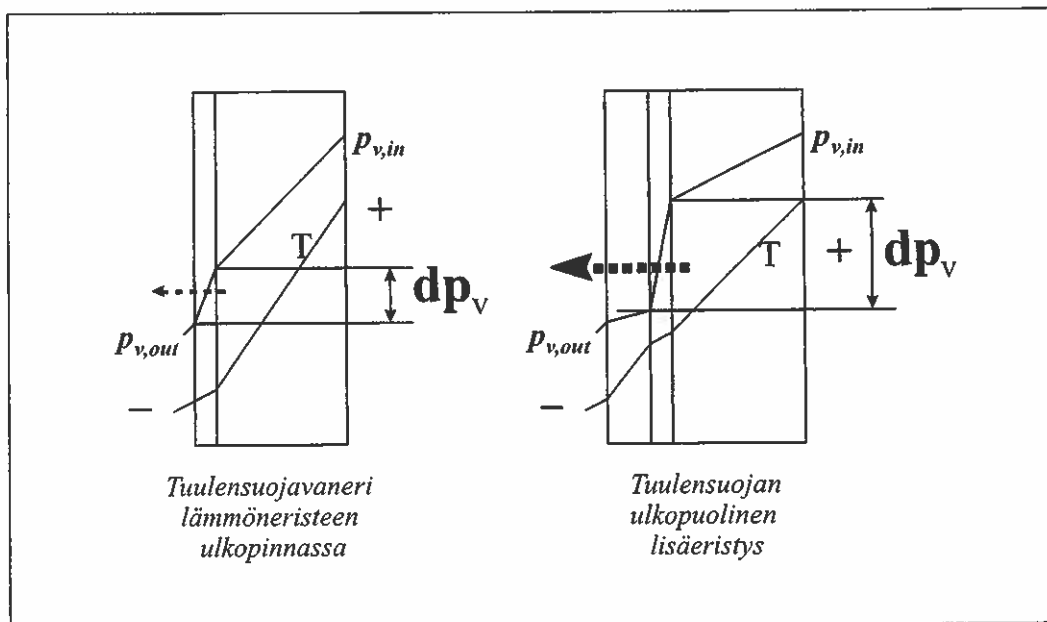


Tuomo Ojanen, Erkki Kokko, Mikael Salonvaara &
Hannu Viitanen

Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet



KÄSIKIRJASTO



Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet

Tuomo Ojanen, Erkki Kokko, Mikael Salonvaara &
Hannu Viitanen

VTT Rakennustekniikka

woodfocus



ISBN 951-38-5169-9
ISSN 1235-0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

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

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

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

Toimitus Maini Manninen

Oy EDITA Ab, ESPOO 1997

Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki, Salonvaara, Mikael & Viitanen, Hannu. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet [Moisture performance of plywood wall structures]. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1870. 90 s. + liitt. 2 s.

UDK 674.81:69.022.3:543.81

Avainsanat external walls, plywood, windshields, moisture, thermal insulation

TIIVISTELMÄ

Vanerin käyttö rakenteiden lämmöneristeen ulkopinnan tuulensuojana on ollut Suomessa toistaiseksi vähäistä. Pohjois-Amerikassa lämmöneristeen ulkopuolisena kerroksena puurakenteissa käytetään yleisimmin OSB-levyä (oriented strand board). Muualla sovellettuja rakenneratkaisuja ei kuitenkaan ole syytä käyttää ilman niiden kosteusteknisten toimintaedellytysten selvittämistä. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää havuvanerin käytön kosteustekniset perusteet puurunkorakenteiden tuulensuojaa vastaavana kerroksena.

Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitoisuuden funktiona ja vanerituulensuojan vaikutus rakenteen kuivumiskykyyn voimakkaissa kosteusrasituksissa eri ulkoilman lämpötiloilla. Laskennassa oli ensimmäistä kertaa käytössä homeen kasvun arviointiin soveltuva osa yhdistettynä lämmön- ja kosteudensiirron simulointiohjelmiin.

Havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys kasvaa kosteassa tilassa 15 - 20-kertaiseksi kuivan tilan arvoihin nähden. Tuulensuojana vaneri läpäisee kosteutta sitä paremmin mitä suurempi on kosteuskuormitus. 9 mm:n havuvaneri täyttää homeen kasvun kannalta turvallisissa käyttöoloissa tuulensuojan vesihöyrynvastukselle Ruotsissa ja Norjassa asetetut vaatimukset. Havuvaneri on tuulensuojan käyttöoloissa OSB-levyä huomattavasti paremmin kosteutta läpäisevä.

Höyrynsulun käyttö vanerituulensuojarakenteessa on Suomen ilmastossa suositeltavaa, vaikka rakenteen sisäpuolinen vastus voidaan mitoittaa diffuusion kannalta turvallisesti ilmankin. Höyrynsulku varmistaa rakenteen pitkäaikais-toimivuuden ja ilmatiivyyden. Jatkuva ilman ulosvirtaus vuotorakojen kautta aiheuttaa kosteusriskin kaikille rakenteille, joten sisäilman pääsääntöinen alipaineisuus on suositeltava myös nyt tutkituilla rakenteilla.

Rakenteen kuivumisnopeutta voidaan olennaisesti parantaa tuulensuojan ulkopuolisen, tuuletusrakoon avoimen lisäeristyksen avulla. 30 mm:n avohuokoinen lämmöneristekerros (esim. mineraalivillalevy) havuvanerituulensuojan ulkopinnalla antaa rakenteelle saman kuivumiskyvyn kuin mikä on eristeen ulkopintaan asennetulla huokoisella kuitulevyllä.

Rakenne on kosteusteknisesti toimiva, kun siinä on höyrynsulku (kylmässä ilmastossa) ja tuulensuojana on ulkoverhouksen ja tuuletusraon suojaama 9 mm:n havuvaneri. Tuulensuojan ulkopuolinen, ulkopinnaltaan avoin lisäeristys parantaa rakenteen toimintavarmuutta ja selviytymiskykyä yllättävistä kosteuskuormista.

Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki, Salonvaara, Mikael & Viitanen, Hannu. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet [Moisture performance of plywood wall structures]. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1870. 90 p. + app. 2 p.

UDC 674.81:69.022.3:543.81

Keywords external walls, plywood, windshields, moisture, thermal insulation

ABSTRACT

In Finland plywood is seldom used as an outer sheathing of the wall insulation, whereas in North America OSB (oriented strand board) is a typical outer sheathing board. Both plywood and OSB are wood and glue composite materials. Before applying structures used in other climates to our environmental conditions, their moisture performance should be closely studied. The objective of this research was to study the fundamentals of the moisture performance of structures having outer sheathing made of spruce plywood.

Experiments were done to determine the vapour permeability of (spruce) plywood as a function of moisture content and the drying rate of plywood outer sheathing when exposed to different outside temperatures. In numerical simulations, mould growth was studied, for the first time, together with transient heat and moisture transfer models.

Vapour permeability of wet plywood can be 15 - 20 times higher than that of the dry material. When the moisture content increases, also the drying effect of the plywood sheathing increases highly. 9 mm thick plywood made of spruce meets the Swedish and Norwegian requirements set for the vapour permeance of the outer sheathing layer. In the conditions that the outer sheathing layer is typically exposed to, plywood has significantly better vapour permeability than OSB.

In Finnish climate, it is recommended to use a vapour retarder in the structures having plywood outer sheathing, even though the diffusive moisture loads from the indoor air could be kept low enough without one. The vapour retarder layer ensures the long-term vapour and air tightness of the structures.

Continuous air exfiltration (indoor air flow out through the structure) causes a moisture risk to all structures in cold climates. It is recommended to maintain indoor underpressure to avoid convection caused high local moisture loads in the structures.

The drying rate of a wall structure can be significantly increased by using exterior insulation made of vapour permeable porous material that is open to ventilation cavity. 30mm thick mineral wool layer on the outer side of a 9 mm plywood sheathing improves the drying capacity of the wall to correspond to that of a wall with highly vapour permeable porous wood fibre board layer as outer sheathing.

The moisture performance of a residential house wall structure in cold climates is safe when the wall has a vapour retarder, and the outer sheathing is made of 9 mm spruce plywood adjacent to a ventilated air space behind the siding. A vapour permeable exterior insulation open to the air cavity improves the drying capacity and moisture performance of the wall during accidental moisture loads.

ALKUSANAT

Tässä julkaisussa esitetään projektissa *Kevyet vaneripohjaiset puuelementtirakenteet, hygroterminen toiminta ja rakennevaatimukset* saadut tulokset. Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti ja laskennallisesti havuvanerin käyttöedellytykset lämmöneristeen ulkopuolisena kerroksena. Tulokset muodostavat osaltaan havuvanerirakenteiden tuotekehityksessä tarvittavat perusteet.

Tutkimus kuului TEKESin Puurakentamisen teknologiaohjelmaan. Sen rahoittivat Teknologian Kehittämiskeskus TEKES ja Suomen Puututkimus Oy, jonka kautta hankkeeseen osallistuivat Finnforest Oy ja Schauman Wood Oy, sekä VTT.

Tutkimus tehtiin VTT Rakennustekniikassa. Tutkimuksen vastuullinen johtaja oli tutkimuspäällikkö Juho Saarimaa. Tutkimusryhmään kuuluivat Rakennusfysiikka-ryhmästä erikoistutkijat Tuomo Ojanen (projektipäällikkö) ja Erkki Kokko sekä tutkija Mikael Salonvaara. Selvityksen puun biologisista rasituksista ja homeen havainnointiin liittyvän tutkimuksen teki tekn.toht. Hannu Viitanen Puun Materiaalitekniikka-ryhmästä. Laboratoriokokeista vastasi Rakennusfysiikka-ryhmän tutk.ins. Hannu Hyttinen. Projektin johtoryhmään kuuluivat:

Keijo Kolu, johtoryhmän puheenjohtaja (Schauman Wood Oy), Pekka Peura (ohjelmapäällikkö), Aki Hakala (TEKES), Jouko Veistinen (Finnforest Oy), Pekka Nurro (Suomen Puututkimus Oy), Keijo Rautiainen (Termex-Eriste Oy), Juha Krankka (Oy Paroc Ab) ja Juho Saarimaa (VTT/RTE). Johtoryhmä kokoontui kuusi kertaa. Haluamme lausua parhaat kiitokset johtoryhmän jäsenille aktiivisesta osallistumisesta projektin seurantaan ja ohjaukseen.

Espoo, syyskuu 1997

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT.....	4
ALKUSANAT	5
1 TAUSTA JA TAVOITTEET	9
2 HAVUVANERIN MATERIAALIOMINAISUUDET	10
2.1 TUTKITUT MATERIAALIT JA NIIDEN TIHEYDET	10
2.2 VANERIEN TASAPAINOKOSTEUDET	10
2.3 VANERIEN VESIHÖYRYNJOHTAVUUDET	12
2.3.1 Vanerien vesihöyrynvastukset	14
2.3.2 Vaatimukset tuulensuojan vesihöyrynläpäisylle Pohjoismaissa	15
2.3.3 Vertailu muihin tuotteisiin	16
3 PUURAKENTEIDEN BIOLOGINEN RASITUS JA TURMELTUMINEN	18
3.1 HOME- JA LAHOVIAT SEKÄ HYÖNTEISET	18
3.1.1 Bakteerit.....	18
3.1.2 Sienet.....	19
3.1.3 Hyönteiset ja muut tuhoeläimet.....	21
4 ULKOPUOLELTA LISÄERISTETTY TUULENSUOJARAKENNE.....	22
5 LASKENNALLINEN TARKASTELU.....	23
5.1 HOMEKRITEERIN KÄYTTÖ LASKENNASSA	23
6 DIFFUUSION MERKITYS - LASKENNALLINEN TARKASTELU	25
7 SALLITTU ILMAN JATKUVA ULOSVIRTAUS.....	29
7.1 HOMEEN KASVUEDELLYTYKSET PUUMATERIAALEISSA	29
7.2 ILMAN ULOSVIRTAUKSEN ANALYSOINTIMENETELMÄ XFILT	30
7.2.1 Perusoletukset	30
7.2.2 XFILT -menetelmän ratkaisuperusteet	31
7.3 LASKENNASSA ANALYSOIDUT TAPAUKSET	33
7.4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	33
7.4.1 Jyväskylän ilmasto	34
7.4.2 Holzkirchenin ilmasto	36
7.4.3 Vancouverin ilmasto	38
7.4.4 Eri ilmastojen vaikutusten vertailu	38
7.5 TULOSTEN ARVIOINTI OHJELMALLA TCCC2D	39
7.6 YHTEENVETO ILMAN ULOSVIRTAUKSESTA	41
7.6.1 Kehitetty kosteuskonvektion homeriskin arviointimenetelmä	41
7.6.2 Sallitut sisäilman läpivirtausmäärät	41
8 RAKENTEIDEN KUIVUMISNOPEUDEN RIIPPUVUUS VUODENAJASTA.....	43
8.1 TULOSTEN TARKASTELU	43
8.1.1 Homeenkasvun riippuvuus materiaaliparametreista	46

9 TUULENSUOJAN ULKOPUOLINEN ERISTERAPPAUS JA VIISTOSATEEN VAIKUTUS	46
9.1 RAPATUN OSB-PINTAISEN SEINÄN KOSTEUS- JA HOMEKÄYTTÄYTYMINEN ..47	
9.1.1 <i>Analysoidut rakenteet</i>	47
9.2 JOHTOPÄÄTÖKSET	48
10 VANERIRAKENTEIDEN KUIVUMISKYVYN LASKENNALLINEN ARVIOINTI	53
10.1 TULOSTEN TARKASTELU	54
10.1.1 <i>Kuivan alkutilan tapaukset</i>	54
10.1.2 <i>Ylimääräisen alkukosteuden kuivuminen</i>	55
11 TUULENSUOJATUOTTEIDEN KUIVUMISKYVYN KOKEELLINEN VERTAILU ..	63
11.1 TAVOITTEET	63
11.2 KOEJÄRJESTELYT	63
11.2.1 <i>Koerakenteet</i>	64
11.3 KOEOLOSUhteet JA MITTAUKSET	65
11.4 KOETULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	66
11.4.1 <i>Kosteuden kuivuminen rakenteista</i>	67
11.4.2 <i>Kuivumiskyvyn arviointi kosteusvirtojen perusteella</i>	73
11.4.3 <i>Kosteusjakaumat</i>	74
11.4.4 <i>Silmämääräinen biologisten vanhenemisprosessien arviointi</i>	80
11.5 JOHTOPÄÄTÖKSET KOKEISTA	82
12 VANERIRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMIVUUDEN JA TUOTEKEHITYKSEN PERUSTEET	84
12.1 HAVUVANERIN MATERIAALIOMINAISUUDET	84
12.2 DIFFUUSION MERKITYS	84
12.3 LÄMMÖNERISTEEN MATERIAALIN VAIKUTUS	85
12.4 ILMAVUODOT JA ILMATIIVYISVAATIMUKSET	85
12.5 KOSTEUDEN KUIVUMISNOPEUS RAKENTEIDEN TOIMINNAN ARVIOINNISSA ..	86
12.6 TUULENSUOJAN ULKOPUOLISEN LÄMMÖNERISTEEN VAIKUTUS	87
12.7 ILMASTON VAIKUTUS	88
12.8 YHTEENVETO	88
LÄHDELUETTELO	90

LIITTEET

3 PUURAKENTEIDEN BIOLOGINEN RASITUS JA TURMELTUMINEN

3.1 HOME- JA LAHOVIAT SEKÄ HYÖNTEISET

Kosteus rasittaa rakenteita vaihtelevasti. Materiaalien ja rakenteiden liiallinen kosteus aiheuttaa ongelmia: **biologiset viat ja vauriot** liittyvät aina kosteusvaurioihin ja ovat yhteydessä toisiinsa. Kosteusvauriot johtuvat rakenteiden sietykkyyn ylittävästä kosteusrasituksesta (Kuva 4). Kosteusvaurio saattaa johtaa riittävän pitkään kestätyään eri asteisiin biologisiin vikoihin tai vaurioihin (bakteeri-, home-, laho-, levä- ja hyönteisviat). Ulkopintojen biologinen rasitus liittyy myös sään aiheuttamaan rasitukseen.

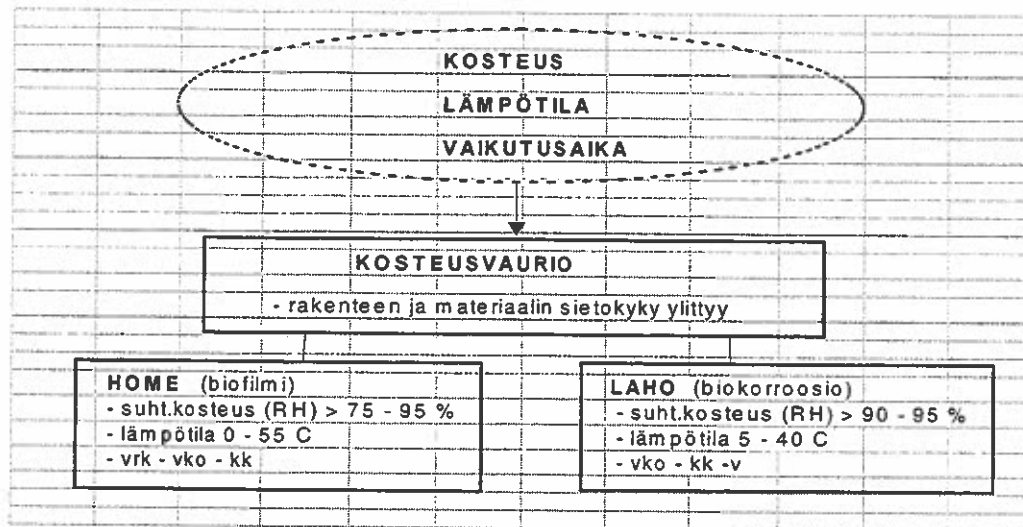
Rakenneosien alttius kosteusrasituksille ja niistä mahdollisesti seuraaville muille vaurioille johtuu monista tekijöistä. Rakennuksen rakenteissa varsinaisia ongelmia tai teknisiä häiriöitä aiheuttavia eliöitä ovat home- ja sinistäjä sienet, eräät bakteerit, levät, lahottajasienet ja hyönteiset. Puurakenteiden kannalta ongelmallisimpia ovat lahottajasienet ja hyönteiset, jotka aiheuttavat puurakenteiden lujuuden heikkenemistä.

Bakteerit ja homesienet ovat yleensä ensimmäisiä kosteisiin rakenneosiin ilmestyviä eliöitä. Ne voivat olla osa myös luonnollista materiaalien ominaisuutta riippuen etenkin materiaalin sijainnista rakennuksessa. Voimakkaan "epänormaalien" kosteusrasituksen jatkuessa ja voimistuessa ilmaantuvat **lahottajasienet** ja lopulta lahovaurioihin liittyy myös sekundaarisia homesieniä, bakteereja ja hyönteisvaurioita. Useimmat **hyönteisvauriot** johtuvat itse asiassa jonkinasteisesta lahovauriosta, koska hyönteiset syövät lahottajasienten rihmastoja ja niiden pehmittämää puuta.

3.1.1 Bakteerit

Bakteerit ovat hyvin laaja eliöryhmä, jossa on hyvin monenlaisia mikrobeja. Tärkein tunnusmerkki on, että ne ovat usein yksisoluisia, tumattomia mikrobeja. Niitä voidaan ryhmitellä monin eri tavoin. Bakteereja on usein jo elävässä puussa ja puumateriaalissa ne aiheuttavat puussa paikallisia muutoksia ja vaurioita määrässä puussa etenkin pitkäaikaisen vesivarastoinnin seurauksena. Tällöin bakteerit aiheuttavat muutoksia puun huokosrakenteessa, jolloin puun läpäisevyys kasvaa. Tämä tulee ilmi esim. puun ylivärjäytymisenä kuullotuksen tai värjäyksen yhteydessä.

Bakteereja on luonnossa lähes kaikkialla ja puussa lähinnä vesi- ja maakosketuksessa olevassa puumateriaalissa. Kosteusvaurioiden yhteydessä materiaaleissa on usein rihmamaisia bakteereja, sädesieniä eli aktinomykettejä, jotka normaalisti elävät maatuovassa eloperäisessä aineessa esim. kompostissa tai mullassa. Ne aiheuttavat voimakkaan, tunkkaisen kellarinomaisen hajun.



Kuva 4. Kosteusvauriosta johtuvien home- ja laho-ongelmien kehittymisen edellytykset.

3.1.2 Sienet

Sieniä on hyvin monia eri lajeja. Sienitieteessä sienet luokitellaan systemaattisesti, niiden biologisen, rakenteellisten ja perinnöllisyysominaisuuksien mukaan. Käytännössä sienet luokitellaan niiden aiheuttamien ongelmien ja vaurioiden mukaan. Ohessa noudatetaan käytännön luokittelua.

Home- ja sinistäjä sienet

Home- ja sinistäjä sienet aiheuttavat materiaalien värivikoja, joita puumateriaalin osalta usein kutsutaan yleisnimellä sinistymä, vaikka väri vaihtelee huomattavasti. Homesienet ovat hyvin vaatimattomia eliöitä. Kuten bakteerit, voivat homesienetkin kasvaa hyvin monenlaisilla kasvualustoilla, myös kivi-, tiili- betoni- ja maali-pinnoilla.

Home-, sinistäjä- ja katkolahottajasienten ero on lähinnä toiminnallinen. Homesienet ilmestyvät yleensä ensimmäisinä materiaalien pintaan, jolloin ne aiheuttavat pinnan värjäytymistä ja tunkkaista hajua, materiaaleista ja olosuhteista riippuen. Homevauriotapauksessa ongelman voivat aiheuttaa monet eliöt yhdessä, ja ongelman luonne ja vakavuus riippuu monista seikoista. Käytännössä ns puun pintahomeessa saattaa olla mukana myös sinistymää, joka voi ulottua vain aivan pintakerrokseen. Voimakkaassa sinistymässä, joka on saanut rauhassa kehittyä, sinistymä ulottuu syvemmälle puuainekseen. Toisaalta sinistymä saattaa kehittyä jo metsässä tai tukkivarastossa, jolloin puhutaan tukkis sinistymästä. Tukkis sinistymän sienet menettävät elinkykynsä puun kuivauksen yhteydessä.

Sinistymä voi ilmaantua märkään tai kosteaan puutavaraan Etenkin **voimakkaassa sinistymässä** saattaa olla osittain myös katkolahoa, etenkin jos olosuhteet ovat sienille pitkään otolliset ja vauriot saavat rauhassa kehittyä. Etenkin märän materiaalin mikrobilajisto saattaa olla hyvin laaja ja vaihteleva (Kuva 5).



Kuva 5. Puun biologinen turmeltuminen.

Sinistäjä- ja homesienet leviävät itiöistä, kuten sienet yleensäkin. Homesienet kasvavat lahottajasieniä nopeammin ja alkavat tuottaa itiöitä hyvin nopeasti sienille otollisissa olosuhteissa. Runsas itiöpitoisuus rakennuksissa voivat aiheuttaa terveydellisiä ongelmia. Myös homeista lähtevä haju on kiusallinen ja se tarttuu asunnossa oleviin tavaroihin, etenkin tekstiileihin. Homesienet eivät sanottavasti vaikuta puun lujuuteen, mutta ne aiheuttavat väri- ja hajuhaittoja, pilaavat ruokatarpeita ja vaurioittavat tekstiilejä ja rakennusmateriaalien pintoja.

Sinistäjä sienet kasvattavat rihmastonsa puun sisään. Niiden sienirihmat ovat nuorena värittömiä, mutta ne värjäytyvät melanisaation kautta aiheuttaen erilaisia värinmuutoksia valon taittumisilmiön mukaan. Home- ja sinistäjä sienet käyttävät ravinnokseen puusolun liukoisia yhdisteitä. Ne eivät muuta sanottavasti puun rakennetta eivätkä hajota selluloosaa tai ligniiniä.

Sinistäjä sienia kasvaa aina käsittelemättömällä puupinnalla, joka on ulkona pitkään alttiina sateille. Pinnan harmaantuminen johtuu suureksi osaksi sinistäjä sienistä sekä auringon UV-valon vaikutuksesta. Sienten kasvu pysähtyy, kun puu kuivuu, mutta jatkuu taas puun kastuttua. Usein sienten kasvu rajoittuu puun pintaan. Ulkona sade pesee pintaa, jolloin syntyy harmaa "patinointi" materiaalin pintaan.

Lahottajasienet

Puurakenteiden kannalta ongelmallisimpia organismeja ovat lahottajasienet, joiden aiheuttama vaurio kohdistuu suoraan puun rakennekomponentteihin. Katkolahottajasienet ovat usein läheistä sukua home- ja sinistäjä sienille, ja pahoin sinistyneessä puussa saattaakin olla katkolahoa. Runsasta katkolahoa on lähinnä maa- ja vesikosketuksessa olevassa märässä puussa. Katkolahossa puun solun seinissä tapahtuu paikallista syöpymistä, eikä puun ulkonäkö olennaisesti muutu katkola-

hossa. Vasta kun laho on edennyt pitkälle ja puu kuivuu, siinä on havaittavissa värinmuutoksia ja halkeilua.

Puun selluloosaa hajottavat ruskolahottajasienet ovat usein haitallisimpia rakennuksissa lahovaurioita aiheuttavia sieniä. Tyypillisiä vauriorakennuksissa esiintyviä ruskolahottajasieniä ovat lattiasieni, kellarisieni, laakakääpä ja saunakääpä. Valkolahoa ilmenee lähinnä kasvavissa puissa sekä maakosketuksessa olevassa puutavarassa. Ruskolahottajasienet erittävät orgaanisia happoja ja entsyymejä, joiden vaikutuksesta materiaalien rakenne muuttuu nopeasti sienikasvuston leviessä ja puun lujuus heikkenee. Hemiselluloosa ja selluloosa hajoavat sienien tarvitsemiksi sokereiksi. Ruskolahossa hajoaa hemiselluloosa ja selluloosa, valkolahossa myös ligniini. Jostain syystä lattiasientä kutsutaan joskus "homeeksi". Tämä aiheuttaa runsaasti sekaannusta, koska vaurio ja sen vaatima korjaus on aivan erityyppinen.

Pitkälle edenneessä ruskolahossa puun ulkonäkö muuttuu usein selvästi: puu värjäytyy ruskeaksi ja myöhemmin puun kuivuessa se halkeilee kuten palanut puu. Etenkään lievässä lahossa ei puun pintaan aina kasva näkyvää rihmastoja, jolloin lahoa on usein hankalaa havaita.

3.1.3 Hyönteiset ja muut tuhoeläimet

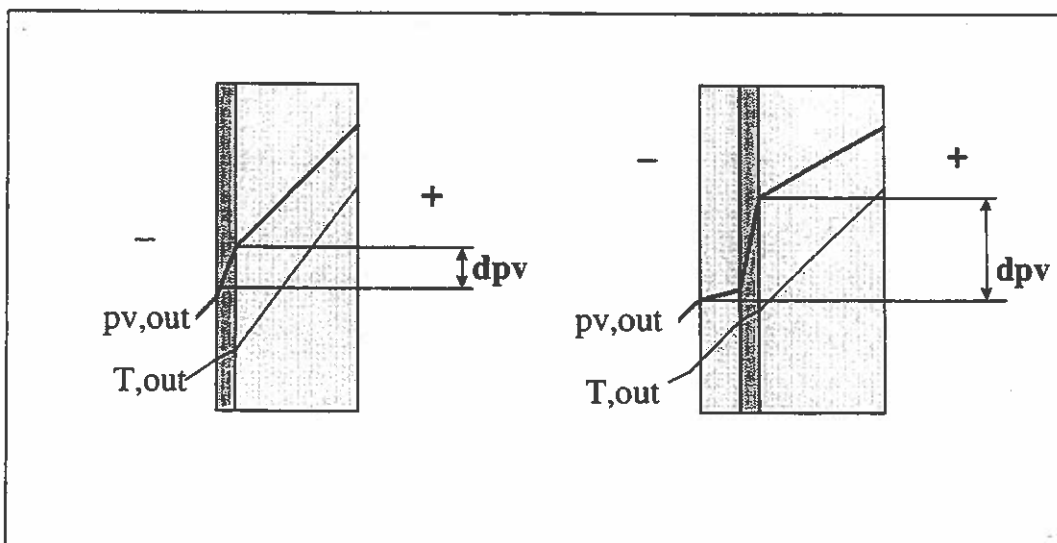
Eläimistä hyönteiset vaikuttavat merkittävimmin rakenteiden kestävyYTEEN. Jyrsijät ja linnut, etenkin tikat, aiheuttavat mekaanisia vikoja, mutta niiden vaikutus on kuitenkin paikallinen. Tosin jyrsijät (hiiret ja rotat) vioittavat lämmöneristeitä ja kosteussulkuja. Toisinaan ne ovat aiheuttaneet laajojakin vaurioita.

Hyönteiset aiheuttavat erilaisia vikoja ja vaurioita materiaaleihin. Ne voivat käyttää materiaaleja ravintonaan tai vioittaa niitä esim. etsiessään ravintoa tai pesäpaikkojaan rakenteissa ja materiaaleissa. Puuta vaurioittavia hyönteisiä ovat varsinaiset puuta ravinnelähteinä käyttävät puutuholaiset, jotka heikentävät puun lujuutta. Näiden lisäksi kuorellisessa puutavarassa voi olla ns. kuorituholaisia, jotka aiheuttavat lähinnä pintavikoja. Eräät hyönteiset kaivautuvat rakennusmateriaaleihin vain tehdäkseen niihin pesiään. Useimmat hyönteiset vaativat kosteaa puuta, mutta eräät tropiikissa elävät lajit voivat iskeytyä myös kuivaan puuhun. Suomessa esiintyvät hyönteisvauriot ovat yleensä yhteydessä lahovaurioihin ja rakennevauriot ovat paikallisia. Hyönteisvauriot kehittyvät yleensä hitaasti maamme ilmastojohdosta.

4 ULKOPUOLELTA LISÄERISTETTY TUULENSUOJARAKENNE

Tässä tutkimuksessa kiinnitetään erityistä huomiota havuvanerituulensuojan kosteusteknisen toiminnan parantamiseen ulkopuolisen lämmöneristykseen avulla. Ulkopuolelta eristettyä tuulensuojarakennetta kutsutaan myös nimikkeellä 'käännetty tuulensuoja'. Tämän rakenteen lämpötekniistä toimintaa on selvitetty aiemmissa tutkimuksissa /4/. Tutkimuksen mukaan seinärakenne, jossa on 50 mm:n paksuinen, tuulensuojan ulkopuolinen ja ulkopinnaltaan avoin mineraalivillainen lämmöneristys toimii lämpötekniisesti jokseenkin samoin kuin tavanomainen rakenne, jossa koko lämmöneristys on tuulensuojan sisäpuolella. Tuulen aiheuttama konvektio suhteellisen ohuessa tuulensuojan ulkopuolisessa lämmöneristeessä ei siten heikennä rakenteen U-arvoa.

Ulkopuolinen lämmöneritys tuo tiettyjä etuja rakenteen kosteustekniseen toimintaan ja se voi olla myös rakenteen paloturvallisuutta parantava tekijä. Kuva 6 esittää viitteellisesti tavanomaisen ja ulkopuolelta lisäeristetyin rakenteen lämpötila- ja vesihöyryn osapainekentät. Ulkopuolinen lisäeristys nostaa tuulensuojan lämpötilatasoa ja siten vesihöyryn osapaine-ero tuulensuojan yli kasvaa tavanomaiseen tapaukseen verrattuna. Oletuksena kuvassa on, että tuulensuojan sisäpinnalla on kuivumistilanteen mukaiset kondenssiolosuhteet. Ulkopuolinen lisäeristys nostaa usein tuulensuojan kosteustasoa, minkä vuoksi tuulensuojan vesihöyrynjohtavuus voi olla korkeampi kuin ulkopintaan asennetussa tapauksessa.



Kuva 6. Tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristeen tuoma lisä kuivumispotentiaaliin, jota kuvaa vesihöyryn osapaine-ero dp_v , tuulensuojan sisäpinnasta rakenteen tuuletusraon sisäpintaan.

5 LASKENNALLINEN TARKASTELU

Laskennallisessa tarkastelussa käytettiin VTT/RTE:ssä kehitettyjä laskentamenetelmiä /6 - 10/. Pääasiassa tarkastelut tehtiin laskentamallilla TCCC2D /6 - 8/ ja lisärappauksen tapauksessa (kappale 9) mallilla LATENITE /9,10/. Laskentamallit soveltuvat 1, 2 (ja 3 LATENITE)-dimensioisten rakenneleikkausten yhtäaikaisen lämmön, ilman ja kosteudensiirron simulointiin dynaamisessa tilanteessa. Lämpö voi siirtyä johtumalla, säteilemällä pintojen välillä, konvektiolla ilman mukana tai kosteuden faasimuutoksina. Kosteuden siirrossa voidaan erikseen tarkastella diffuusista ja konvektiivista kosteutta, ja LATENITE:ssä on kapillaarinen kosteudensiirto erotettu diffuusionesta.

Reunaehtoina ohjelmaan voidaan antaa ulkoilman säätiedosto, josta ohjelma voi hyödyntää mm. auringon säteilyn, tuulen painevaikutukset, ulkopinnan vastasäteilyn taivaalle ja ympäristöön sekä viistosateen. Laskennassa ulkopuolen reunaehtona käytettiin mittauksiin perustuvia, tunneittain muuttuvia säätiedoston arvoja. Sisäpuolelle käytettiin yleensä vakioilämpötilaa +22 °C, kuitenkin niin, että se oli vähintään 3 °C ulkoilman lämpötilaa korkeampi. Kosteuskuorma sisäilmassa oletettiin yleensä vakioksi, +4 g/m³, ulkoilman kosteustilaan nähden.

Laskennan tuloksena on lämpötila ja kosteuskentät. Kosteuspitoisuus on tärkein kosteusteknisen toiminnan kriteeri. Tämän lisäksi kriteerinä käytettiin laskennallista homeindeksiä.

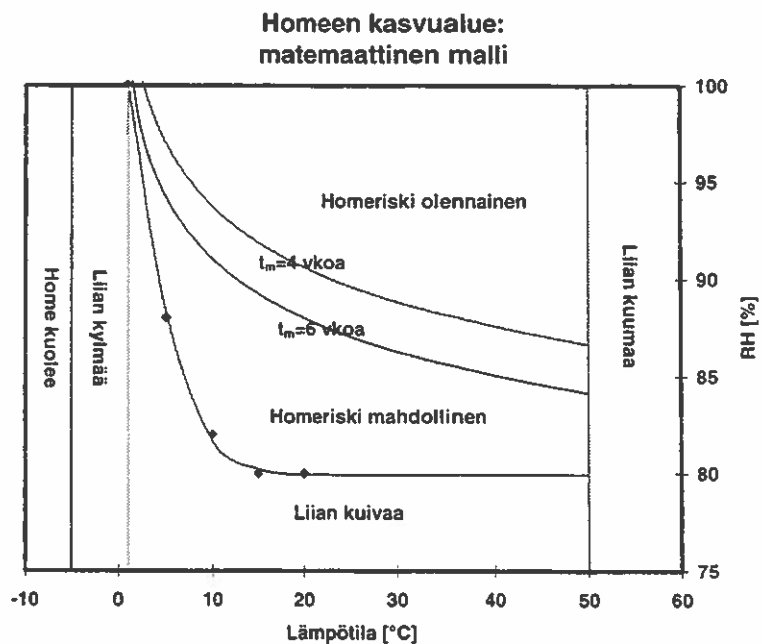
5.1 HOMEKRITEERIN KÄYTTÖ LASKENNASSA

Laskentamalleihin on liitetty homeen kasvua kuvaavan homeindeksin laskentamoduli, mikä perustuu puulle tehtyihin laboratoriomittauksiin /2, 3/. Kuva 7 esittää mittauksiin perustuvat homeen kasvuolosuhteet. Homeindeksi kuvaa homeen määrää puussa. Sen laskenta perustuu homeen kasvulle edullisten olosuhteiden esiintymiseen ja se täydentää pelkkään kosteus-pitoisuuteen perustuvia kriteereitä. Vaikka indeksi pätee puupohjaisille materiaaleille, se antaa kuvan yleisestä homehtumisalttiudesta. Homeen kasvu ei edellytä puuta pohjamateriaaliksi, vaan homeetta voi olla muissakin materiaaleissa, joihin esimerkiksi ilman epäpuhtaudet tuovat homeen tarvitsemää ravintoa.

Laskennassa homeindeksi voi saada arvot väliltä [0, 6]. Indeksien arvo 3 kuvaa ensimmäistä paljain silmin näkyvää homeetta, arvo 4 vastaa 10 %:n homekatetta, arvo 5 vastaa 50 %:n katetta ja 6 on maksimiarvo homeelle suotuisissa oloissa.

Homeindeksin laskenta perustuu nykyhetken tietämykseen. Sen kuvauksessa on vielä epätarkkuuksia mm. eri materiaalien ja dynaamisten tilojen vaikutuksista sekä kylmien ja kuivien kausien vaikutuksesta homeen taantumiseen. Lisäksi käytännössä on viitteitä materiaalikerrosten dimensioiden vaikutuksesta homehtumiseen, mitä laskennassa ei ole huomioitu. Laskennassa tuotettua homeindeksiä ei voida pitää tarkkana homeen kasvua kuvaavana suurena. Se antaa kuitenkin

hyvän kuvan eri rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden eroista ja rakenteellisten tekijöiden merkityksestä homeen kasvuedellytysten suhteen.



Kuva 7. Homeen kasvuun suosiolliset kosteus- ja lämpötilaolot matemaattisena mallina [2, 3].

Laskennassa ei oteta huomioon materiaalien kemikaalien vaikutusta homeen kasvuun. Näin ollen laskenta ei kuvaa oikein esimerkiksi kyllästettyjen tai muuten käsiteltyjen puuosien homehtumista, eikä myöskään tilannetta, jossa sellukuitueristeen sisältämät palonsuojakemikaalit rajoittavat homeen kasvua lämmön-eristeen kosketuksissa olevilla materiaalipinnoilla. Sellukuitueristeen vaikutus homeen kasvuun on todettu aiemmissa tutkimuksissa [11]. Esimerkiksi lämmön-eristeen kemikaalien vaikutus näkyy homeen kasvussa siihen rajoittuvilla pinnoilla, mutta kemikaalit eivät paranna rakenteen kosteusteknistä toimintaa, ts. kosteustasot voivat olla korkeat. Korkeat kosteuspitoisuudet voivat aiheuttaa homeen kasvua tai muita kosteusongelmia rakenteen kyllästämättömissä osissa.

Homeindeksin laskentaa on sovellettu tässä tutkimuksessa riippumatta materiaalien mahdollisesti sisältämistä kemikaaleista ja niiden vaikutuksista. Tuloksena on rakenteellisten tekijöiden vaikutus homeen kasvuedellytyksiin rakenteiden kriittisissä kohdissa.

6 DIFFUUSION MERKITYS - LASKENNALLI- NEN TARKASTELU

Aiemmissa tutkimuksissa on kosteusteknisesti toimivan rakenteen sisä- ja ulko-
puolisten diffuusiovastusten suhteeksi esitetty lukua 5. Käytännössä materiaalien
vesihöyrynsuhteisuus muuttuu voimakkaasti kosteuspitoisuuden funktiona. Kos-
teuspitoisuus ja sen jakauma voi vaihdella olosuhteiden mukaan ja muutosnopeus
riippuu mm. materiaalin hygroskooppisista ominaisuuksista ja dimensioista. Li-
säksi lämpötila vaikuttaa diffuusiovastukseen ainakin jäätymisalueella. Siten
ainakaan levymäisten, puupohjaisten materiaalikerrosten vesihöyrynläpäisevyyttä
ei voida kuvata yksittäisillä vastusarvoilla, vaikka ko. arvoja tyypillisesti määrite-
täänkin vain yhdelle tai kahdelle pisteelle (ns. kuiva- ja märkäkuppikokeet).

Laskennallisessa tarkastelussa materiaalikerrosten käyttäytyminen voidaan kuvata
dynaamisessa tilassa muuttuvia olosuhteita vastaavasti. Seuraavassa esitetään
vanerirakenteiden kosteusteknisen toimivuus laskettuna pelkästään vesihöyrynsu-
diffuusion kannalta, ts. sekä rakenteiden kostuminen että kuivuminen johtui dif-
fuusiosta sisä- ja ulkoilman ja rakenteen välillä. Osittain tapaukset leikkaavat
kappaleessa 10 esitettyjä kuivumistarkasteluja pienellä alkukosteudella. Tavoit-
teena oli löytää ne sisäpinnan materiaaliyhdistelmät, joilla havuvaneria voidaan
käyttää rakenteen tuulensuojana.

Laskennassa tutkittiin 1-dimensioista höyrynsulullista ja -sulutonta rakenneleikka-
usta sekä tuulensuojan ulkopinnalta eristettyä tapausta (Kuva 8). Kaikissa tapauk-
sissa tuulensuojana oli 9 mm havuvaneri. Lämmöneristeenä oli joko mineraalivilla
(20 kg/m^3) tai sellukuitueriste (40 kg/m^3). Höyrynsuluttomassa tapauksessa sisä-
puolen verhouslevynä oli 12 mm:n käsittelemätön havuvaneri. Maalaus lisäisi
sisäpinnan vesihöyrynsuhteesta, mikä tuo varmuutta laskelmiin. Taulukko 7 esittää
laskennassa tarkasteltujen rakenteiden materiaalikerrokset. Samalla tutkittiin
rakenteen kosteusteknisen toiminnan herkkyyttä sisäilman kosteuskuormitukselle.
Normaalin 4 g/m^3 sisäilman kosteuskuorman lisäksi käytettiin 2 g/m^3 kuormaa
ulkoilman kosteustasoon nähden. Sää tiedostona käytettiin Jyväskylän 1979 tietoja.

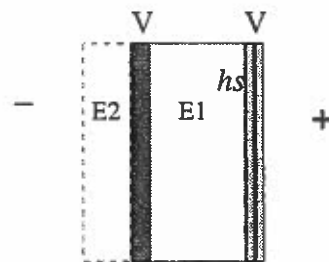
Tuloksena esitetään lasketut rakenteiden kokonaiskosteuden ja tuulensuojan sisä-
pinnan homeindeksin kehitys kahden vuoden aikana alkaen syyskuun 1. päivästä
(Kuva 9 ja Kuva 10).

Höyrynsululliset rakenteet toimivat molemmilla kosteuskuormilla samalla tavoin.
Homeindeksi jäi alle kahden, ts. rakenteilla ei ole riskiä näkyvästä homekasvusta.

Höyrynsuluttomat rakenteet (vaneri sisäverhouksena) toimivat hyvin 2 g/m^3
kuormituksella. Korkeampi 4 g/m^3 kuormitus johti homeen kasvuindeksin vuotui-
seen nousuun. Tulos viittaa siihen, että suhteellisen korkeat sisäilman kosteus-
kuormat voivat höyrynsuluttomissa tapauksissa johtaa hieman kasvaneeseen ho-
meriskiön tuulensuojan alueella. Jos sisäpuolen vaneri olisi ollut maalattu, olisi
rakenne ollut ilmeisesti toimiva myös korkeammalla kuormalla.

Taulukko 7. Diffuusiotarkasteluissa käsitellyt rakennetapaukset ja niiden tunnistet.
Tuulensuojana 9 mm:n havuvaneri.

Tapaus / tun- niste	Lämmöneriste 150 mm	Sisäverhous	Tuulensuojan ulkopuolinen lämmöneriste
MW, 9 + 12	miner.villa	12 mm vaneri	-
MW, R + 9 + 12	- " -	- " -	25 mm
MW, 9 + 12 vb	- " -	- " - + höyrynsulku	-
CFI, 9 + 12	sellukuitu	12 mm vaneri	-
CFI, R + 9 + 12	- " -	- " -	25 mm
CFI, 9 + 12 vb	- " -	- " - + höyrynsulku	-

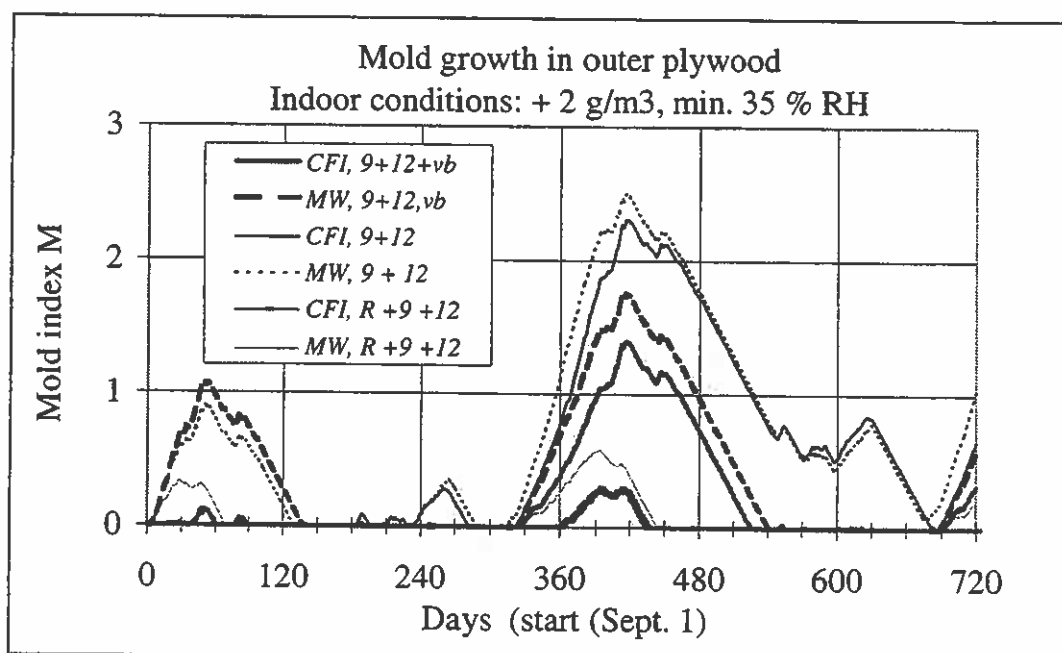
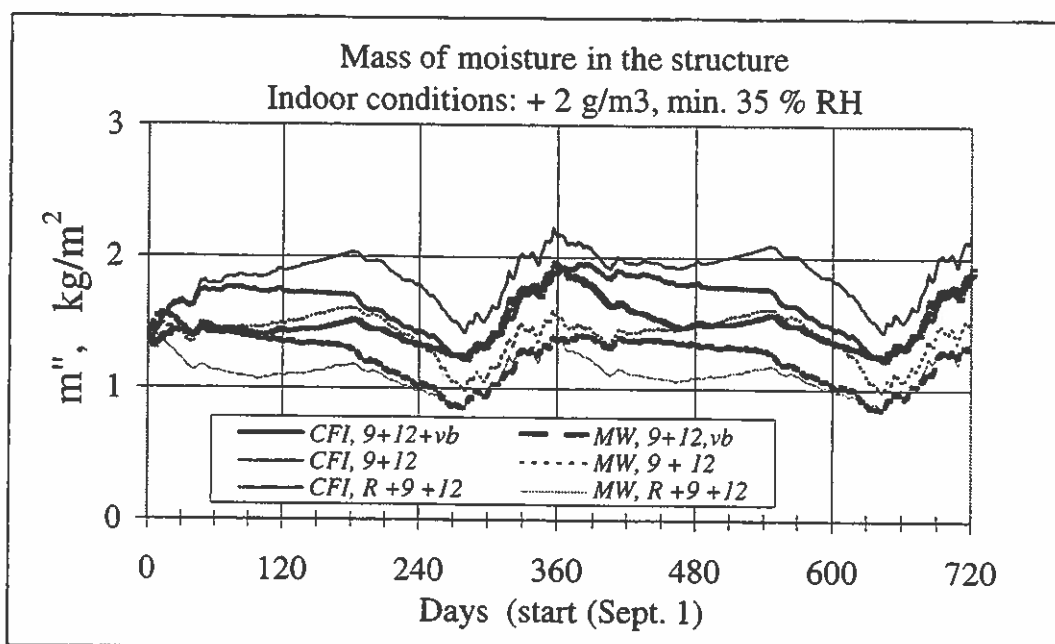


Kuva 8. Laskennallisesti tarkasteltu 1-d rakenneleikkaus.

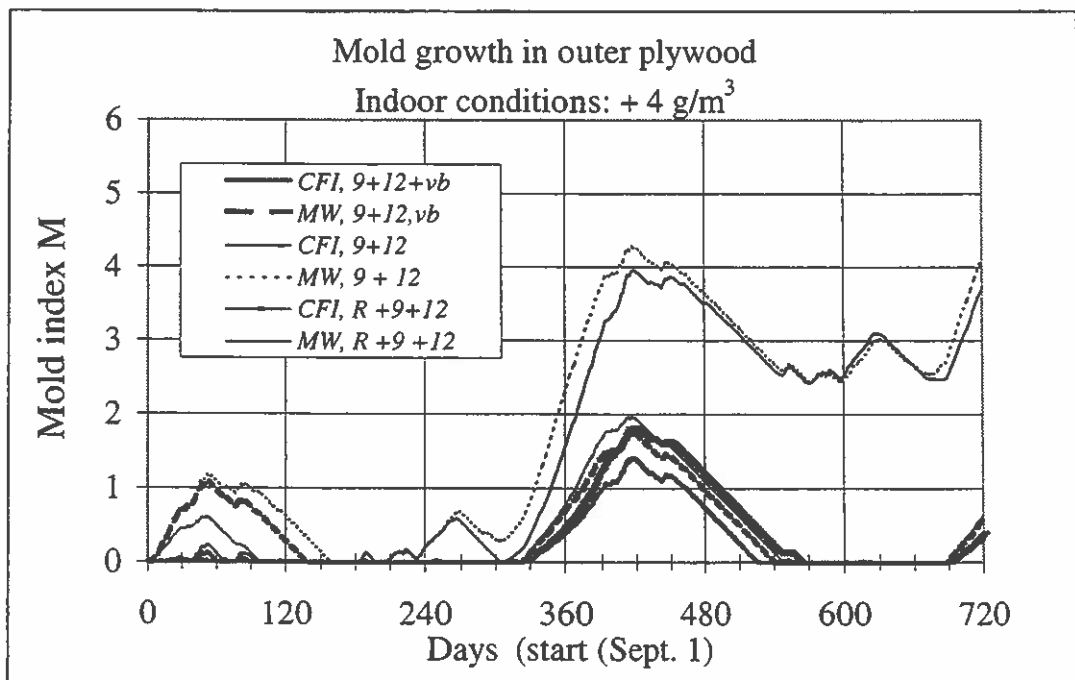
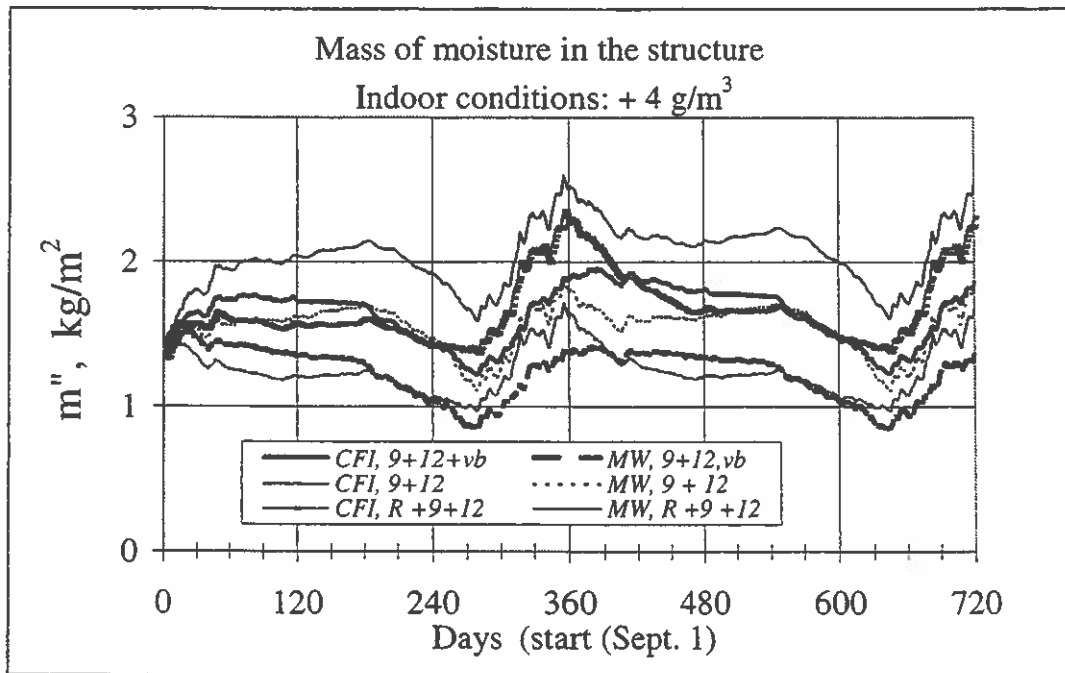
Ulkopuolelta eristetyin tuulensuojan tapauksissa sisäilman $+4 \text{ g/m}^3$ kosteuskuorma aiheutti kohonneet kosteustasot kylmällä kaudella. Rakenteiden kuivuminen oli lämpimällä kaudella niin nopeaa, että laskennallinen homeindeksi oli jokseenkin samanlainen kuin höyrynsulullisissa tapauksessa.

Tuloksista nähdään höyrynsuluttomien rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden herkkyyys sisäilman kosteudelle ja erityisesti ulkopuolisen lisäeristyksen vaikutus rakenteen toimintaan. Ulkopuolisen lisäeristyksen avulla höyrynsuluton rakenne toimi tarkastelutilanteissa yhtä turvallisesti kuin tavanomainen höyrynsulullinen.

Pitkäaikaisen toimivuuden edellytyksenä on sisäverhouksen höyrynvastuksen säilyminen. Höyrynsulun käyttö ulkopuolisen lisäeristyksen kanssa toisi lisävarmuutta rakenteen pitkäaikaiselle toimivuudelle. Pelkkä diffuusio on ilman ulosvirtaukseen ja kertaluonteisiin kosteuskuormiin (alkukosteus, vesivuoto) nähden vähäinen kosteusriskin aiheuttaja. Muiden kuormien lisänä sen merkitys kuitenkin kasvaa. Sisäpuolen vesihöyrynvastuksen varmistaminen höyrynsululla (höyrynsiirtoa rajoittavalla suhteellisen ilmatiiviillä kerroksella) johtaa samalla rakenteen ilmatiiviyden parantumiseen ja kosteuskonvektion riskien pienentymiseen.



Kuva 9. Rakenteen kosteus määrä (yllä, kg/m²) ja homeindeksi (alla) kun sisäilman kosteuskuorma oli 2 g/m³.



Kuva 10. Rakenteen kosteusmäärä (yllä, kg/m²) ja homeindeksi (alla) kun sisäilman kosteuskuorma oli 4 g/m³.

7 SALLITTU ILMAN JATKUVA ULOSVIRTAUS

Aiempien tutkimusten perusteella /12/ sisäilman jatkuva ulosvirtaus rakenteen läpi on osoittautunut merkittäväksi riskitekijäksi rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Ilman ulosvirtaustapauksia on analysoitu laskennallisesti mm. useiden Suomen ja Kanadan paikkakuntien säätiedostojen avulla käyttäen VTT/RTE:ssä kehitettyjä laskentavalmiuksia /7/.

Ilmavirtauksen kosteudensiirtokapasiteetti on suuri verrattuna pelkkään vesihöyryn diffuusioon. Ulkoilmaa kosteamman sisäilman virratessa rakenteeseen ylimääräinen kosteus voi sitoutua hygroskooppisesti materiaaleihin ja jopa tiivistyä rajapinnoille tai lämmöneristeeseen. Ilmavuoto keskittää ongelmat paikallisesti, jolloin kosteuskertymä ja mahdollinen homeen kasvu voi esiintyä suhteellisen pienellä alueella. Mahdollisen kosteus- ja home-riskin esiintymispaikka ja laajuus riippuvat ulospäin virtaavan ilman virtausreitistä ja ilmamäärästä.

Kosteuskonvektioon vaikuttavia tekijöitä on runsaasti. Ilman ulosvirtauksen kosteusvaikutukset riippuvat suuresti sisäilman kosteuskuormista, tuulensuojakerroksen vesihöyryn läpäisyominaisuuksista, rakennusvaipan kokonaistiiviydestä, ilmanvaihto-järjestelmästä, tuulen painevaikutuksista seinämiin, korkeuden aiheuttamasta termisestä painegradientista jne. Kaikkien rakenne- ja ilmavuototapauksen tarkka analysointi ei ole edes laskennallisesti mielekästä.

Aiemmissä tutkimuksissa on keskitytty lähinnä talvikauden kosteuskertymän ja sen kevät- ja kesäkauden kuivumisjaksojen tarkasteluun. Toimivuuden kriteerinä on käytetty kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa valitussa, kriittisessä kohdassa rakennetta.

Oli selvä tarve kehittää pelkistetty, mutta suuruusluokaltaan luotettava ilman läpivirtaustapausten analysointimenetelmä, jossa kriteerinä käytetään homeen kasvulle edullisia olosuhteita. Tässä tutkimuksen osassa esitetään tällaisen analysointimenetelmän perusteet, toiminnan arviointi kehittyneisiin menetelmiin verrattuna ja eri tuulensuojarakenteille ratkaistut tulokset.

7.1 HOMEEN KASVUEDELLYTYKSET PUUMATERIAALEISSA

Tässä tutkimuksessa on käytössä ensimmäistä kertaa matemaattiseen muotoon kehitetty homeen kasvun malli /2, 3/ yhdistettynä toimimaan olemassaolevissa kosteuden simulointimalleissa. Kosteusteknisen toimivuuden kriteerinä voidaan siten käyttää homeen kasvua kuvaavaa indeksiä.

Homeen kasvun alkamiselle suosiolliset kosteusolot riippuvat vallitsevasta lämpötilasta (Kuva 7) /2, 3/. Mitä alhaisempi lämpötila on, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta home alkaisi kasvaa. Homeen kasvu kuvan alimman rajakäyrän oloissa on hidasta. Tätä ylemmät käyrät kuvaavat olosuhteita, jotka kuudessa tai neljässä viikossa aiheuttavat silminnäkävää homeen kasvua. Ho-

meen kasvun alkamiseen tarvittavaa suhteellista kosteutta kuvaava rajakäyrä saadaan yhtälöstä /3/:

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0, & \text{kun } T \leq 20 \\ 80, & \text{kun } T > 20 \end{cases} \quad (1)$$

Myös lämpötilan suhteen on selvästi havaittavissa alue, jolla homeen kasvu ylipäänsä on mahdollista. Pakkasessa home ei käytännössä kasva, kuten ei myöskään yli 50 °C:n lämpötilassa. Riittävän kylmä tai kuuma olosuhde jopa tappaa jo alkaneen kasvun.

7.2 ILMAN ULOSVIRTAUKSEN ANALYSOINTIMENETELMÄ XFILT

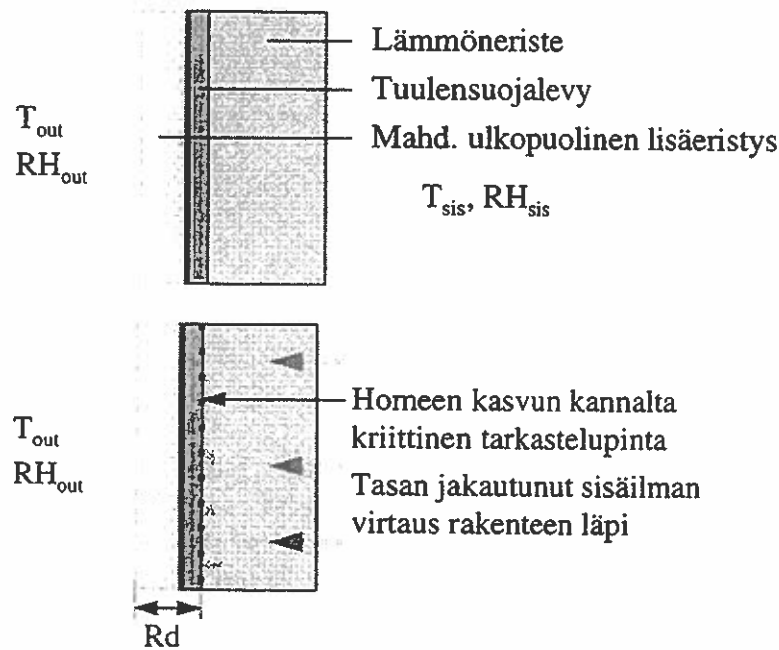
Tutkimuksen tässä osassa sovellettiin kehitettyä yksinkertaista arviointimenetelmää, jolla voidaan löytää rakenteen läpäisevälle jatkuvalle ilman ulosvirtaukselle sallitut raja-arvot, joilla tuleva kosteus tuulettuu ulos rakenteesta aiheuttamatta homekasvua rakenteen kriittisessä kohdassa. Kriittinen kohta on yleensä kylmän pinnan viereinen tuulensuojalevy ja siihen rajoittuvat materiaalikerrokset ilman ulosvirtauskohdassa.

7.2.1 Perusoletukset

Perusoletuksena on, että homekasvun olosuhteiden turvallisella puolella olevan tuulensuojan kautta ulos kuivuva kosteus vastaa valittuna ajanjaksona ilman ulosvirtauksen mukana rakenteeseen tulevaa kosteuskuormaa. Näin ratkaistua ilmavirtausta voidaan pitää tarkasteluoloissa arvioidulle rakenteelle turvallisena. Kosteuslähteenä on pelkästään sisäilman konvektiolla siirtyvä kosteus. Diffuusiovirtaus sisäilmasta rakenteeseen jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Rakenne oletetaan kapasiteetittomaksi, ts. lämpötila- ja kosteuskentän muutokset ovat viiveettömiä. Rakenne kuvataan pelkistetyksi lämmöneristyskerroksena ja sen ulkopuolisena tuulensuojana (Kuva 11). Jatkuva kosteuskuormituksessa tuulensuojan kosteustaso pysyy jokseenkin vakiotasolla, eikä sen kosteuskapasiteetilla siten olisi kovin suurta vaikutusta kerroksen sisemmän rajapinnan kosteuteen.

Rakenteen läpäisevä ilmavirtaus oletettiin tasan jakautuneeksi, ts. ilmavirtauksen ja sen aiheuttaman kosteuskuormituksen paikallista keskittymistä ei oteta huomioon. Jos sama virtaama on paikallisesti vuotorakoon keskittynyt, lisääntyvät kosteuden vaikutukset paikallisesti ja sallittu ilmamäärä pienenee menetelmällä ratkaistusta arvosta. Tuloksena saatu sallittu ilmavirtausmäärä rakenteen pinta-alaa kohden [$L/(s \cdot m^2)$] kuvaa siten suurinta mahdollista ilmavirtausarvoa, jonka tarkasteltu rakenne sallii ilman homehtumisriskiä.



Kuva 11 . Sisäilman ulosvirtauksen ja kosteuden tuulettumisen pelkistetyssä tarkastelussa käytetty rakenneleikkaus.

Rakenteen kriittisen alueen olosuhteet asetettiin tarkastelussa tasolle, jossa homeen kasvulle ei ole edellytyksiä. Tarkastelukohdalle ratkaistiin sallittu suhteellisen kosteuden taso yhtälön 1 avulla kyseiselle kohdalle kulloinkin ratkaistun lämpötilan perusteella. Menetelmässä sisäilman lämpötilaa pidettiin vakiona ja ulkoilman lämpötila muuttui mittauksiin perustuvien referenssivuoden säätietojen mukaisesti.

Tarkastelu tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelman pohjalle tehdyllä sovelluksella (XFILT). Seuraavassa esitetään tarkastelussa tehdyt oletukset ja arviointimenetelmän perusteet.

7.2.2 XFILT -menetelmän ratkaisuperusteet

Ulkoilman arvot perustuvat mitattuun referenssivuoden säätiedostoon, josta käytettiin ulkoilman lämpötilan ja vesihöyryn osapaineen päivittäisiä keskiarvoja. Sisäilman lämpötilalle ja sen kosteuskuormalle [g/m^3] asetettiin vakioarvot.

Arviointimenetelmässä arvioitiin rakenteesta sen tuulensuojalevyn kautta poistuva kosteusvirta tilanteessa, jossa tuulensuojalevyn sisäpinnan suhteellinen kosteus pidettiin kaiken aikaa homekasvukriteerin rajan alapuolella.

Tuulensuojan sisäpinnan lämpötilan perusteella voitiin ratkaista homekasvun suhteellisen kosteuden alaraja. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella voitiin ratkaista paikallinen vesihöyryn osapaine ja -paine-ero ulkoilmaan. Vesihöyryn osapaine tuulensuojalevyn sisäpinnassa ei voi asettua korkeammaksi, kuin

mitä sisäilman kosteuskuorman [g/m^3] aiheuttama lisäys ulkoilman kosteuteen edellyttää.

Tuulensuojalevyn sisäpinnan ja ulkoilman välisen vesihöyryn osapaine-eron sekä tuulensuojan ja mahdollisen tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen vesihöyrynvastuksen avulla ratkaistiin diffuusinen kosteusvirta rakenteesta ulos (kaava 2):

$$m'' = \Delta p_v / R_d = (p_{v,r} - p_{v,o}) / R_d \quad (2,a)$$

$$R_d = d_{TS} / \delta_{p,TS} + d_{EI} / \delta_{p,EI}, \quad (2,b)$$

missä

m''	on	kosteuden massavirta ulos rakenteesta, $\text{kg}/(\text{s m}^2)$
$p_{v,r}$	on	vesihöyryn osapaine tuulensuojan sisäpinnalla, Pa
$p_{v,o}$	on	vesihöyryn osapaine ulkoilmassa, Pa
R_d	on	tuulensuojan ja mahdollisen ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen vesihöyrynvastus, $(\text{s m}^2 \text{ Pa})/\text{kg}$
δ_p	on	vesihöyrynläpäisevyys ($=f(\text{RH})$), $\text{kg}/(\text{s m Pa})$
$_{TS}$	tuulensuojalevylle ja $_{EI}$	sen ulkopuoliselle lämmöneristeelle.

Tuulensuojakerroksen vesihöyrynläpäisevyys ratkaistiin tuulensuojan sisä- ja ulkopinnalle laskettujen suhteellisten kosteuksien keskiarvon perusteella. Liitteessä 1 esitetään tarkastelussa käytettyjen tuulensuojalevyjen vesihöyryn-johtavuudet ja havuvanerin tasapainokosteudet suhteellisen kosteuden funktiona.

Näin ratkaistu tuulensuojan läpäisevä kosteuden massavirta kuvaa homeen kasvun kannalta kulloisenkin lämpötilatason mukaan turvallisissa oloissa mahdollista suurinta kosteuden tuuletusvirtaa ulos rakenteesta tuulensuojalevyn kautta. Tarkastelun lähtökohtana on, että rakenteeseen ilmavirtauksen mukana tuleva kosteusvirta voi olla (korkeintaan) saman suuruinen kuin siitä tuulensuojan kautta poistuva kosteus.

Rakenteen läpäisevät ilmavirrat ratkaistiin kaavalla (3):

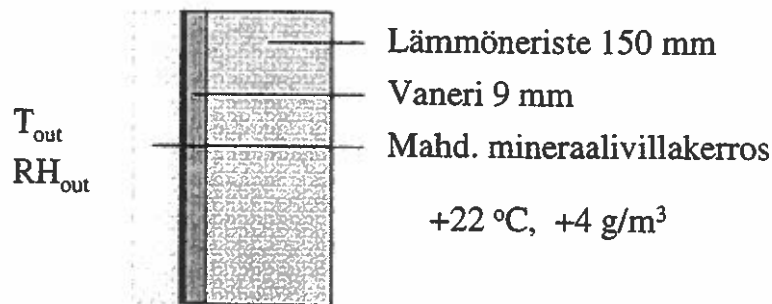
$$V'' = m'' / \Delta \rho = m'' / (\rho_{in} - \rho_{TS}), \quad (3)$$

missä

V''	on	ilman sallittu tilavuusvirta, $\text{m}^3/(\text{s m}^2)$
ρ_{in}	on	sisäilman kosteuden osatiheys, kg/m^3
ρ_{TS}	on	ulosvirtaavan ilman kosteuden osatiheys, kg/m^3 .

7.3 LASKENNASSA ANALYSOIDUT TAPAUKSET

Laskennassa tarkasteltiin rakennetta, jossa on 150 mm paksu lämmöneristekerros (Kuva 12). Tuulensuojana oli joko havuvaneri (9 mm), huokoinen kuitulevy (12 mm), kipsilevy (12 mm) tai lastulevy (12 mm). Perustapausten lisäksi tarkasteltiin ulkopuolelta lisäeristettyjä tapauksia. Tuulensuojan ulkopuoliseksi lämmöneristeeksi oletettiin mineraalivilla, jonka vesihöyrynjohtavuus oli vakio $1,2\text{E-}10 \text{ kg/(s m Pa)}$. Analysoidut ulkopuolisen lämmöneristeen paksuudet olivat 25, 50, 75 ja 100 mm.



Kuva 12. Laskennallisessa tarkastelussa käytetty pelkistetty 1-D rakenneleikkaus. Vanerin lisäksi tarkastelussa käytettiin myös muita tuulensuojamateriaaleja.

Ulkoilmastona käytettiin vuoden 1979 Jyväskylän säätiedostosta ratkaistuja päiväkeskiarvoja. Vertailulaskelmissa käytettiin Holzkirchenin ja Vancouverin vastaavia säätietoja. Käytettyjen säätiedostojen lämpötilan, vesihöyryn osapaineen ja suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot esitetään liitteessä 2. Holzkirchen edustaa Keski-Eurooppalaista mannerilmastoa, jossa on selvä talvikausi ja kostea kesä. Vancouverin kuukausikeskilämpötilat ovat jatkuvasti nollan yläpuolella, eikä varsinaista talvea ei ole siinä mielessä kuin Suomessa tai useimmilla Kanadan muilla seuduilla. Vancouver edustaa leutoa, suhteellisen tasaisen kosteaa rannikkoilmastoa.

Sisäilman lämpötila oli +22 °C ja kosteuskuorma sisäilmaan oli +4 g/m³ (lisäyksenä ulkoilman tilaan). Laskennallisesti tarkasteltiin vuoden pituista jaksoa käyttäen reunaehtoina päiväkeskiarvoja. Tulostus esitetään kuukausikeskiarvoina.

7.4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Seuraavassa esitetään kehitetyllä menetelmällä (XFILT) ratkaistut, rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta turvalliset ilmavirtausmäärät sisäilmasta rakenteen läpi ulos. Tuloksissa esitetään ulkopuolisella (25 - 100 mm:n paksuisella) lisälämmöneristeellä ja ilman sitä ratkaistut tulokset. Ilmavirrat esitetään rakenteen otsapinta-alaa kohden laskettuina keskiarvoina [$\text{L/(s m}^2\text{)}$].

7.4.1 Jyväskylän ilmasto

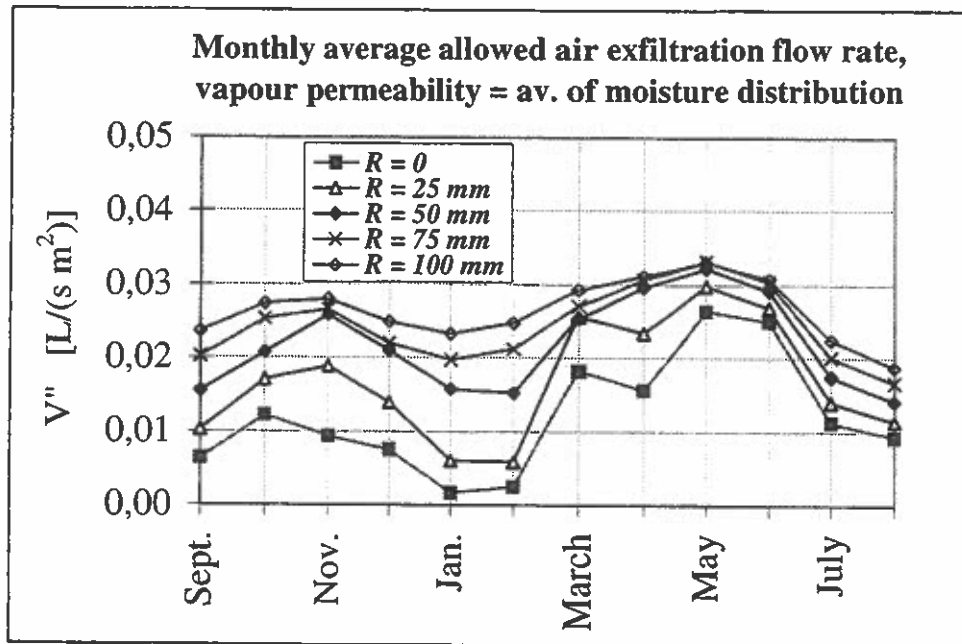
Kuva 13 esittää Jyväskylän ilmastossa vanerirakenteelle ratkaistujen ilmavirtojen kuukausikeskiarvojen jakauman vuoden aikana. Pienimmät sallitut ilmavirtaamat ovat talvikaudella tai loppukesästä riippuen ulkopuolisen lämmöneristeen paksuudesta. Lisälämmönerityksen vaikutus näkyy suhteellisesti voimakkaimmin juuri talvikuukausina, jolloin tuulensuojan lämpötilatason nostaminen lisää kuivausaikaa sulassa tilassa. Ulkopuolisen lämmöneristeen määrästä riippumatta sallitut ilmavirtausmäärät ovat kuvatulla rakenteella pienet.

Talvikaudella tuulensuojakerros on jäässä eikä homekasvua voi esiintyä. Kun arvioidaan sallittua ilmanvirtaustasoa rakenteen läpi, voidaan talvikauden arvoista käyttää pitkän ajanjakson keskiarvoa, sillä pienellä virtaamalla kertyvä kosteus tuulettuu kevätkaudella suhteellisen nopeasti pois rakenteesta. Homeen kasvun kannalta vaarallisinta aikaa on loppukesä ja syyskausi (heinä-lokakuu).

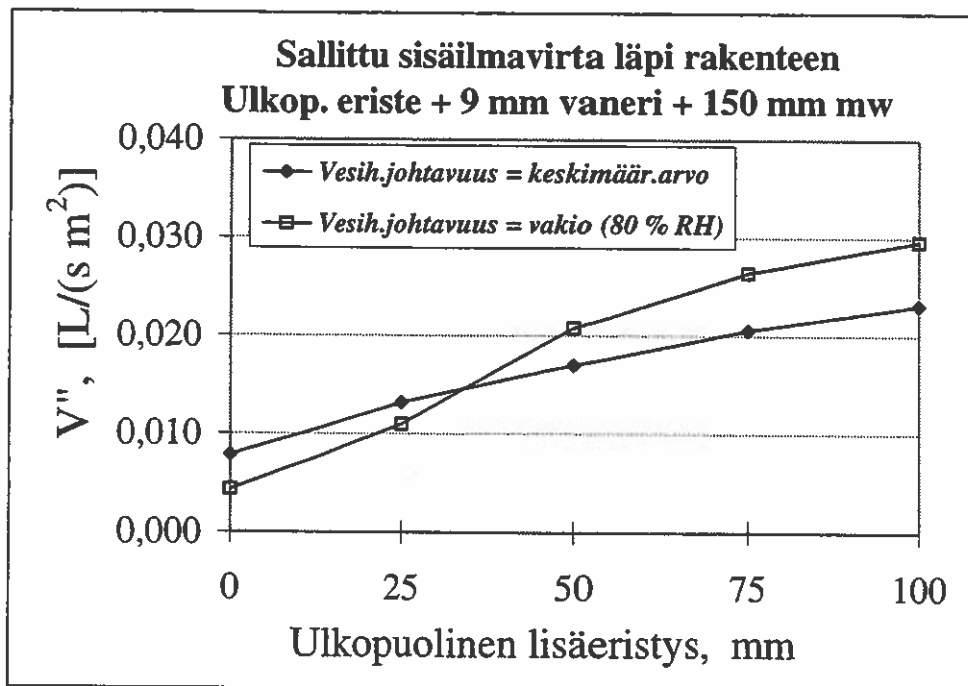
Haettaessa kriteeriä sallitulle ilmavirtausmäärälle käytettiin vertailuarvoina talvikauden (marraskuu-maaliskuu) keskiarvoa sekä lämpimän kesä- ja syyskauden toimivuuden kannalta kriittisimmän jakson (heinä-lokakuu) keskiarvoja. Suhteellisen pitkien jaksojen keskiarvot kuvaavat parhaiten homekriteerin alarajalla hitaasti kehittyvän homeen todellisia riskejä. Näiden kahden jakson ilmavirtauksen keskiarvosta valittiin pienin arvo kuvaamaan sallittua rakenteen läpäisevää ilmavirtausta. Valintamenetelmän Jyväskylän sääoloissa antamat tulokset esitetään vanerirakenteelle tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen paksuuden funktiona (Kuva 14).

Tuloksena esitetyt ilmavirtausmäärät ovat suoraan verrannollisia mihin tahansa rakenteeseen tulevaan jatkuvaan kosteuskuormitukseen. Esimerkiksi jos sallittu ilmavirtaus on kaksinkertainen toiseen tapaukseen verrattuna, myös rakenteen kosteudenkuivauskyky on kaksinkertainen vertailutapaukseen nähden.

Kun tuulensuojan lämpötilatasoa nostetaan ulkopuolisen lämmöneristystyksen avulla, muuttuu tuulensuojan keskimääräinen kosteustaso ja jäätyneen tilan jaksot lyhenevät. Samalla myös ulosvirtaavasta ilmasta rakenteeseen tiivistyvä kosteus määrä pienenee, sillä tuulensuojan kyllästystilan vesihöyryn osapainetaso kasvaa. Taulukko 8 esittää vanerirakenteelle eri tapauksissa lasketut tuulensuojan keskimääräisen kosteustason, sitä vastaavan vesihöyrynsuhtavuuden, rakenteesta tuulettuvan kosteusvirran tiheyden ja ulosvirtaavasta ilmavirrasta rakenteeseen jäävän kosteusmäärän [g/m^3] vuotuiset keskiarvot. Taulukon arvot kuvaavat siis homeen kannalta turvallisia olosuhteita ja esimerkiksi tuulensuojan tehollista vesihöyrynsuhtavuutta vuositasolla.



Kuva 13 . Vanerituulensuojarakenteen läpi ulos virtaavalle ilmalle sallitut tilavuusvirran (maksimi) kuukausikeskiarvot Jyväskylän ilmastossa.



Kuva 14 . Sallittu suurin ilman ulosvirtausmäärä rakenteen läpi tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen funktiona. Tuulensuojana 9 mm:n havuvaneri. Jyväskylän sääolot.

Taulukko 8 . Homeen kasvun kannalta turvalliset raja-arvot kuvan 12 rakenteelle, jonka läpi on jatkuva sisäilman ulosvirtaus. Tuulensuojana 9 mm:n havuvaneri. Eri ulkopuolisen lämmöneristysten paksuuksia vastaavat tuulensuojan kosteuden, vesihöyrynjohtavuuden, rakenteesta tuulettuvan kosteusvirran tiheyden ja ulosvirtaavasta ilmavirrasta rakenteeseen jäävän kosteusmäärän [g/m^3] vuotuiset keskiarvot. Jyväskylän sääolot.

Ulkopuolinen lämmöneristekerros mm	Tuulensuojan keskikosteus % RH	Tuulensuojan vesihöyrynjohtavuus $\times 10^{-12}$ $\text{kg}/(\text{s m Pa})$	Kosteusvirta rakenteesta $\times 10^{-8}$ $\text{kg}/(\text{s m}^2)$	Ilmavirrasta tiivistyvä kosteus g/m^3
0	83	5,3	4,9	3,3
25	80	4,8	6,8	2,9
50	77	4,4	8,8	2,3
75	75	4,0	9,8	1,8
100	74	3,8	10,6	1,4

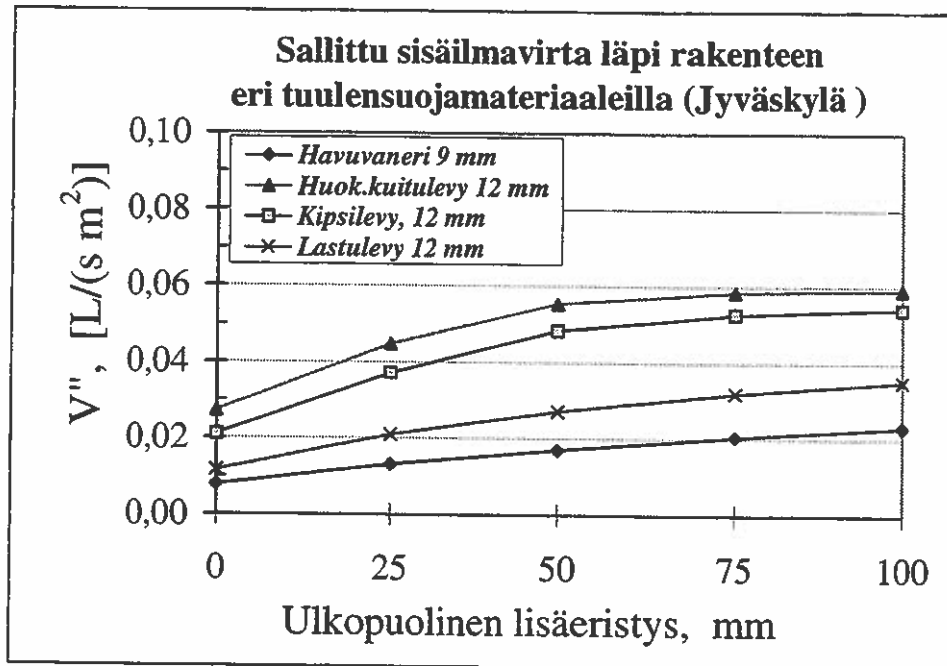
Eri tuulensuojamateriaalien toiminnan vertailu

Kuva 15 esittää eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Kun tuulensuoja rajoittui suoraan tuuletusrakoon, oli havuvanerituulensuojan sallima suurin ulosvirtausmäärä noin $0,008 \text{ L}/(\text{s m}^2)$ kun vastaava arvo huokoisella kuitulevyllä oli $0,027 \text{ L}/(\text{s m}^2)$. Kipsi- ja lastulevyt sijoittuvat edellisten väliin.

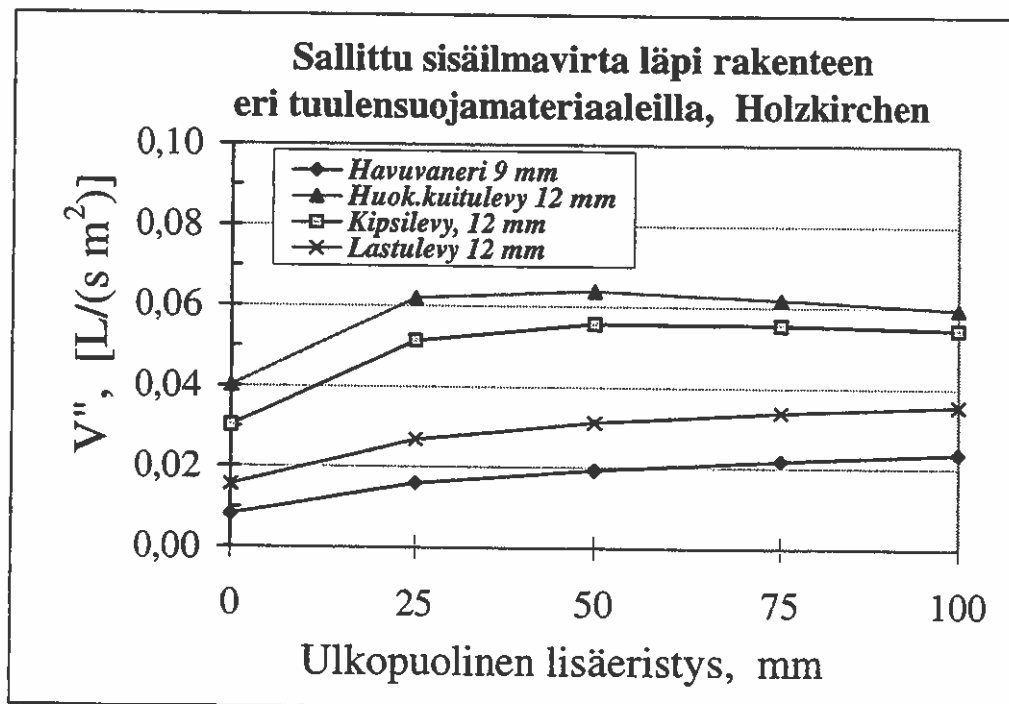
7.4.2 Holzkirchenin ilmasto

Kuva 16 esittää kuukausikeskiarvojen perusteella valitut, eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona Holzkirchenin sääoloissa.

Niillä tuulensuojamateriaaleilla, joiden vesihöyrynjohtavuus oli suhteellisen korkea, kuten huokoinen kuitulevy, sallitti ilmavirta pieneni ulkopuolisen lämmönerityspaksuuden kasvaessa yli 50 mm:n. Tämä johtui siitä, että vesihöyryn osapaine-ero tuulensuojan sisäpinnan ja ulkoilman välillä ei juurikaan kasvanut, mutta ulkopuolinen lämmöneristekerros aiheutti lisävastuksen kosteudensiirtoon.



Kuva 15. Eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Jyväskylän sääolot.



Kuva 16. Eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Holzkirchenin sääolot.

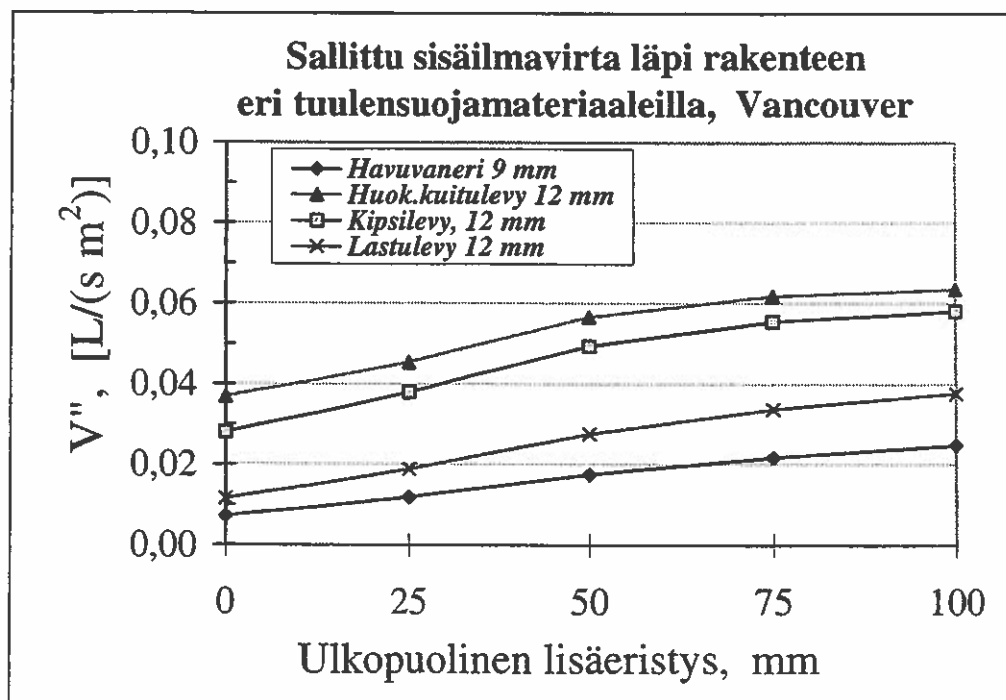
7.4.3 Vancouverin ilmasto

Vancouverin sää on selvästi kolmesta tutkitusta leudoin. Kuva 17 esittää eri tuulensuojarakenteille ratkaistut tulokset. Leudosta talvesta huolimatta Vancouver vastasi tuloksiltaan paremmin Jyväskylää kuin Holzkircheniä. Syynä tähän saattaa olla pitkäaikainen lämmin kausi, jolloin homeen kasvuedellytykset ovat jokseenkin läpi vuoden olemassa.

7.4.4 Eri ilmastojen vaikutusten vertailu

Suhteellisesti suurin hyöty Holzkirchenin oloissa saavutettiin noin 25 mm:n paksuisella tuulensuojan ulkopuolisella lämmöneristyksellä. Jyväskylän oloissa käyrän taitekohta oli huokoisella kuitulevyllä ja kipsilevyllä noin 50 mm:n eristepaksuudessa, mutta havuvanerilla ja lastulevyllä tätäkin paksummat eristykset paransivat rakenteen kosteudensietokykyä ja kasvattivat edelleen sallittua sisäilmavirtaa. Vancouverin tapauksessa 25 - 50 mm:n lisäeristepaksuudet antoivat kaikilla tuulensuojatapauksilla jokseenkin Jyväskylän tilannetta vastaavat tulokset.

Kaikissa tapauksissa sallitut ilmavirtaukset olivat pieniä. Alhainen sallittu ilmavirtaustaso kuvaa rakenteiden herkkyyttä jatkuvalla sisäpuolisella ylipaineella ja sen aiheuttamalle sisäilman virtaukselle rakenteen kautta ulos.



Kuva 17. Eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Vancouverin sääolot.

7.5 TULOSTEN ARVIOINTI OHJELMALLA TCCC2D

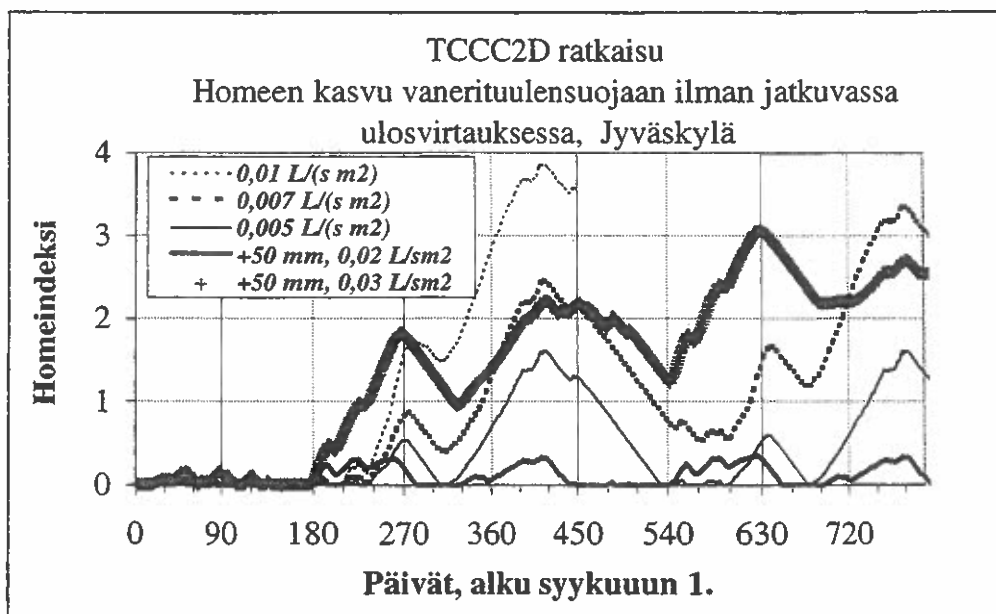
Rakennetta (Kuva 12) arvioitiin tasan jakautuneessa jatkuvassa ilman ulosvirtaus-tilanteessa myös käyttäen laskentamallia TCCC2D. Tällä dynaamisen tilan mallilla ratkaistiin kyseinen 1-dimensioinen ongelma käyttäen tunnin aika-askelta ja ilmastotiedon arvot päivitettiin tunneittain. Ohjelma päivitti tuulensuojan materiaaliominaisuudet liitteen 1 sovitekäyrien mukaisesti. Tunneittain päivitetyt reunaehdot ottavat paremmin huomioon hetkelliset, päivän lämpimien hetkien aikaiset homeen mahdollistavat kasvuolosuhteet. Siten tuntiarvoilla ratkaistu tapaus saattaa tuottaa hieman suuremman homeriskin kuin päivittäisillä arvoilla ratkaistu tilanne. Tapausten vertailu antaa kuitenkin käsityksen dynaamisen tilan ja kehitetyllä yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä saatujen tulosten mahdollisista eroista.

Laskelmissa tarkasteltiin perustapausta ja tapausta, jossa oli 50 mm:n ulkopuolinen lämmöneristekerros. Tarkastelujakson pituus oli runsaat kaksi vuotta (27 kk), jotta homeen vuotuinen kasvu saatiin näkyviin.

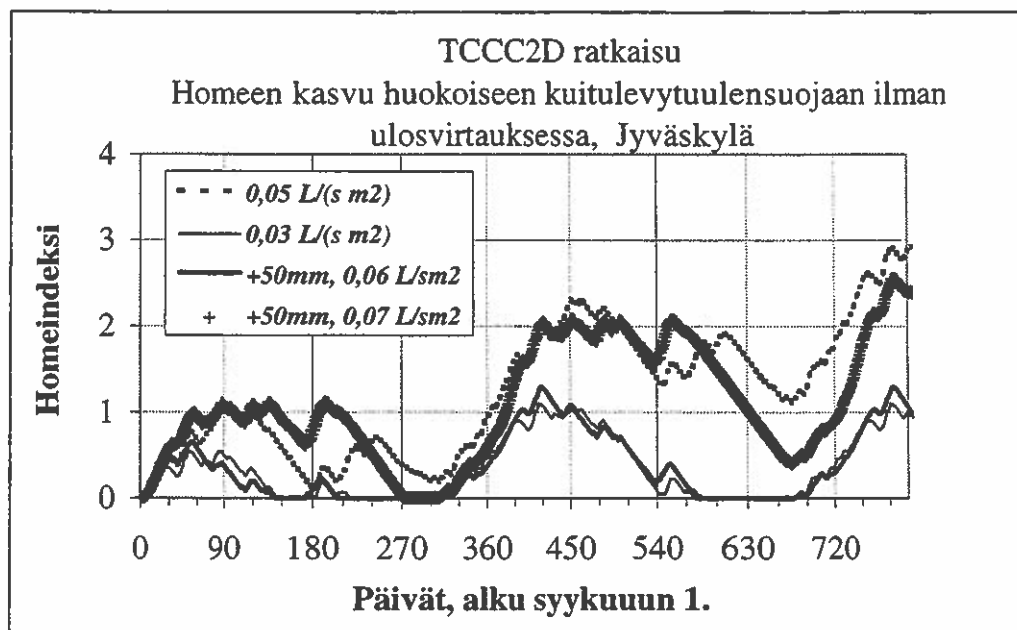
Kuva 18 esittää havuvanerituulensuojarakenteelle ohjelmalla TCCC2D ratkaistut homeindeksit 27 kuukauden aikana alkaen syyskuun alusta ja Kuva 19 vastaavat tulokset kun tuulensuojana oli huokoinen kuitulevy. Havuvaneritapauksessa käytettiin perustapaukselle kolmea ilman tilavuusvirran arvoa: 0,005; 0,007 ja 0,01 L/(s m²) ja eristetyille tapaukselle arvoja 0,02 ja 0,03 L/(s m²). Vastaavat ilmavirtausarvot kuitulevyrakenteella olivat 0,03 ja 0,05 L/(s m²) perustapaukselle ja 0,06 ja 0,07 L/(s m²) eristetyille tapaukselle. Valitut arvot sijoittuvat yksinkertaistetulla menetelmällä ratkaistujen suositusarvojen tasolle.

Tulosten mukaan vanerirakenteessa virtaamalla 0,01 L/(s m²) homekriteeri 3 ylittyy jo toisen vuoden lokakuun loppupuolella. Virtaamalla 0,007 L/(s m²) maksimiarvo oli ensimmäisenä vuonna 2,4, mutta homeen kasvulle jäi paremmat edellytykset seuraavaa vuotta varten, jolloin indeksi sai arvon 3,3. Talvikaudella ei kylmyydestä johtuen ole homeen kasvuedellytyksiä ja home taantuu (homeindeksi alenee). Dynaamisen numeerisen tarkastelun perusteella jatkuva 0,005 L/(s m²) sisäilman ulosvirtaus on sallittu rakenteelle, jonka tuulensuojana on 9 mm:n havuvaneri ilman ulkopuolista lisäeristystä. Yksinkertaistettu tarkastelumenetelmä antoi toimivuuden raja-arvoksi ilmavirran 0,008 L/(s m²). Näin pienillä ilmavirroilla on tärkeintä, että tulos on samalla tasolla, eikä poikkeamaa siten voida pitää suurena.

Ulkopuolelta lämmöneristetyissä tapauksissa yksinkertaistettu tarkastelu antoi toimivuuden rajaksi ilmavirran 0,017 L/(s m²). TCCC2D osoitti virtaaman 0,02 L/(s m²) olevan vielä turvallinen kun taas virtaamalla 0,03 L/(s m²) homekriteeri ylittyi toisena vuonna.



Kuva 18. Homeen kasvu havuvanerituulensuojassa dynaamisen mallin TCCC2D avulla ratkaistuna eri sisäilman virtausmäärillä rakenteen läpi Jyväskylän olosuhteissa. Hyväksyttävä, turvallinen taso on indeksin 3 alapuolella.



Kuva 19. Homeen kasvu huokoisessa kuitulevytuulensuojassa dynaamisen mallin TCCC2D avulla ratkaistuna eri sisäilman virtausmäärillä rakenteen läpi Jyväskylän olosuhteissa. Hyväksyttävä, turvallinen taso on indeksin 3 alapuolella.

Huokoisen kuitulevytuulensuojan tapauksessa toimivaksi osoittautui perustapauksessa virtaama $0,03 \text{ L/(s m}^2\text{)}$, kun virtaamalla $0,05 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ ilmeni homeen kasvuriski usean vuoden tasolla. Yksinkertaistettu tarkastelumenetelmä antoi toimivuuden raja-arvoksi ilmavirran $0,027 \text{ L/(s m}^2\text{)}$. Lisäeristetyssä tapauksessa virtaama $0,06 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ oli toimiva ja $0,07 \text{ L/(s m}^2\text{)}$ lievästi vuosittain lisää homehtuva, kun yksinkertaistettu menetelmä antoi rajaksi arvon $0,055 \text{ L/(s m}^2\text{)}$. Tässä tapauksessa yksinkertaistettu malli vastasi tuloksiltaan varsin hyvin kehittyneen laskentamallin antamia.

7.6 YHTEENVETO ILMAN ULOSVIRTAUKSESTA

7.6.1 Kehitetty kosteuskonvektion homeriskin arviointimenetelmä

Yksinkertaistettu menetelmä antoi suhteellisen hyvän kuvan sallitusta, homeen kasvun kannalta turvallisesta tasan jakautuneen ilman läpivirtausmäärästä. Menetelmän antamat tulokset vastasivat tasoltaan hyvin kehittyneemmällä laskentamenetelmällä ratkaistuja ilmavirtausarvoja.

Kehitettyä yksinkertaistettua menetelmää voidaan käyttää arvioitaessa eri tuulensuojarakenteiden kosteudenkuivauskykyä tasaisena jatkuvassa kosteuskuormituksessa homeen kasvun kannalta turvallisissa oloissa. Nyt esitetty rakenteen läpäisevän sisäilman ulosvirtauksen turvallisen ilmamäärän tason ratkaisu on eräs menetelmän sovellutus.

Käytännössä ei ole tarpeen esittää tarkkoja raja-arvoja sallituille ilmavirtauksille rakenteen läpi. Yksinkertaistetun menetelmän tulosten perusteella voidaan kuitenkin tehdä johtopäätöksiä rakenteen läpi sisältä ulospäin virtaavan ilman kosteusvaikutuksista ja määrittää homeongelmia aiheuttavat ilmavirtaustasot.

7.6.2 Sallitut sisäilman läpivirtausmäärät

Tulosten perusteella homeen kasvun kannalta turvallisissa oloissa sallitut jatkuvat ilmavirtausmäärät tarkasteltujen tuulensuojarakenteiden läpi olivat varsin alhaiset. Vanerituulensuojan sallima rakennepinta-alaa kohden tasan jakautunut virtaama jäi alle tason $0,01 \text{ dm}^3\text{/(s m}^2\text{)}$ ja huokoisella kuitulevytuulensuojalla se oli ilmastosta riippuen tasolla $0,03 - 0,05 \text{ dm}^3\text{/(s m}^2\text{)}$.

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että 0,5-kertainen ilmanvaihto pientalossa edellyttää noin $0,2 \text{ dm}^3\text{/(s m}^2\text{)}$ tasaisesti seinä- ja kattopinnan alueelle jakautunutta korvausilmavirtaa. Korvausilman suunta on tietysti sisään päin, mutta virtaamat kuvaavat mahdollisia rakenteiden vuotovirtoja käytännön paine-erotasoilla. Rakenteiden paikalliset vuotoilmavirrat voivat ylittää huomattavasti tasan jakautuneelle ilmavirtaukselle lasketut arvot. Kosteuden riskitekijät korostuvat, kun ilman läpivirtaus keskittyy paikallisiin vuotoreitteihin. Käytännön rakenteissa mahdolliset paikalliset vuotoilmamäärät voivat ylittää moninkertaisesti sallitut, jatkuvat ilman läpivirtausmäärät.

Tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyksen käyttö parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintavarmuutta. Ulkopuolisen lämmöneristeen vaikutuksesta ulosvirtaavasta ilmasta tiivistyy rakenteeseen entistä pienempi osa sen sisältämästä kosteudesta, jolloin myös sallittu ilmavirtausmäärä kasvaa. Esimerkiksi 50 mm:n lisälämmöneristys tuulensuojan ulkopuolella sallii, tuulensuojamateriaalista riippuen, noin 2 - 2,3 -kertaa suuremman jatkuvan kosteuskuorman (sisäilman läpivirtauksen) rakenteeseen kuin perustapaus ilman ulkopuolista lämmöneristettä. Lisälämmönerityksestä huolimatta sallitut virtausmäärät jäävät varsin alhaisiksi verrattuna käytännön rakenteissa mahdollisiin ilmavuotomääriin.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tarkasteltujen rakenteiden läpi ei tulisi sallia jatkuvaa tai pitkäaikaista sisäilman vuotoa ulospäin. Sisäilman vuotoa rakenteisiin ei voida, eikä ole tarkoituksenmukaista estää pelkästään nykyistä ilmatiiviimmillä rakenteilla. Paikalliseen ilmatiiviyteen tulee kiinnittää huomiota kriittisissä ilmanvuotokohdissa erityisesti katon alueella sekä seinän ja kattorakenteiden liitoskohdissa.

Sisäilman vuoto ulospäin voidaan estää lähinnä vain rakennuksen painesuhteiden hallinnalla. Kosteusriskejä aiheuttava pitkäaikainen ilman ulosvuoto rakenteiden kautta voidaan estää pitämällä rakennus kaikilta osiltaan pääsääntöisesti alipaineisena. Ajoittain tuulen vaikutukset voivat muuttaa painesuhteita, mutta vallitsevan ilmavirtauksen tulee olla ulkoa sisälle päin. Tämä ehto asettaa vaatimuksia mm. rakennuksen vaipan kokonaistiiviydelle ja ilmanvaihto-järjestelmälle. Rakennuksen ulkovaipalta edellytettävä tiiviystaso jää selvitettäväksi myöhemmissä tutkimuksissa.

Termisen nosteen vaikutus rakennusten painesuhteisiin tulee ottaa huomioon erityisesti kerrostaloissa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että eri kerrosten ja huoneistojen välisen ilmatiiviyden tulisi olla sellainen, että huoneistoissa voidaan ylläpitää alipainetta riippumatta ympäröivien tilojen paineoloista.

8 RAKENTEIDEN KUIVUMISNOPEUDEN RIIP- PUVUUS VUODENAJASTA

Tarkastelu tehtiin laskennallisesti Jyväskylän säätiedostoa käyttäen. Seuraavassa tarkastellaan laskennallisesti alussa ylimääräistä kosteutta sisältävien rakenteiden kuivumisnopeutta ja homeen kasvua tuulensuojan sisäpinnalle kun muuttujina ovat tuulensuojan materiaali ja vuodenaika, jolloin rakenne alkoi kuivua. Tarkastelu tehtiin 1-dimensioiselle, täysin varjossa olevalle rakennelikkaukselle. Rakenteen eristeenä oli 150 mm:n sellukuitua ja sen alkukosteus vastasi märkäpuhalletun sellukuitueristeen kosteutta, joka oli saanut kuivua viikon ilman sisäverhousa.

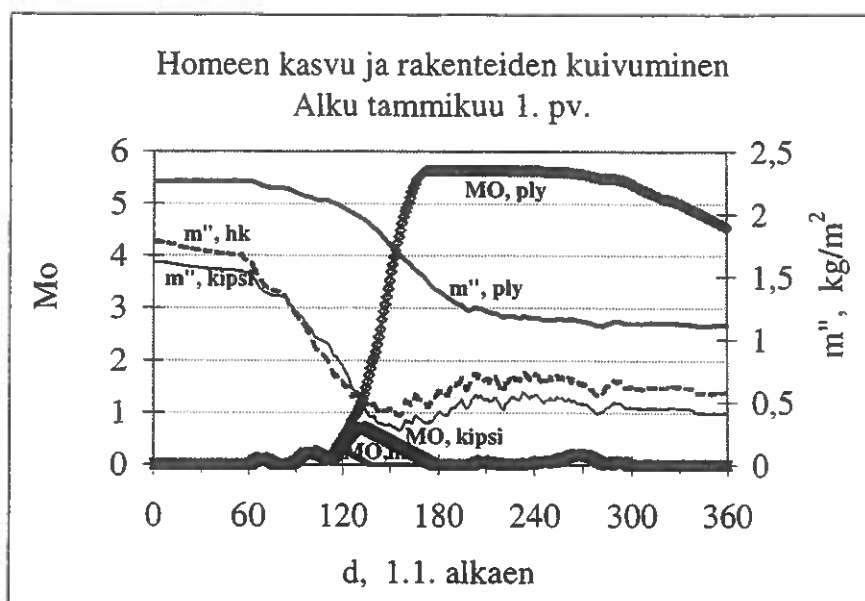
Tarkasteltuina tuulensuojoina käytettiin 9 mm:n havuvaneria, 11 mm:n kipsilevyä ja 12 mm:n huokoista kuitulevyä. Tuulensuojalevyjen kosteudet vastasivat alussa noin 75 % suhteellista tasapainokosteutta. Erilaisista tasapainokosteuksista ja tuulensuojan paksuuksista johtuen rakenteiden kokonaiskosteudet olivat alussa eri tasolla, mutta tilanteet vastasivat toisiaan homeen kasvuedellytysten osalta. Sisäpuolelle oletettiin höyrynsulku, joten rakenteen sisältämä alkukosteus oli ulkoilman olosuhteiden lisäksi ainoa rakennetta kosteudella kuormittava tekijä.

Laskennassa käytettiin Jyväskylän säätiedostoa. Laskennan tulostuksena esitetään rakenteen kokonaiskosteuden ja tuulensuojalevyn sisäpinnan homekasvuindeksin kehitys laskennan alusta lukien. Tarkastelujakson pituus oli 1 vuosi ja tarkastelun alkuhetket olivat tammikuun, toukokuun ja syyskuun 1. päivä.

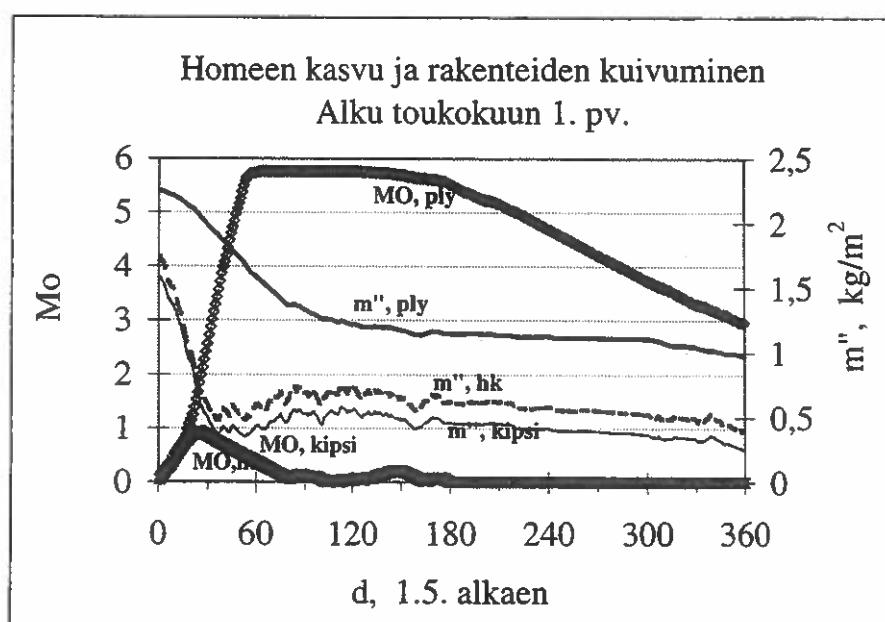
Homeen kasvussa käytettiin kaikille tuulensuojamateriaaleille samoja parametreja, (kuivattu kuusi), jotka vastasivat parhaiten havuvaneria. Sellukuitueristeen kemikaalien homeen kasvua estävää vaikutusta ei mallissa kuvattu. Tulokset pätevät kohtuullisella tarkkuudella myös kun lämmöneristeenä on mineraalivilla, sillä tuulensuojan kosteudenläpäisevyys oli esitettyjen tapausten kuivumisessa ratkaiseva tekijä. Kuvat 20, 21 ja 22 esittävät eri aloitushetkille rakenteen otsapinta-alaa kohden lasketut kokonaiskosteudet (kg/m^2) ja homeindeksit.

8.1 TULOSTEN TARKASTELU

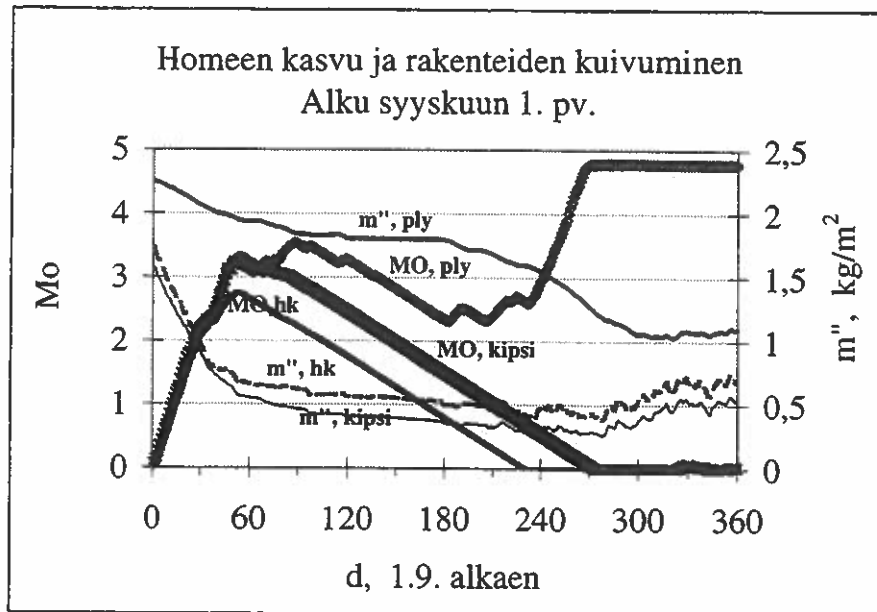
Laskelmiin sisältyy varmuutta kosteuskuormituksen (sisäilman jatkuva kosteuskuormitus $+4 \text{ g/m}^3$) ja reunaehtojen suhteen (ei auringon säteilyä mukana tarkastelussa). Lisäksi homeen kasvun kuvauksessa ja erityisesti kuivien ja kylmien aikojen homekasvun taantumisessa on vielä suhteellisen paljon epävarmuustekijöitä. Siten laskettu homeindeksi ei edusta suurillakaan arvoilla varmaa homeen kasvua. Homeindeksi on syytä tulkita riskinä homeen kasvuille tarkasteluoloissa ja sitä tulee käyttää lähinnä vertailusuurena eri tapausten välillä.



Kuva 20 . Määrän rakenteen kuivuminen ja homeen kehittyminen tuulensuojan sisäpinnalle tammikuun 1. päivästä alkaen. Merkinnot ply = havuvaneri, hk = huokoinen kuitulevy, MO = homeindeksi.



Kuva 21 . Määrän rakenteen kuivuminen ja homeen kehittyminen tuulensuojan sisäpinnalle toukokuun 1. päivästä alkaen.



Kuva 22 . Märän rakenteen kuivuminen ja homeen kehittyminen tuulensuojan sisäpinnalle syyskuun 1. päivästä alkaen.

Huokoinen puukuitulevy ja kipsilevy tuulensuojina rakenteet kuivuivat suhteellisen nopeasti. Homeen kasvua ei näillä rakenteilla ollut ($Mo < 1$) tammi- ja toukokuun tapauksissa, mutta syyskuun alusta kuivumaan lähteneessä tilanteessa kipsilevytuulensuojan homeindeksi kävi näkyvän homeen raja-arvon (3) yläpuolella.

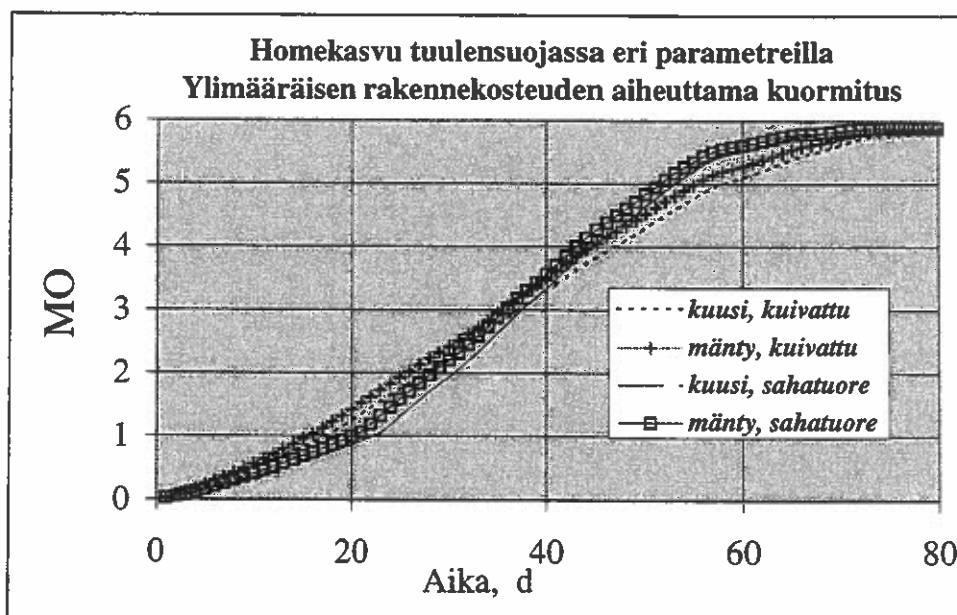
Vanerirakenteiden kuivuminen oli kaikissa tapauksissa muita rakenteita hitaampaa. Kaikissa tapauksissa laskenta ennusti suhteellisen pitkäksi jaksoksi (n. 4 kk) olosuhteita vastaavan maksimihomeindeksin. Tammikuussa alkaneessa tapauksessa hometta ei alkanut muodostua vielä talvikaudella, mutta rakenne ei myöskään ehtinyt kuivua tällöin. Homeen kasvu lämpimällä kaudella oli jokseenkin samaa luokkaa kuin toukokuussa alkaneessa tapauksessa. Syyskuussa alkaneessa tapauksessa homeen kasvu alkoi syyspuolella ja keskeytyi talvikaudeksi, mutta jatkui taas seuraavan vuoden keväällä. Vasta seuraavan kesän aikana rakenne kuivui ja home alkoi taantua.

Jos tarkastellaan kosteuden kuivumisaikaa ja näkyvää hometta kuvaavaa homeindeksin 3 ylittäviä arvoja, on syyskuussa alkava jakso pahin. Erot eivät kuitenkaan ole suuria eri tapausten välillä. Kesän alussa kuivuminen on nopeinta, koska ulkoilman suhteellinen kosteus on alhaisin, mutta myös homeen kasvu on tällöin nopeinta.

Tulosten perusteella seuraavissa laskennallisissa tarkasteluissa käytetään syyskuun alkua laskennan alkuajankohtana, koska se edustaa kuivumisen ja homeen kasvun kannalta pahinta vuodenaikaa.

8.1.1 Homeenkasvun riippuvuus materiaaliparametreista

Kuva 23 esittää homeen laskentamallissa käytettävien parametrien (puulaji mäntyä tai kuusta, puu uunikuivattua tai sahatuoretta) vaikutuksen homeen kasvuun. Tarkastellussa tapauksessa rakenteessa on korkea alkukosteus, joka kuivuu hitaasti vanerituulensuojan kautta ulos. Homeindeksi kuvaa tuulensuojan sisäpinnalle laskettuja arvoja.



Kuva 23 . Laskennallinen homeen kasvun riippuvuus puulajista (mänty / kuusi) ja puun alkukosteudesta (sahatuore / uunikuivattu).

Tulosten perusteella parametrien vaikutus homehtumisindeksiin on voimakkaassa kosteuskuormituksessa laskennan tarkkuuden kannalta suhteellisen pieni. Siten indeksien valinnalla ei ole olennaista merkitystä laskennalliseen ennusteeseen homeen kasvuriskistä.

9 TUULENSUOJAN ULKOPUOLINEN ERISTERAPPAUS JA VIISTOSATEEN VAIKUTUS

Luvussa 6 esitetään millä edellytyksillä kosteuden diffuusio sisäilmasta rakenteisiin pääsee poistumaan rakenteista ja kosteuskuormitus pysyy turvallisella tasolla. Kosteuden aiheuttamia ongelmia ei tällöin esiinny edellyttäen, että rakenteeseen ei tule kosteutta ilmavuotojen, sadeveden tai muun vuodon seurauksena. Lämmön-eristeen ulkopuolisen kerroksen (tuulensuojan) vesihöyryn läpäisykertoimen suuruusluokka on toinen merkittävä tekijä, joka määrittää rakenteen toiminnan ja selviytymisen kastumistilanteista.

Tässä selvityksessä on tarkasteltu viistosateen ja sisäilman kosteuden merkitystä rakenteen kosteus- ja hometekniselle toiminnalle.

9.1 RAPATUN OSB-PINTAISEN SEINÄN KOSTEUS- JA HOMEKÄYTTÄYTYMINEN

Tämän kappaleen tarkasteluissa lämmöneristeen ulkopinnan levy oletettiin OSB-levyksi. Sen sorptiokäyrä ja vesihöyrynsiirtävyys olivat kuvan 24 mukaiset. Sillä oli erityisesti kosteassa päässä suurempi vesihöyrynvastus kuin havuvanerilla, joten tarkastelun tulokset ovat havuvanerin kannalta varmalla puolella (kosteuden kuivuminen hitaampaa kuin vanerirakenteella).

Ulkopinnaltaan rapatun kevytrakenteisen seinän pitkän ajan kosteus- ja homekäyttäytymistä arvioitiin simuloimalla rakenteiden toiminta 3 vuoden ajan altistuneena Jyväskylän vuoden 1979 säälle. Rakenteiden alkukosteus oli suhteellisen kuiva, 65 % RH. Ulkopintarappauksen oletettiin laskennassa olevan joko lähes täysin kapillaarisesti vettä johtamaton tai hyvin vettä kapillaarisesti imevä, kun materiaalin suhteellinen kosteus oli yli 98 %.

9.1.1 Analysoidut rakenteet

Perusrakenne

Ulkoseinä: 3 mm:n rappaus + 9 mm:n OSB + 150 mm:n villaeriste + 12 mm:n vaneri + 12 mm:n kipsilevy

Lisäeristetty rakenne

Ulkoseinä: 3 mm:n rappaus + 50 mm:n villaeriste + 9 mm:n OSB + 150 mm:n villaeriste + 12 mm:n vaneri + 12 mm:n kipsilevy

Rappauksen kapillaarisuus vaikuttaa merkittävästi kosteudensiirtoon, kun materiaalin suhteellinen kosteus > 98 %. Laskelmissa on eriteltyä kaksi ääritapausta rappauksen kapillaarisuudelle: Vesitiivis rappaus, jolla ei ole muuta kuin diffuusiosta kosteuden läpäisyä ja kapillaarinen rappaus, jonka kosteudenläpäisevyys kasvaa kapillaarisella alueella (> 98 % RH) merkittävästi. Lisäksi laskelmissa tarkasteltiin ilmansuunnan (auringon säteilyn) vaikutusta kosteuden siirtoon. Voimakas säteily voi ajaa kosteutta rakenteen sisäosiin ja toisaalta se edistää rakenteen kuivumista.

Lisälaskelmissa (Taulukko 10) tarkasteltiin lisäksi sellukuitueristeen vaikutusta ja höyrynsuluttoman pohjoisseinän tapauksessa sisäpuolen maalipinnan vaikutusta.

Ulkoisina sääolosuhteina käytettiin Jyväskylän vuoden 1979 ilmatieteenlaitoksen mittaamia säätietoja. Viistosade ei ole mitattu suure. Säätiiedostosta on sademäärien (mitattu muutaman kerran vuorokaudessa) ja pilvisyyden perusteella muokattu tunnitaiset sadearvot, joista tuulen suunnan ja nopeuden perusteella ohjelma ratkaisee pinnalle osuvan viistosateen.

Taulukko 9 . Laskentatapaukset ja niiden merkinnät. Kaikissa tapauksissa oli mineraalivillaeristys.

<i>Etelä Vesitiivis rappaus</i>	<i>Pohjoinen Vesitiivis rappaus</i>	<i>Etelä Kapillaarinen rappaus</i>	<i>Pohjoinen Kapillaarinen rappaus</i>	<i>Höyrynsulku/ Rakennuspaperi (HS/RP)</i>	<i>Lisäeristys mm</i>
a1	na1	a1b	na1b	HS	-
a2	na2	a2b	na2b	RP	-
a3	na3	a3b	na3b	HS	50
a4	na4	a4b	na4b	RP	50

Taulukko 10 . Lasketut lisätapaukset.

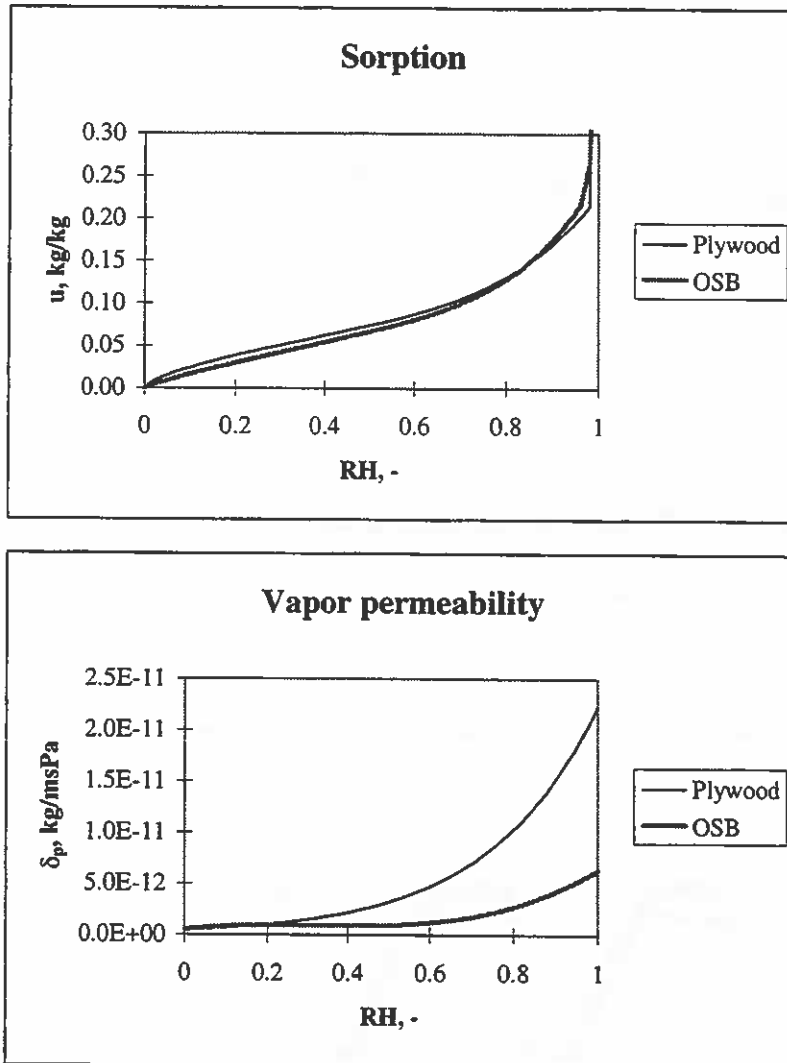
na2p	kuten na2, mutta sisäpinnassa maalipinta (57 ng/sm ² Pa)
na2_cfi	kuten na2, mutta eristys sellukuitueristettä
a2_cfi	kuten a2, mutta eristys sellukuitueristettä

Sisäilman lämpötila oli +22 °C tai ulkoilman lämpötila, jos se ylitti +22 °C. Sisäilman kosteus oli ulkoilman kosteus + 4 g/m³, kuitenkin vähintään 35 % RH.

Rappauksen vesihöyrynsuuntaavuus oli 6 - 13 ng/smPa, mikä on ulkopintarappaukselle varsin suuri arvo (kymmenen kertaa pienempiä arvoja joillakin rappauksilla).

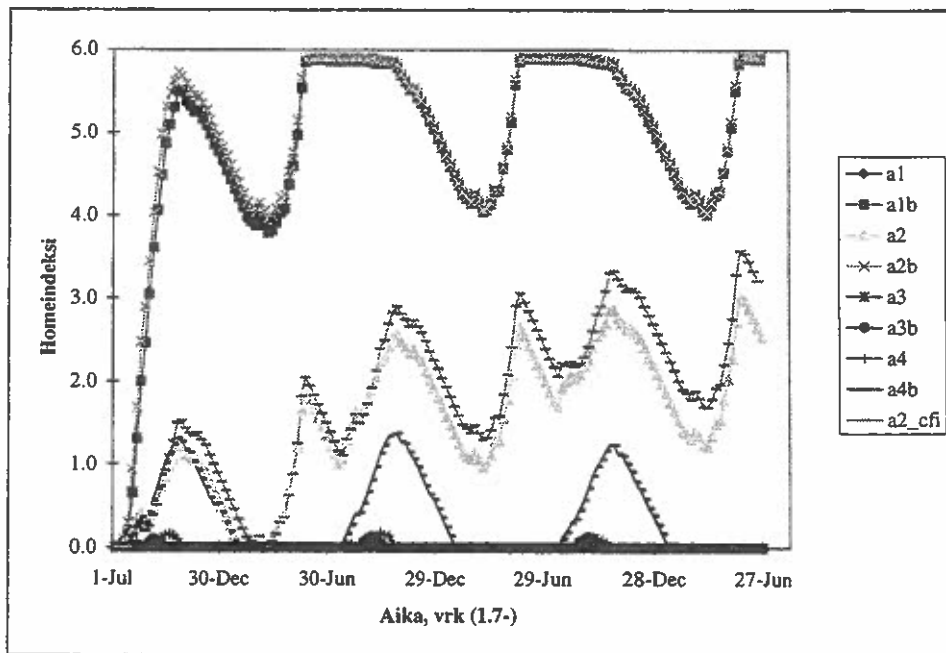
9.2 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kevyen vanerirakenteisen seinän kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat merkittävästi ulkopinnan kosteudenläpäisyominaisuudet sekä ulkoverhouslevyn sijainti rakenteessa. Kuvissa 25 - 30 on vertailtu OSB:n ulkopuolelta eristetyn (50 mm:n lisäeristys) seinän ja lisäeristämättömän seinän OSB-levyn kosteuspitoisuuksia ja homeindeksiä kolmannen vuoden aikana. Rakenteissa, joissa ei ole erillistä höyrynsulkua, aiheuttaa sisäilman kosteuskuormitus varsin suuret kosteuspitoisuudet OSB:ssä talvikaudella.

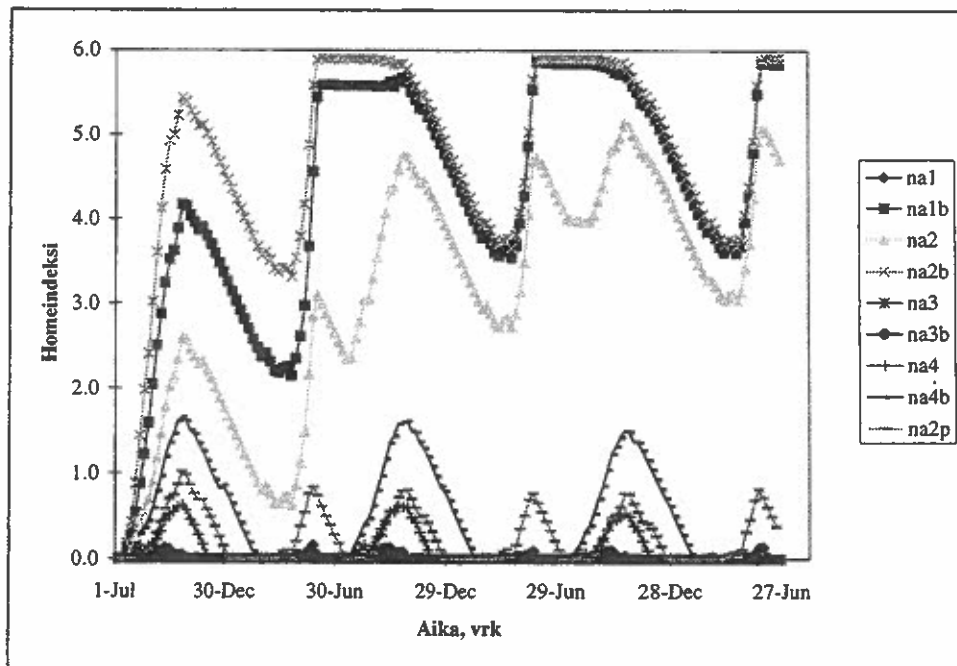


Kuva 24 . Tämän kohdan laskennallisessa tarkastelussa käytetyn OSB:n (Oriented Strand Board) ja vanerin materiaaliominaisuudet, sorptiokäyrät (yllä) ja vesihöyryrjohtavuus (alla). Esitetyt vanerin arvot eivät ole tässä tutkimuksessa havuvaneerille määritettyjä vaan ne ovat peräisin pohjoisamerikalaisista lähteistä.

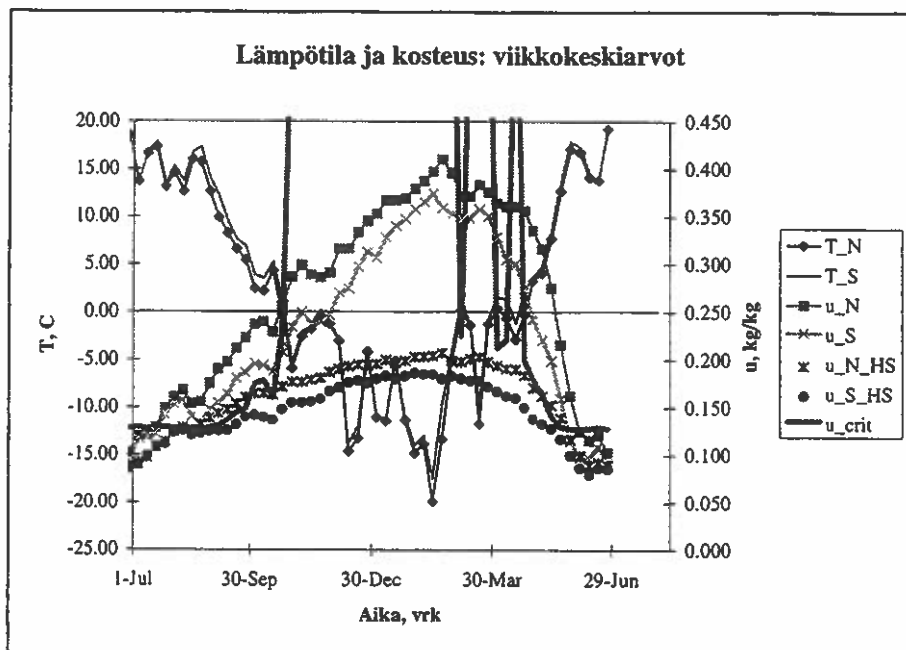
Ulkopinnan rappauksen kapillaarisuus aiheuttaa selkeän lisän OSB:n kosteuspitoisuuksissa ($na2b_u / na2_u$). Rappauksen ollessa nestemäistä kosteutta huonosti johtava maksimikosteus jää n. 0,4 kg/kg, kun kapillaarinen rappaus nostaa maksimikosteuden n. 0,55 kg/kg:aan. Kosteuden kuivuminen OSB:stä ei ole riittävän nopeata lämpötilojen noustessa keväällä ja homeindeksi ehtii nousta huomattavan korkealle sekä kapillaarisen rappauksen että ei-kapillaarisen rappauksen tapauksessa. Lisäeristetyissä rakenteissa ($na4$ ja $na4b$) kosteuspitoisuudet OSB:ssä jäävät merkittävästi alle homeen kehittymisen rajan ja kuivuminen on riittävää keväällä, jotta homeen kasvu ei kehittyisi mikroskooppista tasoa pidemmälle. Edellytyksenä kapillaarisen rappauksen ja lisäeristetyn seinän hyvälle kosteus- ja hometekniselle toimivuudelle on, että lisäeristys on nestemäistä kosteutta huonosti johtavaa.



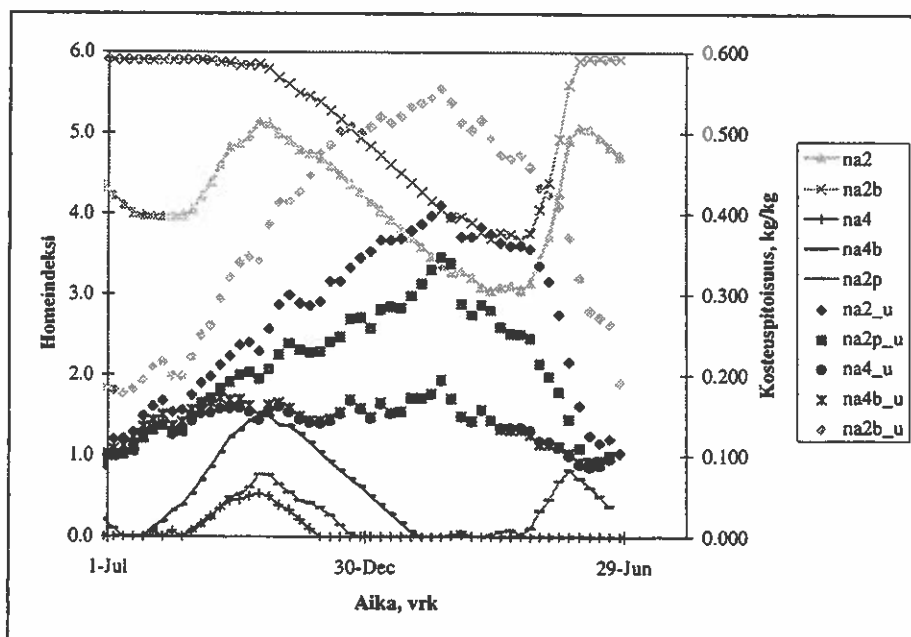
Kuva 25 . Etelään suunnatun seinän ulkopinnan OSB:n homeindeksin kehittyminen kolmen vuoden ajanjaksolla. Tarkasteltava kohta OSB:n sisäpinta.



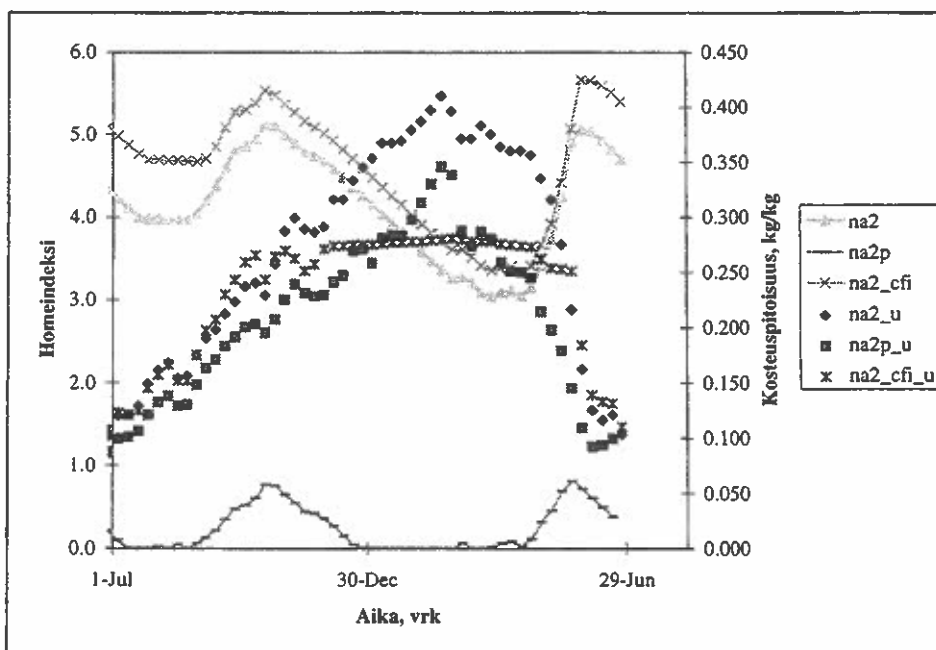
Kuva 26 . Pohjoiseen suunnatun seinän ulkopinnan OSB:n homeindeksin kehittyminen kolmen vuoden ajanjaksolla. Tarkasteltava kohta OSB:n sisäpinta.



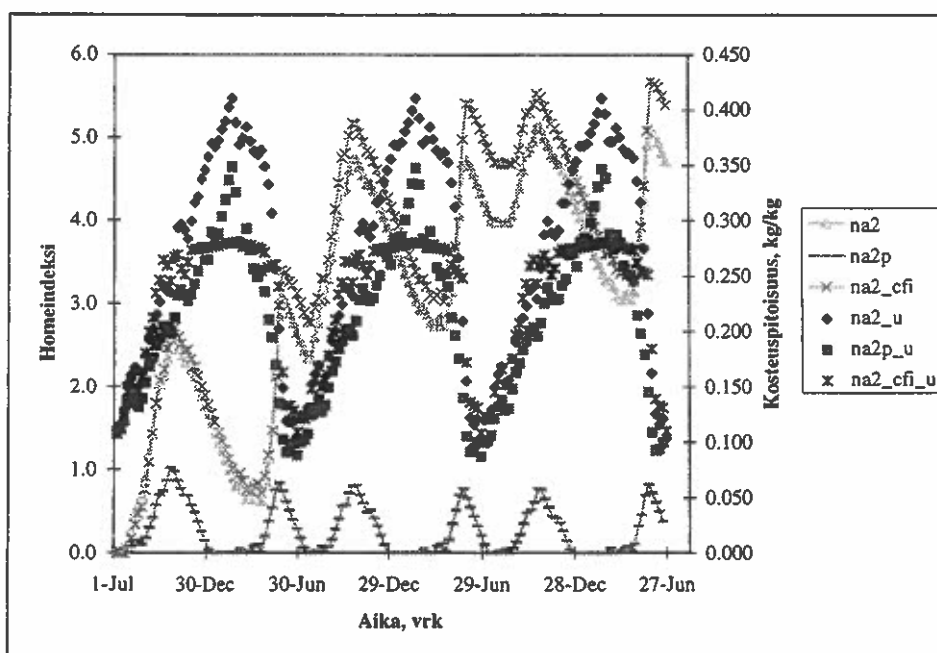
Kuva 27 . Etelään (S) ja pohjoiseen (N) suunnatun lisäeristämättömän seinän OSB:n sisäpinnan lämpötila ja kosteus. u_N = kosteus, pohjoinen, seinässä rakennuspaperi; u_N_{HS} = kosteus, pohjoinen, seinässä höyrynsulku.



Kuva 28 . Kolmannen vuoden homeindeksi ja kosteuspitoisuus OSB:n sisäpinnassa pohjoiseen suunnatussa seinässä. Vertailussa sisäpinnaltaan maalattu seinärakenne.



Kuva 29 . Kolmannen vuoden homeindeksi ja kosteuspitoisuus OSB:n sisäpinnassa pohjoiseen suunnatussa seinässä. Vertailussa sisäpinnaltaan maalattu seinärakenne (na2p...) ja mineraalivillalla (na2) tai sellukuitueristeellä (na2_cfi) eristetty rakenne.



Kuva 30 . Kolmen vuoden homeindeksi ja kosteuspitoisuus OSB:n sisäpinnassa pohjoiseen suunnatussa seinässä. Vertailussa sisäpinnaltaan maalattu seinärakenne (na2p...) ja mineraalivillalla (na2) tai sellukuitueristeellä (na2_cfi) eristetty rakenne.

10 VANERIRAKENTEIDEN KUIVUMISKYVYN LASKENNALLINEN ARVIOINTI

Tarkastelutapa oli jokseenkin sama kuin kappaleessa 8, jossa selvitettiin vuoden-ajan vaikutusta rakenteiden kuivumiseen. Tässä tarkasteltiin laskennallisesti ylimääräisen kosteuden kuivumista ja homeen kasvua tuulensuojan sisäpinnalle kun muuttujina olivat rakenteen sisäverhous, mahdollinen tuulensuojan ulkopuolinen lisäeristys ja ulkopuolen sääolot.

Tarkastelu tehtiin laskennallisesti 1-dimensioiselle, täysin varjossa olevalle rakennelikkaukselle. Lämmöneristeenä oli 150 mm:n sellukuitueristettä ja tuulensuojana 9 mm havuvaneri, vertailurakenteessa 12 mm:n huokoinen kuitulevy. Vane-rituulensuojan mahdollinen ulkopuolinen lisäeristys oli 30 mm paksu mineraalivillakerros, joka oli avoin tuuletusrakoon. Tuulensuojalevyjen kosteudet vastasivat alussa noin 75 % suhteellista tasapainokosteutta.

Sisäpuolen rakenteina käytettiin vanerituulensuojan tapauksessa höyrynsulkua, toista vanerikerrosta tai kaksoislevytyksenä vaneria ja maalattua kipsilevyä. Taulukko 11 esittää laskennassa tarkastellut rakennetapaukset ja tulosten käsitte-lyssä käytetyt tunnistet. Kukin taulukossa esitetty rakenne laskettiin kahdella eri alkukosteudella kolmessa eri ilmastossa. Kaikkiaan eri laskentatapauksia oli siten 36.

Alkukosteuksina käytettiin kahta eri tapausta. Alkukosteus vastasi märkäpuhalle-tun sellukuitueristeen kosteutta viikon kuivumisjakson jälkeen ja toisessa tapauk-sessa rakenne oletettiin alussa kokonaisuudessaan 75 % suhteellista tasapaino-kosteutta vastaavaan tilaan, ts. siinä ei juuri ollut ylimääräistä kosteutta.

Kaikki rakennetapausten toiminta laskettiin 840 vrk:n ajalta Jyväskylän, Holzkir-chenin ja Vancouverin säätiedostoilla syyskuun 1. päivästä alkaen. Tarkastelujak-so käsittää siten kolme syyskautta.

Sisäilmalle oletettiin jatkuva $+4 \text{ g/m}^3$ kosteuskuormitus. Pohjoisseinälle ei oletuk-sen mukaan tullut edes diffuusia auringon säteilyä.

Laskennan tulostuksena esitetään rakenteen kokonaiskosteuden ja tuulensuojale-vyn sisäpinnan homekasvuindeksin kehitys laskennan alusta lukien. Homeen kasvussa käytettiin kuivatun kuusen parametreja. Sellukuitueristeen kemikaalien homeen kasvua estävää vaikutusta ei mallissa kuvattu. Tulokset pätevät kohtuulli-sella tarkkuudella myös kun lämmöneristeenä on mineraalivilla, sillä tuulensuojan kosteudenläpäisevyys oli esitettyjen tapausten kuivumisessa ratkaiseva tekijä.

Kuvat 31 - 36 esittävät eri ilmasto-oloissa rakenteiden otsapinta-alaa kohden lasketut kokonaiskosteudet (kg/m^2) ja vastaavat homeindeksit sekä määrän että kuivan alkutilan tapauksissa. Kuvissa käytetään taulukon mukaisia tunnisteita eri rakennetapauksille.

Taulukko 11 . Laskennassa tarkastellut rakennetapaukset. Kukin rakenne laskettiin kuivan tai kostean alkukosteuden tapauksena kolmessa eri ilmastossa.

Tapaus / Tunniste	Tuulensuoja	Rakenteen sisäverhous	Tuulensuojan ulkopuolinen lämmöneriste
1V	Havuvaneri 9 mm	Vaneri 12 mm	-
1VK	Havuvaneri 9 mm	Vaneri 12 mm + kipsi- levy 12 mm + maali	-
1VKR	Havuvaneri 9 mm	Vaneri 12 mm + kipsi- levy 12 mm + maali	30 mm mw
1HS	Havuvaneri 9 mm	Vaneri 12 mm + <u>höyrynsulku</u> (+ kipsi)	-
1HSR	Havuvaneri 9 mm	Vaneri 12 mm + <u>höyrynsulku</u> (+ kipsi)	30 mm mw
2VK	Huokoinen kuitulevy 12 mm	Vaneri 12 mm + kipsi- levy 12 mm + maali	-

10.1 TULOSTEN TARKASTELU

Molemmissa alkukosteustapauksissa rakenteet pääsääntöisesti kuivuivat. Myös ns. kuivassa tapauksessa oli rakenteessa jonkin verran ylimääräistä kosteutta. Kuivuminen kuvaa rakenteen kosteusvirtojen summaa, missä sisäilmasta tuleva kuormitus heikentää tuulensuojan kautta poistuvan kosteusvirran nettokuivaustehoa.

Kuivumisnopeuden suhteen rakenteet jakautuivat kolmeen ryhmään. Korkein kosteustaso oli niissä vanerituulensuojarakenteissa, joissa ei ollut ulkopuolista lämmöneristettä. Selvästi matalampi kosteustaso oli ulkopuolelta lisäeristetyissä vanerituulensuojarakenteissa. Oman ryhmänsä muodosti referenssirakenne, jossa tuulensuojana oli huokoinen kuitulevy ja sisäverhouksena vaneri-kipsikaksoislevytys.

Kuivumisen perusteella rakenteet oli edelleen helppo asettaa keskinäiseen paremmuusjärjestykseen. Tämä järjestys oli samalla alkukosteudella sama kaikissa tarkastelluissa ilmasto-oloissa.

10.1.1 Kuivan alkutilan tapaukset

Aluksi ns. kuivissa rakenteissa korkeimpaan kosteuteen jäi rakenne, jossa sisäverhouksena oli pelkkä vaneri ilman maalipintaa. Seuraavaksi korkeimmassa kosteudessa oli sisäpuolelta kaksoislevytetty rakenne ja ko. ryhmän alin kosteustaso oli höyrynsulullisella rakenteella.

Ulkopuolelta lisäeristetyt toimivat aluksi noin 4 - 6 kk jokseenkin samoin, mutta myöhemmin höyrynsulullisen kosteustaso laski jonkin verran kaksoislevytettyä rakennetta alemmalle tasolle. Olennaista on, että ulkopuolelta lisäeristetty, sisäpuolelta kaksoislevytetty rakenne oli kuivempi kuin ulkopuolelta eristämätön höyrynsulullinen rakenne. Ero ulkopuolisen lisäeristyksen hyväksi korostui kylmässä ilmastossa, erot olit suurimmat Jyväskylässä ja pienimmät talveltaan hyvin lauhassa Vancouverissa.

Huokoinen kuitulevy -rakenne lähti alemmasta kokonaiskosteudesta, joten kuivumista ei voinut aivan tarkoin verrata vanerirakenteiden tapauksiin. Kosteustaso oli kuitenkin selvästi muita tapauksia alempi paitsi hetkellisesti syyskausilla Jyväskylässä ja Holzkirchenissä, koska näissä ulkoilman korkea suhteellinen kosteus vaikutti voimakkaasti ulkopinnan tuulensuojalevyn kosteuteen. Lisäeristetyn rakenteen tuulensuoja oli paremmin eristetty ulkoilman kosteuden vaikutuksilta.

Homeen kasvuindeksin perusteella arvioiden kaikissa tarkastelluissa ilmasto-oloissa käsittelemätön sisäpuolen 12 mm:n vanerikerros johti vuosittain lisääntyvään homeen kasvuun tuulensuojan sisäpinnalla. Kun sisäverhouksena oli vaneri ja maalattu kipsilevy, oli vanerituulensuojarakenne toimiva Jyväskylän ja Vancouverin oloissa. Holzkirchenissä sen sijaan laskenta ennusti homeen kasvua jopa höyrynsulullisessa tapauksessa. Syynä on suhteellisen suuri ulkoilman kosteustaso kesän ja syksyn aikana, jolloin ulkopuolelta tuleva kosteuskuormitus lisää homeen kasvulle suotuisten olosuhteiden riskiä. Laskenta sisältää toisaalta varmuutta kuormituksen osalta ja epävarmuutta mm. homeen taantumisen mallintamisessa. Siten tulos ei suoraan merkitse, että esimerkiksi höyrynsulullinen vanerituulensuojarakenne homehtuisi ko. ilmasto-oloissa, mutta tulos kuvaa ulkoilman vaikutusta rakennetyypin homehtumisriskiin.

Ulkopuolelta lisäeristetyt vanerituulensuojarakenteet ja huokoinen kuitulevy -rakenne olivat laskennan mukaan täysin vailla homehtumisriskiä kaikissa ilmasto-oloissa, kun rakenne oli alkutilanteessa lähellä lopullista toimintaolojen mukaista kosteustasoa.

10.1.2 Ylimääräisen alkukosteuden kuivuminen

Korkean alkukosteuden kuivuessa rakenteet ryhmittivät samoin kuin kuivemman alkutilan tapauksissa kolmeen suhteellisen selvästi toisistaan eroavaan ryhmään. Nyt ryhmien sisällä rakenteiden kosteustasot vaihtelivat edellistä selvästi enemmän. Mitä kylmempi ilmasto oli, sitä selvemmät olivat erot eri ryhmien ja rakenteiden välillä. Vancouverissa ulkopuolelta eristämättömät rakenteet kuivuivat kosteustasolla $< 1,5 \text{ kg/m}^2$ noin neljässä kuukaudessa, Holzkirchenissä vastaava aika oli 7 kk ja Jyväskylässä lähes 10 kk. On selvää, että näillä rakenteilla kosteusriskit ovat selvästi suuremmat kylmässä ilmastossa kuin leudommassa, jos rakenteissa on ylimääräistä kosteutta. Siten esimerkiksi kaikkien Vancouverissa toimiviksi tunnettujen rakenteiden selviytyminen Suomen ilmastossa on epävarmaa.

Alkukosteuden kuivuminen oli, ilmastosta riippuen, noin 6 - 9 kk:n kuluessa kuivumisen alusta lukien nopeampaa sisäilmaan avoimilla rakenteilla kuin höy-

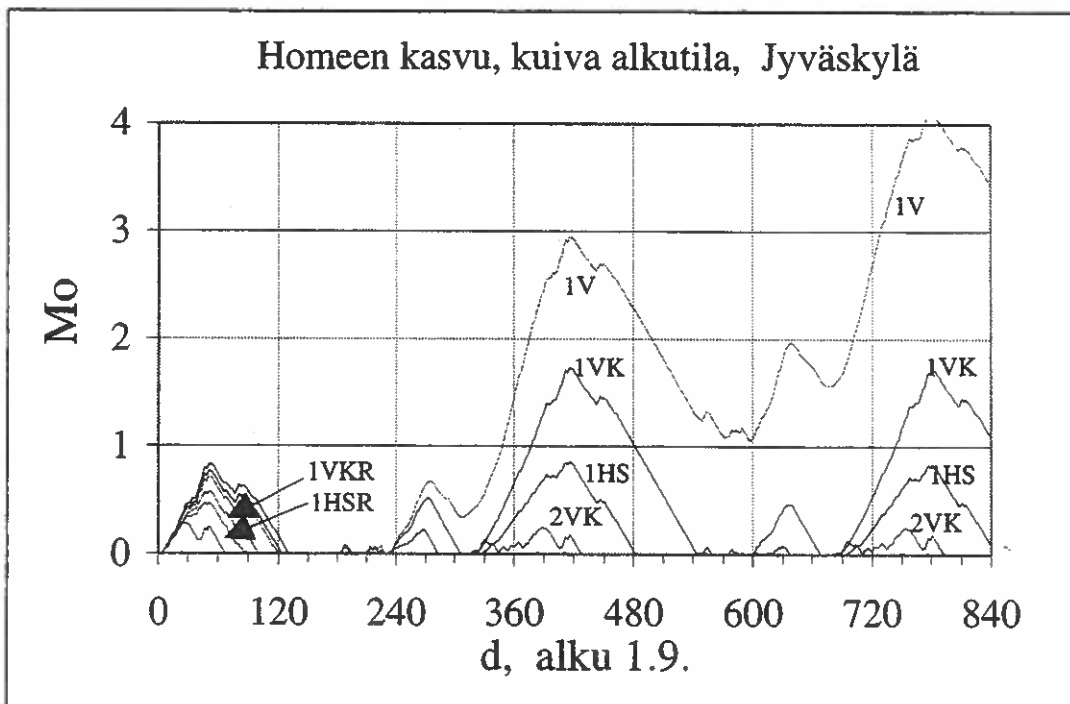
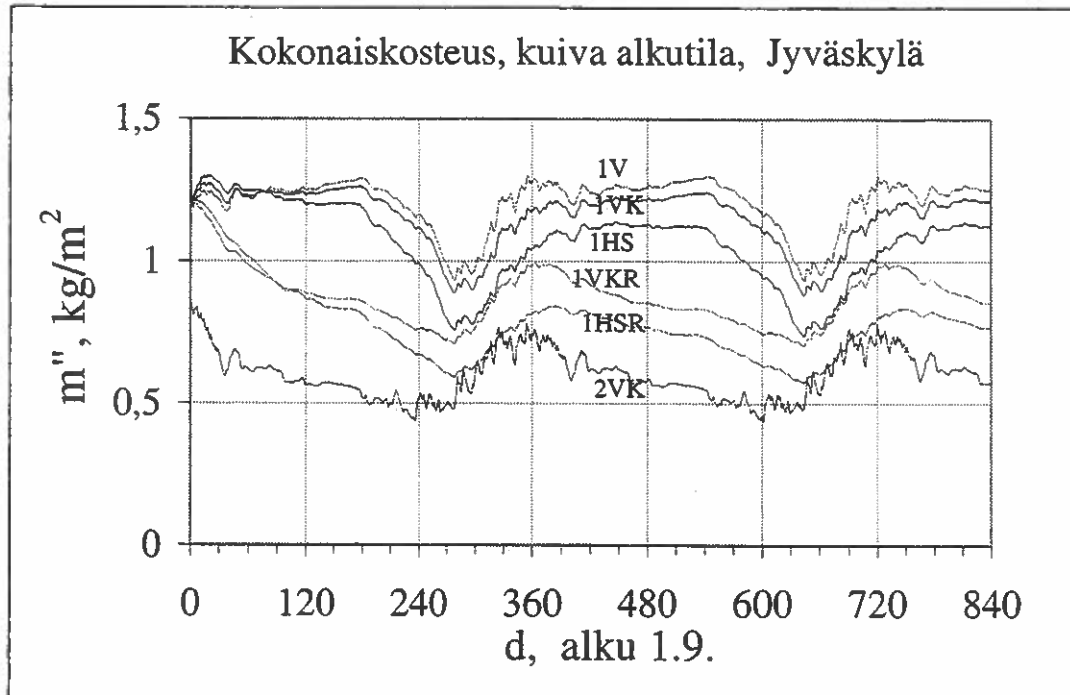
rynsulullisilla. Tämän jälkeen höyrynsulullisten rakenteiden kosteustaso oli alempi kuin vastaavan ryhmän höyrynsuluttomien rakenteiden. Kosteustasojen perusteella rakenteiden kuivumistehokkuus oli em. muutosajankohdan jälkeen sama kuin kuivilla rakenteilla.

Ulkopuolelta lisäeristettyjen rakenteiden kuivuminen oli kaikissa ilmastoissa nopeampaa kuin höyrynsulullisen, ulkoa eristämättömän tuulensuojan tapauksessa. Ulkopuolisen lämmöneristeen tuoma hyöty oli sitä suurempi, mitä kylmemmästä ilmastosta oli kyse.

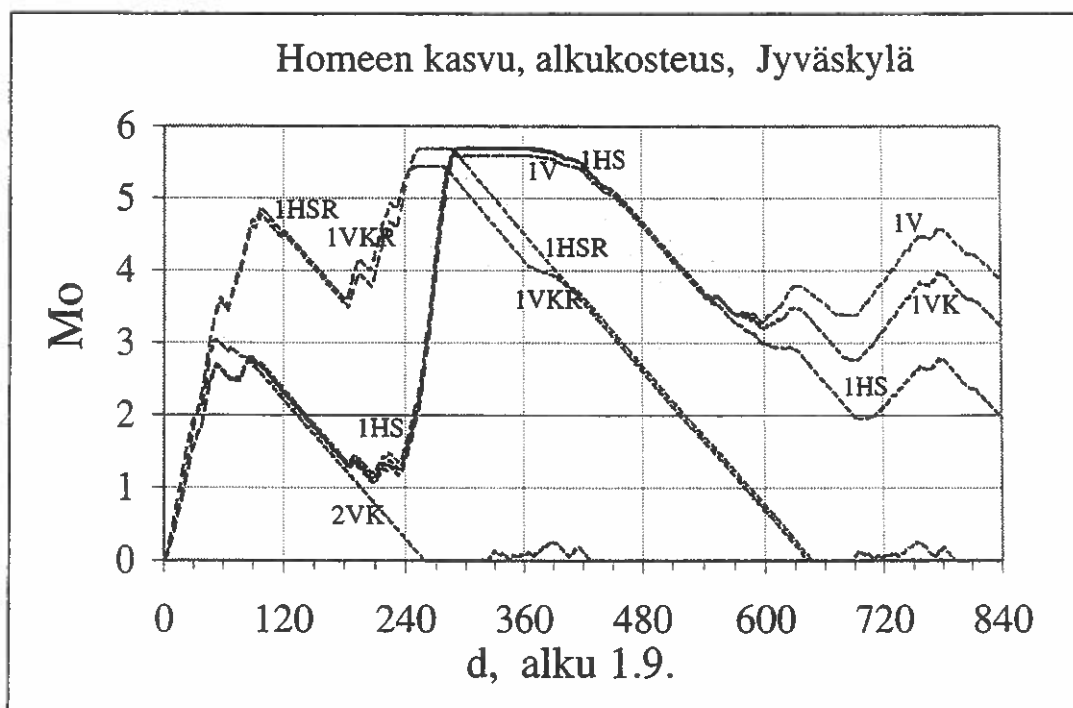
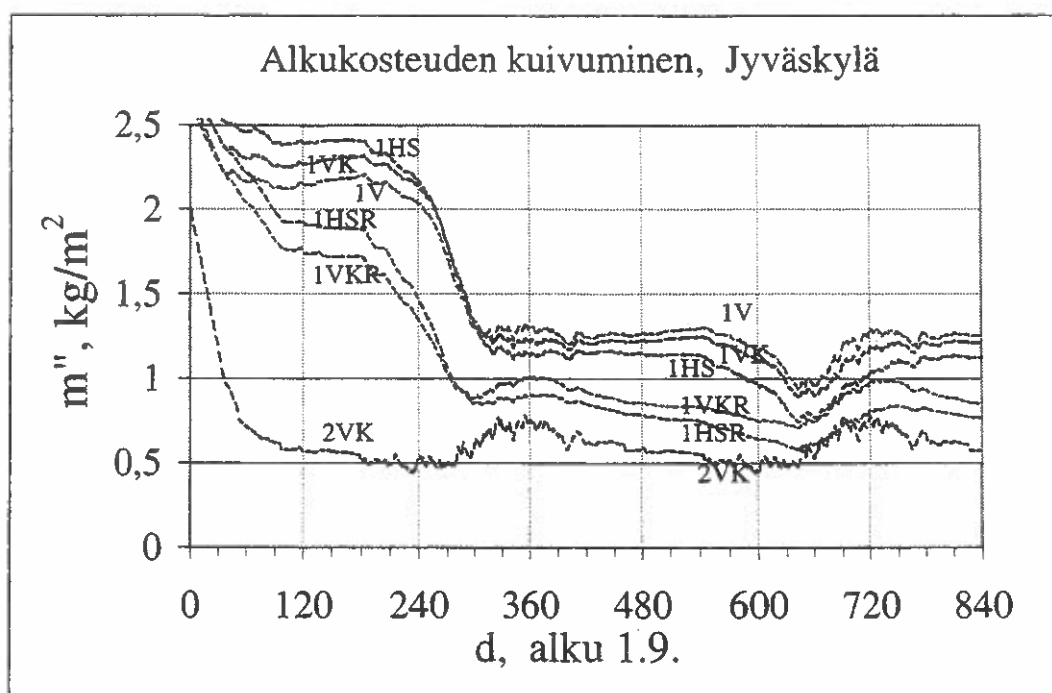
Homeen kasvuindeksi oli kaikissa vanerituulensuojarakenteissa usean kuukauden ajan lähellä maksimiarvoa, huokoisella kuitulevyrakenteella homeindeksi jäi kaikissa tapauksissa näkyvän homerajan alapuolelle. Vanerirakenteissa homeindeksi alkoi laskea, kun rakenne kuivui tasolle $< 1 - 1,2 \text{ kg/m}^2$. Ulkopuolelta eristetyt ja eristämättömät muodostivat homeenkin osalta selkeästi omat ryhmänsä.

Homeindeksiä voidaan käyttää lähinnä rakenteiden keskinäisen toimivuuden vertailuun, eikä niitä pidä tulkita homeen kasvua kuvaavana tarkkana ennusteena. Merkittävää on ulkopuolisen lisäeristyksen vaikutus homeindeksin 4 ylittävien arvojen kesto aikaan. Jyväskylässä ero oli noin 5 kk lisäeristettyjen rakenteiden hyväksi, Holzkirchenissä jopa 8 kk ja Vancouverissa 2 - 7 kk rakennetapauksesta riippuen. Näiltä osin tulos osoittaa ulkopuolisen lisäeristyksen suotuisan vaikutuksen myös homeriskin kannalta. Vaikka lisäeristyksen vaikutus kosteuden kuivumiseen oli selvästi suurin Jyväskylässä, vaikutus homeindeksissä ei ollut niin selvä. Tämä johtuu siitä, että talven kylmä jakso nopeutti homeen taantumista kylmässä ilmastossa ulkopuolelta eristämättömissä tapauksissa. Siten homeindeksi riippuu mm. tarkastelun alun vuodenaajasta.

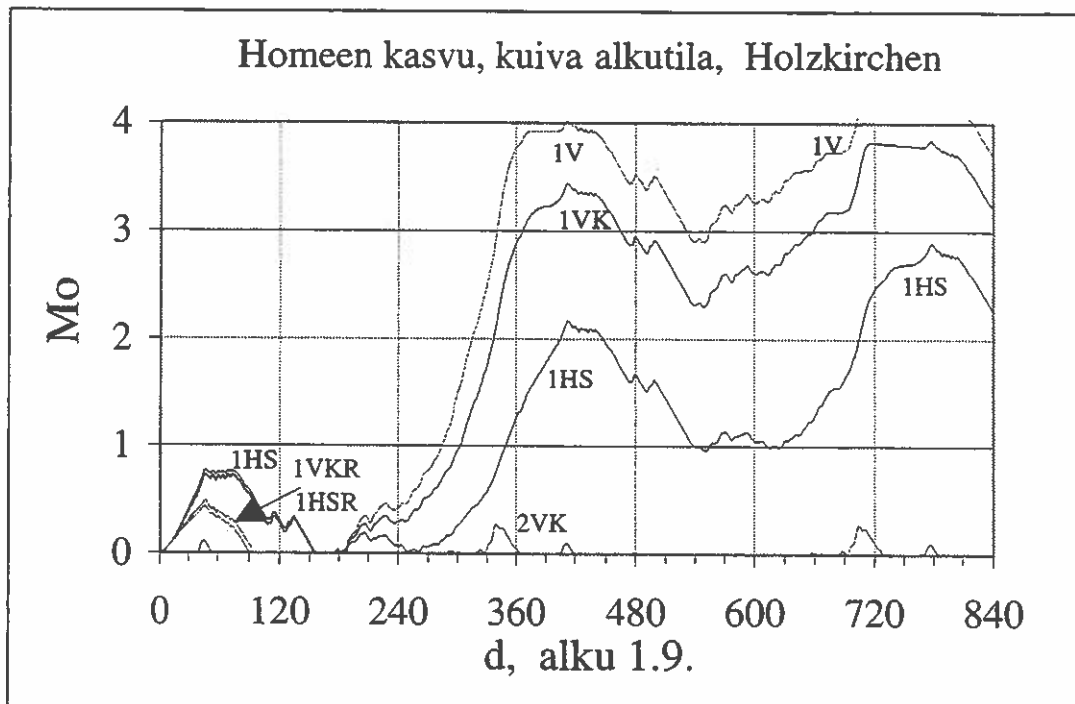
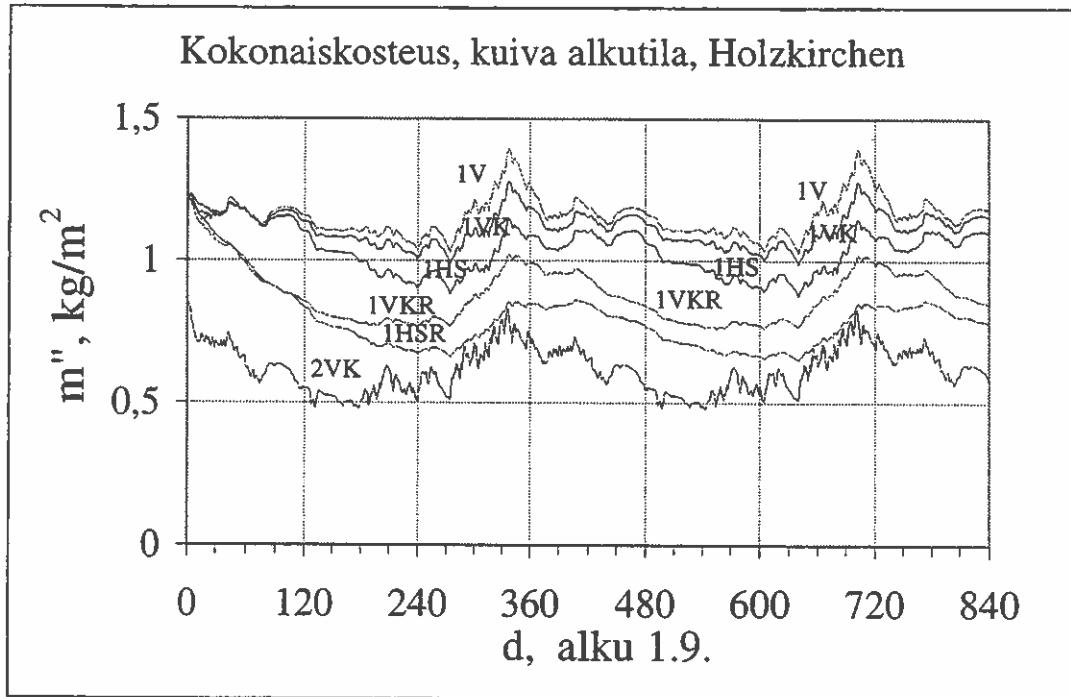
Rakenteiden kosteustasojen ja kuivumisnopeuksien perusteella havaitaan selvimmän kuinka suuri vaikutus ilmastolla on rakenteiden kosteustekniseen toimintaan erityisesti kosteuden kuivumistilanteissa. Siten esimerkiksi sellaiset rakenteet, jotka leudossa Vancouverin ilmastossa kuivuvat suhteellisen nopeasti, voivat kylmemmässä ilmastossa sisältää kosteusriskin. Erityisesti riski korostuu, jos ylimääräinen kosteuskuormitus on esimerkiksi vuosittain toistuvaa, jolloin rakenteet eivät kylmissä oloissa ehdi kuivua ennen seuraavaa kuormitusjaksoa.



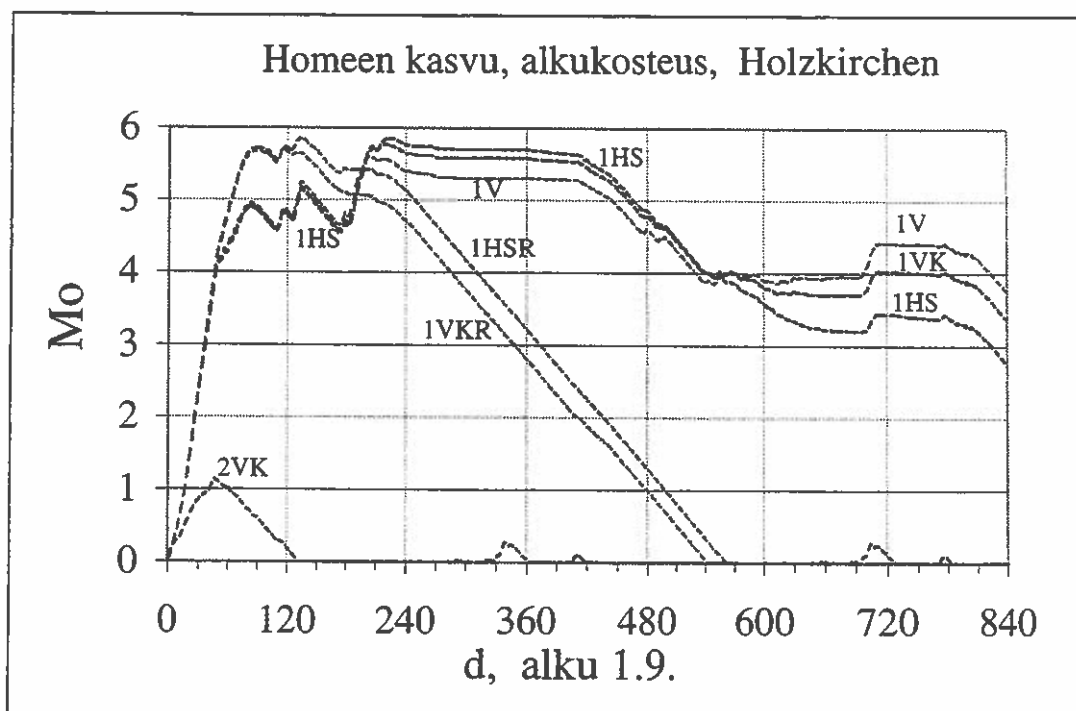
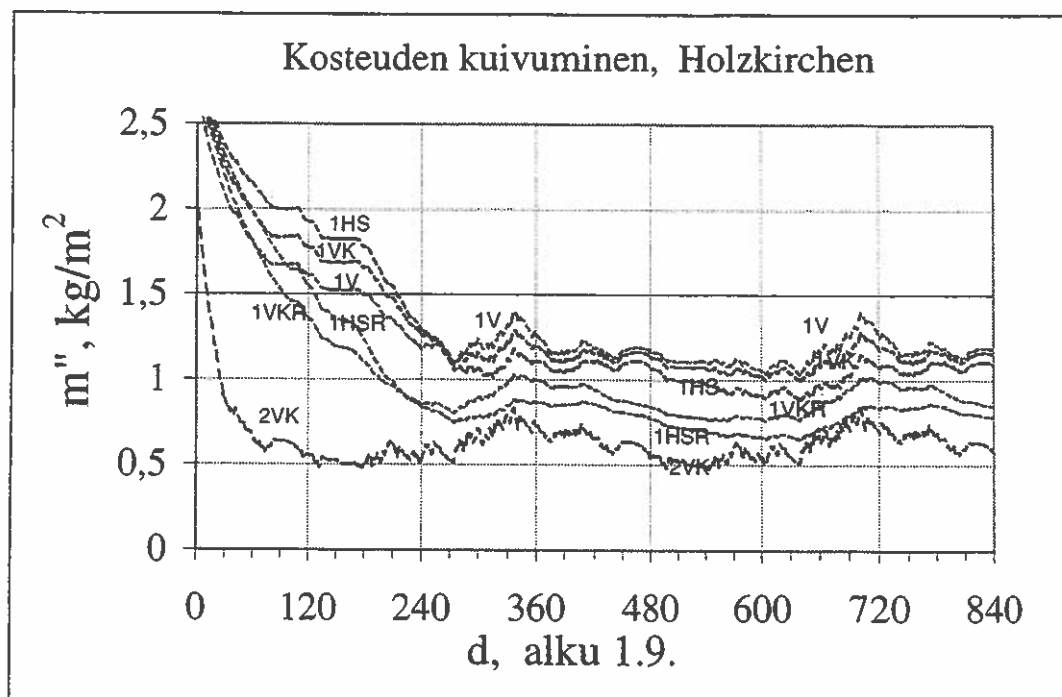
Kuva 31 . Alussa kuivien rakenteiden kosteuskentän kehitys Jyväskylän sääoloissa (yllä) ja laskennallinen homeenkasvuindeksi tuulensuojan sisäpinnalle (alla).



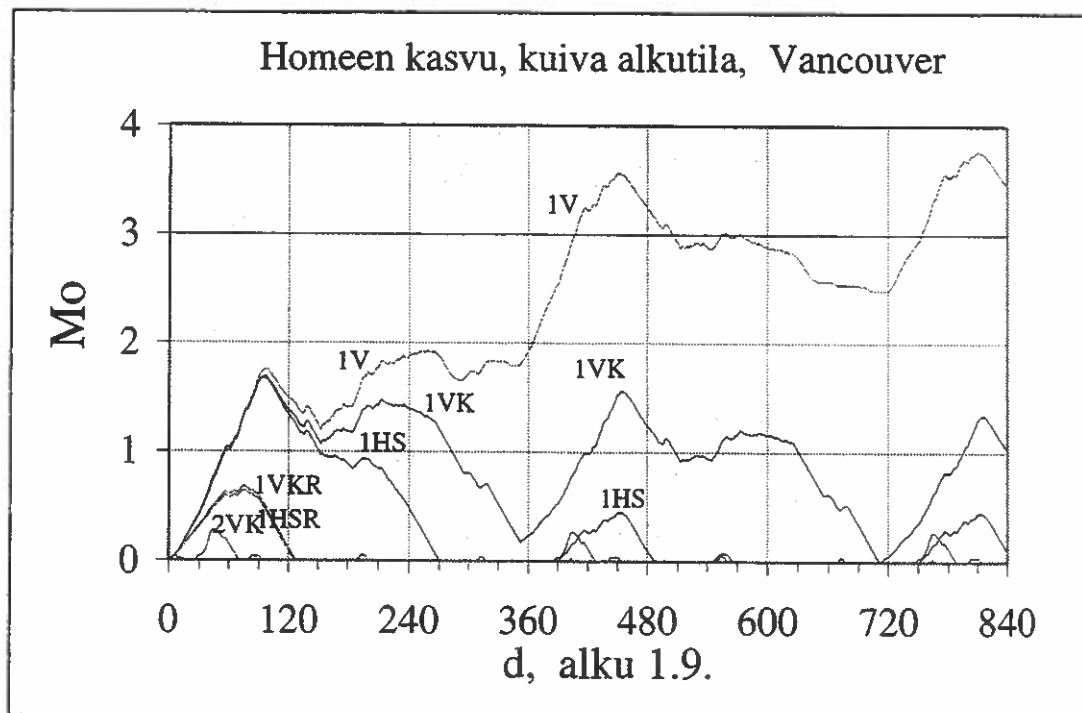
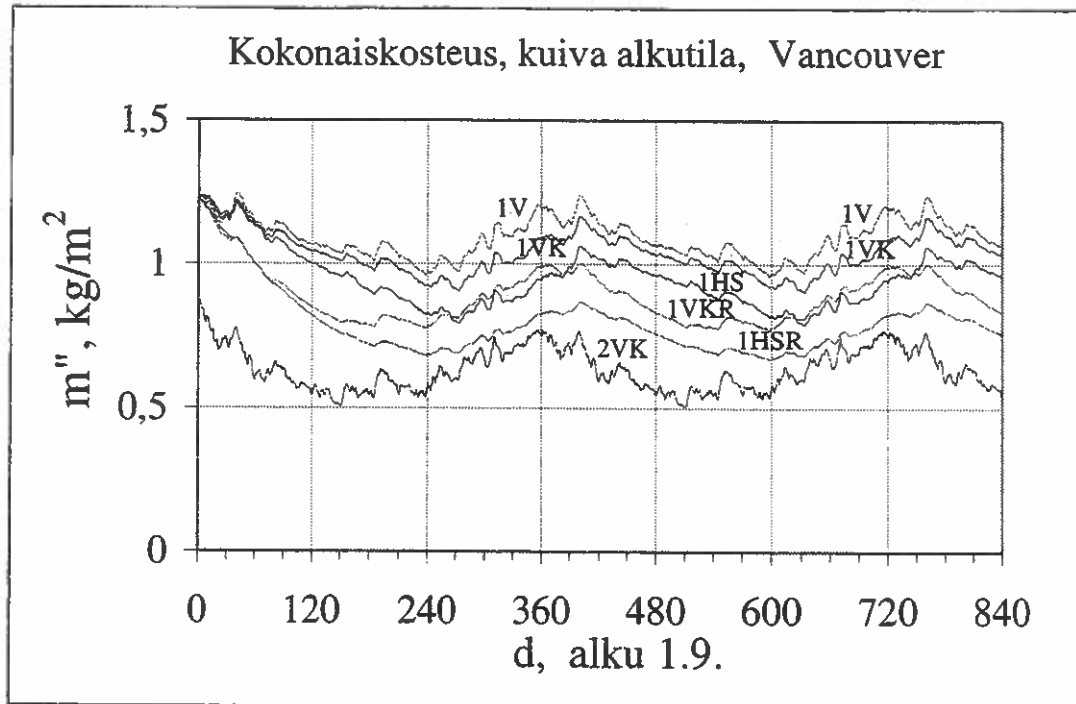
Kuva 32. Ylimääräisen kosteuden kuivuminen rakenteista Jyväskylän sääoloissa (yllä) ja laskennallinen homeenkasvuindeksi tuulensuojan sisäpinnalle (alla).



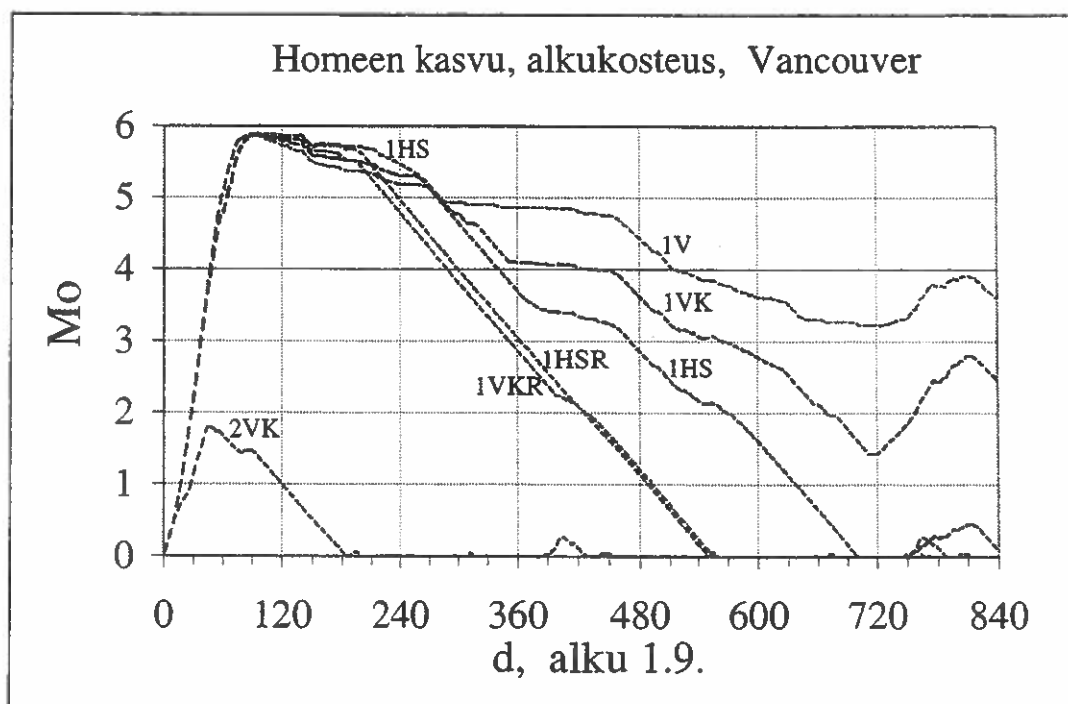
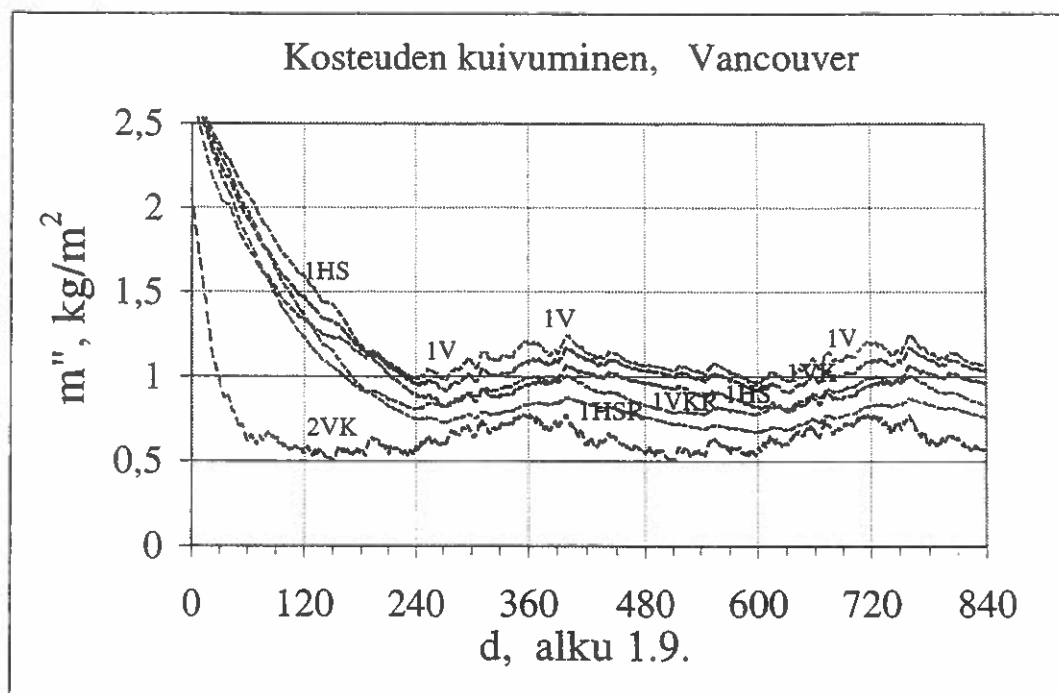
Kuva 33 . Alussa kuivien rakenteiden kosteuskentän kehitys Etelä-Saksan (Holzkirchen) sääoloissa (yllä) ja laskennallinen homeenkasvuindeksi tuulensuojan sisäpinnalle (alla).



Kuva 34 . Ylimääräisen kosteuden kuivuminen rakenteista Etelä-Saksan (Holzkirchen) sääoloissa (yllä) ja laskennallinen homeenkasvuindeksi tuulensuojan sisäpinnalle (alla).



Kuva 35 . Alussa kuivien rakenteiden kosteuskentän kehitys Vancouverin sääoloissa (yllä) ja laskennallinen homeenkasvuindeksi tuulensuojan sisäpinnalle (alla).



Kuva 36 . Ylimääräisen kosteuden kuivuminen rakenteista Vancouverin sääoloissa (yllä) ja laskennallinen homeenkasvuindeksi tuulensuojan sisäpinnalle (alla).

11 TUULENSUOJATUOTTEIDEN KUIVUMISKYVYN KOKEELLINEN VERTAILU

11.1 TAVOITTEET

Tämän kokeellisen tutkimusjakson tavoitteena oli selvittää rakenteen tuulensuojakerroksen vaikutus rakenteen kuivumiskykyyn. Erityisesti tutkittiin ulkoilmaan (tuuletusrakoon) rajoittuvan ja ulkopuolelta lämmöneristetyin vanerirakenteen toimintaa verrattuna rakenteisiin, joissa on muita tuulensuojalevyjä tai tuulensuojaus puuttuu kokonaan. Kosteuslähteenä oli lämmöneristeen lämpimällä pinnalla oleva vesi.

Kokeessa tarkasteltu tilanne kuvaa tapausta, jossa rakenteeseen on kerääntynyt lähinnä vesivuodon mukana suuri määrä ylimääräistä kosteutta. Esitetyt olot ovat äärimmäisen hankalat, eivätkä siten vastaa normaalien käyttöolojen mukaista kosteusrasitusta. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin arvioida rakenteiden kuivumiskykyä ja selviytymistä myös kuvattua lievemmistä kosteusrasituksista, esimerkiksi rakentamisen jälkeisestä alkukosteudesta.

11.2 KOEJÄRJESTELYT

Tutkittava rakenne on koejärjestelyissä (Kuva 37) pelkistetty siten, että vain lämmöneriste- ja tuulensuojakerrokset ovat tarkastelun kohteena. Nämä rakennekerrokset on asennettu tiiviisti muovilaatikkoon siten, että rakenteen uloin pinta on yläpuolista kylmää tilaa vastaan. Laatikon pohjalla on kokeen alussa tasainen kerros vettä. Laatikoiden ylä- ja alapuolisten ilmantilojen lämpötilat pidetään vakioina. Alapuolen korkeampi lämpötila aiheuttaa lämpötila- ja vesihöyryn osapainegradientin ja kosteus pyrkii kuivumaan diffuusisti yläpinnan kautta. Reunoiltaan laatikko on lämmöneristetty, jotta lämpötilakenttä olisi mahdollisimman 1-ulotteinen. Vaaka-asennus valittiin varmistamaan mahdollisimman 1-ulotteinen, konvektioton kosteuskenttä.

Kuivumiskokeet 1-ulotteisessa lämpötilakentässä



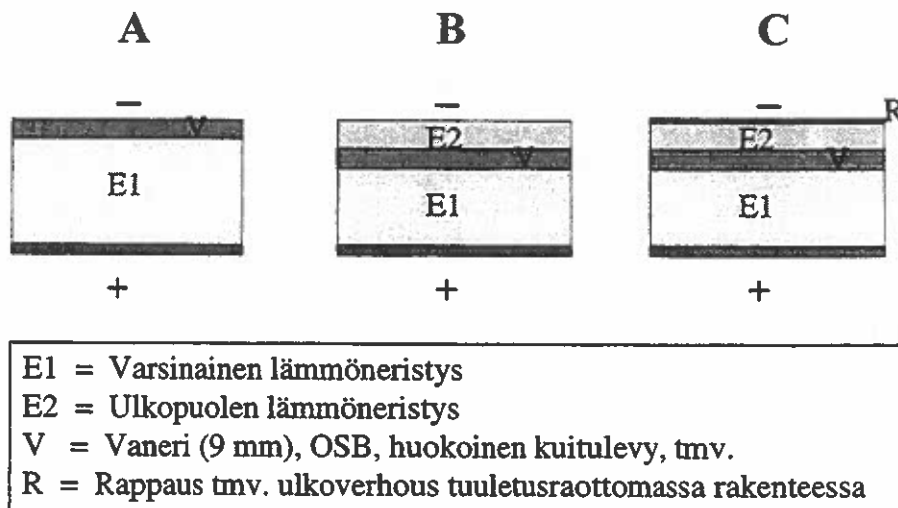
Kuva 37 . Kuivumiskokeiden koejärjestelyt.

11.2.1 Koerakenteet

Tuulensuoja on kokeessa rakenteen kuivumista rajoittava kerros ja tämän kerroksen toiminta määrää koko rakenteen kuivumisnopeuden.

Pääasiallinen tutkimuskohde oli paksuviiluinen 9 mm:n kuusivaneri. Tämän kosteudenläpäisykykyä verrattiin muiden vastaavien tuotteiden (huokoinen kuitulevy ja OSB-levy) toimintaan. Referenssinä on lämmöneriste ilman tuulensuojaa.

Kuva 38 esittää kokeissa tarkastellut tuulensuojauksen kolme eri periaaterakennetta. Taulukko 12 esittää kaikkien koerakenteiden materiaali-kerrokset ja dimensiot.



Kuva 38. Tutkittavat tuulensuojan sijoituksen rakenneperiaatteet.

Tapaus A kuvaa tyypillistä rakennetta, jossa tuulensuoja rajoittui ulkoilmalla tuuletettuun tuuletusrakoon (rakenteet 1, 2, 6 - 9). Tapausten B ja C mukaisissa ns. käännetyin tuulensuojan kokeissa (rakenteet 3 - 5) käytettiin tuulensuojana pelkästään 9 mm havuvaneria. Rakenteessa 5 (rakennetyyppi C) käytettiin tuulensuojan ulkopuolisena eristeenä pinnastaan rapattua tuotetta. Kokeessa käytetty eristerappaus oli Suomessa käytetty normaali kaupallinen tuote. Referenssirakenteena (8) oli pelkkä mineraalivillakerros ilman tuulensuojaa. Lämmöneristeenä käytettiin kaikissa tapauksissa mineraalivillaa. Kaikilla koerakenteilla on sama paksuus, 150 mm. Lämmöneristeen paksuutta muutettiin siten, että kokonaispaksuus säilyi samana riippumatta muista rakenneosista, esim. ulkopuolisesta lämmöneristyskerroksesta.

Kutakin rakennetyyppiä tutkittiin kolmella rinnakkaisella rakenteella. Poikkeuksena oli referenssirakenne (tapaus 8), jota oli vain yksi rakenne ja tapaus 9, joka vastasi tapaus 1, mutta jossa mineraalivillaeriste oli korvattu sellukuitueristeellä.

Taulukko 12 . Koerakenteiden materiaalikerrosten dimensiot. Rakenteen ulkopinnan puoleista levyä kutsutaan tässä tuulensuojaksi. Tämän ulkopuolella oleva lämmöneristekerros on tapauksissa 3 ja 4 avoin ulkopinnaltaan ja tapauksessa 5 ulkopinnalla on rappaus. Tapauksissa 1-7 oli kolme rinnakkaista rakennetta, tapauksessa 9 kaksi rinnakkaista ja referenssitapausta 8 on vain yksi rakenne. Viimeisessä sarakkeessa on tulosten esityksessä käytetty tunniste.

Tapaus	Tuulensuoja	Lämmöneriste	Ulkopuolinen lämmöneriste	Tunniste
1	Kuusivaneri 9 mm 3 ply	mw 141 mm	-	9ply
2	Kuusivaneri 12 mm 4 ply	mw 138 mm	-	12ply
3	Kuusivaneri 9 mm 3 ply	mw 111 mm	30 mm mw	1E9ply
4	Kuusivaneri 9 mm 3 ply	mw 91 mm	50 mm mw	2E9ply
5	Kuusivaneri 9 mm 3 ply	mw 111 mm	30 mm mw + rappaus	R1E9ply
6	OSB (Oriented Strand Board) 12 mm	mw 138 mm	-	OSB
7	Huok. Kuitulevy 12 mm	mw 138 mm	-	pWfb
8 (ref.)	Avoin rakenne	150 mm mw	-	Open
9	Kuusivaneri 9 mm 3 ply	141 mm sellukuitueriste	-	9plyCF

11.3 KOEOLOSUHTEET JA MITTAUKSET

Alkukosteudeksi laatikon pohjalle asetettiin 10 mm vesikerros (10 kg/m²).

Kokeen kokonaiskesto oli 91 vuorokautta ja se koostui kolmesta noin kuukauden pituisesta jaksosta. Sen tavoitteena oli kuvata sekä talvikauden kondenssi- ja jäätymistilanteet että kevään sulamiskauden tilanne. Taulukko 13 esittää koejaksojen lämpötilat. Lämpimän alapuolisen ilman lämpötila pidettiin kaikissa tapauksissa samana (noin +22 °C).

Kokeen ensimmäisessä vaiheessa kylmän, yläpuolisen ilmatilan lämpötila oli noin -10 °C, seuraavassa vaiheessa noin -5 °C ja viimeisessä jaksossa noin +3 °C, jolloin kaikki rakenteet olivat sulia. Kunkin rakenteen tuulensuojan sisäpinnan lämpötilaa seurattiin läpi kokeen. Tapauksessa 8 seurattiin lämmöneristeen ulkopinnan lämpötilaa. Kylmän puolen suhteellista kosteutta ei seurattu, mutta jäähdytyslaitteiston alhainen höyrystymislämmön vaikutuksesta se oli alempi kuin ulkoilman tila tyypillisissä talvioloissa.

Avoimen referenssirakenteen tapauksessa kosteus kuivui kokeen kestäessä toisen vaiheen lopussa ja vettä lisättiin kesken kokeen noin $7,8 \text{ kg/m}^2$ vastaava määrä laatikon pohjalle.

Laatikoiden punnituksin selvitettiin rakenteiden hetkelliset kosteusmäärät ja tuulensuojan kautta haihtunut kosteus. Kaikkien jaksojen lopussa purettiin yksi kunkin tapauksen rinnakkaisesta rakenteesta ja punnituksin ja kuivaamalla selvitettiin kosteusjakaumat rakenteissa. Tapaus 8 purettiin vasta koko kokeen lopuksi ja rakenne 9 kahden viimeisen jakson jälkeen.

Tuloksena saatiin kosteuden haihtumisnopeus eri tyyppisistä rakenteista samoissa kosteuskuormitusoloissa. Erikseen saatiin jäätymiskauden ja sulan kauden tilanteet. Käännetyn tuulensuojan tapauksissa (3 - 5) saatiin näkyviin ulkopintaa lämpimämmissä oloissa olevan tuulensuojan vaikutus kuivumisen tehostamisessa.

Taulukko 13 . Koejaksojen olosuhteet ja mittaukset.

Koejakso	Lämpötilat	Kesto	Mittaukset
I	+22 / -10 °C	32 vrk	Kuivunut kosteusmäärä Tuulensuojan lämpötila Kosteusjakauma lopussa
II	+22 / -5 °C	29 vrk	Kuivunut kosteusmäärä Tuulensuojan lämpötila Kosteusjakauma lopussa
III	+22 / +3 °C	30 vrk	Kuivunut kosteusmäärä Tuulensuojan lämpötila Kosteusjakauma lopussa

11.4 KOETULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Eri koetapauksista käytetään tulosten esityksessä taulukon 12 mukaisia tunnuksia.

Lämpötilat

Kuva 39 esittää koejaksojen mitatut lämpötilat tuulensuojan sisäpinnalla ja ilmatiloissa.

Kokeen ensimmäisessä vaiheessa voitiin -10 °C kylmän puolen lämpötilaa pitää yllä vain noin 20 päivää. Sen jälkeen lämpötila kohosi jakson lopussa noin -7 °C:seen. Toisessa jaksossa kylmän puolen lämpötila vaihteli noin -5 .. -2 °C:n välillä ja kolmannessa se oli suhteellisen vakio, noin +3 °C.

Tuulensuojan lämpötilat muodostivat kaksi ryhmää, ulkopuolelta eristetyt ja ulkopintaan asennetut. Ulkopuolelta lämmöneristetyissä tapauksissa lämpötilakenttien

muoto oli jokseenkin sama ja lämpötilat olivat kaikissa tilanteissa $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Suurta eroa ei ollut edes I ja III vaiheen välillä. Ulkopuolelta avoimissa lisäeristetyissä tapauksissa ulkopuolinen lämmöneriste oli jokseenkin kuiva ja sen lämmönvastus oli suhteellisen korkea.

Rapatun eristerakenteen lämpötilat olivat selkeästi muista tapauksista poikkeavat, koska lämmöneriste kastui tuulensuojan ja rappauksen välissä, eikä sen lämmönsiirtovastus vastannut kuivan eristeen arvoja. Rapatun rakenteen tuulensuojan lämpötilat olivat jopa $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastaavan rappaamattoman rakenteen arvoja alemmat ja tuulensuojan lämpötila laski hetkellisesti jopa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alapuolelle. Nopea muutos rapatun rakenteen lämpötilassa tapahtui noin 4 viikon kohdalla, jolloin rakenteen tuulensuojan lämpötila laski, vaikka kylmän puolen lämpötila alkoi nousta. Selitys asiaan on kosteusjakauksen vaikutukset rakenteen lämmönsiirtovastuksiin ja lisäksi kosteuden faasimuutokset rappauseristeessä.

Erityisesti ulkopintaan asennettujen tuulensuojien lämpötilat seurasivat kylmän puolen lämpötilan vaihteluita. Huokoisen kuitulevyn rajapinta oli näistä lämpimin ja sen lämpötila kävi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ yläpuolella toisessa jaksossa. Muuten kaikki ulkopintaan asennetut tuulensuoja olivat jäätymisalueella kahden ensimmäisen jakson aikana. Kolmannessa jaksossa myös näiden lämpötilat kohosivat noin $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$.. $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tasolle.

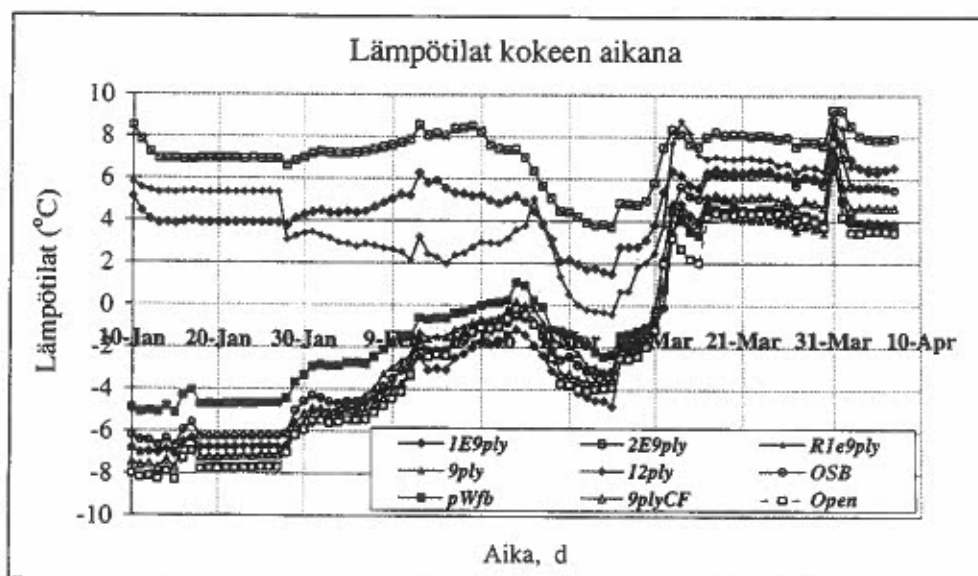
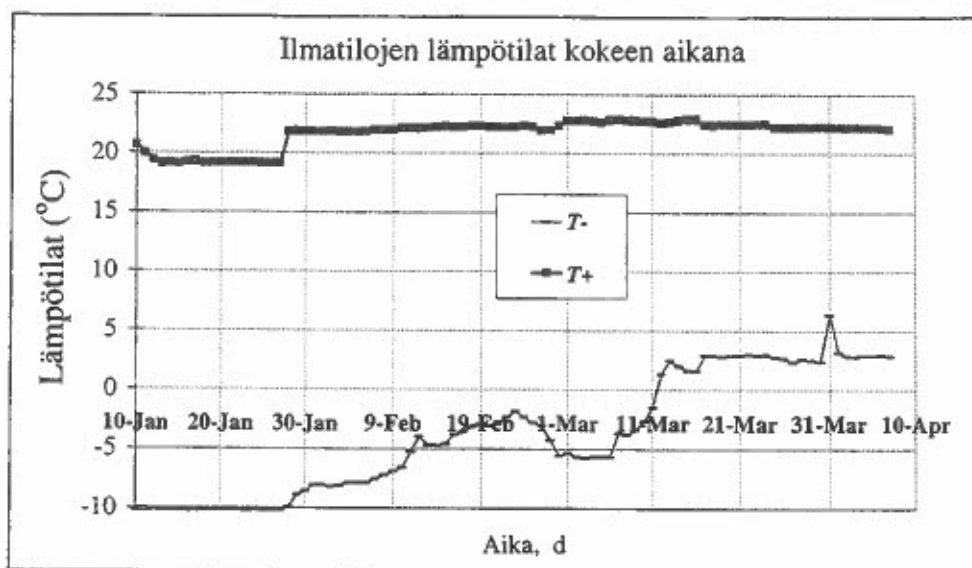
Vaikka kokeen eri jaksolla ei ollutkaan vakio-olosuhteita, oli kokeessa kuitenkin selvä jäätyminen ja sulamiskauden raja. Eri rakenteet olivat samoissa oloissa, joten tulokset ovat keskenään vertailukelpoiset.

11.4.1 Kosteuden kuivuminen rakenteista

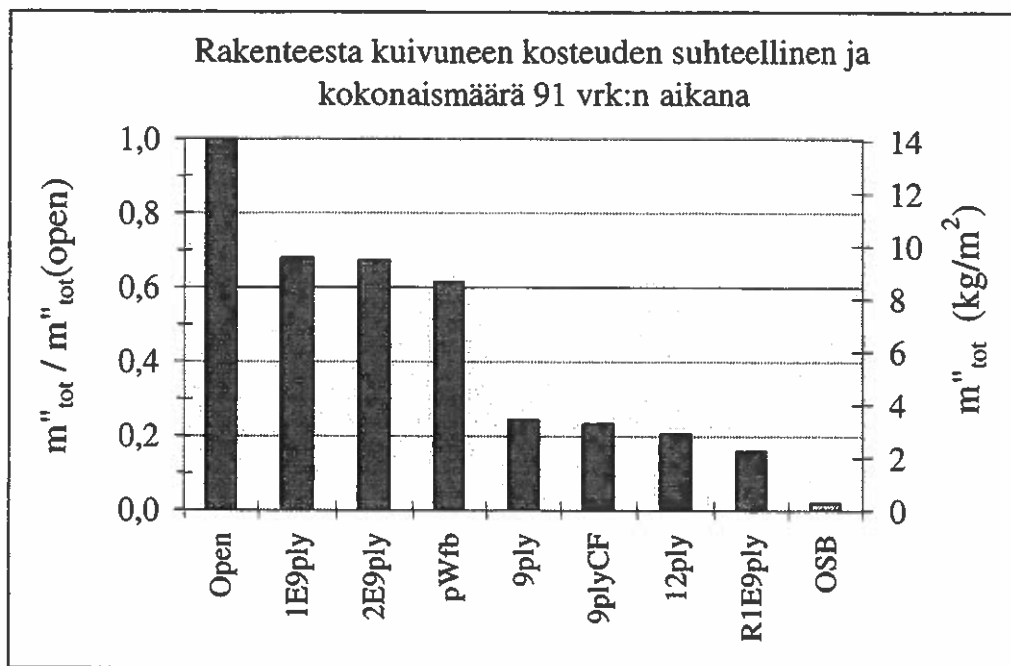
Kokeissa käytetyn OSB-levyn tiheys kuivana oli noin 640 kg/m^3 . Kokeissa käytetty OSB oli huomattavasti vanereita höyrytiiviimpää, mikä näkyi jo vesihöyrynsiirtävyyksien määrityksessäkin. Kuitenkin kyseinen OSB-laatu on luokiteltu soveltuvaksi tuulensuojatyypin käyttöön.

Tuloksissa (Kuvat 40 - 43) esitetään punnituksiin perustuvat tuulensuojan ot-sapinta-alaa kohden lasketut rakenteista kuivuneet kosteusmäärät (kg/m^2) ja suhteelliset arvot verrattuna avoimen referenssirakenteen vastaavaan arvoon. Kuva 40 esittää koko 91 vuorokauden koejakson tilanteen ja muut kuvat koejaksojen 1 - 3 vastaavat tulokset.

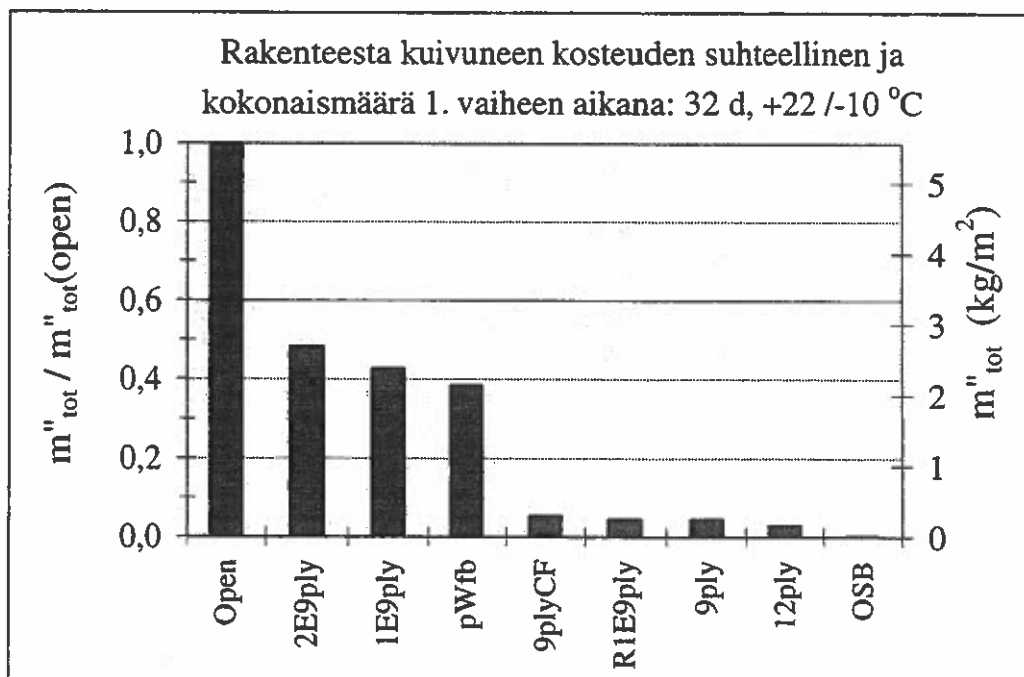
Kuva 44 esittää punnitusten perusteella lasketut kosteusvirran tiheydet (kg/sm^2) eri rakenteista kokeen kolmen eri lämpötilajakson aikana. Tulokset kuvaavat kokeissa olleiden rinnakkaisten tapausten keskimääräisiä arvoja. Viimeisessä vaiheessa kutakin tapausta oli jäljellä yksi rakenne.



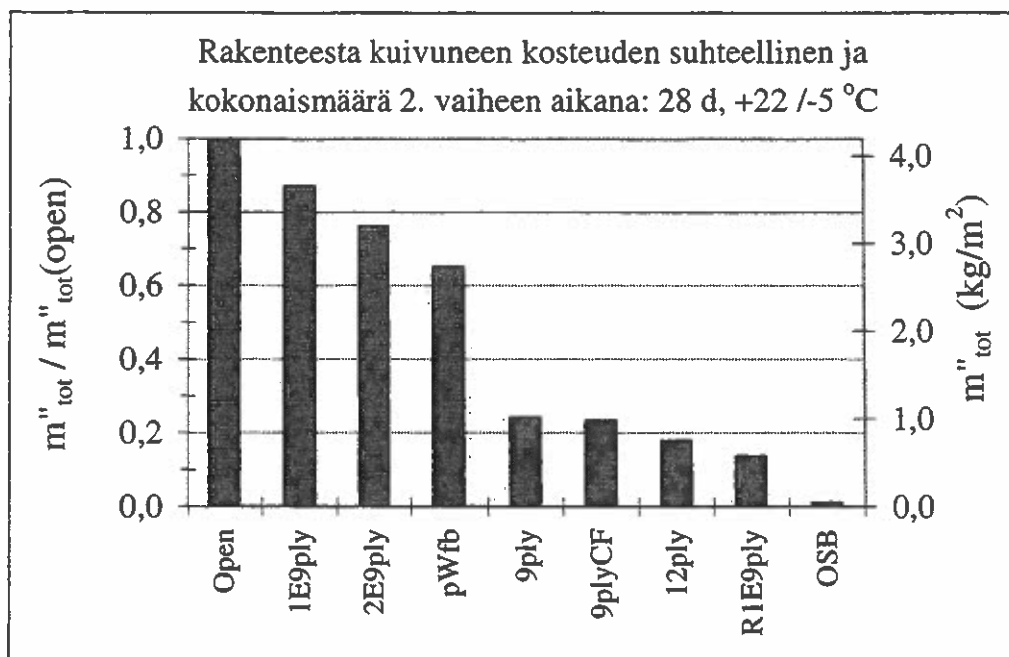
Kuva 39 . Kokeen aikana mitatut lämpötilat ilmatiloissa (yllä) ja tuulensuojan ja lämmöneristeen rajapinnalla sekä avoimen rakenteen ulkopinnalla (alla).



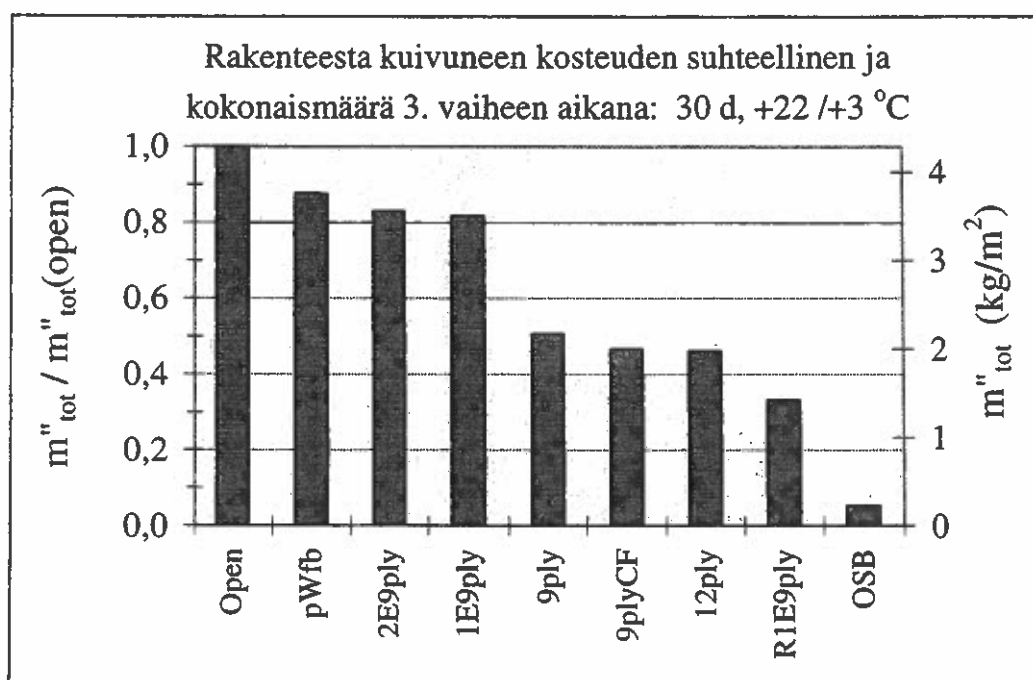
Kuva 40 . Kokeen 91 vrk:n aikana rakenteista kuivuneet kokonaiskosteusmäärät ja suhteelliset kosteusmäärät verrattuna avoimen rakenteen arvoon.



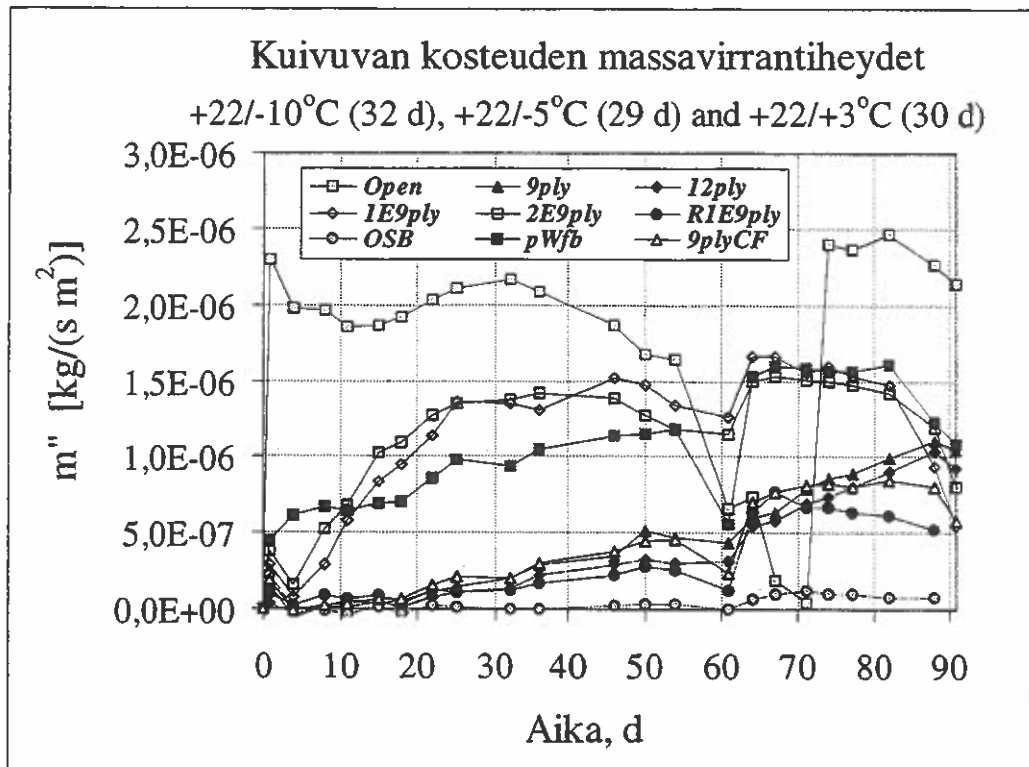
Kuva 41 . Kokeen ensimmäisessä vaiheessa +22/-10 °C:n oloissa 32 vrk:n aikana rakenteista kuivuneet kokonaiskosteusmäärät ja suhteelliset kosteusmäärät verrattuna avoimen rakenteen arvoon.



Kuva 42 . Kokeen toisessa vaiheessa +22/-5 °C:n oloissa 29 vrk:n aikana rakenteista kuivuneet kokonaiskosteusmäärät ja suhteelliset kosteusmäärät verrattuna avoimen rakenteen arvoon.



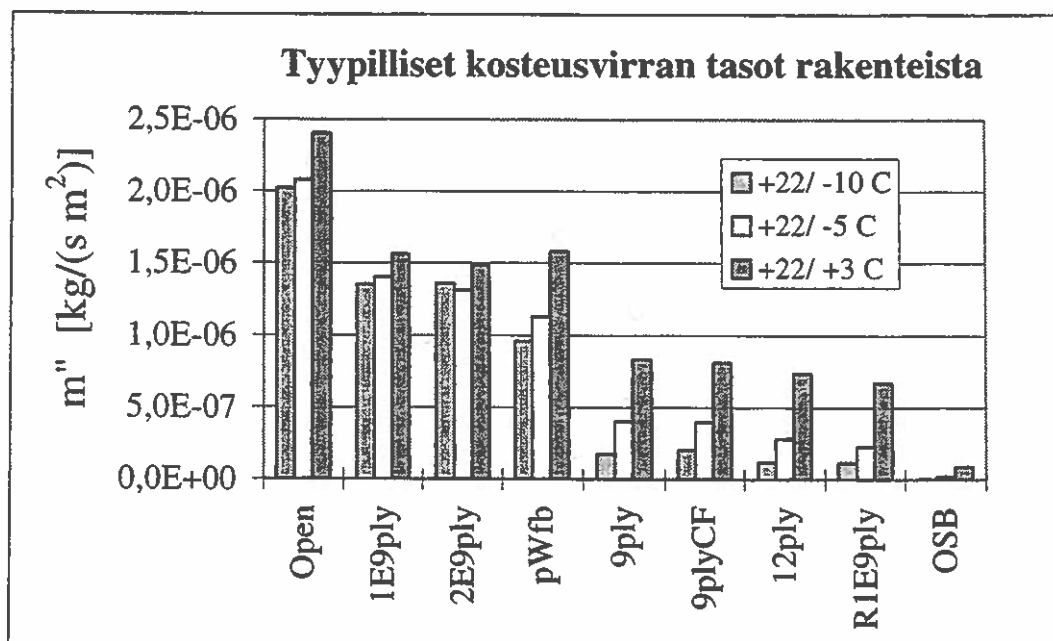
Kuva 43 . Kokeen kolmannessa vaiheessa +22/+3 °C:n oloissa 30 vrk:n aikana rakenteista kuivuneet kokonaiskosteusmäärät ja suhteelliset kosteusmäärät verrattuna avoimen rakenteen arvoon.



Kuva 44 . Punnituksista lasketut kosteuden massavirrantiheydet ulos rakenteista tuulensuojan läpi. Vettä lisättiin kuivuneeseen referenssirakenteeseen (Open) 61 d kohdalla. 81 d jälkeen kolme rakennetta oli alkanut kuivua, eivätkä kosteusvirrat ole näiltä osin vertailukelpoisia.

Rakenteista kuivuneet kosteusmäärät (Kuvat 40 - 43) eivät ole kaikilta osin täysin vertailukelpoisia. Tämä näkyy kosteusvirrantiheyksien vaihtelusta (Kuva 44). Ensimmäisessä vaiheessa kesti jonkin aikaa, ennenkuin tuulensuojien kosteudet tasoittuivat olosuhteita vastaavaan tilaan ja kuivuminen saattoi alkaa. Kuivumisen loppuvaiheessa kosteustason ja -jakauman muutos vaikutti kosteusvirtoihin erityisesti avoimella vertailurakenteella. Avoin rakenne kuivui toisen vaiheen lopussa ja vettä lisättiin rakenteeseen vasta kolmannen vaiheen puolivälissä (61 d). Samoin kolme rakennetta alkoi selvästi kuivua kolmannen vaiheen lopussa.

Tavoitteena oli esittää mahdollisimman vertailukelpoiset kuivumista kuvaavat suureet. Tämän vuoksi jokaisesta vaiheesta valittiin parhaiten tilannetta kuvaava jakso, jolle laskettiin jaksojen keskimääräiset kosteusvirran tiheydet. Nämä 'tyypilliset' kosteusvirran tiheydet kuvaavat kuivuneita kosteusmääriä paremmin rakenteiden toimintaa samankaltaisissa kosteusoloissa. Vertailukelpoiset kosteusvirrantiheydet kunkin tuulensuojatapauksen eri jaksoille esitetään kuvassa 45 ja lukuarvoina (Taulukko 14). Erot kuivuneiden kosteusmäärien ja näin saatujen tyypillisten kosteusvirtojen välillä ei ole merkittävä, mutta kuvan 45 arvot kuvaavat parhaiten eri tapausten keskinäistä kuivumiskykyä.



Kuva 45 . Kokeen kolmessa eri vaiheessa määritetyt tyypilliset kosteusvirran tiheydet eri tuulensuojatapauksissa. Nämä arvot kuvaavat parhaiten eri tapausten keskinäistä kuivumiskykyä.

Taulukko 14 . Kokeen kolmessa eri vaiheessa määritetyt tyypilliset kosteusvirran tiheydet lukuarvoina (vastaavat kuvan 9 arvoja).

Tapaus	+22 / -10 °C kg/(s m ²) x 10 ⁻⁷	+22 / -5 °C kg/(s m ²) x 10 ⁻⁷	+22 / +3 °C kg/(s m ²) x 10 ⁻⁷
OPEN	20,2	20,8	24,1
1E9ply	13,5	14,0	15,6
2E9ply	13,6	13,1	14,8
pWfb	9,6	11,3	15,8
9ply	1,8	4,0	8,4
9plyCF	2,0	4,0	8,1
12ply	1,2	2,8	7,4
R1E9ply	1,2	2,3	6,7
OSB	(0,05)	0,2	0,9

11.4.2 Kuivumiskyvyn arviointi kosteusvirtojen perusteella

Avoimessa referenssitapauksessa kosteusvirta rakenteesta pysyi jokseenkin samalla tasolla niin kauan kuin kosteutta riitti rakenteessa (Kuva 44). Huokoinen kuitulevy sekä ulkoa lisäeristetyt ja sellukuitueristeiset vanerit saavuttivat vakio-kosteusvirran noin 25 päivässä. Erityisesti vanereilla kosteusvirran muutos tätä ennen oli voimakkaasti kasvava. Tulos osoittaa tuulensuojamateriaalien kosteuk-sien tasoittuneen jokseenkin vakiotasolle vasta kokeen loppuvaiheessa, jolloin materiaalikerroksen vesihöyrynläpäisevyys sai vakioarvon.

Kuva 45 ja Taulukko 14 kuvaavat hyvin eri tapausten kuivumiskykyä. Arviot rakenteiden kuivumiskyvystä perustuvat pääosin niiden esittämiin tuloksiin.

Avoimen tapauksen kosteusvirrantiheys pysyi jokseenkin vakiona kahden pak-kasjakson aikana ja kasvoi noin 20 %, kun kylmän puolen lämpötila oli $> 0^{\circ}\text{C}$.

Ulkopuolelta lisäeristetyt vanerituulensuojat, joissa lisäeristykseen pinta oli avoin olivat seuraavaksi parhaita kuivumaan. Lämpötilaoloilla oli vain pieni vaikutus kosteusvirtoihin, sillä itse tuulensuoja oli molemmissa rakennetapauksissa ja kaikissa oloissa sulan puolella. Kosteusvirrat olivat noin 60 -65 % avoimen refe-renssirakenteen arvoista.

Parhaimman tuloksen antoi 9 mm:n vanerituulensuoja 30 mm:n lisäeristyksellä. Ulkopuolen mineraalivillan tuoma lisävastus kosteudensiirrossa näkyy paksum-man 50 mm:n ulkopuolisen eristekerroksen tuloksissa. Kuivumisen tehostamisen kannalta on tärkeää, että kuivumispotentiaali tuulensuojan yli nostetaan ulkopin-nan tapauksesta, ja että tuulensuoja on pääsääntöisesti jäätymisaluetta korkeam-massa lämpötilassa. Ulkopuolisen lämmöneristeen paksuuden kasvatus 30 mm suuremmaksi ei tyypillisissä oloissa juurikaan lisää rakenteen kuivumiskykyä.

Lisäeristykseen etu tavanomaiseen, ulkopinnalle asennettuun vanerituulensuojaan verrattuna oli huomattava pakkasjaksojen aikana. I vaiheessa tyypillinen kosteus-virta lisäeristetyistä rakenteista oli noin 7,5-kertainen verrattuna normaaliin tapa-ukseen, jossa 9 mm:n tuulensuojavaneri oli kylmällä pinnalla. Pakkasessa tuulen-suojan vesihöyryn läpäisyominaisuudet muuttuvat sulan tilan arvoista ja lisäksi pintaan jäätyvä kosteus muuttaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa. II jaksossa lisäeristykseen etu oli parhaimmillaan 3,5-kertainen ja viimeisessä sulan tilan jaksossa hyöty oli vielä lähes 2-kertainen.

Ulkopinnalta lisäeristetyn 9 mm:n vanerituulensuojan kuivuminen oli pakkasjak-soilla parempi kuin ulkopinnalle asennetun huokoisen 12 mm:n kuitulevyn kautta. Kosteusvirta lisäeristetyn tuulensuojan läpi I jaksossa oli noin 40 % korkeampi kuin ulkopinnalle asennetun huokoisen kuitulevyn ja II jaksossa 16 - 24 % korke-ampi. Viimeisessä jaksossa huokoinen kuitulevyrakenne kuivui jokseenkin samoin kuin 30 mm lisäeristetty vanerirakenne.

Rappauspintainen 30 mm:n lisäeristys 9 mm:n vanerituulensuojan kanssa oli kaikissa tarkasteluoloissa selvästi höyrytiiviimpi kuin ulkopinnan eristämätön vaneri. Vanerin lisäksi toinen suhteellisen höyrytiivis pinta pienentää koko raken-

teen kuivumiskykyä. Ulkopuolinen lisäeristys rappauksen kanssa ei tuo samoja etuja kuin ulkopinnalta avoin lisäeristys vaan rakenteen kuivuminen heikkenee jopa normaalitapaukseen verrattuna kaikissa lämpötilaoloissa. Rappauseristarakenteen kuivuminen oli huonompi kuin ulkopintaan asennetun 12 mm:n havuvanerin tapauksessa. Kuivumisnopeus riippuu tietysti rappauksen vesihöyrynläpäisyydestä.

Ero ulkopintaan asennettujen 9 ja 12 mm:n vanerien kosteusvirroissa pieneni suuremmissa lämpötiloissa ja kosteuksien tasoittuessa. I ja II jakson aikana 12 mm:n läpäisevä kosteusvirta oli noin 70 % 9 mm:n tapauksesta ja III jakson aikana lähes 90 %.

Sellukuitueristeinen rakenne (9plycf) tasoittui hieman nopeammin vakiokosteuteen kuin mineraalivillaeristeinen (9ply), joten siitä kuivuneet kosteusmäärät olivat I jakson alkuvaiheessa hieman mineraalivillaeristeistä korkeammat. Jakson lopussa kosteusvirran tiheydet olivat jokseenkin samat. Viimeisessä jaksossa mineraalivillaeristeisen rakenteen kuivuneet kosteusmäärät ja kosteusvirrantiheydet olivat noin 10 % sellukuitueristeistä korkeammat. Käytännössä erot ovat niin pienet, ettei lämmöneristeillä voi katsoa olevan vaikutusta rakenteen kuivumiseen ainakaan tutkituissa kuormitusoloissa.

Kosteusvirta OSB:n läpi oli ensimmäisessä jaksossa jokseenkin olematon, koska materiaalikerrokseen ei ollut vielä saavuttanut tilanteen edellyttämää kosteustasoa. Kaikissa kokeen muissakin vaiheissa OSB-rakenteen kuivuminen jäi huomattavasti heikommaksi kuin minkään kokeessa olleen vanerirakenteen. Ero OSB:n ja havuvanerin välillä kokeen rasisoloissa oli suurempi kuin mitä materiaaliominaisuuksien (OSB:n suurempi vesihöyrynvastus) perusteella olisi voinut ennakoida.

11.4.3 Kosteusjakaumat

Koejaksojen jälkeen puretuista koerakenteista määritettiin kosteusjakaumat punituksin ja kuivaamalla. Taulukko 15 esittää kunkin rakenteen tuulensuojalevyn kosteuspitoisuudet (kg/kg) kokeen eri vaiheiden lopussa ja kuvissa 46 - 48 esitetään eri tapausten kosteusjakaumat (kg/m³). Kuva 49 esittää lisäksi vertailun mineraalivilla- ja sellukuitueristeiden vaikutuksesta kosteusjakautumisiin kahden viimeisen vaiheen jälkeen. Vertailtavina olivat rakenteet, joiden ulkopinnalla on 9 mm:n havuvanerituulensuoja ja ainoa ero oli lämmöneristeen materiaalissa.

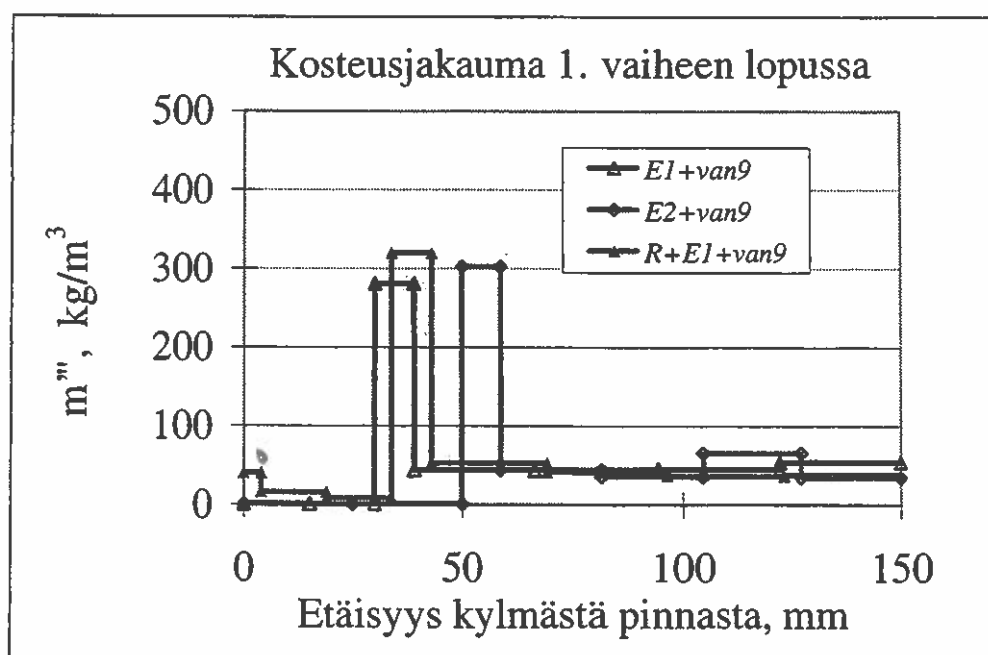
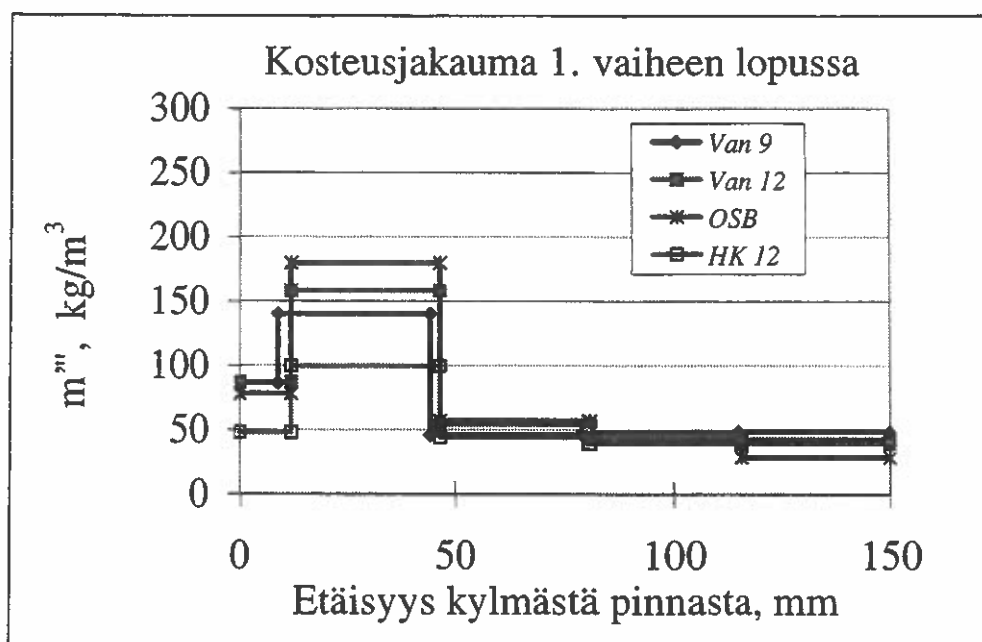
Tuulensuojan kosteuspitoisuus on lämmöneristeen kosteutta merkittävämpi kriteeri toiminnan suhteen. Kosteusjakauma antaa kuvan rakenteen kriittisistä kosteuskertymäkohdista. Kosteusjakaumassa kosteuspitoisuus ilmoitetaan vertailukelpoisena arvona (kg/m³) kun taas tuulensuojan kosteuspitoisuudet ilmoitetaan taulukossa painoprosenteina.

Taulukko 15 . Tuulensuojalevyjen kosteuspitoisuudet kokeen eri vaiheiden lopussa.

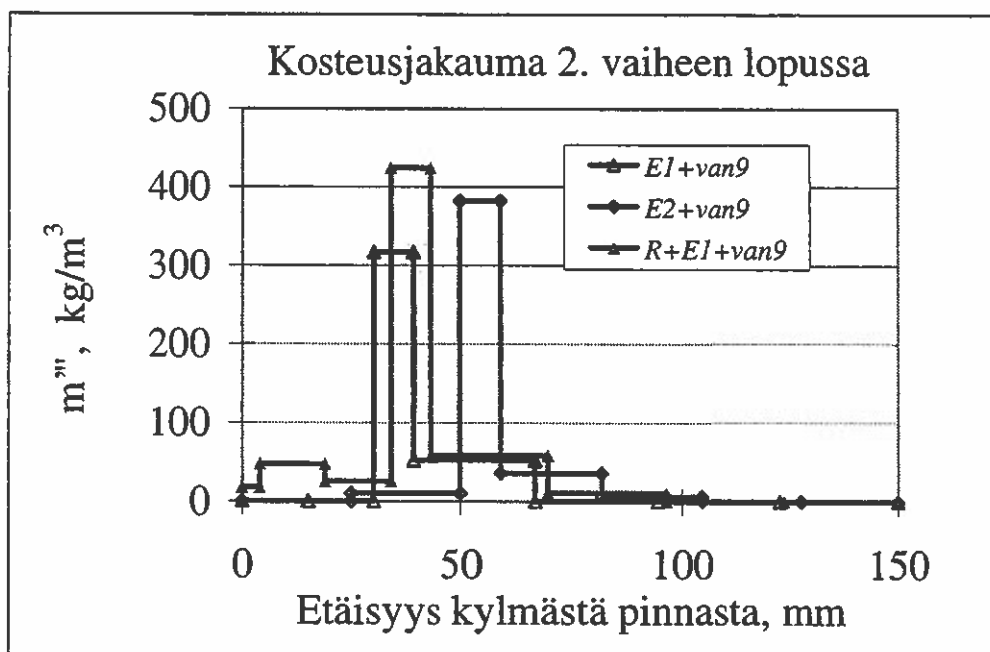
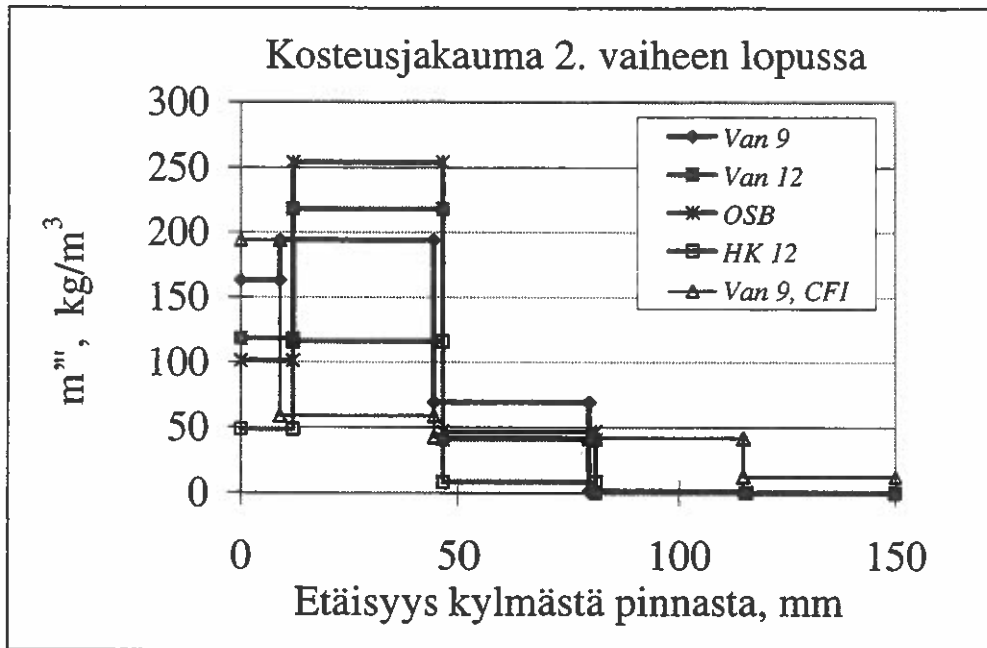
Tapaus	Loppukosteus, vaihe I % p	Loppukosteus, vaihe II % p	Loppukosteus, vaihe III % p
9ply	21,0	35,4	46,2
9plyCF	-	42,1	22,8
12ply	21,8	25,7	46,0
1E9ply	59,3	68,9	15,3
2E9ply	65,9	83,1	19,4
R1E9ply	76,0	92,2	103,8
OSB	12,1	15,7	29,5
pWfb	17,0	17,1	14,4

Kokeen mukaisissa äärimmäisen rankoissa oloissa on odotettavissa suurehko kosteuskertymä tuulensuojaan niin kauan kuin ylimääraistä, rakenteen muiden materiaalikerrosten (lämmöneristeen) hygroskooppisen alueen kosteuspitoisuuden ylittävää kosteutta on jäljellä rakenteessa. Tämä näkyy selkeästi tuloksissa.

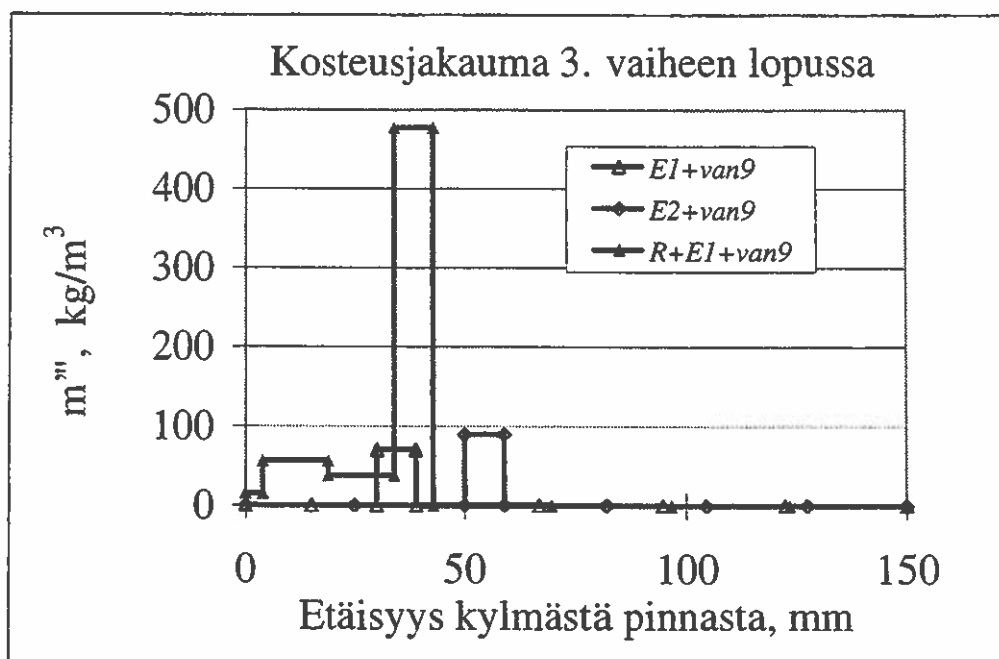
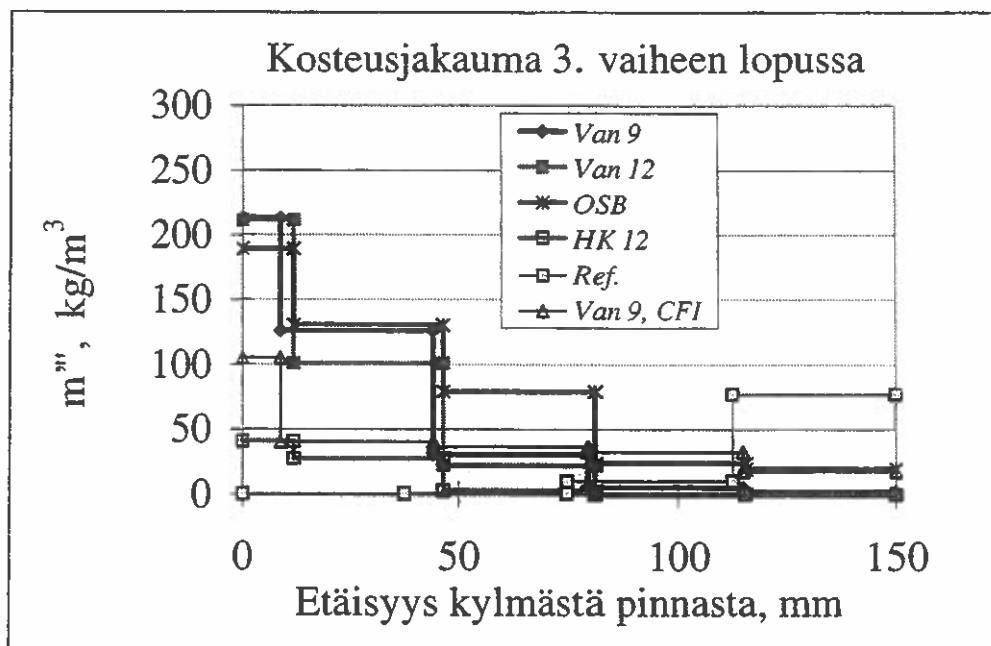
Ulkopintaan asennetun vanerin kosteuspitoisuus kasvoi koko kokeen ajan mineraalivillaeristeellä. Loppukosteus oli noin 0,46 kg/kg. Vanerin loppukosteus sellukuitueristeisessä tapauksessa oli 0,23 kg/kg, mutta toisen vaiheen lopussa kosteus oli ollut tasolla 0,42 kg/kg. Kosteusjakaumat ko. rakenteista osoittavat sellukuitueristeen jakavan kosteuskapasiteetin avulla kosteuden tasaisemmin rakenteeseen kuin mineraalivillaeristys (Kuva 49). Mineraalivillalla kosteuspitoisuudet tuulensuojan lähellä ovat suuret ja lämpimän puolen lähellä pienet. On ilmeistä, että kosteusvirta mineraalivillan läpi ja kosteustaso tuulensuojan lähellä ovat suurempia mineraalivillaeristeisessä rakenteessa verrattuna sellukuitueristeiseen. Tämä näkyi myös kosteusvirroissa: mineraalivillaeristeisen rakenteen kuivuminen oli hieman sellukuitueristeistä nopeampaa. Selvää syytä viimeisen vaiheen jälkeiseen eroon tuulensuojan kosteuksissa ei tämän kokeen perusteella voida arvioida, vaan se edellyttäisi laajempaa tutkimusta useilla rinnakkaisilla rakenteilla. Tuulensuojan loppuvaiheen keskikosteus vastasi sellukuitueristeisessä tapauksessa noin 95 % RH, ts. alempi kosteuspitoisuus ei vielä ollut turvallisella alueella.



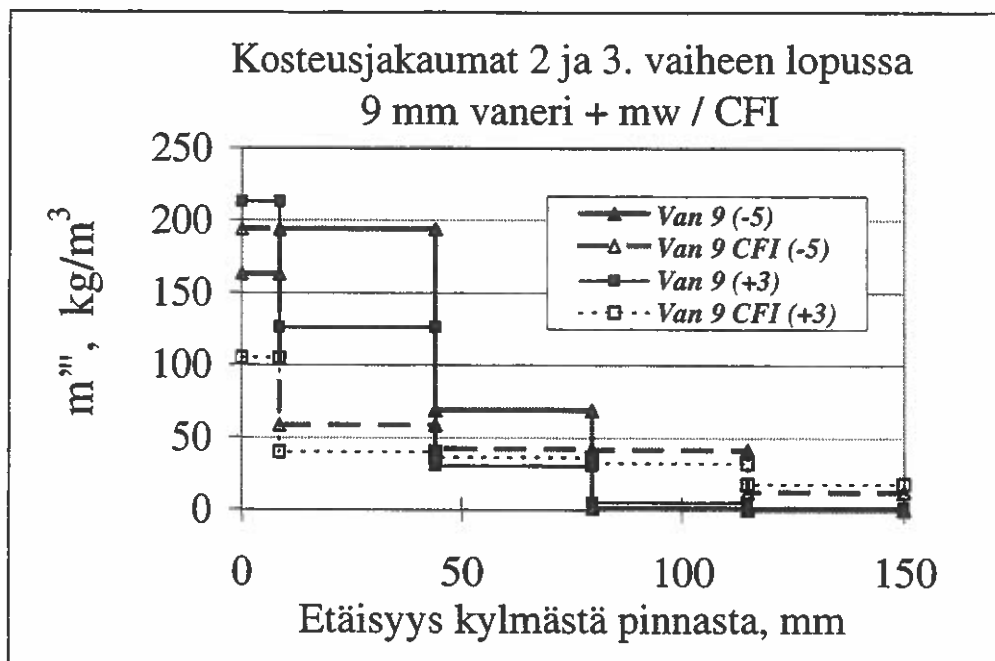
Kuva 46 . Kosteusjakaumat 1. vaiheen jälkeen puretuissa koerakenteissa. Ylemmäs-
sä kuvassa tuulensuoja oli ulkopinnassa ja alemmassa kuvassa lisäeristetyt tapauk-
set sekä vertailukohtana rakenne, jossa on huokoinen kuitulevy ulkopinnassa.



Kuva 47 . Kosteusjakaumat 2. vaiheen jälkeen puretuissa koerakenteissa. Ylemmäsä kuvassa tapaukset, joissa tuulensuoja on ulkopinnassa ja alemmassa kuvassa lisäeristetyt tapaukset sekä vertailukohtana rakenne, jossa on huokoinen kuitulevy ulkopinnassa.



Kuva 48 . Kosteusjakaumat 3. vaiheen jälkeen puretuissa koerakenteissa. Ylemmäsä kuvassa tapaukset, joissa tuulensuoja on ulkopinnassa ja alemmassa kuvassa lisäeristetyt tapaukset sekä vertailukohtana rakenne, jossa on huokoinen kuitulevy ulkopinnassa.



Kuva 49. Kosteusjakaumien vertailu 2. ja 3. vaiheen jälkeisissä tiloissa ($T_c = -5$ ja $+3$ °C) kun rakenteen ulkopinnassa on 9 mm:n havuvaneri ja lämmöneristeenä mineraalivillaa tai sellukuitueristettä (CFI).

Huokoisen kuitulevyn kosteuspitoisuus oli kahden ensimmäisen vaiheen jälkeen (jatkuva kondenssi tuulensuojan sisäpinnalla) noin 17 % p ja lopussa noin 14 % p, sillä rakenne alkoi kuivua loppuvaiheessa.

Kokeissa käytetyn OSB:n tasoittuminen koetilannetta vastaavaan kosteuteen oli hidasta ja rakenteen kuivuminen sen kautta oli erittäin hidasta. OSB:n kosteudet kasvoivat läpi kokeen ollen lopussa noin 30 % p. OSB-tuulensuoja johti suurimpiin lämmöneristeen kosteuspitoisuuksiin ulkopintaan asennettujen tuulensuojien tapauksissa.

Ulkopinnaltaan lisäeristettyjen tapausten tuulensuojan kosteudet olivat erittäin korkeat niin kauan kuin rakenteessa riitti kosteutta. Rapatussa tapauksessa kosteuden kuivuminen oli erittäin hidasta ja tuulensuojan loppukosteus oli yli 100 % p. Ulkopinnoiltaan avoimissa lisäeristystapauksissa tuulensuojan kosteudet olivat toisen vaiheen jälkeen vielä 70 - 80 % p, mutta viimeisen vaiheen jälkeen kun rakenteet alkoivat kuivua, enää 15 ja 19 % p.

Ulkopinnaltaan avoin tuulensuojan ulkopuolinen lisäeristys nopeutti olennaisesti rakenteiden kuivumista. Tuulensuojan kosteustaso oli kuitenkin korkea koko kuivumisen ajan. Tämä asettaa rajat rakenteen kuivumiskyvylle, sillä pitkäaikaisina korkeat kosteuspitoisuudet lisäävät homekasvun mahdollisuutta ja vaurioriskiä. Tuulensuojan ulkopuolinen lisäeristys parantaa rakenteiden selviytymiskykyä, mutta suuret kosteusmäärät ovat kaikilla rakennetapauksilla riskitekijöitä.

Ulkopinnaltaan rapattu tuulensuojan ulkopuolinen lämmöneristys keräsi kosteutta itseensä ja siten tuulensuojan molemmiin puolin oli kosteuden kondenssiolosuhteet ainakin kokeen toisessa ja kolmannessa vaiheessa. Tuulensuojan loppukosteus oli hyvin korkea, yli 100 % p. Vain OSB-tuulensuojarakenteella oli rapattua tapausta huonompi kuivumiskyky. Kuivumisnopeuden ja kosteuspitoisuuksien osalta rap-pauseristerakennetta ei voida pitää vanerituulensuojan yhteydessä suositeltavana, jollei varmisteta, ettei rakenteeseen pääse ylimääräistä kosteutta, tai rappauksen vesihöyrynläpäisyominaisuuksia olennaisesti paranneta. Normaalaa diffuusia käyttökuormitusta vastaavissa oloissa rapattu ja lisäeristetty tuulensuojarakenne kuitenkin lienee kosteusteknisesti toimiva.

11.4.4 Silmämääräinen biologisten vanhenemisprosessien arviointi

Kaikkien kokeen eri vaiheissa purettujen rakenteiden tuulensuojalevyjen kunto arvioitiin (Hannu Viitanen, VTT/RTE). Puulevyt tutkittiin visuaalisesti ja mikroskooppisesti niissä mahdollisesti esiintyvien home- ja sinistäjäsiementen kasvun havaitsemiseksi. Pinnasta tarkasteltiin erikseen mikroskooppinen kasvu, jolloin pinnassa ei havaittu silmin havaittavaa muutosta (homeindeksi 1). Toiseksi pinnasta arvioitiin silmin havaittavan homekasvun osuus (homeaste 3). Kasvu oli useimmissa tapauksissa erikokoisena pistemäisenä kasvuna materiaalien pinnalla. Homekasvun osuus arvioitiin suuntaa-antavalla tarkkuudella. Taulukko 16 esittää levyjen tarkastuksen tulokset.

Homesieniä havaittiin eniten havupuuvanerien pinnassa, etenkin 2 ja 3 vaiheen jälkeen, koejärjestelyistä riippuen. Havupuuvanerien pinta oli hygrofiilinen ja vesi imeytyi niihin nopeasti. Vanerien pinta oli halkeillut. Sen sijaan OSB-levyjen pinta oli hyvin hygrofobinen ja vesi imeytyi niihin hyvin heikosti. Samoin kuitulevyyn vesi imeytyi hyvin hitaasti. OSB-levyissä havaittiin lievää homekasvua vain 3. vaiheen jälkeen eikä kuitulevyssä havaittu homesieniä. OSB-levyn pinnan hygrofobisuus saattaa johtua liimasta tai levyn pintaan lisätyistä aineista. Levyn toinen pinta vaikutti sileältä ja käsitellyltä. Homekasvun vähäinen määrä johtuu pinnan hygrofobisuudesta tai pintaan lisätyistä kemikaaleista. Sellukuitueristeen yhteydessä olleessa vanerissa ei havaittu hometta, mutta vanerin pinta oli hyvin hygrofiilinen. Pinnassa havaittiin sellukuitueristeestä siirtynyttä booria, mikä heikentää homekasvua, mutta lisää pinnan hygrofiilisyyttä.

Taulukko 16 . Koerakenteiden puulevyjen kunto (homeisuusarvio)

Rakenne	Jakso	Levy	Eriste	Ulkop eriste	Homeisuus, % osuus alasta		Huom.
					Home 1	Home 3	
1	1	KV, 3 ply	mw 141	-	paikoin	0	
1	2	(pinta hygrofiilinen)			paikoin	0	
1	3				> 50	6,2	R+I
2	1	KV, 4 ply	mw 138	-	paikoin	0	
2	2	(pinta hygrofiilinen)			paikoin	0	
2	3				n. 10	2,1	R+I
3	1	KV, 3 ply	mw 11	mw 30	paikoin	0	
3	2	(pinta hygrofiilinen)			< 50	6,5	R+I
3	3				n 20	2,7	R+I
4	1	KV, 3 ply	mw 91	mw 50	n. 10	2,2	R+I
4	2	(pinta hygrofiilinen)			> 50	20	R+I
4	3				> 50	15	R+I
5	1	KV, 3 ply	mw 111	mw 30	paikoin	0	
5	2	(pinta hygrofiilinen)			< 50	3,3	R+I
5	3				> 50	4	R+I
6	1	OSB, 12	mw 138	-	0	0	
6	2	(pinta hygrofobinen)			0	0	
6	3				paikoin	1	R+I
7	2	HK, 12	mw 138	-	0	0	paikoin likaa
7	3	(pinta hygrofobinen)			0	0	paikoin likaa
9	2	KV, 3ply	cw, 141	-	0	0	pinnassa
9	3	(pinta hyvin hygrofiilinen)			0	0	hieman booria

R+I = rihmasto ja itiöitä

Home 1: vain mikroskoopilla havaittava lievä rihmasto

Home 3: silmin havaittava homekasvusto (rihmasto + itiöitä)

Tulokset vastasivat suhteellisen hyvin tuulensuojalle esitettyjen loppukosteuksien (Taulukko 15) perusteella arvioitua toimintaa. Korkea pitkäaikainen kosteus viittaa biologisten prosessien mahdollisuuteen..

Kuusivaneri mineraalivillaeristeiden pinnassa. 9 mm:n vanerilla oli homeita jonkin verran enemmän kuin 12 mm:n vanerilla, mihin oli syynä 12 mm:n levyn suurempi kosteuskapasiteetti.

Vastaava sellukuitueristeisen rakenteen vanerituulensuoja näytti tuoreelta ja vaalealta, eikä siinä ollut homekasvustoa. Syynä olivat sellukuitueristeiden sisältämät homeen kasvua rajoittavat yhdisteet, joita oli havaittavissa tuulensuojan pinnassa. Kosteuspitoisuudet olivat kuitenkin kokeessa selvästi homeen kasvualueella.

Lisäeristetyt rakenteet. Kaikki tapaukset olivat kärsineet enemmän kosteudesta kuin ulkopintaan asennetut tuulensuojat. Homeita oli paksummassa lisäeristetyssä

enemmän kuin ohuemman lisäeristyksen tapauksessa. Rapatussa lisäeristystapauksessa hometta oli enemmän kuin avoimessa lisäeristys-tapauksessa.

OSB-levyissä oli hometta hieman viimeisen vaiheen jälkeen. Levyn pintakerros oli hygrofobinen, ts. pinnassa oli vettä hylkivä käsittely, mikä myös esti voimakkaan homehtumisen. Huokoisen kuitulevyn pinnalla ei ollut homejälkiä.

11.5 JOHTOPÄÄTÖKSET KOKEISTA

Tehdyt kokeet, joissa oli 10 kg/m^2 alkukosteus ja jatkuvat kondenssiolosuhteet tuulensuojalevyssä, edustavat äärimmäistä kosteusrasitusta. Koeoloissa saadut tulokset kuvaavat rakenteen selviytymiskykyä runsaan ylimääräisen kosteuden aiheuttamasta rasituksessa. On selvää, että pitkäaikainen kondenssitila johtaa yleensä biologisten vanhenemisprosessien käynnistymiseen niissä rakenteissa, joissa ei ole kemiallista suojausta. Normaaleissa käyttöoloissa rakenteiden kosteustasot ovat koetilannetta alemmat ja rasitusajat koetilannetta huomattavasti lyhyemmät. Kondenssioloja alemmilla kosteustasoilla tuulensuojalevyjen vesihöyrynläpäisevyys on pienempi kuin kondenssitilanteessa, jolloin myös kuivuminen hidastuu koetilanteesta.

Rakenteen ulkopintaan asennettu vanerituulensuoja läpäisee jäätymisalueella kosteutta suhteellisen heikosti. Tuulensuojan toimintaan vaikuttaa jäätymisalueella sen pintaan tiivistyvän kosteuden jäätyminen. Lämmöneristys vanerituulensuojan kylmällä pinnalla kasvattaa kosteuden kuivumisvirran samalle tai jopa korkeammalle tasolle kuin ulkopintaan asennetun huokoisen kuitulevytuulensuojan tapauksessa. Edellytyksenä on, että ulkopuolinen lämmöneristyskerros on ulkopinnaltaan avoin tuuletusrakoon.

Ulkopuolinen lisäeristäminen kohottaa tuulensuojan lämpötilaa ja siten edistää homeen kasvua etenkin tilanteissa, joissa kosteuskuorma aiheuttaa tuulensuojan pinnalle kondenssiolosuhteet. Tuulensuojan kosteuspitoisuudet olivat ulkopuolelta eristetyissä tapauksissa huomattavasti suuremmat kuin tavanomaisissa ratkaisuisissa, koska kokeessa tuulensuojan sisäpinnalla oli jatkuva vesihöyryyn kyllästystila. Ulkopuolinen lisäeristys kasvattaa rakenteen kuivauskykyä, mutta kuivumisjakson tulee olla suhteellisen lyhyt, jotta homeongelmat vältetään.

Ulkopuolinen lisäeristys voi olla suhteellisen ohut, sillä paksu eristekerros aiheuttaa lisävastusta kuivumiseen. Nyt tutkituissa kokonaispaksuudeltaan 150 mm:n rakenteissa 30 mm:n ulkopinnan lisäeristys oli parempi kuin 50 mm:n paksuinen. Suositeltava paksuus todellisissa, paremmin eristetyissä rakenteissa voi olla samaa suuruutta. Tärkeää toiminnan kannalta on pitää tuulensuoja suhteellisen pitkään sulana ja tuottaa tuulensuojan yli normaaleja ulkopinnan oloja suurempi vesihöyryyn osapainegradientti.

Rappaus ulkopuolisen lämmöneristeen ulkopinnalla pienentää kuivumisnopeuden tavanomaista eristeen ulkopintaan asennettua vanerituulensuojatapausta alemmalle tasolle, eikä ole suositeltava rakennevaihtoehto, jos rakenteeseen voi päästä ylimääräistä kosteutta. Rapattu lämmöneriste vanerituulensuojan yhteydessä

edellyttää rakenteen kosteusrasitusten pitämistä alhaisina. Eristerappaus alentaa vanerituulensuojarakenteen selviytymiskykyä rakenteen lämmöneristeeseen tulleista kosteuskuormista.

Nyt koejakson pituus oli 91 vuorokautta ja kosteusrasitus vastasi määrältään lähinnä rakenteeseen kosteusvahingossa tullutta vesimäärää, eikä sisä- tai ulkoilmaston tyypillisesti aiheuttamaa kuormitusta. Lisäeristetyistä, ulkopinnaltaan avoimista rakenteista kuivui kokeen aikana lähes kaikki kosteus, noin 10 kg/m^2 . Näissä oli kuitenkin havaittavissa homehtumista. Ensimmäiset homeen merkit ilmaantuvat sopivissa oloissa jo kuukaudessa. Rakenteissa ilmennyt home todennäköisesti taantuisi kokonaan rakenteen kuivuttua, mutta homeen jälkiä jäisi edelleen näkyviin. Homeella tai sen taantuneilla kasvujäljillä ei kuitenkaan ole mitään rakennetta heikentävää vaikutusta.

Karkeasti arvioiden voidaan olettaa, että ulkopuolelta lisäeristetyn rakenteen tulisi kuivua kolmessa viikossa, jotta tuulensuojan pinta ei alkaisi homehtua. Tällöin taulukon 14 mukaisten massavirtojen mukaan sallittu suurin alkukosteus olisi noin $2,5 \text{ kg/m}^2$. Vastaavin kriteerein ulkopintaan asennettu vaneri sallisi sulan puolella noin $1,5 \text{ kg/m}^2$ alkukosteuden, mutta vastaavasti homehtumisen alku ja kasvunopeus olisi hitaampaa johtuen tuulensuojan alemmasta kosteuspitoisuudesta ja yleensä alemmasta lämpötilasta. Suurin ero lisäeristetyn ja tavanomaisen rakenteen toiminnan välillä on jäätymisalueella, mutta tällöin homeen kasvu ei vielä ala ulkopintaan asennetussa tuulensuojassa. Rakenteen kuivuminen kaikissa oloissa on tärkeää, jotta vältetään suurilta paikallisilta kosteuskertymiltä ja mahdollisilta sulan ajan homeongelmilta. Tämä puolustaa ulkopuolisen lisäeristysten käyttöä erityisesti vanerituulensuojarakenteissa, jotka tyypillisesti kuivuvat jäätymisalueella suhteellisen hitaasti.

12 VANERIRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMIVUUDEN JA TUOTEKEHITYKSEN PERUSTEET

12.1 HAVUVANERIN MATERIAALIOMINAISUUDET

Havuvanerille on tyypillistä vesihöyrynläpäisevyyden voimakas riippuvuus kosteuspitoisuudesta. Korkeilla kosteuksilla vesihöyrynläpäisevyys kasvaa kuivan tilan arvoja jopa 15 - 20 kertaa korkeammiksi. Homeen kasvun kannalta turvallisella, mutta mahdollisimman korkealla kosteudella (+5 °C, 83/64 % RH), on havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys noin 6 - 7-kertainen kuivan tilanteen (50/0 % RH) verrattuna.

9 mm:n havuvanerin vesihöyrynvastus määritettynä tuulensuojalle tyypillisissä, mutta homeen kasvun kannalta turvallisissa käyttöoloissa täyttää Ruotsin ja Norjan määräyksissä annetut raja-arvot tuulensuojan vesihöyrynvastukselle.

Havuvanerin vesihöyrynläpäisevyyden mittausta tulisi tehdä mahdollisimman tarkoin toimintaoloja vastaavassa tilassa, jotta tulos kuvaisi materiaalikerroksen todellista toimintaa.

Käytännössä havuvaneri toimii voimakkaasti itsesäätyvänä kosteusvastuksena. Alhaisessa kosteudessa (talvikauden sisäilma) sillä on suuri vesihöyrynvastus. Korkeassa kosteudessa (tuulensuojan toiminta kosteuskuormituksessa) havuvanerin vastus pienenee ja kuivuminen tuulensuojan kautta tehostuu olennaisesti verrattuna kosteuden läpäisevyyteen kuivassa tilassa.

Lämmöneristeen ulkopinnalle asennetun vanerin vesihöyrynläpäisevyys heikkenee talvikauden jäätymisalueella verrattuna sulan tilan arvoihin. Jäätymisalueella vanerin vesihöyrynläpäisevyys on kosteissa toimintaoloissa noin 1/5 - 1/4 sulan tilan arvoista, mutta kuitenkin selvästi korkeammat kuin kuivan materiaalin arvot. Laskelmissa käytettiin jäätymisalueella kuitenkin kuivan materiaalin arvoja, joten laskelmiin sisältyy varmuutta talvikauden kuivumisen osalta.

OSB-levyyn verrattuna havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys on selvästi parempi (korkeampi) tuulensuojan tyypillisellä kosteusalueella. Kokeissa olleen 12 mm:n OSB-levyn vesihöyrynvastus oli homeen kasvun kannalta turvallisina pidettävissä (83/ 64 % RH) oloissa 3 - 4-kertainen 9 mm:n havuvanerin arvoihin verrattuna ja kirjallisuudesta saadun OSB:n sovitekäyrän mukaan sen höyrynsiirtovastus samassa kohtaa oli noin kaksinkertainen havuvanerin arvoon verrattuna.

12.2 DIFFUUSION MERKITYS

Suosituksena rakenteen ulko- ja sisäpuolen vesihöyrynläpäisevyyksien suhteelle on perinteisesti pidetty arvoa 5. Tutkimuksen mukaan arvo vastaa suhteellisen hyvin kosteusteknisesti toimivan rakenteen vesihöyrynläpäisevyyksien vaatimus-

tasoa, kun suhdeluku on laskettu materiaalikerrosten vuotuisista tehollisista arvoista.

Laskelmien perusteella kotelorakenne, jossa on 9 mm:n havuvaneri lämmöneristeen ulkopinnalla tuuletusrakoon päin ja 12 mm havuvaneri maalattuna sisäpinnalla on kosteusteknisesti toimiva. Tarkastelu perustuu pelkästään sisäilman kosteuskuormitukseen diffuusion välityksellä, ts. kosteuskonvektio sekä alkukosteus tai satunnaiset muut kosteuskuormat puuttuvat.

Käytännössä rakenteen sisäpinnan diffuusiotiiviuden varmistamiseksi olisi hyvä käyttää yhtenäistä höyryn/ilmansulkukerrosta lähellä rakenteen sisäpintaa. Kerroksen diffuusiovastuksen ei välttämättä tarvitse olla muovikalvon luokkaa, mutta Suomen ilmastossa se voi hyvin olla sitä. Yhtenäinen höyrinsulkukerros varmistaa rakenteen sisäpuolen diffuusion- ja ilmatiiviuden säilymisen riittävänä.

12.3 LÄMMÖNERISTEEN MATERIAALIN VAIKUTUS

Tarkastellut vanerirakenteet toimivat kosteusteknisesti jokseenkin samalla lailla riippumatta siitä oliko lämmöneristeenä mineraalivillaa vai sellukuitueristettä. Sellukuitueristeen mineraalivillaa hieman suuremman kosteuskapasiteetin ja diffuusiovastuksen vaikutukset eivät juurikaan näkyneet laskennan tai kokeiden antamissa tuulensuojan ja koko rakenteen kosteuspitoisuuksissa. Kuivumiskokeissa rakenteet kuivuivat täsmälleen samalla nopeudella lämmöneristeestä riippumatta.

Sellukuitueristeen sisältämällä booriyhdisteillä oli homeen kasvua rajoittava vaikutus lämmöneristeeseen kosketuksissa olevilla pinnoilla. Voimakkaissa ja pitkäaikaisissa kosteusrasituksissa mineraalivillalla eristetyn rakenteen tuulensuojalevyissä alkoi esiintyä homeen kasvua noin 2 - 3 kuukaudessa. Vastaavan sellukuitueristeisen rakenteen tuulensuojassa ei homeita esiintynyt, vaikka kosteusolot olivat samat.

Vanerin kosteudelle kriittisten pintojen kyllästys tai homeen kasvua rajoittavien lämmöneristeiden käyttö pienentää paikallista homeen kasvuriskiä, vaikkei niillä olekaan vaikutusta varsinaiseen kosteustekniseen toimivuuteen (kosteuspitoisuuksiin). Rakenteiden toimivuuden tulee kuitenkin perustua alhaisiin kosteustasoihin, jolloin homeen kasvun luonnolliset edellytykset puuttuvat. Tässä raportissa esitetyt tulokset osoittavat, millä perustein havuvanerirakenteiden kosteustekninen toimivuus voidaan varmistaa.

12.4 ILMAVUODOT JA ILMATIIVIYSVAATIMUKSET

Jatkuva, määrältään pienikin ilman ulosvirtaus rakenteen kautta aiheuttaa laskelmien mukaan paikallisen homeriskin lähes kaikille tuulensuojatyypeille. Havuvanerin esimerkiksi huokoiseen kuitulevyyn verrattuna suurempi vesihöyrynvastus lisää hieman riskiä, mutta millään rakenteella jatkuva ilman ulosvirtaus ei ole

toivottava. Riski on suurin kylmässä ilmastossa ja se on erityisen herkkä sisäilman kosteuskuormien suhteen.

Ajoittaiset, suhteellisen alhaiset ilman ulosvirtaukset eivät vielä aiheuta kosteus- ja homeriskiä. Kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi rakennuksen sisäilman tulisi olla pääsääntöisesti alipaineinen ulkoilmaan nähden, jolloin vuotoilma- virtojen vallitseva suunta on yleensä kosteusteknisesti turvallinen. Pelkästään rakenteiden ilmatiiviydellä ei voida taata turvallisuutta kosteuskonvektion kanalta. Rakennuksen vaipan hyvä ilmatiiviys on kuitenkin tärkeä, jotta ilmanvaihtojärjestelmällä voidaan toteuttaa pääsääntöisen alipaineen vaatimus.

Termisen noston merkitys kasvaa korkeissa rakennuksissa, missä sisäilman suhteellisesti korkein ilmanpaine on talvikaudella rakennuksen yläosissa. Erityisesti yläpohjan ja seinän liittymien hyvä ilmatiiviys on tärkeä tekijä ilmapuotojen estämiseksi rakenteen vaipan kautta ulos. Kerrostaloissa termisen noston merkitys korostuu, eikä pelkän rakennusvaipan ilmatiiviys ole riittävä tekijä varmistamaan sisäilman alipaineisuus. Välipohjien ja huoneistojen välinen ilmatiiviys vaikuttaa erityisesti korkeissa rakennuksissa niiden painetason hallintaan. Rakenteiden ilmatiiviydellä on vaikutus paitsi ilmanvaihdon hallittavuuteen myös mm. hajujen, epäpuhtauksien ja äänen leviämiseen. Rakennuksen vaippa, sisäiset rakenteet ja ilmanvaihtojärjestelmä muodostavat kokonaisuuden, jolla kulloisissakin oloissa pyritään hallitsemaan rakennuksen painesuhteita. Toimivuusvaatimuksia ei siten voida esittää pelkästään rakenteille, joskin niiden hyvä ilmatiiviys yleensä edistää kokonaisuuden toimintaedellytyksiä.

Havuvaneri on hyvin ilmatiivistä, mikä osaltaan edesauttaa ilmatiiviiden rakenteiden toteutuksessa. Ilmatiiviys riippuu kuitenkin materiaalikerrosten tiiviiden lisäksi voimakkaasti myös rakenneliitosten ja läpivientien detaljeista.

12.5 KOSTEUDEN KUIVUMISNOPEUS RAKENTEIDEN TOIMINNAN ARVIOINNISSA

Yleensä rakenteiden toimintaa arvioidaan sisä- ja ulkoilmaston kuormitusolojen perusteella. Koska rakenteet eivät käytännössä aina ole näin ideaalisissa ja tasaisissa kuormitusoloissa, on perusteltua tarkastella rakenteiden toimintaa myös niiden kuivumiskyvyn kannalta. Rakentamisen jälkeisen tai muun kertaluonteisen ylimääräisen kosteusannoksen tulee kuivua rakenteesta riittävän nopeasti, jotta kosteus ei ehdi merkittävässä määrin käynnistää biologisia kasvuprosesseja.

Kosteuden kuivuminen lämmöneristeen ulkopintaan asennetun vanerituulensuojan läpi on odotetusti hitaampaa kuin huokoisen kuitulevytuulensuojan kautta. Lisäksi talven jäätymiskausi voi hidastaa kosteuden kuivumisnopeutta 20 - 25 %:iin sulan tilan arvoista. Havuvaneri-tuulensuoja läpäisee kuitenkin huomattavasti paremmin kosteutta kuin Pohjois-Amerikassa tyypillinen tuulensuojalevy OSB. Tutkimuksessa olleen OSB-levyn ja havuvanerin vesihöyrynsiirtävyyksien erot korostuivat varsinkin kosteassa tilassa. Lähellä kyllästystilaa tehdyissä kokeissa havuvaneri-

tuulensuojan läpäisevä kosteusvirta oli sulassa tilassa lähes 10-kertainen OSB-tuulensuojan vastaavaan verrattuna.

Havuvaneri soveltuu tuulensuojaksi myös Suomen ilmasto-oloissa. Suhteellisen diffuusiotiiviinä materiaalina sen kuivumiskyky eristeen ulkopintaan asennettuna on normaalit sisäilman kosteuskuormat ylittävissä kuormitustilanteissa suhteellisen alhainen. Siten sen käyttö edellyttää ylimääräisten kosteuslähteiden minimointia. Rakentamisen aikana lämmöneristekoteloon ei tulisi jäädä paljoa ylimääräistä kosteutta, ja esimerkiksi mahdollisuus ilman ulosvirtaukseen tulisi pitää pienenä. Ulkopintaan asennetun havuvanerin tapauksessa noin 1 - 1,5 kg/m² (rakenteen otsapintaa kohden) ylimääräinen, materiaalikerrosten 80 % tasapainokosteustilaa vastaavan kokonaismäärän ylittävä kosteus edustaa kuormaa, jota ei olisi suositeltavaa ylittää. Havuvanerirakenteen kuivumista voidaan kuitenkin huomattavasti parantaa käyttämällä tuulensuojan ulkopuolista lämmöneristekerrosta.

12.6 TUULENSUOJAN ULKOPUOLISEN LÄMMÖNERISTEEN VAIKUTUS

Tuulensuojan ulkopuolelle asennettu, ulkopinnaltaan avoin huokoinen lämmöneriste parantaa olennaisesti rakenteen kuivumiskykyä jo suhteellisen ohuenakin kerroksena. Lisääntynyt kuivumiskyky merkitsee rakenteelle ylimääräistä toimintavarmuutta mahdollisia suunnittele mattomia kosteuskuormia vastaan. Mineraalivillasta tehtynä tuuletusrakoon rajoittuva, yhtenäinen lämmöneriste täyttää puukerrostalojen pintamateriaalien paloturvallisuusvaatimukset.

Ulkopintaan asennettavan lämmöneristeen merkitys perustuu siihen, että tuulensuojan lämpötila nousee ja sen ylitse on suurempi vesihöyryn osapaine-ero (kuivauspotentiaali) kuin ulkopintaan asennetussa tapauksessa. Samalla tuulensuojan kosteustaso yleensä nousee, mikä havuvanerin tapauksessa nostaa materiaalikerroksen vesihöyrynläpäisevyyttä. Suhteellisen ohutkin ulkopuolinen lämmöneristys riittää pitämään tuulensuojan lämpötilan pitkään jäätymisalueen yläpuolella, jolloin jäätymisen aiheuttama kuivumisen hidastuminen vähenee merkittävästi vuositasolla. Ulkopuolisen lisäeristyksen suurin hyöty saadaan kylmässä ilmastossa, jossa on selvä talvikausi.

Ulkopuolelta noin 30 mm:n mineraalivillakerroksella lisäeristetty havuvanerituulensuojarakenne kuivui samalla nopeudella kuin rakenne, jossa oli ulkopintaan asennettu huokoinen kuitulevytuulensuoja. Kuitulevyn ollessa jäätymisalueella oli lisäeristetyn havuvanerirakenteen kuivuminen jopa tätä nopeampaa.

Jos tuulensuojan ulkopuolinen eristys on ulkopinnaltaan rapattu, vie rappaus lisäeristyksen mukanaan tuoman hyödyn kuivauksen tehostamisessa. Rappauksen ja tuulensuojavanerin yhteinen vesihöyrynvastus hidastaa kosteuden kuivumista rakenteesta, mikä korostuu suurehkoilla kosteuskuormilla, jolloin tuulensuojavanerin molemmiin puolin saattaa olla ajoittaiset kondenssiolot. Rapattua eristeratkaisua voidaan suositella käytettäväksi vanerituulenasuojan yhteydessä vain, jos

varmistetaan, ettei rakenteeseen pääse normaalit käyttöolot ylittäviä kosteuskuormia.

Tuulensuojan ulkopuolinen eristys parantaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, mutta se ei kokonaan poista suurten kosteuskuormien aiheuttamaa riskiä. Kohonnut lämpötila- ja kosteustaso kuivumistilanteessa merkitsee kasvavaa home-riskiä, sillä suurilla kuormilla kuivumisaika ylittää vallitsevissa oloissa homeen kasvulle kriittisen ajan. Ylimääräiset kosteuskuormat aina 2 - 2,5 kg/m² saakka kuivuvat kuitenkin niin nopeasti, ettei olennaista homeen kasvuriskiä ole.

Riittävä ulkopuolinen lämmöneristys on paksuudeltaan 25 - 35 mm:n mineraalivillaa normaaleilla seinän eristyspaksuuksilla. Paksummat lämmöneristykset lisäävät vesihöyrynvastusta, eikä niillä saavuteta olennaisesti parempaa kuivumiskykyä.

12.7 ILMASTON VAIKUTUS

Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja selviytymistä kuvaa parhaiten rakenteiden kuivumisnopeus ylimääräisen kosteusrasituksen jälkeen. Rakenteen kuivuminen havuvanerituulensuojan läpi oli nopeinta leudossa ilmastossa, kuten Vancouverissa. Samalle kosteustasolle pääsy saattoi Jyväskylän oloissa viedä jopa 5 - 6 kuukautta pidempään. Jonkin tietyn rakenneratkaisun toimivuus leudossa Vancouverin ilmastossa ei vielä takaa sen toimivuutta Suomen oloissa.

Tuulensuojan ulkopuolinen lisäeristys paransi rakenteiden kuivumista eniten kylmässä ilmastossa, joten suurin hyöty siitä saadaan Suomen oloissa.

12.8 YHTEENVETO

Havuvaneri soveltuu tuulensuojaksi myös Suomen ilmasto-oloissa. 9 mm:n havuvaneri täyttää tuulensuojan käyttöoloissa Ruotsin ja Norjan vaatimukset tuulensuojan vesihöyrynvastukselle. Kosteudenläpäisyominaisuuksiltaan se on huomattavasti Pohjois-Amerikassa tyypillistä tuulensuojalevyä (OSB) parempi ja erot korostuvat vanerin eduksi tuulensuojan tyypillisissä, kosteissa käyttöoloissa.

Sisäilmasta diffuusiona tulevat kosteuskuormat pysyvät ilman höyrynsulkuakin riittävän alhaisina, jos sisäverhoulevyn höyrynsiirtovastus vastaa maalattua 12 mm:n vaneria. Käytännössä sisäpuolisen höyry- ja ilmatiiviyn jättäminen pelkkien levyjen varaan sisältää riskejä. Havuvanerirakenteissa on suositeltavaa käyttää ilman- ja höyrynsulkuna toimivaa kerrosta varmistamaan rakenteen sisäverhouksen tiiviyn pysyvyys. Tällainen kerros voi Suomen ilmasto-oloissa hyvin olla tavanomainen höyrynsulkuna käytetty PE-muovikalvo.

Suhteellisen vesihöyrytiivinä havuvaneri edellyttää normaalista ilmastosta aiheutuvasta kuormituksesta poikkeavien ylimääräisten kosteuskuormien pitämistä mahdollisimman pieninä. Tällaisia ovat konvektiivinen kosteus ja kertaluonteiset kosteuskuormat.

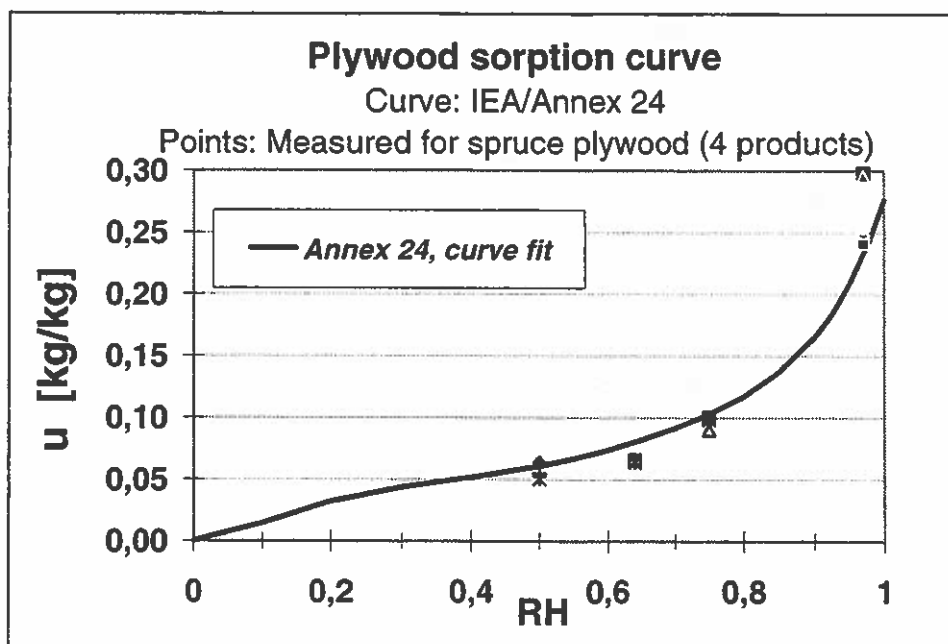
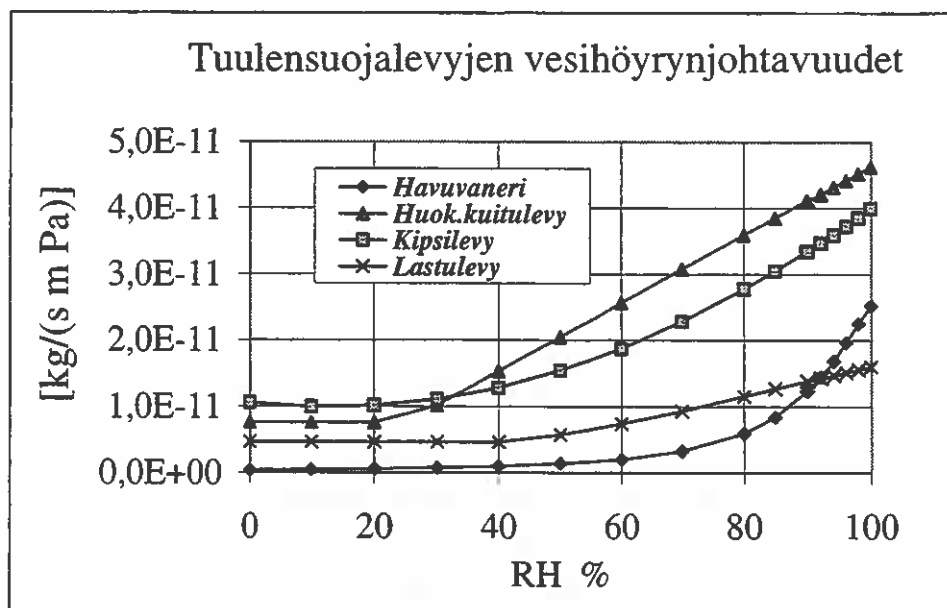
Rakennuksen sisäilman pääsääntöinen alipaineisuus varmistaa konvektiivisten kosteuskuormien pysymisen riittävän alhaisina. Erityisesti kerrostaloissa tämä vaatimus johtaa paitsi rakennuksen ulkovaipan myös rakenteen välipohjien ja muiden asuntojen välisten rakenteiden hyvää ilmatiiviyttä.

Avohuokoinen ja tuuletusrakoon avoin lisäeristys havuvanerituulensuojan ulkopinnalla parantaa olennaisesti rakenteen kuivumisnopeutta ja antaa rakenteelle lisää selviytymisvarmuutta ylimääräisiä kosteuskuormia vastaan. Noin 30 mm:n mineraalivillakerros havuvanerituulensuojan ulkopinnalla antaa rakenteelle saman kuivumiskyvyn kuin mikä on lämmöneristeen ulkopintaan asennetulla huokoisella kuitulevyllä.

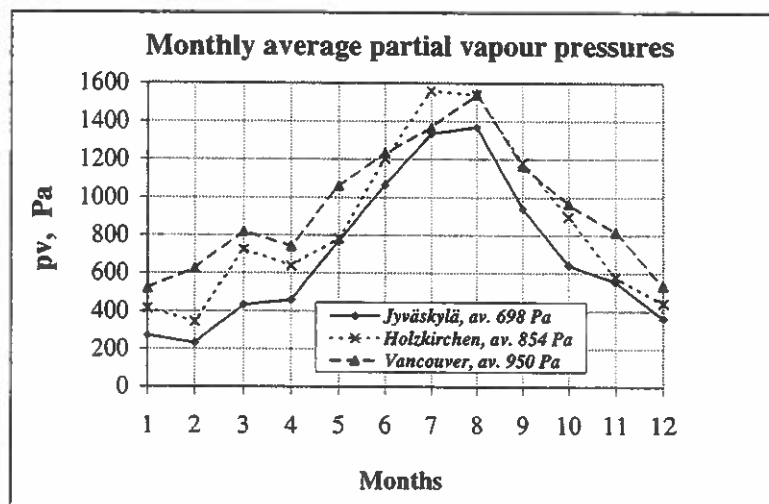
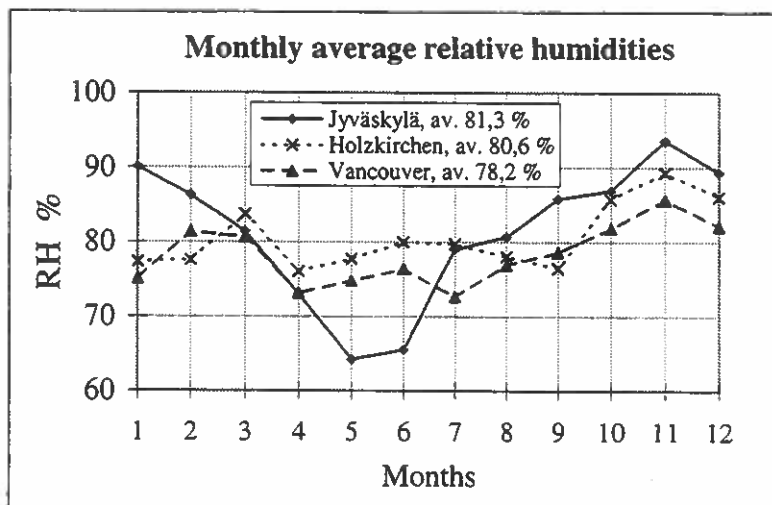
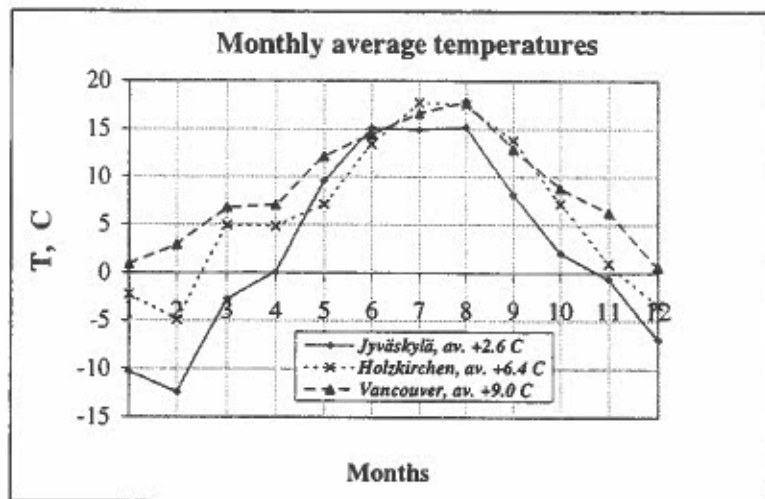
LÄHDELUETTELO

1. Kumaran, K. IEA/Annex24 (Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts). Final Report, Task 3, Material Properties. Leuven, 1996. 135 s.
2. Viitanen, H. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. The Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 1996.
3. Hukka, A. & Viitanen, H. A mathematical model of mold growth on wooden material. To be published in Wood Science and Technology (1997).
4. Ojanen, T., Kokko, E. & Pallari, M.-L. Tuulensuojan toimintaperusteet. VTT tiedotteita 1478. Espoo 1993. 125 s. + liitt. 24 s.
5. National Building Code of Canada 1995.
6. Ojanen, T., Salonvaara, M., Kohonen, R. & Nieminen, J., Kosteuden siirtyminen rakenteissa. Laskentamenetelmät. Espoo 1989. VTT Tutkimuksia 595. 102 s.
7. Ojanen, T. Specification of model TCCC2D. IEA/Annex 24, Reports SF-T1-91/02. 1991.
8. Ojanen, T., Kohonen, R., Kumaran, M. K. Modeling Heat, Air and Moisture Transport through Building Materials and Components. ASTM Manual Series MNL18, Moisture Control in Buildings, editor H.R. Trechsel. Philadelphia 1994. Ss. 18 - 34.
9. Hens, H. Task 1, Modelling, IEA/Annex 24 (Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts) Final Report, Vol 1, Leuven 1996, 90 s.
10. Salonvaara, M. & Karagiozis, A. Moisture Transport in Building Envelopes using an approximate Factorization Solution Method. Proceedings of the Second Annual Conference of the CFD Society of Canada. (Ed. James J. Gottlieb and C. Ross Ethier), Toronto, June 1-3, 1994.
11. Paajanen, L., Ritschkoff, A.-C. & Viitanen, H. Lämmöneristeiden merkitys rakennusten biologisissa vaurioissa. VTT Julkaisuja 791. Espoo 1994. 64 s. + liitt. 8 s.
12. Ojanen, T. & Kumaran, M. K. Air Exfiltration and Moisture Accumulation in Residential Wall Cavities. Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Fifth Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings Conference. Dec. 7-10, 1992, Clearwater Beach, Florida. Ss. 491 - 500.

TUULENSUOJALEVYJEN VESIHÖYRYNJOHTAVUUDET JA HAVUVANERIN SORPTIOKÄYRÄ



JYVÄSKYLÄN, HOLZKIRCHENIN JA VANCOUVERIN SÄÄTIEDOSTOJEN KUUKAUSIKESKIARVOT





Tekijä(t) Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki, Salonvaara, Mikael & Viitanen, Hannu		Projektin nimi Kevyet vaneripohjaiset puuelementtirakenteet, hygroteeminen toiminta ja rakennevaatimukset	
		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (TEKES), Suomen Puututki- mus Oy, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT)	
Nimeke Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet			
Tiivistelmä Vanerin käyttö rakenteiden lämmöneristeen ulkopinnan tuulensuojana on ollut Suomessa toistaiseksi vähäistä. Pohjois-Amerikassa lämmöneristeen ulkopuolisena kerroksena puurakenteissa käytetään yleisimmin OSB-levyä (oriented strand board). Muualla sovellettuja rakennusratkaisuja ei kuitenkaan ole syytä käyttää ilman niiden kosteusteknisten toimintaedellytysten selvittämistä. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää havuvanerin käytön kosteustekniset perusteet puurunkorakenteiden tuulensuojaa vastaavana kerroksena. Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitoisuuden funktiona ja vanerituulensuojan vaikutus rakenteen kuivumiskykyyn voimakkaissa kosteusrasituksissa eri ulkoilman lämpötiloilla. Laskennassa oli ensimmäistä kertaa käytössä homeen kasvun arviointiin soveltuva osa yhdistettynä lämmön- ja kosteudensiirron simulointiohjelmiin. Havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys kasvaa kosteassa tilassa 15–20-kertaiseksi kuivan tilan arvoihin nähden. Tuulensuojana vaneri läpäisee kosteutta sitä paremmin mitä suurempi on kosteuskuormitus. 9 mm:n havuvaneri täyttää homeen kasvun kannalta turvallisissa käyttöoloissa tuulensuojan vesihöyrynvastukselle Ruotsissa ja Norjassa asetetut vaatimukset. Havuvaneri on tuulensuojan käyttöoloissa OSB-levyä huomattavasti paremmin kosteutta läpäisevä. Höyrynsulun käyttö vanerituulensuojarakenteessa on Suomen ilmastossa suositeltavaa, vaikka rakenteen sisäpuolinen vastus voidaan mitoittaa diffuusion kannalta turvallisesti ilmankin. Höyrynsulku varmistaa rakenteen pitkäaikais-toimivuuden ja ilmatiiviyden. Jatkuva ilman ulosvirtaus vuotorakojen kautta aiheuttaa kosteusriskin kaikille rakenteille, joten sisäilman pääsääntöinen alipaineisuus on suositeltava myös nyt tutkituilla rakenteilla. Rakenteen kuivumisnopeutta voidaan olennaisesti parantaa tuulensuojan ulkopuolisen, tuuletusrakoon avoimen lisäeristyskerroksen avulla. 30 mm:n avohuokoinen lämmöneristekerros (esim. mineraalivillalevy) havuvanerituulensuojan ulko-pinnalla antaa rakenteelle saman kuivumiskyvyn kuin mikä on eristeen ulkopintaan asennetulla huokoisella kuitulevyllä. Rakenne on kosteusteknisesti toimiva, kun siinä on höyrynsulku (kylmässä ilmastossa) ja tuulensuojana on ulkoverhouksen ja tuuletusraon suojaama 9 mm:n havuvaneri. Tuulensuojan ulkopuolinen, ulkopinnaltaan avoin lisäeristys parantaa rakenteen toimintavarmuutta ja selviytymiskykyä yllättävistä kosteuskuormista.			
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT			
ISSN ja avainnimeke 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA - MEDDELANDEN - RESEARCH NOTES			
ISBN 951-38-5169-9		Kieli suomi, engl. tiiv.	
Luokitus (UDK) 674.81:69.022.3:543.81		Avainsanat external walls, plywood, windshields, moisture, thermal insulation	
Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374		Sivuja 90 s. + liitt. 2 s.	Hintaryhmä B



Author(s) Ojanen, Tuomo, Kokko, Erkki, Salonvaara, Mikael & Viitanen, Hannu	Name of project Kevyet vaneripohjaiset puuelementtirakenteet, hygrotellinen toiminta ja rakennevaatimukset Commissioned by Technology Development Centre (TEKES), Finnish Wood Research Ltd., Technical Research Centre of Finland (VTT)	
Title Moisture performance of plywood wall structures		
Abstract In Finland plywood is seldom used as an outer sheathing of the wall insulation, whereas in North America OSB (oriented strand board) is a typical outer sheathing board. Both plywood and OSB are wood and glue composite materials. Before applying structures used in other climates to our environmental conditions, their moisture performance should be closely studied. The objective of this research was to study the fundamentals of the moisture performance of structures having outer sheathing made of spruce plywood. Experiments were done to determine the vapour permeability of (spruce) plywood as a function of moisture content and the drying rate of plywood outer sheathing when exposed to different outside temperatures. In numerical simulations, mould growth was studied, for the first time, together with transient heat and moisture transfer models. Vapour permeability of wet plywood can be 15–20 times higher than that of the dry material. When the moisture content increases, also the drying effect of the plywood sheathing increases highly. 9 mm thick plywood made of spruce meets the Swedish and Norwegian requirements set for the vapour permeance of the outer sheathing layer. In the conditions that the outer sheathing layer is typically exposed to, plywood has significantly better vapour permeability than OSB. In Finnish climate, it is recommended to use a vapour retarder in the structures having plywood outer sheathing, even though the diffusive moisture loads from the indoor air could be kept low enough without one. The vapour retarder layer ensures the long-term vapour and air tightness of the structures. Continuous air exfiltration (indoor air flow out through the structure) causes a moisture risk to all structures in cold climates. It is recommended to maintain indoor underpressure to avoid convection caused high local moisture loads in the structures. The drying rate of a wall structure can be significantly increased by using exterior insulation made of vapour permeable porous material that is open to ventilation cavity. 30 mm thick mineral wool layer on the outer side of a 9 mm plywood sheathing improves the drying capacity of the wall to correspond to that of a wall with highly vapour permeable porous wood fibre board layer as outer sheathing. The moisture performance of a residential house wall structure in cold climates is safe when the wall has a vapour retarder, and the outer sheathing is made of 9 mm spruce plywood adjacent to a ventilated air space behind the siding. A vapour permeable exterior insulation open to the air cavity improves the drying capacity and moisture performance of the wall during accidental moisture loads.		
Activity unit VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland		
ISSN and series title 1235-0605 VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES		
ISBN 951-38-5169-9	Language Finnish, Engl. abstr.	
Class (UDC) 674.81:69.022.3:543.81	Keywords external walls, plywood, windshields, moisture, thermal insulation	
Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. + 358 9 456 4404 Fax + 358 9 456 4374	Pages 90 p. + app. 2 p.	Price group B

Julkaisussa selvitetään havuvanerin käyttöedellytykset rakenteen tuulensuojana. Kokeellisesti määritetään havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys ja vanerituulensuojan vaikutus rakenteen kuivumiskykyyn. Laskennallisesti tarkastellaan eri kosteuskuormitusten vaikutusta vanerirakenteen toimintaan käyttäen kriteereinä mm. homeen kasvuolosuhteiden esiintymistä. Vaneri läpäisee kosteutta sitä paremmin, mitä suurempi sen kosteuspitoisuus on. 9 mm:n havuvanerit täyttää tuulensuojan vesihöyrynvastukselle Ruotsissa ja Norjassa asetetut vaatimukset ja se soveltuu tuulensuojaksi myös Suomen ilmastossa. Höyrinsulku on vanerituulensuojarakenteessa suositeltava, sillä yhtenäinen kerros varmistaa rakenteen ilmatiiviiden. Rakenteen kuivumiskykyä voidaan olennaisesti parantaa tuulensuojan ulkopuolisen, tuuletusrakoon avoimen, avohuokoisen lisälämmöneristysen avulla. 30 mm:n mineraalivillalevy havuvanerituulensuojan ulkopinnalla antaa rakenteelle saman kuivumiskyvyn kuin mikä on eristeen ulkopintaan asennetulla huokoisella kuitulevyllä.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU	VTT INFORMATIONSTJÄNST	VTT INFORMATION SERVICE
PL 2000	PB 2000	P.O.Box 2000
02044 VTT	02044 VTT	FIN-02044 VTT, Finland
Puh. (09) 456 4404	Tel. (09) 456 4404	Phone internat. + 358 9 456 4404
Faksi (09) 456 4374	Fax (09) 456 4374	Fax + 358 9 456 4374

