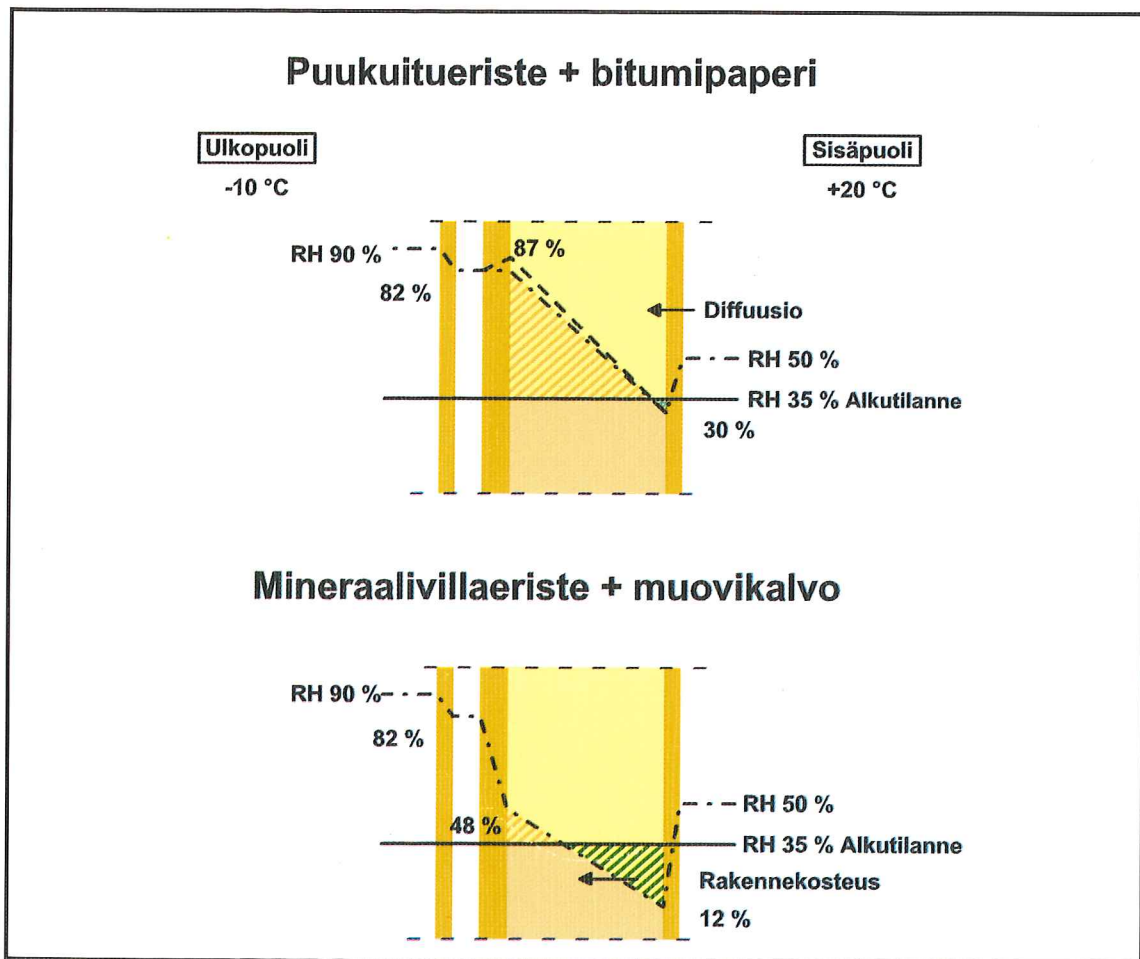
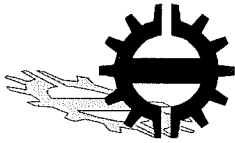


Juha Vinha - Pasi Käkälä

VESIHÖYRYN SIIRTYMINEN SEINÄRAKENTEISSA DIFFUUSION JA KONVEKTION VAIKUTUKSESTA





TAMPEREEN
TEKNILLINEN
KORKEAKOULU

JULKAISU 96
TALONRAKENNUSTEKNIikka

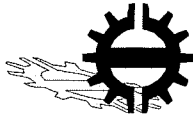
Juha Vinha - Pasi Käkälä

**VESIHÖYRYN SIIRTYMINEN SEINÄRAKENTEISSA
DIFFUUSION JA KONVEKTION VAIKUTUKSESTA**

Kolmas uudistettu painos

Rakennustekniikan osasto
Tampere 2001

UDK 699.82
692.2
ISBN 952-15-0340-8
ISSN 1237-1483



Vinha Juha, Käkelä Pasi

VESIHÖYRYN SIIRTYMINEN SEINÄRAKENTEISSA DIFFUUSION JA KONVEKTION VAIKUTUKSESTA

Julkaisu 96, 81 sivua + 29 liitesivua, 3. uudistettu painos

Syyskuu 2000

Hakusanat: rakennusfysiikka, koelaitteisto, laboratoriokokeet, mittaus- ja säätöjärjestelmä, diffuusio, konvektio, paine-ero, kondensoituminen, puurankaseinät, höyrynsulku, ilmansulku, mineraalivilla, puukuitueriste

TIIVISTELMÄ

TTKK:n talonrakennustekniikan laboratorioon on rakennettu uusi rakennusfysiikallinen tutkimuslaitteisto, jonka avulla voidaan selvittää vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa eri olosuhteissa. Laitteisto on kehitetty aikaisemmin tehdyn lämmönläpäisyilmeistön pohjalta ja sen kehitystyö on kestänyt kokonaisuudessaan n. 4 vuotta.

Uusi tutkimuslaitteisto koostuu lämpimästä ja kylmästä kammioista, joiden väliin tutkittava rakenne asetetaan. Lämpimässä kammiossa mallinnetaan sisäilman olosuhteita ja kylmässä kammiossa ulkoilman olosuhteita. Laitteistossa on suuri joukko erilaisia mittaus- ja säätölaitteita, joita ohjataan automaattisesti tietokoneen avulla. Tarkka ja nopea olosuhteiden säätö edellyttää tehokasta ohjausohjelmaa, joka hakee eri tekijöiden tasapainotilaa koko ajan.

Kokeissa säädettävänä suureina ovat sisä- ja ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus (RH) sekä paine-ero tutkittavan rakenteen yli. Kokeita voidaan tehdä joko vakioolosuhteissa tai muuttuvissa olosuhteissa.

Rakennusfysiikallisessa tutkimuslaitteistossa on monia ominaisuuksia, jotka yhdessä tekevät siitä uudentyyppisen ja monipuolisen koelaitteiston. Näitä ominaisuuksia ovat mm.:

- kokeessa hallitaan kaikkia sisä- ja ulkoilman olosuhteita yhtä aikaa
- rakenteita voidaan testata todellista tilannetta vastaavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa (esim. ulkoilman RH voidaan säätää todellista vastaavaksi myös pakkasen puolella)
- kaikki säädettävät olosuhtearvot voidaan asettaa vapaasti säätöalueen sisällä
- kaikki mittaukset ja säädöt tapahtuvat automaattisesti, tarkasti ja nopeasti tietokoneen avulla
- kokeessa voidaan mitata rakenteeseen diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvät kosteusvirrat erikseen
- rakenteita voidaan mitata vakio-olosuhteissa tai olosuhteita voidaan vaihdella syklisti
- laitteiston tiiviiden ja elementtien asennustekniikan ansiosta ilman virtaus tapahtuu tutkittavan rakenteen läpi hallitusti
- tutkimusaukon koko on suuri (pinta-ala $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$ ja syvyys 400 mm), jolloin koerakenteessa tapahtuu samat ilmiöt kuin todellisissa rakenteissakin (esim. rakenteen sisäinen konvektio)
- laitteiston säätö- ja mittausjärjestelmiä voidaan lisätä ja vaihtaa tarpeen mukaan
- laitteistoa voidaan tarvittaessa kääntää, jolloin seinä-, ylä- ja alapohjarakenteet voidaan testata oikeassa asennossa
- laitteiston rakentamisen yhteydessä kehitettyjä säätö- ja mittausjärjestelmiä voidaan käyttää muidenkin laboratoriotutkimusten koejärjestelyissä

Uudella tutkimuslaitteistolla selvitettiin vesihöyryn siirtymistä puurunkoisissa ulkoseinä-rakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tehtyjen kokeiden perusteella saatiin seuraavat koetulokset:

Diffuusion vaikutus

1. Kaikki seinärakenteet toimivat diffuusion kannalta turvallisesti, jos
 - sisäilman kosteuslisä on pieni ja
 - rakenteeseen ei pääse vettä kosteusvuotojen seurauksena
2. Kosteutta läpäisevä rakenne on selvästi riskialttiimpi kondensoitumisen kannalta kuin höyrynsulullinen rakenne.
 - Seinän sisäpinnassa on oltava riittävä vesihöyrynvastus (5:1 -säätö).
3. Jos seinän sisäpinnassa on riittävä ilman- ja höyrynsulku, eristeenä voidaan käyttää sekä puukuitueristettä että mineraalivillaa.
4. Puupohjaisten materiaalien kosteudensitomiskapasiteetti siirtää kondensoitumisen alkamista, mutta ei aina riitä estämään kondenssin syntymistä.
5. Materiaaleihin sitoutunut ylimääräinen kosteus lisää kondensoitumisriskiä. Puupohjaisilla materiaaleilla riski on suuri, koska niihin voi sitoutua paljon kosteutta.
6. Seinän ulkopinnassa on oltava riittävän hyvin vesihöyryä läpäisevä tuulensuojalevy, jotta seinässä oleva ylimääräinen kosteus voi poistua. Tuulensuojalevyn ulkopuolella on myös oltava toimiva tuuletusrako.

Konvektion vaikutus

1. Kaikki seinärakenteet toimivat konvektion kannalta turvallisesti, jos
 - rakennuksessa on alipaine tai
 - rakenteessa on ehjä ilmansulkukerros
2. Sisällä oleva alipaine ei alenna reiällisen seinän kosteuspitoisuuksia merkittävästi paine-erottomaan tilanteeseen verrattuna. Alipaine varmistaa kuitenkin sen, että rakennukseen ei synny ylipainetta.
3. Sisällä oleva ylipaine nostaa reiällisen seinärakenteen tasapainokosteuksia ja lisää rakenteen kondensoitumis- ja homehtumisriskiä.
4. Kosteutta läpäisevässä seinärakenteessa kondensoituminen on mahdollista paine-erosta riippumatta (diffuusio).
5. Höyrynsulullisessa seinärakenteessa kondenssiriski on ainoastaan silloin, jos ylipainetilanteessa rakenteessa on reikiä, jotka ulottuvat koko sisäpinnan läpi.
6. Puukuitueristeen käyttö hidastaa RH –prosenttien nousua ylipainetilanteessa reiki-en kohdalla, mutta lopulta rakenteen kosteusprosentit vastaavat mineraalivillaseinän arvoja.
7. Reikien ollessa pelkästään ilman-/ höyrynsulun läpi rakenteen RH- prosentit eivät muutu paine-eron vaikutuksesta. Tämä koskee myös sisälevyn kiinnitystä runkopuuhun ilman-/ höyrynsulun läpi.
8. Sisälevyissä ja ilman-/ höyrynsulussa olevat saumat runkopuun kohdalla eivät vaikuta seinärakenteen RH –prosentteihin yli- ja alipainetilanteissa. Ilman-/ höyrynsulun saumaan riittää 200 mm limitys. Saumakohtien teippaus on aina suositeltavaa, mutta runkopuun kohdalla se ei ole välttämätöntä.

Muut koetulokset

1. Laskennallinen diffuusiotarkastelu eroaa todellisesta tilanteesta sitä enemmän mitä läpäisevämpi seinärakenne on.
 - Kosteutta läpäisevän rakenteen kosteustekninen mitoitus on vaikeaa.
2. Läpäisevä seinärakenne ei kykene tasaamaan sisäilman kosteutta talviaikaan.
3. Ylipaine nostaa lämpötiloja huomattavasti tuulensuojalevyn sisäpinnassa niissä rakenteissa, joissa reiät ulottuvat koko sisäpinnan läpi.
4. Ulkoverhous nostaa tuuletusvälin lämpötilaa ulkoilmaan verrattuna, jolloin rakenteen RH –prosentit alenevat tuulensuojalevyn sisäpinnassa tiiviillä rakenteilla.
5. Talviolosuhteissa seinärakenteissa ei yleensä esiinny homeen kasvulle otollisia lämpötila- ja RH –olosuhteita.

Alkusanat

Tämän tutkimusprojektin haasteet ovat olleet suuret, sillä sen tavoitteeksi asetettiin uudenlaisen tutkimuslaitteiston rakentaminen vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan selvittämiseksi. Laitteiston rakentaminen on edellyttänyt paljon innovatiivisuutta, aktiivisuutta ja pitkäjänteistä kehitystyötä eri osatekijöiden yhteensovittamisessa.

Tutkimus alkoi 1.1.1996 ja päättyi 31.12.1998. Tästä ajanjaksosta uuden tutkimuslaitteiston suunnittelu, rakentaminen ja testaus veivät aikaa n. 2 vuotta ja viimeinen vuosi käytettiin erilaisten seinärakenteiden tutkimiseen. Laitteiston toiminta perustuu jo aikaisemmin rakennettuun lämmönläpäisyilma- ja lämmönvaihtolaitteistoon (CHB), joten kokonaisuudessaan rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto on n. 4 vuoden kehitystyön tulos.

Tutkimus on tehty TTKK:lla prof. Ralf Lindbergin ja tekn. lis. Juha Vinhan johdolla. Juha Vinha on toiminut tutkimusryhmän vetäjänä ja ohjaajana. Hän on myös pääosin suunnitellut uuden tutkimuslaitteiston sekä laitteistolla tehdyt rakennusfysikaaliset kokeet. Tutkimusryhmään kuuluivat dipl.ins. Timo Niemelä, joka on rakentanut laitteiston lämpimän kammion ja suojakammion, dipl.ins. Pasi Käkelä, joka on toteuttanut laitteistolla tehdyt rakennusfysikaaliset kokeet ja niiden dokumentoinnin sekä dipl.ins. Pekka Viitala, joka on tehnyt laitteiston ohjausohjelman. Timo Niemelä ja Pasi Käkelä ovat olleet mukana myös suunnittelemassa ja rakentamassa laitteiston mittaus- ja säätöjärjestelmiä. Laitteiston sähköjärjestelmiä ovat lisäksi suunnitelleet ja rakentaneet mm. lab.ins. Kauko Sahi ja lab.tekn. Kari Häyrinen. Laitteiston kehitystyöhön on saatu apua myös monilta muilta henkilöiltä.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat:

<i>Vaito Rossi</i>	Schauman Wood Oy, pj.
<i>Juha Ryyppö</i>	Isover Oy
<i>Jouko Kujala</i>	Turun Rakennustuote Oy
<i>Pekka Peura</i>	TEKES, Suomen Puututkimus Oy
<i>Lasse Pöyhönen</i>	TEKES
<i>Outi Palttala-Heiskala</i>	TTKK, Arkkitehtuuri
<i>Ralf Lindberg</i>	TTKK, Talonrakennustekniikka

Tutkimus kuuluu osana TEKES:n puurakentamisen teknologiaohjelmassa toteutettuihin rakennusfysiikkaa käsitteleviin tutkimuksiin. TEKES:n lisäksi tutkimuksen rahoittajina ovat olleet Isover Oy, Turun Rakennustuote Oy ja Suomen Puututkimus Oy. Kiitämme johtoryhmän jäseniä ja tutkimuksen rahoittajia yhteistyöstä tutkimuksen aikana.

Tampereella 30.3.1999

Juha Vinha

Pasi Käkelä

Toisen painoksen alkusanat

Julkaisu on ollut niin kysytty, että siitä on jo näin pian tarpeellista ottaa uusi painos. Julkaisuun ei ole tehty suuria muutoksia. Joihinkin kohtiin on laitettu tarkennuksia ja lisäyksiä sekä samalla korjattu havaitut painovirheet.

Toinen painos julkaistaan samalla julkaisunumerolla 96, kuin ensimmäinenkin painos. Julkaisun toisesta painoksesta on tehty myös englanninkielinen käännös. Tämän julkaisun numero on 103 ja nimi on "Water Vapour Transmission in Wall Structures due to Diffusion and Convection".

Tampereella 20.12.1999

Juha Vinha

Pasi Käkelä

Kolmannen painoksen alkusanat

Julkaisun kirjoitusasua on edelleen tarkistettu kolmannessa painoksessa, ja samalla on korjattu muutamat mittaus- ja laskentatuloksissa havaitut virheet. Kolmas painos julkaistaan edelleen julkaisunumerolla 96.

Tampereella 9.2.2001

Juha Vinha

Pasi Käkelä

Sisällysluettelo

Merkinnät.....	8
Käsitteet ja määritelmät.....	10
1 Johdanto.....	14
1.1 Tausta	14
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	15
2 TTKK:n rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto.....	16
2.1 Laitteiston toimintaperiaate.....	16
2.2 Laitteiston osat	17
2.3 Olosuhteiden mittaaminen.....	22
2.4 Olosuhteiden säätäminen.....	25
2.5 Ohjausohjelma	28
2.6 Kokeista saatavat mittaus- ja laskenta-arvot.....	31
2.7 Laitteiston kalibrointi ja mittausepävarmuus.....	35
2.8 Laitteiston ominaisuudet.....	37
3 Laitteistolla tehdyt kokeet	39
3.1 Koe-elementtien rakentaminen	39
3.2 Mittausanturien sijainti.....	40
3.3 Koe-elementin asennus	41
3.4 Koeolosuhteet	42
3.5 Rakennäytteen ottaminen ja visuaaliset havainnot	43
3.6 Tutkitut seinärakenteet	44
4 Koetulokset.....	46
4.1 Diffuusion ja rakennekosteuden vaikutus	46
4.2 Konvektion vaikutus.....	53
4.3 Diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvän kosteuden vertailu	57
4.4 Laskennallisen tarkastelun ja koetulosten vertailu.....	60
4.5 Lämpäisevän seinärakenteen vaikutus sisäilman kosteuteen.....	62
4.6 Rakenteen lämpötilakentän muutos paine-eron vaikutuksesta	63

5 Koetulosten tarkastelu ja johtopäätökset	64
5.1 Diffuusion ja rakennekosteuden vaikutus	64
5.2 Konvektion vaikutus	67
5.3 Seinärakenteiden kondensoitumisriskin vertailu.....	68
5.4 Diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvän kosteuden vertailu	69
5.5 Laskennallisen tarkastelun ja koetulosten vertailu.....	70
5.6 Läpäisevän seinärakenteen vaikutus sisäilman kosteuteen talvella	70
5.7 Rakenteen lämpötilakentän muutos paine-eron vaikutuksesta.....	70
5.8 Tuuletusraon vaikutus seinärakenteen toimintaan.....	71
5.9 Seinärakenteiden homehtumisriski	71
6 Johtopäätökset rakenteiden kosteusteknistä suunnittelua varten	72
6.1 Kosteuskuormat	72
6.2 Materiaaliominaisuudet.....	73
6.3 Kosteuden siirtymistä kuvaavat laskentamallit.....	73
7 Yhteenveto.....	76
Lähdeluettelo.....	79
Liiteluettelo	81

Merkinnät

A	pinta-ala	m^2
G	kosteusvirta	kg/s, g/vrk
K	ilmanläpäisykerroin	$m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$, m/s·Pa
P	lämmitysteho	W
R	ilman tilavuusvirta	m^3/s , l/min
T	lämpötila	$^{\circ}C$
U	jännite	V
U	lämmönläpäisykerroin	$W/m^2 \cdot K$
W_p	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyryn osapaine-eron avulla laskettu)	$kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$
W_v	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyrypitoisuuseron avulla laskettu)	m/s
Z_p	vesihöyrynvastus (vesihöyryn osapaine-eron avulla laskettu)	$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$
Z_v	vesihöyrynvastus (vesihöyrypitoisuuseron avulla laskettu)	s/m
a	apusuure	
b	vakiotermi	
d	paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	$kg/m^2 \cdot s$, $g/m^2 \cdot vrk$
k	kerroin	
m	massa	kg, g
Δp	paine-ero	Pa
q	lämpövirran tiheys	W/m^2
r	ilmavirran tiheys	$m^3/(m^2 \cdot s)$, $l/m^2 \cdot min$
r	ilmavirran nopeus	m/s
t	aika	s
u	suure	
u	kosteuspitoisuus	paino- %
x	matka	m
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaine-eron avulla laskettu)	$kg/m \cdot s \cdot Pa$
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrypitoisuuseron avulla laskettu)	m^2/s
Φ	lämpövirta	W
ϕ	ilman suhteellinen kosteus (RH)	%
v	ilman vesihöyrypitoisuus	kg/m^3 , g/m^3
λ	lämmönjohtavuus	$W/m \cdot K$
ℓ	ilmanläpäisevyys	$m^3/(m \cdot s \cdot Pa)$, $m^2/s \cdot Pa$

Yleisimmät alaindeksit

dif	diffuusio
h	häviö (lämmin kammio)
kok	kokonais
konv	konvektio
lask	laskennallinen
mit	mitattu
nop	nopeus
rak	rakenne
p	vesihöyryn osapaine
s	sisä
sp	sisäpinta
u	ulko
up	ulkopinta
v	vesihöyrypitoisuus

Käsitteet ja määritelmät

Alipaine	Kun tietyn ilmatilan absoluuttinen paine on pienempi kuin ympäröivä ilmanpaine, tilassa vallitsee alipaine. TTKK:n koelaitteistossa alipainetilanne tarkoittaa sitä, että lämpimän kammion sisällä ilmanpaine on pienempi kuin suojakammiossa. Alipaine saadaan aikaan imemällä lämpimästä kammioista ilmaa. Alipaineen etumerkki on -.
Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiosta kaasun siirtyä korkeammasta pitoisuudesta alempaan pitoisuuteen.
Hygroskooppinen tasapainokosteus	Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, joka stationääritilassa sitoutuu huokoiseen aineeseen ympäristön tietyssä suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa.
Hygroskooppisuus	Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Höyrinsulku	Höyrinsulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää vesihöyryn haitallinen diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa. Höyrinsulun vesihöyrynläpäisevyys on pieni.
Ilmanläpäisevyys	Ilmanläpäisevyys (ℓ) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmanläpäisykerroin	Ilmanläpäisykerroin (K) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.

Ilmansulku	Ilmansulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi. Ilmansulun ilmanläpäisevyys on pieni.
Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteissa vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa kyllästyskosteuden ($RH = 100\%$). Kondensoitumista tapahtuu yleensä materiaalikerrosten rajapinnoissa.
Konvektio	Konvektio syntyy, kun kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Vesihöyry siirtyy konvektiolla virtaavan ilman mukana.
Kyllästyskosteus	Kyllästyskosteus ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin (U) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Läpäisevä rakenne	Läpäisevässä rakenteessa on ehjä ilmansulku, mutta ei höyrinsulkua.
Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus (ϕ , RH) ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa.
Stationääritila	Stationääritilassa (= jatkuvuustila) olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.

Tiivis rakenne	Tiiviissä rakenteessa on ehjä ilmansulku ja riittävän tiivis höyrynsulku.
Tuulensuoja	Tuulensuoja on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää tuulen aiheuttama haitallinen ilmavirtaus rakenteen lämmöneristekerroksessa. Tuulensuojamateriaalin tulee olla hyvin vesihöyryä läpäisevä.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Kosteus voi siirtyä materiaalissa muissakin olomuodoissa kuin vesihöyrynä, jolloin voidaan puhua myös materiaalin kosteudenläpäisevyydestä.
Vesihöyrynläpäisykerroin	Vesihöyrynläpäisykerroin (W_v tai W_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastuksella (Z_v tai Z_p) tarkoitetaan vesihöyrynläpäisykerroimen käänteisarvoa. Tarkkaan ottaen vain vesihöyrynläpäisykerroimessa on mukana rajapintojen aineensiirtokerroimien vaikutus, mutta niiden osuus on käytännössä merkityksetön. Yksittäisen ainekerroksen vesihöyrynvastus lasketaan kaavalla $Z = d/\delta$.
Vesihöyrypitoisuus	Vesihöyrypitoisuus (v) ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän. Vesihöyrypitoisuuksien ero pyrkii tasoittumaan diffuusion avulla.
Ylipaine	Kun tietyn ilmatilan absoluuttinen paine on suurempi kuin ympäröivä ilmanpaine, tilassa vallitsee ylipaine. TTKK:n koelaitteistossa ylipainetilanne tarkoittaa sitä, että lämpimän kammion sisällä ilmanpaine on suurempi kuin suojakammiossa. Ylipaine saadaan aikaan pumppaamalla lämpimään kammioon ilmaa. Ylipaineen etumerkki on +.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Ulkovaipan rakenteiden kosteusteknistä toimintaa on haluttu selvittää siitä lähtien, kun aikaisemmin käytössä olleista massiivirakenteista siirryttiin lämpöeristettyihin kerroksellisiin rakenteisiin ja samalla rakennusten sisällä veden käyttö kasvoi voimakkaasti. Kuluneiden vuosien aikana käsitykset oikeaoppisista rakenteista ovat vaihdelleet ja jatkuvasti on vallalla täysin ristiriitaisia mielipiteitä eri rakennevaihtoehtojen toimivuudesta. Yhtenä syynä tähän on ollut luotettavan tutkimustiedon puute rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta.

Suurin osa rakenteiden kosteusvaurioista syntyy juoksevan veden tai maaperän kosteuden aiheuttamana (sadevesi, valumavesi, kapillaarisesti siirtyvä kosteus, putkivuodot, pesuvedet). Juoksevan veden poistamiseksi rakenteista on vain kaksi mahdollisuutta; asettaa rakenteen pintaan tiivis kosteussulku tai poistaa kosteuslähde rakenteesta tai sen läheltä. Tältä osin rakenneratkaisut ovat selvät, mutta syystä tai toisesta rakenteita on toteutettu jatkuvasti väärällä tavalla. Voidaan kuitenkin todeta, että rakenteiden suojaaminen kosteudelta koko rakennuksen elinkaaren ajan on hyvin vaikeaa. Siksi hyvän rakenteen ominaisuuksiin kuuluu myös nopea kuivuminen, jota voidaan edesauttaa rakenteiden suunnittelulla ja materiaalien valinnalla. Kuivumisen osalta myös tutkimustietoa kaivataan lisää.

Vesihöyryn käyttäytymisestä rakenteissa on ollut paljon enemmän epä tietoisuutta. Monet ratkaisut ovat joissakin tapauksissa toimineet hyvin, mutta samoista rakenteista on olemassa myös vastakkaisia kokemuksia. Jokin olosuhdetekijä on ollut siis erilainen ja aiheuttanut toisissa tapauksissa rakenteisiin kosteusvaurioita. Ulkovaipan rakenneratkaisuja on pyritty parantamaan monin tavoin, mutta kokemus on osoittanut niiden olleen usein virheellisiä tai puutteellisia. Viime vuosina nämä epäonnistumiset ovat tulleet yhä enenevässä määrin myös julkisuuteen.

On selvää, että joissakin olosuhteissa, kuten sisäilman kosteuslisän ollessa pieni tai ulkoilman olosuhteiden edistäessä kuivumista (tuuli, lämpötila, auringon säteily), kaikki rakenteet toimivat vesihöyryn siirtymisen kannalta moitteettomasti. Eri asia on, miten rakenteet toimivat kosteusrasituksen kasvaessa. Rakenneratkaisuissa on yksilöllisiä eroja ja ne tulee selvittää ennen kuin uusia rakenteita voidaan ottaa käyttöön. Rakenteiden luotettavaan tutkimukseen onkin kaivattu pikaisesti uusia tutkimusmenetelmiä.

Vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan tutkiminen on ollut aikaisemmin ongelmallista, koska eri tutkimusmenetelmät eivät ole antaneet luotettavaa kokonaiskuvaa rakenteen käyttäytymisestä eri tilanteissa. Kenttäkokeilla voidaan selvittää vain yksittäisten rakennusten käyttäytymistä ja tutkimustuloksiin vaikuttavien osatekijöiden keskinäinen merkitys jää usein epäselväksi. Laskennallisessa tarkastelussa on ongelmana valita eri materiaalien ominaisuudet ja olosuhdetekijät oikein sekä mallintaa rakenteet vastaamaan todellista tilannetta. Teoria ja käytäntö saattavat poiketa huomattavasti toisistaan johtuen eri osatekijöiden suuresta määrästä. Laboratoriokokeissa taas ei ole kyetty säätämään kaikkia luonnossa vaikuttavia olosuhdetekijöitä samanaikaisesti ja toisistaan riippumatta. Kokeita on tehty etupäässä lämpötilan ollessa yli 0 °C. Kuitenkin rakenteiden ja materiaalien toiminta muuttuu oleellisesti ulkoilman lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa uusi laboratorioelaitteisto, jolla voidaan tutkia vaipparakenteita halutuissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa ja säätää olosuhteita vapaasti. Tavoitteena oli lisäksi tehdä uudella laitteistolla kokeita eri tyyppisillä puurunkoisilla seinärakenteilla.

Kehitystyön yhtenä tärkeänä lähtökohtana oli myös se, että yrityksillä on jatkossa mahdollisuus testata valmistamiaan rakenteita ja materiaaleja ja varmistua niiden kosteusteknisestä toiminnasta eri olosuhteissa.

Koelaitteiston rakentamiselle oli TTKK:ssa hyvät edellytykset, koska tutkimusryhmän jäsenillä oli laaja kokemus laboratoriolaitteiden rakentamisesta. Hyvä pohja kehitystyölle saatiin aikaisemmin rakennetusta kalibroitavasta lämmönläpäisylaitteistosta (CHB), jota käytetään rakenteiden lämmönläpäisykertoimien (U -arvo) ja materiaalien lämmönjohtavuuksien määrittämiseen (λ -arvo). Tähän laitteistoon oli rakennettu jo tarkka lämpötilojen mittaus- ja säätöjärjestelmä. Tarkka lämpötilan säätö oli myös ensiarvoisen tärkeää muiden olosuhteiden säädön hallitsemiseksi, koska sekä suhteellinen kosteus että paine ovat lämpötilasta riippuvia suureita.

2 TTKK:n rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto

2.1 Laitteiston toimintaperiaate

Rakennusfysikaalisessa olosuhdekokeessa säädetään tutkittavan rakenteen eri puolille halutut sisä- ja ulkoilman olosuhteet. Säädetävinä suureina ovat lämpötila, ilman suhteellinen kosteus (RH) ja paine-ero tutkittavan rakenteen yli. Kokeita voidaan tehdä joko vakio-olosuhteissa tai muuttuvissa olosuhteissa. Vakio-olosuhdekokeessa seurataan tutkittavan rakenteen käyttäytymistä stationääritilanteessa. Muuttuvissa olosuhteissa tehtävässä kokeessa vaihdellaan jotakin tai joitakin olosuhdetekijöitä tietyin väliajoin. Syklin avulla voidaan mallintaa esim. ilmanvaihdon, vuorokauden ja vuodenajan vaihteluita koeolosuhteissa. Tyypillisimmät säädetävät suureet ovat tällöin paine-ero ja ulkolämpötila.

Ennen kokeen alkua laitteiston ohjausohjelman syötetiedostoihin annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä, kanavista, mitattavista suureista, mittausanturien kalibrointikertoimista, koeolosuhteista, tutkittavan koe-elementin ominaisuuksista sekä kokeen aikana seurattavista mittausarvoista.

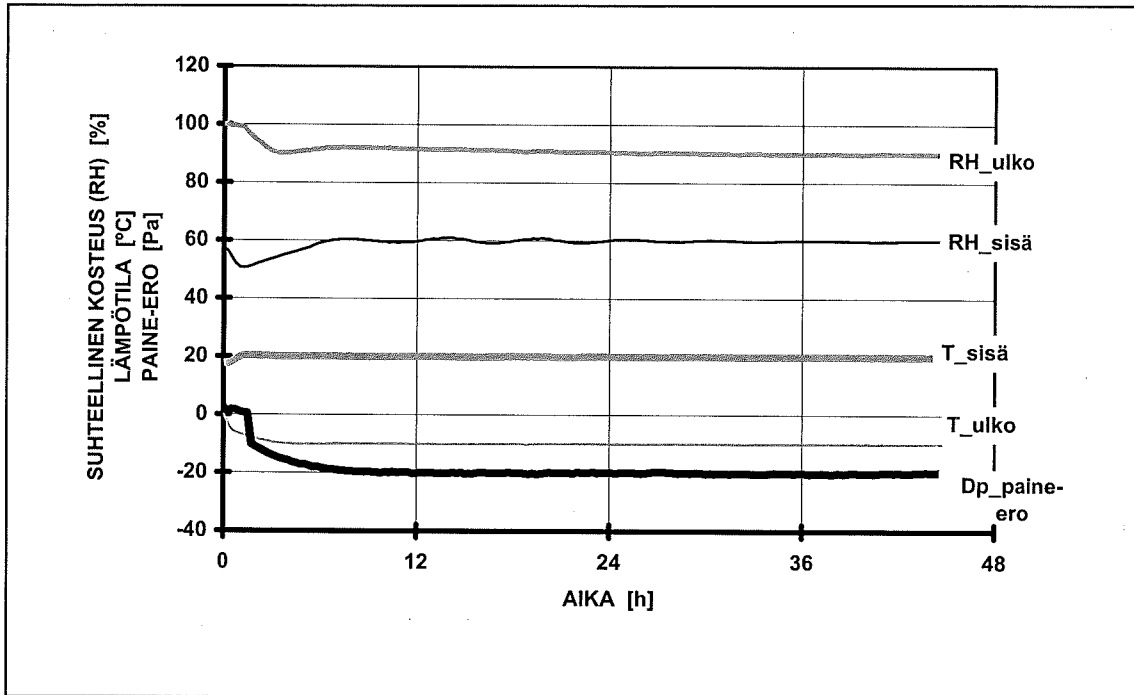
Kokeen aikana tietokone käy säännöllisesti läpi saman mittaus- ja säätöprosessin. Mittaus- ja säätöprosessin aikana mitataan jännitearvot kaikilta n. 100 mittauskanavalta minuutin välein. Tämän jälkeen saadut jännitearvot muutetaan niitä vastaaviksi laskentasuureiksi (lämpötila, suhteellinen kosteus, paine-ero, ilmavirran nopeus, lämmitysteho jne.) muunnoskaavojen avulla ja lasketaan eri suureiden keskiarvot.

Saatuja keskiarvoja käyttäen tietokone laskee tutkittavalle rakenteelle myös erilaisia laskennallisia arvoja (diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvä kosteus, rakenteen vesihöyryn- ja ilmanläpäisevyys jne.). Kokeen kuluessa mitatut ja lasketut arvot sekä säätöapahtumat tallennetaan tulostiedostoihin. Kokeen edistymistä voidaan tarkkailla kokeen aikana numeeristen ja graafisten seurantasivujen avulla tietokoneen näytöltä.

Mittaustulosten perusteella tietokone säätää sisä- ja ulkopuolen olosuhteita siten, että ne saavuttavat mahdollisimman tarkasti niille asetetut tavoitearvot. Käytettävät säätöarvot tietokone laskee säätökaavojen avulla.

Sisä- ja ulkoilman olosuhteet tasoittuvat kokeessa varsin nopeasti; tyypillisesti n. vuorokauden kuluessa kokeen aloittamisesta (kuva 2.1). Nopea olosuhteiden säätö osoittaa, että säätöjärjestelmä on tehokas. Rakenteen kosteuspitoisuuksien tasoittumiseen kuluva aika voi kestää sen sijaan huomattavasti pidempään (jopa yli kuukauden). Tämä riippuu rakenteessa olevien materiaalien alkukosteuksista ja vesihöyrynläpäisevyyksistä sekä säädetävistä olosuhdeasetuksista.

Vakio-olosuhdekokeissa yksi olosuhdeasetus kestää tyypillisesti vähintään viikon verran ja kokonaiskoeaika on n. 1 kuukausi. Syklisissä kokeissa koeajat voivat vaihdella enemmän muutettavista olosuhdetekijöistä riippuen. Kuukauden kokeen aikana laitteisto mittaa n. 4,5 miljoonaa mittauseroa, laskee niistä 2 miljoonaa laskenta-arvoa ja säätää prosessia n. 250 000 kertaa.



Kuva 2.1. Esimerkki olosuhteiden tasoittumisesta rakennusfysikaalisessa kokeessa ajan funktiona.

2.2 Laitteiston osat

Tutkimuslaitteisto koostuu lämpimästä kammioista ja suojakammioista, jotka on sijoitettu suureen pakkashuoneeseen. Lämpimän kammion seinässä on tutkimusaukko, johon tutkittava rakenne asennetaan. Suojakammio asetetaan kokeessa tutkittavan rakenteen ulkopuolelle lämpimän kammion viereen. Lämpimän kammion sisälle säädetään sisäilman olosuhteet ja suojakammion sisälle vastaavasti ulkoilman olosuhteet (kuva 2.2).

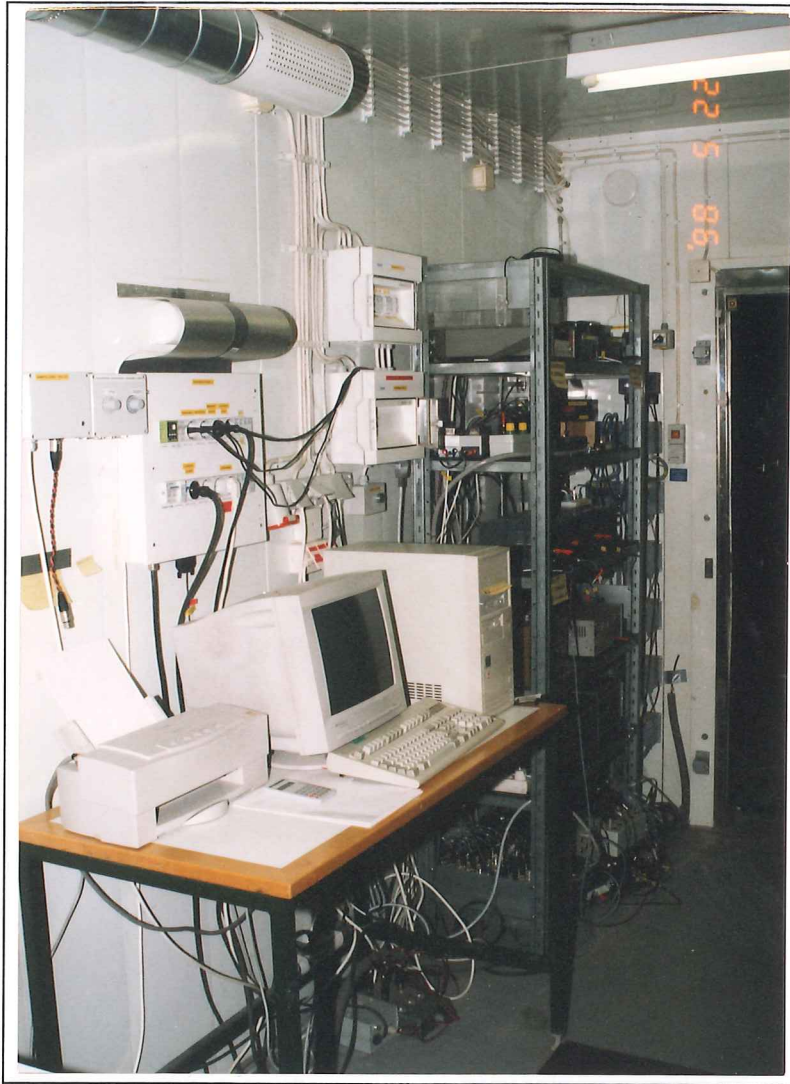
Tutkittavan rakenteen kummallekin puolelle asetetaan kokeessa suojalevyt, joiden tehtävänä on tasoittaa lämpötila- ja ilmanvirtausolosuhteita rakenteen pintojen lähellä. Suojalevyt toimivat kokeessa lisäksi erilaisten mittausturien kiinnitystelineinä.



Kuva 2.2. TTKK:n rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston lämmin kammio ja suojakammio pakkahuoneeseen sijoitettuina.

Koetta ohjataan erilaisten mittaus- ja säätölaitteiden avulla, joista osa on kammioiden sisäpuolella ja osa sijaitsee mittaushuoneessa pakkahuoneen ulkopuolella (kuva 2.3). Kokeen aikana tapahtuvat mittaus-, säätö- ja laskentatoimenpiteet tehdään automaattisesti tietokoneella, jota ohjaa koetta varten suunniteltu ja rakennettu ohjausohjelma.

Uusi koelaitteisto rakennettiin aiemmin rakennetun lämmönläpäisylaitteiston pohjalta. Lämmönläpäisylaitteistosta siirrettiin uuteen laitteistoon lähes sellaisenaan mm. pakkahuoneen jäädytys ja lämpimän kammion lämmitys sekä mittausjärjestelmä. Lämmönläpäisylaitteiston toimintaperiaate on esitetty lähteissä /16/ ja /17/.



Kuva 2.3. Koelaitteiston mittaus- ja säätölaitteita.

Kylmä kammio

Kylmänä kammiona käytettävä pakkahuone on eristetty muista tiloista polyuretaanieristyksellä ja sen sisämitat ovat: leveys 2,7 m, pituus 6,4 m ja korkeus 2,6 m. Seini- en ja katon sisäpintana on maalattu ohutlevy. Lattiana on pinnoitettu betonilaatta, jossa on lattialämmitys jäätymisen estämiseksi. Pakkahuoneen ovena on 1300 × 2000 mm suuruinen eristeovi, jonka karmeissa on myös lämmitysvastukset jäätymistä vastaan. Pakkahuoneen lämpötilan voi säätää +20...-40 °C:een.

Lämmin kammio

Lämmin kammio on ulkomitoiltaan n. 1800 × 1800 × 1100 mm. Kammion koko on valittu siten, että se voidaan tarvittaessa kääntää pakkahuoneessa ylä- ja alapohjarakenteita tutkittaessa.

Lämmin kammio on suunniteltu mahdollisimman ilmatiiviiksi paine-eron säätöä varten. Tästä syystä kammion sisäpintana on 6 mm:n PVC –muovilevyistä hitsaamalla tehty kotelo (etuseinän vahvuus 10 mm). Muovikotelon ympärillä on 150 mm:n polyuretaanieristys (etuseinässä 400 mm) ja ulkopintana on filmivaneri, joka on pinnoitettu vedeneristysmassalla. Kammion ulkopuolelle on tehty lisäksi tukikehikko alumiiniprofiileista. Tiiviiden parantamiseksi kaikki liitokset on tiivistetty silikonilla.

Lämpimän kammion tutkimusaukko on pinta-alaltaan $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$ ja syvyydeltään 400 mm. Tutkimusaukon reunat on tehty molemmin puolin laminoidusta vanerista, jolla on hyvä kosteudenkestävyys, mutta suhteellisen pieni lämmönjohtavuus ja lämpölaajenemiskerroin. Reunavanerit on tuettu ja kiinnitetty muovikoteloon puisen tukikehikon avulla. Muovilevyt ulottuvat tutkimusaukon sisäreunan yli muodostaen 25 mm leveät laipat rakenteiden asennusta varten. Laippoihin on liimattu EPDM -kumista valmistetut solukumitiivisteet.

Tutkimusaukon ulkopuolelle on tehty kahdeksan tukipistettä, joista koe-elementti kiristetään sisälaippoja vasten kahdeksalla kierretangolla. Kiristäminen tapahtuu erillisen teräsruuvien avulla, johon on myös liimattu EPDM -kumitiivisteet.

Liitteessä I on esitetty lämpimän kammion rakentamisvaiheesta otettuja valokuvia.

Suojakammio

Koelaitteiston suunnittelun alkuvaiheessa ulkoilman suhteellisen kosteuden tavoitearvoksi asetettiin RH 90 % myös pakkasen puolella. Kuitenkin koneellisesti jäädytettujen tilojen (kuten pakkashuoneiden ja pakastimien) RH on normaalisti n. 60...80 %. Alhainen suhteellinen kosteus johtuu siitä, ilmassa oleva vesihöyry pyrkii kondensoitumaan höyrystimien kylmille pinnoille. Tämä ongelma on ratkaistu koelaitteistossa erillisen suojakammion avulla, jolla pakkashuoneen ilma ja säädettävä ulkoilma saadaan erilleen toisistaan. Suojakammion seinät on tehty ohuista polykarbonaattilevyistä, jolloin lämpötilan säätö voitiin toteuttaa normaalisti pakkashuoneen lämpötilaa muuttamalla.

Ulkoilman RH saadaan pysymään suojakammiossa korkeana ohjatun ilmankierron ansiosta. Ilmankierto on toteutettu kahdella puhaltimella. Kammion pintoihin on kiinnitetty lisäksi lämmitysfoliot pintojen mahdollista sulatustarvetta varten.

Suojakammion ulkomitat ovat n. $1800 \times 1800 \times 600 \text{ mm}$. Kammion kantavana runkona on käytetty alumiinista valmistettuja kulmaprofiileja samoin kuin lämpimässä kammiossakin. Suojakammio tiivistetään kokeessa lämmintä kammiota vasten samanlaisilla kumitiivisteillä kuin tutkittava koe-elementtikin.

Suojalevyt

Tutkittavan elementin molemmin puolin sijaitsevat suojalevyt on valmistettu alumiinista. Niiden tarkoitus on suojata elementtiä suoralta lämpösäteilyltä, ohjata ilmavirtauksia sekä toimia erilaisten mittausantureiden kiinnitystelineenä. Levyjen taustat ovat heijastavia alumiinipintoja ja tutkittavaa rakennetta vastaan olevat pinnat on maalattu mattamustiksi. Sekä sisä- että ulkolevy kiinnitetään lämpimään kammioon. Sisälevyn pinta-ala on $1000 \times 1000 \text{ mm}^2$ ja ulkolevyn vastaavasti $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$.

Mittauslaitteet

Rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa on käytössä seuraavanlaisia mittauslaitteita:

- lämpötila-anturit
- kosteuslähettimet
- ilmanvirtauslähettimet
- paine-erolähettimet
- laminaariputket
- punnitusanturi
- jännitteen mittauslaitteet

Näiden lisäksi laitteistoon on mahdollista liittää mm. puun kosteusmittareita, lämpövirtalevyjä ja säteilymittareita tarpeen mukaan.

Säätölaitteet

Laitteiston säätölaitteet voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin:

- lämmityksen säätölaitteet
- jäädytyksen säätölaitteet
- kosteuden säätölaitteet
- paine-eron säätölaitteet
- ilmavirtauksen säätölaitteet

Säätölaitteiden avulla ohjataan lämpimän kammion sisätilan lämmitystä, pakkahuoneen jäädytystä, sisä- ja ulkoilman kostutusta, rakenteen yli vallitsevaa paine-eroa sekä ilman virtausnopeutta tutkittavan rakenteen pintojen lähellä.

Muut varusteet ja tarvikkeet

Laitteiston kalibrointitarvikkeisiin kuuluvat mm. lämpötila- ja kosteusanturien kalibrointiastiat, kalibrointisuolat suhteellisen kosteuden määrittämistä varten sekä punnitusanturien kalibrointipainot. Lämpimän kammion vuotoilmamäärän kalibrointia varten on lisäksi kalibrointilevy ja lämmitystehon kulutuksen kalibrointiin 7 kpl kalibrointielementtejä.

Laitteistoon hälytysjärjestelmiin kuuluu laboratoriohalliin asennettu vilkkuvalo, joka syttyy, jos kokeessa esiintyy häiriöitä. Mittaushuoneessa on myös erillinen palohälytys tulipalon varalta. Lisävarusteina voidaan mainita siltanosturiin kiinnitettävä nostohaarukka raskaiden elementtien asennusta varten sekä erilaiset koe-elementin asennustyökalut ja –tarvikkeet.

2.3 Olosuhteiden mittaaminen

Eri suureiden mittaaminen perustuu elektronisiin antureihin, joihin syötetään tietty syöttöjännite jännitelähteestä. Syöttöjännitteen avulla anturi synnyttää mitattavaan suureeseen verrannollisen jännitteen. Tämä anturilta mitattava ulostulojännite (U_i) voidaan muuttaa takaisin mitattavaksi suureeksi seuraavan muunnoskaavan avulla:

$$u_i = k U_i + b \quad (2.1)$$

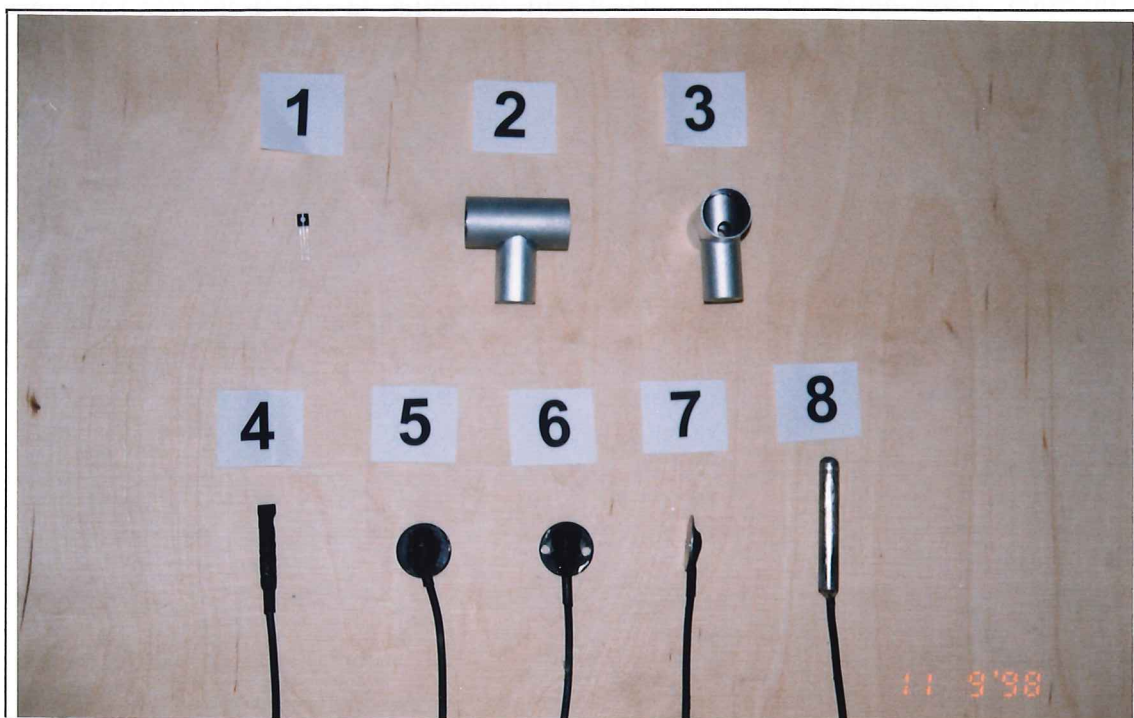
missä u_i on yksittäisen mitattavan suureen arvo. Kertoimet k ja b riippuvat anturin tai lähettimen mittausalueesta ja käytettävästä ulostulojännitteen alueesta. Lämpötila-anturien, kosteusanturien ja punnitusanturien kertoimet määritetään TTKK:lla tehtävissä kalibrointikokeissa. Muiden mittausturien kertoimet annetaan vakioina valmistajan tekemän kalibroinnin perusteella.

Suurin osa mittauslaitteista sijaitsee pakkahuoneen edessä olevassa mittaushuoneessa, josta ainoastaan anturit ja anturijohdot viedään läpivientien kautta lämpimään kammioon ja suojakammioon. Anturit ja lähetimet kytketään mittaushuoneessa erilliseen mittauskanavan valintayksikköön ja siitä edelleen dataloggeriin tai AD/DA -muuntimeen.

Lämpötilan mittaaminen

Koelaitteistossa käytetään lämpötilan mittaamiseen puolijohdeantureita, joiden synnyttämä ulostulojännite muuttuu lämpötilan muuttuessa. Puolijohdeanturiksi on valittu National Semiconductor Corporationin valmistama LM 335 tyyppinen anturi. Yksi lämpötila-anturi koostuu puolijohdeanturista, anturin suojuksesta ja 10 m pituisesta liittimellä varustetusta mittaajajohtosta. Laitteistossa käytetään kolmenlaisia antureita riippuen siitä,

mistä kohdasta lämpötiloja mitataan (ilma-anturit, pinta-anturit ja metallivaippa-anturit). Eri anturityyppejä on esitelty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Laitteistossa käytettäviä puolijohdelämpötila-antureita. Eri anturityypit numerojärjestyksessä lueteltuina ovat: 1) puolijohdeanturi, 2) ja 3) ilma-anturin säteilysuojuksia, 4) ilma-anturi, 5) rakenteen pinta-anturi, 6) suojalevyn pinta-anturi, 7) pinta-anturi sivulta kuvattuna ja 8) metallivaippa-anturi /17/.

Ilma-antureilla mitataan ilman lämpötiloja pakkashuoneessa, lämpimässä kammiossa ja välikammiossa. Anturit on suojattu kutistemuovisukalla ilmankosteutta vastaan. Anturien taakse on laitettu muoviset tuet, joilla anturit kiinnitetään suojalevyissä oleviin lasikuitusauvoihin. Ilma-anturit suojataan myös lämpösäteilyltä laittamalla niiden päälle erilliset alumiiniputkesta valmistetut säteilysuojukset.

Pinta-antureilla mitataan lämpötiloja tutkittavan rakenteen ja suojalevyjen pinnoilta. Anturien alapintaan on liimattu hyvin lämpöä johtava ohut alumiinilevy, jolloin anturin lämpötilaksi saadaan mahdollisimman tarkasti pinnan lämpötila. Anturit on suojattu ilmankosteuden vaikutuksilta kemiallisella metallimassalla ja maalattu mattamustaksi, jotta ne vastaavat säteilyominaisuuksiltaan kiinnityspintojen ominaisuuksia. Suojalevyihin kiinnitettävien anturien alumiinilevyihin on porattu reiät kiinnitysruuveja varten.

Metallivaippa-antureilla mitataan lämpötiloja tutkittavan rakenteen sisältä. Niitä käytetään koelaitteistossa myös mm. ilman kostutuksessa käytettävien vesiastioiden lämpötilan seurantaan. Anturit on suojattu ruostumattomalla teräsvaipalla. Anturin ympärillä on tässä tapauksessa paljon massaa, joten se reagoi hitaammin erilaisiin hetkellisiin lämpötilan muutoksiin. Metallivaippa-anturit kestävät kuitenkin paremmin kosteita olosuhteita sekä mekaanisia ja kemiallisia rasituksia.

Ilman suhteellisen kosteuden mitta

Ilman suhteellista kosteutta mitataan Vaisala Oy:n valmistamilla HMP 230 –sarjan kosteuslähettimillä. Kosteuslähetin koostuu anturiosasta, joka on 10 m johdon avulla kytketty mittaushuoneessa olevaan elektroniikkayksikköön. Lähettimien mittausanturina toimii kapasitiivinen kosteusanturi. Kapasitiivisessa kosteusanturissa mitataan väliaineen dielektrisiä muutoksia kosteuden funktiona.

Ilman suhteellista kosteutta mitataan kokeessa mm. tutkittavan elementin ja suojalevyn välistä, ulkoerhouksen takana olevasta tuuletusraosta ja tutkittavan rakenteen eristetilasta. Kosteusanturien päissä käytetään erilaisia suodattimia riippuen siitä, mitataanko niillä kosteutta ilmasta vai rakenteen huokostilasta.

Ilman virtausnopeuden mitta

Ilmavirtauksen nopeutta mitataan kokeessa Envic Oy:n valmistamilla AFT-1D tyyppin ilmanvirtauslähettimillä. Ilmanvirtauslähetin koostuu anturiosasta, joka on 10 m johdon avulla kytketty mittaushuoneessa olevaan elektroniikkayksikköön. Lähettimien mittausanturina toimii kuumalanka-anemometri. Kuumalanka-anemometrillä mitataan virtausnopeutta seuraamalla lämmönsiirron muutoksia sähkövirralla lämmitetyssä anturissa. Anturit mittaavat suurimman ilmavirran nopeuden arvon virtauksen tulosuunnasta riippumatta. Anturit ovat pienikokoisia ja niillä on suuri taajuusvaste, joka mahdollistaa myös turbulentsin virtauksen mittaamisen.

Virtausnopeutta mitataan kokeessa tutkittavan elementin ja suojalevyjen välistä ja ulkoerhouksen takana olevasta tuuletusraosta. Anturit sijoitetaan keskelle koe-elementtiä leveys suunnassa.

Paine-eron mitta

Paine-eroa rakenteen yli mitataan Furness Control Ltd.:n valmistamilla FCO 16 –tyypin paine-erolähettimillä. Paine-erolähettimessä kaasun paine muutetaan mekaaniseksi liikkeeksi, joka muutetaan mittarin näyttämäksi sähköisesti /3/.

Paine-eron mittaukseen tarvitaan varsinaisen paine-erolähettimen lisäksi kaksi 10 m pitkä muoviletkeä, jotka liitetään toisesta päästään lähettimeen. Letkujen vapaat päät vietään tutkittavan rakenteen eri puolille ja suojataan samanlaisilla suojuksilla kuin ilmaanturit. Suojuksiin on lisätty vaahtomuovisuodattimet paineenvaihteluiden tasaamiseksi.

Ilman tilavuusvirran mittaus

Paine-erolähettimen avulla voidaan mitata myös ilman tilavuusvirtaa kytkemällä letkujen vapaat päät laminaariputkeen. Laminaariputken keskellä on kavennus, joka aiheuttaa paine-eron putken päihin ilman virratessa laminaariputken läpi. Paine-erolähettimen avulla voidaan mitata tämä paine-ero, joka vastaa tiettyä ilman tilavuusvirtaa laminaariputken läpi. Laminaariputkien kokoa vaihdetaan tarvittavan tilavuusvirran mukaan. Koelaitteistossa on käytössä tällä hetkellä Furness Control Ltd.:n valmistamat 0.02, 0.2, 2.0 ja 30 l/min tilavuusvirralle mitoitettut laminaariputket.

Sisähöyrystinastian painon mittaus

Sähköisen punnitusanturin avulla mitataan veden haihtumista sisäilman kostutukseen käytettävästä vesiastiasta. Kostutinastia riippuu terässauvassa, jonka venymä on suoraan verrannollinen vesiastian painoon. Venymää mitataan venymäliuskojen avulla. Vesiastian painon muutosta tarvitaan lämpimään kammioon syötetyn kosteusmäärän laskennassa.

Jännitteen mittaus

Jännitteitä voidaan mitata kokeessa kahdella rinnakkaisella tavalla. Ensimmäisessä tavassa eri mittauskanavien jänniteviestit ohjataan dataloggeriin, jonka kautta jännitemittari mittaa signaalit vuorotellen halutussa järjestyksessä. Toisessa tavassa tietokoneen sisälle asennettu AD/DA -muunninkortti muuttaa saadut analogiset jännitearvot digitaaliseen muotoon ja tietokone muuttaa ne uudestaan analogisiksi jännitearvoiksi. Rakennusfysiikkaalisessa tutkimuslaitteistossa käytetään pääasiassa jännitemittaria ja dataloggeria kanavien mittaukseen. Jännitemittari on Hewlett Packardin valmistama HP 34401A Multi-meter.

Lämmitystehoa mitattaessa jännitemittarin käyttö edellyttää myös sähkövirran mittauksista jännitearvona. Tämä tapahtuu virta/jännitemuuntimen avulla, jossa tehonsyöttöpiirin virta muutetaan sähkövastuksen avulla jännitearvoksi. Tietokone muuttaa jännitearvon takaisin virraksi muunnoskaavan avulla.

2.4 Olosuhteiden säätäminen

Rakennusfysiikkaalisessa olosuhdekokeessa säädetään jokaista olosuhdetekijää omalla säätösystemillään. Säädetävinä suureina ovat sisä- ja ulkoilman lämpötilat, sisä- ja ulkoilman suhteelliset kosteudet sekä paine-ero tutkittavan rakenteen eri puolilla. Lisäksi säädetään ilmavirtauksen nopeutta rakenteen pinnoilla sekä pakkahuoneen lämpötilan ja

ulkolämpötilan välistä eroa siten, että ulkolämpötila pysyy vakiona. Koelaitteiston säätöjärjestelmien toimintaa on esitelty tarkemmin lähteissä /15/ ja /17/.

Kaikkien olosuhdetekijöiden säätäminen perustuu samantyyppiseen säätökaavaan

$$a_{uusi} = a_{ed} + k_1 (u_{tav} - u_{mit}) + k_2 (u_{mit,ed} - u_{mit}) \quad (2.2)$$

missä u_{tav} on säädettävän suureen tavoitearvo, $u_{mit,ed}$ on ko. suureen edellinen mitattu arvo ja u_{mit} on suureen uusi mitattu arvo. k_1 ja k_2 ovat säätökaavan säätökertoimet. a_{uusi} on olosuhteen säätämiseksi käytetyn apusuureen uusi säätöarvo ja a_{ed} on ko. apusuureen edellinen säätöarvo.

Rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa olosuhteiden säätämiseksi käytetään apusuurena yleensä aikaa (t), jonka säätölaite on säätöjaksolla päälle kytkettynä. Sisälämpötilan säädössä apusuurena käytetään kuitenkin lämmitystehoa (P).

Säätökaavan ensimmäinen termi ottaa huomioon nykyisen säätötilanteen, toinen termi säädettävän suureen eron tavoitearvosta ja kolmas termi suureen muutossuunnan. Säätökertoimet ovat vapaasti valittavissa ja niiden avulla vaikutetaan säädön tehokkuuteen ja nopeuteen

Sisälämpötilan säätö

Lämpimän kammion sisätilan lämpötilaa säädetään lämmityslaitteen avulla. Lämpimään kammioon tarvitaan tietty lämmitysteho, jotta kammion lämpötila pysyy korkeampana kuin ulkolämpötila. Lämpimän kammion lämmitys on toteutettu samalla periaatteella ja pääosin samoilla laitteilla kuin lämmönlämpäyslaitteistossa /17/.

Lämmityslaite koostuu eri kokoisista lämmitysvastuksista ja sisätuulettimesta. Vastuksille ohjataan tietty tehomäärä, jolloin sisäilman lämpötila saadaan halutuksi. Lämmitystehon säätö on kaksivaiheinen siten, että syötettävän tehon perustaso saadaan portaallisesti toimivasta lisäjännitelähteestä ja hienosäätö suoritetaan portaattomasti säädettävällä jännitelähteellä. Lämmitystehon säädössä otetaan huomioon myös sisätuulettimen ja sisäkostuttimen tuottama lämmitysteho.

Ulkolämpötilan säätö

Pakkashuoneen jäähditys on toteutettu samalla periaatteella ja samoilla laitteilla kuin lämmönlämpäyslaitteistossakin /17/. Pakkashuonetta jäähdytetään kahdella jäähdityskompressorilla, jotka on asennettu kiinteästi erilliseen kompressorihuoneeseen pakkashuo-

neen viereen. Kompressoripiireihin kuuluvat pakkashuoneessa olevat höyrystimet ja katolle sijoitetut lauhduttimet. Ilman kierrosta huoneessa huolehtii kuusi tuuletinta, jotka on sijoitettu kummankin höyrystimen eteen. Pakkashuoneen jäähdytys tapahtuu tietokoneeseen liitettyjen ohjausreleiden avulla, jotka kytkevät jäähdytyksen päälle ja sammuttavat sen halutun ajan jälkeen.

Välikammiossa on aina hieman korkeampi lämpötila kuin pakkashuoneessa. Tästä syystä säädetään vielä erikseen välikammion ja pakkashuoneen välistä lämpötilaeroa, jotta välikammioon saataisiin tarkalleen haluttu ulkolämpötila.

Ilman suhteellisen kosteuden säätö

Sisä- ja ulkopuolen ilmankosteutta säädetään vesiastioissa olevien sähkövastusten avulla. Sähkövastukset lämmittävät vesiastioissa olevaa vettä, joka höyrystyy ympäröivään ilmaan. Lämpimässä kammiossa ja välikammiossa olevat tuulettimet sekoittavat ilmaa niin, että kosteus jakaantuu siihen tasaisesti. Kostutusta ohjataan tietokoneeseen liitetyillä ohjausreleillä, jotka kytkevät sähkövastukset päälle ja sammuttavat ne halutun ajan jälkeen. Lämpimään kammioon tuotetussa kosteusmäärässä otetaan huomioon myös ilmaletkun kautta tuleva tai lähtevä kosteusmäärä.

Sisäpuolella kostutusta säädetään myös muuttamalla vesiastian aukon kokoa sähköisesti toimivan sulkimen avulla. Tämä on tarpeellista varsinkin silloin, kun sisäilmassa tarvittavat kosteusmäärät ovat pieniä. Muussa tapauksessa sisäilman RH nousisi liian korkeaksi, koska lämpimässä kammiossa ei ole erillistä kuivatussysteemiä.

Suojakammion vesiastian tulee olla hyvin lämpöeristetty, jotta lämmitysvastuksen tehoa ei tarvitse tarpeettomasti kasvattaa. Lisäksi liian lämmin vesi höyrystyy nopeasti suojakammioon, jolloin ylimääräinen kosteus tiivistyy kammion pintoihin haitaten lämpötilan ja kosteuden säätöä.

Paine-eron säätö

Sisä- ja ulkopuolen välistä paine-eroa säädetään ilmapumppujen avulla. Ilmaletku kytkeään pumpun imu- tai puhalluspuolelle riippuen siitä halutaanko lämpimään kammioon ali- tai ylipaine. Ilmapumppujen kokoa vaihdetaan tarvittavan ilman tilavuusvirran mukaan. Koelaitteistossa on käytössä tällä hetkellä ilmapumppuja, joiden maksimituotto on 4.0, 8.0 ja 20 l/min. Pienillä tilavuusvirran arvoilla virtausta pienennetään lisäksi ilmaletkussa olevan kuristimen avulla. Paine-eron hienosäätö tapahtuu tietokoneeseen liitetyn ohjausreleen avulla, joka kytkee pumpun päälle ja sammuttaa sen halutun ajan jälkeen.

Ilman virtaus ilmaletkussa pyritään saamaan mahdollisimman tasaiseksi ja laminaariseksi, joten pumpun käyntijakso on hyvin tiheä. Ilmaletkuun on lisäksi liitetty suodattimella varustettu paisuntasäiliö, joka myös tasoittaa ilmavirtausta.

Paine-ero poikkeaa muista säädettävistä olosuhteista siinä suhteessa, että se muuttuu hyvin nopeasti. Paine-ero on voimakkaasti sidoksissa lämpötilaan, joten tasaisen säädön onnistuminen edellyttää tarkkaa lämpötilan säätöä. Tiiviillä koe-elementeillä pelkästään lämpötilaeron syntyminen sisä- ja ulkopuolen välille kokeen alussa voi nostaa paine-eron hyvin suureksi. Tästä syystä lämpimästä kammioista on johdettu ulos paineentasausputki, jonka päässä on magneettiventtiili. Venttiili avautuu, jos paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä kasvaa suureksi.

Ilman virtausnopeuden säätö

Lämmityslaitteeseen on kytketty sisätuuletin, jonka tehtävänä on siirtää lämmitysvastuksissa kehittyvä lämmitysteho sisäilmaan. Sisätuulettimen pyörimisnopeutta voidaan säätää syöttöjännitettä muuttamalla. Tuulettimen nopeudesta riippumatta ilmavirtaus pysyy kuitenkin luonnollisen konvektion alueella rakenteen sisäpinnan lähellä.

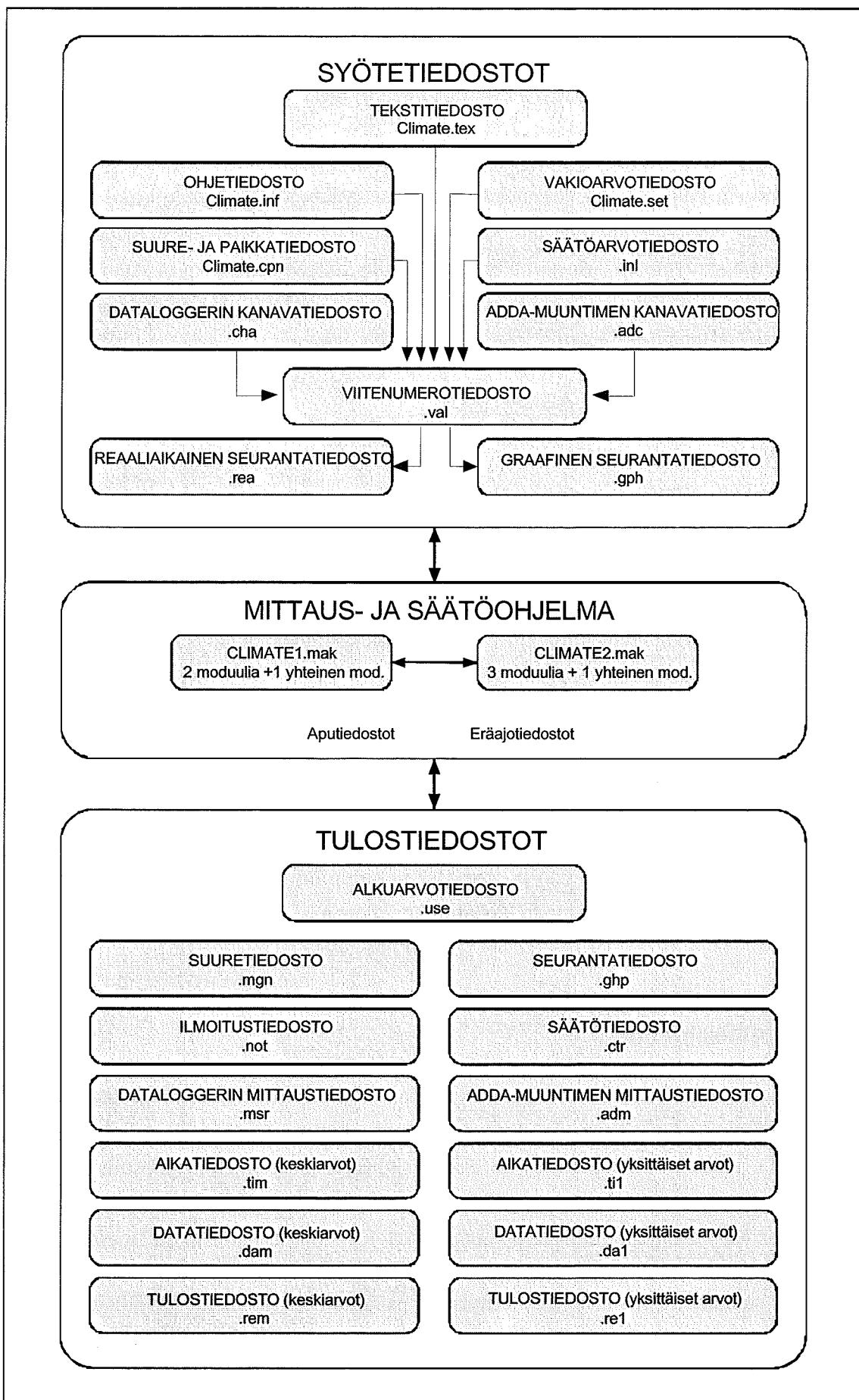
Höyrystimien edessä olevien ulkotuulettimien avulla saadaan haluttu ulkoilmavirran nopeus pakkashuoneeseen. Tuulettimien pyörimisnopeutta ohjataan tietokoneeseen kytketyn taajuusmuuttajan avulla, joka muuttaa tuulettimien syöttöjännitteen taajuutta.

Suojakammiossa ilmavirtauksen nopeutta säädetään kahden puhaltimen avulla. Puhaltimet sijaitsevat suojakammion ylä- ja alaosassa ja niihin on liitetty putkistot, jotka ohjaavat ilman kiertoa suojakammiossa. Puhaltimia voidaan säätää syöttöjännitettä muuttamalla.

2.5 Ohjausohjelma

Ohjausohjelman tehtävänä on mitata sisä- ja ulkoilman olosuhteita kokeen aikana ja säätää ne halutuiksi mahdollisimman nopeasti. Koetta ohjataan CLIMATE -nimisen ohjelman avulla, jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.5. Ohjelma koostuu syötetiedostoista, varsinaisesta mittaus- ja säätöohjelmasta sekä tulostiedostoista. Ohjelma on tehty Quick Basic -ohjelmointikielen versiolla 4.5. Käyttöjärjestelmänä on DOS 6.22.

Ohjelman suunnittelussa on pyritty erityisesti painottamaan käyttäjäystävällisyyttä, kokeen aikaista seuranta- ja koejärjestelyjen muunneltavuutta. Laitteiston mittausjärjestelyjä, säätöolosuhteita ja laskettavia suureita voidaan muuttaa vapaasti antamalla uudet tiedot syötetiedostoihin joko kokeen alussa tai sen aikana. Erilaisilta seurantasivuilta voidaan puolestaan tarkkailla kokeessa tapahtuvia muutoksia.



Kuva 2.5. Ohjausohjelman CLIMATE toimintakaavio.

Ennen kokeen alkua laitteiston ohjausohjelman *syötetiedostoihin* (10 kpl) annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä, kanavista, mitattavista suureista, mittausanturien kalibrointikertoimista, koeolosuhteista, tutkittavan koe-elementin ominaisuuksista sekä kokeen aikana seurattavista mittausarvoista. Syötetiedostot jaetaan lisäksi vakiosyötetiedostoihin ja muuttuviin syötetiedostoihin. Vakiosyötetiedostoja (4 kpl) ei tarvitse koetta varten yleensä muuttaa lainkaan. Muuttuvia syötetiedostoja (6 kpl) muutetaan aina kokeen alussa, joten niille annetaan tehtävää koetta kuvaava nimi. Muuttuvat syötetiedostot pitävät sisällään myös kokeen aikaiseen seurantaan tarvittavat lähtötiedot. Käytännössä niihin valitaan aina kaikki kokeessa mitattavat ja laskettavat suureet. Kaikki syötetiedostot on oltava tehtyinä ennen kokeen aloittamista.

Mittaus- ja säätöohjelma koostuu kahdesta ohjelmasta: CLIMATE1.mak ja CLIMATE2.mak, jotka on jaettu yhteensä 6 moduuliin. Kumpikin ohjelma sisältää pääohjelman ja lukuisan määrän erilaisia aliohjelmiä. Lisäksi mittaus- ja säätöohjelmaan kuuluu joukko ns. aputiedostoja ja eräajotiedostoja.

CLIMATE1.mak suorittaa kokeen alussa erilaisia tarkistuksia, tekee tarvittavat alkutiedostot sekä lukee koetta varten annetut lähtötiedot virtuaalimuistiin. CLIMATE2.mak tekee ensin erilaisia alustuksia, jonka jälkeen se suorittaa annettujen lähtötietojen perusteella seuraavat mittaus- ja säätötoimenpiteet tietyin väliajoin:

- mittaa kanavien jännitearvot ja muuttaa ne mitattaviksi suureiksi
- säätää mittaustulosten perusteella koeolosuhteita
- laskee mittaustuloksista tutkittavalle rakenteelle erilaiset laskenta-arvot
- tallentaa mittaus-, laskenta- ja säätöarvot tulostiedostoihin
- tulostaa mittaus-, laskenta-, ja säätöarvot kuvaruudulle kokeen aikana

Kokeen aikainen seuranta tapahtuu erilaisten graafisten ja numeeristen seurantasivujen avulla. Reaaliaikaisilta seurantasivulta nähdään aina uusimmat mittaus-, säätö- ja laskenta-arvot numeerisina. Näiltä sivuilta nähdään myös arvojen muutokset edellisiin arvoihin verrattuna. Reaaliaikaisten seurantasivujen etuna on, että yhdellä sivulla voidaan esittää suuri määrä erilaisia arvoja samanaikaisesti. Graafisilta seurantasivuilta voidaan puolestaan nähdä eri mittausarvojen muutokset halutulta ajanjaksolta ja halutulla skaalauksella. Yhteen kuvaan voidaan valita 5 kpl mitattavia suureita ja erilaisia kuvasivuja voidaan tehdä rajoittamaton määrä. Jokaista kuvasivua vastaa myös numeerinen seurantasivu, josta nähdään kuvaajien piirtämisessä käytetyt tarkat arvot. Kanavien seurantasivuilta nähdään dataloggerin ja AD/DA –muuntimen kautta mitattavien kanavien uusimmat mittausarvot numerojärjestyksessä. Näiden sivujen lisäksi käytössä on muitakin kokeen seurantaan ja ohjaukseen liittyviä sivuja.

Tulostiedostoja on 13 kpl ja niihin tulostetaan kokeen aikana saadut mittaus-, laskenta- ja säätöarvot. Alkuarvotiedostoon tulostetaan kokeen alussa asetetut säätöarvotiedoston arvot. Suuretiedostoon tulostetaan useita kertoja minuutissa mitattavien suureiden järjestysnumerot ja seurantatiedostoon kokeessa mitattavien ja laskettavien suureiden graafisten seurantasivujen sivunumerot. Ilmoitustiedostoon tulostetaan kokeen aikana tehdyt säätöarvojen muutokset sekä erilaiset virheilmoitukset. Mittaustiedostoihin tulostetaan kanavien mittausjärjestykset kokeessa. Säättötiedostoon tulostetaan kokeen aikana tehdyt säätötapahtumat ja aikatiedostoihin mittauskierroksia vastaavat kellonajat. Datatiedostoihin tulevat kokeen aikana eri mittauskanavilta mitatut ulostulojännitteet ja tulostiedostoihin niistä lasketut mittaus- ja laskenta-arvot.

Kokeen jälkeen tulostiedostot muokataan Excel -taulukkolaskentaohjelmaan sopiviksi erillisen purkuohjelman avulla. Purkuohjelman avulla tulostiedostot voidaan myös jakaa halutun suuruisiin osiin ja tiivistää lyhyemmiksi.

Ohjausohjelmaan on tehty erilaisia varmistuksia ja rajoituksia, jotka ohjaavat kokeen säätöjärjestelmiä. Suurin riski kokeen toiminnan kannalta on varmastikin eri syistä aiheutuvat sähkökatkot. Niiden vaikutusta on pyritty eliminoimaan rakentamalla ohjausohjelmaan automaattinen nousujärjestelmä, joka käynnistää tietokoneen uudelleen sähkökatkon jälkeen ja kytkee mittaus- ja säätöjärjestelmät uudelleen käyntiin. Tietokone pitää muistissaan aina uusimmat säätöarvot ja aloittaa kokeen säätämisen näillä arvoilla sähkökatkon jälkeen. Tällä tavoin varsinkin lyhyiden sähkökatkojen aiheuttamat häiriöt jäävät melko pieniksi.

2.6 Kokeista saatavat mittaus- ja laskenta-arvot

Mittausarvot

Kokeen aikana mitataan mm. seuraavia suureita:

- lämpötilat sisällä, ulkona, rakenteessa ja pinnoilla (T) [$^{\circ}\text{C}$]
- ilman suhteellinen kosteus sisällä, ulkona ja rakenteen huokostilassa (ϕ) [%]
- paine-ero rakenteen yli koe-elementin ylä- ja alaosaan (Δp_{rak}) [Pa]
- ilman vesihöyrypitoisuus sisällä, ulkona ja rakenteen huokostilassa (v) [g/m^3]
- ilman virtausnopeus sisällä, ulkona ja tuuletusraossa (r) [m/s]
- ilman kokonaistilavuusvirta lämpimään kammioon tai sieltä pois (R_{kok}) [l/min]
- kokonaiskosteusvirta, joka poistuu lämpimästä kammioista (G_{kok}) [g/vrk]
- kokonaislämpövirta, joka poistuu lämpimästä kammioista (Φ_{kok}) [W]

Rakennäytteiden avulla saadaan lisäksi mm. seuraavat tiedot:

- rakennusmateriaalien kosteuspuiteisuus (u) [%]

- rakennusmateriaalien sisältämä kosteus (m) [g]
- kondensoitumisen voimakkuus tuulensuojalevyn takana

Laskenta-arvot

Mitattujen suureiden avulla voidaan tutkittavalle rakenteelle laskea myös erilaisia laskenta-arvoja seuraavien kaavojen avulla:

- *Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi (R_{rak}) [l/min]*

$$R_{rak} = R_{kok} - R_h \quad (2.3)$$

missä R_h on lämpimän kammion vuotoilmamäärä.

- *Ilmavirran tiheys rakenteen läpi (r_{rak}) [l/m²·min]*

$$r_{rak} = \frac{R_{rak}}{A_{rak}} \quad (2.4)$$

missä A_{rak} on tutkimusaukon tehollinen pinta-ala (1150 × 1150 mm²).

- *Ilman virtausnopeus rakenteen läpi (r_{nop}) [m/s]*

$$r_{nop} = \frac{1}{60000} \frac{R_{rak}}{A_{rak}} \quad (2.5)$$

- *Rakenteen ilmanläpäisykerroin (K_{rak}) [m/s·Pa]*

$$K_{rak} = \frac{1}{60000} \frac{R_{rak}}{A_{rak} \Delta p_{rak}} \quad (2.6)$$

- *Koko rakenteen tai materiaalikappaleen ilmanläpäisevyys (ℓ_{rak}) [m²/s·Pa]*

$$\ell_{rak} = \frac{1}{60000} \frac{R_{rak} d_{rak}}{A_{rak} \Delta p_{rak}} \quad (2.7)$$

missä d_{rak} on rakenteen paksuus.

Yksittäisen materiaalin ilmanläpäisevyys voidaan mitata asettamalla tutkimusaukkoon pelkästään tästä materiaalista tehty koekappale.

- *Rakenteeseen siirtyvä kosteusvirta (G_{rak}) [g/vrk]*

$$G_{rak} = G_{kok} - G_h \quad (2.8)$$

missä G_h on lämpimän kammion kosteusvuodon määrä.

- *Rakenteeseen siirtyvä kosteusvirran tiheys (g_{rak}) [g/m²·vrk]*

$$g_{rak} = \frac{G_{rak}}{A_{rak}} \quad (2.9)$$

- *Konvektiolla rakenteeseen siirtyvä kosteusvirta (G_{konv}) [g/vrk]*

$$G_{konv} = \frac{1440}{1000} v_s R_{rak} \quad \text{tai} \quad G_{konv} = \frac{1440}{1000} v_u R_{rak} \quad (2.10)$$

missä v_s ja v_u ovat sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet. Laskennassa käytetään sisä- tai ulkoilman vesihöyrypitoisuutta paine-eron suunnasta riippuen.

- *Konvektiolla rakenteeseen siirtyvä kosteusvirran tiheys (g_{konv}) [g/m²·vrk]*

$$g_{konv} = \frac{G_{konv}}{A_{rak}} \quad (2.11)$$

- *Diffuusiolla rakenteeseen siirtyvä kosteusvirta (G_{dif}) [g/vrk]*

$$G_{dif} = G_{rak} - G_{konv} \quad (2.12)$$

- *Diffuusiolla rakenteeseen siirtyvä kosteusvirran tiheys (g_{dif}) [g/m²·vrk]*

$$g_{dif} = \frac{G_{dif}}{A_{rak}} \quad (2.13)$$

Alipainetilanteessa kaava antaa diffuusion minimiarvon.

- *Rakenteen vesihöyrynläpäisykerroin ($W_{v, rak}$) [m/s]*

$$W_{v, rak} = \frac{1}{86400} \frac{G_{dif}}{(v_s - v_u) A_{rak}} \quad (2.14)$$

- *Koko rakenteen tai materiaalikappaleen vesihöyrynläpäisyys* ($\delta_{v, rak}$) [m^2/s]

$$\delta_{v, rak} = \frac{1}{86400} \frac{G_{dif} d_{rak}}{(v_s - v_u) A_{rak}} \quad (2.15)$$

Yksittäisen materiaalin vesihöyrynläpäisyys voidaan mitata asettamalla tutkimusaukkoon pelkästään tästä materiaalista tehty koekappale.

- *Lämpövirta rakenteen läpi* (Φ_{rak}) [W]

$$\Phi_{rak} = \Phi_{kok} - \Phi_h \quad (2.16)$$

missä Φ_h on lämpimän kammion läpi siirtyvä lämpövirta.

- *Lämpövirran tiheys rakenteen läpi* (q_{rak}) [W/m^2]

$$q_{rak} = \frac{\Phi_{rak}}{A_{rak2}} \quad (2.17)$$

missä A_{rak2} on tutkittavan rakenteen pinta-ala.

- *Rakenteen lämmönläpäisykerroin* (U_{rak}) [$W/m^2 \cdot K$]

$$U_{rak} = \frac{\Phi_{rak}}{A_{rak2} (T_s - T_u)} \quad (2.18)$$

missä T_s ja T_u ovat sisä- ja ulkoilman lämpötilat.

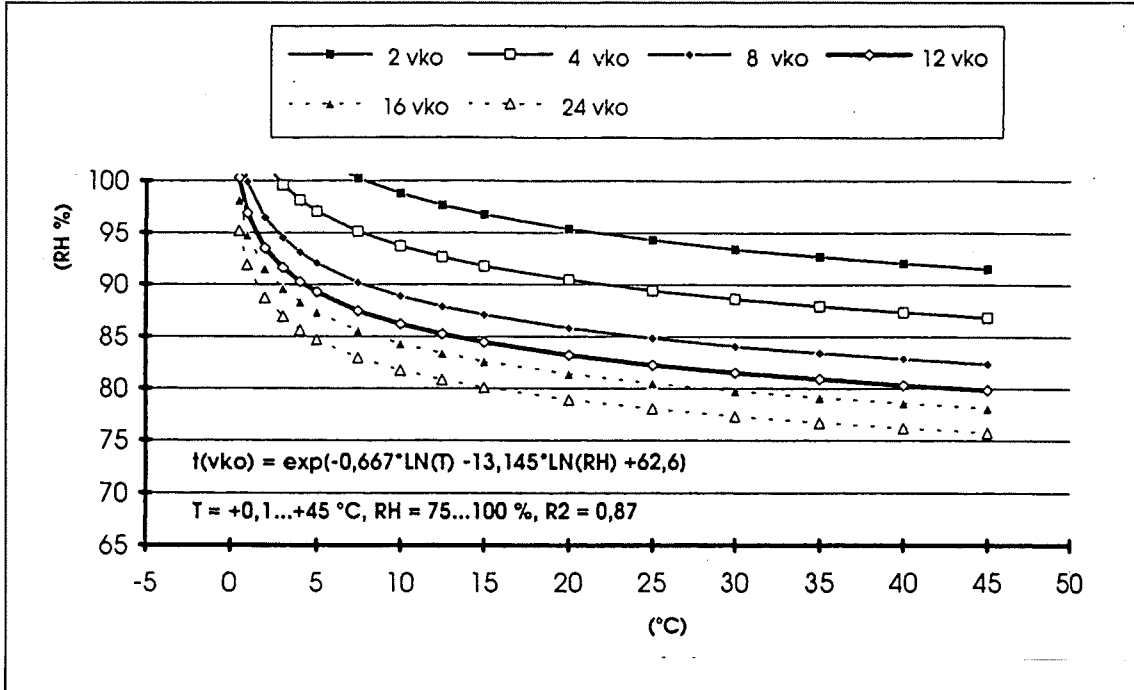
- *Koko rakenteen tai materiaalikappaleen lämmönjohtavuus* (λ_{rak}) [$W/m \cdot K$]

$$\lambda_{rak} = \frac{d_{rak} \Phi_{rak}}{A_{rak2} (T_{sp} - T_{up})} \quad (2.19)$$

missä T_{sp} ja T_{up} ovat rakenteen sisä- ja ulkopinnan lämpötilat.

Yksittäisen materiaalin lämmönjohtavuus voidaan mitata asettamalla tutkimusaukkoon pelkästään tästä materiaalista tehty koekappale.

Olosuhdekokeessa voidaan myös selvittää onko rakenteessa homeen kasvulle suotuisia lämpötila- ja RH -olosuhteita. Homeriskin suuruutta voidaan arvioida kuvassa 2.5 esitettyjen käyrien perusteella /14/.



Kuva 2.6. Kosteus- ja lämpötilojen kriittiset vaikutusajat homeen kasvun alkamiseen (homeaste 1, mikroskoopilla havaittava kasvu) /14/.

2.7 Laitteiston kalibrointi ja mittausepävarmuus

Mittausanturien ja lämpimän kammion kalibrointi

Lämpötila-anturien kalibrointi suoritetaan erillisessä kalibrointiastiassa, jossa voidaan kerralla kalibroida n. 70 kpl lämpötila-antureita. Lämpötila-anturien kalibrointi tapahtuu myös pakkahuoneessa ja mittaukset tehdään samalla laitteistolla kuin varsinaisessa kokeessakin. Kalibroinnissa käytetään vertailumittarina lasiputkilämpömittaria, joka asetetaan kalibrointiastiaan anturien kanssa. Astiassa on lisäksi tuuletin, joka sekoittaa astiassa olevaa ilmaa ja tasaa lämpötilavaihteluita astian sisällä.

Kosteusanturien kalibrointia varten on omat kalibrointiastiat, joissa voidaan kerralla kalibroida n. 5 kosteusanturia. Kosteusanturit kalibroidaan kylläisten suolaliuosten avulla, jotka muodostavat ympäröivään ilmatilaan tietyn suhteellisen kosteuden. Kalibrointiastioissa käytetään kahta suolaliuosta, joista toinen muodostaa ilmaan korkean ja toinen alhaisen RH -prosentin. Kalibrointi tehdään samalla laitteistolla kuin varsinaisessa kokeessakin.

Punnitusanturi kalibroidaan eri painoisten vertailupainojen avulla. Vertailupainojen massat on määritetty elektronisella vaa'alla. Kalibrointi tehdään samalla laitteistolla kuin varsinaisessa kokeessakin.

Muiden mittausturien ja -laitteiden kalibroinnit (ilmanvirtauslähettimet, paine-ero-lähettimet, laminaariputket ja jännitemittari) tehdään joko laitteiden valmistajien toimesta tai valtuutetuissa mittaustaikoissa.

Lämpimän kammion vuotoilmamäärä kalibroidaan asettamalla tutkimusaukkoon kalibrointilevy ja mittaamalla lämpimästä kammioista imettävä tai sinne puhallettava ilman tilavuusvirta erilaisissa paine-erolanteissa. Kalibrointia varten on tehty pinta-alaltaan $1190 \times 1190 \text{ mm}^2$ kalibrointilevy, joka ei läpäise ilmaa. Kalibrointilevy on valmistettu vanerista, jonka sisäpintaan on liimattu ohut teräslevy.

Lämpimän kammion lämpöenergian kulutus kalibroidaan asettamalla tutkimusaukkoon eri paksuisia kalibrointielementtejä, joilla on tunnettu lämmönjohtavuus. Kalibroinnissa tarvitaan eri paksuisia elementtejä, koska tutkimusaukon reunan kautta siirtyvän lämpövirran osuus muuttuu paksuuden muuttuessa /12/. Kalibrointielementtejä on 7 kpl pinta-alaltaan $1190 \times 1190 \text{ mm}^2$ ja paksuudeltaan 20 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm ja 300 mm. Elementit on tehty S 25 -luokan polystyreenilevyistä (EPS) ja pinnoitettu mattamustalla muovikalvolla. EPS -levyn lämmönjohtavuus on määritetty VTT:llä.

Laitteiston mittausepävarmuus

Mittaustulosten ja laskenta-arvojen mittausepävarmuus määritetään lähteessä /2/ esite-tyillä laskentakaavoilla. Osalle mitattavista suureista mittausepävarmuus on annettu valmistajan tekemän kalibroinnin perusteella.

Rakennusfysikaalisessa olosuhdekokeessa mitattavien ja laskettavien suureiden epävarmuudet ovat seuraavat:

- yksittäiset lämpötilat $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$
- lämpötilakeskiarvot $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- ilman suhteellinen kosteus $\pm 2,0 \text{ RH } \%$
- ilman vesihöyrypitoisuus $\pm 0,05 \dots 0,5 \text{ g/m}^3 \text{ } (-20 \dots +20 \text{ }^\circ\text{C})$
- paine-ero rakenteen yli $\pm 1,0 \text{ Pa}$
- ilman virtausnopeus $\pm 0,1 \text{ m/s}$
- ilman tilavuusvirta $\pm 0,1 \text{ l/min}$
- kosteusvirta $\pm 5,0 \text{ g/vrk}$
- kokonaislämmitysteho $\pm 0,1 \text{ W}$
- materiaalien kosteuspitoisuus $\pm 1,0 \text{ paino-}\%$

Joissakin kokeissa paine-eron epävarmuus oli ± 2 Pa.

Rakenneominaisuuksien (K , W_v ja U) ja materiaaliominaisuuksien (ℓ , δ ja λ) epävarmuus on yleensä n. ± 5 % koetuloksesta varmuuskertoimella 2, jos kokeessa säädetään vain yhtä suuretta kerrallaan (paine-eroa, vesihöyrypitoisuuseroa tai lämpötilaeroa). Rakennusfysikaalisessa olosuhdekokeessa tulosten epävarmuus on suurempi, koska kaikkia olosuhdetekijöitä säädetään samanaikaisesti.

2.8 Laitteiston ominaisuudet

TTKK:n rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa on monia ominaisuuksia, jotka yhdessä tekevät siitä tarkan, tehokkaan ja monipuolisen koelaitteiston. Näitä ominaisuuksia ovat mm.:

- kokeissa hallitaan kaikkia sisä- ja ulkoilman olosuhteita yhtäaikaan
- rakenteita voidaan testata todellista tilannetta vastaavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa (esim. ulkoilman RH voidaan säätää todellista vastaavaksi myös pakkasen puolella)
- kaikki säädettävät olosuhdearvot voidaan asettaa vapaasti säätöalueen sisällä
- kaikki mittaukset ja säädöt tapahtuvat automaattisesti ja nopeasti tietokoneen avulla
- kokeessa voidaan mitata rakenteeseen diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvät kosteusvirrat erikseen
- rakenteita voidaan mitata vakio-olosuhteissa tai olosuhteita voidaan vaihdella syklisesti
- laitteiston tiiviiden ja elementin asennustekniikan ansiosta ilman virtaus tapahtuu tutkittavan rakenteen läpi hallitusti
- tutkimusaukon koko on suuri, jolloin koerakenteessa tapahtuvat samat ilmiöt kuin todellisissa rakenteissakin (esim. rakenteen sisäinen konvektio)
- laitteiston säätö- ja mittausjärjestelmiä voidaan lisätä ja vaihtaa tarpeen mukaan
- laitteistoa voidaan tarvittaessa kääntää, jolloin seinä-, ylä- ja alapohjarakenteet voidaan testata oikeassa asennossa
- laitteiston rakentamisen yhteydessä kehitettyjä säätö- ja mittausjärjestelmiä voidaan käyttää muidenkin laboratoriotutkimusten koejärjestelyissä

Olosuhteiden säätöalueet

Säädettäville suureille voidaan määritellä karkealla tarkkuudella seuraavat säätöalueet:

- | | |
|-----------------|--------------|
| • Sisälämpötila | 0...+60 °C |
| • Ulkolämpötila | -40...+20 °C |
| • Sisäkosteus | 20...80 % RH |

- Ulkokosteus 50...95 % RH
- Paine-ero -50...+50 Pa

Yksittäisen olosuhteen säätöalue vaihtelee jonkin verran muiden olosuhdetekijöiden valinnasta ja rakenteen ominaisuuksista riippuen. Varsinkin paine-eron säätöalue vaihtelee huomattavasti rakenteen tiiveyden mukaan. Esim. pelkästä mineraalivillasta tai puukuitueristeestä tehdyille eristelevylle laitteistolla ei saada juurikaan paine-eroa aikaiseksi, koska ilmapumppujen tehoa ei ole mitoitettu näin harvoja ainekerroksia varten.

3 Laitteistolla tehdyt kokeet

Uudella koelaitteistolla aloitettiin puurunkoisten seinärakenteiden tutkimukset syksyllä 1997. Näissä kokeissa haluttiin selvittää höyrynsulun tarpeellisuutta seinärakenteissa ja paine-eron vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Tutkimuksen yhteydessä keskityttiin kahteen seinärakennetyyppiin: höyrynsuluttomaan puukuitueristeiseen seinään ja höyrynsululliseen mineraalivillaeristeiseen seinään.

Koelaitteistolla tehtiin täysimittainen olosuhdekoe 8:lle erilaiselle seinärakenteelle. Kokeet tehtiin 9/1997 ja 12/1998 välisenä aikana. Mittaukset, säädön ohjaukset ja koeajat vaihtelivat eri kokeissa jonkin verran sitä mukaa, kun tiedot ja kokemukset laitteiston toiminnasta lisääntyivät. Olosuhteiden säädöt saatiin kaikissa kokeissa kuitenkin nopeasti tavoitearvojen mukaisiksi, joten koeseinien kosteusteknistä toimintaa voitiin vertailla luotettavasti keskenään.

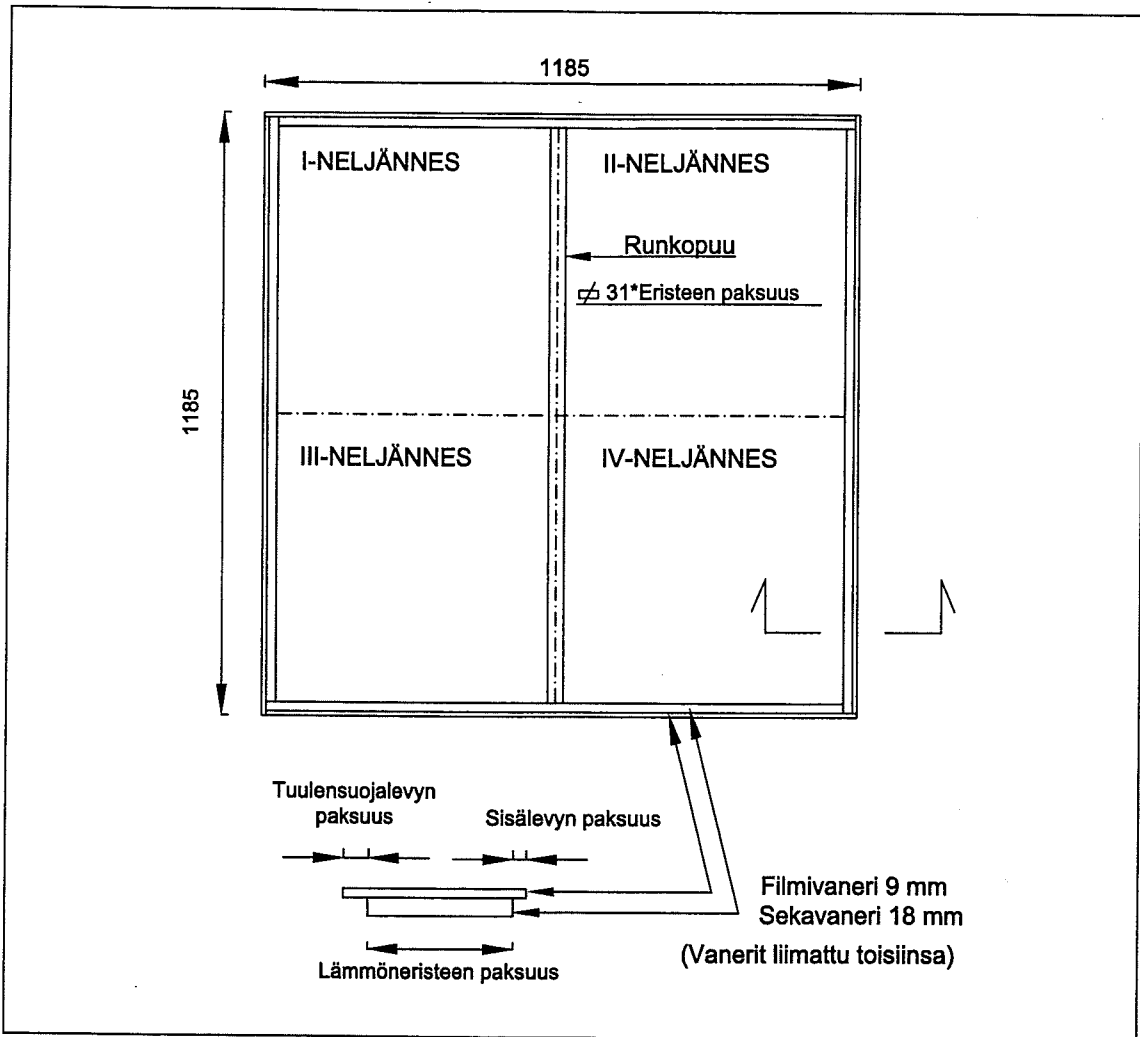
3.1 Koe-elementtien rakentaminen

Tutkittavat seinärakenteet koottiin 9 mm filmivanerista valmistettuihin kehyksiin ilma- ja kosteushäviöiden eliminoimiseksi. Kehysten koko oli $1185 \times 1185 \text{ mm}^2$ ja paksuus koeseinästä riippuen 176 tai 224 mm. Koe-elementin keskelle asennettiin 31 mm levyinen runkopuu ja reunoille 18 mm levyiset sekavanerit. Runkopuun kummallekin puolelle jäi eristetilat, joiden leveys oli 550 mm (kuva 3.1).

Elementit koottiin yleensä siten, että sisälevy ja ilman-/ höyrynsulku asennettiin ensin kiinni kehyksen sisäreunaan. Tämän jälkeen asennettiin lämmöneristeet ja tuulensuojalevy. Sisälevy, ilman-/ höyrynsulku sekä tuulensuojalevy tiivistettiin kehyksessä oleviin huullocksiin silikonilla. Kaikki koe-elementteihin laitettut materiaalit punnittiin ennen koetta.

Käytetyt eristeet ja tuulensuojalevyt olivat kokeen alussa joko kuivia (RH 35 %, RH 55 %) tai kosteita (RH 85 %). Osaan koeseinistä tehtiin myös ilman-/ höyrynsulkuun ja sisälevyyn reikiä sekä saumakohta runkopuun kohdalle. Rakenteiden sisäpinnat olivat pinnoittamattomia. Kaikissa kokeissa käytettiin lisäksi ulkoverhouksena 22 mm vaaka-paneelista koottua seinää, joka kiinnitettiin runkopuuhun ruuveilla.

Liitteessä II on esitetty valokuvia koe-elementin valmistuksesta.



Kuva 3.1. Koe-elementtien rakennekuva.

3.2 Mittausanturien sijainti

Kokeissa oli mukana erilaisia lämpötila-antureita seuraavasti:

- pinta-antureita sisäsuojalevyssä 5 kpl
- ilma-antureita sisällä 5 kpl
- pinta-antureita rakenteen sisäpinnassa 5 kpl
- pinta-antureita tuulensuojalevyn ulkopinnassa 5 kpl
- pinta-antureita ulkoverhouksen sisäpinnassa 5 kpl
- pinta-antureita ulkoverhouksen ulkopinnassa 5 kpl
- ilma-antureita ulkona 5 kpl
- pinta-antureita ulkosuojalevyssä 5 kpl
- metallivaippa-antureita rakenteessa 5 – 6 kpl
- ilma-antureita pakkahuoneessa 5 kpl
- metallivaippa- antureita kostutinastioissa 2 kpl

Pinta-anturit sijoitettiin koekappaleeseen siten, että koe-elementin kulmiin ja keskelle tuli yksi anturi. Kulmiin tulevat anturit kiinnitettiin 150 mm etäisyydelle koe-elementin sivuista. Ilma-anturit ja suojalevyjen pinta-anturit sijoitettiin vastaaville kohdille koe-

elementin ulkopuolelle. Ilma-anturit sijaitsivat suojalevyjen ja rakenteen pintojen välissä 150 mm etäisyydellä kummastakin pinnasta. Rakenteen sisälle asennetut lämpötila-anturit sijaitsivat yleensä runkopuun vieressä tai elementin reunojen lähellä.

Muita mittaustureita ja -laitteita oli kokeissa seuraavasti:

- ilmanvirtausantureita sisällä, ulkona ja tuuletusraossa yht. 3 kpl
- kosteusantureita sisällä, ulkona, pakkahuoneessa ja tasauskammiossa yht. 4 kpl
- kosteusantureita + lämpötila-antureita rakenteen sisällä 7 – 8 kpl
- paine-erolähtimiä rakenteen yli vallitsevan paine-eron mittaamiseen 1 – 3 kpl
- paine-erolähtetin ilmaletkun tilavuusvirran mittaamiseen 1 kpl
- laminaariputket ilmaletkun tilavuusvirran mittaamiseen 4 kpl
- punnitusanturi sisäkostuttimen painon mittaukseen 1 kpl

Rakenteen sisään asennettiin kosteusantureita (Vaisala HMP233), joilla mitattiin sekä lämpötilaa että suhteellista kosteutta (RH). Anturit sijoitettiin yleensä sisäverhouksen ja tuulensuojalevyn viereen rakenteen eristetilaan. Tuuletusrakoon asennettiin ilmanvirtaus- ja kosteusanturit keskelle koekappaletta. Sisä- ja ulkoilmassa olevat ilmanvirtaus- ja kosteusanturit sijaitsivat suojalevyjen ja rakenteen pintojen välissä 150 mm etäisyydellä kummastakin pinnasta. Nämäkin anturit sijaitsivat edestä katsoen rakenteen keskellä.

Mittausturit asennettiin rakenteen sisälle ennen tuulensuojalevyn kiinnittämistä. Anturien johdot vietiin tuulensuojalevystä läpi ja reiät tiivistettiin silikonilla. Koe-elementin kokoaminen ja rakenteeseen sijoitettujen anturien asennus tapahtuivat siis yhtäaikaan.

Liitteessä V on esitetty koe-elementteihin kiinnitettyjen anturien tarkat sijainnit kussakin kokeessa.

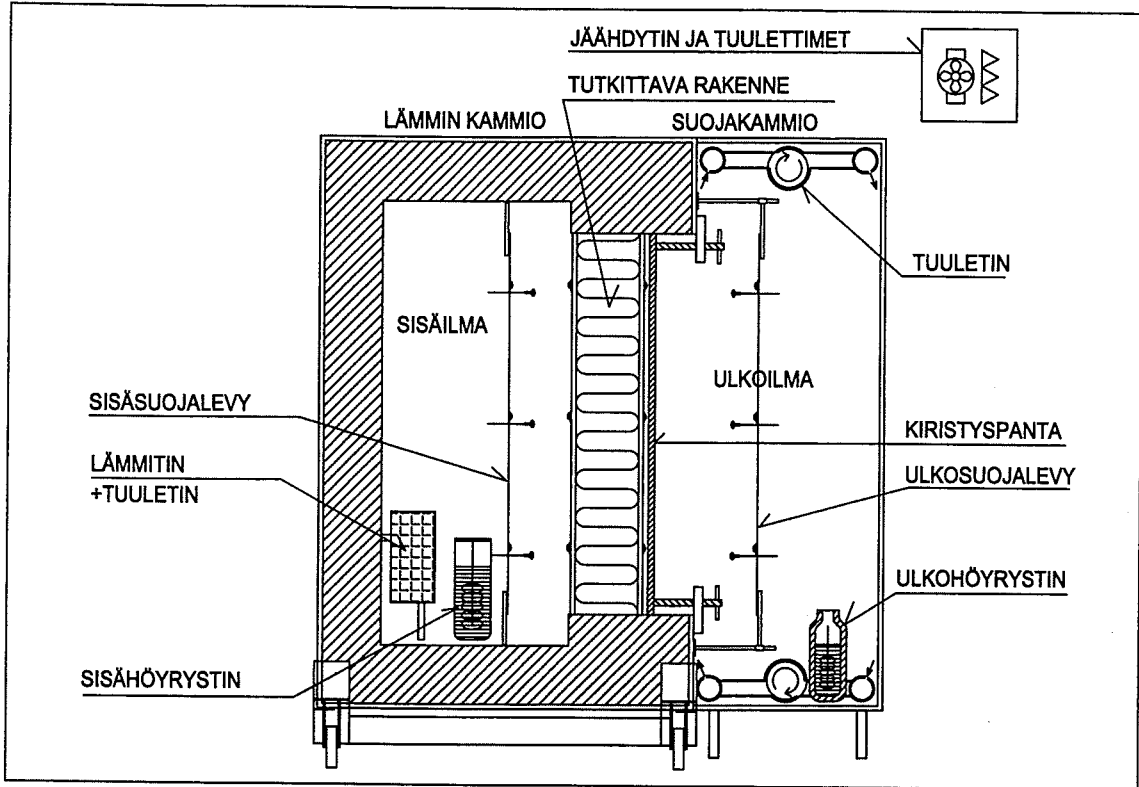
3.3 Koe-elementin asennus

Ennen koe-elementin asennusta sisäsuojalevy asetettiin lämpimän kammion sisäpuolelle ja kokeessa tarvittavat mittausturit kiinnitettiin siihen. Lisäksi sisäpuolella oleva kostutusastia täytettiin vedellä ja sen suuaukko säädettiin sopivan suuruiseksi.

Ennen asennusta koe-elementti punnittiin kokonaisuudessaan. Punnituksen jälkeen elementti nostettiin tutkimusaukkoon ja keskitettiin keskelle aukkoa. Koe-elementti tiivistettiin tutkimusaukon reunaan täyttämällä asennusrako polypropeenieristeellä ja teippaamalla raon reunat ilmastointiteipillä ulkopuolelta. Eriste asetettiin asennusrakoon tasaisesti siten, ettei haitallisia konvektiovirtauksia pääsyt syntymään. Tämän jälkeen koe-elementti kiristettiin tutkimusaukon laippoihin kiristyspannan avulla. Lopuksi koekappaleen ulkopintaan kiinnitettiin ulkoverhous.

Ulkosuojalevy antureineen kiinnitettiin lämpimän kammion ulkopuolelle. Suojakammiossa oleva kostutusastia täytettiin lämpimällä vedellä ja suojakammio siirrettiin lämpimän kammion viereen. Kuvassa 3.2 on esitetty tutkittavien seinärakenteiden koejärjestely rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa.

Liitteessä III on esitetty valokuvia koe-elementin asennuksesta lämpimän kammion tutkimusaukkoon.

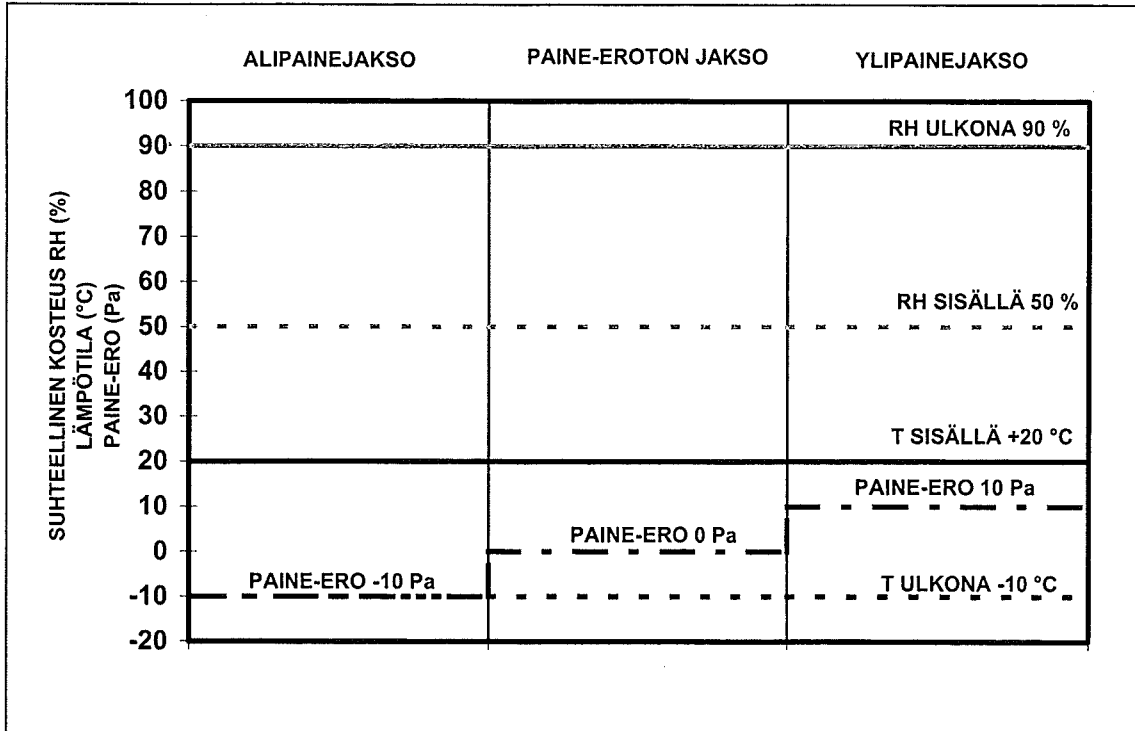


Kuva 3.2. Seinärakennekokeiden koejärjestely rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa.

3.4 Koeolosuhteet

Kaikissa kokeissa säädettävien olosuhteiden tavoitearvot olivat samat: sisällä lämpötila oli $+20\text{ °C}$ ja suhteellinen kosteus 50 \% RH (suositeltavat sisäolosuhteet), ulkona lämpötila oli -10 °C ja suhteellinen kosteus 90 \% RH . Ulkoilman olosuhteiksi valittiin talviolosuhteet, koska tällöin höyrynsulun tarve rakenteissa korostuu.

Seinärakenteita tutkittiin kolmessa erilaisessa paine-erotilanteessa. Ensimmäisessä jaksossa paine-ero rakenteen yli oli -10 Pa (sisällä alipaine), toisessa jaksossa 0 Pa ja kolmannessa jaksossa $+10\text{ Pa}$ (sisällä ylipaine) (kuva 3.3). Kunkin paine-erajakson pituus oli n. 9 vrk, jolloin kokonaiskoeaika oli pääsääntöisesti n. 27 vrk. Selvästi lyhyempi koeaika oli ainoastaan koeseinällä 7 (n. 9 vrk), koska tämän rakenteen kosteustekninen toiminta saatiin selville lyhyemmässä ajassa. Jokaisen kokeen osalta tarkemmat koeajat on ilmoitettu liitteessä VI.



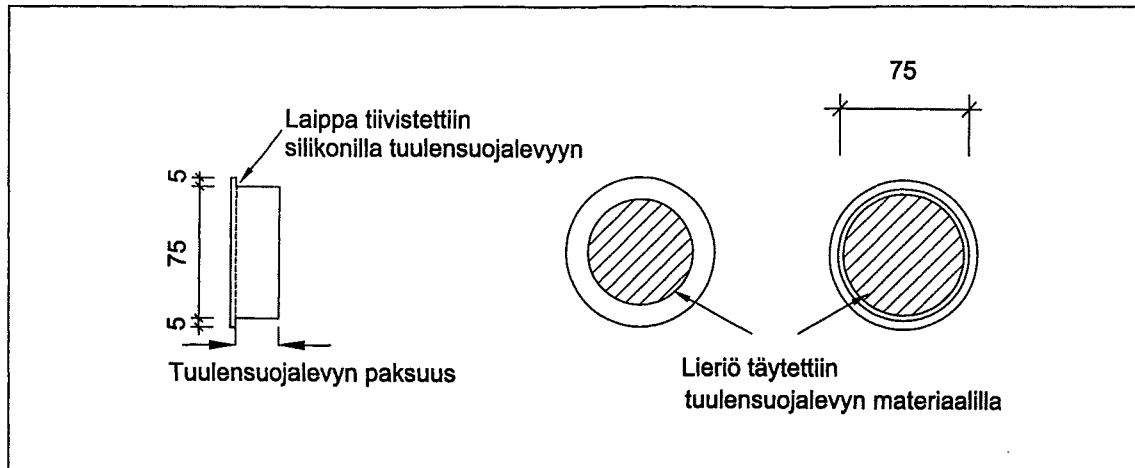
Kuva 3.3. Periaatekuva kokeen kulusta ja säädetyistä tavoitearvoista.

3.5 Rakennenäytteiden ottaminen ja visuaaliset havainnot

Kokeen alussa ja jokaisen paine-erojakson loputtua seinärakenteista otettiin rakennenäytteitä tuulensuojalevystä ja sen takana olevasta eristekerroksesta. Tuulensuojalevyn takana oli lisäksi ohuita (40 mm × 40 mm × 2 mm) männystä tehtyjä puupaloja, jotka vaihdettiin samassa yhteydessä, kun rakennenäytteitä otettiin. Näytteiden ottoa ja puupalojen asennusta varten porattiin ulkolevyyn Ø 75 mm reiät.

Reiät tiivistettiin kuvan 3.4 mukaisilla tulpilla. Tulpat valmistettiin tuulensuojalevynä käytettävästä materiaalista, joten ne eivät muuttaneet rakenteen tiiveyttä näytteenottokohdassa. Puupaloja sijoitettiin kahteen näytteenottoreikään kolme kappaletta kumpaankin. Näytteenottoreikien sijainnit rakenteissa on esitetty liitteessä V.

Rakennenäytteistä ja puupalloista mitattiin kosteuspitoisuudet punnitus-kuivaus-punnitus –menetelmällä. Tuloksia verrattiin RH –antureista saatuihin kosteusprosentteihin. Näytteenoton yhteydessä tehtiin lisäksi visuaalisia havaintoja tuulensuojan taakse mahdollisesti kerääntyneestä jäädä eli esiintyikö rakenteessa kondenssia.



Kuva 3.4. Tuulensuojalevyn näytteenottorei'issä käytetyt tulpat.

Kokeen jälkeen koe-elementti punnittiin ensin kokonaisena ja sen jälkeen eri materiaa-
likerrokset punnittiin vielä erikseen. Punnitusta haittasi mm. rakenteessa olleiden mitta-
usanturien johdot sekä eristeen ja tuulensuojalevyn jäätyminen toisiinsa kiinni osassa
rakenteita. Koe-elementin ja rakennusmateriaalien punnituksesta saadut tulokset ovat-
kin enemmän suuntaa antavia.

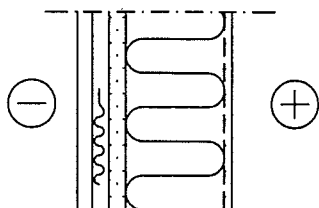
3.6 Tutkitut seinärakenteet

Koelaitteistolla tutkittujen kahdeksan seinärakenteen rakenneleikkaukset on esitetty
kuvassa 3.5 (ks. myös liite V).

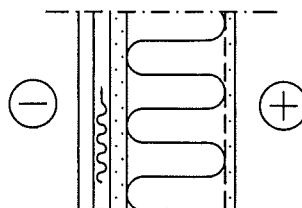
Lämmöneristeiden ja tuulensuojalevyjen lähtökosteudet olivat koeseinissä 1, 3, 5 ja 7
RH 35 %, koeseinissä 2 ja 4 RH 85 % ja koeseinissä 6 ja 8 RH 55 %. Sisälevyt olivat
koko ajan samassa lähtökosteudessa (RH oli n. 30...40 %). Lähtökosteudella tarkoite-
taan tässä yhteydessä materiaalin huokosilman suhteellista kosteutta.

Koeseinissä 2, 4 ja 6 tehtiin runkopuun vasemmalle puolelle 3 kappaletta \varnothing 3,5 mm:n
reikiä, jotka ulottuivat sekä sisälevyn että ilman-/ höyrinsulun läpi. Runkopuun oikealle
puolelle tehtiin vastaavat reiät pelkästään ilman-/ höyrinsulun läpi. Näissä koeseinissä
sisälevyyn ja ilman-/ höyrinsulkuun tehtiin myös sauma runkopuun kohdalle. Sisälevyn
saumaan laitettiin tasoite ja ilman-/ höyrinsulku limitettiin 200 mm, mutta saumoja ei
teipattu. Koeseinässä 8 tehtiin ainoastaan runkopuun vasemmalle puolelle 6 kappaletta
 \varnothing 5,0 mm:n reikiä, jotka ulottuivat sekä sisälevyn että ilmansulun läpi. Muut koeseinät
olivat ehjiä rakenteita.

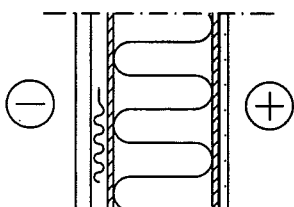
Reikien sijainti koe-elementeissä on esitetty tarkemmin liitteessä V.

KOESEINÄT 1 JA 2

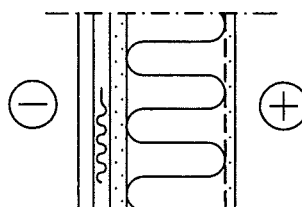
Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
 Tuuletusväli 25mm
 Huokoinen kuitulevy 25mm
 Puukuitueriste 145mm
 Bitumipaperi
 Kipsilevy 13mm

KOESEINÄT 3 JA 4

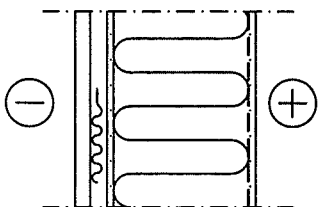
Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
 Tuuletusväli 25mm
 Kova mineraalivilla 30mm
 Mineraalivilla 145mm
 Höyrynsulku, PE 0,2mm
 Kipsilevy 13mm

KOESEINÄ 5

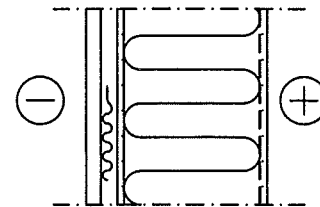
Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
 Tuuletusväli 25mm
 Kuusivaneri 9mm, 3 ply
 Puukuitueriste 145mm
 Kuusivaneri 9mm, 3 ply
 Bitumipaperi
 Kipsilevy 13mm

KOESEINÄ 6

Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
 Tuuletusväli 25mm
 Huokoinen kuitulevy 25mm
 Puukuitueriste 145mm
 Höyrynsulku, PE 0,2mm
 Kipsilevy 13mm

KOESEINÄ 7

Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
 Tuuletusväli 25mm
 Huokoinen kuitulevy 12mm
 Mineraalivilla 2*100mm
 Rakennuspaperi
 Huokoinen kuitulevy 12mm

KOESEINÄ 8

Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
 Tuuletusväli 25mm
 Huokoinen kuitulevy 12mm
 Puukuitueriste 200mm
 Rakennuspaperi
 Huokoinen kuitulevy 12mm

Kuva 3.5. Tutkittujen seinärakenteiden rakenneleikkaukset.

4 Koetulokset

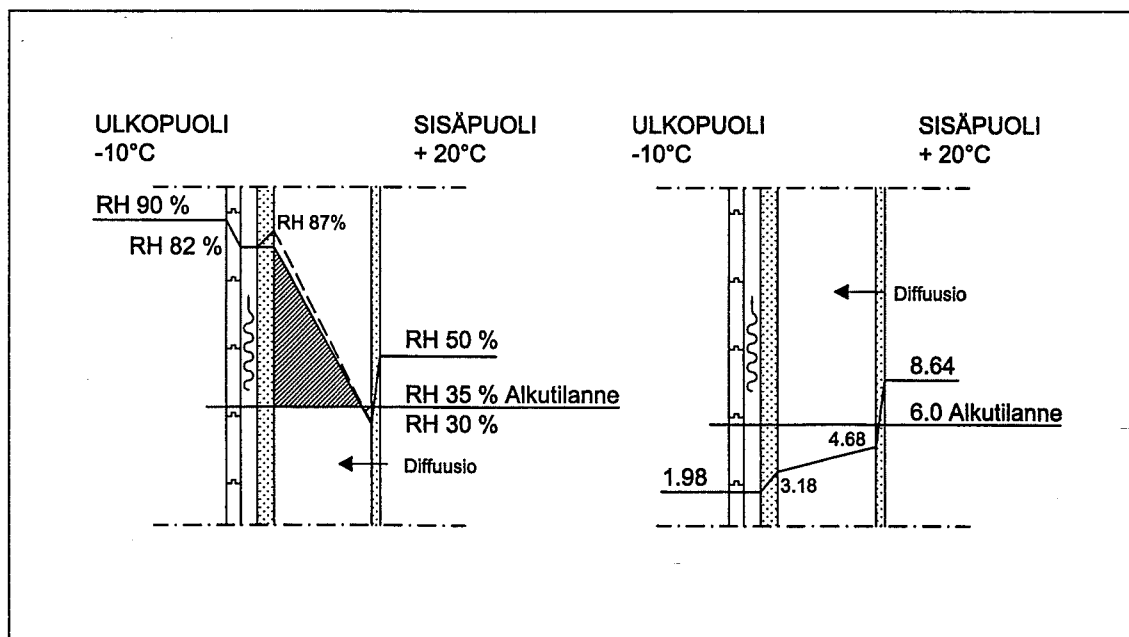
Saaduista koetuloksista on esitetty tässä yhteydessä ne arvot, jotka ovat rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta oleellisia. Kaikki seinäkokeissa saadut mittaustulokset ja niistä lasketut laskennalliset arvot on esitetty kunkin koejakson lopussa liitteessä V. Liitteessä IV on esitetty valokuvia tutkituista seinärakenteista.

4.1 Diffuusion ja rakennekosteuden vaikutus

Kuvissa 4.1...4.8 on esitetty tutkituista seinärakenteista mitatut huokosilman suhteelliset kosteudet (RH –prosentit) ja vesihöyrypitoisuudet kokeen lopussa ehjillä seinärakenteilla ja paine-erottoman jakson jälkeen reiällisillä rakenteilla. RH –käyrät on piirretty kuviin lineaarisina, mutta todellisuudessa huokosilman RH muuttuu eristetilassa hieman epälineaarisesti. Tämä johtuu ilman kyllästyskosteuden epälineaarisesta lämpötilariippuvuudesta. Mittaustulokset on otettu seinien yläosista. Seinämateriaalien kosteuspitoisuudet, jotka määritettiin rakennenäytteiden avulla, vastasivat myös mitattuja huokosilman suhteellisia kosteuksia.

Koeseinä 1

Koeseinässä 1 sisäpinnassa oli bitumipaperi ilmansulkuna, eristeenä oli puukuitueriste ja tuulensuojalevynä huokoinen kuitulevy (RH 35 %). Koeseinässä 1 huokostilan suhteelliset kosteudet ja vesihöyrypitoisuudet nousivat koko kokeen ajan kuitenkin loppua kohden hidastuen. Myös rakennenäytteiden ja puupalojen kosteudet olivat nousussa. Koeseinä 1 ei saavuttanut kokeen aikana stationääritilaa (kuva 4.1).



Kuva 4.1. Koeseinän 1 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m³).

Kuvassa 4.1 on esitetty katkoviivalla RH –prosenttien nousunopeuden perusteella arvioidut stationääritilanteen RH –prosentit.

Koeseinässä 1 tuulensuojalevy ja lämmöneriste olivat kuivan tuntuisia koko kokeen ajan (34,5 vrk) eikä tuulensuojalevyn taakse kondensoitunut vettä.

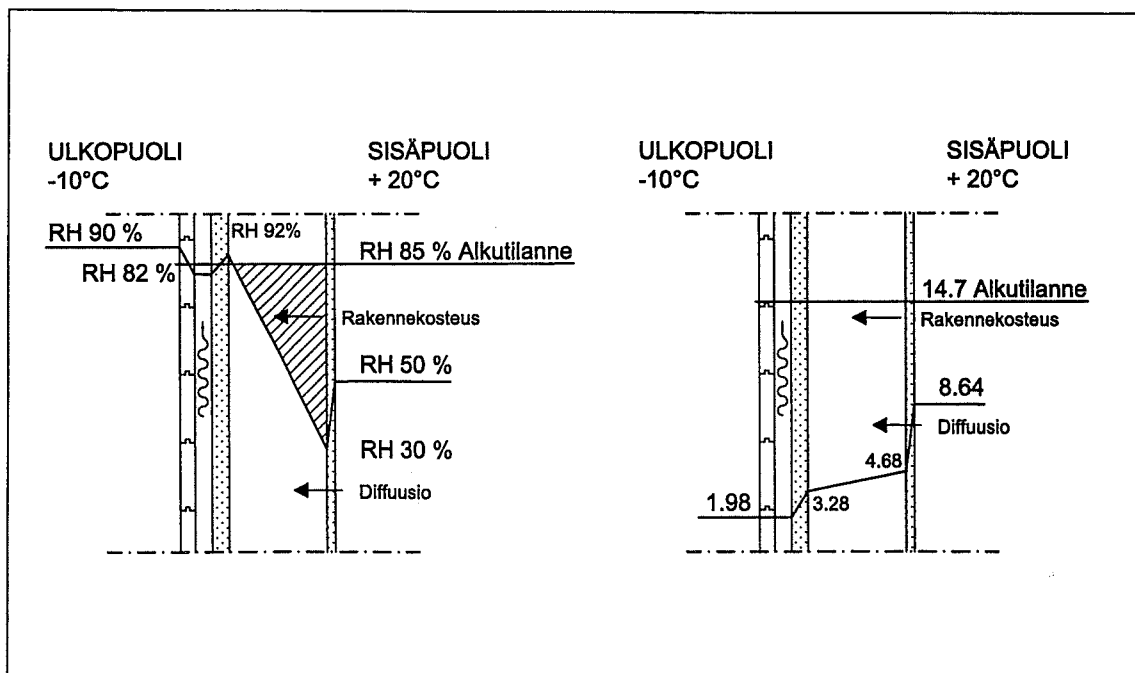
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuudet olivat kokeen lopussa n. 16 paino-%. Puupalojen kosteudet olivat n. 18 paino-%.

Koeseinä 2

Koeseinä 2 perustuu koeseinästä 1 siten, että puukuitueriste ja tuulensuojalevy oli esikostutettu (RH 85 %) ennen kokeen alkua. Stationääritila saavutettiin n. 14 vrk:n kuluttua ja vettä alkoi kondensoitua tuulensuojalevyyn n. 3 vrk:n kuluttua, kun RH –prosentit nousivat eristeen ulkopinnassa yli 90 % (kuva 4.2).

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa oli havaittavissa jään muodostumista jo alipainejakson jälkeen ja jään määrä lisääntyi koko kokeen ajan. Tuulensuojalevy sekä puukuitueristeen ulkopinta olivat kostean tuntuisia käteen koko kokeen ajan.

Lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuudet olivat jo paine-erottoman jakson jälkeen korkeat (n. 24 paino-%) ja ylipaine nosti niitä entisestään. Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuudet olivat koko kokeen ajan varsin korkeat (n. 24 paino-%). Myös puupalojen kosteudet olivat paine-erottoman jakson jälkeen korkeita (n. 22 paino-%).



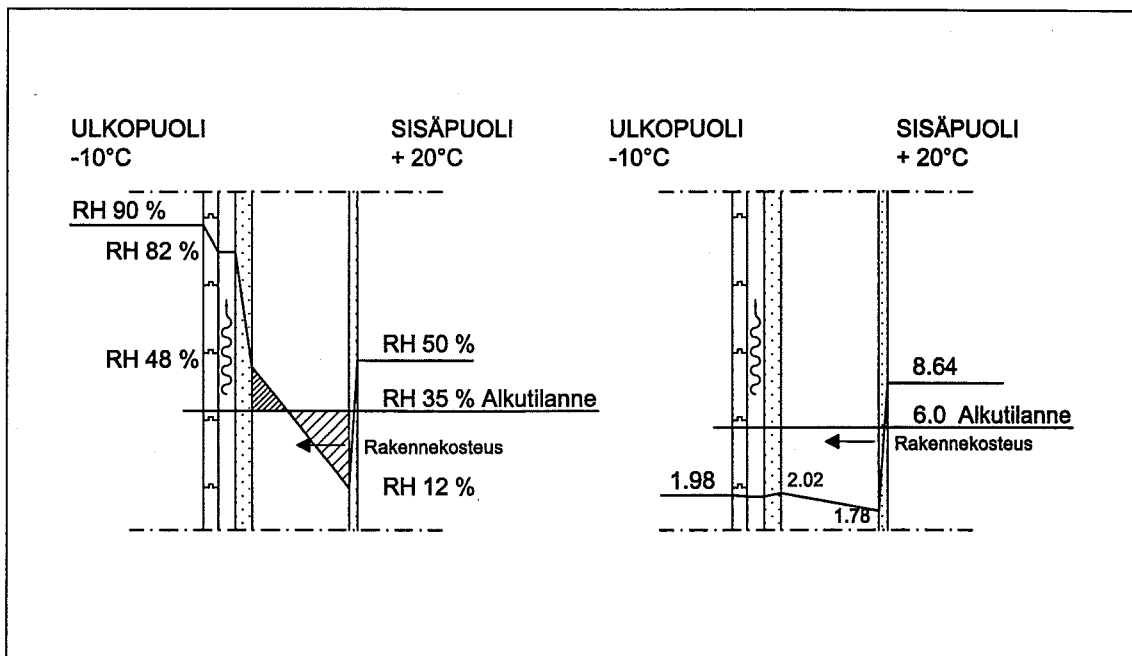
Kuva 4.2. Koeseinän 2 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m³).

Koeseinä 3

Koeseinä 3 oli muuten samanlainen kuin koeseinä 1, mutta lämmöneristeenä ja tuulensuojalevynä käytettiin mineraalivillaa (RH 35 %) ja rakenteen sisäpinnassa oli höyryn-sulkumuovi. Koeseinässä 3 stationääritila saavutettiin jo noin 2 vrk kuluttua kokeen aloittamisesta. RH -prosentit jäivät huomattavasti alhaisemmiksi kuin koeseinässä 1 sekä rakenteen sisä- että ulkopuolella (kuva 4.3).

Tuulensuojalevy ja lämmöneriste olivat kuivan tuntuisia koko kokeen ajan (27 vrk) eikä tuulensuojalevyn taakse kondensoitunut vettä.

Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuudet olivat hyvin alhaiset (n. 1 paino-%). Myös puupalojen kosteudet olivat alhaiset (n. 9 paino-%).



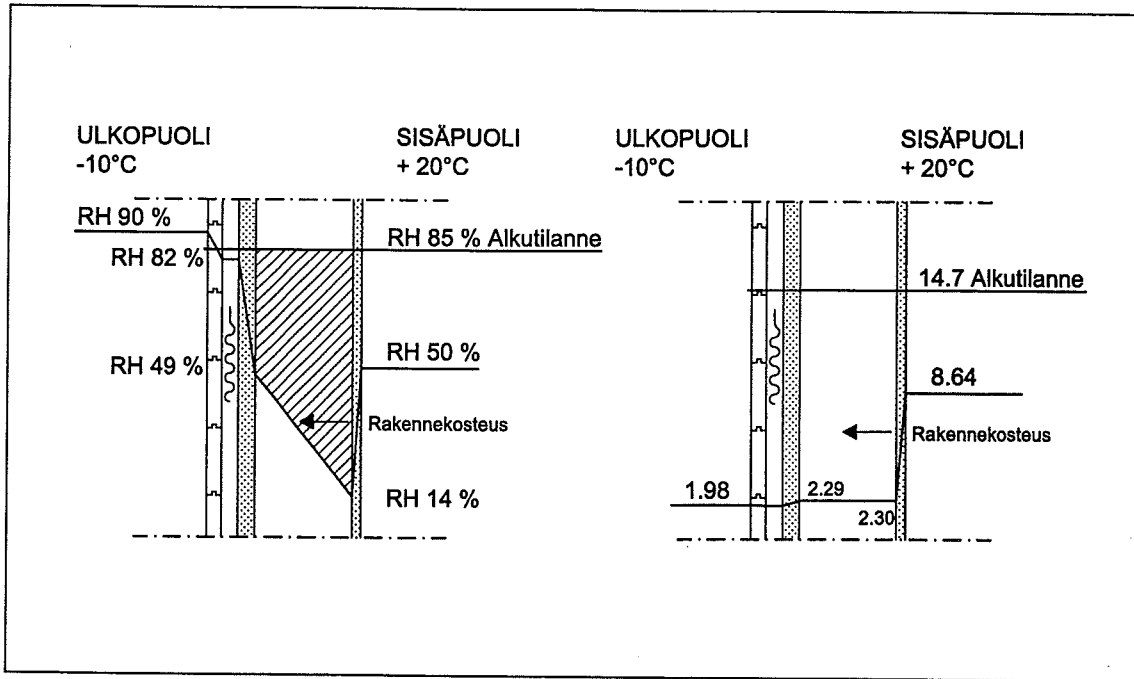
Kuva 4.3. Koeseinän 3 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m^3).

Koeseinä 4

Koeseinä 4 poikkesi koeseinästä 3 siten, että lämmöneriste ja tuulensuojalevy oli esikostutettu (RH 85 %) ennen kokeen alkua. Koeseinä 4 vastasi siis alkutilanteessa koeseinää 2. Tässä kokeessa stationääritila saavutettiin noin 16 vrk:n kuluttua, jonka jälkeen rakenteen RH -prosentit olivat samalla tasolla kuin koeseinässä 3 (kuva 4.4).

Vaikka lämmöneriste ja tuulensuojalevy oli esikostutettu, ne olivat kuivan tuntuisia jo alipainejakson jälkeen aina kokeen loppuun asti (27 vrk). Tuulensuojalevyn taakse ei myöskään muodostunut jäätä tai kondensoitunut vettä. Sen sijaan tuulensuojalevyn ulkopintaan muodostui jäätä lämpötila-anturien kiinnitykseen käytetyn teipin alle (ks. liite IV).

Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuudet olivat paine-erottoman jakson jälkeen alhaiset (n. 1 paino-%). Puupalojen kosteudet olivat paine-erottoman jakson jälkeen myös alhaiset (n. 11 paino-%). Kosteuspitoisuudet nousivat ylipaineen vaikutuksesta reikien lähellä.



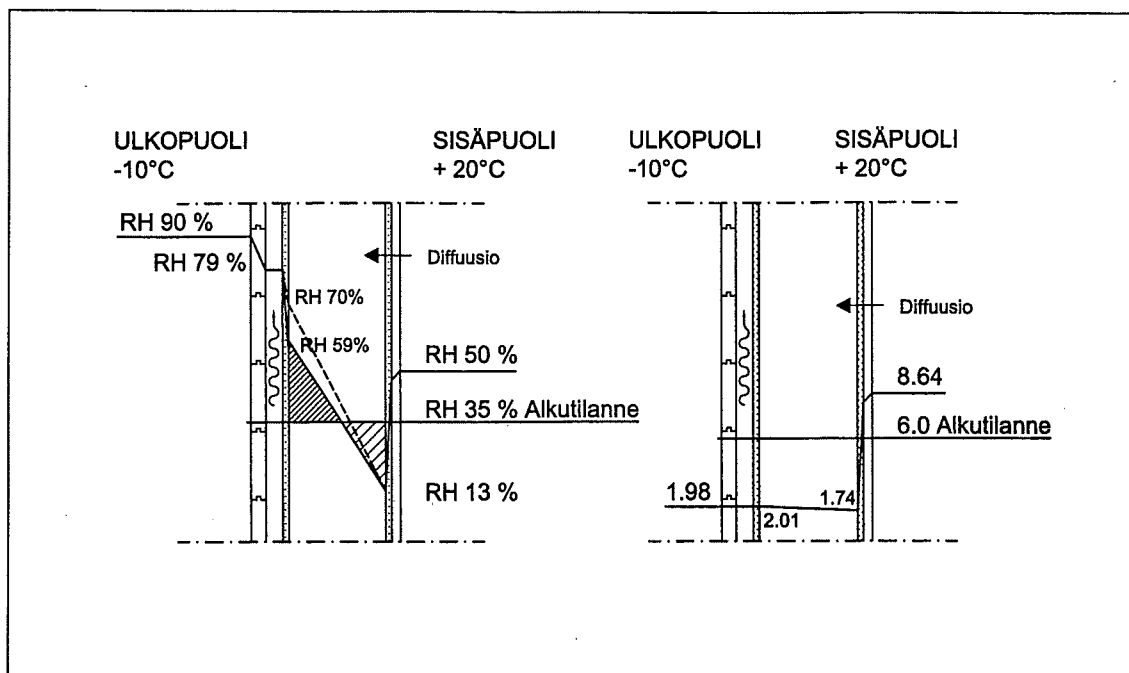
Kuva 4.4. Koeseinän 4 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m³).

Koeseinä 5

Koeseinässä 5 käytettiin erilaista sisälevyä ja tuulensuojalevyä muihin koerakenteisiin verrattuna. Rakenteen sisäpinnassa oli kipsilevyn ja bitumipaperin lisäksi 9 mm vanerilevy ja ulkopinnan tuulensuojalevynä käytettiin myös 9 mm vaneria. Eristeenä käytettiin puhallettavaa puukuitueristettä (RH 35 %). Suhteellisen kosteuden muutokset olivat hyvin samantapaisia kuin koeseinässä 1, mutta RH -prosentit kasvoivat rakenteessa vielä hitaammin. Koeseinä 5 ei myöskään saavuttanut kokeen aikana stationääritilaa (kuva 4.5). Kuvassa 4.5 on esitetty katkoviivalla RH -prosenttien nousun perusteella arvioidut stationääritilanteen RH -prosentit, jotka jäävät alhaisemmiksi kuin koeseinässä 1.

Tuulensuojalevy ja lämmöneriste olivat kuivan tuntuksia kokeen jälkeen (27 vrk) eikä tuulensuojalevyn taakse kondensoitunut vettä.

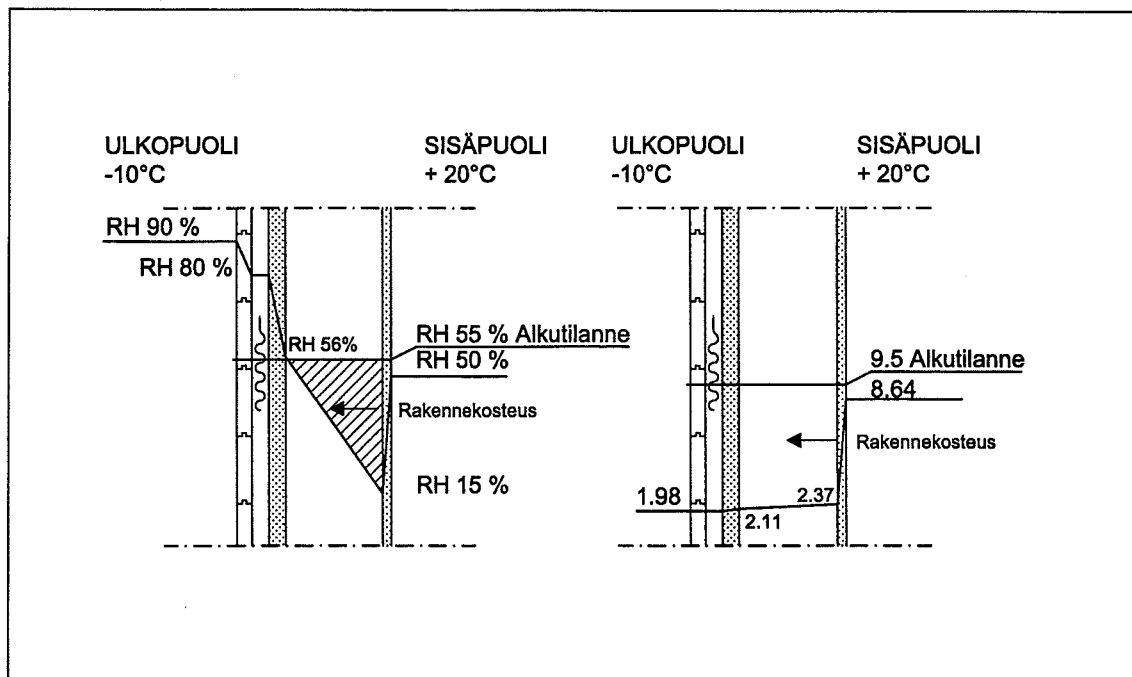
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus oli kokeen lopussa alhainen (n. 12 paino-%). Puupalojen kosteudet olivat niinkään alhaisia (n. 11 paino-%). Lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuus oli sen sijaan korkeampi (n. 19 paino-%).



Kuva 4.5. Koeseinän 5 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m^3).

Koeseinä 6

Koeseinässä 6 oli sisäpinnassa höyrynsulkumuovi, eristeenä puukuitueriste ja tuulensuojalevynä huokoinen kuitulevy. Eriste ja tuulensuojalevy olivat esikostutettuja (RH 55 %). Stationääritila saavutettiin 10 vrk:n kuluttua kokeen aloittamisesta ja rakenteen RH -prosentit jäivät alhaiselle tasolle (kuva 4.6).



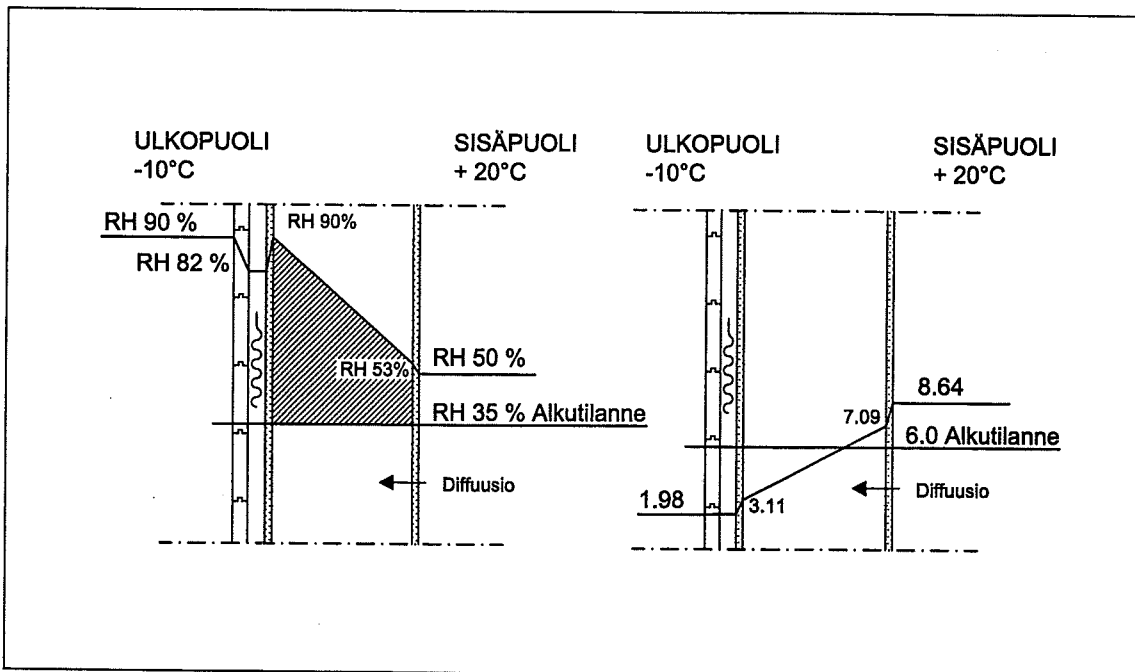
Kuva 4.6. Koeseinän 6 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m^3).

Koeseinässä 6 tuulensuojalevy ja lämmöneriste olivat kuivan tuntuisia koko kokeen ajan (26 vrk) eikä tuulensuojalevyn taakse kondensoitunut vettä.

Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuudet olivat paine-erottoman jakson jälkeen alhaiset (n. 12 paino-%). Puupalojen kosteudet olivat paine-erottoman jakson jälkeen myös alhaiset (n. 11 paino-%). Kosteuspitoisuudet nousivat ylipaineen vaikutuksesta reikien lähellä.

Koeseinä 7

Koeseinässä 7 sisälevynä oli huokoinen kuitulevy ja ilmansulkuna tavallinen rakennuspaperi, jolloin diffuusiolla siirtynyt kosteus määrä oli kokeessa huomattavasti suurempi. Eristeenä käytettiin mineraalivillaa ja tuulensuojalevynä huokoista kuitulevyä (RH 35 %). Koeseinässä 7 kosteuspitoisuudet saavuttivat stationääritilan n. 7 vrk kuluttua kokeen alusta, jonka jälkeen vesihöyryn kondensoituminen alkoi tuulensuojalevyn pintaan (kuva 4.7).



Kuva 4.7. Koeseinän 7 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m^3).

Tuulensuojalevyn pinta tuntui käteen kostealta alipainejakson jälkeen (3 vrk kokeen alusta), mutta pinnalla ei ollut jäätä. Paine-erottoman jakson jälkeen (6 vrk) pinnan kosteus oli entisestään lisääntynyt, mutta kondenssia ei ollut vielä havaittavissa. Ylipainejakson jälkeen (9 vrk) tuulensuojalevyn takana oli selkeä jääkerros lukuun ottamatta kaapeata kaistaa (n. 150 mm) rakenteen alaosassa.

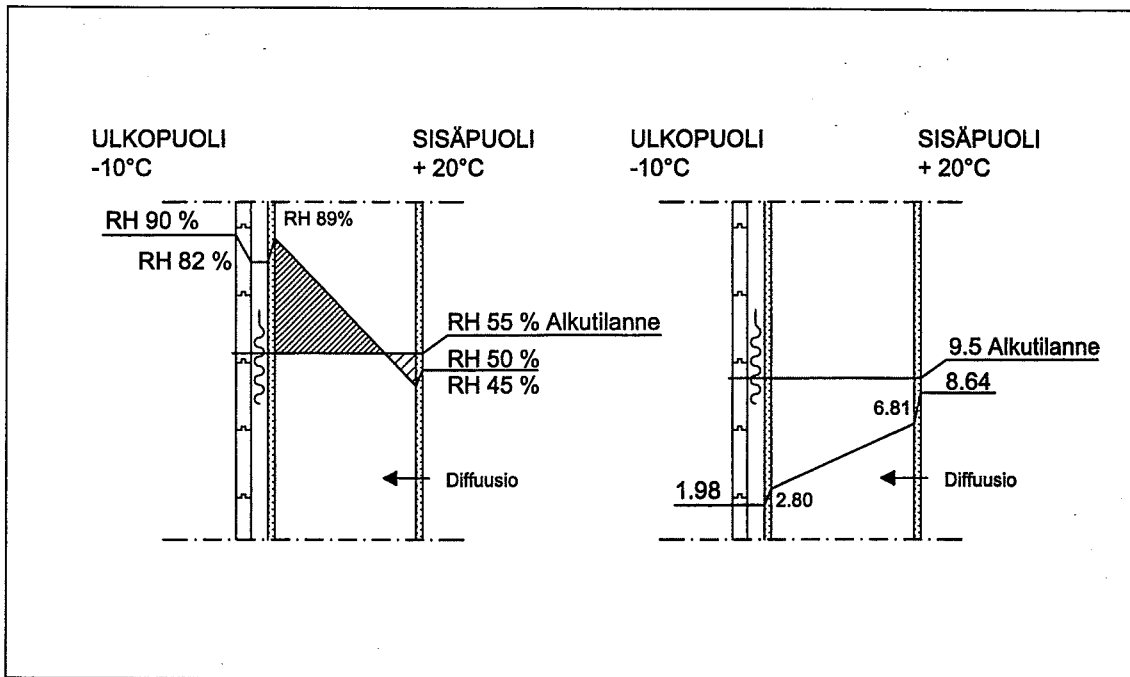
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus oli korkea kokeen jälkeen (n. 20 paino-%). Puupalojen kosteuspitoisuudet olivat vielä korkeammat: paine-erottoman jakson jälkeen n. 23 paino-% ja ylipainejakson jälkeen n. 28 paino-%.

Koeseinä 8

Koeseinä 8 oli rakenteeltaan muuten samanlainen kuin koeseinä 7, mutta eristeenä käytettiin mineraalivillan tilalla puukuitueristettä. Eriste ja tuulensuojalevy olivat esikostutettuja (RH 55 %). Koeseinässä 8 kosteuspitoisuudet saavuttivat stationääritilan n. 21 vrk kuluttua kokeen alusta, jonka jälkeen vesihöyryn kondensoituminen alkoi tuulensuojalevyn pintaan (kuva 4.8).

Rakenne oli kostean tuntuinen jo alipainejakson jälkeen, mutta jäätä alkoi näkyä tuulensuojalevyssä vasta paine-erottoman jakson jälkeen. Koska kondensoituminen alkoi paine-erottoman jakson aikana, ei ylipaineen aiheuttamalla kosteuskonvektiolla ollut vaikutusta koetulokseen. Kokeen loputtua puukuitueriste oli lähes täysin jäänyt kiinni tuulensuojalevyyn.

Lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspitoisuus oli hyvin korkea paine-erottoman jakson jälkeen (n. 32 paino-%). Puupalojen kosteudet olivat myös korkeat (n. 24 paino-%). Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus oli paine-erottoman jakson jälkeen n. 20 paino-%. Kosteuspitoisuudet eivät enää nousseet ylipaineen vaikutuksesta.



Kuva 4.8. Koeseinän 8 huokosilman suhteelliset kosteudet (RH %) ja vesihöyrypitoisuudet (g/m³).

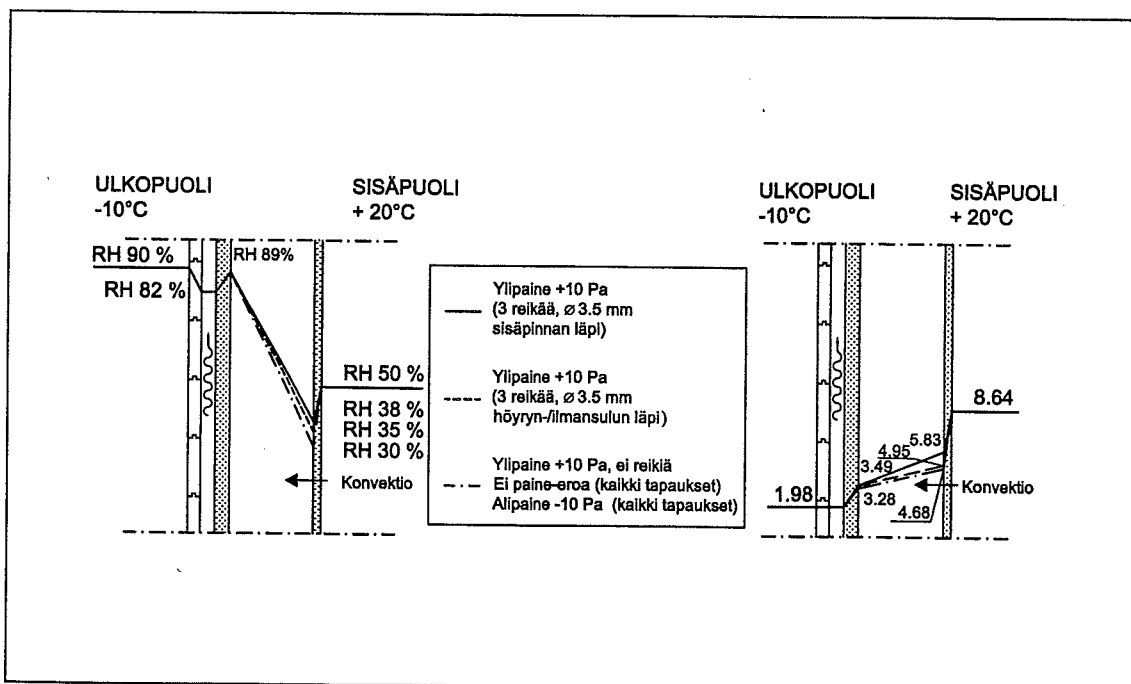
4.2 Konvektion vaikutus

Konvektion vaikutusta rakenteisiin selvitettiin poraamalla koeseiniin 2, 4, 6 ja 8 sisälevyyn ja ilman-/ höyrynsulkuun reikiä. Näissä seinissä sisälevyyn ja ilman-/ höyrynsulkukerrokseen tehtiin myös sauma runkopuun kohdalle (ks. luku 3.6 ja liite V).

Reikien vaikutusta läpäisevien ja tiiviiden seinien huokosilman RH -prosentteihin on tarkasteltu kuvissa 4.9...4.13. RH -käyrät on piirretty kuviin lineaarisina, mutta todellisuudessa huokosilman RH muuttuu eristetilassa hieman epälineaarisesti. Läpäisevillä seinillä tarkoitetaan tässä yhteydessä koeseiniä, joissa käytettiin ilmansulkuna bitumi-paperia tai rakennuspaperia. Tiiviissä seinissä rakenteen sisäpinnassa oli höyrynsulku-muovi.

Läpäisevien seinien koetulokset

Koeseinässä 2 eristeen ulkopinnassa oli korkea suhteellinen kosteus (RH 92 %) kaikissa paine-erotilanteissa. Ylipainetilanne nosti lähinnä sisäpinnan kosteuksia reikien lähellä. Niissä kohdissa, missä rakenne oli ehjä tai reiät olivat pelkästään ilmansulussa, ei sisäpinnan RH -prosentteissa tapahtunut ylipainejaksolla merkittäviä muutoksia. Ilmansulkuun ja sisälevyyn tehdyt saumat sekä sisälevyn kiinnitys runkopuuhun ilmansulun läpi eivät myöskään kasvattaneet RH -prosentteja (kuva 4.9).



Kuva 4.9. Koeseinän 2 huokosilman suhteellisten kosteuksien ja vesihöyrypitoisuuksien muutokset konvektion vaikutuksesta.

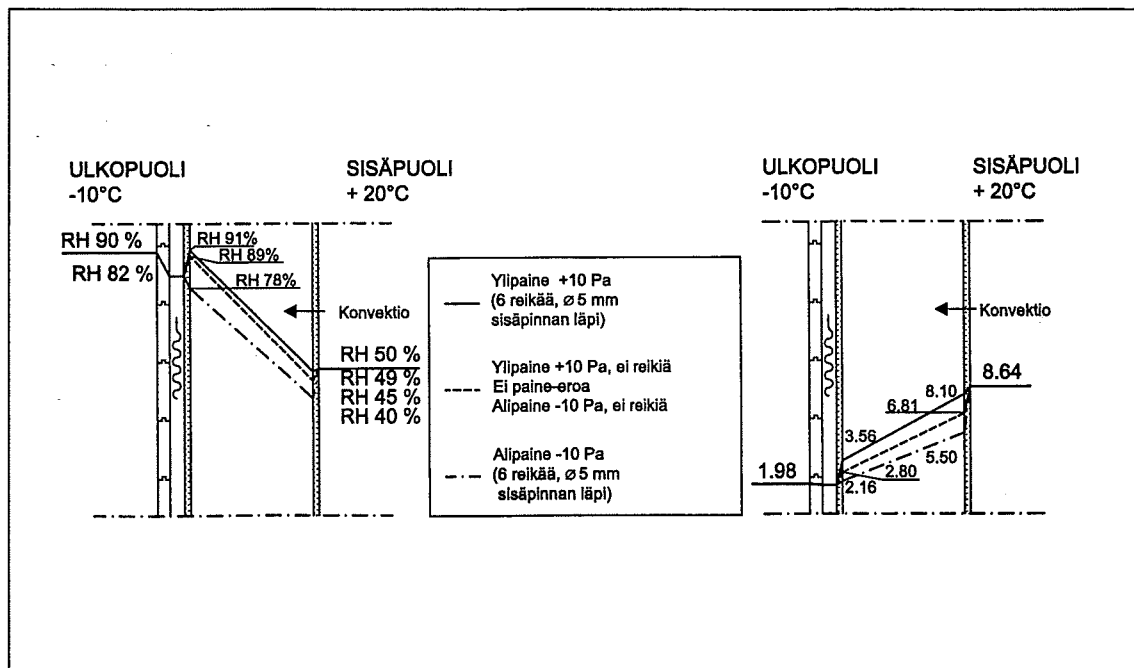
Ylipainejakson aikana puukuitueristeen ulkopinnan kosteuspitoisuudet nousivat n. 24 paino-%:sta n. 34 paino-%:iin siinä osassa rakennetta, jossa reiät ulottuivat koko sisäpinnan läpi. Puupalojen kosteudet käyttäytyivät samalla tavoin: ylipainejakson aikana

ne nousivat n. 22 paino-%:sta n. 29 paino-%:iin reikien ollessa sisäverhouksen läpi. Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus oli kokeen lopussa n. 24 paino-%. Materiaalien kosteuspitoisuudet olivat siis korkeat jo pelkän diffuusion ja rakennekosteuden vaikutuksesta ja konvektio sisältä ulos kasvatti niitä entisestään reikien lähellä. Ylipainetilanteen jälkeen puukuitueristeen kosteuspitoisuus oli saavuttanut hygroskooppisen alueen ylärajan rakenteen ulkopinnassa.

Koeseinä 8 oli tutkituista rakenteista kaikkein läpäisevin. Koeseinään 2 verrattuna siinä oli enemmän reikiä ja ne olivat pinta-alaltaan suurempia ($6 \times \varnothing 5$ mm). Lisäksi bitumi-paperin tilalla oli tavallinen rakennuspaperi ja sisälevynä huokoinen kuitulevy.

Tässä koeseinässä RH –prosentit nousivat jonkin verran myös rakenteen ulkopinnassa siirryttäessä alipaineesta ylipaineeseen: RH 78 % \rightarrow RH 91 % Alipainetilanteen RH –prosentti oli tosin vielä nousussa jakson lopussa, joten todellinen RH –prosenttien ero ali- ja ylipainetilanteen välillä on koetuloksia pienempi (kuva 4.10).

Puukuitueristeen ulkopinnan kosteuspitoisuus ei merkittävästi noussut ylipainetilanteessa reikien lähellä, koska se oli jo ennestään hyvin korkea (n. 32 paino-%). Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus oli kokeen lopussa n. 19 paino-%. Puupalojen kosteudet nousivat n. 25 paino-%:sta n. 30 paino-%:iin reikien ollessa sisäverhouksen läpi. Tässäkin kokeessa materiaalien kosteuspitoisuudet olivat korkeat jo pelkän diffuusion ja rakennekosteuden vaikutuksesta ja konvektio sisältä ulos kasvatti niitä entisestään reikien lähellä. Ylipainetilanteen jälkeen puukuitueristeen kosteuspitoisuus oli saavuttanut hygroskooppisen alueen ylärajan rakenteen ulkopinnassa.

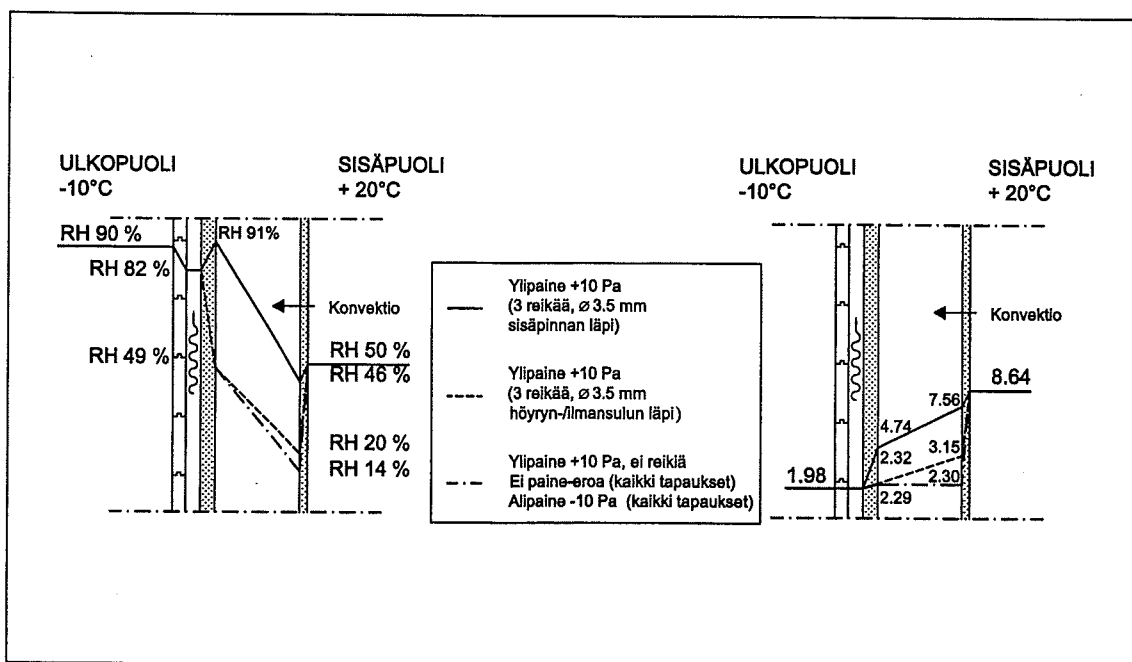


Kuva 4.10. Koeseinän 8 huokosilman suhteellisten kosteuksien ja vesihöyrypitoisuuksien muutokset konvektion vaikutuksesta.

Tiiviiden seinien koetulokset

Koeseinässä 4 ylipaine nosti mineraalivillan ulkopinnan RH -prosentin 91 %:iin, kun paine-erottoman jakson lopussa RH oli 48 % (kuva 4.11). RH -prosentin nousu oli hyvin nopeaa, sillä stationääritila saavutettiin jo 1 vrk:n ylipainejakson jälkeen (ks. kuva 4.13). Pelkkään höyrynsulkuun tehdyt reiät, teippaamaton sauma sekä sisälevyn kiinnitys runkopuuhun höyrynsulun läpi eivät nostaneet rakenteen RH -prosentteja merkittävästi ylipainetilanteessa.

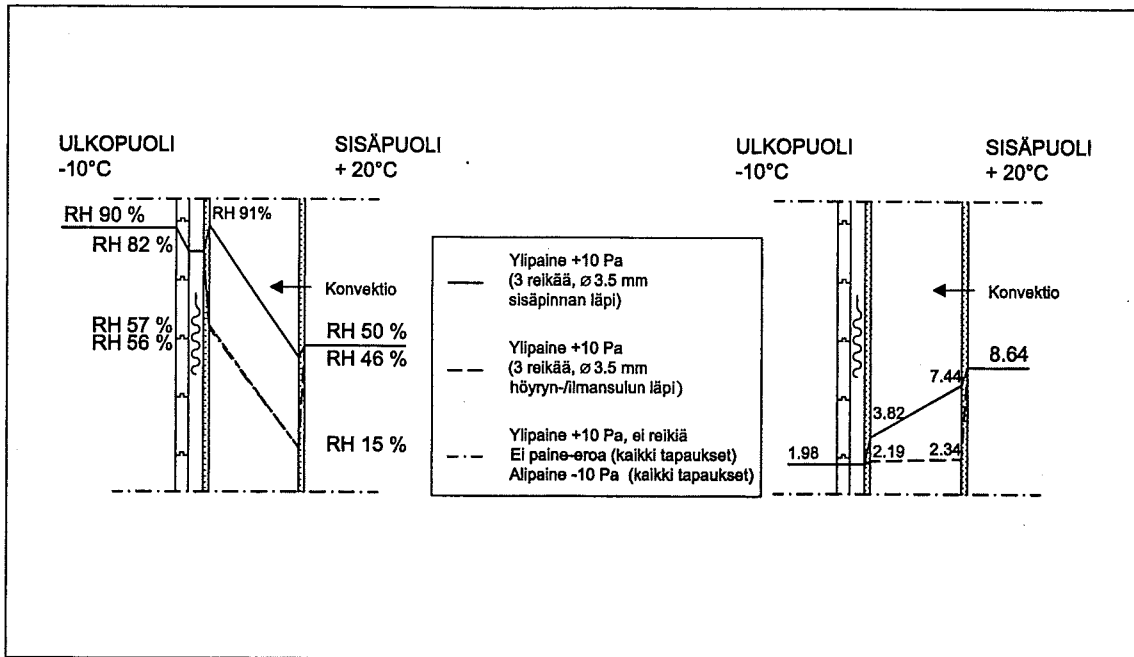
Ylipainejakson aikana tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen ulkopinnan kosteuspuite nousivat n. 1 paino-%:sta n. 3 paino-%:iin siinä osassa rakennetta, jossa reiät ulotuivat koko sisäpinnan läpi. Puupalojen kosteudet käyttäytyivät samalla tavoin: ylipainejakson aikana ne nousivat n. 11 paino-%:sta n. 16 paino-%:iin reikien ollessa sisäverhouksen läpi. Puupalojen kosteudet olivat kuitenkin edelleen alhaisemmat kuin läpäisevällä koeseinällä 2. Tässä kokeessa materiaalien kosteuspuite olivat siis alhaiset pelkän diffuusion ja rakennekosteuden vaikutuksesta, mutta konvektio sisältä ulos nosti niitä huomattavasti reikien lähellä.



Kuva 4.11. Koeseinän 4 huokosilman suhteellisten kosteuksien ja vesihöyrypitoisuuksien muutokset konvektion vaikutuksesta.

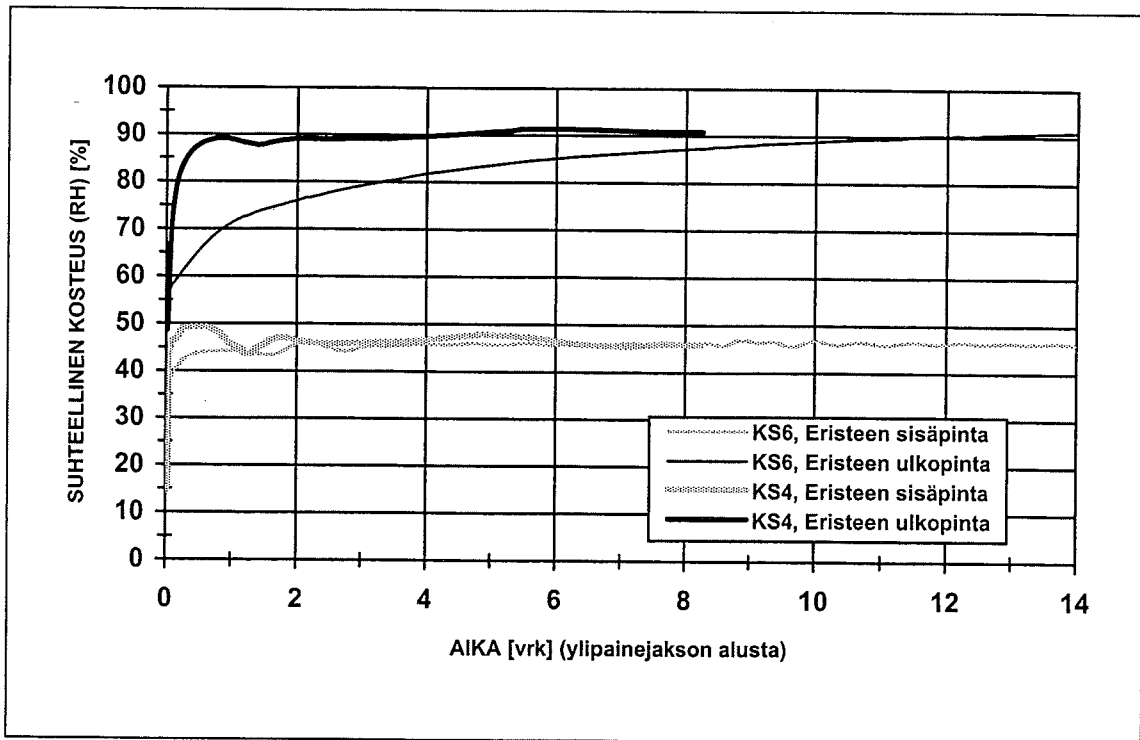
Koeseinä 6 oli tyypiltään samanlainen kuin koeseinä 4, mutta lämmöneristeenä oli käytetty puukuitueristettä. Tässä seinässä ylipaine nosti puukuitueristeen ulkopinnan RH -prosentin 91 %:iin, kun paine-erottoman jakson lopussa RH oli 56 % (kuva 4.12). RH -prosentin nousu oli sen sijaan hitaampaa kuin koeseinässä 4, sillä stationääritila saavutettiin n. 14 vrk:n ylipainejakson jälkeen (ks. kuva 4.13). Pelkkään höyrynsulkuun tehdyt reiät, teippaamaton sauma sekä sisälevyn kiinnitys runkopuuhun höyrynsulun läpi eivät nostaneet rakenteen RH -prosentteja merkittävästi ylipainetilanteessa.

Ylipainejakson aikana tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen ulkopinnan kosteusprosentit nousivat n. 12 paino-%:sta n. 23 paino-%:iin siinä osassa rakennetta, jossa reiät ulottuivat koko sisäpinnan läpi. Puupalojen kosteudet käyttäytyivät samalla tavoin: paine-erottoman jakson jälkeen ne olivat n. 11 paino-% ja ylipainejakson jälkeen n. 21 paino-% reikien ollessa sisäverhouksen läpi. Samoin kuin koeseinässä 4 tässäkin koeksessa materiaalien kosteusprosentit olivat alhaiset pelkän diffuusion ja rakennekosteuden vaikutuksesta, mutta konvektio sisältä ulos nosti niitä huomattavasti reikien lähellä.



Kuva 4.12. Koeseinän 6 huokosilman suhteellisten kosteuksien ja vesihöyrypitoisuuksien muutokset konvektion vaikutuksesta.

Kuvassa 4.13 on esitetty koeseinien 4 ja 6 eristetilan huokosilman suhteellisen kosteuden kehitys ylipainejakson aikana kohdassa, jossa reiät ulottuivat koko sisäpinnan läpi. Kuvan käyrät lähtevät liikkeelle paine-erottoman jakson lopputilanteesta. Kuvassa näkyy hyvin kuinka puukuitueristeissä seinässä RH -prosentin nousu on hitaampaa johtuen eristeen kosteudensitomiskapasiteetista.



Kuva 4.13. Suhteellisen kosteuden muutos ylipainejakson aikana koeseinissä 4 ja 6. Mittaukset on tehty kohdasta, jossa rakenteeseen tehdyt reiät ulottuivat koko sisäverhouksen läpi.

4.3 Diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvän kosteuden vertailu

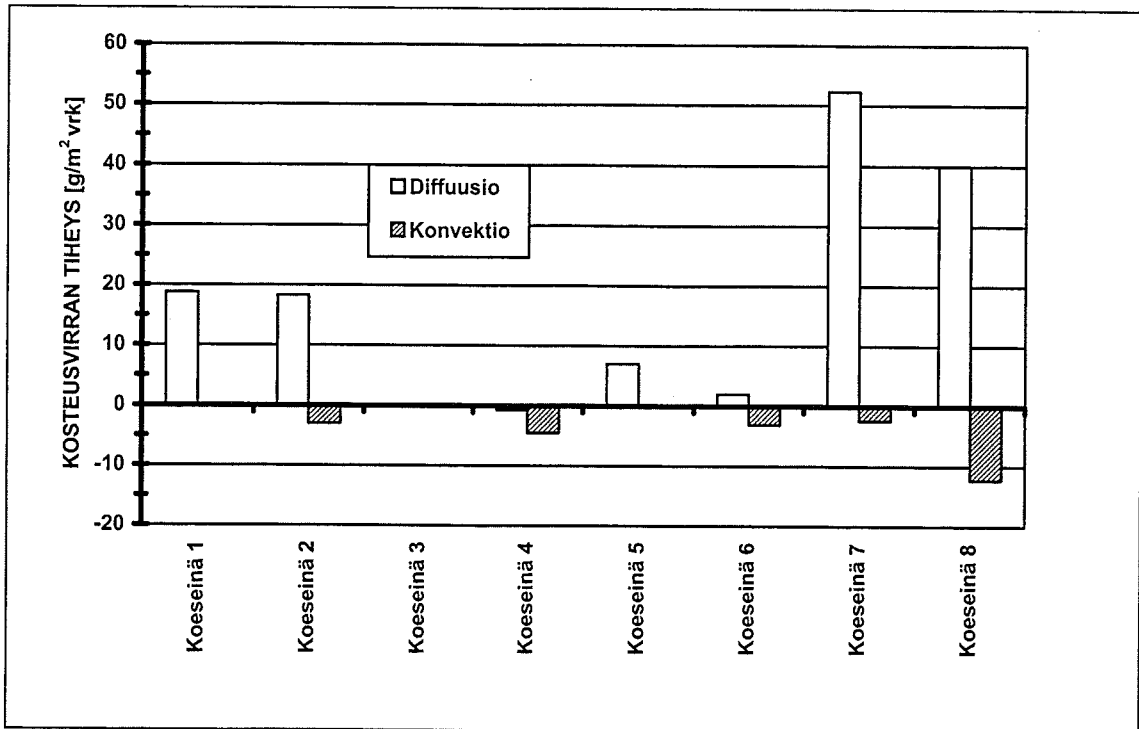
Kokeissa mitattiin eri paine-erotilanteissa diffuusiolla ja konvektiolla rakenteeseen siirtynyttä kosteusvirtaa ja ilman tilavuusvirtaa. Kuvissa 4.14...4.17 kosteusvirran ja ilman tilavuusvirran merkki on positiivinen, kun virtaus tapahtuu sisältä ulos.

Diffuusiolla siirtyvä kosteus määrä vaihtelee jonkin verran eri paine-erotilanteissa johtuen mm. koe-elementin kosteuspitoisuuksien muutoksesta, tuulensuojalevyn sisäpintaan kertyneestä jäädä sekä konvektion vaikutuksesta rakenteen reikien lähellä. Koeseinien 2 ja 7 osalta diffuusiotulosten mittausepävarmuus on tavanomaista suurempi johtuen sisäkostutinastian punnitusanturissa ilmenneistä toimintahäiriöistä.

Alipainetilanne

Kuvassa 4.14 on esitetty diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvä kosteusvirta alipainetilanteessa (-10 Pa).

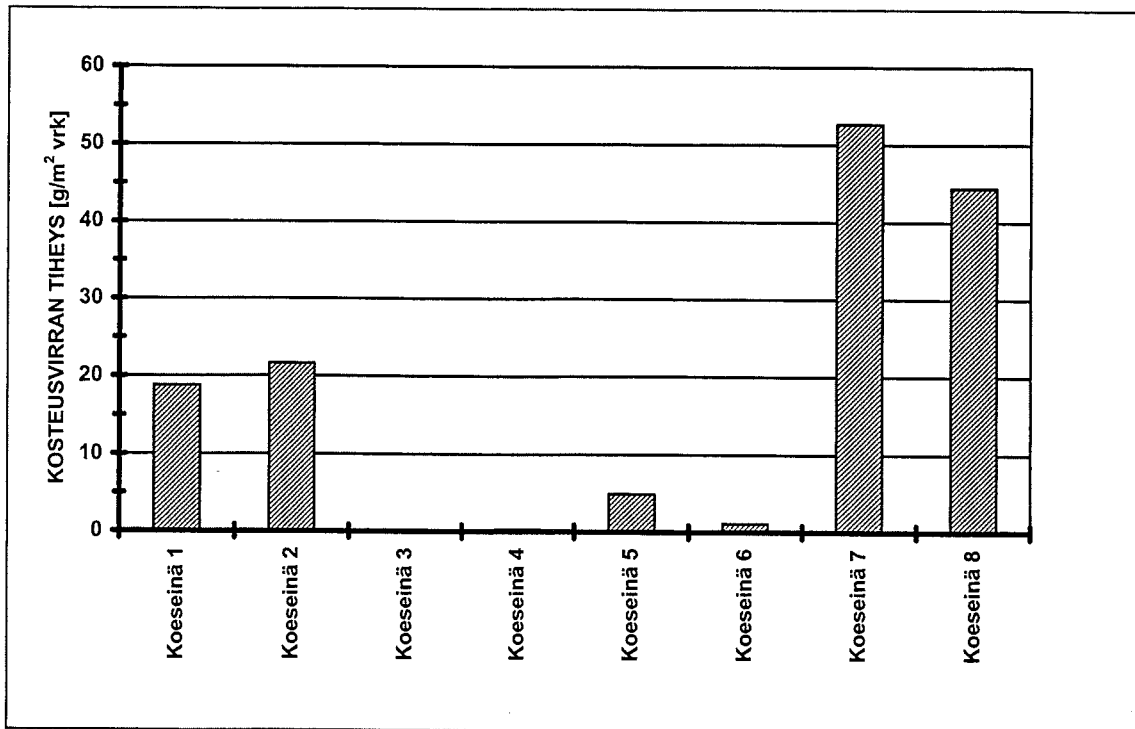
Konvektiolla kosteutta siirtyi reiällisten rakenteiden lisäksi jonkin verran myös koeseinissä 7, koska rakenteen sisäpinnassa käytetyn rakennuspaperin ilmanläpäisevyys oli varsin suuri. Kaikissa koeseinissä konvektiolla siirtyvän kosteuden määrä oli kuitenkin varsin pieni diffuusion verrattuna.



Kuva 4.14. Alipainejakson aikana diffuusiolla ja konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta neliötä kohti.

Paine-eroton tilanne

Kuvassa 4.15 on esitetty diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta paine-erottomalla koejaksolla.



Kuva 4.15. Paine-erottoman jakson aikana diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta neliötä kohti.

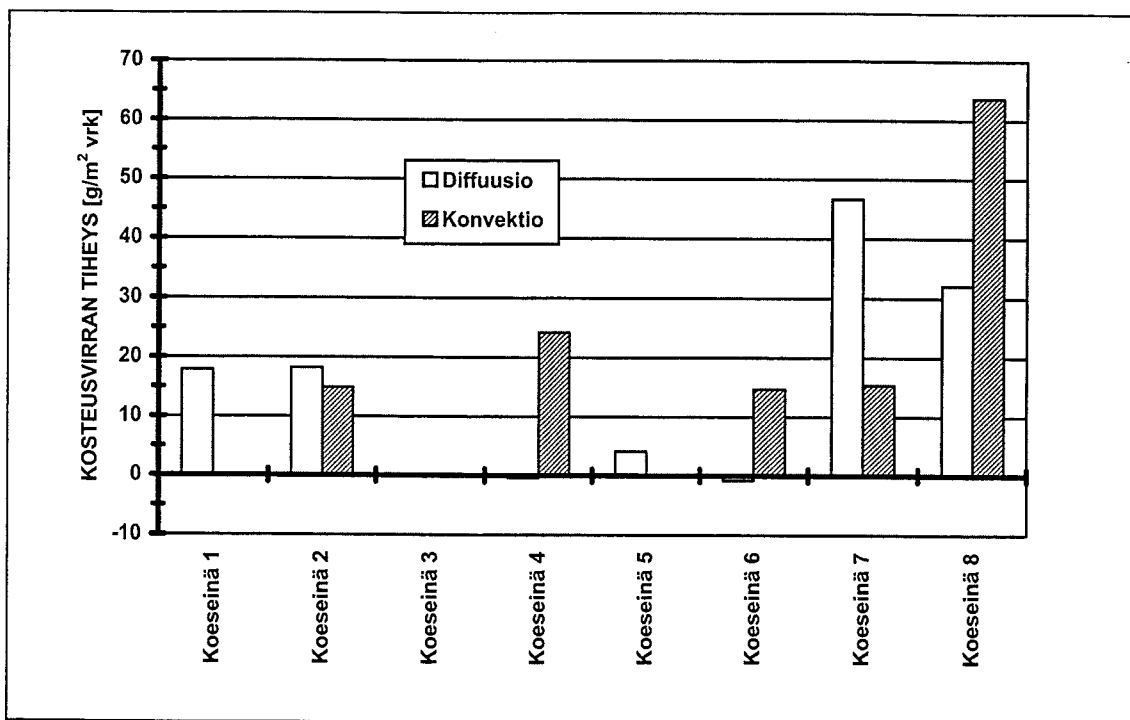
Kuvan 4.15 pylväät osoittavat tiiviyseron rakennuspaperin, bitumipaperin ja muovikalvon välillä. Diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta jakaantuu selkeästi kolmeen suuruusluok-

kaan käytettyjen kalvojen perusteella. Koeseinässä 5 oli sisäpuolella lisäksi vaneri, joka pienensi diffuusiota.

Ylipainetilanne

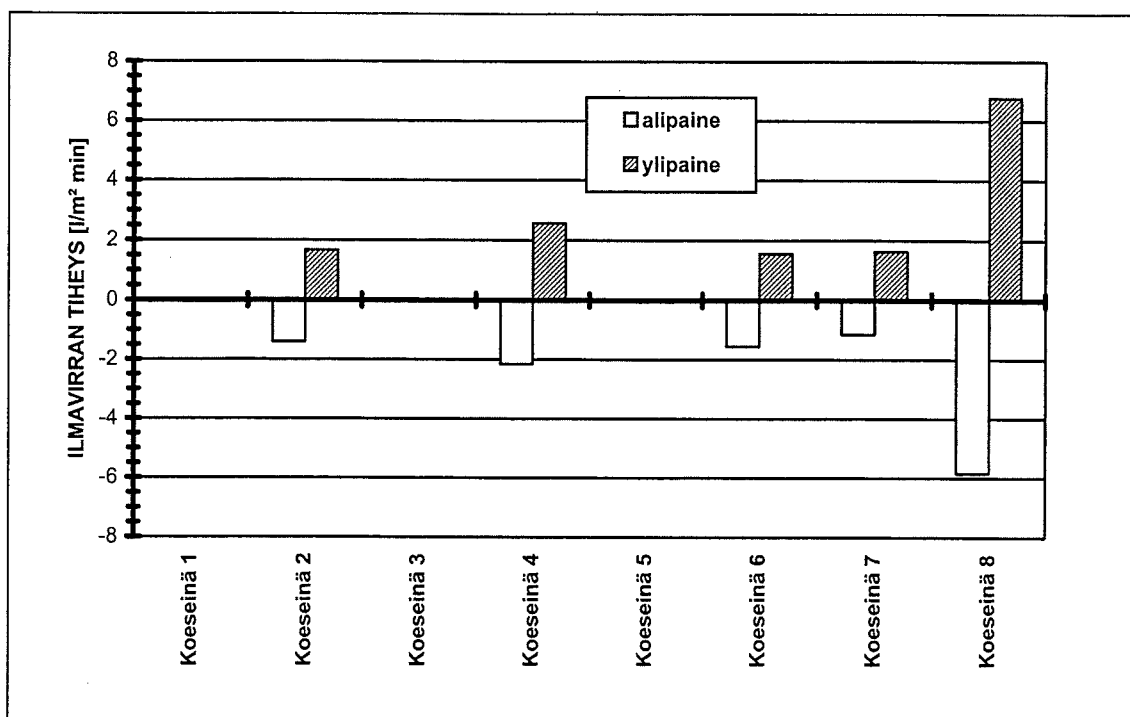
Kuvassa 4.16 on esitetty diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvä kosteusvirta ylipainetilanteessa (+10 Pa).

Ylipainetilanteessa konvektiolla siirtyvän kosteuden osuus kokonaiskosteusvirrasta on huomattavasti suurempi kuin alipaineella. Tämä johtuu siitä, että sisältä rakenteeseen virtaa paljon kosteampaa ilmaa ($\nu_s = 8,64 \text{ g/m}^3$) kuin ulkoa ($\nu_u = 1,98 \text{ g/m}^3$). Tässä tilanteessa myös rakenteen 7 läpi konvektiolla siirtyvä kosteusmäärä on merkittävä, vaikka rakenteessa olikin ehjä ilmansulku.



Kuva 4.16. Ylipainejakson aikana diffuusiolla ja konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta neliötä kohti.

Kuvassa 4.17 on esitetty myös rakenteiden läpi siirtynyt ilman tilavuusvirta neliöltä yli- ja alipainetilanteissa. Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi on suoraan verrannollinen konvektiolla siirtyvään kosteuteen, koska tietty ilmamäärä kuljettaa aina saman määrän kosteutta mukanaan stationääritilanteessa.



Kuva 4.17. Yli- ja alipainejaksojen aikana rakenteen läpi siirtynyt ilman tilavuusvirta neliötä kohti.

4.4 Laskennallisen tarkastelun ja koetulosten vertailu

Taulukossa 4.1 on verrattu kokeissa saatuja diffuusiolla ja konvektiolla siirtyviä kosteusvirtoja laskennallisella tarkastelulla satuihin arvoihin.

Taulukko 4.1. Kokeissa diffuusiolla ja konvektiolla siirtynyt kosteusvirran tiheys (kosteusvirta neliötä kohden) laskennallisiin arvoihin verrattuna.

	KOETULOS				LASKENNALLINEN TARKASTELU			
	Diffuusio [g/m ² vrk]	Konvektio [g/m ² vrk]		Kondenssi ulkopinnassa	Diffuusio [g/m ² vrk]	Konvektio [g/m ² vrk]		Kondenssi ulkopinnassa
		AP	YP			AP	YP	
Koeseinä 1	18,8	-0,1	0,1	Ei kondenssia	17,6	-0,1	0,2	Kondenssi
Koeseinä 2	21,6	-3,0	14,9	3 vrk	17,6	-	-	Kondenssi
Koeseinä 3	0,2	0,0	0,2	Ei kondenssia	0,3	0,0	0,0	Ei kondenssia
Koeseinä 4	0,3	-4,5	24,2	Ei kondenssia	0,3	-	-	Ei kondenssia
Koeseinä 5	4,9	-0,1	0,0	Ei kondenssia	4,2	0,0	0,0	Kondenssi
Koeseinä 6	1,1	-3,1	14,7	Ei kondenssia	0,3	-	-	Ei kondenssia
Koeseinä 7	52,7	-2,4	15,4	7 vrk	18,9	-0,5	2,1	Ei kondenssia
Koeseinä 8	44,4	-12,3	63,7	21 vrk	18,9	-	-	Ei kondenssia

Tutkituista koeseinistä seinillä 1, 2, 5, 7 ja 8 sisä- ja ulkopuolen vesihöyrynvastuksien suhde oli $< 5:1$ ja koeseinillä 3, 4 ja 6 se oli n. 400:1.

Taulukosta 4.1 nähdään, että suurimmat erot diffuusioarvoissa saatiin läpäisevimmissä koeseinissä 7 ja 8. Laskennallisen tarkastelun perusteella näissä koeseinissä ei olisi pitänyt esiintyä kondenssia lainkaan. Näissä koeseinissä kondensoituminen tosin riippuu oleellisesti laskelmissa käytetystä rakennuspaperin vesihöyrynläpäisevyydestä. Koeseinät 1 ja 5 ovat puolestaan laskennallisen tarkastelun perusteella kondensoivia rakenteita, mutta kokeissa kondenssia ei syntynyt. Tämä johtui osaltaan siitä, että rakenteet eivät saavuttaneet kokeen aikana stationääritilaa.

Koeseinän 2 osalta laskennallinen tarkastelu on melko lähellä koetulosta, mutta tässäkin tapauksessa kondenssin aiheutti suurimmaksi osaksi rakenteessa ollut ylimääräinen rakennekosteus, jota ei oltu otettu diffuusiota tarkastelussa huomioon.

Laskennallinen tarkastelu perustuu seuraaviin laskentakaavoihin /1, 8, 9/. Diffuusiolla rakenteeseen siirtyvä kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] voidaan laskea kaavalla:

$$g = \delta_v \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (4.1)$$

missä δ_v on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s], Δv on vesihöyrypitoisuuden ero matkalla x [kg/m^3] ja Δx on diffuusiomatka [m]. Ulko- ja sisäilman vesihöyrypitoisuuksien välinen potentiaaliero voidaan antaa myös osapaine-erona Δp_p [Pa]. Tulokset muutetaan taulukossa 4.1 käytetyksi yksiköksi ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{vrk}$) muunnoskertoimen avulla.

Konvektiolla ehjään rakenteeseen siirtyvä kosteusvirran tiheys g [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] voidaan laskea kaavalla:

$$g = \ell \Delta v \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (4.2)$$

missä ℓ on materiaalin ilmanläpäisevyys [$\text{m}^2/\text{s}\cdot\text{Pa}$], Δv on vesihöyrypitoisuuden ero matkalla x [kg/m^3], Δp on ilman paine-ero matkalla x [Pa] ja Δx on matka, jolla paine-ero muuttuu [m]. Tulokset muutetaan taulukossa 4.1 käytetyksi yksiköksi ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{vrk}$) muunnoskertoimen avulla.

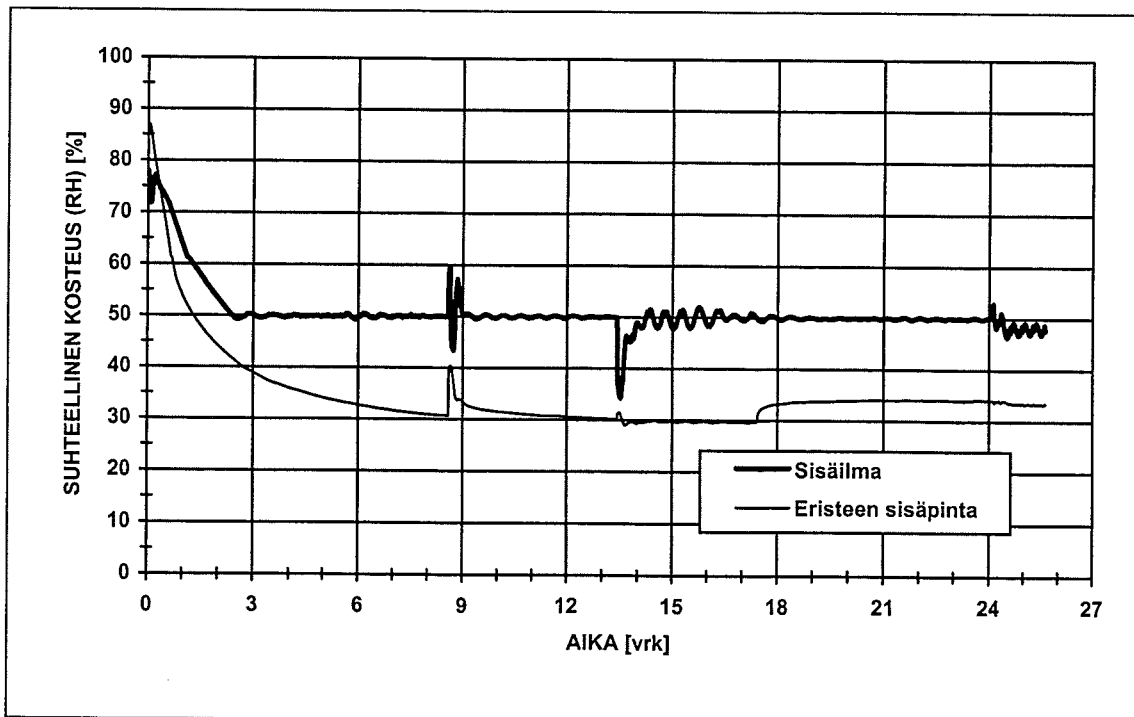
Laskennallisessa diffuusiota tarkastelussa tehdään useita yksinkertaistuksia, jotka aiheuttavat laskentaan virheitä. Laskenta tehdään stationääritilassa, mitä ei kaikissa tehdyissä kokeissa saavutettu. Laskentamalli ei ota huomioon materiaalien kosteudensitomiskapasiteettia, rakenteessa olevaa ylimääräistä rakennekosteutta eikä muita kosteudensiirty-

mismuotoja. Lisäksi laskentamalli olettaa mm. kosteuden siirtymisen olevan yksiulotteista ja lämpötilajakauman olevan suoraviivainen eri materiaalikerroksissa.

Suurimmat virheet laskennassa voivat syntyä kuitenkin vääristä materiaaliominaisuuksista (lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyys), joita käytetään laskennan pohjana. Materiaaliominaisuuksien määrittämisen tekee vaikeaksi se, että ne muuttuvat lämpötilan ja kosteuspitoisuuden muuttuessa. Lisäksi tuulensuojalevyn taakse kondensoituvan veden jäätyminen muuttaa rajakerroksen vesihöyrynläpäisevyyttä oleellisesti. Taulukoiden 4.1 ja 4.2 laskentatarkasteluissa materiaaliominaisuudet on kuitenkin pyritty valitsemaan uusimman tutkimustiedon perusteella mahdollisimman oikeiksi.

4.5 Lämpäisevän seinärakenteen vaikutus sisäilman kosteuteen

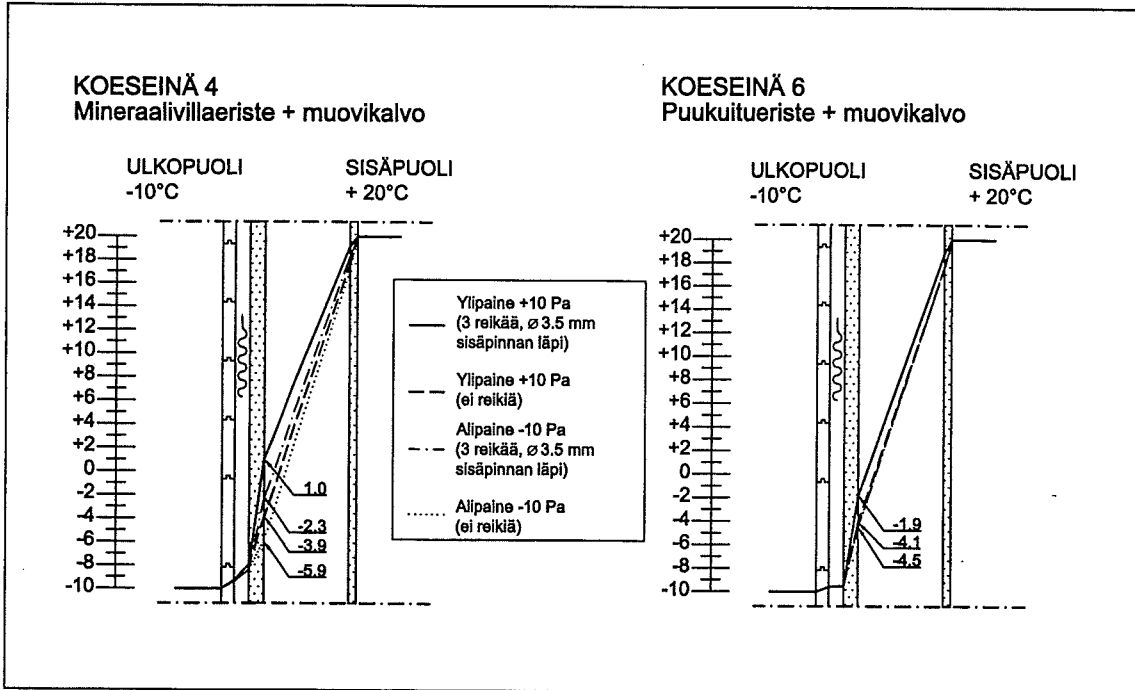
Koeseinällä 2 tehdyssä kokeessa tarkasteltiin myös sisäilman suhteellisen kosteuden alenemista kokeen alussa. Koeseinässä 2 puukuitueristeen lähtökosteus oli RH 85 %, jolloin rakenteesta siirtyi vesihöyryä diffuusiolla myös sisäilmaan. Kokeen alussa sisällä oli lisäksi alipaine, jolloin kosteutta siirtyi rakenteesta sisäilmaan myös konvektion avulla. Kokeessa sisäilman kostutus aloitettiin n. 3 vrk kuluttua kokeen alusta, jonka jälkeen diffuusiovirta tapahtui vain sisältä ulospäin (kuva 4.18). Kuvassa 4.18 on esitetty sisäilman ja puukuitueristeen sisäpinnan suhteellisen kosteuden muuttuminen.



Kuva 4.18. Sisäilman ja eristeen sisäpinnan RH -prosentin muutokset koeseinän 2 osalta. Sisäpinnan mittaus on tehty kohdassa, jossa rakenteeseen tehdyt reiät ulottuivat koko sisäverhouksen läpi.

4.6 Rakenteen lämpötilakentän muutos paine-eron vaikutuksesta

Kuvassa 4.19 on esitetty paine-eron vaihtelun aiheuttamat lämpötilakentän muutokset koeseinillä 4 ja 6. Lämpötilojen muuttumista on tarkasteltu sisäpinnan reikien lähellä sekä ehjän rakenteen osalla. Koeseinät 4 ja 6 erosivat toisistaan ainoastaan lämmöneristeen suhteen. Koeseinässä 4 lämpötilaero mineraalivillaeristeen ulkopinnassa oli 6,9 °C ali- ja ylipainejakson välillä. Koeseinässä 6, jossa käytettiin eristeenä puukuitueristettä, se oli vain 2,6 °C.



Kuva 4.19. Lämpötilakentän vaihtelu eri paine-erotilanteissa reikien lähellä ja ehjän rakenteen osalla.

5 Koetulosten tarkastelu ja johtopäätökset

5.1 Diffuusion ja rakennekosteuden vaikutus

Tarkastellaan aluksi koeseinien 1, 2 ja 8 kosteusteknistä toimintaa (kuvat 4.1, 4.2 ja 4.8). Koeseinässä 1 materiaalit olivat kokeen alussa kuivia (RH 35 %), joten rakenteessa ei ollut ylimääräistä rakennekosteutta. Diffuusion ansiosta RH -prosentit kasvoivat eristeen ulko-osassa koko kokeen ajan. Alhaisesta alkukosteudesta johtuen rakenteen kosteuspi-toisuudet eivät kuitenkaan saavuttaneet kokeen aikana stationääritilaa. Toisin sanoen puukuitueristeen kosteudensitomiskapasiteetti kykeni sitomaan kaiken seinään tulleen kosteuden eikä kondenssitilaa ehtinyt muodostua tuulensuojalevyn pintaan.

Koeseinässä 8 rakenteiden alkukosteus oli kokeeseen 1 verrattuna korkeampi (RH 55 %), jolloin puukuitueristeellä oli vähemmän kosteudensitomiskapasiteettia jäljellä. Toi-saalta koeseinä 8 oli leveämpi kuin koeseinä 1, jolloin eristeen tilavuus oli suurempi. Täs-sä kokeessa rakenne saavutti stationääritilan 21 vrk kuluttua kokeen alusta, minkä jäl-keen kondensoituminen alkoi tuulensuojalevyn pintaan. Kondensoituminen alkoi varsin nopeasti, koska seinän sisäpinta oli vielä läpäisevämpi kuin kokeessa 1.

Koeseinässä 2 materiaalit olivat kokeen alussa kosteita (RH 85 %). Rakenteessa oli näin ollen myös ylimääräistä rakennekosteutta, joka pyrki siirtymään sekä sisään että ulospäin kokeen alettua. Kosteuden siirtyminen ulospäin oli kuitenkin voimakkaampaa, koska potentiaaliero oli ulospäin suurempi. Ylimääräisestä rakennekosteudesta johtuen koesei-nässä 2 alkoi kondensoituminen jo n. 3 vrk kuluttua kokeen alusta. Näin tapahtui, vaikka sisäpuolella oli alipaine, jonka vaikutuksesta kosteutta virtasi myös ulkoa sisälle päin kuivattaen samalla rakennetta. Lähes kaikki diffuusiolla siirtynyt kosteus kondensoitui tuulensuojalevyn pintaan, koska puukuitueristeellä ei ollut kosteudensitomiskapasiteettia jäljellä stationääritilanteen saavuttamisen jälkeen.

Yhteenvetona näistä kokeista voidaan todeta, että puukuitueristeen kosteudensitomiska-pasiteetti siirtää kondensoitumisen alkamista, mutta ei kykene kaikissa tapauksissa estä-mään sitä. Se kuinka kauan kondensoitumisen alkamiseen kuluu aikaa riippuu eristeen ja tuulensuojalevyn alkukosteudesta, seinän sisäpinnan vesihöyryn- ja ilmanläpäisevyydestä sekä kosteusrasituksesta, joka seinään kohdistuu.

Kokeissa olleissa läpäisevissä seinärakenteissa kondensoitumisen alkamiseen kuluva aika vaihteli muutamasta päivästä kolmeen viikkoon. Koska Suomessa koeolosuhteita vastaa-van pakkaskauden pituus vaihtelee tyypillisesti 2...5 kk välillä, voidaan todeta, että läpäi-

sevissä seinissä kondenssiriski on ilmeinen. Eri asia on kuinka paljon esim. auringon säteilyn tai tuulen vaikutus parantaa tilannetta käytännössä.

Kondenssiriski kasvaa sitä suuremmaksi mitä läpäisevämpi rakenne on, mitä kosteampia rakenteessa olevat materiaalit ovat ja mitä suurempi on sisäilman kosteusero ulkoilmaan verrattuna. Jos rakenteeseen kondensoituu vettä, siihen syntyy homeen kasvulle otolliset olosuhteet lämpötilan ollessa > 0 °C. Tällainen tilanne on varsinkin syksyllä ja keväällä. Homeen syntymiseen riittää myös se, että suhteellinen kosteus rakenteessa on yli 80 %, vaikka kondensoitumista ei tapahtuisikaan.

Verrataan samaan asiaan liittyen koeseiniä 7 ja 8, jotka olivat rakenteeltaan muuten samanlaiset, mutta niissä käytettiin erityyppisiä eristeitä (kuvat 4.7 ja 4.8). Kokeessa 7 kondenssi alkoi 7 vrk kuluttua kokeen alusta elementin alkukosteuden vastatessa 35 % RH:ta. Kokeessa 8 kondenssi alkoi 21 vrk kuluttua elementin alkukosteuden vastatessa 55 % RH:ta. Vaikka puukuitueristeen alkukosteus olikin hieman korkeampi kokeen alussa, voidaan todeta, että puukuitueristeen tuoma kosteudensitomiskapasiteetti ei merkittävästi siirtänyt kondensoitumisen alkamisaikaa. Tämä johtuu siitä, että seinän sisäpinta oli hyvin läpäisevä. Toisin sanoen puukuitueristeen kosteudensitomiskapasiteetti on rajallinen.

Koeseinä 6 vastasi rakenteeltaan koeseiniä 1 ja 2 sillä erotuksella, että bitumipaperin tilalla oli seinän sisäpinnassa muovinen höyrynsulku (kuva 4.6). Kuvasta 4.6 havaitaan, että tässä seinässä ulkopinnan suhteellinen kosteus jäi oleellisesti alhaisemmaksi, koska rakenteeseen ei siirtynyt kosteutta diffuusiolla. Tässä kokeessa puukuitueriste toimi moitteettomasti. Toisin sanoen seinän sisäpinnan tiiveys on paljon merkittävämpi asia seinän kosteusteknisen toiminnan kannalta kuin seinässä käytettävä eriste. Sekä puukuitueristettä että mineraalivillaa voidaan käyttää eristeenä, jos seinän sisäpinnassa on riittävä ilman- ja höyrynsulku.

Tarkastellaan seuraavaksi rakenteita 3 ja 4 (kuvat 4.3 ja 4.4), jotka olivat mineraalivillakeristeisiä höyrynsulullisia seiniä. Koeseinä 3 oli kokeen alussa samassa alkukosteudessa kuin koeseinä 1 ja vastaavasti koeseinä 4 samassa alkukosteudessa kuin koeseinä 2. Rakennepaksuudet ja koeolosuhteet olivat kaikissa seinissä samat, joten koetulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Koeseinässä 3 suhteelliset kosteudet jäivät hyvin alhaisiksi ja kosteuspitoisuudet saavuttivat stationääritilan jo 2 vrk kuluttua kokeen alusta. Kosteutta ei siirtynyt rakenteeseen diffuusiolla eikä konvektiolla, joten rakenteeseen ei myöskään kondensoitunut vettä. Seinärakenne toimi kokeessa erittäin hyvin.

Koeseinässä 4 stationääritilan saavuttamiseen kului enemmän aikaa (16 vrk), koska eristeen ja tuulensuojalevyn kosteuspitoisuudet vastasivat kokeen alussa 85 % RH:ta. Tästä huolimatta rakenteeseen ei syntynyt kondenssia, koska mineraalivillan sitoutuva koste-

usmäärä on pieni riippumatta huokosilman RH:sta. Mineraalivillaseinässä oli ylimääräistä kosteutta alkutilanteessa n. 40 g/m², kun puukuitueristeisessä seinässä sitä oli n. 400 g/m². Tämä selittää miksi kondensoituminen alkoi varsin nopeasti koeseinässä 2.

Koeseinän 4 kosteusprosentit alenivat stationääritilanteessa samalle tasolle kuin koeseinässä 3, joten myös koeseinä 4 toimi kokeessa hyvin. Rakenteen hyvä toiminta perustui osaltaan vesihöyryä hyvin läpäisevään tuulensuojalevyyn, joka päästi ylimääräisen kosteuden poistumaan rakenteesta. Pinta-anturien kiinnitysteippien alle kertynyt jää osoittaa, että tuulensuojan tulee olla riittävän hyvin vesihöyryä läpäisevä.

Yhteenvedona kokeista 3 ja 4 voidaan todeta, että seinät, joissa on muovikalvo höyrynsulkuna, toimivat moitteettomasti sisäilman diffuusion kannalta. Tämä sama tulos saatiin myös koeseinän 6 osalta.

Kokeista 2 ja 4 saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että jos eristeenä käytetään mineraalivillaa, eristeen kosteuspitoisuudella ei ole merkitystä rakenteen toimintaan. Sen sijaan, jos puukuitueristeen alkukosteus on suuri, se lisää rakenteen kondensoitumisriskiä merkittävästi. Tässä mielessä esim. kostean kesän ja syksyn jälkeen puukuitueristeessä olevalla ylimääräisellä rakennekosteudella on haitallinen vaikutus. Sama tilanne on silloin, jos puukuitueriste ruiskutetaan seinään märkänä syksyllä tai talvella. Tällöin rakenteessa oleva ylimääräinen kosteus tiivistyy tai jäätyy tuulensuojalevyyn ja kuivuu vasta seuraavana keväänä. Näin ollen, jos märkänä ruiskutettavia eristeitä käytetään, niitä on suositeltavaa asentaa keväällä tai alkukesästä.

Tarkastellaan lopuksi koeseinän 5 kosteusteknistä toimintaa (kuva 4.5). Koeseinässä 5 koeolosuhteet ja materiaalien kosteuspitoisuudet ennen kokeen alkua olivat samat kuin kokeessa 1. Koetuloksista nähdään, että RH –prosentit nousivat rakenteessa huomattavasti hitaammin kuin koeseinässä 1 johtuen tiiviimmästä sisäpinnasta. Tässä kokeessa puukuitueristeen kosteudensitomiskapasiteettia oli vielä runsaasti jäljellä kuukauden kokeen jälkeen. RH –prosenttien muutosnopeudesta kokeen lopussa voidaan lisäksi päätellä, että rakenteen kosteuspitoisuudet eivät olisi aiheuttaneet tasapainotilanteessakaan kondensoitumisriskiä (RH < 85 %). Taulukossa 4.1 koeseinä 5 saatiin laskennallisessa tarkastelussa kondensoivaksi rakenteeksi, joten todellisuudessa ulkopuolen vanerin vesihöyrynläpäisevyys oli ilmeisesti laskenta-arvoa suurempi.

Johtopäätöksenä kokeesta 5 voidaan todeta, että seinän sisäpinnassa oleva vaneri ja bitumipaperi ovat yhdessä riittävän tiiviitä vesihöyrynsulkua vastaan. Levyjen saumakohdista diffuusiolla siirtyvän kosteuden osuus on niin pieni, ettei sillä ole käytännön merkitystä. Saumat ovat riskialttiita lähinnä konvektiolla siirtyvän kosteuden osalta, mutta bitumipaperin ollessa ehjä, se estää konvektion rakenteeseen. Koe osoittaa, että seinän sisäpintaan saadaan riittävä tiiveys muullakin tavalla kuin höyrynsulkumuovia

käyttämällä. Perussääntönä onkin se, että seinän sisäpinnassa tulee olla vähintään viisinkertainen vesihöyrynvastus ulkopintaan nähden /6, 11/.

Vaikka rakenne täyttäisikin edellä mainitun kriteerin, on muistettava, että tuulensuojalevy ei saa olla liian tiivis (vrt. koeseinän 4 anturien kiinnitysteipit). Tässä mielessä koeseinä 5 on hyvin riskialtis rakenne, koska ulkopuolen vanerilla on suuri vesihöyrynvastus varsinkin lämpötilan ollessa alle 0 °C.

5.2 Konvektion vaikutus

Tarkastellaan aluksi koeseiniä 2 ja 4 (kuvat 4.9 ja 4.10). Koeseinässä 2 RH –prosentit nousivat ulkopinnan lähellä korkeiksi jo pelkästään diffuusion vaikutuksesta eikä konvektiolla ollut suurta vaikutusta RH –prosentteihin reikien lähellä. Koeseinässä 4 RH –prosentit pysyivät yleensä alhaisina, mutta ylipainetilanteessa ne nousivat korkeiksi siinä osassa rakennetta, jossa reiät ulottuivat koko sisäpinnan läpi. Tässä tapauksessa RH –prosentit nousivat samalle tasolle kuin läpäisevässä seinärakenteessa.

Kokeessa 6 haluttiin selvittää, miten höyrynsulullisen rakenteen käyttäytyminen muuttuu konvektiutilanteessa, jos mineraalivillaeristeen tilalle laitetaan puukuitueriste (kuva 4.11). Lopputulos tässäkin kokeessa oli samanlainen kuin koeseinällä 4: RH –prosentit nousivat ylipaineella korkeiksi sisäpinnan läpi ulottuvien reikien lähellä. Ainoa ero koetuloksissa oli se, että koeseinässä 6 kosteusprosentit nousivat jonkin verran hitaammin (tasoittumisaika n. 14 vrk), kuin koeseinässä 4 (tasoittumisaika 1 vrk) (kuva 4.13).

Johtopäätöksenä kokeista 2, 4 ja 6 voidaan todeta, että läpäisevissä seinärakenteissa kondenssiriski on olemassa jo pelkästään diffuusion ansiosta ja sisällä oleva ylipaine lisää tätä riskiä entisestään. Sen sijaan höyrynsulullisessa rakenteessa kondenssiriski on ainoastaan silloin, jos ylipainetilanteessa rakenteessa on reikiä, jotka ulottuvat koko sisäpinnan läpi.

Reikien ollessa pelkästään ilman-/ höyrynsulun läpi rakenteen RH- prosentit eivät muutu merkittävästi konvektion vaikutuksesta. Tämä koskee myös sisälevyn ruuvikiinnitystä runkopuuhun ilmansulun läpi. Konvektio ei myöskään vaikuta seinärakenteen RH –prosentteihin, jos sisälevyssä ja ilman-/ höyrynsulussa on sauma runkopuun kohdalla.

Puukuitueristeen käytöstä on hyötyä reiällisessä rakenteessa ylipainetilanteessa, koska eriste kykenee sitomaan reikien kautta konvektion mukana tulevaa kosteutta. Reiät eivät kuitenkaan saa olla suuria, koska eristeen kosteudensitomiskapasiteetti on rajallinen.

Paine-erokokeissa haluttiin selvittää myös sitä, kuinka paljon alipaine kykenee alentamaan seinärakenteen kosteuspitoisuuksia. Koeseinissä 2, 4 ja 6 rakenteiden RH –prosentteissa ei ollut merkittävää eroa alipaineen ja paine-erottoman tilanteen välillä. Koe-

seinään 8 tehtiin kaksinkertainen määrä reikiä, jotka olivat lisäksi isompia kuin muissa kokeissa (kuva 4.12). Tässä kokeessa lämmöneristeen kosteuspitoisuudet tasapainotilanteessa olivat alipainejaksolla jonkin verran alhaisemmat kuin paine-erottomalla jaksolla. Kokeessa 8 myös diffuusion osuus oli huomattavasti suurempi läpäisevämmän seinärakenteen johdosta.

Johtopäätöksenä kokeesta 8 voidaan todeta, että alipaine alentaa läpäisevän seinärakenteen kosteuspitoisuuksia tasapainotilanteessa, jos rakenteessa on riittävän suuria reikiä ($A \geq 100 \text{ mm}^2/\text{m}^2$). Kosteuspitoisuudet alenevat sitä enemmän, mitä suurempi paine-ero rakenteen yli vallitsee ja mitä suurempia rakenteen sisäpinnassa olevat reiät ovat. Todellisissa rakenteissa alipaineen kosteuspitoisuuksia alentava vaikutus on kuitenkin varsin vähäinen. Alipaine varmistaa kuitenkin sen, ettei rakennukseen synny ylipainetta.

5.3 Seinärakenteiden kondensoitumisriskin vertailu

Eri seinärakenteiden kondensoitumisriskiä voidaan verrata toisiinsa tarkastelemalla eristetilan huokosilman vesihöyrypitoisuuksia stationääritilanteessa (kuvat 4.1...4.12). Vesihöyrypitoisuus kertoo lämmöneristeen huokosilmassa olevan absoluuttisen vesimäärän ja se pyrkii tasoittumaan eristeen eri osissa aina samaan arvoon. Kondensoivissa rakenteissa vesihöyrypitoisuus ei kuitenkaan pääse tasoittumaan, koska rakenteeseen tuleva kosteusmäärä on suurempi kuin huokosilmaan mahtuva kosteus eristeen kylmällä puolella. Toisin sanoen rakenteen kondensoitumisriski on sitä suurempi mitä suurempi on lämmöneristeen sisä- ja ulkopintojen vesihöyrypitoisuuksien ero stationääritilanteessa.

Kuvista 4.1...4.12 nähdään, että koeseinissä 7 ja 8 kondensoitumisriski on suurin diffuusiotilanteessa (vesihöyrypitoisuuserot ovat suurimmat). Sen sijaan koeseinässä 2 vesihöyrypitoisuudet ovat melko tasaiset, vaikka tämäkin seinä kondensoi kokeessa. Koeseinän 2 osalta kondensoitumisen aiheuttikin lähinnä puukuitueristeessä ollut ylimääräinen rakennekosteus.

Tarkastellaan vielä saman tyyppin koeseinää 1, joka oli kokeen alussa kuiva. Koeseinä 1 ei saavuttanut kokeessa stationääritilaa, mutta eristeen vesihöyrypitoisuudet olivat kuitenkin olleet kokeen lopussa jo melko samanlaiset. Näin ollen koeseinä 1 on rajatapaus sikäli, että siinä rakenteen sisäpinta saattaa olla juuri ja juuri riittävän tiivis, jotta kondensoitumista ei pääse tapahtumaan diffuusiotilanteessa kokeessa käytetyillä olosuhdeasetuksilla. Rakenteen RH -prosentit ovat kuitenkin niin korkeat, että syksyllä ja keväällä rakenteessa esiintyy homeen kasvulle otollisia lämpötila- ja RH -olosuhteita. Kondensoituminen alkaa tässä rakenteessa siinä tapauksessa, että rakenteessa on ylimääräistä rakennekosteutta (koeseinä 2) tai rakenteeseen tulee kosteutta myös konvektion mukana.

Kuvista 4.9...4.12 nähdään lisäksi, että reiällisten rakenteiden vesihöyrypitoisuuserot kasvavat konvektion vaikutuksesta ylipainetilanteessa. Vesihöyrypitoisuuden muutokset diffuusiutilanteeseen verrattuna kertovat puolestaan sen, kuinka paljon reikä lisää kondenssiriskiä ko. rakenteessa. Koeseinissä 4 ja 6 konvektio kasvatti kondensoitumisriskiä eniten diffuusiutilanteeseen verrattuna.

5.4 Diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvän kosteuden vertailu

Tarkastellaan seinärakenteiden läpi diffuusiolla ja konvektiolla siirtyviä kosteusmääriä eri paine-erotilanteissa (kuvat 4.14...4.16). Kuvista 4.14 ja 4.16 nähdään, että konvektion osuus on yleensä merkityksetön, mikäli rakenteessa ei ole reikiä. Poikkeuksen tästä tekee koeseinä 7, jossa konvektiota esiintyi, vaikka rakenteessa oli ehjä rakennuspaperi ilmansulkuna. Konvektiota esiintyi, koska sisäpinnassa käytetyllä huokoisella kuitulevyllä oli suuri ilmanläpäisevyys ja ilmansulkuna käytetty rakennuspaperi oli käsittelemätöntä (ei bitumointia tai muovitusta). Koeseinä 7 osoittaa, että ääritapauksessa pelkkä rakennuspaperi voi olla ilmansulkuna riittämätön, vaikka se onkin ehjä. Todellisuudessa rakenteen sisäpintaan saadaan kuitenkin helposti riittävän tiivis ilmansulku esim. bitumipaperia käyttämällä.

Reikien vaikutus konvektiolla siirtyvän kosteuden määrään nähdään vertaamalla keskenään kokeita 1 ja 2, kokeita 3 ja 4 sekä kokeita 7 ja 8. Koeseinässä 8 konvektiolla siirtyvä kosteusvirta oli nelinkertainen koeseinään 7 verrattuna, joten kokeessa 8 konvektiosta kolme neljäsosaa tapahtui reikien kautta ja neljäsosa rakennuspaperin läpi.

Vertaamalla kuvia 4.14 ja 4.16 nähdään, että ylipaineella rakenteeseen siirtyvät kosteusmäärät ovat huomattavasti suurempia kuin alipaineella. Tämä johtuu lähinnä sisäilman suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta. Näin ollen ylipaine lisää reiälliseen seinärakenteeseen siirtyvää kosteusvirtaa merkittävästi.

Yleisesti voidaan todeta, että diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta oli suurempi konvektioon verrattuna läpäisevissä rakenteissa ja vastaavasti pienempi höyrynsulullisissa rakenteissa, joissa oli reikiä. Läpäisevissä rakenteissa rakenteeseen siirtyvä kokonaiskosteus oli kuitenkin huomattavasti suurempi kuin höyrynsulullisissa rakenteissa.

Kuvassa 4.17 esitettyjä ilman tilavuusvirran arvoja vertaamalla nähdään, että rakennuspaperin + huokoisen kuitulevyn (koeseinä 7) ilmanläpäisykerroin oli selvästi suurempi kuin esim. bitumipaperilla + kipsilevyllä (koeseinä 1). Toisin sanoen ehjienkin rakenteiden ilmanläpäisykerroimet voivat vaihdella merkittävästi kuten aiemmin tuli todettua. Kuvasta huomataan myös, että kokeissa käytetyn puukuitueristelevyn ilmanläpäisevyys oli lähes 40 % pienempi kuin mineraalivillalla (koeseinät 4 ja 6), koska muuten koeseinät olivat samanlaiset.

5.5 Laskennallisen tarkastelun ja koetulosten vertailu

Taulukossa 4.1 esitettyjä koetuloksia ja laskennallisesti saatuja diffuusion ja konvektion arvoja vertailemalla, voidaan todeta että laskennalliset tulokset poikkeavat todellisista koetuloksista sitä enemmän, mitä läpäisevämpiä seinärakenteet ovat. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että laskennassa käytettyjä materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä ei tunneta riittävän tarkasti eri olosuhteissa. Jos rakenteeseen siirtyy sisäilmasta kosteutta, oikean lopputuloksen saaminen edellyttää kaikkien materiaalikerrosten ominaisuuksien tuntemista. Materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä tulisikin määrittää kokeellisesti eri RH – ja lämpötilaolosuhteissa ja erityisesti alle 0 °C lämpötilassa.

Höyrynsulullisissa rakenteissa laskenta pitää paikkansa siksi, että muovikalvon vesihöyrynvastus on moninkertainen kaikkiin muihin materiaaleihin verrattuna. Tällöin muiden materiaalien todellisia ominaisuuksia ei tarvitse tuntea tarkasti.

Koeseinillä 1, 2, 7 ja 8 oli korkeat kosteuspitoisuudet diffuusiotilanteessa rakenteen ulkopinnassa ja näille koeseinille saatiin myös laskennallisesti pieni sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastusten suhde. Näistä rakenteista koeseinät 2, 7 ja 8 myös kondensoivat kokeessa. Koetulokset osoittavat, että mitä pienempi sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastuksien suhde on sitä suurempi riski on rakenteen kondensoitumiselle talviolosuhteissa. Sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastusten suhde tulee olla vähintään 5:1, kuten jo aiemmin todettiin (luku 5.1).

5.6 Läpäisevän seinärakenteen vaikutus sisäilman kosteuteen talvella

Kuvasta 4.18 nähdään, että hyvin kostea puukuitueriste kykeni kostuttamaan sisäilmaa talviolosuhteissa ainoastaan muutaman vuorokauden ajan. Tämän jälkeen tavoitekosteudessa (RH 50 %) pysyminen edellytti kostuttimen käyttöä. Todellisuudessa yhtä seinäneliötä kohden on rakennuksessa vielä enemmän kostutettavaa ilmatilavuutta kuin kokeessa, jolloin sisäilman kostutusaika vähenee entisestään. Lisäksi ilmanvaihto poistaa kosteutta sisäilmasta huomattavasti tehokkaammin koetilanteeseen verrattuna.

Johtopäätöksenä tästä kokeesta voidaan todeta, että puukuitueristeinen läpäisevä seinärakenne ei kykene tasaamaan sisäilman kosteusvaihteluita talviaikaan, vaan sisäilma pyrkii päinvastoin kuivumaan kosteuden siirtyessä seinärakenteisiin.

5.7 Rakenteen lämpötilakentän muutos paine-eron vaikutuksesta

Kuvassa 4.19 on esitetty koeseinien 6 ja 4 lämpötilakentän muutokset paine-eron vaikutuksesta tuulensuojalevyn takana. Kuvista nähdään, että 10 Pa ylipaine vaikuttaa raken-

teen lämpötilakenttään merkittävästi reikien lähellä, jotka ulottuvat rakenteen sisäpinnan läpi.

Koeseinässä 4 (lämmöneristeenä mineraalivilla) lämpötila muuttui tuulensuojalevyn takana enemmän kuin koeseinässä 6 (lämmöneristeenä puukuitueriste). Tämä kertoo osaltaan siitä, että kokeessa käytetyn puukuitueristeen ilmanläpäisevyys oli pienempi kuin mineraalivillalla (vrt. luku. 5.4).

Lämpötilan nousu reiän lähellä nostaa huokosilman kyllästyskosteuspitoisuutta, jolloin kondensoitumisriski pienenee. Toisaalta reiän alueella kosteusrasitus kasvaa, koska kosteutta siirtyy seinään myös konvektion vaikutuksesta. Lisäksi lämpötilan noustessa riittävästi rakenteeseen voi syntyä homeen kasvulle otolliset olosuhteet.

5.8 Tuuletusraon vaikutus seinärakenteen toimintaan

Kokeissa havaittiin, että tuuletusvälissä ilma oli keskimäärin n. 1,15 °C lämpimämpää kuin ulkoilmassa. Lämpötilan noustessa ilmaan mahtuva kosteusmäärä kasvaa, joten RH –prosentit olivat tiiviillä rakenteilla vielä oletettua pienemmät tuulensuojalevyn sisäpinnassa. Sen sijaan läpäisevillä seinärakenteilla diffuusiolla sisältä siirtyvä kosteus nosti kosteuspitoisuudet korkeaksi lämpötilasta riippumatta. Lämpötilan nousu tuuletusvälissä osoittaa myös, että ulkoverhous parantaa seinärakenteen lämmöneristystä.

5.9 Seinärakenteiden homehtumisriski

Tehdyissä kokeissa selvitettiin myös seinärakenteiden homehtumisriskiä talviolosuhteissa. Seinistä mitattujen lämpötilojen ja RH –prosenttien avulla tutkittiin löytyykö seinistä homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Missään tutkituista seinärakenteista ei kuitenkaan esiintynyt homehduttavia RH -olosuhteita talvitilanteessa. Tämä on luonnollista, koska korkean RH –prosentin alueilla lämpötila oli pakkasen puolella. Homeeriski onkin suurin syys- ja kevätolosuhteissa, joissa ulkolämpötila on yli 0 °C, mutta ulkoilman suhteellinen kosteus on edelleen korkea.

6 Johtopäätökset rakenteiden kosteusteknistä suunnittelua varten

6.1 Kosteuskuormat

Diffuusio

Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen toiminta riippuu siitä, minkälaiselle kosteuskuormalle ne altistetaan. Diffuusiotarkastelussa on oleellista tietää, mikä on mitoituksessa käytettävä sisä- ja ulkoilman välinen vesihöyrypitoisuusero eri vuodenaikoina. Jos mitoituspäätöksiksi valitaan esim. tässä tutkimuksessa käytetty RH 50 % talvella, on sisä- ja ulkopuolen vesihöyrypitoisuuksien ero n. $6,5 \text{ g/m}^3$. Tämä on niin suuri arvo, että monet nykyisin käytettävistä läpäisevistä seinärakenteista ovat riskialttiita kosteusvaurioille. Käytettäessä sisäilman kosteuslisänä esim. $3,5 \text{ g/m}^3$ (tyypillinen mitoitusarvo) vaihtelee sisäilman RH talvikaudella n. 25...35 % välillä. Tällöin suuri osa kaikista nykyisin käytettävistä ulkoseinärakenteista toimii riittävän hyvin. Läpäisevissä seinärakenteissa tämäkin sisäilman kosteuslisä voi kuitenkin aiheuttaa kosteusongelmia.

Todellisuudessa useimpien rakennuksien sisäilman kosteus alenee talviaikaan, mutta on myös paljon sellaisia taloja, joissa näin ei käy tai joissa kosteutta on pidettävä korkeampana ilmankostuttimen avulla esim. terveysyistä. Niissä taloissa, joissa asuu suuria lapsiperheitä sisäilman kosteus on luonnollisesti paljon suurempi, kuin esim. yksin asuvien huoneistoissa. Myös ilmanvaihtojärjestelmä sekä puisten seinäpintojen ja huonekalujen sisältämä kosteus vaikuttaa sisäilman kosteusprosenttiin.

Edellä esitetyistä syistä johtuen mitoituksessa sisäilman RH -prosentiksi on suositeltavaa valita jokin arvo 35...50 % väliltä talvitilanteessa. Nämä arvot ovat myös lähellä terveysviranomaisien suositusta, koska on todettu, että sisäilman RH:n tulisi olla vuodenajasta riippumatta välillä 25...45 %. Sisäilman RH -prosentin ollessa välillä 35...50 % ja sisälämpötilan $\leq 20^\circ\text{C}$, on seinän sisäpinnassa oltava vähintään 5 -kertainen vesihöyrynvastus avo- ja suljetun eristeen ulkopuolella oleviin materiaalikerroksiin verrattuna ja lisäksi tuulensuojalevyn vesihöyrynläpäisevyyden on oltava on riittävän suuri.

Konvektio

Konvektiota ei tarvitse tarkastella erikseen, jos talossa on alipaine tai rakenteissa on ehjä ilmansulkukerros. Ilmanvaihtojärjestelmät pyritään asentamaan ja säätämään niin, että koko rakennuksessa vallitsee alipaine, mutta todellisuudessa näin ei välttämättä ole. Jos

oletetaan, että rakennuksessa on ylipainetta, on mitoitusta varten tiedettävä ylipaineen määrä ja reikien koko rakenteissa.

Ylipaineen määrä voi olla huomattavasti suurempi korkeiden rakennusten yläosissa termisestä paine-erosta johtuen. Toisaalta myös matalissa rakennuksissa voi esiintyä ylipainetta, jos koneellinen tuloilmanvaihto on säädetty väärin poistoilmaan nähden. Ylipaine voi vaihdella 0...20 Pa välillä tilanteesta riippuen. Yleensä paine-erot ovat kuitenkin pienempiä (0...5 Pa).

Vaipparakenteissa olevien reikien kokoa ja määrää on hyvin vaikeaa arvioida, koska niiden määrä riippuu paljolti rakentajien huolellisuudesta ja ammattitaidosta. Ylipaineen kannalta merkityksellisiä ovat rakennuksen yläosissa olevat reiät, jotka ulottuvat koko rakenteen sisäpinnan läpi. Kriittisimpiä paikkoja tässä mielessä ovat erilaiset taite- ja kulmakohdat sekä läpivientien reunat. Lähtökohtana voidaan kuitenkin pitää sitä tilannetta, että reiät ja raot tukitaan tiiviisti esimerkiksi teippaamalla. Tällöin erillistä konvektiomitoitusta ei tarvita.

Diffuusion ja konvektion lisäksi kosteuden siirtymismuotoja ovat myös painovoimainen ja kapillaarinen siirtyminen. Kosteuden painovoimaisen ja kapillaarisen siirtymisen osalta tilanne on selkeä, sillä rakenne on suojattava niitä vastaan riittävän hyvillä kosteuseristysillä.

6.2 Materiaaliominaisuudet

Kosteusteknistä mitoitusta varten on tiedettävä materiaalien vesihöyrynläpäisevydet, ilmanläpäisevydet ja lämmönjohtavuudet eri olosuhteissa. Näistä varsinkin vesihöyrynläpäisevyys voi muuttua huomattavasti lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.

Nykyisin monille materiaaleille on määritetty ainoastaan yksi vesihöyrynläpäisevyysarvo tietyissä lämpötila ja RH –olosuhteissa. Tältä osin tarvitaan lisää tutkimustietoa materiaalien käyttäytymisestä.

Mikäli höyrynsulkukerros tehdään huomattavasti tiiviimmäksi kuin 5:1 –sääntö edellyttää, ei muiden materiaalikerrosten vesihöyrynläpäisevyyttä tarvitse tuntea tarkasti.

6.3 Kosteuden siirtymistä kuvaavat laskentamallit

Rakenteiden kosteustekninen suunnittelu tapahtuu käytännössä siten, että rakenteisiin laitetaan erilliset materiaalikerrokset suojaamaan niitä kosteusrasituksilta ja toisaalta rakenteet suunnitellaan niin, että ne pääsevät tarvittaessa kuivumaan. Diffuusion suhteen mitoituksessa käytetään 5:1 –sääntöä sisäpinnan riittävän höyrytiiveyden varmistamiseksi.

si. Konvektion suhteen ilmatiiveys varmistetaan ilmansulun avulla eikä tarkempia laskennallisia tarkasteluja yleensä tehdä.

Nyt tehtyjen kokeiden ja aikaisempien kokemusten perusteella voidaan todeta, että diffuusiolaskennassa käytetty 5:1 –säntö on yleensä riittävä seinärakenteiden hyvän kosteusteknisen toiminnan takaamiseksi. Se on siis käyttökelpoinen nyrkkisäntö mitoitusta varten myös jatkossa. Konvektion suhteen ehjä ilmansulku tai alipaine sisällä takaavat rakenteen luotettavan toiminnan. Eri asia on, miten tämä saadaan varmistettua käytännössä.

Vaipparakenteet voidaan mitoittaa myös tarkempien laskentamallien avulla, jotka ottavat huomioon lämpötila-, kosteus- ja paine-ero-olosuhteiden sekä materiaaliominaisuuksien lisäksi lukuisia muitakin tekijöitä. Näitä ovat mm. auringon säteily, ilmansuuntien ja tuulen vaikutus, vuorokauden ja vuodenaikojen vaihtelu, eri kosteuden siirtymistavat rakenteen sisällä sekä materiaalien kosteudensitomiskapasiteetti ja kuivumiskyky.

Tarkoilla laskentamalleilla voidaan selvittää erikoistapauksissa, tarvitaanko rakenteen sisäpinnassa vielä suurempi vesihöyrynvastus kuin 5:1 –säntö edellyttää. Niiden avulla voidaan tarkastella myös esim. ulkopuolisen sateen vaikutusta rakenteisiin sekä homerisikin lisääntymistä syys- ja kevätolosuhteissa. Tarkkoja laskentamalleja tarvitaan myös sitä enemmän mitä läpäisevämmäksi seinärakenne halutaan tehdä.

Tarkkojen laskentamallien heikkous on siinä, että ne edellyttävät suurta määrää lähtötietoja sekä ATK-pohjaista mitoitushjelmaa. Lähtötietojen kasvaessa niissä esiintyvien virheiden määrä kasvaa, jolloin mitoitus voi antaa oleellisestikin väärän tuloksen. Lopputuloksen luotettavuus riippuu tällöin merkittävästi laskennassa käytettävien varmuuskertoimien suuruudesta.

Väärä lopputulos voidaan tosin saada diffuusiotarkasteluissa myös 5:1 –säntöä käytettäessä, mikäli eri materiaalikerrosten aineominaisuuksia ei tunneta riittävän tarkasti. Tiiviimpiä höyrynsulkuja käytettäessä ongelmat kuitenkin poistuvat, koska sisäpinnan vesihöyrynvastus tulee joka tapauksessa riittäväksi. Toisin sanoen, jos halutaan varmistua rakenteen toiminnasta diffuusion suhteen, on paljon varmempaa ja yksinkertaisempaa lisätä sisäpinnan vesihöyrynvastusta kuin tarkastella rakennetta tarkemman laskentamallin avulla.

Rakenteiden hyvä kosteustekninen suunnittelu ei edellytä monimutkaisia laskelmia, mikäli rakenteiden materiaaliominaisuudet tunnetaan eri olosuhteissa ja mikäli suunnittelijoilla on käytössä hyviä tyyppirakenneratkaisuja. Tarkemman laskentamenetelmän käyttö ei myöskään säästä rakennuskustannuksia, koska rakenteita ei optimoida materiaalimenekin vähentämiseksi. Suunnittelu voidaan edelleen toteuttaa vanhoja periaatteita noudattaen:

suojataan rakenne kosteudelta erilaisten materiaalikerrosten avulla ja huolehditaan siitä että rakenne pääsee kuivumaan.

Tarkat laskentamallit ovat hyödyllisiä erityisesti tutkimuslaitosten ja tuotekehitysyksiköiden käytössä rakenteita kehitettäessä ja testattaessa. Niiden avulla voidaan kätevästi tarkastella uusia rakenneratkaisuja eri rasitusolosuhteissa. Kun laskentatulokset yhdistetään kokeelliseen testaukseen ja kokemusperäisiin tietoihin, voidaan suunnittelijoille antaa valmiina uusia rakennevaihtoehtoja tai suojaustapoja, jotka on jo testattu luotettavasti eri tilanteissa.

7 Yhteenveto

TTKK:n talonrakennustekniikan laboratorioon on rakennettu uusi rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto, jonka avulla voidaan selvittää vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa eri olosuhteissa. Laitteisto on kehitetty aikaisemmin tehdyn lämmönläpäisy-laitteiston pohjalta ja sen kehitystyö on kestänyt kokonaisuudessaan n. 4 vuotta.

Uusi tutkimuslaitteisto koostuu lämpimästä ja kylmästä kammioista, joiden väliin tutkittava rakenne asetetaan. Lämpimässä kammiossa mallinnetaan sisäilman olosuhteita ja kylmässä kammiossa ulkoilman olosuhteita. Laitteistossa on suuri joukko erilaisia mittausta- ja säätölaitteita, joita ohjataan automaattisesti tietokoneen avulla. Tarkka ja nopea olosuhteiden säätö edellyttää tehokasta ohjausohjelmaa, joka hakee eri tekijöiden tasapainotilaa koko ajan.

Kokeissa säädettävänä suureina ovat sisä- ja ulkopuolen lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus (RH) sekä paine-ero tutkittavan rakenteen yli. Kokeita voidaan tehdä joko vakio-olosuhteissa tai muuttuvissa olosuhteissa.

Kokeen aikana tietokone mittaa ja laskee erilaisten suureiden arvot, säätää niiden perusteella koeolosuhteita ja tallentaa mittaustulokset tulostiedostoihin. Kokeen etenemistä voidaan seurata myös erilaisilta seurantasivuilta tietokoneen näytöltä. Antureilta mitattujen arvojen lisäksi tutkittavasta rakenteesta otetaan rakennenäytteitä, joista selvitetään mm. materiaalien kosteuspitoisuudet ja kondensoitumisen voimakkuus rakenteessa. Mitattujen suureiden mittauserävarmuudet saadaan valmistajien tai TTKK:n tekemän kalibroinnin perusteella.

Rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa on monia ominaisuuksia, jotka yhdessä tekevät siitä uudentyyppisen ja monipuolisen koelaitteiston. Näitä ominaisuuksia ovat mm.:

- kokeissa hallitaan kaikkia sisä- ja ulkoilman olosuhteita yhtäaikaan
- rakenteita voidaan testata todellista tilannetta vastaavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa (esim. ulkoilman RH voidaan säätää todellista vastaavaksi myös pakkaspuolella)
- kaikki säädettävät olosuhtearvot voidaan asettaa vapaasti säätöalueen sisällä
- kaikki mittaukset ja säädöt tapahtuvat automaattisesti ja nopeasti tietokoneen avulla
- kokeessa voidaan mitata rakenteeseen diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvät kosteusvirrat erikseen
- rakenteita voidaan mitata vakio-olosuhteissa tai olosuhteita voidaan vaihdella syklisesti

- laitteiston tiiviyyden ja elementin asennustekniikan ansiosta ilman virtaus tapahtuu tutkittavan rakenteen läpi hallitusti
- tutkimusaukon koko on suuri (pinta-ala $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$ ja syvyys 400 mm), jolloin koe-rakenteessa tapahtuu samat ilmiöt kuin todellisissa rakenteissakin (esim. rakenteen sisäinen konvektio)
- laitteiston säätö- ja mittausjärjestelmiä voidaan lisätä ja vaihtaa tarpeen mukaan
- laitteistoa voidaan tarvittaessa kääntää, jolloin seinä-, ylä- ja alapohjarakenteet voidaan testata oikeassa asennossa
- laitteiston rakentamisen yhteydessä kehitettyjä säätö- ja mittausjärjestelmiä voidaan käyttää muidenkin laboratoriotutkimusten koejärjestelyissä

Uudella tutkimuslaitteistolla selvitettiin vesihöyryn siirtymistä puurunkoisissa ulkoseinä-rakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Erityisesti haluttiin selvittää höyrynsulun tarvetta ja paine-eron vaikutusta rakenteiden toimintaan. Lisäksi vertailtiin mineraalivillan ja puukuitueristeen toimintaa rakenteissa. Tutkimuksessa mitattiin kaikkiaan 8 erilaista seinärakennetta talviolosuhteissa: sisäpuolella lämpötila oli $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja RH 50 %, ulkopuolella lämpötila oli $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja RH 90 %. Kokeissa vaihdeltiin paine-eroa rakenteen yli siten, että aluksi sisäpuolella oli alipaine -10 Pa , tämän jälkeen paine-eroton tilanne 0 Pa ja lopuksi ylipaine $+10 \text{ Pa}$. Yksi koe kesti yleensä n. kuukauden.

Tehtyjen kokeiden perusteella on saatu seuraavat koetulokset:

Diffuusion vaikutus

1. Kaikki seinärakenteet toimivat diffuusion kannalta turvallisesti, jos
 - sisäilman kosteuslisä on pieni ja
 - rakenteeseen ei pääse vettä kosteusvuotojen seurauksena
2. Kosteutta läpäisevä rakenne on selvästi riskialttiimpi kondensoitumisen kannalta kuin höyrynsulullinen rakenne.

→ Seinän sisäpinnassa on oltava riittävä vesihöyrynvastus (5:1 -säätö).
3. Jos seinän sisäpinnassa on riittävä ilman- ja höyrynsulku, eristeenä voidaan käyttää sekä puukuitueristettä että mineraalivillaa.
4. Puupohjaisten materiaalien kosteudensitomiskapasiteetti siirtää kondensoitumisen alkamista, mutta ei aina riitä estämään kondenssin syntymistä.
5. Materiaaleihin sitoutunut ylimääräinen kosteus lisää rakenteen kondensoitumisriskiä. Puupohjaisilla materiaaleilla riski on suuri, koska niihin voi sitoutua paljon kosteutta.
6. Seinän ulkopinnassa on oltava riittävän hyvin vesihöyryä läpäisevä tuulensuojalevy, jotta seinässä oleva ylimääräinen kosteus voi poistua. Tuulensuojalevyn ulkopuolella on myös oltava toimiva tuuletusrako.

Konvektion vaikutus

1. Kaikki seinärakenteet toimivat konvektion kannalta turvallisesti, jos
 - rakennuksessa on alipaine **tai**
 - rakenteessa on ehjä ilmansulkukerros
2. Sisällä oleva alipaine ei alenna reiällisen seinän kosteuspitoisuuksia merkittävästi paine-erottomaan tilanteeseen verrattuna. Alipaine varmistaa kuitenkin sen, että rakennukseen ei synny ylipainetta.
3. Sisällä oleva ylipaine nostaa reiällisen seinärakenteen tasapainokosteuksia ja lisää rakenteen kondensoitumis- ja homehtumisriskiä.
4. Kosteutta läpäisevässä seinärakenteessa kondenssi on mahdollinen paine-erosta huolimatta (diffuusio).
5. Höyrinsulullisessa seinärakenteessa kondenssiriski on ainoastaan silloin, jos ylipainetilanteessa rakenteessa on reikiä, jotka ulottuvat koko sisäpinnan läpi.
6. Puukuitueristeen käyttö hidastaa RH –prosenttien nousua ylipainetilanteessa reikien kohdalla, mutta lopulta rakenteen kosteusprosentit vastaavat mineraalivillaseinän arvoja.
7. Reikien ollessa pelkästään ilman-/ höyrinsulun läpi rakenteen RH- prosentit eivät muutu paine-eron vaikutuksesta. Tämä koskee myös sisälevyn kiinnitystä runkopuuhun ilman-/ höyrinsulun läpi.
8. Sisälevyssä ja ilman-/ höyrinsulussa olevat saumat runkopuun kohdalla eivät vaikuta seinärakenteen RH –prosentteihin yli- ja alipainetilanteissa. Ilman-/ höyrinsulun saumaan riittää 200 mm limitys. Saumakohtien teippaus on aina suositeltavaa, mutta runkopuun kohdalla se ei ole välttämätöntä.

Muut koetulokset

1. Laskennallinen tarkastelu eroaa todellisesta tilanteesta sitä enemmän mitä läpäisevämpi seinärakenne on.
→ Kosteutta läpäisevän rakenteen kosteustekninen mitoitus on vaikeaa.
2. Läpäisevä seinärakenne ei kykene tasaamaan sisäilman kosteutta talviaikaan.
3. Ylipaine nostaa lämpötiloja huomattavasti tuulensuojalevyn sisäpinnassa niissä rakenteissa, joissa reiät ulottuvat koko sisäpinnan läpi.
4. Ulkoverhous nostaa tuuletusvälin lämpötilaa ulkoilmaan verrattuna, jolloin rakenteen RH –prosentit alenevat tuulensuojalevyn sisäpinnassa tiiviillä rakenteilla.
5. Talviolosuhteissa seinärakenteissa ei yleensä esiinny homeen kasvulle otollisia lämpötila- ja RH –olosuhteita.

Lähdeluettelo

1. Björkholtz, D. 1987. Lämpö ja kosteus - Rakennusfysiikka. Helsinki, Rakentajain kustannus Oy. 159 s.
2. FINAS S12. 1992. Suositus kalibroinnin mittausepävarmuuden määrittämisestä. Helsinki, Mittatekniikan keskus. 23 s.
3. Halko, P., Härkönen, S., Lähteenmäki, I., Välimaa, T. 1990. Teollisuuden mittaustekniikka, Perusmittauksia. Helsinki, Ammattikasvatushallitus. 143 s.
4. Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M. 1997. Uudet vaipparakenteet. Energian säästö ja kosteustekniikka. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 1869. 90 s.
5. Koski, T., Vinha, J., Lindberg, R. 1997. Lisäeristettyjen hirsiseiniä kosteustekninen kunto. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, julkaisu 78. 107 s. + 51 liites.
6. Kosteus rakentamisessa, RakMK C2 opas.1999. Helsinki, Ympäristöministeriö, Ympäristöopas 51. 53 s.
7. Lehtinen, T., Lehtonen, H. 1997. Rakennusfysikaalisen mitoituksen kehittäminen, Puurankaisten ulkoseiniä kosteustekninen mitoitusmenetelmä. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, julkaisu 68. 84 s. + 4 liites.
8. Lämmön- ja kosteudeneristys RIL 155. 1984. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto ry. 389 s.
9. Nevander, L. E., Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 s.
10. Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R. 1996. Puukuitueristeisen seinärakenteen hengittävyys. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, julkaisu 67. 35 s. + 9 liites.
11. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa C2. 1998. Kosteus, Määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki, Ympäristöministeriö. 11 s.

12. Ojanen, T., Kokko, E., Pallari, M-L. 1993. Tuulensuojan toimintaperusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 1478. 125 s. + 24 liites.
13. Ojanen, T., Kokko, E., Salonvaara, M., Viitanen, H. 1997. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 1870. 90 s. + 2 liites.
14. Viitanen, H. 1994. Kriittisten kosteusolojen hallinta – avain rakenteiden home- ja lahovaurioiden ehkäisyyn. RIL 167. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. s. 53 – 62.
15. Vinha, J., Niemelä, T., Viitala, P. 1997. Vesihöyryn siirtyminen vaipparakenteissa paine-eron vaikutuksesta, Osa I. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, Tutkimusraportti 606/97. 26 s.
16. Vinha, J. 1997. Lämmönläpäisevyyslaitteiston toiminnan tarkastelu. Rakenteiden mekaniikka. Vol. 30 1/1997, s. 109 - 131.
17. Vinha, J. 1998. Rakenteiden lämmöneristysominaisuuksien mittauslaitteisto. Lisen-siaatintutkimus. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. 106 s. + 17 liites.

Liiteluettelo

Liite I	Lämpimän kammion rakentamisvaiheista otettuja valokuvia	1 s.
Liite II	Valokuvia koeseinän valmistamisesta	1 s.
Liite III	Valokuvia koeseinän asennuksesta	1 s.
Liite IV	Valokuvia tehdyistä kokeista	2 s.
Liite V	Koeseinien rakennekuvat ja antureiden sijoitus	8 s.
Liite VI	Kokeiden tulokset	16 s.

Liite I

Lämpimän kammion rakentamisvaiheista otettuja valokuvia



Kuva 1. PUR-levyt liimattiin PVC-levyistä hitsatun kotelon pintaan (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 2. Tutkimusaukon tukirakenteet tehtiin puusta ja pinnat laminoidusta vanerista (katselusuunta toisinpäin).



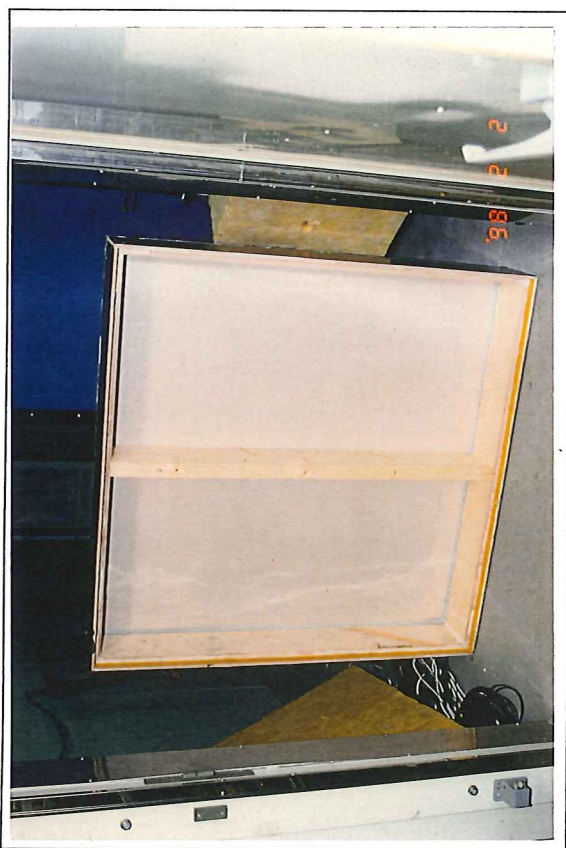
Kuva 3. Lämpimän kammion kaikki ulkopinnat tehtiin filmivanerista (katselusuunta toisinpäin).



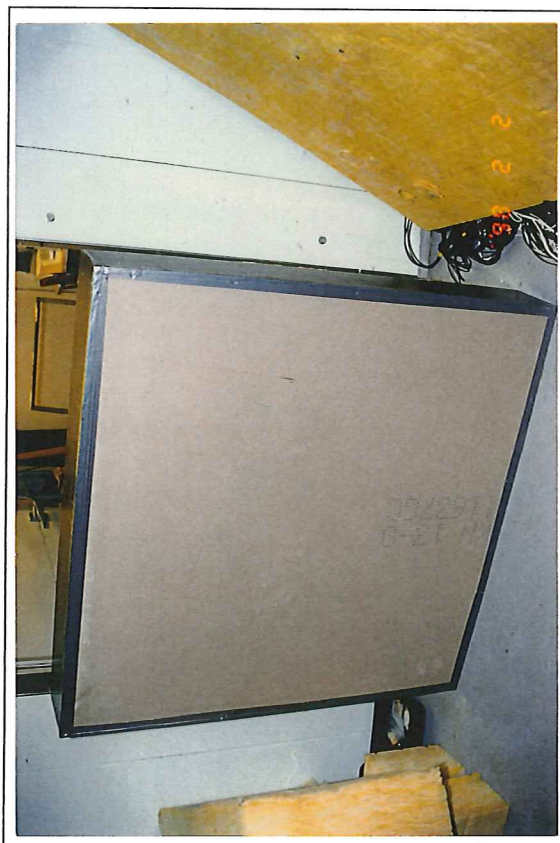
Kuva 4. Lämmin kammio valmiina lukuun ottamatta ulkopinnan kosteudeneristystä ja alumiinista tukirunkoa (katselusuunta toisinpäin).

Liite II

Valokuvia koeseinän valmistamisesta



Kuva 1. Koe-elementin kehykset ja runkopuu, joihin kiinnitettiin höyrynsulku ja sisälevy valmiiksi (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 2. Sama rakenne toiselta puolelta kuin kuvassa 1. Sisälevynä oli tässä koe-elementissä kipsilevy (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 3. Kotelorakenteen rakenneperiaate. Kaikki saumat tiivistettiin pakkasenkestävällä silikonilla (katselusuunta toisinpäin).



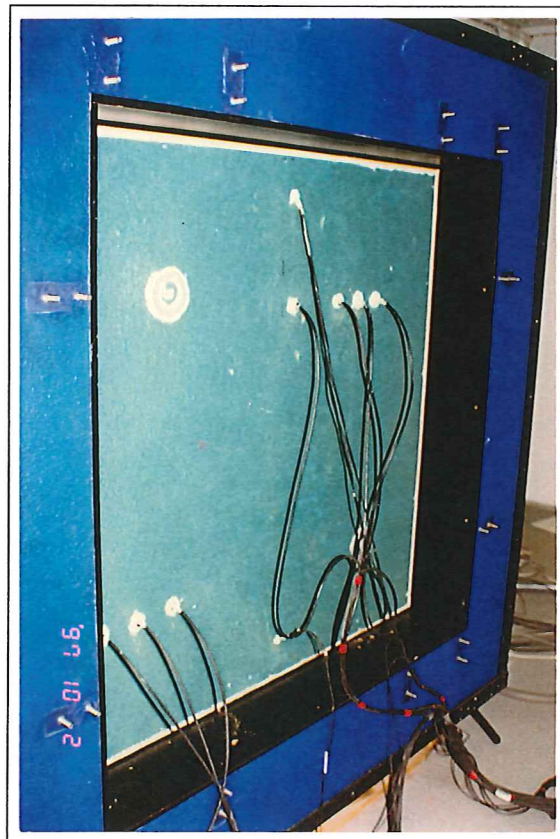
Kuva 4. Koeseinissä käytettiin ulkoverhouksena irrotettavaa vaakapanelointia. Ulkoverhoukseen kiinnitettiin ilmavirtaus- ja kosteusanturi; pintalämpötila-anturit puuttuvat (katselusuunta toisinpäin).

Liite III

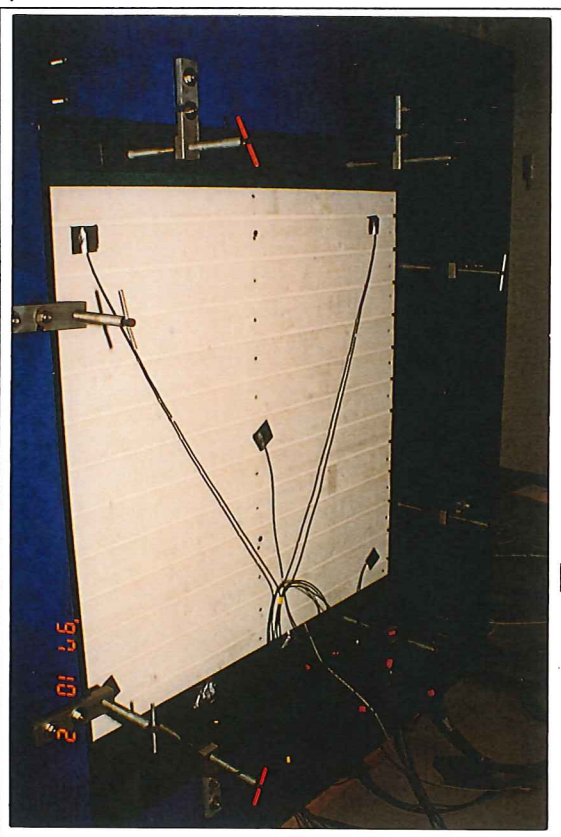
Valokuvia koeseinän asennuksesta



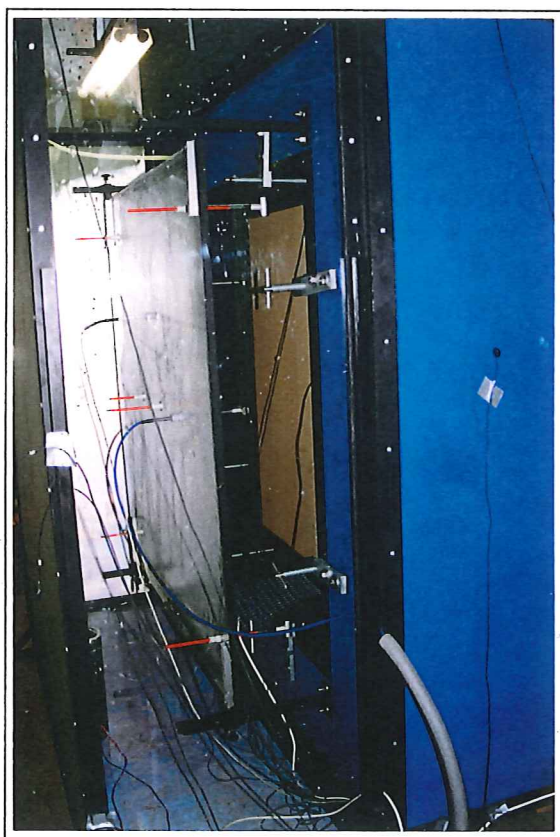
Kuva 1. Valmiin koeseinän sisäpintaan asennettiin pintalämpötila-anturit. Koeseinä oli tämän jälkeen valmis asennettavaksi tutkimusaukkoon.



Kuva 2. Koeseinä asennettiin tutkimusaukkoon ja reunat tiivistettiin. Kuvasta näkyy rakenteeseen sijoitettujen anturien johtoja ja näytteenottoaukkojen tulppaus.



Kuva 3. Koeseinä kiristettiin kiristyspannan avulla paikalleen ja ulkoverhous kiinnitettiin paikalleen.



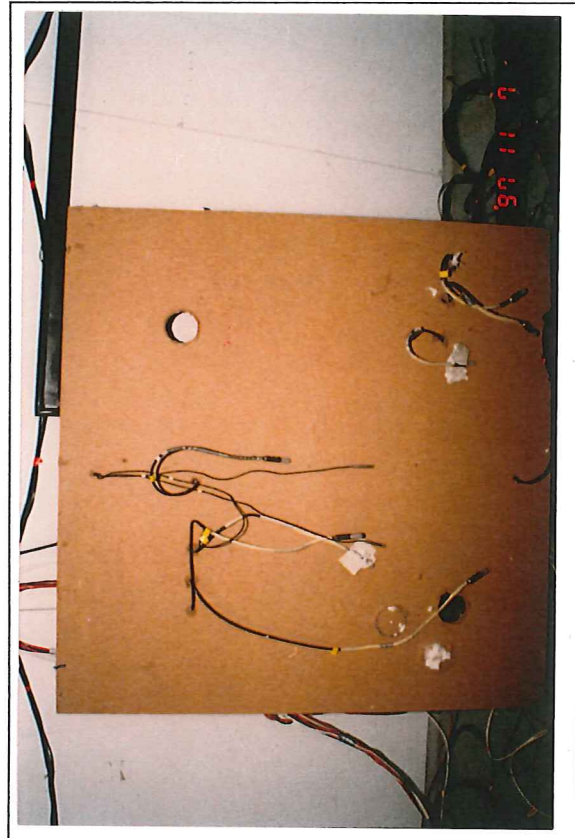
Kuva 4. Ulkosuojalevy mittaustureineen kiinnitettiin paikalleen.

Liite IV

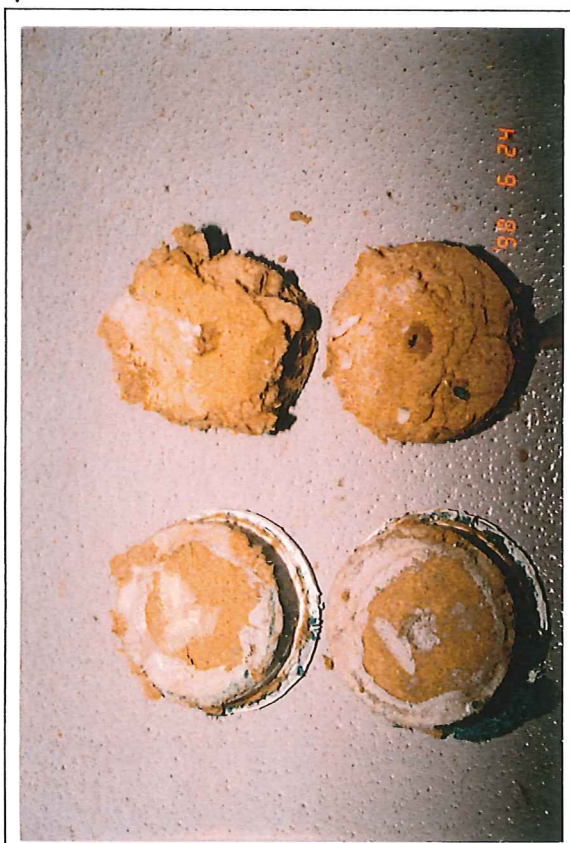
Valokuvia tehdyistä kokeista



Kuva 1. Koeseinän 1 lämmöneristeet kokeen jälkeen. Lämmöneriste asennettiin vastavalla tavalla kaikkiin koeseiniin (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 2. Koeseinän 1 tuulensuojalevy kokeen jälkeen. Koeaikana tuulensuojalevyyn ei kondensoitunut vettä (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 3. Koeseinästä 2 otettuja näytepaloja alipainejakson jälkeen. Tuulensuojalevyyn oli jo kertynyt jäätä (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 4. Koeseinän 2 tuulensuojalevy oli kauttaaltaan märän tuntuinen kokeen jälkeen.



Kuva 5. Koeseinässä 4 jäätä muodostui lämpötila-anturien kiinnittämiseen käytetyn teipin alle tuulensuojalevyn ulkopinnalle (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 6. Koeseinän 5 puukuitueriste asennettiin käsin sullomalla. Eriste kuvattuna kokeen jälkeen (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 7. Koeseinässä 8 kondensoituminen tuulensuojalevyn taakse oli voimakasta (katselusuunta toisinpäin).



Kuva 8. Koeseinässä 8 myös lämmöneriste jäättyi lähes kauttaaltaan kiinni tuulensuojalevyyn (katselusuunta toisinpäin).

Liite V

Koeseinien rakennekuvat ja antureiden sijoitus



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi
KOESEINÄ 1

Sisältö
Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika
03.10-
07.11.97

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

A...H
○
75...79
△

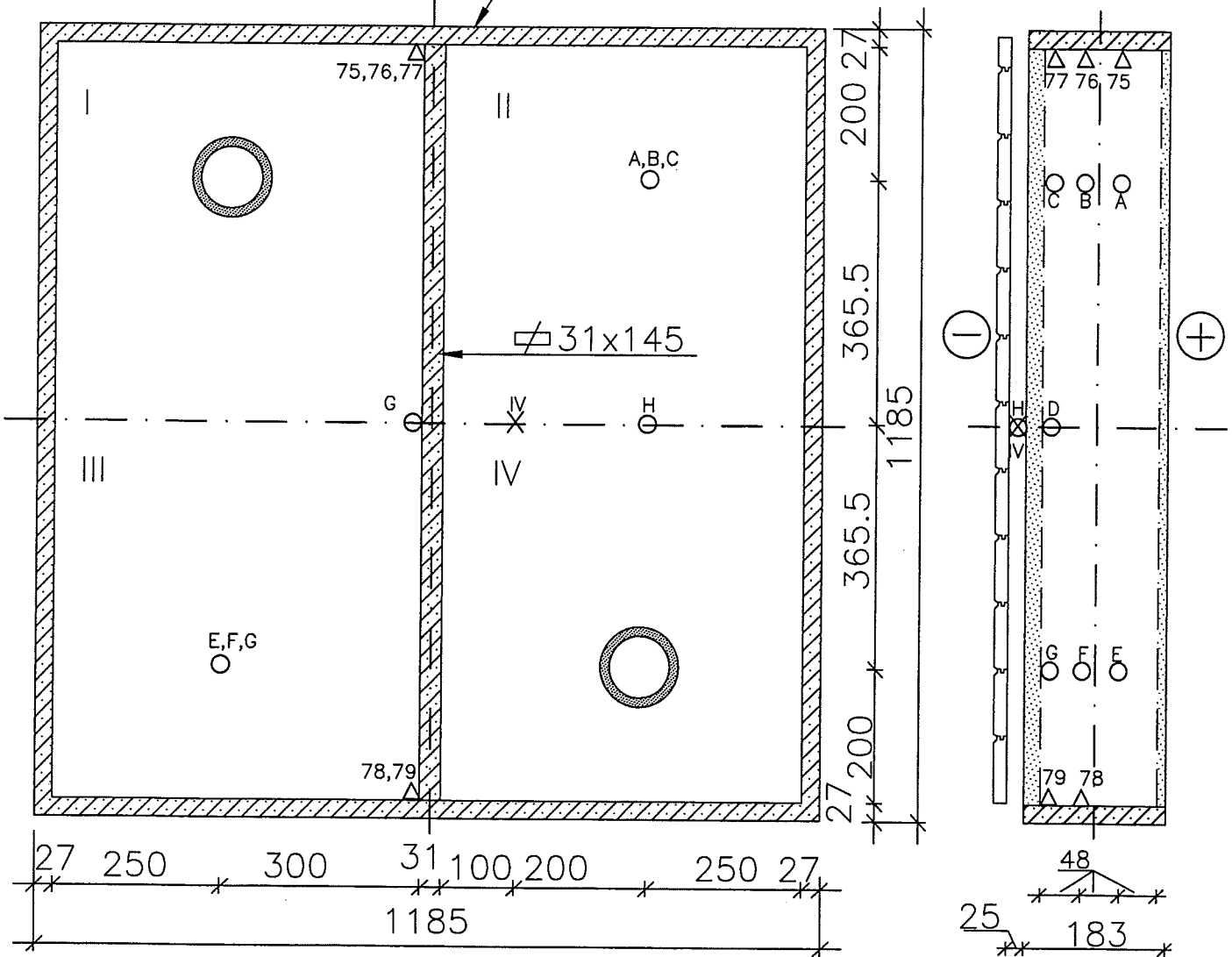
IV-anturi
Puupalat

X
○

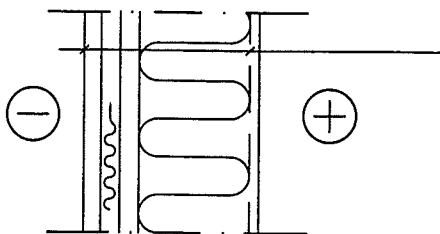
ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 183 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 35 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa

Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Huokoinen kuitulevy 25mm
Puukuitueriste 145mm
Bitumipaperi
Kipsilevy 13mm



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi
KOESEINÄ 2

Sisältö
Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika
15.06–
13.07.98

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

A...H
○
74...79
△

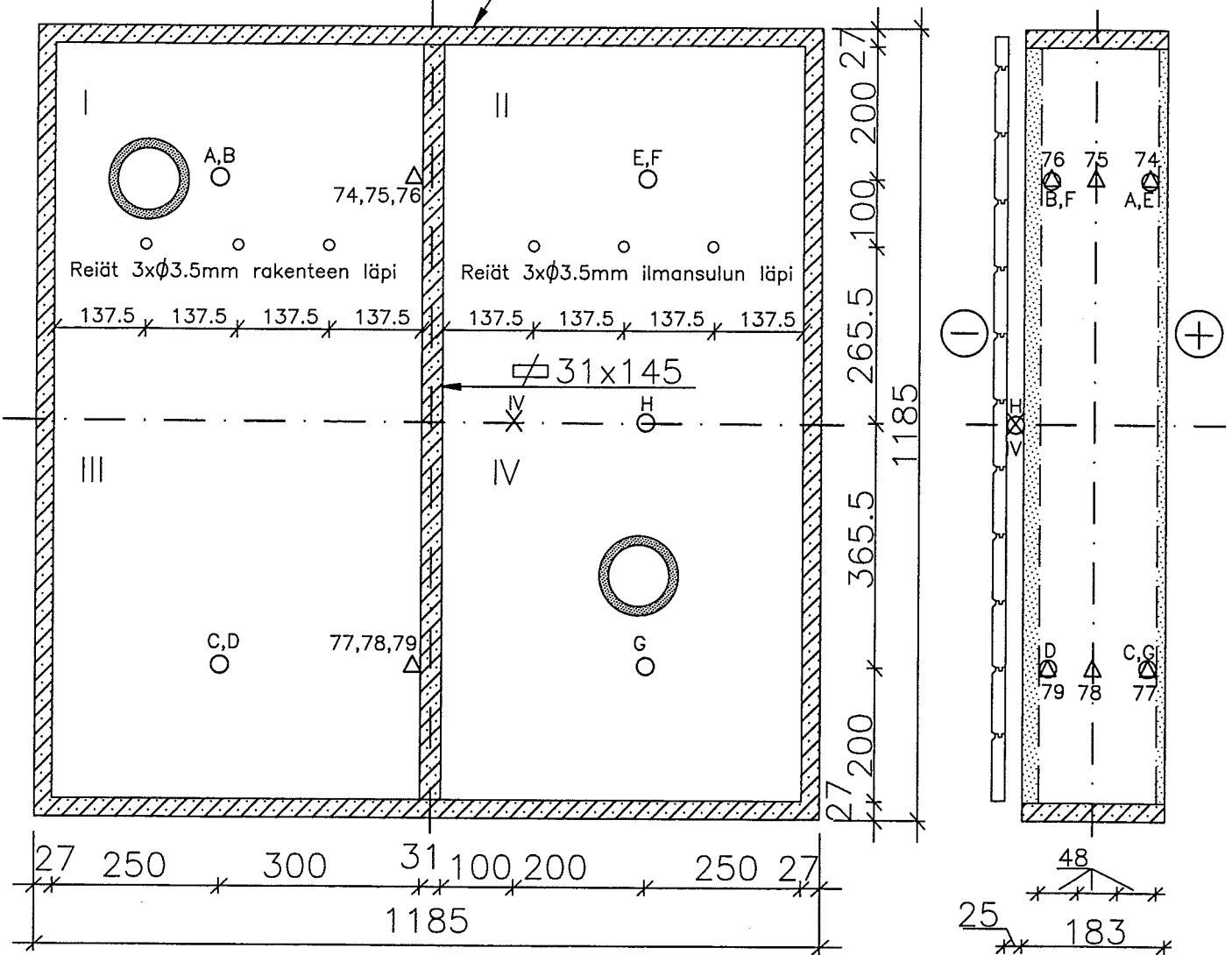
IV-anturi
Puupalat

X
○

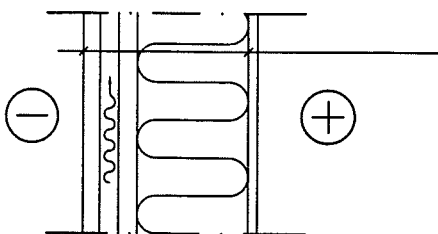
ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 183 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 85 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa

Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Huokoinen kuitulevy 25mm
Puukuitueriste 145mm
Bitumipaperi
Kipsilevy 13mm



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi
KOESEINÄ 3

Sisältö
Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika
05.01-
02.02.98

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

A...H
○
75...79
△

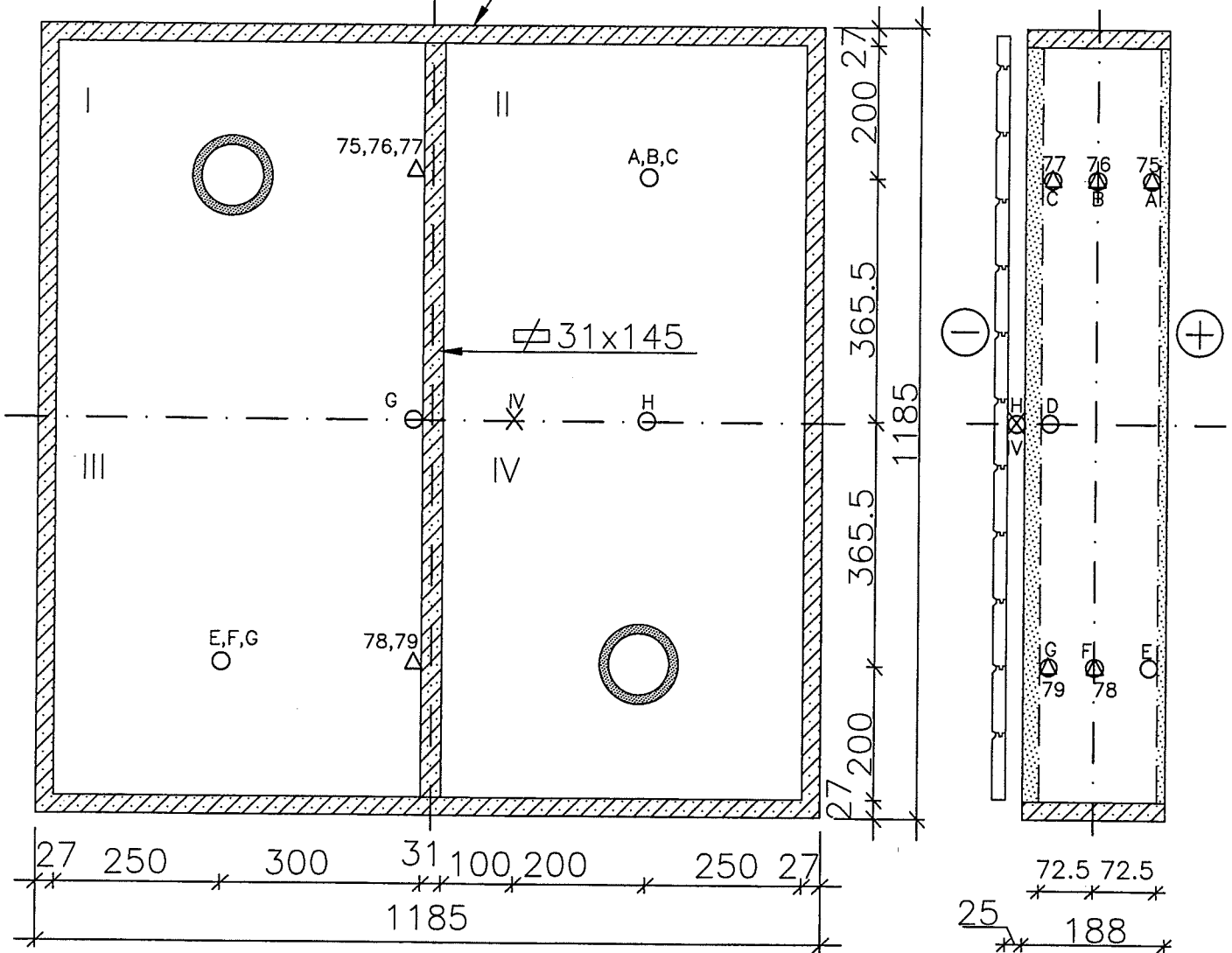
IV-anturi
Puupalat

X
○

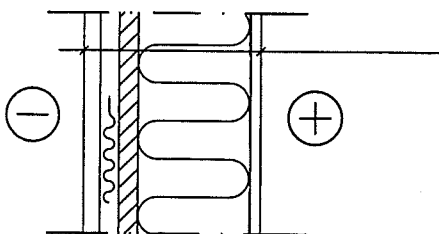
ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 188 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 35 % (+20 °C)

Katselusuunta ulkoa

Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Kova mineraalivilla 30mm
Mineraalivilla 145mm
Höyrynsulku, PE 0,2mm
Kipsilevy 13mm



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi
KOESEINÄ 4

Sisältö
Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika
17.07–
14.08.98

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

A...H
○
74...79
△

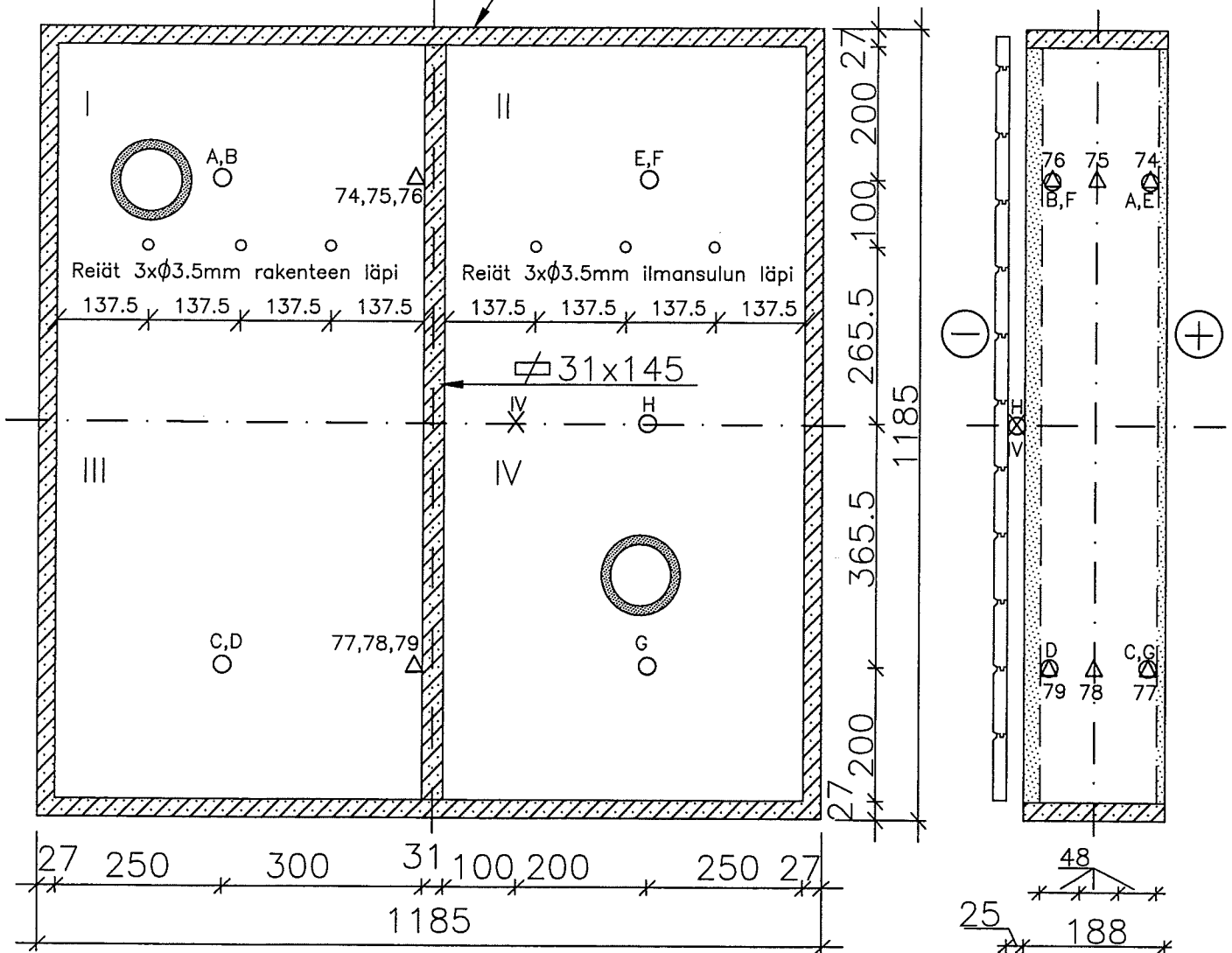
IV-anturi
Puupalat

X
○

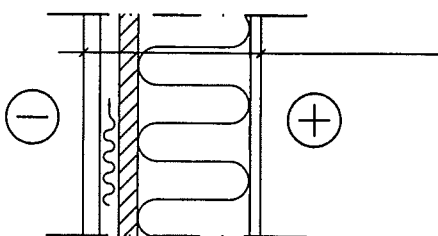
ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 188 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 85 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa

Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Kova mineraalivilla 30mm
Mineraalivilla 145mm
Höyrynsulku, PE 0,2mm
Kipsilevy 13mm



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi
KOESEINÄ 5

Sisältö
Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika
22.11-
19.12.97

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

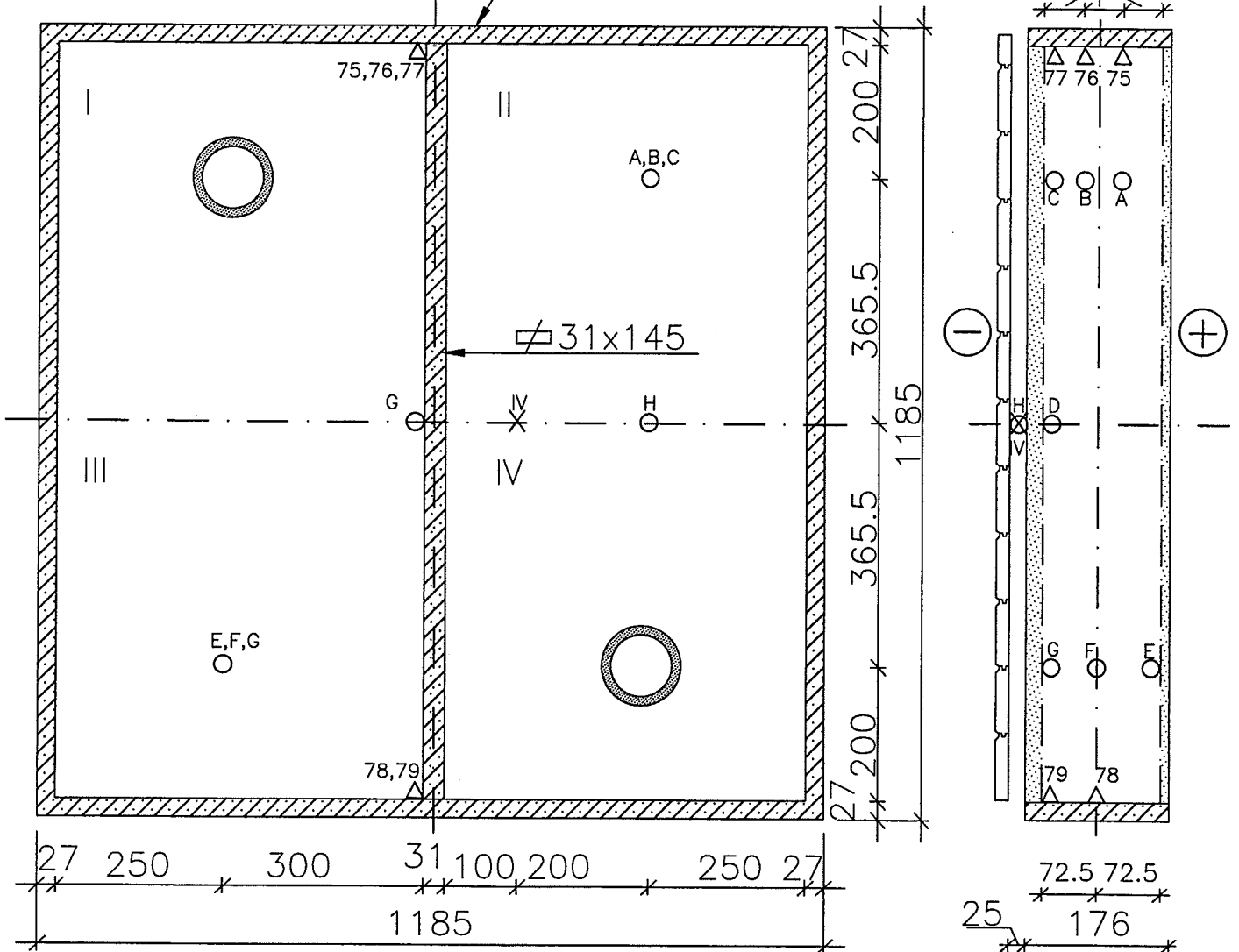
A...H
○
75...79
△

IV-anturi
Puupalat

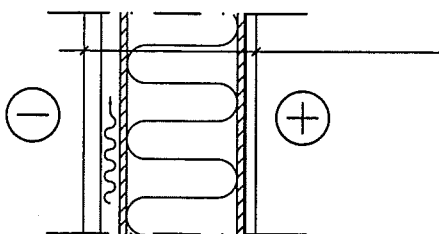
X
○

ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 176 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 35 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa
Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Kuusivaneri 9mm, 3 ply
Puukuitueriste 145mm
Kuusivaneri 9mm, 3 ply
Bitumipaperi
Kipsilevy 13mm



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi
KOEEINÄ 6

Sisältö
Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika
30.09.–
26.10.98

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

A...H
○
74...79
△

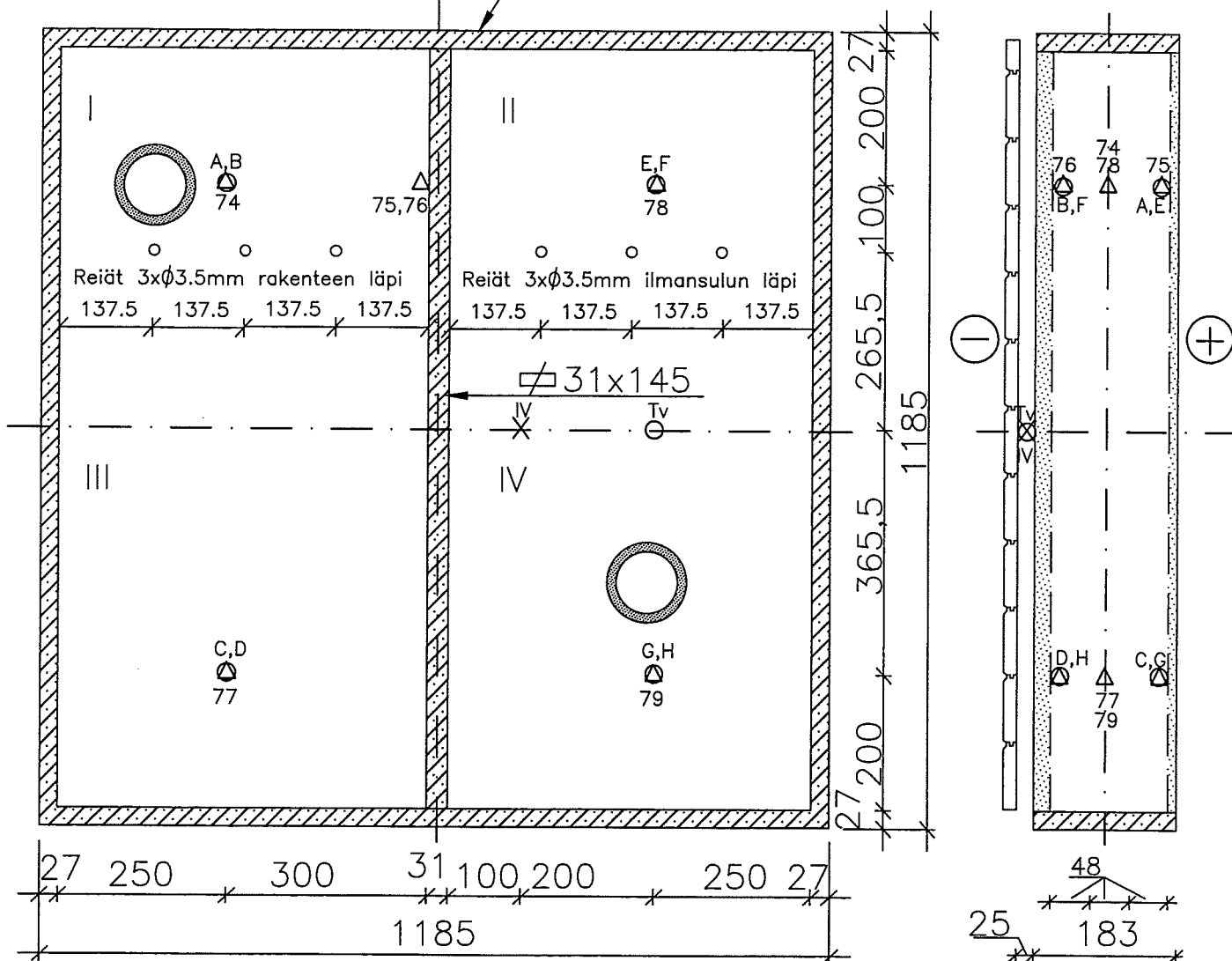
IV-anturi
Puupalat

X
○

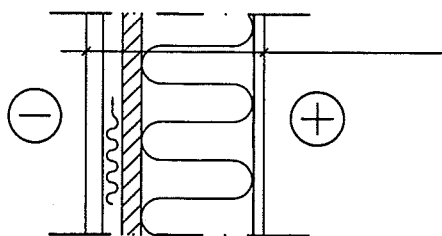
ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 183 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 55 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa


Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Huokoinen kuitulevy 25mm
Puukuitueriste 145mm
Höyrynsulku, PE 0,2mm
Kipsilevy 13mm

 TTKK/TRT Rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto	Kokeen nimi KOESINÄ 7	Sisältö Koe-elementtien mitat ja mittausanturien sijainti	Koeaika 19.09.– 29.09.97
--	---------------------------------	---	--------------------------------

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi
Lämpötila-anturi

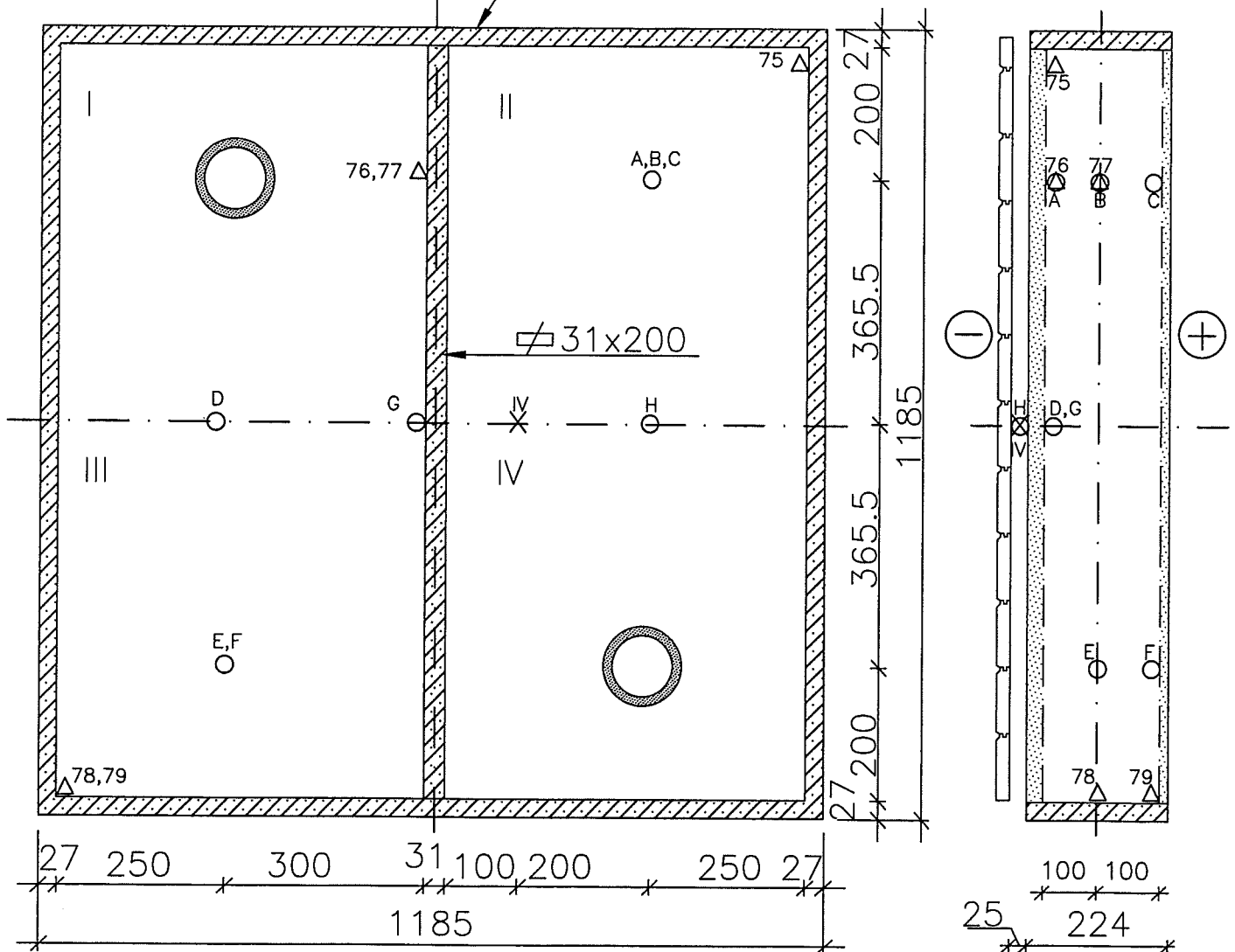
A...H
○
75...79
△

IV-anturi
Puupalat

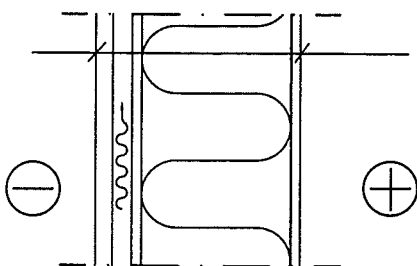
X
○

ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 224 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 35 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa
Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Huokoinen kuitulevy 12mm
Mineraalivilla 2*100mm
Rakennuspaperi
Huokoinen kuitulevy 12mm



TTKK/TRT
Rakennusfysikaalinen
tutkimuslaitteisto

Kokeen nimi

KOESEINÄ 8

Sisältö

Koe-elementtien mitat ja
mittausanturien sijainti

Koeaika

25.08.-
28.09.98

MERKINNÄT

RH/lämpötila-anturi

A...H

○

IV-anturi

X

Lämpötila-anturi

74...79

△

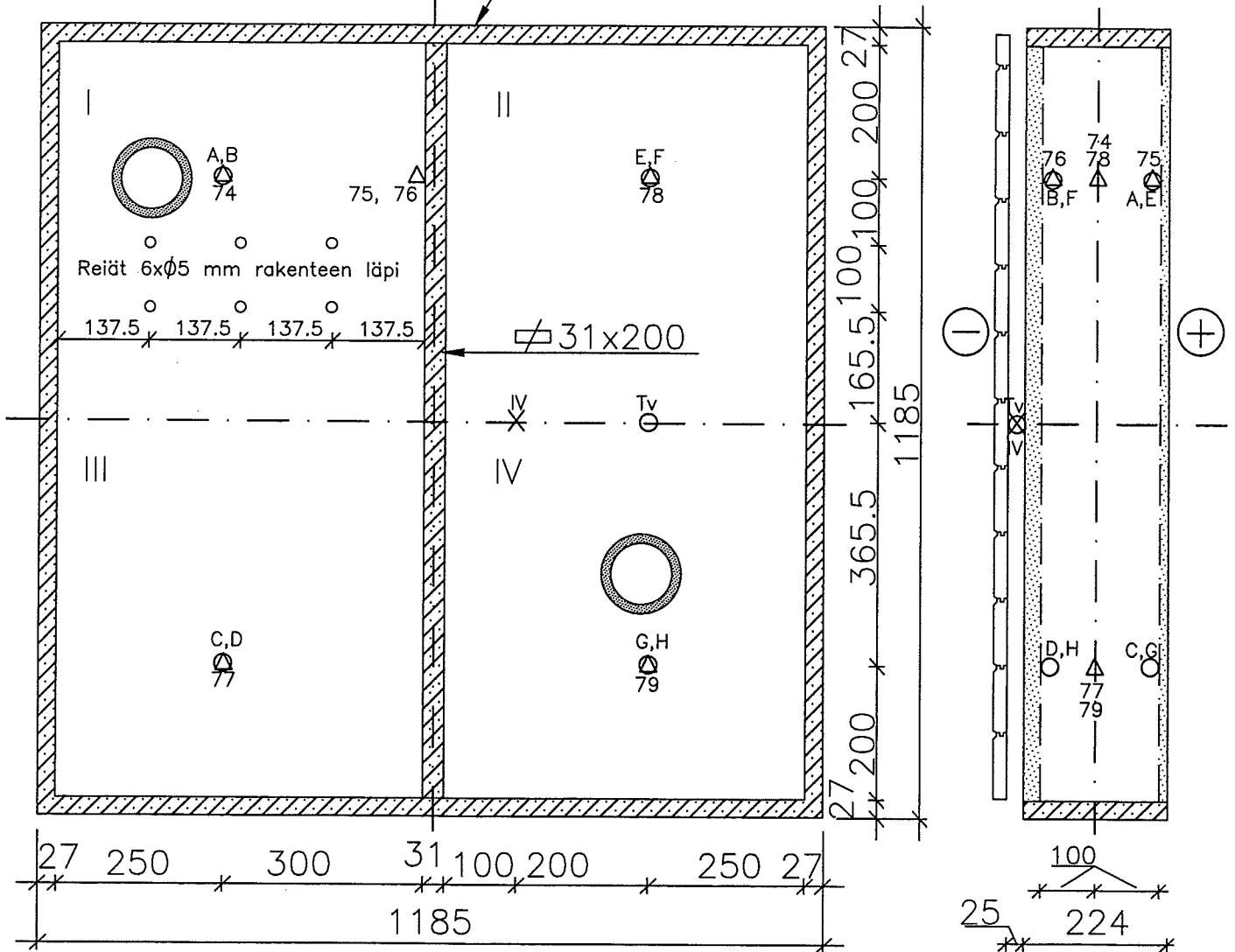
Puupalat

○

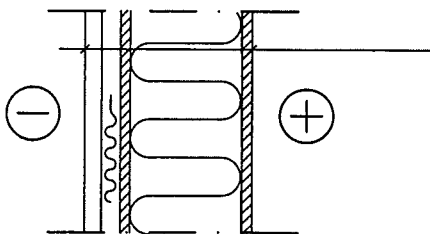
ELEMENTIN KOKO: 1185*1185, paksuus 224 mm (ilman ulkoverhousta)
Tuulensuojalevyn ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet: RH 55 % (+20°C)

Katselusuunta ulkoa

Filmivaneri 9 mm +
sekavaneri 18 mm



RAKENNE



Ulkoverhous, vaakapanelointi 22mm
Tuuletusväli 25mm
Huokoinen kuitulevy 12mm
Puukuitueriste 145+55mm
Ilmansulku, rakennuspaperi
Huokoinen kuitulevy 12mm

Liite VI

Kokeiden tulokset

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 1)

Mittaustulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenäytteet on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	257,3	308,3	264,0
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,01	20,01	20,04
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-10,00	-10,00	-9,99
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	50,0	49,6	49,8
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	90,0	90,0	90,0
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-10,0	0,2	9,9
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,87	18,48	18,51
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-8,49	-8,52	-8,48
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,64	19,62	19,65
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,17	-10,18	-10,16
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,90	19,88	19,88
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,03	-10,02	-10,01
Lämpötila pakkashuoneessa	T_{ph}	°C	-12,80	-12,73	-12,76
Suhteellinen kosteus pakkashuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	66,1	63,5	64,8
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,64	8,58	8,63
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,97	1,98	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkashuoneessa	v_{ph}	g/m ³	1,12	1,09	1,11
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	51,8	51,4	51,5
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,20	0,21	0,21
Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,19	0,19	0,16
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-0,047	0	0,030
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-0,036	0	0,023
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-5,95E-07	0	3,82E-07
Rakenteen läpi siirtynyt ilman tilavuus	V_{rak}	l	-779	0	365
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	24,8	24,8	23,7
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-0,1	0	0,1
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	24,9	24,8	23,6
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	18,7	18,8	17,9
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-0,1	0	0,1
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	18,8	18,8	17,9
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	266	325	264
Tuulensuojalevyyn sitoutunut kosteusmäärä (*)	m_{ts}	g	471	129	103
Rakenteen vesihöyrynläpäisykerroin (**)	$W_{v,rak}$	m/s	3,27E-05	3,29E-05	3,11E-05

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-8,70	-8,76	-8,80
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	10,46	10,35	10,36
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	3,46	3,31	3,28
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	-2,80	-2,93	-2,97
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-1,53	-1,62	-1,61
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	9,65	9,53	9,61
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	1,59	1,46	1,51
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	-4,70	-4,76	-4,73
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	79,4	81,2	81,6
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	36,9	39,6	40,3
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	51,8	56,3	57,8
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	72,0	79,3	81,7
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	60,9	66,8	68,8
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	34,3	37,1	37,9
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	51,6	56,4	58,0
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	70,1	77,2	79,8
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,95	1,98	1,99
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	3,59	3,83	3,90
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	3,20	3,44	3,52
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	2,85	3,10	3,18
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	2,64	2,88	2,97
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	3,17	3,40	3,49
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	2,80	3,03	3,13
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	2,39	2,62	2,72

RAKENNENÄYTTTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET

Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{puu}	%	13,8	16,7	18,0
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{puu}	%	13,8	16,8	17,9
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkop. (yläosa)	u_{er}	%	13,8	14,5	14,5
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopuolella (alaosa)	u_{er}	%	12,5	14,7	16,5
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{ts}	%	13,5	15,0	16,2
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{ts}	%			
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 9,0 %)	u_{rp}	%			9,9
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteus määrä	m_{er}	g			
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g			
Tuulensuojalevyyn sitoutunut kosteus määrä	m_{ts}	g			

*) Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuuksien perusteella laskettu arvo

**) Rakenteen kosteuspitoisuudet eivät olleet tasapainokosteudessa

Visuaalinen havainnointi

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa ei ollut havaittavissa kosteuden tiivistymistä eikä jään muodostumista missään vaiheessa. Levy oli kuivan tuntuinen käteen koko ajan. Myös puukuitueriste oli kuivan tuntuinen.

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 2)

Mittauks tulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenäytteet on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	206,0	211,8	197,8
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,01	20,04	19,92
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-9,92	-9,89	-9,98
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	50,0	50,6	47,6
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	89,9	89,9	90,0
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-9,9	-0,5	10,2
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,62	18,70	18,61
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-7,81	-7,81	-7,74
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,24	19,27	19,16
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,30	-10,22	-10,36
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,67	19,73	19,72
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,20	-10,11	-10,15
Lämpötila pakkahuoneessa	T_{ph}	°C	-12,77	-12,28	-12,93
Suhteellinen kosteus pakkahuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	69,3	71,3	70,4
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,64	8,76	8,19
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,99	1,99	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkahuoneessa	v_{ph}	g/m ³	1,18	1,29	1,18
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	48,5	53,1	54,9
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,16	0,01	0,01
Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,09	0,07	0,08
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-1,41	0	1,67
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-1,07	0	1,26
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-1,78E-05	0	2,10E-05
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-15000	0	19740
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	20,2	28,8	43,8
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-3,9	0	19,7
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	24,2	28,8	24,1
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	15,3	21,8	33,1
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-3,0	0	14,9
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	18,3	21,8	18,2
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	174	254	361
Rakenteen ilmanläpäisykerroin (*)	K_{rak}	m/s•Pa	1,79E-06	0	2,05E-06
Rakenteen vesihöyrynläpäisykerroin	$W_{v,rak}$	m/s	3,18E-05	3,72E-05	3,39E-05

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-9,18	-9,08	-9,03
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	18,00	18,21	18,16
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	-4,00	-3,66	-2,96
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	17,45	17,63	17,52
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-4,77	-4,38	-3,98
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	16,49	16,63	16,45
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	-3,15	-3,27	-3,29
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	16,84	16,93	16,70
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	82,0	81,8	81,8
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	30,4	30,1	37,5
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	88,5	88,6	89,5
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	31,0	29,2	29,3
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	90,9	91,2	91,6
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	39,5	36,0	35,3
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	91,8	92,0	91,8
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	34,2	30,8	29,8
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,94	1,95	1,95
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	4,68	4,68	5,83
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	3,19	3,28	3,49
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	4,62	4,40	4,37
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	3,09	3,19	3,30
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	5,55	5,10	4,95
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	3,53	3,51	3,49
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	4,91	4,44	4,24

RAKENNENÄYTTTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET

Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{puu}	%	26,5	22,7	29,1
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{puu}	%	26,2	22,0	18,4
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus kokeen alussa	u_{er}		25,3		
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus kokeen alussa	u_{ts}		21,9		
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopuolella (reiät sisäpinnan läpi)	u_{er}	%	34,9	24,4	33,6
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopuolella (reiät ilmansulun läpi)	u_{er}	%	42,8	24,2	20,1
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (reiät sisäp. läpi)	u_{ts}	%	21,8	32,9	24,5
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (reiät ilmans. läpi)	u_{ts}	%	24,8	21,9	21,1
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 12.5 %)	u_{rp}	%			ulkop. 15.5 sisäp. 10.5
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteus määrä (reiät sisäpinnan läpi)	m_{er}	g			- 325
(reiät ilmansulun läpi)					- 434
Kehyksiin sitoutunut kosteus	m_k	g			171
Tuulensuojalevyyen sitout. kosteusm. (reiät sisäp. läpi.)	m_{ts}	g			229
(reiät ilmansulun läpi)					135

*) Mittaustuloksessa on mukana reikien vaikutus

Visuaalinen havainnointi

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa oli havaittavissa kosteuden tiivistymistä ja jään muodostumista jo alipaineen jälkeen. Levy ja lämmöneriste olivat kostean tuntuista käteen koko ajan.

HUOM! Koe oli näytteiden ottoa edeltäneet 3 päivää poikki (lämpötila ulkona nousi +7:ään)

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 3)

Mittaustulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenäytteet on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	209,0	216,3	216,3
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,00	20,00	20,00
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-9,97	-10,01	-9,99
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	50,2	50,5	50,0
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	89,9	90,1	90,0
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-10,5	0,2	9,9
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,51	18,53	18,57
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-8,42	-8,50	-8,42
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,42	19,42	19,43
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,34	-10,35	-10,35
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,78	19,78	19,79
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,02	-10,05	-10,04
Lämpötila pakkahuoneessa	T_{ph}	°C	-15,06	-14,38	-14,31
Suhteellinen kosteus pakkahuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	49,0	57,3	58,7
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,68	8,73	8,65
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,98	1,97	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkahuoneessa	v_{ph}	g/m ³	0,67	0,84	0,87
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	51,0	51,3	51,2
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,14	0,19	0,20
Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,11	0,11	0,10
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-0,013	0	0,020
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-0,010	0	0,015
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-1,59E-07	0	2,46E-07
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-128	0	242
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	0,14	0,26	0,41
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-0,03	0	0,29
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	0,17	0,26	0,12
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	0,10	0,20	0,31
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-0,02	0	0,22
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	0,13	0,20	0,09
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	1,20	2,39	3,66

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-8,84	-8,88	-8,95
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	18,26	18,20	18,15
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	6,77	6,42	6,18
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	-1,41	-1,70	-1,91
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-0,96	-0,87	-0,82
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	17,49	17,56	17,70
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	5,93	6,24	6,83
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	-1,89	-1,66	-1,14
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	80,5	81,2	82,4
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	11,0	10,8	10,9
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	24,4	24,6	25,2
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	46,1	46,8	47,8
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	44,1	43,8	44,0
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	12,4	12,3	12,3
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	26,6	25,8	24,8
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	47,5	46,6	45,0
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,95	1,97	1,98
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	1,71	1,68	1,69
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	1,87	1,85	1,86
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	2,02	2,00	2,02
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	2,00	2,00	2,01
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	1,85	1,84	1,86
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	1,93	1,92	1,91
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	2,01	2,00	2,01

RAKENNENÄYTTTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET

Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{puu}	%	8,2	8,2	7,7
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{puu}	%	10,3	11,7	10,9
Mineraalivillaeristeen kosteuspitoisuus ulkop. (yläosa)	u_{er}	%	2,7	0,8	1,2
Mineraalivillaeristeen kosteuspitoisuus ulkop. (alaosa)	u_{er}	%	0,4	0,7	1,0
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{ts}	%	1,9	0,7	0,8
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{ts}	%			
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 7.7 %)	u_{rp}	%			9,9
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteusmäärä	m_{er}	g			17
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g			74
Tuulensuojalevyn sitoutunut kosteusmäärä	m_{ts}	g			11

Visuaalinen havainnointi

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa ei ollut havaittavissa kosteuden tiivistymistä eikä jään muodostumista missään vaiheessa. Levy oli kuivan tuntuinen käteen koko ajan. Myös mineraalivilla oli kuivan tuntuinen.

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 4)

Mittaustulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenäytteet on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	228,5	207,5	211,5
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,00	20,00	20,00
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-9,99	-10,00	-9,99
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	50,0	50,8	50,0
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	90,0	90,0	90,0
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-9,9	-0,5	10,0
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,60	18,61	18,80
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-8,40	-8,29	-8,03
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,27	19,18	19,35
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,33	-10,34	-10,35
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,72	19,68	19,77
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,14	-10,17	-10,20
Lämpötila pakkahuoneessa	T_{ph}	°C	-12,13	-12,29	-12,54
Suhteellinen kosteus pakkahuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	70,8	72,6	72,1
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,64	8,77	8,64
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,98	1,98	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkahuoneessa	v_{ph}	g/m ³	1,28	1,30	1,26
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	51,9	50,3	51,1
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,10	0,08	0,08
Ilmavirran nopeus tuuletusväliässä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,26	0,24	0,22
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-2,15	0	2,57
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-1,63	0	1,94
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-2,71E-05	0	3,24E-05
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-17460	0	24334
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	-6,8	0,4	31,4
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-5,9	0	32,0
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	-0,9	0,4	-0,6
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	-5,2	0,3	23,7
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-4,5	0	24,2
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	-0,7	0,3	-0,4
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	-65	3	277
Rakenteen ilmanläpäisykerroin (*)	K_{rak}	m/s•Pa	2,73E-06	0	3,24E-06

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-9,35	-9,31	-9,29
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	18,27	18,73	19,14
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	-2,28	-0,41	1,03
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	17,05	17,13	17,63
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-5,92	-4,59	-3,89
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	18,31	18,36	18,36
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	-0,60	-0,36	-0,29
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	17,24	17,20	17,30
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	82,2	82,1	82,2
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	18,0	14,3	46,0
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	77,4	48,6	90,9
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	17,8	13,6	13,0
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	92,9	62,3	58,6
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	15,0	14,6	20,1
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	48,8	46,0	48,9
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	15,7	13,7	13,1
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,91	1,92	1,92
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	2,81	2,30	7,56
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	3,18	2,29	4,74
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	2,59	1,99	1,95
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	2,88	2,14	2,13
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	2,35	2,29	3,15
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	2,26	2,18	2,32
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	2,31	2,01	1,94

RAKENNENÄYTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET

Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa, reiät sisäpinnan läpi)	u_{puu}	%	16,8	11,4	15,7
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa, reiät höyrynsulun läpi)	u_{puu}	%	12,6	10,1	10,5
Mineraalivillan kosteuspitoisuus ulkopinnalla (reiät sisäpinnan läpi)	u_{er}	%	6,7	0,9	1,2
Mineraalivillan kosteuspitoisuus ulkopinnalla (reiät höyrynsulun läpi)	u_{er}	%	0,5	0,7	3,3
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (reiät sisäp. läpi)	u_{ts}	%	1,4	0,9	1,6
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (reiät höyryns. läpi)	u_{ts}	%	3,4	0,8	1,4
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 12.5 %)	u_{rp}	%			14,0
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteusmäärä	m_{er}	g			-
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g			-
Tuulensuojalevyyn sitoutunut kosteusmäärä	m_{ts}	g			-

*) Mittaustuloksessa on mukana reikien vaikutus

Visuaalinen havainnointi

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa ei ollut havaittavissa kosteuden tiivistymistä eikä jään muodostumista missään vaiheessa. Levy ja lämmöneriste olivat kuivan tuntuksia käteen koko ajan. Ylipainejakson jälkeen tuulensuojalevyn ulkopinnalla olleiden teippien alla oli jäätä.

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 5)

Mittaustulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenytyt on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	211,5	214,8	216,8
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,00	20,00	20,01
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-9,96	-9,99	-9,99
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	52,3	50,1	50,0
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	89,9	90,0	90,0
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-10,0	0,9	10,0
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,92	18,22	18,24
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-8,22	-8,28	-8,31
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,52	19,52	19,53
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,25	-10,14	-10,14
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,88	19,78	19,80
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,01	-10,01	-10,01
Lämpötila pakkashuoneessa	T_{ph}	°C	-13,43	-13,04	-13,03
Suhteellinen kosteus pakkashuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	64,4	67,7	64,9
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	9,05	8,66	8,65
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,98	1,98	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkashuoneessa	v_{ph}	g/m ³	1,03	1,13	1,08
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	53,5	52,5	53,2
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,16	0,21	0,22
Ilmavirran nopeus tuuletusväliässä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,19	0,23	0,20
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-0,004	0	-0,00026
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-0,003	0	-0,00020
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-4,90E-08	0	-3,28E-09
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-160	0	223
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	9,3	6,5	5,5
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-0,02	0	-0,005
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	9,3	6,5	5,5
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	7,0	4,9	4,1
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-0,02	0	-0,004
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	7,0	4,9	4,1
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	82	62	49
Tuulensuojalevyyn sitoutunut kosteusmäärä (*)	m_{ts}	g	181	44	100
Rakenteen vesihöyrynläpäisykerroin (**)	$W_{v,rak}$	m/s	1,15E-05	8,53E-06	7,18E-06

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-8,34	-8,40	-8,53
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	8,65	8,19	8,24
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	0,88	0,65	0,65
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	-4,50	-4,68	-4,72
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-3,35	-3,66	-3,53
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	15,20	15,32	15,33
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	1,10	1,48	1,40
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	-6,09	-6,06	-6,06
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	75,8	77,4	78,8
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	19,6	21,2	22,4
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	35,9	39,0	41,4
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	50,1	55,2	59,1
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	48,1	52,1	55,5
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	11,6	12,5	13,3
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	27,3	29,0	31,1
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	43,3	48,3	52,5
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,92	1,95	1,97
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	1,70	1,78	1,89
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	1,86	1,98	2,10
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	1,74	1,89	2,01
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	1,82	1,93	2,07
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	1,51	1,64	1,74
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	1,43	1,56	1,66
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	1,32	1,48	1,61

RAKENNENÄYTTTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET

Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{puu}	%	10,9	10,3	12,0
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{puu}	%	9,1	9,2	10,9
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus kokeen alussa	u_{ts}	%	6,6		
Puukuitueristeen kosteuspit. ulkopinnassa (yläosa)	u_{er}	%	18,3	19,8	19,0
(alaosa)	u_{er}	%	16,2	18,1	18,6
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{ts}	%	9,5	10,2	11,8
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{ts}	%			
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 8.0 %)	u_{rp}	%			11,1
Lämmöneristeseen sitoutunut vesimäärä	m_{er}	g			-
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g			-
Tuulensuojalevyyn sitoutunut vesimäärä	m_{ts}	g			-

*) Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuuksien perusteella laskettu arvo

**) Rakenteen kosteuspitoisuudet eivät olleet tasapainokosteudessa

Visuaalinen havainnointi

Tuulensuojalevyn sisäpinnassa ei ollut havaittavissa kosteuden tiivistymistä eikä jään muodostumista missään vaiheessa. Levy oli kuivan tuntuinen käteen koko ajan. Myös puukuitueriste oli kuivan tuntuinen. Eriste asennettiin käsin sullomalla.

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 6)

Mittaustulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenäytteet on otettu kunkin mittausjakson lopussa

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	180,8	97,8	335,5
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,00	20,00	19,99
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-10,06	-9,97	-9,92
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	51,0	53,2	49,9
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	90,2	89,2	89,4
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-10,1	-0,3	10,0
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,72	18,64	18,71
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-9,50	-9,35	-9,42
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,32	19,19	19,25
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,41	-10,24	-10,40
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,73	19,69	19,74
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,28	-10,13	-10,18
Lämpötila pakkahuoneessa	T_{ph}	°C	-12,07	-12,47	-14,44
Suhteellinen kosteus pakkahuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	-	-	-
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,82	9,19	8,62
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,98	1,96	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkahuoneessa	v_{ph}	g/m ³	-	-	-
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	49,0	51,0	52,8
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,13	0,13	0,03
Ilmavirran nopeus tuuletusväliässä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,15	0,13	0,11
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-1,55	0	1,56
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-1,17	0	1,18
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-1,95E-05	0	1,97E-05
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-15957	0	32254
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	-1,4	1,4	18,3
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-4,1	0	19,4
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	2,6	1,4	-1,1
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	-1,1	1,1	13,8
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-3,1	0	14,7
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	2,0	1,1	-0,8
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	-11	24	256
Rakenteen ilmanläpäisykerroin (*)	K_{rak}	m/s•Pa	-1,93E-06	0	1,97E-06

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-8,97	-8,93	-8,98
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	17,64	18,25	18,76
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	-4,50	-3,41	-1,92
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	17,67	17,45	17,62
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-4,58	-4,32	-4,11
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	18,00	18,05	18,02
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	-3,62	-3,23	-3,09
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	17,37	17,41	17,51
Lämpötila kohdassa H	T_{rakH}	°C	-5,03	-4,42	-4,25
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	76,3	79,5	77,9
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	13,0	15,2	46,3
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	54,9	56,0	90,7
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	12,6	12,5	12,6
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	57,8	57,1	57,3
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	14,4	14,2	15,2
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	56,3	55,2	56,6
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	12,7	12,6	12,4
Suhteellinen kosteus kohdassa H (RH)	ϕ_{rakH}	%	57,8	56,8	55,8
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m^3	1,83	1,92	1,87
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m^3	1,96	2,37	7,44
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m^3	1,90	2,11	3,82
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m^3	1,91	1,87	1,89
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m^3	1,99	2,01	2,05
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m^3	2,22	2,18	2,34
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m^3	2,09	2,11	2,19
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m^3	1,89	1,87	1,85
Vesihöyrypitoisuus kohdassa H	v_{rakH}	g/m^3	1,92	1,98	1,97
RAKENNENÄYTTTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET					
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa, reiät sisäpinnan läpi)	u_{puu}	%	9,6	10,3	20,5
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa, ei reikiä)	u_{puu}	%	10,2	10,8	10,4
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopinnalla ennen koetta	u_{er}	%	9,0		
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus ennen koetta	u_{ts}	%	10,5		
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopuolella (reiät sisäpinnan läpi)	u_{er}	%	12,5	11,6	25,2
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopuolella (ei reikiä)	u_{er}	%	12,5	11,6	11,0
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (reiät sisäp. läpi.)	u_{ts}	%	11,8	11,9	21,1
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (ei reikiä)	u_{ts}	%	-	-	-
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 10.0 %)	u_{rp}	%			14,9
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteus määrä	m_{er}	g	-	-	-
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g	-	-	-
Tuulensuojalevyyteen sitoutunut kosteus määrä	m_{ts}	g	-	-	-

*) Mittaustuloksessa on mukana reikien vaikutus

Visuaalinen havainnointi

Tiivistymistä ei ollut havaittavissa missään vaiheessa. Ylipaineella kuitenkin sekä eriste että tuulensuoja olivat kostean tuntuisia reikien läheisyydessä.

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 7)

Mittaus tulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenaistyöt on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	67,5	64,0	67,5
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	20,00	20,00	20,00
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-9,99	-9,99	-9,98
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	50,0	50,0	50,0
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	90,0	90,0	89,8
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-9,9	-0,1	9,8
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	19,39	19,44	19,48
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-7,43	-7,44	-7,95
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,63	19,66	19,66
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,01	-10,04	-10,12
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,94	19,94	19,95
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,00	-10,02	-10,05
Lämpötila pakkahuoneessa	T_{ph}	°C	-12,15	-12,06	-12,53
Suhteellinen kosteus pakkahuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	81,2	83,2	73,6
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,65	8,64	8,64
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,98	1,98	1,98
Vesihöyrypitoisuus pakkahuoneessa	v_{ph}	g/m ³	1,47	1,52	1,29
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	50,3	49,8	50,3
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,05	0,07	0,11
Ilmavirran nopeus tuuletuksivälissä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,08	0,06	0,09
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-1,15	0	1,63
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-0,87	0	1,24
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-1,45E-05	0	2,06E-05
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-4014	0	6494
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	66,0	69,7	82,0
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-3,2	0	20,3
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	69,2	69,7	61,7
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	49,9	52,7	62,0
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-2,4	0	15,4
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	52,3	52,7	46,6
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	186	214	308
Tuulensuojalevyyn sitoutunut kosteusmäärä (*)	m_{ts}	g	220	130	190
Rakenteen ilmanläpäisykerroin	K_{rak}	m/s•Pa	1,47E-06	0	2,10E-06
Rakenteen vesihöyrynläpäisykerroin	$W_{v,rak}$	m/s	9,08E-05	9,15E-05	8,10E-05

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-7,93	-8,04	-8,28
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	-4,90	-4,48	-4,28
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	5,12	5,80	6,28
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	15,55	15,82	15,95
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-5,77	-5,42	-5,14
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	3,22	3,47	3,49
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	14,95	15,12	15,08
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	-5,04	-5,02	-5,15
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	71,3	75,3	80,2
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	84,6	89,6	91,8
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	67,3	70,0	71,6
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	51,2	52,5	53,5
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	90,0	93,9	94,7
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	70,5	74,4	77,3
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	51,8	53,3	54,5
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	67,5	74,7	79,8
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,87	1,96	2,04
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	2,84	3,11	3,24
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	4,64	5,05	5,33
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	6,80	7,09	7,29
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	2,82	3,03	3,12
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	4,28	4,60	4,78
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	6,64	6,90	7,04
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	2,24	2,49	2,63

RAKENNENÄYTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET

Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{puu}	%	18,3	24,9	26,0
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{puu}	%	17,2	21,8	29,0
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus ennen koetta	u_{ts}	%	8,0		
Mineraalivillaeristeen kosteuspit. ulkopinnassa (yläosa)	u_{er}	%	1,0		-
(alaosa)	u_{er}	%			
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa)	u_{ts}	%	12,7	15,4	19,5
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa)	u_{ts}	%			
Runkopuun kosteuspitoisuus	u_{rp}	%			-
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteusmäärä	m_{er}	g			-
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g			-
Tuulensuojalevyn sitoutunut kosteusmäärä	m_{ts}	g			-

*) Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuuksien perusteella laskettu arvo

Visuaalinen havainnointi

Tuulensuojalevyn sisäpinta oli kostean tuntuinen käteen jo alipainejakson jälkeen ja kostuminen lisääntyi kokeen kuluessa. Ylipainejakson aikana tuulensuojalevyn sisäpintaan alkoi muodostua jäätä. Jäähilettä oli tuulensuojalevyn takana n. 15 cm korkeudelta levyn alareunasta aina levyn yläreunaan asti. Jääkerroksen paksuus kasvoi siirryttäessä kohti levyn yläreunaa. Suurimmillaan kerros oli n. 1,5 mm paksu. Tuulensuojalevyssä ei havaittu paikallisesti voimakkaampaa jään kerääntymistä. Mineraalivillassa ei havaittu jäätä eikä eriste ollut kostean tuntuinen.

MITTAUSTULOKSET (Koeseinä 8)

Mittaustulokset on laskettu kunkin mittausjakson lopusta 5 tunnin keskiarvoina.
Kumulatiiviset arvot on laskettu mittausjakson ensimmäisen ja viimeisen arvon väliltä.
Rakennenäytteet on otettu kunkin mittausjakson lopussa.

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Koeaika tunneissa	t	h	297,3	256,8	231,8
Lämpötila sisäilmassa	T_s	°C	19,99	20,00	20,00
Lämpötila ulkoilmassa	T_u	°C	-10,00	-9,99	-10,01
Suhteellinen kosteus sisäilmassa (RH)	ϕ_s	%	50,0	50,0	50,0
Suhteellinen kosteus ulkoilmassa (RH)	ϕ_u	%	90,0	89,8	88,1
Paine-ero rakenteen yli	Δp_{rak}	Pa	-9,9	-0,9	10,0
Lämpötila rakenteen sisäpinnassa	T_{sp}	°C	18,97	19,00	19,13
Lämpötila tuulensuojan ulkopinnassa	T_{ts}	°C	-8,59	-8,15	-7,67
Lämpötila sisäsuojalevyssä	T_{sl}	°C	19,30	19,30	19,33
Lämpötila ulkosuojalevyssä	T_{ul}	°C	-10,39	-10,64	-10,64
Ympäristölämpötila sisäpuolella	T_{sy}	°C	19,80	19,81	19,84
Ympäristölämpötila ulkopuolella	T_{uy}	°C	-10,15	-10,34	-10,44
Lämpötila pakkashuoneessa	T_{ph}	°C	-12,76	-14,50	-14,71
Suhteellinen kosteus pakkashuoneessa (RH)	ϕ_{ph}	%	-	-	-
Vesihöyrypitoisuus sisäilmassa	v_s	g/m ³	8,64	8,64	8,64
Vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa	v_u	g/m ³	1,98	1,97	1,93
Vesihöyrypitoisuus pakkashuoneessa	v_{ph}	g/m ³	-	-	-
Lämpövirta sisälle	Φ_{kok}	W	52,7	52,7	52,6
Ilmavirran nopeus sisäpinnalla (alhaalta ylös)	r_s	m/s	<0,05	<0,05	<0,05
Ilmavirran nopeus ulkopinnalla (ylhäältä alas)	r_u	m/s	0,04	0,06	0,04
Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä (ylhäältä alas)	r_{tv}	m/s	0,18	0,11	0,12
Ilman tilavuusvirta rakenteen läpi	R_{rak}	l/min	-5,84	0	6,77
Ilmavirran tiheys rakenteen läpi	r_{rak}	l/min•m ²	-4,41	0	5,12
Ilmavirran nopeus rakenteen läpi	r_{nop}	m/s	-7,35E-05	0	8,53E-05
Rakenteen läpi siirtyneen ilman tilavuus	V_{rak}	l	-105733	0	98775
Kosteusvirta rakenteeseen	G_{rak}	g/vrk	36,6	58,8	126,7
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{konv}	g/vrk	-16,3	0	84,2
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta	G_{dif}	g/vrk	52,9	58,8	42,4
Kosteusvirta rakenteeseen/m ²	g_{rak}	g/vrk•m ²	27,7	44,5	95,8
Konvektiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{konv}	g/vrk•m ²	-12,3	0	63,7
Diffuusiolla rakenteeseen siirtynyt kosteusvirta/m ²	g_{dif}	g/vrk•m ²	40,0	44,5	32,1
Rakenteeseen siirtynyt kosteusmäärä	m_{rak}	g	453	629	1223
Rakenteen ilmanläpäisykerroin (*)	K_{rak}	m/s•Pa	7,40E-06	0	8,52E-06
Rakenteen vesihöyrynläpäisykerroin (**)	$W_{v,rak}$	m/s	6,95E-05	7,10E-05	5,53E-05

Suure	Merkki	Yksikkö	Alipaine	$\Delta p = 0$	Ylipaine
Lämpötila tuuletusvälissä	T_{tv}	°C	-9,38	-9,09	-9,28
Lämpötila kohdassa A	T_{rakA}	°C	16,25	17,85	19,19
Lämpötila kohdassa B	T_{rakB}	°C	-7,35	-5,67	-2,98
Lämpötila kohdassa C	T_{rakC}	°C	17,18	17,37	17,82
Lämpötila kohdassa D	T_{rakD}	°C	-6,96	-6,21	-5,21
Lämpötila kohdassa E	T_{rakE}	°C	17,21	17,40	17,58
Lämpötila kohdassa F	T_{rakF}	°C	-6,75	-6,32	-5,62
Lämpötila kohdassa G	T_{rakG}	°C	16,59	16,84	17,16
Lämpötila kohdassa H	T_{rakH}	°C	-7,50	-6,72	-6,21
Suhteellinen kosteus tuuletusvälissä (RH)	ϕ_{tv}	%	83,5	83,4	79,9
Suhteellinen kosteus kohdassa A (RH)	ϕ_{rakA}	%	39,7	44,7	49,1
Suhteellinen kosteus kohdassa B (RH)	ϕ_{rakB}	%	78,4	88,7	91,3
Suhteellinen kosteus kohdassa C (RH)	ϕ_{rakC}	%	42,5	44,2	45,8
Suhteellinen kosteus kohdassa D (RH)	ϕ_{rakD}	%	85,8	88,4	88,6
Suhteellinen kosteus kohdassa E (RH)	ϕ_{rakE}	%	46,9	47,7	48,8
Suhteellinen kosteus kohdassa F (RH)	ϕ_{rakF}	%	89,5	87,6	87,1
Suhteellinen kosteus kohdassa G (RH)	ϕ_{rakG}	%	45,3	46,7	47,8
Suhteellinen kosteus kohdassa H (RH)	ϕ_{rakH}	%	81,8	83,9	84,3
Vesihöyrypitoisuus tuuletusvälissä	v_{tv}	g/m ³	1,93	1,98	1,87
Vesihöyrypitoisuus kohdassa A	v_{rakA}	g/m ³	5,50	6,81	8,10
Vesihöyrypitoisuus kohdassa B	v_{rakB}	g/m ³	2,16	2,80	3,56
Vesihöyrypitoisuus kohdassa C	v_{rakC}	g/m ³	6,22	6,54	6,96
Vesihöyrypitoisuus kohdassa D	v_{rakD}	g/m ³	2,44	2,67	2,90
Vesihöyrypitoisuus kohdassa E	v_{rakE}	g/m ³	6,88	7,08	7,32
Vesihöyrypitoisuus kohdassa F	v_{rakF}	g/m ³	2,59	2,63	2,76
Vesihöyrypitoisuus kohdassa G	v_{rakG}	g/m ³	6,41	6,70	7,00
Vesihöyrypitoisuus kohdassa H	v_{rakH}	g/m ³	2,23	2,44	2,55
RAKENNENÄYTTEISTÄ MITATUT KOSTEUSPITOISUUDET					
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen yläosa, reiät sisäpinnan läpi)	u_{puu}	%	16,1	22,5	30,4
Puupalojen kosteuspitoisuus (rakenteen alaosa, ei reikiä)	u_{puu}	%	21,0	25,2	25,1
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ennen koetta	u_{er}	%	12,0		
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus ennen koetta	u_{ts}	%	9,0		
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkopinnalla (reiät sisäpinnan läpi)	u_{er}	%	18,5	31,6	32,3
Puukuitueristeen kosteuspitoisuus ulkop. (ei reikiä)	u_{er}	%	21,2	41,4	28,7
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (reiät sisäp. läpi)	u_{ts}	%	15,2	18,9	18,1
Tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus (ei reikiä)	u_{ts}	%	14,9	21,7	19,8
Runkopuun kosteuspitoisuus (kokeen alussa 10,0 %)	u_{rp}	%			ulkop. >24 sisäp. ~12
Lämmöneristeeseen sitoutunut kosteusmäärä	m_{er}	g	-	-	-
Kehyksiin sitoutunut vesimäärä	m_k	g	-	-	-
Tuulensuojalevyyn sitoutunut kosteusmäärä	m_{ts}	g	-	-	-
*) Mittaustuloksessa on mukana reikien vaikutus					
**) Rakenteen kosteuspitoisuudet eivät olleet tasapainokosteudessa					
Visuaalinen havainnointi					
Tuulensuojalevyn sisäpinnassa oli havaittavissa kosteuden tiivistymistä ja jään muodostumista paine-erottomalla jaksolla ja ylipainejaksolla. Materiaalien punnitus ei onnistunut kokeen jälkeen, koska eriste jäätty kiinni tuulensuojalevyyn.					

Talonrakennustekniikan julkaisuja (v. 1990 - 2001)

- 53 Pynnönen, J., Aro, J., Betonielementtiteollisuuden teräsosat. TTKK 1990. 87 s. + 4 liites.
- 54 Pynnönen, J., Sensio, K., Pultti- ja hitsausliitosten yhteistoiminta teräspalkin jatkoksessa. 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 seurantatutkimus: 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. TUT 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. TUT 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. TUT 1996. 42 s. + 2 liites.
- 69 Keronen, A., Effect of Semi-rigid Connections in RC Portal Frame: Load Tests. TUT 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 homevauriokorjaukset. 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. TUT 1997. 23 s. + 44 liites., hinta 200,-
- 78 Koski, T., Lindberg, R., Vinha, J., Lisäeristettyjen hirsiseinien 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. TUT 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. TUT 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. TUT 1998. 37 s. + 23 liites.
- 87 Pentti M., Mattila, J., Wahlman, J., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa I rakenteet, vauriot ja kunnon tutkiminen. 156 s. TTKK 1998. 250,-
- 88 Osa II korjausmenetelmät (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. TUT 1998. 81 s. + 93 liites.
- 93 Lepo, K., Laatu järjestelmän 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 2000. 81 s. + 29 liites. 200,-
- 97 Kylliäinen, M., Keronen, A., Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuin kerrostaloissa. TTKK 1999. 59 s. + 37 liites. 200,-
- 98 Mattila, J., Peuhkurinen, T., Lähiökerrostalon lisärakentamishankkeen tekninen esiselvitysmenettely. Korjaus- ja LVIS-tekniikka osuus. TTKK 1999. 48 s.
- 99 Torikka, K., Hyypöläinen, T., Mattila, J., Lindberg, R., Kosteusvauriokorjausten laadunvarmistus. TTKK 1999. 106 s. + 37 liites. 200,-
- 100 Pentti, M., Haukijärvi, M., Betonijulkisivujen saumausten suunnittelu ja laadunvarmistus. TTKK 2000. 2. täydennetty painos. 78 s. + 3 liites. 250,-
- 101 Pessi, A-M., Suonketo, J., Pentti, M., Raunio-Lehtimäki, A. Betonielementtijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus. TTKK. 1999. 88 s. + 6 liites. 250,-
- 102 Suonketo, J., Pessi, A-M., Pentti, M.,
- 103 Vinha, J., Käkelä, P., Water Vapour Transmission in Wall Structures Due to Diffusion and Convection. TUT 1999. 110 s. 200,-
- 104 Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R., Carbon Dioxide Permeability of Cellulose-Insulated Wall Structures. TUT 2000. 150,-
- 105 Junttila, T. (toim.), Venäjän federaation kaavoitus- ja rakennuslaki. TTKK 2000. 49 s. 200,-
- 106 Leivo, V., Rantala, J., Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. TTKK 2000. 124 s. 200,-
- 107 Binamu, A., Lindberg, R., The Impact of Air Tightness of The Building Envelope on The Efficiency of Ventilation Systems with Heat Recovery. TTKK 2001. (valmistumassa)

Julkaisun hinta: 120,- + alv 8 %, ellei toisin ole mainittu. Oikeus hinnanmuutoksiin pidätetään.

Myynti: Tietokirjakauppa Juvenes/Julkaisumyynti, PL 527, 33101 Tampere

puh. (03) 365 2351, telefax (03) 365 2191

TALONRAKENNUS-

TEKNIikka

TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Korkeakoulunkatu 5, PL 600, 33101 Tampere

Puh. (03) 365 4804, Telefax (03) 365 2811



VESIHÖYRYN SIIRTYMINEN SEINÄRAKENTEISSA DIFFUUSION JA KONVEKTION VAIKUTUKSESTA

Julkaisussa on tarkasteltu erilaisten puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa talviolosuhteissa. Seinärakenteita on tutkittu laboratorio-olosuhteissa uudella koelaitteistolla, joka rakennettiin tutkimuksen yhteydessä. Koelaitteistossa voidaan säätää sisä- ja ulkoilman olosuhteita (lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja paine-eroa) halutulla tavalla. Kokeen aikana rakenteiden toimintaa voidaan seurata hallituissa olosuhteissa ilman häiriötekijöiden vaikutusta.

Tutkimuksessa on selvitetty mm. höyrönsulun tarpeellisuutta seinärakenteissa sekä rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välisen ilmanpaine-eron vaikutusta rakenteiden toimintaan. Vertailua on tehty erityisesti puukuitueristeisen höyrönsuluttoman seinärakenteen ja mineraalivillaeristeisen höyrönsulullisen seinärakenteen välillä.

Tutkimus alkoi v. 1996 ja päättyi v. 1998 loppuun. Tästä ajanjaksosta uuden koelaitteiston suunnittelu, rakentaminen ja testaus veivät aikaa n. 2 vuotta ja viimeinen vuosi käytettiin seinärakenteiden tutkimiseen. Tutkimus kuuluu osana TEKES:n puurakentamisen teknologiaohjelmassa toteutettuihin rakennusfysiikkaa käsitteleviin tutkimuksiin.

Julkaisun hinta on 200,- + alv 8 %



**TALONRAKENNUS-
TEKNIikka**

TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Korkeakoulunkatu 5, PL 600, 33101 Tampere

Puh. (03) 365 4804

Telefax (03) 365 2811

Email: terttu.makipaa@tut.fi