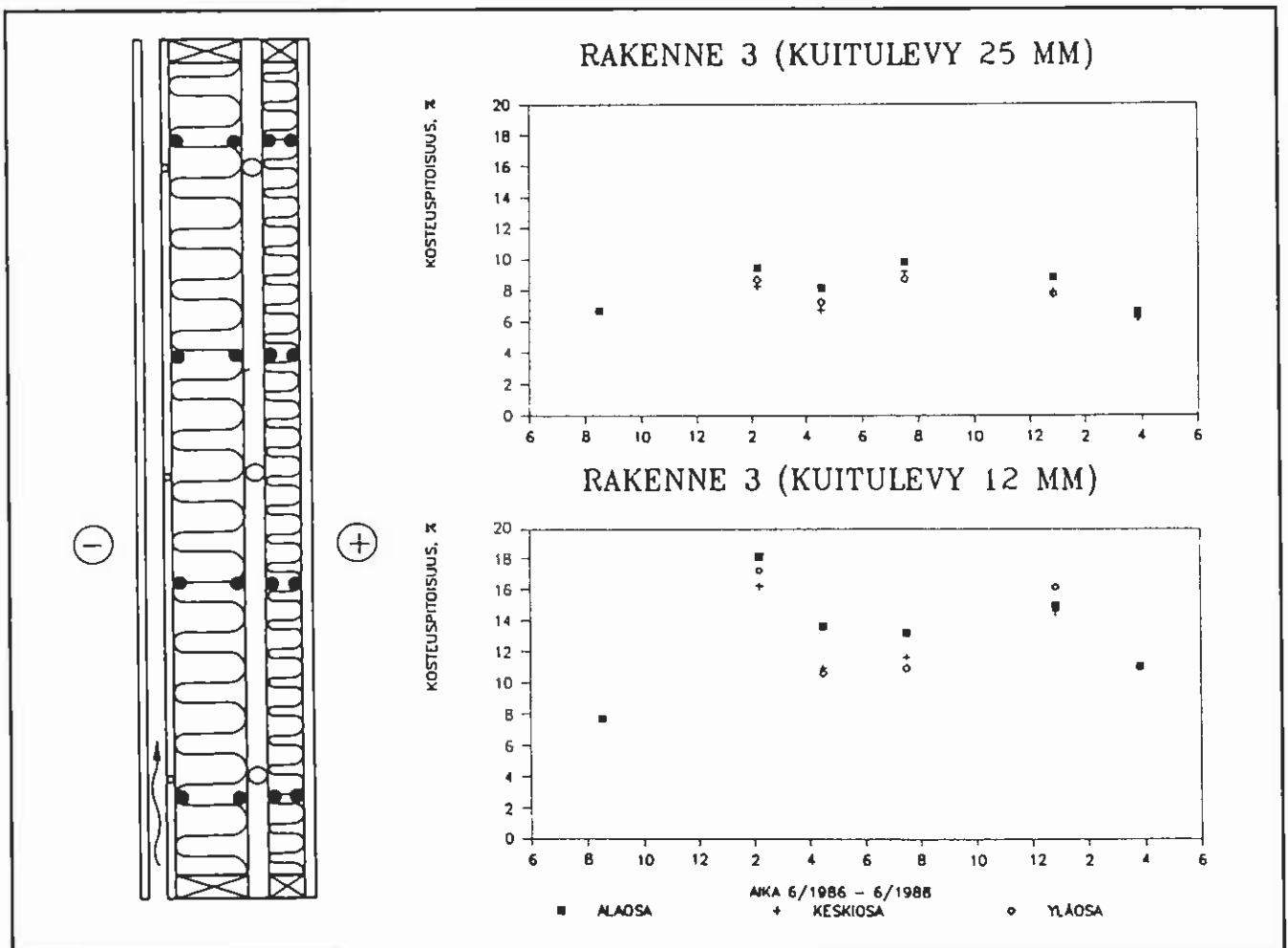




Jyri Nieminen

Höyrynsulun tarve puuseinässä





Höyrynsulun tarve puuseinässä

Jyri Nieminen
Rakennetekniikan laboratorio

ISBN 951-38-3582-0
ISSN 0358-5085
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1989

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, 02150 Espoo
puh. vaihde (90) 4561, teleksi 122972 vttha sf

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, 02150 Esbo
tel. växel (90) 4561, telex 122972 vttha sf

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, SF-02150 Espoo, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telex 122972 vttha sf

VTT, Rakennetekniikan laboratorio, Kemistintie 3, PL 26, 02151 Espoo
puh. vaihde (90) 43561, telekopio (90) 4356 7003

VTT, Konstruktionstekniska laboratoriet, Kemistvägen 3, PB 26, 02151 Esbo
tel. växel (90) 43561, telefax (90) 4356 7003

VTT, Laboratory of Structural Engineering, Kemistintie 3, P.O.Box 26, SF-02151 Espoo, Finland
phone internat. + 358 0 43561, telefax + 358 0 4356 7003

NIEMINEN, Jyri. Höyrynsulun tarve puuseinässä [The need for a vapour barrier in a wooden wall]. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita – Statens tekniska forskningscentral, Meddelanden – Technical Research Centre of Finland, Research Notes 1050. 61 s./p.

UDK 624.011.1:692.23:699.82

Keywords small houses, wooden structures, external walls, barrier coatings, vaporizing, moisture, polymeric films, plastics, behavior, insulation

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin puuseinään sijoitettavan höyrynsulun tarvetta, kosteuden vaikutuksia rakenteiden toimintaan sekä puhallettavien lämmöneristeiden käyttöä puuseinissä. Kenttä- ja laboratoriotutkimuksissa saatujen tulosten mukaan pientalon puurakenteinen ulkoseinä voidaan Suomen ilmastossa tehdä tietyin edellytyksin ilman rakenteeseen sijoitettavaa höyrynsulkumuovia. Tämä edellyttää rakenteilta hyvää ilmanpitävyyttä. Jotta rakenteisiin talvella mahdollisesti kertyvä kosteus ei tuottaisi ongelmia, on rakenteisiin syytä tehdä kuivumisen varmistamiseksi tuuletusrako ulkoverhouksen taakse. Kevyiden, ilmaaläpäisevien lämmöneristeiden asentamiseen ja tuulensuojaukseen on kiinnitettävä riittävää huomiota.

Höyrynsulun poisjättämisellä seinärakenteesta ei voida vaikuttaa pientalon sisäilman kuivuuteen talvella. Kosteus varastoitui tutkittuihin rakenteisiin siten, että se ei talvella voinut siirtyä rakenteesta sisäilmaan. Höyrynsuluttomien rakenteiden ilmavuotokohtat ovat käytännössä samoja kuin muovikalvon avulla tehdyissä rakenteissa.

Puhallettavan selluloosaeristeen on todettu painuvan myös seinissä käytettävillä eristystiheyksillä. Puhalluseristeiden asennustekniikasta ja työvirheistä johtuvia eristysvirheitä on todettu eristemateriaalista riippumatta.

NIEMINEN, Jyri. Höyrynsulun tarve puuseinässä [The need for a vapour barrier in a wooden wall]. Espoo 1989, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita – Statens tekniska forskningscentral, Meddelanden – Technical Research Centre of Finland, Research Notes 1050. 61 s./p.

UDC 624.011.1:692.23:699.82

Keywords small houses, wooden structures, external walls, barrier coatings, vaporizing, moisture, polymeric films, plastics, behavior, insulation

ABSTRACT

In this study, the need for a plastic film vapour barrier in wooden walls, moisture and its effects on the behaviour of wooden structures as well as the use of loose-fill insulation in wooden walls were investigated.

Wood-framed external walls of single-family houses under Finland's climatic conditions can with certain reservations be built without a plastic film vapour barrier. This is possible provided that the structures have a good degree of airtightness. In order to avoid problems caused by possible wintertime built-up of moisture within the wall structure, the wall should be provided with a ventilation gap right behind the external cladding to ensure sufficient removal of humidity. Due attention should also be paid to the installation of wind barriers and light-weight, air-permeable thermal insulation materials.

The wintertime dryness of indoor air can not be affected by using a wooden wall structure without a vapour barrier. The structures under investigation showed a rather low moisture storing capacity, and transfer of moisture from the wall into indoor air is not possible during winter. In practice, airleakages through wooden walls without vapour barrier take place the same ways as through ordinary walls with plastic film vapour barrier.

Settlement of loose-fill cellulose fibre insulation in wall structures is a problem even with high insulation density. Insulation faults caused by poor quality of workmanship were found regardless of the insulation material.

ALKUSANAT

Puuseinään sijoitettavan muovikalvon tarpeesta on keskusteltu viime vuosina. Erilaisten höyrynsuluttomien puuseinärakenteiden toimivuutta on selvitetty kauppa- ja teollisuusministeriön (KTM) energiasaston ja teollisuuden toimialayhdistysten rahoittamissa tutkimuksissa. Tämä julkaisu on KTM:n rahoituksella tehdyn tutkimuksen "Höyrynsuluton kevyt ulkovaippa" loppuraportti.

Tutkimuksen valvojana KTM:stä oli ylitarkastaja Heikki Kotila. Tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi tutkija Jyri Nieminen Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) rakennetekniikan laboratoriosta. Tutkimusryhmään kuuluivat VTT:n rakennetekniikan laboratoriosta tutkimusprofessori Juho Saarimaa ja erikoistutkija Ilpo Kouhia sekä LVI-tekniikan laboratoriosta tutkija Tuomo Ojanen.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	7
2 HÖYRYNSULUN TARVE PUUSEINÄSSÄ	8
2.1 Yleistä	8
2.2 Koetalotutkimus	10
2.2.1 Koerakenteet ja rasitusolosuhteet	10
2.2.2 Tutkimusmenetelmät	16
2.2.3 Rakenteiden toimivuus	18
2.3 Höyrynsuluttoman rakenteen toimivuuden edellytykset	38
3 PUUSEINÄN KOSTEUSKAPASITEETTI	41
3.1 Yleistä	41
3.2 Tarkasteltavat rakenteet ja materiaalit	42
3.3 Seinäakenteen kosteuskapasiteetin toiminta	43
3.3.1 Kosteuden varastoituminen puuseinään	43
3.3.2 Puuseinän kosteuden vaikutus sisäilmastoon	46
4 PUHALLUSERISTEIDEN KÄYTTÖ PUUSEINISSÄ	49
4.1 Yleistä	49
4.2 Puhalluseristeiden painuminen seinärakenteissa	50
4.3 Työvirheet ja työtekniikka	54
4.4 Päätelmät	55
5 YHTEENVETO	56
LÄHDEKIRJALLISUUS	59

1 JOHDANTO

Pientalorakentamiselle on luonteenomaista pyrkimys ulkovaipparakenteiden tiiviyyteen. Puurakenteisten ulkoseinien hyvän ilmanpitävyyden saavuttamisessa on korostettu seinään sijoitettavan muovikalvon eli höyrynsulun merkitystä. Rakenteiden ilmanpitävyyden parantamisella on lämmöneristyksen kasvattamisen ohella pyritty pienentämään pientalon energiankulutusta ulkovaipan osalta.

Asumisen ja samalla sisäilman laatuun on alettu kiinnittää enenevää huomiota. Kun pientalojen ulkovaipparakenteiden tiiviyyden parantuessa rakennusten ilmanvaihdon kehittäminen jäi vähäisemmälle huomiolle, rakennusten sisäilman laatu nousi osittain tästä syystä keskustelun aiheeksi.

Keskustelu sisäilman laadusta on viime vuosina liittynyt myös puurunkoisen pientalon ulkovaipparakenteiden kehittämiseen. Tiiviin rakentamistavan on katsottu olevan osasyynä rakennusten sisäilmasto-ongelmiin. Ratkaisuksi on esitetty mm. höyrynsulutonta (ei muovikalvoa) ulkovaippaa. Ulkovaipparakenteiden kehittämiseen liittyviä kysymyksiä ovat mm. olleet:

- Voidaanko puurakenteinen ulkoseinä tehdä ilman rakenteeseen sijoitettavaa muovikalvoa (höyrynsulkua)?
- Voidaanko ulkovaipan kosteuskapasiteetin lisäämisellä vaikuttaa rakennusten sisäilman talviaikaiseen kuivuuteen?

Puuseinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on tarkasteltu kauppa- ja teollisuusministeriön energiaosaston ja teollisuuden toimialayhdistysten rahoittamissa tutkimuksissa. Erilaisten ilman muovikalvoa toteutettujen seinärakenteiden toimintaa on tutkittu koerakentamiskohteessa tehtyjen mittausten /1/ sekä laboratorio- ja koetalomittauksista ja laskennallisista tarkasteluista saatujen tulosten avulla /4/. Tässä tutkimusraportissa esitetään koetalojen pitkäaikaismittauksissa saatuja tuloksia sekä arvioidaan

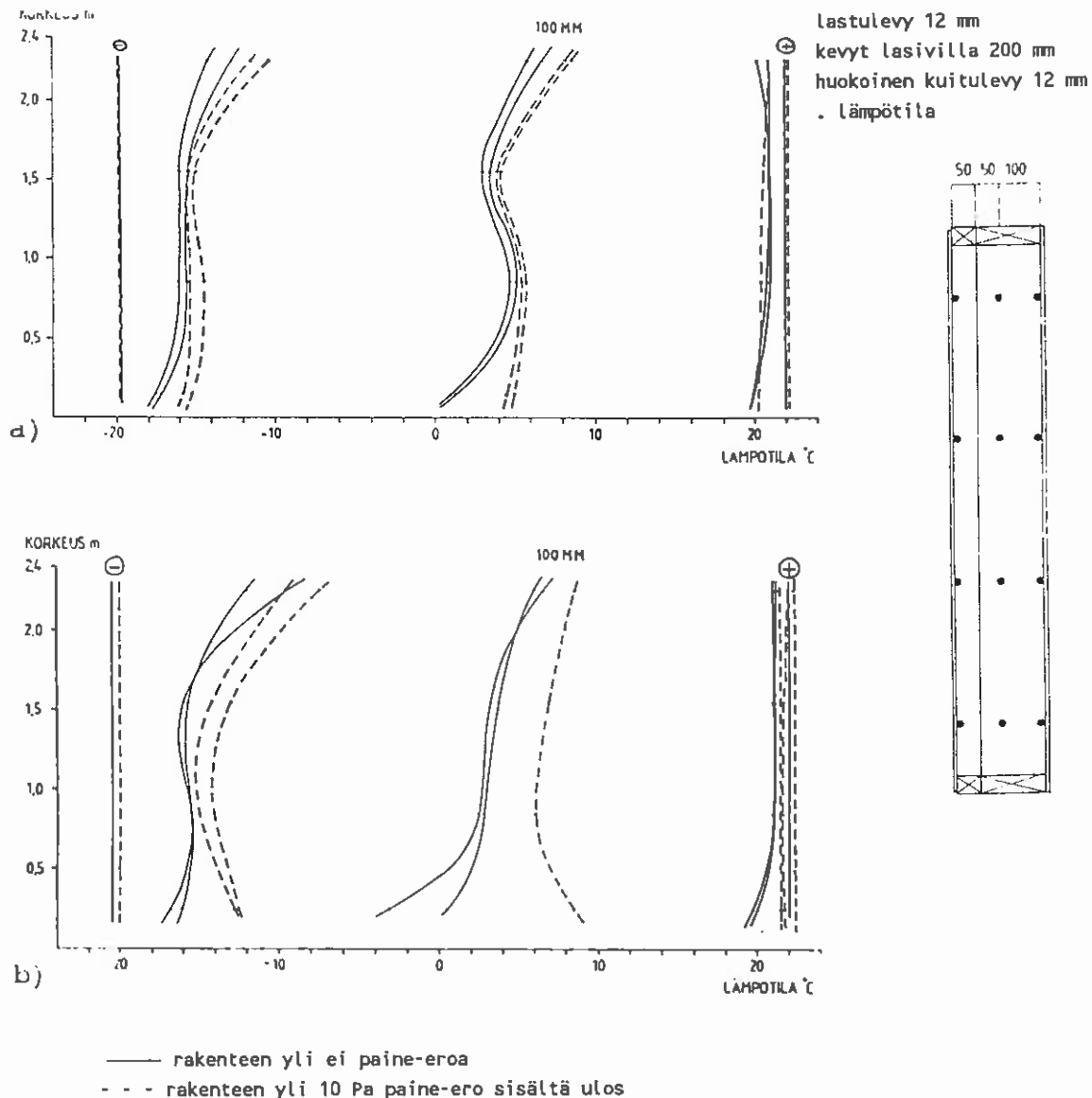
höyrynsuluttomien rakenteiden sovellutusperiaatteita pientalorakentamisessa. Samoin tehtyihin mittauksiin perustuen tarkastellaan puuseinän kosteusvaihteluiden vaikutuksia huoneilman kosteuteen. Puhallettavien lämmöneristeiden käyttöä seinäeristykseen tarkastellaan lopuksi.

2 HÖYRYNSULUN TARVE PUUSEINÄSSÄ

2.1 Yleistä

Rakenteiden ilmavirtaukset - puutteellisesta tuulensuojauksesta johtuvat ilmavirtaukset ja sisäilmasta ulkoilmaan tapahtuvat läpivirtaukset - ovat merkittävin puurakenteisen ulkoseinän toimintaan vaikuttava tekijä. Seinärakenteeseen sijoitettavan muovikalvon eli höyrynsulun tehtäväksi mielletään yleensä vesihöyryn haitallisen diffuusion estäminen. Tyypillisessä pientalon ulkoseinässä muovikalvo on lämmöneristyskerroksen sisäpinnassa, ja rakenne suojataan rakennuslevyillä sisä- ja ulkopuolelta. Tällaisessa rakenteessa muovikalvo on kunnollisesti asennettuna ainoa riittävän yhtenäinen rakennekerros, joka voi estää rakenteen läpi tapahtuvat haitalliset ilmavirtaukset.

Rakenteen läpi sisältä ulos tapahtuvat virtaukset voidaan estää ilmansulun ohella myös järjestämällä rakennukseen alipaine ulkoilmaan nähden. Tämä voi kuitenkin johtaa kylmän ulkoilman hallitsemattomaan virtaukseen rakenteissa. Helposti ilmaa läpäisevillä lämmöneristeillä eristetyissä rakenteissa jo lämpötilaeroista johtuvan luonnollisen konvektion vaikutukset rakenteen lämpötiloihin voivat olla merkittäviä (kuva 1) /2, 4/. Eristyspaksuuden kasvaessa rakenteen kunnollinen tuulensuojaus on yhä tärkeämpi rakenteen toimivuuteen vaikuttava tekijä.



Kuva 1. Laboratoriokoerakenteen pystysuuntaiset lämpötilajakaumat, kun rakenteen eri puolten lämpötilaero on 42 °C. Kaksi viivaa kuvaavat lämpötilojen vaihtelualueita koeolosuhteissa /4/.

a) Ilmanpitävä rakenne

b) Rakenteen ilmanpitävyyttä heikennetty.

Höyrönsuluttomiin puuseinärakenteisiin liittyvän tutkimuksen perustavoitteena oli selvittää ne edellytykset, joilla muovikalvo voidaan jättää pois seinärakenteesta. Lähtökohdaksi oli pientalon puurunkoinen ulkoseinä, jonka lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta voidaan pitää rakennuksen lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmästä riippumatta riittävän hyvänä. Tutkimuksessa ideoitujen rakenteiden toimivuutta tarkasteltiin aluksi laboratoriokokeiden ja lasken-

nallisten tarkastelujen avulla /4/. Rakenteiden toimivuutta käytäntöä vastaavissa olosuhteissa ja siihen vaikuttavia tekijöitä on selvitetty kahdessa VTT:n koetalossa, joista toisessa mittauksia on tehty vuoden 1985 ja toisessa vuoden 1986 syksystä alkaen vuoden 1988 kesään saakka. Seuraavassa on tarkasteltu koetaloissa tehtyjä mittauksia ja niistä saatuja tuloksia.

2.2 Koetalotutkimus

2.2.1 Koerakenteet ja rasitusolosuhteet

Koetaloissa tehtyjen mittausten tarkoituksena oli tutkia höyrynsuluttomien rakenteiden toimintaa käytäntöä vastaavissa olosuhteissa. Mittaukset tehtiin kahdessa koetalossa. Koetalo X on $5 * 6 \text{ m}^2$ kokoinen, yksikerroksinen, elementtirakenteinen puutalo. Rakennuksessa on harjakatto. Rakennuksen ulkoseinät korvattiin höyrynsuluttomilla rakenteilla (kuvat 2 ja 3) siten, että seinät purettiin elementtien runkorakenteita lukuunottamatta. Valmiin pystyrungon avulla rakennettiin uudet eristysrakenteet, jotka erotettiin rakennuksen lattia- ja perustusrakenteista kosteussulkujen avulla. Koerakenteiden koot ovat $3,0 * 2,5$ tai $2,5 * 2,5 \text{ m}^2$. Rakennuksen ulkoverhouksena on vaakalaudoitus. Ulkoverhouksen alla on 25 - 30 mm leveä tuuletusrako lukuunottamatta lounaaseen suuntautuvaa päätyä, jonka koerakenteissa ei ole tuuletusrakoa. Muutostyöt tehtiin vuoden 1985 keväällä, ja mittaukset aloitettiin saman vuoden syksyllä. Osa mittaustuloksista on jo julkaistu /4/.

VTT:n koetaloista yksikerroksisen puutalon ($8 * 16 \text{ m}^2$, tilavuus 384 m^3) ulkoseinäelementit vaihdettiin kuvien 5 ja 6 höyrynsuluttomiin rakenteisiin vuoden 1986 kesällä. Koerakenteet olivat $3,9 * 3,0 \text{ m}^2$ elementtejä, jotka tehtiin koetaloalueella ja nostettiin autonosturin avulla paikalleen. Elementtien väliset saumat tiivistettiin muovipäällysteisellä saumavillalla. Lattian- ja katonrajojen saumat tiivistettiin polyuretaanivaahdolla. Rakennuksen etelä-,

itä- ja pohjoisseinillä on lomalautaverhous, joka on tuettu vaakatasossa kulkevilla kapeilla, 12 mm paksuilla vaneririimoilla, kuva 4. Kun lomalaudan paksuus on 17 mm, pääsee ulkoverhouksen takana oleva tuuletusrako tuulettumaan pääasiassa lautojen välissä olevien 17 * 70 mm rakojen kautta. Tuuletusrakoa ei tässä tapauksessa voida pitää täysin avoimena vaan lähinnä osittain kuristettuna. Rakennuksen länsisivun koerakenteiden (rakenne 4) kohdalla on avoin 50 mm leveä tuuletusrako. Ulkoverhouksena on vanerilevy. Rakennuksessa on elementtirakenteinen, loiva sisäpuolisella vedenpoistolla varustettu katto, joka muodostaa noin 300 mm räystäät rakennuksen kaikille sivuille.

Koetalon X rakenteissa käytettiin lämmöneristeenä kevyttä lasivillaa (nimellistiheys noin 19 kg/m^3) sekä puhallettavia kivivilla- ja selluloosaeristeitä. Puhalluseristeiden kuivatiheydet ja asennusvaiheen kosteuspitoisuudet olivat:

- puhallettava kivivilla:

- kuivatiheys runkotolppavälistä riippuen $62 - 64 \text{ kg/m}^3$
- asennusvaiheen kosteuspitoisuus 0,5 painoprosenttia kuivapainosta

- puhallettava selluloosaeriste:

- kuivatiheys runkotolppavälistä riippuen $52 - 63 \text{ kg/m}^3$
- asennusvaiheen kosteuspitoisuus 10 painoprosenttia kuivapainosta.

VTT:n koetalojen höyrinsuluttomissa rakenteissa lämmöneristeenä oli pääosin kevyt, nimellistiheydeltään 30 kg/m^3 oleva kivivilla. Kahdessa koe-elementissä eristeenä oli nimellistiheydeltään 70 kg/m^3 oleva kivivilla ja kahdessa puhallettava selluloosaeriste. Lisäksi yksi koerakenne oli tehty kokonaan huokoisesta kuitulevystä. Mineraalivillieristeiden nimellisvahvuus oli 5 - 10 mm eristystilan vahvuutta suurempi. Selluloosaeristeen kuivatiheys vaihteli runkotolppavälistä riippuen $64 - 72 \text{ kg/m}^3$, ja asennusvaiheen kosteuspitoisuus oli noin 8,5 painoprosenttia kuivapainosta. Eristystä puhallettaessa elementtien (kaksi kappaletta) sisä- ja ulkopuolen levyt tuettiin runkoon nel-

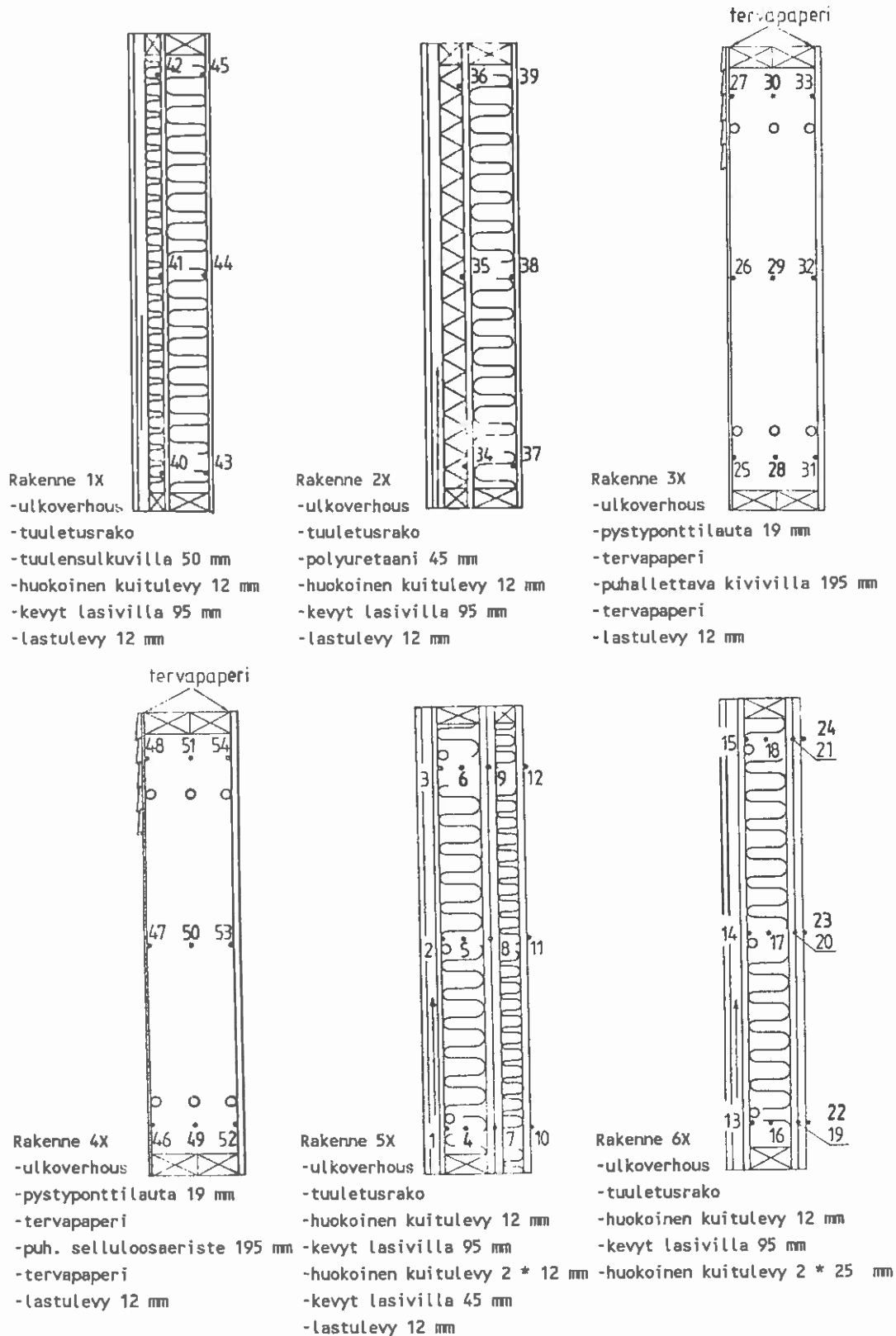
jälle korkeudelle kiinnitettyjen tukilautojen avulla, sillä puhalluksen aiheuttama paine pyrki vaurioittamaan rakenteita. Levyt oli kiinnitetty paineilmanaulaimen hakasilla 70 - 100 mm välein. Puhallustyön aikaisesta levyjen tuenasta huolimatta puhalluksen aiheuttama paine työnsi suurimpiin eristystiheyksiin puhalletuissa rakenteissa elementtien sisäpinnan levyjä 2 - 10 mm irti rungosta. Raot täyttyivät tiukkaan pakkaantuneella eristeellä.

Puhallettavien lämmöneristeiden asennuksista VTT:n koetaloissa ja koemökissä X vastasivat eristysliikkeet.

Koetalon X sisäilman lämpötila ja suhteellinen kosteus säädettiin talvella vakioiksi (+22 °C ja 40 %, marraskuu - huhtikuu). Ulkoilman lämpötilan vaihtelut vaikuttivat jonkin verran sisäilman lämpötiloihin. Sisäilman lämpötilassa oli ilman huonosta sekoittumisesta johtuvia 1 - 3 °C eroja korkeussuunnassa. Suhteellinen kosteus oli säätöjärjestelmän epätarkkuuksista johtuen 35 - 45 %.

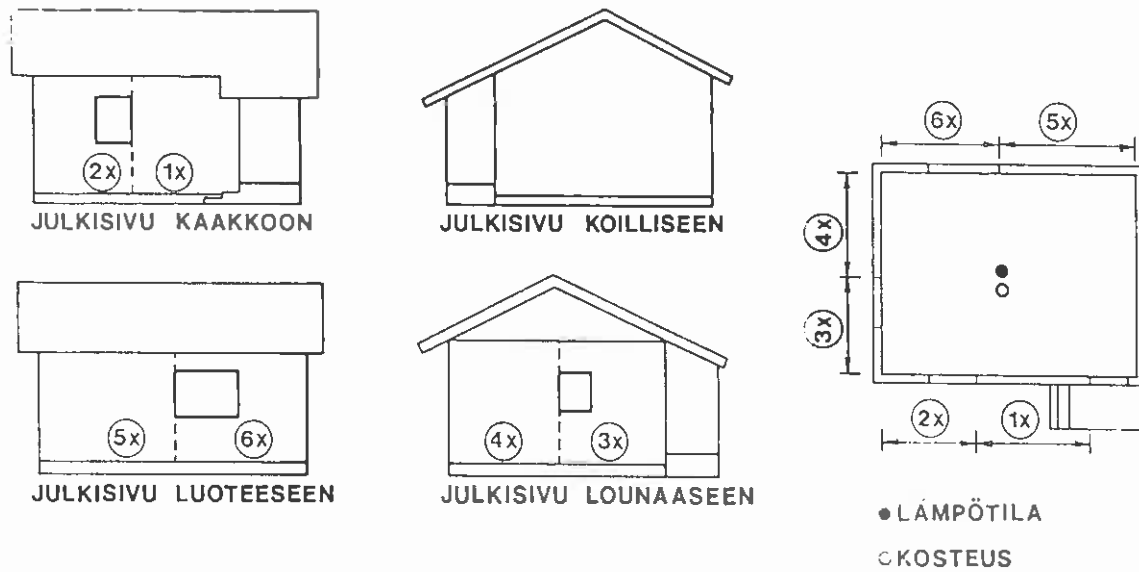
VTT:n koetalojen yksikerroksiseen puutaloon järjestettiin aluksi yhden ja jatkossa kahden ilmankostuttajan avulla vakiokosteustuotto. Talvella sisäilman kosteus oli 15 - 55 %. Alhaisin kosteus saavutettiin talven 1986 - 1987 pitkän pakkaskauden aikana. Lämpötila säädettiin +23 °C (vaihtelu ±3 °C). Sisäilmaa sekoitettiin neljän kanavapuhaltimen avulla, jolloin korkeussuuntaiset erot olivat pieniä. Rakennuksessa tehdyt muutos- ja korjaustyöt laskivat sisäilman lämpötilan ensimmäisenä seurantalvena ajoittain 10 ja 20 °C välille.

Kummankin koetalon lämmitys katkaistiin kesäksi. Sisäilman lämpötila ja kosteus vaihtelivat näin ollen ulkoilman vaihtelujen mukaan. Kesällä sisäilman olosuhdevaihdoksia ei mitattu.

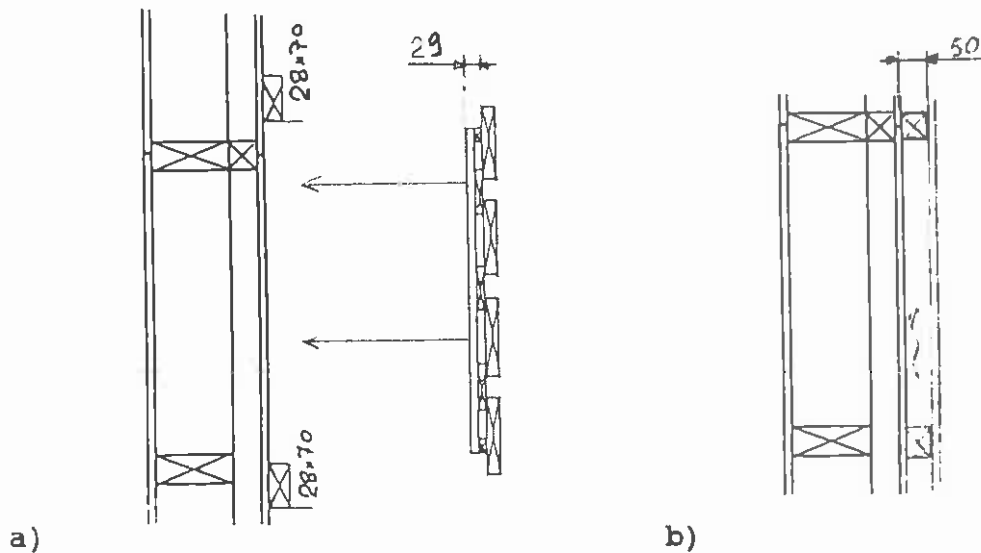


Kuva 2. Koetalon X koerakenteiden periaatteet ja mittauspisteet.

Lämpötila
Kosteus

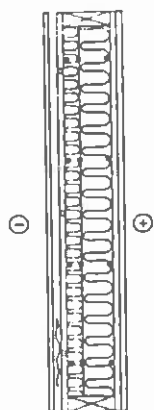


Kuva 3. Koerakenteiden sijainti koetalossa X.



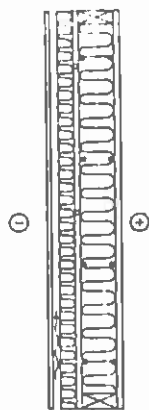
Kuva 4. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon koerakenteiden tuuletusrakojen rakenneperiaatteet.

- Tuuletusrako rakennuksen etelä-, itä- ja pohjoissivulla
- Tuuletusrako rakennuksen länsisivulla.



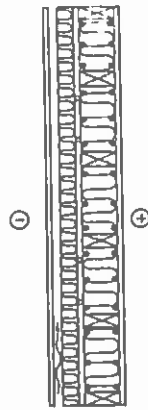
Rakenne 1

- ulkoverhous
- tuuletusrako
- huokoinen kuitulevy 12 mm
- kevyt kivivilla 165 mm
- lastulevy 2 * 12 mm



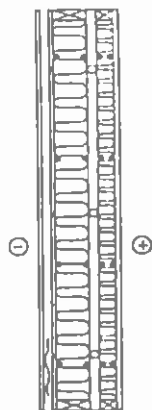
Rakenne 2 (2E1 ja 2P1)

- ulkoverhous
- tuuletusrako
- tuulensulkuvilla 50 mm
- huokoinen kuitulevy 12 mm
- kevyt kivivilla 120 mm
- (pystyrunko)
- lastulevy 12 mm



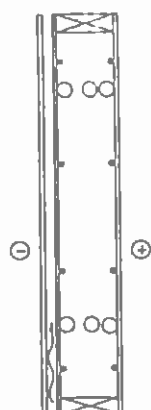
Rakenne 2 (2E2 ja 2P2)

- ulkoverhous
- tuuletusrako
- tuulensulkuvilla
- huokoinen kuitulevy
- lämmöneristys (vaakarunko)
- kevyt kivivilla 165 mm (2E2)
- raskas kivivilla (70 kg/m³, 2P2)
- lastulevy 12 mm



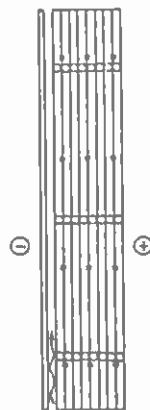
Rakenne 3

- ulkoverhous
- tuuletusrako
- huokoinen kuitulevy 12 mm
- kevyt kivivilla 90 mm
- huokoinen kuitulevy 25 mm
- kevyt kivivilla 50 mm
- lastulevy 12 mm



Rakenne 4

- ulkoverhous
- tuuletusrako
- puolikova kuitulevy 9 mm
- puh. selluloosaeriste 165 mm
- puolikova kuitulevy 9 mm

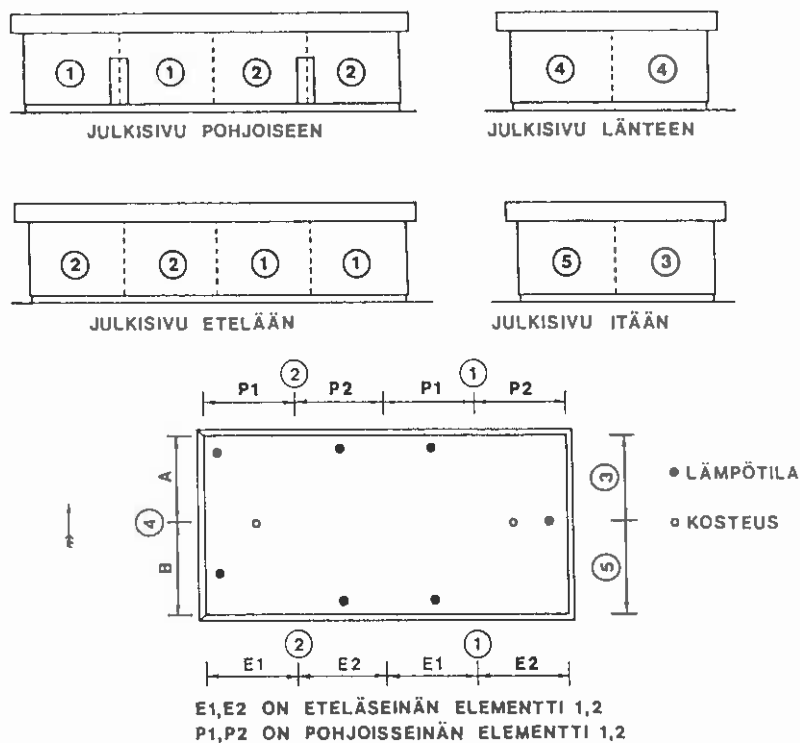


Rakenne 5

- ulkoverhous
- tuuletusrako
- huokoinen kuitulevy 8 * 25 mm

Kuva 5. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon koerakenteet ja mittauspisteet.

Lämpötila
Kosteus



Kuva 6. Koerakenteiden sijainti VTT:n koetalojen yksikerroksisessa puutalossa.

2.2.2 Tutkimusmenetelmät

Koerakenteiden toimintaa seurattiin lämpötila- ja kosteusmittauksin. Lämpötilamittaukset tehtiin kuvissa 2, 3, 5 ja 6 esitetyistä mittauspisteistä. Lämpötilat tallennettiin mikrotietokoneen ohjaaman dataloggerin avulla kolmen minuutin välein ja tulostettiin tuntikeskiarvoina. Koetalossa X sisäilman olosuhteet mitattiin rakennuksen keskeltä siten, että lämpötila mitattiin 0,5 ja 2 m korkeudelta ja suhteellinen kosteus mittaus 1 m korkeudelta lattiasta. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon sisäilmastoa seurattiin seitsemästä mittaustilasta (kuva 6) kolmelta korkeudelta lattiasta. Rakennuksen sisäilman kosteutta mitattiin rakennuksen päädyistä metrin korkeudelta lattiasta.

Lämpötilamittauksissa käytettiin koetalossa X Cu-Ko-ter-moelementtejä ja VTT:n koetalloissa termistoreita.

Rakenteiden kosteusvaihteluja seurattiin ottamalla rakenteista ajoittain näytteitä, joiden kosteuspitoisuudet määritettiin punnitus-kuivatusmenetelmällä. Kosteusnäytteet otettiin 90 mm lieriöporalla. Näytteiden ottokohdat korjattiin samaa materiaalia olevalla kappaleella. Kosteusnäytteitä otettiin eristystä rajoittavista levykerroksista. Puhalluseristeillä eristetyistä rakenteista näytteitä otettiin myös eristyskerroksesta, joka jaettiin kolmeen likimain yhtä paksuun osaan.

Koetalon X rakenteiden kosteusvaihteluita seurattiin pääosin rakenteisiin sijoitettujen $2 * 50 * 50$ mm mäntyliuskojen (ns. vertailupalat) avulla. Liuskat asennettiin rakenteisiin seinien rakennusvaiheessa. Kosteusmääritykset tehtiin ottamalla ajoittain liuskoja rakenteista ja määrittämällä näiden kosteuspitoisuudet punnitus-kuivatusmenetelmällä. Kosteusmittaukset tehtiin eri runkotolppaväleistä kuin lämpötilamittaukset lukuunottamatta koetalon X rakennetta 3X, josta lämpötila ja kosteus mitattiin samasta runkotolppavälistä. Lisäksi rakenteista otettiin kosteusnäytteitä sekä mitattiin rakenteissa 3X ja 4X olevan pystyponttilaudan kosteusvaihteluita puun kosteusmittarilla.

Vertailupalojen avulla voidaan rakenteen kosteusvaihteluita seurata välillisesti. Kun vertailupalat asennetaan rakennekerrosten rajapinnoille, voidaan menetelmällä saada suotuisissa olosuhteissa käsitys rajapinnan kosteusvaihteluista (esimerkiksi kosteuden tiivistymisestä rajapinnalle). Mittausmenetelmänä vertailupalamittaukset sopivat käytettäväksi muiden mittausmenetelmien tukena. Mittauksissa käytettyjen mäntyliuskojen etuna voidaan pitää sitä, että niiden kosteuden perusteella voidaan päätellä kerroksessa olevien puuosien kosteusvaihteluita. Mittaustulosten perusteella voidaan ainoastaan arvioida muiden materiaalikerrosten kosteutta.

Koerakenteet lämpökuvattiin ajoittain. Lämpökuvauksen avulla voidaan saada käsitys rakenteiden lämmöneristysten kunnosta. Kaksivaiheinen lämpökuvaus tapahtuu rakennuksen normaalissa käyttötilassa sekä suuren sisäpuolisen alipaineen vallitessa, jolloin voidaan havaita myös ilmavuotokohdat. Koetalossa X lämpökuvaukset tehtiin ainoastaan rakennuksen normaalissa käyttötilassa. VTT:n koetalojen yksikerroksisessa puutalossa käytettiin kaksivaiheista kuvausta rakenteiden tarkastuksessa ensimmäisenä talvikautena ja seuraavina lämpökuvausta normaalissa käyttötilassa.

Yksikerroksisessa puutalossa mitattiin myös rakennuksen ulkovaipan vuotoilman määrä. Tehdyn painekokeen tuloksena saatiin rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyttä kuvaava ilmavuotoluku. Ilmavuotoluku määritetään 50 Pa sisäpuolisesä alipaineessa. Painekokee tehtiin ensimmäisenä seurantalvena. Ilmanpitävyydessä ajan myötä tapahtuneista muutoksista ei saatu vertailukelpoisia tuloksia, sillä rakennuksen perustusrakenteita muutettiin tutkimuksen aikana.

2.2.3 Rakenteiden toimivuus

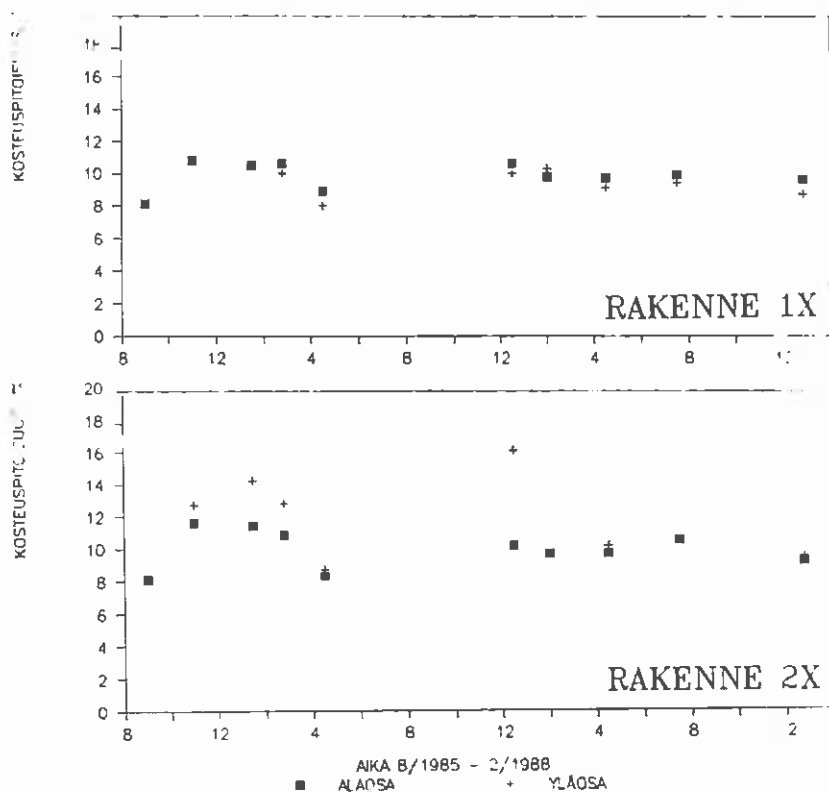
Koerakenteista saatuja mittaustuloksia on kuvissa 7 - 24. Kosteusmittausten tulosten perusteella rakenteisiin talven aikana kertynyt kosteus kuivui kevään tai alkukesän aikana, joten varsinaisia kosteuskeräytyksiä ei syntynyt. Kuitenkin joidenkin koerakenteiden kosteusvaihtelut olivat varsin suuria, ja rakenteiden kosteudet kuivuivat varsin hitaasti. Seuraavassa on lyhyet arviot rakenteiden toimivuudesta.

Koetalo X

Koetalon X rakenteen 1X kosteusvaihtelut olivat pieniä. Kuitulevy ei muodosta eristyskerrokseen kosteudensiirron kannalta tiivistä kerrosta. Rakenne toimii kosteusteknisesti hyvin. Rakenteen sisäverhouslevynä olevan lastulevyn alaosan lämpötilat olivat talvella ajoittain lähellä

tuulensulkuvillan sisäpinnan lämpötiloja. Tämä saattoi johduttaa rakenteen tekotavasta vanhojen lattia- ja perustusrakenteiden päälle ja ilmavirtauksista alkuperäisissä rakenteissa. Rakennetyypin toimivuuden kannalta on hyvä limittää tuulensulkuvillalevyjen ja kuitulevyjen saumat sekä saumata tuulensulkuvillalevyt tähän tarkoitukseen käytettävällä saumausmassalla.

Rakenteesta 2X otettujen kuitulevynäytteiden kosteudet olivat toisena seurantatalvena melko suuria rakenteen yläosassa. Polyuretaani on kosteuden siirron kannalta tiivis samalla, kun rajapinnan lämpötilat saattoivat olla talvella melko korkeita (+5 - +15). Vaikka rakenteen kosteusvaihteluita voitaisiinkin pienentää esimerkiksi sisäpinnan maalauksella, muodostaa mineraalivillaeristyksen ulkopuolella oleva tiivis kerros rakenteelle kosteusteknisen riskin. Rakenneratkaisun toimivuutta ei näin ollen voida pitää puun kosteudenkeston kannalta riittävän turvallisena.

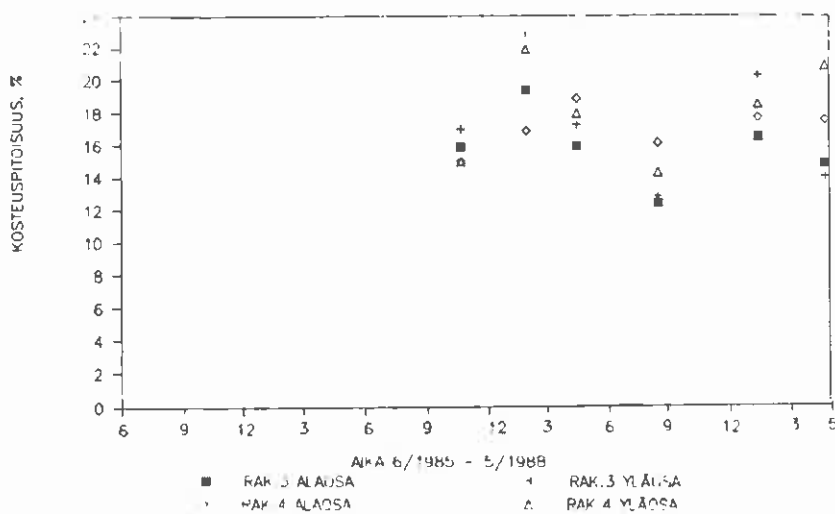


Kuva 7. Rakenteista 1X ja 2X otettujen kuitulevynäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

Rakenteiden 3X ja 4X kosteudet olivat ajoittain suuria. Kosteus väheni hitaasti kevään ja alkukesän aikana. Rakenteissa ei ole ulkoverhouksen alla tuuletusrakoa, mikä hidasti kuivumista. Selluloosaeristeellä lämmöneristetty rakenne kuivui hieman hitaammin kuin mineraalivillarakenne, mikä on voinut johtua selluloosaeristeen suuremmasta kyvystä sitoa kosteutta itseensä. Rakenneperiaatetta ei sellaisenaan voida pitää kosteusteknisesti toimivana, mutta ulkoverhouksen alle tehtävällä tuuletusraolla rakenteen toimivuutta voidaan parantaa. Eristyksen ulkopuolisten rakennekerrosten vesihöyrynläpäisevyyttä kasvattamalla voidaan vaikuttaa kuivumiseen. Kyseessä olevissa rakenteissa eristyskerrosten tervapaperi ja pystyponttilauta voidaan korvata vesihöyryä helpommin läpäisevällä tuulensululla.

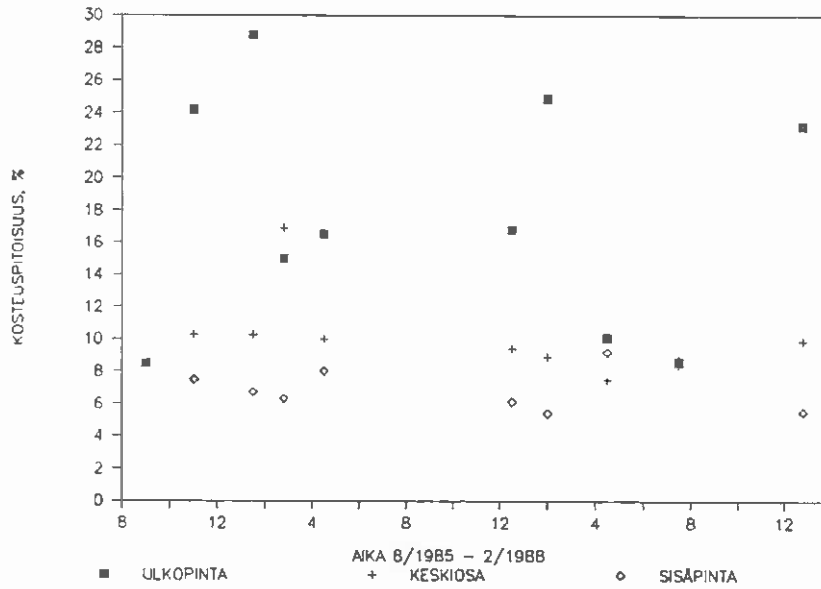
Rakenteen 4X selluloosaeristyksestä otettujen näytteiden kosteuspitoisuudet olivat talvella rakenteen yläosassa selvästi alaosaa suurempia. Eristeen painuminen on ilmeisesti vaikuttanut rakenteen ilmapirtausominaisuuksiin, jolloin konvektiovirtaukset eristyskerroksessa ovat olleet mahdollisia. Puhalluseristeiden käyttöä seinissä on tarkasteltu lähemmin luvussa 4.

RAKENTEET 3X JA 4X (PYSTYPONTTILAUTA)

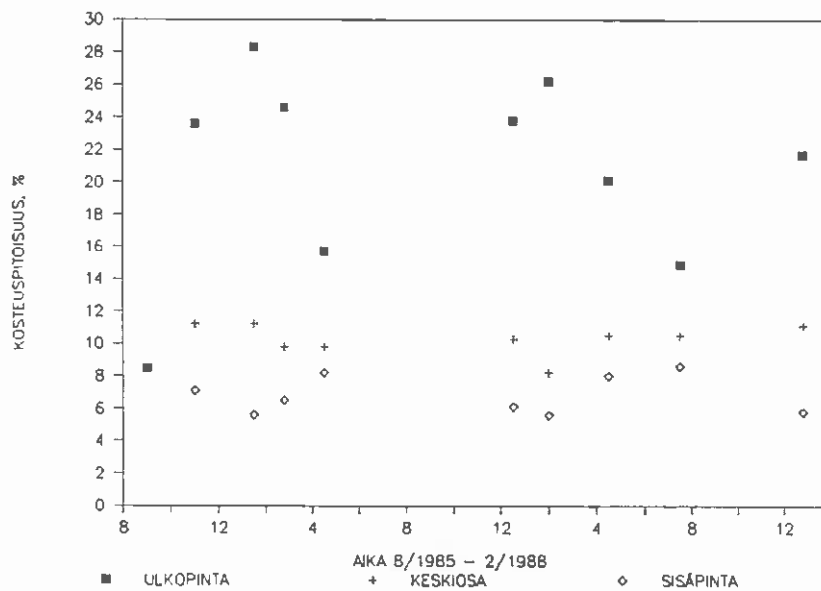


Kuva 8. Rakenteiden 3X ja 4X pystyponttilaudan kosteuden vaihtelut painoprosentteina kuivapainosta.

RAKENNE 3X, YLÄOSA

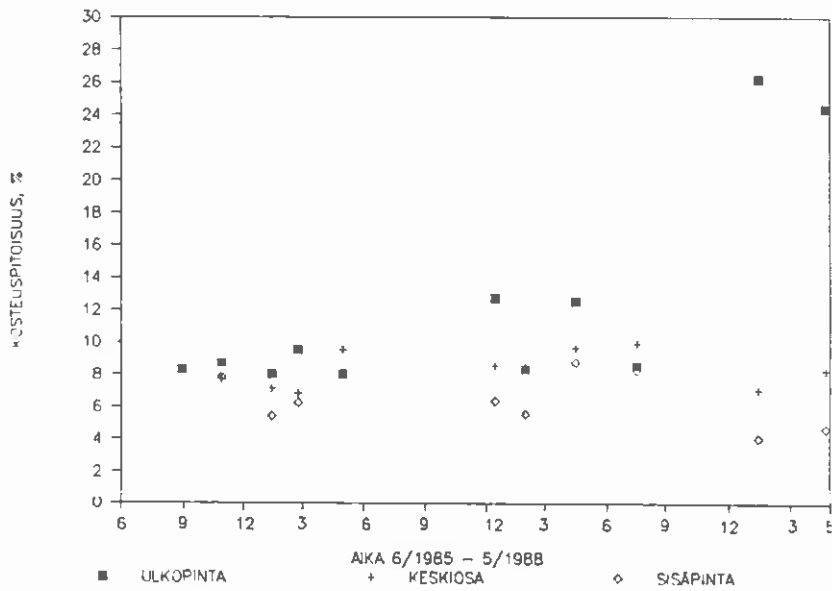


RAKENNE 3X, ALAOSA

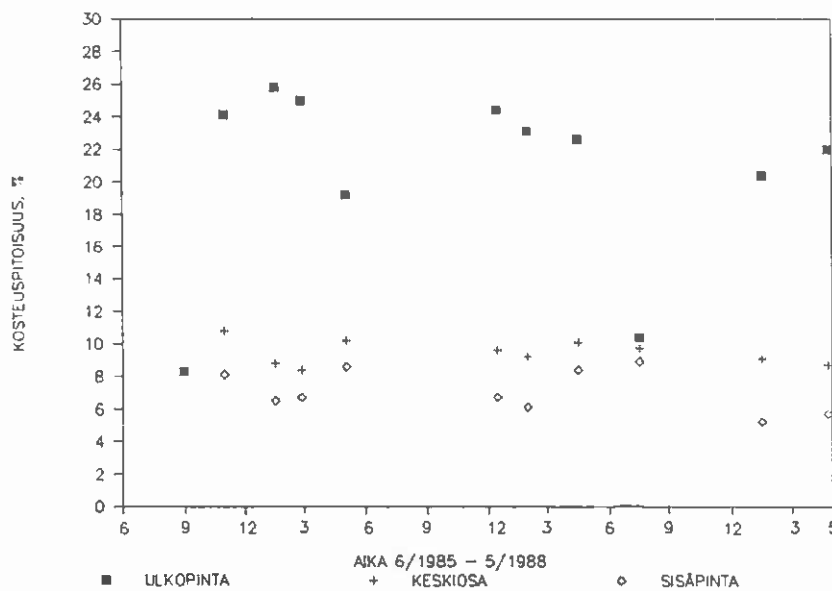


Kuva 9. Rakenteesta 3X otettujen vertailupalojen kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

RAKENNE 4X, YLÄOSA

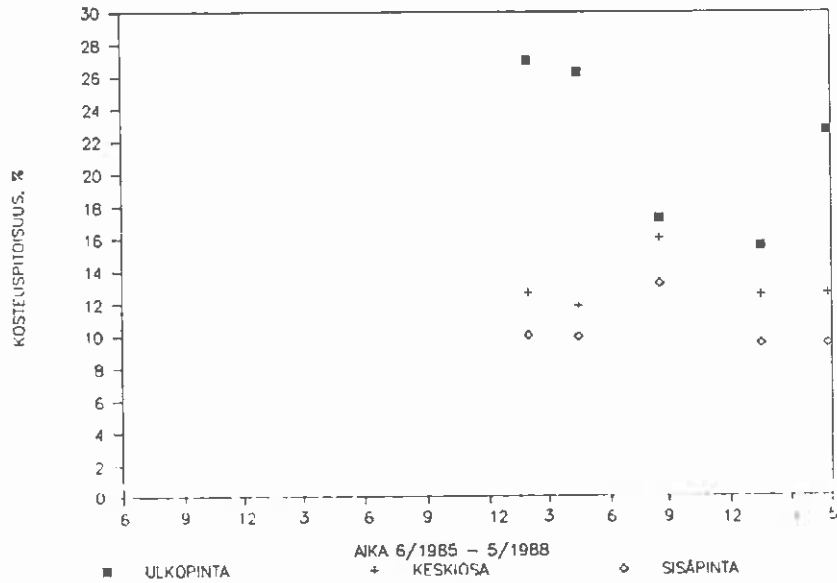


RAKENNE 4X, ALAOSA

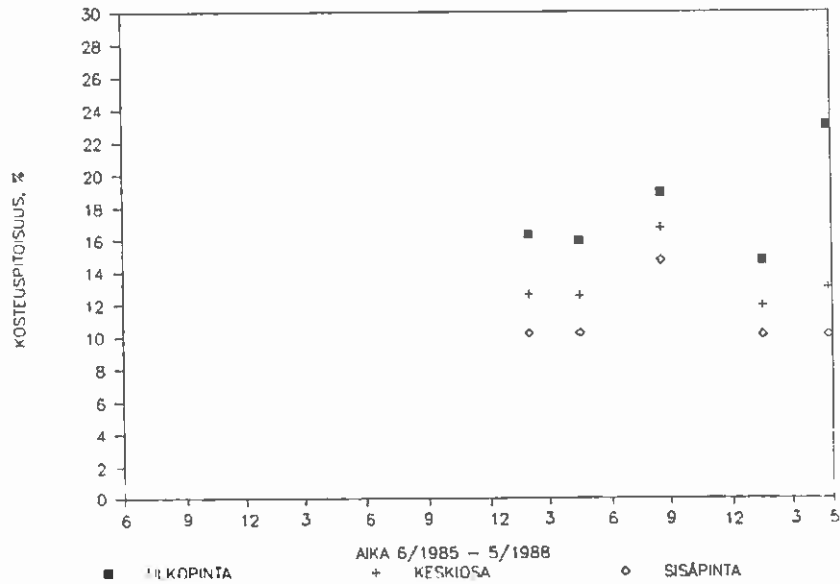


Kuva 10. Rakenteesta 4X otettujen vertailupalojen kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

RAKENNE 4X, YLÄOSA



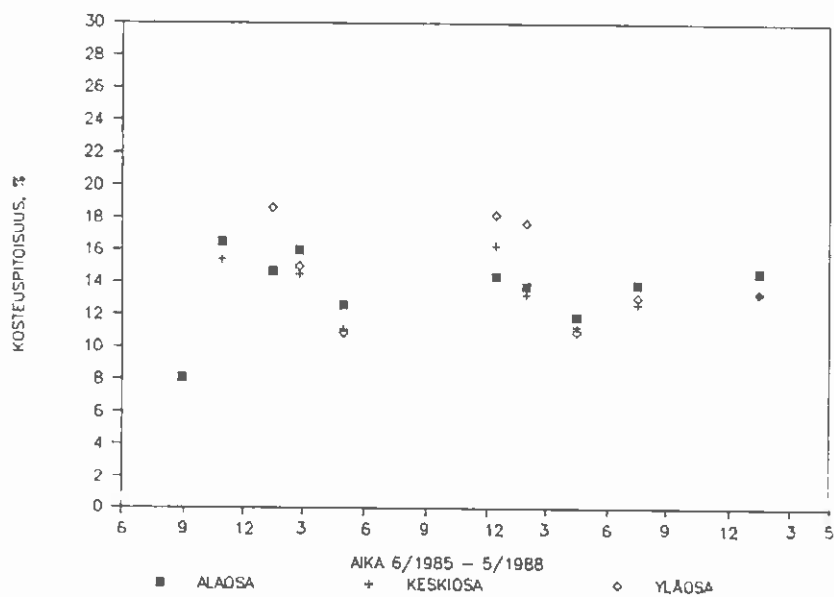
RAKENNE 4X, ALAOSA



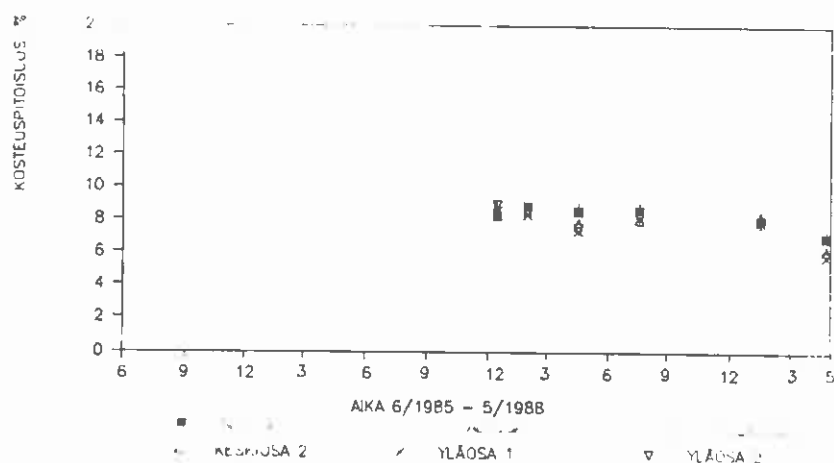
Kuva 11. Rakenteesta 4X otettujen eristysnäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

Rakenteiden 5X ja 6X tuulensulkulevyjen kosteudet ovat olleet keskitalvella korkeita. Rakenteet ovat kuitenkin kuivuneet nopeasti keväällä. Rakenteen 6X ilmanpitävyyttä heikennettiin tarkoituksellisesti ensimmäisen seurantatalven jälkeen, mikä näkyy myös rakenteen kosteusvaihteluissa. Rakenne 5X on tulosten perusteella toimiva.

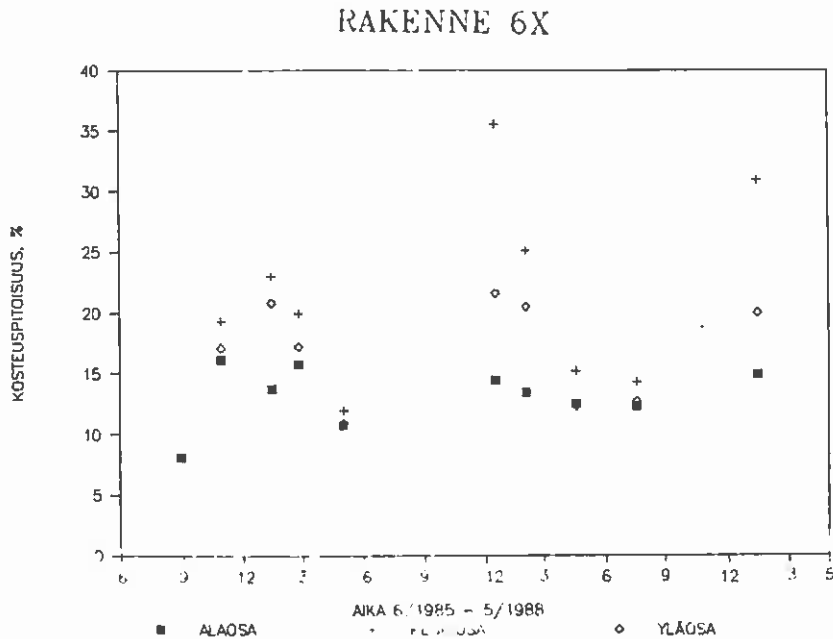
RAKENNE 5X (VERTAILUPALAT)



RAKENNE 5X, KUITULEVY 12 + 12 MM



Kuva 12. Rakenteesta 5X otettujen vertailupalojen ja kuitulevynäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.



Kuva 13. Rakenteesta 6X otettujen vertailupalojen kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

Koetalon X seinäratkaisut vaikuttivat ensimmäisen seuranta-talven (1985 - 1986) jälkeen toimivilta /4/. Jatkoseuranta (1986 - 1988) paljasti kuitenkin, että tutkimuksessa mukana olleiden rakenteiden 2X, 3X, 4X ja 6X varmuutta sisäilman aiheuttamaa kosteusrasitusta vastaan ei voida pitää riittäväenä. Rakenne 6 saataisiin ilmeisesti toimivaksi hyvällä ilmanpitävyydellä ja sisäpinnan maalaamisella tai pinnoittamisella siten, että sisäverhouksen vesihöyrynvastus kasvaa.

VTT:n koetalojen yksikerroksinen puutalo

Koetalon lämpökuvaukset ja painekoe osoittivat rakennuksen rakenteet ja rakenteiden liitokset ilmanpitäviksi. Painekokeen tulokseksi saatu ulkovaipan ilmavuotoluku 1,2 l/h vastaa puurakenteisessa talossa erittäin hyvää ilmanpitävyytensä. Suurimmat ilmavuotokohtat olivat seinäelementtien ja perustusrakenteiden sauma muutamassa kohdassa, elementtien välisten saumojen alareunat paikoin sekä rakenteiden sisäverhouslevyjen saumat paikoin. Ilmavuodot olivat

kuitenkin varsin pieniä. Painekekeen perusteella rakennuksen käyttötilan ilmanvaihtuvuudeksi arvioitiin 0,2 - 0,3 ilmanvaihtokertaa tunnissa.

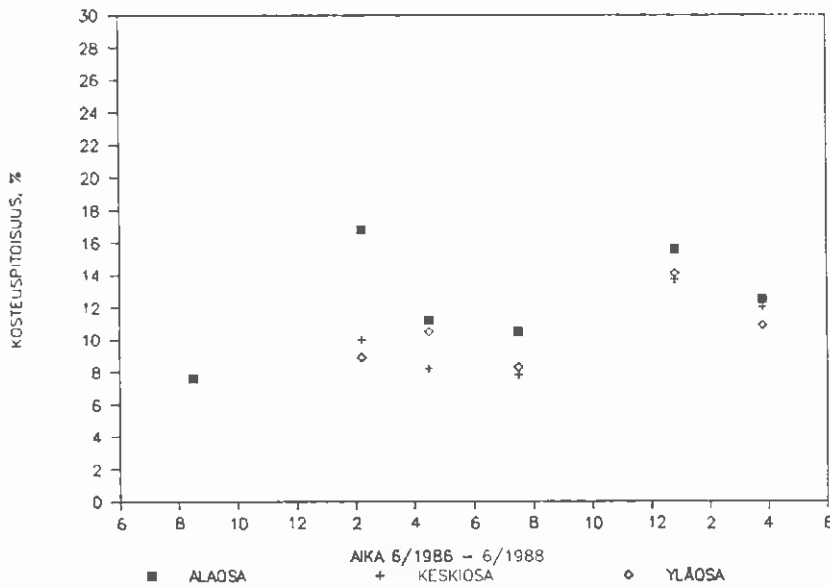
Rakenteiden 1 ja 2 eri elementtien kosteusvaihtelut ovat olleet puuseinän toimivuuden kannalta riittävän pieniä, vaikka koetalon pohjoisseinän kosteudet olivatkin talvella jonkin verran suurempia kuin eteläseinällä. Lämpökuvauksissa rakenteiden ja rakenneliitosten ilmanpitiävyys havaittiin hyväksi. Rakenteesta 1 mitatut kosteudet olivat yleensä suurempia elementtien alaosissa kuin yläosissa. Tähän on ilmeisesti vaikuttanut tuuletusraon puutteellinen toiminta sekä raon alareunan tukkeutuminen rakennuksen seinustoille kertyneen lumen takia. Rakenteen 1 sisäverhouksen kaksinkertaisen lastulevykerroksen vesihöyrynvastus on riittävä verrattuna huokoiseen kuitulevyn vastukseen.

Lämpötilamittausten perusteella rakenteiden 1 ja 2 eristyskerroksissa on tapahtunut ilmavirtauksia (kuvat 17 - 20). Rakenteiden ilmavirtaukset ovat ilmeisesti olleet lämpötilaerojen aiheuttamia konvektiovirtauksia, jotka eivät kuitenkaan ole vaikuttaneet kosteusjakaumiin rakenteen korkeussuunnassa. Mineraalivillan nimellistiheydellä (30 tai 70 kg/m³) ei ole ollut vaikutusta konvektiovirtauksiin, vaan käytettyjen eristeiden ilmanläpäisevyyttä oleellisempaa on ollut eristystä rajoittavien rajapintojen muodostamat virtausreitit. Rakenteen 1 eristyskerroksessa yläosan lämpötilat olivat 3 - 5 °C alaosaa suurempia, kun sisä- ja ulkoilman lämpötilaero oli 35 - 40 °C. Suurimmillaan rakenteen eristyskerroksen pystysuuntainen lämpötilaero oli noin 10 °C.

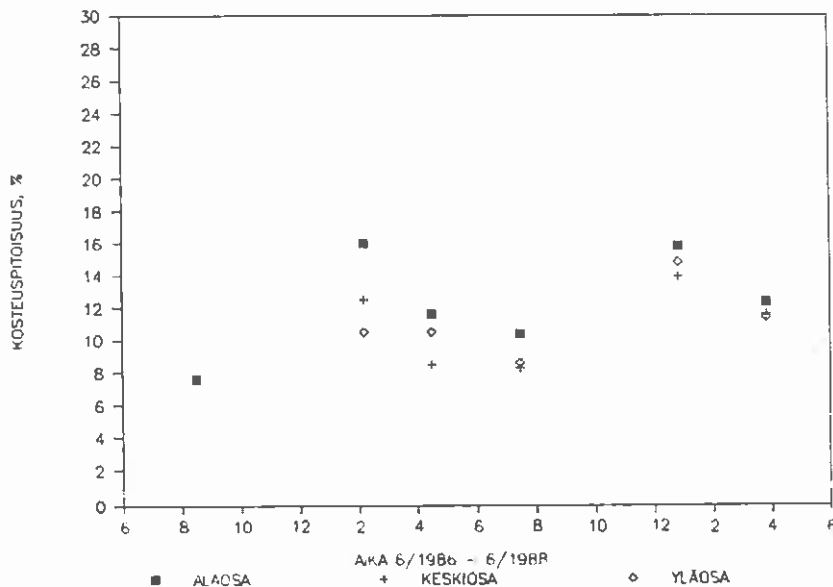
Rakenteen 2 elementeissä oli sekä pysty- että vaakaruonon avulla tehtyjä rakenteita. Konvektion merkitys rakenteiden lämpötiloihin oli suurempi pystyrunkoisissa elementeissä. Pystyrunkoisten elementtien lämpötiloissa ei ollut suuria eroja verrattaessa saatuja tuloksia rakenteen 1 lämpötiloihin. Rakenteen 2 tuulensulkuvillalevyjen saumaus olisi

saattanut parantaa rakenteen lämpöteknistä toimivuutta. Vaakarungon avulla tehdyissä rakenteissa pystysuuntaiset lämpötilaerot olivat pystyrunkoiseen verrattuna pienempiä, mikä tuli selvästi esille sisä- ja ulkoilman lämpötilaerojen ollessa suuret.

RAKENNE 1 (ETELÄSEINÄ, ELEMENTTI 1)

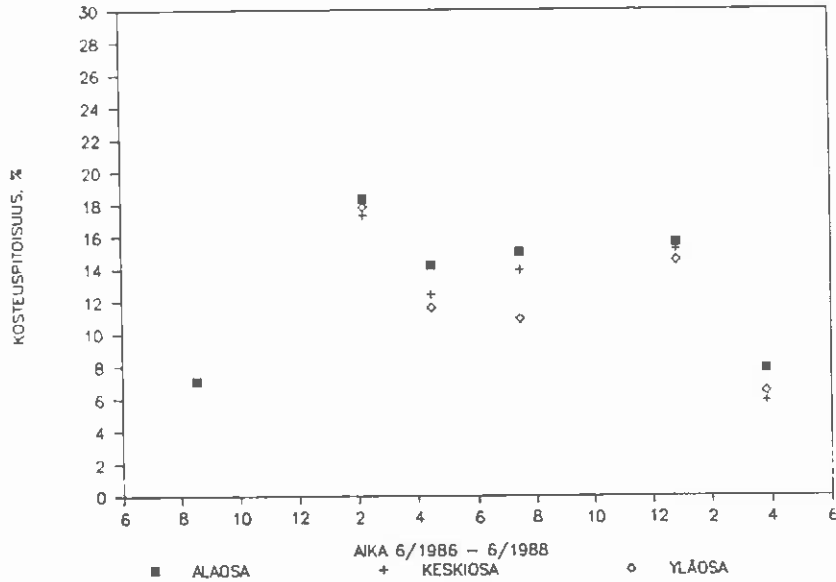


RAKENNE 1 (ETELÄSEINÄ, ELEMENTTI 2)

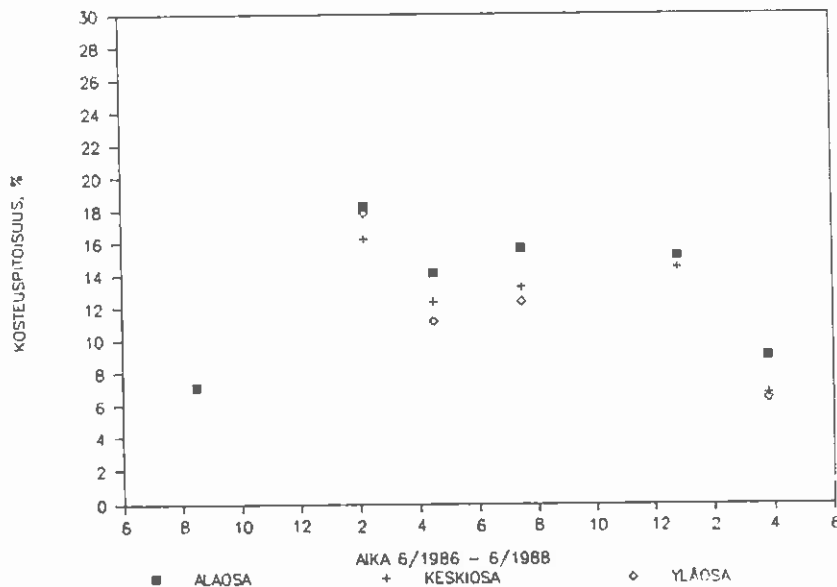


Kuva 14. Rakenteen 1 eteläseinän elementeistä otettujen kuitulevynäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

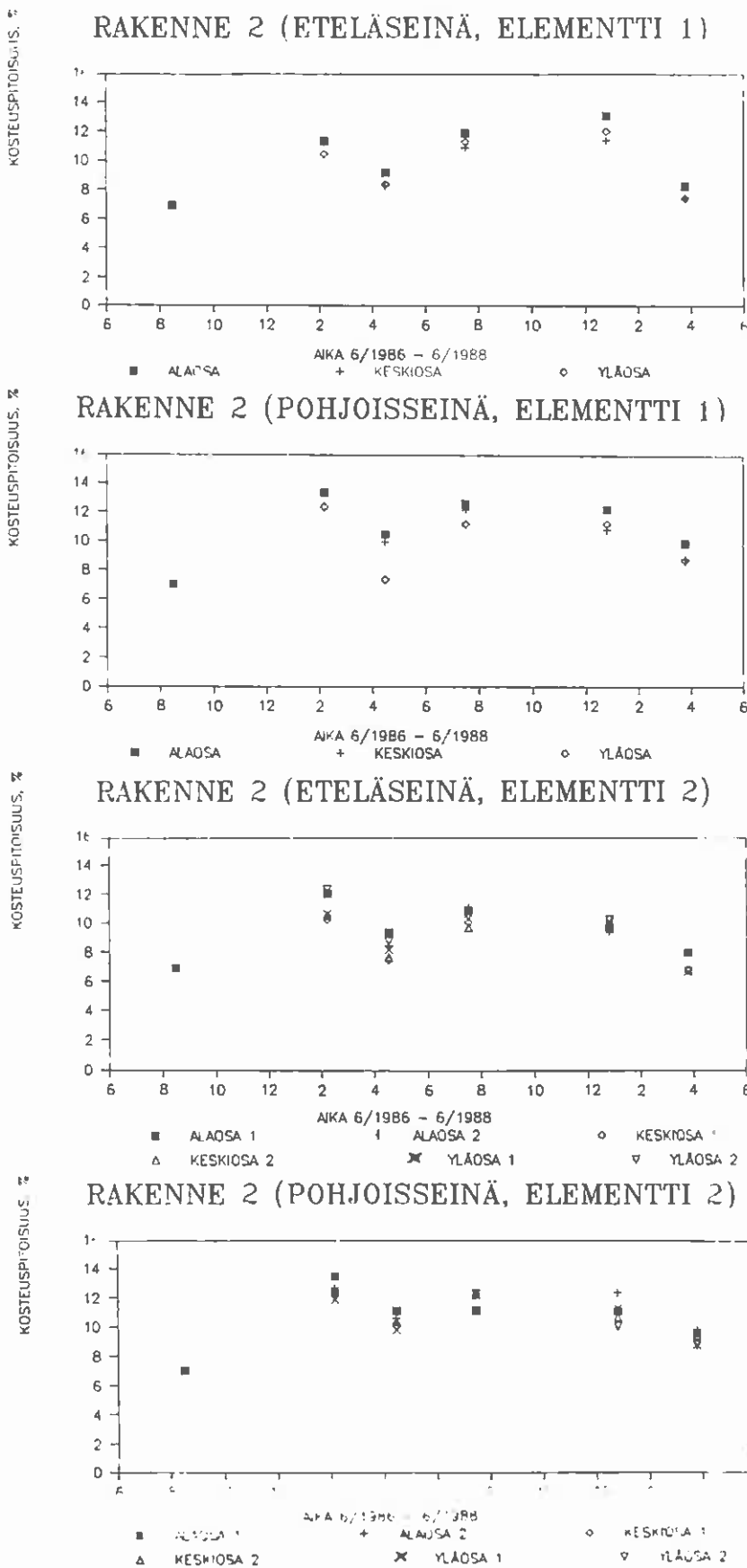
RAKENNE 1 (POHJOISSEINÄ, ELEMENTTI 1)



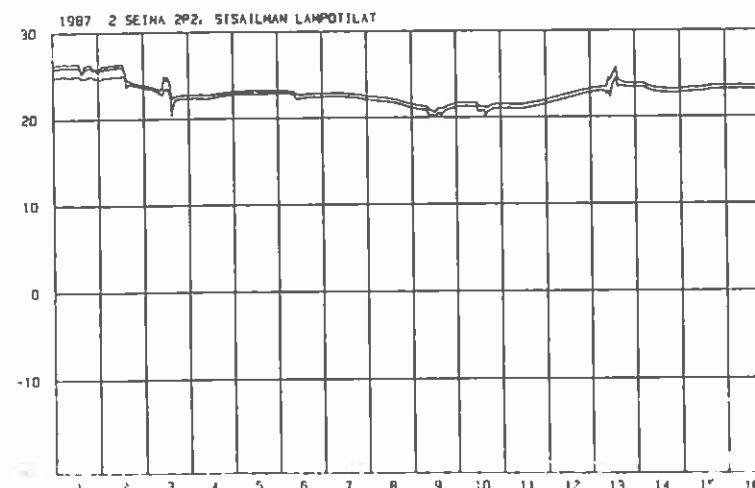
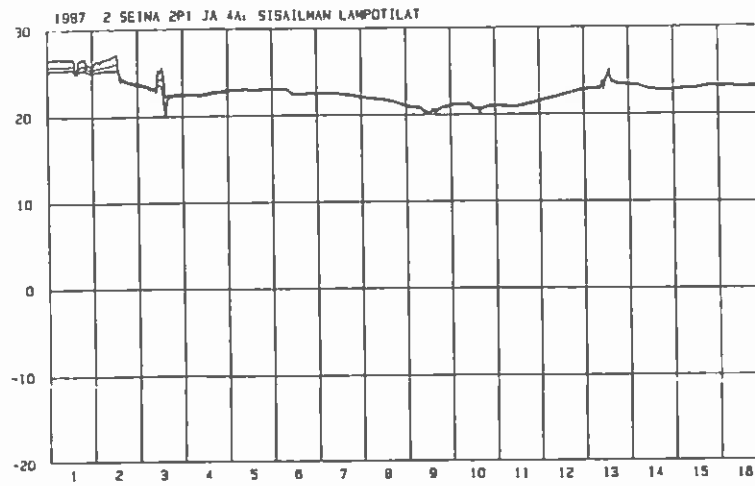
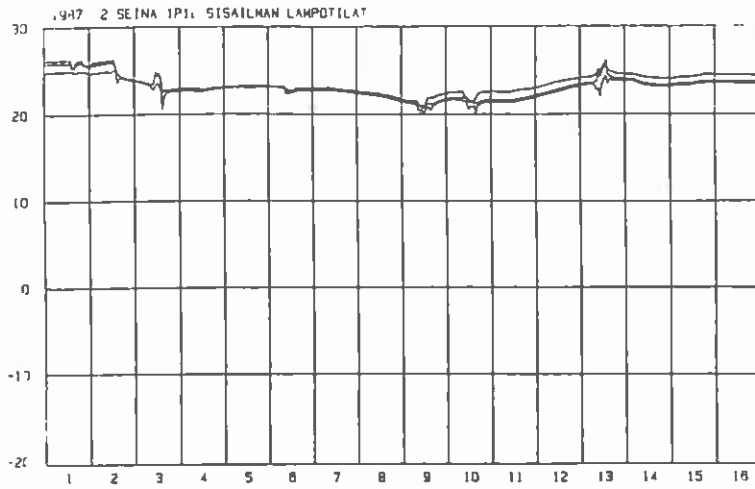
RAKENNE 1 (POHJOISSEINÄ, ELEMENTTI 2)



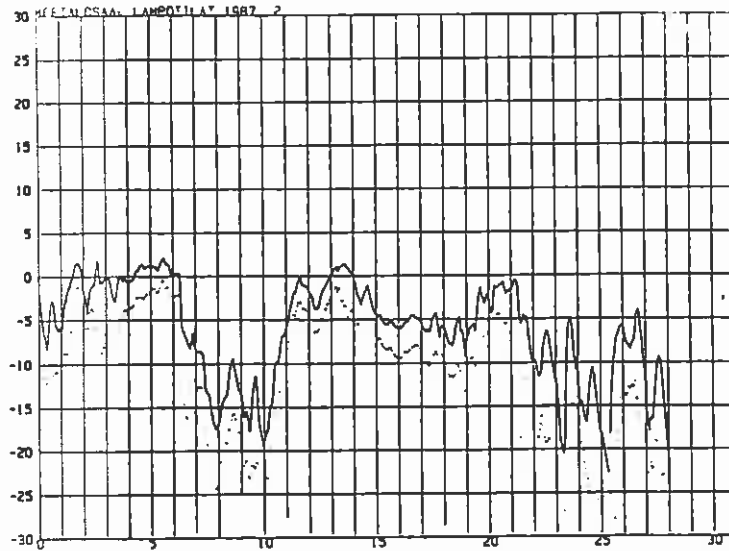
Kuva 15. Rakenteen 1 pohjoisseinän elementeistä otettujen kuitulevynäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.



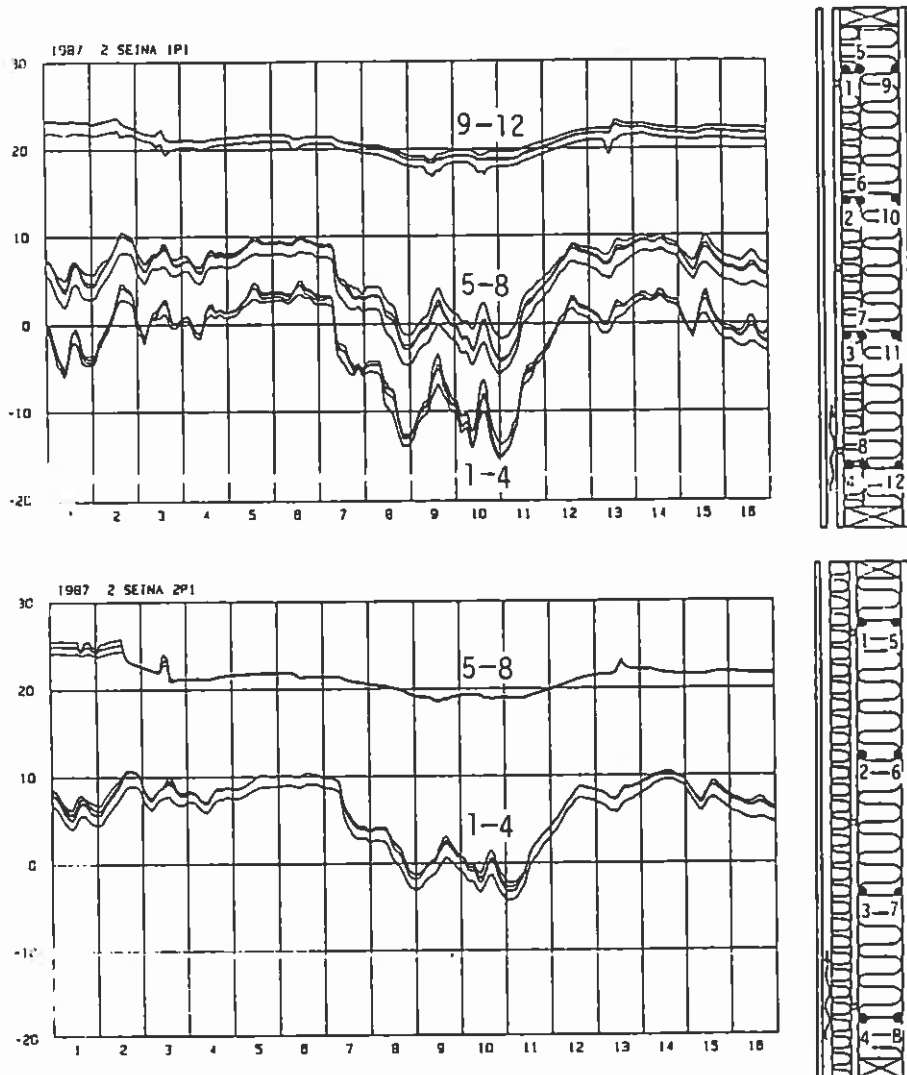
Kuva 16. Rakenteesta 2 otettujen kuitulevynäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.



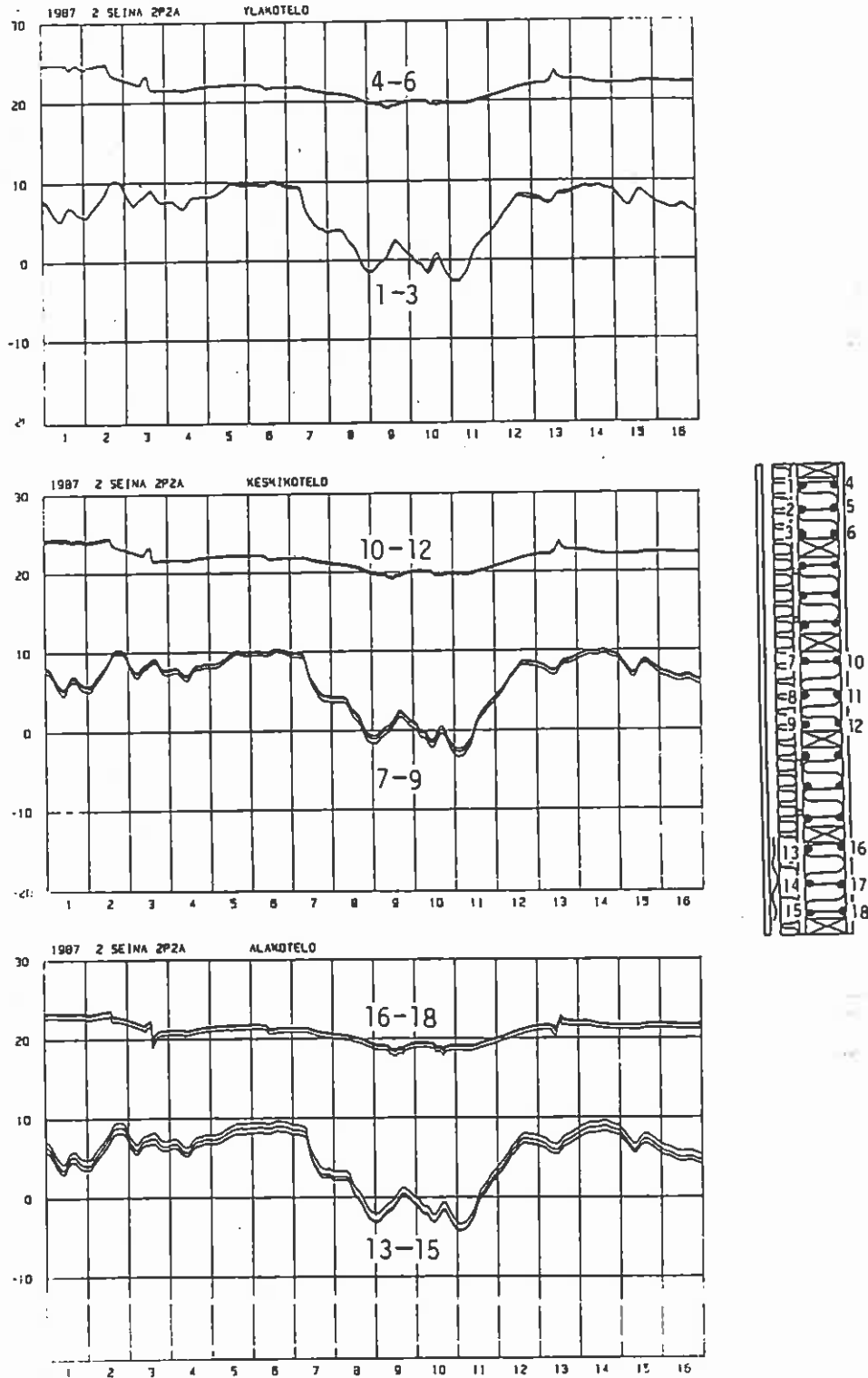
Kuva 17. Sisäilman lämpötilat 1. - 16.2.1987 elementtien 1P1, 2P1 ja 2P2 kohdilta mitattuina.



Kuva 18. Ulkoilman lämpötila helmikuussa 1987 (VTT:n koetalojen sääasema).



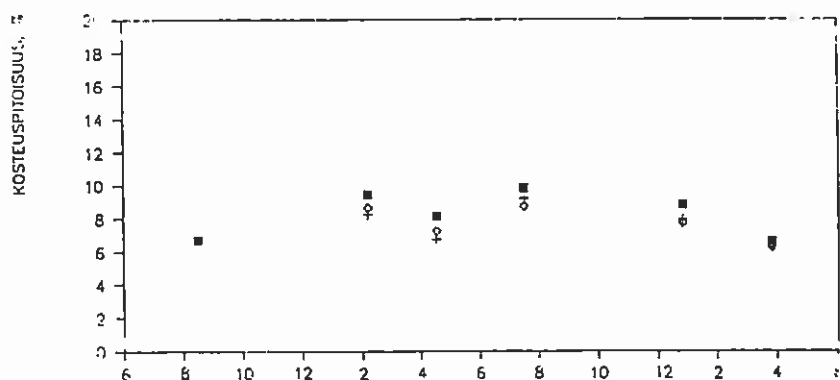
Kuva 19. Lämpötilamittausten tuloksia rakenteista IP1 ja 2P1 (1. - 16.2.1987).



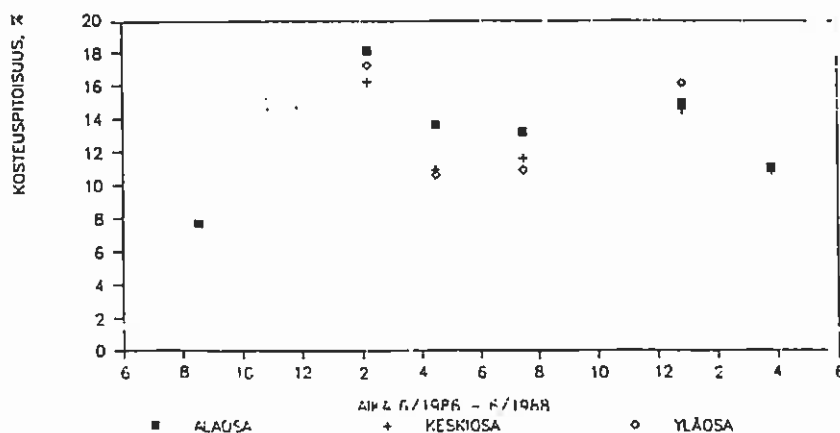
Kuva 20. Lämpötilamittausten tuloksia rakenteesta 2P2 (1. - 16.2.1987).

Rakenteen 3 tuulensulkulevyn kosteusvaihtelut (kuva 21) olivat puuseinärakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta hyväksyttävällä tasolla. Rakenteen eristyskerroksessa olleen 25 mm huokoisen kuitulevyn kosteudet olivat varsin pieniä. Eristyskerroksessa olleen kuitulevyn lämpötilat olivat rakenteen alaosassa melko alhaisia kovimpien pakkasten aikana. Lämpökuvausten perusteella elementin ja perustusrakenteen saumassa oli ilmavuotokohta. Elementin ja sokkelirakenteen välinen sauma tiivistettiin polyuretaanivaahdolla. Sauma on voinut täyttyä puutteellisesti. Rakenteen 3 eristyskerroksessa olevan kuitulevyn reunat jäivät elementin reunoja kiertävien runkopuiden väliin, jolloin rakennevirtaukset elementin alajuoksupuiden ja kuitulevyn saumasta ovat voineet johtaa rakenteen alaosan paikalliseen jäähtymiseen.

RAKENNE 3 (KUITULEVY 25 MM)



RAKENNE 3 (KUITULEVY 12 MM)



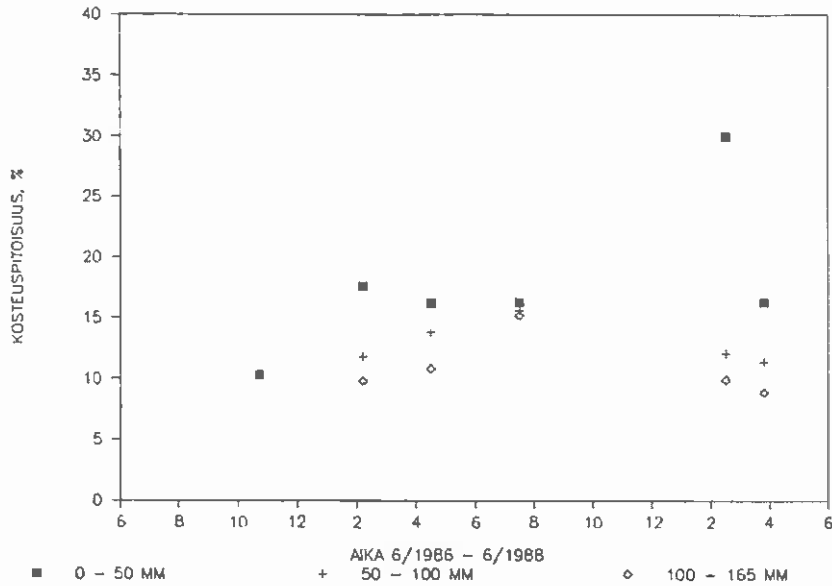
Kuva 21. Rakenteen 3 kuitulevykerroksista otettujen näytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

Rakenteen 4 selluloosaeristyksen uloimman kerroksen kosteusvaihtelut olivat varsin suuria, kuvat 22 - 23. Eristyksen uloin 10 - 20 mm paksuinen kerros oli talvella jäässä. Eristyksen uloimman osan voimakas kostuminen on voinut joutua sisäilman vesihöyryn tiivistymisestä tuulensulun pintaan ja selluloosaeristeen kyvystä sitoa itseensä tiivistyvää kosteutta. Kosteus kuivui varsin nopeasti keväällä. Rakenteen 4 kahden elementin kohdalla ulkoverhous oli tehty vanerilevyistä, joiden takana oli avoin 50 mm leveä tuuletusrako. Rakenneratkaisua ei voida pitää lämmöneristyksen suurten kosteusvaihteluiden takia kosteusteknisesti toimivana, sillä eristeen kosteusvaihtelut ovat käytännössä merkittävin selluloosaeristeen painumista aiheuttava tekijä. Eristyksen suuri kosteus ja kosteuden jäätyminen heikentävät myös rakenteen lämpötekniistä toimivuutta. Lämmöneristyksen suuria kosteusvaihteluita voitaisiin pienentää sisäverhouksen vesihöyrynvastusta kasvattamalla. Puhallettavien lämmöneristeiden käyttöä seinäeristykseen tarkastellaan lähemmin luvussa 4.

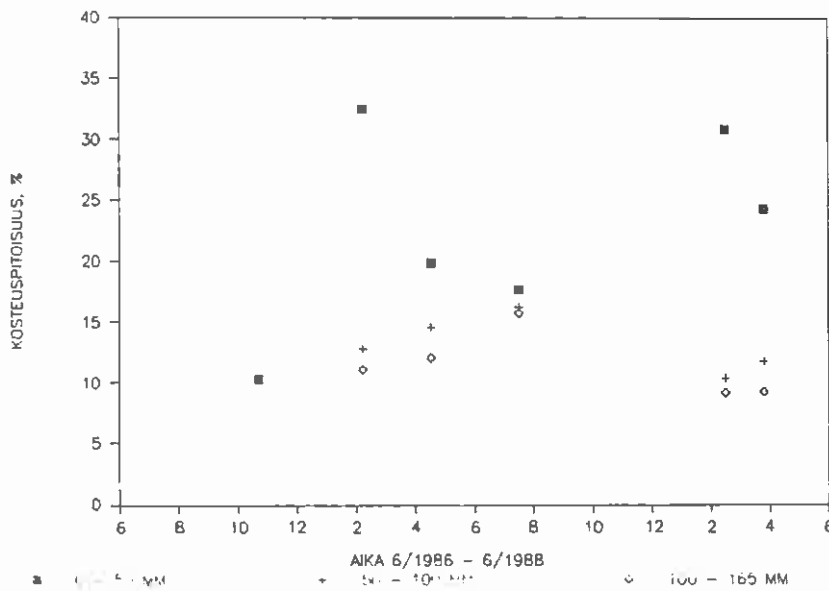
Rakenteen 5 kosteusvaihtelut ovat olleet pieniä, kuva 24. Rakenteen suurin kuitulevyn kosteuspitoisuus oli 16 painoprosenttia kuivapainosta uloimmassa kuitulevykerroksessa toisena seurantatalvena. Rakennetta voidaan pitää kosteusteknisesti toimivana.

VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon höyrynsuluttomat puuseinärakenteet olivat tutkimustulosten perusteella kosteusteknisesti toimivia lukuunottamatta rakennetta 4, jonka eristyskerroksen kosteusvaihtelut olivat suuria. Tutkitut rakenteet olivat riittävän ilmanpitäviä, ja koko rakennuksen ilmavuotoluku vastasi puurakenteisella talolla erittäin hyvää ulkovaipan ilmanpitävyyttä. On kuitenkin varsin todennäköistä, että käytännössä levyseinän ilmanpitävyyttä ei saada riittävän hyväksi ilman muovikalvon korvaamista muilla rakenteellisilla keinoilla.

RAKENNE 4A (YLÄOSA)

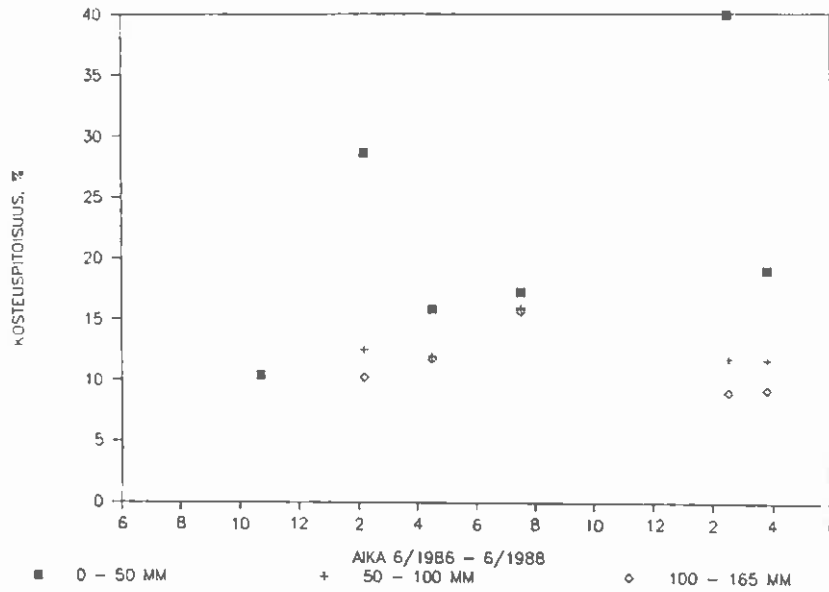


RAKENNE 4A (ALAOSA)

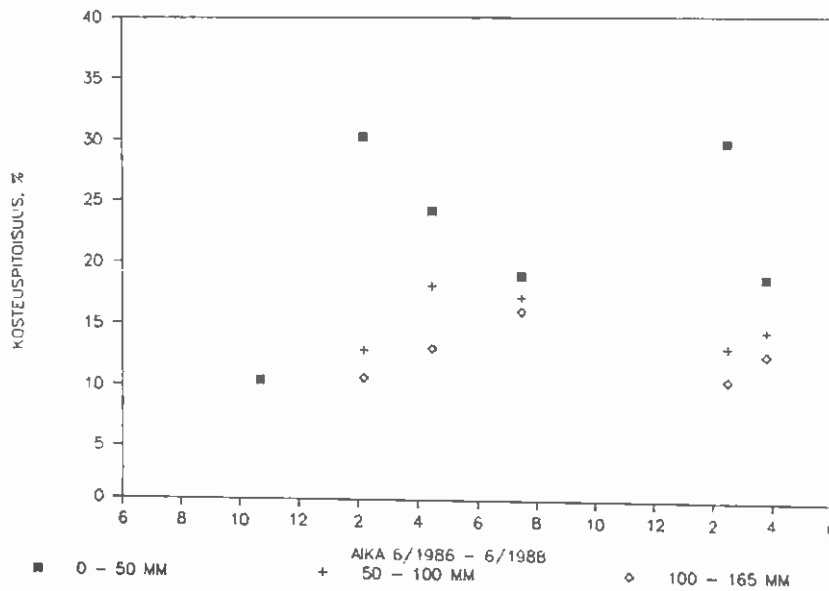


Kuva 22. Rakenteen 4A eristyskerroksesta otettujen näytteiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kuivapainosta.

RAKENNE 4B (YLÄOSA)

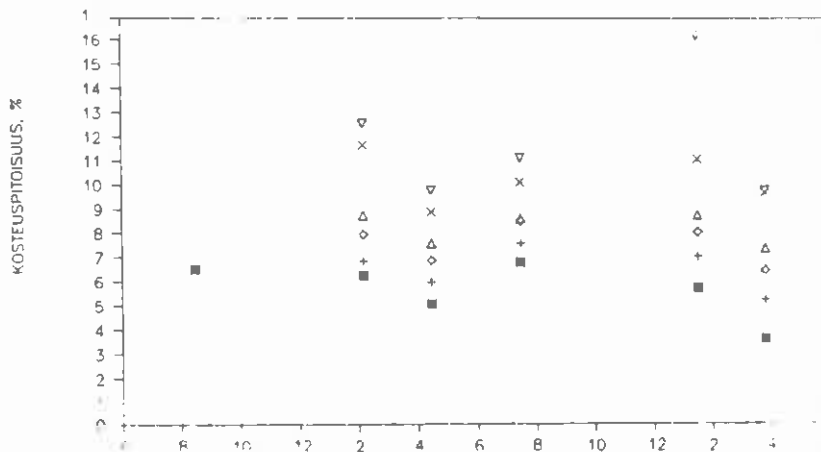


RAKENNE 4B (ALAOSA)

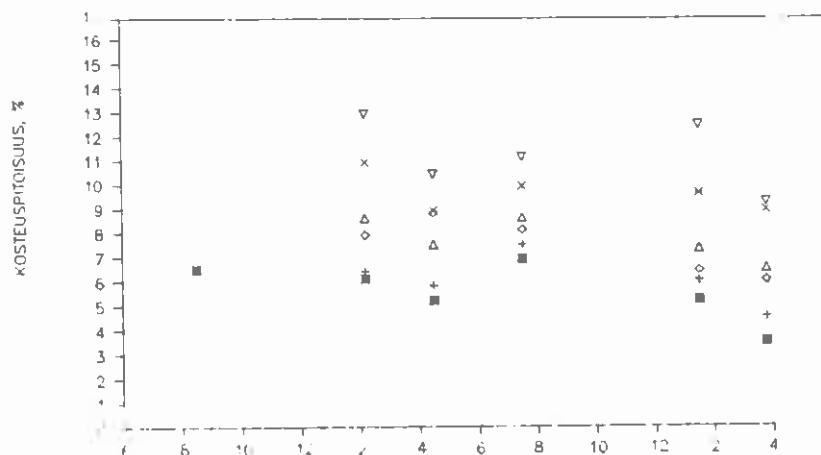


Kuva 23. Rakenteen 4B eristyskerroksesta otettujen näyt-
teiden kosteuspitoisuudet painoprosentteina kui-
vapainosta.

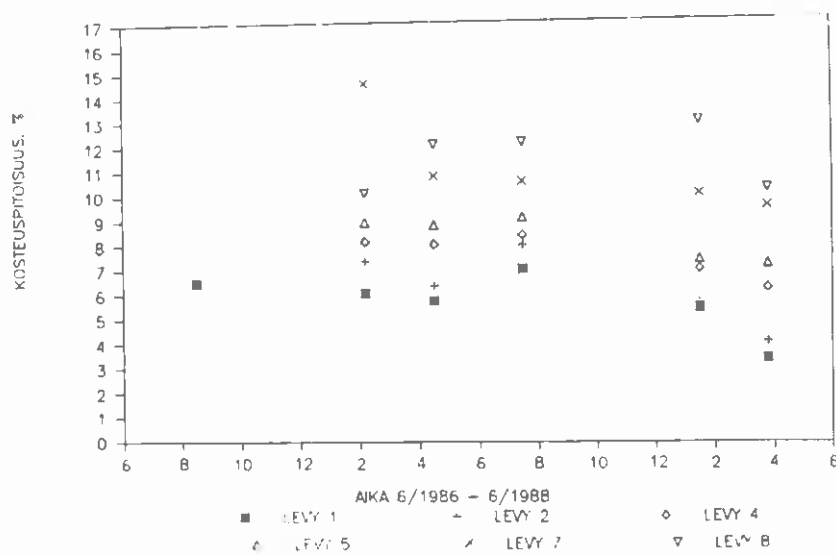
RAKENNE 5 (YLÄOSA)



RAKENNE 5 (KESKIOSA)



RAKENNE 5 (ALAOSA)



Kuva 24. Rakenteesta 5 otettujen kuitulevynäytteiden kosteuspitoisuudet painoprosenteina kuivapainosta.

2.3 Höyrynsuluttoman rakenteen toimivuuden edellytykset

Seuraavassa on tarkasteltu höyrynsuluttoman rakenteen toimivuuden edellytyksiä koetalotutkimuksessa ja tutkimuksesta aiemmin julkaistujen (/4/) laboratorikokeiden ja laskennallisten tarkastelujen tulosten avulla. Saatujen tulosten perusteella puurakenteisen pientalon ulkoseinä voidaan Suomen ilmastossa tehdä ilman höyrynsulkuna olevaa muovikalvoa tietyin edellytyksin. Höyrynsuluttomalta rakenteelta voidaan lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmästä riippumatta vaatia rakenteen hyvää ilmanpitävyyttä. Höyrynsuluttoman rakenteen kosteusrasitus on talvella suurempi kuin muovikalvon avulla tehdyn rakenteen. Ulkoverhouksen alle tehtävällä avoimella tuulettuvalla ilmaraolla voidaan varmistaa rakenteen kuivuminen.

Oikein tehty tuuletusrako estää myös sadeveden tunkeutumisen eristysrakenteeseen. Tuuletusraon avoimen, yhtenäisen osan minimileveyden tulisi olla 25 - 30 mm, kun rakennuksessa on puinen ulkoverhous. Muuratussa julkisivussa laastipurseet voivat tukkia kapean tuuletusraon, joten tuuletusraon leveyden tulisi olla vähintään 50 mm. Rakenteen tuulensuojauksen kannalta tuulen painevaikutusten vähentämiseksi olisi seinän ja katon tuuletusvälien liityttävä vapaasti kuristumattomina toisiinsa siten, että esimerkiksi ulkoverhouksen yläreunaa nostamalla liitoskohta on yläpohjan tuuletusvälin alueella /2/. Lisäksi tuulen painevaikutuksia voidaan vähentää rakennuksen nurkat mukaan lukien leveyssuunnassa mahdollisimman yhtenäisellä tuuletusraolla.

Vesihöyryn diffuusio ei aiheuta ongelmia rakenteen kosteustekniselle toiminnalle, jos lämmöneristeen sisäpuolisen rakennekerroksen vesihöyrynvastus on riittävä eristyksen ulkopuolisen kerroksen vastukseen verrattuna. Koerakenteista saatujen tulosten perusteella tulee sisäverhouksen ja tuulensulun vesihöyrynvastusten suhteen olla 5 - 7, jotta rakenne toimisi kosteusteknisesti tarkoituksenmukaisella tavalla. Laboratorikokeissa /4/ saatujen tulosten perus-

teella lastulevyn maalaaminen kahteen kertaan lateksimaalilla riittää diffuusiosuojaksi levyseinärakenteelle, jossa on huokoinen kuitulevy tuulensulkuna ja lastulevy sisäverhouslevynä. Eri maalipinnoitteiden vesihöyrynvastukset riippuvat kuitenkin maalausaloituksesta ja maalikerroksen paksuudesta, joten maalikerroksen vesihöyrynvastusta on vaikea käytännössä arvioida. Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden lähtökohdaksi tuleekin ottaa toimivuus ilman sisäpinnan pinnoitusta. Taulukossa 1 on eräiden rakennustarvikkeiden vesihöyrynvastuksia, joiden perusteella voidaan arvioida levyseinärakenteen toimivuutta.

Taulukko 1. Rakennustarvikkeiden vesihöyrynvastuksia.

Rakennustarvike	Vesihöyrynvastus $\text{m}^2\text{sPa/kg}$
lastulevy 12 mm	1,5 - 2,7 10^9
kovalevy 5 mm	2,0 - 3,5 10^9
puolikova kuitulevy 9 mm	1,8 - 3,0 10^9
huokoinen kuitulevy 12 mm	0,3 - 0,6 10^9
bituliitti 12 mm	0,3 - 1,1 10^9
kipsilevy (tuulensulku) 9 mm	0,2 - 0,4 10^9
kipsilevy 13 mm	0,4 - 0,7 10^9
bitumivuorauspaperit (tervapaperi)	0,4 - 26 10^9
rakennuspapereit (ei muovitettuja)	< 1,5 10^9

Muovikalvon jättäminen pois tavanomaisesta pientalon puuseinärakenteesta ei ole aivan ongelmattonta. Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella höyrynsulun puuseinärakenne on tavanomaista rakennetta herkempi rakennusvirheille. Puuseinän ilmanpitävyys on nykyisissä rakenteissa suurelta osin juuri muovikalvon varassa, joten muovikalvon puuttuminen on korvattava muilla rakenteellisilla keinoilla. Ilmanpitävyyttä voidaan parantaa esimerkiksi rakennuspapereiden ja -pahvien avulla tai liittämällä kahden päällekkäisen levykerroksen saumat. Seinän sisäverhouksen läpivientejä tulisi mahdollisuuksien mukaan välttää. Esimerkiksi sähköasennukset tulee tehdä mieluummin pintasäilytyksinä.

Rakenteiden ilmapvirtausten merkitys höyrynsuluttoman rakenteen samoin kuin muidenkin kevyiden rakenteiden toimivudelle voi olla suuri. Ilmaa läpäisevien eristeiden ja eristystilan mitoitus on tärkeä rakenteen suunnittelun vaihe. Rakenteen kunnollinen tuulensuojaus, rakenneyksityiskohdian, kuten saumojen ja liitosten huolellinen toteutus, sekä lämmöneristeiden asennus ovat merkittäviä lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä varsinkin, jos seinien lämmöneristyspaksuutta halutaan kasvattaa nykyisestä tasosta.

Pientalon puurakenteisen ulkoseinän kosteustekninen toiminta voidaan turvata edellä esitetyillä periaatteilla ilman seinään asennettavaa muovikalvoa. Höyrynsulun jättäminen pois seinärakenteesta aiheuttaa kosteusteknisen riskin, jonka suuruus riippuu rakenteen rasitusolosuhteista, rakenteen suunnittelusta ja toteutuksesta. Riskin eliminointi edellyttää muovikalvon korvaamista muilla rakenteellisilla keinoilla samalla, kun rakentamisen laatuun on kiinnitettävä suurta huomiota. Höyrynsuluttoman rakenteen soveltaminen tulee kyseeseen normaalien huonetilojen kohdalla. Kosteiden tilojen ulkoseinät on syytä tehdä tarvittavien kosteussulkujen avulla. Tiloissa, joissa on suuri rakennuksen sisäpuolinen ylipaine, ei höyrynsuluttoman rakenteen soveltaminen ole riskitöntä. Kevyessä yläpohjassa höyrynsulun käyttö on suositeltavaa tuuletettavien ullakko-tilojen kosteuden vähentämiseksi.

Höyrynsulutonta rakennetta on esitetty puurakenteisen pientalon ulkoseinäksi myös keinona sisäilman laadun parantamiseksi. Höyrynsuluttomassa rakenteessa korvausilman oletetaan kulkeutuvan sisälle tasaisesti rakenteen läpi. Ulkoseinissä käytettävät rakennuslevyt läpäisevät ilmaa vain vähän, joten ilmanvaihdossa käytettävillä paine-eroilla ilma ei kulkeudu levykerroksen läpi. Ilman virtaus sisätiloihin voi tapahtua ainoastaan rakenteiden saumojen kautta, jolloin korvausilmamäärien hallinta on vaikeaa. Kenttämittauksissa /4, 5/ on todettu, että höyrynsuluttomilla raken-

teilla varustetuissa pientaloissa ulkovaipan ilmapuotokohdat ovat samoja kuin tavanomaisissa muovikalvon avulla tehdyissä taloissa, kun muovikalvo oli yleensä korvattu rakennuspapereilla. Jos ilmanvaihdon korvausilma halutaan johtaa ulkovaipparakenteen läpi sisätiloihin, on rakenteen oltava juuri tähän tarkoitukseen suunniteltu. Pientalojen puurakenteisten ulkoseinien käyttöä osana rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää tutkitaan VTT:ssä meneillään olevassa tutkimuksessa.

Höyrynsuluttomien rakenteiden kehittäminen on Suomessa liittynyt erityisesti selluloosaeristeen käyttöön ulkoseinien lämmöneristeenä. Eriste painuu jonkin verran myös seinissä käytettävillä eristystiheyksillä. Puhallettävien lämmöneristeiden käyttöä seinäeristeinä tarkastellaan lähemmin luvussa 4.

3 PUUSEINÄN KOSTEUSKAPASITEETTI

3.1 Yleistä

Huoneilman talviaikainen kuivuus on koettu ongelmaksi lähinnä asuinkerrostaloissa ja liike- ja toimistorakennuksissa. Viime vuosina ongelma on tuotu esiin myös pientaloja koskevana. Mitään selvää yksittäistä syytä pientalojen sisäilman kuivuuteen ei ole esitetty. Pientalojen sisäilman lämpötilan ja kosteuden pitkäaikaisia vaihteluita on Suomessa mitattu tutkimusmielessä ainoastaan yksittäistapauksissa lähinnä koerakentamiskohteissa. Kuitenkin jo harvat mittaukset osoittavat, että sisäilman lämpötila ja kosteus vaihtelevat talvella tapauskohtaisesti varsin laajoissa rajoissa. Vuosien 1984 - 1988 aikana tehdyissä mittauksissa vaihtelurajat olivat 18 - 26 °C ja 20 - 60 % suhteellista kosteutta. Tulokset on saatu koekohteista, joissa rakenteiden toimintaa on seurattu mittauksin tai ajoittaisin tarkastuksin.

Höyrynsulutonta ulkoseinärakennetta on esitetty ratkaisuksi myös pientalojen sisäilman kuivuuteen. Perusajatuksena on, että runsaasti puupohjaista, hygroskooppista materiaalia sisältävä rakenne pystyisi kosteuskapasiteettinsa eli kosteuden sitomis- ja luovuttamisominaisuuksiensa avulla taasaamaan sisäilman kosteusvaihteluita. Ulkoseinärakenteen kosteuskapasiteetin toiminnasta pyrittiin saamaan käsitys VTT:n koetalojen yksikerroksisessa puutalossa ja koetalossa X tehdyillä mittauksilla.

3.2 Tarkasteltavat rakenteet ja materiaalit

Puurakenteisten pientalojen ulkoseinissä on perinteisesti käytetty runsaasti hygroskooppisia eli kosteutta sitomaan ja luovuttamaan pystyviä materiaaleja. Vanhat suomalaiset pientalot ovat pääosin puru- tai hirsitaloja, joissa hygroskooppisen massan määrät ovat suuria.

Tavallisessa mineraalivillaeristeisessä levyseinäratkaisussa hygroskooppinen massa muodostuu lähinnä eristystilaa rajoittavista puupohjaisista levyistä. Pientalojen ulkoseinäeristykseen on käytetty jonkin verran puhallettavaa selluloosaeristettä, joka pystyy sitomaan painoonsa verrattuna paljon kosteutta ympäröivästä ilmasta. Myös mineraalivilla- ja solumuovieristeet voivat sitoa kosteutta ilmasta ja ovat näin ollen jossain määrin hygroskooppisia, mutta sitoutuvan kosteuden määrät ovat pieniä. Rakenteen lämmöneristeeksi voitaneen ajatella huokoista kuitulevyä, jonka kosteuskapasiteetti on suuri ja lämmönjohtavuus suhteellisen pieni. Eristysmateriaalina huokoinen kuitulevy on kuitenkin kallis.

Vanhojen puru- ja hirsitalojen ulkoseinien lämmöneristystaso on nykyisiin vaatimuksiin nähden huono. Koerakenteiden lämmöneristystason lähtökohtana oli puru- ja hirsiseiniin verrattuna paremman lämmöneristyksen saavuttaminen. Rakenteita oli kolmea päätyyppiä, joissa hygroskooppisen massan määrät vaihtelivat (rakenteet 4X, 5X, 4 ja 5, kuvat 2 ja

5). Rakenteessa 5X on kahdesta 12 mm huokoisesta kuitulevystä tehty huokoinen ainekerros sijoitettuna eristyskerrokseen (mineraalivilla). Rakenteen sisäpinnan levynä on lastulevy. Rakenne 5 on tehty kokonaan huokoisesta kuitulevystä. Rakenteiden 4X ja 4 lämmöneristys on tehty puhallettavalla selluloosaeristeellä.

3.3 Seinärakenteen kosteuskapasiteetin toiminta

3.3.1 Kosteuden varastoituminen puuseinään

Puupohjaiset materiaalit samoin kuin kaikki huokoiset materiaalit voivat sitoa itseensä kosteutta ilmasta. Tietyissä ilman lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa aine pyrkii saavuttamaan tasapainokosteuden, jonka suuruus riippuu aineen huokosrakenteesta. Kun ympäristön suhteellinen kosteus muuttuu, lähtötilanteesta riippuen aine joko sitoo kosteutta ilmasta eli kostuu tai luovuttaa sitomaansa kosteutta eli kuivuu. Kostuvan ja kuivuvan aineen tasapainokosteuksissa vaikuttaa ns. hystereesi-ilmiö, jonka johdosta kuivuvan aineen tasapainokosteudet ovat suurempia kuin kostuvan aineen.

Huokoisen materiaalin hakeutuessa uuteen tasapainotilaan ympäristön kosteusrasitusolosuhteiden muuttuessa tapahtuu aineen huokosrakenteessa kosteuden siirtymistä. Kosteuden siirtyminen huokoisessa aineessa tapahtuu lämpötila- tai kosteuspitoisuuseron aiheuttaman veden paineen ja vesihöyryn osapaineen gradienttien vaikutuksesta. Kuivassa aineessa kosteus siirtyy vesihöyrynä. Kun aineen kosteuspitoisuus kasvaa, alkaa kosteutta siirtyä myös vetenä.

Kuitumaisissa lämmöneristeissä kosteus siirtyy lämpötila- ja vesihöyryn osapaine-erojen takia vesihöyrynä eli vesihöyryn diffuusiona. Kevyiden kuitueristeiden vesihöyrynläpäisevyydet ovat suuria. Myös selluloosaeristeessä kosteus siirtyy vesihöyryn diffuusiona. Veden kapillaarista siirtymistä selluloosaeristeessä ei ilmeisesti tapahdu

rakenteen yli vaikuttavan lämpötilaeron vallitessa, vaikka vettä voi imeytyä vapaasta vedepinnasta eristeeseen. Eristeet voivat vettyä esimerkiksi tuulensulkulevyn pintaan tiivistyvistä kosteudesta. Veden kapillaarinen siirtyminen selluloosaeristeessä talvella kylmältä pinnalta sisäänpäin aiheuttaisi eristyskerrokseen ns. lämpöputki-ilmiön, joka lisää rakenteen lämpöhäviötä.

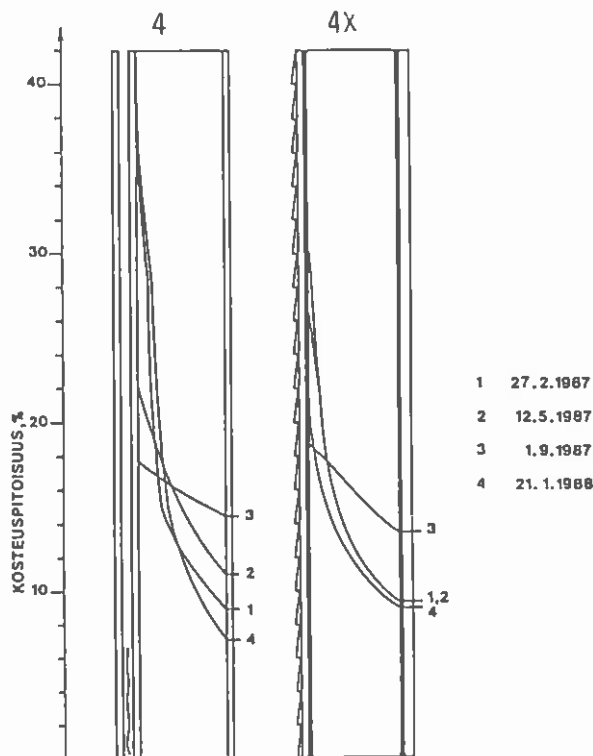
Huokoisessa kuitulevyssä kosteus siirtyy pääasiassa vesihöyryinä. Huokoisen kuitulevyn kapillaarisuus eli veden imeytyminen vapaasta veden pinnasta aineeseen on hyvin vähäistä /7/. Kokonaiskosteudensiirtoa huokoisessa kuitulevyssä voidaan näin ollen arvioida hygroskooppisella kosteusalueella sen vesihöyrynläpäisevyyden (diffuusiokerroimen) perusteella.

Kuvissa 25 ja 26 on koerakenteiden kosteusjakaukset eri vuodenaikoina. Saatujen tulosten mukaan rakenteissa oleva ylimääräinen kosteus oli talvella keräytyneenä rakenteiden uloimpiin kerroksiin. Rakenteiden 4X ja 4 selluloosaeristyksen uloin 10 - 20 mm kerros oli talvella jäässä. Rakenteen 5X tuulensulun (huokoinen kuitulevy) sisäpinnassa oli huurretta.

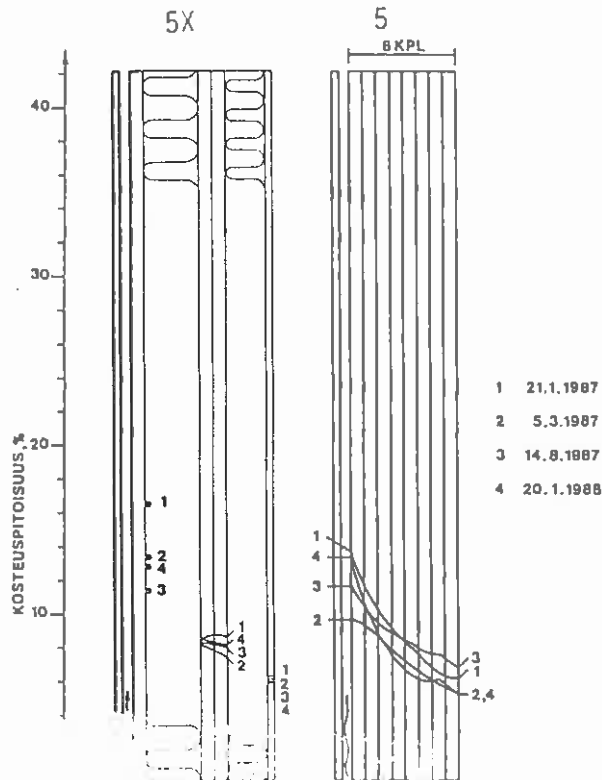
Rakenteista tehtyjen kosteusmääritysten ja havaintojen perusteella kosteus siirtyi ja varastoitui koerakenteissa seuraavasti: Mineraalivilla- ja selluloosaeristeiden vesihöyrynläpäisevyydet ovat suuria. Kun ulkoilman lämpötila alkaa laskea, kosteus jakautuu rakenteessa uudelleen. Sisä- ja ulkoilman välinen vesihöyrynsapaine-ero aiheuttaa kosteusvirran rakenteeseen. Myös ilmavuodot voivat kuljettaa kosteutta rakenteeseen. Kosteus kertyy rakenteen uloimpiin materiaalikerroksiin. Rakenteen ominaisuuksista riippuen kosteutta voi tiivistyä lämmöneristystä rajoittavan rakennekerroksen (tuulensulku tms.) pintaan. Edelleen rajapinnan lämpötilasta ja eristystä rajoittavan kerroksen ominaisuuksista riippuen tiivistynyt kosteus voi imeytyä

joko eristyksen ulkopuoliseen kerrokseen tai selluloosaeristeen tapauksessa myös eristyksen uloimpiin osiin.

Alhaisissa lämpötiloissa eristystä ulkopuolelta rajoittavalle rajapinnalle muodostuu huurreta ja jäätä. Huurrekerroksen kasvaessa tiivistymispiste siirtyy mineraalivillatai selluloosaeristyskerroksen uloimpiin osiin. Kyseinen ilmiö havaittiin höyrynsuluttomille rakenteille tehdyissä laboratoriokokeissa /4/. Kun lämpötila kohoaa, jäänä tai huurteena oleva kosteus sulaa. Rakenne kuivuu pääasiassa ulospäin. Kuivumisnopeus riippuu rakenteen uloimpien kerrosten kosteudensiirto-ominaisuuksista, ympäristöolosuhteista ja tuuletusraon toimivuudesta. Jos lämpötila nousee riittävästi, voi kosteutta siirtyä rakenteessa myös sisäänpäin.



Kuva 25. Rakenteiden 4X ja 4 kosteusjakaumat eri ajankohtina.



Kuva 26. Rakenteiden 5X ja 5 kosteusjakaumat eri ajankohtina.

3.3.2 Puuseinän kosteuden vaikutus sisäilmastoon

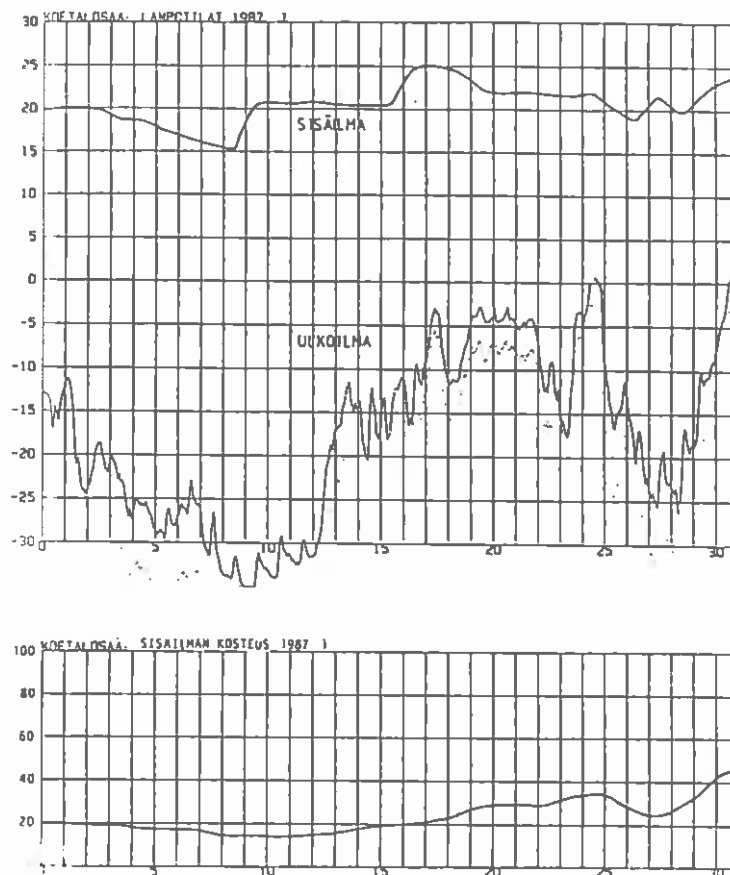
Rakenteiden kosteuskapasiteetin toimintaa tutkittiin koetaloissa, joissa oli luonnollinen ilmanvaihto. Koetalon X sisäilman kosteus säädettiin talvella 40 % suhteelliseen kosteuteen. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon sisäilmaa kostutettiin aluksi yhdellä ja jatkossa kahdella ilmankostuttimella. Yhden kostuttimen kosteustuotto oli noin 150 g/h.

Tammikuussa 1987 vallinneiden kovien pakkasten aikana (kuva 27) rakennuksen sisäilman kosteus laski 15 % suhteelliseen kosteuteen (kaksi ilmankostuttajaa). Sisäilman vesihöyrypitoisuus oli tuolloin $3,09 \text{ g/m}^3$, kun ilman lämpötila oli keskimäärin $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Jos ulkoilman keskimääräiseksi lämpötilaksi ja kosteudeksi oletetaan $-31 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 95 % (11.1.1987), oli ulkoilman vesihöyrypitoisuus $0,29 \text{ g/m}^3$. Rakennuksen

ilmanvaihdoksi arvioitiin 0,2 - 0,3 ilmanvaihtokertaa tunnissa. Rakennuksen tilavuus on 384 m³. Tällöin ilmanvaihdon poistoilman mukana poistuu vesihöyryä sisältä ulos 237 - 356 g/h ja korvausilman mukana tulee ulkoa sisälle 22 - 33 g/h. Kun ilmankostuttajien kosteustuotto oli noin 300 g/h, saavutetaan vakio-olosuhteiden kosteustaseen tasapainotilanne likimain jo pelkästään ilmanvaihdon ja kostutuksen perusteella. Kosteusvirta ulkovaipan rakenteisiin on samaa suuruusluokkaa kuin korvausilman mukana tulevan vesihöyryn määrä. Tarkasteltavassa tapauksessa sisäilman kosteuteen voitaisiin vaikuttaa ilmanvaihtoa tai ilmankostuttajien tehoa säätämällä.

Mittaustulosten mukaan kosteus varastoituu tutkittuihin rakenteisiin siten, että rakenteissa oleva kosteus ei voi vaikuttaa sisäilman kosteuteen talvella. Kun pitkän pakkaskauden aikana rakennuksen sisäilma kuivuu, on rakenteessa oleva ylimääräinen kosteus lähellä ulkopintaa olevissa rakennekerroksissa. Ainoastaan sisäpinnan rakennekerroksista voi kosteutta haihtua sisäilmaan. Käytännössä kuitenkin rakenteessa vaikuttava lämpötilaero kuivattaa sisäpinnan rakennekerroksia myös ulospäin, joten haihtumista sisäpinnan rakennekerroksista voi tapahtua vain hyvin lyhytaikaisesti. Tutkitut rakenteet olivat sisäpinnoiltaan pinnoittamattomia. Sisäpinnan maalaus tai muu pinnoittaminen vähentää edelleen höyrönsuluttoman rakenteen mahdollisuutta tasata sisäilman kosteusvaihteluita.

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella ei pelkällä höyrönsuluttomalla rakenteella ole vaikutusta sisäilman talviaikaiseen kuivuuteen. Seinärakenteen mahdollisuus puskuroida sisäilman kosteusvaihteluita perustuu seinän sisäverhouksen kosteuden vaihteluihin. Periaatteessa mitä suuremman kosteuskapasiteetin omaava ainekerros (sitoutuvan kosteuden absoluuttisen määrän oltava mahdollisimman suuri) on lämmöneristeen sisäpuolella, sitä enemmän kosteutta ainekerroksesta voi haihtua sisäilmaan ilman kosteuden las-
kiessa.



Kuva 27. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon sisäilma vuorokausikeskiarvojen perusteella sekä ulkoilman lämpötila koetalojen sääasemalta alkuvuodesta 1987.

Rakennuksen ulkoseinän sisäpinnan rakennekerrosten ilman kosteusvaihteluja puskuroiva vaikutus on suurin, jos kosteuden siirtyminen ulospäin rakenteessa estetään. Myös ilmanvaihtoa säätämällä voidaan vaikuttaa sisäilman suhteelliseen kosteuteen, mutta toimenpide voi johtaa heikentyneeseen ilman laatuun. Sisäilman lämpötilan laskeminen muutamalla asteella nostaa hieman ilman suhteellista kosteutta.

Tutkimustulosten valossa on ilmeistä, että puurakenteisen pientalon sisäilman kosteuteen vaikuttavat ensisijaisesti

asukkaiden asumistottumukset ja käyttäytyminen silloin, kun ulkovaipan rakenteet ovat kosteusteknisesti toimivia. VTT:ssa meneillään olevassa tutkimuksessa selvitetään pientalon puurakenteisen ulkovaipan käyttöä ilmanvaihtojärjestelmän osana. Yhtenä tavoitteena on selvittää menetelmän merkitys korvausilman kosteuden kannalta.

4 PUHALLUSERISTEIDEN KÄYTTÖ PUUSEINISSÄ

4.1 Yleistä

Puhallettavien lämmöneristeiden pääasiallisia käyttökohteita Suomessa ovat olleet pien- ja kerrostalojen yläpohjien lämmöneristys ja lisäeristys. Puhallettavaa selluloosaeristettä on 1980-luvun alusta käytetty jonkin verran pientalojen ulkoseinien eristykseen. Puhallettavia kivi- villa- ja lasivillaeristeitä on asennettu seiniin vain vähäisessä määrin.

Puhallettavien eristeiden toimivuudesta yläpohjissa on tehty laajoja selvityksiä mm. Suomessa ja Ruotsissa. Puhalluseristeet painuvat kosteusvaihteluiden ja värinän vaikutuksesta jonkin verran. Suomessa on koetalo- ja kenttämittauksissa saatu eri puhalluseristeiden kosteusvaihtelujen aiheuttamalle painumiselle seuraavia suuruusluokka-arvoja:

- puhallettavat mineraalivillat: alle 5 % alkupaksuudesta
- puhallettava selluloosaeriste: 15 - 20 % alkupaksuudesta.

Puhalluseristeiden tiheyden vaihteluvälit yläpohjaeristyksissä ovat kivivillalla 45 - 70 kg/m³, selluloosaeristeellä 40 - 70 kg/m³ ja lasivillalla 20 - 40 kg/m³ /3/. Seinäeristyksissä selluloosaeristeen tavoitetiheytenä oli aiemmin 60 kg/m³ ja nykyään 65 kg/m³. Seinään puhalletun eristeen tiheydellä on pyritty ehkäisemään eristeen painuminen. Edellä esitetyt selluloosaeristeen tavoitetiheydet ovat nimellisiä, eikä eristeen tiheyttä seinärakenteeseen puhallettuna voida yksinkertaisin menetelmin todeta.

Puhallettavien eristeiden, selluloosaeristeen ja kivivil-
lan, toimivuutta puurakenteisen pientalon ulkoseinäeris-
teenä tutkittiin koetalorakenteiden avulla. Selluloosaeris-
teen painumisesta seinissä on Suomessa tehty laboratorioko-
keita ja suppeahko kenttäkartoitus /5/. Yhdysvaltalaisissa
tutkimuksissa /6, 8/ puhallettavilla eristeillä tehtyjen
seinäeristysten laatu havaittiin melko huonoksi.

4.2 Puhalluseristeiden painuminen seinärakenteissa

Puhallettavalla kivivillalla ja selluloosaeristeellä läm-
möneristettyjen rakenteiden (3X ja 4X) toimintaa seurattiin
koetalossa X neljän talvikauden yli (1985 - 1989). Eristei-
den painumia mitattiin kummastakin rakenteesta kahdesta
runkotolppavälistä. Eristysten keskimääräiset tiheydet saa-
tiin punnitsemalla eristeet runkotolppaväleittäin seurannan
päätteeksi sekä määrittämällä keskimääräiset kosteuspi-
toisuudet kolmelta eri korkeudelta otetuista näytteistä.
Koerakenteiden eristystilat olivat täysin koteloituja.

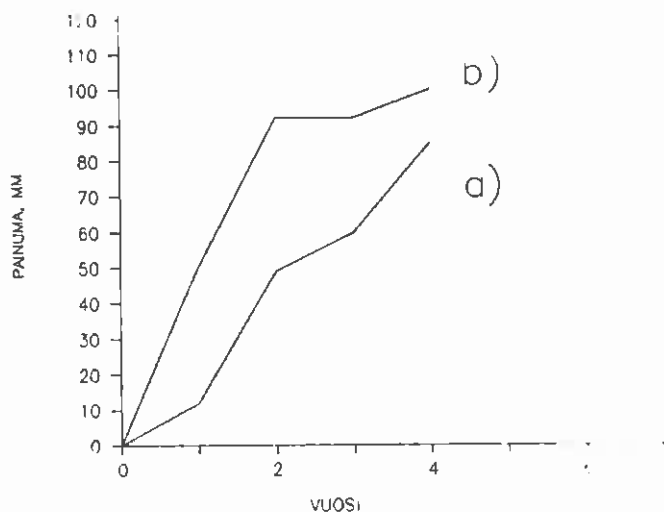
Neljän vuoden seurannan aikana puhallettavalla kivivillalla
eristetyissä rakenteissa ei havaittu eristykseen painumista.
Eristyksen kuivatiheydet olivat 62 ja 64 kg/m³.

Selluloosaeristeellä eristetyistä rakenteista saadut tulok-
set ovat kuvassa 28. Rakenteita purettaessa havaittiin toi-
sesta runkotolppavälistä (tiheys 59 kg/m³) eristyksessä
pieni holvimainen tyhjä tila rakenteen keskiosassa.

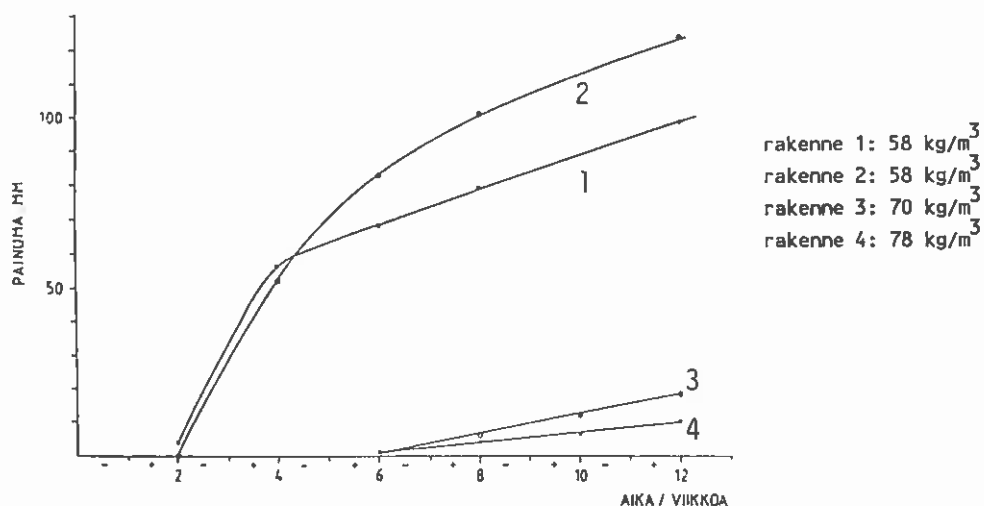
VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon rakenne 4 oli
eristetty puhallettavalla selluloosaeristeellä. Rakenteen
toimintaa seurattiin kolme talvikautta (1986 - 1989).
Painumamittaukset tehtiin vasta seurannan päätyttyä
keväällä 1989. Painumat mitattiin kahdeksasta runko-
tolppavälistä, joiden eristystiheydet määritettiin seuran-
nan lopuksi. Kuivatiheydet olivat 64 - 72 kg/m³. Painuman
suuruus oli kaikissa runkotolppaväleissä alle 10 mm. Eris-
tystä puhallettaessa rakenteisiin jouduttiin rakentamaan

lisätukia, sillä puhalluspaine pyrki vaurioittamaan rakenteita.

Selluloosaeristeisille seinärakenteille tehdyissä laboratorionkokeissa saatiin kuvan 29 ja taulukon 2 tulokset. Laboratorionkokeiden tarkoituksena oli selvittää eristyksen tiheyden ja kosteusvaihteluiden vaikutusta painumaan.



Kuva 28. Selluloosaeristeen painumamittausten tulokset koetalon X rakenteesta 4X. Rakenteen b eristyksen kokonaispainumassa on otettu huomioon eristyskerroksen holvautuminen.
 a) Eristyksen kuivatiheys 59 kg/m^3
 b) Eristyksen kuivatiheys 52 kg/m^3 .



Kuva 29. Selluloosaeristeen painuminen seinärakenteissa laboratorionkokeen perusteella. Rakenteiden 1 ja 2 kokonaispainuma oli 150 - 200 mm, kun rakenteissa olleet holvimaiset ilma-eristykset otetaan huomioon /4/.

Taulukko 2. Selluloosaeristeen painuminen seinärakenteessa kosteusvaihteluiden vaikutuksesta. Laboratorio-kokeen tulokset. Loppupainuma prosentteina eristystilan korkeudesta /5/.

Lab. koe nro	Rakenne nro	Eristystilan korkeus mm	Kuiva-tiheys kg/m ³	Kokeen kesto vko	Loppupainuma	
					mm	%
1	1	2550	50	9	325	12,8
	2	2550	51	9	285	11,2
	3	2550	41	9	345	13,5
	4	2550	49	9	295	11,6
2	5	2550	47	10	290	11,4
	6	2550	60	10	95	3,7
	7	2550	50	10	250	9,8
	8	2550	60	10	150	5,9
3	9	2050	61	9	80	3,9
	10	2050	57	9	145	7,1
	11	2050	57	9	125	6,1
4	12	2050	64	6	5	-
	13	2050	63	6	5	-
	14	2050	65	6	0	-

Puhallettavalla selluloosaeristeellä lämmöneristettyjen seinärakenteiden kuntoa on VTT:ssa tutkittu suppeahkossa kenttäselvityksessä /5/, jonka tulokset ovat taulukossa 3. Kenttäkohteissa tehtyjen tarkastusten perusteella selluloosaeristeen tyypillisin painumisen seuraus pientalojen puurakenteisissa ulkoseinissä on eristyksen holvautuminen. Eristyksen painumista ei yleensä havaittu ullakkotiloista tehtyjen silmämääräisten tarkastusten avulla. Holvautumisen syitä voivat olla:

- eristystilan paikallinen kaventuminen
- eristyksen korkeussuuntaiset tiheysvaihtelut
- runkorakenteiden tuenta, ristirunko
- eristystilaa rajoittavien rakenteiden muodonmuutokset ym.

Selluloosaeristyksen painuminen oli kenttätutkimuksen perusteella suurinta vanhoissa kohteissa. Eristyksen nimellistiheydellä (tavoitetiheys puhallettaessa) ei saatujen tulosten perusteella ollut painumisen kannalta merkitystä.

Selluloosaeristeen holvautumista havaittiin myös höyrynsu-
luttomien rakenteiden kenttätutkimuksessa /4/, jossa yhden
kohteen ulkoseinissä oli käytetty selluloosaeristettä. Vuon-
den välein tehdyissä tarkastuksissa (lämpökuvaukset) havait-
tiin holvien kasvaneen ensimmäiseen tarkastuskertaan ver-
rattuna sekä holvien määrän lisääntyneen vuoden aikana.

Taulukko 3. Kenttätutkimuksesta saatuja tuloksia selluloosaeristeen painumisesta. Painumien ja työvirheiden määrät on arvioitu runkotolppavälien perusteella /5/.

Kohde	Painumat ja työvirheet		
	määrä	sijainti	virheen laatu ja havainnot
1	-	-	ei painumia ¹⁾
2	-	-	ei painumia
3	1	y	painuma, pieniä työvirheitä
4	1	y,a	painumia tai työvirheitä
5	2	y,k,a,i	painumia, vähäisiä työvirheitä
6	2	y,k,i	painumia, työvirheitä
7	3	kr,y,k,i	painumia, vähäisiä työvirheitä
8	-	-	ei painumia, vähäisiä työvirheitä
9	4	y,k,i	painumia
10	5	kr,y,k,a	painumia
11	5	kr,y,k	painumia
12	1	y,k	painumia

määrä: 1 on erittäin pieni, alle 10 % runkotolppaväleistä
2 on pieni, 10 - 30 % runkotolppaväleistä
3 on melko suuri, 30 - 50 % runkotolppaväleistä
4 on suuri, 50 - 70 % runkotolppaväleistä
5 on erittäin suuri, yli 70 % runkotolppaväleistä

sijainti: kr on katonrajassa (sisältä katsottuna)
y on seinän yläosassa
k on seinän keskiosassa
a on seinän alaosassa
i on ikkunan alla

1) luotettavien havaintojen teko ei ollut seinän rakenteen takia mahdollista

Eri tutkimuksissa saatujen tulosten perusteella on ilmeistä, että täysin painumattoman seinäeristykseen tekeminen puhallettavalla selluloosaeristeellä on vaikeaa. Eriste voi painua pitkän ajan kuluessa myös eristystiheyksien ollessa suuria. Suuren tiheyden saavuttaminen on osoittautunut hankalaksi nykyisillä puhallusmenetelmillä. Eris-

teen painumisen lämpöteknisistä seurausvaikutuksista ei toistaiseksi ole tutkimustietoa. Painumien vaikutukset seinien lämpöhäviöihin voivat kuitenkin olla suuria /8/.

Puhallettavien lasi- ja kivivillaeristeiden toimivuudesta seinäeristeenä ei ole tutkimustuloksia. Koetalon X mittauksista ei voida tehdä päätelmiä eristeiden painumisesta tai painumattomuudesta seinissä.

4.3 Työvirheet ja työtekniikka

Koetalon X rakenteita purettaessa puhallettavilla eristeillä tehdyissä rakenteissa havaittiin rakenteiden eristyskerrokseen puhallusvaiheessa syntyneitä virheitä. Eristysvirheet sijaitsivat runkorakenteiden vieressä ja olivat suuruudeltaan 30 - 100 cm². Virheitä oli kaikissa rakenteiden runkotolppaväleissä. Selluloosaeristeisten talojen kenttätutkimuksessa /5/ vastaavia virheitä havaittiin melko yleisesti. Kenttätutkimuksessa tutkimusvälineenä käytettiin lämpökameraa, jolloin pienimpiä virheitä ei ilmeisesti ole havaittu. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon selluloosaeristeisissä rakenteissa puhallusvirheitä ei ollut. Suuriin tiheyksiin pyrittäessä virheiden syntymisen mahdollisuus pienenee.

Yhdysvalloissa tehdyissä tutkimuksissa on puhallettavilla eristeillä tehtyjen seinäeristysten työn laatu havaittiin eristysmateriaalista riippumatta odotettua huonommaksi /6/. Ulkoseinien täyttymättömän eristystilan suuruudeksi arvioitiin 10 % seinän pinta-alasta /8/.

Eristystilan kaventumat voivat johtaa työvirheeseen. Seinän eristystilan täyttymistä on työn aikana mahdotonta seurata. Seinäeristykset puhallettavilla eristeillä tehdään tavallisesti seinän yläosan kautta syöttöletkun avulla. Käytettävistä puhalluspaineesta ja syöttöletkun siirtämisestä sivuja korkeussuunnassa johtuen rakenteeseen voi syntyä tyhjiä alueita. Letkun liian nopea nostaminen voi aiheuttaa raken-

teen eristyksen korkeussuuntaisia tiheyseroja, joiden johdosta eristyksen holvautuminen on mahdollista.

Ulkoseinien eristämässä puhallettavilla eristeillä pyritään suuriin tiheyksiin. Käytettävän laitteiston kotelora-kenteisiin aiheuttama puhalluspaine voi muodostua suureksi, mikä puolestaan saattaa rikkoa rakenteita. Suuren tiheyden saavuttamiseen vaikuttaa selluloosaeristeellä materiaalin kosteus puhallusvaiheessa. Laboratoriokokeissa /5/ yli 60 kg/m³ kuivatiheyksiin päästiin vain suhteellisen kuivalla materiaalilla. Tämä asettaa eristeen varastoinnille ja varastointiolosuhteille omat vaatimuksensa.

4.4 Päätelmät

Täysin virheettömien seinäeristysten tekeminen puhallettavilla eristeillä voi tutkimustulosten valossa olla vaikeaa. Yläpohjaeristyksissä eristettävän tilan täyttymistä ja asennuksen laatua on helppo seurata. Seinissä eristyksen kunnon toteaminen voi vaatia esimerkiksi talon lämpökuvauksen talvella. Puhalluseristeen tiheyttä ei voida yksinkertaisin menetelmin todeta.

Puhallettavan selluloosaeristeen painuminen muodostaa pitkän ajan kuluessa ongelman, jonka korjaaminen on syytä ottaa huomioon rakenteita suunniteltaessa. Painumien ja työvirheiden lämpö- ja kosteusteknisistä seurausvaikutuksista ei ole olemassa tutkimustietoa. Suurten painumien vaikutukset seinän lämpöhäviöön voivat olla merkittäviä.

Puhallettavaa selluloosaeristettä on tarjottu erityisesti höyrynsuluttomien eli ilman erillistä kosteussulkua tehtyjen rakenteiden eristysmateriaaliksi. Eristeen kosteusvaihtelujen on todettu olevan merkittävin painumia aiheuttava tekijä. Höyrynsuluttomien rakenteiden kosteusrasituksen voi talvella olettaa olevan tavanomaista suuremman. Eristyksen kosteusvaihtelut voivat tällöin olla suurempia kuin muovikalvon avulla tehdyissä seinissä.

Puhallettavia mineraalivillaeristeitä on Suomessa käytetty seinäeristykseen vain vähän. Eristeiden toimivuudesta ei näin ollen ole käytännön kokemuksia.

Rakennuksen käyttöikään nähden virheettömien seinäeristysten tekeminen puhallettavilla lämmöneristeillä voi nykyisillä materiaaleilla ja puhallustekniikoilla olla vaikeaa. Eristysvirheitä voi syntyä eristysasennusten aikana työvirheiden takia tai erityisesti selluloosaeristettä käytettäessä painumien takia. Näin ollen puhallettavien eristeiden käyttöä seinäeristykseen tulisi nykyisen tietämyksen perusteella välttää.

5 YHTEENVETO

Tutkimuksessa tarkasteltiin pientalon puurunkoista ulkoseinää, sen rakenneratkaisuja ja lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Erilaisten puuseinärakenteiden toimivuutta arvioitiin tutkimuksen alkuvaiheessa laboratoriokokeiden ja laskennallisten tarkastelujen avulla /4/. Rakenteiden toiminnasta pyrittiin saamaan käsitys koetalotutkimuksessa, jossa rakenteiden lämpö- ja kosteusvaihteluja seurattiin koetalomittauksin.

Höyrynsuluttomien seinärakenteiden toimivuutta pitkällä aikavälillä tutkittiin kahdessa koetalossa. Koetalon X seinärakenteiden seuranta ulottui neljän talvikauden yli. Rakenteiden kosteusvaihteluita mitattiin kolmen seuranta-vuoden ajan. VTT:n koetalojen yksikerroksisen puutalon rakenteet uusittiin höyrynsuluttomilla elementeillä vuoden 1986 kesällä. Kosteus- ja lämpötilamittauksia tehtiin vuoden 1986 syksystä vuoden 1988 kesään. Lisäksi rakenteiden toimintaa seurattiin silmämääräisillä tarkastuksilla ja rakenteita purkamalla talven 1988 - 1989 ajan.

Koetalorakenteet havaittiin pääosin toimiviksi ilman erillisiä kosteussulkukerroksia. Jotta rakenteiden toimivuus olisi turvattu käytännössä rakennuksen ilmanvaihto- ja läm-

mitysjärjestelmästä riippumatta, on tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella höyrynsuluttoman rakenteen suunnittelussa ja rakentamisessa otettava huomioon seuraavat tekijät:

- Rakenteen ilmanpitävyyden on oltava hyvä.
- Levyseinärakenteissa on lämmöneristyksen sisäpuolisten rakennekerrosten vesihöyrynvastuksen oltava riittävän suuri verrattuna ulkopuolisiin rakennekerroksiin.
- Rakenteeseen on syytä tehdä tuulettuva ilmarako ulkoverhouksen taakse, jotta rakenteeseen talvella kertyvä kosteus kuivuu riittävän aikaisin keväällä.
- Kevyet ilmaa läpäisevät lämmöneristeet on asennettava huolellisesti. Eristysrakenne ja eristeet on mitoitettava oikein.
- Rakenteessa on oltava kunnollinen tuulensulku eristyksen ulkopinnassa.

Höyrynsulun jättäminen pois seinärakenteesta merkitsee kosteusteknistä riskiä, jonka eliminointi edellyttää muovikalvon korvaamista muilla rakenteellisilla keinoilla. Höyrynsuluton rakenne on tavanomaista herkempi rakennusvirheille. Höyrynsuluttomien rakenteiden käyttö tulee kyseeseen pientalojen tavallisten asuinhuoneiden kohdalla. Kosteat tilat on syytä tehdä tarvittavien kosteussulkujen avulla.

Höyrynsulutonta seinärakennetta on esitetty keinoksi parantaa pientalojen sisäilman laatua. Rakenteiden hygroskooppi-sen massan lisäämisellä on haluttu vaikuttaa sisäilman kosteuteen talvella. Tutkimuksessa saatujen tulosten mukaan ulkoseinillä ei kuitenkaan ole merkitystä sisäilman talviaikaisen kuivuuden kannalta. Höyrynsuluttomien rakenteiden ilmavuotokohdat ovat samoja kuin tavanomaisten muovikalvon avulla tehtyjen rakenteidenkin. Ilmanvaihdon korvausilman kulkeutuminen rakenteen läpi tapahtuu juuri ilmavuotokohtien kautta, joten höyrynsuluttomien rakenteiden "hengittävyys" on samankaltaista kuin muovikalvon avulla tehtyjen rakenteiden.

Höyrynsuluttomien rakenteiden kehittäminen on suurelta osin liittynyt puhallettavan selluloosaeristeen käyttöön seinäeristeenä. Eri tutkimuksissa saatujen tulosten mukaan eristeen painumisesta muodostuu ongelma myös seinissä käytettävillä eristystiheyksillä. Painumien lämpö- ja kosteusteknisiä seurausvaikutuksia ei ole tutkittu. Puhallettavien mineraalivillojen käyttö seinissä ei ole täysin ongelmantonta. Puhalluseristeiden asennustekniikasta ja työvirheistä johtuvia eristysvirheitä on todettu eristemateriaalista riippumatta. Puhalluseristeiden käyttöä ulkoseinien eristykseen tulisikin välttää, kunnes painumisen tai työvirheiden muodostama ongelmakenttä saadaan ratkaistuksi.

Tutkimustulosten perusteella voidaan päätellä, että pientalon puurakenteisen ulkoseinän kosteustekninen toiminta voidaan turvata ilman seinään asennettavaa muovikalvoakin. Höyrynsulun poisjättäminen merkitsee kuitenkin kosteusteknistä riskiä, jonka eliminointi edellyttää muovikalvon korvaamista muilla rakenteellisilla keinoilla. Höyrynsuluttomalla rakenneratkaisulla ei voida korjata pientalon sisäilmastoon liittyviä ongelmia. Korvausilman sisäänotto ulkovaipparakenteen läpi on mahdollista vain, jos rakenne on juuri tähän tarkoitukseen suunniteltu. Lisäksi puhallettavien lämmöneristeiden käyttöä seinärakenteissa tulee välttää.

LÄHDEKIRJALLISUUS

1. Kohonen, R. et al. Höyrynsuluton puurunkoinen seinärakenne Enso-koetalossa. Espoo 1985. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 441. 54 s. + liitt. 18 s.
2. Kohonen R. et al. Mineraalivillaeristykseen ilmavirtaukset ja tuulensuojaus. Espoo 1986. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 431. 119 s.
3. Kokko, E., Kouhia, I. Puhallettavat lämmöneristeet. Espoo 1986. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 631. 36 s. + liitt. 35 s.
4. Nieminen, J. Höyrynsuluton puuseinärakenne. Espoo 1987. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 735. 140 s. + liitt. 23 s.
5. Nieminen, J. Selluloosaeristeen painuminen seinärakenteissa. Espoo 1989. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 1016. 37 s.
6. Rossiter, W. et al. A field survey of the performance properties of insulation used to retrofit cavity walls of residences. Proc. of the ASHRAE/DOE-ORNL Conference Thermal Performance of the Exterior Envelope of Buildings 1979. New York 1981. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. S. 901 - 915.
7. Saarimaa, J. et al. Kosteuden siirtyminen rakenteissa. Rakennusaineiden kosteustekniset aineominaisuudet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia. Julkaistaan 1989.

8. Tsongas, G. Retrofitted wall insulation: A state-of-the-art review. Proc. of the ASHRAE/DOE Conference Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings II 1982. New York 1983. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
S. 1078 - 1089.



<p>Tekijät Nieminen, Jyri</p>	<p>Projektin nimi Höyrynsuluton kevyt ulkovaippa</p> <p>Toimeksiantaja Kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM)</p>	
<p>Nimeke HÖYRYNSULUN TARVE PUUSEINÄSSÄ</p>		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tutkimuksessa selvitettiin puuseinään sijoitettavan höyrynsulun tarvetta, kosteuden vaikutuksia rakenteiden toimintaan sekä puhallettavien lämmöneristeiden käyttöä puuseinissä. Kenttä- ja laboratoriotutkimuksissa saatujen tulosten mukaan pientalon puurakenteinen ulkoseinä voidaan Suomen ilmastossa tehdä tietyin edellytyksin ilman rakenteeseen sijoitettavaa höyrynsulkumuovia. Tämä edellyttää rakenteilta hyvää ilmanpitävyyttä. Jotta rakenteisiin talvella mahdollisesti kertyvä kosteus ei tuottaisi ongelmia, on rakenteisiin syytä tehdä kuivumisen varmistamiseksi tuuletusrako ulkoverhouksen taakse. Kevyiden, ilmaaläpäisevien lämmöneristeiden asentamiseen ja tuulensuojaukseen on kiinnitettävä riittävää huomiota.</p> <p>Höyrynsulun poisjättämisellä seinärakenteesta ei voida vaikuttaa pientalon sisäilman kuivuuteen talvella. Kosteus varastoitui tutkittuihin rakenteisiin siten, että se ei talvella voinut siirtyä rakenteesta sisäilmaan. Höyrynsuluttomien rakenteiden ilmapuotokohdat ovat käytännössä samoja kuin muovikalvon avulla tehdyissä rakenteissa.</p> <p>Puhallettavan selluloosaeristeen on todettu painuvan myös seinissä käytettävillä eristystiheyksillä. Puhalluseristeiden asennustekniikasta ja työvirheistä johtuvia eristysvirheitä on todettu eristemateriaalista riippumatta.</p>		
<p>Toimintayksikkö Rakennetekniikan laboratorio, Kemistintie 3, PL 26, 02151 Espoo</p>		
<p>ISSN ja avainnimeke 0358-5085 Tiedotteita - Valtion teknillinen tutkimuskeskus</p>		
<p>ISBN 951-38-3582-0</p>	<p>Kieli suomi, Engl. abstr.</p>	
<p>Luokitus (UDK) 624.011.1:692.23:699.82</p>	<p>Avainsanat small houses, wooden structures, external walls, barrier coatings, vaporizing, moisture, polymeric films, plastics, behavior, insulation</p>	
<p>Myynti: Valtion painatuskeskus Kirjakaupat Helsingissä: Annankatu 44 Eteläesplanadi 4 Puh. (90) 17342012 Puh. (90) 662801 Postimyynti: PL 516, 00101 Helsinki Puh. (90) 56601 (vaihe)</p>	<p>Sivuja 61 s.</p> <p>Hinta</p>	<p>Lisätietoja</p>



Authors Nieminen, Jyri	Name of project Höyrynsuluton kevyt ulkovaippa	
Title THE NEED FOR A VAPOUR BARRIER IN A WOODEN WALL	Commissioned by Ministry of Trade Industry	
Abstract <p>In this study, the need for a plastic film vapour barrier in wooden walls, moisture and its effects on the behaviour of wooden structures as well as the use of loose-fill insulation in wooden walls were investigated.</p> <p>Wood-framed external walls of single-family houses under Finland's climatic conditions can with certain reservations be built without a plastic film vapour barrier. This is possible provided that the structures have a good degree of airtightness. In order to avoid problems caused by possible wintertime built-up of moisture within the wall structure, the wall should be provided with a ventilation gap right behind the external cladding to ensure sufficient removal of humidity. Due attention should also be paid to the installation of wind barriers and light-weight, air-permeable thermal insulation materials.</p> <p>The wintertime dryness of indoor air can not be affected by using a wooden wall structure without a vapour barrier. The structures under investigation showed a rather low moisture storing capacity, and transfer of moisture from the wall into indoor air is not possible during winter. In practice, airleakages through wooden walls without vapour barrier take place the same ways as through ordinary walls with plastic film vapour barrier.</p> <p>Settlement of loose-fill cellulose fibre insulation in wall structures is a problem even with high insulation density. Insulation faults caused by poor quality of workmanship were found regardless of the insulation material.</p>		
Activity unit Laboratory of Structural Engineering, Kemistintie 3, P.O.Box 26, SF-02151 Espoo, Finland		
ISSN and series title 0358-5085 Tiedotteita - Valtion teknillinen tutkimuskeskus		
ISBN 951-38-3582-0	Language Finnish, Engl. abstr.	
Class (UDC) 624.011.1:692.23:699.82	Key words small houses, wooden structures, external walls, barrier coatings, vaporizing, moisture, polymeric films, plastics, behavior, insulation	
Sold by Government Printing Centre P.O. Box 516 SF-00101 HELSINKI phone internat. + 358 0 56601	Pages 61 p.	Note
	Price	

