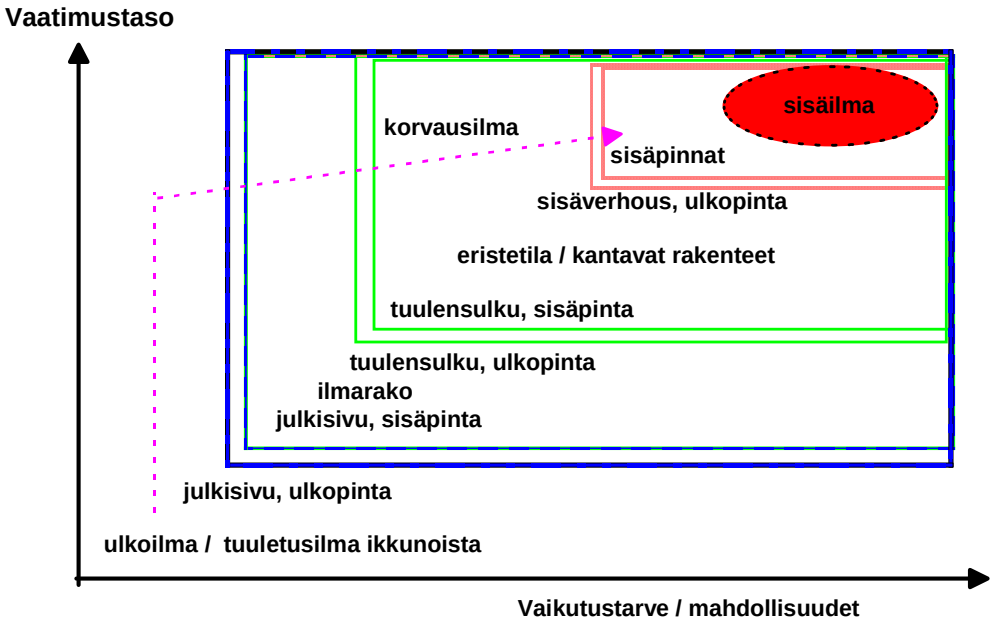
1991

VTT TIEDOTTEITA

Erkki Kokko, Tuomo Ojanen, Mikael Salonvaara,
Antti Hukka & Hannu Viitanen

Puurakenteiden kosteustekninen toiminta

Homekriiteeristö, tarkastelutasot rakenneosittain



VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS ESPOO 1999

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES 1991

Puurakenteiden kosteustekninen toiminta

Erkki Kokko, Tuomo Ojanen, Mikael Salonvaara, Antti Hukka & Hannu Viitanen

VTT Rakennustekniikka

VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS
ESPOO 1999

ISBN 951–38–5499–X
ISSN 1235–0605
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

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, (09) 456 4709

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

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

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Kokko, Erkki, Ojanen, Tuomo, Salonvaara, Mikael, Hukka, Antti & Viitanen, Hannu. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta [Moisture physical behaviour of wooden structures]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1991. 160 s.

Avainsanat wooden structures, moisture, mold, fungi, indoor climate, carbon dioxide, vapor barrier, air barrier, construction, mass transfer, physical properties

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa analysoidaan puurakenteiden kosteusteknistä toimintaa sekä tarkastellaan rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutuksia huoneilman kosteuden ja hiilidioksidipitoisuuden kannalta. Tavoitteena on määritellä aikaisempaa täsmällisemmin kosteustekniset toimintavaatimukset rakenteiden eri kerroksille. Tutkimuksessa mallinnetaan myös puupintojen homeen kasvu ja esitetään alustava kriteeristö homevaurioille.

Lämpö- ja kosteusteknisiä rakenneanalyyseja varten on koottu ilmastotiedot kaikista Suomen rakennusviennin kannalta kiinnostavista kohdemaista sekä esitetään asuin- ja toimistohuoneille kosteusteknisesti mitoittava sisäilmasto. Tämä mahdollistaa rakenteiden lämpö- ja kosteustekniset rakenneanalyysit viennin tarpeisiin.

Suomen ulkoilmastolle on tyypillistä, että ulkoilmaan kosketuksessa olevissa puupinnoissa voi käynnistyä homeen kasvu syksyisin, kun lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat riittävän korkeat. On ilmeistä, että useimmista rakennuksista materiaalista riippumatta löytyy vähäistä kasvua rakenteiden kylmistä osista. Tähän ei tarvita kosteusteknistä virhettä eikä huoneilman kosteutta. Tutkimustuloksena esitetään homeen kasvun kriteeristö, joka realistisesti hyväksyy edellämainitun, mutta ei kosteusvaurioita.

Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan ainekerroksen höyrynvastuksen tulee olla viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevaan ainekerrokseen. Rakenteisiin tulee tehdä toimiva ilmansulku rakennuksen painesuhteiden hallitsemiseksi ja huoneilman vesihöyryn konvektion haitallisuuden välttämiseksi. Lattian maanvastaisen laatan yläpuolinen lämmöneristys heikentää rakenteen kuivumiskykyä.

Huoneilman kanssa vuorovaikutteinen hygroskooppinen puumateriaali vaimentaa huoneilman kosteuden vaihtelua muuttuvissa kuormitusoloissa. Ilmiöllä on merkitystä hellekausina, kun huoneilman kosteus on luonnostaan korkea. Termisesti massiivinen puu vaimentaa myös vuorokautista lämpötilavaihtelua, kun auringon säteilykuormitus vaihtelee. Mainituilla ominaisuuksilla saattaa olla Suomeen verrattuna enemmän merkitystä mm. Keski-Euroopan säässä.

Kokko, Erkki, Ojanen, Tuomo, Salonvaara, Mikael, Hukka, Antti & Viitanen, Hannu. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta [Moisture physical behaviour of wooden structures]. Espoo 1999. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1991. 160 p.

Keywords wooden structures, moisture, mold, fungi, indoor climate, carbon dioxide, vapor barrier, air barrier, construction, mass transfer, physical properties

ABSTRACT

In this research the moisture physical behaviour of wooden structures has been analysed and the interactions concerning humidity and carbon dioxide mass transfer between indoor air and structures has been studied. The aim of this research was to define exactly the moisture physical requirements and criteria for different layers in structures. A model and a solution method to simulate mold growth have been developed and a preliminary criteria for mold damages has been presented. For the hygrothermal analyses of structures the climatic data from all the important export countries of the Finnish construction industry have been collected and a dimensioning indoor climate for residential and office buildings has been created. This makes possible the hygrothermal analyses for export purposes.

In the Finnish climate it is typical that mold growth can begin in the autumn on the wooden surfaces in contact with outdoor air, when the temperature and relative humidity are high enough. The results show that, in most buildings, minor mold growth can be found in cold parts of structures regardless of the materials used. No moisture physical defect or effect of indoor humidity is needed. As a result a realistic criteria for mold damage which accepts the above mentioned fact but not moisture damage is given.

The water vapour resistance of the material layer on the warm side of a open porous thermal insulation layer must be five times higher than that on the cold side. It is necessary to have a genuine air barrier in the envelope in order to be able to control the pressure conditions in buildings and to avoid the harmful water vapour convection from indoor air to the envelope. Thermal insulation above the ground slab degrades the drying capability of the structure.

Hygroscopic wooden material in interaction with indoor air will dampen the variation of indoor air humidity when moisture load is varying. This phenomenon can be significant in warm seasons, when the indoor relative humidity is high. Thermally massive wood dampens down the diurnal indoor temperature variation caused by the varying solar radiation load. These properties can be more important in Central Europe than in Finland.

ALKUSANAT

Projekti “Puurakenteet; lämpö- ja kosteustekninen toiminta ja sisäilmastovaikutukset” on osa Teknologian kehittämiskeskuksen, Tekesin rahoittamaa Puurakentamisen teknologiaohjelmaa. Muita rahoittajia ovat olleet Suomen Puututkimus Oy, Partek Paroc Oy Ab, Termex-Eriste Oy, Isover Oy, Ekovilla Oy, Honkarakenne Oy ja Suomen Selluvilla Oy.

Tässä julkaisussa esitetään aikaisempaa täsmällisemmin kosteustekniset toimintavaatimukset kerroksellisille puurakenteille sekä ensimmäinen versio kriteeristöksi arvioitaessa rakenteissa esiintyvää homeen kasvua. Kehitetty homeen kasvun simulointimenetelmä on uusi aluevaltaus. Mielenkiintoisia ovat myös puurakenteiden ja sisäilman vuorovaikutukset sekä lämpö- että kosteusteknisessä mielessä. Tutkimus tarjoaa uusia ideoita ja argumentteja puurakentamisen kehittämiseen sekä rakennustuotteiden vientiin.

Tutkimuksen johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut Keijo Kolu, Schauman Wood Oy Ab. Muita jäseniä ovat olleet Pekka Peura (ohjelmapäällikkö), Pekka Nurro (Suomen Puututkimus Oy), Keijo Rautiainen (Termex-Eriste Oy), Juha Krankka (Partek Paroc Oy Ab), Reino Saarelainen (Honkarakenne Oy), Aulis Karilahti ja Juha Ryyppö (Isover Oy), Raimo Ahokas (Ympäristöministeriö), Aki Hakala (Tekes) ja Juho Saarimaa (VTT Rakennustekniikka).

Tutkimus tehtiin VTT Rakennustekniikassa. Projektipäällikkönä toimi fil. maist. Erkki Kokko (luvut 3.5, 4, 5.3 ja 7) ja muina päätutkijoina dipl. ins. Tuomo Ojanen (luvut 5.1, 5.2 ja 5.4), dipl. ins Mikael Salonvaara (luvut 2 ja 6), fil. tri Hannu Viitanen (luvut 3.1, 3.2, 3.3 ja 3.4) ja dipl. ins. Antti Hukka (luku 3.3).

Kiitämme kaikkia tutkimustyön suorittamisessa avustaneita henkilöitä ja tahoja. Erityisen kiitoksen lausumme johtoryhmälle, joka aktiivisesti toimien ohjasi työn kulkua ja vaikutti myönteisesti sen sisältöön.

Espoo, elokuu 1999

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ……3
ABSTRACT……4
ALKUSANAT……5

1 JOHDANTO 9

2 MITOITTAVA SISÄ- JA ULKOILMASTO 11
2.1 JOHDANTO JA TAUSTA.....11
2.2 NYKYISIN KÄYTÖSSÄ OLEVAT YMPÄRISTÖOLOSUHTEIDEN MITOITUSTIEDOT 12
2.3 MITOITTAVAN SISÄ- JA ULKOILMASTON MUODOSTAMINEN.13
2.3.1 Standardi sisäilmaston muodostaminen 13
2.3.2 Sisäilmastosuositukset 14
2.3.3 Koetalomittaukset: ESPI 1 ja 2, kerrostalot 14
2.3.4 Eurooppalainen sisäilmastoluokitus.....16
2.3.5 Ulkoilmastotiedostojen hankinta.....16
2.3.6 Ulkoiset kosteuslähteet 16
2.4 MITOITUSREUNAEHDOT RYÖMINTÄTILOILLE 17

3 PUUN HOMEHTUMINEN JA VAURIOITUMINEN 23
3.1 PUUMATERIAALIN OMINAISUUDET JA KESTÄVYYS 23
3.1.1 Puumateriaalin kestävyyteen vaikuttavia tekijöitä 23
3.1.2 Kosteuden vaikutus puuhun 25
3.2 PUURAKENTEIDEN BIOLOGINEN RASITUS JA TURMELTUMINEN 27
3.2.1 Rasitusten vaikutukset.....27
3.2.2 Vauriotilanteet.....30
3.2.3 Vaurioiden aiheuttajat 32
3.2.4 Ongelmien syntyyn vaikuttavat olot.....34
3.3 HOMEEN KASVULLE KRIITTISTEN OLOSUHTEIDEN MALLINTAMINEN 36
3.3.1 Lähtökohdat.....36
3.3.2 Homeen kasvulle suosiollinen alue 37
3.3.3 Malli kasvulle suosiollisissa muuttuvissa oloissa 39
3.3.4 Kuivan ajan vaikutus.....39
3.3.5 Lämpötilavaihtelun vaikutus 41
3.3.6 Materiaalin vaikutus.....41
3.3.7 Mallin ja kokeiden vertailu 41
3.4 HOMEEN KASVUN KRITEERISTÖ JA HOMEVAURION TUNNUSMERKISTÖ 42

3.4.1 Tausta 42
3.4.2 Homeen kasvu, sen arvioiminen ja homekriteeristön perusteet 43
3.4.3 Mikrobi- tai homekasvun hyväksyttävyyden rajat normaalioloissa 46
3.4.4 Rakennuskosteuden ja rakenteiden satunnainen kastumisen aiheuttama homehtuminen 51
3.5 HOME ULKOILMAAN RAJOITTUVISSA PUUPINNOISSA - KENTTÄTUTKIMUS 51
3.5.1 Kenttätutkimuksen lähtökohdat 51
3.5.2 Tavoitteet 52
3.5.3 Tutkimuksen suoritus 52
3.5.4 Tulokset 55
3.5.5 Tulosten tarkastelu 56

4 HÖYRYN- JA ILMANSULKUMATERIAALIT 57
4.1 OHUET KALVOT JA PAPERIT 57
4.2 RAKENNUSLEVYT 59

5 HYGROTERMISET RAKENNEANALYYSIT 61
5.1 VESIHÖYRYN DIFFUUSION MERKITYS PUURAKENTEISSA 61
5.1.1 Diffuusitarkastelun tavoitteet 61
5.1.2 Laskennan periaatteet 61
5.1.3 Laskennassa analysoidut tapaukset 62
5.1.4 Tarkastelun kriteerit 64
5.1.5 Tulokset ja niiden analysointi 65
5.1.6 Yhteenveto diffuusiotarkasteluista 77
5.2 VESIHÖYRYN KONVEKTION LASKENNALLINEN TARKASTELU 78
5.2.1 Konvektiotarkastelun tavoitteet 79
5.2.2 Homeen kasvuedellytykset puumateriaaleissa /45 - 46/ 79
5.2.3 Ilman ulosvirtauksen pelkistetty analysointimenetelmä XFILT 79
5.2.4 Laskennassa analysoidut tapaukset 80
5.2.5 Tulokset ja niiden tarkastelu 81
5.2.6 Tulosten arviointi ohjelmalla TCCC2D 83
5.2.7 Yhteenveto ilman ulosvirtauksesta 84
5.3 KOSTEUSTEKNISET LABORATORIOKOKEET 86
5.3.1 Kokeiden tarkoitus 86
5.3.2 Koejärjestely 86
5.3.3 Koesuoritus 91
5.3.4 Koetulokset 93
5.4 RAKENTEIDEN KUIVUMINEN 105
5.4.1 Tuulensuojan ulkopuolinen lämmöneristys 105

5.4.2 Maanvaraisen alapohjarakenteen kuivumiskyvyn laskennallinen tarkastelu 106

6 RAKENTEIDEN VAIKUTUS SISÄILMAAN 120

6.1 JOHDANTO 120

6.2 LASKENNALLISET ANALYYSIT 121

6.2.1 Simuloinneissa käytetyt laskentamallit 121

6.2.2 Laskentamallin verifiointi pienimittakaavaisilla kenttäkokeilla 121

6.2.3 Pienimuotoisten koetalojen seinärakenteiden kosteuspitoisuudet 123

6.2.4 Hiilidioksidin absorptio rakenteisiin ja diffuusio rakenteiden läpi 126

6.2.5 Sisäilman suhteellinen kosteus 131

6.2.6 Massiivisen hirsirakenteen käyttäytyminen 134

7 JOHTOPÄÄTÖKSET 138

7.1 HÖYRYNSULKU 138

7.1.1 Käsitteitä ja määritelmiä 138

7.1.2 Höyrynsulun vaatimukset 139

7.2 ILMANSULKU 141

7.2.1 Käsitteitä ja määritelmiä 141

7.2.2 Ilmansulun vaatimukset 142

7.3 RAKENTEEN KUIVUMISKYKY 143

7.4 HOMEVAURION KRITEERISTÖ 145

7.5 PUUMATERIAALIEN SISÄILMAVAIKUTUKSET 147

8 YHTEENVETO 149

LÄHDELUETTELO 157

1 JOHDANTO

Rakennusten kosteusongelmat ja niiden välttäminen on ollut viimeisten vuosien kestopuheenaihe rakennusalan ammattijulkaisuissa ja laajasti myös muussa julkisessa keskustelussa. Nykyisessä rakennuskannassa todettujen ongelmien syyt ovat moninaiset ja niiden määrä sekä haitat ilmeisen suuria. Erityisesti kosteuteen liittyvä home terveysriskeineen on puhuttanut suomalaisia.

Tilanteen parantamiseksi tarvitaan toimenpiteitä, joilla kehitetään aikaisempaa paremmin toimivia rakenne- ja taloteknisiä ratkaisuja sekä suunnittelun, rakentamisen ja rakennusten käytön menetelmiä. Ei riitä se, että tiedetään asioista, vaan tieto on myös otettava käyttöön. Kysymys on sekä osaamisesta että toimintakulttuurista.

Tämän tutkimus toteuttaa osaltaan tekijöidensä hahmottamaa strategiaa, jolla on tarkoitus muovata rakentamista ja sen prosesseja nykyistä laadukkaamman tuloksen saamiseksi. Strategian toteutukseen kuuluu osaamisen kehittämiseen, uuden tiedon tuottamiseen, teknologian siirtoon ja laatujarjestelmien kehittämiseen tähtääviä osia. Tämä tutkimus sisältää kahteen ensin mainittuun alueeseen kuuluvia kohtia.

Tutkimuksessa haetaan realistista käsitystä rakennuksissa esiintyvän homeen kasvun ymmärtämiseen. On ollut tarve täsmentää luonnollisen - ilmastollisista tekijöistä johtuvan homeen kasvun - ja varsinaisten kosteusvaurioista johtuvien kasvustojen ero. Rakennusten täydellinen homeettomuus on pikemminkin illuusio kuin realistinen tavoite. Tarvitaan käytännölliset kriteerit hyväksyttävän ja hylättävän tilanteen erottamiseksi.

Rakenteiden kosteusongelmien välttämiseksi on syytä tuntea rakenteiden kosteustekniset toimintaperiaatteet. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan erityisesti vesihöyryn diffuusion ja konvektion aiheuttamaa uhkaa sekä rakenteiden hyvän kuivumiskyvyn merkitystä. Rakenteen eri kerroksille tulisi osata asettaa vaatimukset myös kosteusteknisen toimivuuden näkökulmasta. Saatava tieto tulee saattaa suunnittelijoiden ja viranomaisten tietoon. Tähän on ollut erinomainen mahdollisuus sekä Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan C2 “Kosteus” Määräykset ja ohjeet että Suomen Rakennusinsinöörien liiton julkaisun RIL 107 “Rakennusten veden ja kosteudeneristys” uudistamisen yhteydessä. Kosteusteknisessä mitoituksessa ja suunnittelussa tulee ottaa huomioon varmuusnäkökulma. Tässä tutkimuksessa esitetään tavanomaisten rakennusten sisäilmasto soveltaen riittäväksi katsottua varmuustekijää. Täten analyysitulokset eivät edusta rakenteiden “keskimääräistä toimintaa” vaan toimintaa, johon verrattuna rakenteet pysyvät kuivempina kohtuullisen suurella varmuudella.

Myös rakennusvienti asettaa vaatimuksia kosteusteknisen osaamisen suhteen. Rakennusten ja rakenteiden tulee toimia rakennuspaikan sääoloissa, jotka usein poikkeavat Suomen ilmastosta. Vientiyritysten palvelemiseksi tarvitaan yksityiskohtaiset ilmastotiedot vientimaista, jolloin on mahdollista analysoida rakenteet ja vält-

tää periaatteeliset virheet kosteusteknisessä suunnittelussa. Tämä tutkimus parantaa olennaisesti valmiuksia myös tässä suhteessa.

Puun ja puupohjaisten rakennusaineiden hygroskooppisuus on aina ollut kiinnostava aihe. Tämä liittyy keskusteluun ns. “hengittävistä rakenteista”, mikä tarkoittanee sitä, että rakenteilla ja huoneilmalla on jonkinlainen vuorovaikutus lämmönsiirron lisäksi myös aineensiirtona. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan sekä huoneilman kosteuden että hiilidioksidin siirtymistä rakenteisiin muuttuvissa kuormitustilanteissa. Ajatuksena on löytää uusia fysikaalisia argumentteja puun ja puupohjaisten materiaalien käytön puolesta.

2 MITOITTAVA SISÄ- JA ULKOILMASTO

2.1 JOHDANTO JA TAUSTA

Olennaisen osan rakennusten lämpö- ja kosteusteknisissä analyyseissä muodostavat käsiteltävänä olevan rakennuksen sisä- ja ulkoilman olosuhteet. Näitä tietoja voidaan nimittää yhteisesti ilmasto-olosuhteiksi. Ilmasto-olot määrittäviä parametrejä on lukuisia. Ulkoilman tiedoista tärkeimpiä lämmön- ja kosteuden siirron laskentaohjelmien kannalta ovat:

- Lämpötila
- Kosteus
- Auringon säteily
- Pitkäaaltoinen lämpösäteily
- Tuulen nopeus ja suunta
- Kokonaispaine ja paineen ero
- Sademäärä

Joitakin näistä on saatavilla useista kohteista ja kaupungeista ympäri maailmaa, mutta joidenkin parametrien mittaaminen on vaikeaa ja kallista eikä niitä ole näin saatavilla yhtä laajalti - jos ollenkaan.

Rakennusten ja rakenteiden lämpöteknisen toiminnan kannalta joidenkin näiden parametrien tunteminen päivä-, viikko tai jopa kuukausikeskiarvona voi olla riittävää rakenteen hyväksyttävän toiminnan arvioimiseksi. Toisaalta esimerkiksi viistosateen aikana olisi usein tarpeen tietää tuulen puuskat ja ilmavirtaukset rakennuksen eri osissa yksityiskohtaisesti sekuntien aikaskaalalla.

Arvioitaessa rakenteen lämpöteknistä toimintaa kesäkuukausina ei ole kovin merkittävää tietää, miten rakenne on toiminut tammikuussa. Sen sijaan rakenteen kosteustekninen toiminta riippuu myös rakenteen historiasta: talviaikana rakenteeseen kertynyt ja sinne mahdollisesti jäätynyt kosteus alkaa usein aiheuttaa ongelmia vasta sulaessaan keväällä.

Yksinomaan meteorologinen säätiedosto ei riitä kuvaamaan rakennuksen ympäristöoloja. Rakennus itse ja sitä ympäröivät muut rakennukset, luonnonesteet ja kasvillisuus luovat rakennuksen ympärille mikroilmaston, joka voi olla hyvin erilainen kuin mitä samalla paikkakunnalla oleva ilmatieteen laitoksen sääaseman keräämä tieto osoittaa.

Rakennusten lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan arvioimiseen on tarpeen määrittää jonkinlaiset mitoittavat olosuhteet esimerkiksi vuotuisen säätiedoston muodossa. Mitoittavia sääolosuhteita tarvitaan useampia kuin yksi. Rakenteen lämpöteknisen käyttäytymisen arviointiin tarvittavat sääolot voivat olla hyvinkin erilaiset kuin hyväksyttävän kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisimmät olot.

Mitoittavien säätietojen esiintymistodennäköisyyden tulisi vastata rakenteen odotettua käyttöikää (ilman suurempia vaurioita).

Rakenteiden lämmön ja kosteuden siirron analyysien päämääränä on tuottaa vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

Teoreettisten mallien kehitys ja testaus

'Täydelliset' realistiset mallit, jotka mallintavat esimerkiksi viistosateen ja ilmavirrat rakenteessa, tarvitsisivat säätietoja erittäin lyhyin aikavälein.

Vika-analyysit ja korjaustoimenpiteiden suunnittelu

Tässä tilanteessa tarkasteltavat parametrit riippuvat vian luonteesta - sadevesivuoto tarvitsee sademäärän ja tuulen säätietoja - veden kondensoituminen kattorakenteisiin edellyttää tietoja sisäilman lämpötiloista ja kosteudesta sekä ulkoilman lämpötilasta ja auringon säteilytietoja. Jos mitattua tietoa ei ole saatavilla, on ympäristöolosuhteet arvioitava lähimpien sääasemien tietojen sekä samanlaisista rakennuksista koottujen kokemusten perusteella.

Uusien rakennusten suunnittelu

Rakenteiden suunnittelussa tulisi käyttää rakenteissa esiintyviä maksimaalisia hygrotermisiä kuormia. Koska tulevaisuutta ei kuitenkaan voida ennustaa, on tulevaisuuden sää (niin ulko- kuin sisäilman olosuhteet) ennustettava tilastollisin menetelmin menneinä aikoina koetuista sää- ja ilmasto-olosuhteista. Koska lämpö- ja kosteusteknisten ongelmien aiheuttamat vauriot rakenteissa ovat harvoin katastrofaalisia, on ehkä tarpeetonta valita mitoittaviksi olosuhteiksi ilmastotietoja, joiden esiintymistodennäköisyys on kerran 50 tai 100 vuodessa (kuten rakenteiden lujuusmitoituksessa kovien tuulien sietokyvyn suhteen). IEA Annex 24:ssä arvioitiin, että kerran kymmenessä vuodessa on riittävä mitoituskriteeri: huonona vuotena rakenteeseen kertyneelle kosteudelle jää riittävästi aikaa kuivua ulos rakenteesta aiheuttamatta rakenteen rappeutumista.

2.2 NYKYISIN KÄYTÖSSÄ OLEVAT YMPÄRISTÖOLOSUHTEIDEN MITOITUSTIEDOT

Monissa maissa on käytössä enemmän tai vähemmän hienostuneet menetelmät mahdollisten rakenteiden ja rakennusten kosteusvaurioiden arvioimiseen. Näissä menetelmissä tarvittavat sisä- ja ulkoilman olosuhteet on määritelty joko kansallisissa standardeissa tai rakennusmääräyksissä tai vastaavissa. Mitoittavien ulko- ja sisäilmaston yksityiskohtaisuudessa ja määrässä on huomattavia eroja eri maitten välillä. Joissakin on annettu vain yksi ulkolämpötilan arvo tai kuukausittaiset keskiarvot lämpötilalle ja kosteudelle. Yksityiskohtaisimmissa määritellään myös auringon säteilytehot, tuulen nopeudet ja suunnat sekä viistosade. Suomen kohdalla tilanne on heikoimmasta päästä. Suomessa mitoitusoloja annetaan vain lämpöhäviöiden laskentaan - kosteuden suhteen ei ole olemassa selkeitä mitoitusarvoja. Standardimenettelyjen kirjavuus eri maiden välillä osoittaa toisaalta myös sen, kuinka vaikeata rakenteille on asettaa mitoittavia olosuhteita kosteuskäyttäytymisen arvioimiseksi. Ei myöskään riitä, että on tiedossa ympäristöolosuhteet: on ol-

tava myös menetelmä, esimerkiksi laskentaohjelma, jossa näitä tietoja voidaan käyttää. Siltä osin Suomen kohdalla tilanne on ainakin tutkimuksellisesti maailman kärkitasoa /1/.

2.3 MITOITTAVAN SISÄ- JA ULKOILMASTON MUODOSTAMINEN

Mitoitusolosuhteiden määrittelyssä keskitytään asuinrakennuksiin. Kosteusteknin-en varmuus asetetaan sisäilmastoon. Ulkoilmastona käytetään mitoittavana säänä Jyväskylän energiankulutuslaskentaan tarkoitettua säätiedostoa vuodelta 1979, Oulun pohjoispuolella voidaan tarvita tarkistus Sodankylän säällä (vrt. AT-luvut : Jyväskylä 4952, Oulu 5174, Sodankylä 6319)

Rakennuksen painesuhteet valitaan siten, että neutraalitaso asetetaan lattian tasolle, jolloin saadaan painesuhteet lämpötilavaikutusten mukaan suurimmiksi ja kriittisimmiksi (ilmavuodot); tuulen vaikutus oletetaan lyhytaikaiseksi ja itsensä kumoavaksi (sekä hyvä että huono, sisään/ulosvirtaus)

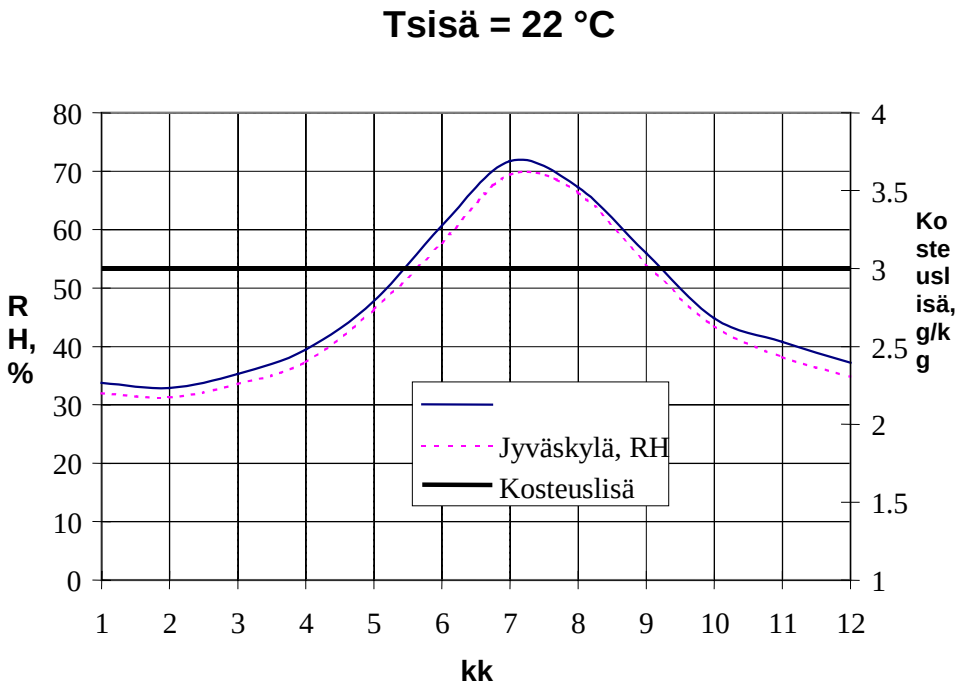
2.3.1 Standardi sisäilmaston muodostaminen

Kosteuskuormat rakennuksissa ovat taulukoiden 2.1 ja 2.2 mukaisia. Keskimääräisessä perheessä oletetaan olevan 2 aikuista ja 2 lasta.

Sisälämpötila	=	maksimi (22 °C, T_{ulko} +3 °C)
Kosteus	=	ulkoilma + 4,0 g/m^3 (= 3,3 g/kg)

- vastaa n. 14,4 kg/pv (600 g/h) kosteuskuormaa 120 m^2 talossa huonekorkeudella 2,5 m ja ilmanvaihtoluvulla n = 0,5 1/h

Kuukausikeskiarvoista laskien sisäilman suhteelliseksi kosteudeksi tulisi kosteuslisällä 3 g/kg kuvan 2.1 mukaan



Kuva 2.1. Sisäilman suhteellinen kosteus ulkoilman kosteuspitoisuuden ja kosteuskuorman funktiona. Kuukausikeskiarvoja.

2.3.2 Sisäilmastosuositukset

Sisäilmastoyhdistys on määritellyt tavoite- ja suunnitteluarvot sisäilman lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle terveyden ja viihtyisyyden näkökohdista lähtien /2/. Raportissa mainitaan **sisäilmaston suunnitteluarvoiksi** laatuluokassa S1 (tyytyväisten osuus esimerkiksi lämpötilan suhteen 90 %)

- talvella 21 °C, 25 %
- kesällä 25 °C, 60 %

Sisäilmaston **tavoitearvot** ovat vastaavasti

- talvella 21 - 22 °C, 25 - 45 %
- kesällä 22 - 25 °C, 30 - 60 %

2.3.3 Koetalomittaukset: ESPI 1 ja 2, kerrostalot

ESPI-taloissa (Energiaa Säästävät PIentalot) on mitattu keskimäärin seuraavat kosteuslisät ulkoilmaan nähden: ESPI 1<1,5 g/kg, ESPI 2 ≈ 2,3 g/kg (=2,8 g/m^3). ESPI 2:ssa ilmanvaihto on ollut melkein aina vakiona ja noin 0,5 1/h, kun talossa 1 ilmanvaihto on vaihdellut huomattavasti enemmän ja ollut keskimäärin suurempi. Molemmissa taloissa oli kaksi aikuista ja kaksi lasta. ESPI 2:ssa oleskeltiin myös päivisin /4/.

Kerrostalomittauksissa (neljä kohdetta) kolmessa huoneistossa kosteuslisä loka-joulukuussa 1995 oli keskimäärin alle 2 g/kg, mutta yhdessä jopa 5,7 g/kg. Huoneistossa oli keskimääräinen suhteellinen kosteus ko. ajanjaksolla 60 %, huipussaan jopa 90 %. Todennäköinen syy oli vähäinen ilmanvaihto.

Taulukko 2.1. Kosteuden tuotto asuinrakennuksissa.

Kosteuslähde	Tuotto
Ihminen	40 - 300 g/h riippuen aktiviteetista (keskimäärin 90 g/h)
Kylpy	700 g/h
Suihku	2600 g/h
Keittiötoiminta	600 - 1500 g/h
	(päivittäinen keskiarvo noin 100 g/h)
Avoin vesipinta	40 g/m^{2}h
Kasvit	
- pienet kasvit	7 - 15 g/h
- keskikokoiset	10 - 20 g/h (esim. Ficus elastica)
Vaatteiden pesu ja kuivaus	
- lingottu pyykki	10 - 50 g/h /kg, kuivaa pyykkiä
- vettä tippuva	20 - 100 g/h /kg, kuivaa pyykkiä
Kuivauksen kesto ja kokonaiskosteus otettava huomioon	

Kokonaisuutena kosteuden tuotossa on mittausten perusteella suurta hajontaa, jos kriteeriksi otetaan vain asukasluku. Kaksilapsinen perhe tuottaa erään lähteen mukaan 5 - 10 kg kosteutta päivässä huoneilmaan, kun toisen lähteen mukaan tuotto on 23,1 kg. Keskimäärin eri lähteistä on saatu taulukon 2.2 mukaiset tuottomäärät asukasluvun funktiona.

Taulukko 2.2. Kosteuden kokonaistuotto asuinrakennuksissa lasten lukumäärän funktiona. Oletusarvona 2 aikuista.

Lasten lkm	Kosteuden tuotto
0	8 kg/d = 350 g/h
1	12 kg/d = 500 g/h
2	14 kg/d = 580 g/h
>2	15 kg/d = 630 g/h

Kun kosteuden tuotto on kohtuullisen tasaisesti jakautunut ja tasoltaan alhainen, on ilman kosteuspitoisuus yleensä tasainen (absoluuttinen kosteus, suhteellinen kosteus voi vaihdella lämpötilan vaikutuksesta). Suurien hetkellisten kosteuden-

tuottojen (esim. keittiön kosteuslähteet) aikana ilman kosteus on usein suurempi katon rajassa - jopa kaksinkertainen lattian rajaan nähden. Tämä johtuu kiehumispisteessä olevan kosteuden keveydestä ilmaan nähden.

Kosteuden siirtyminen ja sekoittuminen huoneiden ja ilmatilojen välillä voi olla nopeaa, sillä esimerkiksi avoimen oven kautta voi 1K lämpötilaeron aiheuttamana kulkea ilmaa 100 l/s.

2.3.4 Eurooppalainen sisäilmastoluokitus

Sisäilman vaatimustasojen arvioimisen avuksi on luotu käsite *sisäilmastoluokka* (Indoor Climate Class, ICC), jota on laajalti käytetty Keski-Euroopassa, erityisesti Belgiassa ja Alankomaissa. Rajapinnat sisäilmastoluokkien välillä määrittävät suurimman sallitun sisäilman vesihöyryn osapaineen, millä kondenssia alkaa esiintyä ja kertyä määrätyissä vertailurakenteissa. Nämä rakenteet on suunniteltu siten, että ne edustavat vaurioalttiita rakenteita siten, että ne ovat avoimia höyryn liikkeelle sisäilman ja rakenteen välillä, mutta höyrytiiviitä ulkoilmaan nähden. Sellaiset rakenteet eivät edusta todellisia käytännön rakenteita kylmän ilmaston oloissa muuta kuin virherakenteissa.

IEA Annex 24:ssä päädytty seuraaviin luokitusrajoihin ns. Pivot-pisteisiin, jotka erottavat neljä sisäilmastoluokkaa:

PIVOT 1 : Suurin sallittu sisäilman vesihöyryn osapaine ennen kuin kondenssia alkaa tammikuussa esiintyä pohjoissuuntaan olevassa seinässä

PIVOT 2 : Suurin sallittu sisäilman vesihöyryn osapaine ennen kuin vuotuista kosteuskertymää alkaa esiintyä pohjoissuuntaan olevassa seinässä

PIVOT 3 : Suurin sallittu sisäilman vesihöyryn osapaine ennen kuin vuotuista kosteuskertymää alkaa esiintyä tasakatossa

Nämä pivot-arvot eivät ole eikä niitä tule pitää sisäilmastovaatimuksina käytännön rakenteiden toimintaan. Niiden hyötykäyttönä voidaan ajatella esimerkiksi tietyn rakenteen toimivuusalueen arviointia: toimiiko Pariisiin suunniteltu rakenne Brysselissä? Pika-arviointi voidaan suorittaa näiden Pivot-arvojen perusteella.

2.3.5 Ulkoilmastotiedostojen hankinta

Ulkomailta (Euroopasta) on hankittu 31 EC:n test reference year (TRY) säätiedostoja, jotka on luotu useiden vuosien tiedostoista kuvaamaan keskimääräistä säätä lämpöteknisiä laskelmia varten. Yhdysvalloista on saatavissa 51 paikkakunnan TRYt, joista kahdeksan on jo käytettävissä. Japanista on saatu CD-levyllä säätietoja, jotka sisältävät myös sadetietoja. Lista hankituista säätiedostoista on taulukossa 2.3.

2.3.6 Ulkoiset kosteuslähteet

Ulkoisista rakenteisiin tulevista kosteuslähteistä viistosade jätetään toistaiseksi tässä tutkimuksessa käsittelemättä. Aihe on itsessään kokonaisen erillisen

tutkimuksen arvoinen. Kosteusvuotojen vaikutusta tarkastellaan alkukosteuden kuivumisen kannalta: selviääkö rakenne ja missä ajassa yksittäisestä vuodosta tai rakentamisen aikana syntyneestä alkukosteudesta (esim. puu: paikallinen vaurio 50 %-p, kuivumismahdollisuudet; hirsiseinän sauman kastuminen). Tätä tarkoitusta varten voidaan luoda keinotekoinen saderasitussää ja tarkastella esim. halkeilleen maalipinnan käyttäytymistä ja vaikutusta rakenteen kokonaistoimintaan.

2.4 MITOITUSREUNAEHDOT RYÖMINTÄTILOILLE

Maaperän mitoituslämpötila ja kosteus ryömintätilaisessa alapohjassa päätettiin asettaa seuraavassa esitettyjen kriteerien pohjalta. Esitettäviä arvoja suositellaan käytettäväksi rakenteen toiminnan arvioinnissa yksinkertaistetuilla laskentamenetelmillä. Ryömintätilan toiminnan tarkempi arviointi edellyttää 2- tai 3-dimensioisen laskennan mahdollistavien ohjelmien käytön. Tällöin suositellaan mallinnettavan rakenneosan ulottamista maaperään saakka ja rajoittamista ulkoilmaan, jolloin ulkoisina reunaehtoina voidaan käyttää seinien mitoitussäätä.

Oletuksena on, että maaperä ja olosuhteet rakennuksen ympärillä voivat olla hyvin tapauskohtaisia (maaperä epähomogeenista, maanpinnan tasaisuus ja vietto, kosteuslähteet ja varjostukset jne). Lähtökohdaksi asetettiin

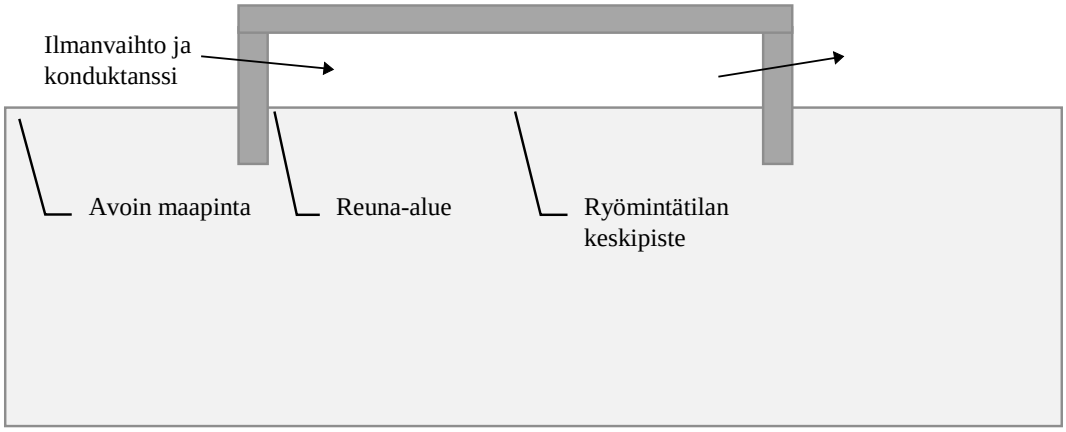
- homogeeninen maaperä
- suhteellinen kosteus maan pinnassa 90 % (lammikoita ei sallita, valumavedet on johdettava pois)

Maan lämpötilakäyttäytymistä ryömintätilaisessa maapohjassa arvioitiin 2-dimensioisen lämmön ja kosteuden siirron laskentaohjelman LATENITE avulla laskemalla lämpötilat rakennuksen alla olevassa maaperässä käyttäen ulkoisina reunaehtoina mitoittavaa ulkoilman säätiedostoa (Jyväskylä 1979).

Laskennassa käytettiin kolmea eri tyyppistä maaperää: savi tai hiesu, moreeni ja kallio. Kaaviokuva lasketuista tapauksista on esitetty kuvassa 2.2.

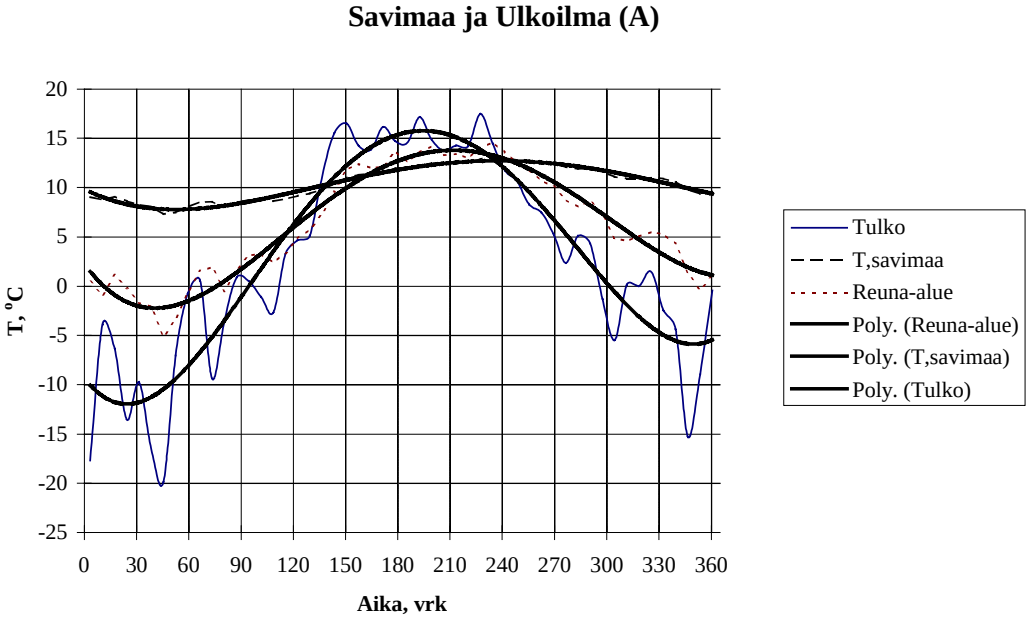
Ryömintätilan ilmatilassa on tehty seuraavanlaiset oletukset:

- ilmatila on täysin sekoittunut eli lämpötila on ilmassa sama kaikkialla ryömintätilassa
- ryömintätilassa konvektiivinen lämmönsiirtokerroin maan pinnassa on 2 W/m^2K, rakennuksen ulkopuolella maan pinnassa 20 W/m^2K
- Ryömintätilan ilmanvaihto ja ryömintätilan kantavien rakenteiden konduktanssi
- tapaus A) n=0,25 1/h, G=0.5 W/K (/m)
- tapaus B) n= 5 1/h, G=6 W/K (/m); kantava rakenne λ = 1 W/mK, s = 0,2m, H = 0,6 m

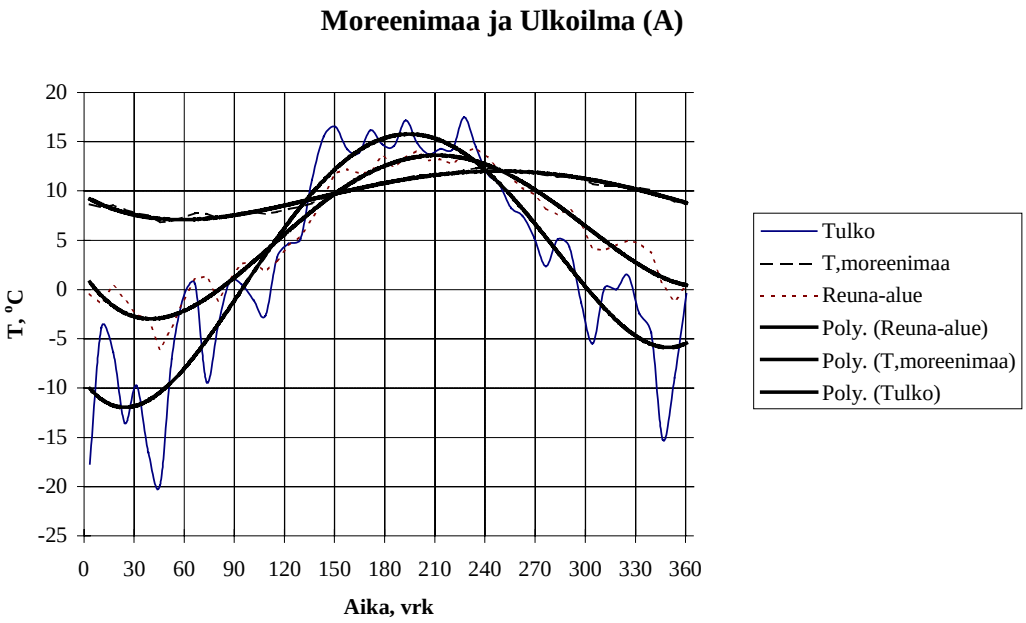


Kuva 2.2. Periaatteellinen kaaviokuva ryömintätilaisen maapohjan lämpötilojen laskennassa käytetystä rakenteesta. Lämpötilat on tulostettu maaperän pinnassa rakennuksen ulkopuolella, ryömintätilan reuna-alueella ja keskikohdassa. Ryömintätilan leveys 10 m.

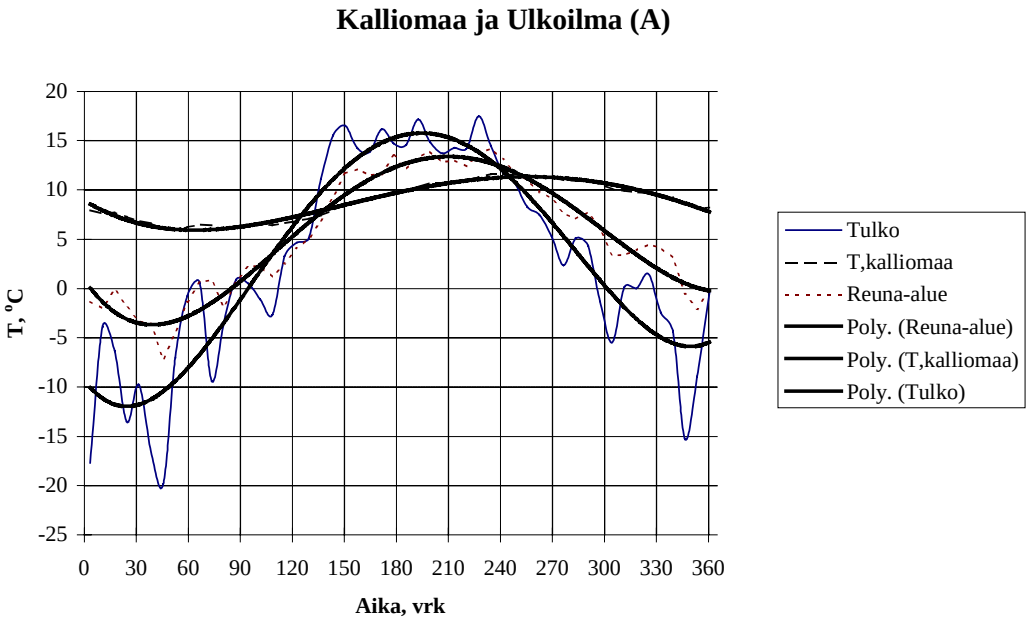
Kuvissa 2.3 - 2.8 on esitetty lasketut lämpötilat ryömintätilan reuna-alueelle ja keskikohdalle 5 m reuna-alueelta. Kuvissa aika alkaa vuoden alusta.



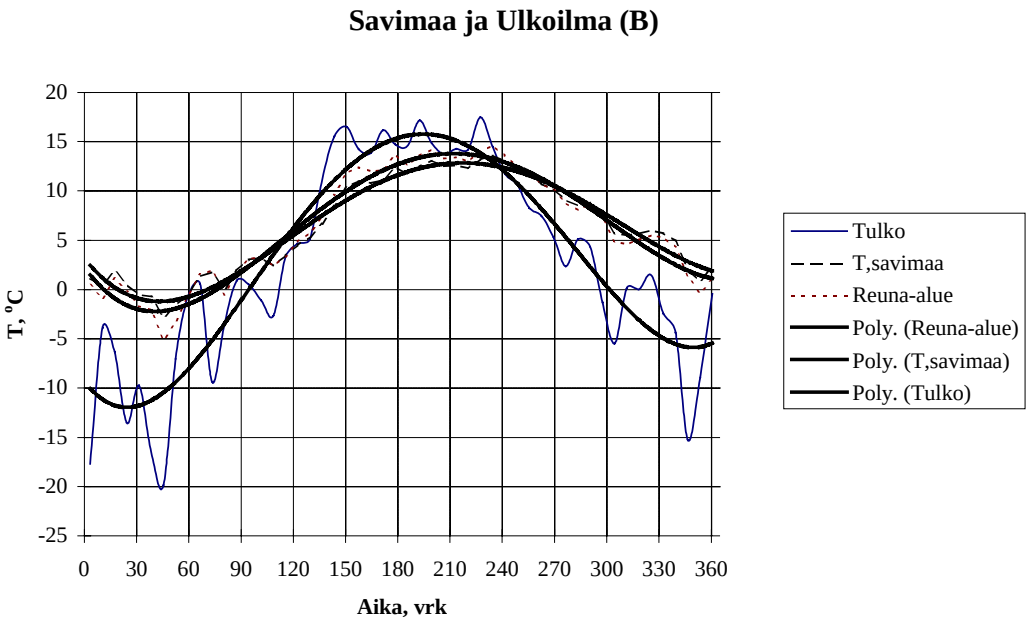
Kuva 2.3. Savimaaperäisen ryömintätilan reuna-alueen ja keskikohdan (5 m reunasta) lämpötilat. Hyvin lämmöneristetty ryömintätila.



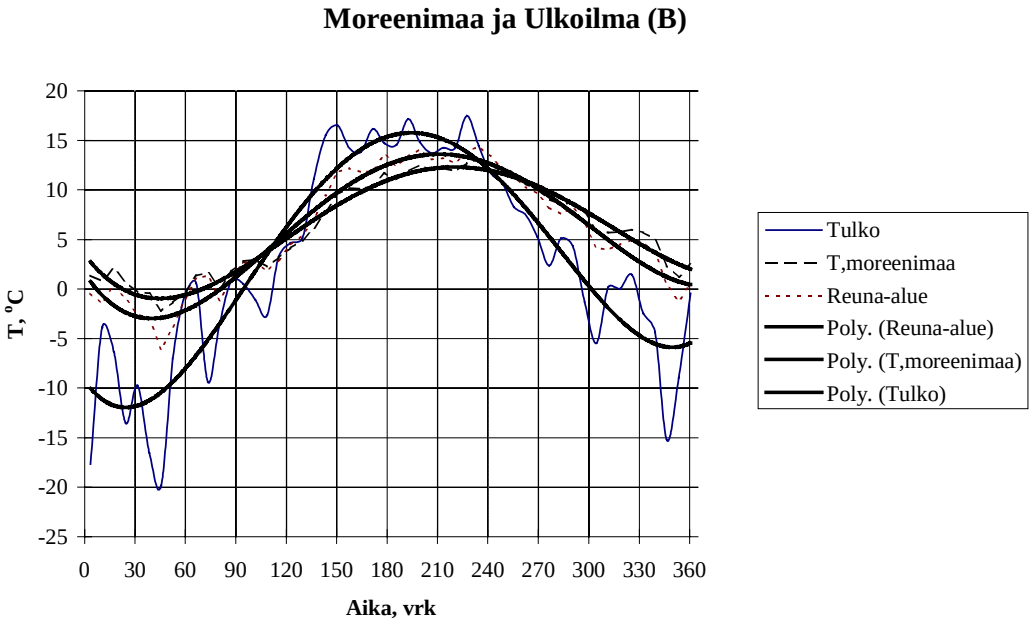
Kuva 2.4. Moreenimaaperäisen ryömintätilan reuna-alueen ja keskikohdan (5 m reunasta) lämpötilat. Hyvin lämmöneristetty ryömintätila.



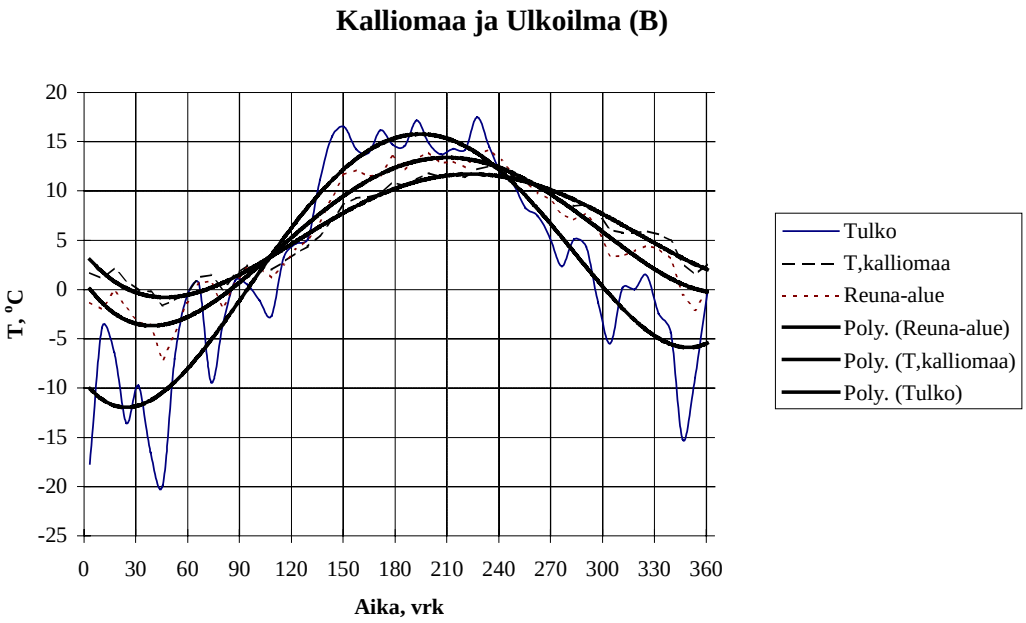
Kuva 2.5. Kalliomaaperäisen ryömintätilan reuna-alueen ja keskikohdan (5 m reunasta) lämpötilat. Hyvin lämmöneristetty ryömintätila.



Kuva 2.6. Savimaaperäisen ryömintätilan reuna-alueen ja keskikohdan (5 m reunasta) lämpötilat. Huonosti lämmöneristetty ja hyvin tuuletettu ryömintätila.



Kuva 2.7. Moreenimaaperäisen ryömyintätilan reuna-alueen ja keskikohdan (5 m reunasta) lämpötilat. Huonosti lämmöneristetty ja hyvin tuuletettu ryömintätila.



Kuva 2.8. Kalliomaaperäisen ryömintätilan reuna-alueen ja keskikohdan (5 m reunasta) lämpötilat. Huonosti lämmöneristetty ja hyvin tuuletettu ryömintätila.

Taulukko 2.3. Käytettävissä olevat säätiedostot (jatkuu seuraavalla sivulla).

Tiedostonimi	Paikkakunta	Maa	TZ	Leveys, Pituus
SHU.DAT	Saint-Hubert	Belgium	-15	50.02 05.24E
UCL.DAT	Uccle(Bruxelles)	Belgium	-15	50.48 04.21E
OST.DAT	Oostende	Belgium	-15	51.12 02.52E
WIN.DAT	Winnipeg	Canada	+75	49.90 97.23W
COP.DAT	Copenhagen	Denmark	-15	55.46 12.19E
HKI.DAT	Helsinki	Finland	-30	60.10 24.57E
NIC.DAT	Nice	France	-15	43.39 07.12E
CAR.DAT	Carpentras	France	-15	44.05 05.03E
LIM.DAT	Limoges	France	-15	45.49 01.17E
MAC.DAT	Macon	France	-15	46.18 04.48E
NAN.DAT	Nancy	France	-15	48.41 06.13E
TRA.DAT	Trappes	France	-15	48.46 02.01E
HOLZKIRC.DAT	Holzkirchen	Germany	-15	48.13 11.72E
VAL.DAT	Valentia	Ireland	0	51.56 10.15E
DUB.DAT	Dublin	Ireland	0	53.26 06.15E
TRI.DAT	Trapani	Italy	-15	37.55 12.30E
CRO.DAT	Crotone	Italy	-15	39.04 17.04E
CAG.DAT	Cagliari	Italy	-15	39.15 09.03E
FAM.DAT	Foggia/Amendola	Italy	-15	41.31 15.43E
ROM.DAT	Roma Ciampino	Italy	-15	41.48 12.35E

MTO.DAT	Monte Terminillo	Italy	-15	42.28 12.59E
GEN.DAT	Genova Sestri	Italy	-15	44.25 08.51E
MIL.DAT	Milano Linate	Italy	-15	45.26 09.17E
VEN.DAT	Venezia	Italy	-15	45.30 12.20E
BOL.DAT	Bolzano	Italy	-15	46.28 11.20E
VLI.DAT	Vlissingen	The Netherlands	-15	51.27 03.36E
DEB.DAT	De Bilt	The Netherlands	-15	52.06 05.11E
EEL.DAT	Eelde	The Netherlands	-15	53.08 06.35E
ABE.DAT	Aberporth	UK	0	51.28 00.19W
KEW.DAT	Kew(London)	UK	0	51.28 00.19W
ESK.DAT	Eskdalemuir	UK	0	55.19 03.12W
LER.DAT	Lerwick	UK	0	60.08 01.11W
WYATLGA	Atlanta, GA	USA	75	33.70 84.50W
WYBOSMA	Boston, MA	USA	75	42.30 71.00W
WYLKCLA	Lake Charles, LA	USA	90	30.20 93.20W
WYMADWI	Madison, WI	USA	90	43.20 89.30W
WYMIAFL	Miami, FL	USA	75	25.80 80.3W
WYPHXAZ	Phoenix, AZ	USA	105	33.50 112.0W
WYPOROR	Portland, OR	USA	120	45.60 122.7W
WYWASDC	Washington, DC	USA	75	38.80 77.00W

- (Longitude: E (itäistä) = syötä negatiivisena arvona LATENITE-ohjelmaan)
- WYECTOLN.f muuntaa WYEC-tyyppiset tiedoston LATENITE-ohjelman ymmärtämään muotoon.
- Kanadasta on saatavilla useita säätiedostoja, joista ainakin kahdeksan jo epävirallisesti käytettävissä.
- Japanista on marraskuusta 1996 lähtien saatavilla suuri määrä säätiedostoja. Sisältävät sadetiedot.
- Lisäksi on ASHRAElta saatavissa energialaskentaan kehitetyt testivuodet 51 USAn paikkakunnalle, jotka sisältävät tunnittaiset arvot tärkeimmille suureille (sade puuttuu). Myös National Climate Data Centeriltä on saatavilla CD-romilla 30 vuoden säätiedostoja 250 paikkakunnalle USA:sta. Sisältävät myös sadetietoja.

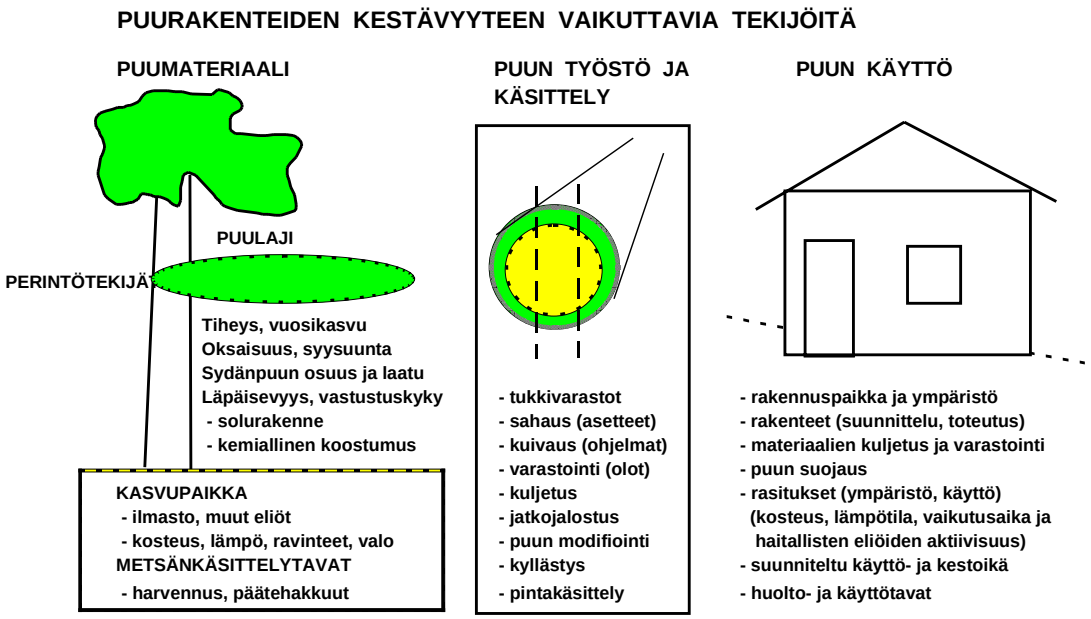
3 PUUN HOMEHTUMINEN JA VAURIOITUMINEN

3.1 PUUMATERIAALIN OMINAISUUDET JA KESTÄVYYS

3.1.1 Puumateriaalin kestävyyteen vaikuttavia tekijöitä

Puumateriaalille on ominaista sen ominaisuuksien vaihtelu, mikä käytännössä ilmenee eri tasoilla: puulajit, havu- ja lehtipuut, pinta- ja sydänpuu, kevät- ja kesäpuu, puun anisotrooppinen rakenne, puumateriaalin solurakenne ja sen mikrorakenne, kemiallinen koostumus, selluloosan, ligniinin, hemiselluloosan sekä uuteaineiden määrä ja koostumus. Käytännössä tämä näkyy eri puulajien välillä havaittavina eroina, mutta myös siinä, että samassakin rungossa tai puutavarassa voidaan havaita poikkeamia.

Käytännössä puu vioittuu tai lahoaa usein vain paikallisesti ja vaurio keskittyy usein tiettyihin kohtiin rakennetta. Kriittiset kohdat, kuten liitoskohdat, jatkokset ja saumat ovat usein sekä lahon kehittymisen että sen vaikutuksen kannalta kriittisiä. Mahdollisen vian syntyminen riippuu sekä itse puumateriaalista että rakenteesta ja sen yksityiskohdista /6/. Tämä vaikeuttaa puun luontaisen lahonkestävyyden hyödyntämistä, koska lahonkestävyyttä ei toistaiseksi osata ennustaa rungosta tai sahatavarakappaleesta. Puun kestävyyteen voidaan vaikuttaa myös valmistusprosessien, esim. kuljetuksen, kuivauksen ja varastoinnin kautta. Kuvassa 3.1 on esitetty kaavamainen piirros puumateriaalin kestävyyteen vaikuttavista tekijöistä. Olennainen tekijä on käyttökohde ja sen olosuhteet.



Kuva 3.1. Puumateriaalin keystävyyteen vaikuttavat hyvin monet tekijät.

Puun luontainen kestävyys biologisia vaurioita, kuten hometta ja lahoa vastaan on geneettisesti määräytynyt ja vaihtelee suuresti eri puulajien, yksilöiden ja rungon eri osien välillä. Puun kestävyys luokitellaan useimmiten sydänpuun lahonkestävyyden mukaan, mutta kestävyys vaihtelee eri vaurion aiheuttajia vastaan. Pintapuun kestävyys on useimmilla lajeilla sydänpuuta heikompi.

Kestävyysluokitukset perustuvat laboratorio- ja kenttäkokeiden tuloksiin sekä käytännön havaintoihin. Mikrobeille otollisissa olosuhteissa lahottajasienet ovat aktiivisia ja vaikuttavat männyn ja kuusen pintapuuhun nopeasti, mutta sienille epäedullisemmissa oloissa materiaalien ominaisuuksilla on suurempi merkitys. Männyn sydänpuu kestää sienen vaikutusta paremmin kuin pintapuu, mutta sydänpuunkin kestävyys vaihtelee. Laboratoriokokeiden mukaan puun tiheydellä sellaisenaan ei ole ratkaisevaa merkitystä puun ns. "absoluuttiselle" lahonkestolle. Käytännössä tiheämpi ja etenkin veden läpäisyä kestävämpi puuaines saattaa olla varteenotettava materiaali etenkin vähemmän rasittavissa oloissa (ns. "suhteellinen lahonkesto"). Puun ja orgaanisten materiaalien hajoaminen luonnossa tapahtuu hyvin monien erilaisten mikro-organismien, bakteerien ja sienten peräkkäisestä tai samanaikaisesta toiminnasta. Puussa elävät eliöt hajottavat ja käyttävät hyödykseen puun eri rakenneosia kemiallisesti (lähinnä entsymaattisilla reaktioilla; mikro-organismit) ja mekaanisesti (hyönteiset). Puun typpipitoisuus on hyvin pieni muihin orgaanisiin materiaaleihin verrattuna, mikä osaltaan hidastaa puun hajoamista: hiilen ja typen suhteellinen osuus (C:N-suhde) puussa on noin 350...1250:1, kun se eliöissä ja monissa orgaanisissa materiaaleissa on 8...12:1. Yleensä katsotaan 20...25:1 hiili-typpisuhteen riittävän eliöiden kasvuun.

Puumateriaalit voidaan kestävyydeltään luokitella eri tavoin. EN 350 1-2 normissa (1994) useimmat puulajit on luokiteltu niiden luontaisen lahon- ja hyönteiskestävyyden mukaan. Näissä luokituksissa kotimaiset puulajit eivät sijoitu mitenkään hyvin (taulukko 1). Kuitenkin on otettava huomioon, että rakentamisen tarkoitus ei ole luoda homeelle, laholle ja hyönteisille otollisia olosuhteita, joissa nämä testit on tehty. Niinpä todellisissa olosuhteissa tilanne voi olla toisenlainen. Kuitenkin tämä luokittelu antaa pohjan materiaalien tarkastelulle ja niiden tarvitsemalle suojauskäsittelylle. Itse materiaalin ohella kestävyyteen vaikuttavat myös monet muut tekijät.

Standardien mukaan painekyllästetty puu sijoittuu kestävyysluokituksessa luokkaan 1. Kemiallinen modifiointi vaikuttaa puun kestävyyteen vaihtelevasti: hyvin asetyloituneen puun kestävyys paranee olennaisesti kun taas joillakin käsittelyillä tulos on marginaalinen. Puun lämpökäsittelyn vaikutuksesta puun kosteus- ja kestävyysominaisuudet muuttuvat käsittelemättömään puuhun verrattuna: puun tasapainokosteus laskee ja lahonkestävyys paranee. Muutos on riippuva mm. lämpökäsittelyn ajasta ja lämpötilasta, jotka vaikuttavat puussa tapahtuviin muutoksiin. Niitä kuvaa esim. lämpökäsittelyssä tapahtuva materiaalin painohäviö /10/. Lämpökäsiteltyä puuta ei vielä toistaiseksi ole sijoitettu eurooppalaiseen kestävyysluokitukseen. Käsittelyn arvioidaan joka tapauksessa parantavan kestävyysluokkaa, mutta tutkimukset ovat tältä osin käynnissä.

Puun kestävyys hometta vastaan on jossakin määrin suhteutettavissa sen lahonkestävyyteen, joten taulukon 3.1 luetteloa voidaan käyttää apuna arvioitaessa puulajien homehtumisalttiutta. Homehtuminen on kuitenkin pintaan liittyvä ilmiö,

joka ei aina ole suoraan riippuvainen itse materiaalista (esim pintaan kertyvät muut aineet, lika yms).

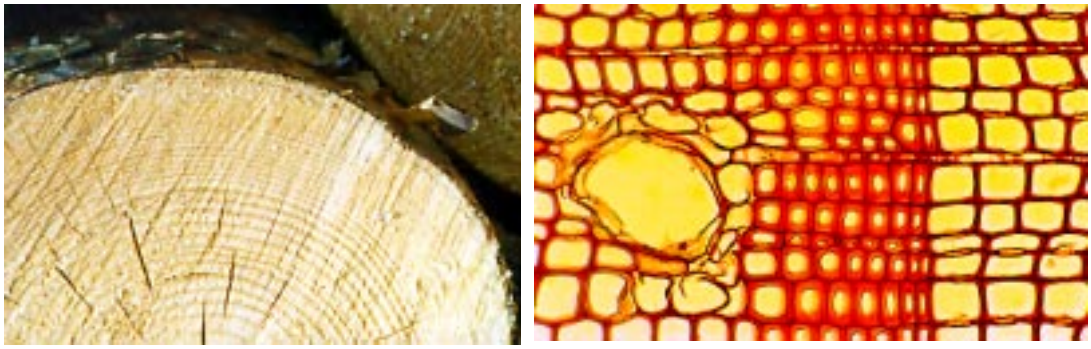
Taulukko 3.1. Eräiden puulajien sydänpuun lahonkestävyys standardin EN 350-2 mukaan (1994).

Luokka	Kestävyys	Esimerkkilajeja
1	hyvin kestävä	tiikki, iroko, afzelia, bilinga
2	kestävä	jättituija, amerikanmahonki, tammi
3	kohtalaisesti kestävä	mänty, lehtikuusi, douglaskuusi, hikkori, afrikanmahonki
4	jonkin verran kestävä	mänty, kuusi, hemlok, kuusi
5	ei kestävä	koivu, leppä, haapa, pyökki, vaahtera

3.1.2 Kosteuden vaikutus puuhun

Puun ominaislujuus on sellaisenaan hyvä, jopa erinomainen. Sen huokosrakenne antaa sille myös lämpöä eristäviä ominaisuuksia. Puun kosteustekniset ominaisuudet ovat puun käytön kannalta sekä positiivisia että negatiivisia. Puun ”kosteuskapasiteettia” eli kykyä ottaa ja luovuttaa kosteutta ilmasta on suhteellisen vähän hyödynnetty rakenteiden kosteusfysiikassa ja sen merkitys rakenteiden toimivuudelle tunnetaan toistaiseksi huonosti. Puun ”kosteuselämistä” on pidetty negatiivisena, koska se aiheuttaa puukappaleiden muodonmuutoksia ja sitä kautta puun ja pinnoitteiden halkeilua (kuva 3.2). Toisaalta puun kostuminen on myös edellytys puun biologiselle vioittumiselle.

Kosteus on voimakkaimpia puun säilyvyyteen vaikuttava tekijä. Pintapuun solukko on puun kasvuaikana rakentunut veden kuljetukseen ja myöhemmässä vaiheessa se muuttuu sydänpuuksi, jossa ei vastaavaa aktiivisuutta ole. Elävä tai vastakaadettu puu on märkää ja pintapuun kosteus vaihtelee puulajista, rungon osasta ja vuodenajasta riippuen. Yleensä se on välillä 120 - 180 % (kosteussuhde lasketaan kuivapainosta). Vesimääränä tämä vastaa noin 500 - 800 l vettä / m3 tuoretta puuta, jos puun tiheys arvioidaan olevan 460 kg / m3. Todellisuudessa puun tiheys vaikuttaa myös puun maksimaaliseen kosteuspitoisuuteen: tiheään puuhun mahtuu vähemmän vettä kuin huokoisempaan puuhun. Biologisesti elävät solut ovat aivan puun rungon pintaosissa, nilassa ja jällessä sekä ydinsäteissä. Veden kulkeutuminen tapahtuu ulommissa pintapuun osissa. Elävässä puussa aktiivinen puolustautuminen vieraita eliöitä vastaan tapahtuu ensisijassa elävissä solukoissa rungon pintaosissa. Esim. kasvavassa kuusessa lahovika rajoittuukin usein lähinnä sydänpuuhun, jossa aktiivista puolustautumista ei samassa määrin tapahdu. Sydänpuu, kuten suuri osa puunrungon soluista, on biologisesti katsoen kuollutta solukkoa /12/.



Kuva 3.2. Poikkileikkauskuva tuoreesta mäntytukista sekä mikroskooppikuva männyn solurakenteesta. Ohutseinäiset kevätpuusolut syntyvät puun kasvun alkaessa keväällä ja paksuseinäiset kesäpuun solut syntyvät myöhemmin.

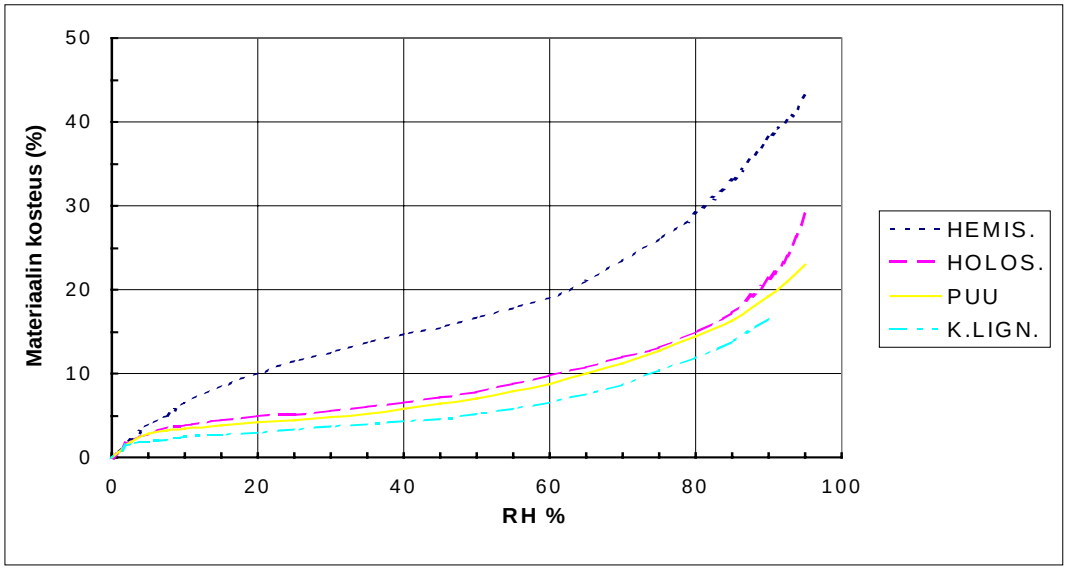
Elävän puun sydänpuu on yleensä huomattavasti kuivempi kuin pintapuu. Kosteussuhde on keskimäärin 35 - 60 %. Männyn sydänpuu poikkeaa pintapuusta kosteuspitoisuuden ohella myös koostumuksensa puolesta. Männyn sydänpuuhun on kertynyt erilaisia hartsiaineita, polymeroituneita rasvahappoja, hartsihappoja, fenolisia yhdisteitä ym. jotka itseasiassa ovat syynä sydänpuun pienempään kosteuspitoisuuteen, alentuneeseen läpäisevyyteen ja myös parempaan lahonkestoon. Sen sijaan kuusessa puusolujen rakenne ja etenkin huokoset ovat erilaiset kuin männyssä. Puun kuivuessa kuusen huokoset aspiroituvat eli sulkeutuvat hyvin tiiviisti. Tämän vuoksi kuusen sydänpuu pysyy usein kuivempana ja sen kyllästäminen ei puun kuivuttua enää onnistu. Sydänpuun laatu ja osuus vaihtelee mm. puulajista, kasvunopeudesta ja iästä riippuen /12/.

Puun kuivuessa vesi poistuu ensin soluonteloista ja vasta sen jälkeen alkaa veden poistuminen soluseinistä. Tilannetta, jossa puusolun seinät ovat veden kyllästämät mutta soluonteloissa ei vielä ole vapaata vettä kutsutaan puusolujen kyllästymispisteeksi ”PSK”. Männyn ja kuusen kosteus on tällöin noin 30 - 35 %. PSKn saavuttamiseen tarvittava absoluuttinen vesimäärä riippuu mm. puun tiheydestä. Puun edelleen kuivuessa vettä poistuu myös soluseinistä, jolloin myös puun mitat alkavat muuttua. Kosteus voi siirtyä puuhun ja puussa sekä vetenä kapillaarisesti että vesihöyrynä diffuusion välityksellä. Näkyvin kosteuden aiheuttama muutos puussa ovat mittamuutokset eli puun turpoaminen ja kutistuminen. Kosteus muuttaa lisäksi puun lujuutta ja tiheyttä, tuore puu on sitkeää mutta lujuus pienempi kuin kuivatulla puulla.

Puu on hygroskooppista materiaalia ts. puun kosteus seuraa ympäristön kosteustilaa. Tehokkainta puun kostuminen on suorassa vesikontaktissa, jolloin vesi imeytyy kapillaarisesti puuhun. Syiden suunnassa veden imeytyminen on moninkertaista tangentiaaliseen ja radiaaliseen suuntaan verrattuna. Kosteus ei sellaisenaan suoraan vaurioita puuta, mutta kosteus heikentää puun lujuutta ja lämmöneristävyyttä ja se on edellytys biologiselle ja kemialliselle turmeltumiselle. Lisäksi vaihteleva kosteus aiheuttaa halkeilua ja muodonmuutoksia.

Kosteus sellaisenaan voi vaikuttaa haitallisesti puutuotteisiin kun puu turpoaa tai sen pinta karhistuu (puun syyt käpristyvät pinnassa). Kuiviin sisätiloihin tarkoitettu pinnoittamaton lastulevy turpoaa nopeasti pienenkin vesimäärän vaikutuksesta etenkin, jos vesi pääsee tunkeutumaan saumakohdista levyn sisään. Puutuotteiden altistaminen käyttökohteesta poikkeaviin kosteusoloihin aiheuttaa myös erilaisia ongelmia: tuotteiden mitat ja muodot muuttuvat. Tavanomaisissa käyttökohteissa puu on maalattuna tai lakattuna. Hyvin harvoin puu on ilman minkäänlaista suojaavaa pintakäsittelyä. Näin ollen pintakalvon ominaisuudet ratkaisevat pitkälti, mitä puutuotteelle veden ja sään vaikuttaessa tapahtuu /5/.

Puumateriaalin mikrorakenne ja kemiallinen koostumus vaikuttavat olennaisesti puun kosteuskäyttäytymiseen. Puulla on hyvin suuri kosteuskapasiteetti, joka pohjautuu kosteusteknisesti hyvin laajaan reaktiopintaan. Puun solurakenne on huokoinen, mutta sen lisäksi solun seinät muodostuvat kerroksellisista rakenteista. Pääasialliset rakennemolekyylit puussa ovat hemiselluloosa, selluloosa ja ligniini. Kuvassa 3.3 on esitetty kunkin rakennemolekyylin tasapainokosteus ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden (RH) suhteen.



Kuva 3.3. Puumateriaalin ja sen eri pääkomponenttien, hemiselluloosa, selluloosan (holos) ja ligiinin (k.lign) tasapainokosteus ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden (RH %) mukaan /16, 19/.

3.2 PUURAKENTEIDEN BIOLOGINEN RASITUS JA TURMELTUMINEN

3.2.1 Rasitusten vaikutukset

Puun käyttöikä vaihtelee hyvin laajassa mittakaavassa aikayksikköinä ilmaistuna. Hyvissä oloissa puu säilyy satoja jopa tuhansia vuosia ja jätteiden käsittelyyn tarkoitetuissa kompostereissa se saadaan hajoamaan muutamassa vuodessa, puusta itsestään ja sen suojauksesta toki riippuen. Pohjoismaissa ilmasto on suhteellisen otollinen puumateriaalin käytölle, kun sen sijaan biologinen rasitus on suurin

trooppisella ilmastovyöhykkeellä, jossa lämpötila, ilman kosteus, sademäärä ja vaurio-organismien määrä on suuri. Yksittäisissä tapauksissa vaurioitumismahdollisuudet riippuvat muista rasituksista, etenkin ilmaston, maaperän ja vesivuotojen kosteusrasituksista. Taulukossa 3.2 esitetyn luokituksen pohjalta voidaan määritellä kussakin käyttökohteessa tarvittava suojaus (pintakäsittely, kyllästys tai muut vaatimukset puumateriaalille).

Käytännön rakenteissa puumateriaaliin vaikuttavia mekaanisia rasituksia ovat kuormat, värähtelyt, kosteuden aiheuttamat muodonmuutokset ja mekaaniset vauriot. Sähkömagneettisesta kuormituksesta merkittävin on auringon UV-valon vaikutus /18/. Terminen eli lämpörasitus toimii usein muiden rasitusten yhteydessä katalysoiden niiden vaikutusta. Ääritilanteissa se on palamista ja hiiltymistä. Muuten puu kestää suhteellisen hyvin lämpötilan vaihteluita. Kemiallista rasitusta aiheuttaa lähinnä kosteus eri muodoissaan, sekä hapot, emäkset ja suolat. Puurakennusten ja puupohjaisten materiaalien kesto- ja käyttöiän kannalta merkittävin rasitus on kosteus. Kosteutta voi tulla eri tavoin rakennuksiin. Biologiset eli eliöiden aiheuttamat rasitukset vaikuttavat useimmiten yhdessä muiden tekijöiden kanssa (kosteus, lämpötila). Merkittäviä tekijöitä ovat etenkin materiaaleja välittömästi ympäröivän ilman, **mikroilmaston**, ja materiaalien **kosteus**, **lämpötila** ja niiden **kestoaika** /30/.

Taulukko 3.2. EHC:n ja EU:n rasitusluokitus puutuotteiden käytölle (EN 335, 1992).

Luokka	Biologinen rasitus	Huuhtoutuminen	Käyttökohteen kuvaus
1	ei	ei	puu kuivassa sisätilassa
2	lievä	ei	puu maanpinnan yläpuolissa ulko rakenteissa, ei suoranaista säärasitusta
3	kohtalainen	kohtalainen	puu maanpinnan yläpuolissa ulko rakenteissa sälle alttiina
4	suuri	suuri	puu maa- tai vesikosketuksessa
5	suuri	suuri	puu suolaisessa merivedessä

Rakennusmateriaaleihin ja rakennuksiin kohdistuvien rasitusten seurauksena materiaalit, rakenteet ja rakennukset **vanhenevat**. Vanheneminen on fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten ilmiöiden aiheuttamia muutoksia materiaaleissa (esim. puun pinnan harmaantuminen sään vaikutuksesta). Erikseen voidaan tarkastella sellaista vanhenemista, joka tapahtuu normaalia nopeammin ja jolla on erityisen haitallisia seurauksia. Tällöin kyseessä on materiaalien tai rakenteiden **vioittuminen** tai **vaurioituminen poikkeuksellisissa oloissa**. Rakennustuote turmeltuu, vioittuu tai vaurioituu siihen kohdistuvien materiaalien sietokyvyn ylittävien rasitusten seurauksena. **Rakennuksen ympäristö**, **käyttö** ja **rakenne** rasittavat materiaaleja eri tavoin. Rasituksen luonne ja voimakkuus vaihtelevat samanaikaisesti vaikuttavien eri rasitusten asteen, lukumäärän ja yhdysvaikutusten mukaan. Ra-

kennukseen vaikuttavia rasituksia ovat erilaiset **fysikaaliset**, **kemialliset** ja **biologiset** rasitukset /6/.

Ympäristörasitukset ovat tyypillisesti perusteiltaan fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia, ja niihin voidaan sisällyttää myös ihmisen teknologista, yhteiskunnallista ja sosiaalista toimintaa. **Rakennuksen käytöstä** johtuvia rasituksia ovat mm. asukkaiden aiheuttama kulutus, kosteuden tuotto tai käyttövesien aiheuttamat rasitukset. **Rakenteista peräisin** olevia rasituksia ovat esim. rakenteista, niiden kerroksista tai rakenneratkaisuista johtuvia, joiden seurauksena materiaalit ja rakenteet ovat herkistyneet ympäristörasituksille. Usein puhutaan oikeista ja vääristä rakenteista, mutta käytännössä on erilaisia ratkaisuja, jotka epäsuotuisissa oloissa johtavat pahimmillaan vaurioihin tai muihin epätoivottuihin muutoksiin, vaikka ne jossakin toisessa ympäristössä voisivatkin toimia moitteettomasti. Rasitusten ennakoinnilla eli riskien kartoituksella voidaan rakenteiden toimintavarmuutta osaltaan lisätä /9, 15/.

Biologiset rasitukset ovat normaalisti peräisin pääasiassa ympäristöstä, mutta esim. kosteusvauriotapauksissa voivat itse rakenteet aiheuttaa tai lisätä niitä /21, 28/. Tyypillisiä biologisen rasituksen aiheuttajia ovat mikrobit, sienet ja hyönteiset. Rasituksen ja sen seurauksena syntyneen materiaalin ominaisuuden muutoksen ja haitta-asteen (vanheneminen / ongelma / vaurio) määrittelyperusteet saattavat vaihdella, ja eri asiantuntijat tai erilaiset menetelmät antavat erilaisen kuvan ilmiöiden luonteesta. Luonnossa on usein tyypillistä ns. **biofilmi** (orgaanisen materiaalin, pölyn ja eliöiden kertyminen materiaalien pintaan). Toistaiseksi puuttuvat luotettavat ja yksiselitteiset määritelmät ja raja-arvot siitä, milloin kyseessä on materiaalien ja rakennesysteemien luonnollinen ominaisuus ja milloin voidaan puhua viasta tai vauriosta. Ongelmaa mutkistavat lisäksi terveydelliset, sosiaaliset ja yhteiskunnalliset näkökohdat.

Tekniikan kehittyessä pystymme havaitsemaan entistä tarkemmin materiaaleissa tapahtuneet muutokset, joita ennen on pidetty normaaleina tai harmittomina. Tiedämme, että **biokorroosio** (esim. laho) aiheuttaa eriasteista materiaalien vioittumista, jolloin pahimmillaan materiaalien suunniteltu käyttö- ja kestoikä saattavat olennaisesti muuttua. Havaintokynnys on kehittynyt niin, että lievätkin muutokset voidaan havaita esim. mikroskooppianalyyseillä ja kemiallisilla analyyseillä. Se mikä merkitys näillä muutoksilla on käytännössä, täytyy arvioida ja päätellä kohdekohtaisesti. Usein se vaatii laajaa asiantuntemusta ja analyysien tekijöiden sekä tulosten soveltajien ja käyttäjien yhteistyötä. Sisäilmassa ja rakenteissa olevien mikrobien normaalipitoisuuksien raja-arvoja on esitetty erilaisia vuosien kuluessa. Määrittelyä hankaloittaa ilmiöön liittyvä suuri hajonta, mittausmenetelmien kirjavuus ja tiedon rajallisuus. Usein kynnyskysymyksenä on **mikrobien lajit ja määrä**, **materiaalin laatu**, **sijainti rakenteessa** sekä **rasituksen vaikutusaika**.

Rakenneosien alttius kosteusrasituksille ja niistä mahdollisesti seuraaville muille haittavaikutuksille johtuu monista tekijöistä, mm:

- rakenteista tai materiaaleista itsestään

(rakennekerrokset, dimensiot, koostumus, käsittelyt, materiaalien liittyminen toisiinsa),

- käyttöoloista (kosteusrasitukset),
- rasituksen sijainnista, kestoajasta ja aiheuttavasta eliöstä.

Rakenteiden toimivuus tulee ratkaista tapauskohtaisesti. Tämä edellyttää yksilöityä analyysia käytetyistä materiaaleista, rakenteista ja niissä olevista mahdollisista vaurioriskeistä eri materiaaleissa ja koko rakenneosassa. Rakennuksessa voi olla hyvin erilaiset olosuhteet johtuen toisaalta rakenteista, materiaaleista ja niiden sijainnista sekä toisaalta ilmanvaihdosta, kosteudesta, lämpötilasta tai materiaalien liittymisestä toisiinsa. Mahdollisten ongelmien ja vaurioiden kehittymiseen vaikuttavat olennaisesti rakenteiden kosteus, lämpötila sekä etenkin vaurioihin johtavan ns. kriittisen olosuhteen kestoaika. Ilmastolla, mahdollisilla vesivuodoilla, käyttörasituksella, rakenteilla ja ilmanvaihdolla on yleensä suurin merkitys rakennusosien toimivuuteen ja kestävyyteen.

Ulkopintoihin kohdistuvat rasitukset poikkeavat olennaisesti itse runkorakenteeseen kohdistuvista rasituksista. Tästä syystä pintojen biologiset rasitukset ovat myös erilaiset kuin runkorakenteiden. Rasitukset vaihtelevat pinnoilla laajemmin ja pintoihin kohdistuvat biologiset ilmiöt, mahdolliset viat ja vauriot ovat havaittavissa helpommin. Toisaalta myös runkorakenteisiin kertyy ajan mittaan pölyä ja likaa, kuten homesienten itiöitä, jolloin materiaalien alkuperäinen koostumus muuttuu. Puun luontainen harmaantuminen ja keloutuminen on eräs esimerkki tällaisesta osittain biologisen prosessin avulla muodostuneesta pinnasta.

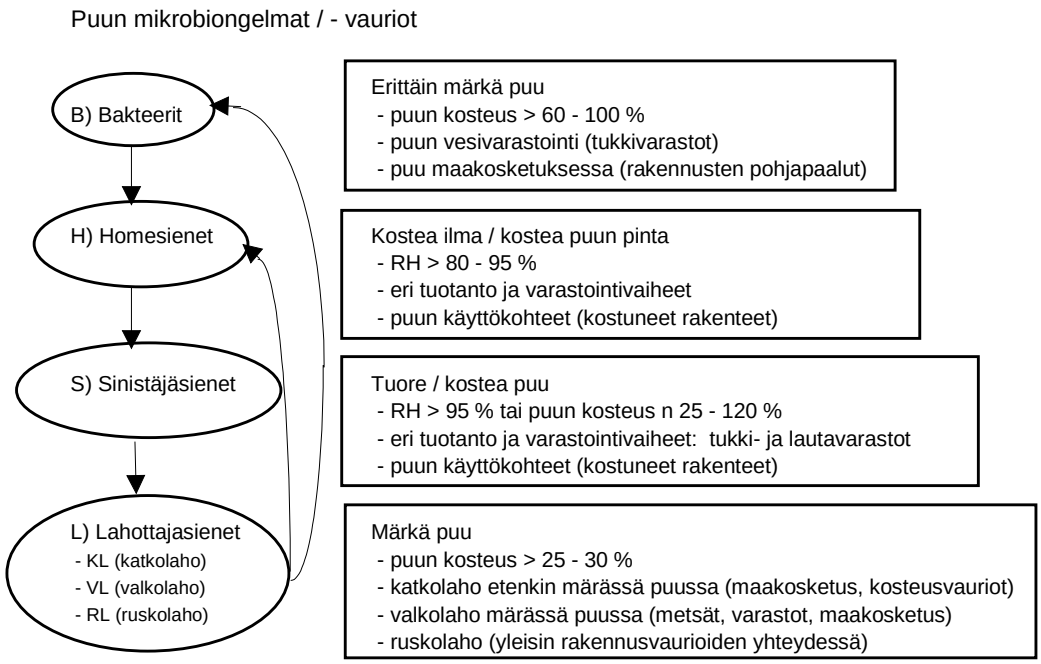
Puun pinnan haarmaantuminen johtuu auringon UV-valon, veden ja organismien yhteisvaikutuksesta. Auringon UV-valo vaikuttaa voimakkaimmin fenolisiin yhdisteisiin, kuten ligniiniin. Jos ympäristörasituksena on vain UV-valo, puu vaalenee, koska ligniinin osuus puun pinnassa vähenee. UV-valon vaikutus johtuu itseasiassa veden hajoamisesta, jolloin syntyy lyhyen ajan vaikuttavia radikaaleja, mm. peroksideja. Nämä itse asiassa ovat perussyynä puun pinnan muuttumiseen. Niinpä kuiva puu reagoi valoon huomattavasti hitaammin. Puun pinnan harmaantuminen johtuu siitä, että pintaan alkaa kasvaa sinistäjäsienten rihmastoa, jota UV-valon valkaiseva vaikutus, sadevesi ja muut ulkoilman partikkelit muokkaavat. Käytännössä kyseessä on eräänlainen puun pinnan patinoituminen, jota kelomateriaalissa hyödynnetään.

3.2.2 Vauriotilanteet

Kosteus rasittaa rakenteita vaihtelevasti ja niissä voi olla vain paikallista altistumista. Yleisellä tasolla ongelma tai vaurio voidaan usein rajata tai määrittää seuraavasti: biologiset viat ja vauriot liittyvät aina kosteusvaurioihin ja ovat yhteydessä toisiinsa. **Kosteusvauriot johtuvat rakenteiden sietokyvyn ylittävästä kosteusrasituksesta** ja kosteusvaurio saattaa johtaa riittävän pitkään kestettyään **eri asteisiin** biologisiin **vikoihin** tai **vaurioihin** (bakteeri-, homesieni-, lahosieni- tai leväkasvu tai hyönteisviat).

Usein puhutaan vain rakennusten homeongelmista, mutta käytännössä ongelmat johtuvat monista eri mikrobiryhmistä (kuva 3.4) Home-, sinistäjä- ja katkolahottajasienten ero on lähinnä toiminnallinen. Homesienet ilmestyvät yleensä ensimmäisinä materiaalien pintaan, jolloin ne aiheuttavat pinnan värjääntymistä ja tunkkaista hajua, materiaaleista ja olosuhteista riippuen. Homevauriotapauksessa ongelman voivat aiheuttaa monet eliöt yhdessä, ja ongelman luonne ja vakavuus riippuu monista seikoista. Toisaalta sinistymä saattaa kehittyä jo metsässä tai tukkivarastossa, jolloin puhutaan tukkisinistymästä. Siitä ei yleensä ole sanottavaa haittaa puutavaran käytölle, jos puu kuivataan huolellisesti ja pysyy kuivana.

Kosteusvaurioiden yhteydessä rakenteiden teknisen toimivuuden kannalta ongelmallisimpia organismeja ovat lahottajasienet, joiden aiheuttama vaurio heikentää monien eri materiaalien lujuutta. Jostain syystä lattiasientä kutsutaan joskus “homeeksi”. Tämä aiheuttaa runsaasti sekaannusta, koska vaurio ja sen vaatima korjaus on aivan erityyppinen. Suomessa hyönteisvauriot yleensä liittyvät lahoon: hyönteiset käyttävät hyväkseen lahottajasienten rihmastoa ja niiden pehmittämää puuta.



Kuva 3.4. Puun mikrobiologinen turmeltuminen ja sen edellytykset kosteuden suhteen.

Kosteusvaurioiden syitä voi olla monia, mutta yhteisenä nimittäjänä on usein rakenteiden virhetoiminnat, normaalirajat ylittävä kosteusrasitus tai veden pääsy rakenteisiin.

3.2.3 Vaurioiden aiheuttajat

Bakteerit

Bakteerit ovat hyvin laaja eliöryhmä, jossa on hyvin monenlaisia mikrobeja. Niitä on luonnossa kaikkialla. 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 märässä puussa etenkin pitkäaikaisen vesivarastoinnin seurauksena. Tämä tulee ilmi esim. puun ylivärjäytmisenä kuullotuksen tai värjäyksen yhteydessä.

Kosteusvaurioiden yhteydessä materiaaleissa on usein rihmamaisia bakteereja, **sädesieniä** eli **aktinomykeettejä**, jotka normaalisti elävät maatuvassa eloperäisessä aineessa esim. kompostissa tai mullassa. Ne aiheuttavat voimakkaan, tunkkaisen kellarinomaisen hajun.

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 /22/.

<u>Home- ja sinistäjäsienet</u>

Home- ja sinistäjäsienet 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 maalipinnoilla. Kosteusvauriotapauksissa eräitä ns. ”etsintäkuulutettuja” lajeja ovat mm. *Stachybotrus atra*, *Ghaetomium globosum* (itseasiassa katkolahottaja), *Aspergillus fumigatus, Acremonium, Alternaria alternata, Aspergillus versicolor, Trichoderma viride*. Toisaalta näitä esiintyy myös ympäröivässä luonnossa, mm komposteissa ja hajoavissa materiaaleissa.

Home-, sinistäjä- ja katkolahottajasienten ero on lähinnä toiminnallinen. Homesienet ilmestyvät yleensä ensimmäisinä materiaalien pintaan, jolloin ne aiheuttavat pinnan värjääntymistä ja tunkkaista hajua, materiaaleista ja olosuhteista riippuen. Homevauriotapauksessa ongelman voivat aiheuttaa monet eliöt yhdessä, ja ongelman luonne ja vakavuus riippuu monista seikoista. Toisaalta sinistymä saattaa kehittyä jo metsässä tai tukkivarastossa, jolloin puhutaan tukkisinistymästä. Siitä ei yleensä ole sanottavaa haittaa puutavaran käytölle, jos puu kuivataan huolellisesti ja pysyy kuivana.

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 kauan aikaa märkänä olleen materiaalin mikrobilajisto saattaa olla hyvin laaja ja vaihteleva. Sinistäjä- ja homesienet leviävät itiöistä, kuten sienet yleensäkin.

Homesienet kasvavat lahottajasieniä nopeammin ja alkavat tuottaa itiöitä hyvin nopeasti sienille otollisissa olosuhteissa. Runsaat itiöpitoisuudet sekä homeen erittämät aineet ja hajut rakennuksissa voivat aiheuttaa terveydellisiä ongelmia. Tällä hetkellä itiöpitoisuuksien raja-arvot vaihtelevat laajasti mittaustavasta, vuodenajasta ja kohteesta riippuen. Homeista lähtevä haju on kiusallinen ja se tarttuu myös asunnossa oleviin tavaroihin, etenkin tekstiileihin. Toisaalta sinistäjäsieniä kasvaa aina käsittelemättömällä puupinnalla, joka on ulkona pitkään alttiina sateille. Pinnan harmaantuminen johtuu suureksi osaksi sinistäjäsienistä 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 sinistäjäsienille, 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 katkolahossa. 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 rakennuksissa esiintyviä ruskolahottajasieniä ovat **lattiasieni** (*Serpula lacrymans*), **kellarisieni** (*Coniophora puteana*), laakakääpä (*Poria / Antrodia* sp), aidaskääpä (*Gloeophyllum sepiarium*) ja saunakääpä (*Gloeophyllum trabeum*). Valkolahoa ilmenee lähinnä kasvavissa puissa sekä maakosketuksessa olevassa puutavarassa. Ruskolahottajasienet erittävät orgaanisia happoja ja entsyymejä, joiden vaikutuksesta materiaalien rakenne muuttuu nopeasti sienikasvuston levitessä ja puun lujuus heikkenee. Hemiselluloosa ja selluloosa hajoavat sienen tarvitsemiksi sokereiksi. Ruskolahossa hajoaa hemiselluloosa ja selluloosa, valkolahossa myös ligniini.

Pitkälle edeneessä 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 ruhmastoa, jolloin lahoa on usein hankalaa havaita. Laho-ongelmat, samoin kuin home-ongelmatkin, ovat hyvin monimuotoisia ja niihin voi liittyä hyvin monia eri mikrobilajeja.

Mikrobien osoittaminen lahonneista materiaaleista esim. viljelykokein saattaa usein olla vaikeaa ja tulokset harhaanjohtavia. Tämä vaikeuttaa myös kriteeristön laadintaa.

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 ravinnelähteenä 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.

Suomessa esiintyvät hyönteisvauriot ovat yleensä yhteydessä lahovaurioihin ja rakennevauriot ovat paikallisia. Hyönteisvauriot kehittyvät yleensä hitaasti maamme ilmaston johdosta. Varsinaisen vaurion aiheuttavat useimmiten hyönteisten toukat. **Tupajumi**, *Anobium punctatum*, on tunnetuin ja yleisin *Anobidae*-heimon puutuholaisista. **Kuolemankello**, *Xestobium rufovillosum* ja *Hadrobregmus pertinax*, elävät vain lahovikaisessa puussa, samoin **hirsijumi**, *Hadrobregmus confusus*. Kuolemankello ja hirsijumi ovat yleisimpiä vanhoissa puurakennuksissa esiintyviä puutuholaisia Suomessa. Tupajumi on viime aikoina tullut harvinaisemmaksi, kun rakennusten lämmitysjärjestelmät ovat tulleet tehokkaammiksi. Sitä esiintyy lähinnä kosteissa kellari-, sauna- tai pesutupatiloissa. Ulkorakenteissa se on erittäin harvinainen /14/.

Tupajäärä, *Hylotrupes bajulus*, on melko yleinen Keski-Euroopassa ja Skandinavian eteläosissa. Se aiheuttaa pahoja vaurioita lähinnä kattorakenteissa. Suomessa sitä on tavattu satunnaisesti vain joillakin saarilla Ahvenanmaan ja Turun saaristossa. **Jalokuoriainen**, *Buprestis haemorrhoidalis*, aiheuttaa toisinaan paikallisia vikoja ja vaurioita puurakenteissa. Vauriojäljet muistuttavat hieman tupajäärän jälkiä, mutta vauriot ovat huomattavasti lievempiä.

Eräät hyönteiset elävät vain kuorellisessa puutavarassa, jolloin ne aiheuttavat vain paikallisia vikoja. Ne voivat kuitenkin aiheuttaa pintojen vioittumista ja likaantumista. Papintappaja, *Callidium violaceum*, ja tikaskuoriaiset ovat yleisimpiä ns. kuorituholaisia Suomessa.

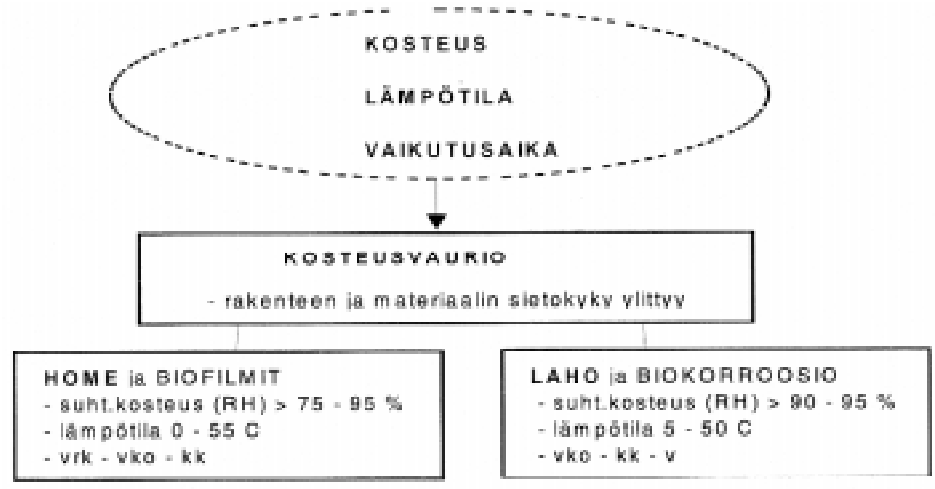
3.2.4 Ongelmien syntyyn vaikuttavat olot

Rakennuksessa voi olla hyvin erilaiset olosuhteet johtuen toisaalta rakenteista, materiaaleista ja niiden sijainnista sekä toisaalta ilmanvaihdosta, kosteudesta, lämpötilasta tai materiaalien liittymisestä toisiinsa, jolloin samassa rakennuksessa olla useita erilaisia eliöitä tai niiden mahdollisesti aiheuttamia ongelmia. Ongelmien ja vaurioiden kehittymiseen vaikuttavat olennaisesti rakenteiden kosteus, lämpötila sekä etenkin vaurioihin johtavan ns. **kriittisen olosuhteen kestoaika** (kuva 3.5). Ilmastolla, mahdollisilla vesivuodoilla, käyttörasituksella ja rakenteilla on yleensä suurin merkitys rakennusosien toimivuuteen ja kestävyyteen /28, 13/.

Normaaleissa, kosteusteknisesti tavanomaisesti toimivissa rakenteissa olevat kosteus- ja lämpöolot ylittävät ainakin paikallisesti julkisivujen ulkopinnoilla tai rakenteen ulommissa osissa homeen kasvun riskirajan. Tästä päätellen homekasvun täydellinen estäminen näissä rakenneosissa on kosteusteknisesti hyvin vaikeaa (pelkkä ulkoilman kosteus aiheuttaa homeriskin ylittävän kosteusrasituksen).

Homesienten kasvu on mahdollista useissa eri rakentamisen vaiheissa. **Homeiden kasvun minimirajana** on 80 % ilman suhteellista kosteutta vastaava kosteus. Riskirajan olosuhteissa homeiden kasvu on erittäin hidasta. Homeista tulee ongelmia, kun ilman suhteellinen kosteus on pitkään yli 90 % ja lämpötila välillä +10...+50 Oc. Lämpötilan ollessa alle +5 oC (-5 ...+5) suhteellisen kosteuden on oltava yli 95 % homeiden kehittymiseksi /24/. Käytännön kannalta nimenomaan kosteuden, lämpötilan, vaikutusajan ja vaihtelun yhdysvaikutus on olennaista, jolloin kosteus ei yksinään ole riittävä arvio mahdollisesta ongelmien kehittymisriskistä.

Vaihtelevissa oloissa homesienten kasvun sallivien kosteus- ja lämpötilaolojen kestoaika on homesienen kehittymiselle olennainen. Homeen kasvun pysäyttävän kuivan vaiheen merkitys näkyy lähinnä pinnan homeisuusasteen vähenemisenä ja homeen ilmaantumisen hidastumisena. Nopeasti toistuvat vaihtelut (lyhyt kuiva-aika) heikentävät homeiden kasvua vähemmän kuin harvaan toistuvat, pitkäaikaisemmat kuiva-ajat. Jos kostean ajan pituus on lyhyt, alle 1 vrk, kuivan ajan piteneminen hidastaa homeen kehittymistä voimakkaasti. Kun kostean ajan pituus on vähintäin 1 vrk, noudattaa homeen kehittyminen selvemmin kostean ajan kumulatiivista vaikutusta /20/. **Kostean ajan kumulatiivinen vaikutus** tulee esiin sellaisissa kohteissa, jotka ajoittain joutuvat kosteudelle alttiiksi, kuten räystään aluslaudat, betonilaatalle koolattujen puulattioiden alaosat). Tällaisissa kohteissa homehtuminen tai vaurioituminen tapahtuu hitaasti, vuosienkin kuluessa, ja ongelmat havaitaan vasta, kun niiden kehitys on edennyt silmin tai hajun avulla havaittavalle tasolle.



Kuva 3.5. Kosteusvauriossa materiaalien ja rakenteiden sietokyky ylittyy pitkäaikaisesti, jolloin seurauksena ovat home- tai laho-ongelmat. Ongelmien kehittymiseen ja puun säilyvyyteen vaikuttavat olennaisesti sekä kosteus ja lämpötila että niiden vaikutusaika. Homeen kehittymiseen tarvittava ilman suhteellinen kosteus on alempi ja vaikutusaika huomattavasti lyhyempi kuin vastaava lahon kehittymiseen tarvittava aika. Laho kehittyy lähinnä vain silloin, kun ilman suhteellinen kosteus on hyvin pitkään yli 95 % ja puun kosteus lähellä puusyiden kyllästymispistettä (puun kosteus 25 - 30 %).

Hometta tulee tarkastella lahosta erillisenä ilmiönä eikä homeen kehittymisen malli sovellu lahon tarkasteluun. **Lahon** osalta kosteusolojen on oltava suuremmat (RH yli 95 %) ja vaikutusajan pidemmän (viikkoja - kuukausia - vuosia). Alle 90...92 %:n ilman suhteellisessa kosteudessa ei lahon kehittymistä ole havaittu otollisissakaan lämpötiloissa /25/. Lähellä 0 °C:n lämpötilaa lahon kehittyminen on erittäin hidasta, vaikka kosteusolot olisivat otolliset (ulkoilmassa oleva puu lahoaa Pohjois-Suomessa hitaammin kuin Etelä-Suomessa). Lämpötilan ollessa +30 ^{o}C laho kehittyy hyvin nopeasti 97...100 %:n ilman suhteellisessa kosteudessa ja +20 ^{o}C:ssa laho kehittyy alkuvaiheessa useita kertaluokkia nopeammin kuin +5 ^{o}C:ssa. Käytännössä laho vaatii kehittyäksen pitkään vaikuttavat kosteat tai märät olosuhteet ja laho on rakenteissa usein paikallista. Laajat vauriot ovat kosteusvaurioihin liittyvä erikoistapaus. Lahoon tai vakavaan homevikaan johtavat olot rakenteissa ovat selvästi helpommin rajoitettavissa ja lahoaminen on seuraus rakenteiden virhetoiminnasta /13/. Toisaalta hankalimmat homesienet kasvavat silloin, kun materiaalit ovat kosteita (tasapainokosteus lähellä 98 - 100 % ilman suhteellista kosteutta). Tällöin tulisi huomio kiinnittää erityisesti näihin hankaliin lajeihin.

3.3 HOMEEN KASVULLE KRIITTISTEN OLOSUHTEIDEN MALLINTAMINEN

3.3.1 Lähtökohdat

Hannu Viitasen väitöskirja /23/ vastaa homeen kasvun alkamista koskeviin kysymyksiin pienillä koekappaleilla tehtyjen homehtumiskokeiden perusteella. Tulokset on muotoiltu homeen kasvun alkamiseen tarvittavaa aikaa kuvaaviksi regressiomalleiksi, jotka soveltuvat homehtumisriskin arviointiin vakio-olosuhteissa. Muuttuvissa olosuhteissa mallit koskevat vain kahden eri olosuhteen vuorottelua, jolloin kysymyksessä ovat vuoroin homeen kasvulle suosiolliset ja vuoroin epäsuotuisat kosteusolot vakiolämpötilassa. Muunlaisissa muuttuvissa olosuhteissa tehtyjen kokeiden määrä on hyvin suppea eikä yksinkertaisiakaan laskennallisia malleja ole käytettävissä.

Homeen kasvua säätelevinä tekijöinä tietyssä puupohjaisessa materiaalissa voidaan pitää lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ravinteikkuutta. Ongelman yksinkertaistamiseksi tehdään seuraavat olettamukset:

1. Homeen kasvu riippuu vain materiaalin välittömällä pinnalla olevissa huokosissa vallitsevista olosuhteista. Nämä olosuhteet muodostuvat ulkoisten olosuhteiden seurauksena rakenteen kosteuskäyttäytymistä kuvaavien mallien kautta.

2. Home ei vaikuta materiaalin tai kokonaisen rakenteen kosteuskäyttäytymiseen, kuten esim. sorptio-ominaisuuksiin.

3. Pienet koekappaleet ovat tehdyissä kokeissa asettuneet riittävällä tarkkuudella ympäröivien olosuhteiden määräämään tasapainokosteuteen, jolloin olemassaolevat regressiomallit kuvaavat äärettömän ohuen lastun homehtumista ‘tarkasti’.

3.3.2 Homeen kasvulle suosiollinen alue

Homeen kasvun alkamiselle suosiolliset kosteusolot riippuvat vallitsevasta lämpötilasta likimain kuvan 3.6 mukaisella tavalla. Mitä alhaisempi lämpötila on, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta home alkaisi kasvaa. Jos kosteus on tämän kriittisen rajan alapuolella, on homeen kannalta kysymyksessä ns. kuiva aika, joka selvästi hidastaa kasvua. Kyseistä rajakäyrää kuvataan yhtälöllä /7/.

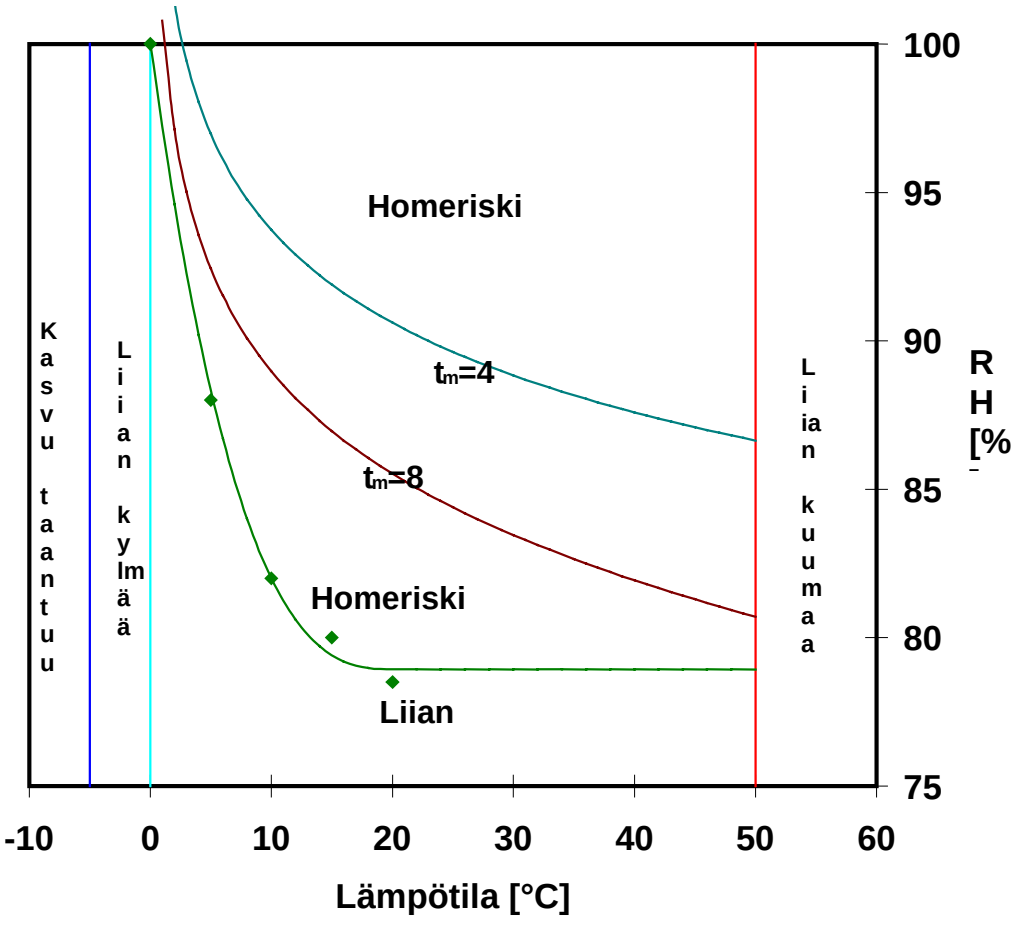
$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0, \text{ kun } T <= 20 \\ 80, \text{ kun } T > 20 \end{cases} \quad (3.1)$$

Myös lämpötilan suhteen on selvästi havaittavissa alue, jolla homeen kasvu ylipäänsä on mahdollista. Pakkasessa home ei kasva, kuten ei myöskään yli 50 °C lämpötilassa. Riittävän kylmä tai kuuma olosuhde lopettaa jo alkaneen kasvun ja saattaa jopa tappaa rihmaston. Etenkin kasvava rihmasto on herkempi, mutta osa sienipartikkeleista kuitenkin kestää ääriolosuhteita paremmin.

Homehtumiskokeissa homeen kasvua mitattiin ns. homehtumisasteella tai home-indeksillä *M* (0-5), joka vastaa homeen esiintymistä taulukossa 3.3 esitettyjen havaintojen mukaisesti.

Taulukko 3.3. Mallinnustutkimuksessa käytetty homeindeksi (M).

Homeindeksi	Havaittu homekasvu	Huom
0	ei kasvua	pinta puhdas
1	mikroskoopilla havaittava kasvu	itiöt itävät, alkavaa homekasvua
2	selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	pinnalla melkoisesti rihmastoa, yli 10 % peitto tutkittavasta alasta
3	ensimmäiset visuaaliset havainnot	uusia itiöitä alkaa muodostua
4	selvästi silmin havaittava kasvu	10 - 50 % peitto tutkittavast alasta
5	runsas silmin havaittava kasvu	yli 50 % peitto tutkittavast alasta
6	erittäin runsas kasvu	lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto



Kuva 3.6. Homeen kasvulle suosiolliset kosteus- ja lämpötilaolot matemaattisena mallina.

3.3.3 Malli kasvulle suosiollisissa muuttuvissa oloissa

Vakio-oloissa pienillä männyn ja kuusen pintapuun koekappaleilla on saatu homeen kasvun alkamisen (homehtumisaste 1) kriittistä aikaa kuvaava regressiomalli

$$t_m = \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02) . \qquad (3.2)$$

Tässä

t_m = homeen kasvun alkamiseen tarvittava aika [vko]

T = lämpötila [°C]

RH = suhteellinen kosteus [%]

W = puulaji (0: mänty, 1: kuusi)

SQ = pinnan laatu / ravinteikkuus (0: kuivauksen jälkeen uudelleen sahattu pinta,
1: alkuperäinen, keinokuivaamosta suoraan tullut pinta)

Yhtälöä (3.2) käytettäessä tulee kuitenkin huomata edellä kuvan 3.6 mukaiset rajoitukset, joita ei ole sisällytetty itse regressiomalliin.

Myös homehtumisasteen 3 saavuttamiseen tarvittavalle ajalle t_v on käytettävissä vastaava malli. Suhde t_m/t_v on tarkastelun kannalta mielenkiintoisella alueella likimain vakio, jonka arvo on $\sqrt{3}$. Näin ollen on tarkoituksenmukaista olettaa homehtumisasteen kasvavan ajan suhteen parabolisesti alueella M = 0 - 3. Yhtälö (3.2) voidaan tällöin tulkita differentiaaliyhtälönä

$$\frac{d\sqrt{M}}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02)} . \qquad (3.3)$$

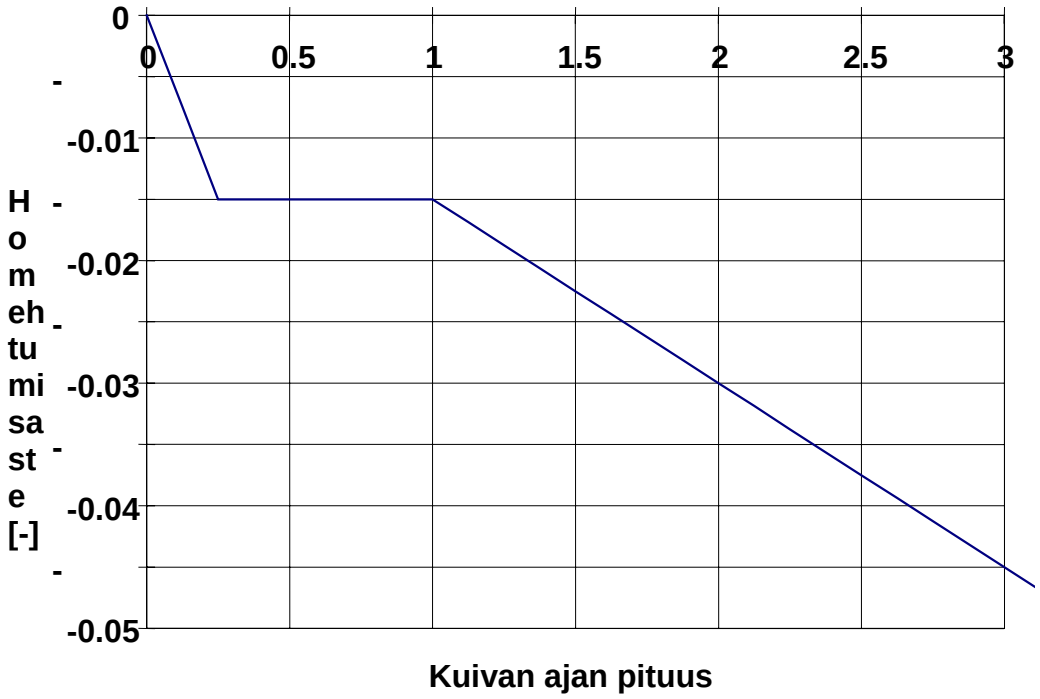
Ajan t yksikkönä käytetään tässä vrk. Alkutilanteessa M = 0 ja kasvu alkaa, kun saavutetaan homehtumisaste 1. Arvo M = 3 merkitsee kuvatulla tavalla visuaalista havaintoa homeen kasvusta.

Kokeiden perusteella voidaan lisäksi olettaa, että yhtälö (3.3) on sellaisenaan käyttökelpoinen myös muuttuvissa kosteusoloissa, jos olosuhteet ovat koko ajan homeen kasvulle suosiolliset. Tällöin homehtumisaste kasvaa olosuhteista riippuvalla vaihtelevalla nopeudella.

3.3.4 Kuivan ajan vaikutus

Kokeiden perusteella tiedetään, että homeen kasvun alkaminen hidastuu olennaisesti, jos koekappaleita välillä altistetaan kasvulle epäsuosiollisille olosuhteille. Kasvun alkamisen hidastuminen on sitä voimakkaampaa, mitä pidempi kuiva jakso on, mutta hidastuminen ei ole kuivan jakson pituuden suhteen lineaarista. Kuivan jakson alku vaikuttaa asiaan voimakkaimmin ja asian kokonaisvaikutusta voidaan kokeiden perusteella kuvata likimain kuvan 3.7

mukaisella kaaviolla. Kuivalla jaksolla tarkoitetaan tässä tapauksessa alle 75 % ilman suhteellista kosteutta vastaavat kosteusolot.



Kuva 3.7. Kuivan (< RH 75 %) ajan vaikutus homehtumisasteeseen ($\Delta\sqrt{M}$).

Kuvan mukaisesti homehtumisaste vähenee kuivana kautena, ja asiaa voidaan kuvata vallitsevan kuivan kauden alkuhetkestä t_1 kuluneen ajan funktiona yhtälöllä

$$\frac{d\sqrt{M}}{dt} = \begin{cases} -0.06, \text{kun } t - t_1 \le 6 \text{ h} \\ 0, \text{kun } 6 \text{ h} \le t - t_1 \le 24 \text{ h} \\ -0.015, \text{kun } t - t_1 > 24 \text{ h} \end{cases} \qquad (3.4)$$

Luonnollisesti homehtumisaste ei kuitenkaan voi saada negatiivisia arvoja.

Kuivana kautena vallitsevan suhteellisen kosteuden arvo ei pienillä kappaleilla kokeiden mukaan merkittävästi vaikuta homehtumisen viivästymiseen. Lämpötilatason vaikutus asiaan on jossain määrin epäselvä, minkä vuoksi lämpötila- ja kosteusriippuvuudet on jätetty yhtälöstä (3.4) kokonaan pois.

Yhtälön (3.4) mukaan homehtumisasteelle 1 edenneen homehtumisen nollaamiseksi tarvitaan 67 vuorokauden mittainen kuiva kausi. On kuitenkin huomattava, että tehdyt kokeet kattavat kuivia kausia vain 14 vrk saakka, eikä niiden aikaskaala muutenkaan ole riittävä rakenteen vuotuista kosteuskäyttäytymistä koskevien johtopäätösten tekemiseksi.

3.3.5 Lämpötilavaihtelun vaikutus

Kokeiden mukaan lämpötilan vaihtelu hillitsee homeen kasvua vakiolämpötilassa tapahtuvaan kasvuun verrattuna. Kasvun hidastuminen on kuitenkin sangen vähäistä jo puolen vuorokauden välein vaihtuvassa lämpötilassa (15 - 25 °C). Asiaa voidaan mallittaa liittämällä homeen kasvunopeuteen lämpötilan aikaderivaatan itseisarvoon verrannollinen hidastustermi, mutta asialla ei näytä olevan merkitystä tarkasteltaessa rakenteen käyttäytymistä 1 vuorokauden välein tulostetun datan perusteella.

Lämpötilavaihtelun vaikutuksen huomiotta jättäminen merkitsee mallin toimivan homeriskin suhteen koko ajan turvallisella puolella: todellinen homehtuminen ei ala ainakaan nopeammin tai herkemmin kuin mitä malli ennustaa. Kovin laajalla alueella vaihtelevissa lämpötilaoloissa voi sen sijaan olla, että malli liioittelee homeriskiä tarpeettoman voimakkaasti. Tämä siksi, että 10 °C lämpötilassa kysymys on eri homelajeista kuin 40 °C lämpötilassa, ja kumpikin tyyppi tarvitsee oman itämisaikansa.

3.3.6 Materiaalin vaikutus

Luodun mallin pohjana olevat regressiomallit perustuvat puhtaalla männyn ja kuusen pintapuulla tehtyihin homehtumiskokeisiin. Sydänpuun tiedetään olevan homehtumisen kannalta vähemmän riskialtis kuin vastaavan pintapuun, mutta käytännössä rakenteessa esiintyy aina molempia. Yhtälön (3.2) mukaisesti mänty homehtuu herkemmin kuin kuusi, ja lisäksi on havaittavissa selvä ravinteikkuudesta johtuva ero alkuperäisen kuivatun pinnan ja uudelleen sahatun pinnan välillä. Muita puulajeja ei malliin sisältynyt, mutta esim. koivun ja haavan on havaittu olevan keskimäärin alttiimman homehtumaan kuin männyn tai kuusen. Homehtumisalttius on jossakin määrin verrannollinen lahonkestävyyteen (vrt. taulukko 3.1).

Muiden materiaalien homehtumisen tarkasteluun luotua mallia voi yrittää soveltaa antamalla pinnan ravinteikkuusparametrille *SQ* sopivia arvoja. Täsmällistä tietoa eri materiaaleille sopivista arvoista ei kuitenkaan ole käytettävissä. Lisäksi on epävarmaa, kuinka hyvin tällaisella voimakkaalla yksinkertaistuksella saatuja tuloksia voidaan soveltaa käytäntöön.

3.3.7 Mallin ja kokeiden vertailu

Taulukossa 3.4 vertaillaan mallin antamia tuloksia pienillä kappaleilla tehtyjen kokeiden tuloksiin männyn osalta vakiolämpötilassa ja muuttuvissa kosteusoloissa. Vertailusta voidaan nähdä, että keskimäärin malli ennustaa homeen kasvun alkamisen hyvin, ja suurimmatkin virheet kasvun alkamiseen tarvittavan ajan tuhteen ovat vain luokkaa 30 %. Koetulokset ovat kuitenkin osittain jopa keskenään ristiriitaisia, esim. kuivan kauden pidentäminen näyttää jossakin tapauksessa jopa lyhentävän homehtumisen alkamiseen tarvittavaa kumulatiivista kosteaa aikaa.

Näyttää siltä, että homehtumisen matemaattisen mallin toimivuus on lähinnä kiinni alussa tehtyjen oletusten paikkansapitävyydestä. Erityisesti pienten koe-

kappaleiden tasaantuminen nopeassa kosteusvaihtelussa on selvästi kyseenalainen olettamus.

Taulukko 3.4. Matemaattisen mallin ja kokeiden vastaavuus.

	thigh	tlow	tm (koe)	tm (malli)	virhe-%	
SQ=0	1	0	1.5	1.4	-7	
	0.25	0.25	7.2	7.7	7	
	0.25	0.75	8.5	16		koetulos epäuskottava
	0.25	0.75	>24	ei homehdu		OK
	0.5	0.5	5	4.3	-14	
	0.5	1. 5	9.3	11	18	
	1	1	2.6	3.4	31	
	1	2	5	6.1	22	
	2	1	3	2.3	-23	
	2	7	15	13	-13	
	7	14	3.7	3.7	0	
	7	7	3	2.6	-13	
	14	7	1.3	1.4	8	
SQ=1	1	0	1	1.1	10	
	0.25	0.25	5.1	3.7	-27	
	0.25	0.75	6.7	7.6	13	
	0.25	0.75	>24	38		OK
	0.5	0.5	3	2.6	-13	
	0.5	1.5	7.3	6.1	-16	
	1	1	1.6	2.3	44	

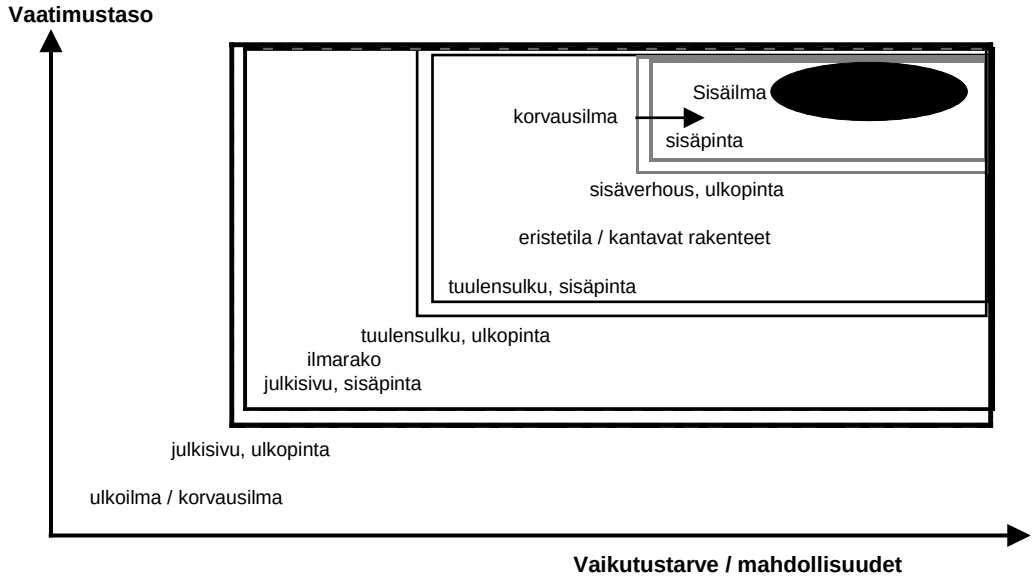
3.4 HOMEEN KASVUN KRITEERISTÖ JA HOMEVAURION TUNNUSMERKISTÖ

3.4.1 Tausta

Käytännössä pintojen ja rakenteiden luonnollista vanhemista onkin toisinaan vaikeaa erottaa haitallisesta vioittumisesta tai vaurioitumisesta. Tässä suhteessa tarvitaan **kriteeristö** kuvaamaan ja erottamaan vaurio sallituista ja normaaleista ilmiöistä. Kriteeristön tulee olla ohjeellinen ja eri tilanteisiin sovellettava. Pelkät mikrobiologiset kriteeristöt eivät riitä vaan niihin on sisällettävä myös fysikaalisia, kemiallisia sekä materiaali- ja rakennekohtaisia ulottuvuuksia. Teknisten ulottuvuuksien ohella tarvitaan ilmeisesti myös lääketieteellisiä sekä yhteiskunnallisia ulottuvuuksia, jolloin kriteeristöt mutkistuvat.

Kuvassa 3.8 on esitetty periaatteellinen kuva kriteeristön vaatimustasosta ja vaikutustarpeista ja -mahdollisuuksista eri rakenneosissa. Kuva on laadittu olemassa olevan tiedon pohjalta arvioiden ja kuvassa esitetty vaatimuskuvaus on vain suuntaa-antava, mutta sillä voidaan karkeasti jakaa rakennuksen eri osat erilaisiin vaa-

timusluokkiin. Todellisuudessa kussakin rakenneosassa on sekä ajallisia että paikallista vaihtelua. Esim ulkoilman homepartikkeli- ja mikrobipitoisuus vaihtelee hyvin laajasti talven lähes 0-lukemista loppukesän ja syksyn useiden tuhansien tai kymmenientuhansien arvoon. Sisäilman osalta vastaavaa vaihtelua esiintyy, kun korvausilma otetaan suoraan ulkoilmasta esim. ikkunatuuletuksena. Tällöin seurauksena on usein kuitenkin suhteellisen laaja eri home- ja mikrobilajien kirjo. Sen sijaan mahdollisessa vauriotapauksessa lajisto on usein harvempi ja pitoisuusarvo jonkin verran korkeampi, riippuen tietysti mikrobilähteen sijainnista sisäilmaan nähden.



Kuva 3.8. "Homekriteeristön" vaatimukset ja toteuttamismahdollisuudet rakennuksen eri osissa.

3.4.2 Homeen kasvu, sen arvioiminen ja homekriteeristön perusteet

Homeet ja mikrobit ovat eräs luonnollinen osa ympäristöämme. Tämän vuoksi on tavattoman vaikeaa asettaa tiukkoja rajoja niiden esiintymisestä rakennuksissa. Homeongelman määrittämiseksi on olemassa ohjearvoja sekä sisäilman että materiaalien osalta. Sisäilman laadun osalta Sosiaali- ja terveysministeriö /17/ on antanut taulukossa 3.5 esitetyt ohjearvot. Ohjearvot on tehty Andersen keräimellä tehtäviä mittauksia varten ja ne pätevät vain talviaikana tai lumen peittäessä maan. Kesäaikana ulkoilman itiölähteet ovat niin suuret, että ne ylittävät moninkertaisesti esitetyt ohjearvot.

Ongelmana on usein se, että ohjearvot pätevät vain silloin, kun ulkoilmasta ei ole odotettavissa mikrobilähteitä. Niinpä kokonaismikrobipitoisuus ei ole kovin hyvä mahdollisten ongelmien indikaattori. Nykyisin pyritäänkin analysoimaan erityisiä ns. indikaattorilajeja. Kosteusvauriotapauksissa eräitä ns. "etsintäkuulutettuja" lajeja ovat mm. *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus versicolor*, *Acremonium* eli *Cephalosporium*, *Alternaria alternata*, *Ghaetomium globosum* (itseasiassa katkolahottaja), *Fusarium*, *Eurotium*, *Phialophora*, *Stachybotrus atra*, *Trichoderma viride*,

Ulocladium /9/. Toisaalta näitä esiintyy myös ympäröivässä luonnossa, mm komposteissa ja hajoavissa materiaaleissa. Kuivien sisäpintojen osalta homekasvua ei tulisi sallia. Tämä ei koske itiöpitoisuuksia. Kosteissa tiloissa paikallista kasvua voi esiintyä, jos se on lievää ja paikallista ja poisto onnistuu pinnan puhdistuksella (esim. homekasvu on pintaan kertyneessä liassa).

Taulukko 3.5. Andersen kuusivaiheimpaktorilla (homepartikkelien keräin) saatujen sisäilman homepartikkelipitoisuuksien tulosten arviointiperusteet. On voimassa vain talviaikana. Kesäaikana on verrattava ulko- ja sisäilman lajistoon. Mahdollisessa kosteusvauriotilanteessa on myös arvioitava lajistoa.

Mitattu sisäilman homesienipartikkelipitoisuus kpl / m^3	Mittaustuloksen tulkinta (talvi-aika)	Tuloksiin perustuva arvio sisäilman laatuluokasta
alle 100	alhainen pitoisuus, jos mikrobilajisto on tavanomainen	1
välillä 100 … 500	voi merkitä kohonnutta pitoisuutta, jos mikrobilajisto poikkeava	2
yli 500 tai “ylikasvu”	kohonnut pitoisuus, mahdollinen terveyshaitta, vrt mikrobilajisto	3

Käytännössä kosteusvaurioita on etsitty sisäilma-analyysien avulla. Kosteusvauriotilanteissa pitäisi tutkia lähinnä materiaaleja eikä ilmaa, koska sisäilman mikrobipitoisuuden ja mahdollisen mikrobiongelman välinen riippuvuus on kovin vaihteleva ja epävarma. Viime aikoina onkin alettu suosittaa materiaalien tukimusta. Materiaalien kuntoa voidaan tutkia ns. viljelymenetelmällä tai tutkimalla niitä suoraan mikroskoopilla. Viljelymenetelmien osalta on annettu ohjearvo niin, että jos pinnalta tehdyssä viljelykokeessa kasvuun lähtevien homepartikkelien määrä on yli **10000 - 100000, PMY / g**, tulos viittaa, että a.o. kohdassa on todennäköisesti aktiivista homekasvua /6/. PMY tarkoittaa pesäkkeen muodostava yksikkö, joka voi olla yksittäinen itiö, itiöryhmä tai rihmastopartikkeli.

Mahdollisen todellisen sienikasvun varmistamiseksi on kuitenkin aina syytä tarkastella materiaalia myös mikroskooppisesti, koska sillä voidaan havaita mahdolliset rihmastot. Suuri viljelyllä saatu pitoisuusarvo voi myös viitata vain pintaan kertyneisiin partikkeleihin tai pinnan likaisuuteen. Käytännön kannalta suuret arvot viittaavat toki ainakin pinnan likaisuuteen, johon on syytä puuttua. Toisaalta ohjearvo on sikäli huono, että se ei ota huomioon tarkasteltavaa pinta-alaa eikä sitä, että pinta saattaa olla saastunut muista syistä (itiölaskeuma). Vastaavasti tilanne voidaan heti varmistaa valomikroskooppisella analyysillä: jos näytteessä havaitaan rihmastoa, on se selvä merkki siitä, että pinnalla on kasvanut tai kasvaa sientä. Jos scanning elektronimirkoskopiaa (SEM) käytetään pinnan tutkimuksessa, voidaan silläkin havaita mahdollinen kasvu. Lisäksi menetelmällä voidaan laskea pintaan kertyneet partikkelit. Partikkelimäärä ei kuitenkaan aina mitenkään liity

mahdolliseen kasvuun, vaan pintaan kertyneistä epäpuhtauksista. SEM-menetelmän ongelmana on se, että se rajoittuu yleensä hyvin pienelle alueelle ja se on kallis verrattuna valomikroskopiaan. Sillä saatuja itiöpitoisuustuloksia ei voida suoraan verrata viljelymenetelmillä saatuihin tuloksiin. Viimeaikaisten tulosten mukaan /19/ SEM-menetelmä sinänsä antaa vertailukelpoisia tuloksia muihin menetelmiin verrattuna, kunhan tulosten tulkintaan kiinnitetään riittävästi huomiota.

Homeen esiintyminen pinnoilla ei ole tasaista ainakaan silloin, kun kosteusrasitus ja homehtumisaste ovat pienet. Tyypillistä tällaisissa tapauksissa on homeen paikoittainen esiintyminen, joka voi näkyä esim. pieninä hometäplinä. Täplän kohdalla homeen peittävyys ja itiöpitoisuus on suuri, mutta koko tarkasteltavan pinnan alueen huomioon ottaen näkyvän homeen peittävyys voi olla keskimäärin vähäinen. Täten käytännön esiintymiä arvioitaessa tulee sopia minimipinta-alasta (tarkastelupinta), jonka osalta home-esiintymän peittävyys on tarkoituksenmukaista arvioida ja verrata kriteereihin pinnasta tehtävien havaintojen perusteella. Tällöin tulee määritellä myös käytetty menetelmä sekä kullakin menetelmällä saadut raja-arvot. Mikäli mikrobikasvusta johtuu suoranaista hajuongelmaa, on se tällöin selvä haitta, joka pitää korjata. Sisäilmasta mitattujen itiöpitoisuuksien verrattavuutta mahdollisiin rakenteissa oleviin vaurioihin pidetään tällä hetkellä heikkona. Tarkasteluperusteena on tällä hetkellä lähinnä kohteista löydettyjen “indikaattorilajien” ja niiden pitoisuuksien tarkastelu.

Tässä tutkimuksessa homeen kasvulle otollisten olosuhteiden mallintamisessa on noudatettu luokiteltua kriteeristöä (katso taulukko 3.3). Siinä indeksi 1 tarkoittaa homeen kasvun ensivaiheita (mikroskooppisesti havaittava) ja indeksi 3 tarkoittaa ensimmäisiä paljain silmin havaittavia homepilkkuja pinnalla. Indeksiä ei ole sidottu pinnalla oleviin partikkeleiden määrään, koska näillä ei välttämättä ole suoraa yhteyttä. Mallien pohjana olevat laboratoriokokeet on tehty niin, että kappaleet on ennen altistusta “saastutettu” homeilla, jotta ollaan varmoja siitä, että kukin koesarja on suhteellisesti samassa “lähtötilanteessa” /26/. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää homeen kasvuoloja, ei partikkeleiden määrää. Myöhemmissä kokeissa on havaittu, että kasvun ja partikkeleiden määrän välillä ei ole kiinteää suhdetta. Pinnat voivat olla saastuneita, ts. niiden partikkelimäärät ovat korkeita, vaikka kasvua ei olisikaan. Käytännössä kohonneet partikkelimäärät voivat olla indikaatio mahdollisesta homekasvusta tai vauriosta, joka on aiheuttanut pitoisuuden kasvun tutkittavalla pinnalla /15/.

Käytännön kannalta vakavamman kosteusrasituksen ja homekasvun indeksit ovat välillä 4 - 6, jolloin suurin osa tarkasteltavasta pinnasta on homekasvun peitossa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kyseessä olisi homevaurio, vaan että pinnalla on runsas homekasvu. Vioitukset ja vauriot on pääteltävä itse materiaalissa tapahtuneiden muutosten pohjalta. Terveydelliseltä kannalta tarkastellen on mahdollista, että jo indeksi 2 (selvästi mikroskoopilla havaittava kasvusto) saattaa olla ongelmallista. Tässä tarkastelussa ei ole otettu huomioon pinnasta tarkasteltujen partikkeleiden määrää tai pitoisuutta.

Homeen esiintyminen pinnoilla ei ole tasaista ainakaan silloin, kun kosteusrasitus ja homehtumisaste ovat pienet. Tyypillistä tällaisissa tapauksissa on homeen paikoittainen esiintyminen, joka voi näkyä esim. pieninä hometäplinä. Täplän

kohdalla homeen peittävyys ja itiöpitoisuus on suuri, mutta koko tarkasteltavan pinnan alueen huomioon ottaen näkyvän homeen peittävyys voi olla keskimäärin vähäinen. Täten käytännön esiintymiä arvioitaessa tulee sopia minimipinta-alasta (tarkastelupinta), jonka osalta home-esiintymän peittävyys on tarkoituksenmukaista arvioida ja verrata kriteereihin pinnasta tehtävien havaintojen perusteella. Tällöin tulee määritellä myös käytetty menetelmä sekä kullakin menetelmällä saadut raja-arvot.

Käytännössä homevaurioita tarkastellaan visuaalisesti. Toki tämän tukena käytetään tarkempia analyyseja. Visuaalisen tarkastelun osalta on syytä erottaa suuret pinnat kuten laatat, kaakelit, levyt, laudat, hirret jne. sekä pienet viivamaiset pinnat kuten kaakelisaumat, elementtisaumat yms. Ensimmäisen osalta tarkastelupinnan koko voisi olla vähintäin 0,25 dm^2 ja toisessa tapauksessa tarkastelupinnan pituus voisi olla 100 mm ja leveys sauman koko leveys. Nykyisin pinnalta tehtävät viljelykokeet (sivelynäytteet elatusalustalle) tehdään 50 x 50 mm suuruiselta alueelta. Tämä siksi, koska menetelmä on kalibroitu tälle koolle. Se ei kuitenkaan välttämättä ole käytännössä tarkoituksenmukainen menetelmä ja sillä mitataan lähinnä vain pinnan mikrobiologista puhtausastetta. Mikäli kyseessä on pienet erilliset pistemäiset pinnat kuten helat, painikkeet, laipat yms.; tarkastelupinta on kukin pistemäinen osapinta erikseen. Viljelymenetelmää voidaan toki tällaisessa tapauksessa käyttää havaintojen muiden tukena, mutta päätelmiä ei tule pelkästään perustaa viljelymenetelmään.

Visuaalisesti havaittavan homeen peittävyydellä tarkoitetaan tarkastelupinnalla nähtävissä olevan home-esiintymän pinta-alan suhdetta tarkastelupinnan pinta-alaan. Tällöin voidaan apuna käyttää esim. pinnoitteiden hilseilyn arviointiin tarkoitettuja standardikuvia. Kun tarkasteltavana on koko seinä, tulisi “mitta-alueita” ottaa riittävästi, jotta saataisiin kattava kuva tilanteesta. Tällöin olisi tarkoituksenmukaista laajentaa aluetta. Ongelmana on se, että kyseessä on mikrobiologinen ongelma, joka ei ole nähtävissä paljain silmin. Visuaalinen tarkastelu sopii vain tilanteisiin, joissa ongelma on kehittynyt jo paljain silmin havaittavaan asteeseen.

3.4.3 Mikrobi- tai homekasvun hyväksyttävyyden rajat normaalioloissa

Tämän kohdan vaatimukset koskevat materiaalipinnoilla olevaa ainakin ajoittain aktiivisesti kasvavaa “elävää” hometta, joka on syntynyt tai jatkaa kasvuaan rakennuksessa sen ollessa käytössä. Lähtökohtana voi olla joko homeeton rakennus tai rakennuskosteuden tai satunnaisen kastumisen seurauksena alkanut homeen tilapäinen kasvu. Tässä kohdassa tarkoitetulle tilanteelle on kuitenkin ominaista se, ettei homeen kasvu pysähdy, vaan jatkuu lähtökohtatilanteesta rakennuksen käytönaikaisen kosteuskuormituksen johdosta.

A. Ulkoilmaan rajoittuvat rakenteet

Katot

Vesikatto altistuu suoraan sadevedelle, lumelle sekä jäälle. Myös ulkoilman korkea suhteellinen kosteus rasittaa sekä itse vesikattoa että sen alusrakenteita. Vesikatteeseen tiivistyvä vesi voi lisäksi kastuttaa alla olevia rakenteita veden valuessa

alaspäin. Kylmään ullakkotilaan voidaan soveltaa samankaltaista periaatetta kuin kylmiin ulkorakenteisiin yleensä. Ullakkoilman olosuhteisiin vaikuttavat ulkoilma, sen pääsy ullakkotilaan, mahdolliset lämpövuodot ja ilmavuodot. Näistä ulkoilman pääsy ullakkotilaan ja sisäilman vuoto ullakolle aiheuttavat kosteusrasitusta. Lämpövuoto tai ullakkotilan lämmittäminen sekä ullakkoilman kohtuullinen tuulettuminen vähentävät kosteusrasitusta. Vesikatteen alusrakenteet altistuvat selvästi sellaiselle kosteusrasitukselle, että homeen kasvun riski on olennainen. Siihen on vaikea edes rakenteellisesti vaikuttaa. Sen sijaan ullakon kantavat rakenteet sekä välipohjan rakenteiden ei normaalisti tulisi altistua pitkäaikaiselle kosteusrasitukselle.

Yhteenvetona voidaan mainita, että ullakkotilan olosuhteet ovat luontaisesti ajoittain sellaiset, että homekasvuriski on olemassa. Homeen kasvuun voidaan vaikuttaa vain materiaalien valinnoilla ja niiden suojauskäsittelyillä. Rakenteellisesti tulee olosuhteisiin vaikuttaa niin, että riskiolot ovat mahdollismman lyhytaikaiset ja paikalliset.

Yläpohjarakenteet voidaan tietyin varauksin rinnastaa eristettyihin seinärakenteisiin, joita tarkastellaan myöhemmin.

Lattiarakenteet

Ulostuulettuva ryömintätilainen lattia on tuuletusaukkojen välityksellä suoraan yhteydessä ulkoilmaan, jolloin ulkoilman olot vaikuttavat myös ryömintätilan oloihin. Tämän lisäksi perustus- ja sokkelirakenteet sekä ryömintätilaan rajoittuva maapohja vaikuttavat myös ryömintätilan ilman laatuun. Samoin kauin kattorakenteissa, ulkoilman ja sisäilman lämpötilaerot aiheuttavat kosteuden tiivistymisriskin. Ajallisesti tiivistymisriski ei satu samanaikaisesti, mutta kummassakin tapauksessa syntyy selvästi homeen kasvun riskirajat ylittävät olot, ainakin paikallisesti ja ajoittain. Perinteistä ryömintätilaa tai ns. Multapenkkilattian alustilaa ei voida verrata mitenkään sisäilman laatuun ja näitä tulisi tarkastella erikseen. Tapauksissa, joissa ryömintätilasta pääsee ilmaa myös sisäilmaan, voivat vaikutukset sisäilman laatuun olla haitalliset. Ryömintätilan ilmalle on luontaista, että homeitiö- ja partikkelipitoisuudet ovat ainakin ajoittain hyvin korkeat ja että ryömitnätilaan rajoittuvissa pinnoissa on myös näkyvää paikallista kasvua. Lahon esiintymistä tai laajaa homesienikasvua ei kuitenkaan pidetä normaalina tilanteena.

Sisätilaan yhteydessä oleva tai ns. lämmin ryömintätilainen lattia on toimivuudeltaan erilainen. On ilmeistä, että tämänkaltaisessa lattiarakenteessa homeen kasvun riskit ovat pienemmät. Toisaalta tämänkaltaisen lattian ongelmana saattaa olla sisäilman pölyn ja lian kertyminen rakenteisiin, jolloin pinnan herkistyvät mikrobi- ja homekasvulle. Kriittiset kosteus- ja lämpöolot eivät kuitenkaan muutu. Vastaavasti sisäilman kosteus saattaa aiheuttaa paikallista ja ajoittaista kosteuden tiivistymisongelmia viileämmissä rakenneosissa. Vastaava rakenne on betonilaatalle koolattu lattia, joka tuulettuu sisäilmaan.

Ryömintätilaan rajoittuvien materiaalien pintakäsittely veden imeytymistä estävällä tai hidastavalla aineella lisää materiaalien vastuskykyä myös hometta vastaan. Mikäli tuotteessa on myös fungisidisiä aineita, tulos on vielä parempi.

Näin voidaan ympäristöstä johtuviien kosteusrasitusten haitallista vaikutusta pienentää /16/. Homekriiteeristön mukaan arvioiden näkyvä lievä home saa peittää jatkuvassa käytössä enintään 5 - 10 % tarkastelupinnan alueesta missä tahansa ryömintätilaan rajoittuvassa pinnassa lukuunottamatta perusmuuria 30 cm korkeuteen maanpinnasta ja maan pintaa. Tällöin homeen aiheuttamat haitat eivät saa levitä sisäilmaan tai ylempiin rakennusosiin.

Seinät

Julkisivut altistuvat seinän ja talon rakenteesta sekä ympäristöstä riippuen eri asteisille kosteus- ja mikrobirasituksille. Mikäli julkisivun tausta on tuuletettu, pääsevät myös ulkoilman partikkelin tähän ilmatilaan. Tätä voidaan pitää luonnollisena rasituksena (vertaa ikkunatuuletus). Julkisivujen ulkopinnat käsitellään sään vaikutusta vastaan. Vaadittava käsittely riippuu mm ympäristön rasituksesta, rakenteista ja materiaaleista. Etenkin rasittavissa oloissa olisi harkittava myös julkisivun taustan käsittelyä veden ja eliöiden vaikutusta vastaan Mikäli julkisivun taustaa ei ole kemiallisesti suojattu hometta ja kosteutta vastaan, saattaa myös siinä olla ulkoilman kosteuden vaikutuksesta syntynyttä home- ja mikrobikasvua. Toisaalta on ilmeistä, että mikrobipitoisuus lisääntyy iän myötä ja siinä on ilmeisesti myös ilmansuunnaasta ja vuodenajasta riippuvaa vaihtelua.

Tuulensulun ulkopinta altistuu myös ulkoilman kosteudelle tuuletusilmaraon kautta, toisaalta myös mahdollisen julkisivuun kohdistuneen kosteusrasituksen kautta, jota voidaan pitää ns. luontaisena rasituksena. Tuulensulun ulkopinnalla voidaan sallia ajoittaista, lievää mikrobi- ja homsienikasvua silloin, kun kasvun aiheuttajana on lähinnä ulkoilman olosuhteet. Tavoitteena on kuitenkin oltava, että tuulensulun ulkopinta käsitellään kosteuden ja mikrobien vaikutusta vastaan. Mahdollisia käsittelyjä ovat mm. veden imeytymistä ehkäisevät käsittelyt sekä bio- ja fungisidit.

Homekriteeristön mukaan näkyvä lievä home saa peittää jatkuvassa käytössä enintään 5 - 10 % tarkastelupinnan alasta. Mainittu vaatimus hyväksyy sen tosiasian, että ulkoilman kanssa kosketukseen joutunut puu tai muu homeelle soveltuvia ravinteita sisältävä materiaali on Suomen ilmastossa homeen kasvualusta ainakin syysjaksoina. Auringon säteilyn absorptio voi vähentää olennaisesti homeen kasvua, mutta osa vaipasta voi olla kokonaan varjostettu. Näin ollen vaatimus on mitoitettu varjossa olevan “pohjoisseinän” mukaan. Puun kosteutta lisäävänä tekijänä voi olla ns. säteilyjäähtyminen avoimelle pohjoissuunnan taivaalle.

B. Eristetila

Tuulensulun sisäpinta on jo rakenteen toimivuutta ajatellen paremmassa tilanteessa, mutta siihenkin kohdistuu etenkin ajoittaista kosteusrasitusta, etenkin sijaintikohdasta ja vuodenajasta riippuen. Itse kantavan rakenteen osalta lämmöneristeen uloin osa on huomattavasti enemmän alttiina kosteudelle kuin vastaava sisäosa. Tässäkin on havaittu mm. vuodenajasta ja sijainnista johtuvaa vaihtelua.

Eristetilan ulommassa osassa homeen kasvuun johtavia kosteus- ja lämpöoloja voidaan syntyvän ajoittain ja ajan kuluessa ne voivat johtaa lievään paikalliseen homekasvuun. Sisäilman vuodot eristetilaan sekä ulkoilman vaikutus lisäävät ho-

meriskiä. Eristetilan ulko-osassa voidaan ajatella syntyvän paikallista homekasvua ja itiö- sekä homepartikkelien kertymistä, etenkin ilmavuotokohtiin. Tällöin homepartikkelien pääsyä sisäilmaan ehkäisee tiivis sisäpinta sekä itse eristemateriaalin suodattava vaikutus. Tuulensulkulevyssä voi myös olla paikallista, lievää homekasvua. Jos homekasvu kuitenkin aiheuttaa hajua tai terveyshaittaa itse sisäilmaan, on asiaan puututtava. Tuulensulun sisäpinnan käsittely veden imeytmistä ja eliöiden vaikutusta vastaan lisäävät sen vastustuskykyä, mutta toisaalta tulee ottaa huomioon kosteuden kulkeutuminen rakenteessa.

Itse kantavassa rakenteessa olosuhteiden tulisi olla sellaiset, ettei synny homekasvuun johtavia olosuhteita. Etenkin eristetilan sisäosissa olosuhteiden tulisi olla jatkuvasti turvallisella tasolla. Ulompiin rakenneosiin liittyvissä rakenteissa homekasvuun johtavat olosuhteet voivat olla ajoittain, mutta sellaiset, ettei pysyvää homekasvua pääse syntymään. Toisaalta, kuten aiemmin mainittiin, ulkoilman vuoto voi aiheuttaa partikkelirasitusta sekä paikallista kosteusrasitusta.

Näkyvää lievää hometta saa muodostua ja esiintyä jatkuvassa käytössä enintään vähäisinä visuaalisesti havaittavina täplinä, joiden peittävyys tarkastelupinnassa on enintään 2 - 4 %. Tällöin peittävyysarvoina ei voida pitää yksittäisiä pisteitä, vaan niiden muodostamaa yhtenäistä joukkoa. Yksittäisten pisteiden laskenta ei tule käytännössä kysymykseen.

Vaatimus tarkoittaa sitä, että lämmöeristyksen kylmässä pinnassa ja rungon kylmissä osissa voi syntyä lievää homeen kasvua, joka on seurausta ulkoilman korkeasta suhteellisesta kosteudesta syksyisin sekä siitä, että rakenteisiin kesällä sitoutunut hygroskooppinen kosteus lähtee ilyman jäähtyessä kylmään suuntaan ja nostaa suhteellista kosteutta rakenteen kylmässä osassa. Vaatimus ei salli sitä, että sisäilman kosteus ja sen tunkeutuminen rakenteeseen lisäisi olennaisesti em. “luonnollista” hometasoa..

C. Sisäpinnat ja sisäilma

Sisäilma ja sisätilat on luonnollisesti priorisoitu vaatimustasoltaan korkeimpaan luokkaan. Tässäkin suhteessa on kuitenkin vaihtelua. Kuten jo mainittiin, suoraan ulkoilmasta otetun korvausilman mukana tulee ulkoilman mikrobirasitusta sisätilaan. Tällä on merkittävää vaikutusta etenkin silloin, kun rakennus sijaitsee ympäristössä, jossa on luontaisia mikrobilähteitä kuten lahoavaa materiaalia maassa, komposteja, maatalouden toimintoja. Toisaalta myös muut ulkoliman partikkelit, esim siitepöly lisäävät rasitusta. Korvausilman suodatus on tällöin eräs merkittävä altistusta vähentävä tekijä, mutta se vaatii aktiivista hoitoa ja huoltoa.

Ilman vuoto ryömintätilasta ei ole suositeltavaa, koska tällöin ryömintätilassa olevat partikkelit tai hajut pääsevät sisäilmaan. Käytännössä ryömintätila on usein osoittautunut vieraiden hajujen lähteeksi. Vastaavasti seinän alaosista, läheltä maan pintaa tuleva korvausilma voi lisätä sisäilman mikrobirasitusta. Sisäilman ilmanvaihto on rakennettava niin, että korvausilma on mahdollisimman puhdasta. Joissakin tapauksissa on suositeltavaa sen suodattaminen.

Sisäpintaan voi kohdistua ajoittaista kosteusrasitusta etenkin märkätiloissa mutta myös muissa tiloissa etenkin viileinä aikoina kosteuden tiivistymisen ja kosteuden

tuoton seurauksena. Tällöin merkittävä tekijä on kosteusvaikutuksen kestoaika ja vaikutus itse materiaaliin. Eri materiaalien kosteuden sietokyky tai kosteuskapasiteetti vaihtelee. Puupohjaiset materiaalit reagoivat suhteellisen nopeasti kosteuteen ja sen muutoksiin, kun sen sijaan kivipohjaiset materiaalit eivät samassa määrin “ime” kosteutta. Kuitenkin kosteuden tiivistyminen kivipohjaisen materiaalin pintaan on huomattavasti voimakkaampaa kuin vastaavasti puupohjaisessa materiaalissa, riippuen kuitenkin mm. Pintakäsittelystä. Viime kädessä sisäpintojen ominaisuuksiin vaikuttavat myös käyttötavat ja sisäilman rasitukset. Huonepölyä kertyy materiaalien pintaan, jolloin niiden alttius homehtumiselle lisääntyy. Vastaava ilmiö esiintyy myös kohteissa, joihin vuotaa sisäilmaa. Sisäilman vuoto ei siin yksinomaan aiheuta kosteusriskiä, vaan se lisää myös homeen kasvulle alttiin materiaalin kertymistä rakenteisiin.

Materiaalien ja rakenteiden luontainen vanheneminen ja sen myötä tapahtuneet muutokset tulisi nykyistä selvemmin erottaa materiaalien vioittumisesta ja vaurioitumisesta. Näin ei useinkaan ole laita, koska tilannetta tarkastellaan jälkikäteen, jolloin nähdään vain lopputulos mutta ei siihen johtanutta kehitystä tai vaikuttavia olosuhteita. Tämänkaltainen tarkastelutapa vaatii myös tämän erikoisalan tuntemusta.

Käytännössä materiaalien vioittumisessa ja hajoamisessa voidaan usein havaita **perättäisyyttä**. Biologiassa siitä käytetään termiä "sukkessio". Esim. puutavaraan iskeytyvät bakteerit, homeet ja sinistäjäsienet, sen jälkeen lahottajasienet. Rakenteissa ilmenevä eliöiden sukkessio vaihtelee johtuen materiaaleista, rakenteista ja ympäristöstä, jotka säätelevät mikrobilajistoa ja materiaalien vaurioitumisastetta.

Kriteeristön mukaan näkyvää hometta ei saisi esiintyä sisäpinnoilla lainkaan. Mikroskooppianalyysissa esille tulevat vähäiset rihmastopartikkelit tai itiöt hyväksytään yksittäisinä poikkeuksellisina esiintyminä, mutta ei tasaisesti toistuvina. Aiemmin mainittu viljelykokeen mukainen ohjearvo PMY 10^4 - 10^5 / g on ilmeisesti aivan liian korkea, jos ajatellaan suhteellisen puhtaiksi tarkoitettuja sisäpintoja. Toisaalta huonepölyssäkin voi olla tämän verran itiöitä, vaikka varsinaista vauriota ei olisikaan. Homesienilajiston tarkempi analyysi antaa usein paremman kuvan mahollisista kosteusongelmista kuin pelkkä mikrobien tai partikkeleiden määrä.

Edellä mainittu raja-arvovaatimus on kansainvälisesti katsoen verraten kova. Esim. keski-Euroopan ja Englannin rakennuskannassa sen toteutuminen on varsin kyseenalaista johtuen vaipan kylmäsiltarakenteista, matalasta sisälämpötilasta ja sisäilman suhteellisen kosteuden noususta sekä ilmanvaihdon puutteista, jolloin sisäpinnoillakin on odotettavissa huomattavasti enemmän homekasvustoa kuin Suomen oloissa.

Suomen olojen kannalta kriittisimpiä ovat kosteat ja märät tilat ja siellä rakenteiden sisäpinnat sekä rajoittavat väliseinä- ja välipohjarakenteet. Sisäpinnat voivat täyttää vaatimuksen vain, jos tilan ilmanvaihto on riittävä ja/tai rakennetta lämmitetään (lattialämmitys). Myös märkätiloja rajoittavat rakenteet voivat saada kosteuskuormitusta, mikäli kosteussulku on puutteellinen (esim. kapillaarinen imeytyminen kaakelisaumalaastissa). Tämä edellyttää myös pintojen säännöllistä puhdistusta, koska pintaan kertyvä lika aiheuttaa lisääntyvää homekasvuriskiä.

3.4.4 Rakennuskosteuden ja rakenteiden satunnainen kastumisen aiheuttama homehtuminen

Satunnaisella kastumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa kastumisen syynä on poikkeuksellinen kertaluontoinen kosteuslähde ja jossa kosteuslähde eliminoidaan korjaavin toimenpitein. Tällöin rakenteen kuivuminen ja sen nopeus on kosteuden aiheuttamien vaurioiden kannalta keskeistä. On ilmeistä, että esim. homeen kasvua vaurion jälkeen ei kyetä aina välttämään, vaan kasvu kehittyy kunnes kuivuminen pysäyttää tilanteen. Kasvanut home taantuu ja jää rakenteeseen. Tilanne poikkeaa siitä, kun homeen kasvulle suotuisat olot toistuvat säännöllisesti tai niitä ylläpidetään jatkuvasti.

Jos tiiviin rakenteen sisällä oleva vanha ja taantunut homekasvusto katsotaan vähemmän vaaralliseksi kuin elävä kasvusto, muodostuu pääasialliseksi kriteeriksi rakenteiden säilyminen vaurioitta, passiivisten homejäämien rajoittaminen kohtuulliselle tasolle sekä jokin takaraja sille ajalle, joka on tarpeen rakenteen kuivumiseen ja homekasvun pysähtymiseen. Vaatimus poikkeuksellisesti kastuneille rakenteille voidaan em. lähtökohdasta käsin esittää seuraavasti:

Rakenteen tulee kuivua rakennuskosteudesta ja muusta poikkeuksellisesta kastumisesta niin nopeasti, ettei rakenteita vaurioittava lahoaminen tai vaarallisimpien homesienilajien kasvu pääse alkamaan ja että kastumisen jälkeen alkanut homeen kasvu pysähtyy 2 - 4 kk:n sisällä kastumisesta (lämpötilasta riippuen).

Rakenteiden kuivumisen jälkeen kasvavaa hometta koskevat aiemman kohdan mukaiset vaatimukset.

Mainittu vaatimus tarkoittaa sitä, että vanha taantunut home tulee erottaa käyttöoloille tyypillisestä aktiivisesta hometilanteesta. Lienee kohtuutonta edellyttää, etteivät rakennusmateriaalit saa lainkaan kastua rakentamisen aikana tai vesivahingon johdosta. Tilapäiselle kastumisen aiheuttamalle homeen kasvulle on juuri kertaloenteisuudesta johtuen asettettu lievästi helpommat vaatimukset kuin kohdassa 2.

3.5 HOME ULKOILMAAN RAJOITTUVISSA PUUPINNOISSA - KENTTÄTUTKIMUS

3.5.1 Kenttätutkimuksen lähtökohdat

Suomen ilmasto-olot ovat kesä- ja syyskautena suosiolliset homeiden kasvulle. On yleisesti tiedossa, että maastossa rakennusten ympäristössä kasvaa ajoittain runsaasti homeita ja että ulkoilmassa on vastaavasti runsaasti homeperäisiä epäpuhtauksia. Myös kehitetty homeen kasvua mänty- ja kuusipuun pinnalla simuloiva laskentamalli antaa tuloksen, jonka mukaan ulkoilmalle ja sen sisältämälle vesihöyrylle altistettu puupinta voi kasvaa hometta edellyttäen, ettei pintaan kohdistuva auringon säteily ehkäise tai keskeytä kasvua. Pintaan kohdistuva sade ja puun ajoittainen kastuminen tästä syystä lisää vastaavasti homeen kasvun mahdollisuutta.

Edellä mainitun kaltaiseen homeen kasvuun ei liity kosteusteknistä rakennevirhettä tai -vauriota eikä rakenteen poikkeuksellista kastumista muusta syystä (rakennuskosteus, vesivahinko tms.). Simulointitulosten mukaan homeen kasvuun ei tarvita myöskään sisäilman vesihöyryä, joka diffuusion tai konvektion välityksellä siirtyisi rakenteisiin.

3.5.2 Tavoitteet

Kenttätutkimuksen tavoitteena oli saada alustava käsitys siitä, kasvaako hometta olemassaolevien kosteusteknisesti virheettömiksi katsottavien rakennusten niissä puupinnoissa, jotka joutuvat kosketuksiin ulkoilman ja sen sisältämän vesihöyryn kanssa.

3.5.3 Tutkimuksen suoritus

Tutkimus kohdistettiin Helsingissä ja sen ympäristössä oleviin puurakennuksiin, jotka olivat joko lämpimiä asuinpientaloja tai kylmiä käyttövarastoja. Kohderakennuksia oli kaikkiaan 9 kpl. Tarkemmat tiedot kohteista ovat:

Kohde N:o 1, Ulkovarasto Hyttinen, Rajontie 120 Kirkkonummi, lämmöneristämätön puurunkoinen kylmä, 1-kerroksinen, lautaverhottu, ulkopinnassa lateksimaali, peltikatto 1:3, valmistumistunut 1992.

Kohde N:o 2, Omakotitalo Hakulinen, Eskontie 1 Vantaa, puurunkoinen lautaverhottu ryömintätilainen purueristetty rakennus, 2-kerroksinen, ulkopinnassa öljymaali, mansardikatto palahuopaa, valmistumisvuosi 1925-1926.

Kohde N:o 3, Omakotitalo Tenhunen, Martinkyläntie 58 Vantaa, puurunkoinen lautaverhottu kellarillinen 1-kerroksinen, ulkopinnassa lateksimaali, aaltopeltikatto 1:3, valmistumisvuosi 1950.

Kohde N:o 4, Omakotitalo Collanus ja siihen liittyvä puolilämmin varasto sekä kevyt lautarakenteinen leikkimökki, Martinkyläntie 60 Vantaa, puurunkoinen 1-kerroksinen, ulkopinnassa lateksimaali, peltikatto 1:3, valmistumisvuosi 1978.

Kohde N.o 5, Omakotitalo Saloranta, Keriharju 9 Helsinki, puurunkoinen lautaverhottu, 1½-kerroksinen, tuuletettu konesaumattu pelti, harjakatto 1:2, ulkopinnassa öljymaali, valmistumisvuosi 1953.

Kohde N:o 6, Omakotitalo Lehtonen, Keriharju 7 Helsinki, puurunkoinen lautaverhottu, 1½-kerroksinen, tuuletettu konesaumattu pelti, harjakatto 1:2. Ulkopinnassa öljymaali, valmistumisvuosi 1953.

Kohde N:o 7, Rivitalo, Uussillantie 41 Helsinki, kevytbetonirunkoinen rapattu, 2-kerroksinen, tuulettuva harjakatto 1:3, valmistumisvuosi 1990.

Kohde N:o 8. Ulkovarasto Kokko, Niittäjäntie 8 Vantaa, lämmöneristämätön puurunkoinen lautaverhottu kylmä, 1-kerroksinen, tiilikatto Panssarialuskatteella 1:3, valmistumisvuosi 1987.

Kohden N:o 9, Koetalo (omakotityyppinen) VTT, Vaisalantie Espoo, 1-kerroksinen, loiva tuulettuva katto huovalla ja singelillä, lautaverhottu, ulkopinnassa puunsuoja käsittely (N:o 3), valmistumisvuosi 1983.

Näytteet otettiin vuoden 1997 syys- ja lokakuun aikana seuraavasti:

Kohde N:o 1

näyte 1.1 pohjoisseinä, lautaverhouksen alaosan sisäpinta

näyte 1.2 idänpuoleinen räystäs, rakolaudoituksen yläpinta

näyte 1.3 katon idänpuoleinen lape, harva laudoitus kattopellin alla, alapinta

näyte 1.4 katon lännenpuoleinen lape, harva laudoitus kattopellin alla, alapinta

Kohde N:o 2

näyte 2.1 tuulettuvan rossipohjan alalauta, alapinta

näyte 2.2 länsiräystään aluslauta, yläpinta

Kohde N:o 3

näyte 3.1 yhtenäinen ruodelaudoitus peltikaton alta, alapinta (ei aluskatetta)

näyte 3.2 kattotuolin vaakapuu, lautaa kylmässä tuulettuvassa ullakossa

näyte 3.3 rakennuksen koillinurkan vuorilauta, yläpää räystään alla, sisäpinta ilmaa vasten

näyte 3.4 rakennuksen eteläseinä, ulkoverhouksen alin vaakalauta, sisäpinta

Kohde N:o 4

näyte 4.1 kattotuolin vaakalauta, kylmä tuulettuva ullakko, itäpääty

näyte 4.2 puolilämpimän varaston pohjoisseinä, ulompi pystylomalauta, alapää, sisäpinta

näyte 4.3 kylmän leikkimökin kattotuolin vaakalauta

näyte 4.4 lounaispääty, ulompi lomalauta, alapää, sisäpinta

Kohde N:o 5

näyte 5.1 kylmä ullakko, eteläpääty, lautaverhouksen sisäpinta

näyte 5.2 kylmä ullakko, pohjoispääty, lautaverhouksen sisäpinta

Kohde N:o 6

näyte 6.1 kylmä ullakko, eteläseinä lautaverhouksen sisäpinta

Kohde N:o 7

näyte 7.1 kylmä ullakko, ruodelaudoitus 10 cm raoin, alapinta asunnon A kohdalla

näyte 7.2 kylmä ullakko, ruodelaudoitus 10 cm raoin, asunnon D kohdalla

näyte 7.3 kylmä ullakko, kattoristikon vinotuki

Kohde N:o 8

näyte 8.1 rakolaudoitus räystäällä, pohjoispääty, laudan yläpinta

näyte 8.2 ovipaneli, ulkopinta, oven yläreuna räystään alla, itäseinä

näyte 8.3 ikkunan pystyvuorilauta, sisäpinta, pohjoispääty

näyte 8.4 ikkunan pystyvuorilauta, sisäpinta, eteläpääty

näyte 8.5 puukiila ikkunan karmin ja seinärungon välistä, eteläpääty

näyte 8.6 aluskate tiilikaton alta

Kohde N:o 9

näyte 9.1 ulkoverhouksen alaosa, ulompi lomalauta, sisäpinta, pohjoisseinä

näyte 9.2 räystään etulauta, sisäpinta, pohjoisräystäs

näyte 9.3 ulkoverhouksen alaosa, ulompi lomalauta, sisäpinta, eteläseinä

Kustakin näytteenottokohdasta irroitettiin näytteeksi käsittelemätöntä alkuperäistä puupintaa sisältävä, vähintään 50 cm^2 kokoinen näyte, joka toimitettiin paperipussiin suljettuna VTT Rakennustekniikkaan mikroskooppista homeanalyysia varten. Lisäksi useimmista kohteista otettiin rinnakkainen näyte puun näytteenottohetkeä vastaavan kosteuspitoisuuden määrittämiseksi. Kosteuspitoisuusnäytteet suljettiin muovipusseihin ja toimitettiin välittömästi VTT Rakennustekniikkaan. Useimmat kohteet valokuvattiin.

Mikroskooppisen homeanalyysin tuloksien ilmoittamisessa on käytetty seuraavaa arvoasteikkoa:

1 ei havaintoa homeen kasvusta
2 mikroskoopilla tarkasteltuna havaittavissa lievää kasvua
3 mikroskoopilla tarkasteltuna havaittavissa runsasta kasvua
4 silmämääräisesti tarkasteltuna havaittavissa hieman kasvua (alle 10 % pinnasta)
5 silmämääräisesti tarkasteltuna havaittavissa lievää kasvua (10…50 % pinnasta)
6 silmämääräisesti tarkasteltuna havaittavissa runsasta kasvua (yli 50 % pinnasta)
7 silmämääräisesti tarkasteltuna havaittavissa voimakasta kasvua (100 % pinnasta)

Kosteuspitoisuusnäytteet kuivattiin 60 ^oC lämpötilassa painon tasaantumiseen asti kosteuspitoisuuden määrittämiseksi.

3.5.4 Tulokset

Kenttänäytteiden homeanalyysin ja kosteuspitoisuusmäärityksen tulokset esitetään taulukossa 3.6 käyttäen edellisessä kohdassa kuvattua homeen kasvun arvosteluperustetta.

Taulukko 3.6. Kenttänäytteiden homeanalyysin tulokset.

Näytteen N:o	Arvostelu homekasvusta	Kosteuspitoisuus % kuivapainosta	Lisätietoja
1.1 1.2 1.3 1.4	1 1 0 2	17 16,5 16 16	Kylmä pilariperustettu varasto, jossa maalattia. Seinien alareuna irti maasta. Ei aluskatetta. Puu vaalea ja terveen näköistä. Rakennus kosteusteknisesti virheetön.
2.1 2.2	2 0	18 15	Ryömintätilaisen alapohjan näytteessä hometta ja sinistymää (5). Räystäsnäytteessä lievää sinistymää (1). Kosteusteknisiä rakennevirheitä ei havaittu.
3.1 3.2 3.3 3.4	2 0 0 0	13 12 14 18	Yhtenäinen ruodelaudoitus aaltopellin alla kuttaaltaan tummunut. Ei jälkiä vesikaton vuotamisesta.
4.1 4.2 4.3 4.4	1 1 0 1	11 16 15 13	Näytteet ulkoverhouksen lomalaudan alapäästä (4.2, 4.4) likaisia.
5.1 5.2	0 0	10 10	Näytteet verraten kuivia.
6.1	0	10	Näyte kuiva
7.1 7.2 7.3	5 5 4		Konesaumatun peltikaton alla ruodelaudoitus 10 cm välein ja ollut myös aluskate lähes kiinni laudoissa. Näyte 7.3 kattoristikosta aluskatteen alta.
8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6	0 4 0 5 3 2[a)], 1[b)]		Ovipanelin yläreuna (näyte 8.2) pitkän räystään alla suojassa sateelta. Pohjoispäädyssä katto puun alla. Eteläseinään kohdistuu viistosade. Aluskatteessa homekasvua molemmissa pinnoissa.
9.1 9.2 9.3	1 4 1	14 14 11	Tasakattoinen kapeahkot räystäät.

[a)]aluskatteen yläpinta, [b)] aluskatteen alapinta

3.5.5 Tulosten tarkastelu

Kylmistä varastoista otettuja näytteitä oli kaikkiaan 12 kpl, joista kahdeksassa todettiin eri asteista homeen kasvua.

Lämmitetyistä rakennuksista kohteet 5 ja 6 olivat 1½-keroksisen talon yläkerran räystäsreunoilla olevista lämmittämättömistä tiloista. Näytteet olivat varsin kuivia, mikä viittaa siihen, että tila jossakin määrin lämpiää alapuolen ja viereisen lämpimän tilan lämpöhäviön vaikutuksesta. Kohteessa 7 oli selkeä rakennusvirhe (aluskate käytännössä kiinni ruodelaudoissa), joka selittää näytteiden 7.1 ja 7.2 korkean homepitoisuuden.

Jos edellisessä kappaleessa mainitut kohteet 5 ja 6 sekä näytteet 7.1 ja 7.2 jätetään em. syistä tarkastelun ulkopuolelle, oli lämmitetyistä rakennuksista otettuja näytteitä kaikkiaan 11 kpl ja näistä seitsemässä todettiin eriasteinen homeen kasvu.

Pääosa positiivisista näytteistä oli sellaisia, että homeen kasvu oli todettavissa vain mikroskooppilla (11 kpl). Joukkoon mahtui kuitenkin joitakin silmämääräisestikin homeisiksi havaittavia näytteitä (5 kpl), vaikka näytteet 7.1 ja 7.2 jätetäänkin ulkopuolelle.

Homeen kasvun suhteen negatiivisten puhtaiden näytteiden lukumäärä oli 8 kpl, kun kohteet 5 ja 6 jätetään ulkopuolelle. Puhtaiden näytteiden osuus oli siten n. 35 % otoksesta. Tulos viittaa siihen, että laskennallisesti ennustettu rakenteiden ulkoilmaan kosketuksessa olevien pintojen alttius homeen kasvulle ilmenee myös käytännössä. Kun rakennukset ovat kuitenkin kosteusteknisesti moitteettomia, ei kyseessä ole virhetoiminto vauriosta puhumattakaan. Ilmeisesti on niin, että useimmista taloista ellei kaikista löytyy etsimällä jonkinasteista homekasvustoa, joka edustaa luonnollista ja mitä ilmeisimmin hyväksyttävää ilmiötä. Jos rakennukset halutaan täysin homevapaiksi, vaaditaan todella kylmää tai vastaavasti kuivaa ulkoilmastoa.

4 HÖYRYN- JA ILMANSULKUMATERIAALIT

Puurunkoisten rakenteiden ja rakennusvaipan lämpö- ja kosteustekninen toimivuus riippuu rakenteessa olevista lämmöneristystä ja runkoa suojaavista ainekerroksista. Yleisesti suojaukseen käytetään höyrynsulkua, ilmansulkua ja tuulensuojaa, joiden tehtävänä on estää haitallinen vesihöyryn diffuusio sisäilmasta rakenteeseen, ilman ja vesihöyryn virtaus rakenteeseen ja sen läpi sekä tuulen ja lämpötilaeron aiheuttama haitallinen ulkoilman tunkeutuminen lämmöneristykseen ja kiertäminen sen kautta takaisin ulkopuolelle. Mainitut kerrokset ovat yleensä rakenteeseen tarkoituksenmukaisiin kohtiin sijoitettuja ohuita kalvomaisia tai levymäisiä ainekerroksia. Usein on myös tarkoituksenmukaista yhdistää höyryn- ja ilmansulkutoiminto samaan ainekerrokseen.

Edellisten lisäksi keveissä puurunkoisissa rakenteissa ja rakennusvaipassa on kosteusteknisesti sisäverhous ja pinnoite (maali, tapetti yms.) sekä tarvittaessa erillisiä kosteuden ja vedeneristyskerroksia (märät tilat, alapohjat, maanvastaiset rakenteet). Näillä on vaikutusta myös vesihöyryn ja ilman liikkeisiin rakenteissa.

Rakenteiden kosteus- ja ilmavirtausteknisen suunnittelun kannalta on olennaista tuntea mainittuihin ainekerroksiin käytettävien tuotteiden keskeiset ominaisuudet (vesihöyrynläpäisykerroin tai -vastus, ilmanläpäisykerroin). Nämä ominaisuudet riippuvat lähes poikkeuksetta sekä lämpötilasta että kosteusoloista. Erityisesti tämä koskee hygroskooppisia kosteutta sitovia materiaaleja kuten puu ja puupohjaiset rakennusaineet. Täten ei voida puhua materiaalivakioista vaan olosuhderiippuvista materiaaliominaisuuksista.

Käytännössä höyrynsulku ja yleensä myös ilmansulku ovat rakenteissa lähellä niiden sisäpintaa. Tällöin lämpötilan vaihtelualue ko. kohdassa jää verraten suppeaksi. Sisäilman kosteus on varsinkin lämmityskaudella kohtuullisen matala, joten rakenteissa ko. ainekerrokset ovat lähellä standardisoitujen testausmenetelmien (vesihöyryn- ja ilmanläpäisy) oloja. Toisaalta olot lämmöneristyksen kylmällä puolella vaihtelevat laajoissa rajoissa. Lämpötila seuraa ulkoilman lämpötilaa ottaen kuitenkin huomioon säteilyolot (auringon säteilyn absorptio tai jäähtyminen IR-säteilyn johdosta). Suhteellinen kosteus voi olla hyvinkin korkea ja rakenteen pinnoille tiivistyy ajoittain vesihöyryä. Tällaisissa oloissa voi ulkopuolisen ainekerroksen kosteudenläpäisyominaisuus vaihdella laajoissa rajoissa eikä standardin mukainen testitulos päde.

4.1 OHUET KALVOT JA PAPERIT

Tutkimuksessa mitattiin useiden tyypillisten Suomessa käytettävien rakennuspapereiden ja höyrynsulkutuotteiden vesihöyrynvastukset lähteessä (1) kuvatulla menetelmällä. Huokoisten vesihöyryä läpäisevien rakennuspapereiden mittaukset suoritettiin sekä sekä korkean että matalan suhteellisen kosteuden alueella, koska mittausympäristön kosteustilan odotettiin vaikuttavan tulokseen. Huokoisten rakennuspaperien mittaustulokset esitetään taulukossa 4.1 ja varsinaisten höyrynsulkutuotteiden tulokset taulukossa 4.2.

Taulukko 4.1. Huokoisten rakennupapereiden vesihöyrynläpäisyominaisuudet kosteassa ja kuivassa ympäristössä sekä kahdessa lämpötilassa.

Materiaali / tuote	Paksuus d, mm	Vesihöyrynläpäisykerroin W_P, kg/(m^2 s · Pa) 3) Vesihöyrynvastus Z_P, (m^2 · s · Pa)/kg 4)	Olosuhteet 23 °C 50%/0%	Olosuhteet 23 °C 97%/65%	Olosuhteet 5 °C 97%/65%
ulkovuoraushuopa 1)	0,44	W_P Z_P	0,29 3,5	1,4 0,73	1,5 0,69
ulkovuorauspaperi 2)	0,20	W_P Z_P	0,69 1,4	2,6 0,38	2,4 0,42
ulkovuorauskreppi 2)	n. 0,20	W_P Z_P	0,46 2,2	2,3 0,43	2,5 0,41
tuulensuojapaperi, kuumasaumattu MW:aan	0,12	W_P Z_P	0,80 1,2	3,3 0,31	4,0 0,25
voimapaperi	0,17	W_P Z_P	3,1 0,32	8,5 0,12	8,4 0,12
oksamassapahvi	0,36	W_P Z_P	2,1 0,48	5,9 0,17	6,3 0,16
raitabitumipaperi	0,34	W_P Z_P	1,6 0,63		6,3 0,16
suojapaperi	0,33	W_P Z_P	2,2 0,45		

1) Tuotteesta käytetään myös nimeä tervapahvi.

2) Tuotteesta käytetään myös nimeä tervapaperi.

3) Vesihöyrynläpäisykertoimen W_p ilmoitettujen lukuarvojen perään on lisättävä kerroin 10^{-9}.

4) Vesihöyrynvastuksien Z_P ilmoitettujen lukuarvojen perään on lisättävä kerroin 10^9.

Taulukko 4.2. Höyrynsulkutuotteiden vesihöyrynläpäisyominaisuudet 23 ^{o}C lämpötilassa ja 50 % / 0 % suhteellisessa kosteudessa.

Materiaali / tuote	Paksuus d, mm	Vesihöyrynläpäisykerroin W_P, kg /($m^2 \cdot s \cdot Pa$) Vesihöyrynvastus Z_P, ($m^2 \cdot s \cdot Pa$) / kg	
Al-pintainen tiivistyspaperi	0,13	W_P Z_P	$< 1x\ 10^{-13}$ $> 1 \times 10^{13}$
Polyetyleenimuovikelmu	0,15	W_P Z_P	$2{,}6 \times 10^{-12}$ $0{,}38 \times 10^{12}$
höyrynsulkupaperi (UPM)	0,21	W_P Z_P	$9{,}2 \times 10^{-12}$ $0{,}11 \times 10^{12}$
sisäpuolinen tiivistyspaperi (UPM)	0,14	W_P Z_P	14×10^{-12} $0{,}07 \times 10^{12}$
sahakääre	0,26	W_P Z_P	18×10^{-12} $0{,}057 \times 10^{12}$

Taulukoiden 4.1 ja 4.2 perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Huokoiset rakennuspaperit läpäisevät vesihöyryä diffuusiolla 100…1000 kertaa paremmin kuin höyrynsulkutuotteiksi nimetyt tuotteet.

- Huokoisten rakennuspaperien höyrynvastus on kuivemmissa mittausoloissa 3…5 kertainen verrattuna kosteampiin mittausoloihin.

- Testauslämpötilan alentaminen 23 ^{o}C asteesta 5 ^{o}C asteeseen ei muuttanut huokoisten rakennuspaperien höyrynvastuksen arvoa.

On ilmeistä, että kaupallisten höyrynsulkutuotteiden höyrynvastus on tarpeeseen nähden moninkertainen, mikäli rakenteet ovat ulospäin hyvin kuivuvia. Huokoisten rakennuspapereiden höyrynvastuksen voimakas riippuvuus suhteellisesta kosteudesta on mielenkiintoinen ilmiö höyrynsuluttomien seinärakenteiden toiminnan kannalta. Lämmityskaudella huoneilman suhteellinen kosteus on verraten matala ja vastaavasti ulkoilman korkea. Tällöin ulkopuolisen paperikerroksen toimintaoloja vastaava höyrynvastus on sisäpuolista pienempi ainakin leudolla säällä. Pakkasen vaikutusta ainekerrosten kosteudenläpäisyyn ei tässä tutkimuksessa mitattu.

4.2 RAKENNUSLEVYT

Rakennuspaperien ja höyrynsulkutuotteiden ohella tarpeen tuntea myös tavanomaisten rakennuslevyjen ja tuulensuojatuotteiden höyrynvastukset. Tässä tutkimuksessa ei mitattu levytuotteita, mutta jäljempänä taulukossa 4.3 esitetään joitakin kirjallisuustietoihin perustuvia vesihöyrynvastuksia. Annetut lukuarvot on katsottava ennen muuta suuruusluokkatiedoiksi, sillä tiedot vaihtelevat valmistaja- ja tuotekohtaisesti sekä valmistusteknisestä syistä aiheutuvan hajonnan takia.

Taulukko 4.3. Eräiden levymäisten rakennustuotteiden höyrynvastuksen arvoja.

Levytuote	Paksuus d, mm	Vesihöyrynvastus Z_P (25 % R.H.) ($m^2 \cdot s \cdot Pa$)/ kg	Vesihöyrynvastus Z_P (80 % R.H.) ($m^2 \cdot s \cdot Pa$) / kg
havuvaneri /27/	9	14	0,8
havuvaneri /27/	12	18	1,0
huokoinen puukuitulevy, 215 kg/m^3 /28/	12	0,3	0,2
puukuitulevy, 610 kg/m^3 /28/	12	1.0	0,7
puukuitulevy, 870 kg/m^3 /28/	3,4	1.2	0,7
lastulevy, 560 kg/m^3 /28/	12	3,4	1,6
kipsilevy, 730 kg/m^3 /28/	10	1,8	0,6

Taulukossa 4.3 ilmoitettujen Z_P-arvojen perään on lisättävä kerroin 10^9.

5 HYGROTERMISET RAKENNEANALYYSIT

Seuraavassa esitetään eri kosteuskuormien vaikutus puurakenteiden kosteustekniseen toimintaan laskennallisen ja kokeellisen analyysi perusteella. Kosteudensiirtymistapojen merkitys rakenteiden kosteuskuormituksessa on syytä tarkastella erillisinä, jotta kunkin merkitys saadaan arvioitua. Kokeellisesti puhtaasti yhtä kosteudensiirtymistapa edustavat järjestelyt ovat suhteellisen vaikeasti toteutettavia, mutta laskennallisin menetelmin voidaan eri tekijät erotella toisistaan ja vertailla niiden vaikutuksia muuten samoissa ilmasto-oloissa.

5.1 VESIHÖYRYN DIFFUUSION MERKITYS PUURAKENTEISSA

Pelkän vesihöyryn diffuusion aiheuttamia kosteuskuormia ja niiden merkitystä keveiden puurakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta ei tunneta riittävän tarkasti. Höyrynsulun käsite ja toiminta ei ole täysin selvä ja usein höyrynsulku toimii myös pääasiallisena rakenteen läpäiseviä ilmavirtauksia rajoittavana materiaalikerroksena. Kylmässä ilmastossa sisäilmasta rakenteisiin pelkästään vesihöyryn diffuusiona tulevan kosteuskuormituksen analysointi on tehtävä erillään muista kosteuskuormista, kuten kosteuskonvektiosta ja alkukosteuksien uudelleen jakautumisesta. Merkittävää rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on rakenteen sisä- ja ulkopuolen kerrosten vesihöyrynläpäisevyyksien suuruus ja keskinäinen suhde. Kun tarkastellaan asuinrakennusten rakenteiden diffuusiotyyppistä kosteuskuormitusta kylmässä ilmastossa, näkyy ulkoilmaston vaikutus lähinnä rakenteen kuivumisnopeudessa, eikä sillä ole olennaista merkitystä rakenteita kuormittavana tekijänä.

5.1.1 Diffuusitarkastelun tavoitteet

Tutkimuksen tämän osan tavoitteena oli selvittää laskennallisesti puurunkoisen seinärakenteen sisä- ja ulkopuolisten vesihöyrynläpäisevyyksien keskinäinen suhde sekä arvioida vesihöyrynläpäisevyyksien tavoitetasot kosteusteknisesti turvallisissa rakenteissa. Tuulensuojan ja sisäverhouksen muita materiaaliominaisuuksia ei tässä yhteydessä tarkasteltu ja esimerkiksi lämmöneristettä verhoavien materiaalikerrosten kosteudensitomiskyky jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Tällä pelkistetyllä tarkastelutavalla pyrittiin arvioimaan yleispätevästi pelkän diffuusion merkitys kosteuskuormituksessa. Hygroskooppisuuden huomiotta jättäminen antoi tarkasteluun lisävarmuutta, sillä materiaalikerroksiin sitoutuva kosteus tasoittaa kosteuksia ja vähentää korkeiden kosteuksien esiintymistodennäköisyyttä. Tarkasteluissa kosteuslähteenä oli sisäilman kosteus, joka diffuusisti siirtyi rakenteeseen vesihöyryn osapaine-eron vaikutuksesta.

5.1.2 Laskennan periaatteet

Tarkastelu tehtiin laskennallisesti rakenteiden lämpö-, ilma- ja kosteusvirtauksien analysointiohjelmaa TCCC2D /31 - 34/ käyttäen. Laskelmissa käsiteltiin pelkistettyä 1-dimensioista rakenneleikkausta, jossa vain lämmöneristekerros kuvattiin materiaalikerroksena ja sen molemmin puolin olevat tuulensuojaa ja sisäverhousta

vastaavat materiaalikerrokset käsiteltiin pelkkinä vastuksina lämmön- ja kosteudensiirrolle.

Rakenteen kosteuskapasiteettina oli vain lämmöneriste (mineraalivilla- tai sellukuitueriste), joten esimerkiksi eri tuulensuojalevyjen kosteudensitomiskyky jäi tarkastelun ulkopuolelle. Näin pelkistetty rakenne kuvaa parhaiten lämmöneristeen rajapintojen toimintaa sisä- ja ulkopuolen eri vesihöyrynläpäisevyysarvoilla. Ilmastoalueilla, joissa ulkoilman lämpötila on suurimman osan vuotta sisäilmaa alemmalla tasolla, on kosteusteknisen toiminnan kriittinen alue lämmöneristeen ulkopinnan viereinen kerros.

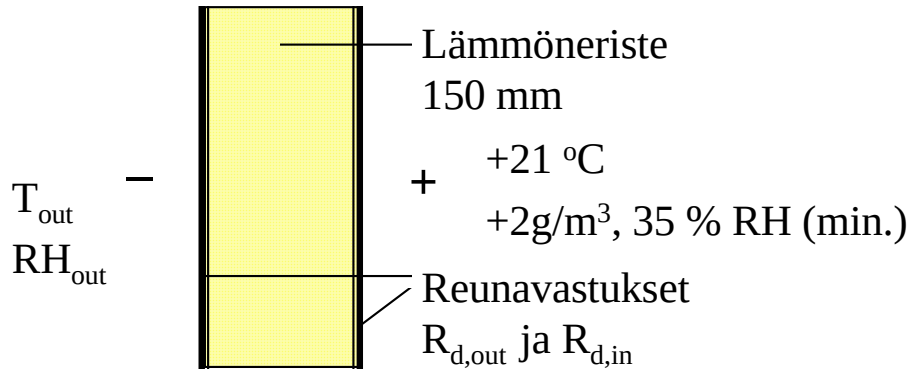
Tarkastelu yksilöidyillä materiaaleilla olisi tuonut vain vähän lisäinformaatiota, mutta se olisi edellyttänyt huomattavasti suurempaa määrää laskentatapauksia. Lähes kaikkien rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyys riippuu kosteuspitoisuudesta ja myös lämpötilasta sekä erityisesti siitä, ollaanko jäätymisalueella vai sen yläpuolella. Nämä riippuvuudet ovat voimakkaasti materiaalikohtaisia. Laskelmissa käytetyt puhtaat vastusarvot eivät siten suoraan vastaa mitään tiettyä materiaalia. Pelkistetyt vastusarvot antavat kuitenkin selkeimmän kuvan vesihöyryn diffuusion merkityksestä ja rakenteen verhoilukerrosten diffuusiovastusten tavoitetasosta.

Reaalirakenteissa suurimmat kosteuskuormat ja siten ilmeisesti myös pahimmat kosteusongelmat aiheutuvat ilmavirtauksista, suurista alkukosteuksista ja nestemäisen veden vuodoista rakenteen sisään. Nämä tapaukset analysoidaan erikseen tutkimuksen muissa osissa. Diffuusio lienee useimmissa tapauksissa osatekijä, joka harvoin yksinään aiheuttaa rakenteen kosteusvaurion, mutta voi epäedullisissa oloissa lisätä kosteuskuormaa yli riskirajan.

Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden ensimmäisenä edellytyksenä on pitää nettokosteusvirta rakenteeseen nollana valitun tarkastelujakson aikana. Tämä oli lähtökohtana tämän kappaleen diffuusitarkasteluissa. Vaativampana ehtona kosteusteknisesti turvalliselle rakenteelle on riittävä kuivumiskyky rakenteeseen päässeen kosteuden poistamiseksi. Tämän vaatimuksen edellytyksiä tarkastellaan lähemmin mm. alkukosteuden kuivumista kuvaavassa luvussa 5.4.

5.1.3 Laskennassa analysoidut tapaukset

Laskennassa tarkasteltiin 150 mm paksua lämmöneristekerrosta (Kuva 5.1). Lämmöneristeenä käytettiin joko mineraalivillaa (20 kg/m^3) tai sellukuitueristettä (40 kg/m^3). Eristepaksuus valittiin suhteellisen pieneksi, koska lämpötilaerosta ja vesihöyryn osapainegradientista aiheutuvat kosteusvirrat ja mahdolliset paikalliset kosteuskertymät ovat suurimmat pienillä eristepaksuuksilla.



Kuva 5.1. Laskennallisessa tarkastelussa käytetty pelkistetty 1-D rakenneleikkaus. Lämmöneristeenä joko mineraalivilla- tai sellukuitueriste.

Mineraalivillan vesihöyrynjohtavuudelle käytettiin laskelmissa vakioarvoa 1,6 $\cdot 10^{-10}$ kg/(m s Pa) ja sellukuitueristeelle vastaavasti arvoa 1,2 $\cdot 10^{-10}$ kg/(m s Pa).

Laskelmissa lämmöneristeen sisä- ja ulkopuolen pintakerrosten vesihöyrynläpäisevyydet oletettiin olosuhteista riippumatomiksi vakioarvoiksi. Ulkopinnan tuulensuojakerroksen vesihöyrynvastukselle käytettiin kolmea eri arvoa: 1, 5 ja 10 $\cdot 10^{+9}$ (s m^2 Pa)/kg. Sisäpuolen vastuksina käytettiin ulkopuoliseen verrattuna 0,5, 1, 2, 3 ja 4-kertaisia vastuksia. Tapauksesta riippuen myös muita vastusarvoja käytettiin sisäpuolen vastuksina. Taulukko 5.1 esittää laskelmissa käytetyt sisä- ja ulkopuolen vesihöyrynläpäisevyyden vastukset.

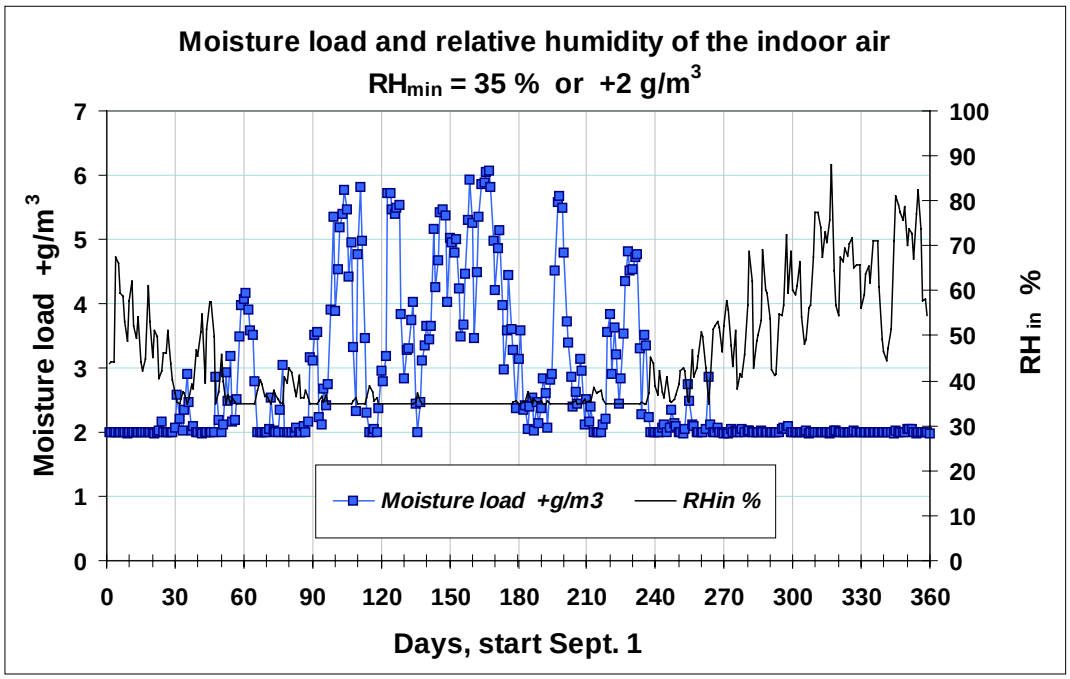
Taulukko 5.1. Laskennassa käytetyt vesihöyrynvastukset rakenteen ulko- ja sisäpinnalle.

Ulkopinnan vesihöyrynvastus (s m^2 Pa)/kg x10^{+09}	**Sisäpinnan vesihöyrynvastus** (s m^2 Pa)/kg x10^{+09}
1	0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10
5	1, 2,5 5, 10, 15, 20, 50
10	5, 10, 20, 30, 40, 50

Ulkoilmastona käytettiin vuoden 1979 Jyväskylän säätiedostoa. Laskelmissa auringon säteily (suora ja diffuusio) jätettiin huomiotta, jolloin tilanne vastasi pohjoisen puoleista täysin varjossa olevaa rakennetta. Auringon säteily vaikuttaa voimakkaasti kosteuden kuivumiseen, joten tehty oletus lisäsi kosteusriskiä ja tarkastelun varmuutta.

Sisäilman lämpötila oli +21 °C tai sama kuin ulkoilman, jos se ylitti tämän asetusarvon. Sisäilman kosteuskuorma oli +2 g/m^3 lisäyksenä ulkoilman tilaan. Alhaisin sisäilman suhteellinen kosteus oli kuitenkin rajoitettu 35 %:iin, mikä talvikaudella kasvatti sisäilman kosteuskuormaa huomattavasti 2 g/m^3 kuormasta. Minimikos-

teuden rajoitus johti talvikaudella jopa 6 g/m^3 vastaaviin päivittäisiin kosteuskuormiin. Tämä lisäsi erityisesti ongelmalliseksi arvioidun talvikauden merkitystä kosteusriskin kannalta. Käytetyillä reunaehdoilla sisäilman keskimääräinen vuotuinen kosteus oli 44,5 % ja keskimääräinen kosteuskuorma lähes 3 g/m^3. Sisäilman suhteellisen kosteuden ja kosteuskuorman vuorokausikeskiarvot on esitetty kuva 5.2.



Kuva 5.2. Tarkastelussa käytetyt kosteuskuormat ja sisäilman suhteelliset kosteudet.

Rakenteen alkukosteus oli sitoutunut lämmöneristeeseen. Mineraalivillalla (20 kg/m^3) se oli 0,05 kg/kg ja sellukuidulla (40 kg/m^3) 0,025 kg/kg, ts. rakenteiden kosteusmäärä simulointijakson alussa oli varsin vähäinen (0,15 kg/ m^2 rakenteen otsapinta-alaa kohden) ja riippumaton lämmöneristeestä.

Laskennallisesti tarkasteltiin vuoden pituista jaksoa syyskuun 1. päivästä alkaen. Aika-askeleena käytettiin yhtä tuntia ja reunaehtoja korjattiin tunneittain. Tulostuksessa käytettiin päivän keskimääräisiä arvoja.

5.1.4 Tarkastelun kriteerit

Tarkastelun kriittiseksi ajankohdaksi valittiin kevätkausi, jolloin rakenteen kosteuspitoisuudet olivat talven kertymäjakson jälkeen korkeimmillaan ja kosteus alkoi kuivua rakenteesta. Paikallisesti suurin kosteus oli rakenteen uloimmissa osissa. Talvikaudella rakenteen ulkopinnan lämpötila on Suomen ilmasto-oloissa useimmiten niin alhainen, ettei biologinen kasvu ole mahdollista /5 - 7/. Ulkolämpötilan noustessa kevätkaudella voivat olosuhteet rakenteen ulko-osissa olla suotuisat homeelle yms. biologiselle kasvulle, jos rakenteeseen talvikaudella kertynyt kosteus ei ole kuivu tarpeeksi nopeasti ulos.

Laskennassa tarkasteltiin koko lämmöneristekerroksen ja erityisesti sen ulkopinnan viereisen alueen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Tarkasteltavaksi

kriittiseksi alueeksi valittiin rakenteen ulkopintaan rajoittuva 5 mm paksuinen kerros, jonka kosteuspitoisuuden, suhteellisen kosteuden ja lämpötilatason kehitys kevätkauden kuivumistilanteessa olivat rakenteen talvikauden jälkeisen selviytymisen kriteereitä.

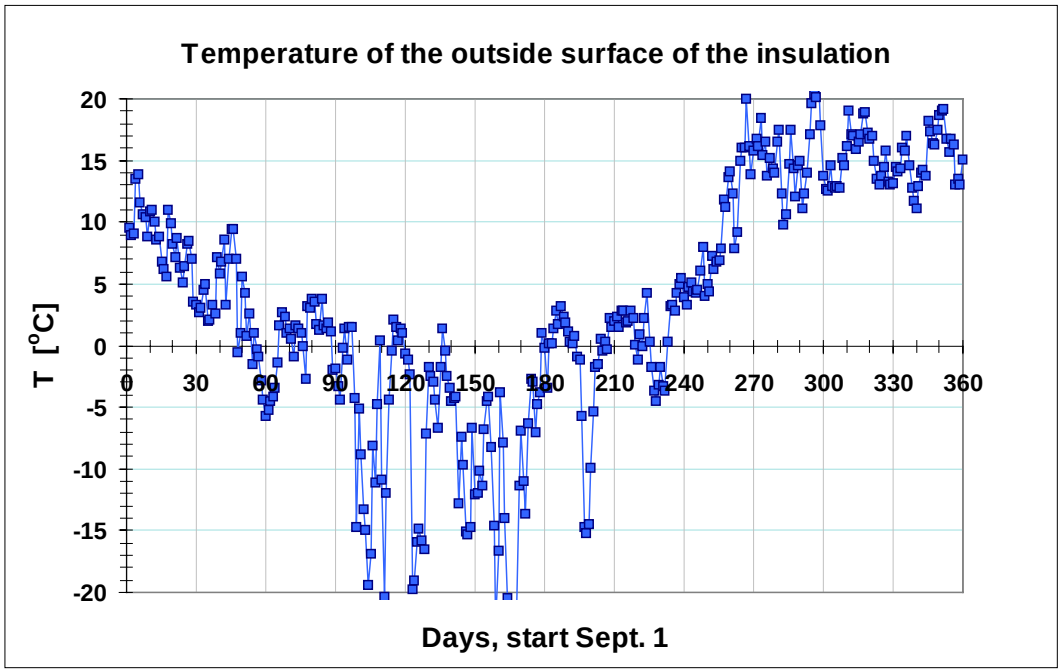
Tässä tarkastelussa ei sovellettu matemaattiseen muotoon kehitettyä homeen kasvumallia /35/. Homehtuminen koskee erityisesti materiaalikerrosten rajapintoja, jolloin näiden kerrosten kosteuskapasiteetti vaikuttaa olennaisesti rajapinnan kosteustasoon. Homekriteerin soveltaminen edellyttäisi kosteuskapasiteetiltaan tarkasti määriteltyjen materiaalikerrosten kuvausta. Lisäksi numeerinen homeindeksi perustuu puulle tehtyihin mittauksiin, joten sen käyttö muiden materiaalien yhteydessä ei olisi täysin perusteltua. Nyt tehdyssä pelkistetyssä tarkastelussa lämmöneristettä rajoittavat kerrokset kuvattiin pelkkinä vastuksina.

Koska tarkastellun, pelkistetyn rakenteen hygroskooppisen alueen kosteuskapasiteetti on pieni, on vesihöyryn kondenssi ensimmäinen merkki suhteellisen pienestäkin paikallisesta kosteuskertymästä. Rakenteen toimivuuden kriteerinä kokonaiskosteuden lisäksi käytettiin sellaisten jaksojen kestoa, joissa kosteus oli lähellä kondenssitilaa (90 - 100 % RH) ja lämpötila oli yli 0 °C, ts. biologiset ilmiöt kuten home ja laho olivat mahdollisia. Tätä kylmemmässä tilassa suuretkaan tilapäiset kosteusmäärät eivät vielä aiheuta ongelmia. Tarkastelussa keskityttiin kylmän talvikauden kertymäjakson jälkeiseen kuivumisjakson pituuden tarkasteluun.

5.1.5 Tulokset ja niiden analysointi

Kuva 5.3 esitetään ulkopinnan viereiselle kriittiselle pisteelle lasketut vuorokautiset keskilämpötilat. Jotta rakenteen puupohjaisissa materiaaleissa voisi kehittyä lahoa tai hometta tulee lämpötilan olla pääsääntöisesti > 0 °C. Syksyllä kriittisen pisteen lämpötila laskee alle 0 °C lokakuun loppupuolella (noin 50 vrk laskennallisen tarkastelujakson alusta) ja lämpötila nousee pysyvästi tämän raja yläpuolelle kevätkaudella huhtikuun loppupuolella (noin 235 vrk laskennan alusta).

Kuva 5.4 - kuva 5.6 esittävät rakenteen pinta-alaa kohden lasketut kokonaiskosteudet tarkastelujakson aikana eri vesihöyrynvastuksilla joko mineraalivilla- tai sellukuitueristeellä. Kuva 5.7- kuva 5.9 esittävät vastaaville tapauksille lasketut rakenteen ulkopinnan viereisen 5 mm paksun lämmöneristekerroksen kosteuspitoisuudet u (kg/kg) erikseen kevään kuivumisjakson aikana. Mineraalivillalla (20 kg/m^3) kosteuspitoisuus 1 kg/kg vastaa sellukuidun (40 kg/m^3) kosteuspitoisuutta 0,5 kg/kg. Kosteuspitoisuuskuvissa on lisäksi esitetty 100 % RH tasapainotilaa vastaava raja-arvo, ts. kosteuspitoisuus, jonka ylittävä arvo vastaa vesihöyryn kondenssiolosuhteita kyseisellä eristemateriaalilla.



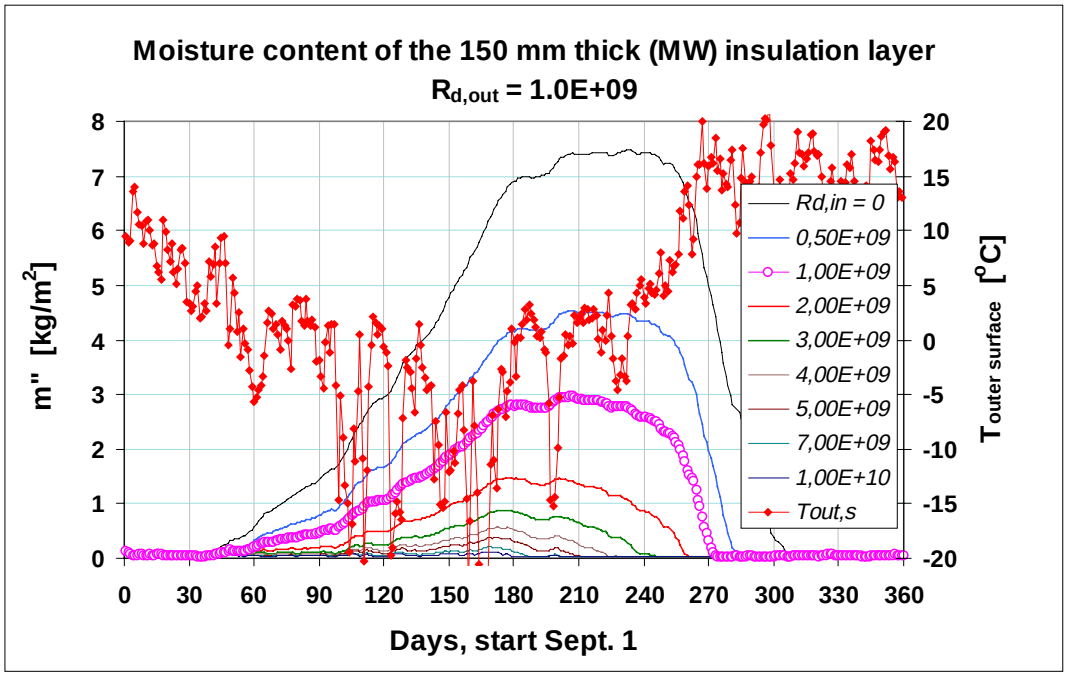
Kuva 5.3. Tarkastellulle rakenteelle Jyväskylän säätiedoilla ratkaistu lämmöneristeen ulkopinnan lämpötilan vuorokausikeskiarvo syyskuun 1. päivästä alkaen.

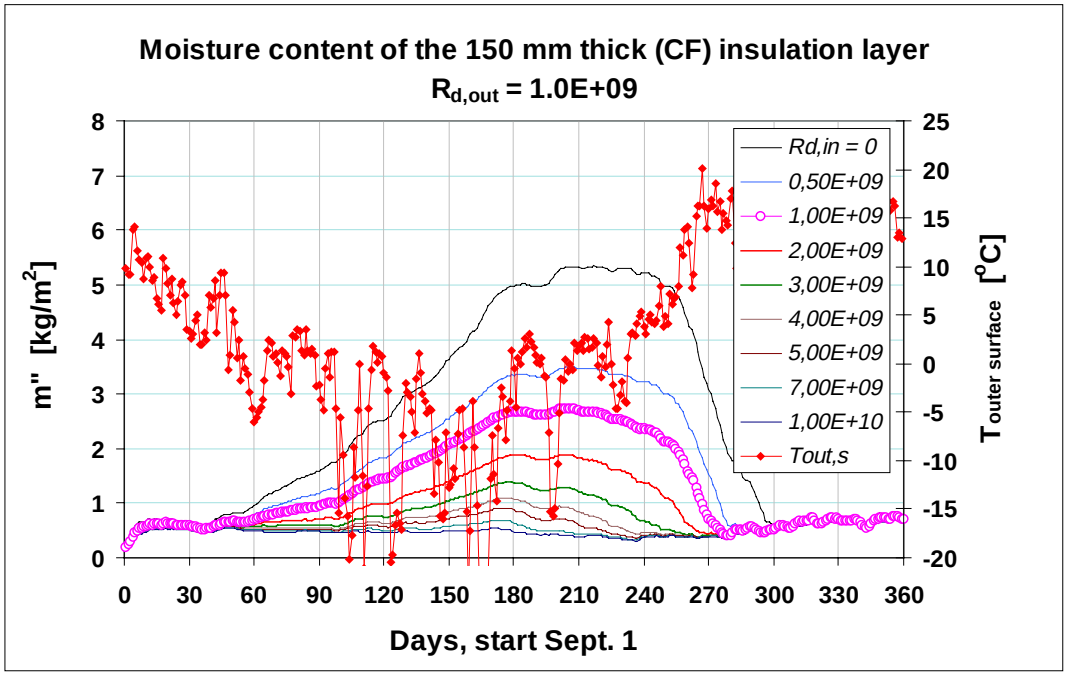
Kosteusmäärät rakenteissa

Talvikaudella rakenteisiin kertyi kosteutta. Kosteus oli rakenteissa pääosin ulkopinnan viereisessä osassa lämmöneristettä. Kertyneet kosteusmäärät riippuivat vastusten tasosta ja keskinäisestä suhteesta. Mitä pienempi sisä- (ja ulkopuolen) vesihöyrynvastus oli, sitä suurempi oli talvikauden aikainen kosteuskertymä rakenteeseen. Paremmin kosteutta läpäisevät pinnat vastaavasti nopeuttivat rakenteen kuivumista.

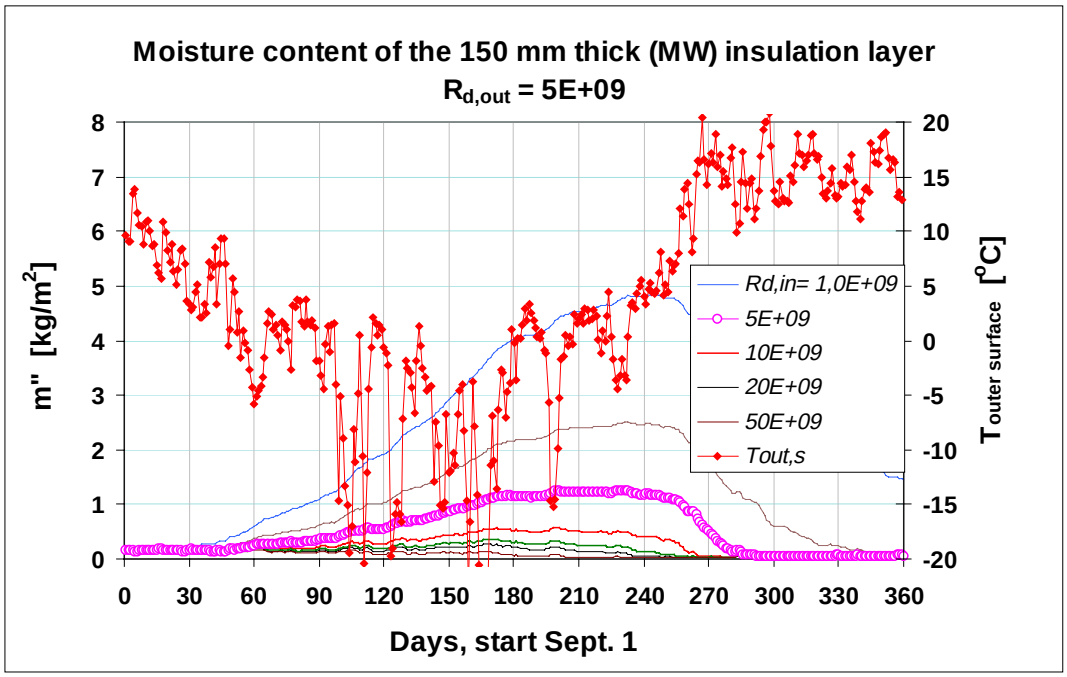
Erityisen mielenkiintoisia ovat kevätkauden kuivumistilannetta esittävät käyrät. Lähes riippumatta talvikauden kosteuskertymän tasosta, kosteuden kuivumisnopeus kevätkaudella riippui pääasiassa sisä- ja ulkopinnan vastusten suhteesta. Esimerkiksi mineraalivillaeristeellä ja vastuksille 1/1E+09 oli suurin kosteusmäärä talvikaudella noin 3 kg/m^2 ja rakenteen ulkopinnan puoleinen osa kuivui alle 100 % RH tason noin 270 vrk:ta laskennan alusta. Tapaukselle, jossa vastukset olivat 10/10E+09, olivat vastaavat arvot noin 0,8 kg/m^2 ja 270 vrk. Sisä- ja ulkopinnan vastusten suhteella 2 oli kuivumisnopeus alle kondenssitason molemmissa em. tapauksissa vastaavasti noin 255 vrk, jolloin rakenteen ulkopinnan keskimääräinen vuorokausilämpötila oli ollut 0 °C rajan yläpuolella noin 3 viikkoa.

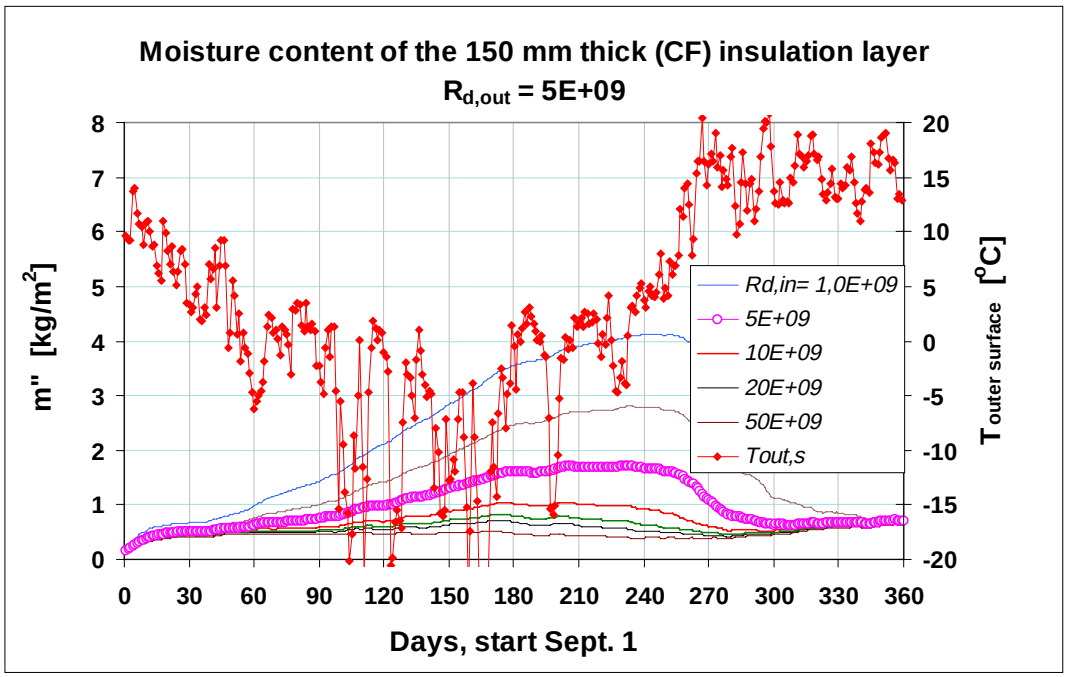
Sisä- ja ulkopuolen vesihöyrynvastusten suhteella 3 jäi talvikauden kosteuskertymä enimmillään hieman yli 1 kg/m^2 arvon (sellukuitueriste, 1,0E+09 ulkopinnan vesihöyrynvastus) ja kaikissa tapauksissa rakenteen ulkopinta kuivui alle kondenssirajan jokseenkin samaan aikaan kuin kohdan vuorokausikeskilämpötila ylitti 0 °C. Tämän perusteella jo sisä- ja ulkopuolen vesihöyrynvastusten suhde 3 olisi riittävä suojaamaan rakenne liialta sisäpuoliselta diffuusilta kosteuskuormitukselta kylmässä ilmastossa.



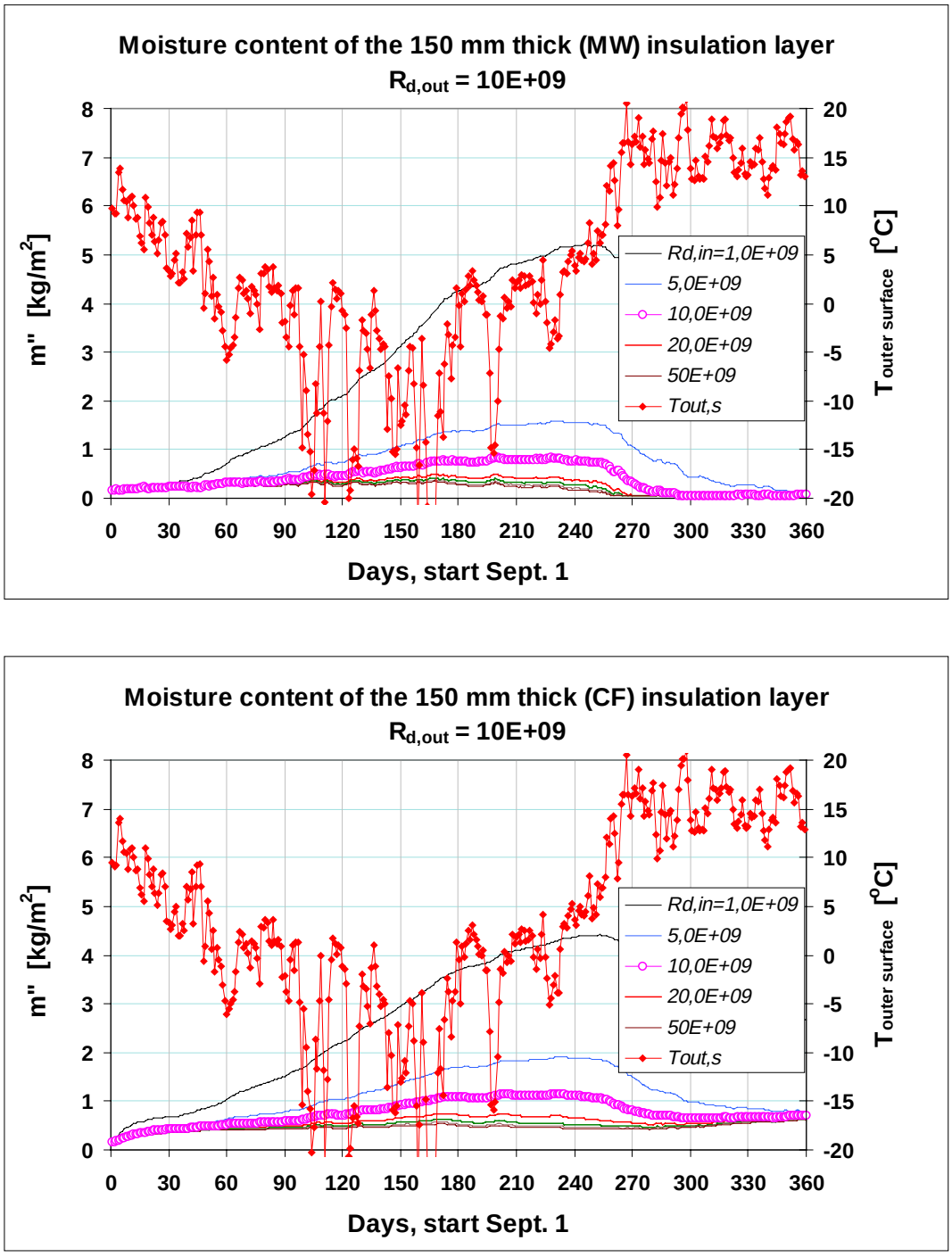


Kuva 5.4. Mineraali- ja sellukuitueristerakenteelle lasketut kokonaiskosteudet vuoden tarkastelujakson aikana syyskuun 1. päivästä alkaen. Ulkopinnan vesihöyrynvastus oli 1,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.

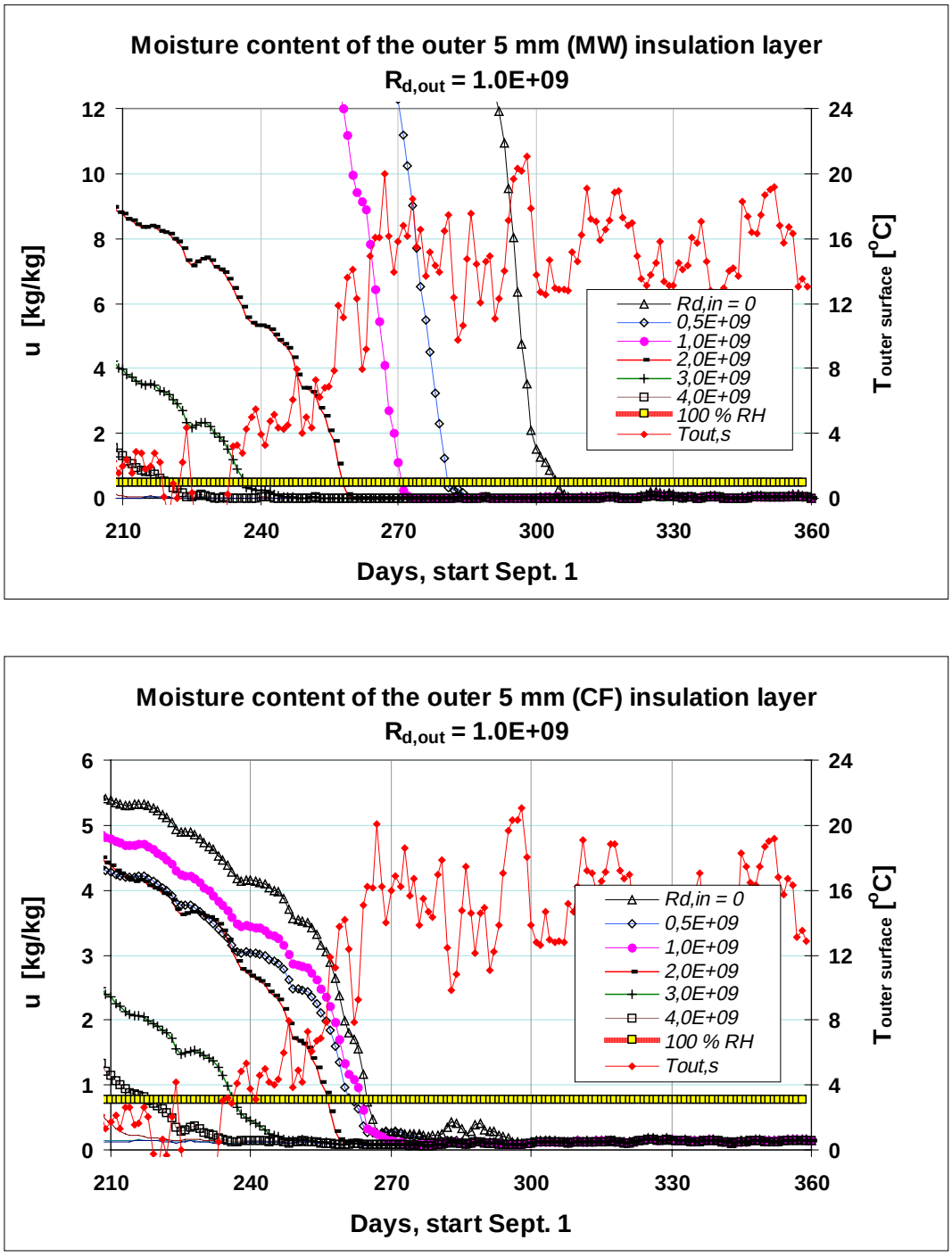




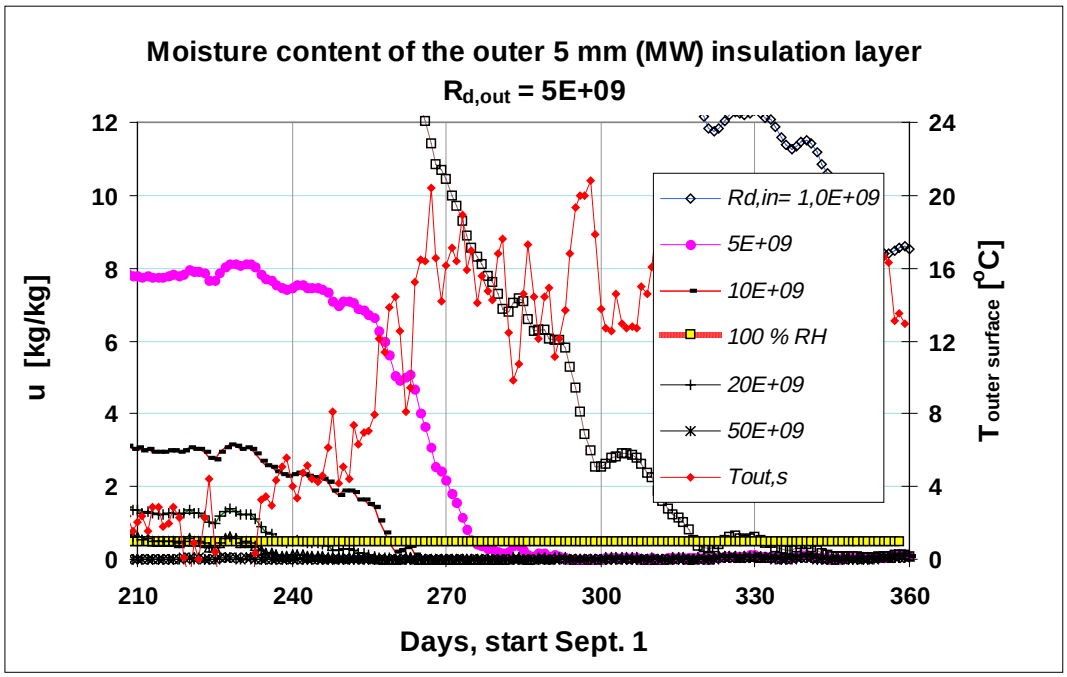
Kuva 5.5. Mineraali- ja sellukuitueristerakenteelle lasketut kokonaiskosteudet vuoden tarkastelujakson aikana syyskuun 1. päivästä alkaen. Ulkopinnan vesihöyrynvastus oli 5,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.

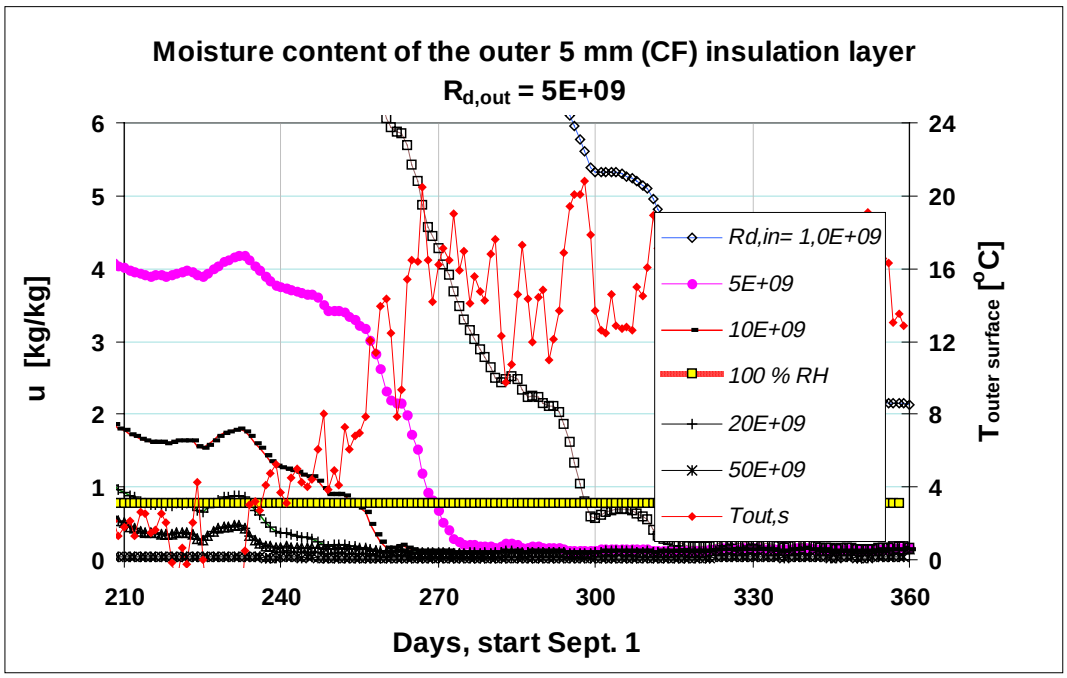


Kuva 5.6. Mineraali- ja sellukuitueristerakenteelle lasketut kokonaiskosteudet vuoden tarkastelujakson aikana syyskuun 1. päivästä alkaen. Ulkopinnan vesihöyrynvastus oli 10,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.

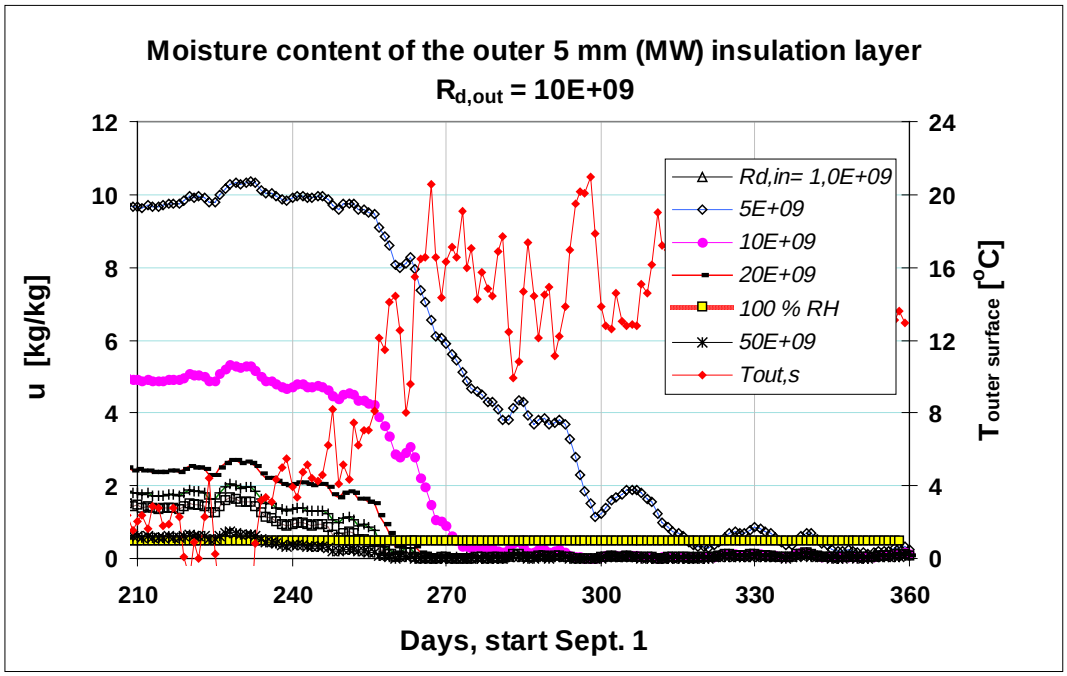


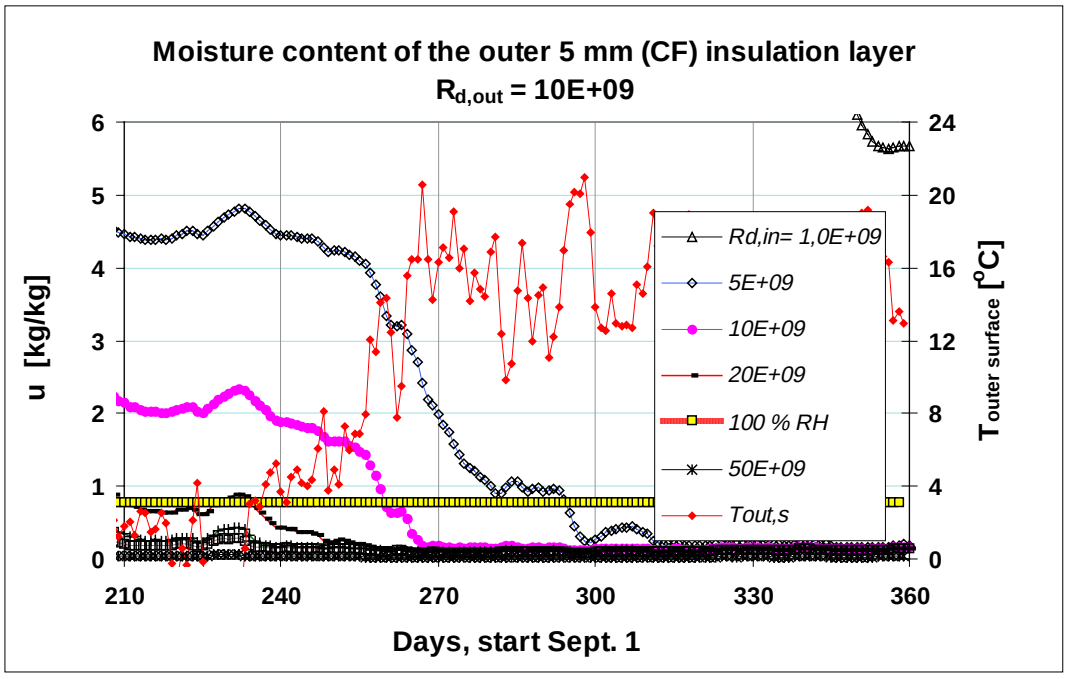
Kuva 5.7. Mineraali- ja sellukuitueristerakenteelle lasketut lämmöneristeen kylmän pinnan puoleisen 5 mm kerroksen kosteuspitoisuudet kevään kuivumisjakson aikana. Päivien numerointi vuoden tarkastelujakson aikana syyskuun 1. päivästä alkaen. Ulkopinnan vesihöyrynvastus oli 1,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.





Kuva 5.8. Mineraali- ja sellukuitueristerakenteelle lasketut lämmöneristeen kylmän pinnan puoleisen 5 mm kerroksen kosteuspitoisuudet kevään kuivumisjakson aikana. Päivien numerointi vuoden tarkastelujakson aikana syyskuun 1. päivästä alkaen. Ulkopinnan vesihöyrynvastus oli 5,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.





Kuva 5.9. Mineraali- ja sellukuitueristerakenteelle lasketut lämmöneristeen kylmän pinnan puoleisen 5 mm kerroksen kosteuspitoisuudet kevään kuivumisjakson aikana. Päivien numerointi vuoden tarkastelujakson aikana syyskuun 1. päivästä alkaen. Ulkopinnan vesihöyrynvastus oli 10,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.

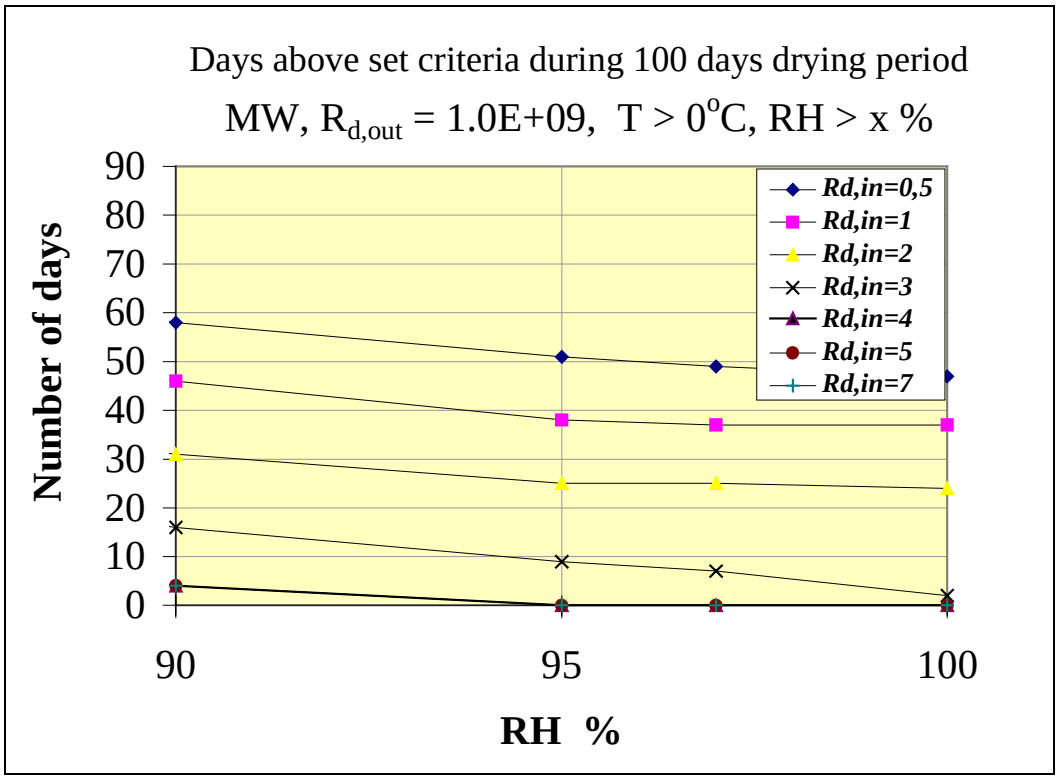
Kriittisten kosteuskausien kesto

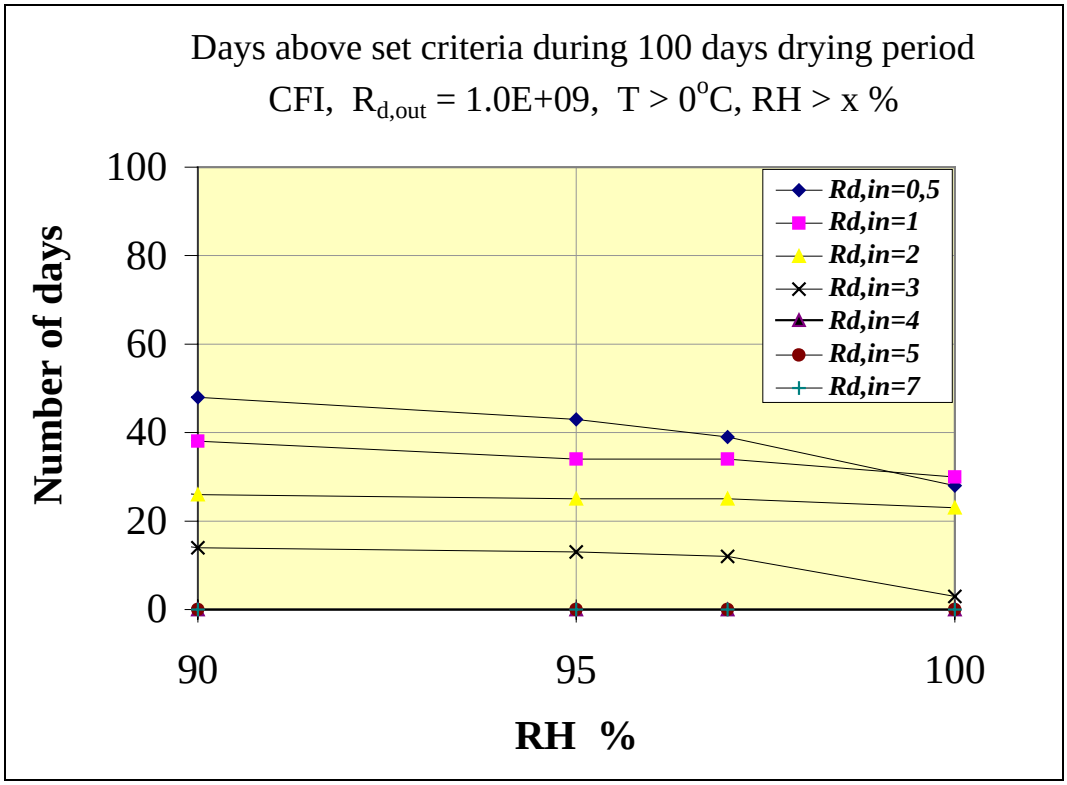
Kuvat 5.10 - 5.12 esittävät yhteenvetona eri sisä- ja ulkopinnan diffuusiovastuksilla lasketuista tapauksista kerätyt kevätkauden kuivumisajat. Lähtökohtana oli päivä, jolloin vuorokauden keskilämpötila rakenteen uloimmassa kerroksessa ylitti >0°C. Tästä eteenpäin seurattiin (100 päivän ajan) kuinka monta vuorokautta kului kunnes suhteellinen kosteus tässä kriittisessä kohdassa oli laskenut alle asetetun rajan. Koska rakenteiden kosteuskapasiteetti oli pieni, kelpaavat tarkastelun kriteeriksi vain korkean suhteellisen kosteuden arvot. Vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusoloissa ei voida esittää tarkkaa aikaa rakenteelta edellytettävälle kuivumiselle. Joka tapauksessa sallittu aika on useita viikkoja.

Kuvan 5.10 perusteella (ulkopinnan diffuusiovastus 1,0 E+09 (m^2 s Pa)/kg) sisä- ja ulkopinnan jo vastusten suhde 4 mahdollisti rakenteiden nopean kuivumisen, eikä. vastusten suhteen kasvatus olennaisesti nopeuttanut kuivumista, vaikka suuremmilla sisä- ja ulkopinnan vastusten suhteella talvikauden aikainen kosteuskertymä edelleen aleni.

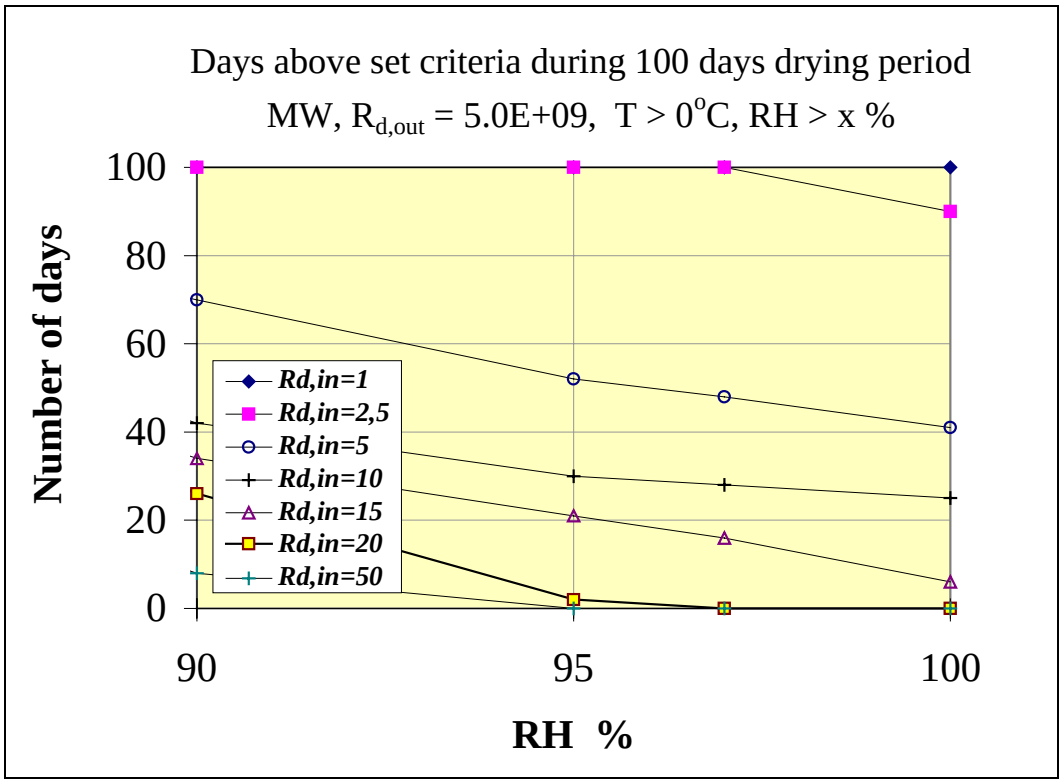
Kun ulkopinnan vastus oli suuri, 10E+09 (m^2 s Pa)/kg, pienenkin kosteusmäärän kuivuminen oli hidasta. Tätä näkyi erityisesti mineraalivillalla, jolla paikalliset kosteudet olivat ulkopinnan lähellä suhteellisen pitkään lähellä kondenssitilaa, vaikka rakenteen kokonaiskosteus oli pieni. Ulkopinnaltaan hyvin diffuusiotiiviit rakenteet eivät ole millään eristeratkaisuilla suositeltavia. Rakenteiden tulee kuivua kohtuullisessa ajassa myös rakentamisen jälkeisestä kosteudesta ja mahdollisista muista hetkellisistä kosteusrasituksista. Tarkan diffuusiovastuksen vaatimustason esittäminen pelkästään diffuusiotarkastelujen perusteella ei ole perusteltua. Tulosten perusteella ulkopuolisen diffuusiovastuksen tulisi kuitenkin olla pienempi kuin 10E+09 (m^2 s Pa)/kg, mielellään jopa alle 5E+09 (m^2 s Pa)/kg. Suurehkot ulkopinnan diffuusiovastukset ovat mahdollisia vain, jos rakenteessa on ulkopinnan puolella lämmöneristeen lisäksi muita kosteutta sitovia materiaalikerroksia ja diffuusio sisäilmasta on pääasiallinen kosteuslähde.

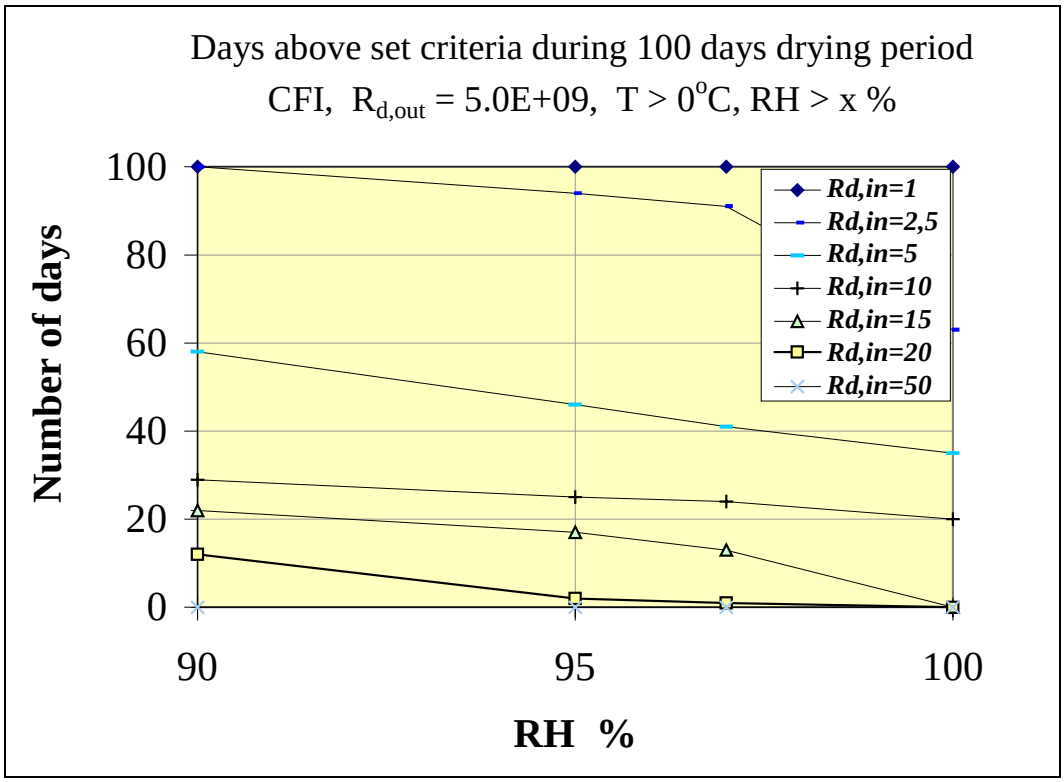
Vesihöyrynvastuksen vakioarvo ei edusta suoraan mitään materiaaliominaisuutta, vaan se kuvaa lähinnä toiminnallista, keskimääräistä arvoa. Rakennusmateriaalien kosteudensiirto-ominaisuudet ovat usein voimakkaasti kosteuspitoisuuden ja lämpötilan funktioita. Missään tapauksessa rakenteen ulkopinnan vastusarvoja ei pidä sekoittaa ns. kuivakuppikokein (noin 0/50 % RH tilassa) määritettyihin vesihöyrynläpäisevyyksiin.



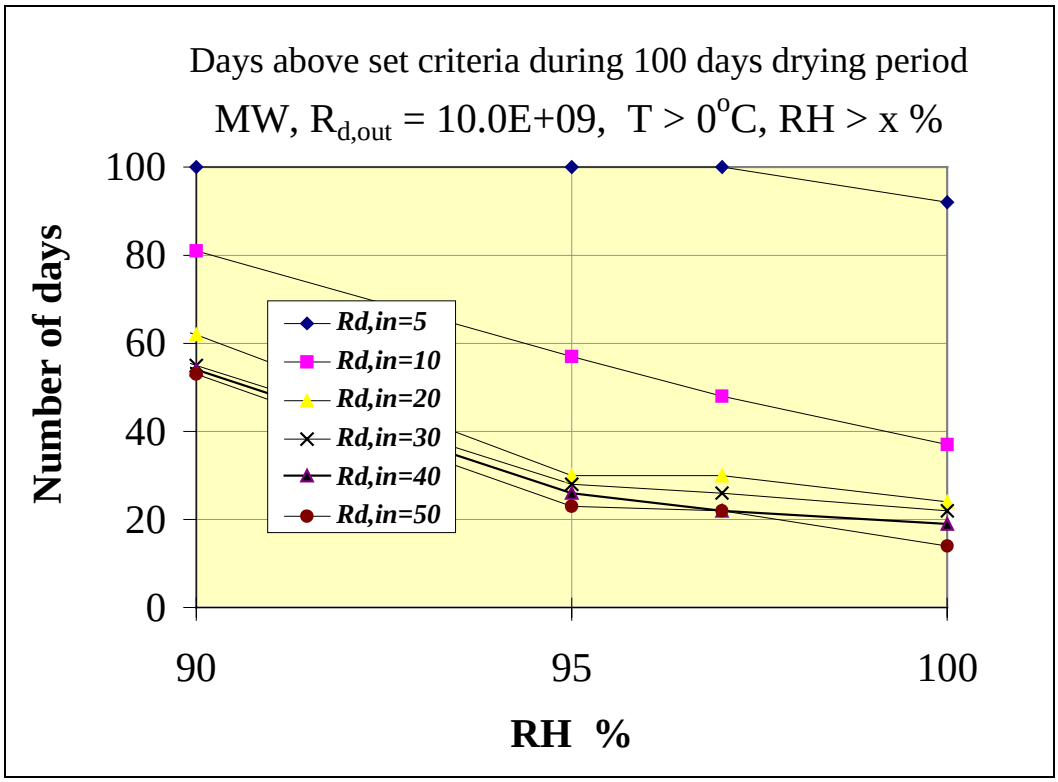


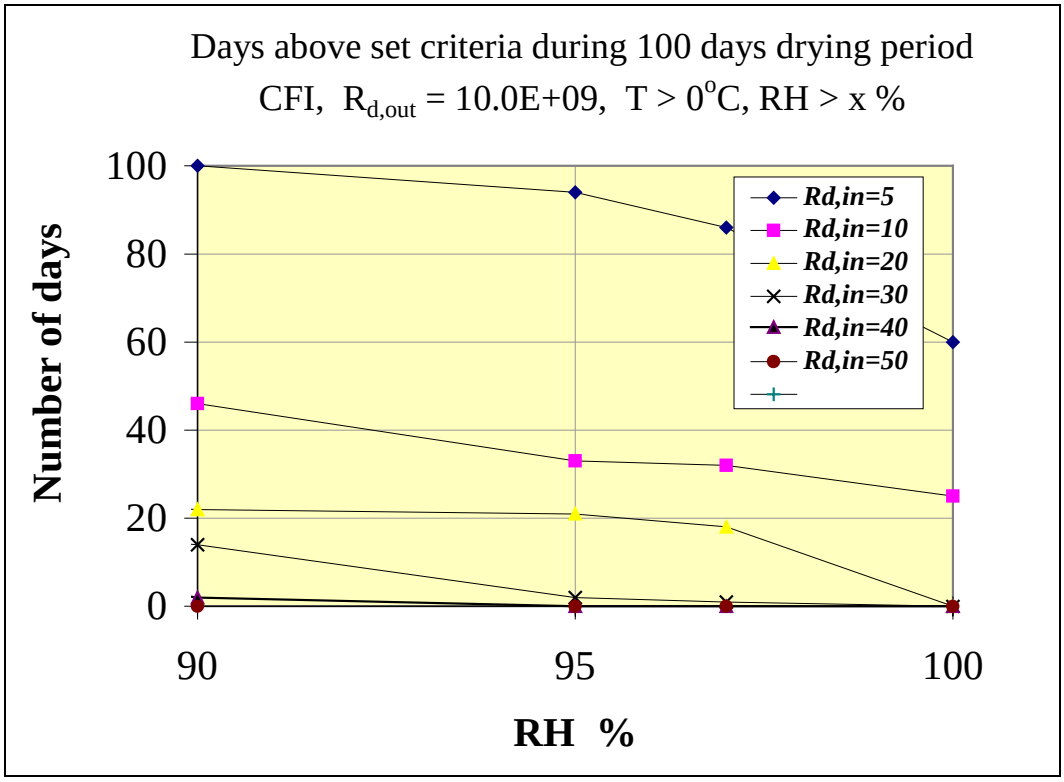
Kuva 5.10 . Talvikauden jälkeisen (T>0 ℃) kuivumisjakson suhteelliset kosteudet rakenteen ulkopinnan viereisessä lämmöneristekerroksessa. Ulkopinnan vesihöyrynvastus 1,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.





Kuva 5.11. Talvikauden jälkeisen (T>0 °C) kuivumisjakson suhteelliset kosteudet rakenteen ulkopinnan viereisessä lämmöneristekerroksessa. Ulkopinnan vesihöyrynvastus 5,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.





Kuva 5.12. Talvikauden jälkeisen (T>0 °C) kuivumisjakson suhteelliset kosteudet rakenteen ulkopinnan viereisessä lämmöneristekerroksessa. Ulkopinnan vesihöyrynvastus 10,0E+09 (m^2 s Pa)/kg.

Sellukuitueristeen ja mineraalivillan toiminnan vertailu

Kokonaiskosteuksissa mineraalivilla- ja sellukuiturakenteiden välillä oli vain vähän eroa tapauksissa, joissa sisäpinnan vastus oli sama tai suurempi kuin ulkopinnan. Näissä tapauksissa sellukuiturakenteen kosteusmäärä oli usein hieman suurempi, mikä johtui materiaalin hygroskooppisuuden aiheuttamasta suuremmasta kosteuskapasiteetista.

Tapauksissa, joissa sisäpinnan vastus oli ulkopinnan vastaavaa pienempi, sellukuitueriste piti koko rakenteen kosteuden alhaisempana kuin mineraalivilla. Esimerkiksi vastuksilla 1,0/0,5 xE+09 ulko/sisäpinnalla oli mineraalivillarakenteen suurin kosteus talvella noin 4,5 kg/m^2 kun vastaava arvo sellukuiturakenteella oli noin 3,5 kg/m^2. Ero johtui siitä, että sellukuitueristeen kosteus oli tasaisemmin jakautunut eristeen koko alueelle. Siten sellukuitueristeessä oli sisäpinnan vieressä suurempi kosteus kuin mineraalivillarakenteessa, mikä pienensi paikallisesti vesihöyryn painegradienttia ja osittain rajoitti rakenteeseen sisäilmasta tulevaa kosteusvirtaa. Kokonaiskosteuksien ero diffuusiotapauksissa oli kuitenkin pieni, eikä eroilla ole juuri käytännön merkitystä, sillä yleensä rakenteissa sisäpuolen vastukset ovat ulkopinnan vastaavia suuremmat.

Mineraalivillassa kosteusjakauma oli jyrkempi kuin sellukuitueristeellä, mikä johtui sellukuidun suuremmasta hygroskooppisuudesta. Mineraalivillaeristeessä kosteus liikkui ja asettui lähelle kylmää pintaa nopeammin kuin sellukuiturakenteessa.

Kuvasta 5.10 nähdään, että sisä- ja ulkopinnan diffuusiovastusten suhteilla 2 ja 3 sellukuitu- ja mineraalivillarakenteen kuivumisaikojen erot ovat merkityksettömät, kun ulkopinnan diffuusiovastus oli 1E+09 (m^2 s Pa)/kg. Tapauksissa, joissa sisäpinnan diffuusiovastus oli ulkopinnan arvoa pienempi tai kun ulkopinnan vastus oli 5 tai 10E+09, sellukuiturakenteen ulkopinnan viereinen paikallinen kosteus kuivui nopeammin alle 90 % RH tasapainoarvon kuin mineraalivillarakenteen. Itse sellukuiturakenne ei kuivunut nopeammin, vaan ero johtui lähinnä tarkastelukriteerinä olevasta tasapainokosteudesta, joka sellukuidulla oli mineraalivillaa korkeampi.

5.1.6 Yhteenveto diffuusiotarkasteluista

Tulosten johtopäätökset perustuvat tilanteeseen, jossa rakenteen kosteuskuorma aiheutuu pelkästään vesihöyryn diffuusiosta rakenteeseen ja jossa rakenteen alkukosteus on vähäinen. Kosteuslähteenä on pääasiassa sisäilma, mutta ajoittain myös ulkoilma voi kostuttaa rakenteen uloimpia kerroksia. Tuulensuojakerros ja sisäverhous oletettiin pelkiksi vastuksiksi, mikä toi tarkasteluun lisävarmuutta. Hygroskooppiset materiaalikerrokset tasoittaisivat kosteuksia ja parantaisivat rakenteiden kosteuden sietoa.

Suositeltu sisä- ja ulkopinnan diffuusiovastusten suhde on 5. Tämä edustaa jo selvästi varman puolella olevaa arvoa, sillä useimmissa tapauksissa diffuusiovastusten suhde 3 olisi riittävä. Suositusarvoon haluttiin kuitenkin ottaa mukaan varmuutta, jolla voidaan osittain kompensoida muiden kosteuslähteiden aiheuttamaa riskiä.

Todellisten diffuusiovastusten määrittäminen edellyttää materiaalien kosteudenläpäisevyyksien tuntemista eri kosteus- ja lämpötilaoloissa. Vuositasolla toiminta on syytä varmistaa eri rakennetapauksilla esimerkiksi laskennallisesti.

Pelkkien diffuusiotarkastelujen perusteella sisäpinnan diffuusiovastukselle ei voida asettaa selkeää vaatimusarvoa. Ulkopinnan diffuusiovastuksen tulisi kuitenkin tämän tarkastelun perusteella olla pienempi kuin 10E+09 (m^2 s Pa)/kg., mieluimmin alle 5E+09 (m^2 s Pa)/kg. Tätä arvoa ei pidä sekoittaa ns. kuivakuppikokein (noin 0/50 % RH tilassa) määritettyihin vesihöyrynläpäisevyyksiin, vaan sen tulee vastata keskimääräistä arvoa tuulensuojakerroksen todellisissa toimintaoloissa.

Lämmöneristeen ulkopuolen diffuusiovastuksen merkitystä rakenteiden kuivumiskyvyn kannalta arvioidaan tarkemmin havuvanerirakenteiden kosteusteknistä toimintaa koskevassa VTT:n tiedotteessa 1870 vuodelta 1997. Tässä julkaisussa tarkastellaan rakenteiden alkukosteuden tai diffuusion lisäksi jokin muu kosteuslähteen, esimerkiksi ilman ulosvirtauksen, vaikutusta rakenteen toimintaan.

5.2 VESIHÖYRYN KONVEKTION LASKENNALLINEN TARKASTELU

Ilmavirtauksen kosteudensiirtokapasiteetti on suuri verrattuna pelkkään vesihöyryn diffuusioon. Jos sisäilmaa virtaa rakenteen läpi, voi rakenteeseen tuleva kosteuskuorma pienelläkin virtaamalla olla paljon suurempi kuin mitä pelkän vesihöyryn diffuusion avulla voi rakenteeseen siirtyä /37 - 40/.

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointiin on olemassa kehittyneitä laskentamenetelmiä, joilla voidaan ratkaista dynaamisen tilanteen yhdistetty lämpö-, ilma- ja kosteusvirtaus esimerkiksi 2-ulotteisessa rakenneleikkauksessa. Ilman ulosvirtaustapauksia on analysoitu laskennallisesti mm. useiden Suomen ja Kanadan paikkakuntien säätiedostojen avulla käyttäen VTT/RTE:ssä kehitettyjä laskentavalmiuksia. Tulokset osoittivat, että sisäilman jatkuva ulosvirtaus rakenteen läpi aiheuttaa kylmissä ilmastoissa voimakkaan kosteuskertymän rakenteeseen /41 - 44/. Kriittinen kohta on yleensä kylmän pinnan viereinen tuulensuojalevy ja siihen rajoittuvat materiaalikerrokset ilman ulosvirtauskohdassa. Tarkkoja raja-arvoja kosteusteknisesti turvallisille ilman ulosvirtausmäärille ei ole esitetty.

Tässä tutkimuksessa oli käytössä matemaattiseen muotoon kehitetty homeen kasvun malli /45 - 46/ yhdistettynä toimimaan olemassaolevissa kosteuden simulointimalleissa. Kosteusteknisen toimivuuden kriteerinä voidaan siten käyttää homeen kasvua kuvaavaa indeksiä.

Kosteuskonvektioon vaikuttavia tekijöitä on runsaasti. Esimerkiksi rakenteiden vuotofunktiot voivat vaihdella laajalla alueella, eikä niiden esiintymistä tai muuttumista rakenteen iän funktiona voida ennustaa tarkasti. Samoin rakennusten painesuhteiden ja erityisesti sisäilman ylipaineen tason sekä esiintymisen ajallinen ja paikallinen vaihtelu riippuu mm. rakennusvaipan kokonaistiiviydestä, ilmanvaihtojärjestelmästä, tuulen painevaikutuksista seinämiin, korkeuden aiheuttamasta termisestä painegradientista jne. Siten kaikkien rakenne- ja ilmavuototapausten tarkka analysointi ei ole edes laskennallisesti mielekästä.

5.2.1 Konvektiotarkastelun tavoitteet

Kehittyneiden laskentamenetelmien soveltaminen kaikissa ilman ulosvirtaustapauksissa ei ole perusteltua. Oli selvä tarve kehittää pelkistetty, 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. Kehitetyllä menetelmällä voidaan arvioida raja-arvo rakenteen läpäisevälle jatkuvalle ilman ulosvirtaukselle, jonka tuoma kosteus tuulettuu ulos rakenteesta aiheuttamatta homehtumisriskiä.

5.2.2 Homeen kasvuedellytykset puumateriaaleissa /45 - 46/

Homeen kasvun alkamiselle suosiolliset kosteusolot puumateriaalissa riippuvat vallitsevasta lämpötilasta likimain kuvan 3.5 mukaisella tavalla. Kuvan alin rajakäyrä esittää homeen kasvun alkamiseen tarvittavaa suhteellista kosteutta. Mitä alhaisempi lämpötila on, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta home alkaisi kasvaa. Pakkasessa home ei kasva, eikä myöskään yli 50 °C lämpötilassa.

5.2.3 Ilman ulosvirtauksen pelkistetty analysointimenetelmä XFILT

Perusoletukset

Laskentamenetelmä perustuu seuraaviin oletuksiin:

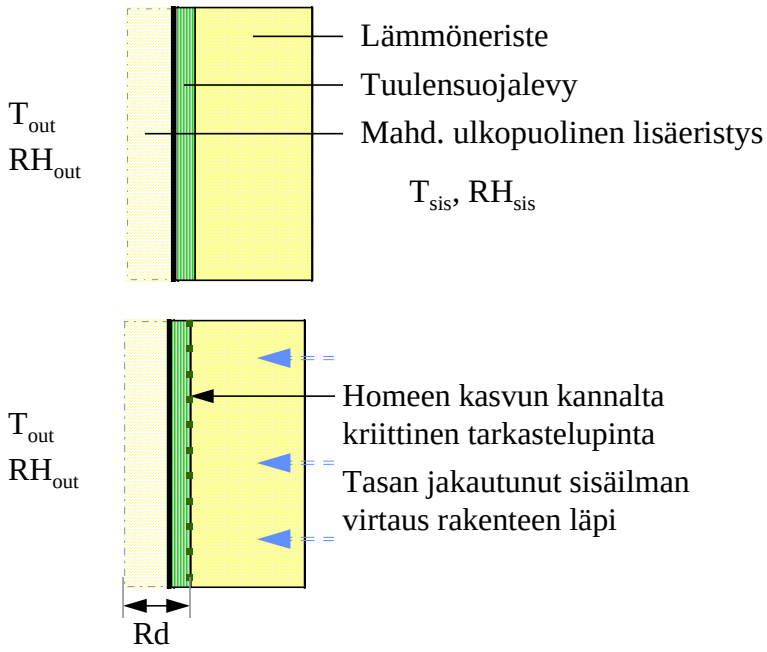
1. Kosteuslähteenä on pelkästään tasan jakautuneen konvektiovirtauksen mukana sisäilmasta rakenteeseen siirtyvä kosteus.

2. Rakenne on kapasiteetiton ja se kuvataan lämmöneristyskerroksena ja sen ulkopuolisena tuulensuojana (kuva 5.13)

3. Rakenteen tuulensuoja on koko ajan sellaisissa oloissa, joissa homeen kasvu ei ole mahdollista, ts. (kuva 3.6) alimman rajakäyrän alapuolella.

4. Tuulensuojan kautta ulos kuivuva kosteusvirta vastaa ilman ulosvirtauksen mukana rakenteeseen tulevaa kosteuskuormaa. Tilanne vastaa pelkistettyä tuulensuojan tuuletuspotentiaalin ja kosteuskonvektion välistä riippuvuutta.

5. Ratkaistun kosteusvirran perusteella voidaan rakenteen läpäisevä sisäilman ulosvirtaus ratkaista tunnettaessa sisäilman tila.



Kuva 5.13. Sisäilman ulosvirtauksen ja kosteuden tuulettumisen pelkistetyssä tarkastelussa käytetty rakenneleikkaus.

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.

Oletuksen mukaan homeen kasvuolosuhteita ei esiinny koskaan, vaikka koko ajan ollaan homeen kasvualueen rajalla. Pieni muutos kosteampaan tilaan päin johtaisi jatkuvaan homeen kasvuun lämpötilan sallimissa oloissa.

Tarkastelu tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelman pohjalle tehdyllä sovelluksella (XFILT). Tarkastelussa käytettiin kosteusvirtojen vertailussa kuukausitasoa.

Tarkastelumenetelmän yksinkertaistuksien aiheuttamista epävarmuustekijöistä huolimatta se antaa hyvän kuvan kosteuskonvektion merkityksestä ja sallittujen ilmavirtausten suuruusluokasta.

5.2.4 Laskennassa analysoidut tapaukset

Laskennassa tarkasteltiin kuva 5.13 mukaista rakennetta, jossa on 150 mm paksu lämmöneristekerros. Tuulensuojan vesihöyrynvastukselle annettiin arvoja, jotka vastasivat havuvanerin (9 mm), huokoisen puukuitulevyn (12 mm), kipsilevyn (12 mm) tai vakiolastulevyn (12 mm) höyrynvastusta. Lämmöneristeen materiaalilla ei ollut merkitystä, sillä kosteus siirtyi oletuksen mukaan konvektiona tuulensuojan sisäpinnalle.

Tutkimuksessa tarkasteltiin rakenteen toimintaa perustapauksessa, jossa tuulensuoja rajoittuu ulkoilmalla tuuletettuun ilmarakoon, sekä lisäksi ulkopuolelta lisäeristettyjä tapauksia. Tuulensuojan ulkopuoliseksi lämmöneristeeksi oletettiin mi-

neraalivilla, jonka vesihöyrynjohtavuus oli vakio 1,2E-10 kg/(s m Pa). Analysoidut ulkopuolisen lämmöneristeen paksuudet olivat 25, 50, 75 ja 100 mm.

Ulkoilmastona käytettiin vuoden 1979 Jyväskylän säätiedostosta ratkaistuja päiväkeskiarvoja. Vertailulaskelmissa käytettiin Holzkirhenin ja Vancouverin vastaavia säätietoja. Holzkirchen sijaitsee Etelä-Saksassa, Baijerissa lähellä Müncheniä ja Vancouver Kanadan länsirannikolla. Laskelmissa otettiin huomioon vain ulkoilman lämpötila ja vesihöyryn osapaine, ts. esimerkiksi auringon säteily jätettiin huomiotta. Tarkastelu vastaa pohjoisen puoleinen täysin varjossa olevaa rakennetta. Auringon säteily vaikuttaa voimakkaasti kosteuden kuivumiseen, joten tehty oletus lisäsi kosteusriskiä ja tarkastelun varmuutta.

Sisäilman lämpötila oli +22°C ja kosteuskuorma sisäilmaan oli +4 g/m^3 lisäyksenä ulkoilman tilaan. Laskennallisesti tarkasteltiin vuoden pituista jaksoa käyttäen reunaehtoina päiväkeskiarvoja.

5.2.5 Tulokset ja niiden tarkastelu

Seuraavassa esitetään kehitetyllä menetelmällä ratkaistut, rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta turvalliset sisäilman ulosvirtausmäärät rakenteen otsapinta-alaa kohden laskettuina [L/(s m^2)] Jyväskylän (kuva 5.14) Holzkirchenin (kuva 5.15) ja Vancouverin (kuva 5.16) ilmastoissa.

Kaikissa tapauksissa sallitut ilmavirtaukset olivat hyvien pieniä. Alhainen sallittu ilmavirtaustaso kuvaa rakenteiden herkkyyttä jatkuvalle sisäpuoliselle ylipaineelle ja sen aiheuttamalle sisäilman virtaukselle rakenteen kautta ulos.

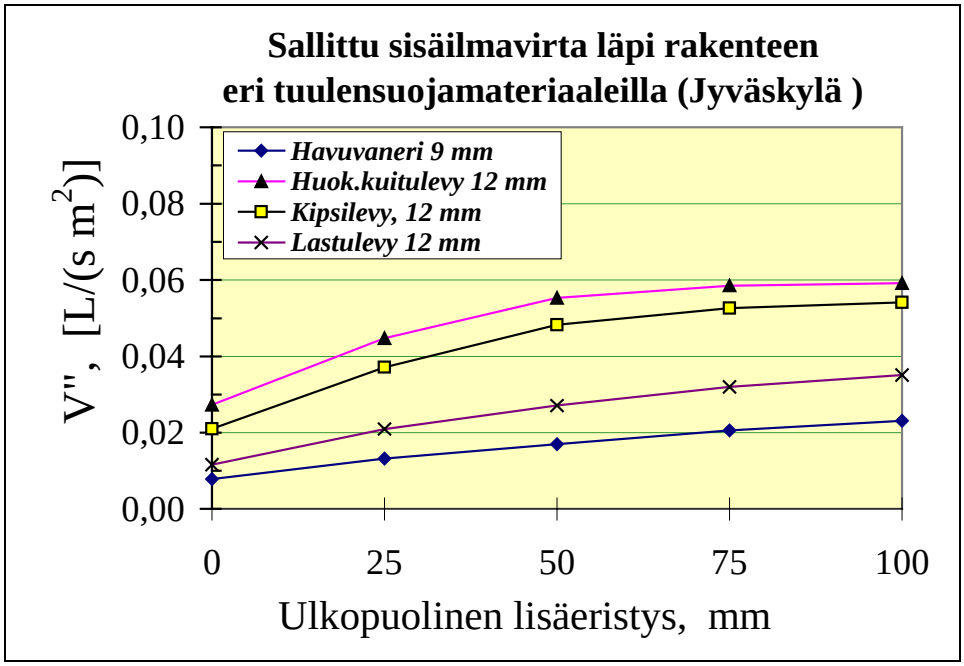
Jyväskylän ilmastossa oli havuvanerituulensuojan sallima suurin ulosvirtausmäärä noin 0,008 L/(s m^2)] kun tuulensuoja rajoittui suoraan tuuletusrakoon, Vastaava arvo huokoisella kuitulevyllä oli 0,027 L/(s m^2)] kipsi- ja lastulevytapausten sijoittuessa edellisten väliin. Tuulensuojan ulkopuolinen lämmöneriste tehosti rakenteen kuivumista niin, että ulosvirtaus sai olla 2 - 2,5 -kertainen perustapaukseen verrattuna.

Holzkirchenin ilmastossa ulkopuolisen lämmönerityksen hyöty oli pieni niillä tuulensuojamateriaaleilla, joiden vesihöyrynjohtavuus oli korkea. Esimerkiksi huokoisella kuitulevyllä sallittu ilmavirta pieneni ulkopuolisen eristepaksuuden 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.

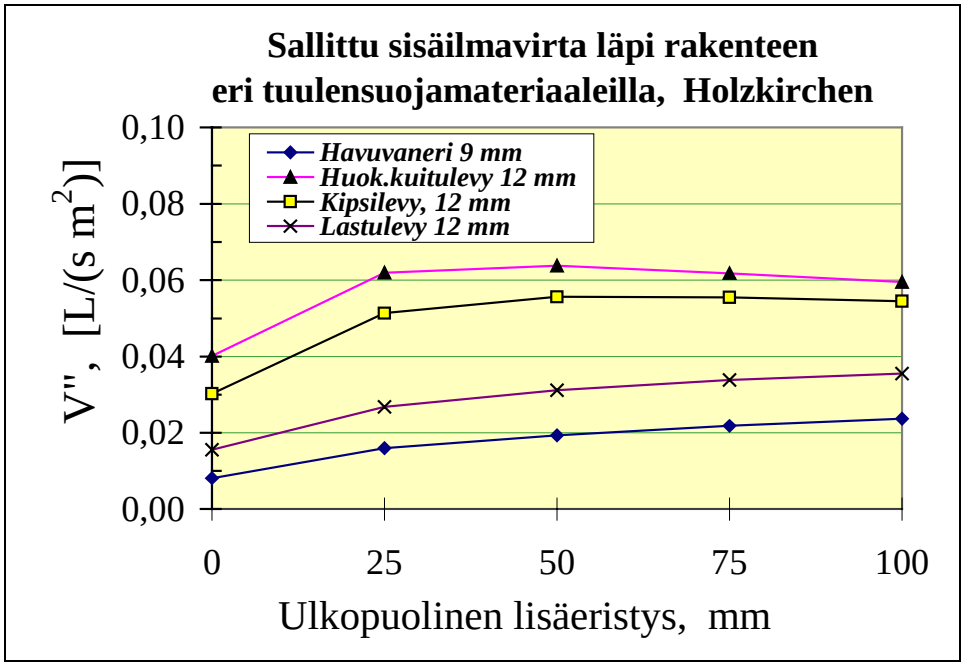
Vancouverin sää on selvästi kolmesta tutkitusta leudoin. Leudosta talvesta huolimatta Vancouver vastasi tuloksiltaan paremmin Jyväskylää kuin Holzkircheniä. Syynä tähän saattaa olla pitkäaikainen lämmin kausi, jolloin homeen kasvuedellytykset ovat jokseenkin läpi vuoden olemassa.

Suhteellisesti suurin hyöty Holzkirchenin oloissa saavutettiin noin 25 mm:n paksuisella tuulensuojan ulkopuolisella lämmönerityksellä. Jyväskylän oloissa käyrän taitekohta oli huokoisella kuitulevyllä ja kipsilevyllä noin 50 mm:n eristepaksuudessa, mutta havuvanerilla ja lastulevyllä tätäkin paksummat eristykset paransivat

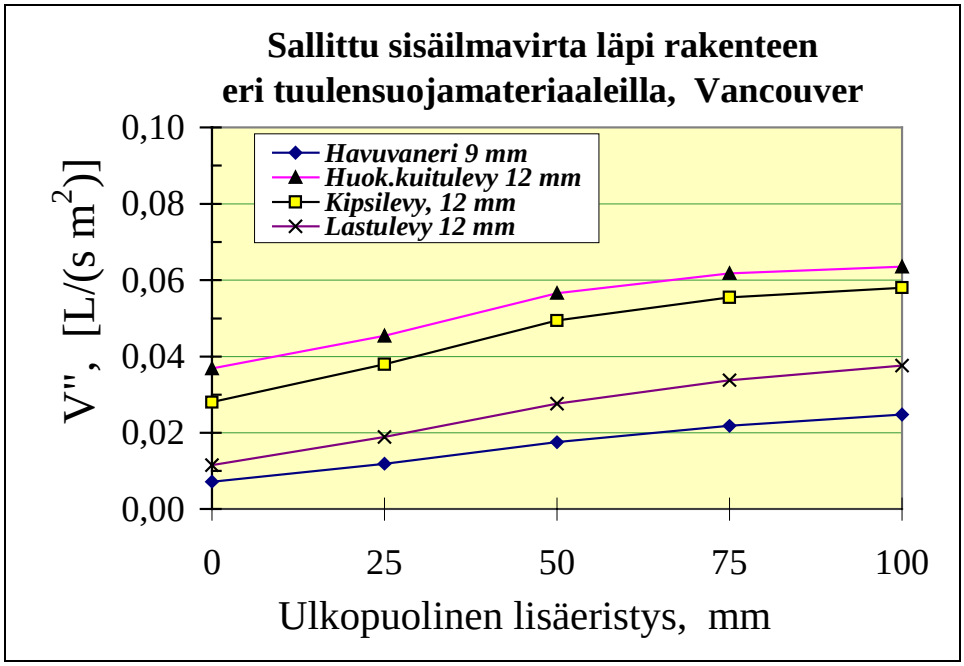
rakenteen kosteudensietokykyä ja kasvattivat edelleen sallittua sisäilmavirtaa. Vancouverin tapauksessa 25 - 50 mm:n lisäeristepaksuudet antoivat kaikilla tuulensuojatapauksilla jokseenkin Jyväskylän tilannetta vastaavat tulokset.



Kuva 5.14. Eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Jyväskylän sääolot.



Kuva 5.15. Eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Holzkirchenin sääolot.



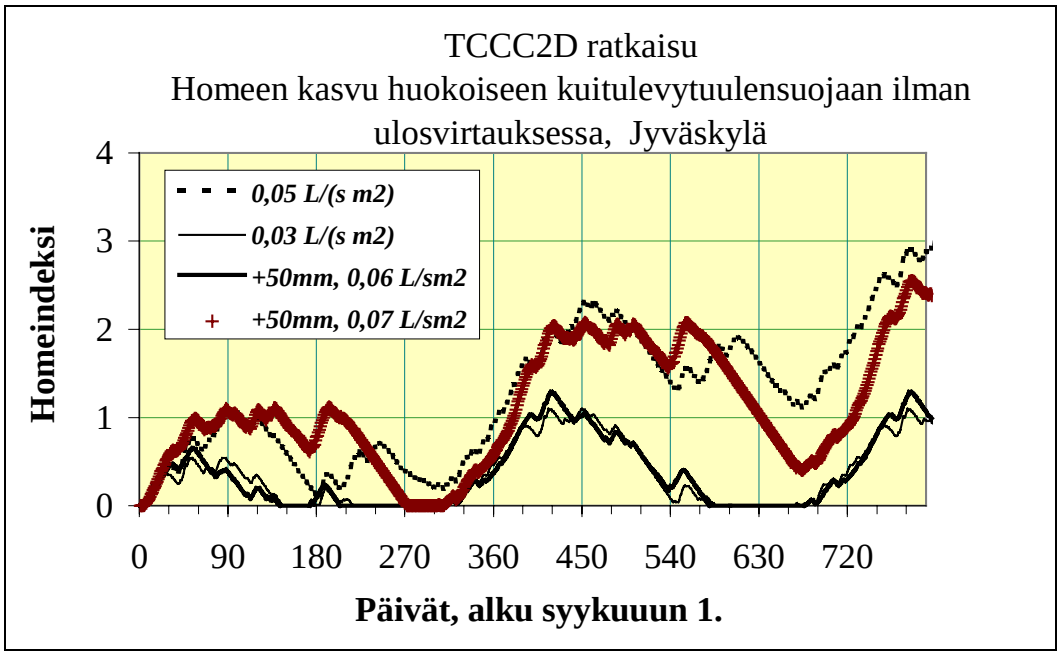
Kuva 5.16. Eri tuulensuojamateriaalien sallimat suurimmat sisäilman läpivirtausmäärät tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyskerroksen (mineraalivilla) funktiona. Vancouverin sääolot.

5.2.6 Tulosten arviointi ohjelmalla TCCC2D

Tuloksia arvioitiin laskemalla valittuja tapauksia kehittyneemmällä laskentamallilla TCCC2D. Laskelmissa reunaehdot ja materiaaliominaisuudet päivitettiin tunneittain, mikä otti paremmin huomioon hetkelliset, päivän lämpimien hetkien aikaiset homeen mahdollistavat kasvuolosuhteet. Siten tuntiarvoilla ratkaistujen tapausten oletettiin tuottavan hieman suuremman homeriskin kuin päivittäisillä arvoilla ratkaistu tilanne. Tapausten vertailu antaa käsityksen dynaamisen tilan ja kehitetyllä yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä saatujen tulosten mahdollisista eroista.

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

Kuva 5.17 esittää ohjelmalla TCCC2D ratkaistut homeindeksit 27 kuukauden aikana alkaen syyskuun alusta. Rakenteella ratkaistut ilmavirtausmäärät olivat 0,03 ja 0,05 L/(s m^2) perustapaukselle ja 0,06 ja 0,07 L/(s m^2) eristetylle tapaukselle. Valitut arvot sijoittuvat yksinkertaistetulla menetelmällä ratkaistujen suositusarvojen tasolle.



Kuva 5.17. Homeen kasvu huokoisessa kuitulevytuulensuojassa dynaamisen mallin TCCC2D avulla ratkaistuna eri sisäilman virtausmäärillä rakenteen läpi Jyväskylän olosuhteissa. Hyväksyttävä, turvallinen taso on indeksin 3 alapuolella.

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

5.2.7 Yhteenveto ilman ulosvirtauksesta

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.

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 L/(s m^2) ja huokoisella kuitulevytuulensuojalla se oli ilmastosta riippuen tasolla 0,03 - 0,05 L/(s m^2).

Vertailun vuoksi voidaan todeta, että 0,5-kertainen ilmanvaihto pientalossa edellyttää noin 0,2 L/(s m^2) 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 turvallisen tason arvot. Kosteuden riskitekijät usein korostuvat, kun ilman läpivirtaus keskittyy paikallisiin vuotoreitteihin.

Tuulensuojan ulkopuolisen lämmöneristyksen käyttö parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintavarmuutta. Ulkopuolisen lämmöneristeen vaikutuksesta ulosvirtaavasta ilmasta tiivistyy rakenteeseen entistä pienempi osa sen sisältämästä kosteudesta. Tuulensuojamateriaalista riippuen, ulkopuolinen lämmöneristys mahdollistaa noin 2 - 2,5 -kertaiset kosteuskuormat (sisäilman läpivirtaus) rakenteeseen kuin perustapauksessa 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. Edellytys rakennuksen painesuhteiden hallitsemisesta 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.

5.3 KOSTEUSTEKNISET LABORATORIOKOKEET

5.3.1 Kokeiden tarkoitus

Kokeiden tarkoituksena on todeta mittauksin keveiden mineraalivillalla tai sellukuitueristeellä lämmöneristettyjen puurunkoseinien kosteustilan muuttuminen ajan funktiona, kun seinärakenteet asetetaan lämpimän "sisäilman" ja kylmän "ulkoilman" väliin. Mittauksia suoritettiin lämmöneristyksen ja sen ulkopuolisen ainekerroksen (tuulensuoja tai lämmöneristyksessä kiinni oleva ulkoverhousrakenne) rajakerroksessa. Tavoitteena on todentaa hallituissa oloissa sisäilman vesihöyryn siirtyminen ja tästä johtuva kosteuden keräytyminen erilaisiin puuseinärakenteisiin tunnetuilla ja hallituilla kosteuden siirtymismekanismeilla (vesihöyryn diffuusio seinän sisäpinnan läpi, vesihöyryn konvektio seinään ilmavirtauksen mukana sisäverhouksessa olevan raon kautta).

Koetuloksia tarvitaan mm.simulointilaskelmien verifiointiin. Tämän lisäksi haetaan puhtaasti kokeellista osoitusta tai havaintoa mm. seuraavissa kysymyksissä:

- sisäilman vesihöyryn jatkuva konvektio rakenteeseen ja sen aiheuttama kosteuden kerääntyminen
- höyrynsulun ja höyrynsuluttomuuden vaikutus sisäilman vesihöyryn diffuusion aiheuttamaan kosteuden keräytymiseen
- tuulensuojan ja ulkoverhouksen höyrynvastuksen merkitys kosteuskeräytymän syntymiseen ja rakenteen kuivumiseen
- tuuletusvälillisen ja tuuletusvälittömän lautaverhotun rakenteen kosteuden keräytyminen ja kuivuminen
- ei hygroskooppisen (mineraalivilla) ja hygroskooppisen (sellukuitueriste) lämmöneristyksen merkitys kosteuden keräytymisen ja kuivumisen kannalta

Jäljempänä esitettävät koetulokset pätevät tutkituille koerakenteille koeolojen mukaisilla reunaehdoilla. Koetulosten yleistäminen muihin oloihin (esim. kosteusteknisesti mitoittava sisä-/ulkoilmasto) voi tapahtua vain simuloimalla rakenteen toiminta sekä kokeessa että käyttötilanteen oloissa.

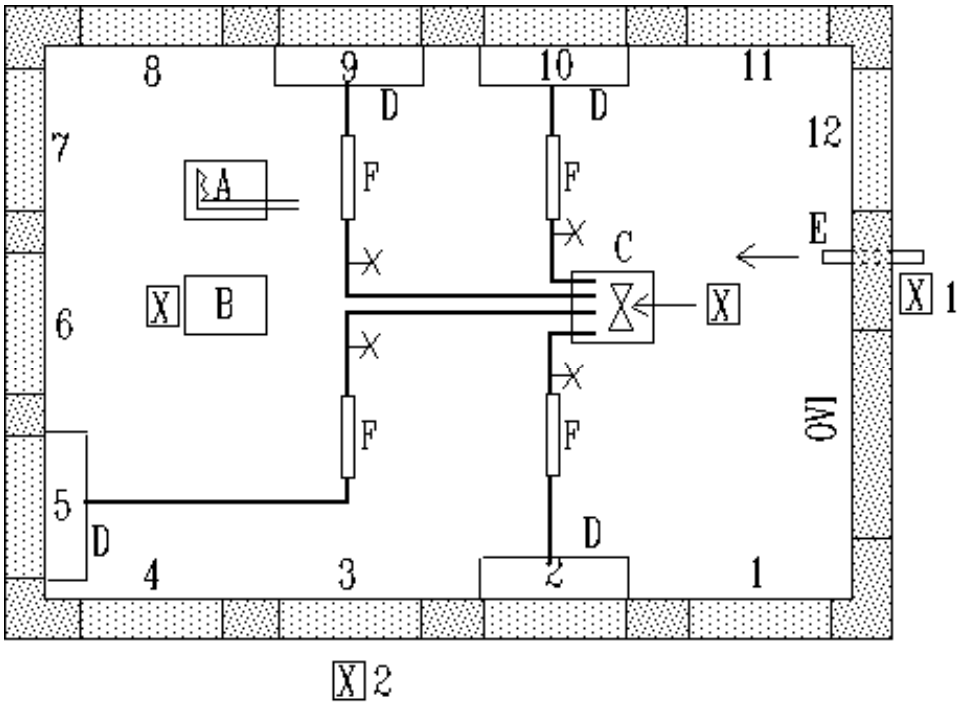
5.3.2 Koejärjestely

Koeseinät ja kokeen suorittamisen edellyttämä muu koejärjestely rakennettiin lämpötilaltaan aseteltavissa olevaan pakkashuoneeseen, jonka ilmatila vastasi seinärakenteiden kannalta ulkoilmaa. Jäljempänä pakkashuoneen ilmasta käytetään nimitystä "ulkoilma". Koska pakkashuoneen jäähdytyspatterin pintalämpötila oli 4…6^{o}C ulkoilman lämpötilaa matalampi ja ilman kosteus tiivistyi patteriin, oli ulkoilman suhteellinen kosteus tasolla 60…70 % R.H. Patteriin kertynyt jää jouduttiin kokeen aikana ajoittain sulattamaan, jolloin ulkoilman lämpötila hetkellisesti nousi.

Pakkashuoneeseen rakennettiin suulakepuristetusta polystyreenisolumuovista (XPS) ulkomitoiltaan n. 2,8 x 2 x 2 m^3 kokoinen koekoppi, jonka seinärakenteiden aukkoihin koottiin 12 kpl erilaisia koeseiniä. Koekopin sisäilman lämpötila pidettiin vakiona sähkölämmittimen.

Lämmitystehon lämpötilaohjatun säädön ja sekoituspuhaltimen avulla. Sisäilman kosteuskuormittajana oli veden sumutukseen ja sumun höyrystymiseen perustuva laitteisto (Burg). Sumutus säädettiin tasolle, joka johti haluttuun sisäilman kosteustasoon. Sisä- ja ulkoilman lämpötilaa mitattiin kokeen aikana säteilysuojatuilla termoelementeillä sekä automaattisella tietojen keruu- ja tallennusyksiköllä. Sisäilman kosteutta seurattiin ja valvottiin piirtävän hiushygrometrin näyttämän perusteella ja kosteustiedot mitattiin automaattisesti keräävällä ja tallentavalla mittalaitteella (Tiny Talk R.H.), josta mittausjakson tiedot saatiin digitaalisessa muodossa käsittelyä varten.

Koekopin XPS-seinämän paksuus oli 120 mm. Koekopin seiniin tehtiin koeseinien rakentamista varten aukkoja, joiden korkeus oli 1 730 mm ja leveys 460 mm. Koeseinät koottiin noudattaen jäljempänä kuvattuja periaatteita ja vaatimuksia. Koeseiniin ei tehty seinän puurunkoa jäljittelevää runko-osaa, vaan sen eri kerrokset olivat yhtenäisiä ja asennusaukon kokoisia sekä kiinni aukon reunoissa. Koeseinien sisäverhoukset, ilmansulku ja höyrynsulkukerrokset, tuulensuojat ja ulkoverhoukset tiivistettiin asennusaukon reunoihin siten, ettei hallitsematonta ilmavuotoa reunarakojen kautta koeseiniin tai niiden läpi voinut esiintyä.



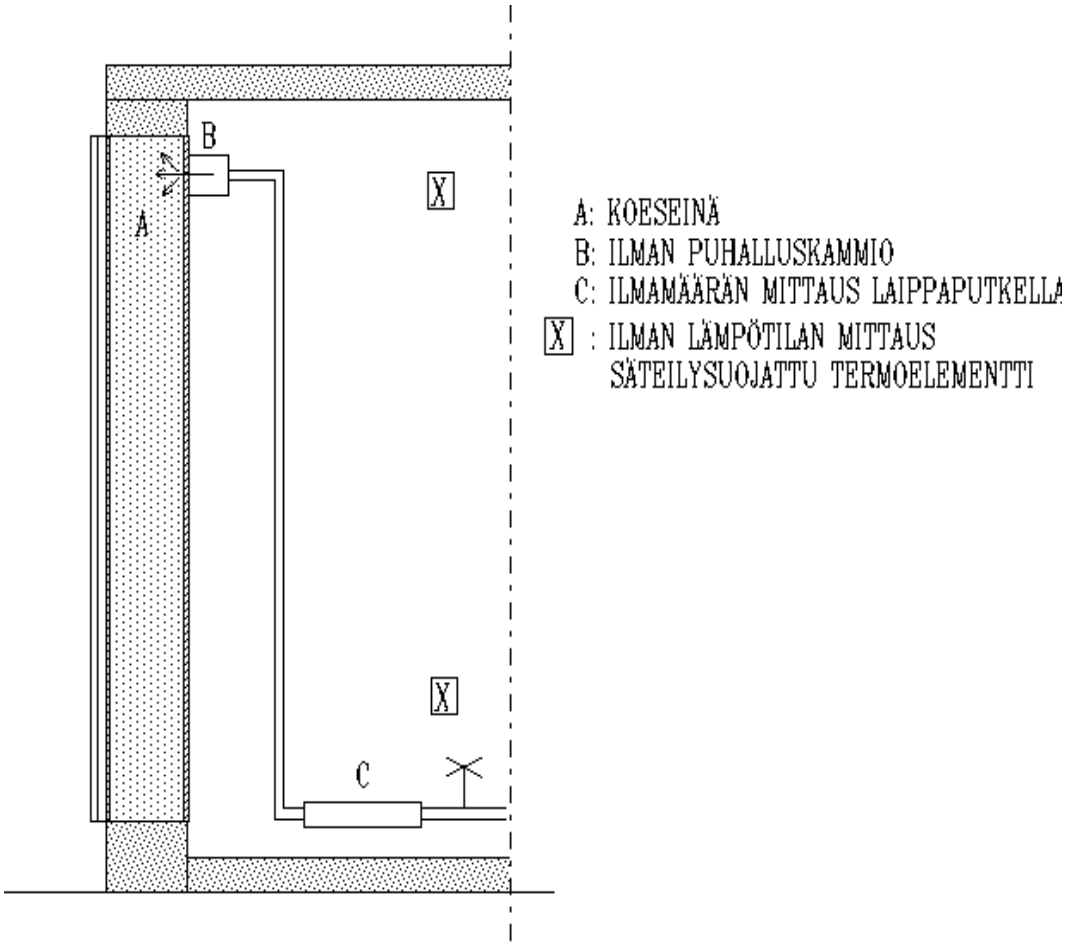
NO.1-12; KOESEINÄT
A: LÄMMITYSVASTUS JA PUHALLIN
B: ILMANKOSTUTIN
C: SÄÄDETTY ILMANPUHALLUS KOESEINIIN
D: ILMAN PUHALLUSKAMMIO
E: KORVAUSILMAVENTTIILI
F: ILMAMÄÄRÄM MITTAUS LAIPPAPUTKELLA
X : ILMAN LÄMPÖTILAN MITTAUS
SÄTEILYSUOJATTU TERMOELEMENTTI

Kuva 5.18. Vaakaleikkaus pakkashuoneesta ja siinä olevasta koekopista koeseinineen.

Kunkin koeseinän sisäpinta oli koekopin XPS-rungon sisäpinnan tasassa. Lämmöneristyksen paksuus oli kaikissa koeseinissä noin 100 mm. Täten koeseinien tuulensuojan ulkopinta oli tuulensuojan paksuudesta riippuen joko 5 mm tai 35 mm koekopin XPS-rungon ulkopinnan ulkopuolella. Ulostyöntyvät tuulensuojan sivupinnat tiivistettiin ilmavuodoilta ja 35 mm ulkonevat reunat lämmöneristettiin sivusuunnassa XPS-kaistoilla. Kahden koeseinän ulkopinnassa oli teräsohutlevy, joka oli noin 10 mm XPS-rungon ulkopinnasta sisään päin. Koeseinien tuuletusvälit ja ulkopuoliset lautaverhoukset olivat tuulensuojan ulkopuolella. Verhouslautana oli 18 mm paksu puoliponttilauta vaakasuuntaisena. Tuuletusvälit tehtiin 22 mm pystyrimoin, jolloin tuuletusväli oli avoin a.o. koeseinän ala- ja yläreunassa. Kuvassa 5.18 esitetään vaakaleikkaus koekopista ja yleisestä koejärjestelystä.

Sisäilman vesihöyryn tunkeutuminen koeseiniin tapahtui diffuusiona seinän sisäpinnan läpi, konvektiona seinän sisäpintaan tehdyn lämmöneristykseen johtaneen vuotoraon kautta tai molemmilla mekanismeilla riippuen koeseinästä. Vesihöyryn konvektion mahdollistava vuotorako tehtiin neljään koeseinän sisäverhouksena olevaan kipsilevyyn ja sen takana olleeseen ilmansulku- ja höyrynsulkukerrok-

seen. Kukin rako sijaitsi vaakasuuntaisena 50 mm etäisyydellä koeseinän yläreunasta. Rakojen pituus oli 380 mm ja leveys 1mm.



Kuva 5.19. Laitteisto vuotoilman johtamiseksi sisäpuolelta vuotoraollisiin koeseiniin.

Kunkin raon kautta johdettiin jatkuva ilmavirtaus sisäpuolelta lämmöneristykseen. Tämä aikaansaatiin kuvan 5.19 mukaisella koejärjestelyllä, jossa puhaltimella halutun suuruiseksi säädetty ilmavirtaus (tavoite 0,15 litraa /s) ohjattiin raon ympärille seinän sisäpintaan tiivistetyn puhalluskammion kautta seinään. Kunkin raon kautta kulkeva ilmavirtaus mitattiin ja virtauksen pysyvyyttä seurattiin laippaputkella, joka oli kiinteästi mittausjärjestelyssä.

Koeseinien kosteustilaa seurattiin seinärakenteisiin asennettujen männystä valmistettujen puukappaleiden avulla. Näitä asennettiin lämmöneristyksen ulkopintaan tuulensuojaa tai ulkoverhousrakennetta vasten kahdelle korkeudelle. Alempien etäisyys seinän alareunasta oli 50 mm ja ylempien seinän yläreunasta 50 mm. Vuotoraollisissa seinissä sisäverhouksen vaakasuora rako oli ylempien puukappaleiden kohdalla.

Puukappaleiden kosteuspitoisuutta mitattiin kahdella eri menetelmällä. Kooltaan 145 x 45 x 19 mm^3 olevat puukappaleet, joihin asennettiin kiinteästi kuparinaulat, toimivat sähköisen mittauksen antureina. Mittaus perustui puun sähkönvastuksen tunnettuun riippuvuuteen kosteuspitoisuudesta tietyllä kosteuspitoisuusalueella.

Nämä sähköisen mittauksen kosteusanturit varustettiin ulkopintaan kiinnitetyilla termoelementeillä ja asetettiin aina lämmöneristyksen kylmään pintaan termoelementti tuulensuojan sisäpintaa vasten.

Kooltaan 130 x 40 x 2 mm^3 olevat puukappaleet olivat kosteusnäytteitä, jotka otettiin haluttuina ajankohtina rakenteesta ja kuivattiin tasapainotilaan 80^oC lämpötilassa kosteuspitoisuuden määrittämiseksi. Nämä anturit olivat myös lämmöneristyksen kylmässä pinnassa tuulensuojan sisäpintaa vasten lukuunottamatta mineraalivillatuulensuojalla varustettuja rakenteita. Näissä puukappaleet olivat tuulensuojan ulkopinnan kuitukangasta vasten upotettuna tuulesuojalevyyn.

Kosteusmittauksen tuloksia tulkittaessa on otettava huomioon mm. seuraavaa:

- Mittaustulos on seinään asennetun puukappaleen keskimääräinen kosteuspitoisuus mittaushetkellä.

- Puukappaleen keskimääräisen kosteuspitoisuuden muutosnopeus tietyillä reunaehdoilla riippuu kappaleen dimensioista. Muutokset pienissä kappaleissa ovat nopeampia kuin suurissa.

- Puukappaleiden kosteuspitoisuudesta voi tehdä johtopäätöksiä koskien rakenteen kosteustilan muutossuuntaa ja nopeutta. Rakenteen kokonaiskosteuden absoluuttiarvoa ei sen sijaan voida päätellä.

Koeseinien rakenteet esitetään taulukossa 5.1. Kaikissa koeseinissä oli sisäverhouksena 12 mm paksu pinnoittamaton kipsilevy. Muiden rakennekerrosten osalta käytetään taulukossa 5.1 seuraavia merkintöjä:

- höyrynsulku, polyeteenimuovi, 0,2 mm — PE
- ilmansulkupaperi, huokoinen rakennuspaperi, 0,35 mm — R-PAP
- sisäverhouksessa rako vesihöyryn konvektiolle — Rako
- lämmöneriste, kevyt lasivilla,17 kg/m3 — MW
- lämmöneriste, irtoasennettu sellukuitueriste, 45 kg/m3 — LCFI
- tuulensuoja, huokoinen puukuitulevy, 12 mm — H-PKL
- tuulensuoja, kuitukangaspintainen lasivillalevy, 45 mm — T-MW
- tuuletusväli, 22 mm, sisältyy tai ei sisälly rakenteeseen — on / ei
- ulkoverhous, puoliponttilauta vaakasuunnassa, 18 mm — UVL
- ulkoverhous, teräsohutlevy, 0,7 mm — Pelti
- sisäilman vesihöyryn pääasiallinen tunkeutumismekanismi
  - diffuusio — D
  - konvektio — C

Taulukko 5.1. Koeseinärakenteet kerroksittain.

Koeseinä N:o	Höyryn-/ ilmansulku	Vuotorako / höyrynsiirtymismekanismi	Lämmöneristys	Tuulensuoja	Tuuletusväli/ ulkoverhous
1	PE	D	MW	H.PKL	on / UVL
2	PE	Rako, C	MW	H-PKL	on / UVL
3	R-PAP	D	MW	H-PKL	on / UVL
4	R-PAP	D	MW	T-MW	on / UVL
5	PE	Rako, C	MW	T-MW	on / UVL
6	R-PAP	D	MW	-	ei / Pelti
7	R-PAP	D	LCFI	-	ei / Pelti
8	R-PAP	D	LCFI	H-PKL	on / UVL
9	R-PAP	Rako, C	LCFI	H-PKL	on / UVL
10	PE	Rako, C	MW	H-PKL	ei / UVL
11	R-PAP	D	MW	H-PKL	ei / UVL
12	R-PAP	D	LCFI	T-MW	ei / UVL

5.3.3 Koesuoritus

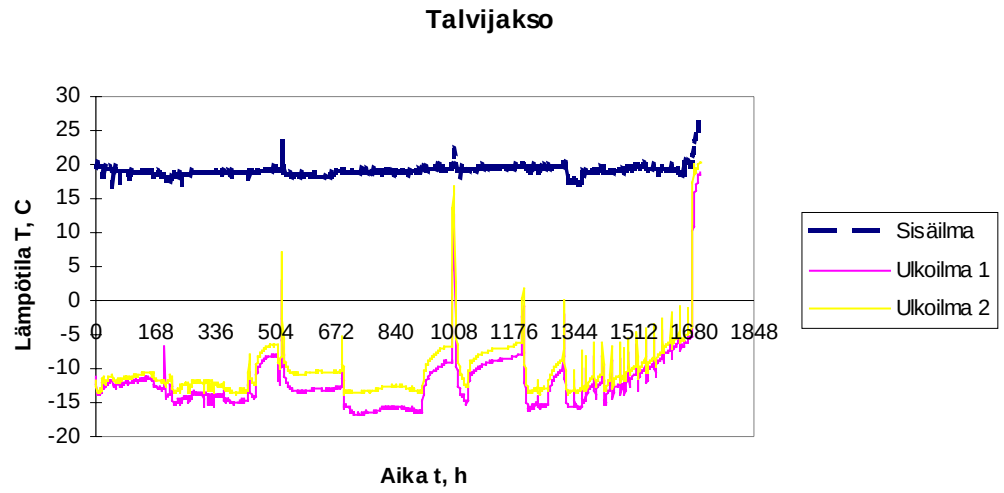
Koeseinien kosteusrasituskoe suoritettiin pakkashuoneessa kahdessa perättäisessä jaksossa, joista ensimmäinen oli nimeltää “talvijakso” ja jälkimmäinen “kevätjakso”. Koekopin sisä- ja ulkoilman tavoitearvot olivat kumpanakin jaksona seuraavat:

Talvijakso,	Sisäilma.	Lämpötila	20 ^{o}C,	Suhteellinen kosteus 25 %
	Ulkoilma	Lämpötila	-10 ^{o}C,	Suhteellinen kosteus 60 %
Kevätjakso,	Sisäilma	Lämpötila	23 ^{o}C,	Suhteellinen kosteus 45 %
	Ulkoilma	Lämpötila	5 ^{o}C	Suhteellinen kosteus 60 %

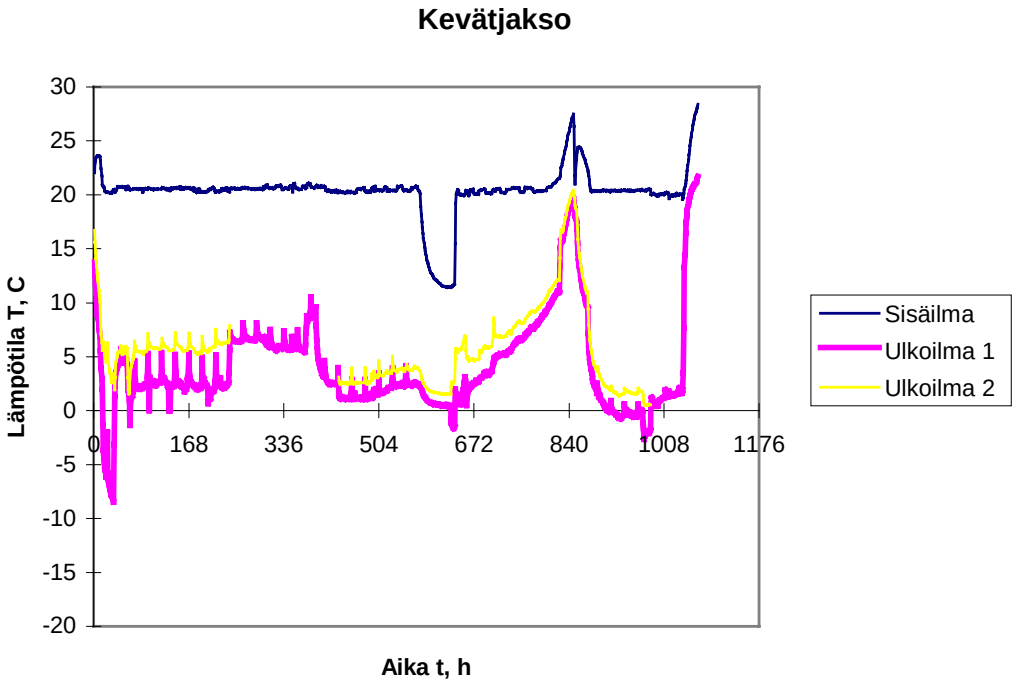
Talvijakso alkoi 28.2.1997 ja päättyi 13.5.1997 ollen kestoltaan 75 vrk. Kevätjakso alkoi 15.5.1997 ja päättyi vastaavasti 25.6.1997 keston ollessa 42 vrk. Kummankin jakson aikana mitattiin ja seurattiin jatkuvasti sisä- ja ulkoilman lämpötilaa sekä sisäilman suhteellista kosteutta. Nämä eivät pysyneet muuttumattomina asetteluarvoissaan, vaan muutoksia tapahtui ajan funktiona lähinnä seuraavista syistä:

- pakkashuoneen jäähdytyspatteriin muodostui jäätä, joka vaikuttaa kylmätehoon ja joka oli ajoittain sulatettava
- höyryn syöttö sisäilmaan vaihteli jossakin määrin koeajan kuluessa ja syöttöä muutettiin tarpeen vaatiessa

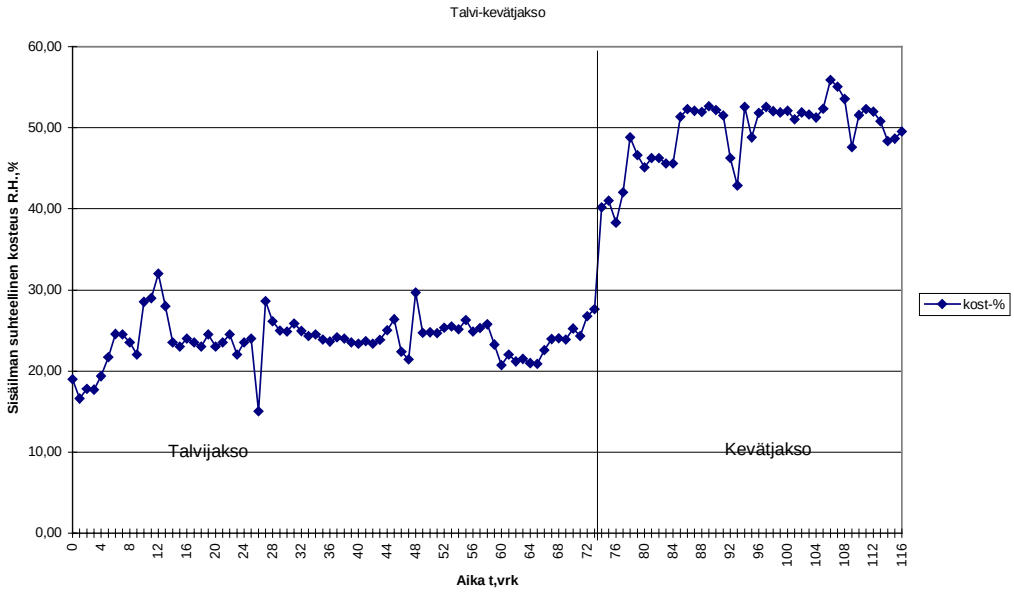
Koejaksojen ilmastotiedot esitetään kuvissa 5.20, 5.21 ja 5.22. Vuotoraollisiin koeseiniin sisäpuolelta syötetty ilmavirtaus mitattiin ajoittain hetkellisarvoina. Kuvassa 5.23 esitetään vuotovirtaukset ajan funktiona em. hetkellisarvoihin perustuen.



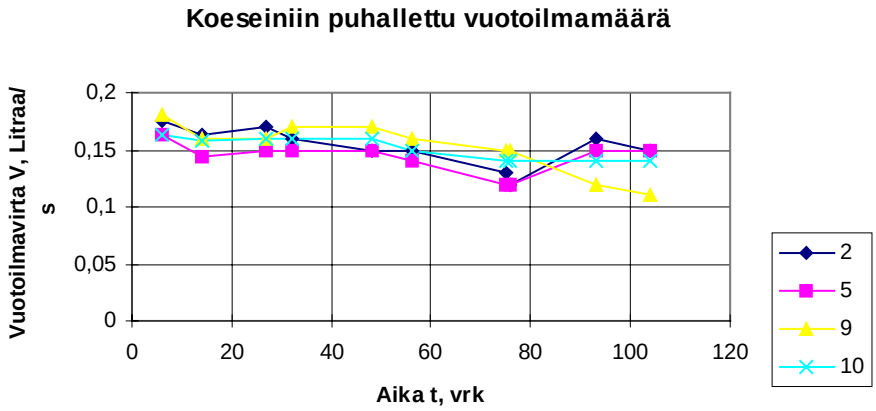
Kuva 5.20. Sisä- ja ulkoilman lämpötila talvijakson aikana.



Kuva 5.21. Sisä- ja ulkolämpötila talvijaksoa seuranneen kevätjakson aikana



Kuva 5.22. Sisäilman suhteellinen kosteus talvi- ja kevätjakson aikana.



Kuva 5.23. Ilmavuoto raollisiin koeseiniin N:o 2, 5, 9 ja 10 talvijakson (ensimmäiset 75 vrk) ja kevätjakson aikana.

5.3.4 Koetulokset

Sähköinen kosteuspitoisuuden mittaus

Taulukossa 5.2 esitetään koeseinien sähköiseen kosteusmittaukseen käytettyjen puukappaleiden kylmän pinnan keskimääräiset lämpötilat talvijakson aikana. Eri antureiden lämpötilojen erot on otettava huomioon tehtäessä johtopäätöksiä sähköisen kosteusmittauksen tuloksista.

Korkeimmat kosteusanturin lämpötilat (3,9…5,2 ^{o}C) mitattiin seinien N:o 2, 5 ja 10 yläosissa. Näissä seinissä oli MW-lämmöneristys ja sisäilman puhallus lämmöneristykseen seinän yläosan vuotoraon kautta. Seinissä N:o 2 ja 10 oli tuulen-

suojana huokoinen puukuitulevy ja seinässä N:o 5 MW-tuulensuoja. Seinässä N:o 9, jossa oli vuotoilman sisäänpuhallus, huokoinen puukuitulevy tuulensuojana ja LCFI-lämmöneristys, oli kosteusanturin lämpötila seinän yläosassa vain -0,9 °C. Tämä johtunee lämmöneristyksen pienemmästä ilmanläpäisevyydestä verrattuna MW-eristeeseen ja lämmöneristyksen ilmavirtauskentän erilaisuudesta.

Taulukko 5.2. Sähköisen kosteusmittauksen puuantureiden kylmän pinnan keskimääräiset lämpötilat talvijakson aikana.

Koeseinän N:o	Lämpötila °C A	Y	Koeseinän N:o	Lämpötila °C A	Y
1	-8,1	-3,1	7	-6,6	-3,4
2	-4,4	+4,5	8	-6,9	-3,3
3	-8,1	-4,1	9	-3,2	-0,9
4	-6,3	+1,9	10	-4,4	+3,9
5	-0,8	+5,2	11	-6,7	-2,5
6	-8,2	-4,6	12	-4,4	-3,3

Seinässä N:o 4 oli ylemmän kosteusanturin kylmän pinnan lämpötila 1,9 °C eli korkeampi kuin esim. seinässä N:o 9, vaikka seinässä N:o 4 ei ollutkaan vuotoilman sisäänpuhallusta. Syynä on anturin ulkopuolella olevan MW-tuulensuojan suuri lämmönvastus verrattuna huokoiseen puukuitulevyyn.

Kaikissa seinissä oli seinän yläosan anturi alaosan anturia korkeammassa lämpötilassa. Tämä lämpötilojen ero (4,1 °C…8,9 °C) oli luonnollisesti suurin niissä seinissä, joissa vuotoilmaa puhallettiin lämmöneristyksen yläosaan. Muissa seinissä oli vastaava lämpötilaero alueella (1,1 °C…5,0 °C) lukuunottamatta MW-tuulensuojalla varustettua seinää N:o 4, jossa ero oli 8,2 °C. Pystysuuntainen lämpötilaero oli LCFI-seinissä pienempi kuin vastaavissa MW-eristetyissä seinissä.

Taulukossa 5.3 esitetään sähköiseen kosteusmittaukseen käytettyjen puukappaleiden kylmän pinnan keskimääräiset lämpötilat kevätjakson aikana.

Taulukko 5.3. Sähköisen kosteusmittauksen puuantureiden kylmän pinnan lämpötilat kevätjakson aikana.

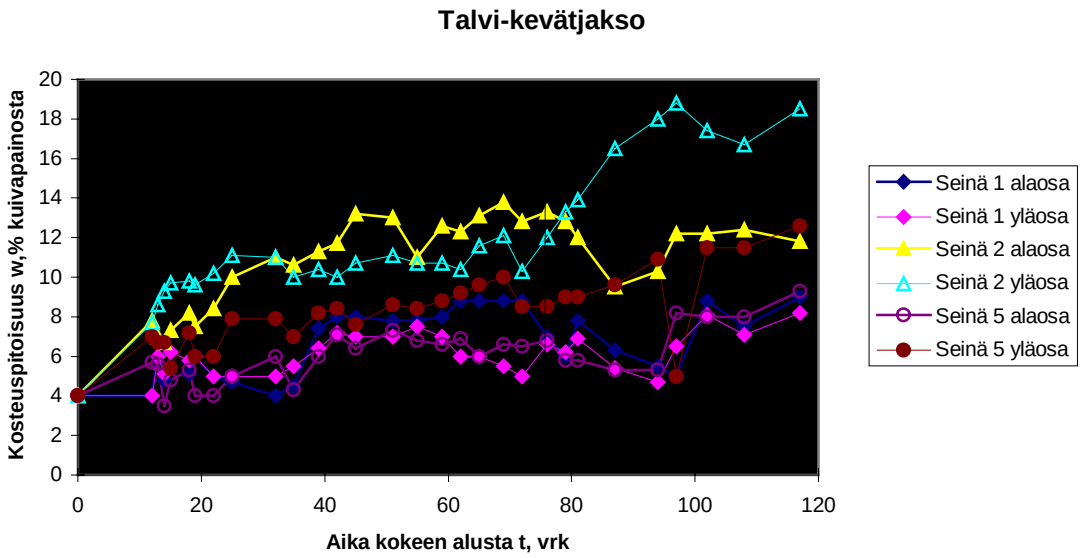
Koeseinän N:o	Lämpötila °C A	Y	Koeseinän N:o	Lämpötila °C A	Y
1	+7,7	+8,4	7	+7,9	+8,1
2	+9,4	+11,0	8	+7,5	+9,0
3	+7,3	+8,8	9	+8,4	+9,0
4	+9,0	+11,2	10	+8,1	+9,9
5	+11,2	+11,6	11	+5,6	+7,9
6	+7,4	+8,2	12	+7,2	+11,1

Talvijakson muuttuessa kevätjaksoksi nousi ulkolämpötila tasolta -10 ^{o}C tasolle +5 ^{o}C, mikä vastaavasti aiheutti seinään asennettujen kosteusantureiden lämpötilan nousun. Mielenkiintoista on kuitenkin se, että kevätjaksolla lämpötilaerot MW-eristettyjen seinien ylä- ja alaosaan sijoitettujen antureiden välillä jäivät suhteellisesti pienemmiksi verrattuna talvijaksoon. Toki seinien yläosassa lämpötila oli edelleen hieman korkeampi kuin alhaalla, mutta tulos viittaa koeseinien lämmöneristyksen luonnollisen konvektion olennaiseen vaimentumiseen (seinät N:o 1, 3, 4, 6 ja 10, joihin ei puhallettu ilmaa).

Myös niissä koeseinissä, joihin puhallettiin ilmaa vuotoraon kautta (seinät N:o 2, 5, 9 ja 10), todettiin lämpötilaeron seinien ylä- ja alaosan antureiden välillä kaventuneen suhteesa enemmän kuin sisä- ja ulkolämpötilan ero pieneni siirryttäessä talvijaksosta kevätjaksoon. Sen sijaan LCFI-eristetyissä ilmavuodottomissa seinissä N:o 7, 8 ja 12 ei havaittu vastaavaa suurta lämpötilaeron pienenemistä, koska seinien ylä- ja alaosan antureiden lämpötilaero ei ollut talvijaksollakaan kovin suuri. Kaikkiaan lämpötila koeseinien tuulensuojan sisäpinnassa tasoittui ulkolämpötilan noustessa, millä on merkitystä myös kosteuden jakautumaan ko. syvyydellä rakenteessa.

Kuvassa 5.24 esitetään MW-eristettyjen koeseinien N:o 1, 2 ja 5 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvi- ja kevätjaksolta. Koeseinä N:o 1, jossa on ehjä PE - höyrynsulku, huokoinen puukuitulevu tuulensuojana ja tuulettuva ilmaväli sen ulkopuolella, muodostaa vertailukohdan muille seinille. Seinässä N:o 2 oli jatkuva ilmavuoto raon kautta lämmöneristyksen yläosaan (Kuva 5.23) rakenteen ollessa muutoin sama kuin rakenne N:o 1. Seinässä N:o 5 oli myös ilmavuotorako ja jatkuva vuoto rakenteeseen (Kuva 5.23) tuulensuojan ollessa MW- tuulensuoja. Kiinteästi asennettujen puuantureiden alkukosteus (4 % kuivapainosta) perustuu anturien valmistukseen käytetyn puun kosteuspitoisuuden määritykseen kuivauspunnitus menetelmällä.

Puuanturin sähkövastuksen muuttumiseen perustuva kosteuden mittausmenetelmä toimiin parhaiten kosteuspitoisuusalueella yli 6 % kuivapainosta, joten tätä kuivemman puun tulokset ovat epävarmoja.



Kuva 5.24. Koeseinien N:o 1, 2 ja 5 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvi- ja kevätjaksolta.

Kuvan 5.24 perusteella voidaan todeta tilanteesta talvijakson päättyessä seuraavaa:

- Kosteusantureiden keskimääräinen kosteuspitoisuus oli kohonnut seinässä N:o 1 arvosta 4 % arvoon n. 6 % kuivapainosta

- Jatkuva ilmavuoto seinään N:o 2 aiheutti loppukosteuden nousemisen tasolle n. 11 % kuivapainosta, mikä merkitsee vesihöyryn konvektion hallitsevaa roolia kosteuden keräytymisessä

- Seinässä N:o 5, johon oli järjestetty jatkuva ilmavuoto ja jossa oli MW-tuulensuoja, jäi anturien loppukosteus tasolle n. 7 % kuivapainosta

Tilanteen kehittymisestä kevätjakson aikana voidaan kuvan 5.25 perusteella todeta seuraavaa:

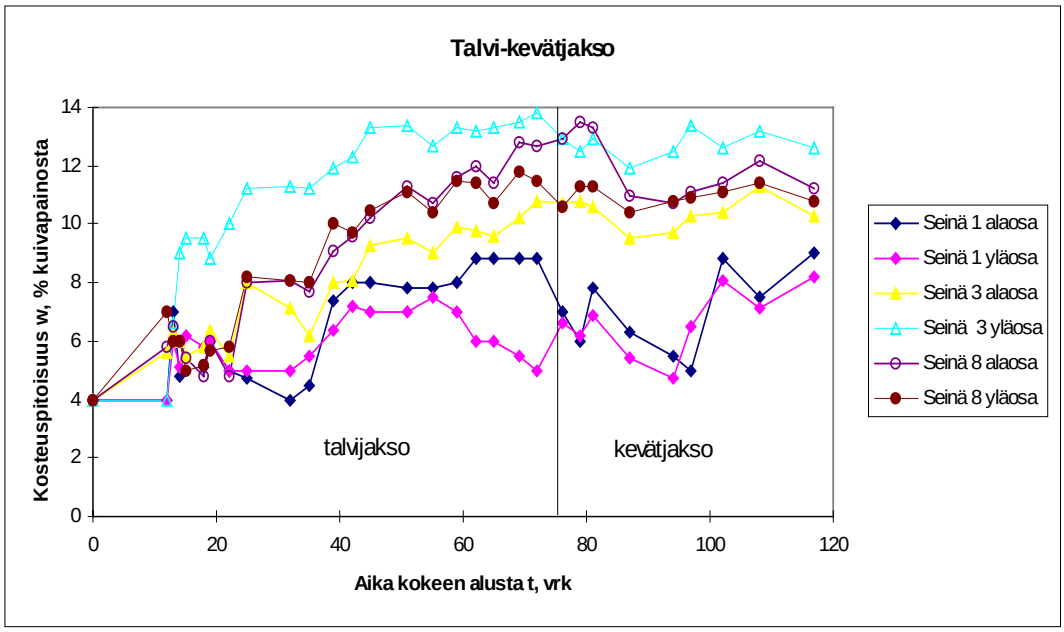
- Koeseinän N:o 1 antureiden kosteuspitoisuus ei juurikaan muuttunut kevätjakson aikana talvijakson jälkeisestä tasostaan (n. 6 % kuivapainosta), mikä oli odotettua.

- Koeseinässä N:o 2 yläosan anturin kosteuspitoisuus kasvoi nopeasti tasolta 11 % tasolle 18 % kuivapainosta alaosan anturin kosteuden pysyessä talvijakson jälkeisellä tasolla n. 11 %. Ilmeisesti kevätjakson talvijaksoa korkeampi sisäilman kosteus on johtanut puumateriaalin kosteuden nopeaan kasvuun vuotoraon läheisyydessä.

- Koeseinässä N:o 5 kasvoi ylemmän anturin kosteuspitoisuus tasolta 10 % tasolle 13 % kuivapainosta ja vastaavasti alemman kosteuspitoisuus tasolta 8 % tasolle 10 %. Nämä kosteuspitoisuudet ovat turvallisella alueella, mikä viestii mineraalivillatuulensuojalla varustetun rakenteen hyvästä kuivumiskyvystä.

Kuvan 5.24 tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin otettava huomioon sähköisen kosteusmittauksen puuantureiden korkeampi lämpötila MW-tuulensuojalla varustetussa seinässä N:o 5, mikä johtaa antureiden matalampaan loppukosteuteen. Taulukossa 5.4 vastaavien puunäytteiden kosteuspitoisuuksissa ei ole samankaltaista eroa, koska seinässä N:o 5 irroitettavat puukappaleet oli sijoitettu MW-tuulensuojan sisään kuitukangasta vasten. Kokeen oloissa puuantureiden loppukosteus jäi kaikissa tapauksissa kosteusteknisesti turvalliselle alueelle. Koetulosten yleistäminen edellyttää kuitenkin tulosten peilaamista mitoittaviin oloihin laskentatyökalun avulla. Tämä pätee kaikkiin jäljempänä tässä kohdassa esitettyihin tuloksiin.

Kuvassa 5.25 esitetään koetuloksia sekä MW- että LCFI-eristetyille koeseinille N:o 1, 3 ja 8. Koeseinä N:o 1, jossa on PE-höyrynsulku, muodostaa taas vertailutason. Muissa koeseinissä on höyrynsulun kohdalla rakennuspaperi, joka läpäisee diffuusiolla vesihöyryä. Kussakin koeseinässä oli tuulensuojana huokoinen puukuitulevy ja sen ulkopuolella tuuletusväli. Koeseiniin ei johdettu vuotoilmaa.



Kuva 5.25. Koeseinien N:o 1, 3 ja 8 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvi- ja kevätjaksolta.

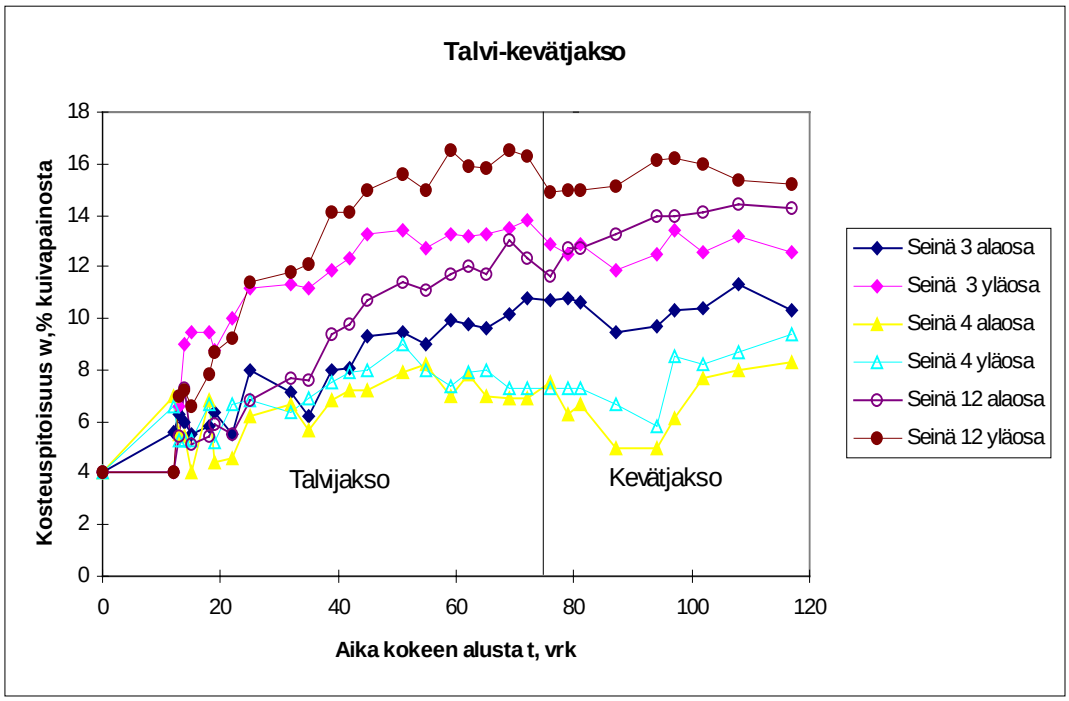
Kuvan 5.25 tuloksista voidaan päätellä seuraavaa:

- Tiiviillä PE-höyrynsululla varustetun koeseinän N:o 1 antureiden keskimääräinen loppukosteus oli talvijakson jälkeen tasolla 6 % kuivapainosta eikä juurikaan muuttunut kevätjakson aikana.

- Rakennuspaperilla varustettujen seinien antureiden keskimääräinen loppukosteus oli talvikauden jälkeen tasolla n. 12 % kuivapainosta riippumatta lämmöneristeestä eikä kosteuspitoisuudessa tapahtunut kasvua huolimatta kevätjakson korkeammasta sisäilman kosteudesta. Ilmeisesti kosteuden poistuminen rakenteesta huokoisen puukuitulevyn läpi on ollut kevätjaksolla vastaavasti myös suurempaa.

- PE-kalvon korvaaminen rakennuspaperilla lisäsi odotetusti rakenteen kosteuden absorptiota, mutta koeoloissa puuantureiden kosteuspitoisuus oli kaiken aikaa turvallisella tasolla.

Kuvassa 5.26 esitetään koetuloksia MW-eristetyille koeseinille N:o 3, 4 ja 12. Kussakin seinässä on lämmöneristyksen sisäpuolella rakennuspaperi, joka läpäisee vesihöyryä diffuusiolla. Seinässä N:o 3 on tuulensuojana huokoinen puukuitulevy ja seinissä N:o 4 ja 12 MW-tulensuojalevy. Seinissä N:o 3 ja 4 on tuuletusväli ja seinässä N:o 12 lautaverhous on kiinni tuulensuojan ulkopinnassa. Missään koeseinässä ei ollut ilmavuotoa sisäpuolelta rakenteeseen, joten vesihöyryn siirtymismekanismina oli diffuusio sisäverhouksen läpi.



Kuva 5.26. Koeseinien N:o 3, 4 ja 12 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvi- ja kevätjaksolle.

Kuvan 5.26 perusteella on todettavissa seuraavaa:

- Huokoisella puukuitulevyllä ja tuuletusvälillä varustetussa seinässä N:o 3 oli puuantureiden keskimääräinen loppukosteus talvikauden jälkeen tasolla 12 % kuivapainosta eikä kevätjakson aikana tapahtunut tason muuttumista.

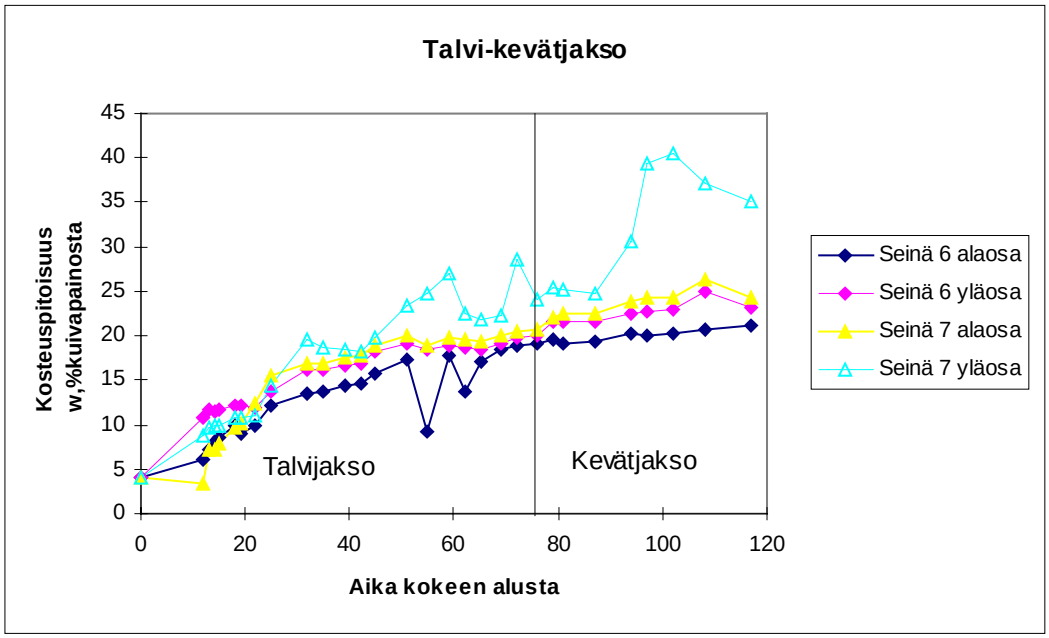
- Kun tuulensuojana oli MW-tulensuoja (seinä N:o 4), oli puuantureiden keskimääräinen loppukosteus talvijakson jälkeen tasolla 7 % kuivapainosta ja kevätjakson päättyessä tasolla 9 % kuivapainosta.

- Kun lautaverhous oli suoraan mineraalivillatuulensuojaa vasten (seinä N:o 12), oli puuantureiden keskimääräinen loppukosteus talvijakson jälkeen tasolla 15 % kuivapainosta eikä kevätjakson aikana tapahtunut tason muuttumista.

Kuvan 5.26 tulosten valossa on ilmeistä, että rakenteen tuulettuminen paransi olennaisesti kosteuden poistumista lautaverhouksen takaa. Tuuletusvälittömässä

tapauksessa hallitsee tuulensuojan sijaan lautaverhous rakenteen kuivumista ulospäin ja muodostaa suuremman kosteuden siirtymisen vastuksen kuin kumpikaan kokeessa mukana ollut tuulensuoja. Loppukosteus tuuletusvälittömässä rakenteessa oli verraten lähellä homeen kasvun riskirajaa.

Kuvassa 5.27 esitetään ulkopuolelta pellillä verhottujen koeseinien tulokset. Toisessa koeseinässä oli lämmöneristeenä MW (N:o 6) ja toisessa LCFI (N:o 7). Kummassakin seinässä oli lämmöneristyksen lämpimällä puolella vesihöyryä diffuusiolla läpäisevä rakennuspaperi. Koeseiniin ei johdettu ilmavirtausta, joten kosteuden siirtymismekanismi oli diffuusio sisäverhouksen läpi.



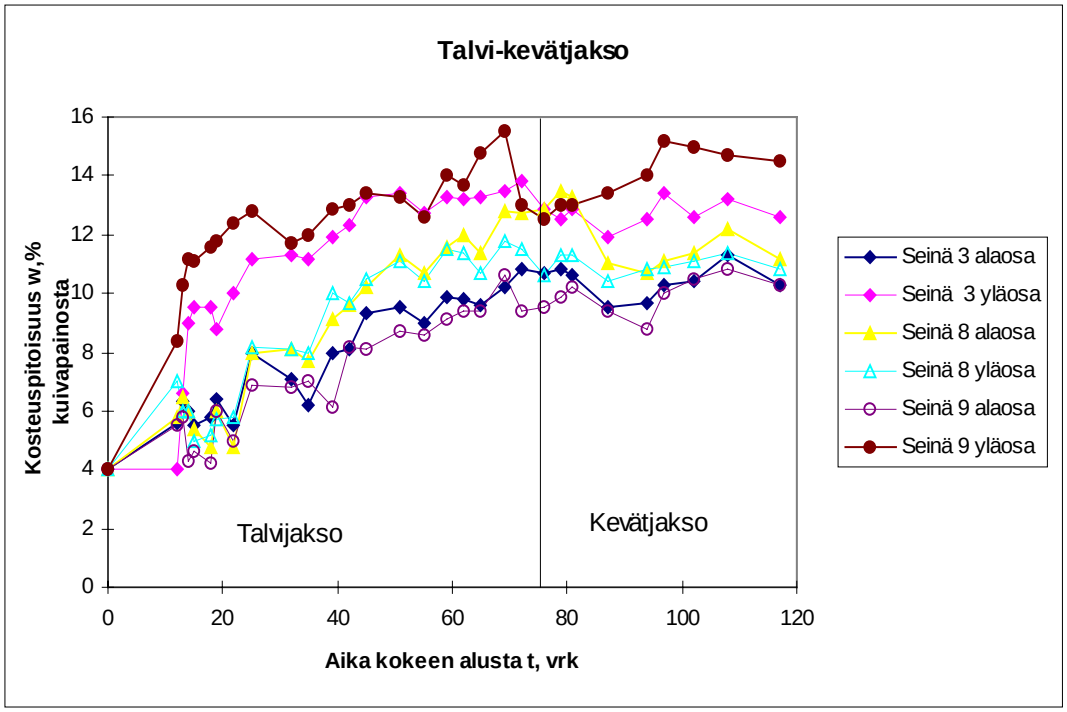
Kuva 5.27. Koeseinien N:o 6 ja 7 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvi- ja kevätjaksolle.

Koeseinien N:o 6 ja 7 ulkopinnassa oli kosteutta läpäisemätön peltiverhous, joten kaikki sisäpinnan läpi rakenteeseen diffusoitunut vesihöyry keräytyi rakenteeseen. Koeseinien tarkoituksena on muodostaa vertailukohta ulkopinnastaan läpäiseville rakenteille ja antaa tietoa mahdollisesta MW- ja LCFI-eristeen käyttäytymiseroista. Kuvan 5.27 perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Puuantureiden keskimääräinen loppukosteus oli seinässä N:o 6 (MW-eriste) talvijakson päättyessä n. 19 % kuivapainosta ja kevätjakson päättyessä n. 23 %. Vastaavasti oli loppukosteus seinässä N:o 7 talvijakson päättyessä n. 22 %, mutta kevätjaksolla ylempi kosteusanturi osoitti puun kosteuden poikkeuksellisen nopeaa kasvua. On mahdollista, että LCFI-eristeen palonsuojakemikaalit häiritsevät sähköistä kosteudenmittausta kosteuspitoisuuden kasvaessa, joten tulos on ainakin kevätjakson osalta epäluotettava.

- Kumpikin koeseinän antureiden kosteuspitoisuus ylitti kokeen aikana turvallisen kosteuspitoisuuden rajan, joten lämmöneristeestä riippumatta ko. tyyppinen rakenne on kosteusteknisesti riskirakenne.

Kuvassa 5.28 esitetään koetuloksia koeseinille N:o 3, 8 ja 9. Seinässä N:o 3 on MW-eristys, höyrynsulun paikalla rakennuspaperi, tuulensuojana huokoinen puukuitulevy ja sen ulkopuolella tuuletusväli. Seinässä N:o 8 on LCFI-eristys ja muilta osin se on samanlainen kuin seinä N:o 3. Seinä N:o 9 on samanlainen kuin seinä N:o 8, mutta rakenteeseen oli järjestetty sisäpuolelta jatkuva ilmavuoto (kuva 5.23).



Kuva 5.28. Koeseinien N:o 3, 8 ja 9 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvi- ja kevätjaksolle.

Kuvan 5.28 perusteella voidaan todeta seuraavaa:

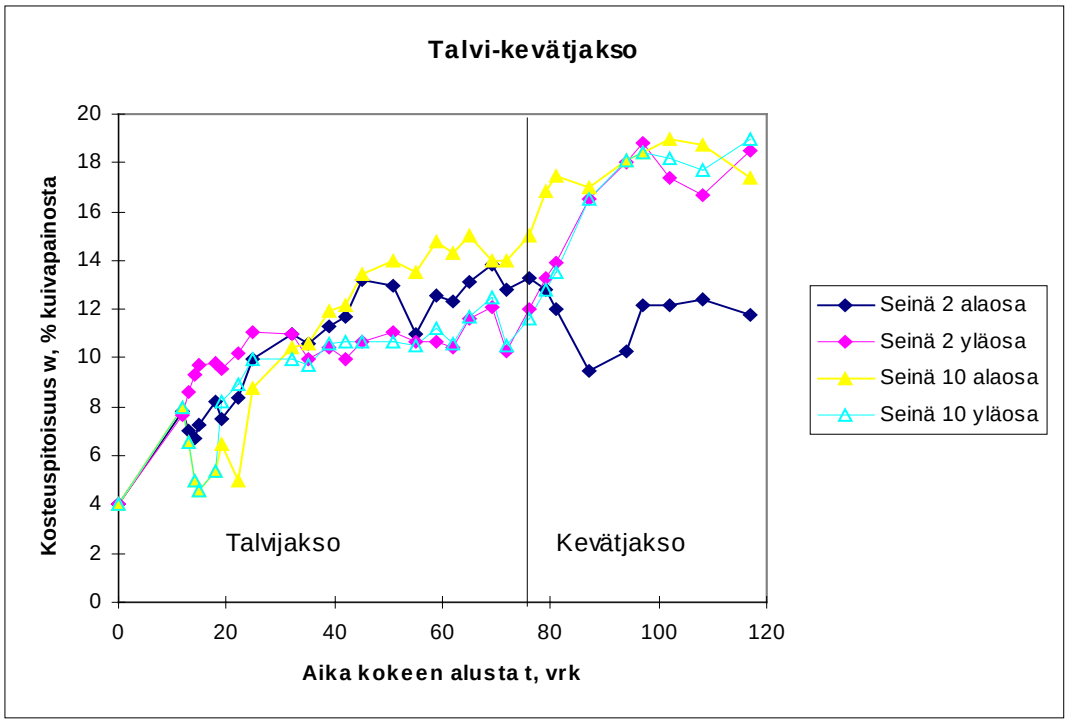
- Ilmavuoto LCFI-eristetyn koeseinän N:o 9 yläosaan suurensi kosteuspitoisuuden arvoa verrattuna saman seinän alaosaan tai ilmavuodottomaan seinään N:o 8, jossa oli myös LCFI eristys.

- Seinässä N:o 3 oli kosteus pystysuunnassa epätasaisemmin jakautunut kuin seinässä N:o 8, joka oli muutoin samanlainen höyrynsuluton ja ilmavuodoton rakenne lämmöneristyksen ollessa MW:n sijaan LCFI-eristettä. sen sijaan keskimääräinen kosteuspitoisuus oli näissä seinissä samaa suuruusluokkaa sekä talvi- että kevätjakson päättyessä.

- Kaikissa kuvan 5.28 koeseinissä kasvoi puuantureiden kosteuspitoisuus talvijakson edetessä, mutta ei enää kevätjakson aikana. Suurinkin kosteuspitoisuuden arvo oli kokeen aikana alle 16 % kuivapainosta, joka on vielä turvallinen arvo mutta lähellä riskirajaa.

Kuvassa 5.29 esitetään koeseinien N:o 2 ja 10 sähköisen kosteusmittauksen tulokset. Kummassakin seinässä on PE-höyrynsulku, MW-eristys, tuulensuojana huokoinen puukuitulevy ja ilmavuoto sisäpuolelta seinän yläosaan. Seinässä N:o 2

on tuuletusväli, kun taas seinässä N:o 10 ulkoverhoulaudoitus on suoraan kiinni tuulensuojan ulkopinnassa.



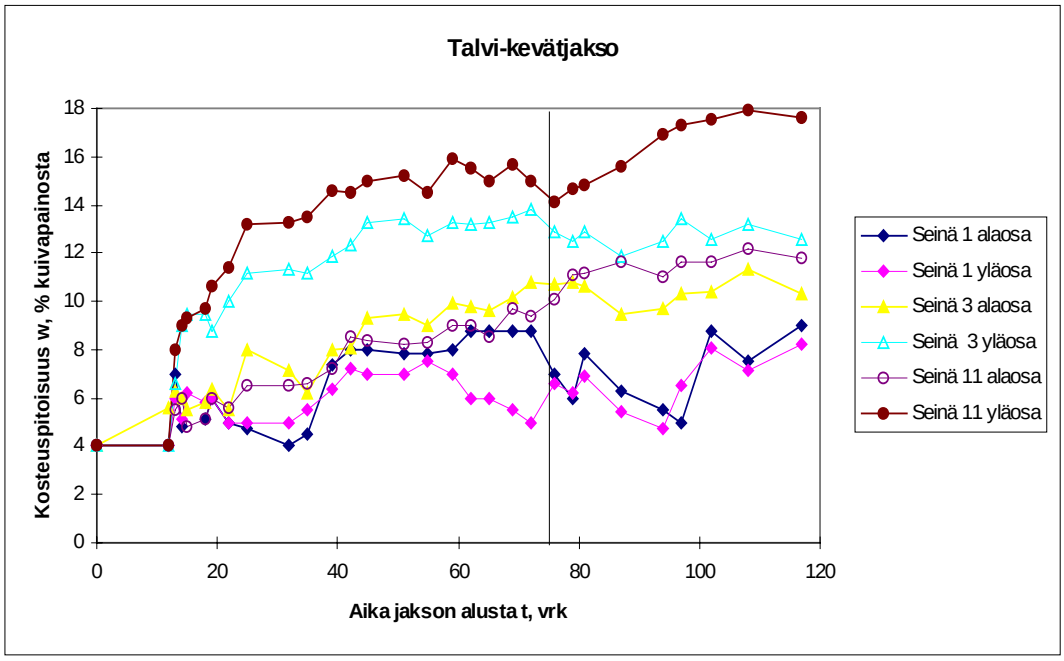
Kuva 5.29. Koeseinien N:o 2 ja 10 sähköisen kosteusmittauksen tulokset talvijaksolle.

Kuvan 5.29 perusteella on todettavissa seuraavaa:

Talvijakson päättyessä oli kummankin koeseinän alaosassa mitattu kosteuspitoisuus suurempi kuin yläosassa, mikä ilmeisesti johtuu ylä- ja alaosan puuanteiden suuresta lämpötilaerosta (Taulukko 5.2).

- Talvijakson jälkeen oli antureiden kosteuspitoisuus kummassakin seinässä alueella 12 % …15 % kuivapainosta. Kevätjakson aikana kosteuspitoisuus nousi kummankin seinän yläosassa ja myös tuuletusvälittömän seinän alaosassa tasolle 19 % kuivapainosta. Sen sijaan kosteuspitoisuus tuuletusvälillisen seinän alaosassa jäi tasolle 12 % kuivapainosta.

Kuvassa 5.30 esitetään talvijakson sähköisen kosteusmittauksen tulokset koeseinille N:o 1, 3 ja 11. Kaikissa koeseinissä on MW-eristys ja tuulensuojana huokoinen puukuitulevy. Seinässä N:o 1 on PE-höyrynsulku ja muissa rakennuspaperi. Seinässä N:o 11 ei ollut tuuletusväliä eikä missään seinässä ilmavuotoa rakenteeseen.



Kuva 5.30. Sähköisen kosteusmittauksen tulokset koeseinille N:o1, 3 ja 11 talvijaksolle.

Kuvan 5.30 perusteella on todettavissa seuraavaa:

- Seinä N:o 1 oli talvijakson päättyessä ja koko kevätjakson ajan muita kuivempi.
- Kosteuspitoisuuden jakautuma oli seinissä N:o 3 ja 11 epätasainen yläosan mittaustuloksen ollessa alaosaa korkeampi.
- Tuulettumattoman seinän N:o 10 yläosasta jakson päättyessä mitattu kosteuspitoisuus oli korkein sekä talvi- että kevätjakson aikana. Kosteuspitoisuuden loppuarvo oli talvijakson päättyessä alle 16 % kuivapainosta, mutta nousi kevätjaksolla tasolle 18 % kuivapainosta.

Puunäytteiden kuivaamiseen perustuvat kosteuspitoisuudet

Kuhunkin koeseinään, niiden ylä- ja alaosaan, oli tuulensuojan sisäpintaa vasten asetettu kuusi puukappaleita näytteenottoa varten. Näistä kappaleista otettiin talvijakson kestäessä kolme kertaa näytteitä aina yksi kunkin seinän ylä- ja yksi alaosasta. Nätteenotot suoritettiin 28 vrk, 48 vrk ja 68 vrk kuluttua talvijakson alusta. Toinen puoli näytteistä jäi kevätjakson mittauksia varten, jolloin vastaavat näytteenotot suoritettiin 91 vrk, 106 vrk ja 130 vrk kuluttua kokeenalkamisesta. Puukappaleiden kuivausmenetelmällä mitatut kosteuspitoisuudet esitetään taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Koeseinistä otettujen puunäytteiden kosteuspitoisuudet. Kolme ensimmäistä tulossaraketta koskee talvikautta ja kolme viimeistä kevätkautta.

Koeseinä N:o	Kosteuspitoisuus w, % kuivapainosta aika kokeen alusta vrk					
	27		48		68	
1Y	7,99	7,81	8,77	6,41 6,5 13	6,52	6,69
1A	8,44	9,23	9,77	6,53	7,13	8,72
2Y	18,37	15,32	15,51	13,57	14,94	20,29
2A	15,39	13,52	14,06	8,33	10,4	10,87
3Y	14,10	12,53	13,52	10,49	11,64	13,19
3A	12,39	12,91	13,22	9,65	10,73	11,62
4Y	12,21	11,13	13,59	8,66	9,91	11,12
4A	10,62	11,59	12,53	7,85	9,25	9,90
5Y	13,86	12,94	14,96	10,00	10,81	10,39
5A	12,51	11,74	12,79	8,34	8,10	9,05
6Y	30,98	40,44	61,49	65,26	72,36	96,60
6A	20,15	25,10	45,46	75,15	78,55	80,38
7Y	25,95	45,80	51,52	43,78	77,16	77,28
7A	26,45	29,43	34,11	47,19	87,10	75,26
8Y	13,14	13,30	13,25	10,80	10,78	12,65
8A	13,95	14,30	15,38	11,53	11,59	12,23
9Y	16,12	14,45	14,73	12,22	12,48 „48	15,10
9A	12,97	11,83	13,28	10,56	11,64	12,66
10Y	16,98	16,54	15,64	16,27	18,44	20,74
10A	14,66	15,62	16,82	14,93	17,45	19,92
11Y	15,96	15,45	16,08	15,26	15,96	19,22
11A	13,70	13,26	14,20	13,97	12,58	15,81
12Y	14,36	14,96	15,75	13,17	12,97	15,50
12A	14,04	15,05	15,37	15,45	12,95	14,45

Verrattaessa taulukon 5.4 kosteuspitoisuuksia sähköisen mittauksen tuloksiin, voidaan yleisesti todeta, että talvijakson päättyessä sähköinen mittaus antoi vain hieman pienempiä kosteuspitoisuuksia kuin taulokossa 5.4 olevat arvot. Poikkeuksena ovat seinät N:o 4 ja 5 sekä N:o 6 ja 7. Kahdessa edellisessä on MW- eriste ja MW-tuulensuoja, jolloin syynä on edellä kuvattu ero antureiden sijainnissa (lämmöneristeen ulkopinnassa tai tuulensuojan kuitukankaan sisäpintaa vasten). Kahdessa jälkimmäisessä tapauksessa syynä on puukappaleiden kokoerosta johtuva erilainen kostumisnopeus, kun kosteustila peltiverhotussa seinässä muuttui muihin seiniin verrattuna nopeasti. Koeseinien N:o 4 ja 5 kaltaista eroa ei kuitenkaan esiinny seinässä N:o 12, jossa on LCFI-lämmöneriste ja myös MW-tuulensuoja. Syynä lienee LCFI:n hygroskooppisuudesta johtuva erilainen suhteellisen kosteuden jakautuma lämmöneristyksessä verrattuna MW-eristykseen.

Taulukon 5.4 mukaan kevätkaudella tapahtui kosteuspitoisuuden merkittävää nousua koeseinän N:o 2 yläosassa sekä seinien N:o 6, 7, 10 ja 11 ylä- ja alaosassa. Vastaava nousu todettiin myös sähköisen kosteusmittauksen tuloksissa, joskin peltiverhotuissa seinissä eri tavoin mitatut tulokset poikkeavat toisistaan edellä kuvatusta syystä. Yleisesti ottaen sähköiset ja näytteenottoon perustuvat kosteuspitoisuuden määritykset antoivat samankaltaisen tiedon rakenteiden käyttäytymisesta.

Taulukon 5.4 tulokset vahvistavat osaltaan sen kokonaiskuvan, joka on muodostunut sähköisen kosteusmittauksen perusteella. Voidaan todeta, että peltiverhottuja seiniä lukuunottamatta yhdenkään puukappaleen kosteuspitoisuus ei noussut 75 vrk kestäneen talvijakson aikana homeen kasvun kannalta kriittiselle tasolle. Niissä tapauksissa, joissa rakenteiden kuivuminen oli varmistettu tuuletusvälillä, saavutti puukappaleiden kosteuspitoisuus varsin pian tietyn tason, josta kosteuspitoisuus kasvoi vain hitaasti tai ei lainkaan. Seinä N:o 1 jäi muita kuivemmaksi (PE-höyrynsulku, ei ilmavuotoa) puukappaleiden kosteuden jäädessä alle 10 % kuivapainosta. Muissa seinissä kosteuspitoisuudet olivat jakson päättyessä alueella 11 %…17 % kuivapainosta. Sisäilman suhteellinen kosteus oli jakson aikana n. 25 %, mitä voidaan pitää verraten tavanomaisena tasona. On ilmeistä, että kosteammalla sisäilmalla olisi päädytty suurempiin loppukosteuksiin.

Tuuletusvälin puuttuminen (seinät N:o 10 ja 11) aiheutti jonkin verran korkeamman talvikauden loppukosteuden verrattuna muuten vastaaviin tuuletusvälillisiin seiniin N:o 2 ja 3. Ilmavuodottomat koeseinät N:o 3 ja 8 olivat muutoin samanlaisia lukuunottamatta lämmöneristettä. Puukappaleiden loppukosteus oli lämmöneristeestä riippumatta (LCFI tai MW) lähes sama.

Höyrynsuluttomien rakenteiden sekä ilmavuotorakenteiden suhteellisen hyvä toimivuus kokeen talvijakson oloissa riippui ennen muuta siitä, että kosteus pääsi helposti poistumaan ulospäin. Ulkopuolelta peltiverhotuissa rakenteissa todettiin kosteuden tiivistyminen pellin sisäpintaan jo ensimmäisen näytteenoton yhteydessä. Myös tuuletusvälittömissä lautaverhotuissa rakenteissa (N:o 10, 11 ja 12) kasvoi kosteuspitoisuus jatkuvasti vaikka ei saavuttanutkaan kriittistä tasoa kokeen aikana.

Puukappaleiden kosteuspitoisuus nousi kokeen kevätjakson aikana homeen kasvun mahdollistavalle tasolle seinien N:o 6 ja 7 lisäksi myös seinissä N:o 2, 10 ja 11. Kosteuden nousu seinän 2 yläosassa oli seuraus vesihöyryn konvektiosta ilmavuodon mukana. Seinässä N:o 10 oli kosteuslähteenä myös vastaava vesihöyryn konvektio. Seinästä N:o 2 poiketen kosteuspitoisuus nousi myös rakenteen alaosassa. Tämä on seuraus tuuletusvälin puuttumisesta, jolloin lämmöneristykseen tunkeutunut ilmavuoto levisi ja kuljetti mukanaan kosteutta koko eristetilan alueelle.

Seinässä N:o 11 oli kosteuslähteenä vesihöyryn diffuusio sisäverhouksen läpi. Seinä on muutoin samanlainen kuin seinä N:o 3. Ainoastaan tuuletusväli puuttui. Puukappaleiden kosteuspitoisuus nousi seinässä N:o 11 lähelle 20 % kuivapainosta, kun se seinässä N:o 3 jäi vastaavasti tasolle 13 % kuivapainosta kevätjakson päättyessä. Tulos ilmaisee selkeästi rakenteen tuulettumisen merkityksen. Vaikka vaakaponttilaudasta tehty verhous ei täysin estä tuulettavan ilman kiertoa ulkover-

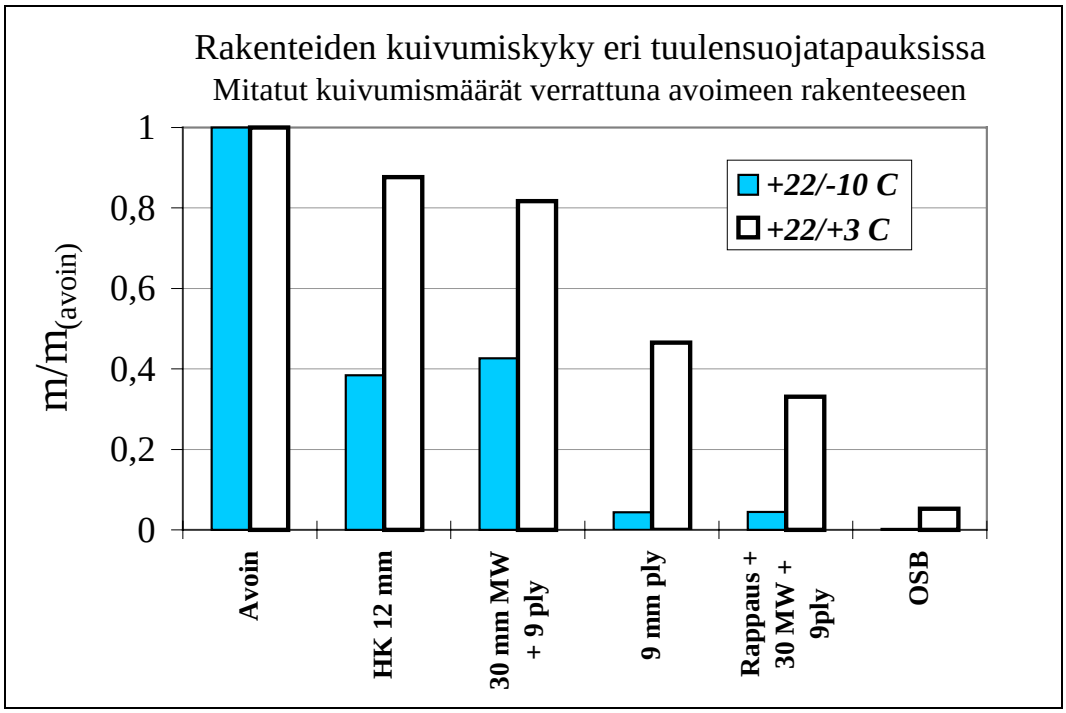
houksen taakse, heikkensi tuuletusvälin poistaminen rakenteiden kuivumiskykyä olennaisesti.

5.4 RAKENTEIDEN KUIVUMINEN

Rakenteiden kuivumiskyky vaikuttaa ratkaisevasti niiden kosteusteknisen toimivuuteen. Vesihöyryn diffuusiotarkastelun (luku 5.1) perusteella rakenteiden lämmöneristeen sisä- ja ulkopuolen vesihöyrynvastusten suhteelle suositellaan vähimmäisarvoa 5:1, jotta sisäpuolinen kosteuskuormitus pysyisi riittävän pienenä verrattuna kosteuden tuulettumiseen rakenteista Suomen ilmastossa. Lämmöneristeen ulkopuolisen kerroksen vesihöyrynläpäisevyyteen ei annettu tarkkaa suositusarvoa, mutta läpäisevyyden kasvattaminen parantaa kuivumiskykyä ja lyhentää siten kosteuden kannalta kriittisiä olosuhteita.

5.4.1 Tuulensuojan ulkopuolinen lämmöneristys

Rinnakkaisessa havuvanerin tutkimusprojektissa /27/ esitettiin tuulensuojan ulkopuolisen eristämisen (diffuusiolle avoin eristekerros) tuoma hyöty rakenteiden kuivumisen tehostamiseksi. Kuva 5.31 esittää kokeellisesti määritetyt rakenteiden suhteelliset kuivumismäärät eri tuulensuojaustapauksissa, kun vertailukohtana oli kylmältä pinnaltaan ulkoilmaan (tuuletusväliin) avoin lämmöneristekerros. Kokeiden kesto oli noin kuukausi yhdessä olosuhteessa. Tuulensuojan ulkopuolinen, tuuletusväliin avoin 30 mm paksuinen lämmöneristekerros nosti vanerituulensuojan kuivumiskyvyn samalle tasolle huokoisen kuitulevytuulensuojan kanssa.



Kuva 5.31. Kokeissa määritetyt rakenteiden suhteelliset kuivumismäärät eri tuulensuojaustapauksissa, kun vertailukohtana oli kylmältä pinnaltaan ulkoilmaan avoin lämmöneristekerros /27/.

Tuulensuojan ulkopuolinen ulkopinnaltaan rapattu lämmöneristys heikensi rakenteen kuivumiskykyä verrattuna tavanomaiseen, ulkopuolelta eristämättömään ja tuuletusrakoon avoimeen tuulensuojaustapaan. Tutkittu OSB (Oriented Strand Board), mikä on Pohjois-Amerikassa tyypillinen tuulensuoja ja aluskatemateriaali, antoi kokeissa hitaimman kuivumisen.

Kuivumiskyvyn kasvattaminen lisää rakenteiden vikasietoisuutta pelkkään mitoitustilanteen mukaiseen kosteuskuormitukseen verrattuna. Kosteusteknisesti turvallisilla rakenteilla tulisikin olla ylimääräistä kuivumiskykyä rakentamisen aikaisen alkukosteuden ja satunnaisten, pienten ylimääräisten kosteuskuormien varalle. Tavanomaisen rakenteen kosteusteknistä toimintavarmuutta voidaan kasvattaa huomattavasti eri kerrosten vesihöyrynläpäisevyyksien oikealla mitoituksella ja lämmöneristeen sijoittelulla kerrosten suhteen.

5.4.2 Maanvaraisen alapohjarakenteen kuivumiskyvyn laskennallinen tarkastelu

Tausta ja tavoitteet

Alapohjan kosteusvauriot on havaittu erääksi yleisimmistä vauriotapauksista. Ylimääräisen veden kuivuminen maanvaraisen, betonilaatan päälle tehdyn alapohjan lämmöneristyksestä on ilmeisen hidasta, eikä kosteutta useinkaan havaita ennenkuin se on jo ehtinyt vaurioittaa lattian puurakenteita.

Selvityksen tarkoituksena oli analysoida betonilaatan päälle tehdyn lämmöneristetyn alapohjarakenteen puuosien ja lämmöneristeen kuivumiskykyä. Rakenteen lämmöneristykseen ja vaakapuun alapintaan asetettiin korkea alkukosteus kuvaamaan kosteusvahingon jälkeistä tilannetta. Laskennallisesti tarkasteltiin kosteuden kuivumista lähinnä sisäilmaan lattiapinnan läpi. Muuttujina tarkastelussa käytettiin puisen lattiapinnan paksuutta (höyrynsiirtovastus sisäilmaan), laatan yläpuolisen lämmöneristyksen ja puukoolauksen paksuutta sekä betonilaatan alapuolista lämmöneristystä ja sen paksuutta.

Tarkasteltu rakenne

Laskennallisesti tarkasteltiin betonilaatta-alapohjarakenteen (Kuva 5.32) kosteusteknistä toimintaa ja kuivumista kosteusvahingon jälkeen. Alapohja oli alapuolelta eristämättömän betonilaatan päälle puukoolauksin rakennettu mineraalivillaeristeinen lautalattia. Puukoolauksen ja betonin välissä oli bitumihuopakaistale, mikä katkaisee kapillaarisen yhteyden puun ja betonin väliltä. Perustapauksessa vaakapuu on 2”x 4” ja laatan yläpuolinen lämmöneriste 100 mm paksu ja laatta on alapuoleltaan kosketuksissa maahan ilman alapuolista eristettä. Perustapauksessa lauta/parkettikerroksen paksuudeksi asetettiin 22,5 mm.

Muuttujia oli kolme:

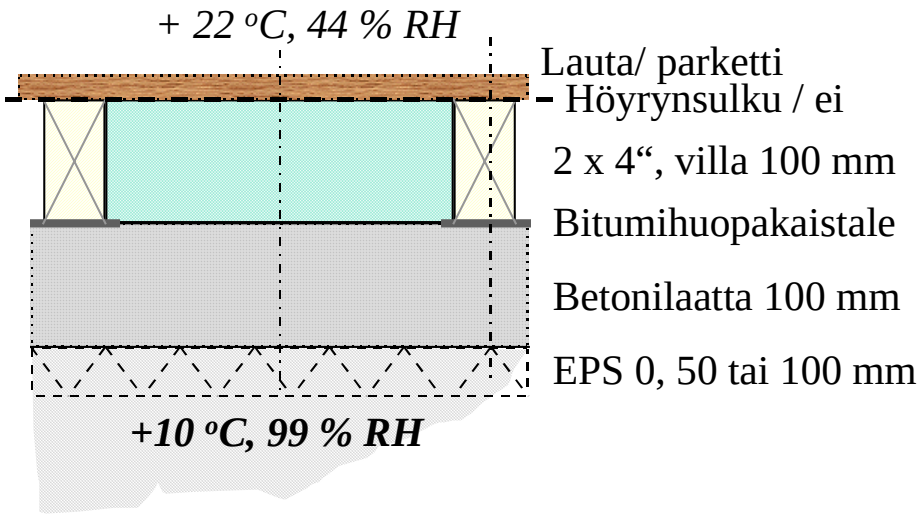
1. Lattian pintakerroksen höyrynsiirtovastuspaksuus
- yhtenäisen puukerroksen (tehollinen) paksuus ja sen mahdollinen höyryn sulku

2. Betonilaatan yläpuolisen puukoolauksen ja lämmöneristyksen paksuus

3. Betonilaatan alapuolinen lämmöneristyskerros ja sen paksuus

Lisäksi muutama tarkastelu tehtiin ilman ylimääräistä alkukosteutta lähtien ns. kuivasta alkutilasta. Näillä tarkasteluilla selvitettiin lähinnä olemassa olevan materiaalikosteuden uudelleenjakautumista jakautumista alkutilanteeltaan kosteusteknisesti keskimäärin turvallisesta tasosta.

Taulukko 5.5. esittää laskennallisesti tarkastellut rakennetapaukset.



Kuva 5.32. Tarkastellun lattiarakenteen leikkaus. Laskennallinen tarkastelu tehtiint symmetrialinjojen väliselle osalle.

Taulukko 5.5. Laskennassa tarkastellut lattiarakenteet. Neljä eri lattiapinnan vesihöyrynvastusta (22,5, 10, 5 mm puuta ja tuulettuva rakenne), kolme laatan yläpuolisen mineraalivillaeriste/ koolausrakenteen paksuutta (100, 50 ja 25 mm) ja kolme laatan alapuolisen EPS- eristekerroksen tapausta (ei eristettä, 50 ja 100 mm). (Jatkuu seuraavalla sivulla).

Tapaus / Tunniste	Lattiapinnan puupaksuus mm	Laatan yläpuolinen eriste/vaakapuu-paksuus mm	Laatan alapuolinen EPS - kerros mm
L 100/- (*	22,5	100	0
L 100/- HS(*	22,5 + höyrys.	100	0
L 100/50	22,5	100	50
L 100/100	“	100	100
L 50/100	“	50	100
L 25/100	“	25	100
M 100/-	10	100	0
M 100/50	“	100	50
M 100/100	“	100	100
M 50/100	“	50	100
M 25/100	“	25	100

S 100/-	5	100	0
S 100/50	“	100	50
S 100/100	“	100	100
S 50/100	“	50	100
S 25/100	“	25	100
T 100/-	Sisäilmaan	100	0
T 100/50	tuulettuva	100	50
T 100/100	lattiarakenne	100	100
T 50/100		50	100

(* = ns. perusrakenne

Perustapaukseksi kutsuttiin tapausta, jossa laatan yläpuolinen lämmöneristys koolauksineen oli 100 mm paksu, laatan alapuoli oli eristämätön ja lattian pinnan paksuudeksi oletettiin 22,5 mm yhtenäistä puuta. Paksuuden arvo johtui laskennassa käytetystä hilajaosta, ja se kuvasi suhteellisen hyvin paksua yhtenäistä levy/lautakerrosta lattiapinnassa. Vain yhdessä perusrakenteen tapauksessa tarkasteltiin höyrynsulullista tilannetta. Höyrynsulku esti kosteuden kuivumisen sisäilmaan, eikä tätä ollut tarpeen todeta kaikissa eristystapauksissa. Höyrynsulutonta rakennetta kutsuttiin avoimeksi, vaikka pintakerroksen vesihöyrynvastus olikin perustapauksessa suhteellisen suuri.

Käytännössä esimerkiksi lautalattian tehollinen vesihöyrynvastus on rakojen takia huomattavasti materiaalikerroksen todellista paksuutta pienempi, ts. kosteus voi kuivua lautakerroksen läpi nopeammin kuin oletetun yhtenäisen puupinnan läpi. Lattiapinnan todellinen vesihöyrynvastus riippuu rakenteen pintakerroksista, eikä tyypillistä tai tarkkaa vesihöyryn vastusta voida esittää. Laskelmissa lattiapinnan vesihöyrynvastus kuvattiin tehollisena puupaksuutena. Perusrakenteen 22,5 mm lisäksi tarkastelut tehtiin 10 ja 5 mm puukerrospaksuuksia vastaavilla pintakerroksen vastuksilla. Äärimmäisenä tapauksena esitettiin lisäksi tuuletettu lattiarakenne, jossa eristekerros on ilmaraon kautta yhteydessä sisäilmaan, ja lattian kosteus voi tuulettua sisäilmaan suljettuja lattiatapauksia helpommin.

Lämmöneristyksen osalta perustapauksen lisäksi käsiteltiin tapauksia, joissa laatan yläpuolinen koolaus ja eristekerros oli 50 ja 25 mm ja laatan alapuolella 50 tai 100 mm:n lämmöneristeet (Taulukko 5.5.).

Alkukosteudet

Laskennassa tarkasteltiin pääasiassa ns. märkää alkutilannetta, jossa rakenteeseen on päässyt ylimääräistä vettä. Muutamassa tapauksessa tarkasteltiin vertailun vuoksi myös ns. kuivaa alkutilaa, jossa normaalin rakennekosteuden lisäksi ei ollut ylimääräistä kosteutta.

Kuivana alkutilana pidettiin tapausta, jossa materiaalien kosteudet vastasivat n. 80 % RH tasapainotilaa, esim. vaakapuun alkukosteus oli 0,17 kg/kg. Tämä ‘kuiva’ tila oli siis varsin lähellä homeen kasvun kannalta kriittistä kosteutta.

Märkä alkukosteus vastasi tapausta, jossa lattiassa oli 2,5 kg/m^2 (lattiapinta-alaa kohden) ylimääräistä kosteutta ns. kuivaan alkutilaan nähden. Kaikki tapaukset

(Taulukko 5.5.) laskettiin käyttäen märän alkutilan arvoja. Märän alkutilan laskelmissa ylimääräinen vesi asetettiin lämmöneristeen ja puukoolauksen alapinnalle.

Ympäristöolosuhteet

Sisäilman olosuhteet asetettiin vakioiksi, lämpötila +22 °C ja vesihöyryn osapaine p_v = 1100 Pa (n. 44 % RH). Kosteus vastaa vuotuista keskimääräistä +3 g/m^3 sisäilman kosteuskuormaa ulkoilmaan nähden Jyväskylän sääoloissa. Betonilaatan alapuolelle oletettiin vakio-olosuhteet, lämpötila +10 °C ja suhteellinen kosteus noin 99 % (p_v = 1225 Pa). Tavoitteena oli selvittää keskellä lattiaa olevan leikkauksen kosteustekninen toimivuus, jolloin vakio-olot olivat riittävä approksimaatio tarkastelun tekemiseen.

Laskenta

Tarkastelu tehtiin simulointiohjelmalla TCCC2D. Laskennallisesti tarkasteltiin 2-D rakenneleikkauksen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa 500 vrk:n ajan em. vakio-oloissa. Tarkasteltu rakenneleikkaus käsitti puolet oletetusta 400 mm koolausvälistä, jolloin symmetrialinjat kulkivat keskeltä vaakapuuta ja toinen keskeltä lämmöneristeosaa (Kuva 5.32).

Tulokset ja niiden tarkastelu

<u>Perusrakenne ilman laatan alapuolista lämmöneristystä</u>

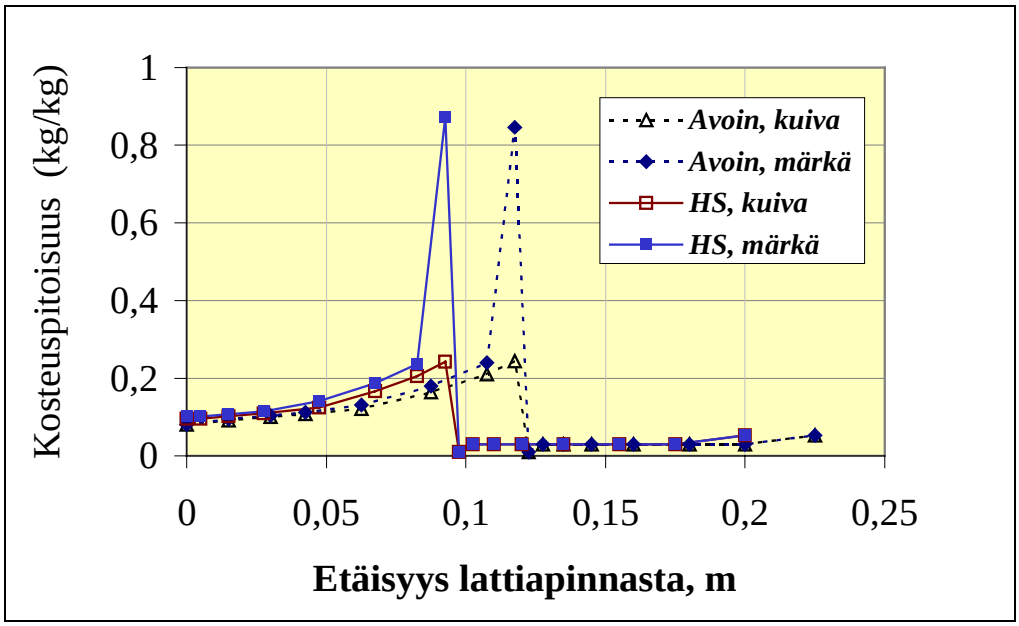
Aluksi esitetään ns. perusrakennetapauksen (100 mm koolaus ja eristys laatan päällä ilman alapuolista eristettä ja 22,5 mm puupaksuutta vastaava lattiapinnan vesihöyrynvastus höyrynsulun kanssa tai ilman sitä) lasketut pystysuuntaiset kosteusjakaumat 500 vrk:n simulointijakson jälkeen. Alkukosteuksina oli joko ns. kuiva tai märkä alkutila. Esitetyt kosteusjakauma on rakenteessa puukoolauksen

kohdalta (Kuva 5.33) ja vastaavasti suhteellisen kosteuden jakauma koolausten puolivälissä lämmöneristekerroksen kohdalla (Kuva 5.34). Höyrynsulullisissa tapauksissa kuvissa vaaka-akselina oleva etäisyys on lautalattian alapuolisesta höyrynsulusta alkaen, joten jakaumakäyrät eivät ole samanmuotoisinakaan yhtenevät.

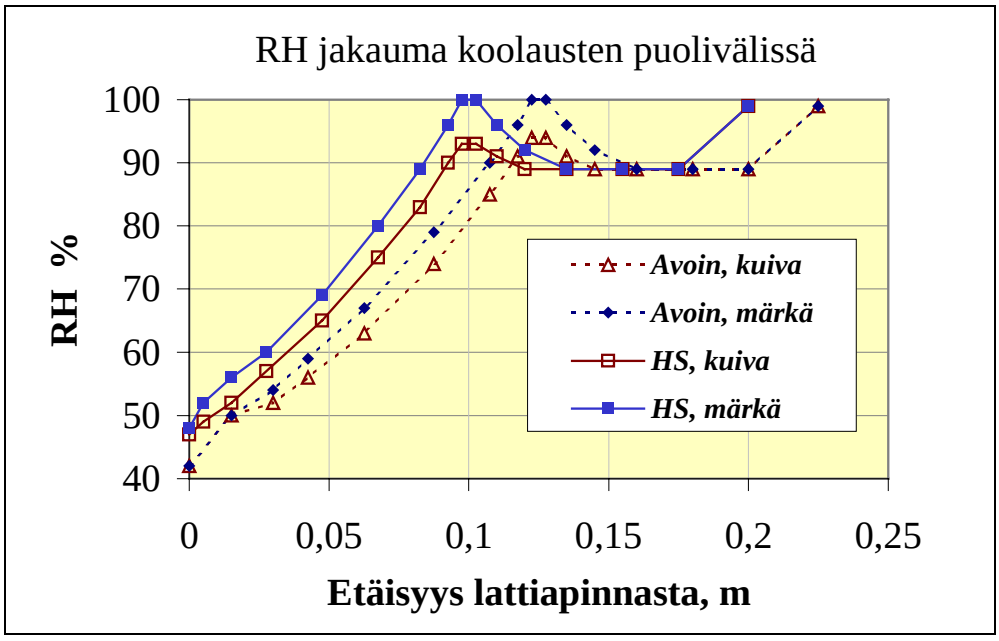
Kosteusjakauma oli vielä 500 vrk:n simulointijakson jälkeen erittäin voimakas. Tarkastelun alussa ns. kuivissa tapauksissa rakenteen kokonaiskosteus pysyi jokseenkin vakiona, mutta kosteus jakautui siten, että puun alaosassa paikallinen kosteuspitoisuus ylitti 0,20 kg/kg arvon, jota pidetään puulle kriittisenä kosteuspitoisuutena. Lattia pinnassa rakenteen kosteus oli tällöinkin varsin alhainen, lautalattiassa noin 0,10 kg/kg.

Kun rakenteessa oli 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta puun ja lämmöneristeen alapinnassa, ei tämä kosteus juurikaan tasoittunut tarkastelujakson aikana. Puun alaosassa oli edelleen hyvin suuri paikallinen kosteus ja lämmöneristeessä oli betonin rajapinnassa edelleen vapaata vettä (kondenssiolosuhteet). Lattialautakerros oli tässäkin tapauksessa samalla, suhteellisen kuivalla tasolla kuin kuivan alkutilanteen tapauksissa.

Höyrynsululla ei ollut vaikutusta kosteusjakauman muotoon tai kosteusmääriin kummassakaan alkukosteustapauksessa, sillä 22,5 mm paksu yhtenäinen puukerros on jo sellaisenaan suuri höyrynsiirtovastus, ei höyrynsulku olennaisesti muuta tilannetta.



Kuva 5.33. Pystysuuntainen kosteusjakauma vaakapuun keskikohdan linjalla 500 vrk:n simulointijakson jälkeen. Perusrakennetapaus, jossa 100 mm laatan yläpuolinen koolaus ja eristys ilman laatan alapuolista eristystä. Lattiapinnan puukerros 22,5 mm. Höyrynsulullisissa tapauksissa etäisyys on lautalattian alapuolisesta höyrynsulusta alkaen.



Kuva 5.34. Suhteellisen kosteuden jakauma vaakapuiden puolivälissä lämmöneristeessä.

Sisäilman vesihöyryn osapaine oli jokseenkin sama kuin betonilaatan alapuolinen. Lämpötilataso betonilaatan päällä oli suhteellisen alhainen, joten kuivumispotentiaali sisäilmaan oli vähäinen tai olematon. Lautakerros oli puun materiaaliominaisuuksien perusteella melko höyrytiivis, joten ns. avoin ja höyrynsulullinen tapaus eivät laskennassa poikenneet toisistaan paljoakaan. Myöskään sisäilman kosteuskuormitus rakenteeseen ei pienten potentiaalierojen vuoksi ollut merkittävä.

Betonilaatan vesihöyrynvastus oli suuri ja sen alapuolella oli suuri suhteellinen kosteus, joten rakenteen kuivuminen alaspäin oli mahdotonta. Tarkastelluissa, pelkistetyissä vakio-olosuhteissa tuloksena oli kosteuden jakautuminen siten, että betonilaatan yläpuoliset osat olivat paikallisesti korkeassa kosteudessa.

Tulosten perusteella jo n. 80 % RH tasapainotilaa vastaava alkukosteus materiaaleissa voi kosteuden uudelleen jakautuessa johtaa paikallisesti puulle liian korkeina pidettäviin kosteuksiin, jos muut materiaalikerrokset eivät voi ottaa kosteutta vastaan. Käytännössä tällaiset pienet kosteudet usein tasoittuvat rakenteessa ja mahdollisesti jopa kuivuvat sisätilaan jo lämpötilojen ja sisäilman kosteustason luonnollisen vaihtelun seurauksena.

Jos rakenteeseen sensijaan pääsee ylimääräistä vettä esimerkiksi putkivuodon takia, voi jo pienikin ylimääräinen kuormitus aiheuttaa kosteuden paikallisen kertymisen betonilaatan yläpintaan ja siihen rajoittuviin materiaalikerroksiin. Paikallisesti korkeat kosteustasot voivat johtaa homeen kasvuun ja rakenteen puuosien lahoamiseen. Tarkastelussa käytetty 2,5 kg/m^2 ylimääräinen kosteusmäärä olisi ilmeisesti johtanut rakenteen vaurioitumiseen. Jos kuvatun kaltainen rakenne kerran kastuu, on sen kuivuminen hyvin hidasta, ts. kaikki kosteusvuodot tämäntyyppiseen lattiaan merkitsevät riskiä rakenteen toiminnalle. Koska lattian pintakerros pysyy pitkään kuivana, huomataan pieni kosteusvuoto tämän tyyppisessä rakenteessa yleensä vasta sitten, kun lattia on jo vaurioitunut.

Laatan alapuolisen eristyksen ja lattian pinnan vesihöyrynläpäisevyyden vaikutus

Tässä esitetyt tulokset koskevat vain ns. märän alkutila tapauksia, joissa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta. Betonilaatan eristäminen alapuoleltaan kohottaa laatan lämpötilatasoa ja puurakenteen kuivumisedellytykset paranevat. Tällöinkin kuivuminen tapahtuu pääosin ylöspäin, joten höyrynsulku lattian pintakerroksen alla heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Edellä esitettyjen ns. perusrakenteen tapausten lisäksi tarkasteltiin vain höyrynsuluttomia rakenteita.

Seuraavassa esitetään kaikkien tapausten (Taulukko 5.5.) valittujen kriittisten pisteiden kosteuspitoisuuden kehittyminen 500 vrk:n tarkastelujakson aikana. Laskelmissa esitetään laatan eri puolelle olevien lämmöneristysten paksuuden ja lattiapinnan vesihöyrynvastuksen vaikutus lattiarakenteen kuivumiskykyyn.

Kriittisinä tarkastelupisteinä käytettiin vaakapuun alimman kohdan pistettä paksuussuuntaan puun keskikohdassa ja lämmöneristeen alinta kohtaa vaakapuiden puolivälissä. Kuvat (5.35 - 5.38) esittävät näiden kriittisten, rakenteen laatan yläpuolisten hitaimmin kuivuvien pisteiden kosteuspitoisuuden (puu) ja suhteellisen kosteuden (lämmöneriste) kehityksen tarkastelujakson

aikana. Muuttujana eri kuvissa oli lattiapinnan tehollinen vesihöyrynvastus kuvattuna yhtenäisenä puukerroksena.

Kuvat (5.39 - 5.42) esittävät samat kriittisen pisteen kosteuspitoisuuksien kehitys, kun muuttujana kuvien välillä oli laatan ylä- ja alapuolisen lämmöneristyksen paksuus. Tapausta 25/100 mm (25 mm yläpuolista / 100 mm alapuolista eristettä) ei kuitenkaan esitetty erikseen, koska sen tuoma hyöty tapaukseen 50/100 mm nähden oli jokseenkin merkityksetön.

Kun lattiapinnan vesihöyrynvastus vastasi yhtenäistä 22,5 mm:n puukerrosta, jäivät kaikkien rakennetapausten kosteuspitoisuudet puun alapinnassa tason 0,20 kg/kg yläpuolelle vielä 500 vrk:n tarkastelujakson lopussa (kuva 5.35). Vasta kun vastus oli 5 mm:n puukerrosta vastaava, oli laatan alapuolisesta lämmöneristyksestä selvästi hyötyä rakenteen kuivumisnopeuden lisäämisessä. Tällöin esimerkiksi lämmöneristetapauksessa 50/100 mm puun 0,20 kg/kg kosteustaso alittui noin 300 vrk:n kohdalla ja lämmöneristeen alapinnan kosteus laski alle tason 90 % noin 150 vrk:ssa.Tuuletus mahdollisti jopa laatan alapuolelta eristämättömän rakenteen kuivumisen tarkastelujakson aikana lähelle hyväksyttävää tasoa.

Kuvat (5.39 - 5.42) esittävät vertailun eri eristystapojen välillä. Perustapauksessa 100/- eristyksillä oli sama mikä lattiapinnan vesihöyrynläpäisevyys oli, tuuletettua tapausta lukuunottamatta, sillä kaikilla vastusarvoilla rakenteen puuosan kosteus pysyi korkealla tasolla läpi tarkastelujakson. Kevyt laatan alapuolinen eristys (100/50 mm) paransi tilannetta hieman. Selvä parannus kuivumisessa saavutettiin, kun laatan molemmin puolin oli saman verran (100 mm) lämmöneristettä. Tosin tässäkin tapauksessa tuulettamattomien rakenteiden puun alaosan kosteuspitoisuudet kosteudet jäivät tarkastelujaksolla yli 0,20 kg/kg tason.

Paras kuivuminen saavutettiin lämmöneritetapauksella 50/100 mm. Tällöin laatan yläpuolisen rakenteen lämpötilataso oli niin korkea, että rakenteen kuivuminen sisäilmaan oli mahdollista, kun lattian pintavastus oli riittävän alhainen. Edellisen kanssa samalla tasolla kuivumisessa oli tapaus 25/100 mm, ts yläpuolisen eritekerroksen ohentaminen 50 mm:stä ei tuonut lisää hyötyä kosteustekniseen toimintaan.. Riittävä kuivumiskyky maanvaraiselle betonilaattalattialle saadaan, kun laatan ylä- ja alapuolisten lämmöneristeiden lämmönsiirtovastusten suhde on 1:2. Tällöinkin kuivumisen edellytyksenä on mahdollisimman pieni vesihöyrynvastus laatan yläpuolisen lämmöneristeen ja sisäilman välillä.

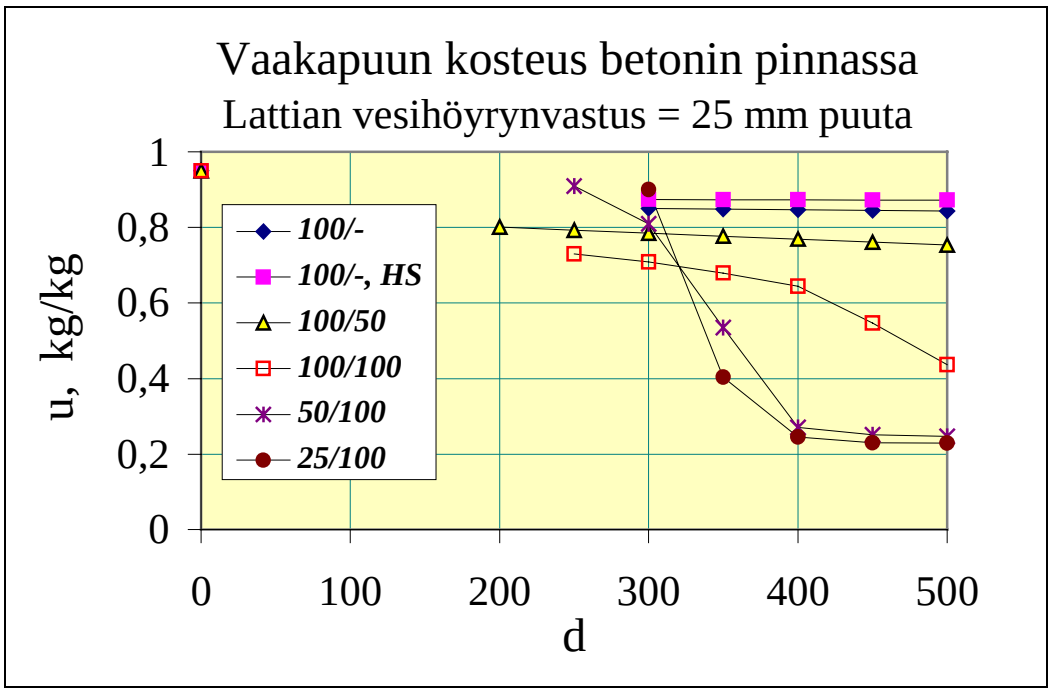
Johtopäätökset

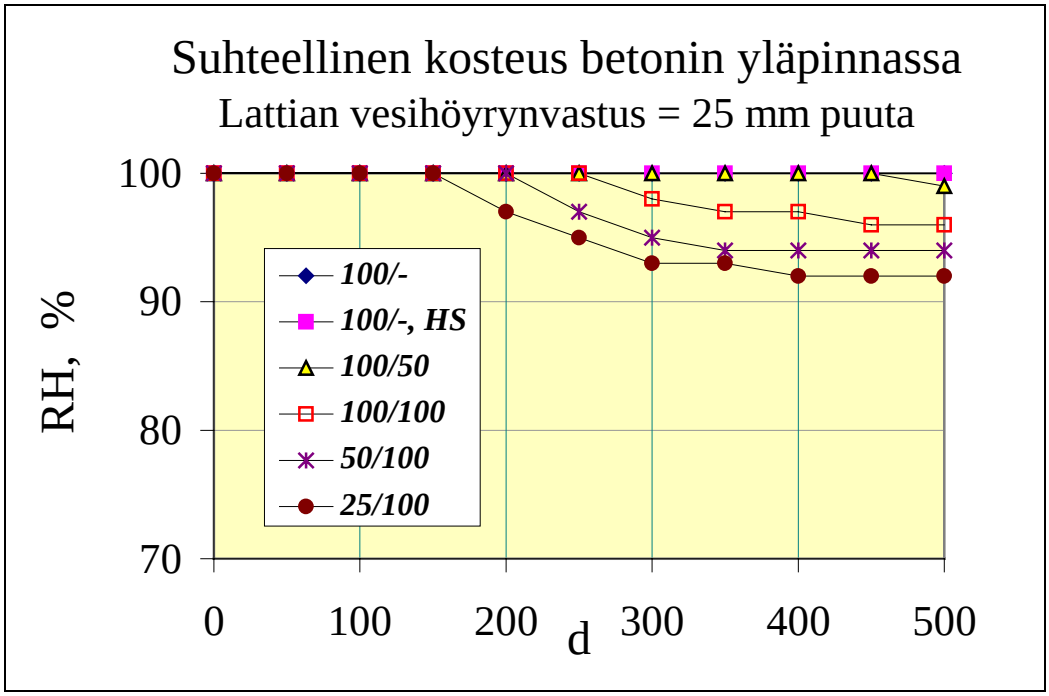
Maanvarainen betonilaattalattian kuivuminen sisäilmaan päin edellyttää laatan alapuolista eristämistä. Jotta kosteuden siirtyminen sisäilmaan olisi kohtuullisen tehokasta, tulee laatan alapuolisen eristyksen lämmönsiirtovastus on noin kaksinkertainen yläpuoliseen verrattuna, esimerkiksi laatan alla on 100 mm EPS- eristettä ja yläpuolella on 50 mm puukoolaus mineraalivillaeristyksin. Vähimmäisvaatimuksena voidaan pitää samansuuruisia lämmönsiirtovastuksia laatan eri puolten eristekerroksilla. Joka tapauksessa kuivuminen sisäilmaan on hidasta ja kosteusvirran suuruus riippuu lämmöneristeiden avulla varmistetun kuivumispotentiaalin lisäksi lattiapinnan höyrynsiirtovastuksesta.

Lattiapinnassa ei tarvita höyrynsulkua. Edellytyksenä höyrynsuluttomuudelle ja pienelle lattiapinnan vesihöyrynvastukselle on, ettei laatassa esiinny kylmäsiltoja, jotka mahdollistavat kosteuden kerääntymisen paikallisesti näille alueille. Yleensä ohutkin laatan alapuolinen eristys riittää varmistamaan tämän lukuunottamatta lattian reuna-alueita, joiden toiminta on erikseen varmistettava.

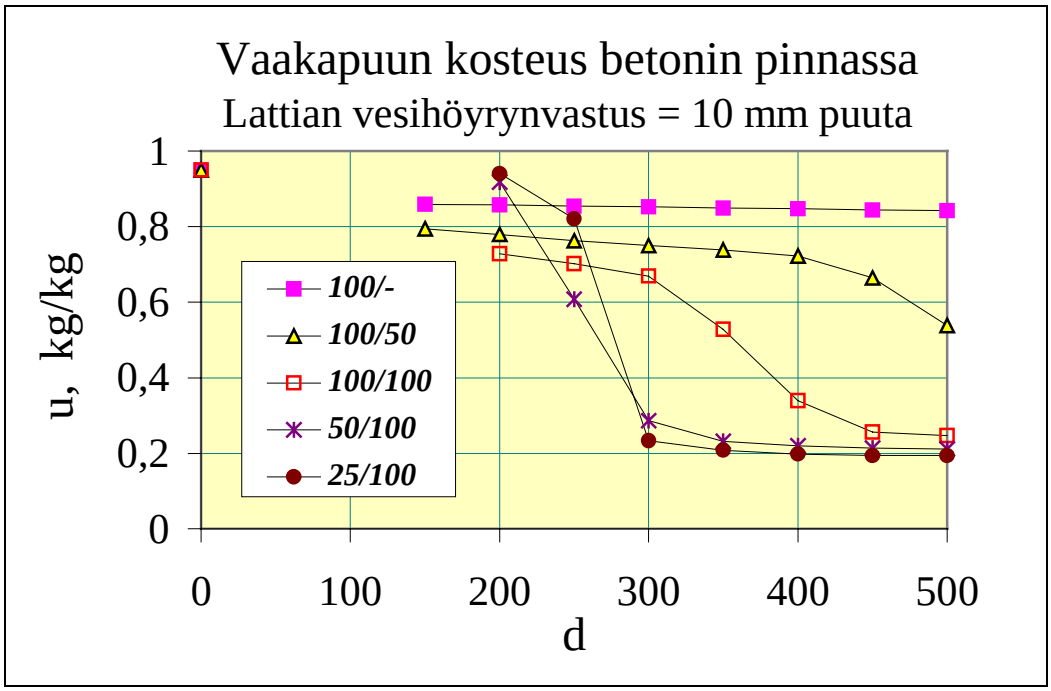
Jotta lattiarakenteeseen joutunut kosteus voisi kuivua sisäilmaan, tulee lattian pinnan olla vesihöyryä mahdollisimman hyvin läpäisevä. Laskelmien perusteella 5 mm:n puukerrosta vastaava vesihöyryn tehollinen vastus lattiarakenteen pinnassa antaa lattialle jo kohtuullisen kuivumiskyvyn. Laskennallisesti tarkasteltu teoreettinen sisäilmaan tuulettuva lattiarakenne paransi kuivumiskykyä tarkasteluoloissa. Hyvä tuulettuvuus saattaa kuitenkin johtaa sisäilman kosteuden kulkeutumiseen lattiarakenteeseen sisäilman kosteustason ollessa korkea. Käytännön kannalta tuulettuvaa lattiarakennetta ei tulisi soveltaa ilman koko rakenteen toiminnan varmistamista sen käyttöoloissa.

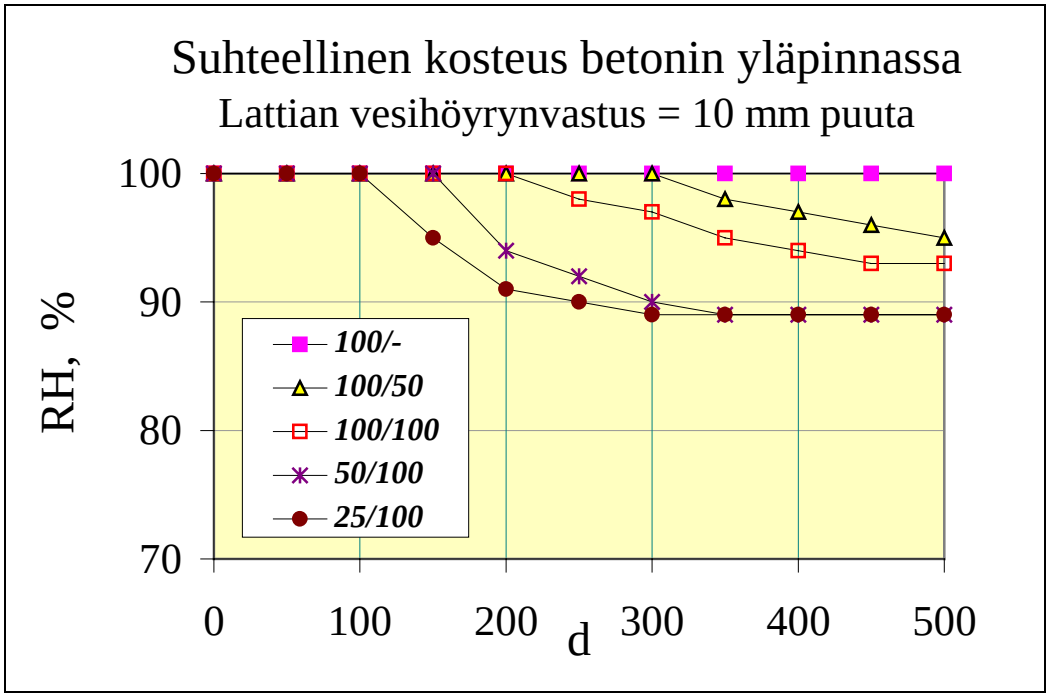
Tarkastellun kaltaiset lattiarakenteet ovat aina kosteusriski, jos kosteutta joutuu rakenteeseen, sillä kosteuden havaitseminen on vaikeaa ennekuin se on jo ehtinyt vaurioittaa lattian puuosia. Kosteusteknisen toimivuuden vikasietoisuutta lisää laatan alapuolinen eristäminen, esimerkiksi 100 mm eristettä alla, 50 mm yläpuolella, ja kohtuullisesti vesihöyryä läpäisevä lattiapinta.



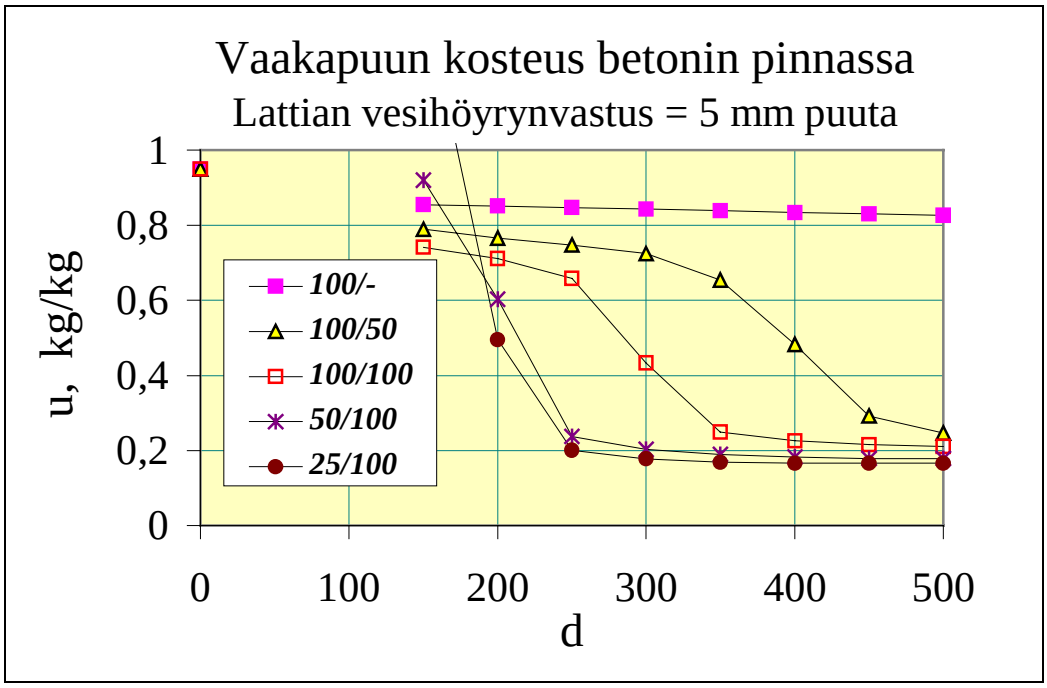


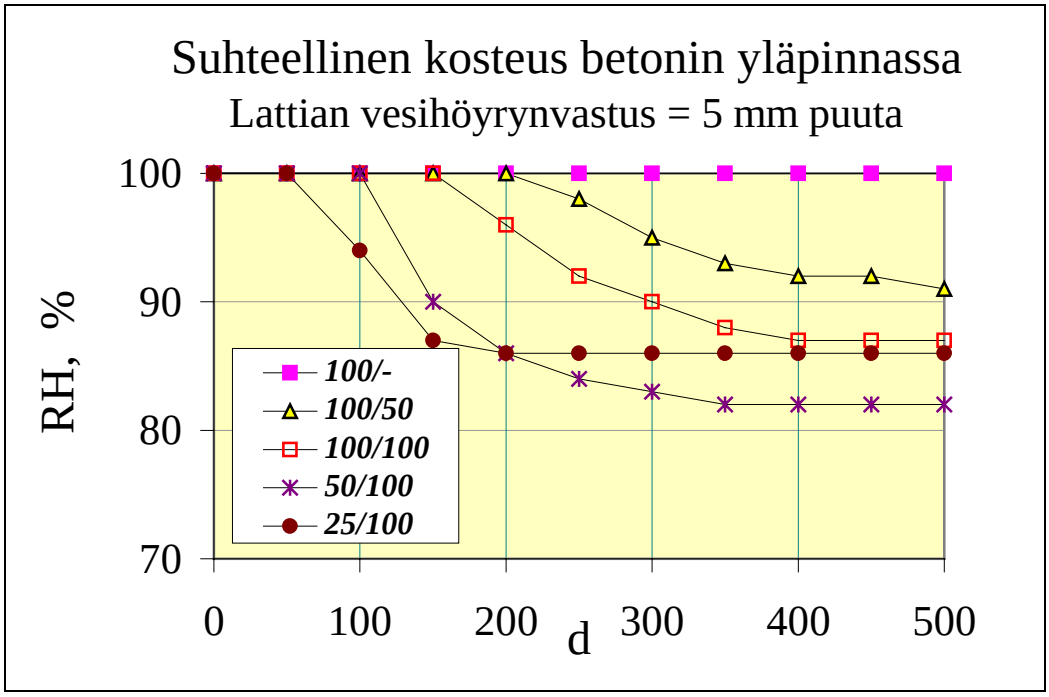
Kuva 5.35. Kriittisten pisteiden kosteuspitoisuuden (vaakapuun alapinta) ja suhteellisen kosteuden (lämmöneristeen alapinta) kehitys 500 vrk:n aikana, kun lattiapinnan vesihöyrynvastus vastaa 22,5 mm:n yhtenäistä puukerrosta. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.



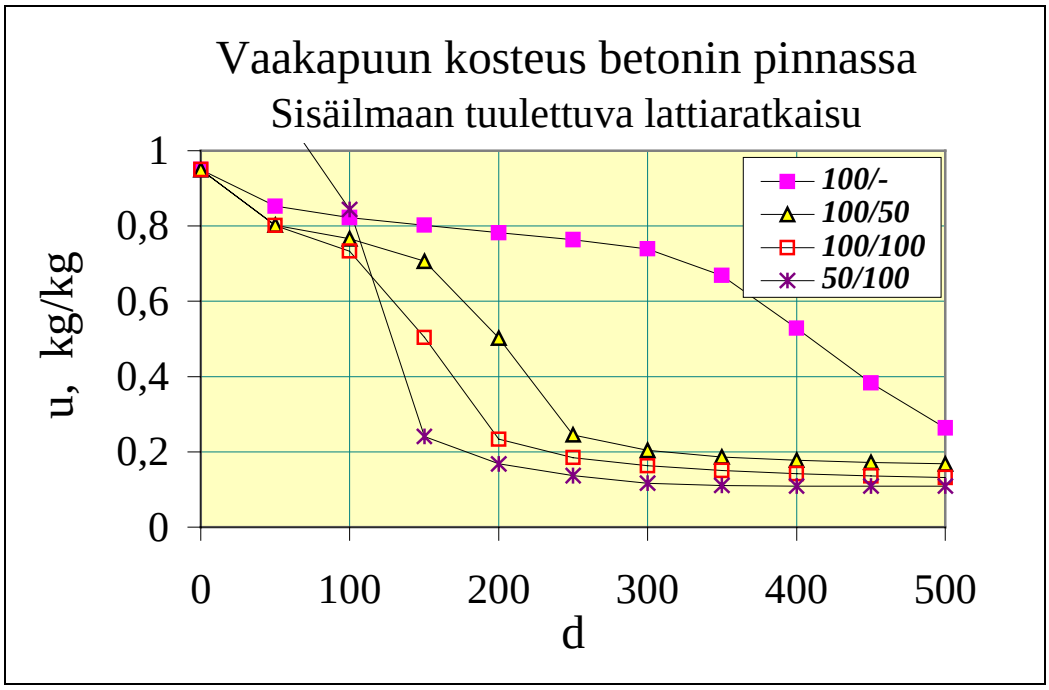


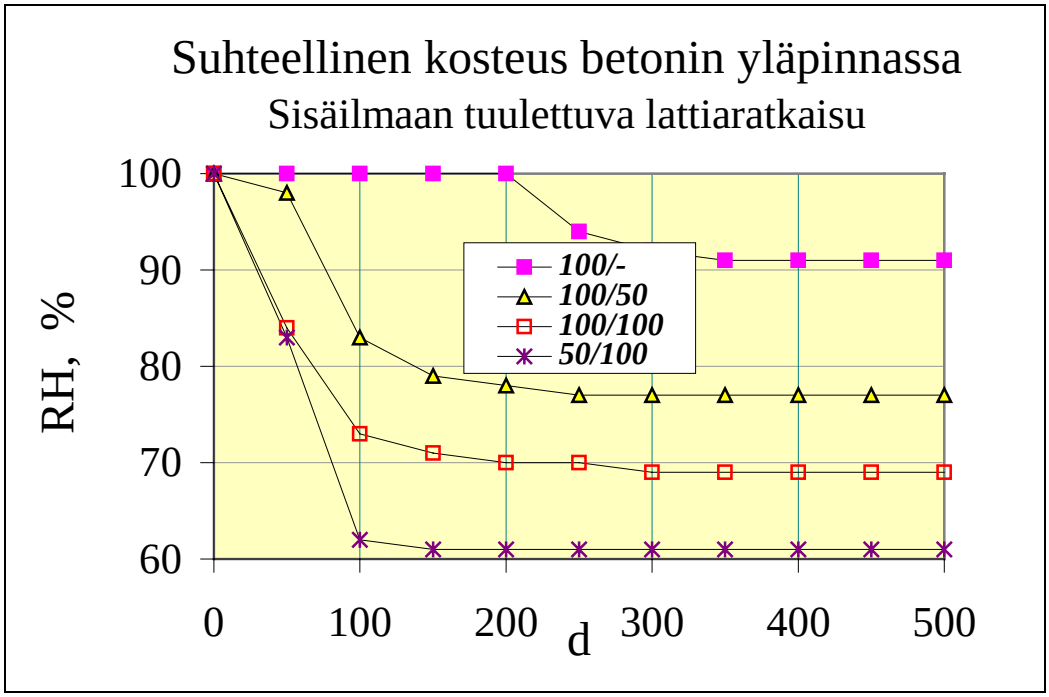
Kuva 5.36. Kriittisten pisteiden kosteuspitoisuuden (vaakapuun alapinta) ja suhteellisen kosteuden (lämmöneristeen alapinta) kehitys 500 vrk:n aikana, kun lattiapinnan vesihöyrynvastus vastaa 10 mm:n yhtenäistä puukerrosta. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.



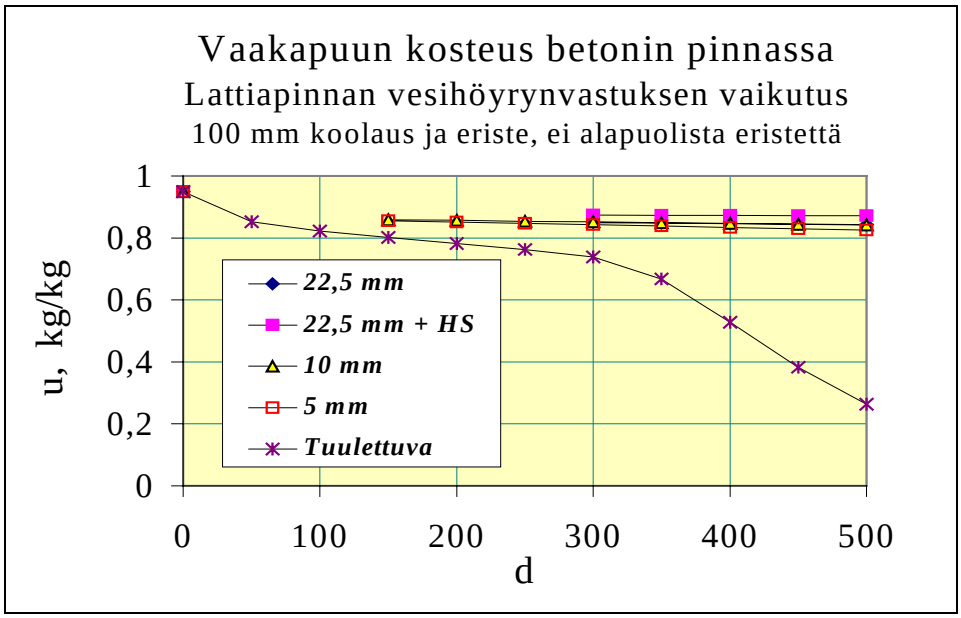


Kuva 5.37. Kriittisten pisteiden kosteuspitoisuuden (vaakapuun alapinta) ja suhteellisen kosteuden (lämmöneristeen alapinta) kehitys 500 vrk:n aikana, kun lattiapinnan vesihöyrynvastus vastaa 5 mm:n yhtenäistä puukerrosta. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.

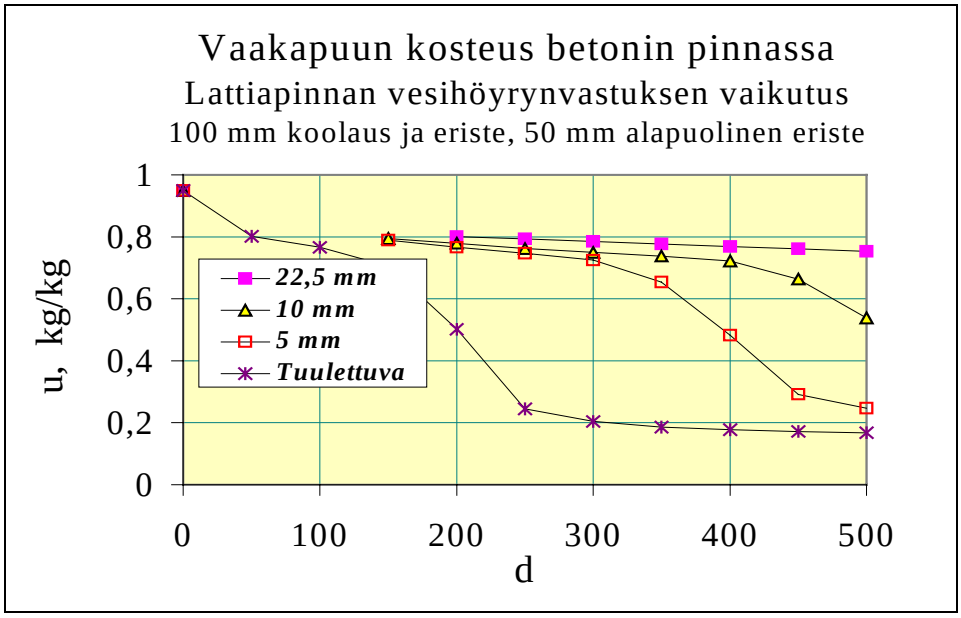




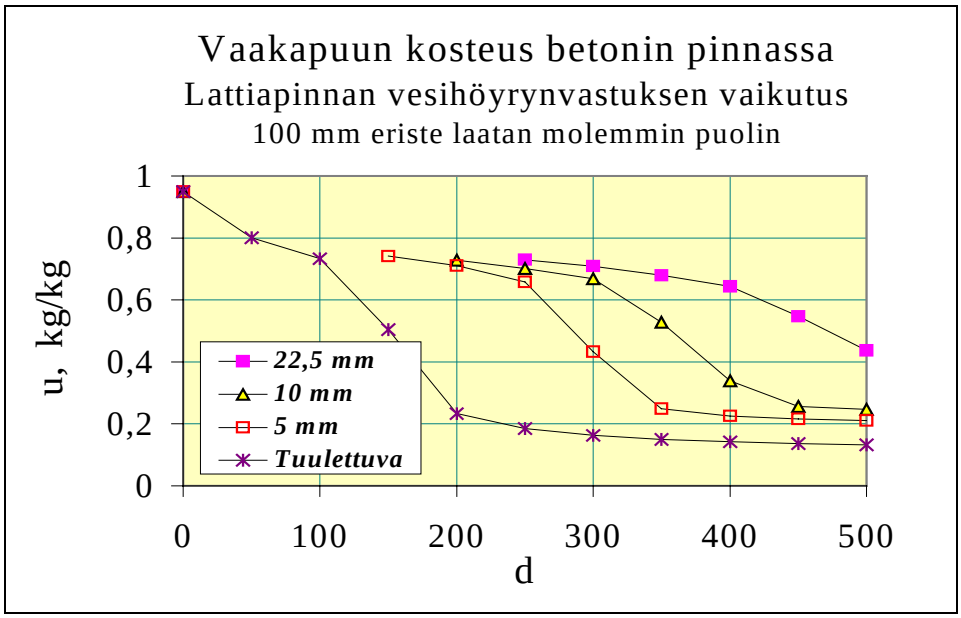
Kuva 5.38. Kriittisten pisteiden kosteuspitoisuuden (vaakapuun alapinta) ja suhteellisen kosteuden (lämmöneristeen alapinta) kehitys 500 vrk:n aikana kun lattiarakenteen pintakerros sallii kosteuden tuulettumisen sisäilmaan. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.



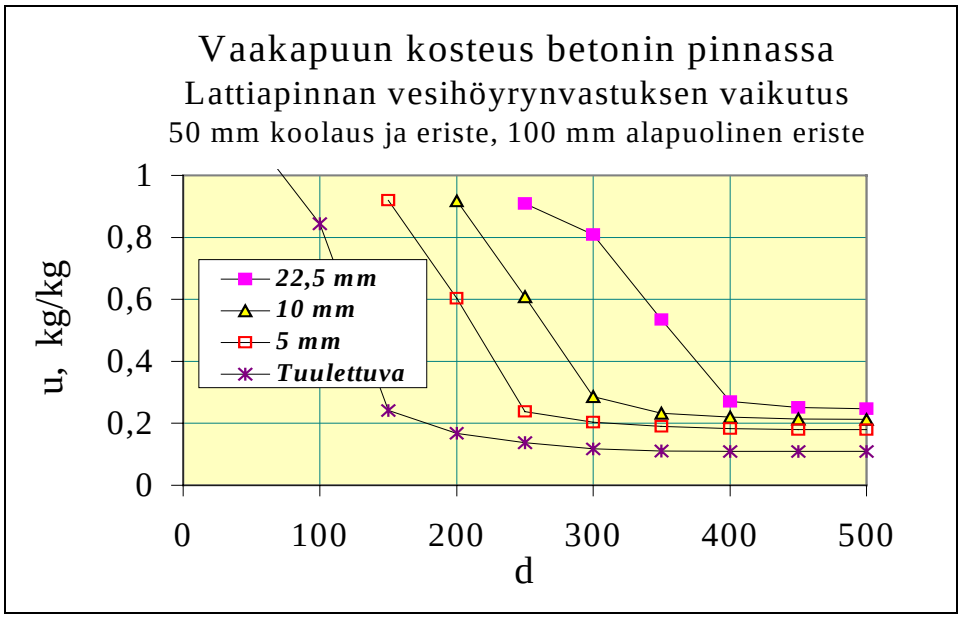
Kuva 5.39. Vaakapuun alapinnan kosteuspitoisuuden kehitys 500 vrk:n aikana tapauksessa, jossa betonilaatan yläpuolella on 100 mm paksu lämmöneriste, mutta alapuolista eristettä ei ole. Muuttujana lattian pintakerroksen vesihöyrynvastus, joka on kuvattu yhtenäisen puukerroksen paksuutena tai rakenne on sisäilmaan tuulettuva. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.



Kuva 5.40. Vaakapuun alapinnan kosteuspitoisuuden kehitys 500 vrk:n aikana tapauksessa, jossa betonilaatan yläpuolella on 100 mm paksu lämmöneriste ja alapuolella 50 mm paksu. Muuttujana lattian pintakerroksen vesihöyrynvastus, joka on kuvattu yhtenäisen puukerroksen paksuutena tai rakenne on sisäilmaan tuulettuva. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.



Kuva 5.41. Vaakapuun alapinnan kosteuspitoisuuden kehitys 500 vrk:n aikana tapauksessa, jossa betonilaatan yläpuolella ja alapuolella on 100 mm paksu lämmöneriste. Muuttujana lattian pintakerroksen vesihöyrynvastus, joka on kuvattu yhtenäisen puukerroksen paksuutena tai rakenne on sisäilmaan tuulettuva. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.



Kuva 5.42. Vaakapuun alapinnan kosteuspitoisuuden kehitys 500 vrk:n aikana tapauksessa, jossa betonilaatan yläpuolella on 50 mm paksu lämmöneriste ja alapuolella 100 mm paksu. Muuttujana lattian pintakerroksen vesihöyrynvastus, joka on kuvattu yhtenäisen puukerroksen paksuutena tai rakenne on sisäilmaan tuulettuva. Rakenteessa oli betonilaatan pinnalla 2,5 kg/m^2 ylimääräistä alkukosteutta.

6 RAKENTEIDEN VAIKUTUS SISÄILMAAN

Seuraavassa esitetään tuloksia laskennallisista analyyseistä rakenteiden ja sisäilmaston (hiilidioksidi, kosteus, lämpötila) vuorovaikutuksista. Tarkastelun kohteeksi on otettu hiilidioksidin diffuusio kevytrakenteisten seinien läpi, seinien kosteuskapasiteetin merkitys sisäilman kosteuteen sekä höyrynsulullisen ja -suluttoman rakennuksen sisäilmastojen erot.

Höyrynsululla (tai laajemmin ottaen koko seinärakenteen vesihöyryn/kaasun läpäisevyydellä) voi olla huomattava vaikutus sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen, jos ilmanvaihtuvuus on alle 0,5 1/h.

Höyrynsulku kevytrakenteisissa rakennuksissa voi ylläpitää sisäilman kosteutta talvikaudella korkeammalla kuin ilman höyrynsulkua (vähäisempi diffuusio seinärakenteiden läpi). Merkitys on kuitenkin useimmiten vähäinen ja riippuu rakennuksen ilmanvaihdosta. Seinärakenteissa ei välttämättä tarvita kosteusteknisen toimivuuden kannalta varsinaista “höyrynsulkua” vaan riittävä ehto on, että rakenne on sisäpinnoiltaan vesihöyrynjohtavuudeltaan esim. 5-kertaa tiiviimpi kuin ulkopinnoiltaan ja rakenteiden ilmavuodot ovat hallinnassa.

Seinärakenteet voivat toimia kosteusvarastoina muuttuvissa kosteuden kuormitusoloissa. Massiiviset väliseinät hirsitaloissa voivat merkittävästi tasapainottaa sisäilman kosteuden tunnittaisia vaihteluja ja viivästyttää kosteuden vuorokautisen keskiarvon muuttumista kesä- ja talvikauden välillä. Hirsiseinärakenteiden terminen massa tasoittaa myös sisäilman lämpötilan kehittymistä hellekausilla.

6.1 JOHDANTO

Rakenteiden lämmön ja kosteuden siirtoon vaikuttavat niin ulko- kuin sisäilmasto. Ulkoilmasto on yleensä tunnettu suhteellisen hyvin, joskin siinä on useita epävarmuustekijöitä. Sisäilmasto sen sijaan riippuu rakennuksen toiminnasta: rakennuksessa oleskelevat henkilöt tuottavat sekä itse että toiminnallaan kosteuslähteitä, ilmanvaihto tuo tai kuljettaa pois lämpöä ja kosteutta ja rakenteet absorboivat, luovuttavat tai läpäisevät kosteutta. Toisin sanoen rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta ja sisäilmasto ovat tiiviissä vuorovaikutuksessa vaikuttaen toinen toisiinsa.

Raportin tässä osassa esitetään tuloksia laskennallisista analyyseistä rakenteiden merkityksestä sisäilmastoon (hiilidioksidi, kosteus, lämpötila). Tarkastelun kohteeksi on otettu

- hiilidioksidin diffuusio kevytrakenteisten seinien läpi
- seinien kosteuskapasiteetin merkitys sisäilman kosteuteen sekä
- höyrynsulullisen ja -suluttoman rakennuksen sisäilmastojen erot.

6.2 LASKENNALLISET ANALYYSIT

6.2.1 Simuloinneissa käytetyt laskentamallit

VTT:n kehittämä lämmön, ilman ja kosteudensiirron laskentaohjelma LATENITE kykenee laskemaan kosteudensiirtoa 1-, 2- tai 3-dimensioisissa rakenteissa. Lämpö voi siirtyä johtumalla, säteilemällä pintojen välillä, konvektiolla ilman mukana tai faasimuutoksina kosteuden siirtyessä tai jäätyessä/sulaessa. Kosteuden siirrossa otetaan huomioon vesihöyryn ja nestemäisen kosteuden liikkeet (toisistaan eroteltuina). Reunaehtoina ohjelmaan voidaan antaa ulkoilman säätiedosto, josta ohjelma hyödyntää mm. auringon säteilyn, tuulen painevaikutukset, ulkopinnan vastasäteilyn taivaalle ja ympäristöön sekä viistosateen.

VTT:n rakenteiden lämmön ja kosteudensiirron laskentamallista LATENITE /3/ on edelleen kehitetty *rakennustason* malli, joka laskee huonetilan taseet ja kykenee ottamaan huomioon sisäilman ja rakenteiden vuorovaikutukset.

Kehitettyyn rakennustason laskentamalliin on yhdistetty laskentamalli hiilidioksidin diffuusion ja kuljettumisen laskemiseksi.

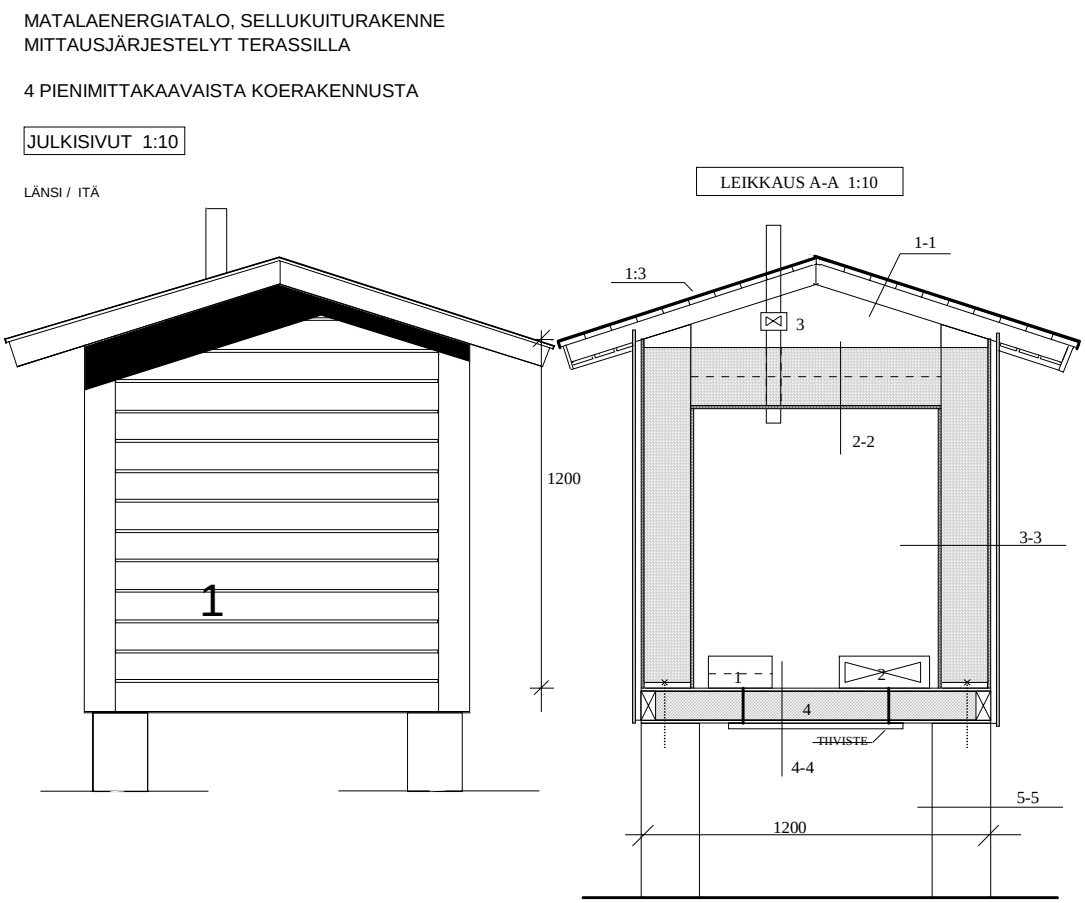
6.2.2 Laskentamallin verifiointi pienimittakaavaisilla kenttäkokeilla

Rakennusmallin toimintaa testattiin seuraavilta osin:

1) Pienimuotoisen koetalorakenteen toiminta luonnonsäässä - Espoo 1995 - 1996 (Julkaisematon)

2) Hiilidioksidin diffuusio ja konvektio - Pienimuotoiset koppikokeet: CO_2-mallin verifiointi
   - Makuuhuoneen yö- ja päiväaikaisen hiilidioksidipitoisuuden kehittymisen laskennallinen arviointi

Koerakennus



Kuva 6.1. Pienimuotoisten koerakennusten kaaviokuvat.

Laskennassa käytetyt parametrit:

- Kopin koko simuloinnissa 1m x 1m x 1
- 4 seinää: Ilmansuunnat pohjoinen, itä, etelä, länsi
- 2 kattoa: Ilmansuunnat pohjoinen ja etelä, katossa 20 asteen kallistus
- hyvin eristetty ja tiivis lattia on jätetty ottamatta laskennassa huomioon
- seinät: 12 mm lauta, 25 mm ilmarako, 12 mm huokoinen puukuitulevy, 150 mm eriste, 12 mm huokoinen puukuitulevy
- kyatot: Bitumikermi, ruodelauta, ilmaväli, 200 mm eriste, rakennuspaperi/höyrynsulku, 12 mm huokoinen puukuitulevy
- alkuykosteus: rakenteissa tasainen 70 % RH, kopissa ei lämmitystä eikä kosteuslähteitä
- Ilmanvaihtoluku 0,5 1/h.

6.2.3 Pienimuotoisten koetalojen seinärakenteiden kosteuspitoisuudet

Pienimuotoisten koetalojen (kuva 6.1) käyttäytymistä vuositasolla arvioitiin laskennallisin menetelmin.

Koetalot eli terassikopit sijaitsevat VTT Rakennustekniikan lämpömiehenkuja 3:n kattoterassilla. Kopeissa oli lämpövastus, jota ohjattiin lämpötilasäädöllä pyrkien pitämään koppien lämpötila n. 20 - 22 °C. Kosteuskuormana käytettiin vesiastioita, joiden vapaa vesipinta-ala pyrittiin asettamaan sellaiseksi, että kosteuden tuotto koppeihin (kuva 6.3) vastaisi (kopin koko huomioon ottaen) suuruusluokaltaan normaalia asuinrakennusta. Kostutus vaimeni jostain syystä maaliskuun alusta eteenpäin niin, että huhtikuun aikana sisäilman kosteus asettui ulkoilman kosteuteen. Tämä on ilmeisesti merkki siitä, että kostutusastiasta on loppunut vesi. Kopissa 2 ilmanvaihto ei oletettavasti aina toiminut säädetyissä arvoissaan (n = 0,5 1/h) johtuen ilmakanavissa esiintyvän kosteuden jäätymisestä. Samaa ilmiötä esiintyi myös muissa kopeissa ajoittain. Tämän seurauksena kopin 2 (höyrynsulku) sisäilman suhteellinen kosteus on hyvin pitkiä aikoja 80 - 90 %. Tästä huolimatta rakenteen kosteuspitoisuudet pysyttelevät alhaisina (kuva 6.4). Suuren suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan n. +20 °C vaikutuksesta koppiin alkoi syntyä hometta sisäpintoihin. Ilman suhteellisen kosteuden nousu 10 %:lla 20 °C lämpötilassa merkitsee n. 1,7 g/m^3 lisäkosteutta.

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

Kuvassa 6.2 esitetään kopissa 3 (höyrynsuluton) esiintyvät sisäilman kosteuspitoisuudet ajan funktiona.

Puun kosteuspitoisuus käyttäytyy hieman eri tavoin kuin huokoisen kuitulevykerroksen, mikä johtuu useista eri syistä: puun vesihöyryn diffuusiokerroin on alhaisempi kuin huokoisella kuitulevyllä ja kosteus puuhun siirtyy osin sivusuunnassa eristekerroksesta ja osin ulko- ja sisäilmasta huokoisten kuitulevykerrosten läpi. Puurakennetta ei voitu yksiulotteisesti käsiteltäessä mallintaa käsiteltäessä koko rakennuksen tasetta.

Koerakenne no. 3

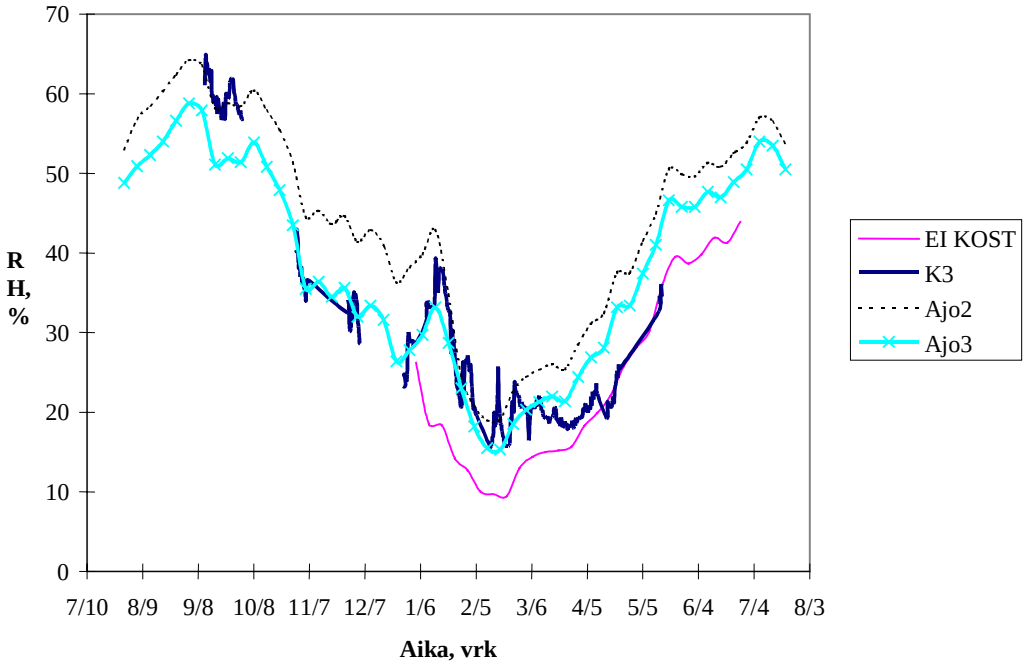
Seinä:

- ulkopaneli 18 mm
- ilmarako 18 mm
- huokoinen puukuitulevy 13 mm

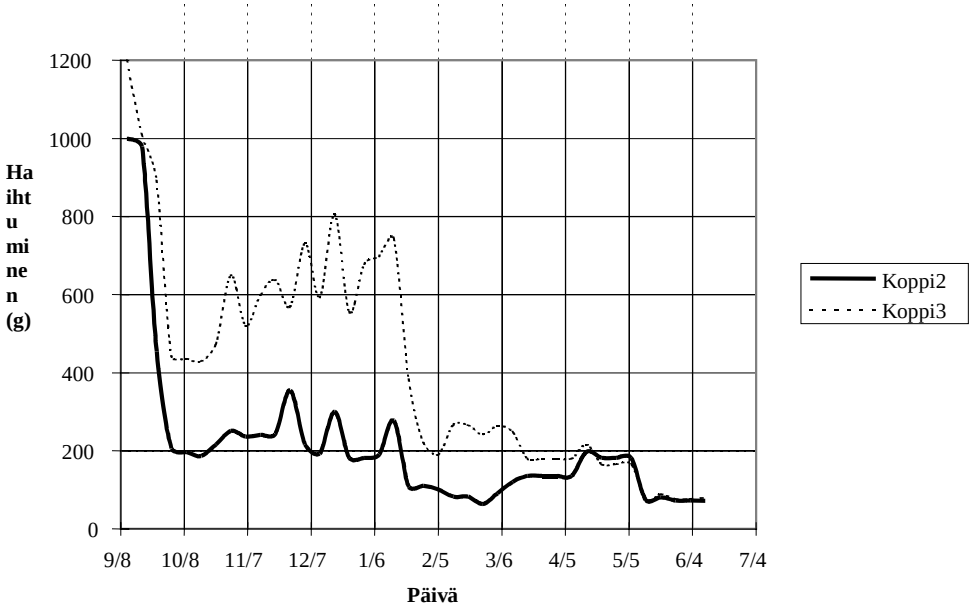
- sellukuituvilla 150 mm, 55 - 60 kg/m^3
- rakennuspaperi
- huokoinen puukuitulevy 13 mm

Katto:

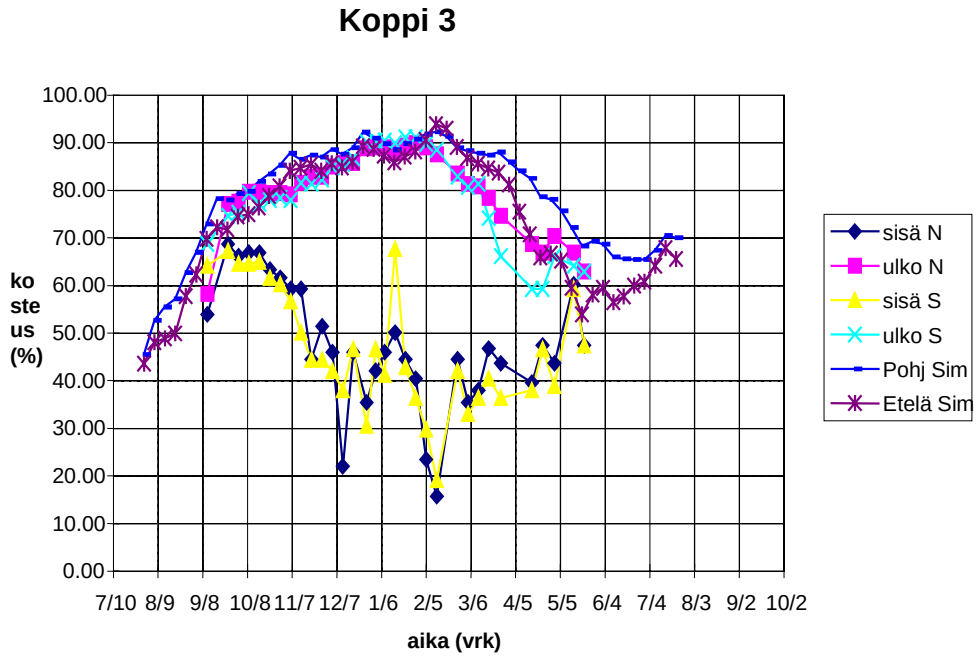
- tuulettuva yläpohja
- sellukuituvilla 200 mm, 20 kg/m^3
- rakennuspaperi
- huokoinen puukuitulevy



Kuva 6.2. Sisäilman mitattu suhteellinen kosteus höyrynsuluttomassa kopissa sekä laskennallisesti tuotettu sisäilman suhteellinen kosteus eri kostutusmalleilla. EI KOST = sisäilman rh-% kostuttamattomassa tilanteessa, K3 = kopista 3 mitattu rh-%, Ajo2 ja Ajo3 eri kostutustapauksissa laskennallisesti esiintyneet sisäilman rh-%. Ajanjakso heinäkuu -95…heinäkuu -96.

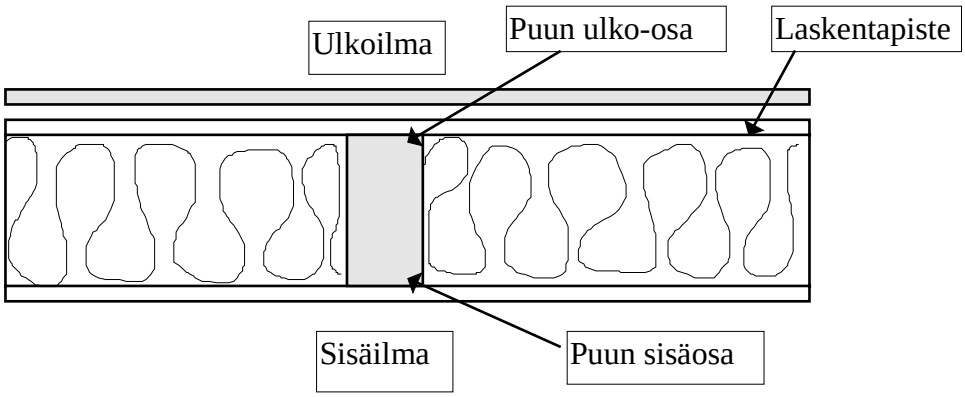


Kuva 6.3. Mitattu veden kulutus kostutusaltaista höyrynsuluttomassa (koppi 3) ja höyrynsulullisessa (koppi 2) kopissa. Toinen kostutusallas poistettu 22.1.96 ja kostutuspintaa pienennetty 2.2.96. Ajanjakso syyskuu -95…kesäkuu -96.



.

Kuva 6.4. Mitatut puiden kosteuspitoisuudet rakenteen ulko- ja sisäreunoilla sekä lasketut huokoisen kuitulevyn (sisäpuolinen 2 mm) kosteuspitoisuudet. Mittaus- ja laskentapisteet on esitetty kuvassa 5. Mitatut arvot N = pohjoinen, S = etelä.



Kuva 6.5. Kosteuden mittauspisteet ja laskennallisesti määritetyn ja kuvaan 6.4 tulostetun kosteuspitoisuuden sijainti rakenteissa.

6.2.4 Hiilidioksidin absorptio rakenteisiin ja diffuusio rakenteiden läpi

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

Pienimittakaavan kenttäkoe ja sen simulointi

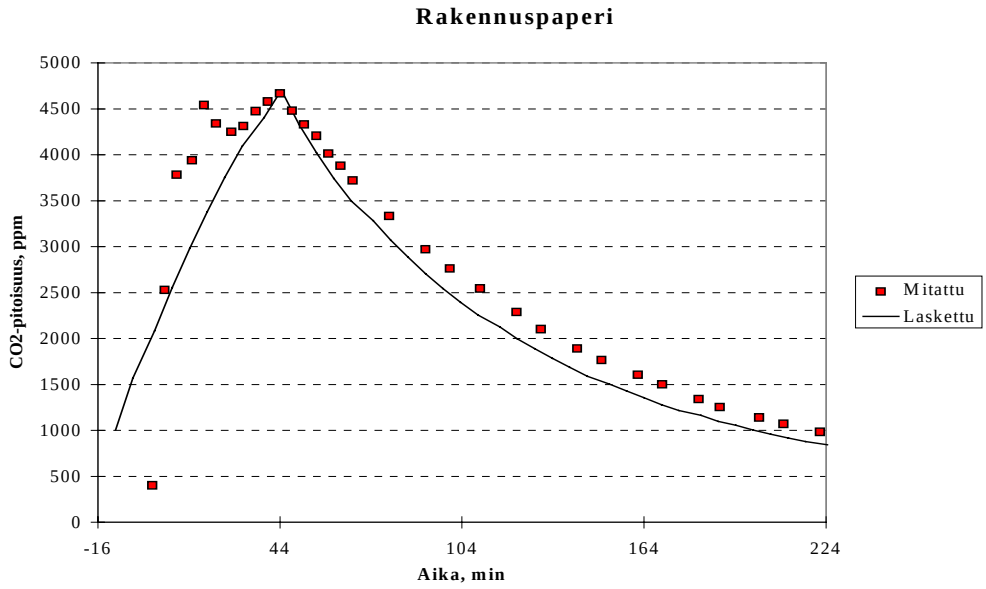
Hiilidioksidin diffuusio pienimittakaavan kenttäkokeen "koetalojen" (kutsutaan tästä eteenpäin kopeiksi) rakenteiden läpi analysoitiin laskentamallilla, jossa rakenteiden osien lämmön ja kosteuden siirto sekä kaasun diffuusio on yhdistetty rakennuksen ilmanvaihdon taseeseen. Laskentamallin toiminnan verifioimiseksi kopeissa suoritettiin koppien sisäilman hiilidioksidipitoisuusmittauksia. Koppeihin (sekä höyrynsuluttomiin että höyrynsulullisiin) asetettiin hiilidioksidilähde. Pitoisuuden annettiin nousta noin 4500 - 5000 ppm, jonka jälkeen lähde lakkautettiin. Ilman hiilidioksidipitoisuuden muuttumista ajan funktiona mitattiin koko prosessin ajan.

Mallissa tarvittavina hiilidioksidin diffuusiokertoimina käytettiin TTKK:ssa mitattuja arvoja (taulukko 6.1).

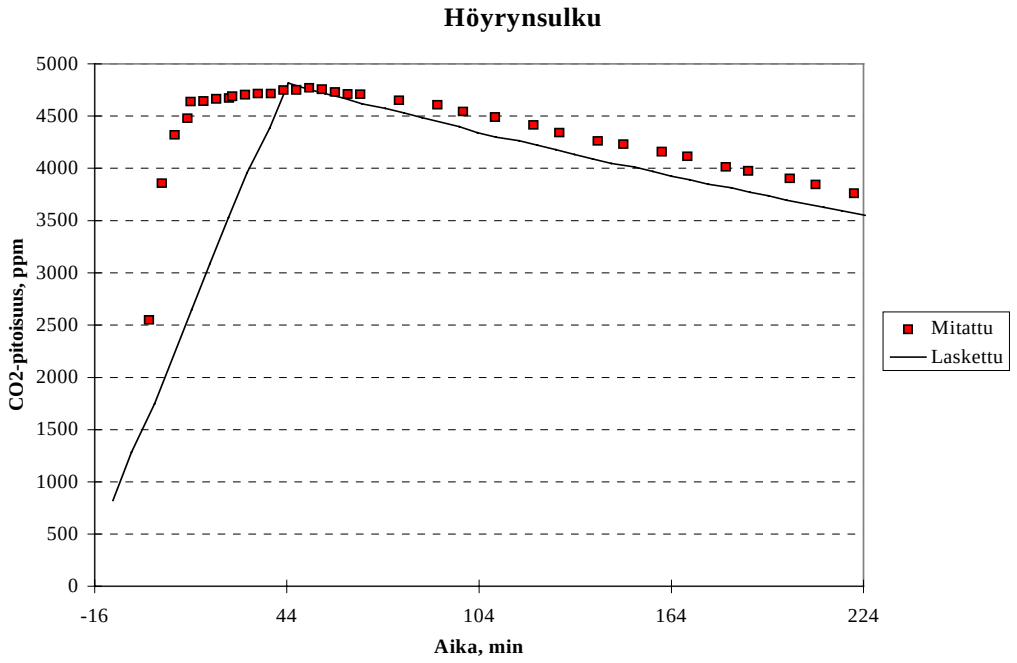
Taulukko 6.1. Materiaalikerrosten diffuusiovastukset laskennassa /47/.

Materiaalikerros	Diffuusiovastus, Z
Maalipinta, himmeä lateksi	$4{,}1 \cdot 10^3$
Huokoinen kuitulevy, 12 mm	$4{,}1 \cdot 10^3$
Sellukuitueriste, 150 mm	$15{,}0 \cdot 10^3$
Mineraalivilla, 150 mm	$15{,}0 \cdot 10^3$
Rakennuspaperi	$3{,}3 \cdot 10^3$

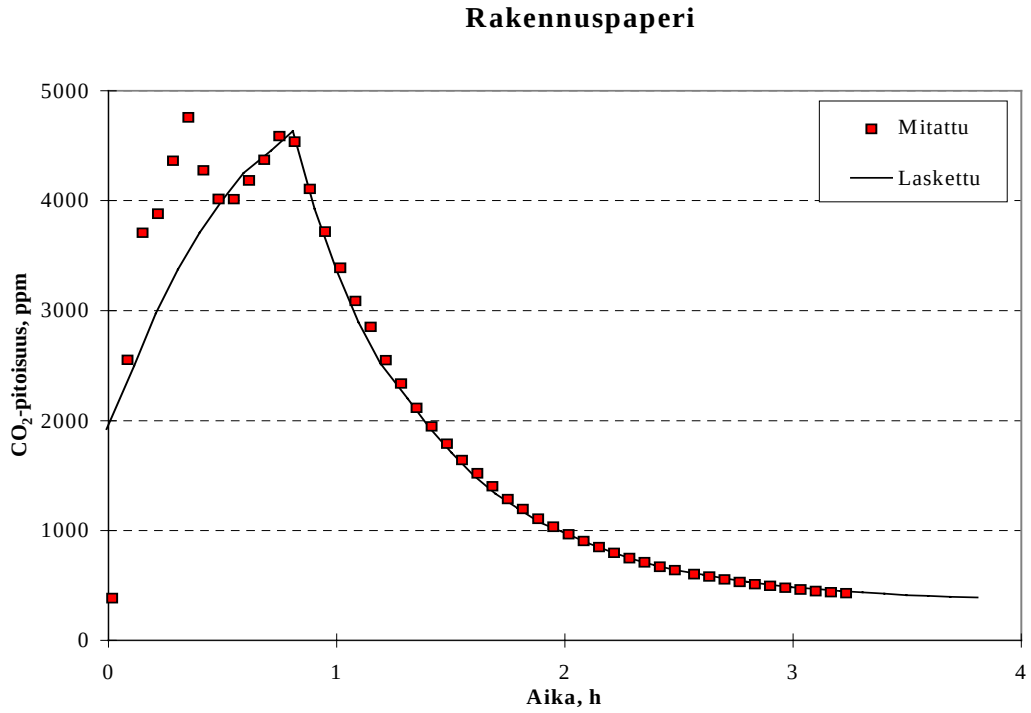
Höyrynsuluttoman sellukuitueristeisen kopin hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona on esitetty kuvassa 6.6 (n = 0,09 1/h) ja 6.8 (n = 1,09 1/h). Vastaavasti on höyrynsulullisen sellukuitueristeisen kopin hiilidioksidi-pitoisuus ajan funktiona esitetty kuvassa 6.7 (n = 0,09 1/h) ja 6.9 (n = 1,09 1/h). Mitatut ja lasketut pitoisuudet täsmäävät hyvin toisiinsa eri ilmanvaihtomäärillä ja mallin voidaan olettaa antavan luotettavat arviot rakenteiden merkityksestä sisäilman hiilidioksipitoisuuteen vaihtelevissa kuormitusoloissa.



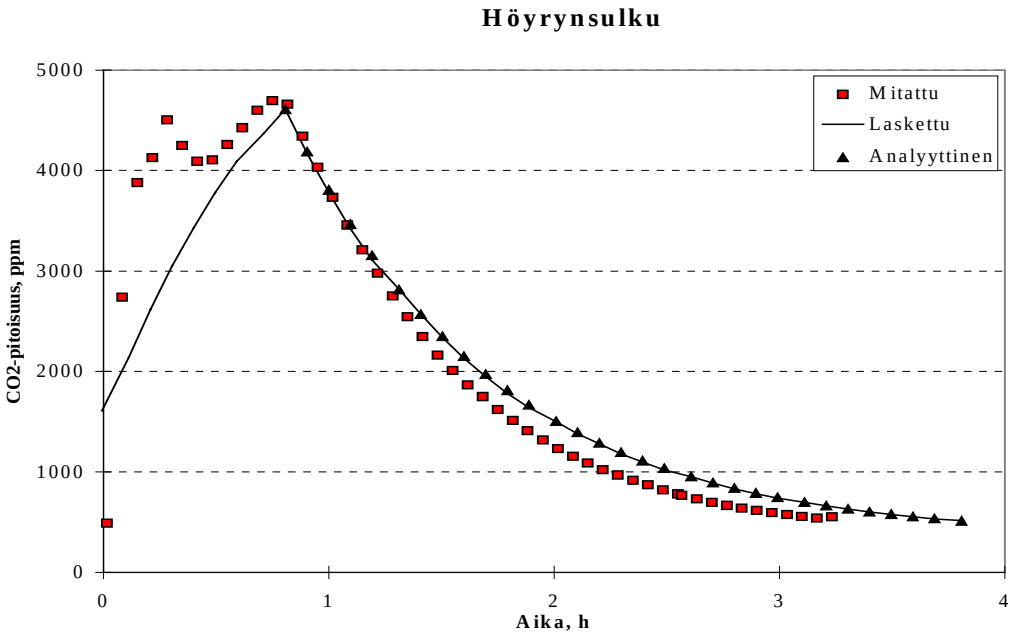
Kuva 6.6. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrynsuluttomassa kopissa, jossa ilmanvaihto n = 0,09 1/h.



Kuva 6.7. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrynsulullisessa kopissa, jossa ilmanvaihto n = 0,09 1/h.



Kuva 6.8. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrynsuluttomassa kopissa, jossa ilmanvaihto n = 1,09 1/h.



Kuva 6.9. Hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona höyrynsulullisessa kopissa, jossa ilmanvaihto n = 1,09 1/h.

Täysmittakaavan dynaaminen analyysi: ajoittain kuormitettu makuuhuone

Laskentamallin verifioinnin jälkeen suoritettiin hiilidioksidin diffuusioanalyysi todellisen kokoiselle huoneelle. Ensimmäiseksi tarkastelukohteeksi otettiin makuuhuone. Rakennusten ilmanvaihdon tarve oletetaan usein yöaikana pienemmäksi kuin iltaisin. Päivisin ja iltaisin asukkaat oleskelevat ja liikkuvat talossa eri huoneissa ja tuottavat eri toiminnoissa mm. ruoanlaitossa ja peseytymisessä huomattavat määrät kosteutta, jota käytetään arvioitaessa ilmanvaihdon tarvetta. Hiilidioksidin tuotto ei tällöin ole usein ongelmallista sisäilman laadun kannalta, koska ilmanvaihto on riittävä ja CO_2-tuotto/tilavuus on suhteellisen pieni. Yöaikaan ilmanvaihto kuitenkin saatetaan pistää puoliteholle, koska usein ilmeisesti kuvitellaan, että sille ei ole niin tarvetta. Seuraavassa havainnollistetaan miten makuuhuoneen kosteus- ja hiilidioksidipitoisuudet vaihtelevat yöaikaan ilmanvaihdon ja rakenteiden läpäisevyyden funktiona. Oletuksena on, että makuuhuoneessa ei ole suuria pintoja omaavia materiaaleja (huonekaluja ym.), jotka voimakkaasti absorboisivat kosteutta, toisin sanoen ihmisten tuottama kosteus kehittyy huoneilmaan, diffusoituu rakennuksen vaippaan ja kuljettuu ilmavirtojen mukana.

Makuuhuone oletetaan nurkkahuoneeksi. Ympäröivien tilojen hiilidioksidi- ja kosteuspitoisuudet ja lämpötila ovat samat kuin ulkoilmassa (+20 °C, RH = 55%, C_{CO2} = 350 ppm)ja näiden tilojen kapasiteetti (ja ilmanvaihto) oletetaan riittäväksi pitämään pitoisuudet alhaisina, vaikka seinien kautta diffusoituisikin vesihöyryä ja hiilidioksidia ko. tiloihin. Makuuhuoneen koko on 4 m x 3 m x 2,5 m (leveys, syvyys, korkeus). Havainnollistetaan höyrynsuluttoman ja -sulullisen rakenteen toimintaa olettamalla kaikkien seinien rakenne samaksi kussakin laskentatapaukses-

sa. Todellisen makuuhuoneen toiminta asettunee näiden kahden tuloksen väliin (nurkkahuone: höyrynsulullliset ulkoseinät, höyrynsuluttomat väliseinät).

Rakenteet ovat seuraavat:

<u>Seinät</u>
HPKL 13 mm, HS/RP, Eriste 150 mm, HPKL 13 mm, Ilmaväli 18 mm, Puuverhous 18 mm

<u>Katto</u>
HPKL 13 mm, HS/RP, Eriste 150 mm, Ilmaväli, Kattohuopa

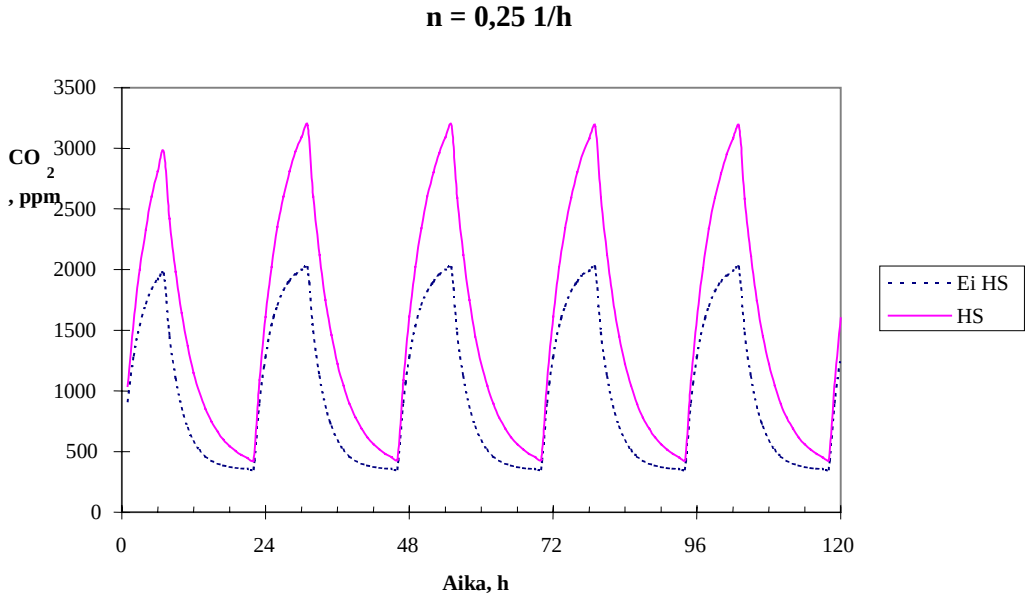
<u>Lattia</u>
Läpäisemätön

HS= Höyrynsulku (Polyeteenikalvo)
RP= Rakennuspaperi

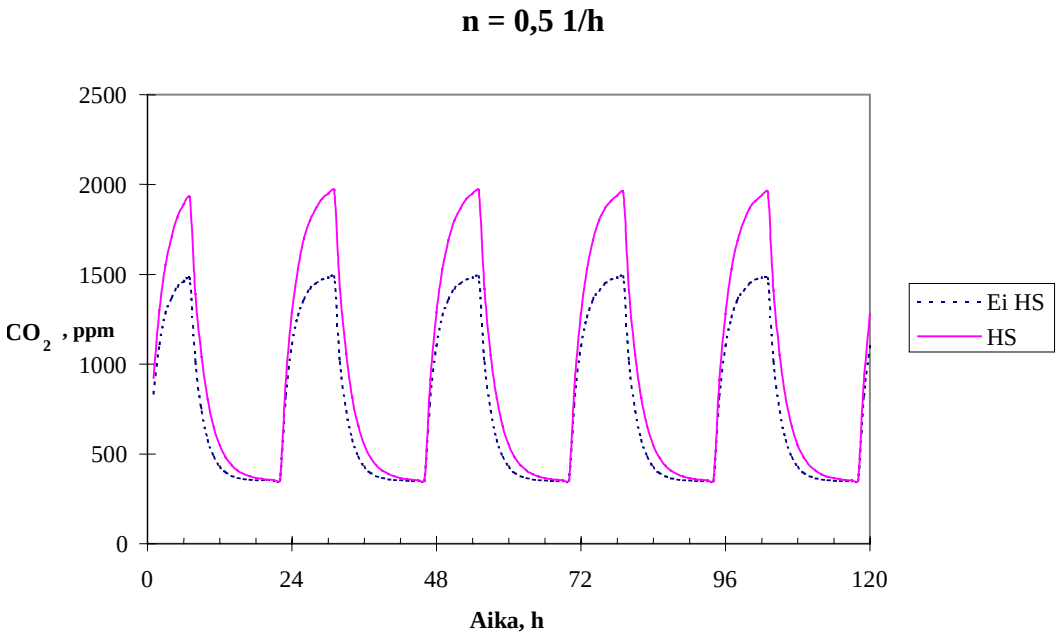
Ilmanvaihtomäärinä käytetään n = 0,25 1/h ja n = 0,5 1/h. Huoneessa nukkuu kaksi aikuista 23 - 07 välisenä aikana. He tuottavat (=oletus) yhteensä vesihöyryä 60 g/h ja hiilidioksidia 430 ml/min.

Sisäilman hiilidioksidipitoisuudet

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



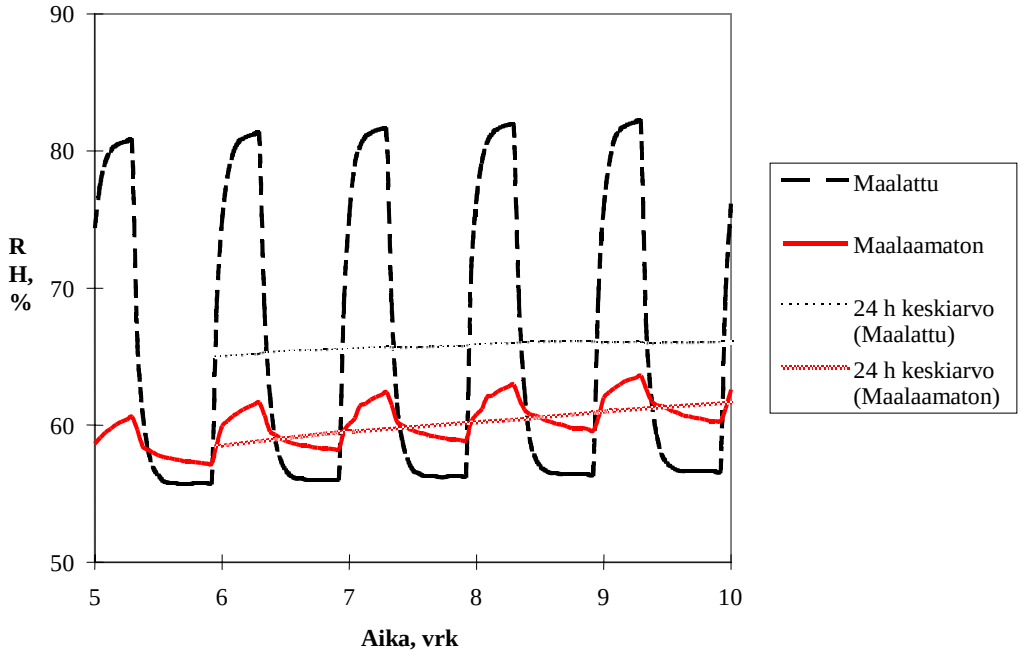
Kuva 6.10. Hiilidioksidipitoisuuden kehittyminen 12 m^2:n makuuhuoneessa, kun ilmanvaihto on n=0,25 1/h. HS = höyrynsulullinen rakenne (polyeteenikalvo), Ei HS = rakenne, jossa höyrynsulku on korvattu rakennuspaperilla.



Kuva 6.11. Hiilidioksidipitoisuuden kehittyminen 12 m^2:n makuuhuoneessa, kun ilmanvaihto on n=0,5 1/h. HS = höyrynsulullinen rakenne (polyeteenikalvo), Ei HS = rakenne, jossa höyrynsulku on korvattu rakennuspaperilla.

6.2.5 Sisäilman suhteellinen kosteus

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



Kuva 6.12. Sisäilman suhteellinen kosteus ajan funktiona maalaamattomassa ja maalatussa makuuhuoneessa. Henkilökuormitus 2 henkilöä klo 23 - 07.

Rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutusten pienimuotoinen laboratoriokoe

Rakenteiden ja sisäilman vuorovaikutusten arviointiin käytettävän laskentamallin verifioimiseksi suoritettiin laboratorio-olosuhteissa pienimuotoinen koe. Kokeessa sisätilavuudeltaan 1 m^3 kopin ilmanvaihdon tuloilman kosteuden annettiin vaihdella porrasmaisesti 45 % ja 80 % välillä. Kopin 5 seinää olivat alumiinipinnoitettua polyuretaanilevyä ja yksi seinistä (pinta-ala 1 m^2) oli rakenteen ulkoapäin lueteltuna

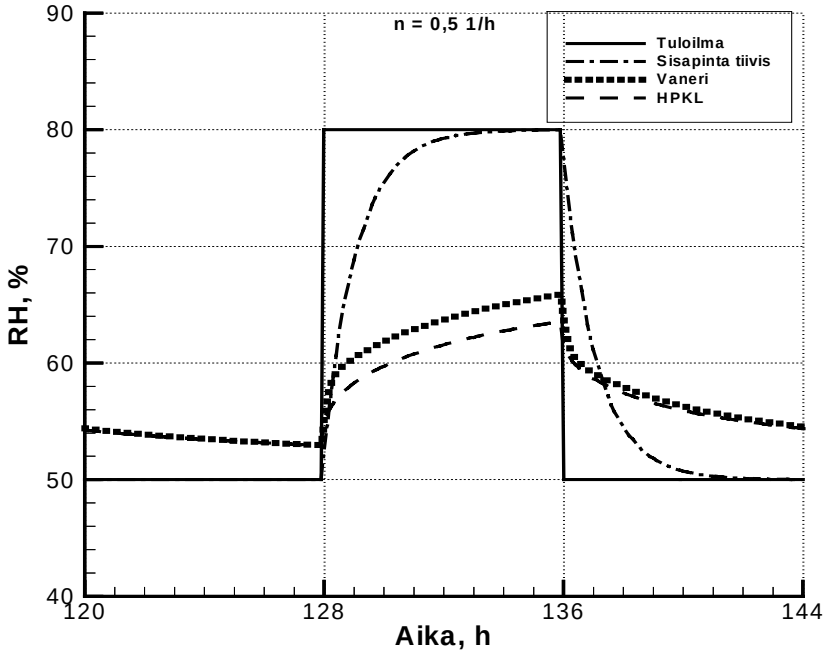
- 12 mm huokoinen puukuitulevy
- 100 mm sellukuitueriste
- rakennuspaperi
- 12 mm huokoinen puukuitulevy.

Alumiinipinnoilla varustetut polyuretaanilevyt eivät läpäisseet kosteutta, joten ainoat kopin sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttavat tekijät olivat tuloilman kosteuspitoisuus ja huokoinen seinärakenne kosteutta läpäisevä seinärakenne. ‘Ulkoilman’ (laboratorio-olosuhde) suhteellinen kosteus ja lämpötila pidettiin vakioarvoissa 45 % ja 23 °C.

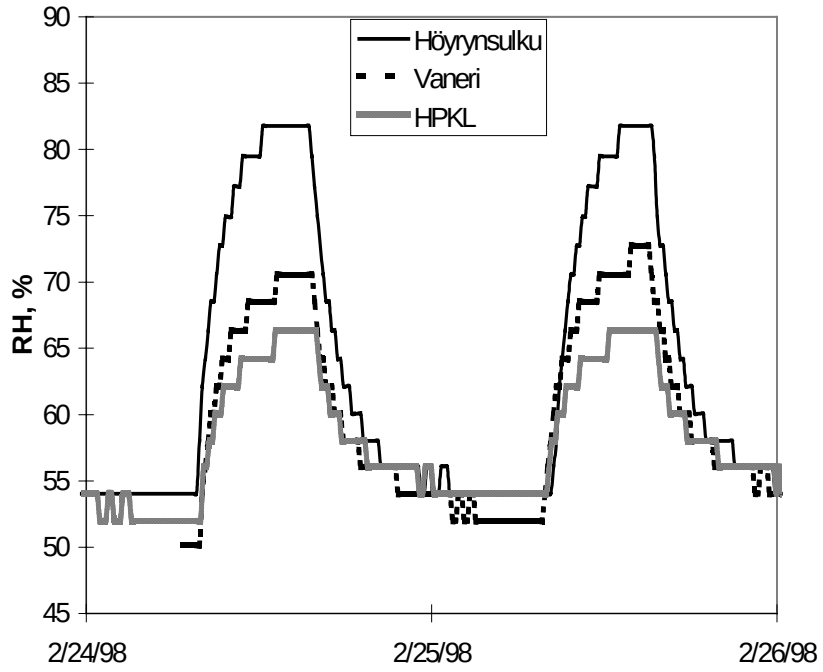
Kuvassa 6.13 nähdään sisäilman suhteellisen kosteuden käyttäytyminen laskennallisissa tarkasteluissa. Vastaavat tulokset koejärjestelystä on esitetty kuvassa 6.14. Tuloksista nähdään selvästi, että laskennalliset tarkastelut antavat hyvin koejärjestelyjä vastaavia tuloksia. Kopin yhden seinän muuttaminen huokoiseksi

ja mahdollistamalla kosteuden siirtyminen edestakaisin sisäilman ja seinän välillä muuttuvissa oloissa vaikuttaa sisäilman kosteuspitoisuuteen tasapainottavasti vuorokauden mittaisissa kuormitussykleissä.

Kokeet suoritettiin pienimittakaavaisina 1 m^3:n kopilla. Kopin pienestä koosta huolimatta voidaan tulosten olettaa olevan samansuuntaisia täysimittakaavan rakennuksissa. Kosteuspuskurina toimiva seinäpinta-ala suhteessa kopin tilavuuteen oli laboratoriokokeessa 1:1. Esimerkiksi neliön muotoisessa huoneessa ulkoseinäpinta-alaa on 4 x L x H (sivun pituus L, huonekorkeus H) ja huoneen tilavuus noin L x L x H (m^3). Tällöin jo ulkoseinäpinta-alan ja huonetilavuuden suhde on (4LH)/LLH = 4/L. Sivun pituuden ollessa L = 4 m huonepinta-alaksi tulee 16 m^2 ja seinäpinta-ala/tilavuus-suhteeksi tulee 1. Ulkoseinäpinta-alasta on luonnollisesti poistettava ikkunat, ovet ja muut vastaavat aukot tai tiiviit pinnat mutta vastaavasti siihen on myös lisättävä kattopinta ja muut kosteudenvaihtoon sisäilman kanssa kykenevät materiaalit ja pinnat. Tässä suhteessa mittakaavavääristymää ei kokeessa ole.



Kuva 6.13. Huokoisella puukuitulevyllä (HPKL), vanerilla tai höyrynsulkumuovilla sisäpinnoilta pinnoitetun kopin ilman suhteellinen kosteus ajan funktiona, kun kopin ilmanvaihto on 0,5 vaihtoa tunnissa ja tuloilman suhteellinen kosteus vaihtelee 45 % ja 80 % välillä porrasmaisesti. Tulokset laskennallisia (laskentaohjelma LATENITE /3/).



Kuva 6.14. Huokoisella puukuitulevyllä (HPKL), vanerilla tai höyrynsulkumuovilla sisäpinnoilta pinnoitetun kopin ilman suhteellinen kosteus ajan funktiona, kun kopin ilmanvaihto on 0,5 vaihtoa tunnissa ja tuloilman suhteellinen kosteus vaihtelee 50 % ja 85 % välillä porrasmaisesti. Laboratoriokoetulokset 1 m^3 koppikoolle. Kosteuden mittaus tehty Tinytalk-tiedonkerääjillä (suhteellinen kosteus).

6.2.6 Massiivisen hirsirakenteen käyttäytyminen

Massiivisen hirsirakenteisen talon seinärakenteiden vaikutusta sisäilman lämpö- ja kosteuskäyttäytymiseen tarkasteltiin laskennallisesti rakennustason laskentamallilla. Tavoitteena oli selvittää voiko suuren kosteuskapasiteetin omaaviin ulko- tai väliseiniin varastoitua ja niistä purkautua kosteutta sisäilmaan a) päivittäisissä sisäilman kosteusvaihteluissa, b) vuositasolla kesä-talvi-syklissä. Sisäilman kosteus oletettavasti säilyy tasaisempana muuttuvissa kuormitusoloissa, mikäli kosteudensiirtoa esiintyy merkittävässä määrin sisäilman ja rakenteiden välillä.

Seuraavassa on kyseessä pelkistetty laskentatapaus, jossa ikkunoiden kautta tulevia säteilykuormia ei ole otettu huomioon.

Analysoidut rakennukset: hirsirakennus ja kevytrakenteinen rakennus

Laskettava hirsirakennuksen osa muodostui seuraavista komponenteista.

Huonetila

12 m^2 makuuhuone, henkilökuormitus 2 hlö 23 - 07 tuottaen 120 W, vesihöyryä 60 g/h ja CO_2 430 ml/min

Rakenteet

Ulkoseinä: 200 mm hirsi + rakennuspaperi/höyrynsulkumuovi + lauta
Väliseinä: 200 mm hirsi (adiabaattireunaehto keskellä)

Laskentatapaukset

A) 2 ulkoseinää, 2 väliseinää (ulkoseinät Etelä/Länsi), maalaamattomat pinnat

B) 4 ulkoseinää, maalaamattomat pinnat

C) kuten A, mutta maalatuilla pinnoilla (kosteudensiirtokerroin 57 ng/s,Pa,m^2)

D) vertailtava kevytrakenteinen rakennus

Ulkoseinät
18 mm lauta, 18 mm ilmarako, 12 mm huokoinen kuitulevy, 150 mm mineraalivillaa, 12 mm lastulevy, 0,2 mm rakennuspaperi, 12 mm kipsilevy, maalipinta (tapauksessa C)

Väliseinät
pinnalla 12 mm puuta, 90 mm eristettä (adiabaattireunaehto)

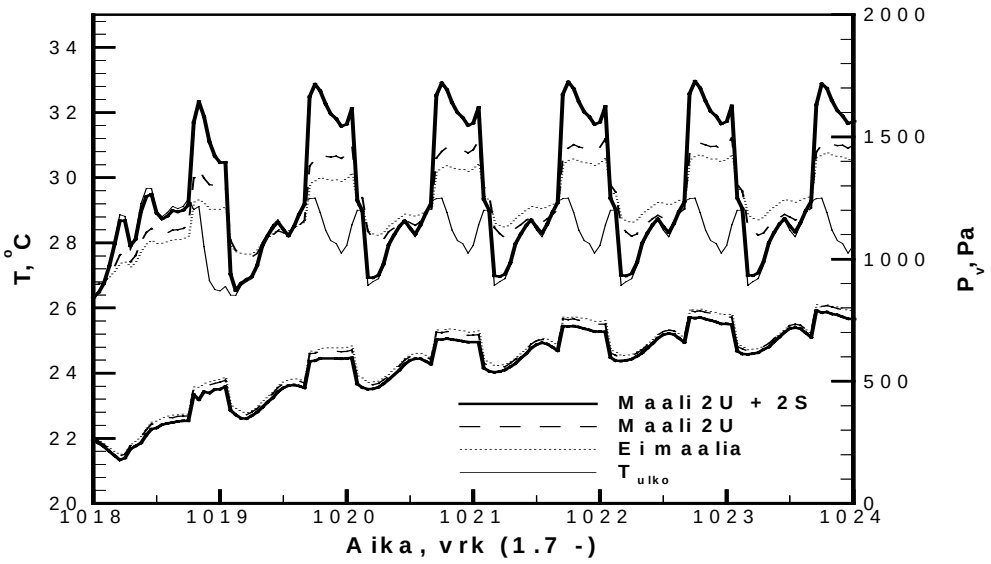
Ulkoisina säätietoina käytetään VTT:n Otaniemen koetaloalueen säätietoja ajalta 1.7.1995 - 30.6.1996.

Sisäilman kosteuden käyttäytyminen ajan funktiona

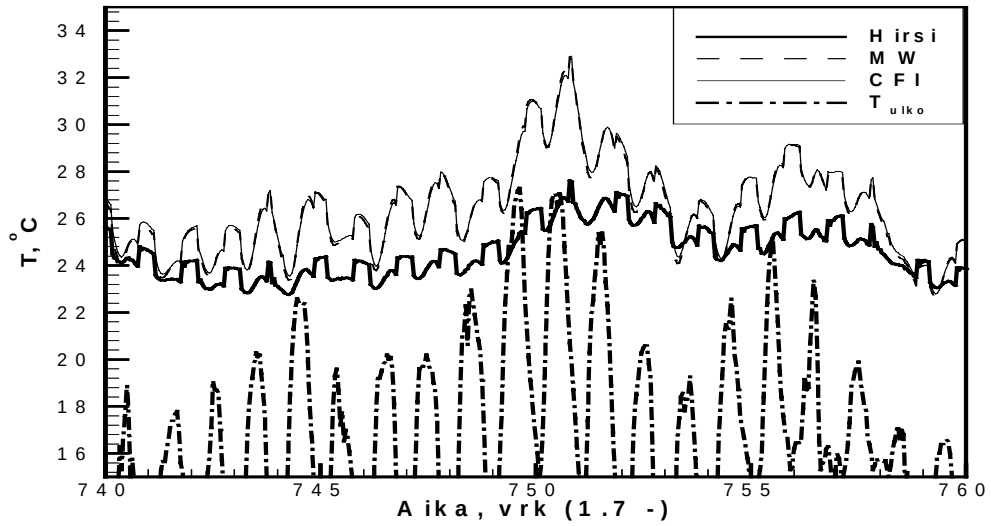
Sisäilman kosteus ajan funktiona sisäpinnoilta maalaamattomassa ja maalatussa hirsirakennuksessa (2U= ulkoseinät maalattu, 2S= sisäseinät maalattu) on esitetty kuvassa 6.15.

Sisäilman lämpötilan kehittyminen ulkolämpötilan ja säteilykuorman vaikutuksesta

Sisäilman lämpötilan kehittyminen hellejaksolla hirsitalon sekä kevytrakenteisen talon makuuhuoneessa on esitetty kuvassa 6.16. Jälkimmäisessä on lämmöneristeenä 150 mm sellukuitu- tai mineraalivillaeristettä. Kuvasta voidaan selvästi havaita hirsitalon lämpökapasiteetin (ja suuremman U-arvon) vaikutus sisäilman lämpötilaan.



Kuva 6.15. Sisäilman lämpötila ja vesihöyryn osapaine hirsirakennuksen makuuhuoneessa, jonka seinäpinnat ovat maalaamattomat, kaksi seinää maalattu tai kaikki seinät maalattuja. Ajankohta on toukokuu.

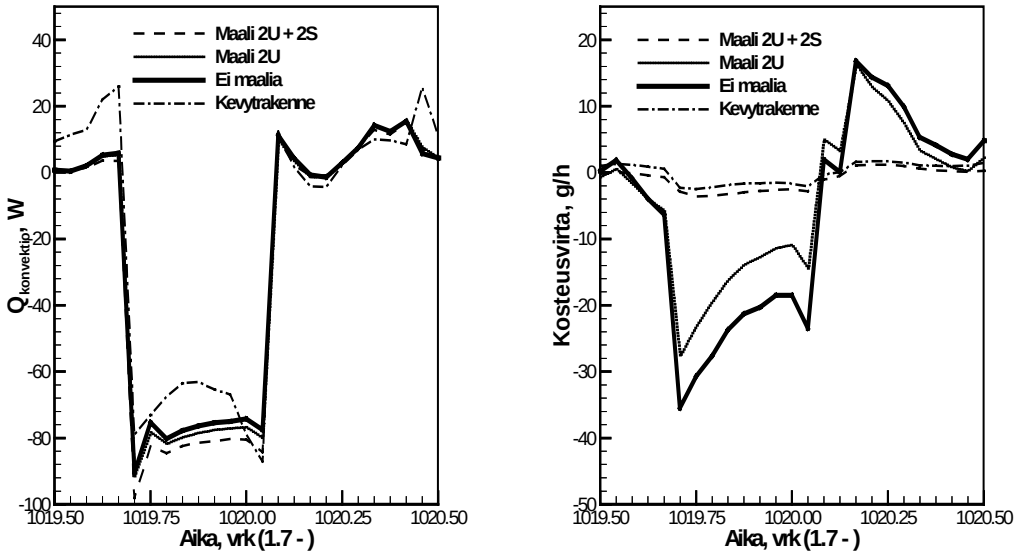


Kuva 6.16. Hellejakson aikainen sisäilman lämpötila massiivisessa hirsirakennuksen ja kevyen puurunkorakennuksen huoneessa. Nurkkahuone, jossa on kahden henkilön miehitys öisin klo 23 - 07. Ilmanvaihto on 0,5 1/h ja ajankohta on elokuu.

Kosteuden vaihto rakenteiden ja sisäilman välillä

Rakenteiden pinnan merkitys rakenteiden ja sisäilman välisessä kosteuden vaihdossa on esitetty kuvassa 6.17. Maalaamattomien rakenteiden pinnan kosteuskapasiteetti toimii sisäilman kosteusvaihteluita tasapainottavana tekijänä, jos pinta on kosteutta hyvin läpäisevää. Pari maalikerrosta esimerkiksi kipsilevyn pinnalla voi kuitenkin tyypillisesti muodostaa kalvon, jonka kosteudenläpäisykerroin on esimerkiksi n. 50 - 100 · 10^{-12} kg/m^{2}sPa, kun maalaamattomalla pinnalla ilman rajapintakerroksen läpäisykerroin on luokkaa 2000 · 10^{-12} kg/m^{2}sPa.

Massiivisen rakenteen ja sisäilman välinen lämmönsiirto watteina on esitetty kuvassa 6.17 A kolmelle eri tapaukselle: 1) väli- ja ulkoseinien sisäpinnat on maalattu (2U + 2S), 2) vain ulkoseinien sisäpinnat on maalattu (2U), 3) kaikki seinät maalaamattomia. Termisen massan vaikutuksen vertaamiseksi on kuvassa esitetty lisäksi tulokset kaikilta pinnoiltaan maalatulle kevyelle rakenteelle (Kevytrakenne). Kuvassa 6.17 B on esitetty vastaavasti samalta aikajaksolta seinärakenteiden ja sisäilman välinen kosteudenvaihto grammoina tuntia kohden.



A B

Kuva 6.17. Lämmön (kuva A) ja kosteuden (kuva B) vaihto sisäilman ja hirsiseinien välillä yhden vuorokauden aikana makuuhuoneessa, jossa on kahden henkilön miehitys klo 23 - 07. Y-akselilla positiivinen arvo merkitsee virtauksen suuntaa seinistä sisäpilmaan. Kuvissa käytetyt merkinnät on selvitetty edeltävässä tekstin kappaleessa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 HÖYRYNSULKU

7.1.1 Käsitteitä ja määritelmiä

Höyrynsulku voidaan käsitteenä määritellä seuraavasti:

Höyrynsululla tarkoitetaan ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen vesihöyryn diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.

Määritelmän mukaan höyrynsulun tehtävänä on hidastaa **vesihöyryn siirtymistä diffuusiolla** rakenteeseen tai rakenteessa niin, ettei rakenteen kosteuspitoisuus missään vaiheessa nouse tästä syystä haitallisen suureksi. Vesihöyryn diffuusio voidaan puolestaan määritellä seuraavasti:

Vesihöyryn diffuusio tarkoittaa kaasuseoksessa (esim. ilma) vakio kokonaispaineessa tapahtuvaa vesihöyrymolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksen höyrypitoisuus- tai höyryn osapaine-eroja.

Vesihöyryn diffuusio ilmassa tapahtuu ilman muista kaasuista sekä painovoimasta riippumattomasti ja perustuu höyrymolekyylien satunnaiseen itsenäiseen liikehdintään (lämpöliike). Täten yksittäisen molekyylin liikkumissuuntaa on mahdoton ennustaa. Sen sijaan suuressa joukossa liike tapahtuu niin, että paikalliset höyrypitoisuuserot tasoittuvat. Molekyylien nettosiirtyminen tapahtuu alenevan höyrynpaineen suuntaan.

Edellä kuvatun mukaisesti vesihöyryn diffuusio ei edellytä kaasuseoksen liikkumista, mikä ilmenisi esim. havaittavana ilmavirtauksena. Toki diffuusiota voi tapahtua viskoosina virtauksena liikkuvassa ilmassakin, mutta ei siksi, että ilma on kaasuseoksena liikkeessä.

Diffuusion fysikaalisesta luonteesta johtuen siirtyvän höyryvirran suuruus riippuu siirtymisreitillä olevien ainekerrosten vesihöyrynvastuksesta ja siirtymistien pinta-alasta. Rakenteessa höyrynsulun tulisi yleensä peittää siirtymistien pinta-ala kokonaan. Jos höyrynsulussa on kuitenkin vähäisiä rakoja ja reikiä, joiden osuus kokonaispinta-alasta on mitätön, ei vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla rakenteeseen juurikaan lisäänny. Sen sijaan, jos höyrynsulun tulisi toimia ilmansulkuna (katso kohta 7.2) ja estää vesihöyryä sisältävän ilman vuotaminen rakenteeseen, ovat vähäisetkin raot ja reijät kiusallisia. Höyryn siirtyminen tapahtuu tällöin konvektiona virtaavan ilman mukana eikä diffusoitumalla.

Saattaa vaikuttaa oudolta, ettei höyrynsululta välttämättä kaikissa oloissa vaadittaisi reijättömyyttä ja tiiveyttä myös ilmavuotojen kannalta. Tällainen vaatimus tulee kuitenkin kohdistaa ilmansulkuun ja nähdä oikein ilmansulun tehtävä rakenteeseen suuntautuvan vesihöyryn konvektion rajoittajana. Jos rakenteessa on toimiva ilmansulku riittää vesihöyryn diffuusion rajoittamisen kannalta se, että höyrynsulku peittää käytännöllisesti katsoen koko rakenteen pinta-alan. Tällainen höyrynsulku voi olla sivelty ainekerros, rakenteessa oleva kalvo tai paksumpi

runkona, sisäverhouksena tai lämmöneristeenä toimiva ominaisuuksiltaan sopiva ainekerros. Jos höyrynsulun tulee toimia myös ilmansulkuna, on höyrynsulun **oltava kokonaisuudessaan ja yksityiskohdiltaan ilmanpitävä ilmansulun vaatimusten mukaan.**

7.1.2 Höyrynsulun vaatimukset

Suomessa on käyty runsaasti keskustelua höyrynsulullisista ja -suluttomista rakenteista. Tässä keskustelussa on ainakin ajoittain ollut vastakkainasettelua, joka perustuu käytännön rakennustoiminnassa omaksuttuun käsitteistöön, jolloin fysikaaliset perusteet ovat hämärtyneet. Tuloksettomin on keskustelu silloin, kun höyrynsululla tarkoitetaan muovikalvoa ja höyrynsuluttomuudella sitä, että muovikalvoa tai vastaavaa ei käytetä. Tällainen määrittely ei sovellu moniin yleisesti käytettäviin toimiviin rakenneratkaisuihin. Asia vain on keskusteluissa fokusoitunut liiaksi kevyeen rankarakenteiseen seinään.

Vastakkainasettelun sijaan asiaa voidaan lähestyä toiminnallisten vaatimusten kautta käyttäen fysikaalisesti määriteltyjä käsitteitä. Kaikilta rakenteilta tulee edellyttää, ettei vesihöyryn diffuusiosta saa aiheutua rakenteille tai rakennuksen käytölle suunnitelmien vastaista haittaa. Suomen ilmasto-oloissa tällainen vaara on ilmeinen. Näin ollen meillä on aina lähdettävä siitä, että vesihöyryn diffuusio rakenteisiin on hallinnassa ja suuruudeltaan vaaraton. Kaikissa vaipparakenteissa tulee toteutua se, ettei lämpimältä puolelta diffusoituva vesihöyry johda höyrynpaineen ja suhteellisen kosteuden haitalliseen nousuun rakenteen sisällä suunnitelmien mukaisissa käyttöoloissa. Yleisesti tämä toteutuu noudattamalla periaatetta, jonka mukaan rakenteen lämpimässä osassa on suurempi höyrynvastus kuin kylmällä puolella. Poikkeuksiakin käytännössä on, mutta niiden menestys perustuu rakenteeseen suuntautuvan diffuusion lähes täydelliseen estämiseen tai ajoittaisen kosteuskeräytymän sallimiseen, jolloin kylmälläkin puolella voi olla tiivis kerros.

Toiminnallinen ajattelutapa johtaa väistämättä siihen johtopäätökseen, että kaikissa rakenteissa tarvitaan ainekerros tai kerroksia vesihöyryn diffuusion hidastamiseen. Tätä aine- tai rakennekerrosta voidaan perustellusti kutsua höyrynsuluksi. Meidän tulee vain tietää höyrynsulun höyrynvastukselle asetettava vaatimusarvo ja löytää ratkaisu vaatimuksen toteuttamiseen. Tästä näkökulmasta katsoen Suomessa ei voida käyttää menestyksellä höyrynsuluttomia rakenteita, mutta toteutus voi olla muutakin kuin muovikelmu tai vastaava.

Tässä tutkimuksessa on lähdetty hakemaan määrällistä vaatimusta höyrynsulun vesihöyrynvastukselle, kun rakenteessa on avohuokoinen vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevä lämmöneristys kuten mineraalivilla tai sellukuitueristys. Tarkastelut on tehty kerroksellisella rakenteella, jossa lämmöneristyksen kummassakin pinnassa on ohut höyrynvastukseltaan tunnettu ainekerros, jolla ei ole lainkaan kosteuden sitomiskykyä. Tämä olettamus lisää johtopäätösten turvallisuutta, sillä se nopeuttaa kosteuden paikallisen keräytymähuippujen muodostumista.

Kohdan 5.1 tulosten mukaan höyrynsulun höyrynvastukselle voidaan Suomessa asettaa seuraava vaatimus:

Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan aine- tai rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen on oltava lämmityskauden toimintaoloissa vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan aine- tai rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen. Ellei tämä vaatimus toteudu, on rakenteeseen lisättävä erillinen höyrynsulku, jonka höyrynvastuksen on oltava riittävän suuri vaatimuksen toteuttamiseksi.

Esitetty vaatimus koskee kaikkia rakenteita, joissa on hyvin vesihöyryä läpäisevä avohuokoinen lämmöneristys. Edellä viitattiin joihinkin poikkeuksiin. Näiden toimivuudesta olisi yleensä hyvä varmistua erillisellä tutkimuksella.

Puun ja puupohjaisten rakennusaineiden ja tuotteiden vesihöyrynjohtavuus riippuu epälineaarisesti kosteuspitoisuudesta ja ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Normaalia on, että vesihöyrynjohtavuus kasvaa suhteellisen kosteuden noustessa ja erityisen voimakkaasti korkean kosteuden alueella. Tällaisesta aineesta tehdyn kerroksen vesihöyrynvastus vaihtelee vuodenaikojen mukana. Lämmöneristyksen lämpimällä puolella on lämmityskaudella kuivaa ja vastaavasti kylmällä puolella suhteellinen kosteus suurimmillaan. On mahdollista, että monet vesihöyrynvastuksen suhteen verraten symmetrisiltä vaikuttavat rakenteet, joissa on samankaltaisia kerroksia lämmöneristyksen kummallakin puolella, ovat toimivia juuri tästä syystä. Selvää on kuitenkin, että niissä rakenteen kosteuspitoisuus kohoaa talvella enemmän kuin käytettäessä hieman diffuusiotiiviimpää sisäverhousta.

Kohdan 4.1 mukaan tyypillinen höyrynsulkumuovi on diffuusiotiiviydeltään 100...1000 kertainen verrattuna huokoisiin rakennuspapereihin tai yleisesti käytettäviin tuulensuojatuotteisiin. 7 μm paksu alumiinifolio on muovikelmua vielä pari kertaluokkaa tiiviimpi. Tällaiset tuotteet ovat olennaisesti edellä esitettyä vaatimusta diffuusiotiiviimpiä ja siten soveltuvia höyrynsuluksi. Ne kuitenkin estävät huoneilman ja rakentessa niiden ulkopuolella olevan osan välisen kosteudensiirron tehokkaasti. Tästä ei ole haittaa, mikäli sisäilman laatu ja kosteus hallitaan suunnitellusti ilmanvaihdon avulla. Kylmänä kautena kosteus tiiviin höyrynsulun ulkopuolinsessa rakenteessa ei juuri sisäilman vesihöyryn diffuusion takia lisäänny.

Höyrynsulun tulee sijaita rakenteen sellaisessa kohdassa, ettei suhteellinen kosteus nouse liian korkeaksi höyrynsulun lämpimällä puolella. Varmin paikka on lämmöneristyksen lämmin puoli.

Rankarakenteisissa seinissä on höyrynsulku viety usein 50 mm syvyyteen lämmöneristyksen lämpimästä pinnasta. Perusteluna on se, ettei tarvita läpivientejä, jolloin höyrynsulku säilyy ehyempänä. Tällaiset perustelut viittaavat luonnollisesti ilmansulkuun ja ovat siinä mielessä järkeviä.

Laskennallisesti on helppo osoittaa, että lämmöneristyksen sisään asennettu höyrynsulku on turvallinen, jos ulkopuolella on paksumpi osa eristystä (väh. 100 mm). Käytännössä riskejä voi kuitenkin aiheutua useista syistä, kuten

- paikallinen työvirhe lämmöneristyksen ulko-osassa

- paikallinen kylmäsilta höyrynsulun ulkopuolisessa rakenteessa

- höyrytiiviin kerroksen asentaminen rakenteen sisäpintaan, jolloin väliin mahdollisesti pääsevä kosteus ei voi kuivua (ulkoseinään rajoittuvat märkätilat, diffuusiotiivis maalaus).

Mainituista riskeistä johtuen voitaisiinkin ajatella, että lämmöneristyksen sisään tehdään haluttaessa vesihöyryä diffuusiolla hyvin läpäisevä ilmansulku ja varsinainen höyrynsulku tehdään lähelle rakenteen sisäpintaa. Tällöin haluttu tavoite toteutuu olennaisesti pienemmillä riskeillä. Lisäksi paksussa lämmöneristyksessä sisään viety ilmansulku vähentää luonnollisen konvektion lämpöteknisiä haittoja.

7.2 ILMANSULKU

7.2.1 Käsitteitä ja määritelmiä

Käsite ”ilmansulku” on Suomessa rakennusalan sanastossa verraten tuore, mutta tunnetaan hyvin esim. Kanadassa (air barrier). Ilmansulku voidaan määritellä seuraavasti:

Ilmansulku tarkoittaa rakennuksen vaipassa olevaa ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi puolelta toiselle tai sisäpuolelta rakenteen kautta takaisin sisäpuolelle.

Määritelmänsä mukaan ilmansulun tulee olla systeeminä riittävän tiivis. Sekä ilmansulun tekemiseen käytettävän ainekerroksen että ilmansulun epäjatkuvuuskohtien (saumat, läpiviennit) tulee olla tiiviitä, niin ettei haittoja aiheudu.

Epätiiviyden haitat voivat olla moninaisia.

- rakennuksen painesuhteita ei hallita eikä rakennusta kyetä pitämään ilmanvaihtojärjestelmällä alipaineisena talvella
- ilmanvaihdon hallittavuus heikkenee sekä rakennus- että huonetilakohtaisesti
- vuotoilmanvaihdon lisääntyminen aiheuttaa epäviihtyisyyttä ja energiankulutuksen lisääntymistä
- lämpimän ja kostean huoneilman virtaaminen kylmempään rakenteeseen aiheuttaa jatkuessaan paikallisesti vakavan kosteusriskin

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu ilmavuotoja ja niihin liittyvää paikallista kosteusriskiä. Kohtien 5.2 ja 5.3 tulosten valossa pitkäkestoista jatkuvaa sisäilman vuotoa rakenteen läpi ei voi hyväksyä, koska vesihöyryn konvektio johtaa nopeasti paikalliseen haitalliseen kosteuskeräytymään lämmityskaudella. Vesihöyryn konvektio voidaan määritellä seuraavasti:

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa kaasuseoksen (esim. ilma) sisältämän vesihöyryn siirtymistä kaasuseoksen mukana sen liikkuessa kokonaispaine-eron vaikutuksesta.

Rakenteeseen lämpimältä puolelta vuotava ilma jäähtyy vuotoreitillä ja samalla suhteellinen kosteus kasvaa ja kondenssitilanne saavutetaan helposti. Rakenteeseen paikallisesti muodostuva kosteuskeräytymä voi syntyä nopeasti ja olla myös suuri.

Käytännössä usein korostetaan yläpohjan höyrynsulun merkitystä ja sen saumojen ja läpivientien tiiviyden tarvetta. Tämä on oikein, mutta terminä pitäisi olla ilmansulku. Painovoima ei vaikuta lainkaan vesihöyryn diffuusioon, mutta aivan olennaisesti ilmavirtauksiin ja vesihöyryn konvektioon. Onkin ilmeistä, että valtaosa sisäilman vesihöyryn aiheuttamista kosteusvaurioista rakenteissa on seurausta haitallisesta vesihöyryn konvektiosta. Tyypillinen esiintymispaikka on rakennuksen yläosat, joihin helposti muodostuu pitkäaikainen terminen ylipaine talvisin.

7.2.2 Ilmansulun vaatimukset

Rakennuksen vaipan tiiviysvaatimuksia on pohdittu Suomessa eri näkökulmista jo parinkymmenen vuoden ajan. Lukuarvoin määriteltyä vaatimusta ei kuitenkaan ole rakentamismääräyksissä annettu. Tärkein syy lienee se, ettei rakenteiden suunnitteluvaiheessa kyetä riittävän tarkoin arvioimaan saavutettavaa lopputulosta. Tämä voidaan selvittää vasta jälkikäteen mittauksin. Tilanne poikkeaa olennaisesti esim. lämmöneristystä koskevien määräysten antamisesta. Ratkaisu voisi olla se, että lopputuloksen sijaan tiiviysvaatimukset tulisi kohdistaa suunnittelun ja rakentamisen prosessiin, jolloin edellytettäisiin ilmansulun suunnittelua ja toteuttamista suunnitelman mukaan. Saavutettavaa tiiviystasoa ei kyetä ennustamaan, mutta muutos aikaisempaan verrattuna on oikean suuntainen.

Kosteusteknisestä näkökulmasta katsoen rakennuksen sisäilman tulisi olla pääsääntöisesti lievästi alipaineinen ulkoilmaan nähden. Tämä vaatimus voi toteutua vain, jos rakennuksen ilmansulku on riittävän tiivis. Tällöinkin tilanne voi muuttua ylipaineiseksi, mikäli koneellisen ilmanvaihdon sisäänpuhallus on liian suuri.

Rakennusvaipan ja samalla ilmansulun tiiviyttä voidaan kuvata ns. painekokeen tuloksella. Tavallisesti painekokeessa aiheutetaan puhaltimella 50 Pa paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkoilman välille ja samalla mitataan kokonaisilmavirta puhaltimen kautta. Kun kaikki suunnitelmien mukaiset aukot on suljettu, tapahtuu vastaava ilmavirtaus vaipan läpi erilaisten suunnittelemattomien vuotorakojen kautta. Painekokeen tuloksena ilmoitetaan yleensä kuinka suuri osa rakennuksen tilavuuden edustamasta ilmamäärästä vuotaa tunnissa vaipan läpi. Tälle ilmavuotoluvulle (n_{50}) on esitetty suositeltavia tavoitearvoja, joista käsin voidaan johtaa ilmansulun tekemiseen käytettävälle ainekerrokselle ilmanläpäisykertoimen enimmäisarvo.

Tarkastelun kohteeksi valittiin 100 m^2 kokoinen pientalo, jossa vaipan pinta-ala mukaanlukien alapohja on 300 m^2 ja jonka sisätilavuus on 250 m^3. Ikkunoita ja ovia ei tarkastelussa otettu huomioon. Lähtökohdaksi asetettiin painekokeen tulos 1 1/h, mikä edustaa verraten tiivistä pientaloa ja on hyväksyttävä tiiviystaso, katsottiin asiaa mistä näkökulmasta tahansa. Edelleen oletettiin, että tämä tiiviystaso saavutetaan pelkästään hyvän ilmansulun ansiosta niin, ettei muilla vaipan ainekerroksilla ole vaikutusta asiaan.

Painekokeen tulos edustaa vuotovirtausta 250 m^3/h (0,0694 m^3/s) ja tämän vuodon oletetaan jakautuvan tasaisesti koko vaipan ja ilmansulun alueelle. Kun paine-ero on 50 Pa ja vaipan pinta-ala 300 m^2, saadaan ilmansulun ilmanläpäisykertoimelle arvo $4{,}63 \cdot 10^{-6}$ $m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$. Käytännössä tämä lukuarvo edustaa ilmansulun tiiviyttä systeeminä ja pitää näinollen sisällään erilaisten rakojen kautta sekä itse ilmansulkumateriaalin läpi vuotavan ilmavirtauksen vaikutuksen. Jos oletetaan, että puolet ilmavuodosta tulee ikkunoiden ja ovien kautta ja että puolet varsinaisen ilmansulkukerroksen läpi tulevasta vuodosta tapahtuu ilmansulun epäjatkuvuuskohtien kautta saadaan ilmansulkukerroksen valmistamiseen käytettävän ainekerroksen ilmanläpäisykertoimelle suositusarvo. **Rakennuksen vaipan ilmansulku suositellaan tehtäväksi ainekerroksesta tai kalvomaisesta tuotteesta, jonka ilmanläpäisykerroin on enintään $1 \cdot 10^{-6}$ $m^3 / (m^2 \cdot s \cdot Pa)$**. Tämä lukuarvo on kertaluokkaa pienempi kuin aikaisemman tutkimuksen perusteella annettu vastaava suositus tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen enimmäisarvoksi /36/.

7.3 RAKENTEEN KUIVUMISKYKY

Rakennusten ja rakenteiden kosteusteknisessä suunnittelussa ja mitoituksessa on perinteisesti pyritty arvioimaan ratkaisujen toimivuus käyttötarkoituksesta ja ulkoilmastosta johdettavissa mitoittavissa toimintaoloissa. Rakenteen pysyminen riittävän kuivana suunnitelmien mukaisessa käytössä on välttämätön mutta ei aina riittävä ehto sille, ettei kosteusongelmia esiinny. Näitä voi syntyä poikkeuksellisten, suunnitelmien vastaisten kosteusrasitusten seurauksena.

Rakennusten pitkäikäisyydestä johtuen voidaan perustellusti ajatella, että poikkeuksellisia kosteusrasituksia esiintyy suurella todennäköisyydellä joko rakennusvaiheen tai käytön aikana.. Syynä voi olla kastuminen työmaaoloissa, voimakas myrskysade, vesivahinko, putkivuoto tms., jolloin rakenteisiin pääsee lyhyessä ajassa runsaasti kosteutta. Kosteuslähteen poistuttua joudutaan arvioimaan rakenteen kuivumista. Tämän tulisi tapahtua nopeasti niin, ettei varsinaisia haittoja ehdi muodostua mahdollisten esteettisten vaurioiden lisäksi. Vaihtoehtoina ovat rakennetta aktiivisesti kuivattavat toimenpiteet tai rakenteen kuivuminen itsestään. Jälkimmäisestä ei juuri aiheudu kustannuksia, mutta kuivumiskykyyn tulee voida luottaa.

Rakenteen hyvä kuivumiskyky on eduksi myös silloin, kun rakenteessa on vähäinen virhe, jonka seurauksen rakenteeseen pääsee jatkuvasti käytön aikana suunniteltua enemmän kosteutta. Jos kosteus ylimääräisestä kuormituksesta huolimatta pääsee helposti poistumaan, ei varsinaista vauriota pääse välttämättä muodostumaan. Selvää on kuitenkin se, ettei hyvä kuivumiskyky oikeuta huolimattomuuteen, vaan rakenteet tulee suunnitella ja toteuttaa hyvän rakentamistavan mukaan. Hyvä vikasietoisuus antaa kuitenkin kosteusteknistä toimintavarmuutta.

Hyvällä kuivumiskyvyllä tarkoitetaan rakenteeseen satunnaisesta syystä muodostuneen kosteuskeräytymän mahdollisuutta poistua eri mekanismeilla (vesihöyryn diffuusio ja konvektio, veden kapillaarivirtaus ja painovoimainen valuminen) niin, että kosteuden vaikutusaika rakenteessa jää vaurioiden muodostumisen kannalta mahdollisimman lyhyeksi. Hyvän kuivumiskyvyn rakenteelle ovat ominaisia seuraavan kaltaiset piirteet:

- Rakenne ja sen ontelot on suunniteltu niin, ette sisään päässyt vesi lammikoidu vaan valuu rakenteen ulkopuolelle siinä määrin kuin vesi voi painovoimaisesti virtaamalla poistua. Veden poistumista voidaan auttaa erilaisin kallistuksin ja viemäröintijärjestelyin.

- Vesi, joka ei pääse valumalla poistumaan rakenteesta, voi helposti höyrystyä ja siirtyä nopeastii vesihöyryn diffuusion tai konvektion välityksellä ulkopuolelle tai tämän lisäksi kapillaarisesti virtaamalla sopivaan höyrystymis- tai valumiskohtaan poistuakseen rakenteesta.

Kuivumiskyvyn kannalta edullisia ratkaisuja ovat hyvin toimivat rakenteen tuuletusjärjestelmät, vesihöyryä diffuusiolla ja vettä kapillaarisesti hyvin läpäisevät ainekerrokset lämmöneristyksen ulkopuolella julkisivurakenteella viistosateen tunkeutumiselta suojattuina. Auringon säteilyn absorptio rakennuksen vaipan ulkopintaan on Suomen oloissa merkittävää rakenteiden kuivumisen kannalta. Se tehostaa tuuletusvälien toimintaa silloin, kun tuuletusilman sisääntulo- ja poistumiskohtien välillä on korkeusero ja höyrystää rakenteissa lähellä ulkopintaa mahdollisesti olevaa vettä. Tosin kesäaikana on tietyissä oloissa mahdollista, että höyryä siirtyy höyrystymiskohdasta myös rakenteiden sisäosiin, mutta meidän ilmastossamme tällaiset ilmiöt ovat lyhytkestoisia ja tuskin lainkaan ongelmallisia.

Hyvin toimivalla tuuletusvälillä tarkoitetaan ratkaisua, jossa koko rakennusosa on tuuletusilmavirran kuivattavan vaikutuksen alainen ja jossa tuuletusilmavirta on tarpeeseen nähden riittävä. Tuuletusvälien ilmavirtausteknisestä mitoittamisesta on kuitenkin varsin vähän tietoa. Erityisesti, jos osa tuulettuvaksi ajatellusta ilmavälistä ei ole selkeästi tuuletusvirtauksen sisääntulo- ja poistumiskohtien välisellä alueella (esim. ulkoseinän tuuletusväli valesokkelin kohdalla), tulee ratkaisun toimivuuteen suhtautua kriittisesti.

Vesihöyryä hyvin diffuusiolla läpäisevä tuulensuoja on tyypillisesti avohuokoinen myös pakkasella vesihöyryä johtava ainekerros, jonka ilmanläpäisykertoimen ei tulisi olla suurempi kuin $10 \cdot 10^{-6}$ m^3 / ($m^2 \cdot s \cdot Pa$). Mikäli tuulensuojakerroksen kosteudenläpäisykykyä erityisesti lämmityskauden oloissa halutaan parantaa, on eräs keino varustaa tuulensuoja ohuehkolla jäykähköllä ulkopuolisella mineraalivillaeristyksellä. Tällöin tuulensuojakerroksen toimintalämpötila nousee ja mikäli rakenteessa on höyrystyvää kosteutta, höyrynpaine-ero tuulensuojan yli kasvaa olennaisesti. Nämä kumpikin tekijä vaikuttavat siihen, että rakennetta kuivattava höyryvirta tuulensuojan läpi kasvaa merkittävästi verrattuna siihen, että tuulensuojakerros on lämmöneristyksen ulkopinnassa.

Kuivumiskyvyn kannalta huonoja ovat ratkaisut, joissa:

- osa rakenteesta jää kahden vesihöyryn- ja kosteudenläpäisyn kannalta tiiviin ainekerroksen väliin.

- lämmöneristyksen ulkopuolella (kylmä puoli) olevan ainekerroksen höyrynvastus on suurehko.

- lämmöneristyksen ulkopuolella (kylmällä puolella) on jatkuvasti korkea suhteellinen kosteus (monet maanvastaiset rakenteet).

Jos osa rakenteesta on kosteutta huonosti läpäisevien pintojen välissä, on suunnitelmissa (ja myös rakennuksen käytössä) lähdettävä siitä, etta kyseinen rakenteen osa säilyy jatkuvasti riittävän kuivana. Mikäli vettä kuitenkin pääsee rakenteeseen, se jää sinne pitkäksi ajaksi, jolloin on otettava huomioon vaurioitumisen mahdollisuus. Yleensä tilanne vaatii aktiivisia toimenpiteitä rakenteen kuivattamiseksi. Esimerkkejä riskiratkaisuista ovat mm. veden- tai kosteudeneristyksellä varustetun märkätilan seinän sijoittaminen höyrynsululla varustettua ulkoseinää vasten, tuulettumaton tasakattorakenne ja ulkoseinä, jonka varsinainen höyrynsulku on asennettu lämmöneristyksen sisään ja jonka sisäpintaan on asiaa tiedostamatta maalattu tai tapetoitu toinen höyrynsulku.

Mikäli rakenne on suunniteltu niin, että lämmöneristyksen ulkopuolella on suurehko höyrynvastus, ei tällainen rakenne kuivu kovin nopeasti satunnaisesta kosteuskuormasta lämmityskauden aikana. Tiiviin ulkokuoren sisäpinnassa laskee kylläinen höyrynpaine lämpötilan laskiessa ja rakenteen lämpimämmissä osissa oleva kosteus siirtyy kylmään päin ja jää tiiviin kuoren taakse. Avohuokoisen lämmöneristyksen hygroskooppisuudesta riippumatta on tällainen rakenne riskiratkaisu jo suunnitelmien mukaisissa käyttöoloissakin.

Maanvastainen alapohja, jonka lämmöneristys on kokonaan tai suurimmaksi osaksi pohjalaatan yläpuolella on saatujen tulosten mukaan huonosti kuivuva. Suhteellinen kosteus pysyy jatkuvasti korkeana laatan yläpinnassa, jos yläpuolisessa rakenteessa on alkuun ollut kosteutta tai lattiaan pääsee vettä. Kuivattaminen edellyttää aktiivisia toimenpiteitä. Ongelma vältetään sijoittamalla lämmöneristys kokonaisuudessaan betonilaatan alle. Mikäli pelätään lattiapinnan kylmyyttä (reuna-alueet) ja halutaan koolattu lattia lämpöviihtyvyyden parantamiseksi, tulisi tyytyä ohuehkoon lämmöneristykseen laatan päällä verrattuna alapuoliseen eristykseen.

7.4 HOMEVAURION KRITEERISTÖ

Homeen kasvu on hyvin arkipäiväinen biologinen ilmiö, jota tavataan Suomen luonnossa yleisesti. Erityisesti kosteiden ja riittävän lämpimien sääkausien (loppukesä, syksy) hometta esiintyy kaikkialla luonnossa ja niin myös rakennusten välittömässä ympäristössä. Kun rakennusten sisäilmaa analysoidaan tällaisena kautena, on ymmärrettävää huoneilmasta löytyy lähinnä niitä homeperäisiä emissiotuotteita, jotka löytyvät myös ulkoilmasta.

Kun rakennukset rakennetaan suojaamaan sisäilmaa ulkoiselta säältä, kohdistuvat säärasitukset rakennusten vaipan ulko-osiin. Tällöin on varsin odotettua, että ulkoilmaan rajoittuvissa vaipan pinnoissa voi myös esiintyä säätilasta riippuen jonkinasteista homeen kasvua kuten rakennuksen ympäristössäkin. Kohdan 3 mukaan tämä on jopa luonnollista, mikä myös ilmeni homehavainnoista kenttänäytteissä. Kaikki näytteet otettiin kosteusteknisesti virheettömiksi tunnistetuista rakenteista läheltä rakennuksen ulkopintaa ja selvästi yli puolessa näytteitä todettiin jonkinasteista homeenkasvua. Täten lienee epärealistista edellyttää rakennuksilta täydellistä homeettomuutta.

Kriteeristön asettaminen tavalla tai toisella rakennusten homeen kasvulle on monesta syystä tarpeen. Meidän tulee tunnistaa homevaurio ja erottaa se normaalista

suunnitelmien mukaan toimivan rakenteen luonnollisesta homekasvustosta. Vasta tällöin syntyy edellytykset tehdä oikeita päätöksiä rakenteiden homekorjauksista ja niiden laajuudesta. Asian tekee tavallista vaikeammaksi se, että homeperäisten emissioiden haitat ovat terveydellisiä, jolloin kriteeristön asettamiseen tarvitaan yhtäältä lääketieteellinen ja toisaalta fysikaalinen ja biologinen näkökulma. On luonnollista, että kaikki tietämys ei ole vielä valmiina olemassa, niin että homevaurion kriteeristö voitaisiin määritellä lopullisessa muodossaan. Kuitenkin rakentaa täytyy ja myös korjata rakennuksia.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin puurakenteiden lämpö- ja kosteusteknisiä toimintaoloja sekä suunnitelmien mukaan että virheellisesti toimivissa tapauksissa. Edelleen on luotu valmius laskennallisesti ennustaa rakenteen pintojen homeen kasvua. Laskentatyökalu yhdessä kokeellisten havaintojen kanssa antaa mahdollisuuden täsmentää käsitettä homevaurio lähtien rakennusfysikaalisesta ja -bilogisesta näkökulmasta. Kohdassa 3.3 esitetty kriteeristö perustuu mainittujen näkökulmien parhaaseen tietoon juuri tällä hetkellä. Kun tieto lisääntyy, on varmasti tarvetta kriteeristön uudelleenarviointiin ja täsmentämiseen. Tavoitteena tulisi olla kriteeristö, joka riittävällä varmuudella täyttää kaikista olennaisista näkökulmista asetettavat vaatimukset.

Kriteeristö on tässä tutkimuksessa kehitetty noudattaen seuraavia yleisiä periaatteita:

- Rakenteiden lämpö- ja kosteus- ja ilmavirtaustekninen toiminta tulee olla hyväksyttävien suunnitelmien mukaista.

- Lämpö-, kosteus- ja ilmavirtausteknisesti virheellisesti suunniteltuja tai hyväksyttävän suunnitelman vastaisia virheellisesti tehtyjä rakenneratkaisuja ja niihin näistä syistä muodostuvia homekasvustoja ei tule hyväksyä.

- Rakennuksen ja sen tilojen käytön tulee olla tarkoituksenmukaista. Epätarkoituksenmukaisen käytön seurauksena voi olla kosteus- ja homevaurio. Tällöin vaurion syy tulee tunnistaa niin, että se voidaan eliminoida.

- Homeen esiintymisen kriteeristö tiukentuu siirryttäessä rakenteissa ulkopinnasta sisäpintaan päin.

- Mikäli kosteusteknisesti virheettömään ja oikein käytettävään rakenteeseen, lähinnä sen ulkopinnan tuntumaan muodostuu homekasvustoa, jonka syntyminen perustuu ulkoilman lämpötilan ja kosteuden muodostamaan suotuisaan kasvuympäristöön, voidaan tällainen esiintymä katsoa hyväksyttäväksi.

Edellä kuvatut periaatteet lähtevät siitä yleisestä ajatuksesta, että tekemällä rakenteet ja rakennukset laitejärjestelmineen kosteusteknisesti oikein ja virheettömästi sekä käyttämällä rakennusta käyttötarkoituksen mukaisesti, ei rakenteeseen synny homevaurioina pidettäviä homekasvustoja. Jos kuitenkin rakennuksen jossakin kohdassa esiintyy vähäistä kasvustoa (ulkoilmaan rajoittuvat pinnat, märkätilojen kaakelien saumalaasti yms.), joiden homekasvun välttäminen on käytännössä erittäin vaikeaa, voidaan tällainen kasvusto katsoa hyväksyttäväksi. Kuitenkin erityisesti märkätiloissa tulee edellyttää pintojen hoitoa ja puhdistusta, koska likaantuminen suosii homeen kasvua.

7.5 PUUMATERIAALIEN SISÄILMAVAIKUTUKSET

Tässä tutkimuksessa on analysoitu laskennallisesti ja laboratoriokokein huoneilman ja rakenteiden välistä aineensiirtoa, kun rakenteissa niiden sisäpinnassa on diffuusisesti läpäiseviä tai difuusiotiiviitä ainekerroksia. Erityisesti on tarkasteltu kahden kaasun - hiilidioksidin ja vesihöyryn - kulkeutumista huoneilmasta rakenteisiin tai päinvastoin.

Tutkimuksen tämän osan tavoitteeksi asetettiin rakenteiden ja sisäilman välisen diffuusioaineensiirron käytännöllisten vaikutusten toteaminen. Kokeellisesti verifioitu laskennallinen analyysi osoitti, että makuhuoneen hiilidioksidipitoisuuden yöaikainen maksimiarvo jää varsin merkittävästi pienemmäksi silloin, kun rakenne läpäisee hiilidioksidia hyvin diffuusiolla verrattuna siihen, että rakenteiden sisäpinnat ovat diffuusiotiiviit. Jos huoneen ilmanvaihto on syystä tai toisesta suunniteltua pienempi, korostuu diffuusiopoistuman merkitys.

Hiilidioksidin poistumisesta ei voi vetää suoria johtopäätöksiä etenkään suurimolekyylisiin kaasuihin nähden. Kukin kaasu diffusoituu itsenäisesti oman osapaineeronsa perusteella muista kaasuista riippumattomasti. Täten hiilidioksidi verraten hyvänä diffusoitujana menettää merkitystään ilmanvaihdon toimivuuden indikaattorina silloin, kun poistoilman lisäksi esiintyy poistuminen diffuusiolla. Hiilidioksidiin verrattuna hitaasti diffusoituvien kaasujen kannalta ilmanvaihto on suhteessa merkittävämpi huoneilman puhdistaja.

Huoneilman kanssa vuorovaikutuksessa oleva rakennuspuu ja puuhun perustuvat rakennusmateriaalit vaimentavat tehokkaasti huoneilman suhteellisen kosteuden muutoksia, kun vesihöyryn tuotto huoneessa vaihtelee. Vesihöyryn ajoittaisella sitoutumisella hygroskooppiseen materiaaliin on merkitystä erityisesti hellejaksojen aikana, jolloin ulkoilman höyrypitoisuus ja sisäilman suhteellinen kosteus ovat luonnostaan korkealla. Huonetilassa, jossa ilman kosteuden lähtötaso on korkea tai jossa ilmanvaihto on puutteellinen, on aktiivinen huoneilman kanssa vuorovaikutuksessa oleva hygroskooppinen massa merkittävä mukavuustekijä. Ilmiö on tärkeä myös rakennusviennin näkökulmasta, kun kohdemaassa on lämpimiä ja kosteita sääjaksoja. Hygroskooppisuuden edullinen vaikutus kuitenkin menetetään, jos rakenteen sisäpinta pinnoitetaan tai maalataan höyrytiiviiksi.

Hygroskooppiset rakennusaineet sitovat itseensä ilman kosteutta tai luovuttavat sitä, kun materiaalia ympäröivän ilman suhteellinen kosteus muuttuu. Ilmiö on mielenkiintoinen huoneilman kosteusvaihtelujen kannalta. Kun huoneessa on paljon vapaata puupintaa tai huoneilman vesihöyry pääsee nopeasti diffusoitumaan hygroskooppiseen materiaaliin kuten huokoinen puukuitulevy tai sellukuitueriste, voi huoneilman ja rakennusaineen välillä olla käytännössä merkittävä kosteustekninen vuorovaikutus. Tämä ilmenee siten, että aktiivinen hygroskooppinen massa vaimentaa huoneilman suhteellisen kosteuden muuttumista, kun kosteuden tuotto tilassa vaihtelee. Asuinrakennuksissa mielenkiinto kohdistuu ennen muuta makuuhuoneisiin, joissa kosteus pyrkii yöaikana nousemaan.

Suomessa on pitkä lämmityskausi ja olemme tottuneet arvioimaan rakenteiden tai taloteknisten järjestelmien toimintaa juuri lämmityskautta silmälläpitäen. Tällöin ulkoilman kosteuspitoisuus on pieni ja huoneilma on luonnostaan kuivaa. Huo-

neilman kanssa vuorovaikutteisella hygroskooppisella massalla ei ole lämmityskauden oloissa samaa merkitystä mukavuustekijänä kuin kuin kesällä. Toki huoneilman suhteellisen kosteuden vaihtelu muuttuvissa kuormitustilanteissa vaimenee hygroskooppisen massan ansiosta talvellakin, mutta kaiken aikaa ilma on kesään verrattuna kuivaa.

Kesällä erityisesti kosteiden hellejaksojen aikana nousee huoneilman suhteellinen kosteus luonnostaan korkeaksi. Kun tällaisena aikana esim. makuuhuoneen ilmaan tuotetaan lisää vesihöyryä, voi suhteellinen kosteus nousta epämukavan korkeaksi. Hien haihtuminen iholta estyy ja ilmanvaihto tuntuu riittämättömältä. Ikkunan avaaminen auttaa, mutta katkaisee yöunen. Liikennemelu voi myös estää tuuletuksen. Mikäli hygroskooppinen massa pystyy sitomaan nukkujien aiheuttaman vesihöyryn tuoton, säilyy ilman suhteellinen kosteus fysiologisesti miellyttävämmällä alueella. Korkealla suhteellisella kosteudella on myös ilman laatua heikentäviä vaikutuksia.

Alustavien tulosten valossa huoneilman kanssa aktiivisessa vuorovaikutuksessa oleva hygroskooppinen massa kuten terminenkin massa voi olla merkittävä kesäaikainen mukavuustekijä, jonka merkitys esim. keski-Euroopassa tai Japanissa on Suomeen verrattuna suurempi. Hygroskooppisuuden merkitys voidaan menettää käytettäessä suuren höyrynvastuksen maalipinnoitteita tai ainekerroksia huoneilman ja hygroskooppisen massan välillä.

Mikäli jatkotutkimukset tukevat edellä esitettyä käsitystä hygroskooppisuuden merkityksestä, voidaan käynnistää ilmiön systemaattinen hyödyntäminen. Näköpiirissä on uusien hygroskooppisesti aktiivisten rakenneratkaisujen kehittäminen. Esim. ulkoseinissä hygroskooppinen ainekerros voidaan sijoittaa höyrynsulun sisäpuolelle. Väliseinät ja välipohjat voidaan kehittää hygroskooppisesti aktiivisiksi. Korjausrakentamisessa voidaan pyrkiä kosteusvaihteluita tasoittaviin ratkaisuihin. Tämä voi lisätä puun ja puupohjaisten materiaalien käyttöä sisustuksiin myös kivitaloissa. Myös puun pintakäsittelylle tulee uusia vaatimuksia.Erityisen kiinnostavaa on ilmiön hyödyntäminen rakennusviennissä. Mikäli hyöty pystytään osoittamaan fysikaalisin perustein, ovat edellytykset hygroskooppisuuden hyödyllisyyden laajamittaiseen tiedostamiseen olemassa.

8 YHTEENVETO

Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää rakenteiden eri kerroksille asetettavat määrälliset vaatimukset kosteusteknisesti turvallisten ratkaisujen toteuttamiseksi. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti sisäilman vesihöyryn muodostamaan riskiin ja rakenteiden puupinnoissa esiintyvän homeen kasvun muodostamaan uhkaan. Myös tarkasteltiin rakenteen hyvän kuivumiskyvyn merkitystä, kun rakenne kastuu. Toisena pääteemana tarkasteltiin puumateriaalien hygroskooppisuuden merkitystä huoneilman kosteuden vaihteluun kesäaikaisissa oloissa.

Tavoitteiden toteutuminen edellytti kosteusteknisesti mitoittavien sisä- ja ulkoilmasto-olojen määrittelyä sekä alustavien kriteerien määrittelyä homeen kasvulle rakenteissa ja rakennusvaipassa. Jälkimmäinen tehtävä on erinomaisen hankala. Homeen ja homeperäisten emissioiden terveydellisiä vaikutuksia ei tunneta riittävästi eikä näin ollen ole myöskään ole mahdollista asettaa terveydellisiin vaikutuksiin perustuvia vaatimuksia sisäilman puhtaudelle. Täten kriteeristön luomisessa lähdettiin siitä, ettei rakenteilta hyväksytä kosteusteknisesti virheellistä, suunnitelmien vastaista toimintaa. Homeen kasvulle määräytyy tätä kautta luonnolliset raja-arvot.

Mitoittavat ilmastotiedot

Tutkimuksessa luodut mitoittavien ilmastotietojen käyttö edellyttää kehittyneitä dynaamiseen analyysiin soveltuvia laskentamenetelmiä. Täten tiedot palvelevat tutkimusta ja korkeatasoista tuotekehitystä sekä Suomen että vientimaiden ilmasto-olihin.

Rakennusfysikaalisesti merkittäviä ulkoilmastoparametreja ovat

- Lämpötila
- Kosteus
- Auringon säteily
- Pitkäaaltoinen lämpösäteily
- Tuulen nopeus ja suunta
- Kokonaispaine ja paine-ero
- Sademäärä (vesi, lumi)

Osa ulkoilmastoparametreista on relevantteja myös sisäilmastoparametreina.

Koska rakenteiden kosteustekniseen mitoitukseen on saatava riittävä varmuus (Ei riitä, että rakenteet keskimäärin toimivat.), lähdettiin siitä, että varmuustekijä on yksinkertaisinta ottaa huomioon sisäilman kosteudessa. Tarkastelujen jälkeen päädyttiin seuraavaan määrittelyyn:

Sisälämpötila = maksimi (22 ^{o}C, T_{ulko} + 3 ^{o}C)

Kosteus = ulkoilman kosteus + 4,0 g/m^3 (3,3 g/kg)

Määrittely vastaa 120 m^2 talossa noin 600 g/h kosteuskuormaa sisäilmaan, kun huonekorkeus on 2,5 m ja ilmanvaihto on 0,5 1/h. Kosteuden tuotto on kohtuullisesti suurempi kuin keskimäärin toteutuva.

Mitoittavaksi ulkoilmastoksi valittiin kunkin paikan ns. referenssivuoden säätiedosto (test reference year eli TRY), joita Suomen lisäksi hankittiin kymmeniltä paikkakunnilta mm Euroopasta, USA:sta ja Japanista. TRY säätiedostot ovat dynaamisiin analyyseihin soveltuvia tunnittaisia säätietoja.

Ryömintätilan olojen arviointi kohtuullisen tarkasti edellyttää sekä tapauskohtaisten reunaehtojen määrittelyä että kehittynyttä 2D tai 3D laskentamenetelmää. Tutkimuksessa esitetään joitakin suosituksia yksikertaisempia myös tarkasteluja varten.

Puun homehtumisen kriittiset olosuhteet

Kuvassa 5 esitetään homeen kasvulle suosiolliset kosteus- ja lämpötilaolot, jotka on myös esitetty matemaattisena mallina puupintojen homeen kasvun laskennallista simulointia varten. Homehtumiskokeissa homeen kasvua mitataan ns. homehtumisasteella *M*, joka vastaa homeen esiintymistä seuraavien havaintojen mukaisesti:

M=0 ei havaintoa kasvusta

M=1 mikroskoopilla tehty havainto

M=2 yli 10 % peitto mikroskoopilla havaittuna

M=3 ensimmäinen visuaalinen havainto

M=4 yli 10 % peitto visuaalisesti havaittuna

M=5 yli 50 % peitto visuaalisesti havaittuna

Kuvassa 7 esitetään periaate homekriteeristön vaatimusten asettamiselle ja toisaalta myös toteuttamismahdollisuuksille. Kuva havainnollistaa yhtäältä vaatimustason kiristymisen lähestyttäessä rakenteen sisäpintaa ja toisaalta samalla vaikutustarpeen ja vaikutusmahdollisuuksien lisääntymisen.

Homeet ja mikrobit ovat luonnollinen osa ympäristöämme. Tämän vuoksi on vaikeaa asettaa tiukkoja rajoja niiden esiintymiselle rakennuksissa ja rakenteissa. Nyt esitetyt hyväksyttävyyden kriteerit perustuvat tämän hetken tietoon ja kriteereitä tullaan tarkentamaan tiedon lisääntyessä. Lähtökohtana on se, että kosteusteknisesti virheetön ja suunnitelmien mukainen ratkaisu on hyväksyttävä, vaikka rakenteessa, lähinnä sen kylmissä osissa esiintyykin luonnostaan lievää homeen kasvua.

Vesikatto ja välittömästi sen alla olevat rakenteet altistuvat Suomessa ajoittain luonnostaan sellaisille olosuhteille (ulkoilman korkea suhteellinen kosteus, ulkoilman kosteuden siirtyminen tuuletusilman mukana katon tuuletusväliin, katon jäähtyminen IR-säteilyn vaikutuksesta), että homeen kasvun riski on olemassa ilman kosteusteknistä rakennevirhettäkin. Homeen kasvuun voidaan vaikuttaa lähinnä materiaalivalinnoin ja erilaisin suojauskäsittelyin.

Ulkoseinien ulkoilmaan ja tuuletusväleihin rajoittuvat pinnat altistuvat myös ulkoilman ajoittain korkealle suhteelliselle kosteudelle, jolloin luontaista homeen kasvua voi esiintyä lähes samoin perustein kuin vesikattorakenteissa. Puupintoihin voi muodostua näkyvää hometta, jonka peittävyyden tulisi kuitenkin jäädä vähäiseksi (enintään 5…10 % tarkastelupinnan alasta). Huoneilman kosteudella ei ole vaikutusta tähän kasvuun ja rakenne voi olla kosteusteknisesti virheetön. Mainittu vaatimus hyväksyy sen, että sopiva homekasvun ravinteita sisältävä pinta on Suomen ilmasto-oloissa ainakin syksyisin homeen kasvualusta.

Ulkoilmalla tuulettuva ryömintätila on suoraan yhteydessä ulkoilmaan ja sen kosteuteen. Kosteutta ryömintätilan ilmaan voi tulla myös maaperästä tai pintavetenä rakennuksen ympäristöstä. On tyypillistä, että homeen kasvun mahdollistavat olosuhteet esiintyvät ryömintätilan pinnoilla ainakin paikallisesti ja ajoittain. Lahon esiintymistä tai laajaa homekasvustoa ei kuitenkaan voine pitää normaalina tilanteena. Näkyvää hometta kuitenkin yleisesti esiintyy ja se voinee peittää 5…10 % tarkastelupinnasta, johon ei kuitenkaan lueta maan pintaa eikä perusmuurin pintaa 30 cm korkeuteen maan pinnasta.

Rakenteiden lämmöneristetilat ja niihin rajoittuvat pinnat ovat edellisiin verrattuna vähemmän alttiita ns. luontaiselle homeen kasvulle. Kriittisin kohta on eristetilaa rajoittavat kylmät pinnat kuten tuulensuojan sisäpinta, johon kohdistuu normaalissa suunnitelmien mukaisessa käyttötilanteessa ajoittaisia kosteusrasituksia. On realistista sallia lievä homekasvujen esiintyminen lämmöneristetilan kylmissä pinnoissa. Näkyvän homeen peittävyys saa olla näissä enintään 2…4 % tarkastelupinnasta. Runkorakenteen pinnoille lukuunottamatta kylmiä osia ja eristetilan sisäpinnalle ei näkyvää hometta saisi jatkuvassa käytössä muodostua. Vaatimus tarkoittaa sitä, että eristetilan kylmien pintojen vähäinen homekasvu perustuu ulkoilman ajoittain korkeaa kosteuteen sekä rakenteisiin hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden uudelleenjakautumiseen ulkolämpötilan aletessa. Vaatimus ei salli sisäilman vesihöyryn merkittävää tunkeutumista rakenteisiin niin, että homehtuminen on edelläkuvattua olennaisesti laajempaa.

Rakenteiden sisäpinnat on luonnollisesti priorisoitava tiukimpaan luokkaan. Sisäpintoihin kohdistuu märkätiloissa ajoittaisia kosteusrasituksia, jolloin merkittävää on kosteuden vaikutusaika. Voidaan kuitenkin edellyttää, ettei näkyvää hometta saisi lainkaan esiintyä rakenteiden sisäpinnoilla normaalisti kuivissa huonetiloissa. Mikroskooppianalyysissä esille tulevat vähäiset rihmastopartikkelit ja itiöt on kuitenkin realistista hyväksyä yksittäisinä esiintyminä. Tästä huolimatta vaatimusta on pidettävä kansainvälisesti kovana, kun tarkastellaan tilannetta esim. Englannin ja keski-Euroopan rakennuskannoissa. Vaatimus edellyttää myös, että märkätilojen kuivattamisesta ja ja sen pintojen puhdistamisesta huolehditaan asianmukaisesti (riittävä ilmanvaihto, lattialämmitys suositeltava).

Rakennuskosteus tai satunnainen kertaluotoinen kastuminen voi aiheuttaa tilanteen, jossa homeen kasvun välttäminen on vaikeaa. Kasvu luonnollisesti lakkaa, kun kosteus poistuu, jolloin home taantuu ja jää rakenteeseen. Jos vanha home katsotaan vähemmän vaaralliseksi kuin elävä, muodostuu vaatimukseksi rakenteen säilyminen vaurioitta ja homejäämän rajoittuminen kohtuulliseksi. Rakenteen tulee kuivua rakennuskosteudesta ja muusta kertaluontoisesta kastumisesta niin nopeasti, ettei lahoaminen tai vaarallisimpien homesienien kasvu pääse alkamaan ja että kastumisen jälkeen homeen kasvu pysähtyy 2…4 kk:n sisällä. Mainittu vaatimus tarkoittaa, että taantunut home erotetaan aktiivisesta.

Kenttätutkimus, jossa tutkittiin homeen kasvua ulkoilmaan tai tuuletusvälin ilmaan rajoittuvissa puupinnoissa Helsingin seudulla osoitti, että kosteusteknisesti virheettömissä vaipparakenteissa löytyi visuaalisesti tai mikroskooppisesti havaittavaa homeen kasvua yli 60 %:ssa näytemäärästä. Vaikka aineisto oli suhteellisen suppea (noin 30 kpl näytteitä yhdeksästä kohteesta), se tukee edellä esitettyä realistista näkemystä homeen kasvua koskevien vaatimusten asettamisessa. On varsin mahdollista, ettei homeettomia rakennuksia juurikaan ole Suomen rakennuskannassa.

Vaatimus höyrynsululle

Suoritetussa tutkimuksessa mitattiin erilaisten rakennuspaperien ja höyrynsulkutuotteiden höyrynvastuksia sekä matalan että korkean suhteellisen kosteuden oloissa. Puurunkoisen vaipparakenteen kosteuskenttä ja sen muutokset ajan funktiona analysoitiin laskennallisesti ohjelmistolla TCCC2D käyttäen Jyväskylän referenssivuoden säätiedostoa. Laskennallinen analyysi vahvisti sen vanhan käsityksen, että **avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan ainekerroksen höyrynvastuksen tulee Suomen ilmastossa lämmityskauden oloissa olla vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan ainekerroksen höyrynvastukseen.** Jos vaatimus täyttyy, ei sisäilman vesihöyryn diffuusio muodosta uhkaa rakenteille, kun kyseessä on tavanomainen asuin- tai toimistotilan sisäilma.

Tavanomaisten höyrynsulkutuotteiden mitattu höyrynvastus oli 100…10000 kertainen verrattuna tyypillisten diffuusisesti läpäisevien huokoisten rakennuspaperien höyrynvastukseen. Jälkimmäisten höyrynvastus riippuu voimakkaasti suhteellisesta kosteudesta ollen kuivissa oloissa (50 % / 0 %) 3 - 5 kertainen verrattuna kosteisiin oloihin (97 % / 65 %). Kosteissa oloissa koelämpötilan alentaminen 23 ^{o}C:sta 5 ^{o}C:seen ei juurikaan vaikuttanut rakennuspaperien höyrynvastukseen.

Vesihöyryn konvektio rakenteisiin

Sisäilman hallitsematon virtaus rakenteisiin erilaisten vuotorakojen kautta muodostaa merkittävän kosteusteknisen riskin. Haitallisen vuodon syntyminen edellyttää vuotoreittiä ja pitkäkestoista sisäpuolista ylipainetta. Tällainen tilanne muodostuu helposti rakennuksen yläosaan, kun ulkoilman lämpötila on riittävän matala. Tutkimuksessa analysoitiin laskennallisesti jatkuvan ulospäin suuntautuvan ilmavuodon vaikutuksia rakenteen kosteuskenttään ja puupintojen homekasvuun. Jälkimmäinen tuli mahdolliseksi, kun mänty- ja kuusipuun pinnan homeen kasvun matemaattinen malli liitettiin ohjelmistoon TCCC2D. Laskelmien ohella suoritet-

tiin laajahko koesarja erilaisilla puurunkoseinillä tilanteissa, joissa rakennetta kuormitettiin sisäpuolisen vesihöyryn diffuusiolla, konvektiolla tai molemmilla. Rakenteita muunneltiin myös niin, että niiden kyky kuivua ulospäin oli koetapauksittain erilainen.

Yhteenvetona laskentatuloksista voidaan todeta, että pitkäkestoista ilman ja sen mukana tapahtuvaa vesihöyryn vuotamista sisäpuolelta rakenteisiin ei voi hyväksyä. Laskelmien mukaan rakenteisiin syntyy vähäiselläkin vuodolla paikallisesti sellaisia lämpötila- ja kosteusoloja, jotka mahdollistavat homeen kasvun. Kasvu on tällöin ilmavuotoreitin välittömässä yhteydessä, jolloin homeperäiset emissiot voivat siirtyä vuotoilmaan.

Koe- ja laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että sisäilman vesihöyryn konvektio rakenteisiin on yleensä diffuusioon verrattuna haitallisempaa. Konvektiossa rakenteisiin tunkeutunut kosteus jakautuu epätasaisesti ja paikalliset kosteuskeräytymät muodostuvat helposti suuriksi. Rakenteen hyvä kuivumiskyky helpottaa tilannetta, mutta ei eliminoi ongelmaa. Tuulensuojan suuri kosteudenläpäisykyky ja sen lämmöneristäminen ohueltikin ulkopuolelta parantaa lämmöneristetilaan päässeen kosteuden mahdollisuutta kuivua ulkopuolelle. Sellukuitu- ja mineraalivillaeristysten käyttäytymisessä on ero kosteuden kertymisen kannalta. Edellisessä kosteus sitoutuu eristeaineeseen eikä juurikaan valu. Jälkimmäisessä vapaa vesi valuu alaspäin eristetilan pohjalle. Kuitumaisen lämmöneristeen tyypillä ei ole kovin merkittävää vaikutusta rakenteeseen tunkeutuvan kosteuden määrän kannalta. Höyrynsulku, ilmansulku ja tuulensuoja ovat tässä suhteessa eristeaineeseen verrattuna hallitsevia ja määräävät rakenteen kosteusteknisen toimivuuden.

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 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 vallitseva ilmavirran suunta tulee olla ulkoa sisälle päin. Edellytys rakennuksen painesuhteiden hallitsemisesta asettaa vaatimuksia mm. rakennuksen vaipan kokonaistiiviydelle ja ilmanvaihto-järjestelmälle. Rakennuksen ulkovaipalta edellytettävä tiiviystaso jää selvitettäväksi myöhemmissä tutkimuksissa. Ilmansulun tekemiseen käytettävän ainekerroksen ilmanläpäisykerroin saa olla enintään $1 \cdot 10^{-6}$ $m^3 / (m^2 \cdot s \cdot Pa)$. Tällöin huolellisella työllä on mahdollista saavuttaa rakennuksen vaipan kokonaistiiviyttä mittaavan painekokeen tulokseksi 1 1/h, mikä on riittävä ainakin pientalon painesuhteiden hallinnan kannalta.

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.

Laatan päälle koolattu maanvarainen lattia

Tutkimuksessa analysoitiin laskennallisesti maanvastaisen laatan päälle koolatun lattiarakenteen kuivumiskykyä. Laskentatapauksena käsiteltiin laatan yläpuolinen 100 mm paksu mineraalivillaeristys ja 22,5 mm paksu lauta- tai parkettilattia. Lämmöneristyksen ja laudan välissä oli muovikelmu höyrynsulkuna tai rakenne oli höyrynsuluton. Betonilaatan alle sijoitetun EPS-eristyksen paksuus oli vaihtoehtoisesti 0, 50 tai 100 mm. Huonelämpötilaksi oletettiin 22 ^{o}C ja huoneilman suhteelliseksi kosteudeksi 44 % R.H. Lattian ja maaperän rajakerroksen lämpötilaksi oletettiin 10 ^{o}C ja suhteelliseksi kosteudeksi 99 % R.H. Laskelmissa tutkittiin lattiaan oletetun alkukosteuden kuivumista ja jäännöskosteuden jakautumista rakenteessa. Johtopäätökset laskentatuloksista ovat jäljempänä.

Maanvarainen betonilaattalattian kuivuminen sisäilmaan päin edellyttää laatan alapuolista eristämistä. Jotta kosteuden siirtyminen sisäilmaan olisi kohtuullisen tehokasta, tulee laatan alapuolisen eristyksen lämmönsiirtovastus olla noin kaksinkertainen yläpuoliseen verrattuna, esimerkiksi laatan alla on 100 mm EPS- eristettä ja yläpuolella on 50 mm puukoolaus mineraalivillaeristyksin. Vähimmäisvaatimuksena voidaan pitää samansuuruisia lämmönsiirtovastuksia laatan eri puolten eristekerroksilla. Joka tapauksessa kuivuminen sisäilmaan on hidasta ja kosteusvirran suuruus riippuu lämmöneristeiden avulla varmistetun kuivumispotentiaalin lisäksi lattiapinnan höyrynsiirtovastuksesta.

Lämmöneristyksen yläpinnassa ei tarvita höyrynsulkua. Edellytyksenä höyrynsuluttomuudelle ja pienelle lattiapinnan vesihöyrynvastukselle on, ettei laatassa esiinny kylmäsiltoja, jotka mahdollistavat kosteuden kerääntymisen paikallisesti näille alueille. Yleensä ohutkin laatan alapuolinen eristys riittää varmistamaan tämän lukuunottamatta lattian reuna-alueita, joiden toiminta on erikseen varmistettava.

Jotta lattiarakenteeseen joutunut kosteus voisi kuivua sisäilmaan, tulee lattian pinnan olla vesihöyryä mahdollisimman hyvin läpäisevä. Laskelmien perusteella 5 mm:n puukerrosta vastaava vesihöyryn tehollinen vastus lattiarakenteen pinnassa antaa lattialle jo kohtuullisen kuivumiskyvyn. Laskennallisesti tarkasteltu teoreettinen sisäilmaan tuulettuva lattiarakenne paransi kuivumiskykyä tarkasteluoloissa. Hyvä tuulettuvuus saattaa kuitenkin johtaa sisäilman kosteuden kulkeutumiseen lattiarakenteeseen sisäilman kosteustason ollessa korkea. Käytännön kannalta tuulettuvaa lattiarakennetta ei tulisi soveltaa ilman koko rakenteen toiminnan varmistamista sen käyttöoloissa.

Tarkastellun kaltaiset lattiarakenteet ovat aina kosteusriski, jos kosteutta joutuu rakenteeseen, sillä kosteuden havaitseminen on vaikeaa ennekuin se on jo ehtinyt vaurioittaa lattian puuosia. Kosteusteknisessä toiminnassa vikasietoisuutta lisää laatan alapuolinen eristäminen, esimerkiksi 100mm eristettä alla, 50 mm yläpuolella, ja kohtuullisesti vesihöyryä läpäisevä lattiapinta.

Rakenteiden vaikutus sisäilmaan

Hygroskooppiset rakennusaineet sitovat itseensä ilman kosteutta tai luovuttavat sitä, kun materiaalia ympäröivän ilman suhteellinen kosteus muuttuu. Ilmiö on mielenkiintoinen huoneilman kosteusvaihtelujen kannalta. Kun huoneessa on paljon vapaata puupintaa tai huoneilman vesihöyry pääsee nopeasti diffusoitumaan hyg-

roskooppiseen materiaaliin kuten huokoinen puukuitulevy tai sellukuitueriste, voi huoneilman ja rakennusaineen välillä olla käytännössä merkittävä kosteustekninen vuorovaikutus. Tämä ilmenee siten, että aktiivinen hygroskooppinen massa vaimentaa huoneilman suhteellisen kosteuden muuttumista, kun kosteuden tuotto tilassa vaihtelee. Asuinrakennuksissa mielenkiinto kohdistuu ennen muuta makuuhuoneisiin, joissa kosteus pyrkii yöaikana nousemaan.

Suomessa on pitkä lämmityskausi ja olemme tottuneet arvioimaan rakenteiden tai taloteknisten järjestelmien toimintaa juuri lämmityskautta silmälläpitäen. Tällöin ulkoilman kosteuspitoisuus on pieni ja huoneilma on luonnostaan kuivaa. Huoneilman kanssa vuorovaikutteisella hygroskooppisella massalla ei ole lämmityskauden oloissa samaa merkitystä mukavuustekijänä kuin kuin kesällä. Toki huoneilman suhteellisen kosteuden vaihtelu muuttuvissa kuormitustilanteissa vaimenee hygroskooppisen massan ansiosta talvellakin, mutta kaiken aikaa ilma on kesään verrattuna kuivaa.

Kesällä erityisesti kosteiden hellejaksojen aikana nousee huoneilman suhteellinen kosteus luonnostaan korkeaksi. Kun tällaisena aikana esim. makuuhuoneen ilmaan tuotetaan lisää vesihöyryä, voi suhteellinen kosteus nousta epämukavan korkeaksi. Hien haihtuminen iholta estyy ja ilmanvaihto tuntuu riittämättömältä. Ikkunan avaaminen auttaa, mutta katkaisee yöunen. Liikennemelu voi myös estää tuuletuksen. Mikäli hygroskooppinen massa pystyy sitomaan nukkujien aiheuttaman vesihöyryn tuoton, säilyy ilman suhteellinen kosteus fysiologisesti miellyttävämmällä alueella. Korkealla suhteellisella kosteudella on myös ilman laatua heikentäviä vaikutuksia.

Tutkimuksessa analysoitiin laskennallisesti ja laboratoriokokein huoneilman ja hygroskooppisten rakennusaineiden välistä kosteusteknistä vuorovaikutusta. Laskennalliset ja kokeelliset tulokset ovat ristiriidattomia, mutta niitä tulee pitää vielä alustavina. Tulokset ovat kuitenkin lupaavia ja niiden pätevyys tullaan varmentamaan todellisisssa rakennuksissa.

Kuvassa 6.12 esitetään laskentatulos 12 m^2 kokoiselle makuuhuoneelle, jossa on kahden aikuisen miehitys 8 tunnin ajan vuorokaudesta ja joka on muuna aikana miehittämättä. Laskennassa ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus oletettiin vakioiksi (20 ^oC ja 55 %R.H.). Huoneen kaikki neljä seinää on verhottu sisäpuolelta huokoisella puukuitulevyllä, jonka alla on huokoinen rakennuspaperi ja sellukuitulämmöneriste. Yläpohjassa on sama sisäverhous sekä sellukuitueristys. Huoneessa ei ole muuta hygroskooppista materiaalia. Ilmanvaihto on ½ vaihtoa tunnissa. Huoneilman kosteus ja sen vaihtelu simuloitiin viikon jakson ajan, kun rakenteen sisäpinta oli maalaamaton sekä maalattu höyrynsulkumaalilla. Lattiapinnoite oli kosteutta läpäisemätön. Kuvan 6.12 mukaan huoneilman suhteellinen kosteus nousi yöllä n. 25 %-yksikköä maalatussa huoneessa ja n. 5 %-yksikköä sisäpinnan ollessa maalaamaton.

Kuvassa 6.15 esitetään vastaava simulointitulos 12 m^2 kokoiselle massiivihirsiseinäiselle makuuhuoneelle. Laskennassa on käytetty ulkoilmastona todellista viikon sääjaksoa toukokuulta 1996. Hirren paksuus oli 200 mm. Kosteutta ei siirry lattia- ja kattopinnan läpi. Laskentatapaukset koskevat tilanteita, joissa kaikkien neljän seinän sisäpinat ovat maalaamattomia, kaksi maalattu höyrynsulkumaalilla ja kak-

si maalaamatonta sekä kolmantena tapauksena kaikki seinäpinnat maalattu höyrynsulkumaalilla.

Kuvan 6.15 mukaan käsittelemättömällä puupinnalla on merkittävä huoneilman kosteuden vaihtelua vaimentava vaikutus. Kaikkien seinien maalaaminen aiheutti vuorokautisen kosteusvaihtelun kolminkertaistumisen.Vaikka hirren sisäosat eivät kosteuden siirtymisen viiveellisyydestä johtuen ehdi vaikuttaa huoneilman kosteuden lyhytjaksoiseen vaihteluun, on puun ohuella n. 1…2 mm paksulla pintakerroksella huomattava merkitys. Vastaava vaikutus voidaan ilmeisesti aikaansaada siten myös ohuemmalla puutavaralla kuten kuten höylätyllä panelilla.

Ilmatilan kosteuden nopea sitoutuminen hygroskooppiseen materiaaliin on todennettiin myös laboratoriokokeella, jossa rakenteena oli huokoisella puukuitulevyllä ja rakennuspaperilla verhottu sellukuitueristetty seinärakenne. Seinä rajoittui koetilaan, jonne tuotiin suhteelliselta kosteudeltaan hallitusti vaihtelevaa ilmanvaihdon tuloilmaa ilmanvaihtomäärän ollessa ½ vaihtoa tunnissa. Koetilan ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu lähes kolminkertaistui, kun seinärakenne päällystettiin sisäpuolelta muovikalvolla. Koetilan koko oli n. 1 m^3 ja koeseinän pinta-ala oli n. 1 m^2. Muut koetilaa rajoittaneet pinnat olivat kosteutta läpäisemättömiä.

Alustavien tulosten valossa **huoneilman kanssa aktiivisessa vuorovaikutuksessa oleva hygroskooppinen massa voi olla merkittävä kesäaikainen mukavuustekijä**, jonka merkitys esim. keski-Euroopassa tai Japanissa on Suomeen verrattuna suurempi. Hygroskooppisuuden merkitys voidaan menettää käytettäessä suuren höyrynvastuksen maalipinnoitteita tai ainekerroksia huoneilman ja hygroskooppisen massan välillä.

Mikäli jatkotutkimukset tukevat edellä esitettyä käsitystä hygroskooppisuuden merkityksestä, voidaan käynnistää ilmiön systemaattinen hyödyntäminen. Näköpiirissä on uusien hygroskooppisesti aktiivisten rakenneratkaisujen kehittäminen. Esim. ulkoseinissä hygroskooppinen ainekerros voidaan sijoittaa höyrynsulun sisäpuolelle. Väliseinät ja välipohjat voidaan kehittää hygroskooppisesti aktiivisiksi. Korjausrakentamisessa voidaan pyrkiä kosteusvaihteluita tasoittaviin ratkaisuihin. Tämä voi lisätä puun ja puupohjaisten materiaalien käyttöä sisustuksiin myös kivitaloissa. Myös puun pintakäsittelylle tulee uusia vaatimuksia.Erityisen kiinnostavaa on ilmiön hyödyntäminen rakennusviennissä.

LÄHDELUETTELO

1. Hens, H. and A. Janssens. 1993. Inquiry on HAMCAT CODES, International Energy Agency, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Report Annex 24, Task 1, Modelling.

2. Sisäilmayhdistys, 15.6.1995. Sisäilmaston, rakennustöiden ja pintamateriaalien luokitus.

3. Salonvaara M. ja A. Karagiozis. 1994. Moisture Transport in Building Envelopes using an approximate Factorization Solution Method, Teoksessa: 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.

4. Laine, Juhani ja Saari, Mikko. ESPI-matalaenergiapientalot. 1998. VTT, Espoo. 75 s. + liitt. 44 s. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes : 1924. ISBN 951-38-5332-2; 951-38-5333-0.

5. Ahola, P., Koskela, K., Paajanen, L. Suomi-Lindberg, L. & Viitanen, H. 1993. Maalatun puun kestävyyteen vaikuttavia tekijöitä tutkittu. Paperi ja Puu 75 (6): 413 - 417.

6. Aurola, R. ja Välikylä, T (toim). 1997. Asumisterveysopas. Ympäristö ja terveys.

7. Hukka, A. ja Viitanen, H. 1998. A mathematical model of mould growth in wooden material. Accepted for publication in Journal of Wood Science and Technology.

8. Huovinen, S. et al. 1996. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden käyttöikä. Rasitukset. 3.5. Ilmastorasitukset. RIL 183-3.5-1996. 79 s.

9. Husman, T. ja Reiman, M. 1996. Homevaurioiden aiheuttamat terveyshaitat ja niiden tutkiminen. Ympäristö ja terveys 8 ss. 20 - 25.

10. Viitaniemi, P. ja Jämsä, S. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. Espoo, VTT, 1996. 57 s. VTT Julkaisuja - Publikationer; 814 ISBN 951-38-4523-0 WWW: http://www.inf.vtt.fi/pdf/julkaisut/1996/J814.pdf

11. Kokko, E. ja Ojanen, T. 1997. Kosteus ja home kuriin. Rakennustaito 5: 42 - 43.

12. Kärkkäinen, M. 1985. Puutiede. Sallisen kustannus Oy. Sotkamo. 415 s.

13. Luotonen, P. & Viitanen, H. Rakennusten mikrobi- ja hyönteisongelmat. Vantaa 1995, Tikkurila Oy. 49 s.

14. Mannerkoski, I., Pulkkinen, M. & Viitanen, H. Seurasaaren museorakennusten vahinkohyönteiset vuosina 1985 - 1988 ja niiden torjuntamahdollisuudet. Espoo 1989. VTT tutkimuksia 626. 28 s. + liitt. 2 s.

15. Pasanen, A-L., Rautiaila, S., Ikäheimo, M., Kalliokoski, P., Kääriäinen, H. ja Rantamäki, J. 1998. Rakennusmateriaalien kostumistavan ja kuivumisen vaikutus mikrobikasvuston muodostumiseen ja elinkykyyn.

16. Rantamäki, J., Kääriäinen, H. ja Tulla, K. Pientalojen kosteushomevaurioriskit syytä tunnistaa. Rakennuslehti 23.10.1997. nro 31.

17. Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse, New York. Syracuse University Press. 233 s.

18. Sosiaali- ja terveysministeriö. 1997. Sisäilmaohje. STM oppaita 1997:1.

19. Toivola, M., Meklin, T. Luoto, K. Hyvärinen, A. ja Nevalainen, A. 1998. Rakennusmateriaalien mikrobivaurion arvioiminen eri menetelmiä käyttävissä laboratorioissa. Kansanterveyslaitoksen julkaisuja B9.

20. Viitanen, H. & Bjurman, J. 1995. Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions. Mat. und Org. 29(1): 27 - 46.

21. Viitanen, H. 1995. Puujulkisivujen korjausperiaatteet. Korjausrakentaminen V. Rakennusten julkisivu- ja ulkoseinärakenteiden korjaus. RIL K171-1995. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, s. 77 - 86.

22. Viitanen, H. 1995. Biologiset rasitukset. RIL 183-3-3...4. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden käyttöikä. Rasitukset: 3.3 Biologiset rasitukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y, 56 s.

23. Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperatrue and exposure time. Dissertation. Uppsala 1996. The Swedish University of Agricultural Sciences. Dep. of Forest Products. 58 s.

24. Viitanen, H. 1997. Modelling the time factor in the development of mould fungi in wood - the effect of critical humidity and temperature conditions. Holzforschung 51 (1): 6 - 14.

25. Viitanen, H. 1997. Critical time of different humidity and temperature conditions for the development of brown rot decay in pine and spruce. Holzforschung 51 (2): 99 - 106.

26. Viitanen, H. & Ritschkoff, A. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala. Swedish

University of Agricultural Scienses, Department of Forest Products. Report no 221. 40 s + liitteitä 9 s.

27. Ojanen, T., Kokko, E., Salonvaara M. & Viitanen, H. Havuvaneri-rakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. VTT Tiedotteita 1870. Espoo 1997. 90 s. + liitteitä 2 s.

28. Tveit, A Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute. Oslo 1996.

29. Luotonen, P., Paajanen, L. and Vihavainen, T. 1980. Lattiasienen aiheuttamien vaurioiden korjaaminen. Seurantatutkimus. Espoo. VTT Puutavaralaboratorio, Raportti No 4. 30 s. + liitt. 37 s.

30. Ojanen, T. et al. 1997. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. VTT Tiedotteita 1870. Espoo. 90 s. + liitt. 2 s.

31. Viitanen, H. 1997. Puutuotteiden käyttöikä. Puumies 42 (1): 19 - 23.

32. Ojanen, T., Salonvaara, M., Kohonen,R. & Nieminen, J., Kosteuden siir-tyminen rakenteissa. Laskentamenetelmät. Espoo 1989. VTT Tutkimuksia 595. 102 s.

33. 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. s. 18 - 34.

34. Ojanen, T., Kohonen, R., Numerical Simulation of Heat, Air and Moisture Transfer in Building Structures. Proceedings of the Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components. Models and Characterization of Transfer Properties. Organized by BRI, Japan & CSTB, France. 1995, s. 221 - 239.

35. Ojanen, T., Evaluation of simulation model TCCC2D using simplified weather data and material properties. IEA/Annex 24 (HAMTie) Closing seminar, Sept. 11, 1996, Espoo, Finland. Proceedings, s. 1 - 14.

36. Hukka., A. & Viitanen, H. A mathematical model of mold growth on wooden material. Julkaistaan lehdessä Wood Science and Technology (1997).

37. Ojanen, T., Kokko, E., Pallari, M.-L., Tuulensuojan toimintaperusteet. VTT Tiedotteita 1478. Espoo 1993. 125 s. + liitt. 24 s.

38. 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. s. 491 - 500.

39. Ojanen, T. & Kumaran, K., Effect of Exfiltration on the Hygrothermal Behaviour of a Residential Wall Assembly. Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. Vol 19 - January 1996. s. 215 - 227.

40. Ojanen, T., Kokko, E., Sisäilman ylipaine rakenteiden kosteusvaurioiden aiheuttajana. Rakennustaito 3/96, ISSN 0048-6663, s. 16 - 17.

41. Ojanen, T., Kokko, E., Övertryck inomhus kan orsaka fuktskador. Bygg & Teknik 8/96. S. 60 - 61.

42. Hens, H., Task 1, Modelling, IEA/Annex 24 (Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts) Final Report, Vol 1, 1996 Leuven, 90 s.

43. Ojanen, T., Evaluation of simulation model TCCC2D using simplified weather data and material properties. IEA/Annex 24 (HAMTie) Closing seminar, Sept. 11, 1996, Espoo, Finland. Proceedings, s. 1 - 14.

44. 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. s. 18 - 34.

45. 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.

46. Hukka., A. & Viitanen, H. A mathematical model of mold growth on wooden material. To be published in Wood Science and Technology (1998).