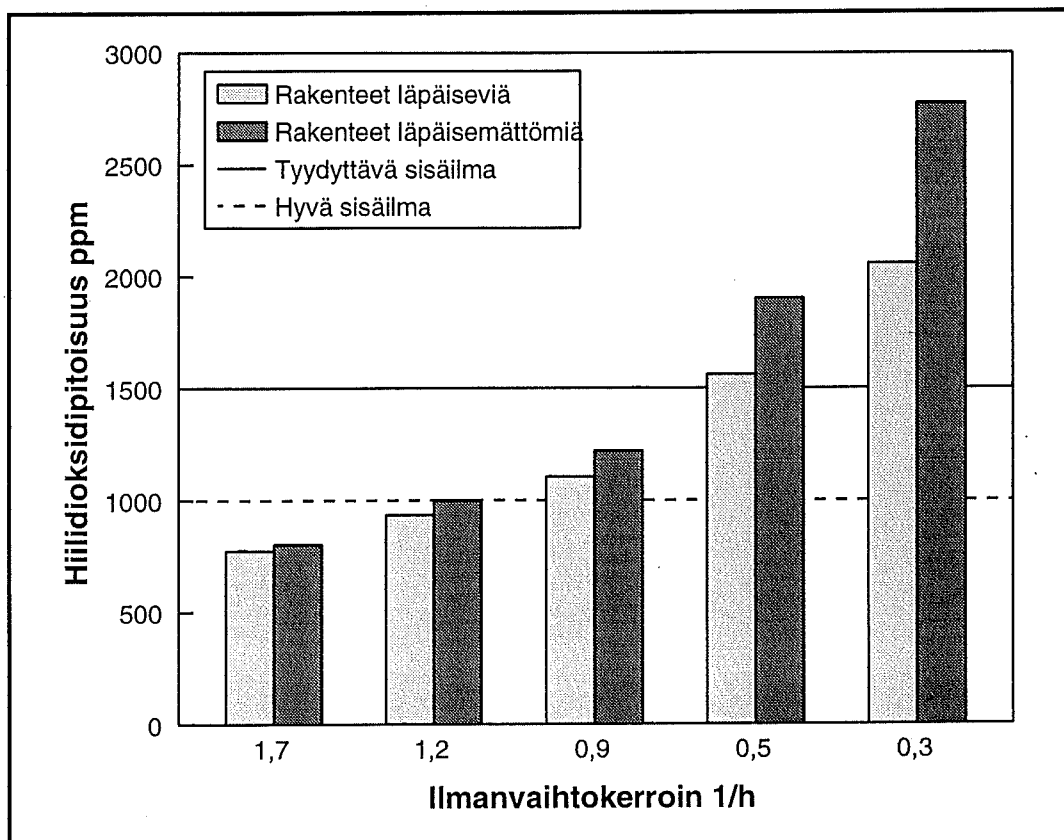




Timo Niemelä - Juha Vinha - Ralf Lindberg

# PUUKUITUERISTEISEN SEINÄRAKENTEEN HENGITTÄVYYS



**Tampereen teknillinen korkeakoulu**  
**Rakennustekniikan osasto**  
**Talonrakennustekniikka**

**Julkaisu 67**

Timo Niemelä Juha Vinha Ralf Lindberg

**PUUKUITUERISTEISEN SEINÄRAKENTEEN HENGITTÄVYYS**

TAMPERE 1996

ISBN 951-722-482-6  
ISSN 1237-1483

## ALKUSANAT

Tutkimuksessa on selvitetty erilaisten materiaalien sekä höyrynsuluttomien, puukuitu-eristeisten seinärakenteiden kaasujen läpäisevyyttä.

Tutkimuksen ovat rahoittaneet Teknologian kehittämiskeskus TEKES (85 %), Ekovilla Oy (5 %), Termex-eriste Oy (5 %) ja Uudenmaan Puhalluseristevilla Oy (5 %). Lisäksi tutkimuksessa mukana ollut Schauman Wood Oy on osallistunut suoritettujen kokeiden kustannuksiin yhtä suurella osuudella kuin puukuitueristeyritykset.

Tutkimuksen johtoryhmään ovat kuuluneet:

- Tutkimus- ja kehityspäällikkö Vaito Rossi, puh.joht., Schauman Wood Oy
- Professori Ralf Lindberg, TTKK
- Dipl.ins. Lasse Pöyhönen, TEKES
- Toimitusjohtaja Keijo Rautiainen, Termex-eriste Oy
- Toimitusjohtaja Reijo Louko, Ekovilla Oy
- Toimitusjohtaja Jukka Prähli, Uudenmaan Puhalluseristevilla Oy
- Rak.ins. Erkki-Jussi Panula, Ins.tsto Ekosuunnittelu

Tutkimus on suoritettu Tampereen teknillisellä korkeakoululla talonrakennustekniikan laboratorioissa ja sen vastuullisena johtajana on toiminut prof. Ralf Lindberg. Tutkimuksen on suorittanut tekn. yo Timo Niemelä ja ohjaajana on toiminut dipl.ins. Juha Vinha.

Tampereella 12.2.1996

Tekn. yo Timo Niemelä

Dipl.ins. Juha Vinha

Prof. Ralf Lindberg

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
SISÄLLYSLUETTELO	II
KÄSITTEITÄ JA MERKINTÖJÄ	IV
1. JOHDANTO	1
2. RAKENNUSTEN SISÄILMASTO	2
2.1 Yleistä	2
2.2 Sisäilmaston epäpuhtaudet	2
2.3 Sisäilman hiilidioksidirajoja	3
3. TEOREETTINEN TARKASTELU	4
3.1 Diffuusio	4
3.1.1 Diffuusio ilman läpi	4
3.1.2 Lämpötilan vaikutus diffuusion	4
3.1.3 Diffuusio rakenteen läpi	5
3.1.4 Yleisen laskentamallin peruskäsitteet	5
3.1.5 Yleisen laskentamallin virheet	6
3.2 Konvektio	6
3.2.1 Rakenteen yli tapahtuva konvektio	6
3.2.2 Rakenteiden sisäinen konvektio	7
3.2.3 Konvektiovirtausten merkitys	8
4. KOKEET	10
4.1 Koelaitteisto	10
4.1.1 Koekammio	10
4.1.2 Hiilidioksidimittaus	10
4.1.3 Painemittaus	11
4.1.4 Lämpötilan mittaus	11
4.1.5 Kosteusmittaus	11
4.1.6 Koelaitteiston kalibrointi	11
4.1.7 Kokeiden suoritus	12
4.2 Koekappaleet	13
4.2.1 Suoritetut materiaalikokeet	13
4.2.2 Suoritetut pinnoitekokeet	14
4.2.3 Suoritetut rakennekokeet	14
4.2.4 Suoritetut kosteuskokeet	15

<b>4.3 Kertoimien määrittäminen</b>	<b>15</b>
4.3.1 Hiilidioksidinvastuksen määrittäminen tavalla 1	15
4.3.2 Hiilidioksidinvastuksen määrittäminen tavalla 2	17
4.3.3 Pinnoitteiden hiilidioksidinvastuksen määrittäminen	17
4.3.4 Rakenteiden hiilidioksidinvastuksen määrittäminen	17
4.3.5 Rakenteiden näennäisilmanvaihtokerroimen määrittäminen	18
4.3.6 Materiaalien hiilidioksidinläpäisevyyden määrittäminen	18
4.3.7 Kerroinmäärittämisen arviointi	18
<b>5. KOKEIDEN TULOKSET</b>	<b>19</b>
<b>5.1 Yleistä</b>	<b>19</b>
<b>5.2 Ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuuden aleneminen</b>	<b>19</b>
<b>5.3 Koekappaleiden hiilidioksidinvastus</b>	<b>20</b>
5.3.1 Materiaalit	20
5.3.2 Pinnoitteet	20
5.3.3 Rakenteet	21
<b>5.4 Näennäisilmanvaihtokerroimet rakennekokeissa</b>	<b>21</b>
<b>5.5 Kosteuskokeiden tulokset</b>	<b>21</b>
<b>5.6 Materiaalien hiilidioksidinläpäisevyys</b>	<b>22</b>
<b>6. TULOSTEN MALLINTAMINEN</b>	<b>23</b>
<b>6.1 Näennäisilmanvaihtoluku erilaisissa tiloissa</b>	<b>23</b>
<b>6.2 Makuuhuoneen hiilidioksiditaso</b>	<b>24</b>
<b>6.3 Mallinnusten arviointi</b>	<b>28</b>
<b>7. HIILIDIOKSIDIN JA VESIHÖYRYN VERTAILU</b>	<b>29</b>
<b>7.1 Hiilidioksidin- ja vesihöyrynläpäisevyyksien vertailu</b>	<b>29</b>
<b>7.2 Vesihöyryyn diffuusio seinärakenteen läpi</b>	<b>30</b>
<b>8. YHTEENVETO</b>	<b>32</b>
<b>LÄHDELUETTELO</b>	<b>34</b>
<b>LIITTEET</b>	

## RAPORTISSA KÄYTETTYJÄ KÄSITTEITÄ

### Kaasuja läpäisevä rakenne

“Hengittävä”, diffuusioavoin, eli rakenteen läpi kaasujen diffundoitumisen mahdollistava rakenne. Rakenteen yli ei tapahdu kuitenkaan konvektiovirtauksia.

### Kaasuja läpäisemätön rakenne

Diffuusiosuljettu, rakenteen läpi kaasujen diffundoitumisen estävä rakenne.

### Näennäinen ilmanvaihtokerroin

Hiilidioksidin diffuusion nopeudesta laskettava kerroin. Se kertoo tarvittavan ilmanvaihdon määrän, joka poistaisi hiilidioksidia sisäilmasta yhtä paljon kuin diffuusio läpäisevien rakenteiden läpi.

### Ensiöpuoli

Koelaitteiston kammion terässiiniin ja tutkittavaan koekappaleeseen rajoittuva tila, johon hiilidioksidi syötettiin.

### Toisiopuoli

Tila, johon koekappaleen läpi diffundoitunut hiilidioksidi siirtyi.

### ppm

Tilavuuden miljoonasosa

## MERKINTÖJÄ

c	hiilidioksidin konsentraatio ilmassa ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
g	hiilidioksidivirran tiheys ( $\text{g}/\text{m}^2 \times \text{s}$ )
D	kaasupitoisuuteen perustuva kaasun diffuusiokerroin ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\delta_v$	hiilidioksidipitoisuuteen perustuva hiilidioksidinläpäisevyys ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
d	homogeenisen ainekerroksen paksuus (m)
$Z_v$	hiilidioksidipitoisuuteen perustuva hiilidioksidinvastus (s/m)
p	ilmanpaine (Pa)
t	aika
T	lämpötila
C	hiilidioksidipitoisuus (ppm)
$n_n$	näennäinen ilmanvaihtokerroin (1/h)

### **Alaindeksit:**

k	koekappale
v	konsentraatioeron avulla laskettu
e	ensiöpuoli
t	toisiopuoli

## 1. JOHDANTO

Normaaleissa puurunkoisten pientalojen seinissä on käytetty muovikalvoa höyrynsulkuna estämään kosteuden kulku seinärakenteeseen sekä aikaansaamaan rakenteen ilmatiiviys. Viime aikoina on kuitenkin alettu yhä voimakkaammin kritisoidaan liian tiiviitä "pullotaloja". Tämä on johtanut keskusteluun seinärakenteen "hengittävydestä" ja sitä kautta "hengittävien" seinärakenteiden sisäilman laatua parantavasta vaikutuksesta.

Puukuitueristeillä on kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta eri tavalla kuin mineraalivillaeristeillä. Tämä ominaisuus antaa tietyin edellytyksin mahdollisuuden höyrynsulun jättämiseen pois seinärakenteesta /1/, /8/, /12/, jolloin kaasumolekyylien on mahdollista kulkeutua diffundoitumalla seinärakenteen läpi.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää teoreettisesti ja kokeellisesti sisäilman hiilidioksidin kulkeutumista erilaisten materiaalien ja seinärakenteiden läpi diffuusion vaikutuksesta. Lisäksi tarkasteltiin teoreettisesti vesihöyryn käyttäytymistä rakenteissa ja verrattiin sitä hiilidioksidiin. Samalla pyrittiin selvittämään, mitä seinärakenteen eri puolilla vallitsevat erilaiset lämpö-, kosteus- ja paineolosuhteet vaikuttavat seinän läpi kulkeutuviin kaasuvirtoihin.

Tutkimusta varten kehitettiin koelaitteisto, jonka avulla määritettiin tyypillisten rakennusmateriaalien ja joidenkin sisäpinnoitteiden läpi tapahtuvaa hiilidioksidin diffuusiota. Koetulokset muutettiin hiilidioksidinvastusarvoiksi. Materiaalitulosten perusteella koottiin kaksi mahdollisimman hyvin hiilidioksidia läpäisevää seinärakennetta ja määritettiin niiden aikaansaama kokonaishiilidioksidinvastus sekä ns. ensiöpuolen näennäinen ilmanvaihtokerroin. Lisäksi tutkittiin kahdella koekappaleella kosteuden vaikutusta hiilidioksidinläpäisevyyteen.

Vesihöyryn kulkeutumista materiaaleissa ja rakenteissa on tutkittu paljon. Erilaisille materiaaleille on määritetty vesihöyrynläpäisevyysarvoja ja näiden pohjalta on kehitetty yksinkertainen käsinlaskentamenetelmä. Menetelmän avulla voidaan laskea rakenteen läpi diffuusiolla kulkeutuvan ja rakenteeseen tiivistyvän kosteuden määrää. Menetelmä on huomattavasti yksinkertaistettu mm. niin, että se ei ota huomioon rakennusmateriaalien kosteuskapasiteettia eikä muita kosteuden siirtymismuotoja. Sillä kuitenkin saavutetaan yleensä käytännön suunnittelutyössä vaadittava tarkkuus.

Koetuloksia käytettiin lähtökohtana mallinnettaessa diffuusion vaikutusta sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen. Teoreettiset laskelmat perustuivat rakennekokeista saatuihin näennäisilmanvaihtokertoimiin sekä vesihöyryn kulkeutumista kuvaavaan käsinlaskentamenetelmään.

## 2. RAKENNUSTEN SISÄILMASTO

### 2.1 Yleistä

Sisäilmastoon ja sen laatuun on alettu kiinnittää viimeisen 15 vuoden aikana kasvavaa huomiota. Monet tutkimukset ihmisten ajankäytöstä osoittavat, että ihminen viettää keskimäärin n. 70-90 % ajastaan sisätiloissa. Tietyt ihmisryhmät, kuten vanhukset ja sairaat ovat sisätiloissa käytännöllisesti katsoen koko ajan.

Lisääntynyt sisälläolo ja 1970-luvun energiakriisin pientaloihin mukanaan tuoma tiivis rakennustyyli ovat aikaansaaneet muutoksia ihmisten terveydentilassa. Ihmisillä on yhä enemmän ilmaantunut erilaisia terveydellisiä oireita, kuten limakalvojen ja hengitysteiden ärsytysoireita, iho-oireita, väsymystä, stressiä ja erilaisia särkyoireita. Myös erilaiset allergiaoireet sekä astma ovat lisääntyneet huomattavasti viime vuosina. Usein terveysvaikutusten syyksi yhdistetään huono sisäilma, puutteellinen ilmanvaihto tai erilaiset rakennusten homeongelmat.

### 2.2 Sisäilmaston epäpuhtaudet

Sisäilmaston epäpuhtauksien lähteitä ovat:

- ihminen itse (hiilidioksidi, kosteus, haju)
- ihmisen toiminta (pyykinpesu, hygienia, ruoanlaitto, tupakointi)
- rakenteet, pintamateriaalit, tekstiilit, kalusteet (formaldehydi, pöly)
- maaperä (radon)
- kotieläimet (pöly, hilse)
- ulkoilma (siitepöly, teollisuus- ja liikennepäästöt)

Sisäilmastoprojektissa /2/ tehtyjen tutkimusten mukaan haitallisimmat sisäilmaston epäpuhtaudet Suomessa ovat **radon, formaldehydi ja tupakan savu**. Näiden tekijöiden aiheuttamat haitat on kuitenkin usein mahdollista eliminoida oikeilla suunnittelu- ja toteutusratkaisuilla varsinkin uudisrakentamisessa.

Sisätiloissa, joissa ei tupakoida ja joissa ihminen itse on pääasiallinen ilman pilaaja, on ilman laadun mitoitettava tekijä tavallisesti **ihmisperäisen hajun voimakkuus** /3/. Ihmisen keholta, vaatetuksesta ja uloshengitysilmaasta erittyy koko ajan erilaisia hajua aiheuttavia kaasuja, kuten ammoniakkaa, asetonia, metanolia, etanolia, metaania ja toluenia. Hajun voimakkuuden mittaamiseen ei ole kuitenkaan onnistuttu kehittämään luotettavaa ja helppokäyttöistä mittausmenetelmää. Haluttaessa tutkia hajun intensiteettiä, on se tehtävä erityisen hajupaneelin subjektiivisten aistimusten perusteella /3/.

**Hiilidioksidi** on hengityksessä vapautuva aineenvaihdunnan reaktioiden tulos. Se on määrällisesti merkittävin ihmiskehon tuottamista epäpuhtauksista, mutta ei tavallisesti mitoiteta sisäilman laatua. Haju ja hiilidioksidipitoisuus korreloivat kuitenkin hyvin toisensa kanssa tiloissa, joissa ei tupakoida /4/. Hiilidioksidipitoisuus on myös todettu luo-



tettavimmaksi sisäilman laadun indikaattoriksi käytettäessä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Siksi sitä käytetään lähes poikkeuksetta ohjatuissa ilmanvaihtojärjestelmissä /4/.

Sisäilmassa esiintyy lisäksi monia muita epäpuhtauksia. Niiden pitoisuudet ovat kuitenkin normaaleissa olosuhteissa pieniä, eivätkä ne mitoita sisäilman laatua. Sisäilmassa esiintyy mm. hiukkasmaisia epäpuhtauksia, allergeeneja, home- ja lahottajasisienien itiötä, biologisia epäpuhtauksia, bakteereja ja viruksia ja erilaisia orgaanisia yhdisteitä.

### 2.3 Sisäilman hiilidioksidirajoja

Sisäilman hiilidioksidipitoisuudelle on annettu monissa sisäilman laatua käsittelevissä lähteissä erilaisia laatuluokitus- ja maksimiarvoja. Tämä johtuu siitä, että hiilidioksidipitoisuus on helpompi mitata kuin sisäilman laadun normaalisti mitoitettava ihmisperäisen hajun voimakkuus. Taulukkoon 2.1 on koottu erilaisia sisäilmastoluokituksissa ja erilaisissa ohjeissa sekä määräyksissä esitettyjä hiilidioksidirajoja.

**Taulukko 2.1.** Erilaisia sisäilman hiilidioksidirajoja.

<i>CO<sub>2</sub>-pitoisuus ppm</i>	<i>KUVAUS</i>
350	<i>Normaali ulkoilman hiilidioksidipitoisuus</i>
800	<i>Huoneilman maksimipitoisuus, jos ilmanvaihdon ohjaamiseen käytetään hiilidioksidipitoisuutta /5/</i>
1000	<i>Luokka S1, hyvä sisäilma /6/ Hyvä sisäilman laatu, hengitysilma aiheutuva pitoisuus /2/ Hajujen kannalta hengityksestä vapautuvan hiilidioksidin enimmäispitoisuus /3/</i>
1250	<i>Luokka S2 /6/</i>
1500	<i>Luokka S3, tyydyttävä sisäilma, (kokonaispitoisuus) /6/ Tyydyttävä sisäilma. Lääkintöhallitus, Asuntojen kuntoa ja hoitoa koskevat ohjeet, 1990 Tyydyttävä sisäilman laatu, hengitysilma aiheutuva pitoisuus /2/</i>
2500	<i>Sisäilman maksimipitoisuus /5/ (ihmisperäinen maksimipitoisuus 1500 ppm) Tyydyttävä sisäilman laatu, kokonaispitoisuus /2/</i>
5000	<i>HTP 8 h (haitalliseksi todettu pitoisuus) Työsuojeluhallitus 1987</i>
n. 150000	<i>= 15 % Hengenvaarallinen pitoisuus</i>

Seinä rakenteiden "hengittävyden" tarkastelua varten tehtäviin laboratoriokokeisiin hiilidioksidi sopii hyvin. Sen etuja ovat:

- mittareiden saatavuus
- kaasun helppo saatavuus
- hiilidioksidin suuret pitoisuudet sisäilmassa muihin epäpuhtauksiin verrattuna

### 3. TEOREETTINEN TARKASTELU

Kaasut voivat siirtyä rakenteissa neljällä tavalla: diffuusiolla, konvektiolla, termodiffuusiolla ja effuusiolla. Kahta jälkimmäistä, eli termodiffuusiota ja effuusiota pidetään käytännön rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa merkityksettöminä eikä niitä tarkastella tässä tutkimuksessa.

#### 3.1 Diffuusio

##### 3.1.1 Diffuusio ilman läpi

Kaasujen diffuusiota on tutkittu paljon. Ilman läpi tapahtuvan diffuusion määrän laskemiseksi teoreettista tietä on kehitetty useita laskentamalleja. Fullerin esittämää kokeellista korrelaatiota /15/ pidetään hyvänä:

$$D_{AB} = 0,0101 \times \frac{T^{1,75} \times (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{p \times \left[ (\sum v_A)^{1/3} + (\sum v_B)^{1/3} \right]^2} \quad (3.1)$$

$D_{AB}$  kaasun A diffuusiokerroin B:n läpi ( $m^2/s$ )

T lämpötila (K)

p kokonaispaine (Pa)

$M_A$  ja  $M_B$  tutkittavien kaasujen molekyylimassat (g/mol)

$\Sigma v_A$  ja  $\Sigma v_B$  kaasujen ns. rakenteelliset tilavuuskasvut, joita on esitetty taulukossa 3.1.

**Taulukko 3.1.** Joidenkin kaasujen rakenteelliset tilavuuskasvut /15/ ja molekyylimassat.

<i>Kaasu</i>	<i>Kemiallinen merkki</i>	<i>Rakenteellinen tilavuuskasvu <math>\Sigma v</math></i>	<i>Molekyylimassa g/mol</i>
<i>vesihöyry</i>	<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>12,7</i>	<i>18</i>
<i>hiilidioksidi</i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>26,9</i>	<i>44</i>
<i>happi</i>	<i>O<sub>2</sub></i>	<i>16,6</i>	<i>32</i>
<i>ammoniakki</i>	<i>NH<sub>3</sub></i>	<i>14,9</i>	<i>17</i>
<i>ilma</i>	-	<i>20,1</i>	<i>29</i>

##### 3.1.2 Lämpötilan vaikutus diffuusioon

Kaasumolekyylien liike on suoraan verrannollinen lämpötilaan. Täten molekyylien liike ja samalla diffuusion nopeus hidastuu lämpötilan laskiessa. Taulukkoon 3.2 on kaavan 3.1 avulla laskettu vesihöyryn ja hiilidioksidin diffuusiokertoimia ilman läpi erilaisissa lämpötiloissa.

**Taulukko 3.2.** Hiilidioksidin ja vesihöyryn diffuusiokerroimia ilman läpi laskettuna erilaisissa lämpötiloissa.

	<i>Diffuusiokerroin ilman läpi</i> <i>*10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s</i>		
	<i>20 °C</i>	<i>0 °C</i>	<i>-20 °C</i>
<i>hiilidioksidi</i>	<i>15,3</i>	<i>13,6</i>	<i>11,9</i>
<i>vesihöyry</i>	<i>24,6</i>	<i>21,8</i>	<i>19,1</i>

### 3.1.3 Diffuusio rakenteen läpi

Tietyn kaasun diffuusio rakenteen läpi aiheutuu siitä, että ilma sisältää eri määrän ko. kaasua rakenteen eri puolilla ja tämä pitoisuusero pyrkii tasaantumaan. Diffuusion aiheuttama kaasuvirta on siten kaasumolekyylien liikettä rakenteen läpi suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Rakenteen eri puolilla vallitseva ilmanpaine-ero tai sen vaihtelu ei vaikuta kaasujen diffuusionopeuteen. Diffuusio ei myöskään aiheuta ilmavirtauksia.

Diffuusiovirran tiheys perustuu Fickin lakiin:

$$j_A = -D_{AB} \times \frac{\partial c_A}{\partial z} \quad (3.2)$$

$j_A$	komponentin A moolivirran tiheys (mol/m <sup>2</sup> *s)
$D_{AB}$	A:n diffuusiokerroin B:n läpi (m <sup>2</sup> /s)
$c_A$	komponentin A konsentraatio (mol/m <sup>3</sup> )
$z$	virtauksen suuntainen komponentti (m)

### 3.1.4 Yleisen laskentamallin peruskäsitteet

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa on usein laskettu diffuusion aiheuttamaa vesihöyryn kulkeutumista rakenteiden ja materiaalien läpi. Tarkastelu on tehty yleensä yksiulotteisena käsinlaskentana.

Tätä laskentatapaa voidaan soveltaa sellaisenaan koskemaan myös muita kaasuja. Tällöin homogeenisen materiaalin läpi diffuusiolla kulkevan kaasun määrä voidaan laskea kaavalla:

$$g = \delta_v \times \frac{\Delta c}{d} \quad (3.3)$$

$g$	kulkeutuneen kaasun määrä (g/m <sup>2</sup> *s)
$\delta_v$	materiaalin kaasunläpäisevyys (m <sup>2</sup> /s)
$\Delta c$	kaasun konsentraatioero matkalla $d$ (g/m <sup>3</sup> )
$d$	ainekerroksen paksuus (m)

Kun rakenne koostuu useista homogeenisista materiaalikerroksista, saadaan sen läpi diffuusiolla kulkevan kaasuvirran määrä kaavalla:

$$g = \frac{\Delta c}{\sum Z_v} \quad (3.4)$$

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad \text{eri ainekerrosten kaasunvastus (s/m)}$$

d homogeenisen ainekerroksen paksuus (m)

### 3.1.5 Yleisen laskentamallin virheet

Kuvatulla laskentamallilla lasketut tulokset ovat epätarkkoja varsinkin kosteusteknisissä tarkasteluissa. Mallin puutteina voidaan pitää mm. seuraavia seikkoja:

- Se ei ota huomioon materiaalien kosteuskapasiteettia eli sitä, että eri materiaalit sitovat itseensä tietyissä ympäristöolosuhteissa kullekin ominaisen kosteusmäärän.
- Muita kosteuden kulkeutumismuotoja ei oteta huomioon.
- Vesihöyrynläpäisevyys oletetaan vakioksi, jota se todellisuudessa ei ole.
- Lämpötilajakauma rakenteessa oletetaan suoraviivaiseksi.
- Samanaikainen lämmön siirtyminen ja sen vaikutukset jätetään huomiotta.
- Kaasuvirran oletetaan olevan ajasta ja paikasta riippumatonta.

Hiilidioksidin diffuusio materiaalien läpi on teoreettisesti yksinkertaisempi ilmiö kuin vesihöyryn diffuusio. Hiilidioksidin diffuusiota tarkasteltaessa yleisellä laskentamallilla poistuu ainakin seuraavat epäkohdat vesihöyryn diffuusion verrattuna:

- Ilmalla ei ole lämpötilasta riippuvaa hiilidioksidin maksimikapasiteettia, kuten vesihöyryllä (hiilidioksidilla ei tapahdu faasimuutoksia normaaleissa lämpötiloissa).
- Tavalliset rakennusmateriaalit (betonia lukuunottamatta) eivät sido hiilidioksidimolekyylejä ainakaan siinä määrin kuin orgaaniset materiaalit sitovat vesihöyryä.

## 3.2 Konvektio

Konvektio voidaan jakaa rakenteen yli tapahtuvaan konvektioon ja rakenteen sisäiseen konvektioon.

### 3.2.1 Rakenteen yli tapahtuva konvektio

Käytännön tilanteissa vallitsee lähes aina sisä- ja ulkoilman välillä paine-ero. Paine-eroa saavat aikaan tuuli, lämpötilaeroista johtuvat ilman tiheyserot sekä erilaiset ilmanvaihtojärjestelmät. Rakenteen yli tapahtuvassa konvektiossa kaasut siirtyvät ilmanpaine-eron aikaansaaman virtauksen mukana rakenteen läpi joko suotumalla huokoisen materiaalin lävitse tai virtaamalla rakojen ja reikien kautta. Konvektion aiheuttaa rakenteen yli vaikuttava ilmanpaine-ero.

lävitse tai virtaamalla rakojen ja reikien kautta. Konvektion aiheuttaa rakenteen yli vaikuttava ilmanpaine-ero.

Fukthandbokissa /7/ on esitetty rakennuksen vaippojen ilmanpitävyyteen perustuva laskentatapa (kaavat 3.5 ja 3.6), jolla voidaan laskea konvektiovirran mukana ulos kulkeutuvaa kaasun määrää.

$$G = c \times R_r \quad (3.5)$$

G	ilmavirran mukana poistuva kaasun määrä (g/s)
c	kaasun konsentraatio sisäilmassa (g/m <sup>3</sup> )
R <sub>r</sub>	ilmavirtaus rakenteiden läpi (m <sup>3</sup> /s), saadaan kaavasta 3.6

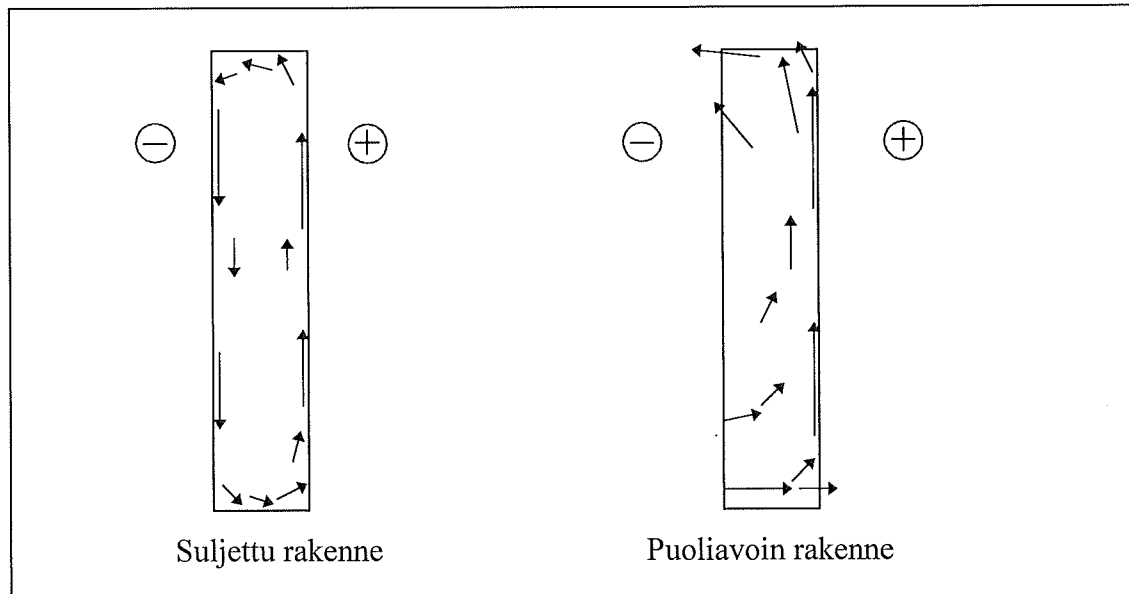
$$R_r = R_{50} \times \left( \frac{\Delta p}{50 \text{ Pa}} \right)^\beta \quad (3.6)$$

R <sub>50</sub>	ilmavirran määrä (m <sup>3</sup> /s), saadaan kohteessa suoritettavalla tiiviysmittauksella 50 Pascalin paineella
Δp	rakenteen yli vallitseva ilmanpaine-ero (Pa)
β	virtauksen laadusta riippuva kerroin, 0,5 < β < 1, usein käytetään arvoa β=0,67

### 3.2.2 Rakenteiden sisäinen konvektio

Seinäarakenteissa ilmenee myös rakenteen sisäistä konvektiota. Se johtuu seinän ylä- ja alaosan välillä vallitsevasta lämpötilaerosta ja se aiheuttaa ilman kiertoa rakenteen sisällä.

Seinän tuulensuojauksen ollessa lämmöneristyskerrokseen verrattuna tiivis, lämpötilaero aiheuttaa ilman kiertoa rakenteen sisällä (ns. suljettu rakenne). Tavanomaisten tuulensuojamateriaalien (permeabiliteetti n. 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>) kanssa seinät toimivat suljettujen rakenteiden tavoin, koska tuulensuojan lävistävä ilmavirtaus on pieni /14/. Jos tuulensuoja on taas suhteellisen hyvin ilmaa läpäisevä, tapahtuu ilman kiertoa tuulensuojauksen läpi (ns. puoliavoin rakenne). Näiden kahden tapauksen periaatteelliset ilman virtauskentät on esitetty kuvassa 3.1.



**Kuva 3.1.** Periaatteelliset ilman virtauskentät sisäisessä konvektiossa suljetulla ja puoliavoinella seinärakenteella.

### 3.2.3 Konvektiovirtausten merkitys

Konvektiovirtausten suuruuden ja suunnan määrittäminen todellisessa tilanteessa on vaikeaa, koska vallitsevat olosuhteet eivät ole stabiileja ja virtaukset ovat erilaisia eri rakennusosissa. Rakenteen yli vaikuttavan konvektiovirtauksen suunta voi olla joissakin rakennusosissa sisältä ulospäin myös koneellisen poistoilmanvaihdon tapauksessa, vaikka sisäilmassa pitäisi tällöin olla alipaine ulkoilmaan verrattuna /9/. Konvektiovirtausten suuruuteen vaikuttaa ainakin:

- seinärakenteen rakennekerrosten ominaisuudet sekä niiden lukumäärä
- seinärakenteen toteutuksen taso
- seinärakenteen koko ja muoto sekä mahdolliset konvektiokatkot
- vallitsevat ilmasto-olosuhteet ulkona ja sisällä
- ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamat paine-olosuhteet
- rakennuksen sijainti, ympäristö, muoto ja suunta

Konvektiovirtausten kuljettama kosteus määrä voi olla moninkertainen diffuusion siirtämään kosteus määrään verrattuna /8/. Sisäisellä konvektiolla on myös huomattava vaikutus kosteuden jakautumiseen seinärakenteessa. Rakenteen läpi tapahtuvilla virtauksilla on kuitenkin huomattavasti rakenteen sisäistä konvektiota suurempi vaikutus rakenteen lämpö- ja kosteuskenttään /9/.

Konvektiota tapahtuu rakenteiden yli niin höyrynsuluttomissa kuin höyrynsulullisissa rakenteissa ja se on riippuvainen rakennuksen vaippojen ilmanpitävyydestä. Höyrynsuluttomien ja höyrynsulullisten rakennusten ilmanpitävyysarvoissa ei ole havaittavissa systemaattista eroa /10/, /11/, /12/. Näin ollen kohdassa 3.2.1 esitetyn laskentatavan mukaan rakenteen yli vaikuttavien konvektiovirtojen suuruus ei ole riippuvainen siitä, onko rakenteessa höyrynsulkua vai ei.

Huomioitavaa on myös se, että konvektion luonteella on ratkaiseva merkitys rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Konvektio voi tapahtua reikien ja rakojen kautta tai suotumalla huokoisen materiaalin läpi. Konvektion mukana poistuvan hiilidioksidin määrän kannalta virtauksen luonteella ei ole edellä esitetyn laskentatavan perusteella kuitenkaan merkitystä.

Vaikka rakenteen sisäinen konvektio vaikuttaa huomattavasti rakenteen kosteuskenttään, kosteuden ja hiilidioksidin kulkeutumista sen vaikutuksesta ei voi suoraan verrata toisiinsa. Yleensä pientalojen sisäilman hiilidioksidipitoisuuden kohoaminen on dynaamista, vuorokausirytmillä toistuvaa lyhytaikaista kuormitusta. Sisäilman rakenteisiin aiheuttama kosteusrasitus on taas ajallisesti huomattavasti pitkäaikaisempaa ja tasaisempaa. Lisäksi kaasujen erilainen molekyylipaino aiheuttanee eroja vesihöyry- ja hiilidioksidimolekyylien liikkeeseen sisäisen konvektion tapauksessa.

Konvektion ja diffuusion merkityksen suhdetta sisäilman hiilidioksidin poistumisessa ei tässä tutkimuksessa voitu kokeellisesti määrittää, koska seinärakenteen konvektiovirtauksia ei voi rakennetulla hiilidioksidin läpäisevyyslaitteistolla tutkia.

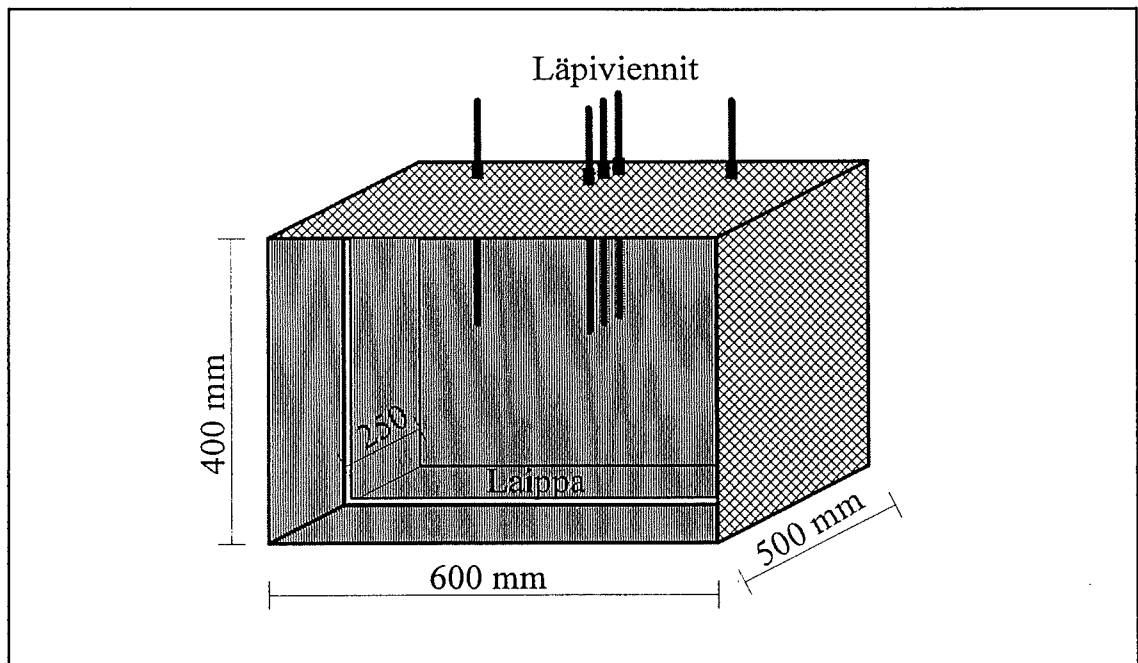
## 4. KOKEET

### 4.1 Koelaitteisto

Kokeet suoritettiin TTKK:n laboratoriotiloihin rakennetulla koelaitteistolla. Laitteistolla mitattiin kussakin kokeessa vallitsevat olosuhteet sekä koekappaleiden läpi diffuusiolla kulkeutuvan hiilidioksidin määrää. Mittaus ja tietojen tallennus suoritettiin tietokonepohjaisesti. Periaatekuva koelaitteistosta on esitetty liitteessä 1.

#### 4.1.1 Koekammio

Koekammio oli yhdeltä sivulta auki oleva laatikko. Kammio oli valmistettu 2 mm:n vahvuisesta ruostumattomasta teräksestä ja sen ulkomitat olivat n.  $600 \times 500 \times 400 \text{ mm}^3$ .



Kuva 4.1. Koekammio.

Auki olevan sivun paikalle asennettiin koekappale, joka tiivistettiin kammion laippoja vasten. Laipat on sijoitettu siten, että kammion seiniin ja koemateriaaliin rajoittuvan ensiöpuolen tilavuudeksi muodostui  $0,0579 \text{ m}^3$  ja vapaan aukon kooksi  $0,196 \text{ m}^2$ . Kokeiden aikana koekappale oli pystysuorassa.

#### 4.1.2 Hiilidioksidimittaus

Ensiöpuolen hiilidioksidimittaus suoritettiin SERVOMEX 1400B4-kaasuanalysaattorilla. Analysaattori oli sijoitettu koekammion ulkopuolelle ja ensiöpuolen ilma kierrätettiin analysaattorin läpi erillisen näytepumpun avulla. Analysaattori kalibroitiin koesarjan aikana noin viikon välein kahden kalibrointikaasun (puhdas tyyppi ja 4 %  $\text{CO}_2$ ) avulla.



Toisiopuolen CO<sub>2</sub> -mittaus tapahtui HORIBA APBA-250E-analysaattorilla. Analysaattori oli sijoitettu koekappaleen toisiopuolelle siten, että mittarin ilman sisäänoton ja koekappaleen väli oli noin 10 cm. Mittarin kalibrointi suoritettiin hallituissa hiilidioksidipitoisuuksissa SERVOMEX-analysaattorin arvojen mukaisesti.

#### 4.1.3 Painemittaus

Ilmanpainetta mitattiin sekä ensiö- että toisiopuolelta suhteellisella painemittarilla. Tiettyllä ajanhetkellä mitattua ensiö- ja toisiopuolen lukemien eroa verrattiin kokeen alussa vallinneeseen erotukseen. Tästä lukemasta voitiin päätellä, muodostuiko kokeen aikana ensiö- ja toisiopuolen välille ilmanpaine-eroa. Painemittaustuloksilla ei ollut kokeiden aikana merkitystä sen jälkeen, kun laitteiston kalibroinnin yhteydessä ensiö- ja toisiopuolen välille asennettiin "huohotinputki".

#### 4.1.4 Lämpötilan mittaus

Lämpötilan mittaus suoritettiin erillisillä lämpötila-antureilla. Anturit kalibroitiin ennen koesarjaa kahdessa eri lämpöisessä vedessä siten, että antureiden lähettämä volttimäärä muutettiin lämpötiloiksi virallisesti kalibroidun lämpömittarin lukemien perusteella.

Lämpötilan vaihtelua eri kokeiden välillä oli maksimissaan 2 °C. Täten lämpötiloilla ei ollut käytännön merkitystä vertailtaessa eri koekappaleiden läpi kulkeutunutta hiilidioksidivirran määrää.

#### 4.1.5 Kosteusmittaus

Ilman suhteellinen kosteus mitattiin kahdella Vaisalan HMI 31-kosteusmittarilla. Vallitsevat kosteusolosuhteet vaikuttivat materiaalien huokosrakenteeseen ja sitä kautta niiden kaasujen läpäisevyyssnopeuteen.

#### 4.1.6 Koelaitteiston kalibrointi

Koelaitteiston kalibrointi suoritettiin heinäkuussa -95. Kalibroinnissa koekappaleena käytettiin teräslevyä ja laitteistolle asetettiin kaksi vaatimusta:

- Ensiö- ja toisiopuolen välille ei saa muodostua ilmanpaine-eroa.
- Kalibrointimittauksissa ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuus pitää pysyä vakiona.

Aluksi kalibrointimittauksia suoritettiin siten, että ensiöpuoli oli täysin eristetty toisiopuolesta. Tällä järjestelyllä ensiöpuolen CO<sub>2</sub>-pitoisuus pysyi vakiona, mutta ensiö- ja toisiopuolen välille muodostui kaikissa mittauksissa paine-eroa. Paine-erot johtuivat ainakin kalibroinnin aikana tapahtuneesta lämpötilan vaihtelusta. Tästä syystä kokeissa säädettiin ensiöpuolen painetta läpimitaltaan 2 mm:n putken kautta.

Koska putki on avoin, sen kautta kulkeutui hiilidioksidia pois ensiöpuolelta. Putken kautta kulkeutuvan hiilidioksidin määrä aikayksikköä kohden mitattiin kokeellisesti erilaisilla ensiöpuolen pitoisuuksilla. Tulosten avulla määritettiin ajasta ja pitoisuudesta riippuva korjauskerroin, jota käytettiin ensiöpuolen pitoisuuden korjaamiseen.

Huohotinputken pienestä läpimitasta johtuen ensiöpuolen pitoisuuden korjaus kokeiden aikana jäi pieneksi kokonaispitoisuuteen verrattuna. Vuorokauden pituisten kalibrointimittausten lopussa korjaus oli n. 300 ppm. Toisaalta nopeimmin hiilidioksidia läpäisevien materiaalien kokeissa korjauskerroin ei ehtinyt juurikaan muuttamaan ensiöpuolen pitoisuutta. Huohotinputken asentamisen jälkeen ei kalibrointimittauksissa eikä varsinaisissa kokeissa esiintynyt ensiö- ja toisiopuolen välillä ilmanpaine-eroa.

#### 4.1.7 Kokeiden suoritus

Koe aloitettiin tiivistämällä koekappale silikonilla koekammion laippaa ja seiniä vasten. Silikonin kuivumisen jälkeen teipattiin koekappaleen toisiopuolelle muovikalvo, jotta syötetty hiilidioksidi ehtisi levitä tasaisesti koko ensiöpuolelle ennen varsinaisen läpäisymittauksen aloittamista.

Tämän jälkeen ensiöpuolelle päästettiin kaasupullosta 100 % hiilidioksidia niin, että CO<sub>2</sub> -pitoisuus nousi yli 1,0 % ja annettiin kaasujen tasaantua vähintään tunnin ajan. Kaasun syötön ja tasaantumisen aikana poistettiin ensiö- ja toisiopuolen välinen ilmanpaine-ero pitämällä huohotinputken lisäksi avoimena reikää, jonka halkaisija oli 10 mm.

Tasaantumisjakson jälkeen mitattiin ilman kosteuspitoisuus, suljettiin paineentasausreikä, käynnistettiin mittausohjelma ja poistettiin muovikalvo koekappaleen toisiopuolelta. Mittausohjelma tarkkaili ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuutta, ja tietojen talletus alkoi pitoisuuden laskiessa alle 1,0 %:n. CO<sub>2</sub> -pitoisuudet, lämpötilat ja ilmanpaineen muutokset mitattiin yhden minuutin välein.

Koetta jatkettiin kunnes ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuus laski alle 0,15 %. Huonosti läpäisevien materiaalien kokeet lopetettiin vuorokauden kuluttua tulosten tallentamisen käynnistymisestä.

Kokeet uusittiin niin, että ensimmäisen kokeen loputtua syötettiin ensiöpuolelle uusi annos hiilidioksidia ja uusittiin mittaus. Uusintamittauksella varmistettiin kokeiden onnistuminen. Varsinaisen mittauksen ja uusintamittauksen tulosten välillä ei ollut yhtenkään koekappaleen kohdalla merkittävää eroa.

Koelaitteistossa suoritettiin myös kahdelle puupohjaiselle koekappaleelle koe, jolla tutkittiin kosteuden vaikutusta niiden hiilidioksidinläpäisevyyteen. Kokeissa ensiöpuolen ilman suhteellista kosteutta nostettiin ja toisiopuolella vallitsi normaalit huoneen kosteusolosuhteet. Ensiöpuolen ilmaan saatiin kosteuslisää kaatamalla koekammion pohjalle vettä. Olosuhteiden annettiin tasaantua useiden vuorokausien ajan ennen läpäisevyyssmittauksia. Muuten kosteuskokeet suoritettiin kuten muutkin kokeet.

## 4.2 Koekappaleet

Koekappaleina käytettiin yleisesti käytössä olevia rakennusmateriaaleja. Joitakin huomioita koekappaleista:

- Koekappaleet olivat ulkomitoiltaan 390 \* 590 mm ± 5 mm.
- Kipsilevyt 1 ja 2 olivat eri valmistajilta.
- Huokoinen kuitulevy 2 ja 3 olivat eri tuotemerkkejä.
- Pinnoituskokeiden taustalevynä sekä rakennekokeiden sisäverhouslevynä käytettiin kipsilevyä 2.
- Tapetit kiinnitettiin kipsilevylle normaalilla tapettiliisterillä.
- Maalaukset suoritettiin telalla kahteen kertaan.
- Maaleja ei ohennettu.
- Normaalina lateksimaalina käytettiin sisämaalaukseen tarkoitettua vesiohenteista, puolihihmeää (4/RT-luokitus) akrylaattilateksimaalia.
- Käytetty himmeä lateksimaali oli sisämaalaukseen soveltuvaa vesiohenteista, täys-himmeää (6/RT-luokitus) PVA-lateksimaalia.
- Rakennuspaperina käytettiin erään puukuitueristevalmistajan käyttämää tuotetta.
- Puulevy valmistettiin liimaamalla neljästä mäntylaudasta yhtenäinen levy ja höyläämällä se 13 mm:n vahvuiseksi.
- Sisäverhuospaneelina käytettiin mäntypaneelia STV 12\*95.
- Puulevy ja paneeli olivat pinnoittamattomia.
- Eristeiden mitatut keskimääräiset tiheydet:
  - \* mineraalivilla TS 80 kg/m<sup>3</sup>
  - \* mineraalivilla 17 kg/m<sup>3</sup>
  - \* puukuitueriste 45 kg/m<sup>3</sup>
- Puukuitueristeiset koekappaleet märkäpuhallettiin puusta tai vanerista valmistettuihin kehyksiin. Kehysten sisämitat olivat samat kuin koekammion vapaan aukon mitat, joten hiilidioksidin läpäisyypinta-ala muodostui puukuitueristeisillä koekappaleilla saman kokoiseksi kuin muissakin kokeissa.

### 4.2.1 Suoritetut materiaalikokeet

Ensimmäisissä materiaalikokeissa ei mitattu lämpötilaa eikä ilmankosteutta. Näiden kokeiden olosuhteet eivät kuitenkaan poikenneet oleellisesti muissa kokeissa vallinneista olosuhteista. Suoritetut materiaalikokeet sekä niissä vallinneet keskimääräiset ilman suhteelliset kosteudet ja lämpötilat on esitetty taulukossa 4.1.

**Taulukko 4.1.** Suoritetut materiaalikokeet.

<b>Päivä</b>	<b>Materiaali</b>	<b>Paksuus mm</b>	<b>RH %</b>	<b>Lämpötila °C</b>
21.08.	<i>kipsilevy 1</i>	13	-	-
22.08.	<i>combivaneri</i>	12	-	-
25.08.	<i>rakennusmuovi</i>	0,2	-	-
30.08.	<i>puulevy</i>	13	45	21
4.09.	<i>mineraalivilla TS</i>	30	44	21
21.09.	<i>lastulevy 1</i>	12	40	20
26.09.	<i>huokoinen kuitulevy 1</i>	25	47	21
27.09.	<i>huokoinen kuitulevy 2</i>	12	34	21
2.10.	<i>kuusivaneri</i>	9	37	20
4.10.	<i>lastulevy 2</i>	11	41	21
10.10.	<i>kipsilevy 2</i>	13	37	21
17.10.	<i>mineraalivilla</i>	150	41	22
23.10.	<i>kipsilevy TS</i>	9	40	21
28.10.	<i>huokoinen kuitulevy 3</i>	12	37	21
2.11.	<i>puukuitueriste</i>	150	25	20
1.12.	<i>rakennuspaperi</i>	-	20	20
10.12.	<i>sisäverhouspaneeli</i>	12	23	20

**4.2.2 Suoritetut pinnoitekokeet**

Kokeissa käytetyt pinnoitemateriaalit ovat yleisesti käytössä olevia sekä sisustuskau-  
poista saatavilla olevia tuotteita. Suoritetut kokeet sekä niissä vallinneet keskimääräiset  
ilman suhteelliset kosteudet ja lämpötilat on esitetty taulukossa 4.2.

**Taulukko 4.2.** Suoritetut pinnoitekokeet.

<b>Päivä</b>	<b>Materiaali</b>	<b>RH %</b>	<b>Lämpötila °C</b>
5.10.	<i>paperitapetti</i>	28	20
13.10.	<i>himmeä lateksimaali</i>	30	21
19.10.	<i>normaali lateksimaali</i>	38	22
21.10.	<i>vinyylitapetti</i>	30	21

**4.2.3 Suoritetut rakennekokeet**

Koelaitteistossa tehtiin kaksi koetta kokonaisella seinärakenteella. Rakenteet ja kokeissa  
vallinneet keskimääräiset ilman suhteelliset kosteudet ja lämpötilat on esitetty taulukos-  
sa 4.3.

**Taulukko 4.3.** Suoritetut rakennekokeet.

<i>Päivä</i>	<i>Rakenne</i>	<i>RH</i> <i>%</i>	<i>Lämpötila</i> <i>°C</i>
5.11.	<i>Rakenne 1</i>	28	20
	<i>paperitapetti</i> <i>kipsilevy 2 13 mm</i> <i>puukuitueriste 150 mm</i> <i>huokoinen kuitulevy 2 12 mm</i>		
14.1.	<i>Rakenne 2</i>	23	21
	<i>rakennuspaperi</i> <i>puukuitueriste 150 mm</i> <i>huokoinen kuitulevy 2 12 mm</i>		

**4.2.4 Suoritetut kosteuskokeet**

Kosteuskokeissa käytetyt koekappaleet ja kokeissa vallinneet keskimääräiset lämpötilat sekä ilman suhteelliset kosteudet on esitetty taulukossa 4.4.

**Taulukko 4.4.** Suoritetut kosteuskokeet.

<i>Koekappale</i>	<i>RH %</i>		<i>Lämpötila</i> <i>°C</i>
	<i>Ensiöpuoli</i>	<i>Toisiopuoli</i>	
<i>Sisäverhouspaneeli</i>	93	21	21
<i>Rakenne 2</i>	89	20	21

**4.3 Kertoimien määrittäminen**

Suoritettujen kokeiden perusteella materiaalikoekappaleille ja pinnoitetuille koekappaleille määritettiin hiilidioksidinvastus kahdella tavalla. Tapa 1 perustui tietyllä aikavälillä poistuneeseen hiilidioksidin määrään ja tapa 2 tuloksista laskettavaan näennäisilmanvaihtokerrotimeen. Rakenteiden läpäisevyyttä kuvattiin sekä näennäisilmanvaihtokerrotimeilla että hiilidioksidinvastuksilla.

**4.3.1 Hiilidioksidinvastuksen määrittäminen tavalla 1**

Tapa 1 perustui kokeen jakamiseen lyhyihin ajanjaksoihin. Jokaisesta jaksosta laskettiin ensiö- ja toisiopuolella vallinnut keskimääräinen konsentraatioero sekä jakson aikana kappaleen läpi diffundoitunut hiilidioksidin määrä.

Hiilidioksidipitoisuudet muutettiin konsentraatioiksi yleisen kaasulain avulla:

$$c = \frac{p \times C \times M}{R \times T} \times 10^{-6} \quad (4.1)$$

c	hiilidioksidin konsentraatio (g/m <sup>3</sup> )
p	kokonaispaine (Pa)
C	hiilidioksidipitoisuus (ppm)
M	hiilidioksidin moolimassa = 44,010 g/mol
R	moolinen kaasuvakio = 8,3143 J/(mol*K)
T	lämpötila (K)

Mittausjakson i aikana vallinnut keskimääräinen konsentraatioero  $\Delta c_i$  saatiin kaavasta:

$$\Delta c_i = \frac{c_{e,1} + c_{e,2}}{2} - \frac{c_{t,1} + c_{t,2}}{2} \quad (4.2)$$

$c_{e,1}$	ensiöpuolen konsentraatio mittausjakson alussa (g/m <sup>3</sup> )
$c_{e,2}$	ensiöpuolen konsentraatio mittausjakson lopussa (g/m <sup>3</sup> )
$c_{t,1}$	toisiopuolen konsentraatio mittausjakson alussa (g/m <sup>3</sup> )
$c_{t,2}$	toisiopuolen konsentraatio mittausjakson lopussa (g/m <sup>3</sup> )

Mittausjaksolla i koekappaleen läpäissyt hiilidioksidin määrä  $g_{k,i}$  saatiin kaavasta:

$$g_{k,i} = \frac{(c_{e,1} - c_{e,2}) \times V_e}{(t_2 - t_1) \times A_k} \quad (4.3)$$

$V_e$	ensiöpuolen tilavuus (m <sup>3</sup> )
$A_k$	koekappaleen diffuusiolle avoin pinta-ala (m <sup>2</sup> )
$t_1$	kokeen kokonaisaika mittausjakson i alussa (s)
$t_2$	kokeen kokonaisaika mittausjakson i lopussa (s)

Mittausjakson i hiilidioksidinvastusluku  $Z_{v,i}$  saatiin kaavalla:

$$Z_{v,i} = \frac{\Delta c_i}{g_{k,i}} \quad (4.4)$$

Ja koekappaleen hiilidioksidinvastus saatiin kaavasta:

$$Z_v = \left( \sum_{i=1}^n Z_{v,i} \right) / n \quad (4.5)$$

n	mittausvälien lukumäärä
---	-------------------------

### 4.3.2 Hiilidioksidinvastuksen määrittäminen tavalla 2

Määrittäminen tavalla 2 perustuu ensiöpuolen näennäiseen ilmanvaihtokertoimeen  $n_{n,e}$ . Se laskettiin ensiöpuolelta poistuneen hiilidioksidin määrästä kaavalla:

$$n_{n,e} = -\frac{1}{t} \times \ln \left( \frac{C_{\infty} - C}{C_{\infty} - C_0} \right) \quad (4.6)$$

$C_0$	ensiöpuolen alkupitoisuus (ppm)
$C_{\infty}$	kokeessa vallinnut toisiopuolen keskimääräinen pitoisuus (ppm)
$C$	kokeen alusta ajan $t$ kuluttua vallinnut pitoisuus (ppm)
$t$	kokeeseen kulunut aika (h)

Saatu kerroin muutettiin hiilidioksidinvastuskertoimeksi  $Z_v$  kaavalla:

$$Z_v = \frac{A_k}{n_{n,e} \times V_e} \times 3600 \quad (4.7)$$

$V_e$	ensiöpuolen tilavuus ( $m^3$ )
$A_k$	koekappaleen diffuusiolle avoin pinta-ala ( $m^2$ )

### 4.3.3 Pinnoitteiden hiilidioksidinvastuksen määrittäminen

Pinnoitteiden hiilidioksidinvastus määritettiin vähentämällä pinnoitetun levyn kokonaishiilidioksidinvastuksesta pinnoitteen taustana olleen levyn hiilidioksidinvastus kaavan 4.8 mukaisesti.

$$Z_{v,pinn} = Z_{v,kok} - Z_{v,levy} \quad (4.8)$$

$Z_{v,pinn}$	käytetyn pinnoitteen hiilidioksidinvastus
$Z_{v,kok}$	taustalevyn ja pinnoitteen muodostaman koekappaleen $CO_2$ -vastus
$Z_{v,levy}$	taustalevyn hiilidioksidinvastus

### 4.3.4 Rakenteiden hiilidioksidinvastuksen määrittäminen

Rakenteiden hiilidioksidinvastukset määritettiin myös tavoilla 1 ja 2. Lisäksi rakenteille laskettiin yleiseen laskentamalliin perustuen kokonaishiilidioksidinvastus siten, että eri ainekerrosten vastusarvot laskettiin yhteen.

### 4.3.5 Rakenteiden näennäisilmanvaihtokertoimen määrittäminen

Rakennekokeiden tulosten perusteella laskettiin rakenteiden ensiöpuolelle aikaansaamat näennäiset ilmanvaihtokertoimet kaavan 4.6 mukaisesti.

### 4.3.6 Materiaalien hiilidioksidinläpäisevyyden määrittäminen

Homogeenisille koekappaleille määritettiin lisäksi hiilidioksidinläpäisevyys siten, että materiaalin paksuus jaettiin saadulla vastusluvulla:

$$\delta_v = \frac{d}{Z_v} \quad (4.9)$$

$\delta_v$  hiilidioksidinläpäisevyys ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $d$  materiaalin paksuus (m)

### 4.3.7 Kerroinmäärittäminen

Kertoimien määrittämissä on puutteena se, että kokeiden aikana ei ensiöpuolella vallinnut hiilidioksidipitoisuuden suhteen stationääritilanne. Tämä koskee erityisesti hiilidioksidinvastuskertoimen määrittämistä tavan 1. Tavalla 2 laskien tämä virhe osin poistuu, koska laskennan perusteena käytetty näennäinen ilmavaihtokerroin pysyy vakiona. Määrittelyissä tuloksissa tavan 1 ja 2 välillä on pieni, systemaattinen ero siten, että tavalla 1 saadaan hieman suurempi vastusarvo.

Pinnoitteiden määrittämisessä on käytetty käsinlaskentamenetelmän periaatetta, että rakenteen kokonaisvastus on sen sisältämien homogeenisten materiaalikerrosten osavastusten summa. Tämä saattaa aiheuttaa virhettä, kun taustalevynä toimineen kipsilevyn 2 vastus oli suurempi kuin pinnoitteiden (paitsi normaalin lateksimaalin tapauksessa).

Rakenteiden läpäisevyyttä kuvaavista suureista on tarkin näennäisilmanvaihtokerroin. Alenevan ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuuden aiheuttama epätarkkuus korostuu rakenteiden tapauksessa, koska eristeen ulkopinnalla olevan tuulensuojalevyn hiilidioksidinläpäisevyys on huonompi kuin eristeen.

Lasketut tulokset ovat kuitenkin suuruusluokaltaan oikeita. Vaikka määrittämissä kehitettäisiin, saavutettava hyöty olisi todennäköisesti käytännön tilanteiden kannalta merkityksetön. Tämä johtuu pääosin suurista materiaaliroista tuoteryhmien sisällä sekä olosuhteiden muuttumisesta.



## 5. KOKEIDEN TULOKSET

### 5.1 Yleistä

Mikäli koekappaleilla oli vuorokauden kokeen jälkeen ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuus vielä yli 0,90 %, niille ei määritetty hiilidioksidinvastus- eikä läpäisevyysarvoja. Nämä koekappaleet olivat:

- rakennusmuovi
- combivaneri 12 mm
- normaali lateksimaali

Käytetty koelaitteisto oli suunniteltu läpäisevien rakennusmateriaalien ja rakenteiden tutkimiseen. Täten mittausten tarkkuus heikkenee, jos materiaali läpäisee huonosti hiilidioksidia. Mikäli edellä mainituille materiaaleille haluttaisiin määrittää tarkka hiilidioksidinläpäisevyys, pitäisi se tehdä erityyppisellä laitteistolla. Näitä materiaaleja ei voida kuitenkaan käyttää pyrittäessä hyvin kaasuja läpäiseviin seinärakenteisiin, joten tarkempaa määrittystä ei katsottu aiheelliseksi tehdä.

Kokeiden aikana toisiopuolella vallinnut hiilidioksidipitoisuus oli tavallisesti n.  $400 \pm 30$  ppm. Joissain kokeissa pitoisuus kohosi tätä korkeammaksi, mutta se ei suoritettujen uusintamittausten perusteella vaikuttanut laskettuihin kertoimiin.

### 5.2 Ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuuden aleneminen

Eri koekappaleiden ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuuksien aleneminen on esitetty liitteissä seuraavasti:

- Yli vuorokauden kestäneiden materiaalikokeiden ensiöpuolen alenemäkäyrät liitteessä 2.
- Lyhyiden (alle vuorokaudessa alarajan saavuttaneiden) materiaalikokeiden ensiöpuolen alenemäkäyrät liitteissä 3 ja 4.
- Pinnoituskokeiden ensiöpuolen alenemäkäyrät liitteessä 5.
- Rakennekokeiden ensiöpuolen alenemäkäyrät liitteessä 6.

Alenemäkäyrät on liitteissä esitetty 300 minuuttiin asti, jotta käyrät olisivat vertailukelpoisia toistensa kanssa.

### 5.3 Koekappaleiden hiilidioksidinvastus

#### 5.3.1 Materiaalit

Kokeiden perusteella lasketut materiaalien hiilidioksidinvastukset on esitetty taulukossa 5.1.

**Taulukko 5.1.** Kokeista määritetyt keskimääräiset hiilidioksidinvastukset  $Z_v$  materiaaleille.

<i>Materiaali</i>	<i>Vahvuus</i> <i>mm</i>	<i>Hiilidioksidinvastus <math>Z_v</math></i> <i>*10<sup>3</sup> s/m</i>	
		<i>Tapa 1</i>	<i>Tapa 2</i>
<i>kipsilevy 1</i>	13	5,8	5,7
<i>puulevy</i>	13	320	290
<i>mineraalivilla TS</i>	30	3,2	3,2
<i>lastulevy 1</i>	12	74	73
<i>huokoinen kuitulevy 1</i>	25	7,9	7,7
<i>huokoinen kuitulevy 2</i>	12	4,3	4,1
<i>kuusivaneri</i>	9	1950	1850
<i>lastulevy 2</i>	11	35	33
<i>kipsilevy 2</i>	13	7,2	6,9
<i>mineraalivilla</i>	150	11	10
<i>kipsilevy TS</i>	9	5,7	5,5
<i>huokoinen kuitulevy 3</i>	12	5,3	5,2
<i>puukuitueriste</i>	150	15	15
<i>rakennuspaperi</i>	-	3,4	3,3
<i>sisäverhouspaneeli</i>	12	380	345

#### 5.3.2 Pinnoitteet

Kokeissa määritetyt pinnoitteiden hiilidioksidinvastukset on esitetty taulukossa 5.2.

**Taulukko 5.2.** Pinnoitteiden keskimääräiset hiilidioksidinvastukset  $Z_v$ .

<i>Pinnoitus</i>	<i>Hiilidioksidinvastus <math>Z_v</math></i> <i>*10<sup>3</sup> s/m</i>	
	<i>Tapa 1</i>	<i>Tapa 2</i>
<i>paperitapetti</i>	1,5	1,3
<i>himmeä lateksimaali</i>	4,0	4,1
<i>vinyyliapetti</i>	3,0	3,2

### 5.3.3 Rakenteet

Kokeissa testattujen rakenteiden hiilidioksidinvastusarvot on esitetty taulukossa 5.3. Vastusarvojen vertailun perusteella voidaan sanoa, että laskentamallissa käytetty tapa laskea eri kerrosten vastusarvot yhteen, antaa suuruusluokaltaan oikean arvon rakenteen kokonaishiilidioksidinvastukselle.

**Taulukko 5.3.** Rakennekokeista eri tavoilla määritettyjen hiilidioksidinvastusarvojen vertailu.

	<i>Rakennekokeista määritetty hiilidioksidinvastus <math>Z_v</math> *10<sup>3</sup> s/m</i>		<i>Materiaalikokeista yhteen- laskettu hiilidioksidinvastus <math>\Sigma Z_v</math> *10<sup>3</sup> s/m</i>	
	<i>Tapa 1</i>	<i>Tapa 2</i>	<i>Tapa 1</i>	<i>Tapa 2</i>
<i>rakenne 1</i>	27	25	28	27
<i>rakenne 2</i>	19	19	23	22

### 5.4 Näennäsilmanvaihtokertoimet rakennekokeissa

Rakennekokeiden tulosten perusteella lasketut ensiöpuolen näennäsilmanvaihtokertoimet on esitetty taulukossa 5.4.

**Taulukko 5.4.** Rakennekokeiden perusteella määritetyt koelaitteiston ensiöpuolen näennäsilmanvaihtokertoimet.

<i>Rakenne</i>	<i>Ensiöpuolen näennäsilmanvaihtokerroin <math>n_{n,e}</math> 1/h</i>
<i>rakenne 1</i>	<i>n. 0,50</i>
<i>rakenne 2</i>	<i>n. 0,65</i>

### 5.5 Kosteuskokeiden tulokset

Kosteuskokeiden tulosten perusteella kosteuden lisääntyessä hiilidioksidin diffuusio puussa hidastuu selvästi. Toisella kosteuskokeissa testatulla koekappaleella, eli rakenteella 2 ei muodostunut havaittavaa eroa hiilidioksidinläpäisevyysnopeuteen kosteuden vaikutuksesta. Ensiöpuolen alenemäkäyristä lasketut läpäisevyyttä kuvaavat suureet on esitetty taulukossa 5.5.

**Taulukko 5.5.** Kosteuskokeista lasketut läpäisevyyttä kuvaavat suuret verrattuna normaalien kokeiden perusteella laskettuihin vastaaviin arvoihin.

	<i>Sisäverhouspaneeli hiilidioksidinvastus (tapa 2) *10<sup>3</sup> s/m</i>	<i>Rakenne 2 näennäinen ilmanvaihto- kerroin 1/h</i>
<i>ensiöpuoli "kuiva"</i>	<i>n. 345</i>	<i>n. 0,65</i>
<i>ensiöpuoli "kosteaa"</i>	<i>n. 620</i>	<i>n. 0,65</i>

Suoritetuista Kosteuskokeista ja normaaleista kokeista saadut ensiöpuolen hiilidioksidipitoisuuden alenemakäyrät on esitetty sisäverhouspaneelin osalta liitteessä 7 ja rakenteen 2 osalta liitteessä 8.

## 5.6 Materiaalien hiilidioksidinläpäisevyys

Koekappaleiden hiilidioksidinvastusluvusta määritetyt materiaalien hiilidioksidinläpäisevyys on esitetty taulukossa 5.6. Taulukossa ei ole esitetty koetuloksista määritettyjä absoluuttisia arvoja, koska läpäisevyysarvo ei ole yksikäsitteinen. Tämä johtuu lähinnä kolmesta seikasta:

- Samalla materiaalinimellä kutsutaan monia eri tuotteita, jotka saattavat ominaisuuksiltaan erota toisistaan huomattavasti.
- Olosuhteiden muuttuminen muuttaa läpäisevyyttä.
- Rakenteiden hiilidioksidinläpäisevyyden tutkimiseen ei ole yleisesti käytössä olevaa ja standardisoitua tutkimusmenetelmää. Erilaisilla koelaitteistoilla, joissa voi eroja esiintyä esim. koekappaleen tason suunnassa voidaan saada erilaisia tuloksia.

**Taulukko 5.6.** Koetulosten perusteella saatuja rakennusmateriaalien hiilidioksidinläpäisevyyksiä.

<i>Materiaali</i>	<i>Hiilidioksidinläpäisevyys <math>\delta_v</math> * 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s</i>
<i>huokoinen kuitulevy</i>	<i>2,0...3,5</i>
<i>kipsilevy</i>	<i>1,5...2,5</i>
<i>lastulevy</i>	<i>0,13...0,38</i>
<i>puu</i>	<i>0,04...0,05</i>
<i>mineraalivilla</i>	<i>14...15</i>
<i>puukuitueriste</i>	<i>9...11</i>

## 6. TULOSTEN MALLINTAMINEN

Tutkimuksen kokeellisessa osassa saatujen tulosten vaikutusta todelliseen tilanteeseen pyrittiin mallintamaan teoreettisin laskelmin. Tuloksia mallinnettiin kahdella eri tavalla:

- Määritettiin erilaisten tilojen läpäisevien seinärakenteiden aikaansaama näennäinen ilmanvaihtokerroin.
- Laskettiin normaalin pientalon makuuhuoneen kokonaishiilidioksiditasetta.

### 6.1 Näennäisilmanvaihtoluku erilaisissa tiloissa

Näennäisilmanvaihtomallinnuksessa käytettiin seinärakenteina koelaitteistossa testattuja rakenteita, jotka on esitetty taulukossa 4.3. Kokeissa määritetyt näennäiset ilmanvaihtokertoimet on esitetty taulukossa 5.4. Kertoimet voidaan muuttaa halutun kokoisen tilan näennäisilmanvaihtokertoimiksi kaavalla:

$$n_n = n_{n,e} \times \frac{A}{A_k} \times \frac{V_e}{V} \quad (6.1)$$

A	Laskettavan tilan kaasuja läpäisevien seinien pinta-ala (m <sup>2</sup> )
A <sub>k</sub>	Koekappaleen diffuusiolle avoin ala (m <sup>2</sup> )
V	Laskettavan tilan tilavuus (m <sup>3</sup> )
V <sub>e</sub>	Koekammion ensiöpuolen tilavuus (m <sup>3</sup> )

Näennäinen ilmanvaihtoluku laskettiin neljälle erilaiselle tilalle. Kaikissa tiloissa katto ja lattia ovat kaasuja läpäisemättömiä.

#### Huone 1:

- huoneen koko 3 m \* 4 m \* 2,7 m
- seinät ovat aukottomia, koko pinta-alaltaan kaasuja läpäiseviä

#### Huone 2:

- huoneen koko 3 m \* 4 m \* 2,7 m
- kaksi seinää on kaasuja läpäiseviä ja läpäisyypinta-alaa pienentää lisäksi ikkuna (2,7 m<sup>2</sup>)

#### Talo 1:

- talon koko 10 m \* 12 m \* 2,7 m
- seinät ovat aukottomia, koko pinta-alaltaan kaasuja läpäiseviä

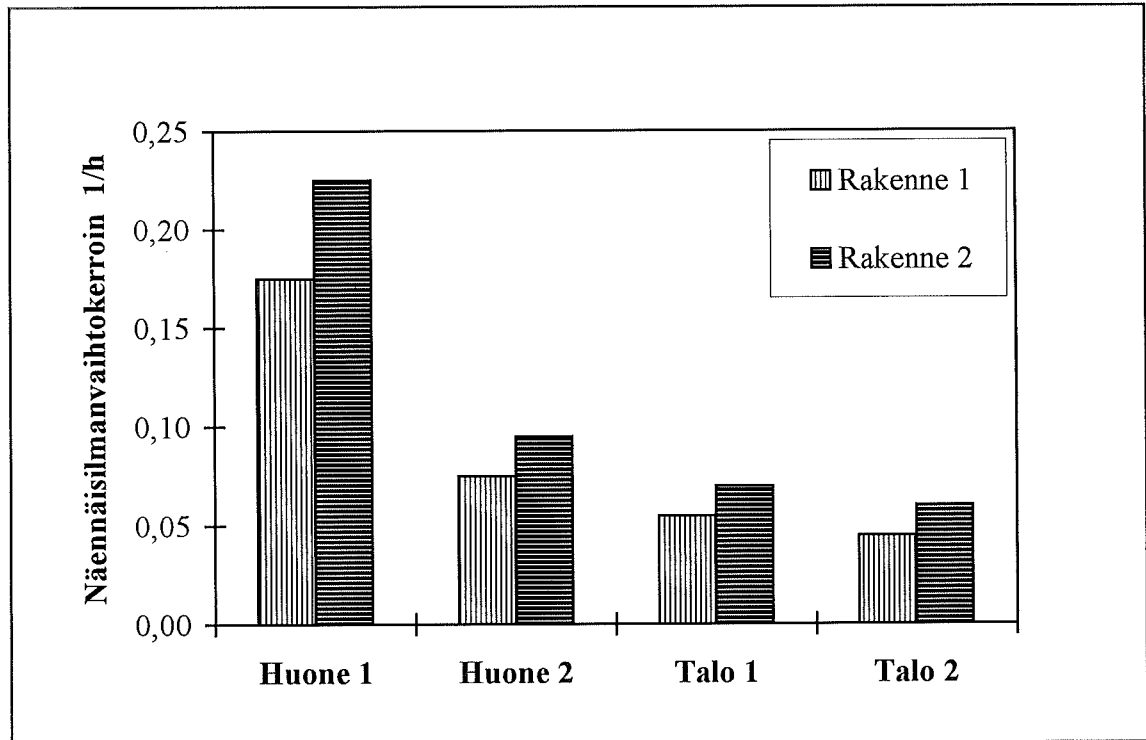
#### Talo 2:

- talon koko 10 m \* 12 m \* 2,7 m
- ulkoseinien pinta-alasta on aukkoja 15 %

Huoneen 1 tapauksessa näennäisilmanvaihtokertoimeksi saadaan seinärakenteesta riippuen n. 0,17-0,23 1/h. Lukemaa voidaan pitää merkittävänä arvona sisäilman laatua tarkasteltaessa. Huoneen 1 kaltaista tilaa ei todellisuudessa kuitenkaan koskaan esiinny. Muiden laskettujen tilojen näennäisilmanvaihtokerroin jää selvästi huoneen 1 arvoa pienemmäksi. Todellisuudessa vaikuttavaa kerrointa laskettaessa tulos riippuu huomattavasti asetettavista lähtöarvoista. Lasketut näennäiset ilmanvaihtokertoimet on esitetty taulukossa 6.1 ja kuvassa 6.1.

**Taulukko 6.1.** Seinärakenteiden 1 ja 2 aikaansaama näennäinen ilmanvaihtokerroin erilaisissa tiloissa.

	<i>Näennäinen ilmanvaihtokerroin 1/h</i>	
	<i>Rakenne 1</i>	<i>Rakenne 2</i>
<i>Huone 1</i>	<i>0,17...0,18</i>	<i>0,22...0,23</i>
<i>Huone 2</i>	<i>0,07...0,08</i>	<i>0,09...0,10</i>
<i>Talo 1</i>	<i>0,05...0,06</i>	<i>n. 0,07</i>
<i>Talo 2</i>	<i>0,04...0,05</i>	<i>n. 0,06</i>



**Kuva 6.1.** Lämpäsevien seinärakenteiden aikaansaamat keskimääräiset näennäiset ilmanvaihtokertoimet erilaisissa tiloissa.

## 6.2 Makuuhuoneen hiilidioksiditaso

Monien sisäilmastotutkimusten mukaan pientalon sisäilman laadun mitoittava tilanne esiintyy usein yöllä makuuhuoneissa, nukuttaessa ikkunat ja väliovi kiinni. Tästä syystä pyrittiin laskennallisesti mallintamaan normaalin pientalon makuuhuoneen hiilidioksiditasetta. Laskenta suoritettiin vesihöyryn kulkeutumista kuvaavalla käsinlaskentamenetelmällä ja siinä otettiin huomioon diffuusion vaikutus sekä ulko- ja väliseinien että katon läpi. Vertailukohtana käytettiin kaasuja läpäisemättömiä rakenteita.

Laskettavaksi tilaksi valittiin yksikerroksisen pientalon kulmahuone, jonka kaksi seinää on ulkoseiniä ja kaksi väliseiniä. Materiaalit valittiin siten, että rakenteet ovat mahdollisimman hyvin hiilidioksidia läpäiseviä ja niiden vastusarvoina käytettiin tavalla 2 määritettyjä arvoja. Rakenteet on esitetty taulukossa 6.2.

**Taulukko 6.2.** Laskennassa käytetyt rakenteet ja niiden hiilidioksidinvastusluvut.

<i>Rakenne</i>	<i>Materiaali</i>	<i>Hiilidioksidinvastus *10<sup>3</sup> s/m</i>
<i>Ulkoseinä</i>	<i>paperitapetti</i>	<i>1,3</i>
	<i>kipsilevy 2 13 mm</i>	<i>6,9</i>
	<i>rakennuspaperi</i>	<i>3,3</i>
	<i>puukuitueriste 150 mm</i>	<i>15,1</i>
	<i>huokoinen kuitulevy 2 12 mm</i>	<i>4,1</i>
	<i>yhteensä</i>	<i>30,7</i>
<i>Väliseinä</i>	<i>paperitapetti</i>	<i>1,3</i>
	<i>kipsilevy 2 13 mm</i>	<i>6,9</i>
	<i>puukuitueriste 100 mm</i>	<i>9,9</i>
	<i>kipsilevy 2 13 mm</i>	<i>6,9</i>
	<i>paperitapetti</i>	<i>1,3</i>
	<i>yhteensä</i>	<i>26,3</i>
<i>Katto</i>	<i>himmeä lateksimaali</i>	<i>4,1</i>
	<i>kipsilevy 2 13 mm</i>	<i>6,9</i>
	<i>rakennuspaperi</i>	<i>3,3</i>
	<i>puukuitueriste 300 mm</i>	<i>30,2</i>
	<i>yhteensä</i>	<i>44,5</i>

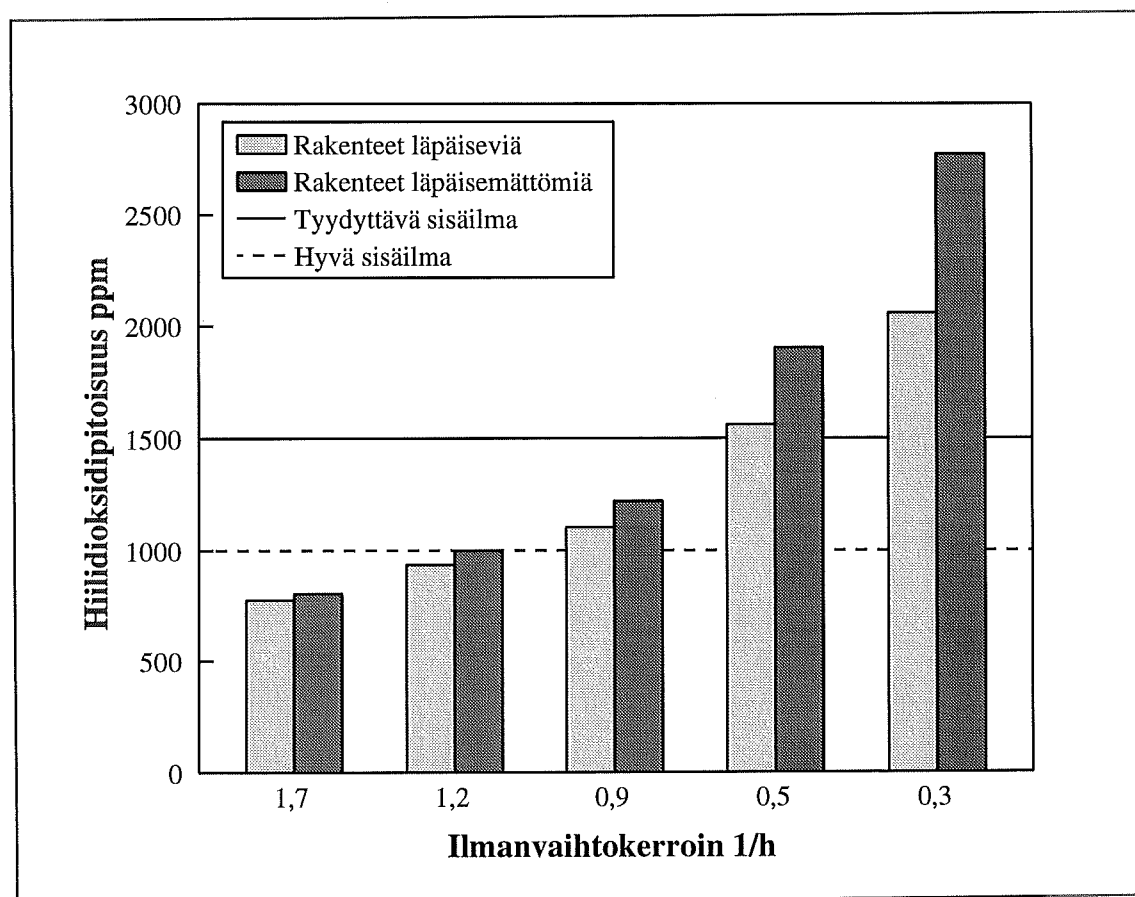
Laskennassa käytettiin lisäksi seuraavia lähtöarvoja:

- laskenta-aika on 8 tuntia
- makuuhuoneen koko 3 m \* 4 m \* 2,7 m
- huoneessa nukkuu 2 ihmistä, jotka tuottavat hiilidioksidia 215 ml/min/hlö (ihmisen lepotuotto /13/)
- ulkoseinässä ikkuna (2,0 m<sup>2</sup>) ja väliseinässä ovi (1,6 m<sup>2</sup>), jotka ovat kiinni
- ulkoilman hiilidioksidipitoisuus 350 ppm
- muissa sisätiloissa koko yön vallitseva CO<sub>2</sub> -pitoisuus 600 ppm
- kaasuja läpäisemättömässä makuuhuoneessa myös väliseinät ovat läpäisemättömiä
- ulkona ja sisällä lämpötila +20 °C sekä suhteellinen kosteus 30 % (rakenteissa käytetyillä materiaaleilla suoritettujen läpäisevyyskokeiden keskimääräiset olosuhteet)

Muuttujana käytettiin huoneen ilmanvaihtokerrointa, jota muuttamalla saatiin huoneen hiilidioksidin loppupitoisuudelle erilaisia arvoja. Tulokset on esitetty taulukossa 6.3 ja kuvassa 6.2.

**Taulukko 6.3.** Makuuhuonemallinnuksessa saatuja loppupitoisuusarvoja erilaisilla ilmanvaihtokertoimilla.

<i>IV-kerroin</i>	<i>Rakenteet läpäiseviä ppm CO<sub>2</sub></i>	<i>Rakenteet läpäisemättömiä ppm CO<sub>2</sub></i>	<i>Kommentit</i>
0,3	2060	2775	<i>tyypillinen ilmanvaihdoltaan huonosti toimiva makuuhuone</i>
0,5	1562	1905	<i>RakMK D2:n vähimmäisilmanvaihtokerroin normaalikorkuisille huoneille</i>
0,9	1104	1221	<i>RakMK D2:n ihmislukumääräperusteinen vähimmäisilmanvaihtokerroin</i>
1,2	935	1000	<i>hiilidioksidipitoisuuden tavoitetaso 1000 ppm (hyvä sisäilma /6/)</i>
1,7	775	805	<i>Hiilidioksidipitoisuuden tavoitetaso 800 ppm</i>



**Kuva 6.2.** Makuuhuonemallinnuksessa saatuja hiilidioksidin loppupitoisuusarvoja erilaisilla ilmanvaihtokertoimilla sekä tyydyttävän ja hyvän sisäilman hiilidioksidipitoisuudet /6/.

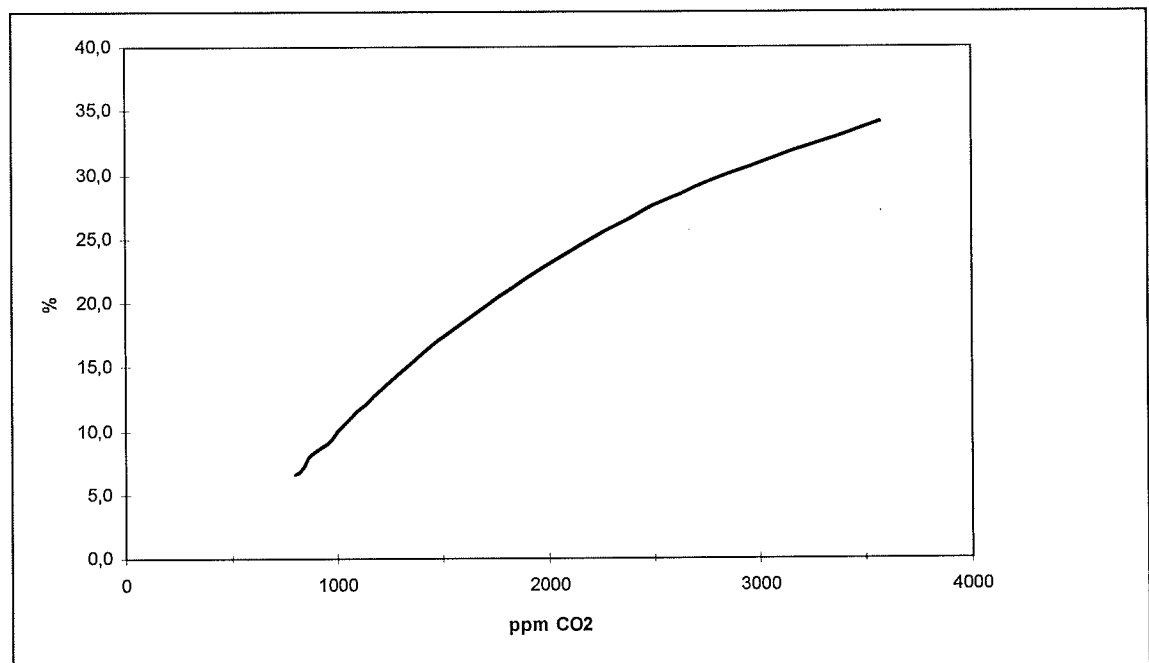


Tuloksista on laskettu kaasuja läpäisevien rakenteiden sisäilman hiilidioksidilisää pienentävä prosenttuaalinen vaikutus  $\rho$  verrattuna kaasuja läpäisemättömiin rakenteisiin kaavalla 6.2:

$$\rho = \frac{C_i^- - C_i^+}{C_i^- - C_{\text{ulk}}} \times 100 \% \quad (6.2)$$

$C_i^-$  loppupitoisuus, joka muodostuu läpäisemättömillä rakenteilla  
 $C_i^+$  loppupitoisuus, joka muodostuu kaasuja läpäisevillä rakenteilla  
 $C_{\text{ulk}}$  ulkoilman hiilidioksidipitoisuus = 350 ppm

Prosenttuaalinen vaikutus kasvaa voimakkaasti makuuhuoneen pitoisuuden noustessa. Pienennysvaikutus jää hyväksi sisäilmaksi luokitelluilla hiilidioksidipitoisuuksilla (< 1000 ppm) pieneksi, mutta "ongelmamakuuhuoneiden" pitoisuuksilla (n. 3000 ppm) pienennysvaikutus on n. 30 %. Tulokset on esitetty kuvassa 6.3.



**Kuva 6.3.** Mallinnuksessa saatu läpäisevien seinien sisäilman hiilidioksidilisää pienentävä prosenttuaalinen vaikutus verrattuna läpäisemättömiin seinärakenteisiin.

Makuuhuonemallinnuksen tulosten perusteella määritettiin myös kaasuja läpäisevien seinärakenteiden aikaansaama näennäinen ilmanvaihtokerroin. Arvoksi saatiin n. 0,11...0,13 1/h, joka on suurempi kuin taulukossa 6.1 esitetyt huoneen 2 arvot. Tämä johtuu lähinnä erilaisista oletuksista lähtöarvoissa (esim. katto ja väliseinä "hengittävät") sekä erilaisesta laskentatavasta.

### 6.3 Mallinnusten arviointi

Mallinnuslaskelmiin tulee suhtautua kriittisesti, koska niissä on tehty huomattava määrä oletuksia. Todellisessa tilanteessa sisäilman hiilidioksiditaseeseen vaikuttaa tarkastellun diffuusion lisäksi monet muutkin tekijät kuten konvektio. Laskelmissa ei ole otettu huomioon myöskään seuraavia hiilidioksiditaseeseen vaikuttavia tekijöitä:

- Käsinlaskentamenetelmä ei ota huomioon rakenteiden huokosilmaan mahtuvaa hiilidioksidimäärää, joten se aliarvioi hiilidioksidin poistumaa sisätiloista ainakin tarkastelujakson alussa. Jos huokosissa olevan ilman CO<sub>2</sub>-pitoisuus on alhainen kuormitusjakson alkaessa, hiilidioksidivirran vastuksena toimii tällöin vain sisäverhouksen- ja pinnoitteen aiheuttama vastus.
- Hiilidioksidilla on ilmaa suuremmasta molekyylipainosta johtuen taipumus kerrostua ilman alaosaan. Täten katon kautta tapahtuva hiilidioksidin diffundoituminen on ilmeisesti hitaampaa kuin seinän. Laskelmat yliarvioivat jonkin verran hiilidioksidin poistumaa, koska katon vastuskertoimina on käytetty pystyssä olleilla koekappaleilla määritettyjä arvoja.
- Ulko- ja sisälämpötilojen muutokset. Lämpötilan laskiessa diffuusio hidastuu.
- Materiaalien kosteuspitoisuudet. Joidenkin materiaalien läpi tapahtuva diffuusio hidastuu materiaalien kosteuspitoisuuden noustessa.
- Perinteisen käsinlaskumenetelmän yleiset virheet.

## 7. HIILIDIOKSIDIN JA VESIHÖYRYN VERTAILU

### 7.1 Hiilidioksidin- ja vesihöyrynläpäisevyysien vertailu

Vesihöyrynläpäisevyyttä tutkitaan useinmiten standardisoidulla tutkimusmenetelmällä, eli ns. kuppikokeella. Tässä tutkimuksessa ei tehty vesihöyrynläpäisevyyskokeita, vaan esitetyt läpäisevyys- ja vastusarvot on saatu kirjallisuudesta.

Vesihöyry- ja hiilidioksidinläpäisevyyksiä joidenkin rakennusmateriaalien ja ilman läpi on esitetty taulukossa 7.1. Kertoimilla on huomattava korrelaatio toistensa kanssa. Täten tietyn kaasun läpäisevyysarvo tietylle materiaalille on riippuvainen kaasun diffuusio- kertoimesta ilman läpi.

**Taulukko 7.1.** Vesihöyry- ja hiilidioksidinläpäisevyysarvoja joidenkin rakennusmateriaalien ja ilman läpi lämpötilassa 20 °C.

<i>Materiaali</i>	<i>Vesihöyrynläpäisevyys /7/ * 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s</i>	<i>Hiilidioksidinläpäisevyys * 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s</i>
<i>ilma</i>	24,6	15,3
<i>puukuitueriste</i>	13,5 /8/	9...11
<i>mineraalivilla</i>	15...24	14...15
<i>huokoinen kuitulevy</i>	3,8...4,6	2,0...3,5
<i>kipsilevy 13 mm</i>	n. 2,3	1,5...2,5
<i>lastulevy</i>	0,1...0,5	0,13...0,38
<i>puu</i>	0,2...3,5	0,04...0,05

Tutkittujen sisäverhouspinnoitteiden aiheuttamien hiilidioksidinvastusten (taulukko 7.2) vastaavassa vertailussa korrelaatio on huomattavasti pienempi.

**Taulukko 7.2.** Pinnoitteiden vesihöyry- ja hiilidioksidinvastusten vertailu.

<i>Pinnoite</i>	<i>Vesihöyrynvastus * 10<sup>3</sup> s/m</i>	<i>Hiilidioksidinvastus * 10<sup>3</sup> s/m</i>
<i>himmeä lateksimaali</i>	0,7 /17/	4,3
<i>normaali lateksimaali</i>	6,6 /17/	ei määr.
<i>paperitapetti</i>	1 /7/	1,5
<i>vinyyliapetti</i>	10 /7/	3,2

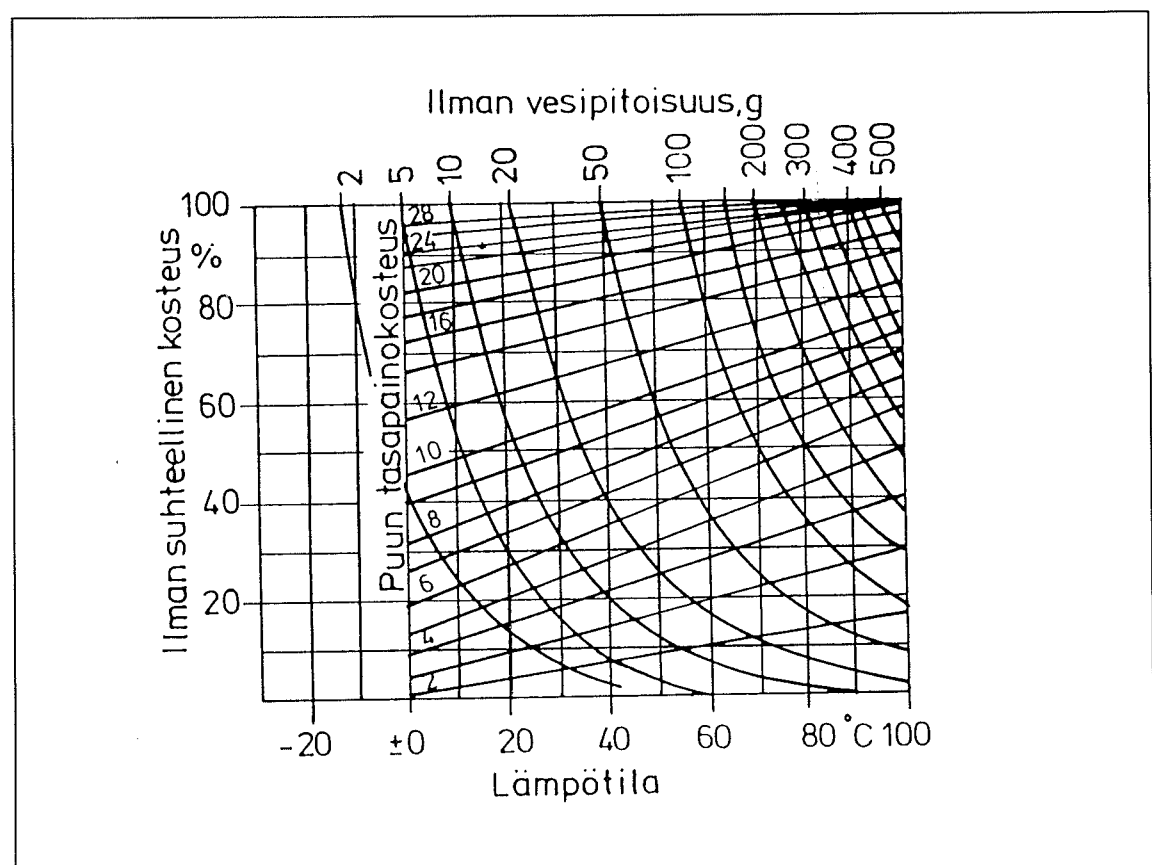
Maalien kohdalla ero johtuu ilmeisesti käytetyn maalikerroksen vahvuudesta. Lateksimaalien vesihöyrynläpäisevyys on huomattavasti riippuvainen maalikerroksen vahvuudesta /16/. Kokeissa, joissa maalien vesihöyrynläpäisevyys on tutkittu, maalikerros on ruiskutettu paperin pinnalle. Hiilidioksidin läpäisevyyskokeissa maali taas maalattiin kipsilevyille ohentamattomana telalla kahteen kertaan. Molempien vastusarvojen määrittämisessä maaleina on käytetty samoja tuotemerkkejä. Lateksimaaleja käytettäessä on myös huomattava, että maalattavan pinnan tasaisuus vaikuttaa oleellisesti siihen, kuinka yhtenäisen kerroksen maali muodostaa.

Tapettien läpäisevyyksikertoimissa ei ole myöskään yhtä voimakasta korrelaatiota kuin materiaalien kohdalla. Tähän yksi selitys on se, että hiilidioksidin ja vesihöyrynvastuskertoimia ei ole määritetty samoilla tuotemerkeillä.

## 7.2 Vesihöyryn diffuusio seinärakenteen läpi

Diffuusion aikaansaama vesihöyryn kulkeutuminen seinärakenteen läpi käsinlaskentamenetelmän mukaan on sitä suurempaa, mitä pienempi rakenteen vesihöyrynvastusluku on. Koska materiaalien vesihöyryn- ja hiilidioksidinvastusluvut riippuvat pääosin toisistaan, rakenteen hiilidioksidinläpäisevyyden parantaminen lisää myös rakenteen läpi kulkeutuvaa vesihöyryn määrää.

Puu materiaalina sitoo ja luovuttaa kosteutta. Näin ollen käsinlaskentamenetelmä ei anna täysin oikeaa kuvaa puuseinien ja puupohjaisia materiaaleja sisältävien rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta. Puun, kuten kaikkien hygroσκοoppisten aineiden tasapainokosteus on riippuvainen sitä ympäröivän ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Kuvassa 7.1 on esitetty puun tasapainokosteuden riippuvuus ilman vesipitoisuudesta ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) ja lämpötilasta.



**Kuva 7.1.** Ilman vesipitoisuuden ja lämpötilan vaikutus puun tasapainokosteuteen.

Hygroskooppisen materiaalin ja sen ympäristön välillä vallitsee aina jokin seuraavista olomuodoista:

- Materiaali sitoo kosteutta ympäristöstä. Ilmiötä kutsutaan kostumiseksi eli absorptioksi.
- Materiaali luovuttaa kosteutta ympäristöön. Ilmiötä kutsutaan kuivumiseksi eli desorptioksi.
- Materiaali on tasapainokosteudessa ympäristön kanssa.

Materiaalin tasapainokosteuteen vaikuttaa myös, onko aine kostunut vai kuivunut saavuttaessaan tasapainotilan. Tätä aineen kostumisen ja kuivumisen välistä eroa kutsutaan hystereesiksi.

Koska puukuitueristeellä on puun tavoin ominaisuus sitoa ja luovuttaa kosteutta, sen kosteusteknisen toimivuuden perustana voidaan pitää vanhojen puru- ja hirsiseinien toimintaperiaatetta. Nämä rakenteet pystyvät puun kosteudensitomisoimaisuusien avulla varastoimaan sisäilmasta rakenteeseen talvella siirtyvää kosteutta ja kuivumaan kesällä. Tällöin rakenteen kosteusteknisen toimivuuden määrää sen kosteuskapasiteetin riittävyys.

Vaikka käsinlaskentamallissa on tiettyjä puutteita (kohta 3.1.5), on sitä hyväksi käyttäen kuitenkin laskettu kohdan 6. mallinnuslaskelmissa käytetyn seinärakenteen kosteuskäytäytymistä talviolosuhteissa.

Ulko- ja sisätilan kosteuserona on käytetty  $3,5 \text{ g/m}^3$  ja rakennekerrosten vesihöyrynvastukset on esitetty taulukossa 7.3.

**Taulukko 7.3.** Laskennassa käytetyt materiaalien vesihöyrynvastusarvot.

<i>Materiaali</i>	<i>Paksuus mm</i>	<i>Vesihöyrynvastus * <math>10^3 \text{ s/m} /7/</math></i>
Paperitapetti	-	1
Kipsilevy	13	6
Rakennuspaperi	-	5 **
Puukuitueriste	150	10 ***
Huokoinen kuitulevy	12	3

\*\* Vesihöyryn vastusluku on laskettu hiilidioksidin vastusluvusta kertomalla se hiilidioksidin ja vesihöyryn ilman läpäisevyyksien suhteella.

\*\*\* Vesihöyryn vastuslukuna on käytetty sahanpurun arvoa.

Käytetyillä lähtöarvoilla seinärakenteeseen ei muodostu kastepistettä, vaan eristetilan ulkopinnan RH on 82 % ja diffuusio siirtää kosteutta rakenteen läpi  $80 \text{ g/m}^2 \text{ vko}$ . Läpi menevän kosteuden määrällä ei ole sinänsä merkitystä, koska eristetilaan ei tiivisty kosteutta. Laskentataulukko on esitetty liitteessä 9.

## 8. YHTEENVETO

Tutkimuksessa on tarkasteltu hiilidioksidin ja vesihöyryn kulkeutumista kaasujen diffundoitumisen mahdollistavien rakenteiden läpi.

Tarkastelua varten kehitettiin koelaitteisto, jolla voitiin tutkia hiilidioksidin diffuusiota erilaisten rakennusmateriaalien, sisäpinnoitteiden ja rakenteiden läpi. Koelaitteiston avulla määritetyt rakennusmateriaalien hiilidioksidinläpäisevyysarvot korreloivat hyvin muissa tutkimuksissa esitettyjen vesihöyrynläpäisevyyskertoimien kanssa.

Kosteudella näyttäisi olevan selvä hidastava vaikutus puun hiilidioksidinläpäisevyyteen. Koetuloksista ei voi päätellä, kuinka kosteus vaikuttaa muista materiaaleista koostuvan rakenteen läpi tapahtuvaan hiilidioksidivirtaan. Teoreettisesti tarkasteltaessa lämpötilan lasku hidastaa hiilidioksidin diffuusiota.

Koetulosten perusteella suoritettiin myös erilaisia sisäilman hiilidioksiditasetta mallintavia tarkasteluja, joissa otettiin huomioon seinärakenteen läpi tapahtuva hiilidioksidin diffuusio. Mallinnukset eivät anna koskaan täysin oikeaa tulosta todellisuudessa vallitsevista hiilidioksidipitoisuuksista, mutta laskentatuloksista voidaan kuitenkin tehdä joi-takin johtopäätöksiä.

Sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen "hengittävillä" rakenteilla on alentava vaikutus. Jos käytetään Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 antamia ilmanvaihtoarvoja, tai jos tarkastellaan hyväksi luokiteltua sisäilmaa, "hengittävien" seinärakenteiden vaikutus sisäilman hiilidioksidilisään ei ole merkittävä. Vaikutus korostuu, jos hiilidioksidipitoisuus sisällä nousee korkeaksi.

Yhteenvetona tehdyistä mallinnustarkasteluista voidaan todeta, että ilmanvaihdon tarve ei vähene käytettäessä kaasuja läpäiseviä rakenteita, mutta niitä käyttämällä voidaan pienentää tilapäisesti korkeiksi kohonneiden hiilidioksidipitoisuuksien aiheuttamaa haittaa.

Rakennettaessa hyvin hiilidioksidia läpäiseviä seinärakenteita, materiaalit on valittava hyvin huolellisesti. Kokeiden perusteella esimerkiksi taustaltaan tuulettamattoman paneelin ja normaalin sisälateksimaalin käyttö sisäverhouksena ei tule tällöin kysymykseen. Rakenteen ulkoverhouksen tulee olla myös riittävästi tuuletettu. Lisäksi olisi huolehdittava, että seinärakenteet pysyvät kaasuja läpäisevinä koko rakennuksen käyttöiän.

Jos seinärakenteen sisäverhous on tuuletettu, paranee rakenteen hiilidioksidinläpäisevyys ja toisaalta sisäverhousmateriaali- ja pinnoite voidaan tällöin valita vapaasti. Tuulettavaa sisäverhousta käytettäessä on huolehdittava riittävän ilmankierron aikaansaamisesta sisäverhouksen taakse. Kosteusteknisessä mielessä sisäverhouksen tuuletus asettaa muun rakenteen voimakkaamman kosteusrasituksen alaiseksi, koska tällöin sisäpinnoitteen- ja verhouksen aikaansaamaa diffuusiovastusta vesihöyryä vastaan ei ole. Tästä syystä sisäverhoukseltaan tuuletetun rakenteen kosteustekninen toiminta on varmistettava.

Sisäilman laatua kokonaisuudessa tarkasteltaessa on muistettava, että tutkittu hiilidioksidi on vain laadun indikaattori. Muut, erityisesti normaaleissa tilanteissa laadun mitoit-

tavat epäpuhtaudet tulee ottaa huomioon, ennen kuin voidaan puhua “hengittävien” rakenteiden sisäilmaa parantavasta vaikutuksesta.

Läpäisevien seinärakenteiden vaikutus kokonaishiilidioksiditaseeseen on kaiken kaikkiaan hyvin monimutkainen massansiirtotapahtuma. Tämän tutkimuksen mallinnuksessa käytetty yksinkertainen käsinlaskentamenetelmä mallintaa vain karkeasti kokonaispitoisuutta. Jatkotutkimustarpeena olisi tarkempien mallien käyttö erityisesti lyhytaikaisen dynaamisen kuormituksen tapauksessa. Tutkimuksessa ei myöskään kokeellisesti varmistettu lämpötilan vaikutusta diffuusionopeuteen ja kosteuden vaikutuksen tutkiminen jäi suppeaksi. Avoimiksi kysymyksiksi jäi myös rakenteessa talviaikana vaikuttavien lämpövirran ja erilaisten konvektiovirtausten vaikutus.

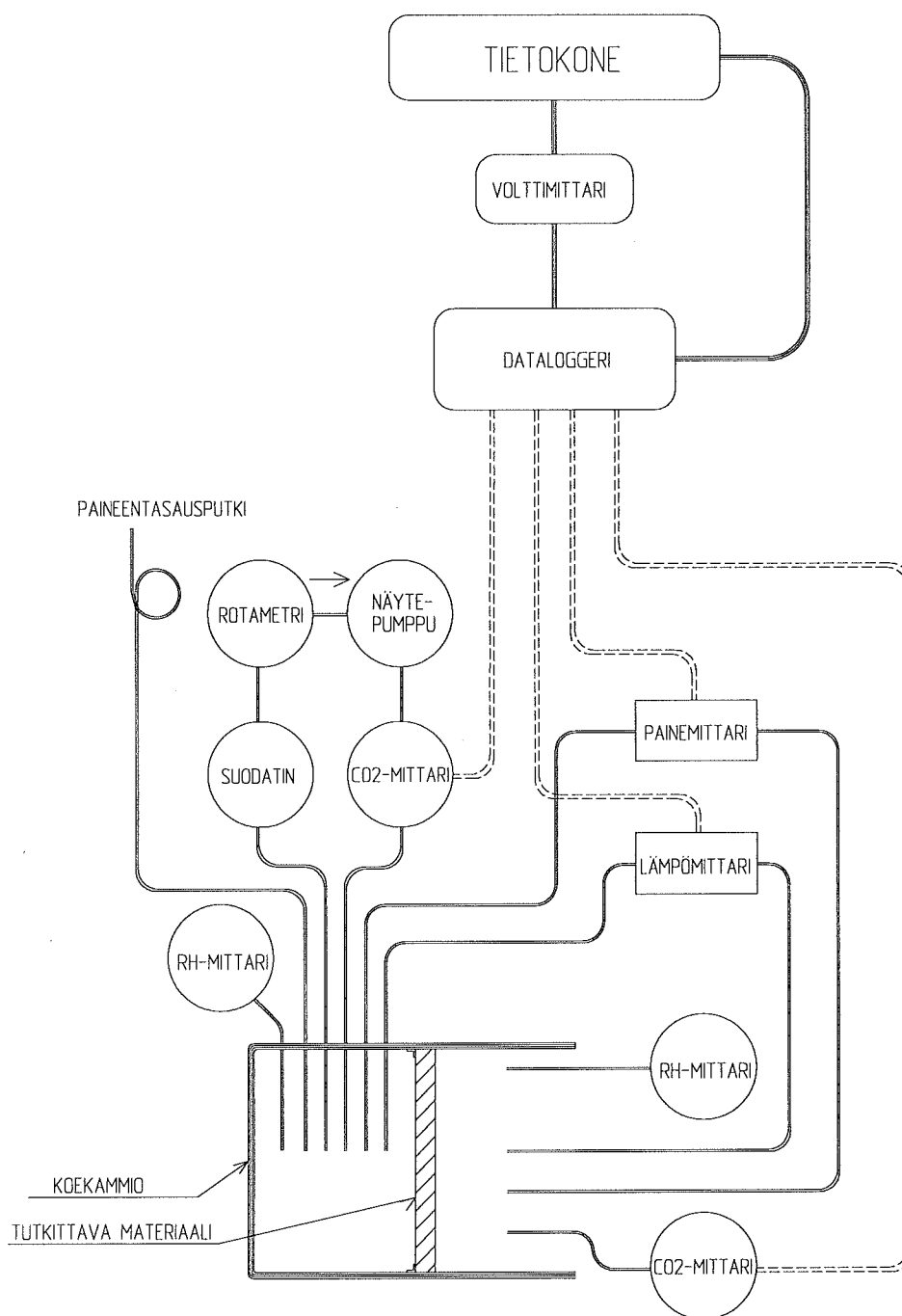
## LÄHDELUETTELO

- /1/ Nieminen, J. Höyrynsulun tarve puuseinässä. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 1050, 61 s.
- /2/ Rakennuksen sisäilmaston laatu ja ilmanvaihdon tarve. Helsinki 1986, Teknillinen korkeakoulu, LVI-laboratorio, KTM:n energiaosaston julkaisusarja D:104, 239 s.
- /3/ Seppänen, O. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Rauma 1988, LVI-kustannus Oy, 347 s.
- /4/ Kuusela, L., Pekkonen, J., Suomi, U. Rakennuksen sisäilmasto ja tarpeenmukainen ilmanvaihto. Espoo 1984, Teknillinen korkeakoulu, LVI-laboratorio, Sisäilmastoprojekti, Raportti C:9, 85 s.
- /5/ RakMK D2, Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto, Määräykset ja ohjeet 1987.
- /6/ Sisäilmaston, rakennustöiden ja pintamateriaalien luokitus 15.6.1995. Sisäilmastoyhdistys, Suomen rakennuttajaliitto, Suomen arkkitehtiliitto, Suomen konsulttitoimistojen liitto, 29 s.
- /7/ Nevander, L. E., Elmarsson, B. Fukthandbok. Tukholma 1994, AB Svensk byggtjänst, 526 s.
- /8/ Nieminen, J. Höyrynsuluton puuseinärakenne. Espoo 1987, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 735, 140 s. + liitt. 23 s.
- /9/ Ojanen, O., Kohonen, R. Ilmavirtausten vaikutus rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 590, 106 s.
- /10/ Polvinen, M., Kauppi, A., Saarimaa, J., Haalahti, P., Laurikainen, M. Rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyys. Espoo 1983, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 215. 143 s.
- /11/ Kauppi, A. Pientalon tiiviys ja sen pysyvyys, Forssan asuntomessualue. Espoo 1985, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 440. 46 s. + liitt. 10 s.
- /12/ Miettinen, R., Olkkonen, H., Saarimaa, J. Selluvillaeristeiset höyrynsuluttomat pientalot. Helsinki 1989, Ekovilla Oy, 63 s.
- /13/ Scherrer, J. Työn fysiologia. Juva 1988, WSOY, 631 s.
- /14/ Kohonen, R., Kokko, E., Mähönen, T., Ojanen, T. Mineraalivillaeristyksen ilmavirtaukset ja tuulensuojaus. Espoo 1986, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 431, 119 s.

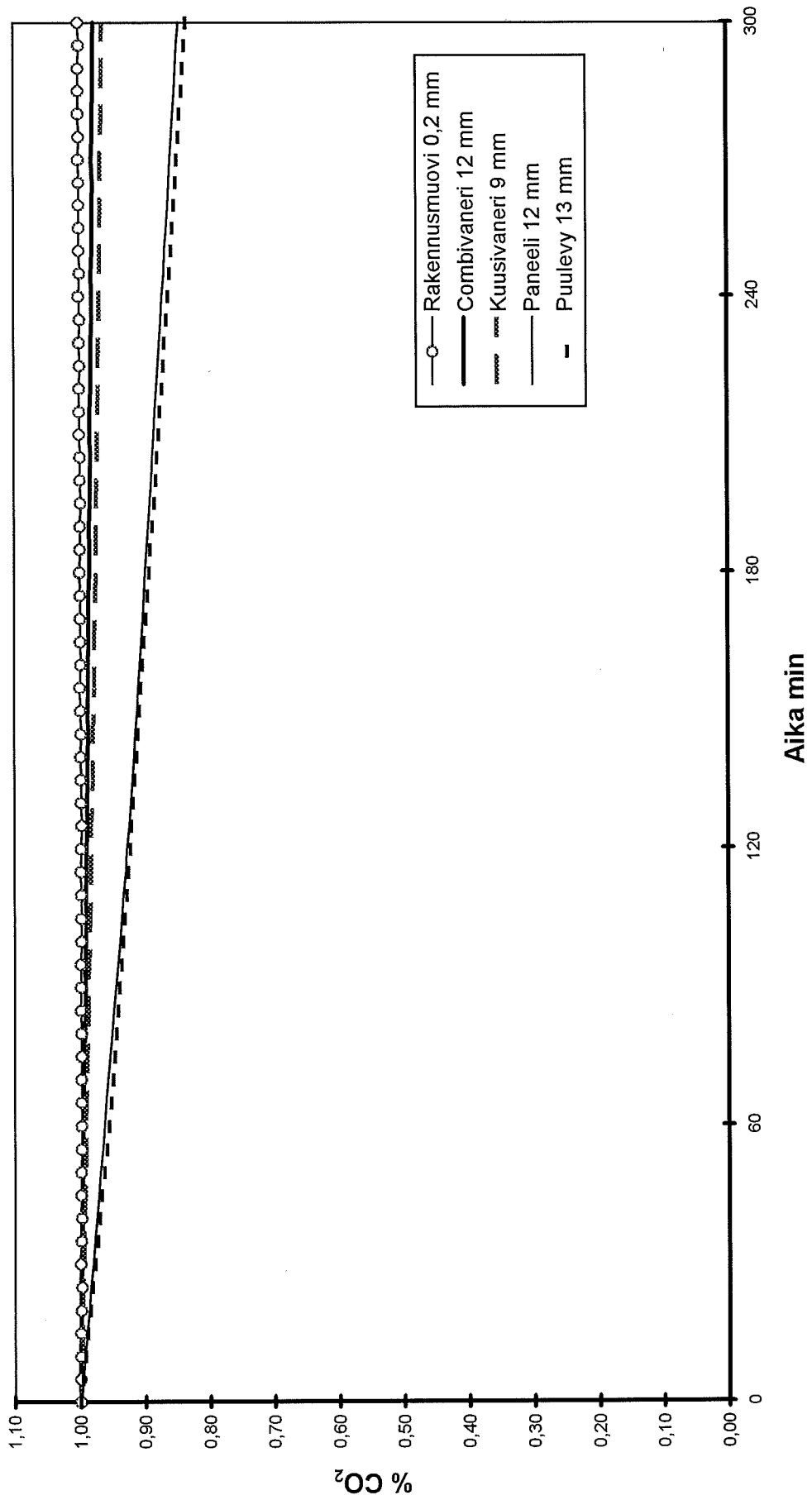


- /15/ Lampinen, M. J. Aineensirto-oppi. Espoo 1988, Otakustantamo, 123 s.
- /16/ RIL 184, Rakennusmateriaalien ja -osien kestävyys. Helsinki 1991, 263 s.
- /17/ Puhelinkeskustelu Eila-Majja Hakkaraisen (Tikkurila Oy) kanssa 17.10.1995.

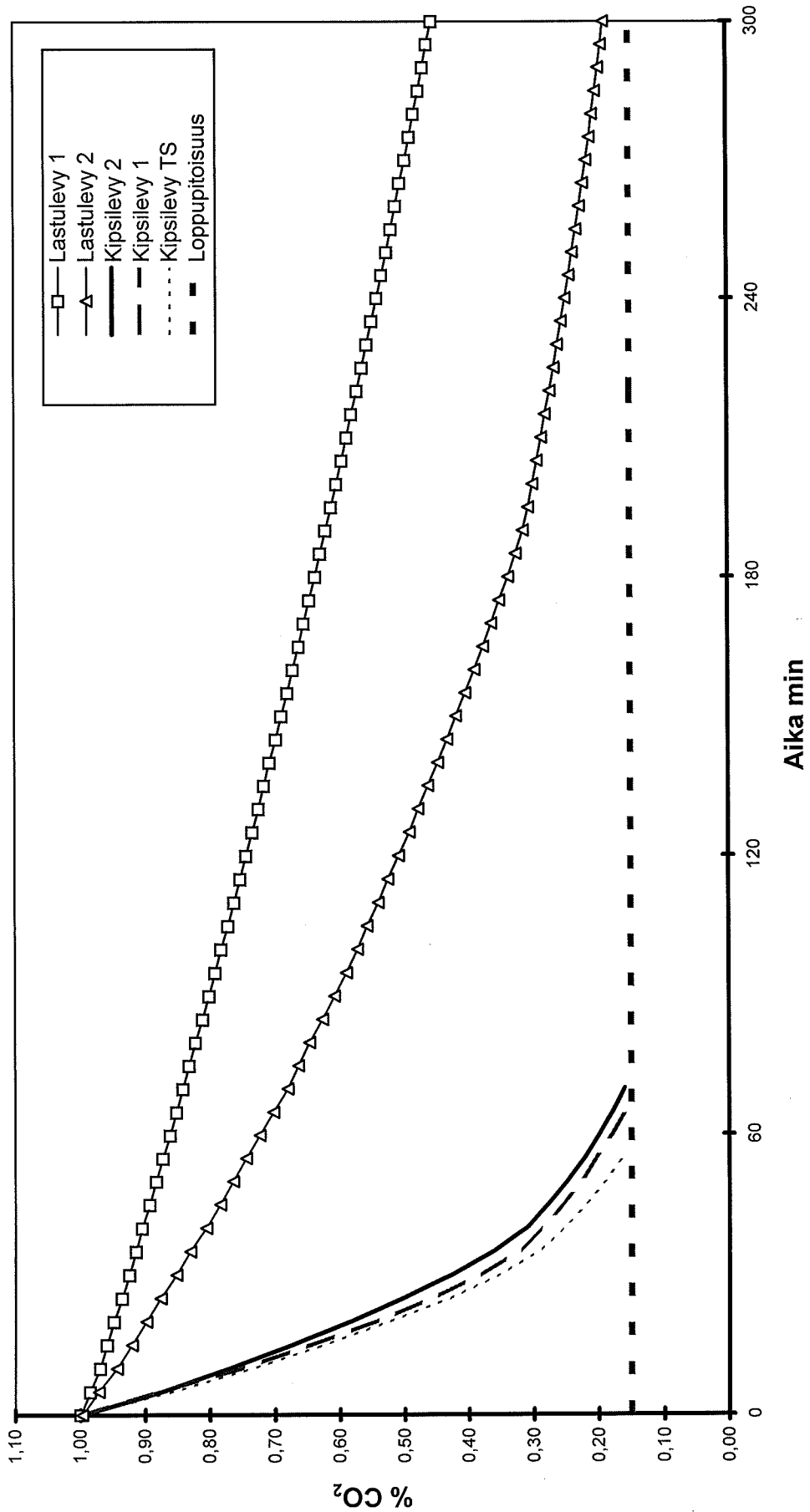
## HIILIOKSIDIN LÄPÄISEVYYSLAITTEISTO



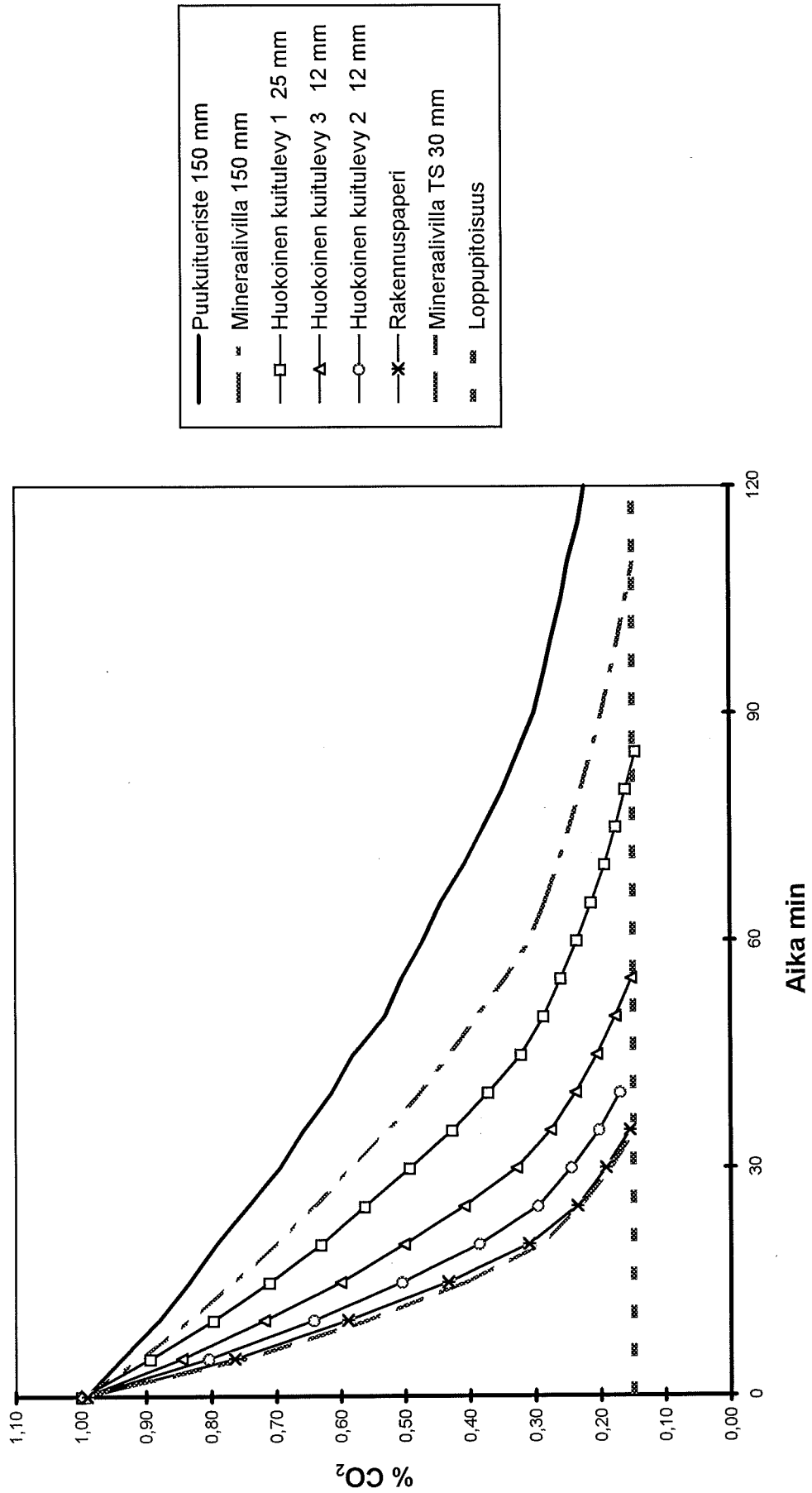
Hiiidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella,  
huonosti läpäisevät materiaalit



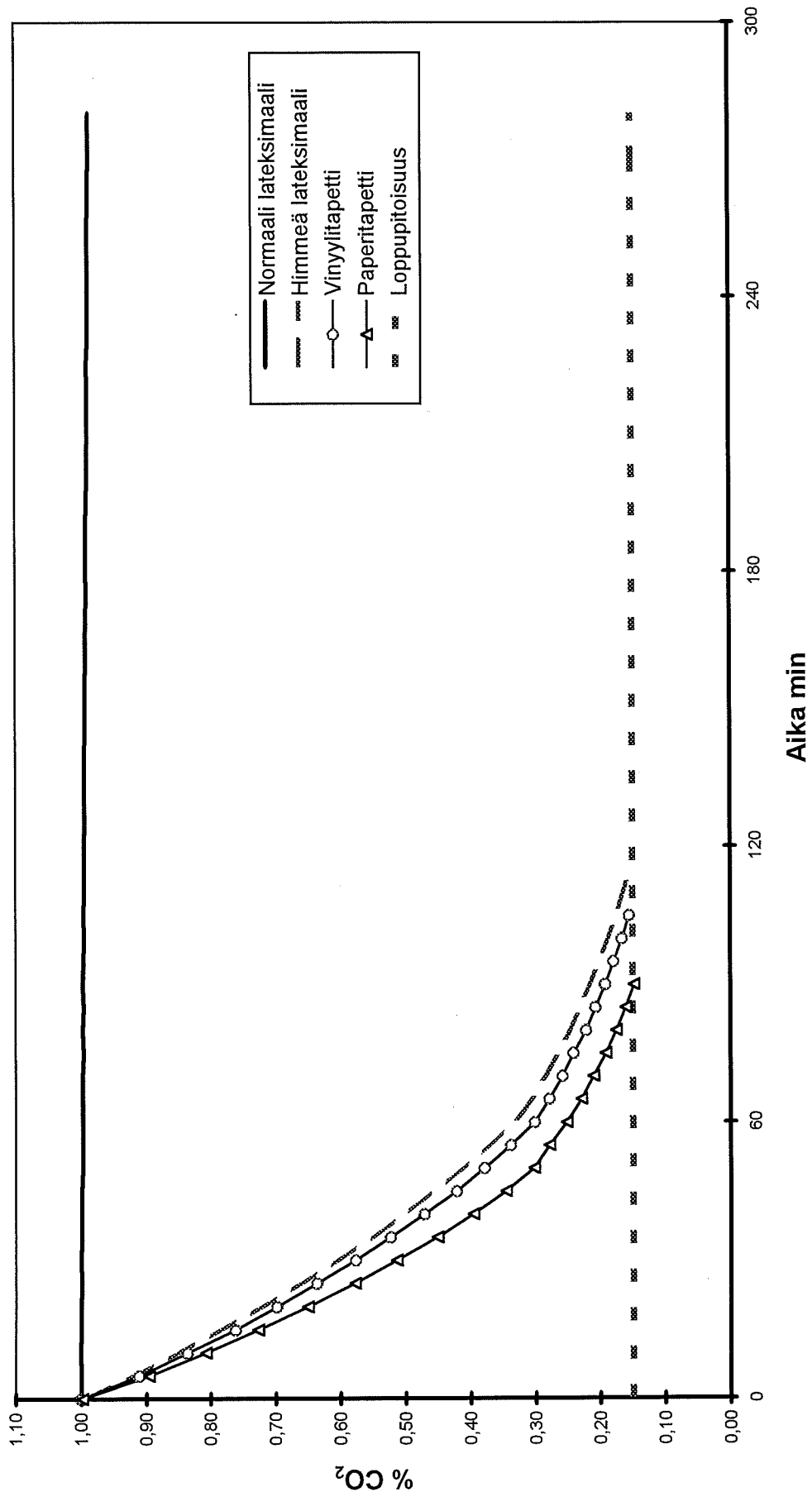
Hiiidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella,  
Lastulevyt ja kipsilevyt



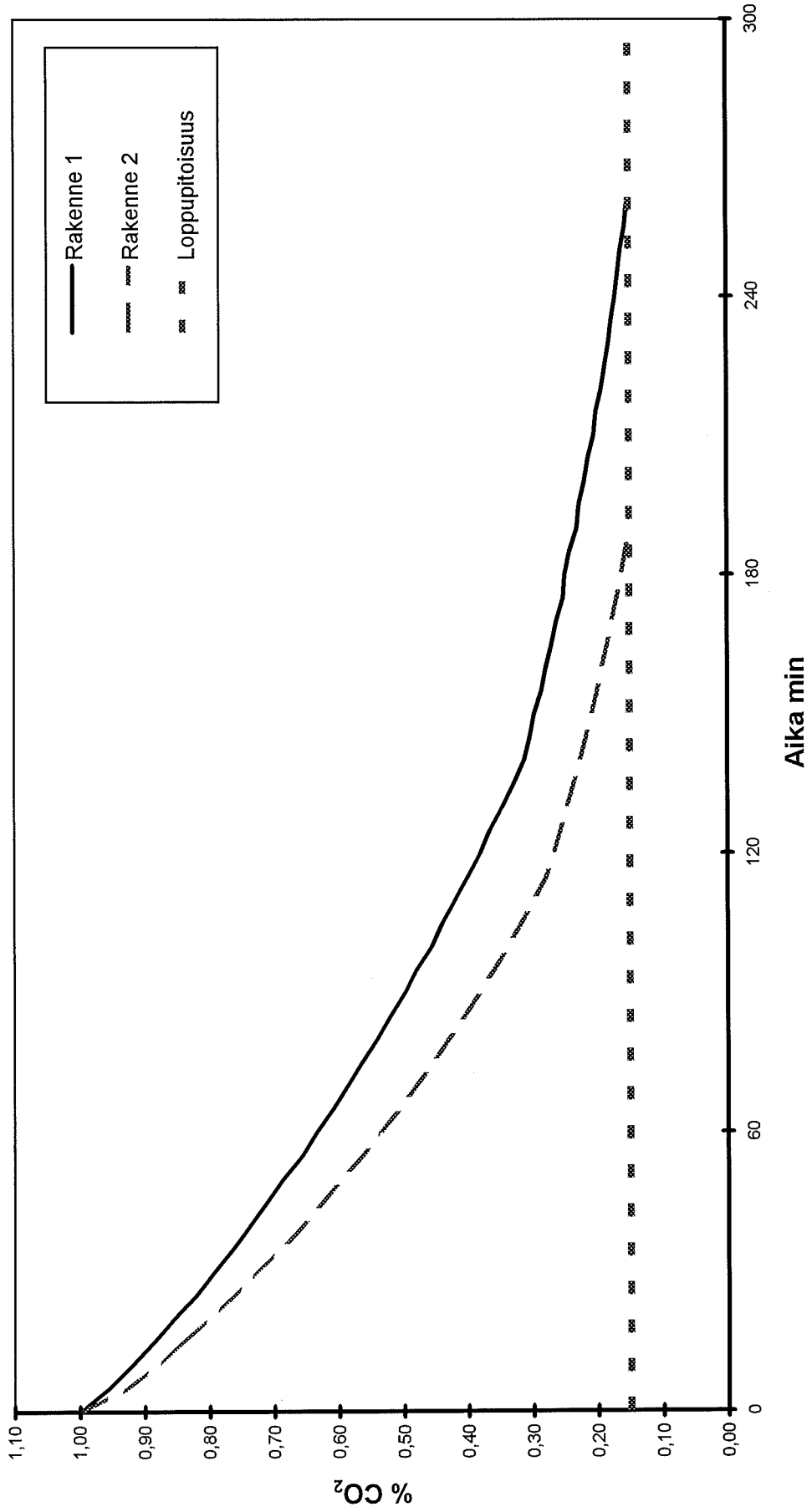
**Hiilidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella,  
Materiaalit**



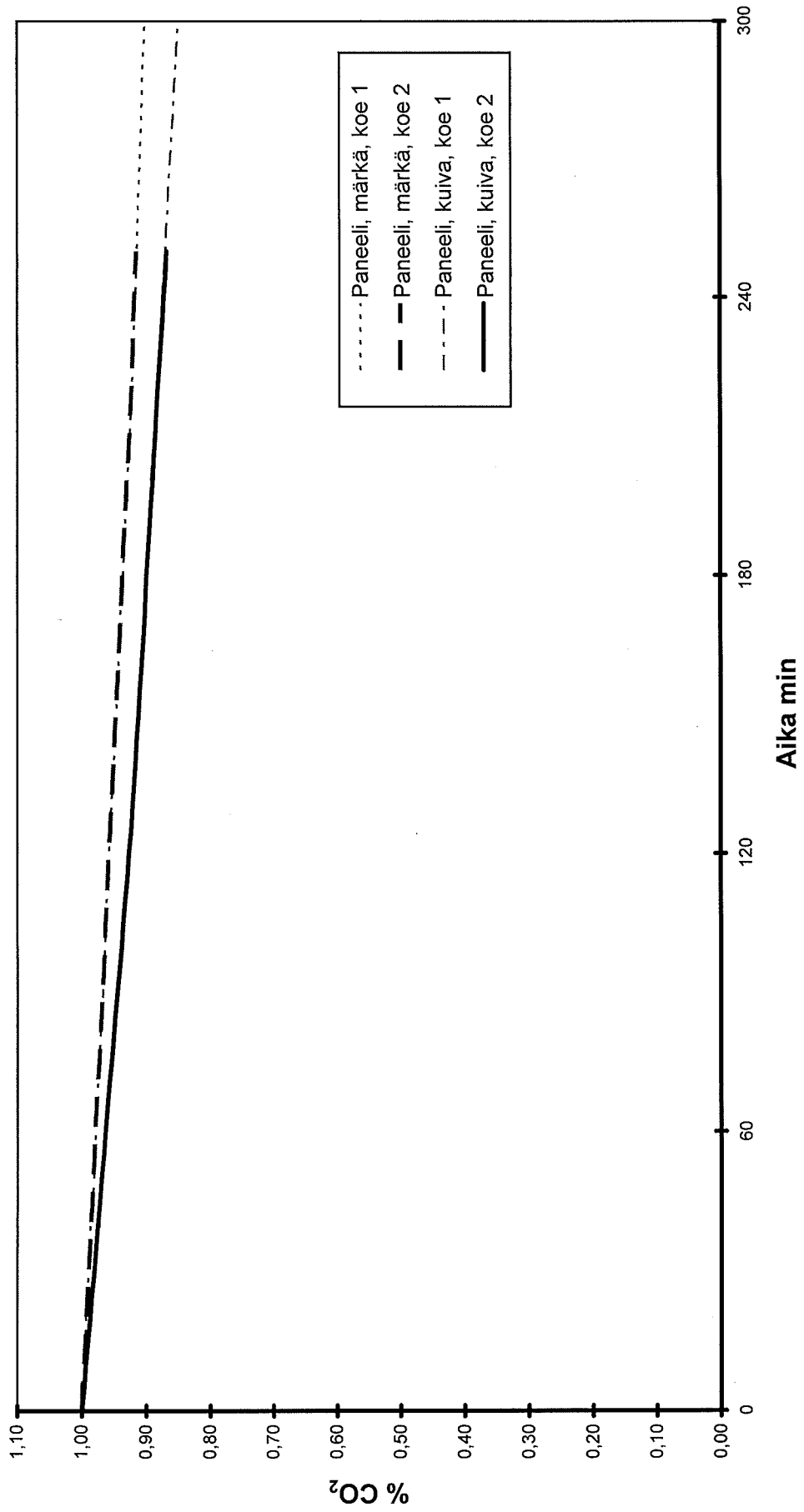
**Hiilidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella,  
Pinoitekokeet**



**Hiilidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella,  
Rakennekokeet**

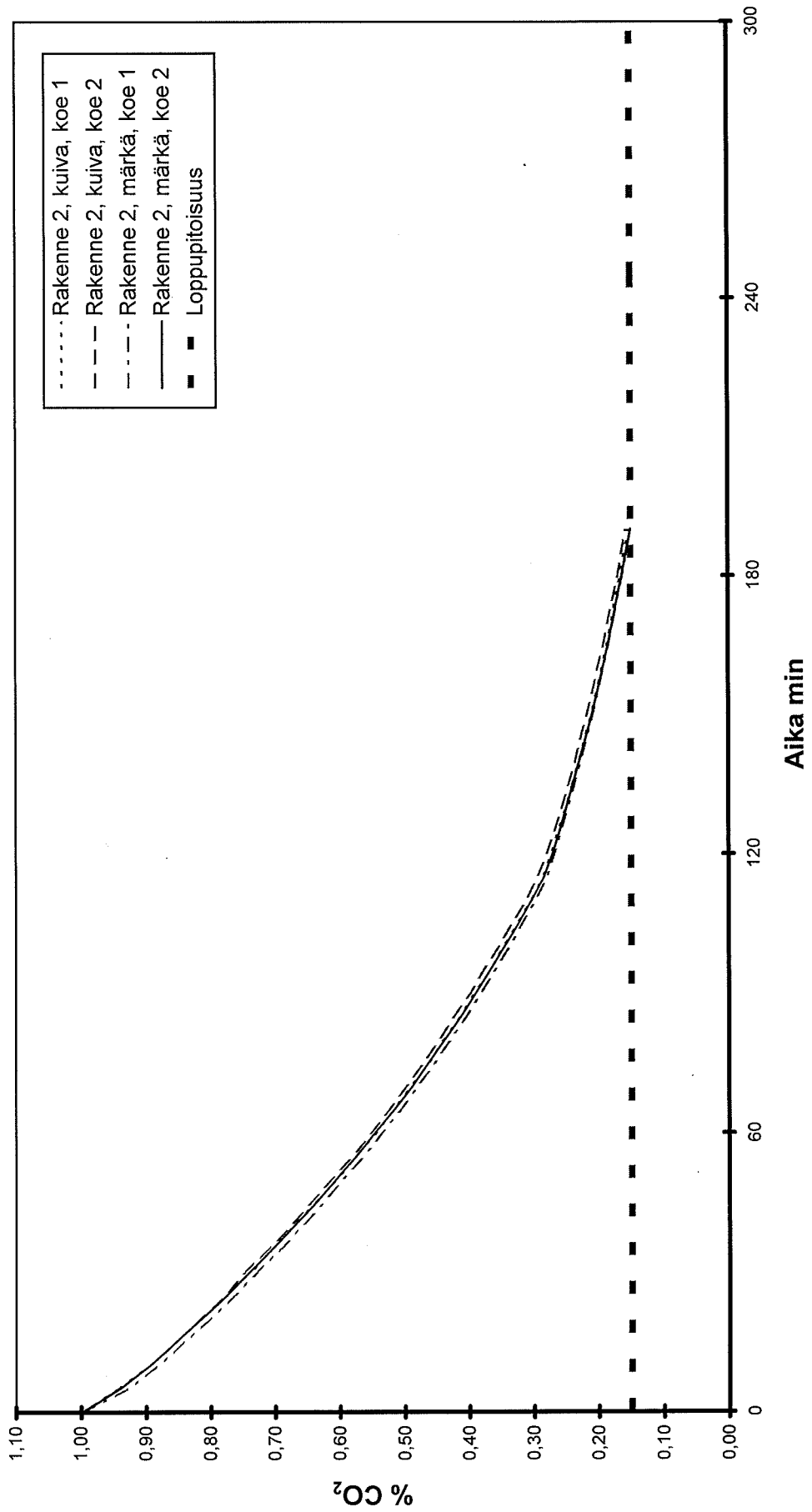


### Hiilidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella, kosteuskokeet, Sisäverhouspaneeli





### Hiiidioksidipitoisuuden aleneminen ensiöpuolella, kosteuskokeet, Rakenne 2



		Mallinusrakenne														
Ulkoilma	t=	-6: °C														
	RH	82: %														
Sisäilma	t=	20: °C														
	RH	35: %														
		Paksuus	Lämmönjoht.	m	Osuus	Lämpötila	Kyllästystkost.	Vesihöyrynläp.	Z	Osuus	Vesihöyrypit.	Kerroksen	Tiivistyvä kosteus			
		mm	W / m °C	m² °C / W	%	°C	g / m³	10E-6 m²/s	10³ s/m	%	g / m³	RH %	g/m² vko			
Sisäilma		-	-	-	-	20,0	17,28	-	-	-	6,05	35 %	-			
Sisäpinta		-	-	0,13	3,4 %	19,1	16,41	-	-	-	-	-	-			
Paperitapetti		0	0	0,00	3,4 %	19,1	16,41	-	3	11,3 %	5,65	34 %	-			
Kipsilevy		13	0,23	0,06	4,9 %	18,7	16,04	-	2,3	6 32,5 %	4,90	31 %	-			
Rakennuspaperi		0	0	0,00	4,9 %	18,7	16,04	-	5	51,2 %	4,24	26 %	-			
Puukuitueriste		150	0,045	3,33	92,6 %	-4,1	3,58	-	15	10 88,7 %	2,92	82 %	0,00			
Huokoinen kuitulevy		12	0,05	0,24	98,9 %	-5,7	3,15	-	4	3 100,0 %	2,52	80 %	-			
Ulkopinta		-	-	0,04	100,0 %	-6,0	3,08	-	-	-	-	-	-			
Ulkoilma		-	-	-	-	-6,0	3,08	-	-	-	2,52	82 %	-			
Yhteensä				3,80					27		delta v =		3,52 g/m³			
	k=			0,26												
Rakennuksen til. V=		300 m³														
Vaipan pinta-ala A=		350 m²														
		Konvektion kuljettama ilmamäärä keskimäärin														
Ilmanvuotoluku n 50 =		2: 1/h														
Paine-ero delta p=		1: Pa														
		Rakenteen läpi kulkeva kosteusmäärä, jos rakenteessa ei ole kastepistettä														
Konvektio	g=	1,22E-04	g/m² s =		0,44	g/m² h =		74	g/m² vko							
Diffuusio	g=	1,32E-04	g/m² s =		0,48	g/m² h =		80	g/m² vko							
Yhteensä	g =	2,54E-04	g/m² s =		0,92			154	g/m² vko							

## Talonrakennustekniikan julkaisuja (1990 - 1999)

- 42 Valta, M., Rakennusalan ammattitaitojen oppimisprosessi. TTKK 1990.
- 43 Pynnönen, J., Teräsrungot. Tutkimus. Runkovertailu, rungon rakenteita ja rakennustyön toteutus. TTKK 1990. 175 s.
- 44 Asp-Lehtinen, M., Tuuliniemi, V., Pentti, M., Julkisivumaaleista ja niiden kestävyydestä betonialustalla. TTKK 1990. 138 s., hinta 90,-
- 45 Keronen, A., Mastojäykistetty, matalaperustuksinen teräsbetonikehäsystemi. TTKK 1990. 156 s.
- 46 Pynnönen, J., Levanto, R., Elementtien käytöstä liittopalkkeissa. TTKK 1990. 95 s. + 10 liites.
- 47 Pynnönen, J., Toivonen, J., Betonitäyhteisten teräspalkkipilareiden palotekniset mitoitukset. TTKK 1990. 121 s. + 3 liites.
- 48 Pynnönen, J., Kärkäs, K., Teräsrunkoisen talon kevyet ulkoseinät. TTKK 1990. 89 s.
- 49 Pynnönen, J., Syrjynen, J., Siporex-laatastonsisäinen teräsbetoniliittopalkki. TTKK 1990. 125 s. + 53 liites.
- 50 Pynnönen, J., Leppänen, T., Teräsrunko monikerroksisessa toimisto- ja liikerakennuksessa. TTKK 1990. 113 s.
- 51 Pynnönen, J., Laavola, M., Kevyiden välipohjien värähtelyt. TTKK 1990. 92 s. + 31 liites.
- 52 Pynnönen, J., Suvanto, J., Teräsrakenteisen kerrostalon suunnittelun ja rakentamisen seuranta. TTKK 1990. 115 s. + 43 liites.
- 53 Pynnönen, J., Aro, J., Betonielementtiteollisuuden teräsosat. TTKK 1990. 87 s. + 4 liites.
- 54 Pynnönen, J., Sensio, K., Pultti- ja hitsausliitosten yhteistoiminta teräspalkin jatkokossa. TTKK 1991. 59 s. + 20 liites.
- 55 Inha, T., Mattila, J., Teräsrakenteiden palosuojauksen suunnittelu. TTKK 1991. 105 s.
- 56 Mehto, L., Lindberg, R., Keronen, A., Koivula, U., Lapinniemen kehräämön seuranta tutkimus: Rakenteiden tekninen toimivuus. TTKK 1991. 37 s.
- 57 Lindberg, R., Vinha, J., Myllyviita, S., Hellman, H., Beam-to-Column Connections in Story-Height Concrete Frame. TTKK 1992. 94 s. + 9 liites.
- 58 Pynnönen, J., Poukka, T., Teräsrunkoinen aravakerrostalo ja suunnitteluratkaisuvaihtoehtoja. TTKK 1992. 96 s. + 49 liites.
- 59 Tawast, I., Perustusten vahvistusmenetelmät korjausrakentamisessa. TTKK 1993. 199 s. + 11 liites., hinta 150,-
- 60 Kokko, P., Pentti, M., Ruostumattomien raudotteiden käyttö julkisivuelementeissä. TTKK 1993. 27 s.
- 61 Vinha, J., Lindberg, R., Kerrospilarirungon pilari-palkki -liitokset (Suunnitteluohje). TTKK 1994. 35 s.
- 62 Vinha, J., Lindberg, R., Mastopilari kehärakenteessa (Suunnitteluohje). TTKK 1994. 26 s. + 5 liites.
- 63 Lindberg, R., Suonketo, J., Hassinen, P., Test Report Long-Term Tests on Isora-Elements. TTKK 1994. 55 s. + 67 liites.
- 64 Laasonen, M., Betonirakenteiden analysointi elementtimenetelmällä. TTKK 1994. 72 s. + 8 liites., hinta 150,-
- 65 Kärkäs, K. Sähkömagneettisen luotauksen mahdollisuuksista rakenneaurioiden tutkimuksessa. Julkaisematon.
- 66 II Korjausrakentamisen tutkimusseminaari. TTKK 1995. 161 s.
- 67 Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R., Puukuitueristeisen seinärakenteen hengittävyys. TTKK 1996. 35 s. + 9 liites.
- 68 Majahalme, T., Modeling in Construction Technology; A Literature Review. TTKK 1996. 42 s. + 2 liites.
- 69 Keronen, A., Effect of Semi-rigid Connections in RC Portal Frame: Load Tests. TTKK 1996. 94 s. + 6 liites.
- 70 Puska, A., Korjausrakentamisen valvonta. TTKK 1996. 68 s. + 32 liites.
- 71 Wahlman, J., Betonijulkisivujen säilyvyys ja korjaaminen - aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. TTKK 1997. 143 s. + 47 liites., hinta 180,-
- 72 Inha, T., Iso-Mustajärvi, P., Teräsrakenteiden palosuojaus. TTKK 1997. 71 s.
- 73 Huttunen, I., Pentti, M., Julkisivukorjaushankkeen laadunvarmistus. TTKK 1997. 30 s. + 39 liites.
- 74 Huttunen, I., Pentti, M., Vesikattokorjaushankkeen laadunvarmistus. TTKK 1997. 26 s. + 27 liites.
- 75 Leivo, V. (toim.), Koulujen kosteus- ja homeauriokorjaukset. Kokemuksia Ylöjärven kunnasta. TTKK 1997. 83 s. + 6 liites.

- 76 Berg, P., Rätty, H., Rakentamisen ympäristöteknologiaohjelman väliarvio. TTKK 1997. 51 s. + 23 liites.
- 77 Keronen, A., Kylliäinen, M., Sound Insulating Structures of Beam-to-Column Framed Wooden Apartment Buildings. TTKK 1997. 23 s. + 44 liites., hinta 200,-
- 78 Koski, T., Lindberg, R., Vinha, J., Lisäeristettyjen hirsiseiniäen kosteustekninen kunto. TTKK 1997. 107 s. + 51 liites.
- 79 Hietala, J., Keränen, H., Pentti, M., Betonisandwich-ulkoseinän muodonmuutokset ja halkeilu. TTKK 1997. 48 s. + 6 liites.
- 80 Berg, P., Malinen, P., Appraisal for The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries - Rapid Programme. TTKK 1997. 69 s. + 56 liites.
- 81 Berg, P., Puurakentamisen teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1997 - 1998 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1997. 57 s. + 32 liites.
- 82 Berg, P., Appraisal of The Wood in Construction Technology Programme. TTKK 1997. 37 s. + 35 liites.
- 83 Lahdensivu, J., Viljakainen, M., Avoin puurakentamisjärjestelmä, esiselvitys. TTKK 1998. 35 s. + 19 liites.
- 84 Pihlajamaa, J., Berg, P., Puurakentamisen teknologiaohjelman väliarvio. Puurakentamisen teknologiaohjelman loppujakson toimenpiteiden määrittäminen. TTKK 1998. 67 s. + 45 liites.
- 85 Keronen, A., (toim.), Puukerrostalo: Rakenteet. TTKK 1998. 105 s.
- 86 Berg, P., Rätty, H., Appraisal of The Environmental Technology in Construction Technology Programme. TTKK 1998. 37 s. + 23 liites.
- 87 Pentti M., Mattila, J., Wahlman, J., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa I rakenteet, vauriot ja kunnan tutkiminen. 156 s. TTKK 1998. 250,-
- 88 Osa II (valmistumassa)
- 89 Pentti, M., Huttunen, I., Vepsäläinen, K., Olenius, K., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa III Korjaushanke. TTKK 1998. 124 s. + 23 liites. 250,-
- 90 Lindberg, R., Keränen, H., Teikari, M., Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. TTKK 1998. 34 s. + 26 liites.
- 91 Berg, P., Salminen, K., Leivo, V., Nopeat tuotantjärjestelmät teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1998-2000 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1998. 55 s. + 37 liites.
- 92 Berg, P., Malinen, P., Leivo, V., Internal Monitoring of The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries - Rapid Programme. TTKK 1998. 81 s. + 93 liites.
- 93 Lepo, K., Laatujaerjestelmän kelpoisuus. TTKK 1998. 101 s. + 50 liites.
- 94 Pentti, M., Hyypöläinen, T., Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. TTKK 1999. 150 s. + 40 liites. 250,-
- 95 Leivo, V. (toim.), Opas kosteusongelmiin - rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma. TTKK 1998. 157 s. 150,-
- 96 Vinha, J., Käkelä, P., Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. TTKK 1999. 81 s. + 29 liites. 200,-
- 97 Kylliäinen, M., Keronen, A., Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuinkeerostaloissa. TTKK 1999. 59 s. + 37 liites. 200,-
- 98 Mattila, J., Peuhkurinen, T., Lähiökeerostalon lisärakentamishankkeen tekninen esiselvitysmenettely. Korjaus- ja LVIS-tekninen osuus. TTKK 1999. 48 s.
- 99 Torikka, K., Hyypöläinen, T., Mattila, J., Lindberg, R., Kosteusvauriokorjausten laadunvarmistus. TTKK 1999.

Julkaisun hinta: 120,- + alv 8 %, ellei toisin ole mainittu. Oikeus hinnannmuutoksiin pidätetään.  
 Myynti: Tietokirjakauppa Juvenes/Julkaisumyynti, PL 527, 33101 Tampere,  
 puh. (03) 365 2351, telefax (03) 365 2191



**TALONRAKENNUS-  
 TEKNIikka**  
**TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU**  
 Korkeakoulunkatu 3, PL 600, 33101 Tampere  
 Puh. (03) 365 4804, Telefax (03) 365 2811