

Title Tuulensuojan toimintaperusteet
Author(s) Ojanen, Tuomo; Kokko, Erkki;
Pallari, Marja-Liisa
Citation VTT Tiedotteita : 1478
Date 1993
Rights This report may be downloaded for
personal use only.

VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000
FI-02044 VTT
Finland

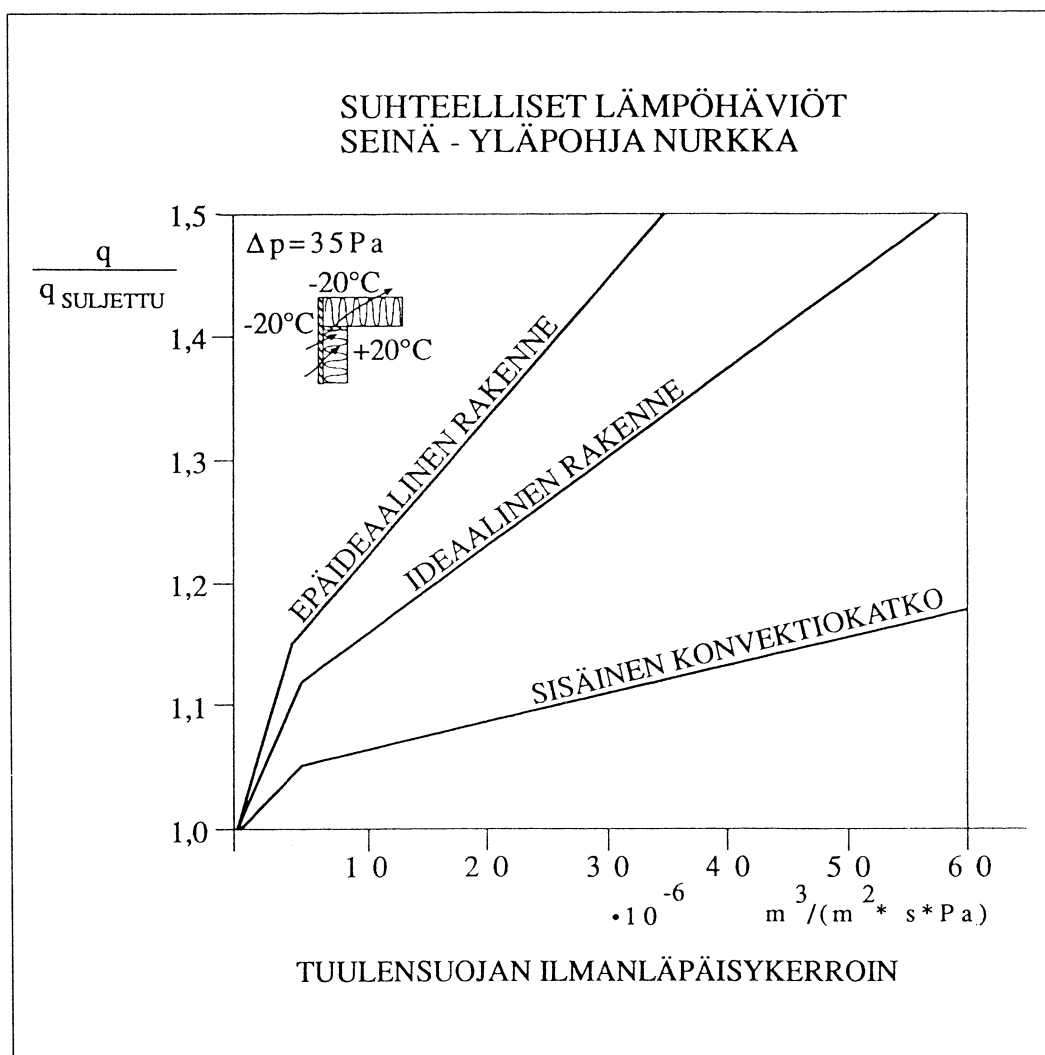
By using VTT Digital Open Access Repository you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.

Tuomo Ojanen, Erkki Kokko & Marja-Liisa Pallari

Tuulensuojan toimintaperusteet



Tuulensuojan toimintaperusteet

Tuomo Ojanen, Erkki Kokko & Marja-Liisa Pallari
LVI-tekniikan laboratorio



ISBN 951-38-4372-6
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1993

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 42, 02151 ESPOO
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374, teleksi 125175 vtin sf

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 42, 02151 ESBO
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374, telex 125175 vtin sf

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 42, FIN-02151 ESPOO, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374, telex 125175 vtin sf

VTT, LVI-tekniikan laboratorio, Lämpömiehenkuja 3, PL 206, 02151 ESPOO
puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 455 2408

VTT, VVS-tekniska laboratoriet, Värmemansgränden 3, PB 206, 02151 ESBO
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 455 2408

VTT, Laboratory of Heating and Ventilation, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 206, FIN-02151 ESPOO, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 455 2408

Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki & Pallari, Marja-Liisa. Tuulensuojan toimintaperusteet [Criteria for hygrothermal performance of wind barriers]. Espoo 1993, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1478. 125 s. + liitt. 24 s.

UDK 699.82:536.2:533.27
692.23

Avainsanat wind barriers, thermal behavior, thermal conditions, moisture, walls, structures, external walls, thermodynamic properties, facades, permeability, recommendations, criteria, value, air tightness, experimentation, numerical analysis, simulation, regulations, building envelope, heat loss, models

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa esitetään suositusarvot rakenteen tuulensuojan ilmatiiviydelle ja kokeelliset menetelmät tuulensuojarakenteiden kosteusteknisen toiminnan arvioimiseksi sekä herkkyystarkastelun tulokset tuulensuojan eri parametrien vaikutuksista rakenteiden kuivumiseen. Taustana esitetään katsaus tuulensuojausta koskeviin määräyksiin ja ohjeisiin Suomessa ja muissa vastaavan ilmastoalueen maissa.

Rakenteiden lämpöhäviöt asettavat rajat tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle. Laskentamallilla TCCC2D tehdyn analyysin perusteella suositellaan osastoiduissa rakenteissa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle arvoa $25 - 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Osastoimattomissa rakenteissa, joissa voimakas nurkkakonvektio on mahdollinen, tulisi tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen olla enintään $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa koskevissa kokeissa tarkasteltiin rakenteiden kuivumista eri tyyppisten tuulensuojamateriaalien kautta. Tulosten perusteella havaittiin, että ns. kuppikokeilla tuulensuojalle määritettyjen vesihöyrynläpäisykertoimien perusteella ei voida arvioida rakenteiden kuivumisnopeutta kaikissa käytännön olosuhteissa. Ongelma korostuu erityisesti ohuilla pinnoitteilla.

Laskennallisten herkkyystarkastelujen perusteella tuulensuojan ilmatiiviydellä ei ole merkittävää vaikutusta rakenteiden kuivumiseen. Liian hyvin ilmaa läpäisevä tuulensuoja voi aiheuttaa paikallisia kosteuskertymiä voimistuneen konvektion takia.

Kosteusteknisesti myös talvioloissa hyvin toimivan tuulensuojan tulisi olla mahdollisimman hyvin vesihöyryä läpäisevä lähellä vesihöyryn kyllästystilan olosuhteita veden jäätymisalueellakin. Tuulensuojausrakenteen kosteusteknistä toimintaa voidaan parhaiten arvioida tutkimuksessa esitetyillä kokeellisilla menetelmillä, joissa olosuhteet vastaavat käytännössä esiintyviä.

Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki & Pallari, Marja-Liisa. Tuulensuojan toimintaperusteet [Criteria for hygrothermal performance of wind barriers]. Espoo 1993, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1478. 125 p. + app. 24 p.

UDC 699.82:536.2:533.27
692.23

Keywords wind barriers, thermal behavior, thermal conditions, moisture, walls, structures, external walls, thermodynamic properties, facades, permeability, recommendations, criteria, value, air tightness, experimentation, numerical analysis, simulation, regulations, building envelope, heat loss, models

ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the effects of wind barriers on the thermal and moisture behaviour of wall structures. As a result the recommended values for the air tightness of wind barriers and new experimental methods to analyse the moisture behaviour of wind barrier structures are presented. Also the results from the numerical sensitivity analysis of the parameters of wind barriers, and the survey on the regulations in Nordic countries concerning wind barriers are presented.

The increase of heat losses through the building envelope is used as a criteria for the air tightness of the wind barrier layer. Numerical simulation model TCCC2D was used in the analysis. For separated structures, the maximum air permeance of the wind barrier is recommended to be about $25 - 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, and with possible corner convection, value $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ is recommended.

The drying of structural moisture through different types of wind barriers was experimentally analysed. The results show that the vapour permeance of wind barriers determined using typical dry and wet cup methods can not be used to predict the moisture behaviour of wind barrier structures in real conditions. Thin layers are especially problematic in this respect.

Sensitivity analysis shows that the air permeance of the wind barrier has no significant effect on the drying of the structure. High air permeance may cause local moisture accumulation because of the increased convection.

In order to achieve good moisture performance also in winter conditions, the wind barrier should have high vapour permeance near condensation conditions in freezing temperatures. The moisture performance of wind barrier structures can be evaluated with the experimental methods presented in this research.

ALKUSANAT

Tässä raportissa esitetään Tuulensuojan tuotekehityksperusteet -projektissa saadut tulokset. Tutkimuksessa selvitettiin laskennallisesti suositusarvot tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle. Kokeellisesti ja laskennallisesti tarkasteltiin tuulensuojamateriaalien ja tuulensuojan eri parametrien vaikutusta kosteuden kuivumiseen rakenteista. Tulokset muodostavat tuulensuojan tuotekehityksessä tarvittavan pohjan.

Tutkimuksen rahoitti Teknologian kehittämiskeskus (TEKES) ja tuulensuojamateriaaleja valmistava teollisuus: Ahlström Eristeet Oy, Gyproc Oy, Paroc Oy Ab, Schauman Wood Oy ja Yhtyneet Paperitehtaat Oy Paperituote.

Tutkimus tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) LVI-tekniikan laboratoriossa. Tutkimusryhmään kuuluivat fil. kand. Erkki Kokko ja dipl.ins. Marja-Liisa Pallari. Kokeellisesta tutkimuksesta vastasi ins. Hannu Hyttinen. Tutkimuksen vastuullinen johtaja oli dipl.ins. Tuomo Ojanen. Projektia valvoi erikoistutkija Esko Virtanen Teknologian kehittämiskeskukselta.

Projektin johtoryhmään kuuluivat dipl.ins. Esko Virtanen, dipl.ins. Juha Ryyppö, kehityspäällikkö Seppo Leimala, dipl.ins. Juha Krankka, myyntipäällikkö Ari-Kalle Kiviharju (15.9.92 saakka), tekn. markkin. päällikkö Keijo Kolu (15.9.92 alkaen), proj. päällikkö Juhani Peuramäki ja erikoistutkija Erkki Kokko. Parhaat kiitokset projektin johtoryhmän jäsenille.

Espoo, huhtikuu 1993

Tuomo Ojanen

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
SYMBOLILUETTELO	8
1 JOHDANTO	9
2 MÄÄRÄYKSET JA OHJEET SUOMESSA JA MUISSA MAISSA	10
2.1 Suomi	11
2.2 Ruotsi	12
2.3 Norja	15
2.4 Kanada	16
2.5 Yhteenveto pohjoismaisesta käytännöstä	16
3 TUULENSUOJAN VAIKUTUS RAKENTEIDEN LÄMPÖTEKNISEEN TOIMINTAAN	17
3.1 Laskennallisen tarkastelun perusteet	17
3.1.1 Laskentamallin kuvaus	17
3.1.2 Lämpöteknisen toimivuuden tunnusluvut	18
3.2 Tarkastellut rakenteet ja niiden reunaehdot	19
3.2.1 Tuulensuojan ilmanläpäisykertoimet	20
3.2.2 Kasettirakenne	21
3.2.3 Nurkkarakenteet	24
3.3 Tulokset ja niiden tarkastelu	27
3.3.1 Kasettirakenne	28
3.3.2 Kahden seinän nurkka	39
3.3.3 Seinän ja yläpohjan nurkka	43
3.4 Johtopäätökset tuloksista	49
4 TUULENSUOJAN VAIKUTUS RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEEN TOIMINTAAN	53
4.1 Rakenteiden yksidimensioiset kuivumiskokeet	53
4.1.1 Koejärjestelyt	54
4.1.2 Koetulokset ja niiden tarkastelu	57
4.1.3 Johtopäätökset tuloksista	63

4.2	Aineominaisuuksien ja kuivumiskokeiden korrelaatio	85
4.3	Rakenteiden täysmittakaavaiset kuivumiskokeet	87
4.3.1	Kokeiden toteutus	88
4.3.2	Tulosten tarkastelu	92
4.3.3	Johtopäätökset tuloksista	102
4.4	Parametrien laskennallinen herkkyystarkastelu	104
4.4.1	Ilmanläpäisykertoimen ja ulkopinnan painegradientin vaikutus	106
4.4.2	Tuulensuojan vesihöyrynläpäisykertoimen vaikutus rakenteen kuivumiseen	110
4.4.3	Yhteenveto laskelmien antamista tuloksista	120
4.5	Johtopäätökset tuulensuojan kosteusteknisestä toimivuudesta	120
5	TUULENSUOJALTA EDELLYTETTÄVÄT OMINAISUUDET JA JATKOTUTKIMUSTARVE	122
	LÄHDELUETTELO	124
	LIITTEET	
1	Tavallisimmat suureet sekä niiden symbolit ja yksiköt	
2	Tuotteiden aineominaisuustietoja	
3	Kosteusjakaumat täysmittakaavaisissa seinäkokeissa	

SYMBOLILUETTELO

d	Kerrospaksuus, m
\vec{g}	Maan vetovoimakiihtyvyys, = 9,81 m ² /s
\vec{g}	Kosteusvirrantiheys (vektori), kg/(m ² · s)
K	Ilmanläpäisykerroin, m ³ /(m ² · s · Pa)
M	Molaarinen massa, kg/kmol
Nu^*	Modifioitu Nusseltin luku, -
Nu^*_{TS}	Tuulensuojalle laskettava modifioitu Nusseltin luku, -
p_v	Vesihöyryn osapaine, Pa
q	Lämpövirrantiheys, W/m ²
R	Yleinen kaasuvakio, = 8314,3 J/(kmol · K)
W_p	Vesihöyrynläpäisykerroin, kg/(m ² · s · Pa)
Z_p	Kosteudenläpäisyvastus (vesihöyrynvastus), (m ² · s · Pa)/kg
Z_v	Kosteudenläpäisyvastus (vesihöyrynvastus), s/m
δ_v	Kosteudenläpäisevyys, m ² /s
δ_p	Vesihöyrynläpäisevyys, kg/(m · s · Pa)
v	Vesihöyrypitoisuus, kg/m ³

1 JOHDANTO

Rakenteiden tuulensuojauksella on huomattava vaikutus rakennuksen ulkovaipan lämpöhäviöihin ja kosteustekniseen toimintaan. Tuulensuojakerroksen tulee olla riittävän ilmatiivis ja kosteutta käyttöoloissa hyvin läpäisevä. Tämän projektin tavoitteena oli esittää suositukset tuulensuojatuotteiden ilmatiiviydelle ja kosteudenläpäisevyydelle kevyellä mineraalivillalla eristetyissä ulkoseinäarakenteissa.

Taustana esitetään katsaus tuulensuojausta koskeviin vaatimuksiin ja ohjeisiin Suomessa ja muissa vastaavan ilmastoalueen maissa. Tarkasteltavina olivat Ruotsin, Norjan ja Kanadan tilanteet sekä Suomen nykykäytäntö.

Laskennallinen tarkastelu tehtiin käyttäen laskentamallia TCCC2D. Rakenteiden lämpötekninen toiminta asettaa vaatimukset tuulensuojan ilmanläpäisevyydelle. Tuulen painevaikutukset näkyvät erityisesti nurkkarakenteissa, joissa on kenttäkokeissa mitattu suuria paine-eroja eri ulkovaipan osien välillä. Nurkkarakenteiden lisäksi tarkastelun kohteena olivat ns. kasettirakenteet, joiden lämmöneristeet eivät ole virtausyhteydessä viereisten ulkovaipan osien lämmöneristykseen.

Yleensä tuulensuoja sijoitetaan lämmöneristeen ulkopintaan, jolloin sen lämpötila on lähellä ulkoilman arvoa. Kosteusteknistä toimivuutta voidaan joissain tapauksissa parantaa sijoittamalla tuulensuoja lämmöneristeen sisään, mutta samalla lämmöneristeen uloin kerros on alttiina tuulen aiheuttamille ilmavirtauksille. Tällaisen ns. käännetyn tuulensuojan lämpö- ja kosteustekniset toimintaperusteet selvitettiin.

Laskennassa esitetään luonnollisen ja pakotetun konvektion vaikutukset sekä ideaalisissa rakenteissa, että rakenteissa, joihin on oletettu lämmöneristykseen toteutuksen vähäisiä virheitä ja niiden seurauksena aiheutuvia poikkeamia rakenteiden virtauskentissä.

Kosteusteknisen toiminnan osassa tarkasteltiin kokeellisesti rakenteiden kuivumista erityyppisten tuulensuojamateriaalien kautta. Laskennallisesti tehtiin herkkyystarkasteluja eri tuulensuojan parametrien vaikutuksesta rakenteen kuivumiseen. Sekä kokeellisessa että laskennallisessa tutkimuksessa selvitettiin rakenteiden kosteustekninen toiminta voimakkaissa kosteusrasituksissa, joissa rakenteiden alkukosteudet olivat suuret.

Tavoitteena oli arvioida eri tuulensuojarakenteiden ja -materiaalien selviytymiskyky normaaleista käyttöoloista poikkeavissa kosteusrasituksissa. Lisäksi kokeissa voitiin tarkastella tuulensuojan kosteuskapasiteetin merkitystä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta.

Tutkimuksessa verrattiin tyypillisillä ns. kuppikokeilla tutkittaville tuulensuojamateriaaleille määritettyjä vesihöyrynläpäisykertoimia ja eri tuulensuojatyypeille käytännön olosuhteita vastaavissa tilanteissa tehtyjä kuivumiskokeita. Tavoitteena oli selvittää onko tuulensuojan vesihöyryn läpäisykertoimen ja rakenteen kuivumisnopeuden välillä korrelaatiota, vaikka koeolosuhteet poikkeavat huomattavasti toisistaan. Lisäksi tavoitteena oli selvittää ne kriteerit, joiden perusteella tuulensuojan kosteusteknistä toimivuutta voidaan arvioida.

Rakenteiden kosteustekniset ongelmat eivät ole tuulensuojan aiheuttamia, mutta tuulensuojakerroksen ominaisuuksista riippuu rakenteen kyky selviytyä muista poikkeavista rakenteellisista tai ympäristöoloista aiheutuvista kosteusrasituksista. Tuulensuojan ominaisuuksien tulisi siten vastata mahdollisia riskitilanteita.

2 MÄÄRÄYKSET JA OHJEET SUOMESSA JA MUISSA MAISSA

Tässä luvussa selvitetään nykyisin vallitsevaa tilannetta tuulensuojan ominaisuuksilta edellytettävistä tai niille suositelluista vaatimuksista Suomessa ja muissa vastaavan ilmastoalueen maissa.

Tuulensuojausta koskevat kohdat ja maininnat Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa ovat niukkoja. Meillä ei myöskään ole tuulensuojamateriaaleille tarkoitettua virallista tyyppihyväksyntämenettelyä. Ohjeissa on pyritty esittämään ne reunaehdot, joiden toteutuessa rakenteen ja sen lämmöneristyksen lämpö- ja kosteustekninen toiminta on tarkoituksenmukaista. Tarkkojen määrällisten ilmaisujen sijaan on tyydytty "vaatimusten" laadulliseen esittämiseen.

Suomen kannalta kiintoisaa on verrata meillä vallitsevaa tilannetta muihin samankaltaisen ilmastovyöhykkeen maihin. Jäljempänä on tarkastelun kohdemaiksi valittu Ruotsi, Norja ja Kanada. Vertailussa on näiden maiden kesken Suomi mukaanluettuna todettavissa huomattavia eroja kansallisissa käytännöissä.

2.1 SUOMI

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 "Lämmöneristys, ohjeet" esitetään laadulliset ohjeet lämmöneristykseen suojaamiseksi ilmapirtauksilta ja kosteudelta. Pääperiaatteena on, että ilmapirtausten lämmöneristävyttä heikentävälle vaikutukselle altis eristys on suojattava tarkoituksenmukaisten riittävän tiiviiden ainekerrosten väliin. Edellytetään myös, että rakenteen tulee olla kosteusteknisesti toimiva. Tähän liittyy ainoa määrällinen ilmaisu. Lämmöneristykseen lämpimällä puolella olevan höyrynsulun (yleisemmin ainekerroksen) höyrynvastuksen on oltava vähintään viisinkertainen siitä ulospäin olevaan rakenteen osaan nähden tai kosteuden liiallinen keräytyminen tulee estää tuulettamalla. Mainittu "vaatimus" voidaan luonnehtia kokemusperäiseksi historialliseksi ohjeeksi, josta kuitenkin on lukuisia käytännössä toimivaksi osoittautuneita poikkeuksia.

Kehitettäessä lämmöneristeiden normaalin lämmönjohtavuuden tyyppihyväksyntämenettelyä on jouduttu ottamaan kantaa eristyksen suojaamisen vaatimukseen lämpöteknisestä näkökulmasta. Erityisen huomion kohteena ovat olleet lämmöneristeenä tyyppihyväksytyt tuulensuojamateriaalit kuten eräät mineraalivillatuotteet.

Lämmöneristeen normaalin lämmönjohtavuuden (λ_n) arvoa määrittäessä sovelletaan ns. suojaustapaluokittelua /9/, joka käsittää kolme perustyyppiä. Tuulensuojan kannalta kiinnostava on luokka 2, johon sisältyy tavanomainen tuulensuojattu seinärakenne. Vaikka ympäristöministeriön soveltamassa ohjeessa ei aseteta vaatimusarvoa itse tuulensuojamateriaalin ilmanläpäisykertoimelle (K) on asiaan jouduttu ottamaan kantaa tyyppihyväksyttäessä eräitä tuulensuojatuotteita λ_n -arvon suhteen.

Kun tuotteen ilmanläpäisykerroin on katsottu lämpöteknisesti kriitiseksi suureeksi, on ilmanläpäisykerroin määrätty tuotteen laadunvalvonnassa valvontasuureeksi. Ilmanläpäisykertoimen nimellinen arvo ja laadunvalvonnassa sovellettava valvontaraja määräytyvät hakijan tuoteselvityksen perusteella, mutta itse lämmöneristeeseen ei sovelleta suojaustapaluokkaa 2, ellei nimellinen K-arvo ole pienempi kuin $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Tämä arvo voidaan katsoa epäsuorasti asetetuksi Suomen vaatimusarvoksi, joka aikanaan valittiin lähteessä /3/ esitettyjen, silloista tuulensuojauuskäytäntöä koskevien tutkimustulosten perusteella. Tämän tutkimuksen perusteella vaatimustasoa on syytä tarkistaa.

Suomessa ei ole käytössä varsinaista tuulensuojan tyyppihyväksyntää siinä mielessä kuin Ruotsissa ja Norjassa. Rajoitettuja hyväksyntöjä on kuitenkin mahdollista hakea ja saada kuten esimerkiksi soveltuvuus rungon jäykisteeksi.

2.2 RUOTSI

Ruotsissa on käytössä vapaaehtoisuuteen perustuva tuulensuojatuotteiden tyyppihyväksyntämenettely, joka on verraten hyvin dokumentoitu /1, 11, 12/. Lähdekirjallisuudessa on esitetty myös tuulensuojatuotteiden vaatimukset.

Yleisluontoisia vaatimuksia ovat seuraavat:

- tuulensuojan on kestävä vaatimukset täyttävänä käyttökohteessaan vähintään 50 vuoden ajan,
- tuotteen on kyettävä mukautumaan alustan ja rakennusrungon liikkeisiin eivätkä lämpö- ja kosteusmuodonmuutokset saa olla haitallisia,
- tuotteen on kestävä ainakin 1 vuoden ajan altistuminen luonnon UV-säteilylle.

Tärkeimmät toiminnalliset vaatimukset on kohdistettu seuraaviin tuoteominaisuuksiin:

- ilmanläpäisyyn,
- höyrynläpäisyyn,
- vanhenemiskestävyyteen ja
- veto- ja repimislujuuteen.

Vaatimukset ovat:

Ilmanläpäisykertoimen (K) tulee olla pienempi kuin $0,10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) = 28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Testausmenetelmä on SS 27 02 35 ja paine-ero $\pm 100 \text{ Pa}$. Vaatimus koskee itse tuotetta eikä siitä tehtyä valmista tuulensuojaa saumoineen kuten Norjassa.

Kosteudenläpäisyvastuksen (Z) (usein vesihöyrynvastus) tulee olla pienempi tai enintään yhtä suuri kuin $20 \cdot 10^3 \text{ s/m}$. Sekä lukuarvo että yksikkö vaikuttavat kotimaiseen käytäntöön verrattuina oudoilta, mutta taustalla on eroavuus määrittelymätasolla.

Kosteudenläpäisevyys (δ) voidaan määrittellä joko vesihöyrypitoisuuden (v , kg/m^3) tai vesihöyryn osapaineen (P , Pa) perusteella. Määrittelylausekkeet ovat

$$\vec{g} = - \delta \text{ grad } v \quad \text{ja}$$
$$\vec{g} = - \delta_p \text{ grad } p_v \quad \text{,joissa}$$

\vec{g} on kosteusvirran tiheysvektori, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Määrittelytavasta riippuen kosteudenläpäisevyyden yksiköt ovat

δ_v [m^2/s] ja

δ_p [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$], joka supistuu myös muotoon [s].

Eri tavoin määriteltyjen kosteudenläpäisevyyksien keskinäisen riippuvuuden ilmaisee kaava (1)

$$\delta_p = \frac{\delta_v \cdot M}{R \cdot T}, \quad (1)$$

missä M on vesihöyryn moolimassa, 18,015 kg/kmol

R on yleinen kaasuvakio, 8314,3 J/(kmol · K)

Sijoitettuna ja ratkaistuna kaava (1) antaa riippuvuudeksi 20°C:n lämpötilassa

$$\delta_p = \delta_v \cdot 7,39 \cdot 10^{-6} \text{ s}^2/\text{m}^2$$

Ainekerroksen kosteudenläpäisyvastus Z lasketaan kaavalla (2)

$$Z = \frac{d}{\delta}, \quad (2)$$

missä d on ainekerroksen paksuus, m

δ on kosteudenläpäisevyys, m^2/s tai $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$.

Soveltaen kaavoja (1) ja (2) saadaan eri siirtopotentiaaleihin perustuvien kosteudenläpäisyvastusten keskinäiseksi riippuvuudeksi

$$Z_p = \frac{Z_v}{7,39 \cdot 10^{-6}} \text{ m}^2/\text{s}^2 = Z_v \cdot 0,135 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Esitetyn riippuvuuden mukaan on Ruotsin vaatimisarvo $Z_v \leq 20 \cdot 10^3 \text{ s}/\text{m}$ sama kuin vesihöyryn osapaineeseen perustuva vaatimisarvo $Z_p \leq 2,7 \cdot 10^9 \text{ (m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)/kg}$. Jälkimmäinen yksikkö supistuu haluttaessa muotoon Z_p [m/s], joten sekaannuksen vaara on ilmeinen.

Z_p -arvoa vastaava vesihöyryn osapaineeseen perustuva kosteudenläpäisykerroimen (usein vesihöyrynläpäisykerroin) vaatimusero on $W_p \geq 0,37 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Norjaan verrattuna edellytetään olennaisesti suurempaa kosteudenläpäisyyttä. Testimenetelmä on SS 02 15 82.

Vanhemiskestävyys testataan sekä lämpötila- että UV-rasituksen kannalta. Lämpövanhentuminen testataan tuulettuvassa lämpökaapissa $70^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}/48$ viikkoa (kankaat ja foliot yms. $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}/24$ viikkoa). Lämpötilaa ja vanhentamisaikaa voidaan muunnella "Arrhenius-tvä" periaatteella. Vaatimukset vanhennetulle tuotteelle ovat seuraavat:

- silmämääräisessä tarkastuksessa ei saa esiintyä näkyviä halkeamia,
- murtovenymän muutoksen tulee olla pienempi kuin 50 % alkuperäisarvosta (kankaat, foliot, pahvit).

UV-vanhentaminen testataan ISO 4892 mukaisesti kokonaissäteilyannoksella 0,25 MW·s, mikä tapahtuu $45^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ lämpötilassa ja säteilytyssyklillä (besprutningscykel) 18/102. Vaatimus kohdistuu vanhennetun kangas-, folio- tai pahvituotteen murtovenymän muutokseen, joka on oltava pienempi kuin 20 % alkuperäisarvosta.

Veto- ja repimislujouden vaatimus koskee kankaita, folioita ja pahveja. Testausmenetelmä on SS 23 68 03 ja testauslämpötila 23°C . Kankaiden ja folioiden osalta mainitaan myös testausmenetelmät SS 24 21 21 (vaihtoehtona) ja DIN 53 363 repimisljuustestinä, jonka tulokselle on asetettu vaatimus "Repimisljuuden on oltava ≥ 20 N vetosuunnasta riippumatta". Pahveja koskeva vaatimus annetaan standardissa SS 23 68 03 ja se koskee veto- ja repimisljuutta sekä murtovenymää.

Kosteusmuodonmuutosta koskeva vaatimus on asetettu erikseen levymateriaalille. Ilmatilan suhteellisen kosteuden muutosta 30 % - 90 % vastaava piteuden ja leveyden muutos tulee olla pienempi kuin 3 mm/m.

Ulkoseinien palomääräykset, jotka koskevat rakennuksia paloluokassa Br 1 sisältävät tuulensuojaa koskevia kohtia. Ulkoseinissä voidaan käyttää rajoitetusti palavaa tuulensuojamateriaalia, jos ne ovat koko korkeudeltaan palonsammutuksen tavoitettavissa. Koko rakenteen täysmittakaavainen palotestaus voidaan suorittaa menetelmien SP Brand 105 ja SIS 02 48 20 mukaisesti. Tuloksen ollessa hyväksyttävä voidaan tuulensuojaa käyttää ilman paloa osastoisia rakennusosia. Muutoin osastointirajoitukset on otettava huomioon. Yli 8 kerroksisissa rakennuksissa sekä hoitolaitoksissa on käytettävä palamattomaksi luokiteltuja materiaaleja (NR 8:431 c).

Vaatimuksia ilman selkeästi määriteltyä testausmenettelyä on asetettu seuraavasti:

Kiinnitystarvikkeet, puristus- ja saumausmateriaalit: Käyttöiän on oltava vähintään 50 vuotta BSK:n mukaisessa ilmastoluokassa (miljöklass) M2 (BSK, Bestämmelser för stålkonstruktioner). Levy materiaalit: Vanhenemisominaisuudet tulee osoittaa, käyttöiän oltava vähintään 50 a. Kankaat, foliot yms. käsittelylämpötila: Käyttörajoitukset tulisi selvittää.

2.3 NORJA

Vaatimukset perustuvat rakennuslakiin ja sen pohjalta annettuihin yleisen tason rakentamismääräyksiin /10/. Vaatimusarvot tuotteiden ko. ominaisuuksille asettaa Norges Byggeforskningsinstitut (NBI), vaikka se ei olekaan varsinaisesti viranomaistaho.

Tuulensuojaan kohdistuvat keskeiset vaatimukset ovat:

- a) Rakennukseen valmiiksi asennetun, saumat sisältävän tuulensuojakerroksen keskimääräinen ilmanläpäisykerroin:
 $K < 0,05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) \approx 13,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.
- b) Tuulensuojan vesihöyrynläpäisykerroin $W_p \geq 0,104 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Näyttö a)-kohdan vaatimuksen täyttymisestä annetaan kokeellisen ja laskennallisen menetelmän yhdistelmällä. Itse tuotteen ilmanläpäisykerroin mitataan norjalaisen standardisoidun menetelmän mukaisesti. Tuulensuojaukseen sisältyvien saumojen vuoto testataan koeseinässä (korkeus x leveys = 2,2 x 1,5 m²), jossa on kaksi pystysuuntaista saamaa yhteispituudeltaan 4,4 m. Paine-ero tuotteen tai rakenteen yli on kummassakin testissä ±50 Pa. Koetulosten avulla lasketaan keskimääräinen ilmanläpäisykerroin (K) samalle sovitulle seinäkoolle, joka on 10 m x 2,7 m (pituus x korkeus).

Vesihöyrynläpäisykerroin (W_p) määritetään NORDTEST-menetelmän mukaisesti. Mittausolot ovat: lämpötila 23°C ja suhteellinen kosteus 93 %/50 %. 93 % aikaansaadetaan kylläisellä KNO₃-suolaliuoksella.

Norjassa on käytössä vapaaehtoisuuteen perustuva tyyppihyväksyntämenettely tuulensuojatuotteille. Em. menettelyt sisältyvät tyyppitestaukseen. Lisäksi siihen kuuluu

240 h /60 sykliä kestävä säävanhentamiskoe, jossa vaihdellaan syklisesti lämmitystä, jäähdystä, UV-säteilytystä ja sadetusta.

Vanhentamisen jälkeen suoritetaan visuaalinen tarkastus, jossa todetaan mahdolliset muutokset kuten halkeamien syntyminen.

Palomääräykset koskevat tuulensuojatuotteita eri tavoin rakennus- ja käyttötarkoituksityypin mukaan. Rakenteet testataan kokonaisina ja palonkestävyyden aikaluokan määrittämiseksi ja vaativissa kohteissa edellytetään tuulensuojalta palamattomuutta.

2.4 KANADA

Rakentamista koskevat määräykset esitetään lähteessä /4/. Aihealueeseen liittyvät kysymykset käsitellään suurten rakennusten osalta lähteen /4/ kohdassa 4 ja pienten rakennusten osalta kohdassa 9.

Kohdassa 4 tarkastellaan lähinnä tuulikuormia ja niiden laskentaa. Myöskään kohdassa 9 ei anneta tuulensuojaa koskevia määrällisiä vaatimuksia kuten Ruotsissa ja Norjassa. Sanan "wind barrier" sijaan käytetään sanaa "air barrier", joka on käsitteenä laaja-alaisempi (läpivirtaus, kauttavirtaus). Tekstissä käsitelläänkin vain epätiiviyteen ja vaipan läpi tapahtuvaan ilmavuotoon liittyviä kysymyksiä. Tällöin höyrynsulku- ja ilmasulkutoiminnat tulevat monissa tapauksissa saman ainekerroksen tehtäväksi eli varsinaista erillistä tuulensuojaa ei lähde /4/ tunne.

2.5 YHTEENVETO POHJOISMAISESTA KÄYTÄNNÖSTÄ

Tässä kappaleessa tarkastellaan pelkästään edellä esitettyjä ilman- ja kosteudenläpäisyyden kohdistuvia virallisesti tai epävirallisesti asetettuja vaatimusarvoja. Tiedot on koottu taulukkoon 1 keskinäisen vertailtavuuden helpottamiseksi.

Taulukon 1 mukaan Ruotsissa edellytetään tuulensuojalta selvästi suurempaa vesihöyrynläpäisykerrointa kuin Norjassa, jossa vaatimus ilmatiiviuden suhteen on Ruotsiin verrattuna tiukempi. Suomen epävirallinen ilmanläpäisykertoimen vaatimus on Ruotsiin nähden suurempi sallien läpäisevämmät tuotteet. Useimmat Suomessa käytettävät tuotteet täyttävät kuitenkin myös Ruotsin vaatimuksen. Tämän tutkimuksen tulokset puoltavat Suomen vaatimustason kohtuullista tiukentamista.

Liitteessä 1 esitetään tuulensuojaukseen liittyvät suureet ja yksiköt.

Taulukko 1. Tuulensuojatuotteiden ilman- ja kosteudenläpäisyn viralliset ja epäviralliset vaatimustasot eräissä pohjoismaissa. Ilmanläpäisykerroimet ovat maksimi-raja-arvoja, vesihöyrynläpäisykerroimet minimiraja-arvoja.

Maa	Ilmanläpäisykerroin		Vesihöyrynläpäisykerroin	Vesihöyrynvastus	
	K	K	W_p	Z_p	Z_v
	$m^3/m^2 \cdot s \cdot Pa$	$m^3/m^2 \cdot h \cdot Pa$	$kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$	$m^2 \cdot s \cdot Pa$	s/m
Ruotsi	$28 \cdot 10^{-6}$	0,10	$0,37 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^3$
Norja	$13,9 \cdot 10^{-6}$ ²⁾	0,05 ²⁾	$0,104 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^9$	$71 \cdot 10^3$
Suomi	$50 \cdot 10^{-6}$ ¹⁾	0,18	-	-	-

¹⁾ C4-uudistukseen ehdotettu arvoksi $30 \cdot 10^{-6} m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$.

²⁾ Koskee valmista tuulensuojakerrosta saumoineen.

3 TUULENSUOJAUKSEN VAIKUTUS RAKENTEIDEN LÄMPÖTEKNISEEN TOIMINTAAN

Tässä tarkastelussa oli tavoitteena selvittää laskennallisesti tuulensuojan ilmanläpäisykerroimen (permeabiliteetti / paksuus) vaikutus rakenteiden lämpötekniseen toimintaan. Laskennallisesti arvioitiin tyypillisten rakenteiden lämpöhäviöiden kasvun riippuvuus tuulensuojan ilmanläpäisykerroimesta, kun paineolosuhteet tuuletusraoissa ja -väleissä vastasivat voimakkaalla tuulella mitattuja arvoja.

3.1 LASKENNALLISEN TARKASTELUN PERUSTEET

Seuraavassa kuvataan käytetty laskentamalli TCCC2D ja lämpöteknisissä laskelmissa käytetyt tunnusluvut.

3.1.1 Laskentamallin kuvaus

Laskelmissa käytetty numeerinen simulointimalli TCCC2D /5, 8/ on kehitetty VTT:n LVI-tekniikan laboratoriossa. Se soveltuu monikerroksellisten rakenteiden lämmön-, ilman- ja kosteudensiirron simulointiin dynaamisessa tilanteessa 2-dimensioisena tarkasteluna. Reunaehtoina voidaan käyttää esimerkiksi tunneittain mitattuja säätiedoston arvoja tai vakioarvoja. Laskentamallia on sovellettu rakenteiden hygrotermisen toiminnan tarkasteluun vaativissakin tapauksissa /6, 7/.

IEA:n Annex 24, HAMTIE:ssa tehdyn selvityksen / 2 / perusteella TCCC2D:n on arvioitu ominaisuuksiltaan edustavan tämänhetkistä kansainvälistä kärkeä. Selvityksessä oli mukana 27 rakenteiden hygroteermisen toiminnan analysointiin soveltuvaa ohjelmaa kahdeksasta maasta.

3.1.2 Lämpöteknisen toimivuuden tunnusluvut

Tavoitteena oli selvittää tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen vaikutus rakenteiden lämpötekniseen toimintaan. Tarkastelussa käytettiin tunnuslukuina ns. modifioituja Nusseltin lukuja, jotka laskettiin erikseen rakenteelle ja tuulensuojalle.

Rakenteelle määritetty modifioitu Nusseltin luku Nu^* kuvaa konvektion aiheuttaman keskimääräisen lämpöhäviön kasvua rakenteen läpi. Tämä määritetään (kaava 3) rakenteen kontrollipinnan (sisäpinta) läpäisevien keskimääräisten lämpöhäviöiden suhteena konvektiollisessa tilanteessa (q) ja täysin virtauksettomassa, puhtaassa lämmönjohtumistilanteessa (q_0):

$$Nu^* = q / q_0 \quad (3)$$

Koska tutkimuksessa selvitetään tuulensuojan vaikutusta rakenteen lämpötekniseen toimintaan, määritettiin tuulensuojakerroksen toiminnalle oma Nusseltin luku:

$$Nu^*_{TS} = q / q_{sulj} \quad (4)$$

missä

q on keskimääräinen lämpövirrantiheys, W/m^2

q_{sulj} on keskimääräinen lämpövirrantiheys ilmavirtauksilta täysin suljetulla rakenteella, W/m^2 .

Jos tuulensuojakerros on täysin ilmatiivis, saa Nu^*_{TS} arvon 1,00. Rakenteen sisällä voi kuitenkin olla konvektiota, ts. Nu^* voi olla $>1,00$, ja sen voimakkuus ja vaikutus rakenteen lämpötekniseen toimintaan riippuu mm. rakenteen toteutuksesta.

Nu^* kuvaa siis ilmavirtausten aiheuttamaa rakenteen lämpöhäviöiden kasvua virtauksettomaan tilanteeseen verrattuna, ja Nu^*_{TS} kuvaa tuulensuojan läpäisevien konvektiovirtausten vaikutusta rakenteen lämpöhäviöihin. Arvioitaessa ja vertailtaessa eri tuulensuojien toimintaa käytetään tuulensuojalle laskettua Nu^*_{TS} lukua.

3.2 TARKASTELLUT RAKENTEET JA NIIDEN REUNAEHDOT

Laskennallisesti tarkasteltiin kolmea eri rakennetapausta:

- 1) kasettirakennetta, jolla tässä tarkoitetaan muista ympäröivistä rakenteista ilmavirtausteknisesti eristettyä pystyrakennetta, jonka ulkopinnalla on tuulensuoja ja jonka muut pinnat ovat ilmavirtauksilta täysin suljetut (ilmavirtaus muiden ulkovaipan osien välillä ei ole merkittävää),
- 2) kahden seinän nurkkarakennetta, ja
- 3) seinän ja yläpohjan nurkkarakennetta.

Nurkkarakenteissa perusoletuksena oli pahin mahdollinen tilanne, jossa ilmavirtaus nurkan yli seinäosasta toiseen tapahtuu pääasiassa tuulensuojan ja lämmöneristeen läpi eikä tuuletusrakojen kautta. Tällöin nurkkapaine-erot ja ilmavirtauksen vaikutukset rakenteen lämpöhäviöihin voivat olla korkeat.

Kaikissa tapauksissa käytettiin lämmöneristeenä kevyttä lasivillaa (taulukko 2). Laskelmissa lämmöneristeen aineominaisuudet oletettiin vakioiksi.

Taulukko 2. Laskelmissa käytetyt lämmöneristeen materiaaliominaisuudet.

Tiheys kg/m ³	Lämmönjohtavuus W/Km		Ilman permeabiliteetti m ²	
	x-suunta	y-suunta	x-suunta	y-suunta
20	0,0365	0,0385	2,8E-09	5,0E-09

Laskennassa käytettiin ulko- ja sisäpuolisen ilmatilan lämpötiloina vakioarvoja -20 ja +20 °C. Pystyseiniä ulko- ja sisäpinnan lämmönsiirtokertoimet olivat 15,0 ja 7,5 W/m²K vastaten rakenteen lämmönsiirtovastusta 0,20 Km²/W. Yläpohjan ulko- ja sisäpinnan lämmönsiirtokertoimet olivat vastaavasti 10,0 ja 5,0 W/Km².

Laskelmat tehtiin kaikille tapauksille voimakkaan (noin 9 m/s) tuulen painevaikutuksia kuvaavissa painegradientti- ja paine-erotapauksissa. Kahden seinän liitosnurkan yli vallitsevaksi paine-eroksi valittiin 65 Pa, mikä vastaa jokseenkin tuulen nopeudella 9 m/s mitattua arvoa / 3 /. Samoin perustein seinän ja yläpohjan liitoksen paine-eroksi valittiin 35 Pa. Tuulen aiheuttamaksi painegradientiksi kasettirakenteen tuuletusraossa valittiin arvo 3 Pa/m.

Kasettirakenteella ja seinä/yläpohjaliitoksessa (tapaukset 1 ja 3) ilmavirtauksiin vaikutti luonnollinen konvektio virtausta lisäävästi. Näille rakenteille laskelmat tehtiin myös pelkän luonnollisen konvektion vaikuttaessa rakenteen toimintaan.

3.2.1 Tuulensuojan ilmanläpäisykertoimet

Tavoitteena oli tarkastella tuulensuojauksen vaikutusta rakenteen lämpötekniiseen toimintaan erilaisissa konvektiotapauksissa. Tuulensuojan ilmanläpäisykerroin käsiteltiin laskelmissa vastuksena, joka asetettiin 5 mm paksulle lämmöneristekerroksen (uloimmalle) osalle. Siten rakenteiden laskennallinen k-arvo (ilman sisäisen konvektion aiheuttamia muutoksia) oli sama riippumatta tuulensuojan tyypistä.

Taulukossa 3 esitetään laskennallisesti tarkastellut tuulensuojakerroksen ilmanläpäisykertoimet ja näitä laskennassa vastaavat permeabiliteetit kuudessa eri tapauksessa, jotka vaihtelivat täysin virtausta läpäisevästä, puoliavoimesta rakenteesta (1) täysin suljettuun tapaukseen (6).

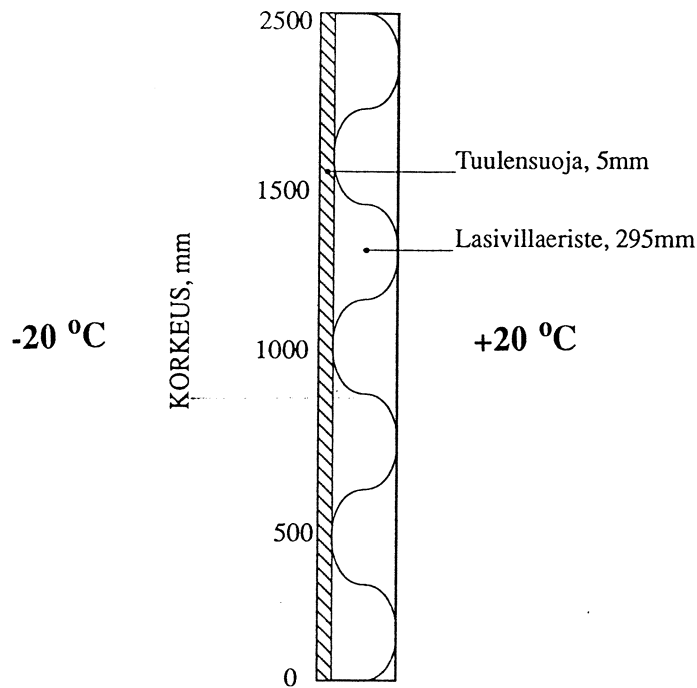
Taulukko 3. Laskelmissa käytetyt ilmanläpäisykertoimet ja niitä vastaavat permeabiliteetit, kun tuulensuojakerroksen paksuus on 5 mm.

TAPAUS	ILMANLÄPÄISY- KERROIN $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	PERMEABILITEETTI (d = 5 mm) m^2
1 (avoin)	31.000 x 10 ⁻⁶	2,8E-09
2	1.000 "	9,0E-11
3	400 "	3,6E-11
4	50 "	4,5E-12
5	5 "	4,5E-13
6 (suljettu)	0,01 "	1,0E-15

Taulukon 3 arvojen lisäksi haettiin tarkentavilla laskelmilla tuulensuojan ilmanläpäisykertoimet, joilla konvektiiviset lisälämpöhäviöt tuulensuojan kautta jäivät tarkasteluoloissa 5 %:n tai 10 %:n suuruisiksi.

3.2.2 Kasettirakenne

Tarkasteltavaksi rakenteeksi valittiin 2,5 m korkea, 300 mm paksu lasivillaeriste-kerros (20 kg/m^3), joka oli suljettu ilmavirtauksilta muilta paitsi ulkopinnaltaan (kuva 1). Tuulensuoja kuvattiin 5 mm paksuna kerroksena, jonka ilman permeabiliteettia (m^2) muutettiin halutun permeanssin (ilmanläpäisykertoimen [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]) mukaisesti.



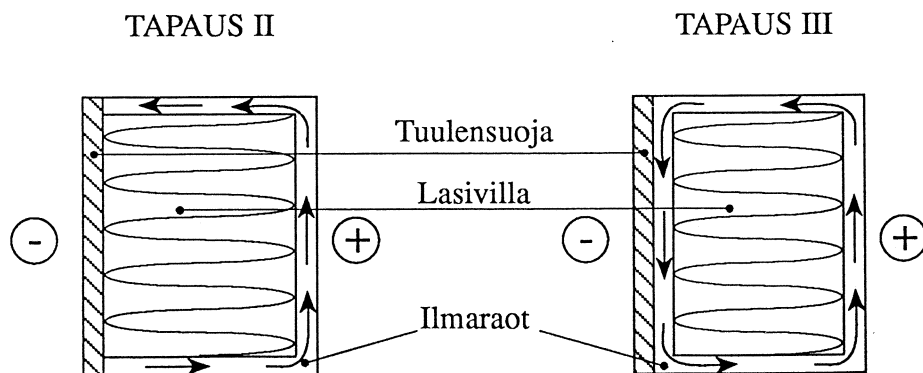
Kuva 1. Laskennallisesti tarkasteltu kasettirakenne.

Kasettirakenteelle lasketut perustapaukset on lueteltu taulukossa 4. Pelkän luonnollisen konvektion tilanteessa (A) vain lämpötilaero (40 K) aiheutti ilman virtauksen. Laskelmat tehtiin myös olettaen pakotetun konvektion (tuulen) vaikuttavan tuuletusraossa luonnollisen konvektion lisäksi (tapaus B). Tuuletusraon **painegradientiksi** valittiin **3,0 Pa/m** (suunta ylöspäin), mikä kuvaa suhteellisen harvalla ulkoverhouksella ja voimakkaalla tuulella mahdollista arvoa. Tuulensuojan ilmanläpäisykertoimille käytettiin taulukon 3 mukaisia arvoja (1 - 6). Laskelmat tehtiin sekä ideaalisesti toteutetuille että epäideaalisille rakenteille.

Epäideaaliset rakenteet

Todelliset rakenteet ovat tuskin koskaan täysin ideaalisia. Siksi laskelmissa tarkasteltiin ns. ideaalisten rakenteiden (tapaus I) lisäksi myös rakenteita, joiden toteutuksen oletettiin vastaavan paremmin käytännössä esiintyviä tapauksia. Laboratoriomittauksissa on luonnollisen konvektion aiheuttamaksi lämpöhäviöiden kasvuksi mitattu noin 10 %:n arvoja pintaverhouksiltaan täysin suljetuissa tapauksissa ja jopa 20 %:n arvoja puoliavoimilla tapauksilla / 3 /. Tämä on mahdollista, kun eristeen ja verhouklevyjen väliin jäävät virtausreitit lisäävät konvektiota.

Laskelmissa oletettiin rakenteen reunoille virtausraot siten, että reunaosien permeabiliteettia kasvatettiin alkuperäisestä. Lähtökohtana oli käyttää vaaka- ja pystypinnoilla rakoja, jotka suljetun rakenteen tapauksessa kasvattavat keskimääräisiä rakenteen läpäiseviä lämpövirtoja noin 10 %. Tilannetta kuvaa laskentatapaus III A 6. Näin haettuja reunakerrosten permeabiliteetteja käytettiin ns. epäideaalisten rakenteiden tarkastelussa. Tarkasteluissa oli kaksi eri tapausta (kuva 2): Tilanne, jossa lämmöneristeen kaikilla muilla paitsi tuulensuojan vastaisella pinnalla on raot (tapaus II) ja tilanne, jossa myös tässä välissä on virtausta edistävä rako (tapaus III).



Kuva 2. Rakoina kuvattujen epäideaalisuuksien sijainti rakenteessa tapauksissa II ja III. Tapauksessa III lämpöhäviöiden kasvu luonnollisen konvektion tilanteessa lämpötiloilla +20/-20 °C on noin 10 %.

Taulukko 4. Kasettirakenteelle lasketut tapaukset.

NUMERO	TAPAUSET	LUONN. KONVEKTIO	PAKOTETTU KONVEKTIO (3 Pa/m)	TUULEN-SUOJAN PERMEAB.	VILLAN PERMEAB.
0	Refer.tapaus, V = 0.	EI	EI	1.0E-17 m ²	1.0E-17 m ²
I A, (1...6)	Ideaalinen rakenne	ON	EI	TAPAUKSET 1...6 (taul. 2)	2,8E-09 m ² / 5.0E-09 m ²
I B, (1...6)	Ideaalinen rakenne	ON	ON	- " -	- " -
II A (1...6)	Epäideaalinen rakenne. Ei rakoja TS:n ja villan välissä	ON	EI	- " -	- " -
II B (1...6)	- " -	ON	ON	- " -	- " -
III A (1...6)	Epäideaalinen rakenne. Rako TS:n ja villan välissä	ON	EI	- " -	- " -
III B (1...6)	- " -	ON	ON	- " -	- " -

Käännetty tuulensuoja

Taulukossa 4 esitettyjen perustapausten lisäksi haluttiin selvittää lämmöneristeen sisään sijoitetun tuulensuojan vaikutus rakenteen lämpötekniiseen toimintaan. Tässä tarkastelussa tuulensuojan ulkopinnan puolella oletettiin olevan 50 mm kerros lämmöneristettä, jonka lämmönjohtavuus vastasi varsinaisen lämmöneristeen arvoja. Varsinaista lämmöneristekerrosta ohennettiin 250 mm:iin, jolloin koko rakenteen k-arvo pysyi samana kuin perustapauksissa. Konvektio lisääntyi erityisesti painegradienttitapauksissa tuulensuojan ulkopuolisessa eristekerroksessa, mutta pieneni jonkin verran sisemmässä eristekerroksessa, koska tämä kapeni ja lämpötilaero ko. kerroksen yli pieneni.

Laskelmat tehtiin vain valituille tuulensuojan ilmanläpäisykertoimien tapauksille ideaalisessa ja II-tyypin epäideaalisessa rakenteessa.

Laskelmissa oli tavoitteena selvittää:

- a) käännetyin tuulensuojarakenteen lämpötekniinen toiminta verrattuna tavanomaiseen, lämmöneristeen ulkopinnalta tuulensuojattuun rakenteeseen ja
- b) tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutus koko rakenteen lämpöhäviöihin, ts., voidaanko käännetty tuulensuoja eristää ulkopuoleltaan tyypillistä lämmöneristettä vastaavalla eristeellä (noin 20 kg/m³) vai edellyttääkö ratkaisu tyypillistä tuulensuojavillaa (noin 58 kg/m³).

3.2.3 Nurkkarakenteet

Tarkastelun kohteena olivat seinä-seinä- ja seinä-yläpohja-nurkkarakenteiden lämpötekniinen toimivuus pakotetun ja luonnollisen konvektion tilanteissa ja näissä oloissa tuulensuojalta edellytettävä ilmanläpäisykerroin.

Kuvissa 3 ja 4 esitetään laskennallisesti tarkastellut seinien nurkkarakenteet. Seinien lämmöneristekerroksen paksuus oli 200 mm ja yläpohjan 300 mm. Tuulensuoja kuvattiin 5 mm paksuna kerroksena, jolle asetettiin tarkasteltavaa ilmanläpäisykerrointa vastaava arvo. Yläpohjassa ei ollut tuulensuojaa. Rakenneosien laskennallinen k-arvo ilman konvektiovaikutuksia oli tuulensuojan tiiviydestä riippumatta sama. Laskelmissa tarkasteltiin tuulensuojan ilmanläpäisykertoimien luokkia 1...6, (taulukko 3) ja lisäksi tehtiin täydentäviä laskelmia hakemalla $Nu_{TS}^* = 1,05$ raja-arvot tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle.

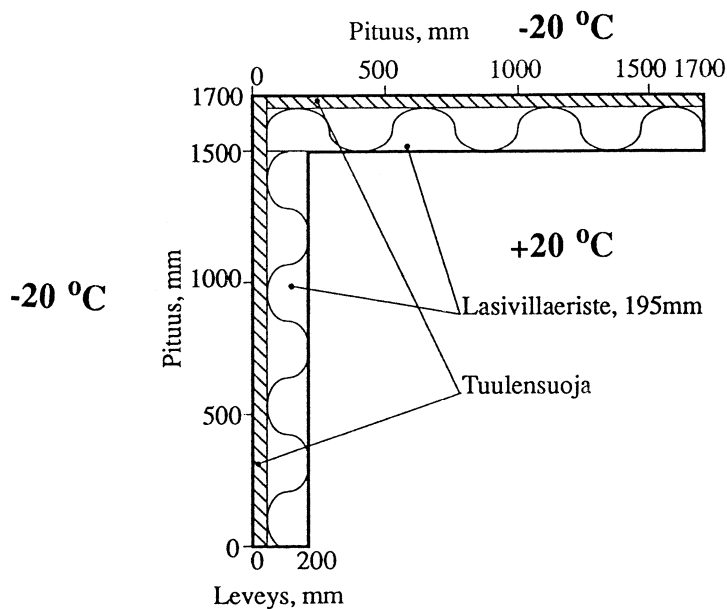
Laskelmissa tarkasteltiin kolmea eri tapausta kummallakin kulmarakenteella:

Perustapauksena oli tilanne, jossa seinämiin ei oletettu tukirakenteita kuten vaaka- tai pystypuita (kuvat 3 ja 4). Tämä oletus tekee nurkan alueen alttiimmaksi konvektiolle kuin tapaus, jossa nurkkaan on sijoitettu virtausta rajoittavia ja ohjaavia rakenteita /3/. Tätä rakennetta tarkasteltiin sekä ideaalisena että epäideaalisena.

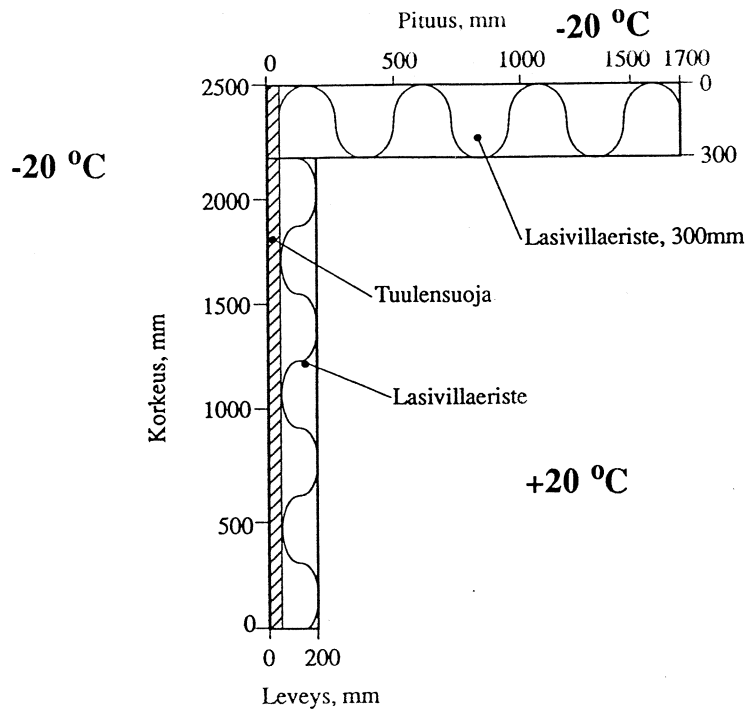
Toiseksi tarkasteltiin tapausta, jossa nurkkaan oli sijoitettu runkorakenteita kuvaamaan (lähes) ilmatiivis virtauseste (kuva 5), joka ulottui noin puoleen väliin lämmöneristettä rakenteen sisäpinnasta.

Kolmantena tapauksena tarkasteltiin rakennetta, jossa nurkassa oli läpi koko eristekerroksen ulottuva virtauseste (kuva 6). Tämä virtauseste on rakenteen sisäinen, ylimääräinen tuulensuojakerros, joka oletettiin ilmanläpäisyker-toimeltaan samaksi kuin seinän ulkopinnan tuulensuojamateriaali kussakin tarkastellussa tapauksessa. Tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia pienentää nurkkakonvektion vaikutuksia osastoimalla nurkan viereiset rakenteet tuulensuojaa käyttäen.

Tarkastelussa kuvatut epäideaalisuudet (raot) vastasivat kasettirakenteen laskennassa käytettyjä dimensioita ja ilman permeabiliteetteja. Tässä tapauksessa rakoja kuvaava suuremman ilmanläpäisevyyden alue on sijoitettu vain lämmöneris-teen sisäpintaan. Seinän ja yläpohjan tapauksessa ko. rako jatkuu vaakasuunnassa aina tuulensuojaan saakka (kuva 4).

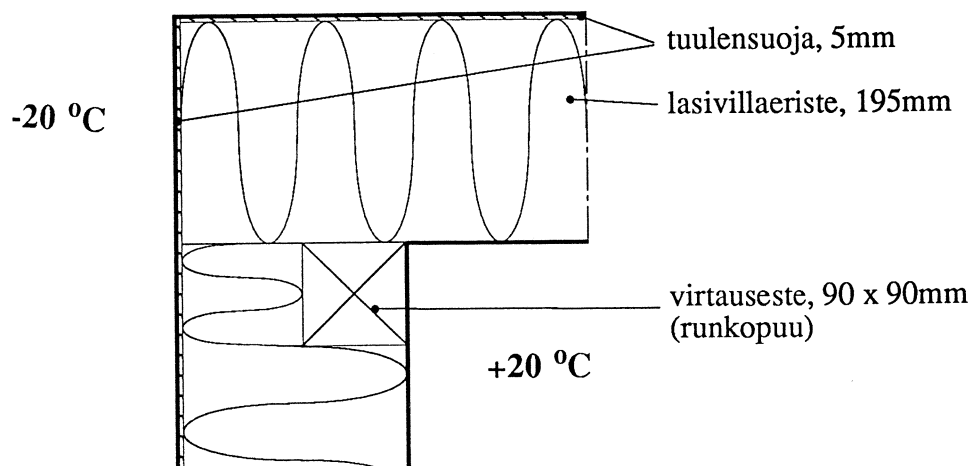


Kuva 3. Laskennallisesti tarkasteltu kahden seinän vaakaleikkaus.



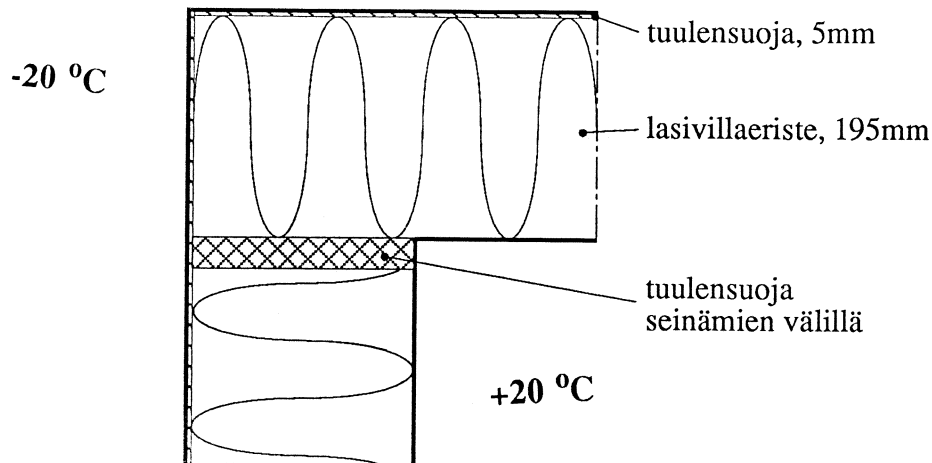
Kuva 4. Laskennallisesti tarkasteltu seinän ja yläpohjan liitos.

VIRTAUSESTE I, ULKOSEINÄNURKKA



Kuva 5. Nurkkarakenne, jossa on puurunkoa kuvaava, virtausta ohjaava kerros.

VIRTAUSESTE II, ULKOSEINÄNURKKA



Kuva 6. Nurkkarakenne, jossa rakenteen sisällä oleva ylimääräinen tuulensuojakerros rajoittaa ilman virtausta nurkan yli.

3.3 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tuulensuojauksen toimintaa arvioitaessa tulee käyttää tunnuslukua Nu_{TS}^* , joka kuvaa rakenteen ulkopuolisen painekentän vaikutusta rakenteen lämpöhäviöihin. Esimerkiksi epäideaalisella kasettirakenteella tapauksessa III saa Nu^* rakenteen sisäisen, luonnollisen konvektion takia joka tapauksessa vähintään arvon 1,10 tarkastelussa käytetyissä lämpötilaoloissa. Tätä ei voida tuulensuojauksen tiiviyyttä lisäämällä pienentää.

Tuloksista näkyy selvästi tuulensuojan merkitys konvektion aiheuttamien lämpöhäviöiden vähentäjänä. Ongelmana on määrittää se vaatimustaso, joka konvektion aiheuttamalle lämpöhäviöiden kasvulle tulisi asettaa.

Tarkastelukriteerit 5 % ja 10 %

Arvioitaessa tuulensuojalta edellytettävää tiiviyyttä voidaan eräänä tarkastelun lähtöarvona pitää luonnollisen konvektion tilannetta puoliavoimella, ideaalisella

rakenteella, jossa 40 K:n lämpötilaerolla voidaan tuulensuojan avulla pienentää lämpöhäviöitä enintään noin 5 %. Toisaalta tyypillisellä suljetulla (epäideaalisella) rakenteella voi keskimääräisten lämpöhäviöiden kasvu sisäisen konvektion vuoksi olla noin 10 % lämpötilaerolla 40 K.

Tarkasteltaviksi raja-arvoiksi valittiin $Nu^*_{TS} = 1,05$ ja $Nu^*_{TS} = 1,10$, ts. voimakkaassa tuulitilanteessa tuulensuojan ilmanläpäisevyydestä aiheutuvat hetkelliset lisälämpöhäviöt saavat asetetun raja-arvon mukaan olla korkeintaan 5 % tai 10 % ulkopinnaltaan täysin tiiviin rakenteen lämpöhäviöihin verrattuna. Eri tapauksille haettiin tämän tuloksen antavat tuulensuojan ilmanläpäisevyydet.

Tarkasteluissa käytetyn voimakkaan tuulen aiheuttamien paineolojen esiintyminen riippuu mm. tuulen vaihteluista, sen kohdistumisesta rakennukseen ja rakenteellisista tekijöistä.

Tuloksina esitetään seuraavassa rakenteiden lämpöhäviöiden suhteellinen kasvu eri konvektiotilanteissa ja eri tuulensuojan ilmanläpäisykertoimilla. Lisäksi esitetään vielä ne tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen raja-arvot, joilla tarkasteluoloissa rakenteiden lämpöhäviöt kasvavat korkeintaan 5 % tai 10 %.

Ilmavirtausten vaikutus eri rakenneosiin on erilainen. Samoin rakenneosien osuus koko ulkovaipasta vaihtelee. Nurkkakonvektion vaikutusalue kahden pystyseinän nurkassa rajoittuu verrattain pienelle alueelle nurkkien lähellä ja tämän alueen osuus koko rakennuksen vaipasta on suhteellisen pieni. Sen sijaan kasettirakenteilla ja seinä-yläpohjaliitoksissa konvektion vaikutusalue on selvästi pystynurkkaa suurempi, koska näissä tapauksissa konvektio vaikuttaa yleensä koko tuulenpuoleisen seinäosan lämpötekniseen toimintaan.

3.3.1 Kasettirakenne

Referenssitilanteessa (tapaus 0), jossa oli pelkästään lämmönjohtumista, lämpövirrat rakenteen läpi laskettiin asettamalla lämmöneristeen permeabiliteetille hyvin pieni arvo, $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$, jolloin virtaus rakenteessa oli merkityksetön. Rakenteen läpäisevän lämpövirran tiheydeksi saatiin arvo $q_0 = 4,751 \text{ W/Km}^2$.

Taulukossa 5 esitetään tulokset laskentatapauksittain määritettyinä Nusseltin lukuina. Nu^* kuvaa konvektion vaikutusta rakenteen lämpötekniseen toimintaan ja

Nu_{TS}^* luku vastaavasti tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen vaikutusta rakenteen lämpöhäviöihin. Tuulensuojausta tarkasteltaessa vertailulukuna käytetään seuraavassa Nu_{TS}^* -lukuja.

Luonnollisen konvektion vaikutus kasettirakenteen lämpöhäviöihin (Nu_{TS}^*) esitetään kuvassa 7 tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen funktiona. Vastaavasti kuvassa 8 esitetään 3 Pa/m painegradientin ja luonnollisen konvektion yhteisvaikutus rakenteen lämpöhäviöihin.

Ideaalisessa rakenteessa luonnollinen konvektio kasvattaa lämpöhäviöitä ilman tuulensuojaa lähes 6 % (tapaus I A 1), ja täysin suljetun rakenteen tapauksessa noin 1 %. Puoliavoimella rakenteella tuulensuojan Nusseltin luku Nu_{TS}^* on 1,047, ts. tuulensuojauksella voidaan tässä virtaustilanteessa pienentää häviöitä vajaat 5% verrattuna rakenteeseen, jossa ei ole tuulensuojaa.

Epäideaalisessa rakenteessa, jossa on virtausta lisääviä rakoja eristeen ja verhoukslevyjen välissä, mutta tuulensuojan ja villan rajapinta on ideaalisesti toteutettu, kasvaa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (tapaus II A/B 4) keskimääräinen lämpöhäviö luonnollisen konvektion tapauksessa noin 3 % ja painegradientin vaikutuksesta noin 15 % verrattuna tuulensuojaltaan täysin tiiviiseen tapaukseen.

Kun muiden rajapintojen lisäksi myös tuulensuojan ja lämmöneristeen välissä on virtausta lisäävä rako (tapaus III), lisääntyvät lämpöhäviöt luonnollisen konvektion vaikutuksesta täysin suljetussakin tapauksessa noin 9 %. Luonnollisen konvektion tapauksessa kasvavat lämpöhäviöt ilmanläpäisykertoimella $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ noin 1,5 % verrattuna suljettuun tapaukseen, kun vastaava arvo 3 Pa/m painegradientin vaikuttaessa tuuletusraossa on 10,5 %.

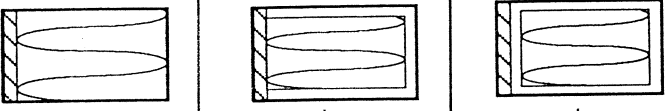
Tuulensuojan vaikutus konvektion aiheuttamiin lisälämpöhäviöihin on tapauksen III mukaisessa epäideaalisessa rakenteessa pienemmät kuin tapauksessa II, jossa tuulensuoja on kiinni lämmöneristeessä.

Oletus ideaalisesta rakenteesta antaa liian hyvän kuvan todellisten rakenteiden lämpöteknisestä toiminnasta konvektiutilanteessa. Valittu painegradientti 3 Pa/m tuo varmuutta tarkasteluun. Kun ideaalisen rakenteen laskelmissa käytettiin painegradienttia 3 Pa/m ja tuulensuojan ilmanläpäisykerroin arvoa $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ kasvoivat lämpöhäviöt konvektion vaikutuksesta ideaalisellakin

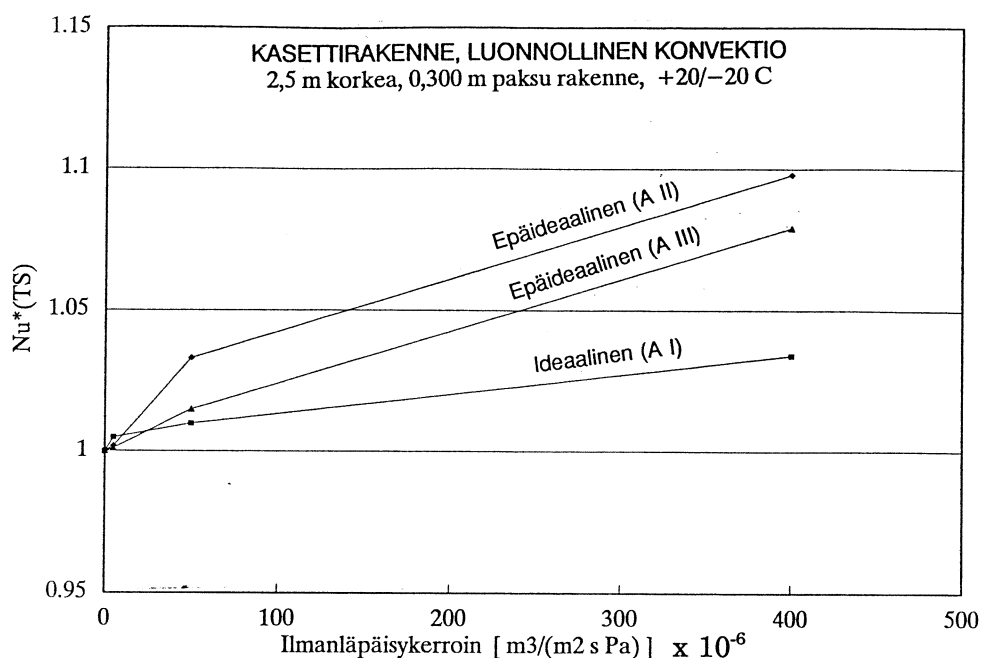
rakenteella noin 8 %. Tällöin tuulensuojan Nusseltin luku on 1,07, ts. pelkästään tuulensuojan permeabiliteettia pienentämällä voidaan lämpöhäviöitä pienentää 7%.

Kun mahdolliset rakenteen epäideaalisuudet otetaan huomioon vaikuttaa tuulensuojan ilmanläpäisykerroin $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ liian korkealta rakenteen lämpöteknisen toimivuuden kannalta ($\text{Nu}^*_{\text{TS}} = 1,15$). Kertaluokkaa tiiviimmällä tuulensuojalla on $\text{Nu}^*_{\text{TS}} < 1,02$, joten tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen vaatimustaso sijoittuu kasettirakenteella em. arvojen välille.

Taulukko 5. Keskimääräisten lämpövirtojen perusteella lasketut rakenteen ja tuulensuojan Nusseltin luvut eri tuulensuojan ilmanläpäisykertomilla, tapauksissa 1..6 (taulukko 3) lämpötilaerolla +20/-20 °C.

TUULENSUOJAN ILMANLÄPÄISEVYYS TAPAUS N:O	IDEAALINEN RAKENNE, TAPAUS I		EPÄIDEAALINEN RAKENNE, TAPAUS II		EPÄIDEAALINEN RAKENNE, TAPAUS III	
	Nu*	Nu* _{TS}	Nu*	Nu* _{TS}	Nu*	Nu* _{TS}
A. LUONNOLLINEN KONVEKTIO:						
1 (puoliavoin)	1,058	1,047	1,233	1,190	1,216	1,118
2	1,044	1,034	1,177	1,136	1,191	1,095
3	1,044	1,034	1,138	1,098	1,174	1,079
4	1,021	1,010	1,070	1,033	1,104	1,015
5	1,015	1,005	1,038	1,002	1,089	1,001
6 (suljettu)	1,010	1,000	1,036	1,000	1,088	1,000
						
B. A + PAINEGRA DIENTTI 3 Pa/m:						
1 (puoliavoin)	1,343	1,331	1,921	1,860	1,920	1,760
2	1,291	1,279	1,763	1,707	1,722	1,580
3	1,244	1,233	1,599	1,548	1,584	1,453
4	1,082	1,072	1,188	1,150	1,204	1,105
5	1,020	1,011	1,048	1,015	1,095	1,005
6 (suljettu)	1,009	1,000	1,033	1,000	1,090	1,000

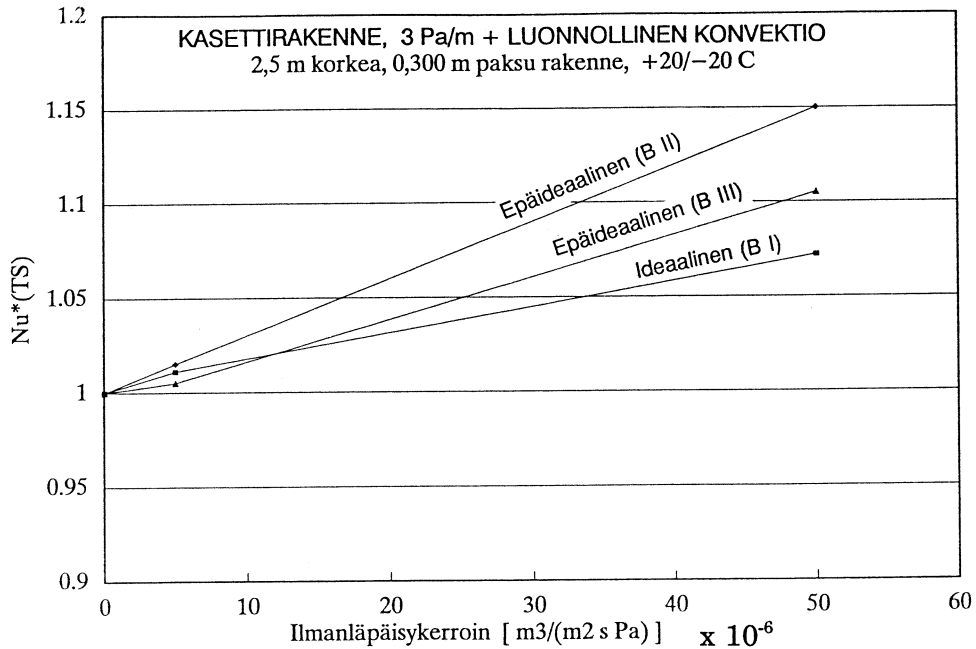
Vaikka rakentamisessa on tavoitteena ideaalinen toteutus, ei tapauksen I mukaista rakennetta voida pitää tuulensuojan ominaisuuksien valinnan lähtökohtana. Epäideaalisissa rakenteissa tapaus II asettaa tuulensuojalle tiukemmat vaatimukset kuin vielä 'epäideaalisempi' tapaus III, jossa sisäinen konvektio tiiviilläkin tuulensuojalla huonontaa olennaisesti rakenteen lämpöteknistä toimintaa.



Kuva 7. Luonnollisen konvektion (+20/-20 °C) vaikutus kasettirakenteen ($d = 300 \text{ mm}$) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Lämpöhäviöiden suhteellinen kasvu esitetään tuulensuojan ilmanläpäisykerroimen funktiona.

Verrattaessa luonnollisen konvektion ja pakotetun konvektion tapauksia toisiinsa, voidaan todeta, että kasettirakenteet, joissa on hyvin tiivis tuulensuoja ($< 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) toimivat molemmissa tapauksissa jokseenkin kuten suljetut rakenteet. Erot pakotetun ja luonnollisen konvektion välillä kasvavat kun tuulensuojan ilmanläpäisykerroin kasvaa.

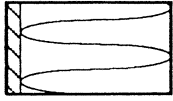
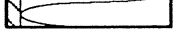
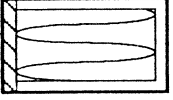
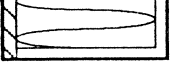
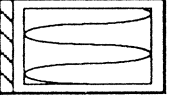

Taulukossa 6 esitetään eri tapauksissa laskettujen sisäpinnan läpäisevien lämpövirrantiheyksien minimi- ja maksimi-arvot sekä sisäpinnan minimilämpötila.



Kuva 8. Painegradientin 3 Pa/m ja luonnollisen konvektion (+20/-20 °C) vaikutus kasettirakenteen ($d = 300 \text{ mm}$) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Lämpöhäviöiden suhteellinen kasvu esitetään tuulensuojan ilmanläpäisykerroimen funktiona.

Lämpövirrantiheyksien minimi- ja maksimiarvot vaihtelivat tapauksittain paljon. Sisäpinnan minimilämpötilalla on merkitystä mm. huonetilan termisen viihtyisyyden ja rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Jos lämpötila laskee tarpeeksi alas, on vaarana sisäilman kosteuden tiivistyminen rakenteen pintaan. Alhaisin sisäpinnan lämpötila oli tapauksissa II ja III B 1 noin 14,8 °C. Tämä vastaa vesihöyryn kyllästyspainetta noin 1680 Pa, mikä puolestaan vastaa +20 °C lämpötilassa ilman suhteellista kosteutta 72 %. Tuulensuojan tiiviydellä 4 (ilmanläpäisykerroin $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) oli alin pintalämpötila 17,6 °C. Pelkän konvektion vaikutuksesta ei juuri ole vaaraa vesihöyryn kondenssista rakenteen sisäpintaan. Jos ilmavuotokohtaan liittyy rakenteellinen kylmäsilta, kuten rajapinnoilla usein on mahdollista, voi tilanne olla olennaisesti huonompi.

Taulukko 6. Perustapauksille laskettujen sisäpinnan läpäisevien lämpövirrantiheyksien minimi- ja maksimiarvot sekä sisäpinnan minimilämpötila lämpötilaerolla +20 /-20 °C.

Tapaus	Lämpövirran tiheys			Sisäpinnan minimilämpötila °C	
	min W/m ²	max W/m ²	keskim. W/m ²		
IA 3 	1	3,18	7,92	5,028	18,93
	2	3,31	7,74	4,958	18,96
	3	3,39	7,50	4,962	18,99
	4	3,69	6,90	4,852	19,07
	5	3,84	6,47	4,825	19,13
	6	3,87	6,49	4,939	19,12
IB 	1	2,29	13,28	6,382	18,22
	2	2,30	11,87	6,132	18,41
	3	2,40	10,92	5,911	18,53
	4	3,15	8,27	5,139	18,89
	5	3,76	6,68	4,848	19,10
	6	3,87	6,42	4,796	19,13
IIA 	1	1,633	20,16	5,858	17,30
	2	1,74	17,53	5,594	17,65
	3	1,89	15,62	5,404	17,91
	4	2,423	12,36	5,084	18,34
	5	2,73	10,60	4,932	18,58
	6	2,77	10,59	4,920	18,58
IIB 	1	1,28	38,87	9,128	14,81
	2	1,05	32,78	8,377	15,62
	3	1,07	28,66	7,599	16,17
	4	1,84	17,38	5,642	17,67
	5	2,59	11,21	4,981	18,49
	6	2,78	10,71	4,907	18,56
IIIA 	1	1,69	19,88	5,776	17,34
	2	1,84	18,31	5,657	17,55
	3	1,94	17,02	5,576	17,72
	4	2,25	14,67	5,247	18,03
	5	2,23	13,45	5,172	18,20
	6	1,91	15,08	5,328	17,98
IIIB 	1	1,23	38,90	9,124	14,80
	2	1,10	31,88	8,182	15,74
	3	1,14	28,51	7,624	16,19
	4	1,78	18,02	5,721	17,59
	5	2,22	13,79	5,201	18,15
	6	2,11	14,54	5,276	18,05

Käännetty tuulensuoja

Käännetyn tuulensuojan perusajatuksena on kosteustekninen toimivuus. Kun tuulensuoja on ulkopinnaltaan eristetty, sen lämpötila on normaalia eristeen ulkopintaan tehtyä asennustapaa korkeampi, jolloin kosteuden kuivuminen tuulensuojan läpi voi olla tehokkaampaa. Tässä osassa selvitettiin käännetyn tuulensuojan vaikutus rakenteen lämpötekniiseen toimintaan.

Käännetyn tuulensuojan (rakenne ulkopinnasta: 50 mm villaa, tuulensuoja, 250 mm villaa) laskelmat tehtiin ideaaliselle rakenteelle luonnollisen ja pakotetun konvektion tapauksissa ja epäideaaliselle rakenteelle (tapaus II) pakotetun konvektion tapauksessa valituilla tuulensuojan ilmanläpäisykertoimilla. Ero ulkopintaan sijoitetun tuulensuojan toimintaan nähden oli suhteellisen vähäinen, joten tarkastelu tehtiin vain valituille tapauksille.

Tuulensuojan villakerros oli joko tyypillinen raskas villa (58 kg/m^3 , ilmanläpäisykerroin 50 mm kerroksella noin $500 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) tai lämmöneristettä vastaava kevyt lasivilla, jonka ilmanläpäisykerroin oli 6 kertaa tuulensuojavillan arvoa suurempi.

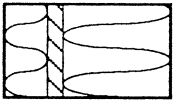
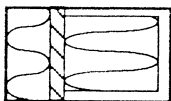
Taulukossa 7 esitetään rakenteen sisään sijoitetun tuulensuojan tapauksissa lasketut modifioidut Nusseltin luvut. Ilmanläpäisykertoimet olivat taulukon 3 mukaiset ja massapintaisella tuulensuojalla $35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Kuvissa 9 ja 10 esitetään Nusseltin luku Nu^*_{TS} tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen funktiona ideaaliselle ja epäideaaliselle rakenteelle painegradienttitilanteessa.

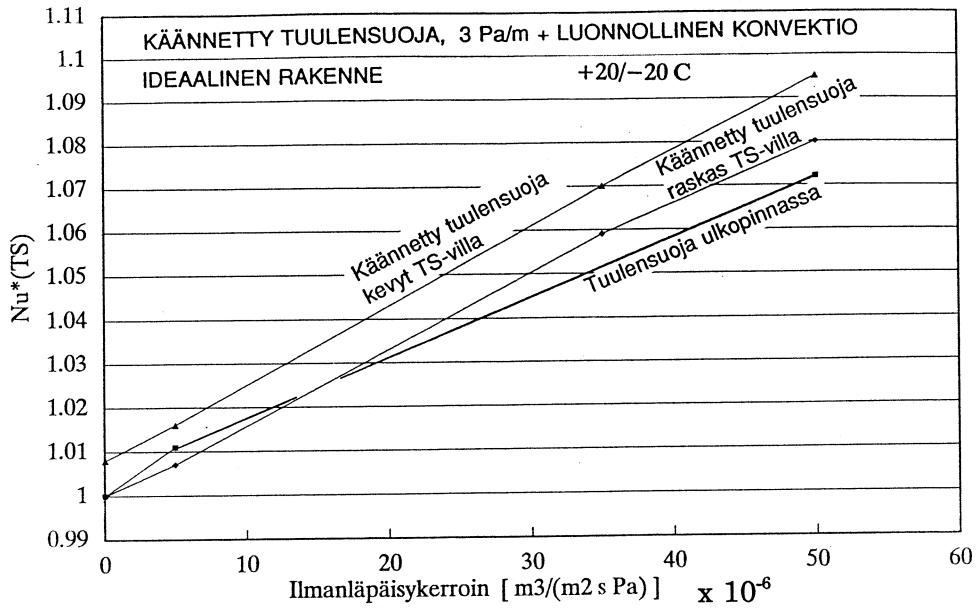
Käännetty tuulensuoja: vertailu ulkopinnaltaan tuulelta suojattuun tapaukseen

Tuloksia verrattiin tapauksiin, joissa vastaava tuulensuoja oli sijoitettu rakenteen ulkopintaan (taulukko 5). Lämpöhäviöt kasvoivat käännetyn tuulensuojakerroksen vaikutuksesta ideaalisella rakenteella painegradienttitilanteessa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella (tapaus 4) $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ vain noin 0,8 %. Tapausta 4 tiiviimmillä tuulensuojakerroksilla erot olivat tätäkin pienempiä. Epäideaaliset rakenteet eivät olleet täysin vertailukelpoisia taulukon 5 tuloksiin, koska rakenteen hilaverkko oli käännetyn rakenteen tarkastelussa erilainen, mikä vaikutti erityisesti epäideaalisuuksien (rakojen) kuvaamiseen.

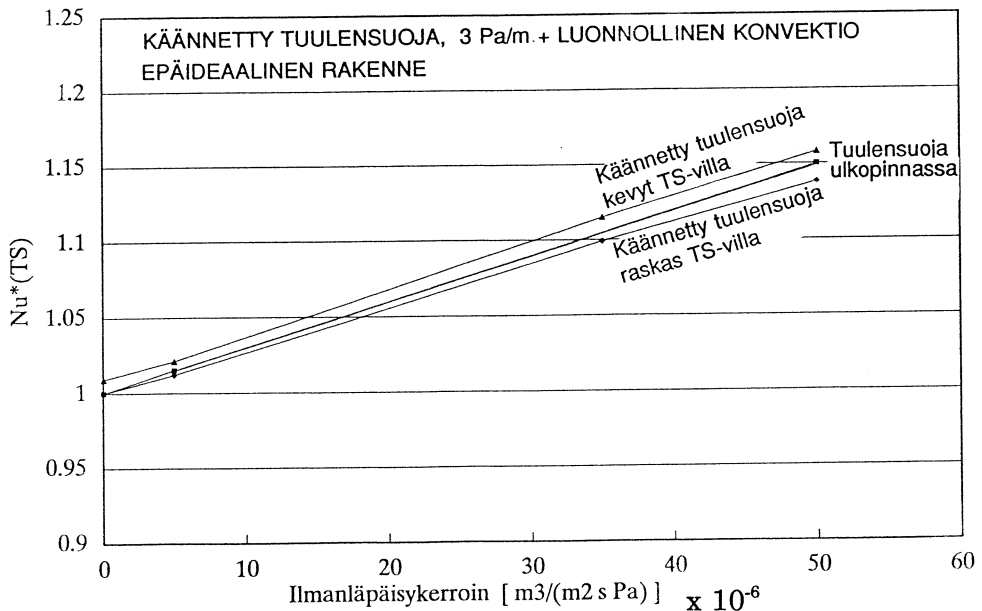
Kun tuulensuojavillan ilmanläpäisykerroin vastaa tyypillisen materiaalin arvoja, on konvektion merkitys käännetyn tuulensuojarakenteen ulkokerroksessa hyvin vähäinen rakenteen lämpöhäviöiden kannalta.

Taulukko 7. Käännetylle villa-tuulensuojarakenteelle lasketut suhteelliset lämpöhäviöt. Merkintä 'sama villa' tarkoittaa, että tuulensuojakerroksen ulkopuolinen 50 mm osa on samaa lasivillalämmöneristettä (20 kg/m³) kuin sisempikin kerros. Muissa tapauksissa tämä vastaa aineominaisuuksiltaan tyypillistä tuulensuojavillaa (58 kg/m³).

TUULENSUOJAN ILMANLÄPÄISYKERROIN TAPAUS N:O	IDEAALINEN RAKENNE		EPÄIDEAALINEN RAKENNE TAPAUS II	
	Nu*	Nu* _{TS}	Nu*	Nu* _{TS}
A. LUONNOLLINEN KONVEKTIO				
Massapinta, sama villa	1.016	1.009		
Massapinta, TS-villa	1.015	1.008		
6, sama villa	1.007	1.000		
6, TS-villa	1.000	1.000		
B. A + PAINEGRA- DIENTTI 3 Pa/m				
4, sama villa	1.109	1.095	1.184	1.158
4, TS-villa	1.094	1.080	1.164	1.138
Massapinta, sama villa	1.084	1.070	1.140	1.115
Massapinta, TS-villa	1.072	1.059	1.125	1.099
5, sama villa	1.029	1.016	1.045	1.021
5, TS-villa	1.020	1.007	1.035	1.012
6, sama villa	1.021	1.008	1.032	1.009
6, TS-villa	1.013	1.000	1.023	1.000



Kuva 9. Ulkopinnan painegradientin (3 Pa/m) vaikutus käännetyin tuulensuoja-rakenteen (ideaalinen) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Tuulensuojan ulkopuolella on 50 mm tyypillistä tuulensuojavillaa (58 kg/m³).



Kuva 10. Ulkopinnan painegradientin (3 Pa/m) vaikutus käännetyin tuulensuoja-rakenteen (epäideaalinen) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Tuulensuojan ulkopuolella on 50 mm lämmöneristeenä käytettyä lasivillaa (20 kg/m³).

Käännetty tuulensuoja: ulkopuolisen eristeosan ilmanläpäisykertoimen merkitys

Kun käännettyssä tuulensuojarakenteessa ulkopuolinen lämmöneriste oli korvattu kevyellä lasivillalämmöneristeellä, konvektion merkitys odotetusti kasvoi.

Suurin ero oli suhteellisen hyvin ilmaa läpäisevän tuulensuojapinnoitteen tapauksessa 4, missä painegradientin alaisessa ideaalisessa rakenteessa kevyempi tuulensuojavilla johti keskimääräisten lämpöhäviöiden kasvuun noin 1,5 %:lla (Nu_{TS}^* kasvoi 1,080 → 1,095). Todellisen massapinnoitteen arvoilla laskettuna ulkopuolisen villan keventäminen kasvatti lämpöhäviöitä noin 1,1 % ja tätä tiiviimmällä rakenteella (tapaus 5) vielä vähemmän, noin 0,9 %.

Epäideaalisessa rakenteessa ulkopuolisen villan ilmanläpäisevyyden vaikutus hieman korostui; tyypillisen massapintaisen tuulensuojarakenteen lämpöhäviöt kasvoivat kevyemmän ulkopuolisen villan vaikutuksesta noin 1,3 %. Vastaavasti tapauksessa 4 lämpöhäviöt kasvoivat 1,7 % ja tapauksessa 5 noin 1 %.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että ns. käännetty tuulensuoja ei lämpötekni-
seltä toiminnaltaan poikkea olennaisesti tavanomaisesta tuulensuojasta. Merkittävin tekijä myös lämmöneristeen sisään sijoitetussa tuulensuojauksessa on kyseisen tuulensuojapinnoitteen ilmanläpäisykerroin. Pinnoitteen ulkopuolisen lämmöneriste-
kerroksen ilmanläpäisevyys vaikuttaa hyvin vähän rakenteen lämpöhäviöihin ja on merkityksellinen vain rajatapauksissa. Villakerroksen ilmanläpäisevyyden merkitys korostuu, jos tuulensuojapinnoitteen ilmanläpäisykerroin on suhteellisen suuri.

Käännetyn tuulensuojan tapauksissa tuulensuojan suhteellisen ohut (50 mm) läm-
möneristekerros voidaan tehdä nykyistä kevyemmästä materiaalista, jopa tavanomaisesta lämmöneristevillasta ilman, että tällä olennaisesti heikennetään rakenteen lämpötekni-
stä toimintaa. Perusteet nykyisen, suhteellisen raskaan materiaalin käytölle voivat löytyä muista kuin lämpötekni-
sen toimivuuden vaatimuksista (esimerkiksi asennettavuudesta).

Kasettirakenne: 5 %:n ja 10 %:n lämpöhäviöiden kasvu

Taulukossa 8 esitetään tuulensuojan ilmanläpäisykertoimet kriteerillä $Nu_{TS}^* = 1,05$ ja $Nu_{TS}^* = 1,10$ tapauksille I, II ja III sekä luonnollisen konvektion että luonnolli-
sen konvektion ja painegradientin 3 Pa/m vaikuttaessa rakenteeseen.

Taulukko 8. Tuulensuojalta edellytettävät ilmanläpäisykertoimet kun kriteerinä on tarkastellun rakenteen lämpöhäviöiden kasvu korkeintaan 5 % tai 10 % verrattuna ulkopinnaltaan täysin tiiviiseen rakenteeseen.

TAPAUKSET	TUULENSUOJALTA EDELLYTETTÄVÄ ILMANLÄPÄISYKERROIN	
	Kriteeri $Nu_{TS}^* = 1,05$ $m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$	Kriteeri $Nu_{TS} = 1,10$ $m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$
	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$
Luonnollinen konvektio		
I A	-	-
II A	140	400
III A	240	500
3 Pa/m painegrad. + luonn. konv.		
I B	33	70
II B	17	33
III B	25	48
+ käännetty tuulensuoja:		
I B _{raskas TS-villa}	30	65
I B _{kevyt TS-villa}	24	52
II B _{raskas TS-villa}	18	35
II B _{kevyt TS-villa}	14	30

Tulosten perusteella tuulensuojaukselta vaadittava tiiviys riippuu olennaisesti tuuletusraon paineoloista. Jos tuuletusraossa on 3 Pa/m painegradientti vaikuttamassa samaan suuntaan luonnollisen konvektion kanssa, on tuulensuojalta vaadittava tiiviys noin kymmenkertainen pelkän luonnollisen konvektion tapaukseen verrattuna (II ja III).

Idealisella rakenteella saa tuulensuojan ilmanläpäisykerroin olla korkeintaan $33 \cdot 10^{-6} m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$, jotta tuuletusraon painegradientin vaikutus lämpöhäviöihin jäisi alle 5 %:n. Vastaava arvo epäidealisella rakenteella on $17 \cdot 10^{-6} m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$.

3.3.2 Kahden seinän nurkka

Taulukossa 9 esitetään seinänurkan vaakaleikkauksen 3,0 m (1,5 m + 1,5 m) pitkän sisäpinnan läpäisevistä keskimääräisistä lämpövirrantiheyksistä lasketut modifioidut Nusseltin luvut (yhtälöt 3 ja 4) ja sisäpinnan (nurkan) alhaisin lämpötila-arvo. Paine-ero nurkan ylitse oli kaikissa tapauksissa 65 Pa. Taulukko 9 kuvaa perustapausta, jossa nurkkaan ei oletettu virtausvastuksia tai -esteitä.

Vaakaleikkauksessa ei voitu ottaa huomioon tarkastelutasoa vastaan tapahtuvaa luonnollista konvektiota. Vertailutasona oli täysin konvektioton tapaus, jolloin tuulensuojalle ja rakenteelle ratkaistut Nusseltin luvut olivat samat. Virtauksetoman vertailutilanteen keskimääräinen lämpövirrantiheys oli $7,150 \text{ W/Km}^2$

Kuvassa 11 esitetään kahden seinän nurkkarakenteen lämpöhäviöiden suhteellisen kasvun riippuvuus tuulensuojan ilmanläpäisykerroimesta ideaalisella ja epäideaalisella rakenteella.

Taulukossa 10 ja kuvassa 12 esitetään tulokset tapauksista, joissa rakenteen nurkan virtausreitin ala on rajoitettu noin puoleen vapaasta alasta (puurunko) (kuva 5) ja tapauksista, joissa virtausta rajoittaa nurkan läpi asennettu ylimääräinen tuulensuojakerros (kuva 6). Ylimääräisen tuulensuojan ilmanläpäisykerroin oli sama kuin varsinaisen tuulensuojan kussakin tarkastellussa tapauksessa.

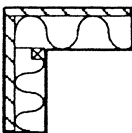
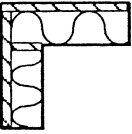
Tulokset osoittavat odotetusti konvektion aiheuttamien lämpöhäviöiden suhteellisten muutosten olevan suuremmat kuin kasettirakenteelle vastaavilla tuulensuojan ilmanläpäisevyyksillä lasketut. Pakotettu nurkkakonvektio asettaa tuulensuojan ilmanläpäisevyydelle huomattavasti tiukemmat vaatimukset kuin kasettirakenne.

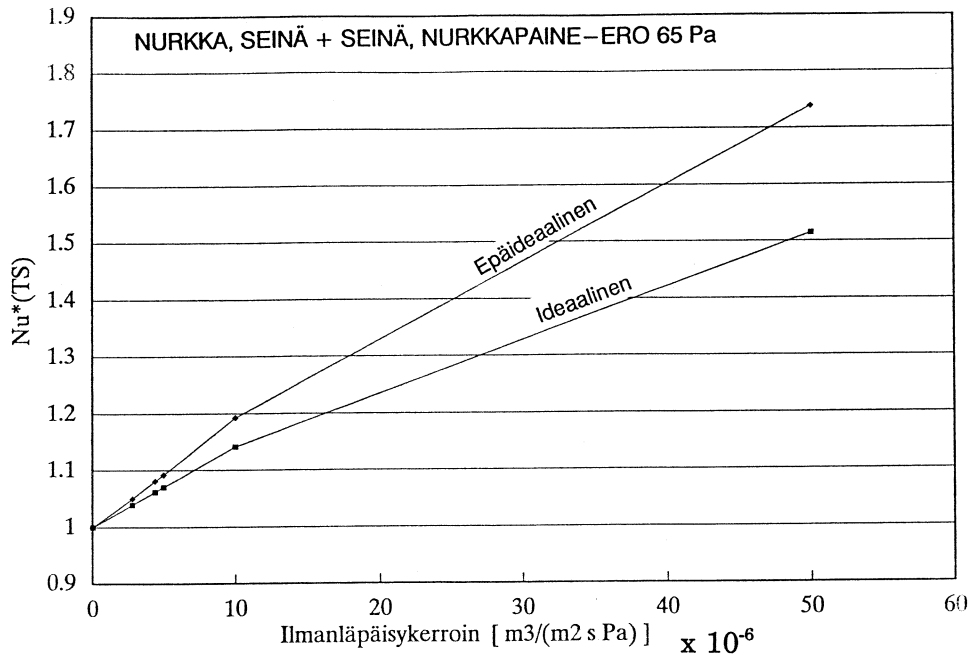
Kun tarkastelukriteerinä oli tuulensuojan kautta tapahtuvien konvektiovirtausten aiheuttama lämpöhäviöiden kasvu, saatiin kriteerillä $Nu_{TS}^* < 1,05$ täysin ideaalisesti toteutetulle rakenteelle tuulensuojan ilmanläpäisykerroimelle arvo $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, ja kriteerillä $Nu_{TS}^* < 1,10$ vastaavasti arvo $7,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Vastaavat arvot epäideaalisen rakenteen tuulensuojan ilmanläpäisykerroimelle olivat $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ja $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Laskelmissa nurkkarakenteelle tarkasteltujen epäideaalisuuden vaikutus keskimääräisiin lämpöhäviöihin oli selvästi pienempi kuin kasettirakenteen tapauksissa.

Taulukko 9. Ulkoseinänurkan vaakaleikkaukselle lasketut Nusseltin luvut ja sisäpinnan minimilämpötilat tuulensuojan eri ilmanläpäisevyyksillä, kun paine-ero nurkan ylitse oli 65 Pa ja lämpötilaero +20 / -20 °C. Tässä tapauksessa $Nu^* = Nu^*_{TS}$. Perustapaus, kun nurkassa ei ole virtausesteitä.

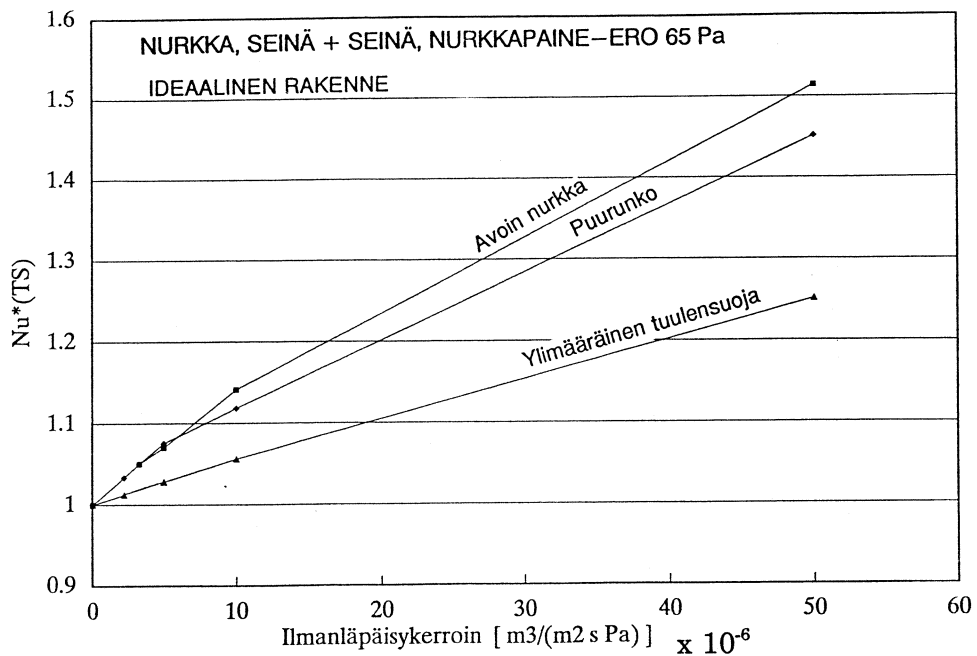
LASKENTATAPAUUS	Nusseltin luvut $Nu^* = Nu^*_{TS}$	Sisäpinnan minimilämpötila T_{min} (°C)
Paine-ero 65 Pa		
IDEAALINEN RAKENNE:		
Tuulensuojan ilmanläpäisevyyystapaus:		
1	1,689	17,19
(Taulukko 3) 2	1,812	17,33
3	1,838	17,44
4	1,514	17,89
5	1,070	18,51
6	1,000	18,75
4. b) $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,141	18,38
5. b) $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,062	18,53
5. c) $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,046	18,53
5. d) $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,039	18,57
EPÄIDEAALINEN RAKENNE:		
Tuulensuojan ilmanläpäisevyyystapaus:		
1	2,070	17,18
2	2,237	17,29
(Taulukko 3) 3	2,237	17,39
4	1,738	17,87
5	1,092	18,54
6	1,000	18,75
5. b) $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,192	18,42
5. b) $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,081	18,55
5. c) $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,050	18,59

Taulukko 10. Ulkoseinänurkan vaakaleikkaukselle lasketut Nusseltin luvut ja sisäpinnan minimilämpötilat tuulensuojan eri ilmanläpäisykertoimilla, kun paine-ero nurkan ylitse oli 65 Pa ja lämpötilaero +20 / -20 °C. Tässä tapauksessa $Nu^* = Nu^*_{TS}$. Rakenteessa on joko kulmaan sijoitettu puurunkoa kuvaava virtauseste tai ylimääräinen tuulensuojakerros (kuvat 5 ja 6).

LASKENTATAPAUS	Nusseltin luvut $Nu^* = Nu^*_{TS}$	Sisäpinnan minimilämpötila T_{min} °C
Paine-ero 65 Pa		
<u>Puurunko virtausesteenä:</u>		
Tuulensuojan ilmanläpäisevyystapaus:		
1	1,499	17,28
(Taul. 2) 2	1,630	17,41
3	1,671	17,51
4	1,451	17,91
5	1,075	18,43
6	1,000	18,75
5.a) $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,050	18,49
5.b) $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,033	18,54
5.c) $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,024	18,58
<u>Tuulensuoja virtausesteenä:</u>		
Tuulensuojan ilmanläpäisevyystapaus:		
1	1,711	17,20
(Taul. 2) 2	1,729	17,38
3	1,671	17,52
4	1,251	17,98
5	1,028	18,45
6	1,000	18,75
5.a) $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,012	18,59
4.a) $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	1,056	18,10



Kuva 11. Nurkkakonvektion vaikutus kahden seinän ($d = 200 \text{ mm}$) muodostaman nurkan ($1,5 + 1,5 \text{ m}$ sisäpintaa) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Nurkassa ei ole virtausesteitä.



Kuva 12. Nurkkakonvektion vaikutus kahden seinän ($d = 200 \text{ mm}$) muodostaman nurkan ($1,5 + 1,5 \text{ m}$ sisäpintaa) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Nurkassa on puurunko tai ylimääräinen tuulensuojakerros.

Puurungon vaikutus konvektiivisiin lämpöhäviöihin oli tuulensuojaltaan suhteellisen tiiviillä rakenteilla (tapaus 5) jokseenkin merkityksetön. Tapauksessa 4 lämpöhäviöt pienenevät puurungon vaikutuksesta noin 4 %.

Ylimääräinen, virtaustien katkaiseva tuulensuojakerros pienensi lämpöhäviöitä huomattavasti, esimerkiksi ilmanläpäisevyyss tapauksessa 4 noin 17 %:lla ($Nu_{TS}^* = 1,51 \rightarrow 1,25$). 5 %:n raja-arvo saavutettiin kun tuulensuojakerrosten ilmanläpäisykertoimet olivat noin $9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ja 10% arvo vastaavasti ilmanläpäisykertoimilla $19 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Tulosten perusteella nurkan yli tapahtuvien ilmavirtausten rajoittaminen rakenteen sisään sijoitettavalla, ilman virtaustien katkaisevalla tuulensuojakerroksella olisi tehokas tapa pienentää tuulen aiheuttamia lämpöhäviöitä. Tällöin tuulensuojamateriaali voisi olla ilmanläpäisevyydeltään suurempi kuin mitä tyypillinen tuulensuojan soveltamistapaus edellyttäisi.

3.3.3 Seinän ja yläpohjan nurkka

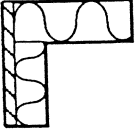
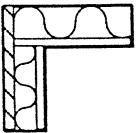
Taulukoissa 10 ja 11 esitetään kuvan 4 rakenteen seinälle (2,3 m) ja yläpohjalle (1,5 m) ja koko sisäpinnalle (3,8 m) lasketut suhteelliset lämpöhäviöt (yhtälöt 3 ja 4) sekä sisäpinnan minimilämpötilat eri tuulensuojan ilmanläpäisevyyksillä. Taulukoiden 10 ja 11 tapaukset ovat rakenteiden perustapauksia, joissa nurkan alueen ilmavirtausta ei ole rajoitettu ylimääräisin estein.

Tuloksina esitetään sekä luonnollisen konvektion (taulukko 11) että pakotetun ja luonnollisen konvektion yhteisvaikutukset (taulukko 12 sekä kuva 13). Tässä tapauksessa nurkkapaine-ero 35 Pa oli pienempi kuin kahden seinän liitoksessa, mutta toisaalta rakenteen virtauskenttä riippui pelkästään yhdestä, seinäosan tuulensuojakerroksesta. Kuvassa 13 esitetään nurkkakonvektion vaikutus ideaalisen ja epäideaalisen rakenteen suhteellisiin lämpöhäviöihin.

Luonnollisen konvektion tapauksessa, puoliavoimella rakenteella (tapaus 1, taulukko 3), seinän ja yläpohjan tarkastelualueen keskimääräinen lämpövirran tiheys kasvoi konvektion vaikutuksesta noin 3 %. Epäideaalisella rakenteella vastaava arvo oli noin 6 %, mikä vastaa ideaalisella kasettirakenteella saatua luonnollisen konvektion arvoa.

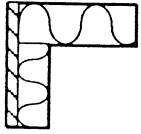
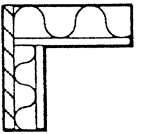
Pakotetun konvektion tapauksessa konvektion aiheuttama lämpöhäviöiden kasvu tuulensuojan toiminnan kannalta (Nu^*_{TS}) oli täysin ulkopinnaltaan avoimessa, ideaalisessa tapauksessa (tapaus 1, ei tuulensuojaa) noin 51 %. Erikseen pystysuoralle seinäosalle laskettu vastaava arvo oli 39 % ja yläpohjalle laskettu 77 %.

Taulukko 11. Seinän ja yläpohjan liitokselle lasketut Nusseltin luvut (Nu^ , Nu^*_{TS}) ja seinämän sisäpinnan minimilämpötila luonnollisen konvektion tapauksessa lämpötilaerolla +20/-20 °C. Nurkassa ei ollut virtauseiteitä.*

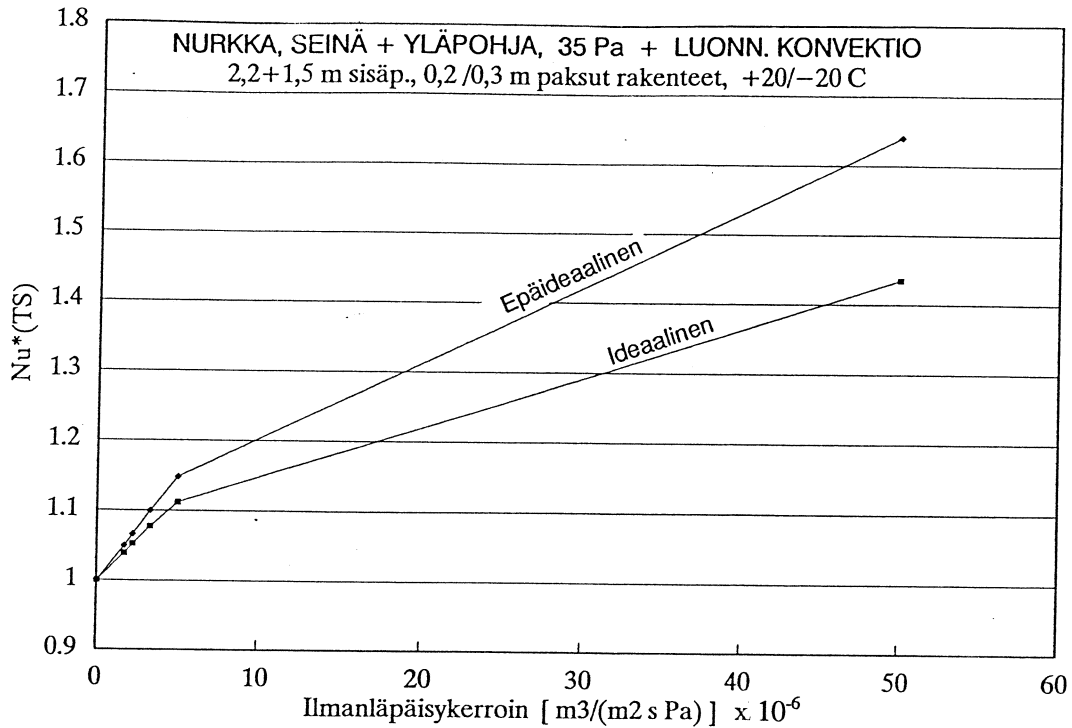
LASKENTATAPAUS	Nusseltin luvut				Sisäpinnan minimi lämpötila °C
	Nu^*	$Nu^*_{TS,lot}$	$Nu^*_{TS,vert}$	$Nu^*_{TS,horis}$	
LUONNOLLINEN KONVEKTIO:					
Ideaalin rakenne:					
Tuulensuojan ilmanläp. tapaus: 1					
	1,033	1,027	1,044	0,988	18,47
(Taul. 2) 2	1,031	1,025	1,043	0,986	18,50
3	1,030	1,024	1,041	0,986	18,51
 4	1,023	1,017	1,029	0,990	18,54
5	1,010	1,004	1,007	0,997	18,57
6	1,006	1,000	1,000	1,000	18,58
Epäid. rakenne:					
Tuulensuojan ilmanläp. tapaus: 1					
	1,059	1,049	1,084	0,975	18,49
(Taul. 2) 2	1,056	1,046	1,078	0,974	18,52
3	1,054	1,044	1,075	0,974	18,53
 4	1,039	1,029	1,049	0,981	18,55
5	1,016	1,006	1,010	0,995	18,58
6	1,010	1,000	1,000	1,000	18,58

Tuulensuojauksen tiiviyttä lisättäessä yläpohjan lämpöhäviöt vähentyivät suhteellisesti tuulen painepuolen pystyseinän arvoja nopeammin. Tiiviysluokassa 5 ($5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) kasvoivat tuulensuojalle lasketut lämpöhäviöt seinän osalla 17 %, yläpohjan alueella lämpöhäviöt pienenivät noin 1,5 % ja koko alueen lämpöhäviöt kasvoivat noin 11 % verrattuna täysin suljetun rakenteen lämpöhäviöihin. Tiiviillä tuulensuojan arvoilla saadut $Nu^*_{TS} < 0$ -arvot johtuvat siitä, että painepuolelta suojan puolelle tuleva pienehkö ilmavirtaus ehti lämmitä seinän sisäpinnan lähellä suhteellisen korkeaan lämpötilaan ennen kuin se virtasi yläpohjan alueelle, missä se edelleen paikallisesti lämmitti rakennetta puhtaan johtumistilanteen arvoihin verrattuna.

Taulukko 12. Seinän ja yläpohjan liitokselle lasketut Nusseltin luvut (Nu^* , Nu^* ja seinämän sisäpinnan minimilämpötila, kun paine-ero nurkan ylitse oli 35 Pa ja lämpötilaero +20/-20 °C. Nurkassa ei ollut virtausesiteitä.

LASKENTATAPAUS	Nusseltin luvut				Sisäpinnan minimi lämpötila °C	
	Nu^*	$Nu^*_{TS,tot}$	$Nu^*_{TS,vert}$	$Nu^*_{TS,horis}$		
<u>PAINE-ERO 35 Pa + LUONN.KONVEKTIO:</u>						
<u>Ideaalinen rakenne:</u>						
Tuulensuojan						
ilmanläp. tapaus:						
(Taul. 2)	1	1,521	1,510	1,393	1,768	17,02
	2	1,541	1,530	1,492	1,618	17,18
	3	1,547	1,536	1,550	1,510	17,31
	4	1,445	1,435	1,541	1,206	17,76
	5	1,120	1,112	1,171	0,985	18,34
	6	1,007	1,000	1,000	1,000	18,58
5c) $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,085	1,077	1,123	0,979	18,40
5e) $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,059	1,052	1,085	0,979	18,45
5f) $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,046	1,039	1,065	0,981	18,48
<u>Epäideaalinen rakenne:</u>						
Tuulensuojan						
ilmanläp. tapaus:						
(Taul. 2)	1	1,753	1,734	1,582	2,070	17,02
	2	1,802	1,782	1,738	1,881	17,17
	3	1,827	1,807	1,839	1,739	17,30
	4	1,658	1,640	1,793	1,303	17,75
	5	1,161	1,148	1,232	0,966	18,41
	6	1,011	1,000	1,000	1,000	18,58
5c) $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,112	1,100	1,163	0,963	18,47
5e) $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,078	1,066	1,112	0,967	18,50
5f) $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,061	1,049	1,085	0,971	18,52
5g) $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,044	1,033	1,058	0,979	18,53

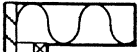
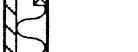
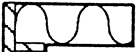

Kun tuulensuojan aiheuttama **lämpöhäviöiden kasvu** tarkasteluoloissa rajoitettiin 5 %:iin, ($Nu^*_{TS} = 1,05$) saatiin pakotetun konvektion tapauksissa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle ideaalisella rakenteella raja-arvo $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ja epäideaalisella rakenteella vastaavasti $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Vastaavat arvot 10% tarkastelukriteerillä olivat $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ideaaliselle ja $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ epäideaaliselle rakenteelle.



Kuva 13. Nurkkakonvektion vaikutus seinän ($d = 200$ mm) ja yläpohjan ($d = 300$ mm) muodostaman nurkan ($2,3 + 1,5$ m sisäpintaa) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Nurkassa ei ole virtausesteitä.

Taulukossa 13 ja kuvassa 14 esitetään tulokset tapauksista, joissa rakenteen nurkan virtausreitinnä ala on rajoitettu noin puoleen vapaasta alasta (puurunko) ja tapauksista, joissa virtausta rajoitetaan nurkan läpi asennetulla ylimääräisellä tuulensuojakerroksella (rakenne kuvissa 5 ja 6). Ylimääräisen tuulensuojan ilmanläpäisykerroin oli sama kuin varsinaisen tuulensuojan kussakin tarkastellussa tapauksessa. Tarkastelut tehtiin vain ideaalisille rakenteille luonnollisen konvektion tapauksessa (taulukko 13) ja pakotetun konvektion tapauksessa (taulukko 14 ja kuva 14).

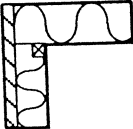
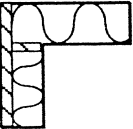
Taulukko 13. Seinän ja yläpohjan liitokselle lasketut Nusseltin luvut (Nu^* , Nu^*_{TS}) ja seinämän sisäpinnan minimilämpötila luonnollisen konvektion tapauksessa lämpötilaerolla $+20/-20$ °C. Rakenteessa on joko kulmaan sijoitettu puurunkoa kuvaava virtauseste tai ylimääräinen tuulensuojakerros (kuvat 5 ja 6).

LASKENTATAPAUS	Nusseltin luvut				Sisäpinnan minimi lämpötila °C	
	Nu^*	$Nu^*_{TS,tot}$	$Nu^*_{TS,vert}$	$Nu^*_{TS,horis}$		
LUONNOLLINEN KONVEKTIO:						
<u>Puurunko virtausesteenä:</u>						
Tuulensuojan						
ilmanläp. tapaus:	1	1,026	1,019	1,028	0,999	18,56
(Taul. 2)	2	1,025	1,018	1,028	0,999	18,56
	3	1,025	1,018	1,027	0,999	18,56
	4	1,020	1,013	1,020	0,999	18,56
	5	1,010	1,003	1,005	1,000	18,57
	6	1,007	1,000	1,000	1,000	18,57
<u>Tuulensuoja virtausesteenä:</u>						
Tuulensuojan						
ilmanläp. tapaus:	1	1,034	1,027	1,049	0,981	18,52
(Taul. 2)	2	1,028	1,021	1,037	0,987	18,50
	3	1,025	1,018	1,030	0,992	18,49
	4	1,014	1,007	1,012	0,998	18,51
	5	1,008	1,001	1,002	1,000	18,56
	6	1,007	1,000	1,000	1,000	18,57

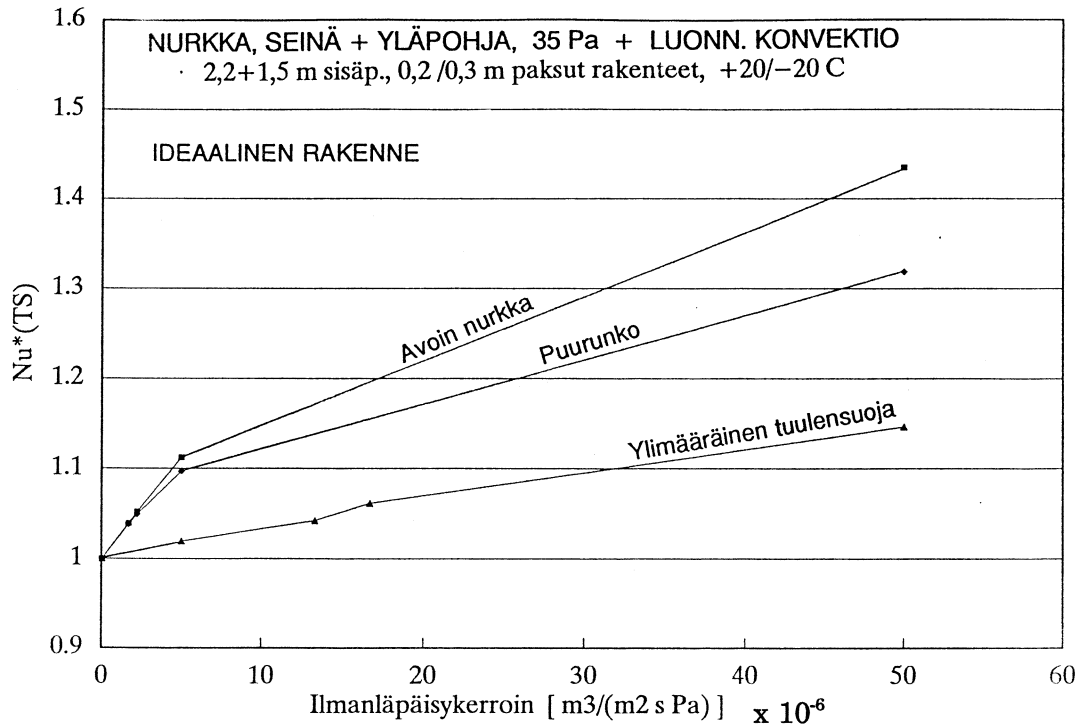
Luonnollisen konvektion tapauksessa virtausesteiden vaikutus ennestään pieniin Nusseltin lukuihin oli jokseenkin merkityksetön.

Puurungon ollessa virtausesteenä aiheutti pakotettu konvektio suurimmat suhteelliset muutokset lämpöhäviöihin hyvin ilmaa läpäisevillä tuulensuojilla. esimerkiksi tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ Nusseltin luku Nu^*_{TS} muuttui arvosta 1,44 arvoon 1,32 puurungon muuttaessa konvektiokenttää täysin vapaaseen nurkkarakenteeseen verrattuna. Kertaluokkaa tiiviimmällä tuulensuojalla vaikutus oli merkityksetön, noin 1 %. Lämpöhäviöiden 5 %:n raja-arvo saavutettiin siten myös jokseenkin samalla ilmanläpäisykertoimella ($2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) kuin ilman puurunkoa tehdyssä tarkastelussa.

Taulukko 14. Seinän ja yläpohjan liitokselle lasketut Nusseltin luvut (Nu^* , Nu^*_{TS}) ja seinämän sisäpinnan minimilämpötila, kun paine-ero nurkan ylitse oli 35 Pa ja lämpötilaero +20/-20 °C. Rakenteessa on joko kulmaan sijoitettu puurunkoa kuvaava virtauseste tai ylimääräinen tuulensuojakerros (kuvat 5 ja 6).

LASKENTATAPAUS	Nusseltin luvut				Sisäpinnan minimi lämpötila °C	
	Nu^*	$Nu^*_{TS,tot}$	$Nu^*_{TS,vert}$	$Nu^*_{TS,horis}$		
PAINE-ERO 35 Pa + LUONN.KONV.:						
<u>Puurunko virtausesteenä:</u>						
Tuulensuojan						
ilmanläp. tapaus:	1	1,308	1,299	1,266	1,370	17,79
(Taul. 2)	2	1,336	1,327	1,344	1,287	17,93
	3	1,355	1,346	1,398	1,231	18,03
	4	1,328	1,319	1,427	1,080	18,32
	5	1,105	1,097	1,145	0,992	18,58
	6	1,007	1,000	1,000	1,000	18,57
5a) $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,056	1,049	1,073	0,996	18,57
5b) $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,045	1,038	1,056	0,997	18,57
<u>Tuulensuoja virtausesteenä:</u>						
Tuulensuojan						
ilmanläp. tapaus:	1	1,597	1,586	1,422	1,835	17,02
(Taul. 2)	2	1,468	1,458	1,433	1,515	17,27
	3	1,399	1,389	1,403	1,361	17,45
	4	1,154	1,146	1,180	1,072	17,96
	5	1,026	1,019	1,029	0,999	18,36
	6	1,007	1,000	1,000	1,000	18,57
4a) $16,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,068	1,061	1,081	1,017	18,15
4b) $13,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$		1,049	1,042	1,057	1,007	18,22

Käytettäessä nurkassa ylimääräistä tuulensuojakerrosta lämpöhäviöiden pieneminen oli huomattavaa. Tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella $50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ konvektion aiheuttamat lisälämpöhäviöt pienenevät 44%:sta 14,6 %:iin. Lämpöhäviöiden 5 %:n raja-arvo saavutettiin tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella $14,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ja 10 %:n raja-arvo ilmanläpäisykertoimella $31,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Suhteellinen hyöty ylimääräisestä tuulensuojakerroksesta on seinän ja yläpohjan nurkkatapauksessa selvästi parempi kuin kahden seinän nurkassa, missä on kaksi tuulensuojakerrosta jo perusrakenteessakin.



Kuva 14. Nurkkakonvektion vaikutus seinän ($d = 200 \text{ mm}$) ja yläpohjan ($d = 300 \text{ mm}$) muodostaman nurkan ($2,3 + 1,5 \text{ m}$ sisäpintaa) keskimääräisiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin, kun vertailukohtana on täysin tiivis tuulensuoja. Nurkassa on puurunko tai ylimääräinen tuulensuojakerros.

3.4 JOHTOPÄÄTÖKSET TULOISTA

Tuulensuojan ilmanläpäisevyydelle voidaan asettaa erilaisia vaatimuksia sen mukaan, millaiset paineolot tuuli aikaansaa rakennuksen ulkovaipan tuuletusrakoihin ja ilmatiloihin. Ulkovaipan lämpöhäviöt kasvavat erityisesti nurkissa silloin kun nurkkapaine-erot ja virtausreitit mahdollistavat voimakkaan ilmavirtauksen lämmöneristeen läpi ulkovaipan osasta toiseen. Nurkat asettavat tuulensuojan ilmanläpäisykerroimelle tiukimmat vaatimukset.

Taulukkoon 15 on koottu laskettujen kasetti- ja nurkkarakennetapausten asettamat vaatimukset tuulensuojan ilmanläpäisykerroimelle. Tarkastelukriteerinä oli tuulensuojauksen kautta tapahtuvan konvektion aiheuttamien lisälämpöhäviöiden pitäminen tarkasteluoloissa korkeintaan 5 %:ssa tai 10 %:ssa verrattuna täysin

suljettuun tuulensuojaan. Pakotetun konvektion tarkasteluun sisältyi varmuutta, koska valitut paineolot vastasivat tuulen nopeudella noin 9 m/s mahdollisia paine-eroja.

Taulukko 15. Lasketuista tapauksista kootut raja-arvot tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle, kun vaatimuksena on, että tuulensuojauksen läpi tapahtuvien ilmvirtausten aiheuttamat lisälämpöhäviöt ovat korkeintaan 5 % tai 10% tarkastelluissa olosuhteissa lämpötilaerolla +20/-20 °C.

RAKENNETAPAUS	Ideaali I Epä- ideaali E	Luonnollinen konvektio (+20 /-20 °C)	Pakotettu konvektio	TUULENSUOJALTA EDELLYTETTÄVÄ ILMANLÄPÄISYKERROIN	
				$Nu^*_{TS} < 1,05$	$Nu^*_{TS} < 1,10$
KASETTIRAKENNE				$m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{-6}$	$m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa) \times 10^{-6}$
I A	I	ON	EI	-	-
II A	E	ON	EI	140	400
III A	E	ON	EI	240	500
I B	I	ON	3 Pa/m	33	70
II B	E	ON	3 Pa/m	17	33
III B	E	ON	3 Pa/m	25	48
NURKKARAKENTEET					
Seinä / seinä	I	EI	65 Pa	3,5	7,0
- " -	E	EI	65 Pa	2,8	5,4
- " - + ylim. TS -kerros	I	EI	65 Pa	9	19
Seinä / yläpohja	I	ON	35 Pa	2,1	4,4
- " -	E	ON	35 Pa	1,7	3,2
- " - + ylim. TS -kerros	I	ON	35 Pa	15	32

Luonnollisen konvektion tilanteessa tuulensuojauksen merkitys on lähinnä rakenteen epäideaalisuuksien konvektiota edistävien vaikutusten kumoaminen, jolloin tuulensuojan ilmanläpäisykertoimena riittäisi noin $140 \cdot 10^{-6} m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$.

Voimakas painegradientti tuuletusraossa asettaa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle jopa kymmenkertaisen tiiviysvaatimuksen pelkän luonnollisen konvektion tilanteeseen verrattuna. Tyypillinen, lämmöneristykseltään epäideaalisesti toteutettu kasettirakenne edellyttää voimakkaassa 3 Pa/m painegradientissa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimi-

melle arvon $17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, kun vaatimuksena on tuulen aiheuttamien hetkellisten lisälämpöhäviöiden pitäminen alle 5 %:ssa.

Käännetty tuulensuoja, jossa osa lämmöneristeestä on tuulta suojaavan pintakerroksen ulkopuolella, toimii lämpötekniisesti lähes samoin kuin tavanomainen rakenne, jossa ilmavirtauksia vaimentava kerros on lämmöneristeen ulkopinnalla.

Rakenteen materiaalikerrosten rajojen tulisi olla mahdollisimman ideaalisia. Rakenteessa olevat virtausraot lisäävät lämpöhäviöitä, jos ilma pääsee kiertämään rakojen kautta eristekerroksen ympäri. Erityisesti tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnan tulisi olla mahdollisimman tiivis siten, ettei ilmavirtaus kerrosten välissä ole mahdollinen. Kylmän pinnan lähellä alaspäin tapahtuva ilmavirtaus jäädyttää rakenteen alaosan tehokkaasti ja kasvattaa lämpöhäviöitä riippumatta tuulensuojan ilmanläpäisykertoimesta. Rakenteen epäideaalisuuksien vaikutus korostuu, jos tuulensuoja on hyvin ilmaa läpäisevä.

Nurkkarakenteiden konvektiivisten lämpöhäviöiden rajoittaminen edellyttää tuulensuojaukselta selvästi parempaa tiiviyttä kuin ns. kasettirakenteiden tapauksessa. Pakotetun nurkkakonvektion tapauksessa on seinän ja yläpohjan liitos kriittisin osa rakennetta, sillä sen toiminta perustuu yleensä vain seinäosan tuulensuojan tiiviydelle. Jos rakenne mahdollistaa suuren paine-eron nurkan yli, tulisi tuulensuojan ilmanläpäisykerroksen olla noin $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, jotta tuulen aiheuttamat hetkelliset lisälämpöhäviöt jäisivät alle 5 %. Tähän lukuun sisältyy huomattava varmuus, eikä sitä voida pitää pohjana tuulensuojan tiiviysvaatimuksille.

Nurkkarakenteen sisäisillä, virtausreitillä pinta-alaa muuttavilla ja virtausta ohjaavilla esteillä (puurunko) ei ole merkittävää vaikutusta lämpöhäviöihin.

Tapaukset, joissa rakenteen nurkassa oli ylimääräinen tuulensuojakerros rajoittamassa ilman virtausta seinämän osasta toiseen, antoivat lupaavia tuloksia. Nurkan yli tapahtuvien ilmavirtausten rajoittaminen on tehokas tapa pienentää tuulen aiheuttamia lämpöhäviöitä. Nurkkaan sijoitetut konvektiokatkot eivät myöskään häiritse rakenteen kosteusteknistä toimintaa, koska ne eivät rajoita kosteuden diffuusiota ulos rakenteesta, vaan ainoastaan osastoivat vaipan eri osat.

Kun nurkkaan sijoitetaan ylimääräinen tuulensuojakaista konvektiokatkoksi, voi tuulensuojamateriaalin ilmanläpäisykerroin olla suurempi kuin mitä tyypillinen tuulensuojan soveltamistapaus edellyttää. Esimerkiksi 5 %:n raja-arvo vaatimus

lämpöhäviöiden kasvulle toteutuu kahden seinän liitoksessa noin 2,5-kertaisella ($9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$), ja seinän ja yläpohjan liitoksessa noin 8-kertaisella ($15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella verrattuna normaalirakenteeseen. Kun osastoivan kerroksen ilmatiiviyttä kasvatetaan, lähestyy tapaus toiminnaltaan kasettirakennetta, jolloin varsinaisen tuulensuojauksen tiiviysvaatimukset ovat huomattavasti nurkkatapauksia lievemmat.

Tässä tutkimuksessa tuulensuojaa on käsitelty ideaalisesti toteutettuna kerroksena, jonka ilmanläpäisevyys on sama kuin tuulensuojamateriaalin. Käytännön rakenteissa tuulensuojauksen tiiviyn tulee tarkoittaa tuulensuojakerroksen toteutuksen pitkäaikaista kokonaistiiviyttä eikä pelkästään tuulensuojan materiaaliominaisuutta.

Selvästi osastoiduissa rakenteissa, joissa nurkkakonvektio on rakenteellisesti rajoitettu merkityksettömäksi, tulisi tuulensuojakerroksen ilmanläpäisykertoimen vaatimustason (maksimiarvon) olla luokkaa $25 - 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Osastoimattomissa rakenteissa, joissa voimakas nurkkakonvektio on mahdollinen, voidaan suuruusluokaltaan $4 - 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ olevaa tuulensuojan ilmanläpäisykerrointa pitää hyvänä arvona. Kun otetaan huomioon tarkasteluoloihin sisältyvä varmuus ja nurkkarakenteiden suhteellisesti vähäisempi osuus koko rakennuksen vaipasta kasettirakenteisiin verrattuna, voidaan vaatimustasosta tinkiä ilman, että olennaisesti muutettaisiin vaipan vuotuisia keskimääräisiä lämpöhäviöitä. Riittävänä tuulensuojauksen ilmanläpäisykertoimen maksimiarvona koko vaipalle voidaan pitää suuruusluokkaa $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Jos suuri paine-ero on mahdollinen nurkkarakenteessa ja rakenteen lämpötekniinen toimivuus riippuu lähes pelkästään yhdestä tuulensuojakerroksesta, sisältyy rakenteen toimintaan riski. Epäideaalisuudet tuulensuojassa (rajapintojen raot yms.) voivat paikallisesti muuttaa ilman virtauskentän ja jopa pilata rakenteen lämpötekniisen toimivuuden, riippumatta tuulensuojamateriaalin ilmanläpäisevyydestä.

Paineentasausvaipan tekniikkaa / 3 / sovellettaessa saadaan rakenteen vaipan tuuletusrakojen ja ilmatilojen paineolot lähestymään luonnollisen konvektion tapausta. Tällöin tuulensuojan tiiviysvaatimukset ovat lievemmat kuin nyt tarkastelluissa pakotetun konvektion tapauksissa, ja tuulensuojauksen virheellisen toiminnan (ilmavuotojen) aiheuttamat riskit ovat suhteellisen pienet. Suositeltavaa olisikin yhdistää ulkovaipan tuuletusilmatilojen rakenteellinen paineentasaus toteutukseltaan riittävän tiiviiseen tuulensuojaan.

4 TUULENSUOJAUKSEN VAIKUTUS RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEEN TOIMINTAAN

Tuulensuojaurakenteiden kosteusteknistä toimintaa tutkittiin kokeellisesti ja laskennallisesti. Laskennassa tarvittavat tuulensuojamateriaalien aineominaisuustiedot (Liite 2) joko kerättiin olemassa olevasta aineistosta tai määritettiin kokeellisesti.

Määritettyjen kosteudensiirto-ominaisuuksien ja kuivumiskokeiden vertailu paljasti merkittäviä poikkeamia yleisesti käytettyjen ns. kuiva- ja märkäkuppikokeiden antamien tulosten ja materiaalin todellisissa oloissa tapahtuvan kosteudensiirron välillä. Siksi varsinainen toiminnallinen tarkastelu painottui kokeelliseen tutkimukseen ja laskentaa käytettiin pääasiassa eri parametrien herkkyystarkasteluihin.

Seuraavassa esitetään pelkistetyissä, yksidimensioisissa kosteuden kuivumiskokeissa ja laboratoriossa tehdyissä täysmittakaavakokeissa saadut tulokset. Tuloksia verrataan määritettyihin vesihöyrynläpäisykertoimiin. Laskennallisessa osassa esitetään herkkyystarkasteluna tehty selvitys tuulensuojan ilmanläpäisy- ja vesihöyrynläpäisykertoimen vaikutuksesta rakenteen kosteustekniseen toimintaan.

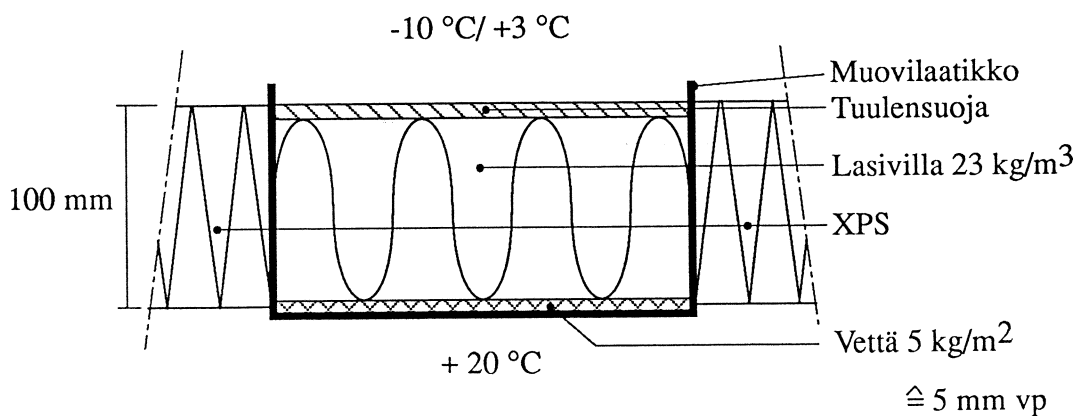
Kokeellisessa tutkimuksessa oli lähtökohtana voimakas kosteusrasitus, joka ei vastaa tyypillisissä käyttöoloissa esiintyviä tilanteita, mutta on kuitenkin mahdollinen esimerkiksi rakentamisen jälkeen, jolloin materiaalit voivat olla kosteita. Tavoitteena oli tutkia rakenteen selviytymiskykyä (kuivumista) eri tuulensuojaratkaisulla, kun alkukosteus oli niin korkea, että tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnalla oli pääasiassa vesihöyryn kondenssitilanne.

4.1 RAKENTEIDEN YKSIDIMENSIOISET KUIVUMISKOKEET

Kokeiden tavoitteena oli selvittää eri tuulensuojamateriaaleilla toteutettujen rakenteiden kuivumista ja rakenteissa olevan kosteuden jakautumista kuivumisen aikana sekä pakkaskauden tilannetta vastaavissa että jäätymisrajaa korkeammassa ulkoilman oloissa. Kokeissa rakenteiden kuivuminen perustui rakenteiden yli vallitsevan lämpötilaeron ja vesihöyryn osapaine-eron aiheuttamaan yksiulotteiseen kosteuden siirtymiseen.

4.1.1 Koejärjestelyt

Kokeet tehtiin vaakasuorille rakenteille (kuva 15) siten, että pinta-alaltaan noin $390 \times 315 \text{ mm}^2$:n suuruisen muovilaatikon pohjalla oli sellupaperiin imeytettynä 5 mm :n vesipatsasta (5 kg/m^2) vastaava kosteusmäärä. Alkukosteus vastasi normaalia rakennuksen käyttötilannetta huomattavasti korkeampaa kosteusmäärää. Se valittiin kuvaamaan tuulensuojan kykyä selviytyä mahdollisesti esiintyvistä kosteuskuormista (rakentamisen jälkeinen kosteus, vuodot ulkoverhouksen läpi, sisäilman ulosvirtauksen aiheuttama kosteuskertymä tmv.). Vesikerroksen päällä oli rakenne, jonka ulommaisena kerroksena oli tuulensuoja. Rakenteen kokonaispaksuus oli kaikissa kokeissa noin 100 mm ($100 - 102 \text{ mm}$). Lämmöneristeenä käytettiin 23 kg/m^3 lasivillaa.



Kuva 15. Koejärjestelyt rakenteen kuivumiskokeessa.

Laatikat oli asennettu lämmöneristettyyn kehikkoon, jonka alapuolen ilmatilan lämpötila pidettiin vakiona $+20 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Yläpuolisen ilmatilan lämpötiloina käytettiin vakioarvoja $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ tai $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ eri koetilanteissa. Konvektiota ei esiinny käytetyissä koeolosuhteissa. Rakenteiden reunat oli tiivistetty silikonilla laatikkojen reunoihin. Kosteuden siirtyminen oli lieviä reunavaikutuksia lukuunottamatta yksiulotteista, lähinnä diffuusiona rakenteen läpi alhaalta yläpinnan tuulensuojan kautta rakenteesta ulos tapahtuvaa.

Kokeissa käytettiin 10 eri rakennetta, joita kutakin oli kolme rinnakkaista koerakennetta. Kuvassa 16 esitetään kokeissa käytetyt rakenteet, jotka olivat seuraavat:

#10 Referenssirakenne, jossa lasivillan yläpinta oli avoin ilmatilaan, ts. rakenteessa ei ollut minkäänlaista tuulensuojaa.

#1 Lasivillapohjainen tuulensuojalevy ilman pinnoitetta.

#2 Lasivillapohjainen tuulensuojalevy, jossa on massapinnoite ulkopinnalla.

#3 Lasivillapohjainen tuulensuojalevy, jossa on massapinnoite sisäpinnalla. Tapaus edustaa ns. käännettyä tuulensuojaa, jossa tuulensuojan ilmavirtauksia vastustava pintakerros on eristeen sisällä, jolloin sen lämpötila on ulkopintaa huomattavasti korkeampi, -10 °C :n ulkolämpötilassakin noin $> 0\text{ °C}$.

Tapauksissa #1 - #3 villa-tuulensuojalevyt oli ohennettu 32 mm:iin, jotta tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnan lämpötila vastaisi mahdollisimman hyvin todellisen rakenteen tapausta.

#4 Tuulensuojana 12 mm paksu huokoinen puukuitulevy.

#5 Tuulensuojana 9 mm paksu kipsilevy.

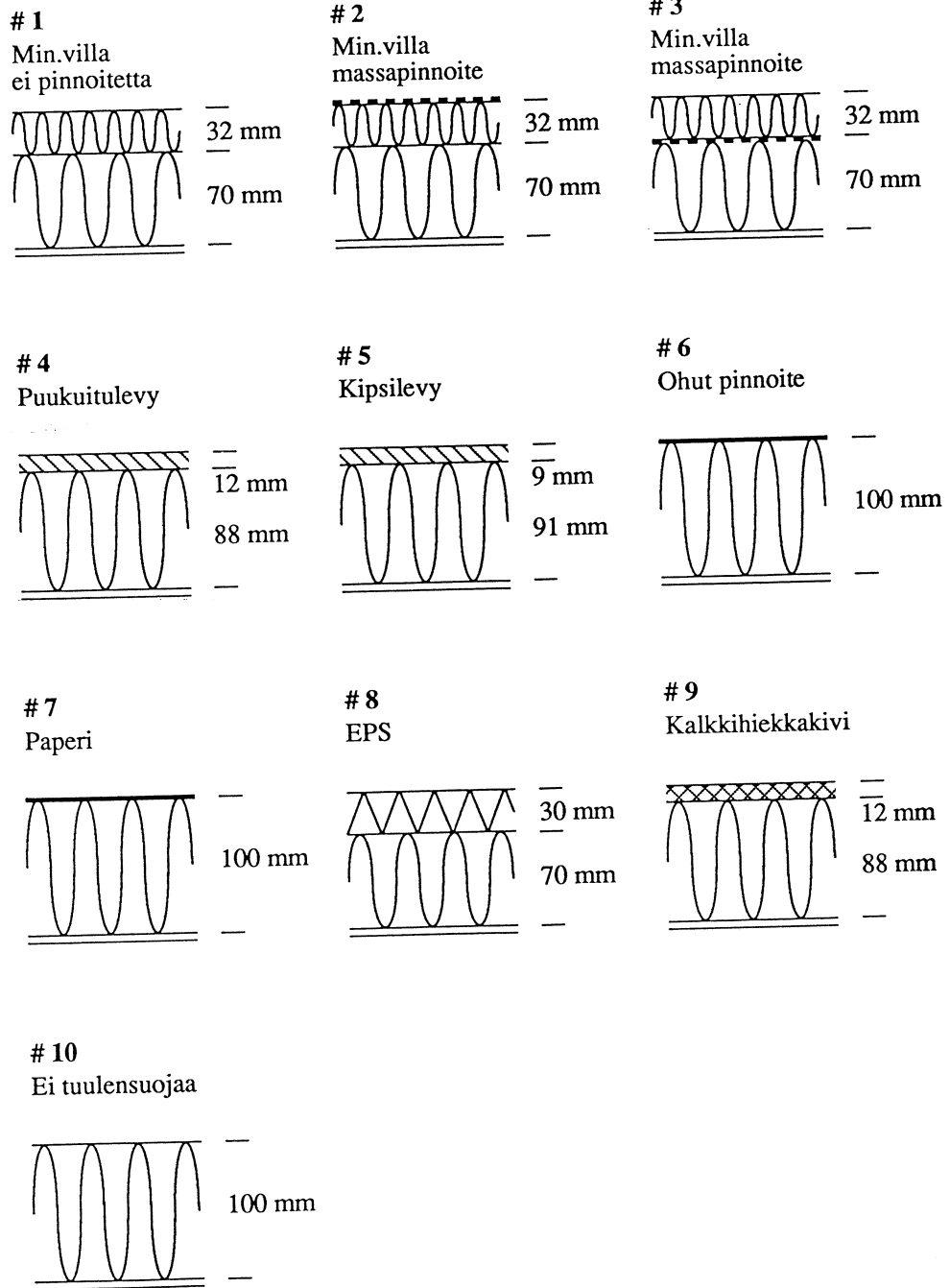
#6 Tuulensuojana oli 100 mm:n eristekerroksen päälle asennettu muovilaminoitu pinnoite. Tästä käytetään seuraavassa myös nimikettä 'ohut pinnoite'.

#7 Tuulensuojana oli 100 mm:n villaeristevillaan kuumasaumattu ohut paperi. Tästä käytetään seuraavassa myös nimikkeitä 'paperi' tai 'paperipinnoite'.

#8 Vertailurakenne, jossa oli 30 mm paksu EPS-levy ($18,5\text{ kg/m}^3$), joka ei ole tuulensuoja-EPS, mutta vastaa tiheydeltään ja valmistustavaltaan tätä.

#9 Tuulensuojana 12 mm paksu kalkkihiekkakivi. Kalkkihiekkakivi valittiin kuvaamaan kapillaarisesti hyvin kosteutta johtavan materiaalin käyttäytymistä tuulensuojana.

Kokeiden kestäessä seurattiin rakenteiden lämpötiloja ja laatikot rakenteineen punnittiin ajoittain (2 - 3 kertaa viikossa), jolloin voitiin seurata rakenteen kuivumista. Kokeissa käytettiin kolmea rinnakkaista rakennetta, jotka purettiin vuorollaan kokeen kestäessä ja sen päätteeksi. Rakenteiden eri kerrosten kosteuspitoisuudet purkuhetkellä määritettiin punnitus-kuivaus-menetelmällä.



Kuva 16. Kokeissa tutkitut rakenteet.

4.1.2 Koetulokset ja niiden tarkastelu

Kuvissa 17 - 20 esitetään punnituksista saadut tulokset ja kuvissa 21 - 40 rakenteiden kosteusjakaumat.

Kuivumisnopeus

Kuvassa 17 esitetään kosteuden kuivumisen aiheuttama rakenteiden massan muutos (g) eri rakenteille ajan funktiona, kun yläpuolisen ilmatilan lämpötila oli +3 °C, ja kuvassa 18 vastaavasti kylmän puolen lämpötilalla -10 °C.

Kuvissa 19 ja 20 esitetään eri rakenteille punnitustuloksista lasketut kosteuden kuivumisen massavirran tiheydet ajan funktiona lämpötiloilla +20/+3 °C (kuva 19) ja +20/-10 °C (kuva 20). Huippuarvo noin 600 tunnin kohdalla kokeessa +20/+3°C johtui kylmäkoneiston pysähtymisestä kokeen aikana. Massavirran pieneneminen loppuvaiheessa johtuu siitä, että jokseenkin kaikki kosteus oli kuivunut rakenteista.

Molemmilla lämpötiloilla **pinnoittamattomat rakenteet (#1 ja #10)** ja ns. **käännetty tuulensuoja (#3)** antoivat kokeen alkuvaiheessa jokseenkin samat massavirrantiheydet, noin $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$. Pinnoittamattomilla rakenteilla (#1 ja #10) ei voitu erottaa jäätyminen (-10 °C) aiheuttamaa massavirran pientymistä lämpimämpään koetapaukseen verrattuna. Pakkaspuolen kokeissa massavirran pientyminen (rakenteen alaosan kuivuminen) alkoi +3 °C:n koetta aiemmin, mutta erot tasoittuivat ja peittyivät mittaustulosten hajontaan.

Käännetyn tuulensuojan (#3) tapauksessa massapinnoitteen lämpötila oli >0 °C, joten molemmissa koelämpötiloissa kuivumisen massavirrat olivat jokseenkin samat.

Koelämpötilassa +20/+3 °C tapaukset **#2 ja #7**, joissa oli **pinnoitemassa tai paperi ulkopinnalla**, antoivat jokseenkin saman kuivumisen massavirran tiheyden kuin pinnoittamattomat rakenteet. Sen sijaan pakkaskokeessa tapausten #2 ja #7 massavirran tiheys oli noin $1,1 - 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, ts. selvästi alempi kuin pinnoittamattomissa tapauksissa tai kun pinnoitteen lämpötila oli >0 °C.

Muovilaminoidun pinnoitteen (#6) läpi kuivuva kosteuden massavirran tiheys oli > 0 °C tilanteessa $0,75 - 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ja pakkaskokeessa $0,4 - 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

Kaikki kokeissa olleet tuulensuojan pinnoitteet, joiden lämpötila oli < 0 °C, aiheuttivat kosteuden jäätymistä tuulensuojan sisäpuoliseen materiaalikerrokseen

sekä tuulensuojan ja eristeen rajapinnalle (kuvat 21 - 40). Tämä hidasti rakenteiden kuivumista pakkaskaudella. Ohuilla pinnoitteilla (massa, paperi yms.) olivat massavirrantiheydet jäätymisalueella noin 50 - 60 % pienemmät kuin $T > 0\text{ °C}$ ulkolämpötilassa.

Massavirrantiheys **huokoisen puukuitulevyn (#4)** läpi oli $> 0\text{ °C}$:n kokeessa noin $1,2 - 1,35 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$ ja pakkaskokeessa noin $0,9 - 1,0 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$. **Kipsilevyllä (#5)** massavirrantiheydet olivat vastaavasti noin $0,7 - 1,1 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$ ($> 0\text{ °C}$) ja $0,6 - 0,7 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$ ($+20/-10\text{ °C}$). Puukuitulevy sitoi kosteutta itseensä $> 0\text{ °C}$:n kokeissa noin 2,3-kertaisesti ja pakkaskokeissa noin 60 % enemmän kuin kipsilevy.

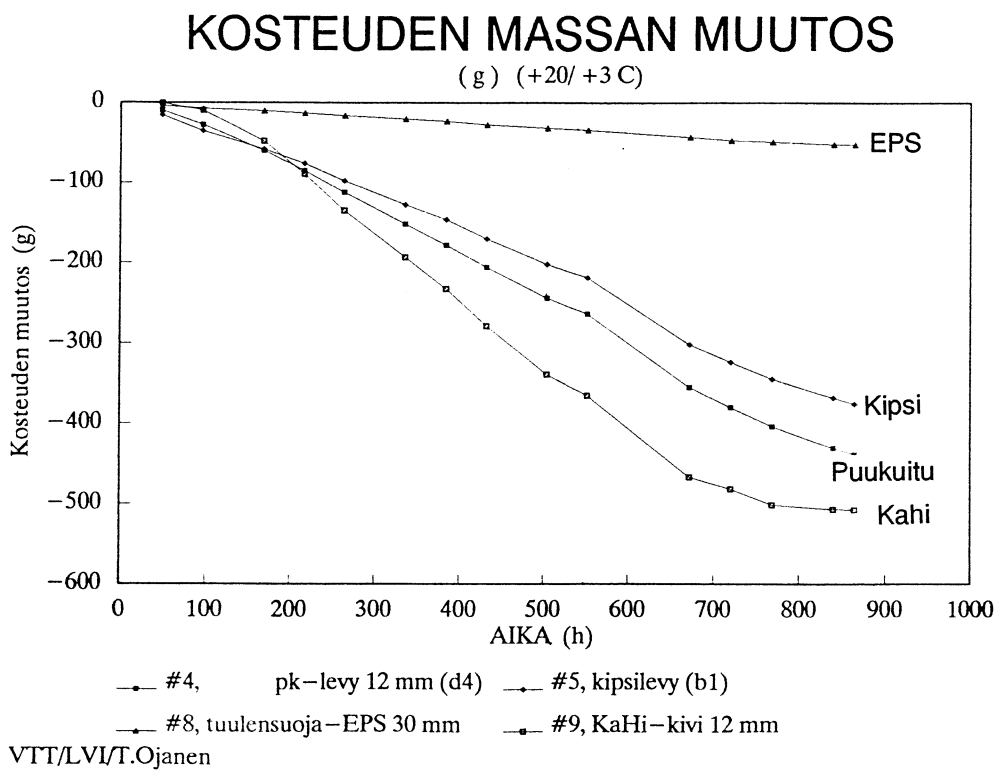
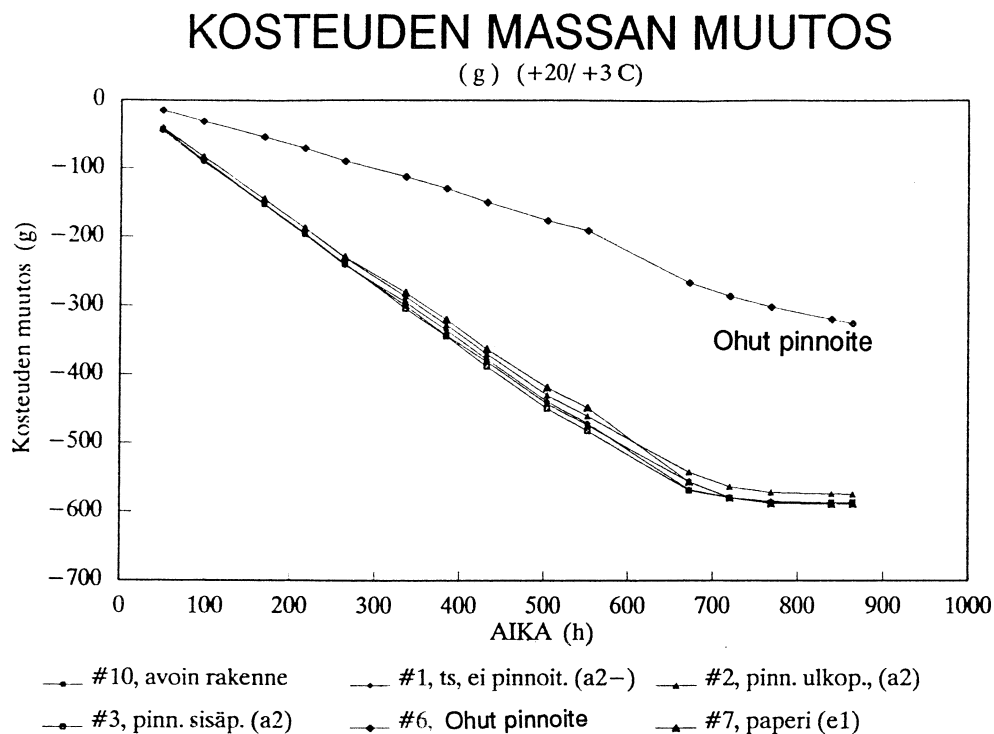
Kuivuminen **EPS-levyn (#8)** läpi oli hyvin hidasta molemmissa lämpötilaoloissa massavirrantiheyden vaihdellessa välillä $0,1 - 0,2 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$. Myös kosteuden absorptiokyky oli EPS:llä pieni ja kosteusjakauma voimakas.

Kosteuden massavirrantiheys **kalkkihiekkakiven (#9)** läpi sai $> 0\text{ °C}$:n kokeessa jopa arvoja $> 2 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$, kun taas pakkaskokeessa kuivuminen oli huomattavasti hitaampaa, vain $0,33 - 0,86 \cdot 10^{-6}\text{ kg/(s}\cdot\text{m}^2)$. Materiaalin kosteuskapasiteetti näkyi selvänä viiveenä kuivumisessa erityisesti $> 0\text{ °C}$:n kokeessa. Kahi pystyi sitomaan itseensä kosteutta $> 0\text{ °C}$:n kokeessa noin 60 % enemmän ja pakkaspuolella noin 2,4-kertaisen määrän puukuitulevyyn verrattuna. Kapillaarisesti hyvin johtava materiaali toimi ilmeisen hyvin jäätymisalueen yläpuolella, mutta kosteuden jäätyminen pienensi materiaalin läpi diffuusiona tapahtuvaa kosteuden siirtymistä olennaisesti.

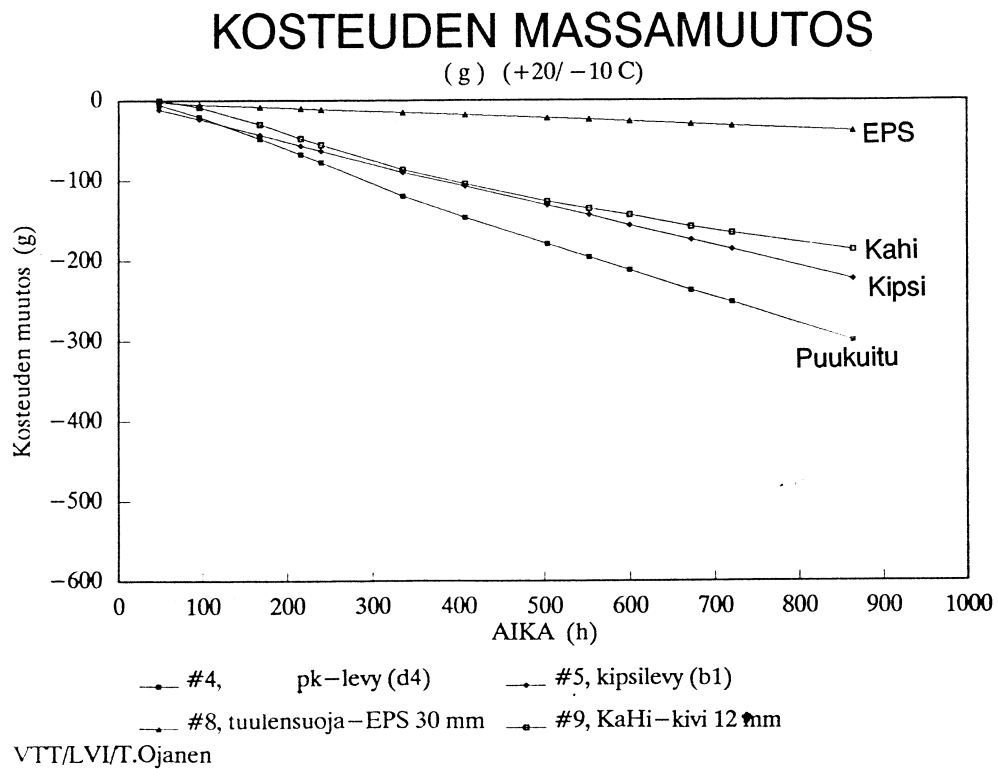
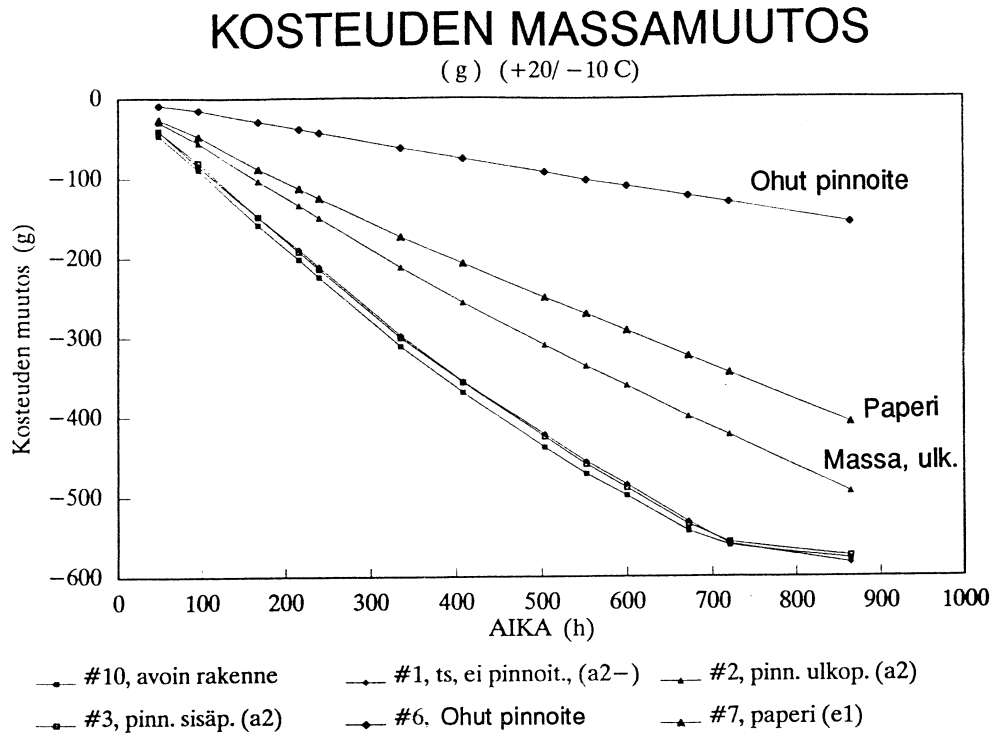
Veden ja jään kerääntymisen vaikutus kuivumiseen

$+20/+3\text{ °C}$:n kokeissa ei havaittu kosteuden kerääntymisen vaikuttavan koetilanteen aikaiseen kosteuden massavirrantiheyteen, ts. rajapinnalle ja materiaaleihin kerääntyvä nestemäinen vesi ei muuttanut rakenteen kuivumisnopeutta.

Pakkaspuolen kokeissa kosteuden massavirrantiheys pieneni kokeen kestäessä useilla tuulensuojamateriaaleilla. Tämä johtui jään ja huurteen kerääntymisestä rakenteen rajapinnalle ja materiaaleihin. Pinnoittamattomissa ja ns. käännetyn tuulensuojan tapauksissa tätä ilmiötä ei havaittu, joten villaeristykseen kerääntynyt hurre ja jää ei (koetilanteen kosteuspitoisuuksilla $< 45\text{ kg/m}^3$) vaikuttanut materiaalin kosteudensiirto-ominaisuuksiin. Havaitut muutokset kuivumisnopeudessa perustuvat tuulensuojamateriaaliin ja sen pinnalle kerääntyvän jään ja huurteen vaikutukseen.



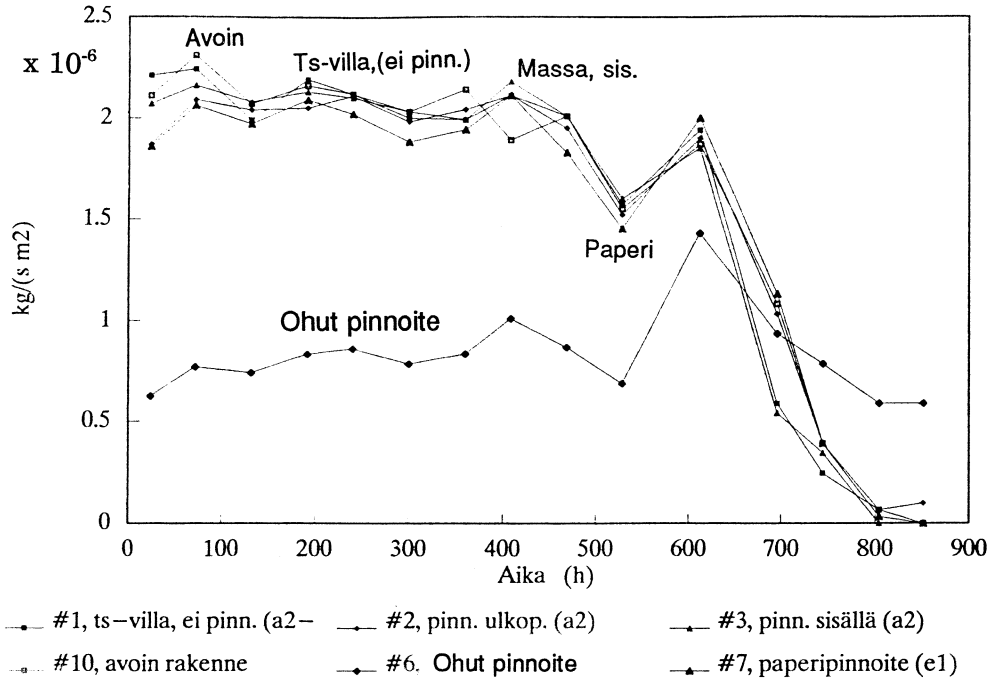
Kuva 17. Kosteuden massamuutos rakenteissa koetilanteen lämpötiloilla +20/+3°C.



Kuva 18. Kosteuden massamuutos rakenteissa koetilanteen lämpötiloilla +20/-10°C.

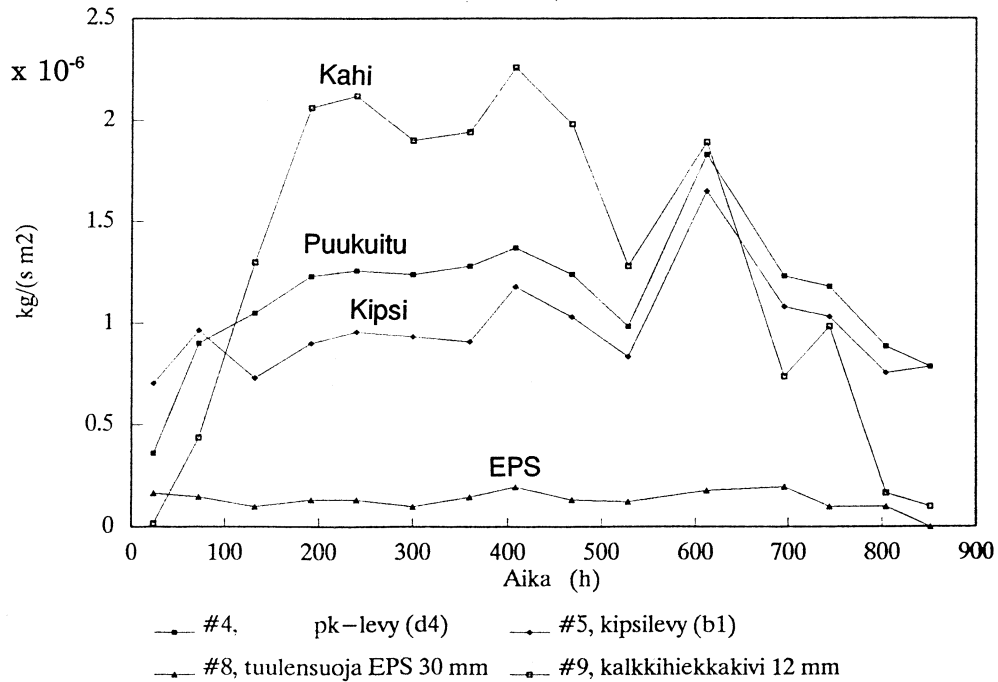
MASSAVIRRRAN TIHEYS [kg/(s m²)]

+20 / +3 C

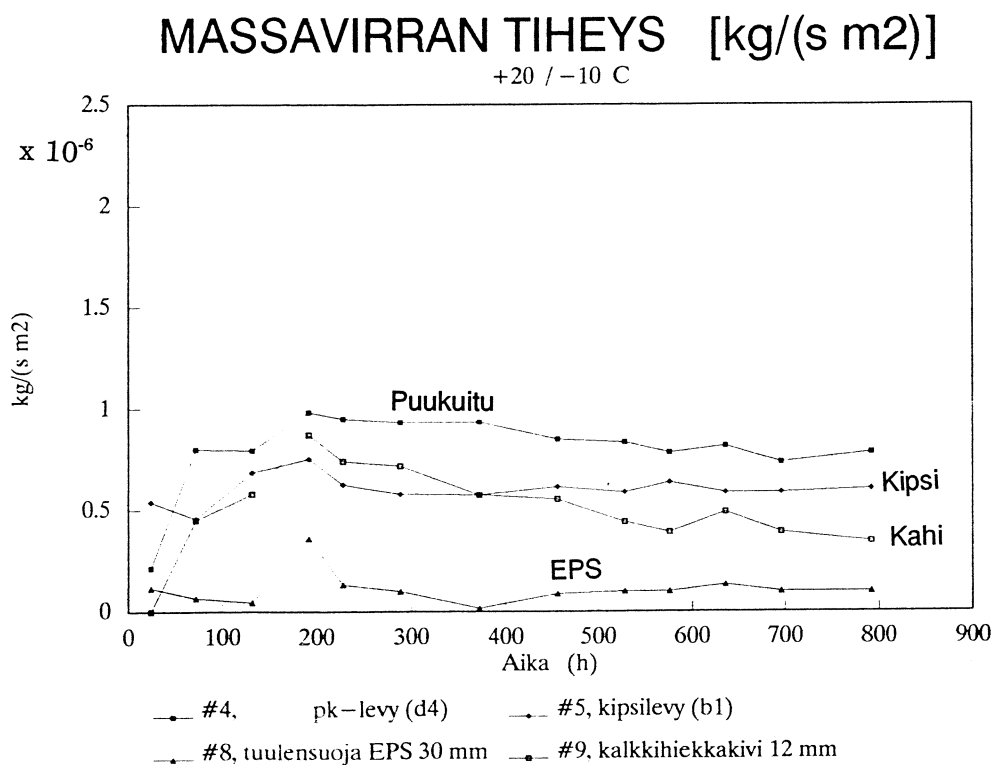
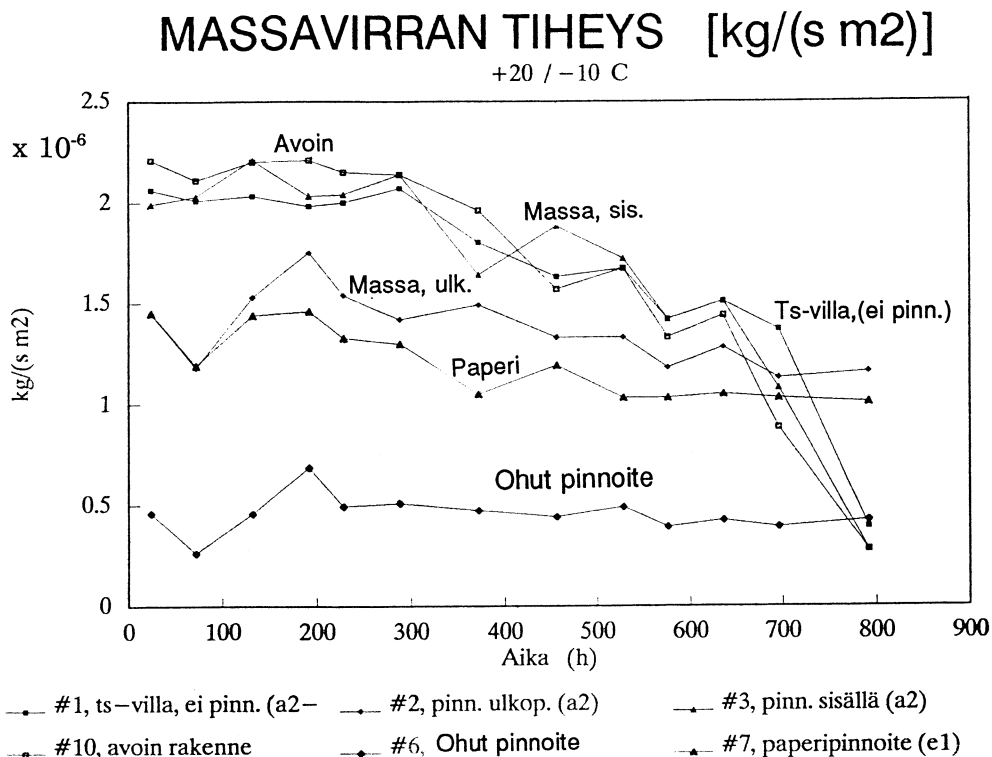


MASSAVIRRRAN TIHEYS [kg/(s m²)]

+20 / +3 C



Kuva 19. Kosteuden massavirran tiheydet ajan funktiona tutkituille rakenteille lämpötiloilla +20/+3 °C.



Kuva 20. Kosteuden massavirran tiheydet ajan funktiona tutkituille rakenteille lämpötiloilla +20/-10 °C.

Voimakkaimmin kuivumisen massavirantiheys muuttui Kahi-kivellä, jolla se aleni arvosta $0,86 \cdot 10^{-6}$ (200 h) arvoon $0,33 \cdot 10^{-6}$ kg/(s·m²) (800 h) (-62 %). Paperipinnoitteella (#7) vastaava muutos oli arvosta $1,45 \cdot 10^{-6}$ arvoon $1,0 \cdot 10^{-6}$ kg/(s·m²) (-31 %) ja ulkopinnan massapinnoitteella (#2) arvosta $1,5 \cdot 10^{-6}$ arvoon $1,15 \cdot 10^{-6}$ kg/(s·m²) (-23 %). Huokoisella puukuitulevyllä (#4) massavirantiheys pieneni maksimista $1,0 \cdot 10^{-6}$ kg/(s·m²) noin 20% kokeen aikana. Kipsilevyllä oli paikallinen maksimi noin 200 h kohdalla, mistä massavirantiheys pieneni nopeasti (<100 h aikana) noin 20 % lopulliselle tasolle. Kun ohuella pinnoitteella (#6) yhden mittauksen huippuarvo hylättiin epävarmana, oli kokeen aikainen muutos noin -15 % 200 h arvosta. EPS-levyllä ei kokeen aikaista muutosta voitu erottaa punnitustulosten satunnaisesta hajonnasta.

Massavirran tiheyden lasku noin 300 h:n kohdalla (+20/-10 °C) tapauksissa #1, 3 ja 10 johtui kosteuden kuivumisesta rakenteen alaosan sellupaperista. Kosteus jakautui suuremman lämpötilagradientin kokeissa nopeammin kuin +20/+3 °C:n kokeissa, joissa pohjaosan kuivuminen alkoi vasta noin 500 h:n kohdalla.

Kosteusjakaumat

Hyvän kuvan tuotteiden toiminnasta antavat rakenteiden kosteusjakaumat, jotka on määritetty kokeen kestäessä ja sen jälkeen. Kuvissa 21 - 30 esitetään +20/+3 °C:n kokeissa 11, 23 ja 36 vuorokautta kokeen alusta määritetyt rakenteiden kosteusjakaumat ja kuvissa 31 - 40 vastaavasti +20/-10 °C:n kokeissa määritetyt kosteusjakaumat 10, 26 ja 38 vuorokautta kokeen alusta. Referenssirakenteen #10 (ei tuulensuojaa) tulokset esitetään ensimmäisenä.

Kuvien otsikoissa esitetään punnitushetken kokonaiskosteusmäärä rakenteessa (kg/m²) (lämmöneristeessä ja tuulensuojassa, poislukien sellupaperin kosteus). Rakenteita purettaessa tehtiin lisäksi silmämääräisiä havaintoja vapaan veden ja jään esiintymisestä rakenteen eri osissa. Nämä havainnot on luetteloitu kuvien yhteydessä.

4.1.3 Johtopäätökset tuloksista

Pinnoittamattoman kuitulämmöneristeen kuivuminen

Kosteuden kuivuminen pinnoittamattoman tuulensuojavillan läpi on yhtä nopeaa kuin ulkopinnaltaan avoimen, tuulensuojattoman lämmöneristeenä käytetyn lasivillankin läpi. Pinnoittamattomien lämmöneristerakenteiden kuivumisnopeus ei kokeissa riippunut lämpötilagradientista, mutta suurempi lämpötilagradientti johti jyrkempiin kosteusjakauksiin ja lämmöneristeen sisäpinnan viereisten osien nopeam-

paan kuivumiseen. Myöskään lasivillaan tiivistynyt tai jäänyt kosteus ei vaikuttanut rakenteen kuivumisnopeuteen, kun kosteuden määrä oli $< 45 \text{ kg/m}^3$.

Kosteuden jäätyminen vaikutus

Kun diffuusisti hyvin kosteutta läpäisevän tuulensuojan (kokeissa massa- tai paperipinnoite) lämpötila oli $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$, kuivui rakenne jokseenkin yhtä hyvin kuin tuulelta suojaamaton rakenne, jonka lämmöneriste oli avoin ulkoilmaan.

Tuulensuojan lämpötilan ollessa jäätymisalueella kosteuden kuivuminen rakenteesta pieneni materiaalin mukaan 30 - 50 % ja voimakkaasti kapillaarisella materiaalilla (Kahi) jopa yli 70 % verrattuna $T > 0 \text{ }^\circ\text{C}$:n olosuhteisiin. Kapillaarinen tuulensuojamateriaali toimi hyvin lämpötilassa $T > 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Jäätymisalueella kosteus tiivistyi ja jäättyi rajapinnalle ja sen läheisyydessä, ja kosteuden kuivuminen kapillaarisen materiaalin läpi hidastui olennaisesti.

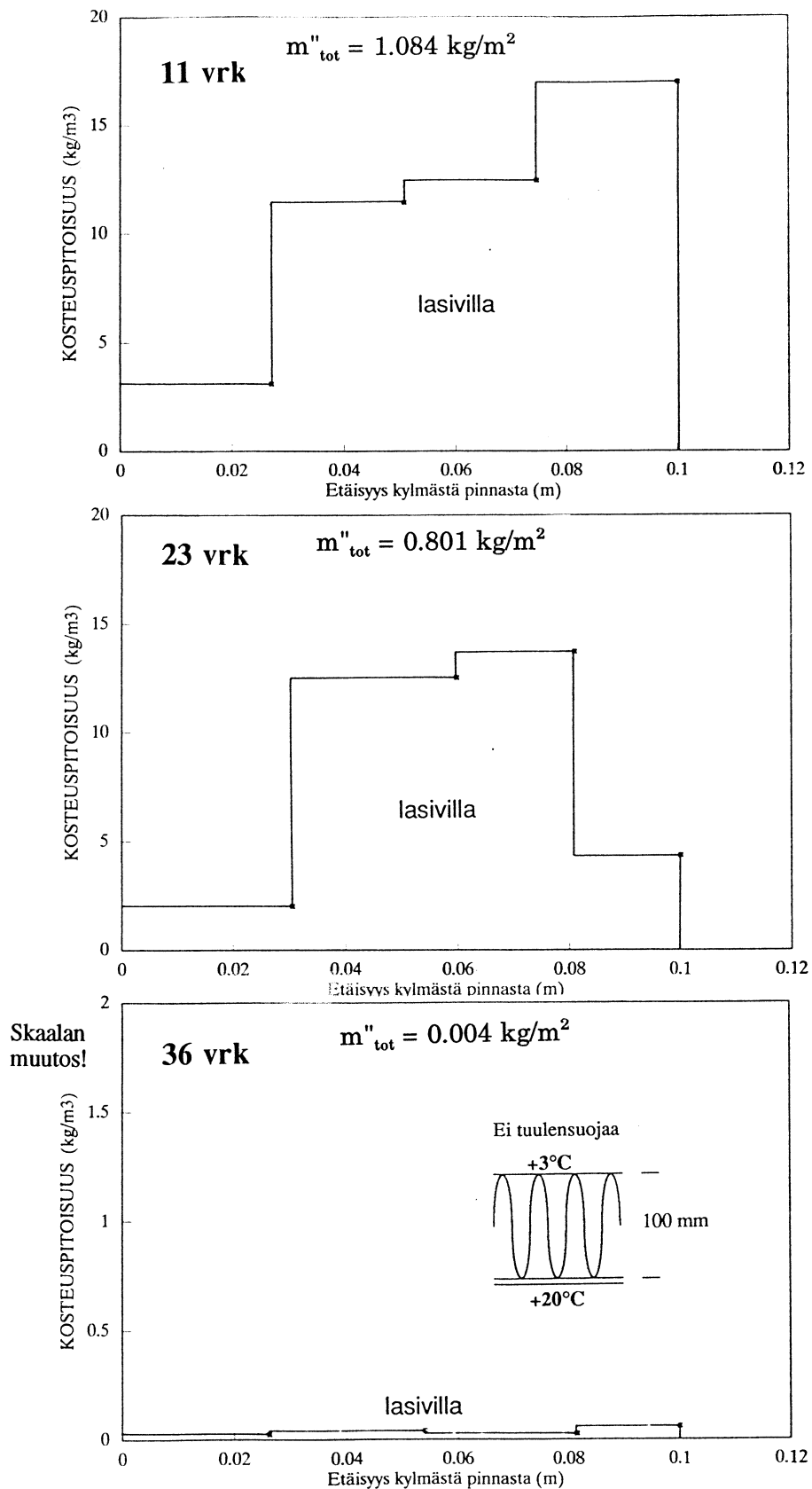
Tuulensuojauksen tuulelta suojaavan ja kosteuden siirtoa rajoittavan pintakerroksen lämpötila on usein ratkaiseva rakenteen kuivumisen kannalta. Kun tuulensuojapinnoite sijoitettiin lämmöneristekerroksen sisään siten, että pinnoitteen lämpötila oli $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$ myös ulkoilman pakkasjaksojen aikana, rakenne kuivui kuten vastaava rakenne ulkoilman lämpötilassa $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$, ts. jäätyminen vaikutukset voitiin eliminoida. Edellytyksenä oli kosteutta hyvin läpäisevä ulkopuolinen lämmöneristekerros.

Tuulensuojaan kerääntyvän kosteuden vaikutus kuivumiseen

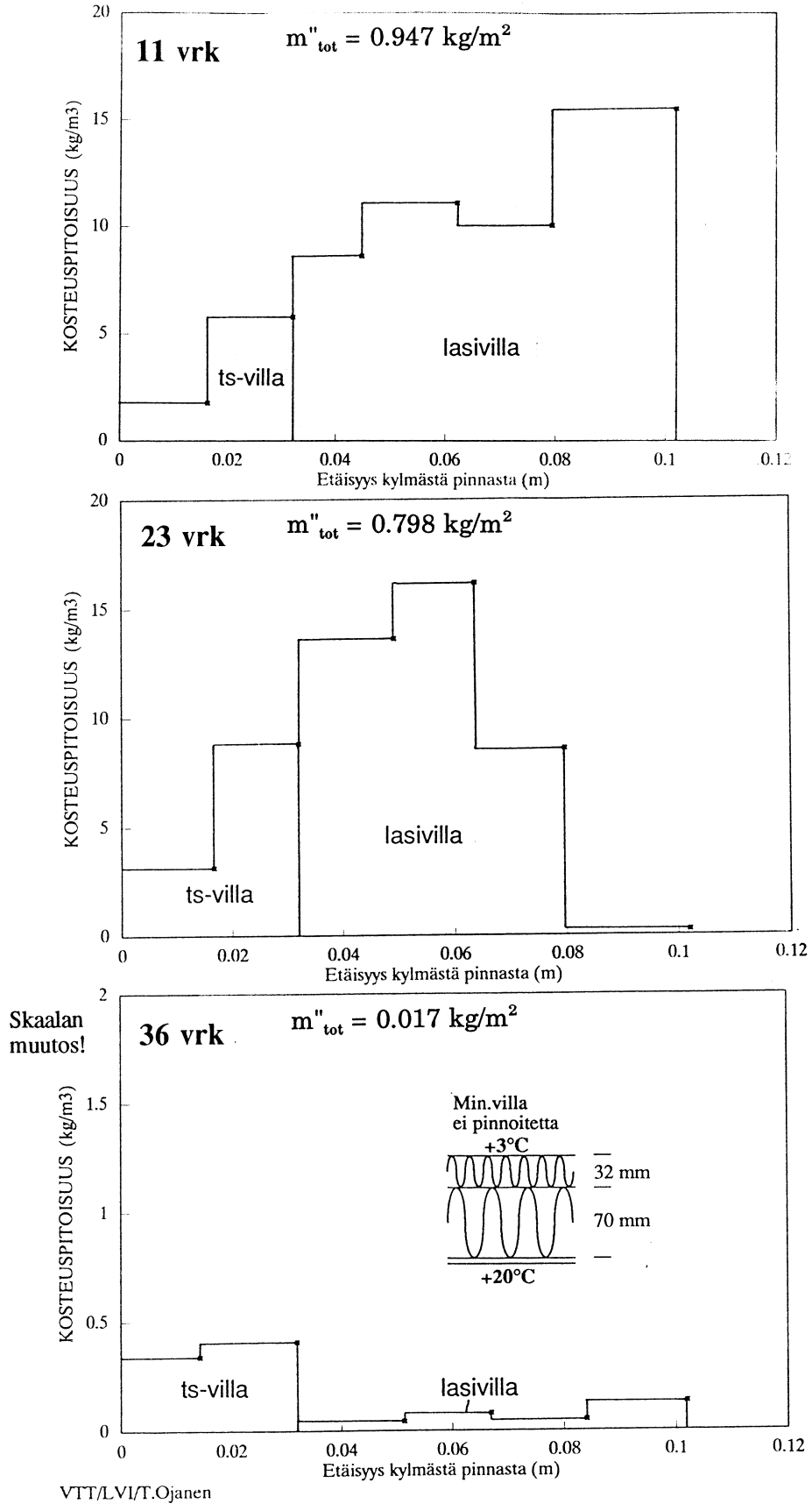
Ulkolämpötilassa $T > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ei tuulensuojaan kerääntyvä nestemäinen vesi olennaisesti muuttanut kuivumisen kokeen aikaista massavirrantiheyttä millään tuulensuojamateriaalilla.

Pakkaskokeissa rakenteen kokeen aikainen kuivuminen hidastui, koska jäätä ja huurretta kerääntyi tuulensuojamateriaaliin ja sen sisäpinnalle. Kokeen aikainen kuivumisen massavirran muutos vaihteli ollen Kahilla noin 60 %, paperilla ja massapinnoitteella noin 25 - 30 %, puukuitu- ja kipsilevyllä noin 20 % ja ohuella pinnoitteella noin 15 %.

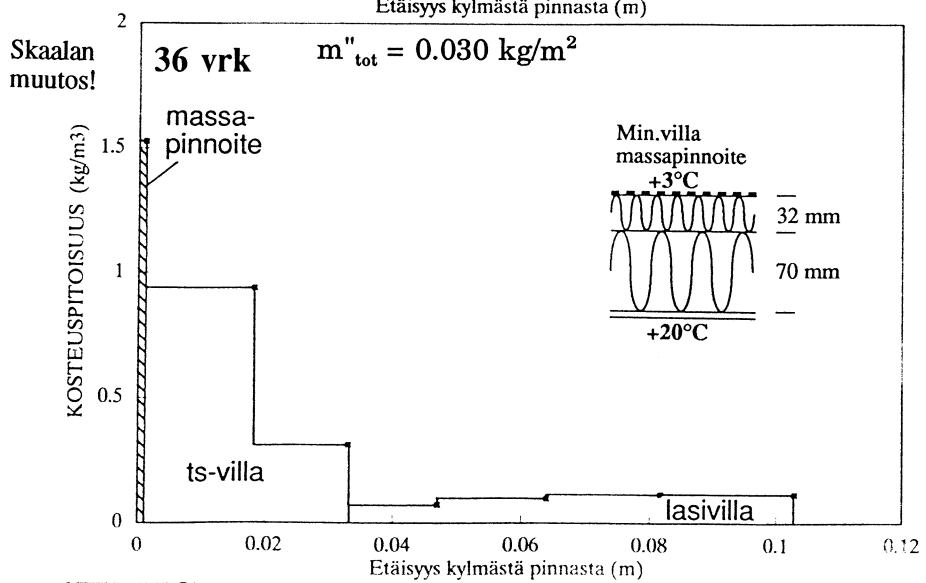
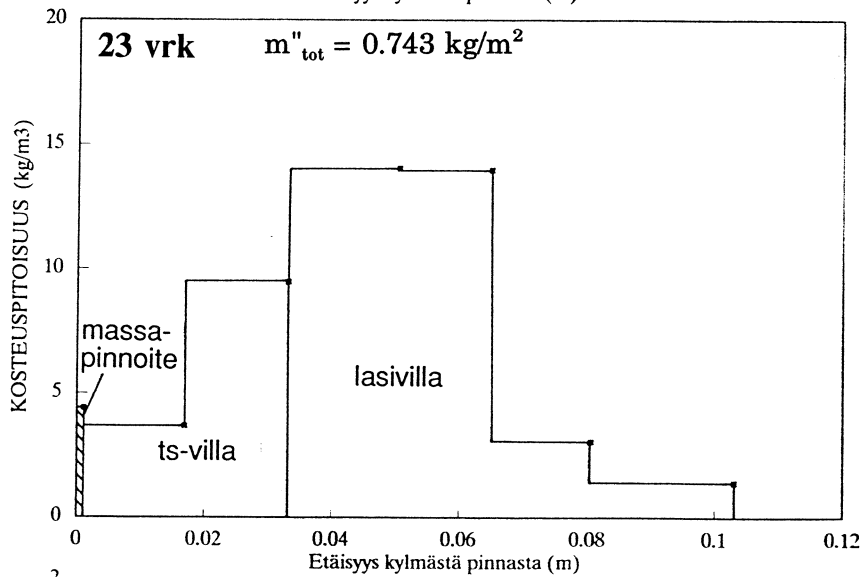
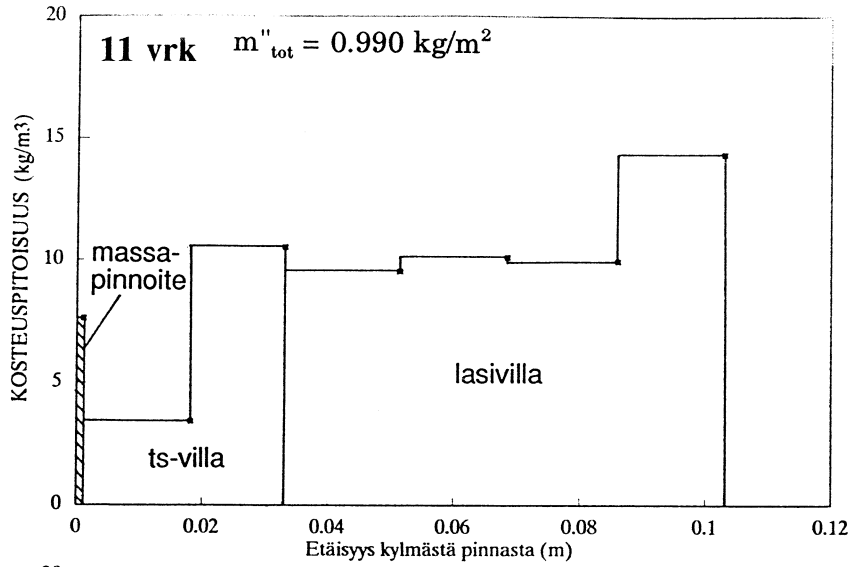
Yhteenvetona voidaan todeta, että tuulensuojan pelkkää kaasufaasin kosteudensiirtoa kuvaava vesihöyrynläpäisevyys on ratkaiseva ominaisuus tuulensuojarakenteen kuivumisen kannalta tyypillisessä lämmityskauden aikaisessa tilanteessa, kun ulkolämpötila $T < 0 \text{ }^\circ\text{C}$.



Kuva 21. Kosteusjakaumat referenssirakenteessa #10 kokeessa +20/+3 °C.

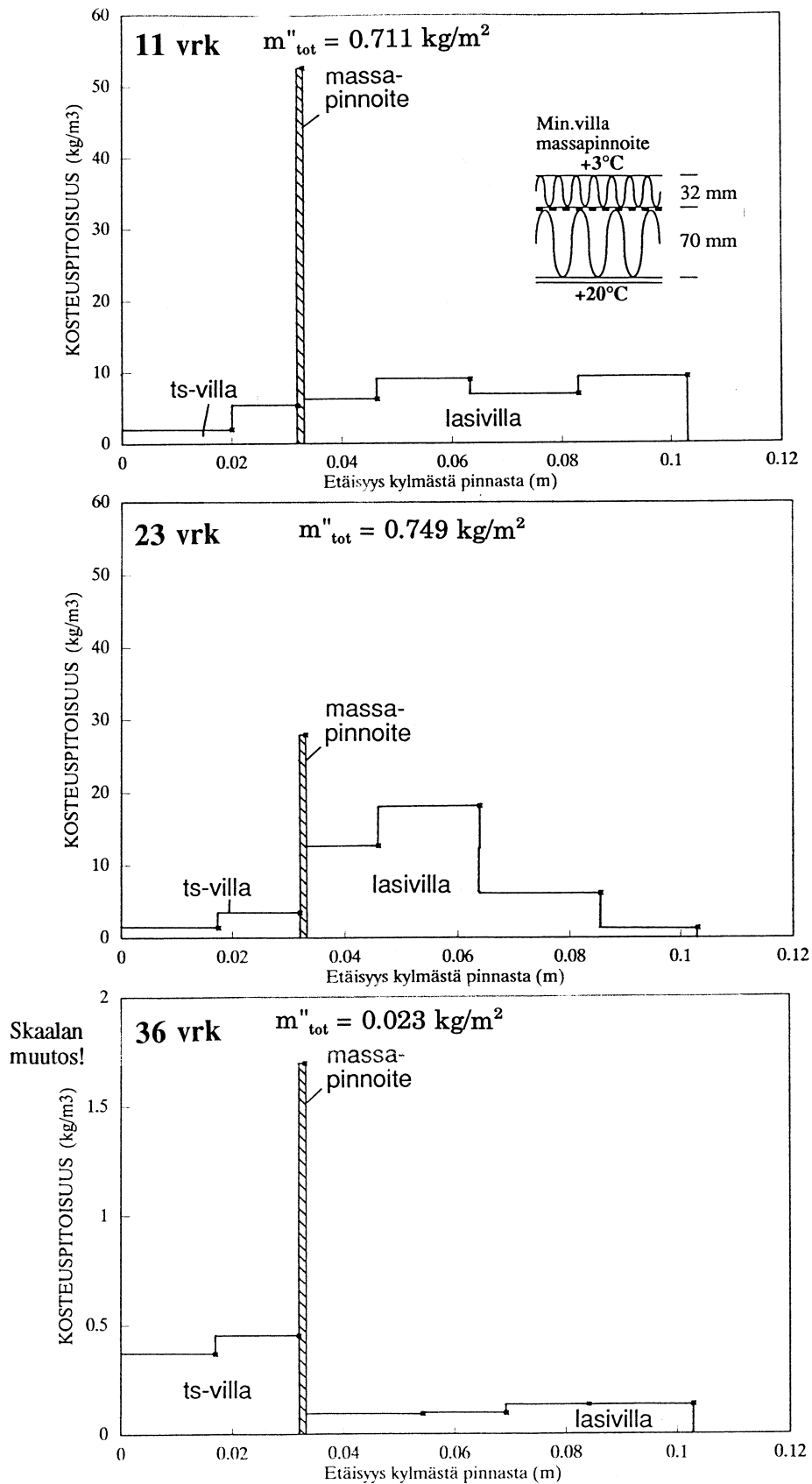


Kuva 22. Kosteusjakaumat rakenteessa #1 kokeessa +20/+3 °C.

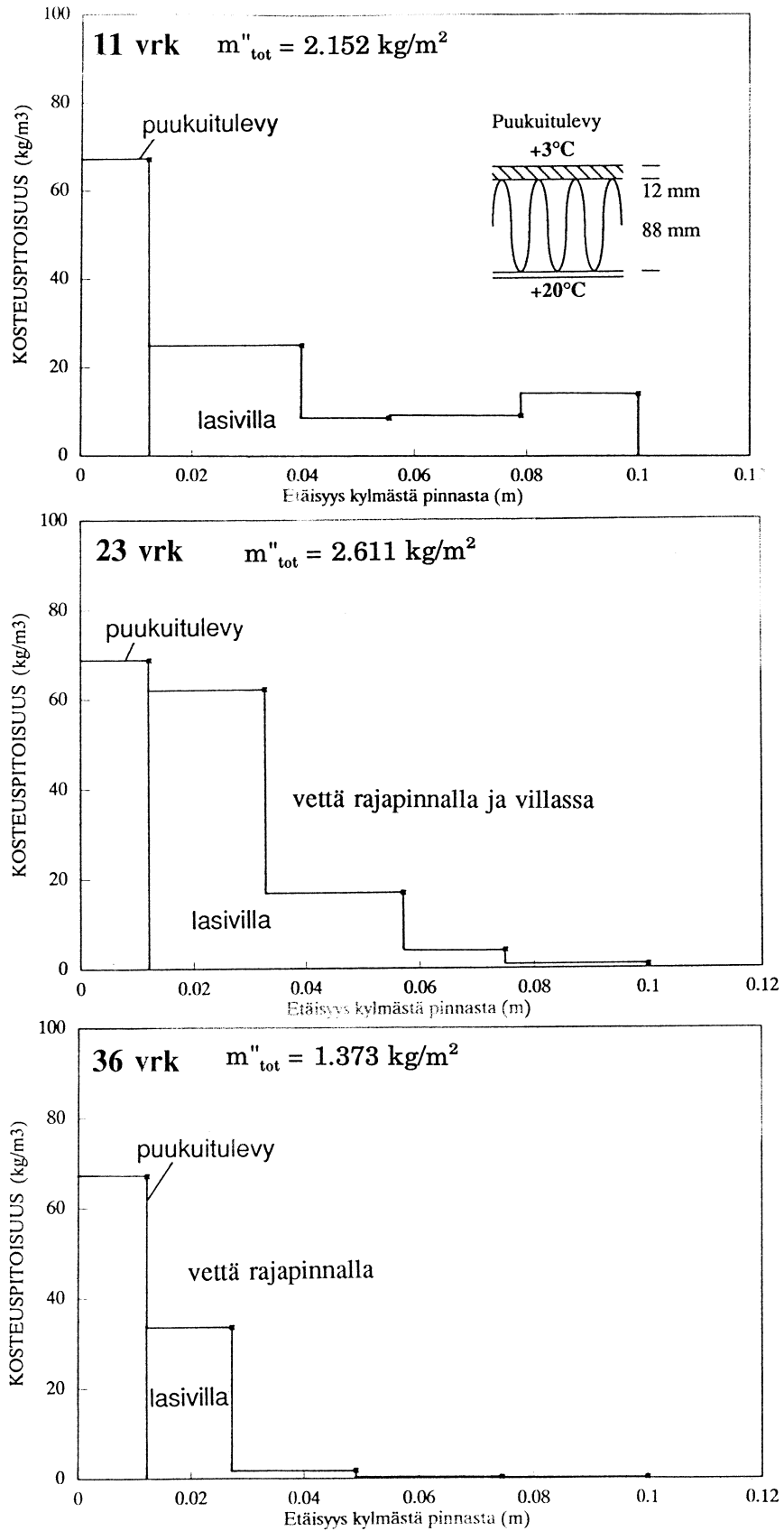


VTT/LVI T.Ojanen

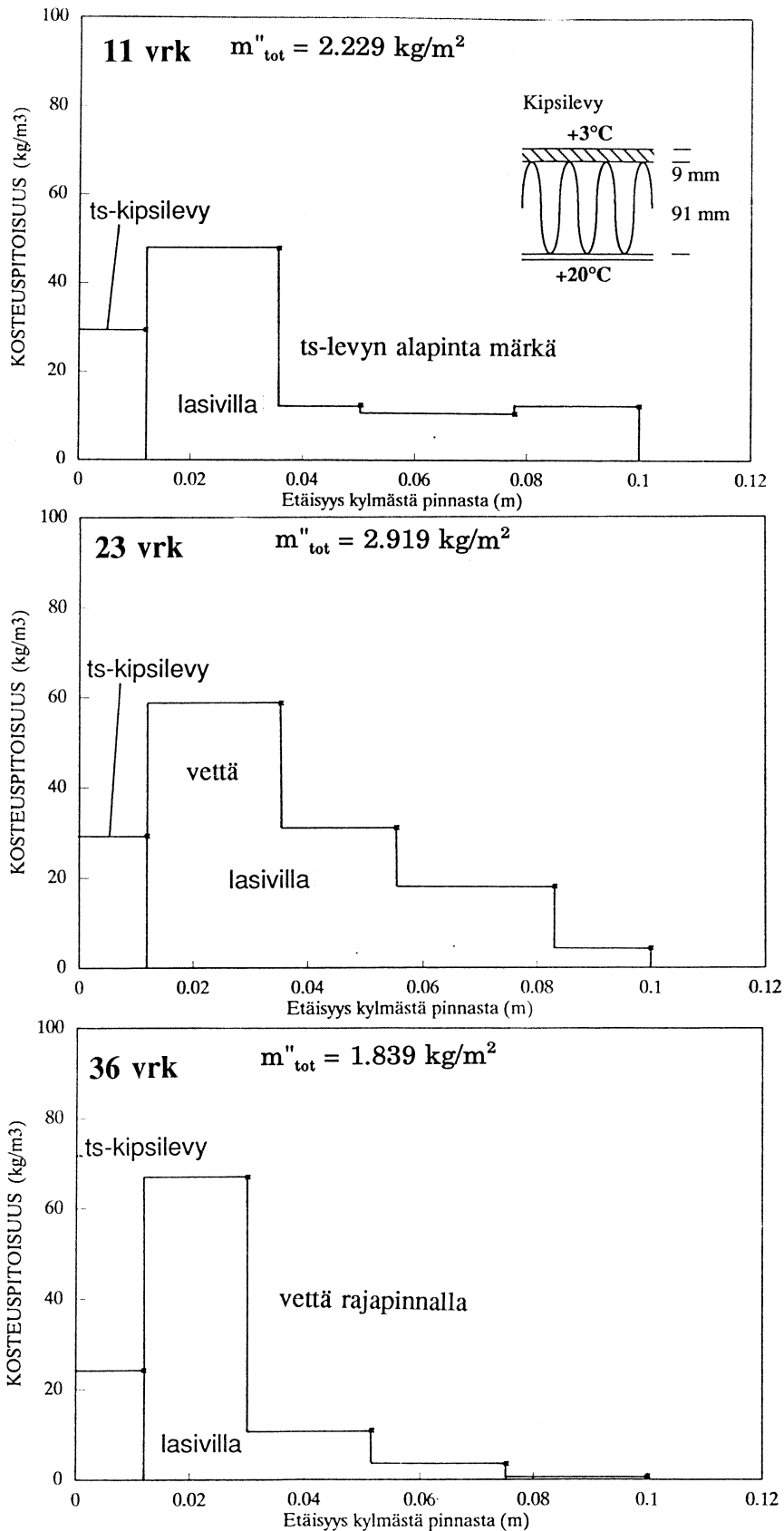
Kuva 23. Kosteusjakaumat rakenteessa #2 kokeessa +20/+3 °C.



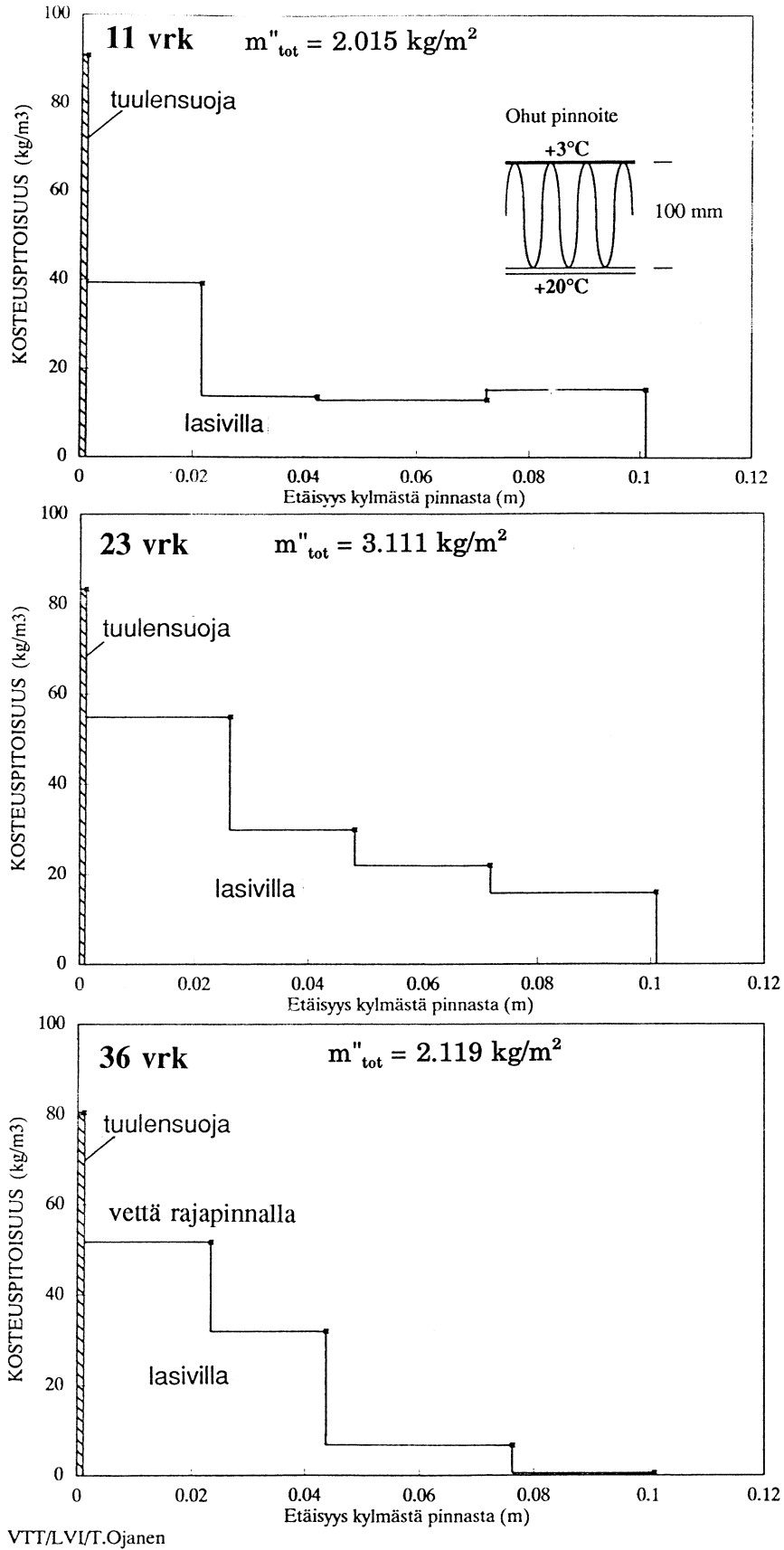
Kuva 24. Kosteusjakaumat rakenteessa #3 kokeessa +20/+3 °C.



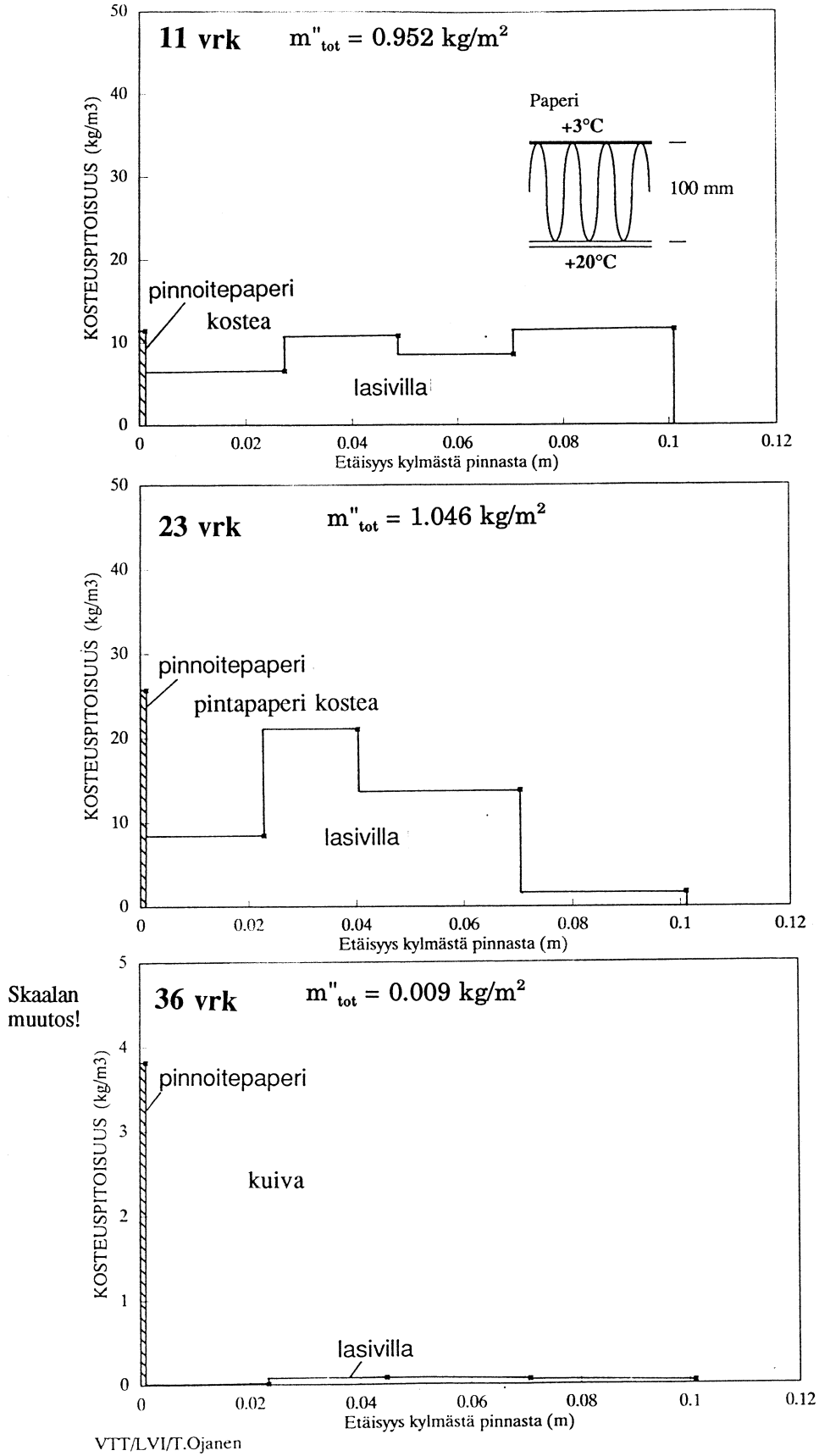
Kuva 25. Kosteusjakaumat rakenteessa #4 kokeessa +20/+3 °C.



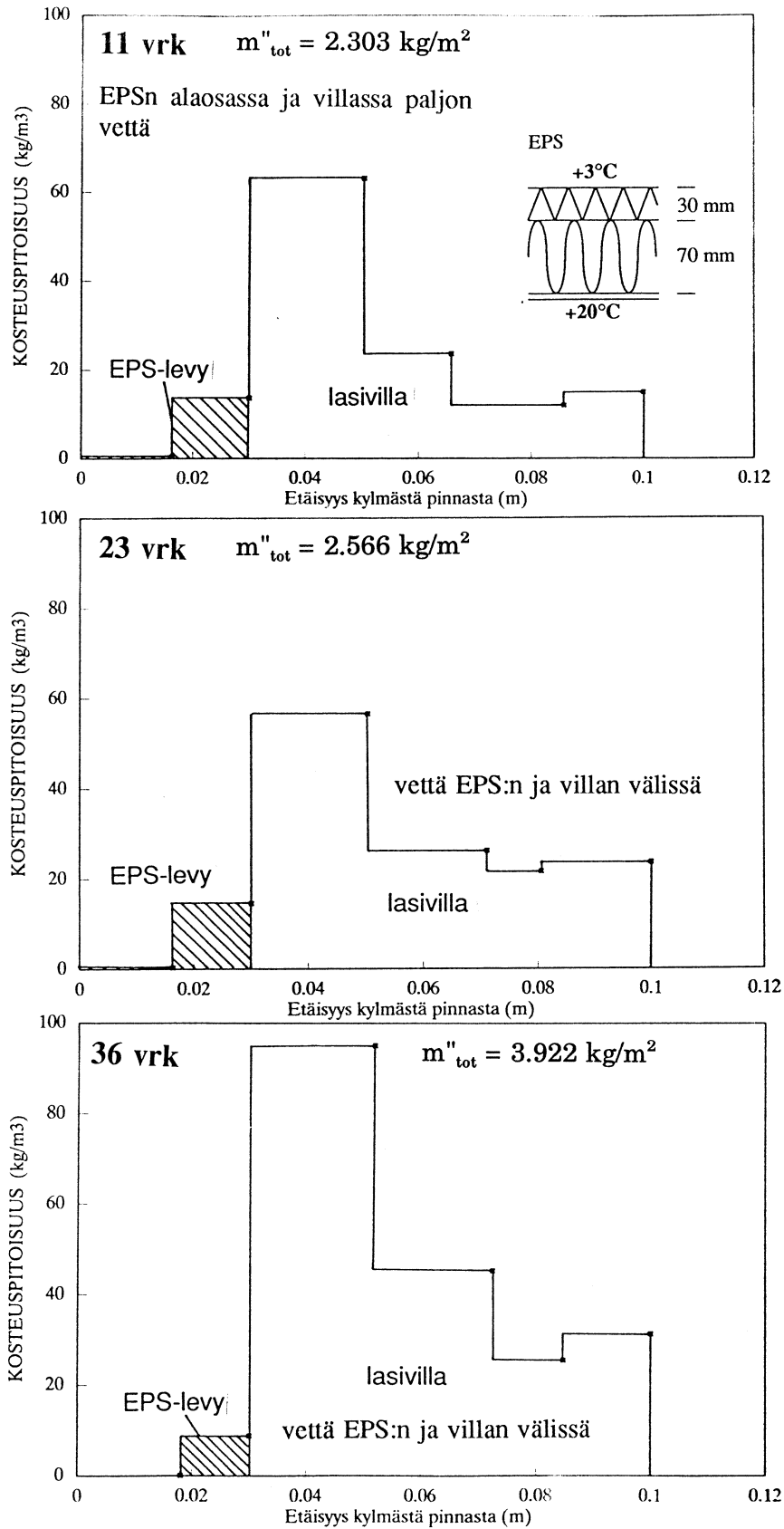
Kuva 26. Kosteusjakaumat rakenteessa #5 kokeessa +20/+3 °C.



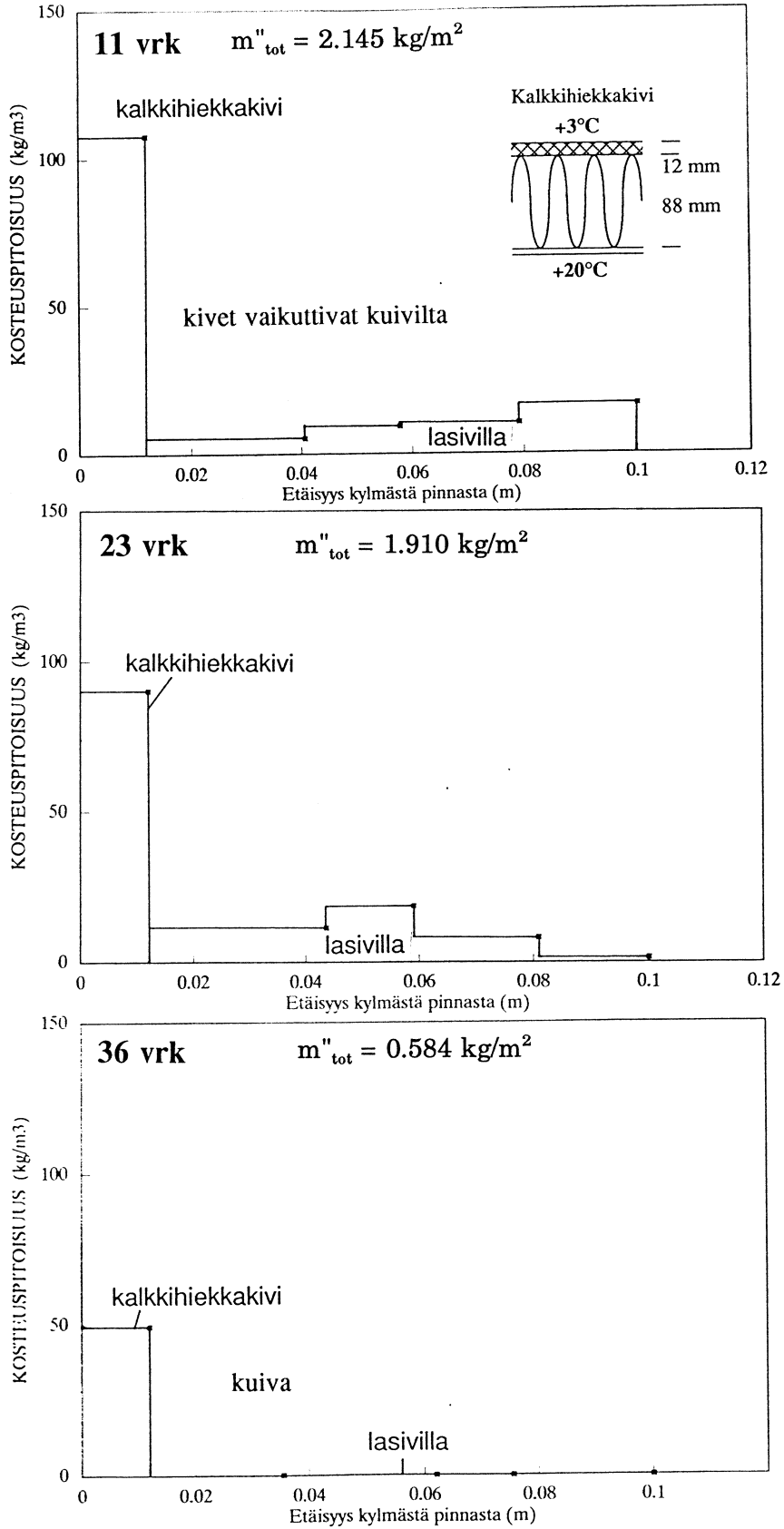
Kuva 27. Kosteusjakaumat rakenteessa #6 kokeessa +20/+3 °C.



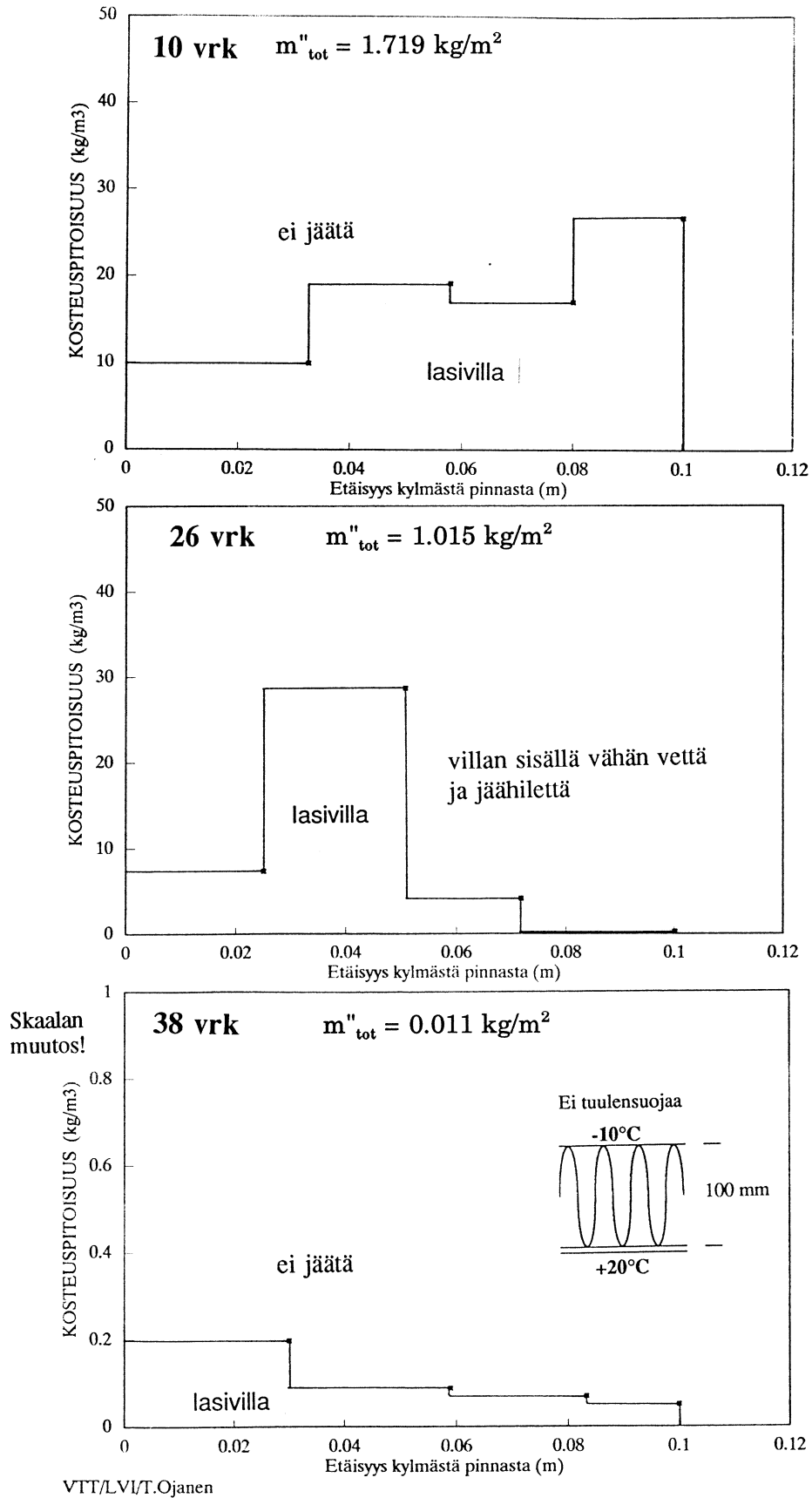
Kuva 28. Kosteusjakaumat rakenteessa #7 kokeessa +20/+3 °C.



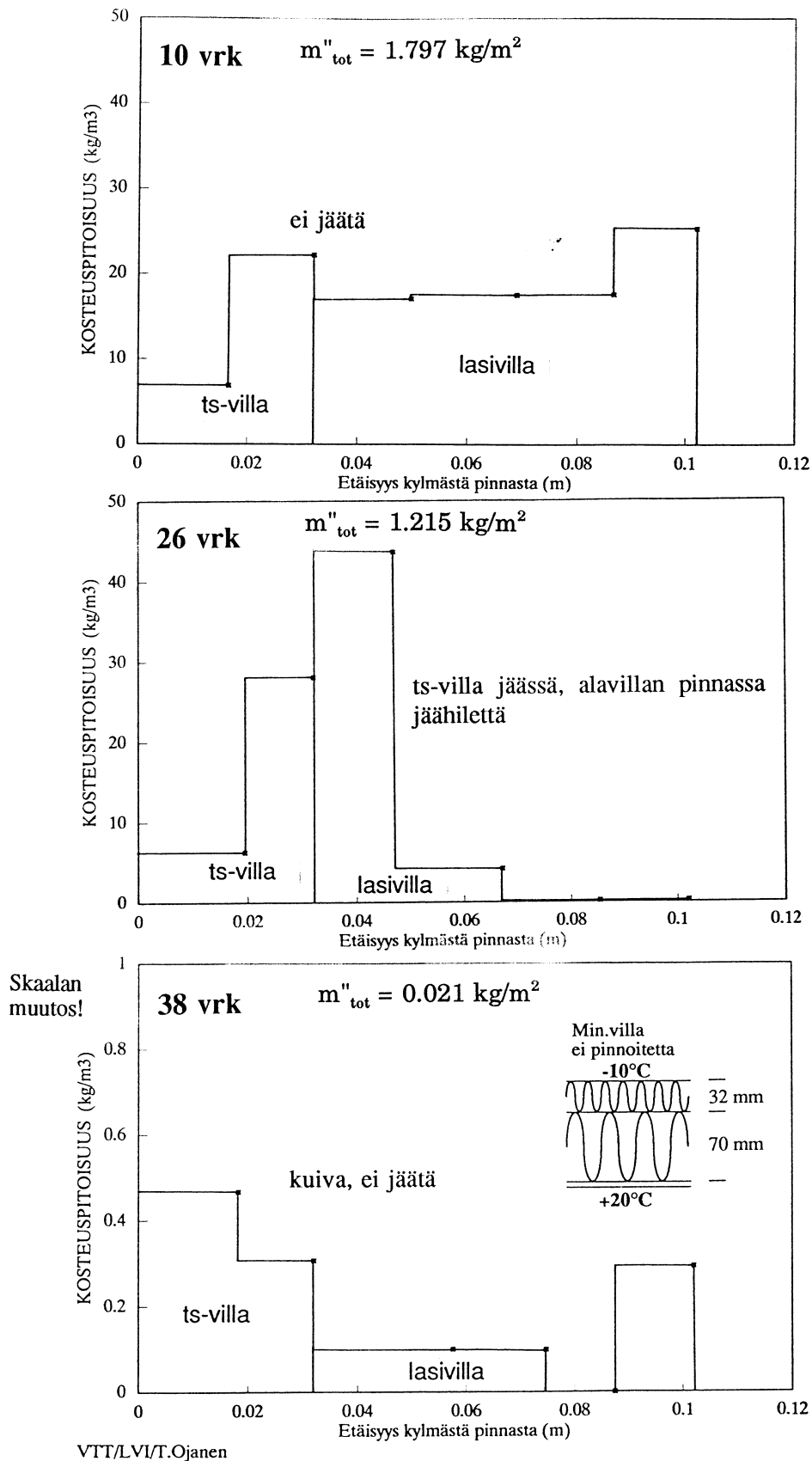
Kuva 29. Kosteusjakaumat rakenteessa #8 kokeessa +20/+3 °C.



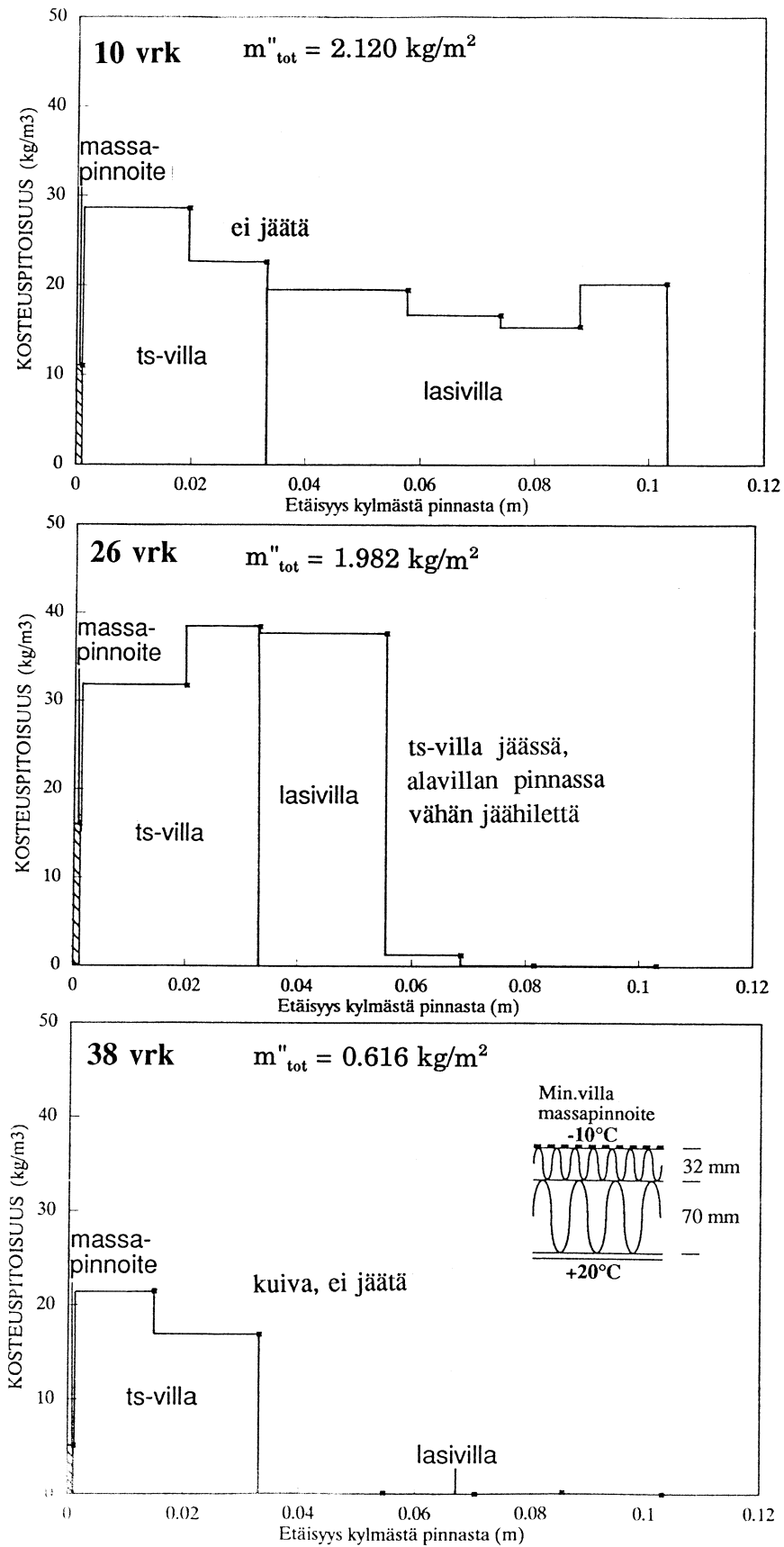
Kuva 30. Kosteusjakaumat rakenteessa #9 kokeessa +20/+3 °C.



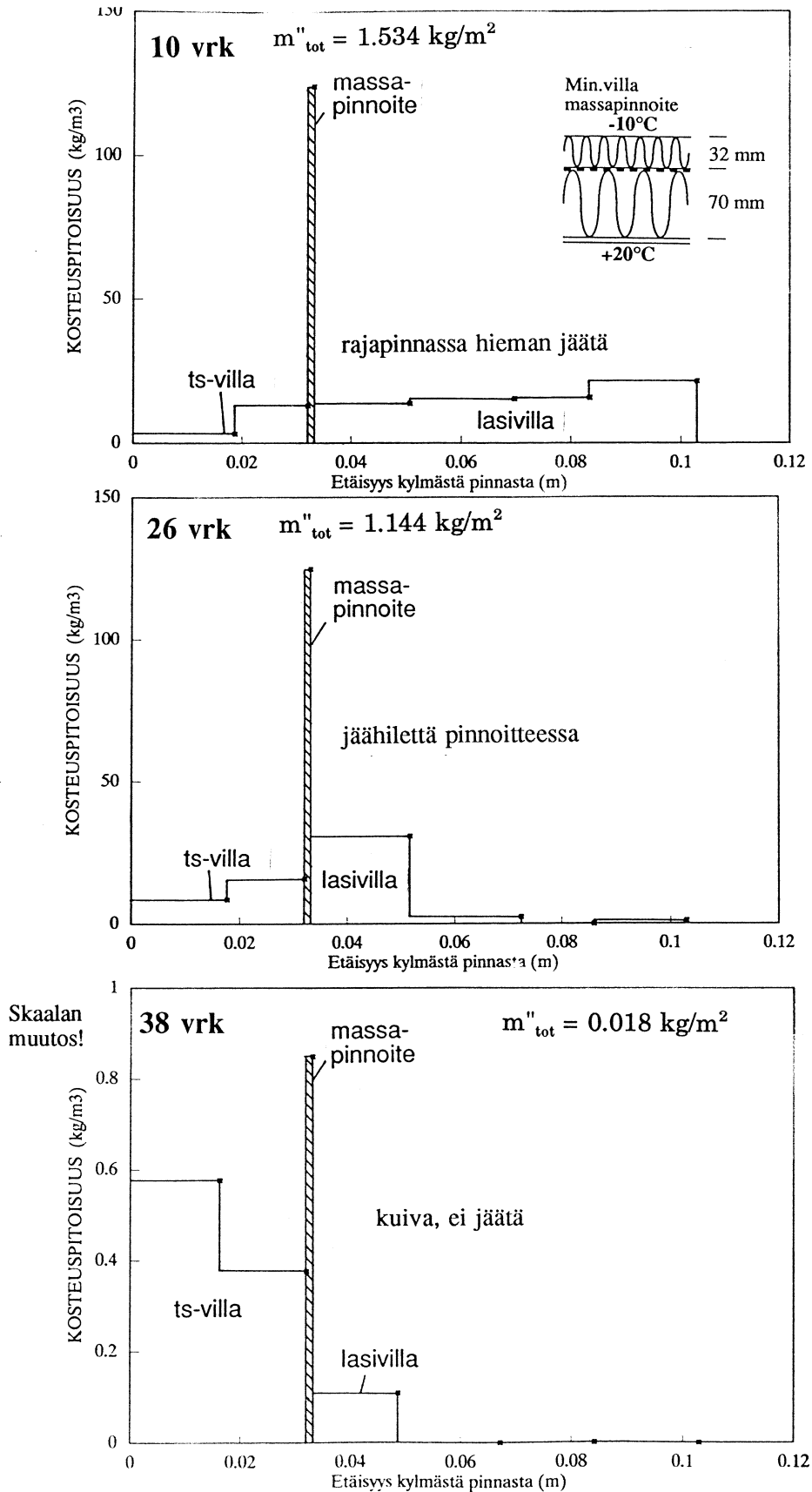
Kuva 31. Kosteusjakaumat referenssirakenteessa #10 kokeessa +20/-10 °C.



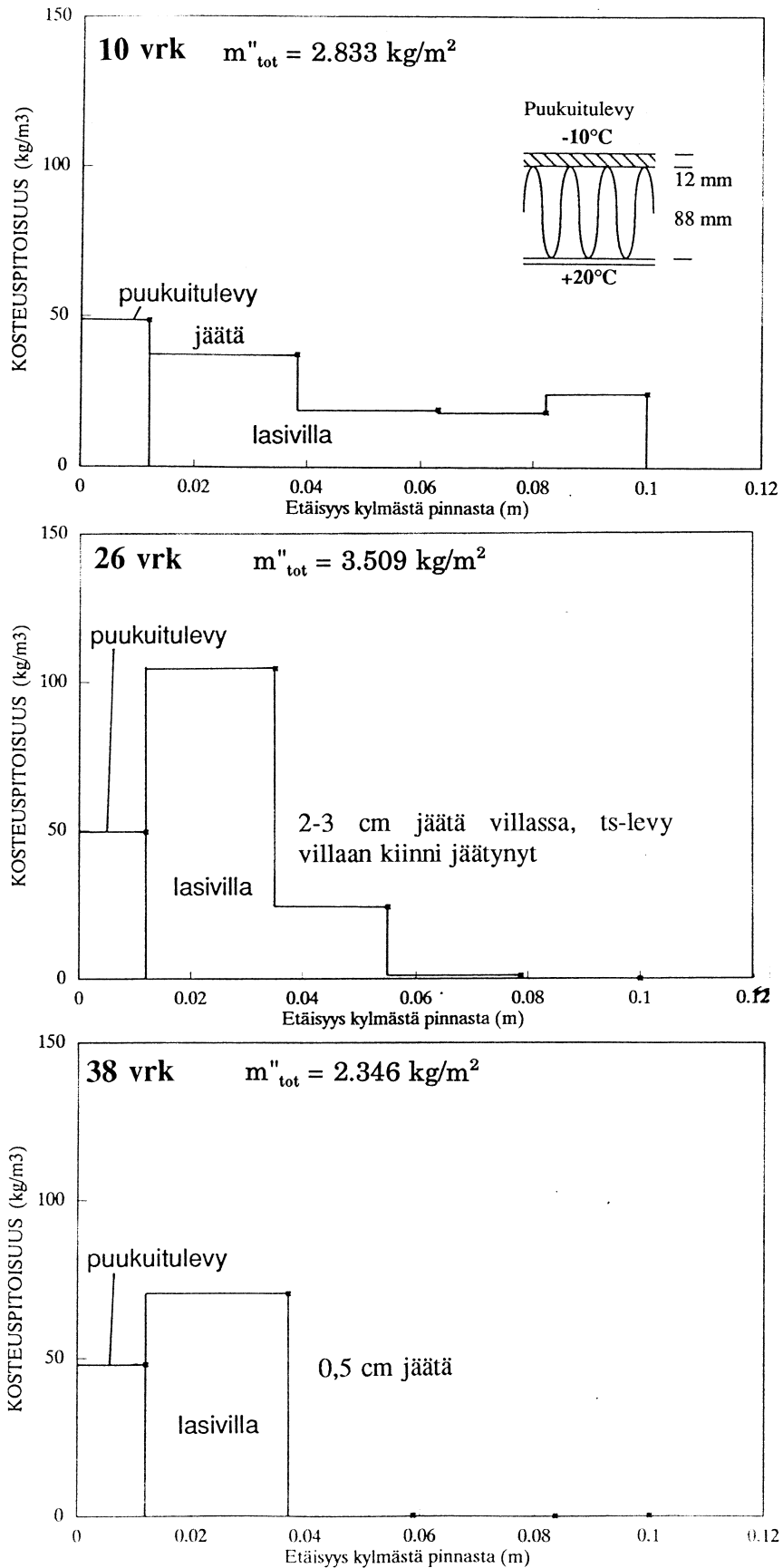
Kuva 32. Kosteusjakaumat rakenteessa #1 kokeessa +20/-10 °C.



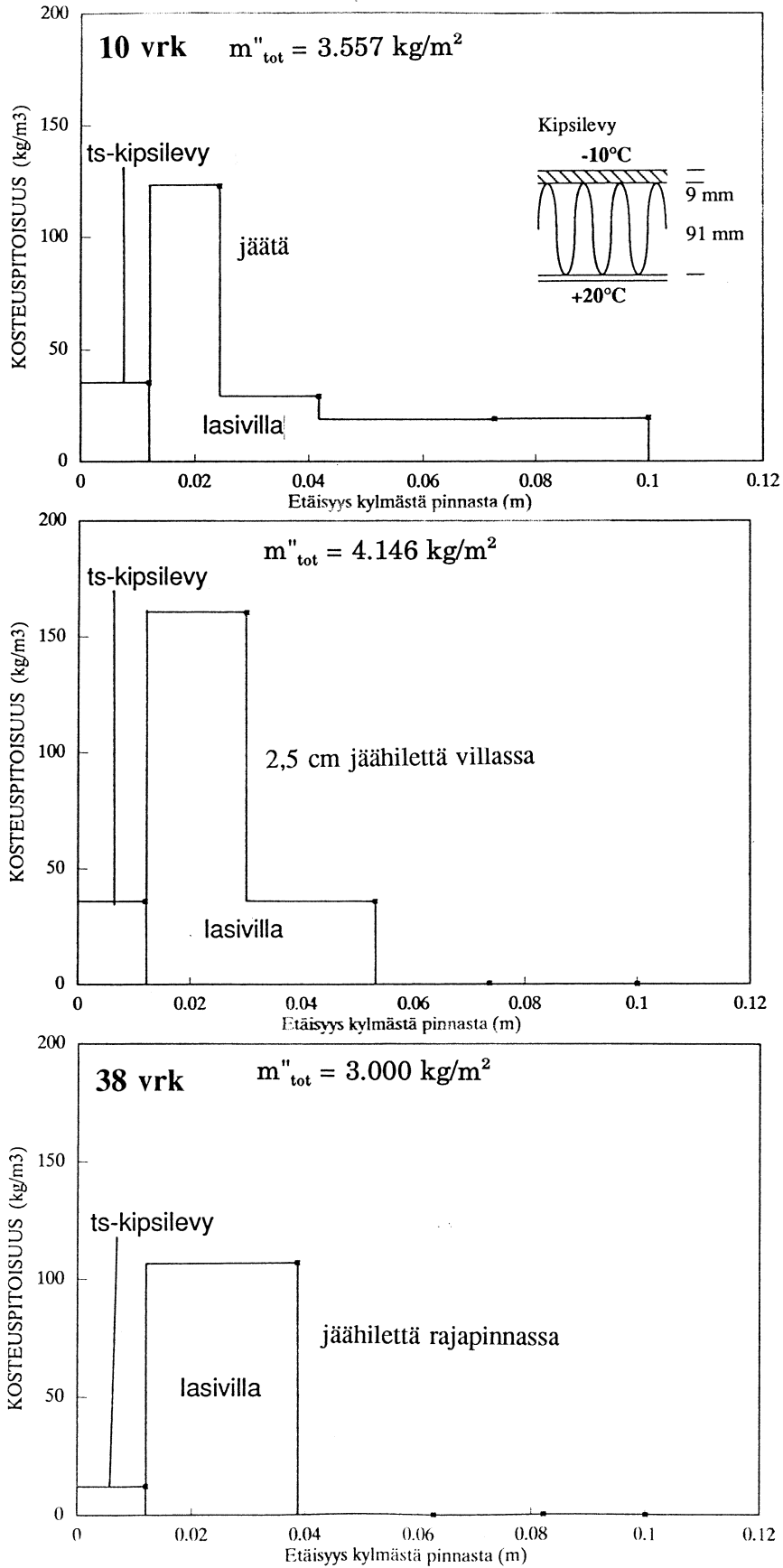
Kuva 33. Kosteusjakaumat rakenteessa #2 kokeessa +20/-10 °C.



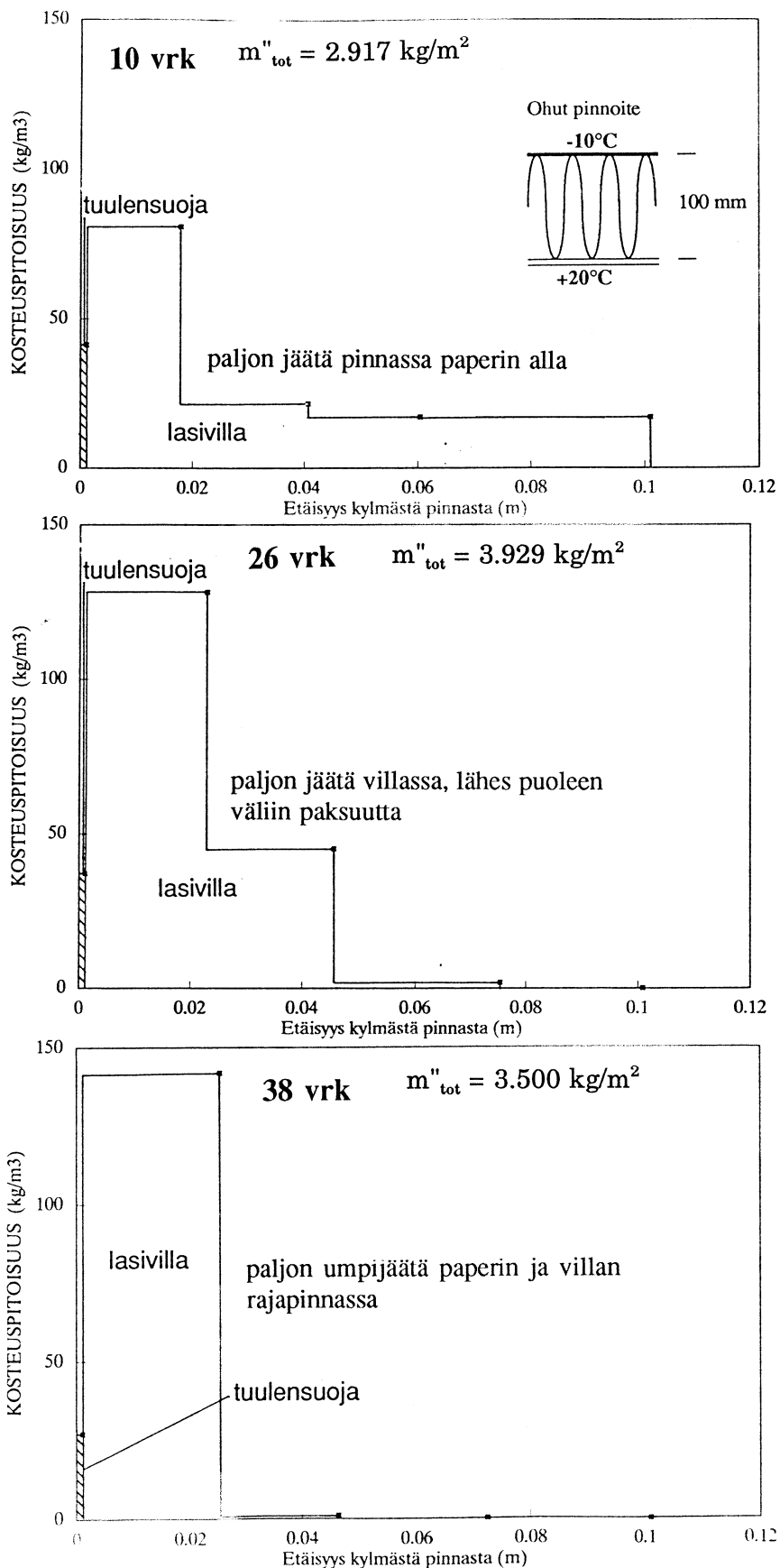
Kuva 34. Kosteusjakaumat rakenteessa #3 kokeessa +20/-10 °C.



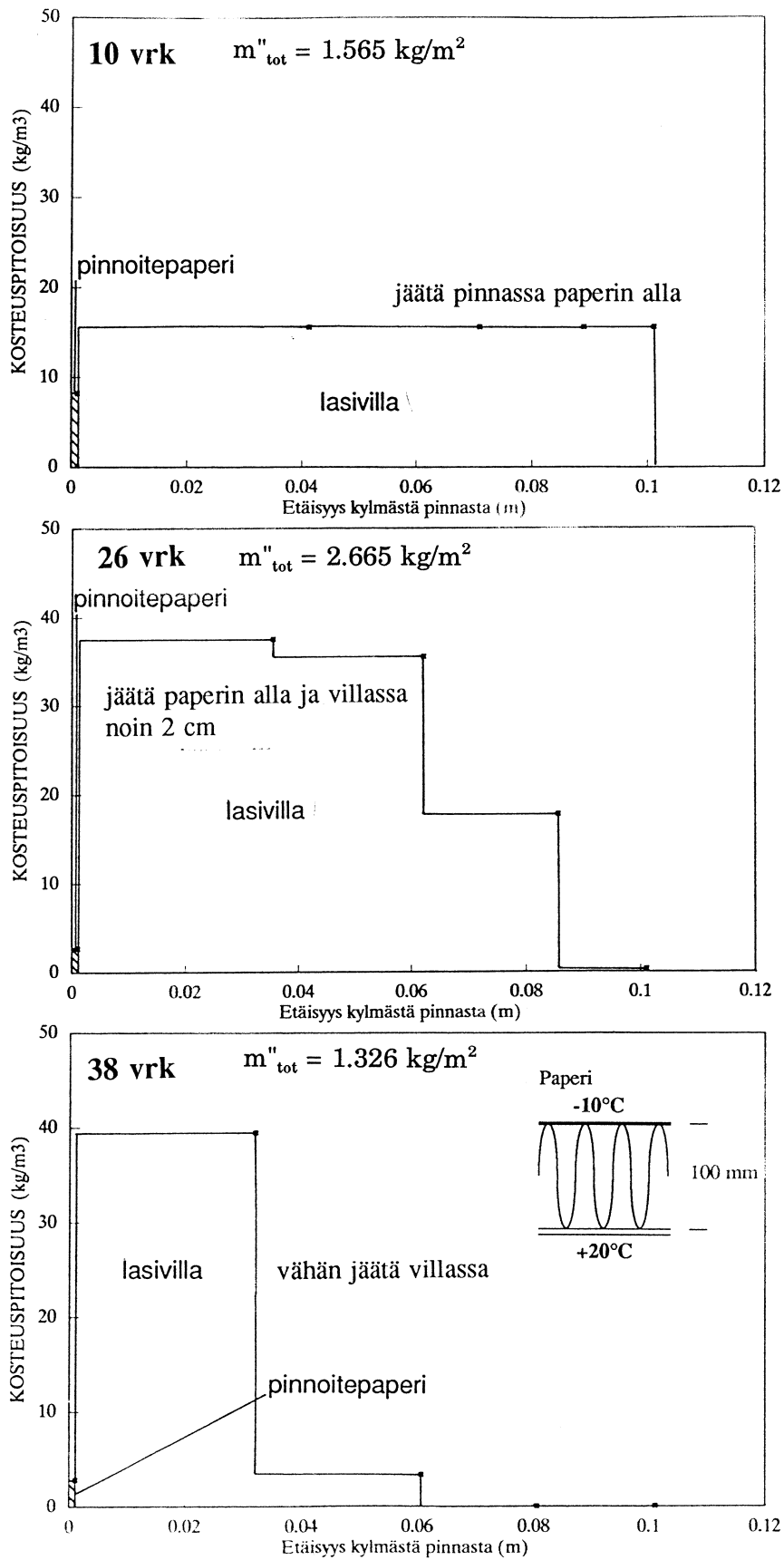
Kuva 35. Kosteusjakaumat rakenteessa #4 kokeessa +20/-10 °C.



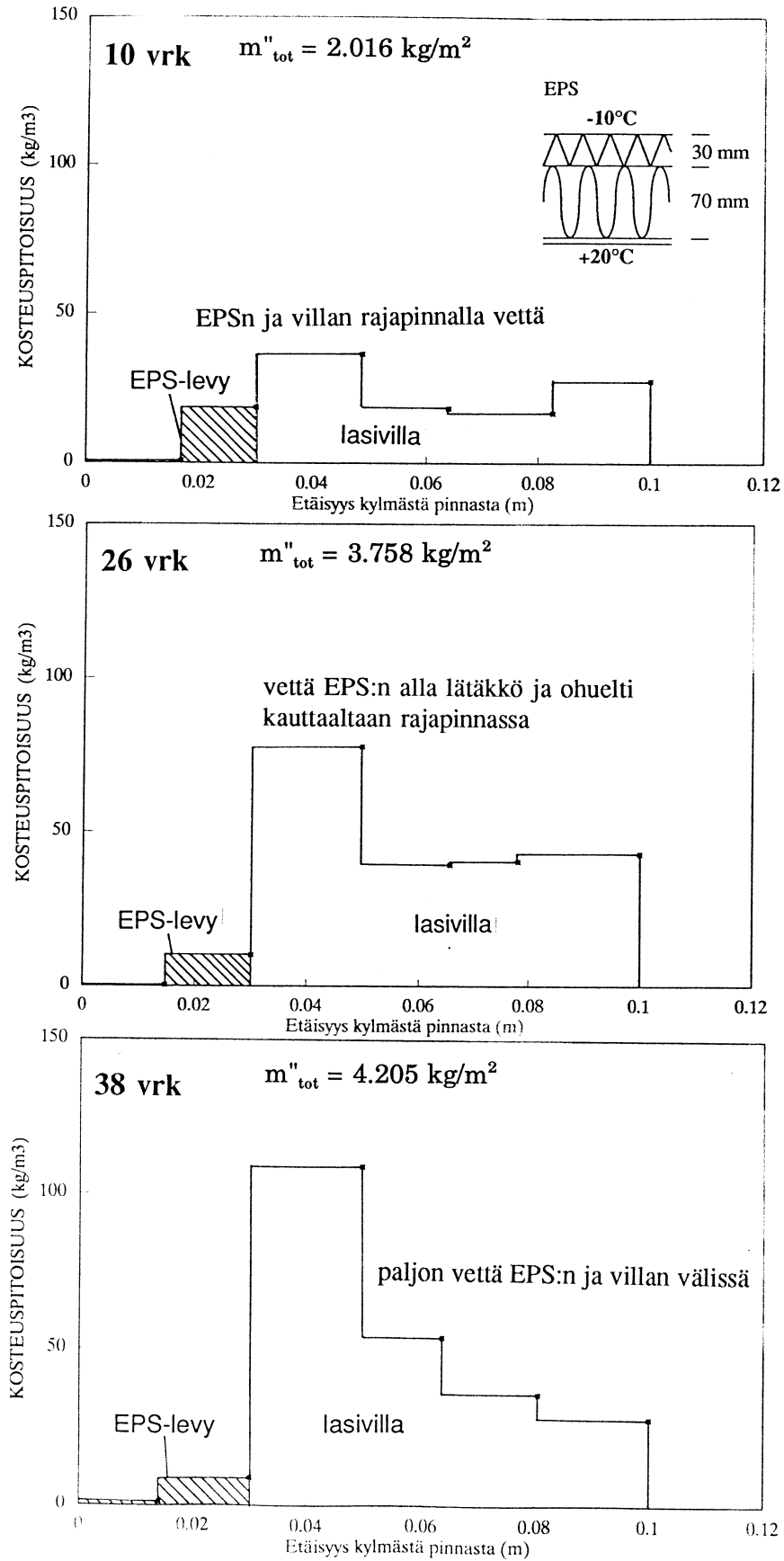
Kuva 36. Kosteusjakaumat rakenteessa #5 kokeessa +20/-10 °C.



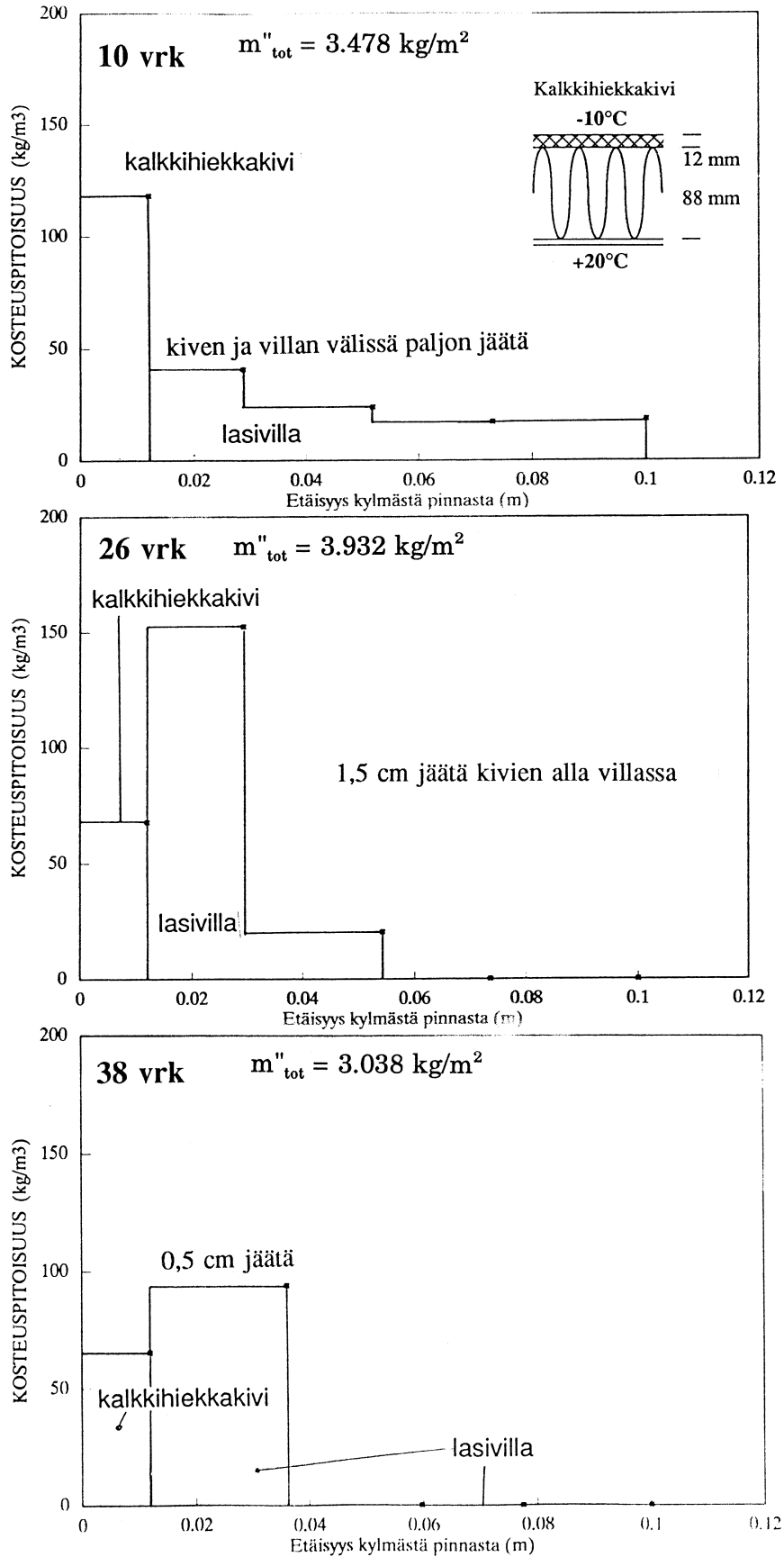
Kuva 37. Kosteusjakaumat rakenteessa #6 kokeessa +20/-10 °C.



Kuva 38. Kosteusjakaumat rakenteessa #7 kokeessa +20/-10 °C.



Kuva 39. Kosteusjakaumat rakenteessa #8 kokeessa +20/-10 °C.



Kuva 40. Kosteusjakaumat rakenteessa #9 kokeessa +20/-10 °C.

4.2 AINEOMINAISUUKSIEN JA KUIVUMISKOKEIDEN KORRELAATIO

Jotta tuulensuojan kosteudensiirto-ominaisuuksia voitaisiin käyttää tuulensuojarakenteen kosteusteknisen toimivuuden arviointiin, tulee materiaalien vesihöyrynläpäisykertoimien ja rakenteen todellisia kuivumisoloja simuloivien kokeiden osoittaa selkeä korrelaatio. Tuulensuojamateriaaleille määritettyjä vesihöyrynläpäisykertoimia (Liite 2) verrattiin luvussa 4.1 kuvattujen kuivumiskokeiden tuloksiin.

Parhaiten vertailukelpoisia ovat +20/+3 °C:ssa tehdyt kuivumiskokeet ja +5 °C:n lämpötilassa 97/75%:n suhteellisilla kosteuksilla määritetyt vesihöyrynläpäisykertoimet. Eri tuulensuojarakenteille kokeissa määritettyjen kuivumisnopeuksien ja vesihöyrynläpäisykertoimien tulisi asettua samaan järjestykseen, ts. korkean vesihöyrynläpäisykertoimen tulisi vastata rakenteen nopeaa kuivumista.

Taulukossa 16 esitetään tutkitut tuotteet järjestyksessä sen mukaan, miten nopeaa kosteuden kuivuminen niiden kautta oli materiaaleille määritettyjen vesihöyrynläpäisykertoimien ja vastaaville tuotteille tehtyjen kuivumiskokeiden perusteella. Taulukon tulokset pätevät vain tutkimuksessa käytetyille tuotteille, eivätkä siten kuvaa tuoteryhmää kokonaisuutena. Näiden tulosten perusteella ei voida asettaa tuoteryhmiä paremmuusjärjestykseen rakenteiden kuivumisen kannalta, vaan jokainen tuulensuojatuote on erikseen tutkittava.

Taulukosta nähdään, että toimintakokeiden tulokset eivät vastaa materiaaliominaisuuksien perusteella odotettuja.

Ohuen muovilaminoidun pinnoitteen (#6) vesihöyrynläpäisykerroin oli korkeampi kuin esimerkiksi massapinnoitteilla, mutta toimintakokeessa tämä tuote oli ohuista pinnoitteista selvästi höyrytiivein. Samoin kipsilevyllä mitatut vesihöyrynläpäisykertoimet antoivat paremman kuvan tuotteen vesihöyryn läpäisevyydestä kuin toimintakokeet, joissa kipsilevyn kautta tapahtuva kuivuminen oli vain hieman korkeammalla tasolla kuin ohuella pinnoitteella. Huokoisen puukuitulevyn vesihöyrynläpäisykerroin oli sama kuin villatuulensuojan massapinnoitteen, mutta käytännössä kuivuminen oli yli 30 % hitaampaa. +20/+3 °C:n kokeissa massa- ja paperipinnoitteet eivät juurikaan hidastaneet rakenteen kuivumista verrattuna ulkopinnaltaan täysin tuulelta suojaamattomaan tapaukseen, vaikka materiaaleille määritetyt vesihöyrynläpäisykertoimet poikkesivat huomattavasti toisistaan. Kuivumisnopeuden järjestys +20/-10 °C:n kokeissa oli sama kuin +20/+3 °C:n kokeissa.

Taulukko 16. Kokeissa käytettyjen tuulensuojatuotteiden kuivumisnopeuksien arvio määritettyjen vesihöyrynläpäisykertoimien ja toimintakokeiden perusteella. Tulokset pätevät vain tutkimuksessa käytettyihin tuotteisiin, eivätkä siten kuvaa koko tuoteryhmää. Tulosten perusteella ei voida asettaa eri tuoteryhmiä paremmuusjärjestyksen rakenteiden kuivumisen kannalta.

Tuulensuojatuote	Arvio kuivumisnopeudesta tuulensuojan vesihöyrynläpäisykertoimen perusteella (järjestys)	Toimintakokeissa havaittu kuivumisnopeus (järjestys)
Paperipinnoite	1.	2.
Muovilaminoitu pinnoite	2.	5.
Kipsilevy	3.	4.
Massapinta	4.	1.
Huokoinen puukuitulevy	5.	3.

Kuivumiskokeissa tuulensuojan sisäpinta oli lähes kaiken aikaa kyllästystilassa. On ilmeistä, että keskimäärin 86 %:n suhteellisessa kosteudessa määritetyt vesihöyrynläpäisykertoimet poikkeavat huomattavasti kyllästysalueen vastaavista arvoista. Erityisesti tämä korostuu ohuilla pinnoitteilla, joiden suhteellinen kosteus oli koetilanteessa kauttaaltaan lähellä rajapinnan arvoa 100 % RH. Puukuitu- ja kipsilevyllä kerroksen kosteusjakaumat olivat ohuita pinnoitteita suuremmat ja kosteuden siirtyminen kerroksen läpi vastasi paremmin niitä oloja, joissa vesihöyrynläpäisykertoimet oli määritetty (97/75 %). Ainakaan ohuille pinnoitteille määritettyjen vesihöyrynläpäisykertoimien vertailu toimintakokeiden tuloksiin ei siten ole perusteltua.

On todennäköistä, että erot eri materiaalien kostean pään (noin 100 % RH) vesihöyrynläpäisykertoimien arvoissa ovat suuret. Lisäksi eroa aiheuttaa se, että lämpötilagradienttioloissa kaasufaasin ja kapillaarisen kosteudensiirron suhteet muuttuvat kuppikokeiden vakiolämpötilaan verrattuna. Kuppikokeet antavat tulokseksi ko. mittausoloissa tapahtuvan kokonaiskosteudensiirron, mikä voi sisältää myös kapillaarista kosteuden siirtymistä. Vesihöyrynläpäisykertoimille +5 °C lämpötilassa mitatut arvot eivät myöskään päde jäätymisalueella, missä huurteen ja jään muodostuminen materiaaleihin ja rajapintaan vaikuttaa kosteuden siirtymiseen.

Tulosten perusteella on tarve kehittää erityisesti ohuille pinnoitteille soveltuva vesihöyrynläpäisykertoimen määrittäminen menetelmä, joka soveltuu lähellä kyllästystilaa tehtäviin määrittäksiin. Tuulensuojan kosteustekninen toimivuus kylmässä ilmastossa

edellyttää, että kosteus siirtyy tuulensuojan läpi pääasiassa diffuusina virtauksena, jolloin rakenteiden kuivuminen myös jäätymisalueella on mahdollista. Vesihöyrynläpäisykerroin tulisi voida määrittää puhtaalle diffuusiiovirralle toisin kuin esimerkiksi ns. kuppikokeissa, joissa mahdollinen kapillaarinen kosteusvirtaus sisältyi tuloksiin.

Koska tuulensuojalle perinteisin kuppikokein määritettyjen vesihöyrynläpäisykertoimien ja todellisissa käyttöoloissa tapahtuvan rakenteen kuivumisella välillä ei ole yhteyttä, ei tuulensuojaukselle voida esittää yksiselitteisiä vaatimuksia näin määritettyjä materiaalin vesihöyrynläpäisykertoimia käyttäen.

Tutkimuksessa tehtyjen kuivumiskokeiden perusteella voidaan kohtuullisen hyvänä kuivumisen massavirran tiheytenä pitää $+20/-10$ °C:n oloissa arvoa $1 \cdot 10^{-6}$ kg/(m²s) (kuva 20). Ulkopuolen suhteellinen kosteus oli tuolloin noin 60 % - 70%. Olettaen kylläisen tuulensuojan sisäpinnan lämpötilaksi pinnoitetyyppisellä materiaalilla noin 1 °C ulkoilman lämpötilaa korkeampi arvo saadaan tuulensuojan todelliseksi vesihöyrynläpäisykertoimeksi näissä oloissa noin $8 - 10 \cdot 10^{-9}$ kg/(s·m²·Pa). Levymäisillä tuulensuojilla lämpötilaero tuulensuojan sisäpinnan ja ulkoilman välillä on suurempi (2 - 2,5 °C), jolloin vesihöyrynläpäisykertoimeksi ko. massavirrantiheydellä saadaan noin $6 - 8 \cdot 10^{-9}$ kg/(s·m²·Pa). Suositeltavaksi pelkkää kaasufaasin diffuusiota kuvaavan vesihöyrynläpäisykertoimen vähimmäistasoksi voidaan valita tästä selvästi pienempi arvo, esimerkiksi $2 - 3 \cdot 10^{-9}$ kg/(s·m²·Pa).

Edellä esitettyjä tunnuslukuja ei kuitenkaan voida määrittää perinteisin kuppikoemenetelmin. Paras keino todeta tuulensuojan kosteusteknisen toimivuuden taso on tehdä tässä luvussa esitetyn tyyppinen koe, jonka tulosten perusteella eri tuulensuojamateriaalien toimivuutta todellisissa käyttöoloissa voidaan vertailla ja arvioida.

4.3 RAKENTEIDEN TÄYSMITTAKAAVAISET KUIVUMISKOKEET

Luvussa 4.1 kuvatuissa kuivumiskokeissa selvitettiin 1-dimensioisen kosteudensiirron vaikutuksia eri tuulensuojarakenteiden kosteustekniseen toimintaan erittäin vaikeissa kosteusoloissa. Kokeista puuttui konvektion ja maan vetovoiman vaikutus kosteuden jakautumiseen rakenteissa.

Laboratorio-oloissa tehtyjen täysmittakaavakokeiden tarkoituksena oli täydentää aiemmin tehtyjä kokeita. Tavoitteena oli selvittää kosteuden kuivuminen rakenteesta 2-dimensioisessa tapauksessa ja erityisesti:

- 1) luonnollisen konvektion vaikutus rakenteen kosteusjakaumaan pystysuunnassa sekä
- 2) pakkastilanteessa tuulensuojaan, lämmöneristeeseen ja näiden rajapinnalle jäätyneen kosteuden sulamisen vaikutukset rakenteen kosteusjakaumaan:
 - säilyykö kosteusjakauma saman muotoisena kuin jäätymisvaiheessa, vai tasoittuvatko kosteuspitoisuudet,
 - imeytyykö rajapinnalla sulanut kosteus materiaalikerrokseen vai valuuko se mahdollisesti rajapintaa pitkin alas rakenteen pohjalle,
 - vaikuttaako maan vetovoima kosteuden jakautumiseen materiaalikerroksissa, erityisesti villalämmöneristeessä sekä
 - miten kosteusjakauma vaikuttaa rakenteen kuivumiseen.

Tuloksiin vaikuttavat olennaisesti tuulensuojamateriaalin kosteuden siirto- ja varastoisominaisuudet sekä tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnan ominaisuudet.

Voimakkaat paikalliset kosteuskertymät eivät ole toivottavia, sillä ne ovat riski rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta ja voivat johtaa jopa rakenteiden vaurioitumiseen. Hyvin toimivassa rakenteessa kosteusjakauma on mahdollisimman tasainen eri lämpötilaoloissa, jolloin rakenteen kuivuminen tuulensuojan kautta on tehokkainta.

Kokeissa lähes täyskorkeisiin pystyrakenteisiin syötettiin lämpimältä pinnalta kosteutta. Syötettävä kosteusvirta pyrittiin pitämään mahdollisimman tasaisesti jakautuneena rakenteen otsapinta-alaa kohden ja lisäksi se pyrittiin pitämään koejakson aikana samansuuruisena kaikille tutkittaville rakenteille. Kosteuden jakautumista rakenteessa sekä sen kuivumista pakkasjakson ja sulamisvaiheen aikana seurattiin hajottamalla ja punnitsemalla rakenteet.

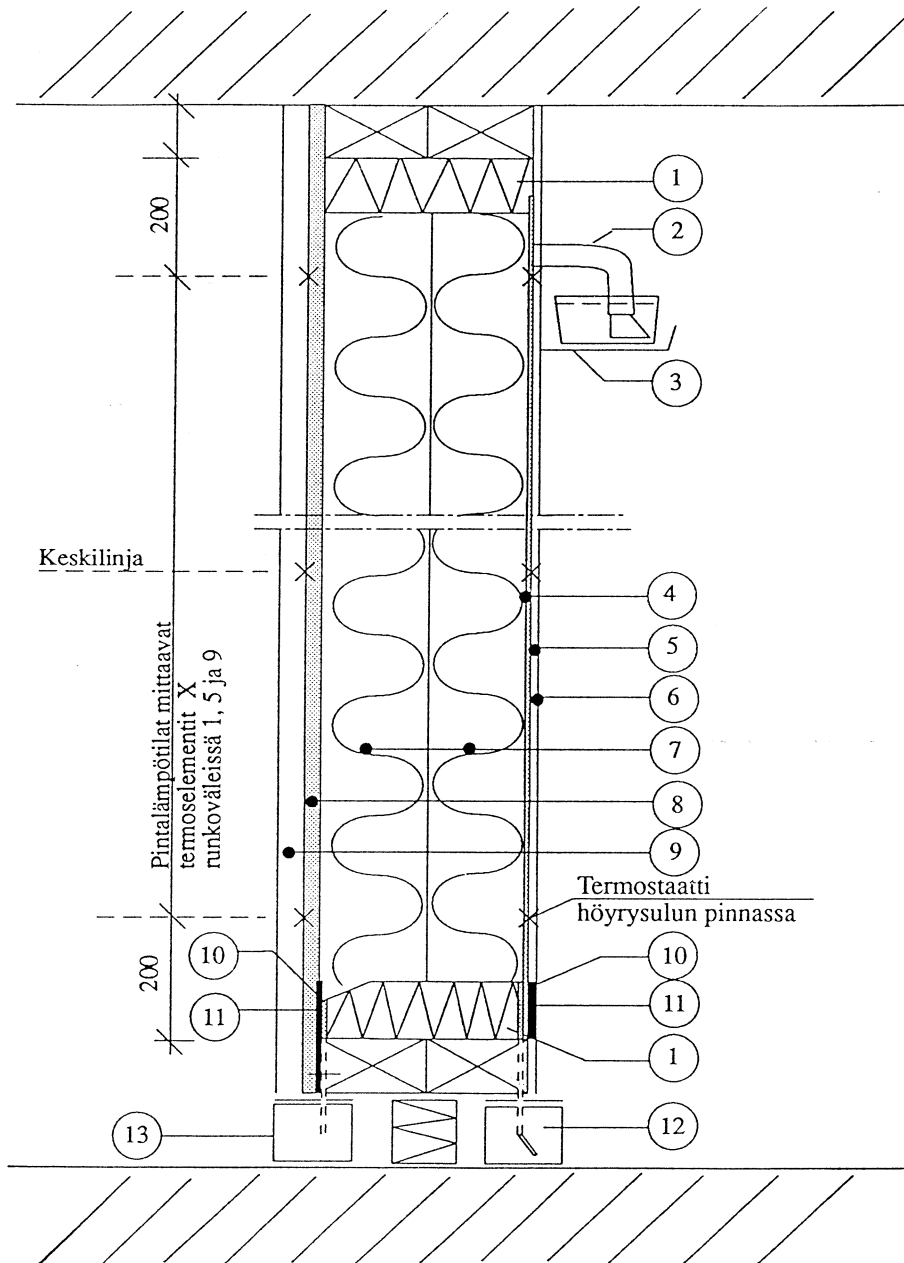
4.3.1 Kokeiden toteutus

Kokeet tehtiin kuudelle eri tuulensuojarakenteelle, kaksi peräkkäistä sarjaa kolmelle koerakenteelle kerrallaan. Kutakin koerakennetta tehtiin kolme rinnakkaista, jotka voitiin purkaa muista erillään mahdollisimman vähäisellä koetilanteen häirinnällä.

Rakenteet

Seinät tehtiin noin 2,2 m korkeiksi. Rungot tehtiin suulakepuristetusta XPS:stä, millä pyritään minimoimaan sivusuuntaiset lämpötila- ja kosteusgradientit. Seinän runkoväli oli 335 mm, mikä oli riittävä leveys, jotta kylmäsiltojen aiheuttama 3-

dimensioinen vaikutus oli lähes täysin eliminoitu. Kuvassa 41 esitetään seinän periaatteellinen rakenne ja kostutusjärjestelyt.



- | | |
|--|---|
| 1. Runko, suulakepuristettu polystyreeni | 9. Tuulensuojan puristustuki
(runkotolppien kohdalla) |
| 2. Veden johtamisletku, sisällä paperikaista | 10. Paperitäytteinen vesitila |
| 3. Veden syöttöastia | 11. Vesitilan muodostava muovilevy |
| 4. Kosteutta sitova paperikerros | 12. Ylivuotoastia |
| 5. Höyrösulku, muovi | 13. Sulamisvedet keräävä astia |
| 6. Sisäverhouslevy, lastulevy 9 mm | |
| 7. Lasivilla 2 x 100 mm | |
| 8. tutkittava tuulensuoja
(massa kiinnitys runkoon) | |

Kuva 41. Koeseinän periaatteellinen rakenne ja kostutusjärjestelyt.

Seinän lämmöneriste oli 200 mm paksua lasivillaa (noin 20 kg/m³), joka asennettiin kahdessa 100 mm:n kerroksessa. Lämpimältä puolelta eristettä rajoitti kostutuksessa käytetty sellukartonki (n. 5 mm paksu) ja höyrynsulku. Lämmöneristeen kylmälle pinnalle asennettiin tutkittava tuulensuoja. Myös villatuulensuojia käytettäessä rakenteen kokonaiseristepaksuus pidettiin 200 mm:nä, jolloin rakenteessa oli 50 mm tuulensuojavillaa ja 150 mm lasivillaeristettä.

Valittujen koeseinärakenteiden tuulensuojaustavat olivat:

- 1) **Massapintainen tuulensuojavilla (massa ulkopinnalla)**
- 2) **Lämmöneristevillaan kuumasaumattu ohut paperi**
- 3) **Tuulensuojakipsilevy (9 mm)**
- 4) **Huokoinen puukuitulevy (12 mm)**
- 5) **Muovilaminoitu pinnoite (asennettuna villan ulkopintaan)**
- 6) **Käännetty tuulensuoja, jossa muovilaminoitu pinnoite on kylmältä pinnalta 50 mm paksun villan sisäpuolella (50 mm villaa + ts + 150 mm villaa). Muovilaminoidusta pinnoitteesta käytetään seuraavassa myös nimikettä ohut pinnoite.**

Tuulensuojan ja villan rajapinnalle, rakenteen alaosaan asennettiin kapeahko kerros sellukarttonkia, johon rajapintaa pitkin mahdollisesti valuva kosteus imeytyi. Tästä kosteus johdettiin edelleen ulkopuoliseen keräilyastiaan, jolloin kunkin rakenteen mahdollinen kosteusvaluma voitiin määrittää punnitukseen.

Seinien kostutus

Tutkittaviin rakenteisiin ja niiden rinnakkaisiin seiniin tuli saada mahdollisimman samansuuruiset, jatkuvat kosteusvirrat, jotta tapaukset olivat vertailukelpoiset. Sekä yläpäästä syötetyn että alapäästä pois valuneen veden määrät kirjattiin seinään siirtyneen kokonaiskosteuden selvittämiseksi.

Kosteus tuotiin rakenteeseen sen lämpimälle pinnalle, höyrynsulun ja lämmöneristeen välissä olevaan sellukartonkikerrokseen mahdollisimman tasan pystysuunnassa jakautuneena. Tämä toteutettiin kosteuden jatkuvan imeytyksen periaatteella rakenteen yläosan kautta. Mahdollinen rakenteen pohjalle kostutuskerroksen läpi valunut vesi kerättiin siten, että se ei päässyt valumaan rakenteen kylmää pintaa kohden ja sen määrää seurattiin päivittäisin punnitukseen. Rakenteittain vaihtelevat, rakenteisiin jääneet nettokosteusmäärät tasoitettiin ruiskuttamalla ajoittain vähemmän kosteutta imeneiden seinien kostutuskerrokseen puuttuvat vesimäärät.

Koeolosuhteet

Lämpimän puolen lämpötila pidettiin vakiona, noin +27 °C:na. Korkeahko lämpötila valittiin, jotta kosteuden siirtyminen rakenteeseen olisi nopeaa, ja kokeet olisivat tehtävissä kohtuullisessa ajassa. Kokeet aloitettiin kylmän puolen lämpötilalla -10°C, missä koetta jatkettiin noin kolmen viikon ajan, jolloin riittävä kosteusmäärä oli jäänyt rakenteen kylmän pinnan lähelle. Vuorokautinen kosteuden siirtyminen rakenteen eristekerrokseen oli noin 160 .. 170 g/m².

Rakenteiden kostutus jatkui vain pakkasjakson ajan. Kolmen viikon kuluttua kokeen alusta kylmän puolen ilmalämpötilaa nostettiin +3 °C:seen, missä oloissa koetta jatkettiin ilman kosteuden syöttöä vielä noin kaksi viikkoa. Taulukossa 17 esitetään seinärakenteiden lämpötilaolosuhteet ja purkuajankohdat.

Taulukko 17. Seinärakenteiden lämpötilaolot, syötetty kosteusmäärä ja kosteusjakaumien määritysajankohdat.

RAKENTEEN PURKU	LÄMPÖTILA- OLOT	KOSTEUDEN SYÖTTÖ	AIKA KOKEEN ALUSTA
I PURKU	+27 / -10 °C	3,2 - 3,6 kg	20 vrk
II PURKU	+27 / +3 °C	0	22 "
III PURKU	+27 / +3 °C	0	35 "

Kokeissa määritettävät tekijät

Rakenteisiin syötettyjen ja rakenteesta pois valuneiden vesimäärien lisäksi seurattiin ilmatilojen ja valittujen pintojen (esim. käännetyin tuulensuojan ja eristeen rajapinnan) lämpötiloja. Lisäksi seurattiin kylmän puolen ilman suhteellista kosteutta.

Rakenteiden kosteusjakaumat selvitettiin hajottamalla kustakin rakennetapauksesta yksi rinnakkaisseinä kerrallaan. Rakenteen tuulensuojan ja lämmöneristeen pystysuuntainen kosteusjakauma määritettiin kuivaus/punnitusmenetelmällä. Samoin määritettiin lämpimän pinnan kostutuskerroksessa (sellukartonki) jäljellä oleva kosteus. Mahdollinen rajapinnan kautta alas valuneen veden määrä tarkennettiin rakenteen kylmän puolen alaosan sellukartonkikerroksen punnitukseen seinän hajotuksen yhteydessä.

Rakenteiden ensimmäinen osa purettiin pakkasjakson lopulla ja seuraava pian sulamisvaiheen alettua, noin 2 päivää lämpötilamuutoksen jälkeen. Viimeiset seinäosat purettiin noin 2 viikkoa tämän jälkeen.

4.3.2 Tulosten tarkastelu

Luonnollisen konvektion vaikutus kosteusjakaumaan näkyi selvimmin pakkaskauden jälkeen purettujen seinäosien tuloksissa. Tuulensuojan kyky selviytyä voimakkaasta kosteusrasituksesta sekä nestemäisen veden siirtyminen rakenteissa näkyy sulamisvaiheen kosteusjakaumista.

Koko rakenteen kosteustekninen toimivuus

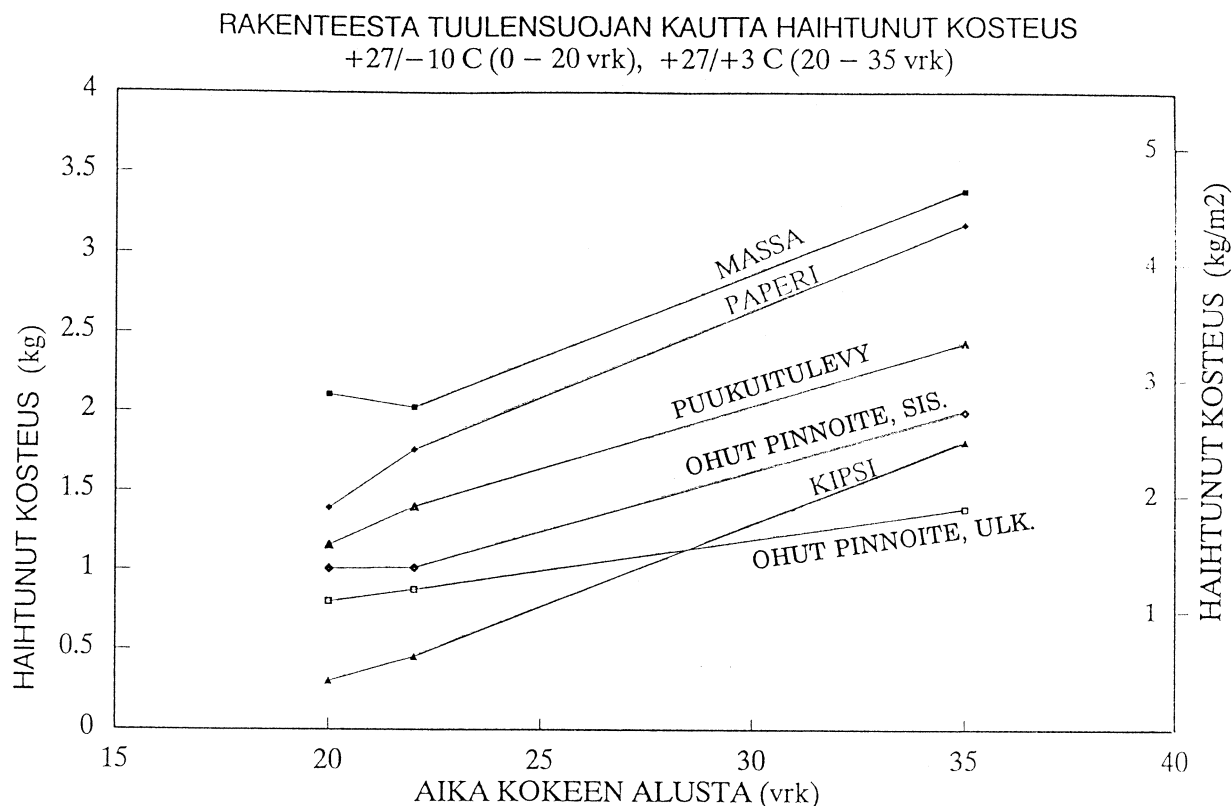
Rakenteisiin syötettiin 3,2 - 3,6 kg kosteutta kokeen 20 ensimmäisen päivän pakkasjakson aikana. Osa syötetystä kosteudesta haihtui rakenteesta jo pakkaskaudella. Pienekö osa kosteudesta oli vielä kahdessa ensimmäisessä purkuvaiheessa sitoutunut lämpimän pinnan sellukartonkikerrokseen. Rakenteeseen sitoutunut kosteus jakautui villakerroksien kosteudeksi ja tuulensuojan kosteudeksi. Ohuiden tuulensuojien rakenteissa lähes kaikki rakennekosteus oli sitoutunut villakerrokseen.

Rakenteista tuulensuojan läpi pakkasjakson ja $T > 0$ °C jaksojen aikana kuivuneet vesimäärät esitetään taulukossa 18 ja kuvassa 42.

Tulokset vahvistavat aiemmin tehtyjen 1-dimensioisten kuivumiskokeiden tuloksia. Rakenne kuivui parhaiten, kun tuulensuojana oli **massapintainen** villatuulensuoja. Pakkasjakson aikana myös **paperipintaisen villan** läpi tapahtui kosteuden huomattavaa kuivumista.

Taulukko 18. Mittaustuloksista määritetyt kuivuneen kosteuden määrät kokeen pakkasjakson (20 vrk) ja sen jälkeisen jakson (20 - 35 vrk) aikana.

Rakenne	Kuivunut kosteus- määrä pakkasjakson aikana kg	Kuivunut kosteus- määrä $T > 0$ °C jak- son aikana kg
Massapintainen villatuulensuoja	2,1	1,3
Paperipinnoite	1,4	1,75
Huokoinen puukuitulevy	1,15	1,2
Muovilaminoitu pinnoite eristeen sisällä	1,0	1,0
Muovilaminoitu pinnoite ulkopinnalla	0,8	0,6
Kipsilevytuulensuoja	0,3	1,5



Kuva 42. Täysmittakaavaisissa seinäkokeissa tuulensuojan kautta haihtuneet kosteusmäärät ajan funktiona. Kostutus ja pakkasjakso päättyi 20 vrk:n kuluttua kokeen alusta.

Rakenteeseen, jossa oli **kipsilevytuulensuoja**, tiivistyi eniten vettä pakkasjakson aikana. Kipsilevyn kosteuspitoisuus säilyi korkeana kaikissa koetilanteissa, ja sen kosteuskapasiteetti osaltaan pienensi lämmöneristeeseen varastoitunutta kosteusmäärää, joka pakkasjakson lopulla oli vain hieman korkeampi kuin paperipintaisessa villassa. Kokeen lopussa kipsilevyn ja villakerroksen kosteusmäärät olivat jokseenkin samat.

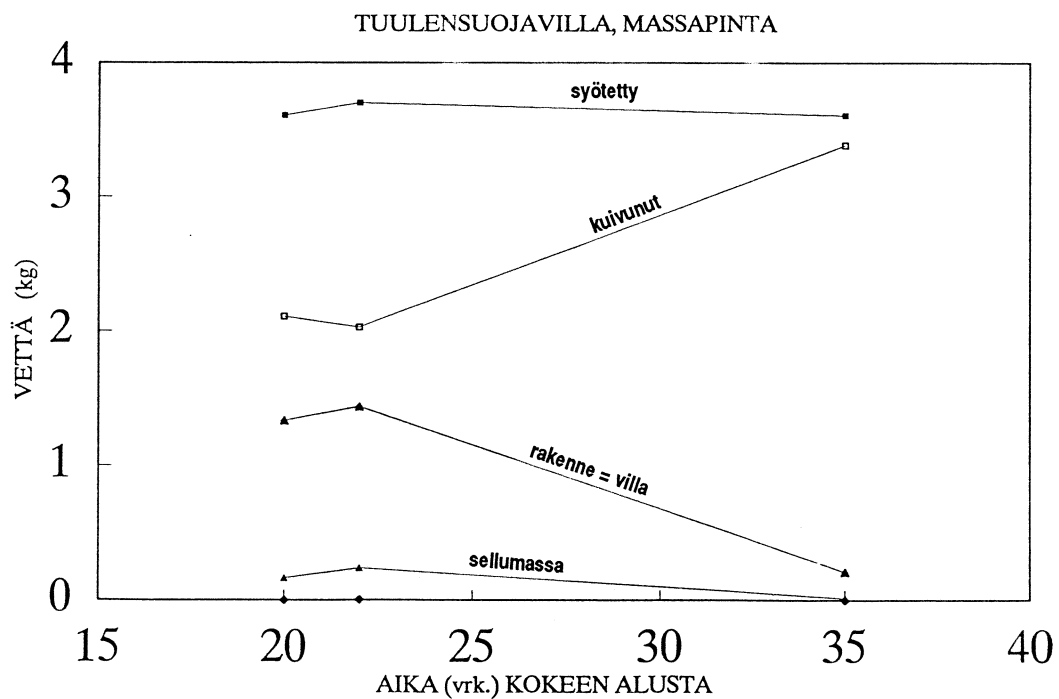
Huokoinen puukuitulevy toimi kipsilevyn tavoin kosteuskapasiteettina. Kuivuminen sen läpi oli pakkasjakson aikana kipsilevyä selvästi parempi. Lämpötilassa $T > 0^{\circ}\text{C}$ oli kuivuminen levymäisten tuulensuojien läpi samaa suuruusluokkaa.

Kun tuulensuojana oli **muovilaminoitu pinnoite lämmöneristeen ulkopinnalla**, kuivui pakkasjakson aikana rakenteesta noin 0,8 kg vettä. **Käännetyn tuulensuojan** tapauksessa rakenteen kuivuminen oli pakkasjakson aikana noin 25 % tehokkaampaa kuin tapauksessa, jossa sama muovilaminoitu pinnoite oli asennettu ulkopinnalle.

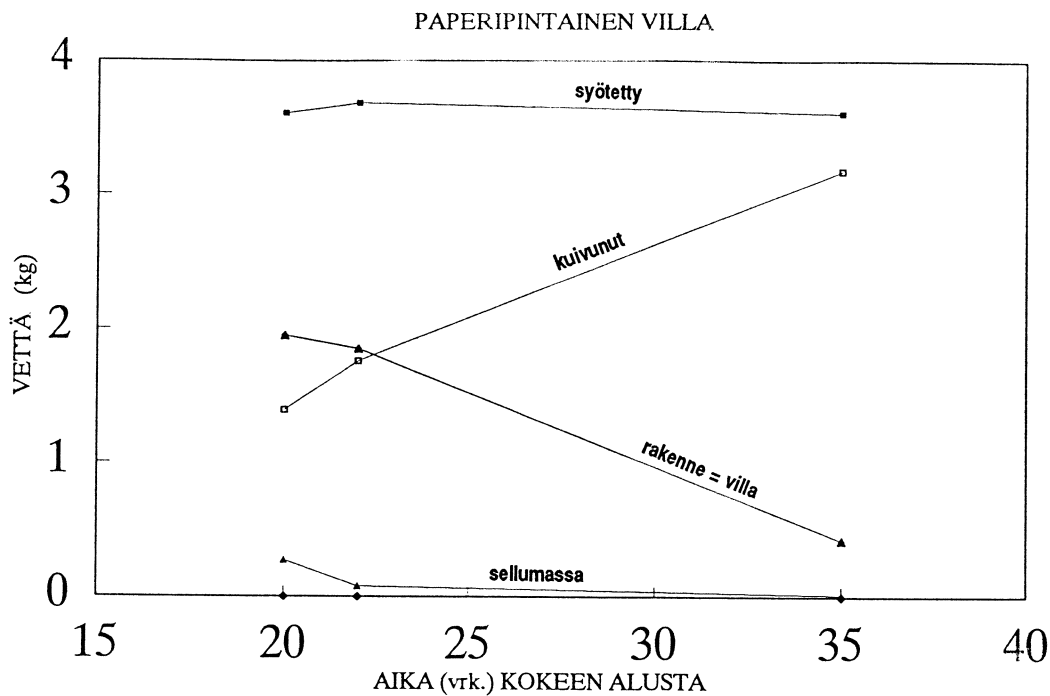
Kuvasta 42 näkyy parhaiten rakenteiden kuivuminen eri tuulensuojien kautta. Kun ulkopuolen lämpötila nostettiin +3 °C:seen, kuivuivat rakenteet, joissa oli massa- tai paperipintainen tai kipsilevytuulensuoja jokseenkin yhtä tehokkaasti. Varsinkin massapintaisen tuulensuojarakenteen alaosa oli ennen kokeen loppua kuitenkin jokseenkin kuivunut, mikä vaikutti ko. tuulensuojalle saatuun kuivumisnopeuteen.

Kuitulevyn ja lämmöneristeen sisään vedetyn ohuen pinnoitteen kuivumisnopeudet olivat jakson (20 - 35 vrk) aikana jokseenkin samat. Kun muovilaminoitu pinnoite oli lämmöneristeen ulkopinnalla, oli kuivumisnopeus em. tapauksia lähes puolet heikompaa.

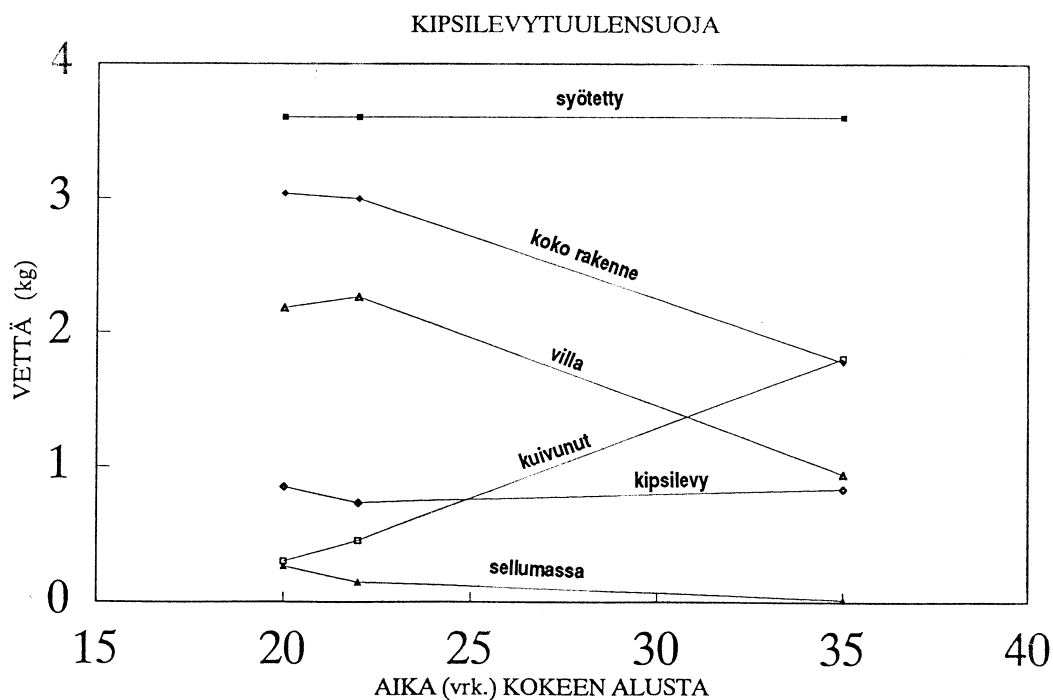
Kuvissa 43 - 48 esitetään rakenteisiin syötetyt kosteusmäärät, purkutilanteissa määritetyt eri materiaalikerrosten ja koko rakenteen kosteusmäärät sekä näistä lasketut, rakenteista kuivuneen kosteuden määrät. Kosteusmäärät esitetään ajan funktiona kokeen alusta, jolloin kulmakerroin vastaa kosteuden massavirtaa.



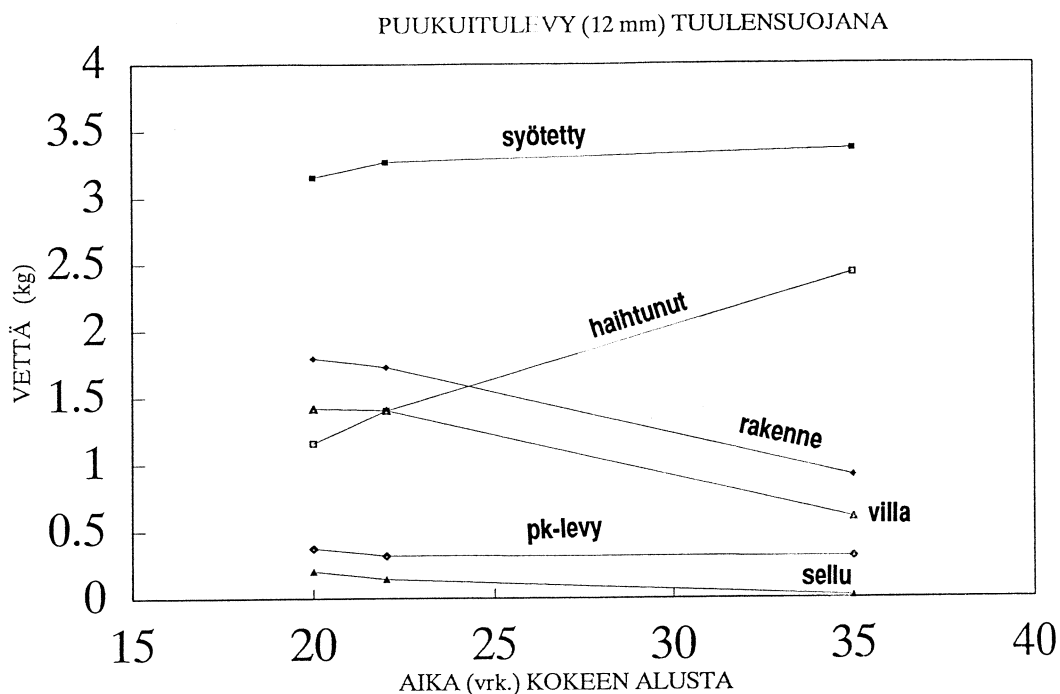
Kuva 43. Tuulensuojana massapintainen villatuulensuoja. Rakenteeseen syötetyt, rakenteesta kuivuneet ja sen eri materiaalikerroksiin sitoutuneet kosteusmäärät ajan funktiona kokeen alusta.



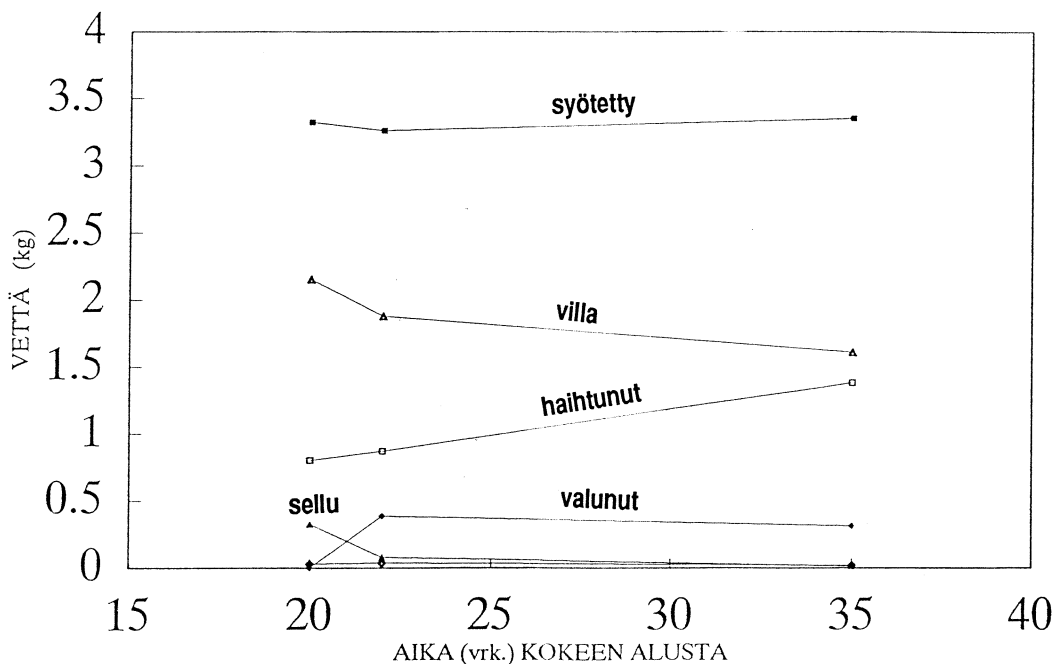
Kuva 44. Tuulensuojana paperipintainen villa. Rakenteeseen syötetyt, rakenteesta kuivuneet ja sen eri materiaalikerroksiin sitoutuneet kosteusmäärät ajan funktiona kokeen alusta.



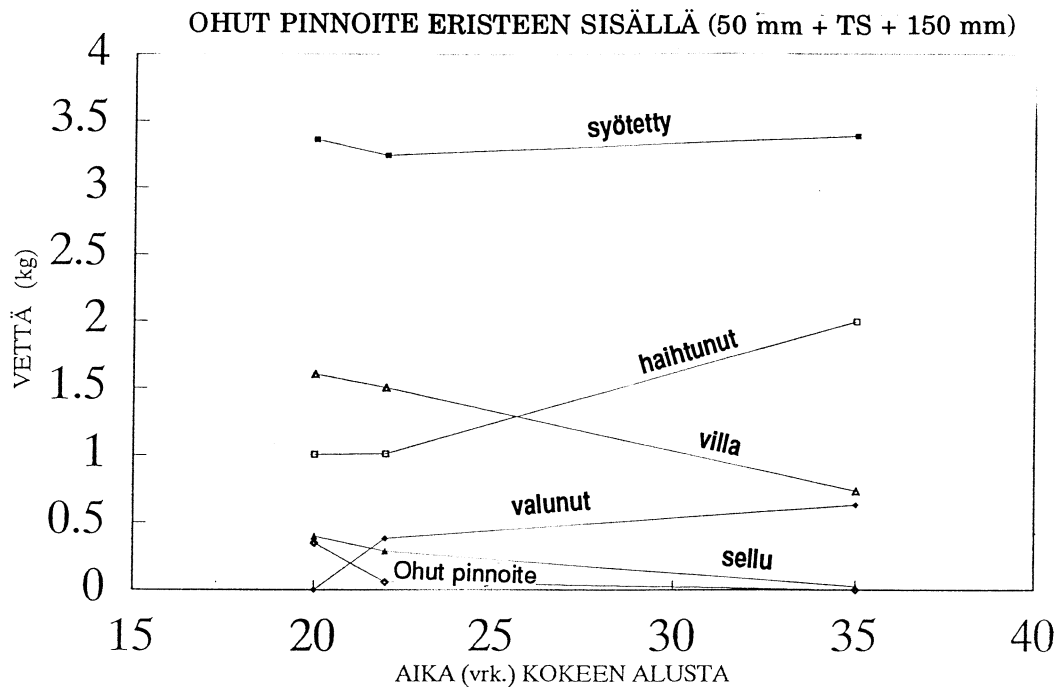
Kuva 45. Tuulensuojana kipsilevy (9 mm). Rakenteeseen syötetyt, rakenteesta kuivuneet ja sen eri materiaalikerroksiin sitoutuneet kosteusmäärät ajan funktiona kokeen alusta.



Kuva 46. Tuulensuojana huokoinen puukuitulevy. Rakenteeseen syötetyt, rakenteesta kuivuneet ja sen eri materiaalikerroksiin sitoutuneet kosteusmäärät ajan funktiona kokeen alusta.



Kuva 47. Tuulensuojana muovilaminoitu pinnoite rakenteen ulkopinnalla. Rakenteeseen syötetyt, rakenteesta kuivuneet ja sen eri materiaalikerroksiin sitoutuneet kosteusmäärät ajan funktiona kokeen alusta.



Kuva 48. Tuulensuojana muovilaminoitu pinnoite 50 mm villan sisäpuolelle asennettuna. Rakenteeseen syötetyt, rakenteesta kuivuneet ja sen eri materiaalikerroksiin sitoutuneet kosteuserät ajan funktiona kokeen alusta.

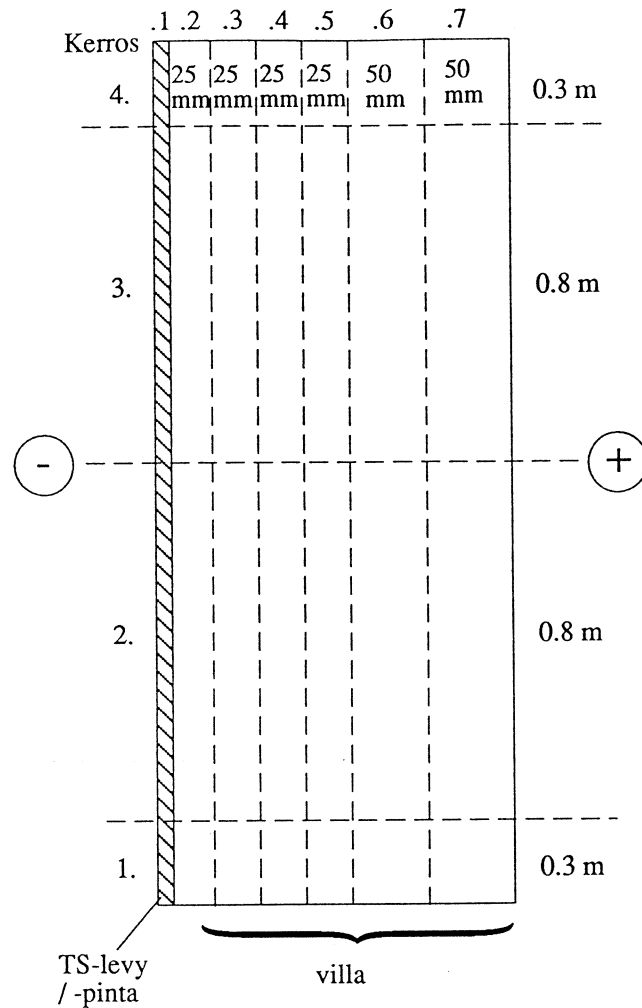
Kosteusjakaumat ja niiden tarkastelu

Kuvassa 49 esitetään seinärakenteen jako osiin purkutilanteessa ja eri osien numerokoodit. Eri osien numerokoodeja käytetään myöhemmissä tuloskuvin ja tulostaulukoissa taulukon 19 esittämässä järjestyksessä.

Seinät jaettiin paksuussuunnassa seitsemään osaan ja pystysuunnassa neljään osaan. Uloin kerros oli tuulensuojan pinta (paperi tai massa) tai levymäisillä tuulensuojilla koko levypaksuus. Loput kuusi kerrosta olivat lämmöneristeen kerroksia (tai tuulensuojavillaa). Kylmän pinnan vieressä villa jaettiin neljään noin 25 mm:n kerrokseen jolloin lämpimän pinnan viereen jäi kaksi noin 50 mm:n paksuista kerrosta. Ylhäällä ja alhaalla seinästä irroitettavien kappaleiden korkeus oli 300 mm ja keskellä rakennetta 800 mm.

Punnituksissa määritettiin kosteuspitoisuudet kuvan 49 mukaisella jaolla koko rakenteen koolausvälille, noin 335 mm leveille kaistaleille. Koekappaleet punnittiin

seinästä irroitettuina ja uunikuivatuksen jälkeen. Seinän purun yhteydessä tehtiin silmämääräisiä havaintoja kosteudesta ja jäästä rakenteissa.



Kuva 49. Koeseinämien jako osiin purkutilanteessa.

Taulukko 19. Seinärakenteiden purussa käytetty **seinäosien numerointi**. Vasen uloin sarake on tuulensuoja (kipsi, kuitulevy) tai sen pintakerros (massa, paperi, tms. pinta) (numerot n.1). Siitä oikealle neljä 25 mm paksua ja kaksi 50 mm paksua villakerrosta. Pystysuunnassa oli kaikkiaan neljä kerrosta, alin numero 1, ylin numero 4. Esimerkiksi tuulensuojan viereisen, toiseksi ylimmän kerroksen numero on 3.2. Kuvasta 49 nähdään ko. kerroksen paksuudeksi 25 mm ja korkeudeksi 800 mm.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm	
4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	0,3 m
3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	0,8 m
2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	0,8 m
1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	0,3 m

Seinämien jako osiin ei onnistunut tarkalleen kuvan 49 mukaisin dimensioin seinän paksuussuunnassa. Siksi tulosten käsittelyssä skaalattiin tilavuusyksikköä kohden esitettävät kosteusmäärät kunkin kappaleen kuivapainon mukaan siten, että kuvissa ja taulukoissa tietylle alalle esitetty kosteuden osatiheys (kg/m^3) vastaa mahdollisimman tarkoin todellista arvoa, josta paksuuden vaihtelun aiheuttama virhe on poistettu.

Kullekin seinätyypille punnituksin määritetyt kosteusosatiheyden (kg/m^3) jakaumat esitetään sekä taulukkomuodossa että kuvina liitteessä 3.

Luonnollisen konvektion vaikutus kosteusjakaumaan

Parhaiten luonnollisen konvektion vaikutus näkyy ensimmäisen purkutilanteen tuloksista, missä rakenteiden yli vallitseva lämpötilaero oli suurin (+27/ -10 °C). On kuitenkin mahdotonta luotettavasti erotella toisistaan luonnollisen konvektion aiheuttamaa, ja toisaalta mahdollisesti epätasaisesti lämpimälle pinnalle jakautuneen syöttöveden aiheuttamaa pystysuuntaista kosteusjakaumaa rakenteen materiaalikerroksissa. Tuloksista voidaan tehdä kuitenkin suuntaa-antavia päätelmiä konvektion vaikutuksista kosteuskenttään.

Kosteus oli kaikissa tapauksissa kerääntynyt enemmän rakenteen puolivälin yläpuolisiin kerroksiin kuin alempiin rakenneosiin. Tämä tukee laskelmissa havaittua luonnollisen konvektion vaikutusta rakenteen kosteusjakaumaan vastaavissa oloissa.

Poikkeuksena muista tuulensuojatapauksista oli ns. käännetty tuulensuoja, jossa suurimmat kosteuspitoisuudet olivat tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnan lähellä rakenteen alaosassa. Tällöin tuulensuojana oli muovilaminoitu pinnoite, jonka vesihöyrynläpäisevyys kondenssioloissa oli suhteellisen alhainen.

Voimakkain kosteusjakauma oli rakenteissa, joiden tuulensuojan (vesihöyry- ja ilmanläpäisykerroin oli pieni (muovilaminoitu pinnoite, kipsilevy, paperi). Näillä kosteuskertymä tuulensuojaan rajoittuvassa villakerroksessa kasvoi tasaisesti alhaalta ylöspäin. Kipsilevytuulensuojalla ylimmän ulkokerroksen kosteuspitoisuus oli noin 5,5 -kertainen alimman kerroksen kosteuspitoisuuteen verrattuna, kun vastaava suhdeluku ohuella pinnoitteella (lämmöneristeen ulkopinnassa) oli 3,9 ja paperituulensuojalla 2,8. Paperituulensuojassa paperi oli liimattu villaan, joten tässä tapauksessa ko. rajapinnalla ei luultavasti ollut konvektiota edistäviä virtausrakoja, mikä osaltaan saattoi pienentää kosteusjakaumaa pystysuunnassa.

Massapintaisella villatuulensuojalla ylin kerros oli kuivin, mutta toiseksi ylin oli selvästi kostein. Suurin kosteuskertymä oli tuulensuojavillan ja lämmöneristeen

rajapinnan viereisissä kerroksissa eikä ulkopinnan massapinnan viereisessä, kuten olisi voinut olettaa. Jäätymisraja ($T < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) oli tuulensuojavillan (50 mm) ja lämmöneristeen rajapinnasta hieman lämmöneristeen sisäpuolella, joten kosteus tiivistyi villalämmöneristeessä jäätymisalueelle.

Tuulensuojavillan toiseksi ylimmän, villa/tuulensuojarajapinnan viereisen kerroksen kosteuspitoisuus oli noin 3,1 kertaa suurempi kuin vastaavan alimman kerroksen. Lämmöneristevillalla vastaavan kerroksen suhdeluku oli noin 1,8. Tiiviimpiin tuulensuojarakenteisiin verrattuna poikkeava kosteusjakauma saattaa johtua mm. siitä, että tuulensuojavillan ilmanläpäisykerroin on selvästi lämmöneristevillan vastaavaa arvoa pienempi. Luonnollisen konvektion vaikutus pienenee, kun hyvin ilmaa läpäisevä lämmöneristekerros on 50 mm kapeampi kuin kahdessa muussa rakennetapauksessa. Lisäksi villatuulensuojan korkeahko ilmanläpäisykerroin (yli 10-kertainen paperiin ja kipsiin nähden) on voinut vaikuttaa toisellakin tavalla: puhaltimin sekoitettu kylmän puolen ilmatilan paine- ja virtauskenttä on koetilanteessa voinut osittain vaikuttaa rakenteen virtauskenttään.

Kosteusjakauman muutos sulamisvaiheen jälkeen

Tavoitteena oli selvittää jäätyneen kosteuden sulamisen vaikutus kosteusjakaumaan. Tässä verrattiin kaksi vuorokautta kylmän puolen lämpötilamuutoksen ($-10 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow +3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) jälkeen määritettyä kosteusjakaumaa pakkasjakson lopulla määritettyyn.

Vain yhdellä tutkituista tuulensuojamateriaaleista (muovilaminoitu pinnoite) voitiin havaita jään sulaessa vapautuneen nestemäisen veden valumista tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapintaa pitkin rakenteen alaosaan. Vettä valui rakenteista niiden ulkopuolisiin keräilyastioihin heti lämpötilamuutoksen jälkeen noin $0,4 \text{ kg}$ molemmissa rakennetapauksissa (normaali ja käännetty tuulensuoja). Selvimmin veden valuminen rakenteen sisällä näkyi käännetyn tuulensuojan rakenteessa, jossa paikalliset kosteuspitoisuudet olivat rakenteen alaosassa jopa 270 kg/m^3 pakkasjaksolla ja heti sulamisen alettua vielä 180 kg/m^3 .

Tulosten perusteella ei voitu havaita kosteuden valumista materiaalikerroksissa alaspäin siten, että alempi kerros olisi saanut ylempää suuremmat kosteuspitoisuudet.

Lämpötilamuutoksen jälkeen kosteudet pyrkivät tasoittumaan erityisesti rakenteen keskikerroksissa, mikä saattoi osittain johtua konvektion pienentymisestä. Kosteuden tasoittuminen oli mitä ilmeisimmin vesihöyryn diffuusiona tapahtuvaa kosteuden siirtymistä viereisten rakenneosien välillä. Pienet erot kosteuspitoisuuksissa saattoivat johtua eroista rinnakkaisten rakenteiden kostutuksessa.

Mineraalivillatuulensuojalla rakenteen kosteusjakautumat jonkin verran tasoittuivat pystysuunnassa. Suurimmat kosteuspitoisuudet olivat edelleen rakenteen toiseksi ylimmässä kerroksessa. Suurehko kosteuspitoisuus lämpimän pinnan viereisessä, toiseksi ylimmässä kerroksessa johtui ilmeisesti kostutuskerrokseen (sellumassa) epätasaisesti jakautuneen kosteuden siirtymisestä lämmöneristeeseen, missä kosteuden siirtyminen oli hidastunut kylmän puolen lämpötilan noston jälkeen.

Paperituulensuojalla rakenteen keskikerrosten pystysuuntaiset kosteuspitoisuudet tasoittuivat ja korkeimmat kosteudet keskittyivät entistä selvemmin näihin osiin. Toiseksi alimman kerroksen kosteuspitoisuudet kasvoivat paikoittain 4,5 - 5 kg/m³. Vain yhdessä mittauskohdassa toiseksi alimman kerroksen (2.3) kosteuspitoisuus oli suurempi kuin tätä ylemmän kerroksen kosteus vastaavalla syvyydellä rakenteessa. Alin kerros kuivui tuulensuojan viereisistä osistaan voimakkaasti, mutta lämpimällä puolella kosteus oli lisääntynyt jonkin verran. Tämä luultavasti johtui seinien yksilöllisistä eroista, koska vastaavaa ei havaittu muilla rakenteilla.

Kipsilevyrakenteella lämmöneristeen pystysuuntainen kosteusjakauma ei juuri muuttunut pakkasjakson tilanteesta. Vain alimman kerroksen kosteudet olivat pienentyneet, ja kipsi oli kuivunut kauttaaltaan noin 15 ... 30 kg/m³.

Puukuitulevyrakenteella lämmöneristeen ulkopinta ja huokoinen puukuitulevy olivat hieman kuivuneet lämpötilamuutoksen jälkeen. Kosteusjakauma oli säilynyt jokseenkin samana.

Ohuilla pinnoitteilla ulkopuolisen tuulensuojan tapauksessa muuttui pystysuuntainen kosteusjakauma vain paikallisesti pakkasjakson tilasta, kun ylimmän kerroksen kosteus pieneni noin 100:sta 60 kg/m³:iin. Käännetyn tuulensuojan tapauksessa itse tuulensuojaan sitoutunut jää oli sulanut ja kosteudet olivat tuulensuojapinnoitteessa tasoittuneet. Myös villan kosteudet olivat pienentyneet erityisesti rakenteen alaosassa ylimääräisen veden valuttua pois rakenteesta.

Rakenteiden kosteusjakaumat kokeen lopussa

Rakenteiden viimeinen purku tehtiin 15 vrk kestäneen kuivatusjakson (+27/+3°C) jälkeen. Rakenteessa, jossa oli **mineraalivillatuulensuoja**, kosteutta oli jäljellä merkittävästi vain lämmöneristeen tuulensuojaa vastaan olevassa osassa, toiseksi ylimmässä kerroksessa. Tähän osaan kosteus oli alun kostutusvaiheessa voimakkaimmin sitoutunut. Tuulensuojavilla oli kauttaaltaan melko kuivaa.

Paperituulensuojalla kosteusjakauma kokeen lopussa oli lähes villatuulensuojaa vastaava. Pääasiassa kosteus oli sitoutunut 1,1 - 1,65 m:n korkeuteen 50 - 100 mm lämmöneristeen kylmästä pinnasta. Pienehköjä kosteusmääriä oli myös tämän osan ylä- ja alapuolella sekä kylmällä puolella.

Kipsituulensuojalla lämmöneristeosan kosteus oli pääasiassa kylmän puolen keskikerroksissa sekä osa myös ylimmässä kerroksessa. Kipsilevyssä kosteuspitoisuus oli korkea ja melko tasaisesti jakautunut koko kokeen ajan, ja siten kipsilevyn kosteuskapasiteetti pienensi villaan sitoutuneen kosteuden määrää.

Puukuitulevyrakenteessa, samoin kuin kipsilevyllä, tuulensuojan kosteuspitoisuus oli jokseenkin vakio koko $T > 0$ °C -jakson ajan. Lämmöneristeen kosteus oli keskittynyt kahteen ylimpään kerrokseen alempien ollessa lähes kuivia.

Ohuilla pinnoitetuulensuojilla käännetyn rakenteen kosteuspitoisuudet olivat pienentyneet kauttaaltaan suhteellisen alhaiselle tasolle. Suurin paikallinen arvo, noin 40 kg/m^3 , oli rakenteen alaosassa tuulensuojan viereisessä villakerroksessa. Rakenteessa, jossa pinnoite oli asennettu lämmöneristeen ulkopintaan, olivat kosteudet koko rakenteessa käännetyn tuulensuojan tapausta huomattavasti korkeammat. Suurin paikallinen kosteuspitoisuus oli edelleen rakenteen yläosan lämmöneristeessä, yli 60 kg/m^3 .

4.3.3 Johtopäätökset tuloksista

Tehdyt kokeet edustivat voimakasta rakenteiden kosteuskuormitusta. Johtopäätöksinä kokeiden tuloksista voidaan todeta:

- * Mitä höyrytiiviimpi (ja ilmatiiviimpi) tuulensuoja, sitä voimakkaampi kosteusjakauma ja sitä korkeammat paikalliset kosteuspitoisuudet rakenteeseen syntyvät lämpötilaeron aiheuttaman luonnollisen konvektion vaikutuksesta.
- * Luonnollisen konvektion vaikutuksesta kosteus kerääntyy voimakkaimmin rakenteen yläosaan. Paikallinen kosteuspitoisuus rakenteen yläosan lämmöneristeessä voi olla jopa 2 - 5 -kertainen alaosan vastaavaan arvoon verrattuna.
- * Hyvin ilmaa läpäisevällä tuulensuojalla rakenteen ulkopuolinen painekenttä voi vaikuttaa rakenteen kosteusjakaumaan.

- * Epäideaalisuudet tuulensuojan ja lämmöneristeen välillä lisäävät konvektiota, mikä voi johtaa ideaalista rakennetta suurempiin paikallisiin kosteuspitoisuuksiin, ts. rakenteen epäideaalisuudet lisäävät kosteusriskiä.
- * Kosteuskertymän paikalliset huiput säilyvät pitkään myös kosteuslähteen poistuttua. Kuivumisvaiheessa pääasiallinen kosteusvirtaus on rakenteesta ulospäin, ja kosteuden tasoittuminen diffuusiona muissa suunnissa on hidasta.
- * Mahdollinen veden valuminen kasvattaa kosteusriskiä, koska hetkelliset virtaamat ovat suuret ja paikallinen kosteuskertymä rakenteen alaosaan voi olla voimakas.
- * Nestemäisen veden valuminen rakenteessa on mahdollista, kun kaikki seuraavat ehdot täyttyvät:
 - rakenteessa on paljon kosteutta; joko jatkuva kosteuslähte (esimerkiksi ilman ulosvirtauksen kuljettama kosteus) tai suuri kerta-annos vettä (rakentamisen jälkeinen tilanne)
 - tuulensuojalla ei ole olennaista kosteuskapasiteettia (ohut kerros)
 - tuulensuoja ja lämmöneriste ovat irti toisistaan, jolloin rajapinnalle voi kerääntyä kosteutta
 - tuulensuojakerros on heikosti kosteutta läpäisevä erityisesti kun $T < 0^{\circ}\text{C}$
 - kosteus kertyy jääkerroksena rajapinnalle
 - lämpötilan nousu aiheuttaa jään sulamisen, josta seuraa kosteuden valuminen.

Jotta tuulensuojattu rakenne toimisi kosteusteknisesti hyvin myös ankarissa kosteusrasituksissa, tulisi tuulensuojan vesihöyrynläpäisevyyden olla mahdollisimman suuri erityisesti lähellä vesihöyryn kyllästysolosuhteita myös jäätymisalueella. Lisäksi tuulensuojan tulisi olla riittävän ilmatiivis, jotta ulkopuolinen painekenttä ei vaikuttaisi kosteusjakaumiin. Rakenteen lämmöneristekerroksen tulisi olla mahdollisimman ideaalisesti toteutettu ja tuulensuojauksen tiiviisti lämmöneristeen pintaan asennettu, jolloin luonnollisen konvektion vaikutus kosteusjakaumiin olisi pieni.

Tuulensuojan ominaisuuksille asetettava vaatimustaso riippuu täysin niistä olosuhteista, joihin rakenteen toiminnassa tulee varautua. Jos rakentamisen jälkeinen kosteus on suhteellisen alhainen ja voidaan olettaa, että kosteusvirtaus rakenteeseen pysyy pienenä (yhtenäinen höyrynsulku, ilman ulosvirtaus rakenteen kautta estetty), ovat kaikki esitetyn tyyppiset tuulensuojat kosteusteknisesti toimivia. Lisää toimintavarmuutta haluttaessa voidaan valita tuulensuoja, joka mahdollistaa rakenteiden kuivumisen myös vaikeammassa oloissa.

4.4 PARAMETRIEN LASKENNALLINEN HERKKYYSTAR- KASTELU

Laskennallisesti tarkasteltiin tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen ja vesihöyrynläpäisykertoimen vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Laskennallisen tarkastelun kohteena oli kuvassa 50 esitetty 2,5 m korkea rakenne, jonka eristyspaksuus (20 kg/m^3 lasivillaa) oli 200 mm. Ohuilla pinnoitteilla lämmöneristeen uloin 5 mm paksu kerros kuvattiin laskennassa tuulensuojakerroksena. Paksuilla (kipsi, puukuitulevy) tuulensuojilla ko. tuulensuojakerros kuvattiin todellisessa paksuudessaan.

Koska vesihöyrynläpäisykertoimen todellista arvoa ei tunnettu riittävällä tarkkuudella kaikille tuulensuojamateriaaleille (lähinnä ohuille pinnoitteille), rajoittui laskennallinen tarkastelu parametrien herkkyystarkasteluun. Tuulensuojarakenteiden kuivumisen keskinäinen vertailu voidaan tehdä luotettavasti vain koetulosten perusteella. Laskennan tulokset kuvaavat tuulensuojan parametrien muutosten suhteellista vaikutusta rakenteen kuivumiseen ja paikallisiin kosteuspitoisuuksiin.

Tarkasteluoloina käytettiin tapauksen mukaan ulkopuolen ilmatilalle kolmea eri vakio-oloa, jotka olivat: $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 90 % RH, $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 80 % RH sekä $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 60 % RH. Sisäpuolen ilman lämpötila oli $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Koska höyrinsulku oletettiin ideaalisen tiiviiksi, ei sisäpuolen ilman kosteudella ollut merkitystä.

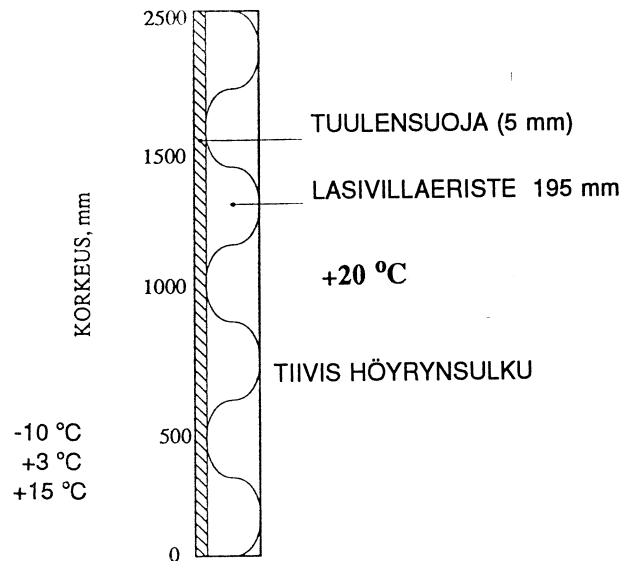
Rakenteisiin asetettiin 5 mm paksua vesikerrosta vastaava kosteus määrä villan lämpimälle pinnalle. Lämmöneristeen ja tuulensuojakerroksen muille osilla oletettiin vakiokosteus, jolloin alkutilanteen kokonaiskosteus rakenteen otsapinta-alaa kohti oli noin $5,2 \text{ kg/m}^2$.

Laskelmissa muutettiin tuulensuojan ilman ja vesihöyryn läpäisyominaisuuksia ja laskelmat tehtiin sekä ideaalisesti toteutetulle että epäideaaliselle (kuva 2, tapaus III) rakenteelle neljän viikon pituista tarkastelujaksoa simuloiden valituissa ulkoilman oloissa.

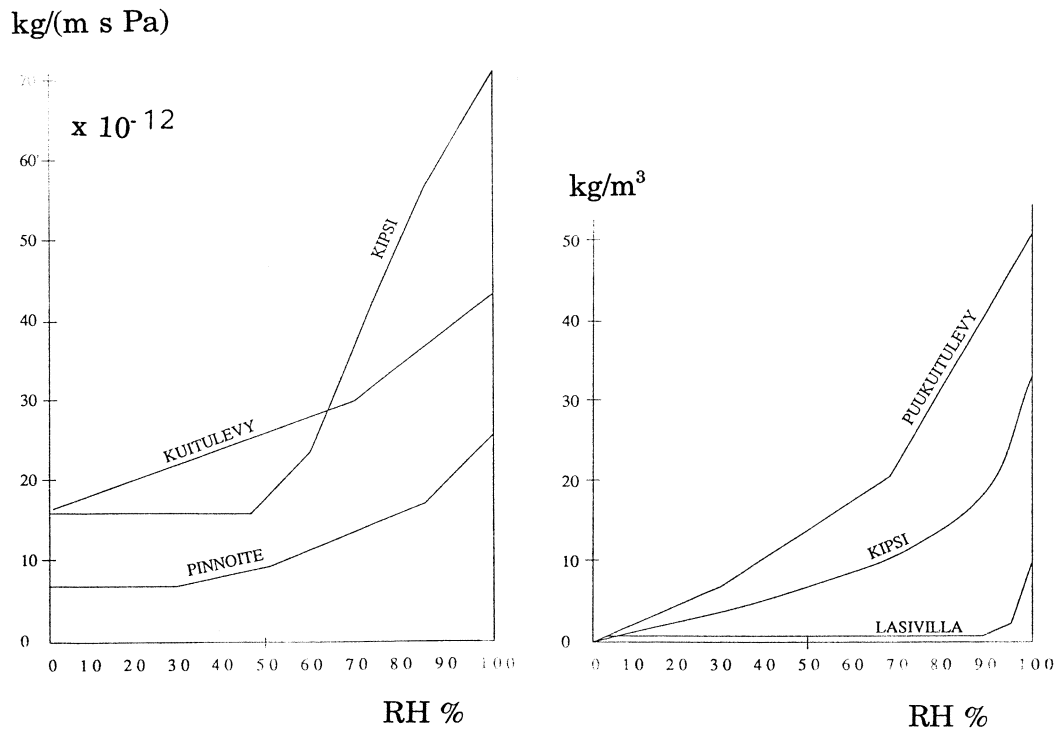
Kaikkien tuulensuojamateriaalien vesihöyrynläpäisykertoimen todellista arvoa ei tunnettu riittävällä tarkkuudella, joten tulokset kuvaavat vain parametrien vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Laskelmissa tarkasteltiin kolmea perustapausta:

- * huokoinen puukuitulevy
- * kipsilevy
- * muovilaminoitu pinnoite.

Näille laskennassa annetut vesihöyrynläpäisykertoimet ja tasapainokosteudet esitetään kuvassa 51 suhteellisen kosteuden funktioina.

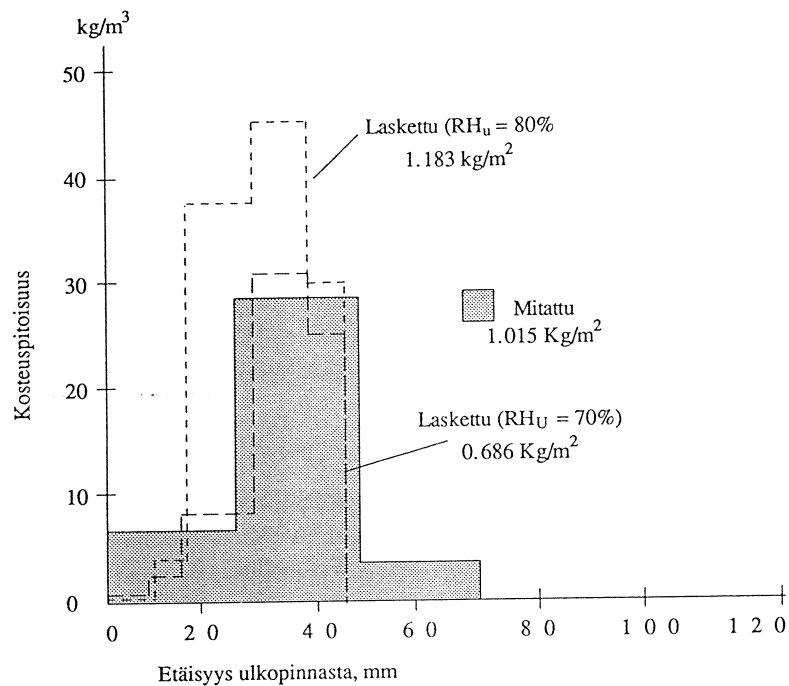


Kuva 50. Laskennassa tarkasteltu rakenne.



Kuva 51. Laskennassa käytettyjen kolmen tuulensuojamateriaalin vesihöyrynläpäisykertoimet ja tasapainokosteudet suhteellisen kosteuden funktioina.

Kuvassa 52 esitetään vertailuna käytännön tilanteeseen 100 mm paksun lämmöneristerakenteen kosteusjakauma 4 viikkoa kuivumisen alusta +20/-10 °C:n vakio-oloissa. Vertailun koetulokset ovat luvun 4.1 kokeista. Laskelmissa käytettiin ulkopuolen ilmatilan suhteellisen kosteuden arvoja 70 ja 80 %. Kokeissa mitattu kosteus vaihteli välillä 60 ... 80 %. Laskennassa kosteus tiivistyi jokseenkin samaan kohtaan koekappaletta kuin kokeessakin. Erot johtuvat laskennan hilajaon ja koekappaleen kosteusmäärityksen erilaisesta jaosta sekä todellisuudessa vaihtelevien ja laskennassa vakioiksi asetettujen reunaehtoien poikkeamista.



Kuva 52. Laskennan ja kokeen vertailu. Tuulensuojattoman villarakenteen kosteuskenttä neljän viikon kuivumisjakson jälkeen +20/-10 °C:n vakio-oloissa.

4.4.1 Ilmanläpäisykertoimen ja ulkopinnan painegradientin vaikutus

Lämpötekniikan laskelmien mukaan tuulensuojan ilmanläpäisykertoimella on suuri vaikutus rakenteen lämpöhäviöihin. Näissä laskelmissa tarkasteltiin tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen vaikutusta rakenteen kuivumiseen.

Laskelmien tuloksia tarkastellaan hetkellä, jolloin rakenne on kuivunut neljän viikon ajan. Tulosten käsittelyssä tarkastellaan rakenteeseen jäänyttä kokonaiskosteutta (kg/m²) sekä lämmöneristeen maksimikosteutta (kg/kg) tuulensuojan viereisissä osissa.

Ilmanläpäisykertoimen herkkyytarkastelussa käytettiin ulkopuolen ilmatilan olosuhteelle vakioarvoja +3 °C, 80 % RH.

Luonnollinen konvektio

Aluksi tarkasteltiin pelkän luonnollisen konvektion vaikutusta rakenteen kuivumiseen kun tuulensuojana oli 12 mm paksu huokoinen puukuitulevy. Laskelmat tehtiin vaihdellen tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen arvoa ko. materiaalille tyypillisestä arvosta $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ s Pa})$. Vesihöyrynläpäisevyydelle käytettiin materiaalille asetettua arvoa (kuva 51).

Tuloksina esitetään rakenteen kokonaiskosteus (kg/m^3) ja lämmöneristeen suurin paikallinen kosteuspitoisuusarvo (kg/kg) neljän viikon kuluttua kuivumisen alusta taulukossa 20 ideaaliselle rakenteelle ja taulukossa 21 epäideaaliselle rakenteelle.

Taulukko 20. Tuulensuojan (12 mm huokoinen puukuitulevy) ilmanläpäisykertoimen vaikutus rakenteen kuivumiseen luonnollisen konvektion tilanteessa (+20/+3 °C) ideaalisella rakenteella. Kosteudet neljän viikon tarkastelujakson jälkeen.

Tuulensuojan ilmanläpäisykerroin $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	Tuulensuojan permeabiliteetti (m^2)	Rakenteen kokonaiskosteus (kg/m^3)	Tuulensuojan maksimikosteus (kg/kg)	Villan maksimikosteus (kg/kg)
$2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-13}$	3,989	0,175	0,357
$4,0 \cdot 10^{-6}$	$8,64 \cdot 10^{-13}$	3,988	0,175	0,360
$10,0 \cdot 10^{-6}$	$21,6 \cdot 10^{-13}$	3,987	0,176	0,367
$30,0 \cdot 10^{-6}$	$64,8 \cdot 10^{-13}$	3,983	0,177	0,386
$100,0 \cdot 10^{-6}$	$216,0 \cdot 10^{-13}$	3,979	0,180	0,420

Tuulensuojan ilmanläpäisykerroin ei luonnollisessa konvektiossa vaikuta rakenteen kuivumiseen juuri lainkaan. Rakenteen epäideaalisuus ei myöskään vaikuta rakenteen kuivumiseen mutta epäideaalisessa rakenteessa kosteutta kertyy eristeen yläosaan kylmän pinnan läheisyyteen paikallisesti selvästi enemmän kuin ideaalisessa rakenteessa. Tasan jakautunut kosteus on rakenteen toiminnan kannalta toivottavampi kuin suuret paikalliset kosteuskertymät.

Taulukko 21. Tuulensuojan (12 mm huokoinen puukuitulevy) ilmanläpäisykerroimen vaikutus rakenteen kuivumiseen luonnollisen konvektion tilanteessa (+20/+3 °C) epäideaalisella rakenteella. Kosteudet neljän viikon tarkastelujakson jälkeen.

Tuulensuojan ilmanläpäisykerroin $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	Tuulensuojan permeabiliteetti m^2	Rakenteen kokonaiskosteus kg/m^2	Tuulensuojan maksimikosteus kg/kg	Villan maksimikosteus (kg/kg)
$2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-13}$	3,978	0,185	1,188
$4,0 \cdot 10^{-6}$	$8,64 \cdot 10^{-13}$	3,979	0,185	1,223
$10,0 \cdot 10^{-6}$	$21,6 \cdot 10^{-13}$	3,979	0,185	1,285
$30,0 \cdot 10^{-6}$	$64,8 \cdot 10^{-13}$	3,976	0,186	1,423
$100,0 \cdot 10^{-6}$	$216,0 \cdot 10^{-13}$	3,969	0,187	1,930

Painegradientin vaikutus rakenteen kuivumiseen

Laskelmilla tarkastellaan painegradientin (3 Pa/m) vaikutusta rakenteen kuivumiseen. Tarkasteltaviksi tuulensuojiksi valittiin muovilaminoitu pinnoite ja huokoinen puukuitulevy. Laskelmat tehtiin ideaaliselle ja epäideaaliselle rakenteelle ulkolämpötilan ollessa +3 °C. Tuulensuojan vesihöyrynläpäisykerroimet vastasivat kuvassa 51 esitettyjä. Laskelmien tulokset esitetään taulukossa 22.

Tarkasteltavina olevien tuulensuojamateriaalien ilmanläpäisykerroimet ovat hyvin alhaiset. Rakenteen kuivumista tarkasteltiin lisäksi olettaen ilmanläpäisykerroimelle arvo $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, mikä on lämpöteknisen tarkastelun tulosten perusteella lähellä suositusalueen yläraja-arvoa.

Molemmilla tuulensuojilla oli painegradientin vaikutus rakenteen kuivumiseen jokseenkin merkityksetön. Ainoa selvästi havaittava ero oli, että huokoisien puukuitulevyn ollessa tuulensuojana lämmöneristeen paikallinen maksimikosteus kasvoi painegradientin vaikutuksesta (0,845 kg/kg -> 1,199 kg/kg).

Taulukko 22. *Tuulensuojan ilmanläpäisykerroimen ja tuuletusraon painegradientin (3 Pa/m) vaikutus rakenteen kuivumiseen kun tuulensuojana on muovilaminoitu pinnoite tai 12 mm paksu huokoinen puukuitulevy.*

MUOVILAMINOITU PINNOITE				
Rakenne	Paine- gradientti (Pa/m)	Ilmanläpäisy- kerroin (m ³ /m ² ·s·Pa)	Rakenteen kokonaiskosteus (kg/m ²)	Eristeen maksimi- kosteus (kg/kg)
Ideaalinen	0	0,01 · 10 ⁻⁶	3,512	0,389
	3	0,01 · 10 ⁻⁶	3,514	0,391
	3	30,0 · 10 ⁻⁶	3,426	0,843
Epäideaalinen	0	0,01 · 10 ⁻⁶	3,504	1,372
	3	0,01 · 10 ⁻⁶	3,506	1,377
	3	30,0 · 10 ⁻⁶	3,409	5,683
HUOKOINEN PUUKUITULEVY (12 mm)				
Ideaalinen	0	4,0 · 10 ⁻⁶	4,104	0,845
	3	4,0 · 10 ⁻⁶	4,098	1,199
	3	30,0 · 10 ⁻⁶	4,053	3,627
Epäideaalinen	0	4,0 · 10 ⁻⁶	4,103	3,382
	3	4,0 · 10 ⁻⁶	4,094	4,084
	3	30,0 · 10 ⁻⁶	4,052	9,322

Kun tuulensuojan ilmanläpäisykerroimelle asetettiin arvo $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, kasvoi rakenteesta kuivuneen keskimääräisen kosteusvirran arvo painegradientin vaikutuksesta puukuitulevyrakenteella noin 4,5 % ja rakenteella, jossa oli muovilaminoitu pinnoite noin 5 % (vertailukohtana oli muutos alkuperäisestä kokonaiskosteudesta noin $5,2 \text{ kg/m}^2$). Konvektiivinen kosteuden siirtyminen rakenteesta ulos on vähäinen, eikä sitä voida olennaisesti lisätä tuulensuojan ilmanläpäisykerrointa suositusarvojen puitteissa kasvattamalla.

Paikallinen maksimikosteus lämmöneristeessä kasvaa, kun tuulensuojan ilmanläpäisykerrointa kasvatetaan. Vaikutus korostuu epäideaalisilla rakenteilla. Ideaalisella rakenteella, jossa oli tuulensuojana huokoinen puukuitulevy, sai lämmöneristeen maksimikosteus arvon 1,2 kg/kg. Vastaava arvo epäideaalisella rakenteella oli 4,1 kg/kg, ja epäideaalisella rakenteella, jonka tuulensuojan ilmanläpäisykerroimelle oli asetettu arvo $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ oli paikallinen maksimikosteus 9,3 kg/kg.

Rakenteiden kosteustekninen toiminta puoltaa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen pitämistä alhaisena, ts. suhteellisen ilmatiivis tuulensuoja toimii kosteusteknisesti paremmin kuin rakenne, jonka tuulensuojan vesihöyrynläpäisevyys on sama mutta ilmanläpäisevyys korkeampi. Tiivis tuulensuoja pienentää konvektion vaikutuksia ja samalla riskejä kosteuden paikallisesta kertymisestä. Kosteuden kuivumiseen tuulensuojan ilmatiiviydellä ei ole merkittävää vaikutusta, kun ollaan luvussa 3.4 suositellulla alueella.

4.4.2 Tuulensuojan vesihöyrynläpäisykertoimen vaikutus rakenteen kuivumiseen

Laskelmien tavoitteena oli selvittää tuulensuojan vesihöyrynläpäisykertoimen vaikutus rakenteen kuivumiseen. Laskelmat tehtiin sekä ideaaliselle että epäideaaliselle rakenteelle käyttäen tuulensuojana huokoista puukuitu- tai kipsilevyä tai muovilaminoitua pinnoitetta. Ulkopuolen ilmatilan olosuhteina käytettiin vakioarvoja -10 °C ja 90 % RH, +3 °C ja 80 % RH sekä +15 °C ja 60 % RH. Sisäpuolen ilman lämpötila oli +20 °C.

Tarkasteltavina tekijöinä olivat vesihöyrynläpäisykertoimen muutoksen vaikutukset rakenteen kuivumiseen ja paikallisiin kosteuspitoisuuden maksimiarvoihin. Taulukossa 23 esitetään laskennassa tuulensuojille käytetyt ilmanläpäisykertoimet, tuulensuojan paksuudet ja permeabiliteetit ilmalle.

Taulukko 23. Laskelmissa tarkasteltujen tuulensuojamateriaalien ilmanläpäisykertoimet, laskennassa käytetyt paksuudet ja permeabiliteetit ilmalle.

Tuotenimike	Ilmanläpäisykerroin ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)	Paksuus (mm)	Permeabiliteetti ilmalle (m^2)
Kipsilevy	$2 \cdot 10^{-7}$	9	$3,2 \cdot 10^{-14}$
Huokoinen puukuitulevy	$4 \cdot 10^{-6}$	12	$8,6 \cdot 10^{-13}$
Muovilaminoitu pinnoite	$1 \cdot 10^{-8}$	5	$9,0 \cdot 10^{-16}$

Laskennassa muutettiin tuulensuojan vesihöyrynläpäisykertoimia siten, että kuvassa 51 esitettyjen vesihöyrynjohtavuuksien (δ_p) [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$] tasoa muutettiin lisäämällä tai vähentämällä siitä valittu vakioarvo. Kuvan 51 käyrään tehtiin siis valitun suuruinen siirto ylös- tai alaspäin koordinaatistossa käyrän muodon pysyessä alkuperäisenä. Lisättävä vakioarvo valittiin 0 % suhteellista kosteutta vastaavan vesihöyrynjohtavuu-

den ($\delta_{p,0}$) kerrannaisarvoksi. Laskelmat tehtiin käyttäen $0,5 \cdot \delta_{p,0}$:lla pienennettyjä tai kasvatettuja arvoja sekä $2,0 \cdot \delta_{p,0}$:lla kasvatettuja arvoja.

Taulukoissa 24 - 26 esitetään lasketut rakenteiden kokonaiskosteudet ja lämmöneristekerroksen maksimikosteuspitoisuudet neljän viikon tarkastelujakson jälkeen ideaaliselle ja epäideaaliselle rakenteelle, kun vesihöyryjohtavuuden (δ_p) tasoa on muutettu laskennassa. Tulokset esitetään lisäksi kolmelle eri ulkoilman vakio-olosuhteelle.

Kuvissa 53, 55 ja 57 esitetään rakenteista tuulensuojan kautta kuivuneen kosteuden keskimääräiset massavirrantiheydet tuulensuojan vesihöyryjohtavuuden suhteellisen muutoksen funktiona. Suhteellisen vesihöyryjohtavuuden perusarvo 1,0 kuvaa tuulensuojamateriaalille mittausten perusteella asetettua vesihöyryjohtavuutta. Kuvissa 54, 56 ja 58 esitetään vastaavasti eri tuulensuojatapauksille lasketut lämmöneristeen maksimikosteudet tuulensuojan vesihöyryjohtavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.

Eri tuulensuojarakenteiden kuivumisnopeudet eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään, sillä tulokset riippuvat lähes täysin vesihöyryjohtavuudelle asetetusta arvosta kyllästystilassa. Tämä arvo ei perustu mittauksiin, vaan se on arvioitu alemmille suhteellisen kosteuden arvoille tehdyistä mittauksista extrapoloimalla. Tarkastelun kohteena ovat vesihöyryjohtavuuden tason, ulkolämpötilan ja rakenteen eristekerroksen ideaalisuuden vaikutukset rakenteiden kuivumiseen.

Taulukko 24. Kipsituulensuojarakenteen kokonaiskosteus (kg/m^2) ja eristeen maksimikosteus (kg/kg) ideaalisessa ja epäideaalisessa rakenteessa eri ulkolämpötiloilla ja erilaisilla vesihöyrynjohdavuussoviteilla. Rakenteen alkukosteus oli $5,384 \text{ kg/m}^2$.

δ_p
 $\delta_{p-0,5}$ tuulensuojan (mitattu) vesihöyrynjohdavuussovite vesihöyrynjohdavuudesta on vähennetty puolet siitä arvosta, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %

$\delta_{p-1,5}$ vesihöyrynjohdavuuteen on lisätty puolet siitä arvosta, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %

δ_{p-3} vesihöyrynjohdavuuteen on lisätty kaksi kertaa se arvo, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %.

Kipsilevy

Rakenne	Ulkolämpötila (°C)	Vesihöyrynjohdavuus δ_p	Kokonaiskosteus (kg/m^2)	Eristeen maksimikosteus (kg/kg)
Ideaalinen	-10	$\delta_{p-0,5}$	4,973	6,134
		δ_p	4,919	5,807
		$\delta_{p-1,5}$	4,867	5,488
		δ_{p-3}	4,718	4,594
Epäideaalinen	-10	$\delta_{p-0,5}$	4,965	13,867
		δ_p	4,907	13,478
		$\delta_{p-1,5}$	4,851	13,108
		δ_{p-3}	4,701	12,011
Ideaalinen	+3	δ_p	3,980	1,228
		$\delta_{p-1,5}$	3,852	0,587
		δ_{p-3}	3,603	0,277
Epäideaalinen	+3	δ_p	3,981	4,798
		$\delta_{p-1,5}$	3,852	3,614
		δ_{p-3}	3,594	0,718
Ideaalinen	+15	δ_p	3,575	0,017
		$\delta_{p-1,5}$	3,552	0,016
		δ_{p-3}	3,527	0,016
Epäideaalinen	+15	δ_p	3,573	0,017
		$\delta_{p-1,5}$	3,548	0,017
		δ_{p-3}	3,522	0,016

Taulukko 25. Tuulensuojana huokoinen puukuitulevy. Rakenteen kokonaiskosteus (kg/m^2) ja eristeen maksimikosteus (kg/kg) ideaalisessa ja epäideaalisessa rakenteessa eri ulkolämpötiloilla ja erilaisilla vesihöyrynohtavuussovitteilla. Rakenteen alkukosteus oli $5,263 \text{ kg/m}^2$.

δ_p tuulensuojan (mitattu) vesihöyrynohtavuussovitte vesihöyrynohtavuudesta on vähennetty puolet siitä arvosta, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %
 $\delta_{p-0,5}$
 $\delta_{p-1,5}$ vesihöyrynohtavuuteen on lisätty puolet siitä arvosta, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %
 δ_{p-3} vesihöyrynohtavuuteen on lisätty kaksi kertaa se arvo, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %.

Huokoinen puukuitulevy

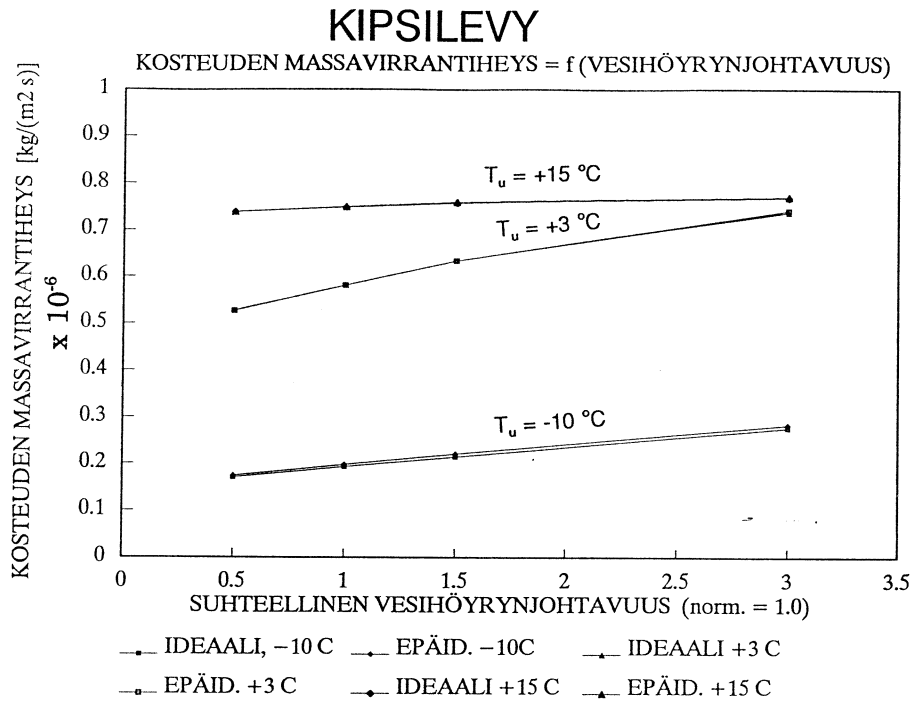
Rakenne	Ulkolämpötila (°C)	Vesihöyrynohtavuus δ_p	Kokonaiskosteus (kg/m^2)	Eristeen maksimikosteus (kg/kg)
Ideaalin	-10	$\delta_{p-0,5}$	5,013	4,879
		δ_p	4,922	4,332
		$\delta_{p-1,5}$	4,837	3,889
		δ_{p-3}	4,603	2,588
Epäideaalin	-10	$\delta_{p-0,5}$	5,007	11,806
		δ_p	4,912	10,938
		$\delta_{p-1,5}$	4,825	10,142
		δ_{p-3}	4,582	8,201
Ideaalin	+3	δ_p	4,104	0,845
		$\delta_{p-1,5}$	3,945	0,446
		δ_{p-3}	3,647	0,160
Epäideaalin	+3	δ_p	4,103	3,382
		$\delta_{p-1,5}$	3,913	1,742
		δ_{p-3}	3,635	0,363
Ideaalin	+15	δ_p	3,549	0,015
		$\delta_{p-1,5}$	3,467	0,015
		δ_{p-3}	3,411	0,014
Epäideaalin	+15	δ_p	3,548	0,015
		$\delta_{p-1,5}$	3,439	0,014
		δ_{p-3}	3,413	0,015

Taulukko 26. Muovilaminoitu pinnoite tuulensuojana. Rakenteen kokonaiskosteus (kg/m^2) ja eristeen maksimikosteus (kg/kg) ideaalisessa ja epäideaalisessa rakenteessa eri ulkolämpötiloilla ja erilaisilla vesihöyrynsuojauksilla. Rakenteen alkukosteus oli $5,139 \text{ kg/m}^2$.

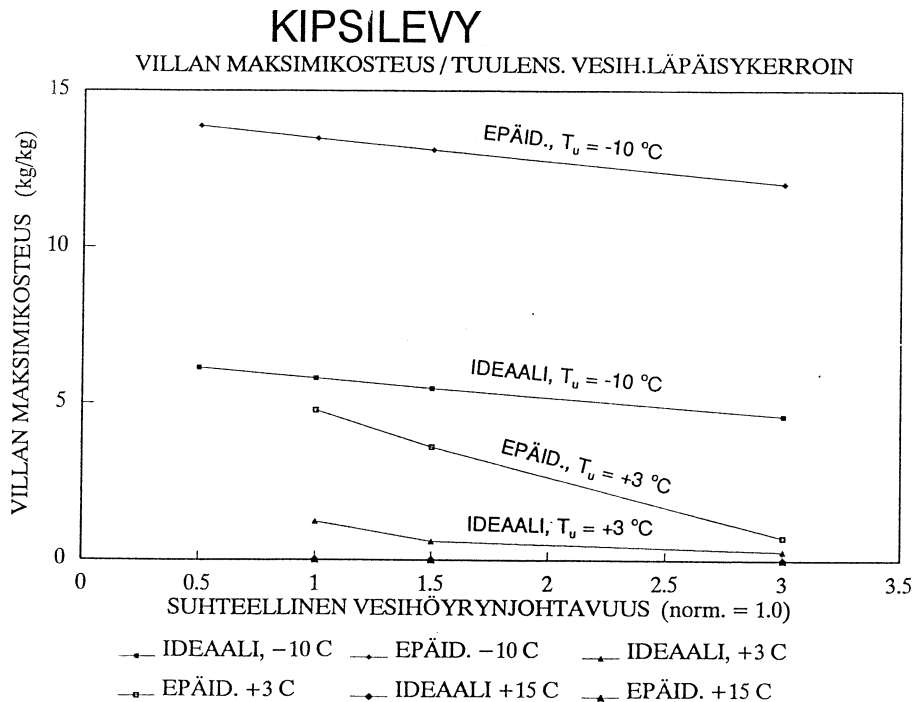
δ_p tuulensuojan (mitattu) vesihöyrynsuojauksella
 $\delta_{p-0,5}$ vesihöyrynsuojauksesta on vähennetty puolet siitä arvosta, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %
 $\delta_{p-1,5}$ vesihöyrynsuojaukseen on lisätty puolet siitä arvosta, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %
 δ_{p-3} vesihöyrynsuojaukseen on lisätty kaksi kertaa se arvo, joka sillä on suhteellisen kosteuden ollessa 0 %.

Muovilaminoitu pinnoite

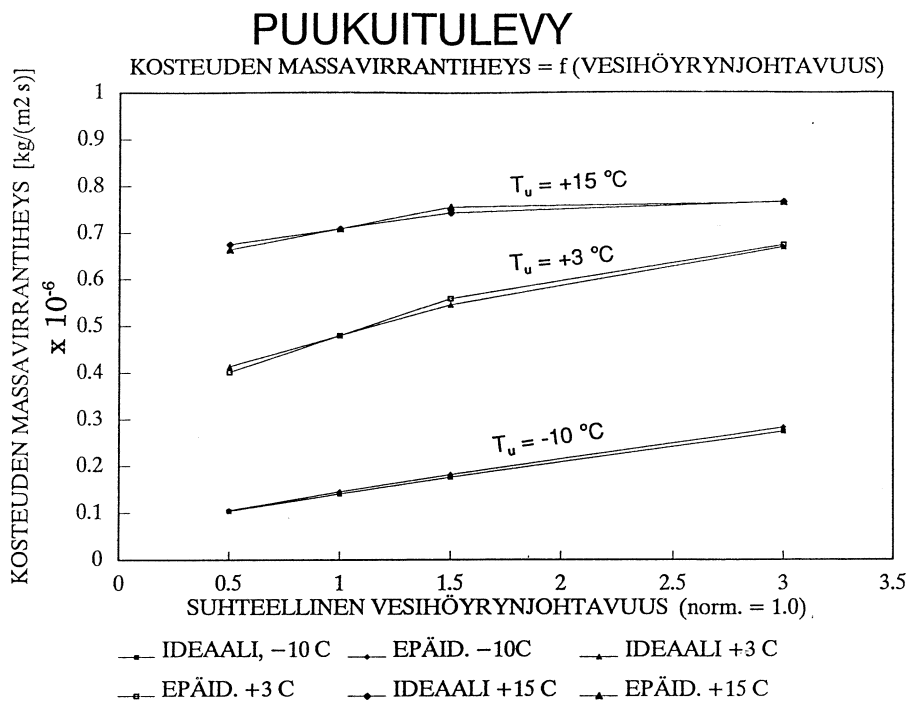
Rakenne	Ulkolämpötila (°C)	Vesihöyrynsuojauksella δ_p	Kokonaiskosteus (kg/m^2)	Eristeen maksimikosteus (kg/kg)
Ideaallinen	-10	$\delta_{p-0,5}$	4,638	5,202
		δ_p	4,556	4,662
		$\delta_{p-1,5}$	4,479	4,192
		δ_{p-3}	4,276	2,957
Epäideaallinen	-10	$\delta_{p-0,5}$	4,630	11,883
		δ_p	4,541	11,113
		$\delta_{p-1,5}$	4,466	10,391
		δ_{p-3}	4,260	8,402
Ideaallinen	+3	δ_p	3,669	0,613
		$\delta_{p-1,5}$	3,536	0,417
		δ_{p-3}	3,277	0,164
Epäideaallinen	+3	δ_p	3,670	2,944
		$\delta_{p-1,5}$	3,531	1,613
		δ_{p-3}	3,266	0,357
Ideaallinen	+15	δ_p	3,160	0,014
		$\delta_{p-1,5}$	3,130	0,015
		δ_{p-3}	3,136	0,015
Epäideaallinen	+15	δ_p	3,144	0,013
		$\delta_{p-1,5}$	3,116	0,016
		δ_{p-3}	3,113	0,015



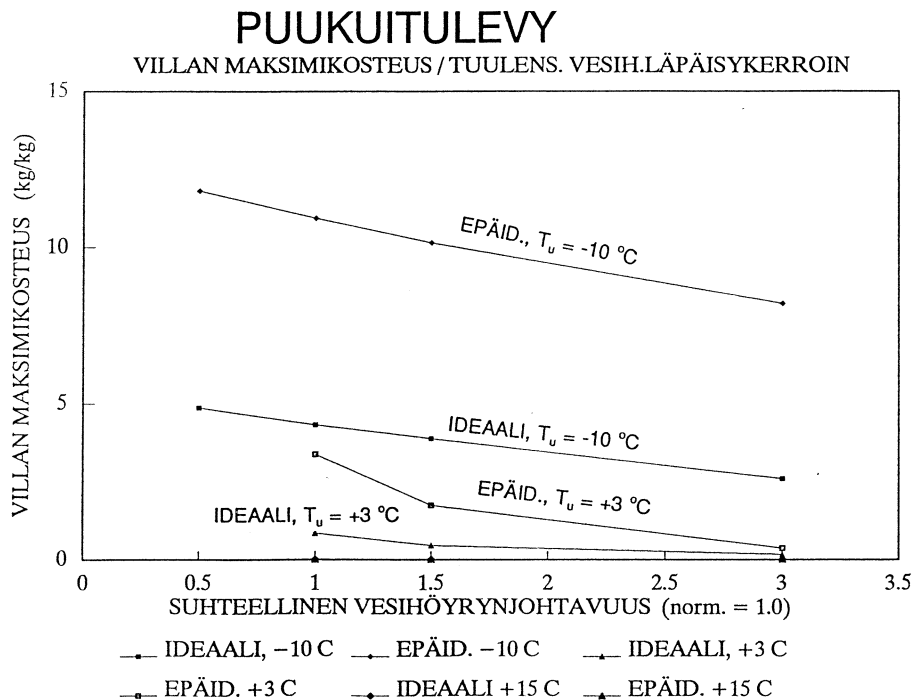
Kuva 53. Rakenteesta kipsilevytuulensuojan kautta kuivuneen kosteuden keskimääräiset massavirrantiheydet tuulensuojan vesihöyrynjohtavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.



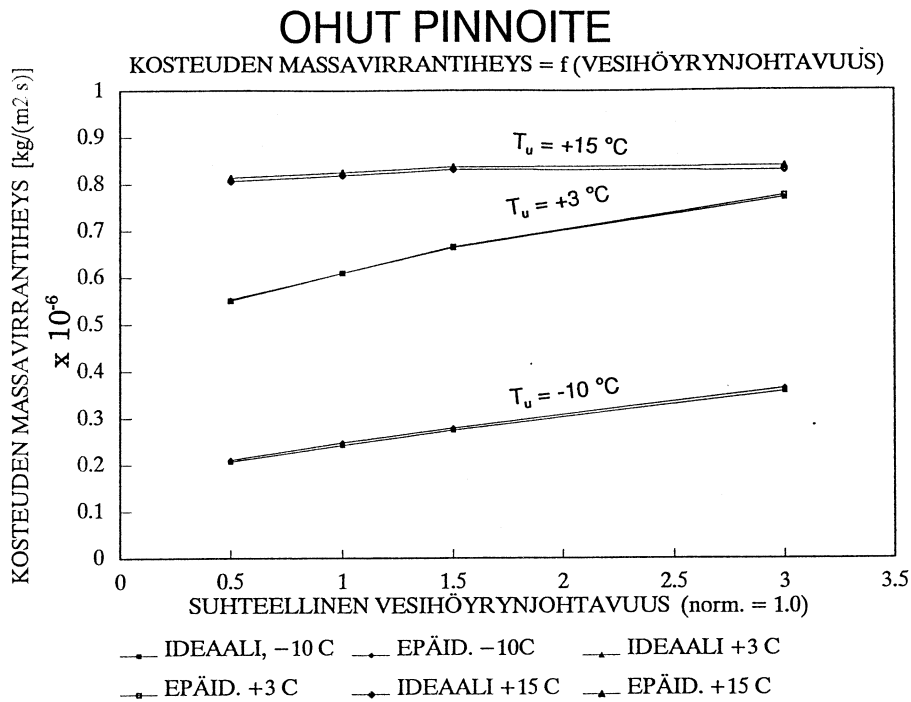
Kuva 54. Kipsilevytuulensuojarakenteen lämmöneristeen maksimikosteudet tuulensuojan vesihöyrynjohtavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.



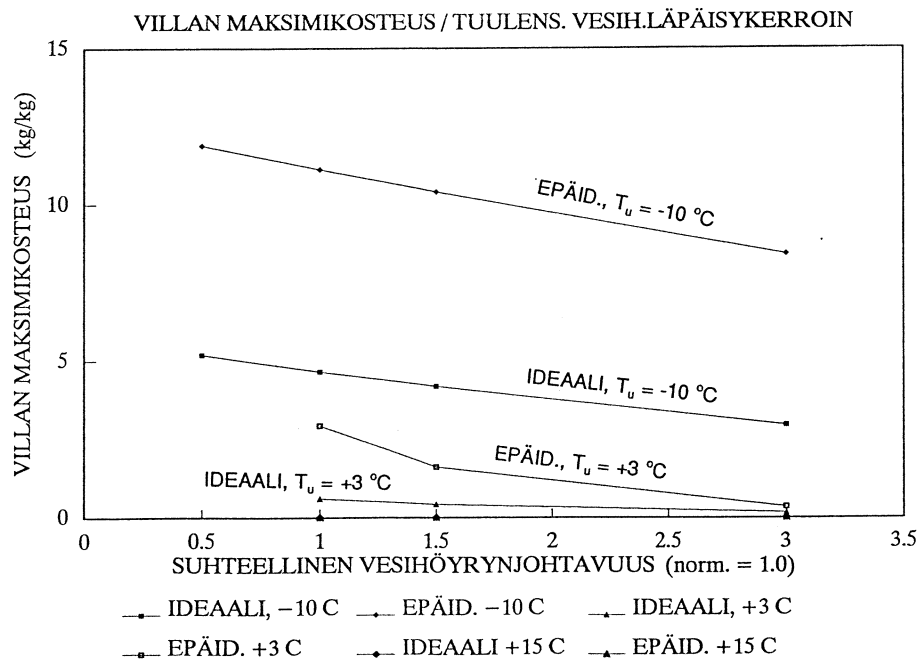
Kuva 55. Rakenteesta huokoisen puukuitulevytuulensuojan kautta kuivuneen kosteuden keskimääräiset massavirrantihetydet tuulensuojan vesihöyrynjoh- tavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.



Kuva 56. Puukuitulevytuulensuojarakenteen lämmöneristeen maksimikosteudet tuulensuojan vesihöyrynjoh- tavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.



Kuva 57. Rakenteesta muovilaminoidun pinnoitetuulensuojan kautta kuivuneen kosteuden keskimääräiset massavirrantiheydet tuulensuojan vesihöyrynjohtavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.



Kuva 58. Muovilaminoidun pinnoitetuulensuojarakenteen lämmöneristeen maksimikosteudet tuulensuojan vesihöyrynjohtavuuden suhteellisen muutoksen funktiona.

Ulkolämpötilan vaikutus

Laskelmien tuloksista voidaan todeta, että rakenteen kuivuminen on sitä tehokkaampaa, mitä korkeampi ulkolämpötila on. Ulkopuolen lämpötilalla on saman suuntainen vaikutus myös lämmöneristeen tuulenpuoleisen osan maksimikosteuksiin: Lämpötilassa + 15 °C oli lämmöneristeen kylmä pinta jokseenkin kuiva ($u < 0,02 \text{ kg/kg}$), kun taas -10 °C:n ulkolämpötilassa paikalliset kosteuspitoisuudet olivat suurimmillaan ideaalisella rakenteella noin 6 kg/kg, mikä vastaa noin 120 kg/m^3 :n kosteusosatiheyttä.

Kuivumisnopeuteen vaikutti paitsi vesihöyrynjohtavuuden kasvu lämpötilan kasvaessa myös se, että alemmilla ulkolämpötiloilla vesihöyryn osapaine-ero rakenteen ja kylmän puolen ilmatilan välillä oli pienempi kuin korkeammilla arvoilla. Laskelmissa tämä vaikutus korostui, sillä ulkopuolen suhteelliset kosteudet oli valittu siten, että alemmilla lämpötiloilla suhteellinen kosteus oli suurimmillaan. Valituilla arvoilla pyrittiin kuvaamaan rakenteiden todellisia, keskimääräisiä käyttöolosuhteita.

Rakenteen epäideaalisuuden vaikutus

Rakenteen epäideaalisuus ei merkittävästi vaikuta rakenteen keskimääräiseen kosteustekniseen toimintaan. Kokonaiskosteudet saman tuulensuojan rakenteissa ovat jokseenkin samat sekä ideaalisella että epäideaalisella rakenteella.

Rakenteen lämmöneristeen epäideaalisuus lisäsi huomattavasti lämmöneristeen paikallisia maksimikosteuksia. Rakenteeseen laskennassa oletetut ilmaraot lisäsivät konvektiota paikallisesti, jolloin kosteus kulkeutui ideaalista rakennetapausta nopeammin kylmän pinnan lähelle, jossa se kondensoitui, ja paikallinen kerääntymä saattoi kasvaa suureksi. Suurimmat suhteelliset erot näkyivät + 3 °C:n lämpötilassa, jossa epäideaalisuus kasvatti paikallisen kosteuspitoisuuden jopa 4 - 6 kertaiseksi ideaalisen rakenteen arvoihin verrattuna. Suurimmat kosteuspitoisuudet esiintyivät -10 °C:n ulkolämpötilassa, jolloin lämmöneristeen paikallinen kosteuspitoisuus oli jopa 13 kg/kg (noin 260 kg/m^3). + 15 °C:n ulkolämpötilassa rakenteiden kuivuminen oli niin tehokasta, että epäideaalisuudet eivät vaikuttaneet paikallisiin kosteuspitoisuuksiin.

Vesihöyrynjohtavuuden vaikutus

Tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen muutos ei vaikuttanut rakenteiden kuivumiseen. Ainoa mahdollisuus tehostaa rakenteiden kuivumista materiaaliominaisuuksia muuttamalla on kasvattaa tuulensuojan vesihöyrynläpäisykerrointa [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$] tai materiaalin vesihöyrynjohtavuutta [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$].

Selvimmän vesihöyrynsuojavuuden vaikutus näkyy kuvissa 53 - 58. Kipsilevyssä vesihöyrynsuojavuuden kasvattaminen 50 % kuivan tilan arvosta pienensi lopullisen kosteuden määrää -10 °C :n ulkolämpötilassa noin 1 % ja $+3\text{ °C}$:ssa noin 2,5 % verrattuna alkukosteuteen. Tämä merkitsee rakenteesta poistuneen keskimääräisen kosteusvirran kasvua noin 11 %:lla (-10 °C) ja 9 %:lla ($+3\text{ °C}$). Kun vesihöyrynsuojavuutta kasvatettiin kolminkertaiseksi kuivan tilan arvosta, kasvoivat keskimääräiset kosteuden kuivumisvirrantiheydet kipsituulensuojalla noin 43 % (-10 °C) ja 27 % ($+3\text{ °C}$).

Puukuitulevytuulensuojalla kasvoivat kosteuden kuivumisvirrat 3-kertaisella vesihöyrynsuojavuudella -10 °C :n ja $+3\text{ °C}$:n ulkolämpötiloissa vastaavasti noin 94 % ja 40 %. Ohuella pinnoitteella päästiin vastaavassa tapauksessa noin 48 %:n ja 27%:n kuivumisvirran kasvuihin.

Vesihöyrynsuojavuuden muutoksen vähäisempi vaikutus $+3\text{ °C}$:n kuivumisvirtoihin johtuu siitä, että kosteuden siirtyminen lämmöneristeen läpi ei enää 'parannetun' tuulensuojan arvoilla riitä ylläpitämään kyllästystilaa tuulensuojan ja villan rajapinnalla. Tällöin vesihöyryn osapaine-ero tuulensuojan yli pienenee ja rakenteen kuivuminen hidastuu, vaikka kaikki kylmälle pinnalle tuleva kosteus kuivuu rakenteesta.

Samansuuntainen vaikutus näkyi myös rakenteen maksimikosteuksissa, jotka pienenevät kun vesihöyrynsuojavuutta kasvatettiin. Ideaalisessa rakenteessa lämmöneristeen kylmän pinnan maksimikosteus kuvaa kohtuullisella tarkkuudella keskimääräisiä kosteusoloja tuulensuojan rajapinnalla. $+15\text{ °C}$:n ulkolämpötilassa maksimikosteudet osoittivat, että missään tarkastellussa rakennetapauksessa ei ollut kondenssioloja ($u < 0,45\text{ kg/kg}$). Kondenssioloja ei myöskään esiintynyt $+3\text{ °C}$:n ulkolämpötilassa, kun vesihöyrynsuojavuutta parannettiin kolminkertaiseksi kuivan tilan arvosta.

Ulkolämpötilassa -10 °C ei tuulensuojan kondenssioloja voitu välttää edes vesihöyrynsuojavuutta kasvattamalla. On kuitenkin tärkeää, että tuulensuoja läpäisee mahdollisimman paljon tulevasta kosteudesta myös pakkasessa. Lisäksi tuulensuojan mahdollinen kosteuskapasiteetti tasoittaa paikallisia kosteuskertymiä.

Vesihöyrynsuojavuuden kasvattaminen vaikutti kosteuden kuivumisvirran tiheyteen suhteellisesti eniten -10 °C :ssa. Juuri jäätymisalueella rakenteisiin voi kerääntyä kosteutta ja niiden kuivumista tulee tehostaa. Vesihöyrynsuojavuus on tässä nimenomaan kaasufaasin kosteuden siirtoa kuvaava ominaisuus. Kapillaarinen kosteusvirtaus tuulensuojassa tehostaa rakenteiden kuivumista $T > 0\text{ °C}$ -oloissa, mutta jäätymisalueella tästä ei ole hyötyä veden jäätyessä. Yleensä kapillaarisesti

kosteutta hyvin johtavan materiaalin vesihöyryn diffuusiovastus on suuri, jolloin jäätymisalueen kosteusongelmat ovat mahdollisia.

4.4.3 Yhteenveto laskelmien antamista tuloksista

Tuulensuojauksen ilmanläpäisykerrointa kasvattamalla ei voida merkittävästi lisätä rakenteiden kuivumista kosteusrasituksessa. Ilmanläpäisykertoimen suositusarvon ylärajalla kosteusvirta rakenteesta ulos oli noin 5 % suurempi kuin täysin ilmatiiviin tuulensuojan tapauksessa. Toisaalta ilmanläpäisykertoimen kasvattaminen lisää paikallisia kosteuskertymiä erityisesti kun rakenteen lämmöneristys on epäideaalisesti toteutettu. Siten myös kosteusteknisen toiminnan kannalta ovat suhteellisen pienet ilmanläpäisykertoimet suositeltavia.

Tuulensuojamateriaalin vesihöyrynsuhtavuuden kasvattaminen parantaa rakenteiden kuivumista. Olennaista on lisätä kaasufaasin kosteudensiirtoa tuulensuojan läpi, jolloin rakenteiden kuivuminen tehostuu myös jäätymisalueella.

4.5 JOHTOPÄÄTÖKSET TUULENSUOJAN KOSTEUSTEKNISESTÄ TOIMIVUUDESTA

Rakenteista ja käyttöoloista riippuen tulisi tuulensuojan kosteusteknisessä toimivuudessa varautua normaaleista käyttötilanteista poikkeaviin kosteusrasituksiin. Suuria kosteuskuormia esiintyy tyypillisesti esimerkiksi heti rakentamisen jälkeen, jolloin rakentamisen aikainen kosteus tulisi poistaa rakenteista. Samoin muiden rakenneosien toiminnan tai ympäristöolosuhteiden poikkeaminen suunnitelluista voi aiheuttaa kosteusrasituksia.

Tutkittujen tuulensuojamateriaalien kyky selviytyä rakenteiden kosteusrasituksista vaihteli suhteellisen paljon. Tarkastelluissa tapauksissa kosteusmäärät rakenteissa olivat suuret. Vaikka kosteuden kuivuminen rakenteesta joillain tuulensuojilla oli keskimääräistä hitaampaa, ei se merkitse etteikö ko. tuulensuoja toimisi hyvin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Itse tuulensuoja ei aiheuta kosteusriskejä, mutta sen tulisi voida poistaa kosteusriskit tehokkaasti. Riskien välttämiseksi on tuulensuojan valinnassa otettava huomioon mahdolliset kosteuskuormat. Riskialttiissa tapauksissa, joissa kosteudet rakenteissa voivat olla suuret, esimerkiksi eristettäessä märkäpuhallusvillalla, tulisi pyrkiä riskien minimointiin valitsemalla mahdollisimman hyvin kosteutta kylläisenä ja jopa jäisenä läpäisevä tuulensuoja.

Tulosten perusteella tutkittujen tuulensuojien joukossa ei ollut ideaalista tuulensuojamateriaalia. Niiden kosteudensiirto-ominaisuuksissa on edelleen parantamista. Massapintainen villatuulensuoja toimi kosteusteknisesti suhteellisen hyvin myös pakkasessa, mutta tuotteen ilmanläpäisykertoimet eivät vastanneet tarkasteltuihin (luku 3.4) rakennetapauksiin suositeltuja arvoja.

Tarkkojen suositusarvojen esittäminen tuulensuojan vesihöyryn läpäisykertoimelle on vaikeaa, koska tätä ei voida määrittää riittävän luotettavasti lähellä kyllästystilan oloja. Erityisesti ongelma korostuu ohuilla pinnoitteilla. Levymäisillä tuulensuojilla märkäkuppikokeet antavat suhteellisen hyvän kuvan tuotteen toiminnasta oloissa, joissa tuotteen toinen pinta on lähellä kondenssitilaa, mutta määritetyt tulokset sisältävät vielä mahdollisen kapillaarisen kosteudensiirron. Samoin kriteerien määrittystä vaikeuttaa esiintyvien kosteuskuormien valinta ja vaatimukset niiden kuivumisajoista.

Tuulensuojan kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttaa olennaisesti sen kyky läpäistä vesihöyryä kyllästystilassa myös lämpötiloissa $T < 0$ °C, mikä vastaa talvikauden aikaista tilannetta. Tämän ominaisuuden toteaminen onnistuu parhaiten testaamalla tuote mahdollisesti esiintyviä vaikeita käyttöoloja vastaavissa kokeissa. Tässä tutkimuksessa esitetty menetelmä, jossa kosteuden kuivumista seurattiin 1-dimensioissa kosteudensiirtotilanteessa antaa mahdollisuuden tuotteiden toiminnan vertailuun ja arviointiin.

Kuivumiskokeiden perusteella voidaan kohtuullisen hyvänä vesihöyrynläpäisykertoimena $+20 / -10$ °C:n oloissa pitää tasoa $8 - 10 \cdot 10^{-9}$ kg/(s·m²·Pa) ja levymäisillä tuulensuojilla noin $6 - 8 \cdot 10^{-9}$ kg/(s·m²·Pa). Suositustasoksi voidaan valita selvästi pienempi arvo, esimerkiksi $2 - 3 \cdot 10^{-9}$ kg/(s·m²·Pa). Esitetyt arvot kuvaavat kosteuden siirtymistä puhtaasti vesihöyryn diffuusiona lähellä kyllästystilan (RH = 100 %) olosuhteita. Näitä vastaavia tunnuslukuja ei perinteisin kuppikoemenetelmin voida määrittää.

Tuulensuojamateriaalin tulisi olla niin suurihuokoista, että kosteus siirtyy pääasiassa kaasufaasin diffuusiona sen läpi. Tällöin kuivuminen myös pakkasjakson aikana olisi mahdollista. Samalla tuulensuojan tulee olla riittävän ilmatiivistä.

Käännetty tuulensuoja, jossa tuulensuojan pinnoite on lämmöneristeen sisällä, parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Tuulensuojan pinta on pidemmän aikaa 'sulana' ja vesihöyryn osapaine-ero pinnoitteen ylitse on suurempi kuin ulkopintaan asennetussa tapauksessa.

5 TUULENSUOJALTA EDELLYTETTÄVÄT OMINAISUUDET JA JATKOTUTKIMUSTARVE

Rakenteen vaipan lämpöhäviöiden kasvu asettaa rajat tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen suositusarvoille. Suositusarvot riippuvat mahdollisista paineoloista rakenteissa.

Pelkän luonnollisen konvektion tilanteessa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle riittävä arvo on noin $100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Tällöin tuulensuoja rajoittaa rakenteen ulkopinnan läpi tapahtuvia ilmavirtauksia, mikä vaimentaa erityisesti epäideaalisilla rakenteilla luonneollisen konvektion vaikutuksia rakenteen lämpöhäviöihin. Tuulelle alttiissa, osastoiduissa rakenteissa, joissa nurkkakonvektio on merkityksetön, voi tuulensuojakerroksen ilmanläpäisykertoimen maksimiarvo olla luokkaa $25 - 30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Osastoimattomissa rakenteissa, joissa voimakas nurkkakonvektio on mahdollinen, voidaan riittävänä tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen maksimiarvona pitää suuruusluokkaa $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

Tuulensuojauksen tiiviys tarkoittaa tuulensuojakerroksen toteutuksen pitkäaikaista kokonaistiiviyyttä eikä pelkästään tuulensuojamateriaalille määritettyä ilmanläpäisevyyttä. Tärkeää on rakenteen eristekerroksen ja tuulensuojan mahdollisimman ideaalinen toteutus siten, että materiaalikerrosten rajapinnat ovat tiiviit eikä niissä ole ilmavirtausta kasvattavia rakoja. Tässä tutkimuksessa ei ole käsitelty tuulensuojan säänkesto-ominaisuuksia. Näillä voi olla suuri merkitys sekä tuulensuojan että koko rakenteen ominaisuuksien säilymisen kannalta rakentamisen aikaisissa olosuhteissa, kun tuulensuoja on usein pitkäänkin ilman ulkoverhouksen antamaa suojaa.

Nurkkarakenteisiin sijoitettava ylimääräinen konvektiokatko (tuulensuojakerros) on tehokas tapa pienentää tuulen aiheuttamia lämpöhäviöitä. Kun ylimääräinen konvektiokatko on ulkovaipan eri rakenneosien välissä, tämä ei aiheuta estettä kosteuden kuivumiselle rakenteesta ulos. Rakenteiden osastointi pienentää riskiä, mikä sisältyy korkeisiin nurkkapaine-eroihin ja vain yhteen tuulta rajoittavaan kerrokseen. On suositeltavaa yhdistää ulkovaipan tuuletusilmatilojen rakenteellinen paineentasaus osastoituihin rakenneratkaisuihin ja tälle suositeltuun tuulensuojan vähimmäistiiviYTEEN.

Tuulensuojan kosteusteknisessä toimivuudessa tulisi varautua normaaleista käyttötilanteista poikkeaviin kosteusrasituksiin. Tällaisia ovat esimerkiksi rakentamisen jälkeinen kosteuskuorma ja muiden rakenneosien toiminnan tai ympäristöolosuhteiden poikkeaminen suunnitelluista.

Tuulensuojan vesihöyrynläpäisykertoimelle ei voida esittää tarkkoja suositusarvoja, koska tätä ei voida määrittää luotettavasti niissä oloissa, joissa rakenteet joutuvat toimimaan silloin, kun rakenteissa on ylimääräistä kosteutta, ts. lähellä kyllästystilan oloja. Erityisesti ongelma korostuu ohuilla pinnoitteilla, jotka ovat koko kerrospaksuudeltaan jokseenkin samassa tilassa. Tyypillisillä kuppikoemenetelmillä voidaan määrittää tietyllä kosteusalueella ($< 100 \% RH$), lämpötilassa $T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, materiaalin läpi kaikissa faaseissa tapahtuvaa kosteuden siirtymistä kuvaava tunnuskuva.

Tuulensuojan kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttaa olennaisesti sen kyky läpäistä vesihöyryä kyllästystilassa myös lämpötiloissa $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mikä vastaa talvikauden aikaista tilannetta. Tämän ominaisuuden toteaminen onnistuu parhaiten testaamalla tuote mahdollisesti esiintyviä vaikeita käyttöoloja vastaavissa kokeissa. Tässä tutkimuksessa esitetty menetelmä, jossa kosteuden kuivumista seurattiin 1-dimensioissa kosteudensiirtotilanteessa antaa mahdollisuuden tuotteiden toiminnan vertailuun ja arviointiin.

Sijoittamalla tuulensuoja lämmöneristeen sisään voidaan rakenteen kosteusteknistä toimintaa parantaa heikentämättä olennaisesti rakenteen lämpötekniistä toimintaa. Jäätyminen tuulensuojan pintaan on vähäisempää ja vesihöyryn osapaine-ero pinnoitteen ylitse on suurempi kuin ulkopintaan asennetun tuulensuojan tapauksessa. Myös tuulensuojan kosteuskapasiteetti voi pienentää lämmöneristeen kosteutta ja parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa.

Kapillaariset materiaalit toimivat tuulensuojina hyvin veden jäätymisrajan yläpuolella. Pakkasessa jäätyvä kosteus kuitenkin tukkii materiaalia, ja kuivuminen hidastuu olennaisesti.

Tuulensuojamateriaalin tulisi olla niin suurihuokoista, että kosteus siirtyy pääasiassa kaasufaasin diffuusiona sen läpi, jolloin myös talviaikainen kuivuminen on mahdollista.

Jatkotutkimukseen on selvä tarve. Määrittys- ja testausmenetelmien kehittäminen tuulensuojan kosteudensiirto-ominaisuuksien mittaamiseksi ja arvioimiseksi on välttämätöntä. Eri tuulensuojamateriaalien ja -rakenteiden toimintaa on voitava vertailla todellisissa käyttöolosuhteissa, ja materiaalien kosteusteknisille ominaisuuksille tulee voida esittää mitattavissa olevat arvot. Erityisesti tarve korostuu ohuilla pinnoitteilla, kuten esimerkiksi paperi-, muovilaminaatti- ja maalikerroksilla. Lisäksi jatkotutkimusta tarvitaan rakenteiden kosteuskuormien ja tuuletustarpeen määrittämisessä sekä tuuletuksen mitoituksen perusteiden selvityksessä. Tämän perusteella voidaan arvioida mm. tuulensuojaan kohdistuvat kosteusrasitukset.

LÄHDELUETTELO

1. Boverkets Nybyggnadsregler. Föreskrifter och allmänna råd. BFS 1988:18. Svensk Tryck, Stockholm 1989.
2. Hens, H. Enquiry on existing HAMCaT codes. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven 1992. Report IEA/Annex 24, Task 1, Modelling. 21 s. + liitt. 5 s.
3. Kohonen, R., Kokko, E., Mähönen, T. & Ojanen, T., Mineraalivillaeristyksen ilmavirtaukset ja tuulensuojaus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Tutkimuksia 431. Espoo 1986. 119 s.
4. National Building Code of Canada.
5. Ojanen, T. Classification of model TCCC2D. IEA/Annex 24, Task 1, Report SF-T1-91/02. Espoo 1991. 8 s.
6. Ojanen, T. & Kohonen, R. Hygrothermal influence of air convection in wall structures. Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV, Orlando, December 4 - 7, 1989. s. 234 -249.
7. Ojanen, T. & Kumaran, M., K. Air Exfiltration and Moisture Accumulation in Residential Wall Cavities. Proceedings of the Fifth Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings Conference, ASHRAE/DOE/BTECC, Clearwater Beach, Florida Dec. 7.-10., 1992. s. 491 - 500.
8. Ojanen, T., Salonvaara, M., Kohonen, R. & Nieminen, J. Kosteuden siirtyminen rakenteissa. Laskentamenetelmät. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Tutkimuksia 595. 102 s.
9. Sisäasiainministeriön kirje no 3897/545/76, Liite 1 , Sisäasiainministeriö, Kaavoitus- ja rakennusosasto, Helsinki 22.12.1976.
10. Uvsløk, Sivert (NBI) ja Kokko, Erkki (VTT) keskustelut 4.9.1991 ja 2.6.1992.

11. Vindskydd av duk, folie mm, utgåva 1.9A. Sveriges Plastförbund SPF Verksnorm 2500, Första giltighetsdag 1.5.1991.
12. Vindskydd egenskaper och krav. Boverket, Typgodkännandekontoret, 20.11.1989, rev. 12.9.1990. 3 s.

TAVALLISIMMAT SUUREET SEKÄ NIIDEN SYMBOLIT JA YKSIKÖT

Tässä esitettyjä suuremerkkejä ja yksiköitä /1 -5/ käytetään VTT:n tutkimusselostuksissa ja niitä suositellaan käytettäväksi muussakin raportoinnissa.

Suure	Merkki	Yksikkö
LÄMPÖ		
Lämpömäärä:	Q	J
Lämpövirta: $\phi = dQ/dt$	ϕ	W
Lämpövirran tiheys: $q = d\phi/dA$	q	W/m ²
Lämpövirta pituusyksikköä kohden: $q = d\phi/dl$	q	W/m
Lämmönjohtavuus: $q = -\lambda \text{ grad } T$	λ	W/(m · K)
Lämmönvastus: $R = (T_{s1} - T_{s2})/q$	R	(m ² · K)/W
Lämmönvastus pituusyksikköä kohden: $R = (T_{s1} - T_{s2})/q$	R	(m · K)/W
Pinnan lämmönsiirtymiskerroin: $h = q/(T_s - T_e)$	h	W/(m ² · K)
Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus: $R_{si} = (T_i - T_{si})/q$ $R_{se} = (T_{se} - T_e)/q$	R_{si}, R_{se}	(m ² · K)/W
Lämmönläpäisykerroin: $U = \phi/(T_i - T_e)A$ Huom: Toistaiseksi käytetään rinnakkain k-arvoa	U (k)	W/(m ² K)
Lämpökonduktanssi: $G = \phi/(T_i - T_e)$	G	W/K
Terminen diffusiviteetti: $a = \lambda/\rho c$ (Lämpötilanjohtavuus)	a	m ² /s

Suure	Merkki	Yksikkö
<p>Ominaislämpö: $c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$, vakiopaineessa vakiotilavuudessa</p>	<p>c_p c_v</p>	<p>J/(kg · K) J/(kg · K)</p>
<p>Tilavuuslämpökapasiteetti: $C'' = \frac{C}{V}$</p>	<p>C''</p>	<p>J/m³K</p>
<p>Lämpökapasiteetti: $C = \frac{dQ}{dT}$</p>	<p>C</p>	<p>J/K</p>
<p>Pituuden lämpölaajenemiskerroin: $\alpha = \frac{1}{\ell} \frac{d\ell}{dT}$</p>	<p>α_ℓ</p>	<p>K⁻¹</p>
<p>Tilavuuden lämpölaajenemiskerroin: $\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$</p>	<p>α_v</p>	<p>K⁻¹</p>
<p>Lämpötila: termodynaaminen celsius</p>	<p>T t</p>	<p>K °C</p>
<p>KOSTEUS JA ILMA</p>		
<p>Kosteus: Vesi kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa.</p>		
<p>Vesihöyry: Kosteus kaasumaisessa olomuodossa</p>		
<p>Vesihöyrypitoisuus (tilavuusyksikössä): Vesihöyryn massa jaettuna kaasuseoksen tilavuudella</p>	<p>ν</p>	<p>kg/m³</p>
<p>Vesihöyryn massaosuus: Vesihöyryn massa jaettuna kuivan ilman massalla</p>		<p>kg/kg</p>

Suure	Merkki	Yksikkö
HUOMAUTUKSET		
1. Vesihöyrypitoisuus tarkoittaa samaa kuin vesihöyryn osatiheys, ρ_v		
2. Kyllästystilalle käytetään merkintöjä v_{sat} ja $\rho_{v,sat}$		
Vesihöyryn osapaine: Vesihöyryn osapaine kaasuseoksessa	P_v	Pa
HUOMAUTUS: Kyllästystilalle käytetään merkintää		
$P_{v,sat}$		
Suhteellinen kosteus: Vallitseva vesihöyrypitoisuus jaettuna samaa lämpötilaa vastaavalla kyllästystilan vesihöyrypitoisuudella	ϕ	
$\phi = \frac{v}{v_{sat}}$		
HUOMAUTUS: Oletettaessa vesihöyryn käyttäytyvän ideaalikaasun tavoin käytetään		
$\phi = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$		
Ominaisentalpia: Entalpia jaettuna massalla	h	J/kg
Höyrystymisen (tiivistymisen) ominaisentalpia	h_e	J/kg
Sulamisen (jäätymisen) ominaisentalpia	h_m	J/kg
Kosteuspitoisuus (tilavuusyksikössä): Haihtumiskykyisen veden massa jaettuna aineen tilavuudella	w	kg/m ³

Suure	Merkki	Yksikkö
<p>HUOMAUTUS: Aineen tilavuutena voidaan käyttää joko kostean tai kuivan aineen tilavuutta, mikä on täsmennettävä ilmoitettaessa kosteuspitoisuus. Menetelmä veden haihduttamiseksi kosteasta aineesta on ilmoitettava.</p>		
<p>Kosteuden massaosuus: Haihtumiskelpoisen veden massa jaettuna aineen massalla.</p>	u	kg/kg
<p>Kosteuden tilavuusosuus: Haihtumiskelpoisen veden tilavuus jaettuna aineen tilavuudella</p>		m ³ /m ³
<p>HUOMAUTUS: Aineen massana voidaan käyttää joko kostean tai kuivan aineen massaa, mikä on täsmennettävä ilmoitettaessa kosteuden massaosuus. Menetelmä veden haihduttamiseksi kosteasta aineesta on ilmoitettava.</p>		
<p>Kosteusvirta: Järjestelmään siirtyvän tai siitä poistuvan kosteuden massa jaettuna ajalla.</p>	G	kg/s
<p>Kosteusvirran tiheys: Kosteusvirta jaettuna pinta-alalla.</p>	g	kg/(m ² · s)
<p>Vesihöyryn diffuusiokerroin ilmassa: Seuraavan lausekkeen määrittelemä suure:</p>		
<p>a) Vesihöyrypitoisuuteen perustuva vesihöyryn diffuusiokerroin</p>		
<p>$g = - D \text{ grad}$</p>	D	m ² /s
<p>b) Vesihöyryn osapaineeseen perustuva vesihöyryn diffuusiokerroin</p>		
<p>$g = - \delta_a \text{ grad } p$</p>	δ_a	kg/(m·s·Pa)

Suure	Merkki	Yksikkö
<p>D:n ja δ_a:n välisen riippuvuuden ilmaisee kaava</p> $\delta_a = \frac{D \cdot M}{R \cdot T}$ <p>jossa</p> <p>R on 8314,3 J/(kmol · K) M_{H_2O} on 18,015 kg/kmol</p> <p>Diffuusiokerroin D lasketaan kaavalla /5/</p> $D = 23,06 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ <p>jossa</p> <p>p_0 on 1013,25, mbar (\approx hPa) p on vallitseva ilmanpaine, mbar</p> <p>Kosteudenläpäisevyys: Seuraavien lausekkeiden määrittelemät suureet:</p> <p>a) Vesihöyrypitoisuuteen perustuva kosteudenläpäisevyys</p> $g = -\delta_v \text{ grad } v$ <p>b) Vesihöyryn osapaineeseen perustuva kosteudenläpäisevyys</p> $g = -\delta_p \text{ grad } p_v$	<p>δ_v</p> <p>δ_p</p>	<p>m^2/s</p> <p>kg/(m·s·Pa)</p>

Suure	Merkki	Yksikkö
<p>joissa</p> <p>g on kosteusvirran tiheysvektori; v on huokosten vesihöyrypitoisuus; p on vesihöyryn osapaine huokosissa.</p> <p>HUOMAUTUS - Vesihöyryn siirtyminen huokoisissa aineissa voi tapahtua useilla mekanismeilla. Tavallisesti käytetään vesihöyrypitoisuutta tai vesihöyryn osapainetta.</p> <p>Sanaa diffuusio ei tule käyttää tässä yhteydessä, koska osa kosteusvirrasta liikkuu nesteenä.</p> <p>Läpäisevyydet riippuvat vastaavasta suhteellisen kosteuden tasosta tai aineen kosteuspitoisuudesta.</p> <p>Kosteudenläpäisykerroin: Seuraavien lausekkeiden määrittelemät suureet:</p> <p>a) Vesihöyrypitoisuuteen perustuva kosteudenläpäisykerroin</p> $g = W_v (v_1 - v_2)$ <p>b) Vesihöyryn osapaineeseen perustuva kosteudenläpäisykerroin</p> $g = W_p (p_1 - p_2)$ <p>joissa</p> <p>g on kosteusvirran tiheys kohtisuoraan ainekerroksen pintoja vastaan; v_1 ja v_2 ovat ympäristön ilmatilojen vesihöyrypitoisuudet; p_1 ja p_2 ovat ympäristön ilmatilojen vesihöyryn osapaineet</p>	<p>W_v</p> <p>W_p</p>	<p>m/s</p> <p>kg/(m²·s·Pa)</p>

Suure	Merkki	Yksikkö
<p>Kosteudenläpäisyvastus: Kosteudenläpäisykertoimen käänteisarvo:</p> <p>a) Vesihöyrynpitoisuuden perustuva kosteudenläpäisyvastus</p> $Z = \frac{1}{W_v} ; (g = \frac{v_1 - v_2}{Z_v})$ <p>b) Vesihöyryn osapaineeseen perustuva kosteudenläpäisyvastus</p> $Z_p = \frac{1}{W_p} ; (g = \frac{p_1 - p_2}{Z_p})$ <p>Kosteudenvastuskerroin: Höyryn diffuusiokerroin ilmassa, D, jaettuna huokoisen aineen kosteudenläpäisevyydellä δ (tai δ_a/δ_p)</p> <p>Kosteuskapasiteettikerroin: Seuraavan lausekkeen määrittelemä suure:</p> $= \frac{dw}{d\phi}$ <p>jossa</p> <p>w on kosteuspitoisuus; ϕ on suhteellinen kosteus.</p>	<p>Z_v</p> <p>Z_p</p> <p>μ</p>	<p>s/m</p> <p>$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$</p> <p>kg/m^3</p>

Suure	Merkki	Yksikkö
<p>HUOMAUTUS: Tämä lukuarvo ilmaisee hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän tangentin arvon.</p>		
<p>Pinnan kosteudensiirtymiskerroin: $g = \beta_p (p_e - p_s)$</p>	β_p	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
<p>Kosteuden terminen diffuusiokerroin: Seuraavan lausekkeen määrittelemä suure:</p>		
<p>$g = - D_T \text{ grad } T$</p>	D_T	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$
<p>jossa</p> <p>g on kosteusvirran tiheysvektori; T on lämpötila.</p>		
<p>HUOMAUTUS: Terminen diffuusiokerroin riippuu siitä, kuinka kosteusgradientteihin perustuva virtaus on kuvattu.</p>		
<p>Kapillaarisuuskerroin: $m_s = A \sqrt{t}$</p>	A	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$
<p>jossa</p> <p>m_s on vesipinnasta pinta-alayksikköä kohti imeytyvän veden massa.</p>		
<p>Ilman tilavuusvirta: Järjestelmään siirtyvä tai siitä poistuva ilman tilavuus jaettuna ajalla.</p>	R	m^3/s
<p>Ilmavirran tiheys (eli nopeus): Ilmavirta jaettuna pinta-alalla.</p>	r	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
<p>Huokoisen aineen permeabiliteetti: Seuraavan lausekkeen määrittelemä suure:</p>		

Suure	Merkki	Yksikkö
$r = - \frac{k}{\eta} \text{ grad } p$ <p>jossa</p> <p>r on kaasuvirran tiheys- eli nopeusvektori huokoisessa aineessa; p on kaasun paine [Pa]; η on kaadun dynaaminen viskositeetti vakiolämpötilassa [Ns/m²].</p>	k	m ²
<p>Ilmanläpäisevyys: Seuraavan lausekkeen määrittelemä suure</p> $l = \frac{k}{\eta}$	l	m ³ /(m·s·Pa)
<p>HUOMAUTUS: Ilman dynaaminen viskositeetin lämpötilariippuvuuden normaalipaineessa ilmaisee kaava</p> $\eta = (17 + 0,05 \delta) \delta \cdot 10^{-6} \text{ (Ns/m}^2\text{)}$		
<p>Ilmanläpäisykerroin: Seuraavan lausekkeen määrittelemä suure:</p> $r = K (p_1 - p_2)$ <p>jossa</p> <p>r on ainekerroksen läpi siirtyvän ilmavirran tiheys eli nopeus; p_1 ja p_2 ovat ilman paineet ainekerroksen eri puolilla.</p> <p>HUOMAUTUS: Ilmanläpäisykerroimen suure K sisältää vakiolämpötilassa olevan ilman viskositeetin vaikutuksen.</p>	K	m ³ /(m ² ·s·Pa)

Suure	Merkki	Yksikkö
MUITA SUUREITA		
Paksuus	d	m
Leveys	b	m
Pituus	ℓ,(a,b,c)	m
Korkeus	h	m
Pinta-ala	A	m ²
Tilavuus	V	m ³
Halkaisija	D	m
Aika	t	s
Massa	m	kg
Tiheys	ρ	kg/m ³
Voima	F	N
Paine	p	Pa
Teho	P	W
Taajuus	f	Hz(=1/s)
Jännite (sähkö)	V	V
Sähkövirta	I	A
Sähkövastus	R	Ω

LÄHDELUETTELO

- /1/ ISO 7345 - 1985(E), Thermal insulation - Physical quantities and definitions. First edition 15.5.1985.
- /2/ ISO 9346:1987(E), Thermal insulation - Mass transfer - Physical quantities and definitions. First edition 1.11.1987.
- /3/ Draft International Standard ISO/DIS 31-4 Quantities and units - Part 4 Heat. ISO/TC 12 Voting beginning 15.3.1990.
- /4/ Ryti, H. Suureet, yhtälöt, symbolit ja merkitsemistavat. Teoksessa: Tekniikan käsikirja 1, kahdeksas, uusittu ja lisätty painos. Jyväskylä 1981. K.J. Gummerus Oy.
- /5/ DIN 52615. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Nov. 1987.

TUOTTEIDEN AINEOMINAISUUSTIETOJA

Vesihöyrynläpäisykertoimet määritettiin kokeellisesti. Muut aine- ja tuoteominaisuustiedot on koottu aikaisemmista tutkimuksista ja valmistajien antamista tiedoista.

TUOTTEIDEN VESIHÖYRYNLÄPÄISYKERTOIMET

Tuote	[kg/(m ² · s · Pa)] · 10 ⁻⁹			
	0/50 % r.h. 20°C	50/97 % r.h. 20°C	73/vesi r.h. 20°C	97/75 % r.h. 5°C
Villatuulensuojan massapinnoite (I, II)	1,5	2,7	3,2	3,1
Kipsilevy	1,3	2,5	11,5	3,6
Huokoinen puukuitulevy	1,5	2,3	7,7	3,1
Villaan kuumasaumattu ohut paperi	3,0	3,8	3,0	6,4
Muovilaminoitu pinnoite	1,5	2,9	8,0	4,8

MUITA AINEOMINAISUUSTIETOJA

Tuote	Neliö-paino (g/m ²)	Paksuus (mm)	Tiheys (kg/m ³)	Lämmön-johtavuus (W/(m · K))	Ilmanläpäisykerroin (m ³ /m ² · s · Pa)
Massapintainen villatuulensuoja (I)	3480	60	58	0,029	35 · 10 ⁻⁶
Kipsilevy	7500	9	833	0,150	2 · 10 ⁻⁷
Massapintainen villatuulensuoja (II)	6300	70	90	0,033	24 · 10 ⁻⁶
Huokoinen puukuitulevy	3420	12	285	0,050	4 · 10 ⁻⁶
Villaan kuumasaumattu ohut paperi	50	-	-	-	1 · 10 ⁻⁷
Muovilaminoitu pinnoite	110	0,25	440	-	1 · 10 ⁻⁸

KOSTEUSJAKAUMAT TÄYSMITTAKAAVAISISSA SEINÄKOKEISSA

Tässä liitteessä esitetään täysmittakaavaisissa seinäkokeissa määritetyt kosteusjakaumat taulukoina ja kuvina.

Kuvissa pylväiden pohjan alue kuvaa rakenteen jakoa osiin seinän paksuus- ja korkeussuunnissa, ja kunkin pylvään korkeus kuvaa ko. alueelle määritettyä kosteusosatiheyttä (kg/m^3). Ylin taulukko ja kuva esittää ensimmäisen purun (+27/-10 °C) tuloksia, keskimäinen toisen purun (2 vrk sulamisvaiheen alun jälkeen mitattuja) ja alin viimeisen purkuvaiheen kosteusjakaumia.

Taulukko 1. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m³) massapintaisen villatuulensuojan (50 mm) ja lämmöneristevillan (150 mm) rakenteessa.

I PURKU. 20 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / -10 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,4	0,9	10,3	9,6	6,6	2,0	0,9
0,0	5,5	24,2	22,0	19,4	1,4	8,1
0,8	6,9	22,5	14,8	13,0	7,8	7,3
0,8	3,6	7,7	12,4	11,1	7,6	2,1

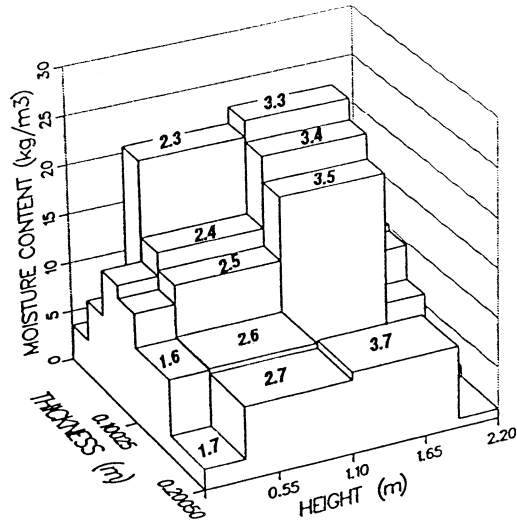
II PURKU. 22 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,4	4,4	21,7	10,0	9,3	6,1	9,0
0,4	7,5	23,7	18,4	15,2	12,5	16,8
0,2	5,5	22,4	12,6	5,2	1,3	0,3
3,8	4,4	10,5	9,2	6,5	0,6	0,0

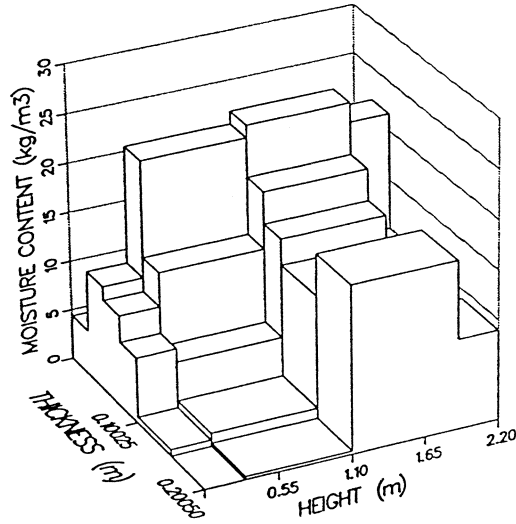
III PURKU. 35 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,6	0,4	0,0	2,1	0,9	0,0	0,0
0,2	0,6	1,6	17,4	5,9	0,2	0,1
0,0	0,3	1,4	0,8	0,3	0,1	0,1
0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,2

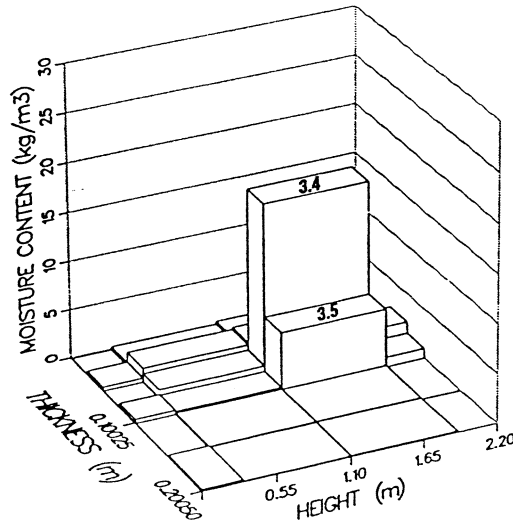
I PURKU



II PURKU



III PURKU



Kuva 1. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) massapintaisen mineraalivillatuulensuojan (50 mm) ja lämmöneristevillan (150 mm) rakenteessa.

Taulukko 2. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) paperituulensuojan (kuumasaumattuna 100 mm lasivillaan kiinni) ja lämmöneristevillan (100 mm) rakenteessa.

I PURKU. 20 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / -10 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,2	37,5	27,3	15,4	12,0	5,7	8,0
0,3	33,7	27,3	20,2	20,2	12,5	13,4
0,3	24,9	18,5	13,2	13,2	6,3	1,7
0,2	13,5	5,7	7,0	4,6	0,6	0,0

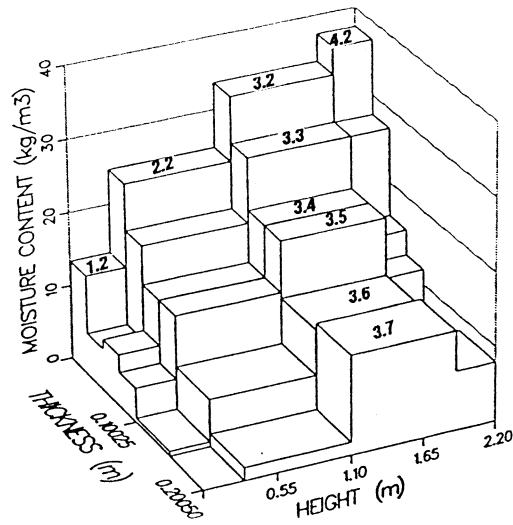
II PURKU. 22 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,5	28,0	22,0	15,2	8,2	2,0	1,5
0,5	27,5	19,9	19,2	19,2	9,4	9,2
0,8	18,7	23,6	17,7	17,7	8,3	5,0
0,9	1,5	3,9	7,8	11,4	10,0	4,0

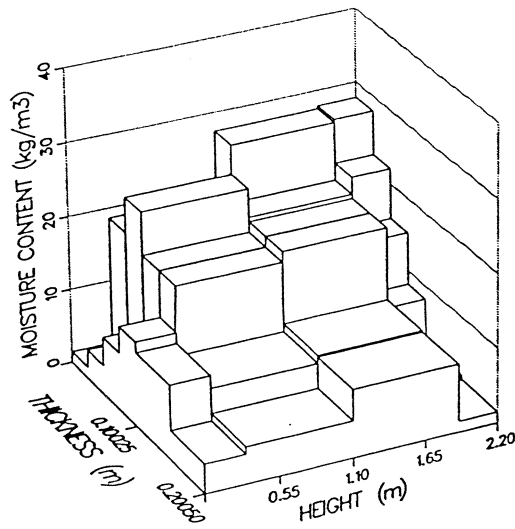
III PURKU. 35 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,2	0,0	0,8	5,3	3,3	0,2	0,0
0,3	0,3	8,7	20,2	20,2	0,6	0,3
0,2	0,3	1,9	5,1	5,1	0,3	0,2
0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

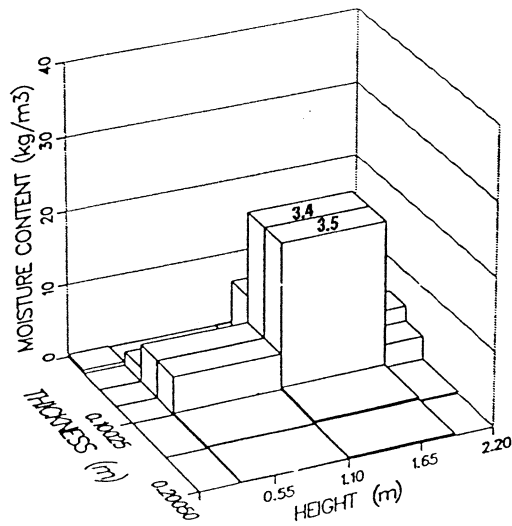
I PURKU



II PURKU



III PURKU



Kuva 2. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) paperituulensuojan (kuumasaumattuna 100 mm lasivillaan kiinni) ja lämmöneristevillan (100 mm) rakenteessa.

Taulukko 3. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) kipsilevytuulensuojan (9 mm) ja lämmöneristevillan (2 x 100 mm) rakenteessa.

I PURKU. 20 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / -10 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
132,4	97,1	28,5	18,5	13,3	7,2	9,2
120,0	61,1	23,3	19,8	16,8	11,5	13,2
143,1	37,3	13,5	9,1	4,4	2,4	1,6
124,6	17,8	6,6	8,6	7,2	2,8	0,0

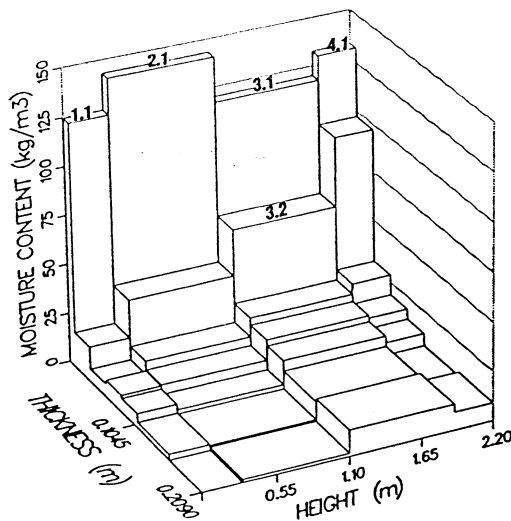
II PURKU. 22 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
115,6	95,7	29,6	16,5	11,9	7,7	9,1
105,2	68,6	25,8	19,4	19,4	12,8	13,4
125,8	37,8	12,9	10,3	10,3	3,7	1,0
93,2	6,2	3,3	4,1	0,5	0,3	0,2

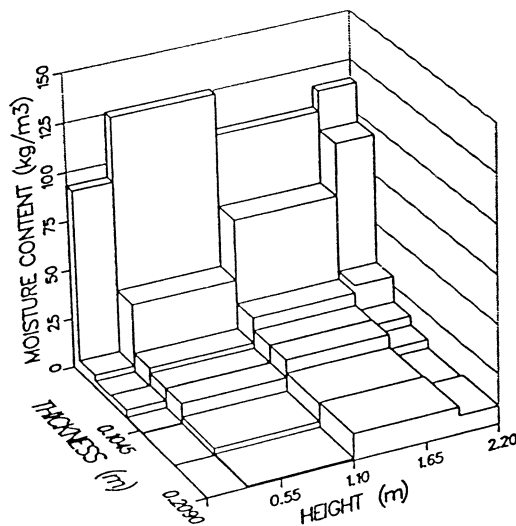
III PURKU. 35 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
121,2	27,1	8,9	2,0	0,0	0,0	0,0
121,2	40,4	19,5	4,5	4,5	0,1	0,2
136,8	24,6	15,2	5,4	5,4	0,8	0,2
128,0	1,4	2,2	1,9	0,7	2,6	0,2

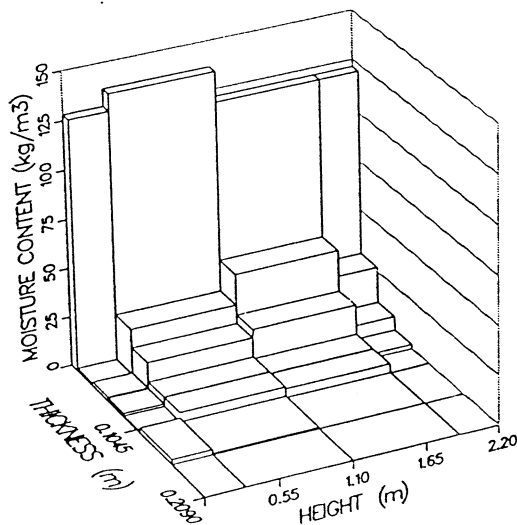
I PURKU



II PURKU



III PURKU



Kuva 3. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) kipsilevytuulensuojan (9 mm) ja lämmöneristevillan (2 x 100 mm) rakenteessa.

Taulukko 4. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) huokoisen puukuitulevytuulensuojan (12 mm) ja lämmöneristevillan (2 x 100 mm) rakenteessa.

I PURKU. 20 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / -10 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
73,0	46,2	16,8	10,3	7,0	6,6	8,6
65,2	30,9	17,4	15,3	12,7	10,2	9,1
50,1	20,8	10,9	9,2	7,2	2,2	0,2
40,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0

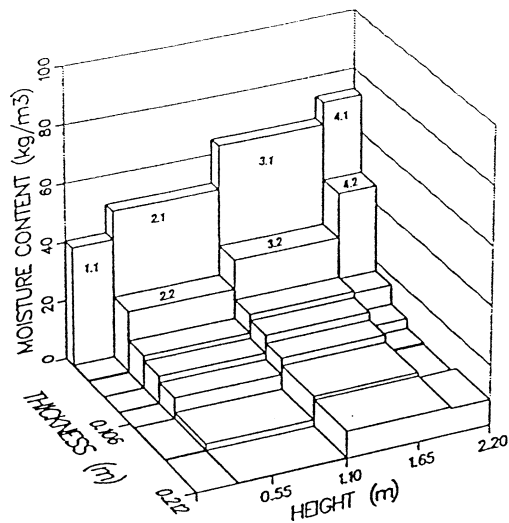
II PURKU. 22 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
58,4	38,7	18,3	11,2	6,8	5,3	7,6
53,0	32,2	18,3	15,6	13,6	10,7	15,6
47,1	11,6	8,0	5,5	4,1	2,7	2,1
32,5	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0

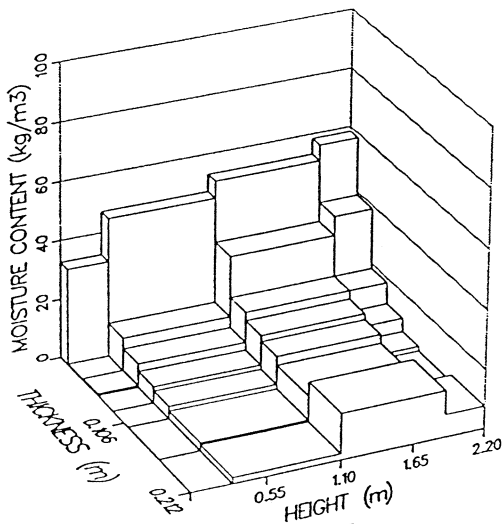
III PURKU. 35 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
59,5	16,4	11,2	5,8	1,7	0,7	0,2
61,9	18,4	18,5	16,1	11,2	4,0	0,1
35,4	0,5	1,8	2,6	2,3	0,1	0,0
29,2	0,4	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0

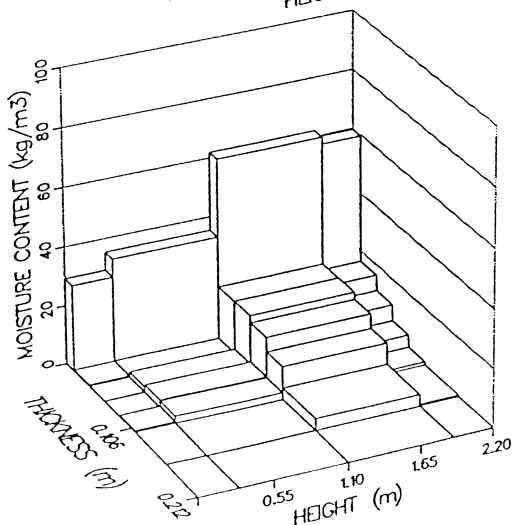
I PURKU



II PURKU



III PURKU



Kuva 4. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) huokoisen puukuitulevytuulensuojan (12 mm) ja lämmöneristevillan (2 x 100 mm) rakenteessa.

Taulukko 5. *Mitatut kosteusjakaumat (kg/m³) ulkopinnalle asennetun muovilaminoidun tuulensuojapinnoitteen ja lämmöneristevillan (2 x 100 mm) rakenteessa. Kosteuspitoisuuden esityksessä on pinnoitteen paksuutena käytetty 5mm, jotta kerroksen pintaan tiivistynyt/jäätynyt kosteus voitiin kuvata.*

I PURKU. 20 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / -10 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
9,1	96,7	20,4	11,5	9,8	5,4	6,8
8,8	68,9	23,1	17,1	17,5	10,5	10,8
12,3	39,4	12,8	10,6	7,3	1,7	0,2
31,4	25,0	3,6	2,2	0,9	1,8	1,3

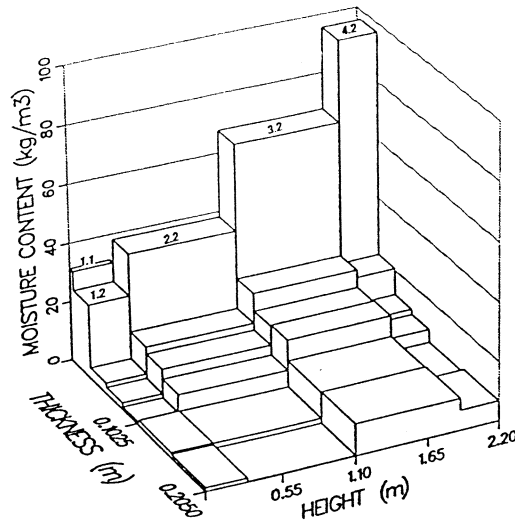
II PURKU. 22 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
11,7	60,1	23,3	14,9	9,8	5,4	6,8
13,7	56,4	31,1	25,4	17,5	11,3	11,9
9,3	24,0	11,7	7,2	0,9	0,1	0,1
15,6	14,3	5,5	2,0	0,4	0,0	0,0

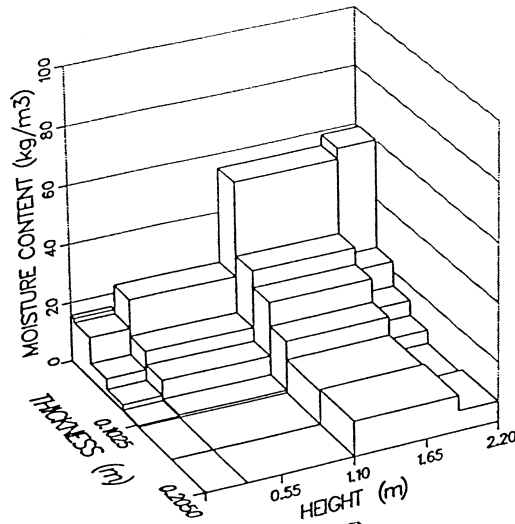
III PURKU. 35 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

TS	25 mm	25 mm	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
11,1	63,6	26,5	12,9	6,8	2,7	0,0
10,3	40,7	27,6	23,8	16,6	7,6	0,5
12,2	33,3	17,6	7,5	1,8	0,4	0,1
9,3	22,8	3,2	0,8	0,8	0,4	0,2

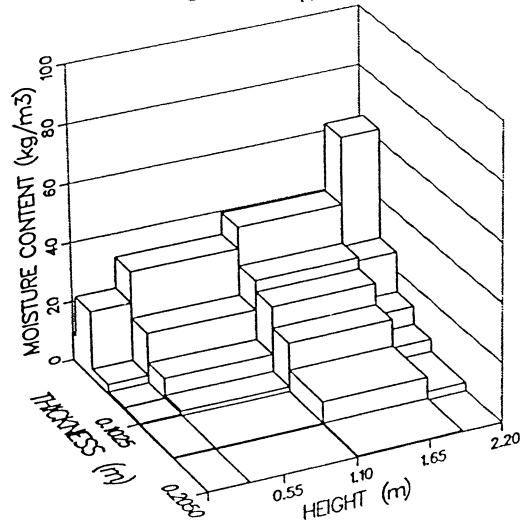
I PURKU



II PURKU



III PURKU



Kuva 5. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) ulkopinnalle asennetun **muovilaminoidun tuulensuojapinnoitteen** ja lämmöneristevillan ($2 \times 100 \text{ mm}$) rakenteessa. Kosteuspitoisuuden esityksessä on pinnoitteen paksuutena käytetty 5 mm , jotta kerroksen pintaan tiivistynyt/jäätynyt kosteus voitiin kuvata.

Taulukko 6. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m³) rakenteen sisään asennetun muovilaminoidun tuulensuojapinnoiteen ja lämmöneristevillan (50 mm + TS + 150 mm) rakenteessa. Kosteuspitoisuuden esityksessä on pinnoitteen paksuutena käytetty 5 mm, jotta kerroksen pintaan tiivistynyt/jäätynyt kosteus voitiin kuvata.

I PURKU. 20 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / -10 °C.

25 mm	25 mm	TS	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,0	0,0	17,8	16,2	6,2	4,7	12,1
0,0	0,0	16,5	23,9	12,9	9,7	15,3
0,0	0,0	140,0	17,2	4,5	0,4	0,6
0,0	0,0	270,0	228,0	15,1	3,6	0,4

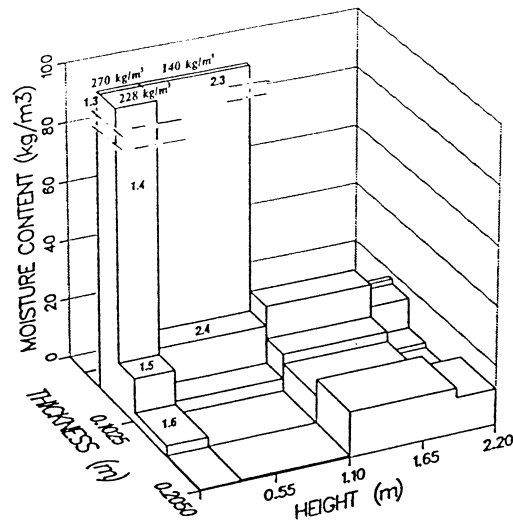
II PURKU. 22 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

25 mm	25 mm	TS	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,0	0,0	13,0	15,2	6,2	4,8	7,9
0,0	0,0	16,7	21,6	12,3	9,9	20,9
0,0	0,0	17,3	13,8	5,2	0,8	1,2
0,0	0,0	14,5	180,0	18,4	9,3	9,0

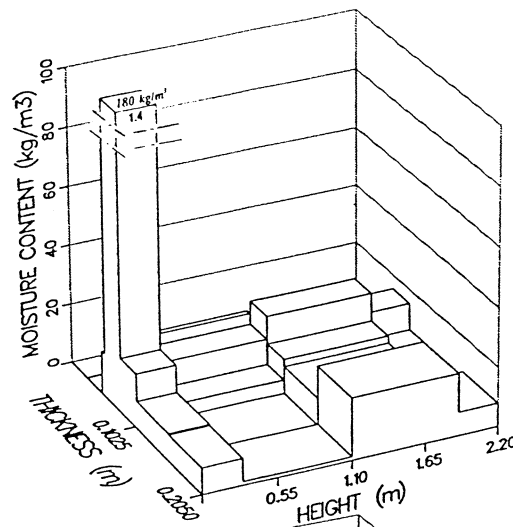
III PURKU. 35 VUOROKAUTTA KOKEEN ALUSTA. +27 / +3 °C.

25 mm	25 mm	TS	25 mm	25 mm	50 mm	50 mm
0,0	0,0	12,3	13,6	5,6	1,7	0,2
0,5	0,0	19,7	24,3	11,2	4,6	0,2
0,0	0,2	18,2	15,1	3,3	1,1	0,1
0,4	2,2	20,7	38,5	4,7	1,8	0,3

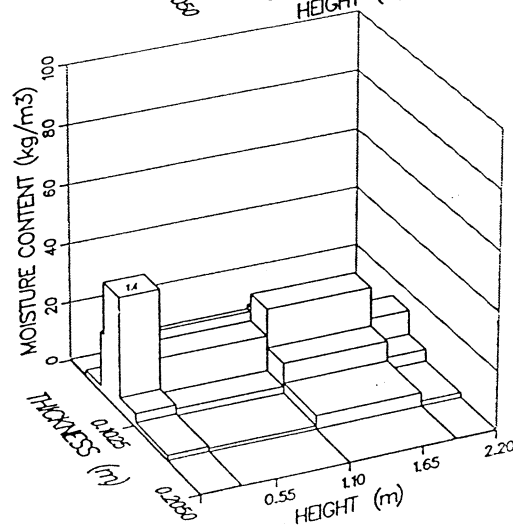
I PURKU



II PURKU



III PURKU



Kuva 6. Mitatut kosteusjakaumat (kg/m^3) rakenteen sisään asennetun muovilaminoidun tuulensuojapinnon ja lämmöneristevillan (50 mm + TS + 150 mm) rakenteessa. Kosteuspitoisuuden esityksessä on pinnon paksuutena käytetty 5 mm, jotta kerroksen pintaan tiivistynyt/jäätynyt kosteus voitiin kuvata.



Tekijä(t) Ojanen, Tuomo Kokko, Erkki Pallari, Marja-Liisa	Projektin nimi Tuulensuojan tuotekehityspäätökset	
Nimeke Tuulensuojan toimintaperusteet	Toimeksiantaja(t) Ahlström Eristeet Oy, Gyprok Oy, Paroc Oy Ab, Schaumann Wood Oy, Yhtyneet Paperitehtaat Oy Paperituote	
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa esitetään suositukset rakenteen tuulensuojan ilmatiiviydelle ja kokeelliset menetelmät tuulensuojarakenteiden kosteusteknisen toiminnan arvioimiseksi sekä herkkyystarkastelun tulokset tuulensuojan eri parametrien vaikutuksista rakenteiden kuivumiseen. Taustana esitetään katsaus tuulensuojausta koskeviin määräyksiin ja ohjeisiin Suomessa ja muissa vastaavan ilmastoalueen maissa.</p> <p>Rakenteiden lämpöhäviöt asettavat rajat tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle. Laskentamallilla TCCC2D tehdyn analyysin perusteella suositellaan osastoiduissa rakenteissa tuulensuojan ilmanläpäisykertoimelle arvoa $25-30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Osastoimattomissa rakenteissa, joissa voimakas nurkkakonvektio on mahdollinen, tulisi tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen olla enintään $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.</p> <p>Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa koskevissa kokeissa tarkasteltiin rakenteiden kuivumista eri tyyppisten tuulensuojamateriaalien kautta. Tulosten perusteella havaittiin, että ns. kuppikokeilla tuulensuojalle määritettyjen vesihöyrynläpäisykertoimien perusteella ei voida arvioida rakenteiden kuivumisnopeutta kaikissa käytännön olosuhteissa. Ongelma korostuu erityisesti ohuilla pinnoitteilla.</p> <p>Laskennallisten herkkyystarkastelujen perusteella tuulensuojan ilmatiiviydellä ei ole merkittävää vaikutusta rakenteiden kuivumiseen. Liian hyvin ilmaa läpäisevä tuulensuoja voi aiheuttaa paikallisia kosteuskertymiä voimistuneen konvektion takia.</p> <p>Kosteusteknisesti myös talviolioissa hyvin toimivan tuulensuojan tulisi olla mahdollisimman hyvin vesihöyryä läpäisevä lähellä vesihöyryn kyllästystilan olosuhteita veden jäätymisalueellakin. Tuulensuojarakenteen kosteusteknistä toimintaa voidaan parhaiten arvioida tutkimuksessa esitetyillä kokeellisilla menetelmillä, joissa olosuhteet vastaavat käytännössä esiintyviä.</p>		
Toimintayksikkö LVI-tekniikan laboratorio, Lämpömiehenkuja 3, PL 206, 02151 ESPOO		
ISSN ja avainnimeke 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-4372-6	Kieli suomi, engl. tiiv.	
Luokitus (UDK) 699.82:536.2:533.27 692.23	Avainsanat wind barriers, thermal behavior, thermal conditions, moisture, walls, structures, external walls, thermodynamic properties, facades, permeability, recommendations, criteria, value, air tightness, experimentation, numerical analysis, simulation, regulations, building envelope, heat loss, models	
Myynti: VTT, Informaatiopalvelulaitos PL 42, 02151 ESPOO Puh. (90) 456 4404 Telekopio (90) 456 4374	Sivuja 125 s. + liitt. 24 s.	Hintaryhmä C

Author(s) Ojanen, Tuomo Kokko, Erkki Pallari, Marja-Liisa	Name of project Tuulensuojan tuotekehityksperusteet	
	Commissioned by Ahlström Eristeet Oy, Gyprok Oy, Paroc Oy Ab, Schaumann Wood Oy, Yhtyneet Paperitehtaat Oy Paperituote	
Title <h2 style="text-align: center;">Criteria for hygrothermal performance of wind barriers</h2>		
Abstract <p>The objective of this research was to analyze the effects of wind barriers on the thermal and moisture behaviour of wall structures. As a result the recommended values for the air tightness of wind barriers and new experimental methods to analyse the moisture behaviour of wind barrier structures are presented. Also the results from the numerical sensitivity analysis of the parameters of wind barriers, and the survey on the regulations in Nordic countries concerning wind barriers are presented.</p> <p>The increase of heat losses through the building envelope is used as a criteria for the air tightness of the wind barrier layer. Numerical simulation model TCCC2D was used in the analysis. For separated structures, the maximum air permeance of the wind barrier is recommended to be about $25-30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, and with possible corner convection, value $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ is recommended.</p> <p>The drying of structural moisture through different types of wind barriers was experimentally analysed. The results show that the vapour permeance of wind barriers determined using typical dry and wet cup methods can not be used to predict the moisture behaviour of wind barrier structures in real conditions. Thin layers are especially problematic in this respect.</p> <p>Sensitivity analysis shows that the air permeance of the wind barrier has no significant effect on the drying of the structure. High air permeance may cause local moisture accumulation because of the increased convection.</p> <p>In order to achieve good moisture performance also in winter conditions, the wind barrier should have high vapour permeance near condensation conditions in freezing temperatures. The moisture performance of wind barrier structures can be evaluated with the experimental methods presented in this research.</p>		
Activity unit Laboratory of Heating and Ventilation, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 206, FIN-02151 ESPOO, Finland		
ISSN and series title 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-4372-6	Language Finnish, Engl. abstr.	
Class (UDC) 699.82:536.2:533.27 692.23	Keywords wind barriers, thermal behavior, thermal conditions, moisture, walls, structures, external walls, thermodynamic properties, facades, permeability, recommendations, criteria, value, air tightness, experimentation, numerical analysis, simulation, regulations, building envelope, heat loss, models	
Sold by VTT, Information Service P.O.Box 42, FIN-02151 ESPOO, Finland Phone internat. + 358 0 456 4404 Fax + 358 0 456 4374	Pages 125 p. + app. 24 p.	Price group C

- 1063 Aho, Ilari & Laitinen, Ari. Absorptiolämpöpumppu öljylämmitysjärjestelmissä. 1989. 81 s.
- 1077 Kalliomäki, Pekka & Kohonen, Reijo. Rakennusten lämpötaseen ratkaisu. Menetelmät ja ohjelmistojen luotettavuuden arviointi. 1989. 129 s. + liitt. 13 s.
- 1091 Marjamäki, Päivi, Heimonen, Ismo & Katajisto, Katri. Lämmitys- ja ilmastointiprosessien dynaaminen simulointi HVACSIM*-ohjelmalla. 1990. 91 s. + liitt. 12 s.
- 1135 Nyman, Mikko (toim.). Suomalainen kylmän ilmaston rakennustekniikka. Raportti 9. Lämmitys ja ilmastointi Suomessa. 1990. 70 s.
- 1181 Aunela, Leena & Larjava, Kari. Raskasmetallipäästöt Suomessa. 1990. 64 s. + liitt. 6 s.
- 1189 Ojanen, Tuomo. Puun sähköiset mittausten menetelmät. Osa 4. Puun kosteudenjohtavuuden ja kapillaarisuuden määrittäminen gammasäteilylaitteiston avulla. 1990. 21 s. + liitt. 42 s.
- 1191 Hyvärinen, Juhani. Tiedonsiirtoratkaisut rakennusautomaatiojärjestelmissä. 1990. 89 s.
- 1194 Laitila, Päivi, Katajisto, Katri, Karjalainen, Sami & Lassila, Kenneth. Huonelämpötilan säätö. 1991. 134 s. + liitt. 11 s.
- 1195 Haikarainen, Jouni & Kohonen, Reijo. Muuttuvilmavirtaisten ilmanvaihtojärjestelmien toimivuus, säätö ja energiatalous asuinkerrostalossa. 1990. 125 s. + liitt. 38 s.
- 1246 Virtanen, Markku. Pientalojen energiankulutus. Suora sähkölämmitys. 1991. 42 s. + liitt. 22 s.
- 1254 Larjava, Kari, Siltanen, Torsti, Muurinen, Martti & Puustinen, Harri. Huonekaluteollisuuden lämmöntuotannon päästöt. 1991. 30 s. + liitt. 8 s.
- 1280 Kokko, Erkki, Mähönen, Timo & Rautiainen, Liisa. Raaka-aineiden ja työstöparametrien vaikutus EPS-solumuovin ominaisuuksiin. 1991. 40 s.
- 1309 Aunela, Leena & Larjava, Kari. Raskasmetallipäästöjen vähentäminen. Teknis-taloudellinen tarkastelu. 1991. 77 s.
- 1310 Saari, Mikko. Asuinhuoneistossa tarvittavien ilmavirtojen määrittäminen kuormituksen perusteella. 1991. 98 s. + liitt. 24 s.
- 1337 Laitila, Päivi, Kärki, Satu, Piira, Kalevi, Katajisto, Katri & Kohonen, Reijo. LVI-säätö- ja energiajärjestelmien koestus- ja testauslaitteisto (emulaattori). Laitetekninen kuvaus. 1992. 58 s. + liitt. 6 s.
- 1361 Parmanen, Juhani. Meluisten ajoneuvojen yksilöinti. 1992. 34 s. + liitt. 8 s.
- 1363 Ahonen, Markku, Xu, Mingzhe & Virtanen, Markku. Uudentyyppisten kaukolämmönjakokeskusten teknistaloudellinen analyysi. 1992. 106 s. + liitt. 22 s.
- 1405 Parmanen, Juhani. Ääneneristävyyden CEN-ohjeavot. 1992. 34 s.
- 1429 Tolvanen, Merja. Äänenvaimennusmateriaaleista irtoavien kuitumaisten epäpuhtauksien määrittäminen. 1992. 37 s.
- 1431 Äikäs, Erkki & Holmberg, Rolf. Saunan lämpötilat ja ilmanvaihto. 1992. 34 s.
- 1435 Kärki, Satu. LVI-automaatiolaitteiden emulaattoritestauksen testausmenettely ja sen soveltaminen. 1992. 131 s. + liitt. 25 s.
- 1440 Määttä, Jukka. Käyttöveden lämmityksen suunnittelu ja mitoitus. 1993. 49 s. + liitt. 23 s.
- 1443 Aho, Ilari & Xu, Mingzhe. Optimisäätöteorian soveltaminen rakennusten lämmitykseen. 1993. 68 s.
- 1459 Sysiö, Pauli. Kevyitten ajoneuvojen melun yksilöinti. 1993. 23 s. + liitt. 3 s.
- 1465 Sysiö, Pauli. Tieliikennemelun laskentamallin estekorjaus. 1993. 22 s. + liitt. 1 s.
- 1467 Ahonen, Markku. Lämpimän käyttöveden tuotto varaajalla varustetulla kaukolämmönjakokeskuksella. 1993. 42 s. + liitt. 15 s.
- 1468 Heikkinen, Jorma, Kovanen, Keijo, Ojanen, Tuomo, Pallari, Marja-Liisa, Piira, Kalevi & Siitonen, Veijo. Vedottomien ulkoilmaventtiilien kehittämisperusteet. 1993. 104 s.
- 1478 Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki & Pallari, Marja-Liisa. Tuulensuojan toimintaperusteet. 1993. 125 s. + liitt. 24 s.

