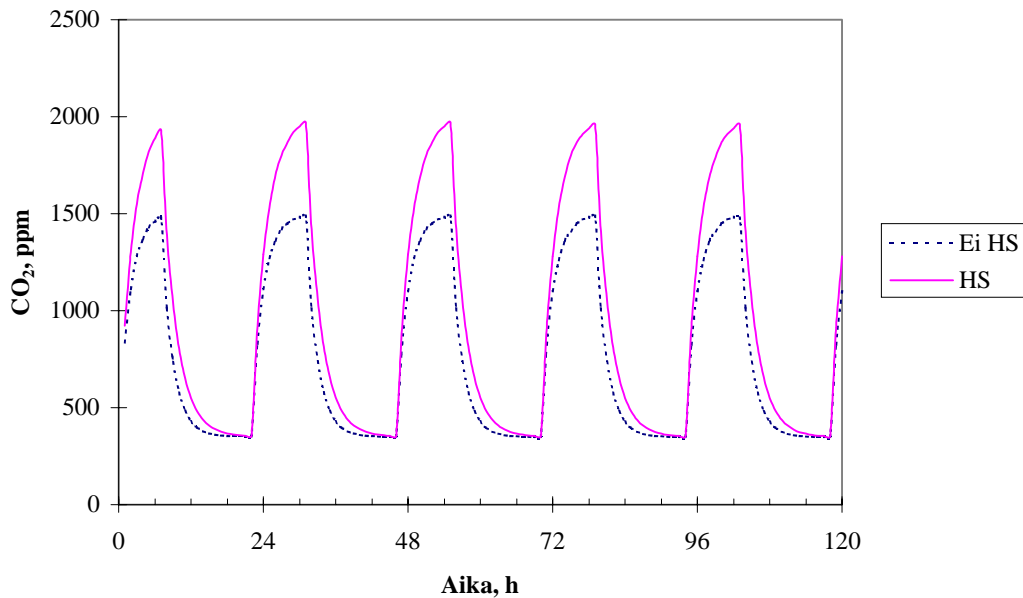
Makuuhuoneen hiilidioksidipitoisuutta arvoitiin laskennallisesti viiden vuorokauden ajalta. Kuvissa 28 ja 29 on esitetty hiilidioksidipitoisuuden kehittyminen vuorokauden eri aikoina höyrynsulullisessa ja -suluttomassa rakenneratkaisussa kahdella eri ilmanvaihtomäärällä.

**n = 0,25 1/h**



Kuva 28. Hiilidioksidipitoisuuden kehittyminen  $12 \text{ m}^2$ :n makuuhuoneessa, kun ilmanvaihto on  $n=0,25 \text{ 1/h}$ . HS = höyrinsulullinen rakenne (polyeteenikalvo), Ei HS = rakenne, jossa höyrinsulku on korvattu rakennuspaperilla.

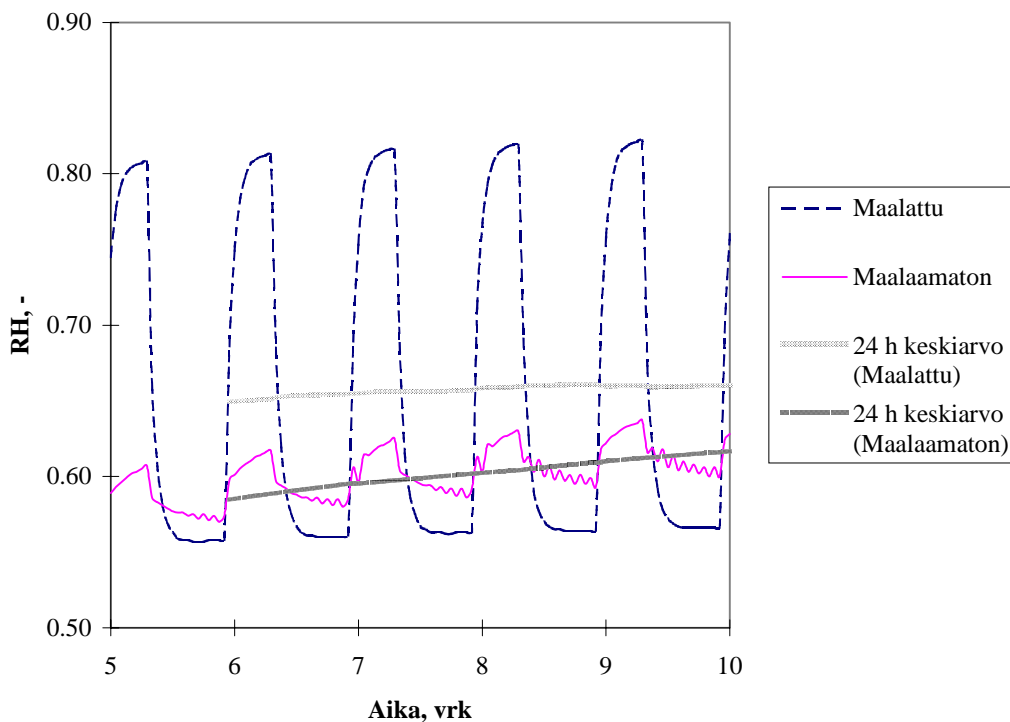
**n = 0,5 1/h**



Kuva 29. Hiilidioksidipitoisuuden kehittyminen  $12 \text{ m}^2$ :n makuuhuoneessa, kun ilmanvaihto on  $n=0,5 \text{ 1/h}$ . HS = höyrinsulullinen rakenne (polyeteenikalvo), Ei HS = rakenne, jossa höyrinsulku on korvattu rakennuspaperilla.

### 3.2.2 Kosteustekninen toiminta

Makuuhuoneen suhteellisen kosteuden kehittyminen tasapainotilaan kestää kauemmin sellaisessa huoneessa, jonka rakenteiden sisäpinnat ovat kosteutta hygroskooppisesti sitovia. Kuvassa 30 on esitetty sisäilman suhteellisen kosteuden käyttäytyminen makuuhuoneessa, kun seinien ja katon sisäpinnat ovat maalattut tai maalaamattomat (kosteudenläpäisyltään tiivis maalipinta). Lasketulla 10 vrk:n ajanjaksolla kosteus ei ole vielä ehtinyt asettua tasapainotilaan maalaamattomassa huoneessa, sen sijaan maalattut pinnat eivät reagoi sisäilman kosteuden muutoksiin juuri lainkaan ja sisäilman kosteus noudattaa pääosin ilmanvaihdon ja kosteuskuormien muutoksia.



Kuva 30. Sisäilman suhteellinen kosteus ajan funktiona maalaamattomassa ja maalatussa makuuhuoneessa. Henkilökuormitus klo 23–07.

## 4 Päätelmät

Kosteuden ja sen liikkumisen merkitys lämmöneristettyjen seinärakenteiden käyttäytymiseen riippuu eristemateriaalin ja sitä ympäröivien ainekerrosten tasapainokosteusominaisuuksista. Hygroskooppiset materiaalit (esim. sellukuitueriste, puu, puukuitulevy) pystyvät sitomaan itseensä suurempia määriä kosteutta kuin ei-hygroskooppiset materiaalit (mineraalivillat) ulko- ja sisäilmassa esiintyvillä tyyppillisillä suhteellisilla kosteuksilla. Sellukuitueristeessä esiintyvät kosteusmäärät suhteellisilla kosteuksilla 40–70 % ovat riittäviä aiheuttamaan hetkellisesti noin +20 % korkeampia lämpövirtoja paksuissa höyrytiivissä rakenteissa. Tämä lämpövirran lisäys aiheutuu lämpötilamuutosten aiheuttamasta kosteuden haihtumisesta ja kondensoitumisesta rakenteen eri osissa. Sama pätee myös ei-hygroskooppisille eristeille, jos eristekerroksen ympärillä olevat kerrokset ovat kosteutta sitovia tai jos kosteutta on jäänyt merkittäviä määriä höyrytiivin rakenteen sisään.

Ulkopinnastaan höyrynläpäisevissä rakenteissa kosteuden liikkeet ulkoilman ja rakenteen välillä voivat toimia eräänlaisena puskurikerroksena, joka tasoittaa rakenteen sisäpinnassa esiintyviä hetkellisiä lämpövirtoja ulkoilman lämpötilan ja rakenteeseen kohdistuvan auringon säteilyn vaihdellessa. Laskenta- ja mittaustulosten mukaan kosteutta sitovat (hygroskooppiset) ja kosteutta sitomattomat eristeet toimivat lämpöteknisesti eri tavalla, jos tarkastellaan vuorokausien hetkellisiä lämpövirtoja. Hygroskooppisen materiaalin kosteuskapasiteetti ja sen aiheuttama lämpövirtojen tasausvaikutus (puoliavoimessa rakenteessa) helpottaa rakennuksen lämpötilan säätymistä tasaisemmaksi sekä parantaa täten termistä viihtyisyyttä. Vaikutus on kuitenkin rajallinen ja menettää merkitystään, jos huonetilan lämpökuormissa esiintyy suurehkoja ajallisia vaihteluita (esim. auringon säteily ikkunan kautta).

Lämmityskauden aikana osa huoneilmaan tuotetusta vesihöyrystä poistuu diffuusoitumalla höyrinsuluttomiin rakenteisiin ja näiden läpi ulkopuolelle. Lisäksi kosteutta poistuu normaalisti ilmanvaihdon mukana. Täten huoneilma on höyrinsuluttomassa rakennuksessa talvella jonkin verran kuivempaa kuin höyrinsulullisessa rakennuksessa, kun kosteuden tuotto sisäilmaan ja ilmanvaihtomäärät ovat yhtäsuuret. Höyrinsuluttomasta rakenteesta voi tulla kosteutta diffuusiolla huoneilmaan vain, kun höyrinpaine rakenteessa ylittää huoneilman höyrinpaineen. Tällainen tilanne voi syntyä, kun auringon säteily lämmittää rakenteen ja sitoutunut hygroskooppinen kosteus vapautuu. Toinen mahdollisuus on suoraan huoneilmaan tapahtuvan kosteuden tuoton nopea aleneminen, jolloin huoneilma kuivuu niin, että rakenteista tapahtuu kosteuden höyrystymistä ja diffuusoitumista jonkin aikaa huoneeseen päin.

Höyrinsuluttomat sellukuitueristetyt seinärakenteet ovat lämmityskaudella Suomen ilmastossa kosteusteknisesti tyydyttävästi toimivia tietyin edellytyksin, joita ovat:

- Jos lämmöneristykseen sisäpuolisen ainekerroksen höyrynvastus on pieni, saa lämmöneristykseen ulkopuolisen ainekerroksen höyrynvastus olla lämmityskau-

den käyttöoloissa enintään viidesosa sisäpuolen höyrynvastuksesta. Tämä voi toteutua, mikäli käytettyjen rakennuspaperien ja levyjen höyrynvastus pienee ympäristön suhteellisen kosteuden ja aineen kosteuspitoisuuden kasvaessa (ulkoilmaan rajoittuvat rakenneosat lämmityskaudella). Riittävä sisäpinnan höyrynvastuksen lisäys on toteutettavissa myös sopivin maali- ja tapettikerroksin.

- Jos seinärakenteen ulkoverhous rajoittaa rakenteen kuivumista ulospäin, tulee riittävästä kuivumiskyvystä varmistua tekemällä ulkoverhouksen tausta tuuletuvaksi.
- Huoneilman tulee olla riittävän kuivaa, mikä yleensä toteutuu asuinrakennuksissa (lisäys ulkoilman kosteustasoon talvella enintään  $4 \text{ g/m}^3$ ). Täten höyrynsulutonta diffuusion läpäisevää rakennetta ei tule käyttää märkätiloissa eikä tiloissa, joissa ilmaa kostutetaan keinotekoisesti.
- Höyrynsuluttomassa rakenteessa kuten myös höyrynsulullisessa tulee olla toimiva ilmansulku. Kumpikin rakennetyyppi on herkkä vesihöyryä konvektion aiheuttamalle kosteuskeräytymälle, jos huoneilmaa pääsee virtaamaan jatkuvasti rakenteeseen päin. Ongelma on suurin yläpohjassa ja seinien yläosissa.

Höyrynsuluton hygroskooppista materiaalia sisältävä rakenne tasaa huoneilman kosteuden vaihtelua vuorokausiperiodilla, mikäli huoneilman kosteuskuormitus vaihtelee (esim. makuuhuone). Sellukuitueriste ja pinnoittamaton huokoinen puukuitulevy ovat tässä suhteessa tehokkaita, koska höyry pääsee helposti ainekerrokseen ja kuitupinta-alaa on runsaasti. Ilmiöllä on käytännöllistä merkitystä erityisesti hellekausina, kun ulkoilman ja myös huoneilman kosteus on korkeimmillaan. Tällöin huoneilman suhteellinen kosteus nousee helposti epäviihtyisäksi, vaikka ilmanvaihto olisikin suunnitelmien mukainen. Tehokas sisäilman kanssa vuorovaikutteinen hygroskooppinen ”akku” ottaa merkittävän osan kosteudesta itseensä ja purkaa sen huoneeseen tai ulospäin, kun kuormitustilanne huoneessa on päättynyt.

Vesihöyryä diffuusiolla läpäisevä rakenne läpäisee myös muita kaasumaisia komponentteja kuten esim. hiilidioksidia. Tämä on tyypillinen ihmisperäinen huoneilman epäpuhtaus, jonka pitoisuutta seuraamalla tehdään päätelmiä ilmanvaihdon toimivuudesta. Kuormitustilanteet ovat normaalisti dynaamisesti vaihtelevia huoneilman miehityksen vaihdella. Laskelmien mukaan kahden hengen normaalko-koisessa makuuhuoneessa jäi yöaikainen hiilidioksidipitoisuuden huippuarvo höyrynsuluttomilla rakenteilla 25 % matalammaksi verrattuna höyrynsulullisiin, kun ilmanvaihto oli 0,5 l/h. CO<sub>2</sub>:n suhteen tulos ei ole niin merkittävä kuin millaiseksi todettiin rakenteen ja huoneilman vuorovaikutus vesihöyryä suhteen. Eron syynä on se, ettei materiaaleilla ole hiilidioksidin suhteen hygroskooppisuutta vastaavaa ominaisuutta. Toisaalta tulos kuitenkin osoittaa, että diffuusio höyrynsuluttomiin rakenteisiin on merkittävä CO<sub>2</sub>-konsentraation vaikuttava tekijä, joka on otettava huomioon tulkittaessa kentämittausten tuloksia.

Sisäilmastovaikutusten kannalta tämän tutkimuksen tulokset ovat hyvin alustavia. Tarvitaan jatkotutkimuksia erityisesti hygroskooppisuuden potentiaalisten mahdollisuuksien hyödyntämiseksi. Näköpiirissä voisi olla rakennusten termisen viihtyvyyden ja sisäilman laadun parantaminen sijoittamalla rakenteisiin sopivasti sekä termistä massaa että hygroskooppisesti aktiivisia osia.

# 5 Yhteenveto

## 5.1 Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sellukuitueristettyjen rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset toimintaperiaatteet sekä tarkastella alustavasti rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutuksia sekä vesihöyryn että hiilidioksidin suhteen. Lisäksi tavoitteena oli selvittää höyrönsuluttomien rakenteiden kosteustekninen turvallisuus Suomen ilmastossa lämmityskaudelle tyypillisissä oloissa.

## 5.2 Hygroskooppisuuden lämpötekniset vaikutukset

Hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden höyrystymiseen tai lauhtumiseen liittyy aina faasimuutosenergian sitoutuminen tai vapautuminen. Täten muuttuviin säätilanteisiin, joihin liittyy muutoksia rakennusaineisiin hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden jakautumassa, liittyy aina myös faasimuutosenergian termiset vaikutukset.

Tutkimuksessa analysoitiin laskennallisesti, laboratoriokokein ja pienimittakaavan kenttäkokein ilmiön merkitystä eri tyyppisissä rakenteissa. Tutkitut perusrakenteet olivat:

- Suljettu sellukuiturakenne, jossa kuiva tai hygroskooppista kosteutta sisältänyt eriste oli vesihöyryn diffuusion kannalta tiiviiden pintakerrosten välissä.
- Puoliavoin rakenne, jossa sellukuitueristyksen sisäpuolella oli tiivis höyrönsulku ja ulkopuolella vesihöyryä hyvin läpäisevä tuulensuoja.
- Avoin rakenne, jossa sellukuitueristyksen molemmiin puolin oli vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevät rakennekerrokset.

Kokeissa rakenteet asetettiin vakion sisäilman ja muuttuvan ulkoilman väliin. Ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksilla aiheutettiin muutoksia koerakenteisiin hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden jakautumaan. Tästä aiheutuvat termiset vaikutukset todettiin mittauksin ja simuloitiin laskennallisesti ohjelmistolla LATENITE (2). Muutokset tehtiin laboratoriokokeissa porrasmuutoksina 12 h välein vuorokauden jaksoissa. Pienimuotoiset kenttäkokeet tehtiin rakennusta jäljittelevissä koekopeissa laboratorion kattoterassilla ulkoilmaa vasten.

Keskeiset tulokset olivat:

- Kun suljetun rakenteen sellukuitueristyksen kosteuspitoisuus vastaa 40 %–70 % R.H. tasapainokosteutta, aiheutui kokeessa hygroskooppisen kosteuden vapautumisesta tai sitoutumisesta rakenteen sisäpinnan lämpövirran hetkellisiä nousuja jopa 20 % suuremmaksi kuin vastaavalla kuivan eristyksen rakenteella.



- Kun höyrinsulullisen puoliavoimen seinärakenteen ulkopinnan lämpötilaa nostettiin päiväjakson ajaksi, vapautui rakenteesta vesihöyryä, joka suurelta osin siirtyi ulkoilmaan. Tällöin höyryyn sitoutunut faasimuutosenergia poistui rakenteesta. Höyrystyminen hidasti rakenteen lämpötilan nousua, millä on rakennetta jähdyttävä merkitys hellekausina. Yöjakson aikana, kun ulkoilma jäähtyi ja sen suhteellinen kosteus nousi, sitoutui ulkoilmasta kosteutta takaisin rakenteeseen.
- Kun höyrinsuluton avoin rakenne asetettiin laboratoriokokeessa vakion sisälämpötilan ja muuttuvan ulkolämpötilan väliin, oli höyryvirran suunta rakenteen sisäpinnassa jatkuvasti ulospäin. Syynä oli se, että ulkolämpötila vaihteli alueella, joka oli kauttaaltaan sisälämpötilan alapuolella ja vastaavasti myös vesihöyryyn osapaine oli ulkoilmassa ja rakenteessa sisäilmaan verrattuna pienempi. Yöjakson aikana kuitenkin, kun rakenne ja ulkoilma jäähtyivät, oli höyryvirran suunta rakenteen ulkopinnassa jonkin aikaa sisäänpäin kunnes suunta taas muuttui. Yleisesti ottaen kumulatiivinen höyrymäärä sisältä rakenteen läpi ulkopuolelle oli jo yhden vuorokauden aikana suurempi kuin rakenteeseen varastoituneen hygroskooppisen kosteusmäärän vaihteluväli.

### 5.3 Höyrinsuluttoman rakenteen kosteustekninen toimivuus

Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa tutkittiin pienimuotoisissa koerakennuksissa ulkoilmaa vasten laboratorion kattoterassilla. Koppien tilavuus oli n.  $1 \text{ m}^3$  ja niiden ulkoseinissä sekä yläpohjassa käytettiin kevyttä lautaverhottua puurunkoista tuulettuvaa ratkaisua. Tutkitut koerakenteet olivat höyrinsulullinen (0,2 mm PE-kelmu) kevyt lasivillaeristetty ( $20 \text{ kg/m}^3$ ), höyrinsulullinen kevyt irtopuhalluksella sellukuitueristetty ( $60 \text{ kg/m}^3$ ) ja höyrinsuluton sellukuitueristetty ratkaisu, jossa 0,2 mm paksun muovikelmun tilalla oli huokoinen rakennuspaperi. Rakenteiden sisäverhouksena oli huokoinen puukuitulevy sellaisenaan ja tuulensuojana myös huokoinen puukuitulevy. Koppien sisälämpötila pidettiin koko lämmityskauden ajan likimain vakiona (n.  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ), sisätilaan haihdutettiin kosteutta samankokoisista haihdutusaltaista ja koneellinen poistoilmanvaihto oli 0,5 l/h. Höyrinsuluttomassa kopissa oli ilman suhteellinen kosteus alimmillaan helmikuussa 20–25 % R.H.. Höyrinsulullisissa kopeissa suhteellinen kosteus oli jatkuvasti olennaisesti korkeampi (n. 80 %), mikä osaltaan johtui ilmanvaihdon koneellisen poiston ajoittaisesta tukkeutumisesta jäätyamisen takia.

Seinärakenteen puurungon ulko-osan kosteuspitoisuus nousi höyrinsuluttomassa kopissa helmikuussa tasolle n. 23 % kuivapainosta, mutta kosteus kuivui kevättä kohden ollen maaliskuun lopussa enää n. 15 % kuivapainosta. Höyrinsulullisten rakenteiden puurungon ulko-osan kosteus oli enimmillään n. 16 % kuivapainosta, joten sisäilman vesihöyry ei korkeasta suhteellisesta kosteudesta huolimatta aiheuttanut runkopuun kylmän osan kosteuden nousua.

## 5.4 Rakenteiden ja sisäilman välinen aineensiirto

Kohdassa 5.3 mainituissa pienimuotoisissa kopeissa tutkittiin hiilidioksidin absorptiota rakenteisiin. Kokeet suoritettiin sekä höyrynsulullisessa että höyrynsuluttomassa sellukuitueristetyssä kopissa käyttäen erilaisia koneellisen poiston ilmanvaihtomääriä. Kussakin kokeessa kopin ilmatilaan johdettiin hiilidioksidia niin, että pitoisuus nousi tasolle n. 5 000 ppm. Sen jälkeen hiilidioksidin syöttö lopetettiin ja kopin ilman hiilidioksidipitoisuuden alenemista mitattiin jatkuvasti. Mittaustulokset simuloitiin myös laskennallisesti. Tärkeimmät tulokset olivat:

- Höyrynsuluttomassa kopissa, jossa oli diffuusion läpäisevää vaippaa n. 5 m<sup>2</sup> ja jonka tilavuus oli n. 1 m<sup>3</sup>, oli hiilidioksidipitoisuuden aleneman perusteella laskettu näennäinen ilmanvaihto n. 0,6 1/h suurempi kuin todellinen mitattu ilmanvaihto. Ero johtuu hiilidioksidin diffuusion rakenteisiin.
- Höyrynsulullisessa kopissa oli vastaavalla tavalla laskettu ja mitattu todellinen ilmanvaihto lähellä toisiaan.
- Koppikokeiden simuloidut ilman hiilidioksidipitoisuuden alenemat vastasivat hyvin mitattuja arvoja, joten täysmittakaavaisten huonetilojen ilman hiilidioksidipitoisuuden simulointiin osoittautui olevan hyvät edellytykset.

Tutkimuksessa simuloitiin 12 m<sup>2</sup>:n makuuhuoneen ilman hiilidioksidi- ja vesihöyrypitoisuuksien muuttuminen ajan funktiona, kun makuuhuoneessa oli yöaikainen kahden nukkujan miehitys 8 h:n ajan toistuvasti. Huoneen ilmanvaihto oli jatkuvasti 0,5 vaihtoa tunnissa. Huoneen seinärakenteet oletettiin aluksi höyrynsuluttomiksi ja ne sekä yläpohja vastasivat edellä kuvatun höyrynsuluttoman kokeen rakenteita. Simuloinnin toisessa vaiheessa rakenteiden sisäpintaan oletettiin maalattun diffuusion tiivis höyrynsulkukerros. Tärkeimmät simulointitulokset olivat:

- Maalaamattomassa huoneessa hiilidioksidipitoisuus nousi yön aikana ulkoilman tasosta arvoon n. 1 500 ppm ja maalatussa arvoon n. 2 000 ppm.
- Kun ilmanvaihtoa pienennettiin määrään 0,25 1/h, oli vastaava hiilidioksidipitoisuuden yöaikainen huippuarvo maalaamattomassa huoneessa n. 2 000 ppm ja maalatussa n. 3 000 ppm.
- Hiilidioksidin absorptio höyrynsuluttomiin rakenteisiin muuttuvissa kuormitustilanteissa vaikuttaa merkittävästi huoneilman CO<sub>2</sub>-pitoisuuteen ja saavutettaviin huippuarvoihin. Absorption suhteellinen merkitys kasvaa ilmanvaihtomäärän aletessa.
- Makuuhuoneen yöaikainen suhteellinen kosteus kasvoi maalatussa huoneessa n. 25 %-yksikköä ja maalaamattomassa vain n. 5 %-yksikköä, kun ilmanvaihdon tuloilman kosteus ja lämpötila pysyivät jatkuvasti samoina (20 °C, 50 % R.H.).

- Maalatussa huoneessa kosteus laski päiväsaikaan ulkoilman edustamalle tasolle, mutta maalaamattomassa huoneessa minimiarvo jäi jonkin verran korkeammaksi.
- Höyrynsuluton huokoiseen puukuitulevyyn ja sellukuitueristykseen perustuva rakenne (ulko- ja väliseinät sekä yläpohja) vaimensi tehokkaasti huoneilman kosteuden vaihtelun muuttuvassa kuormitustilanteessa. Rakenteisiin absorboitunut ja sitoutunut kosteus palasi huomattavalta osaltaan takaisin huoneilmaan kuormittamattoman päiväjakson aikana.
- Laskentaoloissa höyrynsuluttomaan rakenteeseen jäi kumulatiivisesti lisääntyvä vuorokautinen kosteuden nettokeräytymä, jonka suhteen ei saavutettu tasapainotilaa tarkastelujakson aikana.

## Lähdeluettelo

1. Hens, H. & Janssens A. Inquiry on HAMCAT CODES, International Energy Agency, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Report Annex 24, Task 1, Modeling, 1993.
2. Salonvaara M. & Karagiozis A. Moisture Transport in Building Envelopes using an approximate Factorization Solution Method, In: *Proceedings of the Second Annual Conference of the CFD Society of Canada* (Ed. James J. Gottlieb and C. Ross Ethier), Toronto, June 1–3 1994.
3. Karagiozis, A., Salonvaara, M. & Kumaran, K. LATENITE Hygrothermal Material Property Database, IEA Annex 24 Report T1-CA-94/04, Trondheim, Norway, 1994.
4. Niemelä, T., Vinha J. & Lindberg, R. Puukuitueristeisen seinärakenteen hengittävyys. Julkaisu 67, Talonrakennustekniikka, Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto, Tampere 1996.
5. Leppänen, P. The Marjala House -an ecological single-family house in Liperi, Finland, VTT Building technology, 31.10.1995 Espoo.





Tekijä(t) Salonvaara, Mikael & Kokko, Erkki			
Nimeke <b>Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta</b>			
Tiivistelmä <p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sellukuitueristettyjen rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset toiminta-periaatteet sekä tarkastella alustavasti rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutuksia sekä vesihöyry- että hiilidioksidipitoisuuden kannalta.</p> <p>Muuttuvissa säätilanteissa rakenteiden hygroskooppiset materiaalit sitovat tai luovuttavat vesihöyryä riippuen säämuutoksen suunnasta. Lauhtuva vesihöyry luovuttaa ja höyrystyvä kosteus sitoo faasimuutosenergiaa, joka siirtyy höyryn mukana rakenteessa paikasta toiseen tai tulee ulkopuolelta rakenteeseen tai poistuu sieltä ulkopuolelle. Kosteus ja sen liikkeet vaikuttavat rakenteen lämpötilakentän ja pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden hetkellisiin arvoihin, mutta eivät juurikaan pitkäaikaisiin keskiarvoihin verrattuna vastaavaan ei-hygroskooppiseen rakenteeseen. Auringon säteilyn aiheuttama rakenteen lämpötilan nousu hidastuu hygroskooppisen kosteuden höyrystymisen vaikutuksesta, jos höyry poistuu rakenteesta. Jos höyry siirtyy ja lauhtuu muualle rakenteessa, lämpenee rakenne lauhtumiskohdassa.</p> <p>Mikäli sellukuitueristetyssä puurunkoisessa vaipparakenteessa on vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevät pinnat, poistuu huoneilman vesihöyryä rakenteisiin ja niiden läpi. Lämmityskaudella - erityisesti keskitalvella seurauksena on puurungon kylmän osan kosteuspuiteisuuden nousu tasolle 20–23 % kuivapainosta, mikäli huoneilman kosteus on alimmillaan 20–25 % R.H. Koerakenteista kosteus kuitenkin kuivui keväällä nopeasti. Tiiviin höyrinsulun kanssa puurungon kylmän osan kosteuspuiteisuus oli enimmillään 16 % kuivapainosta, vaikka sisäilman suhteellinen kosteus oli kokeessa jatkuvasti hyvin korkea (n. 80 % R.H.). Höyrinsuluttoman rakenteen tyydyttävä toiminta edellyttää rakenteen hyvää kuivumiskykyä ulospäin sekä huoneilman kosteustason pysymistä lämmityskaudella kohtuullisena.</p> <p>Höyrinsuluttomuus kuivattaa sisäilmaa lämmityskaudella verrattuna höyrinsululliseen vaippaan ilmanvaihdon ollessa sama. Toisaalta höyrinsuluton hygroskooppisia materiaaleja sisältävä rakenne tasaa huoneilman kosteuden vaihtelua muuttuvissa kuormitustilanteissa. Ilmiö on hyödyllinen hellekausiin, jolloin ilman kosteus on luonnostaan korkealla tasolla. Höyrinsuluton rakenne läpäisee vesihöyryn ohella diffuusiolla myös muita kaasuja. Muuttuvissa kuormitustilanteissa makuuhuoneen ilman hiilidioksidipitoisuuden huippuarvo voi jäädä 25 % pienemmäksi kuin höyrinsulullisessa vaihtoehdossa ilmanvaihtomäärän ollessa 0,5 1/h.</p>			
Avainsanat cellulose fibre insulation, structures, heat transfer, mass transfer, building envelope, construction materials, indoor air, moisture, water vapour, carbon dioxide			
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5650-X (nid.) 951-38-5651-8 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Projektinnumero R9SU00261	
Julkaisu-aika Maaliskuu 1999	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 51 s.	Hinta B
Projektin nimi Matalaenergiatalon sellukuiturakenne		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Ekovilla Oy, Termex-Eriste Oy, Uudenmaan Puhalluseristevilla Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. +358 9 4561  
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and  
report code of publication

VTT Research Notes 1946  
VTT-TIED-1946

Author(s) Salonvaara, Mikael & Kokko, Erkki			
Title <b>Heat and mass transfer in cellulose fibre insulation structures</b>			
Abstract <p>The objectives of this study were to determine the principles of hygrothermal (heat and moisture) performance of building envelope structures with cellulose fiber insulation and to preliminarily investigate the interactions between indoor air and building envelope parts in terms of vapor and carbon dioxide concentrations.</p> <p>In varying environmental conditions hygroscopic materials in building structures absorb or release water vapor depending on the direction of the change in the weather. Condensing water vapor discharges (heat source) and evaporating liquid water charges (heat sink) the latent heat involved in the phase changes of moisture carrying the energy from one place to another, into or out of the structure. Moisture and its movements affect the temperatures and the local instantaneous heat fluxes, whereas the effect is small on the long term average values when compared to similar but non-hygroscopic structures. The rate of increase in temperatures due to solar radiation is slower because of evaporating moisture if that moisture can escape out of the structure. If vapor moves and condenses somewhere else inside the structure, the local temperature at the spot of condensation will increase.</p> <p>If a wood-framed building envelope structure has interior and exterior layers that are very permeable to water vapor diffusion, water vapor from indoor air can diffuse into and through the building envelope. During the heating season - especially in the middle of winter - this will result in moisture contents as high as 20-23 % by weight in the wood in the cold side of the structure when the indoor air relative humidity is at lowest 20-25% (at approximately 22°C). Moisture in the experimental test huts dried out fast during the spring, however. In wood frame walls with a vapor retarder the cold side moisture contents were at highest 16 % by weight, even though the indoor air relative humidity was continuously very high (approximately 80 %). In order to achieve satisfactory performance with the walls without a vapor retarder, such walls must have a good drying capability (outwards) and the indoor air humidity must remain at moderate level during the heating season.</p> <p>The lack of a vapor retarder will result in drier indoor air when the ventilation rate is the same in buildings with or without vapor retarders. On the other hand, building structures without a vapor retarder and with hygroscopic materials can balance the variations in the humidity of indoor air during changes in moisture loads. The phenomena is useful during hot weather when the moisture content of air is high. The structures without a vapor retarder can allow diffusion of other gases too than only vapor through them. During intermittent occupancy in a bedroom the carbon dioxide concentration in the indoor air may remain at 25% lower level when no vapor retarders are used than in a bedroom with vapor retarders, when the ventilation rate is 0.5 changes per hour in both cases.</p>			
Keywords cellulose fibre insulation, structures, heat transfer, mass transfer, building envelope, construction materials, indoor air, moisture, water vapour, carbon dioxide			
Activity unit VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5650-X (soft back ed.) 951-38-5651-8 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Project number R9SU00261	
Date March 1999	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 51 p.	Price B
Name of project Matalaenergiatalon sellukuiturakenne		Commissioned by Technology Development Centre of Finland (Tekes), Ekovilla Oy, Termex-Eriste Oy, Uudenmaan Puhalluseristevilla Oy	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	