

Juha Vinha - Pasi Käkälä - Targo Kalamees

PUURUNKOISTEN SEINÄRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN VERTAILU OMAKOTITALOSSA



Juha Vinha - Pasi Käkelä - Targo Kalamees

**PUURUNKOISTEN SEINÄRAKENTEIDEN
KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN VERTAILU
OMAKOTITALOSSA**



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Rakennustekniikan osasto
Talonrakennustekniikka

Vinha Juha, Käkeli Pasi, Kalamees Targo

PUURUNKOISTEN SEINÄRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN VERTAILU OMAKOTITALOSSA

Tutkimusraportti 116, 54 sivua + 11 liitesivua
Maaliskuu 2003

Hakusanat: rakennusfysiikka, mittauslaitteisto, kenttämittaus, mittausjärjestelmä, diffuusio, konvektio, paine-ero, kondensoituminen, höyrinsulku, ilmansulku, mineraalivilla, puukuitueriste

Tiivistelmä

Tutkimuksessa on tarkasteltu Turun Rakennustuote Oy:n kehittämän puurunkoisen seinäelementin eli 'mittaelementin' kosteusteknistä toimintaa. Seinäelementeissä käytettyjä rakenteita on aikaisemmin tutkittu myös TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa tehdyissä rakennusfysikaalisissa kokeissa. Turun Rakennustuote Oy halusi lisäksi selvittää seinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa käytännön olosuhteissa, jotta laboratoriokoetulosten rinnalle saataisiin vertailutietoa. Tutkimus päätettiin toteuttaa jatkuvatoimivana mittauksena Lietoon, lähelle Turkuu rakennetussa omakotitalossa. Koetalo valmistui loppuvuodesta 1998, jolloin myös mittausanturit asennettiin taloon. Mittauksia tehtiin omakotitalossa tammikuun 1999 ja maaliskuun 2000 välisenä aikana.

Mitattavia suureita olivat suhteellinen kosteus, lämpötila, paine-ero ja ilmavirtauksen nopeus. Suureita mitattiin sisä- ja ulkoilmasta sekä rakenteesta sisältä. Lisäksi tuulensuojalevystä ja lämmöneristeistä otettiin näytteitä n. 3 kk:n välein. Suurelementtien perusrakenne oli seuraava: huokoinen kuitulevy (25 mm), levymäinen puukuitueriste (145 mm), bitumipaperi ja kipsilevy (13 mm). Mitatuissa seinäsektoreissa sisäverhouksena käytettiin paperitapettia. Mittaukset tehtiin kahdesta koolausvälistä (k600), joista toiseen vaihdettiin lämmöneristeeksi mineraalivilla ja bitumipaperin tilalle höyrinsulkumuovi (PE 0,2 mm). Näin voitiin helposti vertailla kahta erilaista seinärakennetekniikkaa.

Mittausjakson aikana sisäilman kosteuslisäksi mitattiin enimmillään talvella 3,8 g/m³ ja alimmillaan kesällä 1,1 g/m³. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihteli 35 %:sta (talvella) 60 %:iin (kesällä). Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihteli sateesta ja auringon säteilystä johtuen luonnollisesti paljon enemmän saaden maksimiarvonsa talvella ja minimiarvonsa kesällä.

Lämmöneristeiden ulko-osissa suhteellinen kosteus nousi ylimmillään 83 %:iin puukuitueristeisessä sektorissa syksyllä 1999. Alkutilasta 1999, kun rakennusaikaista kosteutta vielä oli rakenteissa, suhteellinen kosteus nousi em. sektorissa 89 %:iin. Koetalossa ei havaittu missään kohdassa kondenssia rakennenyhteiden oton yhteydessä. Höyrinsuluttomassa seinärakenteessa huokosilman suhteelliset kosteudet olivat talvikaudella n. 10 – 15 RH % korkeampia eristetilän ulko-osassa kuin höyrinsulullisessa rakenteessa. Ero oli suurimmillaan talvikaudella sisäilman kosteuslisän kasvaessa, joten sisäilman kosteuslisä vaikutti eristeen ulko-osan RH -prosenttiin höyrinsuluttomassa seinärakenteessa. Seinän yläosissa suhteellinen kosteus, vesihöyritysoisuus sekä lämpötila olivat alaosia korkeammat riippumatta eristetyypistä. Huoneen yläosassa oli

korkeammat riippumatta eristetyypistä. Huoneen yläosassa oli keskimäärin 3,0 Pa:n ylipaine ja alaosassa 1,6 Pa ylipaine. Tuuletusraossa mitattiin ilmavirtauksen keskimääräiseksi arvoksi 0,1 m/s.

Mittausten perusteella voitiin todeta, että rakenteen ulkoverhouksen takana oleva tuuletusväli parantaa merkittävästi rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Tuuletusvälin lämpötilan ero ulkoilman lämpötilaan kasvoi lineaarisesti ulkoilman lämpötilan laskiessa. Lämpötilan nousu tuuletusvälissä alentaa tuuletusvälin RH:ta ja pienentää samalla rakenteen homehtumisriskiä sekä kosteuden kondensoitumisriskiä rakenteeseen. Lisäksi tuuletusväli parantaa rakenteen lämmöneristävyyttä ja kuivumiskykyä.

Mittausjakson aikana tarkasteltiin rakenteen homehtumisriskiä filtri. Hannu Viitasen kehittämän homeindeksiluokituksen avulla. Homeindeksi oli kummassakin rakenteessa koko mittausjakson ajan < 1 , mikä tarkoittaa sitä, että rakenteissa ei ollut homeenkasvua. Homeen kasvulle suotuisia lämpötila- ja RH -olosuhteita mitattiin lähinnä puukuitueristeisen seinärakenteen yläosasta, eristetilan ulkopinnasta, mutta tässäkin tapauksessa suotuisat olosuhteet esiintyivät vain hetkittäin ja homeindeksi palautui takaisin 0:aan varsin nopeasti pitkien kuivumisjaksojen ansiosta. Eteläseinän suotuisat lämpötilaolosuhteet alensivat rakenteiden homehtumisriskiä merkittävästi ja rakennusaikainen kosteus puolestaan lisäsi homehtumisriskiä talon valmistumisen jälkeen.

Tutkimuksessa verrattiin höyrinsuluttoman puukuitueristeisen seinärakenteen toimintaa myös aikaisemmin laboratoriokokeissa olleisiin vastaaviin seinärakenteisiin. Laboratoriokokeissa höyrinsuluton seinärakenne ei toiminut tyydyttävästi, mutta näissä kokeissa rakenteelle kohdistunut kosteusrasitus oli suurempi kuin koetalossa. Tutkimuksessa tarkastellun höyrinsuluttoman seinärakenteen toimintakyvyn yläraja onkin koetalossa mitattujen ja laboratoriossa olleiden olosuhteiden välimaastossa.

Mittauksia verrattiin myös laskennallisella tarkasteluilla saatuihin tuloksiin, kun tarkasteltavana oli samat rakenteet tutkimuksessa mitatuissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa. Laskennassa käytettiin saksalaista WUFI 2D ja ruotsalaista 1D-HAM laskentaohjelmaa. Materiaaliominaisuuksina käytettiin pääosin TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa mitattuja materiaaliarvoja. Laskentatulosten perusteella voitiin todeta, että puurunkoisten seinärakenteiden toimintaa voidaan mallintaa riittävällä tarkkuudella myös laskennallisesti. Kokeissa mitatut eristetilan ulko-osien RH -arvot erosivat laskentatuloksista eniten kokeen alkuvaiheessa. Laskennallisessa tarkastelussa suhteelliset kosteudet muuttuivat vuorokausivaihteluissa myös hitaammin kuin kokeessa mitatut arvot. Lämpötilojen osalta koetulosten ja laskennan välillä ei ollut merkittäviä eroja.

Sekä höyrinsulullinen että höyrinsuluton seinärakenne toimivat koetalossa mitatuissa olosuhteissa kosteusteknisesti hyvin. On kuitenkin muistettava, että mitattujen sektorien sijainti oli rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta kannalta ihanteellinen: talo sijaitsee Etelä-Suomessa avoimella paikalla ja mittausanturit olivat eteläseinällä. Kesä 1999 oli myös erittäin kuiva ja kuuma eivätkä syksyn olosuhteet olleet homehtumisen kannalta kriittisiä. Lisäksi sisäilman kosteuslisät olivat varsin tavanomaisia. Jos olosuhteissa tapahtuu muutoksia tai rakennus sijaitsee epäedullisemmalla paikalla, höyrinsuluttoman rakenteen homehtumisriski ja kosteuden kondensoitumisriski rakenteeseen kasvaa. Höyrinsuluttoman seinän sisäpinnan vesihöyrynvastusta onkin syytä lisätä, jotta rakenteen toiminta varmistetaan myös kosteusrasituksen kasvaessa. Eristetilan ulko-osien suhteellisen kosteuden arvoja voidaan lisäksi pienentää mm. käyttämällä suuremman lämmönvastuksen ja pienemmän vesihöyrynvastuksen omaavaa tuulensuojalevyä.

Alkusanat

Tämä kenttätutkimus liittyy TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa käynnissä olevaan laajaan puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa käsittelevään tutkimusalueeseen. Seinärakenteita on tutkittu TTY:llä sekä laboratoriokokeiden avulla että laskennallisesti. Lisäksi seinärakenteissa käytettäville materiaaleille on määritetty rakennusfysikaalisia ominaisuuksia laskennallisia tarkasteluja varten. Tämän kenttätutkimuksen avulla on saatu arvokasta lisätietoa rakenteiden toiminnasta käytännön olosuhteissa laboratoriokokeiden ja laskennallisten tarkastelujen rinnalle.

Kenttätutkimuksessa käytetty mittauslaitteisto on kehitetty TTY:n laboratoriokoelaitteistoissa käytettävien mittaus- ja säätölaitteiden pohjalta ja sen toiminta on todettu tutkimuksessa hyväksi. Laitteistoa on tutkimuksen jälkeen parannettu myös lisää mm. siten, että mitatut datat voidaan siirtää tutkimuspaikalta työpisteeseen suoraan GSM-puhelimen avulla. Vastaavalla periaatteella toteutettuja kenttämittauslaitteistoja käytetään nykyisin monissa erilaisissa mittausjärjestelyissä.

Tutkimuksen on rahoittanut Turun Rakennustuote Oy ja Saint-Gobain Isover Oy. Tutkimukseen on saatu rahoitusta myös TEKES:stä. Turun Rakennustuote Oy:n edustajana tutkimuksessa on ollut toimitusjohtaja Jouko Kujala ja Saint-Gobain Isover Oy:n edustajana kehitysinsinööri Harri Kemppainen. Tutkimuksen vastuullisena johtajana on toiminut TTY:llä professori Ralf Lindberg. Kiitämme tutkimukseen osallistuneiden yritysten edustajia sekä kaikkia tutkimuksen toteuttamisessa avustaneita henkilöitä yhteistyöstä tutkimuksen aikana. Lisäksi haluamme esittää erityiskiitokset Jorma Tiaiselle tämän julkaisun kääntämisestä englanniksi.

Tampereella 1.3.2003

Juha Vinha

Pasi Käkelä

Targo Kalamees

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Alkusanat.....	4
Sisällysluettelo	5
Merkinnät.....	7
Käsitteet ja määritelmät.....	8
1 Johdanto	11
1.1 Lähtökohta	11
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	11
2 Mittauslaitteisto.....	12
2.1 Laitteiston yleinen toimintaperiaate.....	12
2.2 Laitteiston osat.....	12
2.3 Suureiden mittaaminen	13
2.4 Ohjausohjelma	14
2.5 Kokeista saatavat mittaus- ja laskenta-arvot.....	15
2.6 Laitteiston mittausepävarmuus	16
3 Mittausjärjestelyt.....	17
3.1 Koetalon sijainti ja rakennuspaikka.....	17
3.2 Koetalon perustiedot	17
3.3 Mittausjärjestelyt koetalossa ja anturien asentaminen	18
3.4 Mittausanturien sijainti	20
3.5 Rakennenäytteiden ottaminen ja visuaaliset havainnot	22
3.6 Aikataulu.....	23
4 Koetulokset.....	24
4.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet.....	24
4.2 Suhteelliset kosteudet rakenteessa	26

4.3	Vesihöyrypitoisuudet rakenteessa	28
4.4	Lämpötilat rakenteessa.....	29
4.5	Lämpötilat ja vesihöyrypitoisuudet rakenteen ulkopinnalla ja tuuletusvälissä	31
4.6	Paineolosuhteet	35
4.7	Ilmavirran nopeus tuuletusraossa.....	36
4.8	Rakennenäytteistä mitatut kosteuspitoisuudet	37
4.9	Seinäarakenteiden homeriskitarkastelu	38
4.10	Mittaustulosten vertailu laboratoriokoetuloksiin	39
4.11	Laskennallinen tarkastelu.....	41
5	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset.....	45
5.1	Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden merkitys	45
5.2	Materiaalien ja rakenteiden merkitys	47
6	Yhteenveto	50
	Lähdeluettelo	52
	Liitteet	54

Merkinnät

A	pinta-ala	m^2
T	lämpötila	$^{\circ}C$
DT	lämpötilaero	$^{\circ}C$
ΔT	lämpötilaero	$^{\circ}C$
U	jännite	V
U	lämmönläpäisykerroin	$W/m^2 \cdot K$
a	apusuure	
b	vakiotermi	
d	paksuus	m
k	kerroin	
m	massa	kg, g
Dp	paine-ero	Pa
Δp	paine-ero	Pa
r	ilmavirran nopeus	m/s
t	aika	s
u	suure	
u	kosteuspitoisuus	paino- %
w	kosteuspitoisuus	kg/m^3
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrypitoisuuseron avulla laskettu)	m^2/s
ϕ	ilman suhteellinen kosteus (RH)	%
λ	lämmönjohtavuus	$W/m \cdot K$
v (tai v)	ilman vesihöyrypitoisuus	kg/m^3 , g/m^3
Δv	ilman vesihöyrypitoisuusero	kg/m^3 , g/m^3

Yleisimmät alaindeksit

crit	kriittinen
s	sisä
sp	sisäpinta
u	ulko
up	ulkopinta
v (tai v)	vesihöyrypitoisuus
tv	tuuletusväli
utv	tuuletusvälin ulkopinta
stv	tuuletusvälin sisäpinta

Käsitteet ja määritelmät

Alipaine	Kun tietyn ilmatilan absoluuttinen paine on pienempi kuin ympäröivä ilmanpaine, tilassa vallitsee alipaine. Tässä julkaisussa alipaineella tarkoitetaan sitä, että rakennuksen sisällä vallitseva ilmanpaine on pienempi kuin ulkona.
Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiosta kaasun siirtyä korkeammasta pitoisuudesta alempaan pitoisuuteen.
Hygroskooppinen tasapainokosteus	Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, joka stationääritilassa sitoutuu huokoiseen aineeseen ympäristön tietyssä suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa.
Hygroskooppisuus	Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Höyrynsulku	Höyrynsulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää vesihöyryn haitallinen diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa. Höyrynsulun vesihöyrynläpäisevyys on pieni.
Ilmanläpäisevyys	Ilmanläpäisevyys (l) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmanläpäisykerroin	Ilmanläpäisykerroin (K) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmansulku	Ilmansulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi. Ilmansulun ilmanläpäisevyys on pieni.

Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteiden pintoihin vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut pinnan lähellä kyllästyskosteuden ($RH = 100\%$).
Konvektio	Konvektio syntyy, kun kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheuserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Vesihöyry siirtyy konvektiolla virtaavan ilman mukana.
Kyllästyskosteus	Kyllästyskosteus ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin (U) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Läpäisevä rakenne	Läpäisevässä rakenteessa on tiivis ilmansulku, mutta ei höyrynsulkua.
Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus (ϕ , RH) ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa.
Stationääritila	Stationääritilassa (= jatkuvuustila) olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.
Tiivis rakenne	Tiiviissä rakenteessa on tiivis ilmansulku ja höyrynsulku.
Tuulensuoja	Tuulensuoja on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää tuulen aiheuttama haitallinen ilmavirtaus raken-

teen lämmöneristekerroksessa. Tuulensuojamateriaalin tulee olla hyvin vesihöyryä läpäisevä.

- Vesihöyrynläpäisevyys** Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryyn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Kosteus voi siirtyä materiaalisuissa muissakin olomuodoissa kuin vesihöyrynä, jolloin voidaan puhua myös materiaalin kosteudenläpäisevyydestä.
- Vesihöyrynläpäisykerroin** Vesihöyrynläpäisykerroin (W_v tai W_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryyn osapaine-ero) on yksikön suuruinen.
- Vesihöyrynvastus** Vesihöyrynvastuksella (Z_v tai Z_p) tarkoitetaan vesihöyrynläpäisykerroimen käänteisarvoa. Tarkkaan ottaen vain vesihöyrynläpäisykerroinissa on mukana rajapintojen aineensiirtokerroimien vaikutus, mutta niiden osuus on käytännössä merkityksetön. Yksittäisen ainekerroksen vesihöyrynvastus lasketaan kaavalla $Z=d/\delta$.
- Vesihöyrypitoisuus** Vesihöyrypitoisuus (ν) ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän. Vesihöyrypitoisuuksien ero pyrkii tasoittumaan diffuusion avulla.
- Ylipaine** Kun tietyn tilan absoluuttinen paine on suurempi kuin ympäröivä ilmanpaine, tilassa vallitsee ylipaine. Tässä julkaisussa ylipaineella tarkoitetaan sitä, että rakennuksessa sisällä vallitseva ilmanpaine on suurempi kuin ulkona.

1 Johdanto

1.1 Lähtökohta

Turun Rakennustuote Oy on kehittänyt puusta tehdyn seinäelementin eli ns. mittaelementin. Yritys on myös tehnyt samalla periaatteena toteutettuja ylä- ja alapohjaelementtejä. Lämmöneristeenä elementeissä käytetään mineraalivillaa tai puukuitueristettä. Seinäelementin sisäpinnassa käytetään höyryn-/ilmansulkuna mineraalivillan kanssa höyrynsulkumuovia ja puukuitueristeen kanssa bitumivuorauspaperia. Sisäverhouslevynä käytetään kipsilevyä. Puurunkorakenne ei aseta vaatimuksia muidenkaan materiaalien käytölle. Uusia puuelementtejä on käytetty mm. Raision asuntomessuille rakennetussa näyttelytalossa (1997).

Keväällä -98 aloitettiin uuden koetalon rakentaminen Lietoon. Koetalossa käytettiin uutta seinäelementtiratkaisua. Näin saatiin hyvät mahdollisuudet tutkia seinäelementtien kosteusteknistä toimintaa todellisissa olosuhteissa. Kiinnostavia asioita olivat mm. puukuitueristeen ja mineraalivillaeristeen seinän toiminnan vertailu eri vuodenaikoina sekä rakennusaikaisen kosteuden kuivuminen.

Turun Rakennustuote Oy on ollut mukana myös TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa tehtävässä tutkimuksessa, jossa selvitettiin vesihöyryn siirtymistä vaipparakenteissa erilaisissa lämpötila-, kosteus- ja paine-ero-olosuhteissa. Tutkimus kuului TEKES:n puurakentamisen teknologiaohjelman tutkimusprojekteihin. Tämän tutkimuksen yhteydessä tutkittiin vastaavan puukuitueristeen seinärakenteen toimintaa laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriokokeista saatujen tulosten lisäksi haluttiin saada vertailutietoa todellisesta kohteesta käytännön olosuhteissa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli vertailla käytännön olosuhteista saatuja mittaustuloksia vastaavanlaisella koerakenteella tehtyyn laboratoriokokeeseen. Lisäksi tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa mittaustalusto, jonka avulla voidaan tutkia uuden puuseinäelementin toimintaa koetalossa eri vuodenaikoina. Laitteiston vaatimuksena oli jatkuvatoimiva mittausjärjestelmä, jolla voitaisiin mitata mm. suhteellista kosteutta, lämpötiloja, paine-eroa ja ilmavirtaa.

Mittaustaluston rakentaminen perustui TTY:ssä aikaisemmin rakennettuun lämmönläpäisyjärjestelmään (CHB), jota käytetään rakenteiden lämmönläpäisykertoimien (U -arvo) määrittämiseen sekä rakennusfysikaaliseen tutkimusjärjestelmään, jota käytetään mm. rakenteiden kosteusteknisen toiminnan mallintamiseen.

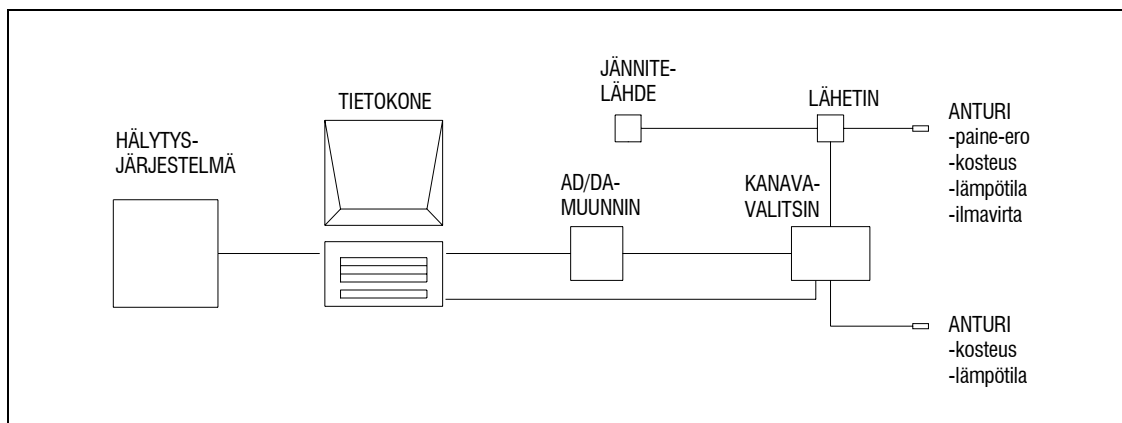
2 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteiston toimintaperiaate perustuu suurelta osin lähteissä /7/ ja /8/ esitettyjen laitteistojen toimintaan. Tässä kappaleessa on kerrottu mittauslaitteiston periaate yleisellä tasolla.

2.1 Laitteiston yleinen toimintaperiaate

Ennen kokeen alkua laitteiston ohjausohjelman syötetiedostoihin annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä ja -kanavista, mitattavista suureista, anturien kalibrointikertoimista sekä mittauksen aikana seurattavista mittausarvoista.

Seurannan aikana tietokone käy säännöllisesti läpi saman mittausprosessin. Mittausprosessin aikana mitataan jännitearvot kaikilta n. 50 - 100 mittauskanavalta halutuin välein. Tämän jälkeen saadut jännitearvot muutetaan niitä vastaaviksi laskentasuureiksi (lämpötila, suhteellinen kosteus, paine-ero, ilmavirran nopeus jne.) muunnoskaavojen avulla ja lasketaan eri suureiden keskiarvot. Saatuja keskiarvoja käyttäen tietokone laskee tutkitavalle rakenteelle myös erilaisia laskennallisia arvoja (tässä tapauksessa vesihöyrypitoisuus ja homeraja-arvot). Mittauksen kuluessa mitatut ja lasketut arvot tallennetaan tulostiedostoihin. Mittauksen edistymistä voidaan tarkkailla kokeen aikana numeeristen ja graafisten seurantasivujen avulla tietokoneen näytöltä (kuva 2.1).



Kuva 2.1. Laitteiston toimintaperiaate.

2.2 Laitteiston osat

Mittauslaitteet

Koetalokohteessa oli käytössä seuraavanlaiset mittauslaitteet:

- lämpötila-anturit

- kosteuslähettimet
- ilmanvirtauslähettimet
- paine-erolähettimet
- jännitteen mittausslaitteet

Näiden lisäksi laitteistoon on mahdollista liittää mm. puun kosteusmittareita, lämpövir-
talevyjä, säteilymittareita ja CO₂-mittareita tarpeen mukaan.

2.3 Suureiden mittaaminen

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

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

missä u_i on yksittäisen mitattavan suureen arvo. Kertoimet k ja b riippuvat anturin tai lähettimen mittausalueesta ja käytettävästä ulostulojännitteen alueesta. Anturien kertoimet määritetään joko TTY:llä tehtävissä kalibrointikokeissa tai mittausanturien kertoimet annetaan vakioina valmistajan tekemän kalibroinnin perusteella.

Anturit ja lähettimet kytketään erilliseen mittauskanavan valintayksikköön ja siitä edelleen AD/DA -muuntimeen. Tietokoneen sisälle asennettu AD/DA -muunninkortti muuttaa saadut analogiset jännitearvot digitaaliseen muotoon, jolloin niitä voidaan käsitellä tietokoneohjelman avulla.

Lämpötilan mittaus

Mittauslaitteistossa käytettiin lämpötilan mittaamiseen puolijohdeantureita, joiden synnyttämä ulostulojännite muuttuu lämpötilan muuttuessa. Puolijohdeanturiksi on valittu National Semiconductor Corporationin valmistama LM 335 tyyppin anturi. Yksi lämpötila-anturi koostuu puolijohdeanturista, anturin suojuksesta ja 10 m pituisesta liittimellä varustetusta mittausjohdosta. Laitteistossa käytettiin eri tavoin suojattuja antureita riippuen siitä, mistä paikasta lämpötiloja mitattiin.

Ilman suhteellisen kosteuden mittaus

Ilman suhteellista kosteutta mitattiin Vaisala Oy:n valmistamilla HMP 230 –sarjan kosteuslähettimillä. Kosteuslähettimen koostuu anturiosasta, joka on liitetty 10 m johdolla elektroniikkayksikköön. Lähettimien mittausanturina toimii kapasitiivinen kosteusantu-

ri. Kapasitiivisessa kosteusanturissa mitataan väliaineen dielektrisiä muutoksia kosteuden funktiona.

Ilman suhteellista kosteutta mitattiin myös TTY:llä valmistetuilla kosteusantureilla. Mittaavaksi komponentiksi on valittu RHU-217-AT, jossa ei tarvita anturin ulkopuolista elektroniikkaa. Erillistä syöttöjännitelähdettä ei tarvita, vaan syöttöjännite saadaan kanavavalitsimen kautta.

Ilman virtausnopeuden mitta

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

Paine-eron mitta

Paine-eroa rakenteen yli mitattiin Huba Control AG:n valmistamilla T 70 –tyypin paine-erolähettimillä. Paine-erolähettimessä kaasun paine muutetaan mekaaniseksi liikkeeksi, joka muutetaan jännitevasteeksi.

Paine-eron mittaukseen tarvitaan varsinaisen paine-erolähettimen lisäksi kaksi 10 m pitkää muoviletkua, jotka liitetään toisesta päästään lähettimeen. Letkujen vapaat päät viedään tutkittavan rakenteen eri puolille ja suojataan suojuksilla, joihin on lisätty vaahdotmuovisuodattimet paineenvaihteluiden tasaamiseksi.

2.4 Ohjausohjelma

Mittausta ohjataan CLIMATE -nimisellä ohjelmalla. Ohjelma koostuu syötetiedostoista, varsinaisesta mittaus- ja säätöohjelmasta sekä tulostiedostoista. Ohjelma on tehty Quick Basic –ohjelmointikielen versiolla 4.5. Käyttöjärjestelmänä toimii DOS 6.22.

Ennen mittauksen alkua laitteiston ohjausohjelman syötetiedostoihin annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä, kanavista, mitattavista suureista, mittausturien kalibrointikertoimista, tutkittavan rakenteen ominaisuuksista sekä mittauksen aikana seurattavista mittausarvoista.

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

Ohjausohjelmaan on tehty erilaisia varmistuksia ja rajoituksia. Suurin riski mittauksen toiminnan kannalta on varmastikin eri syistä aiheutuvat sähkökatkot. Niiden vaikutusta on pyritty eliminoimaan rakentamalla ohjausohjelmaan automaattinen nousu- ja hälytysjärjestelmä, joka käynnistää tietokoneen uudelleen sähkökatkon jälkeen ja kytkee mittausjärjestelmät uudelleen käyntiin.

Vastaavaa ohjelmaa käytetään TTY:n lämmönläpäisy-laitteistossa ja rakennusfysikaaliossa tutkimuslaitteistossa. Lähteessä /8/ on tarkempi kuvaus ohjelman toiminnasta.

2.5 Kokeista saatavat mittaus- ja laskenta-arvot

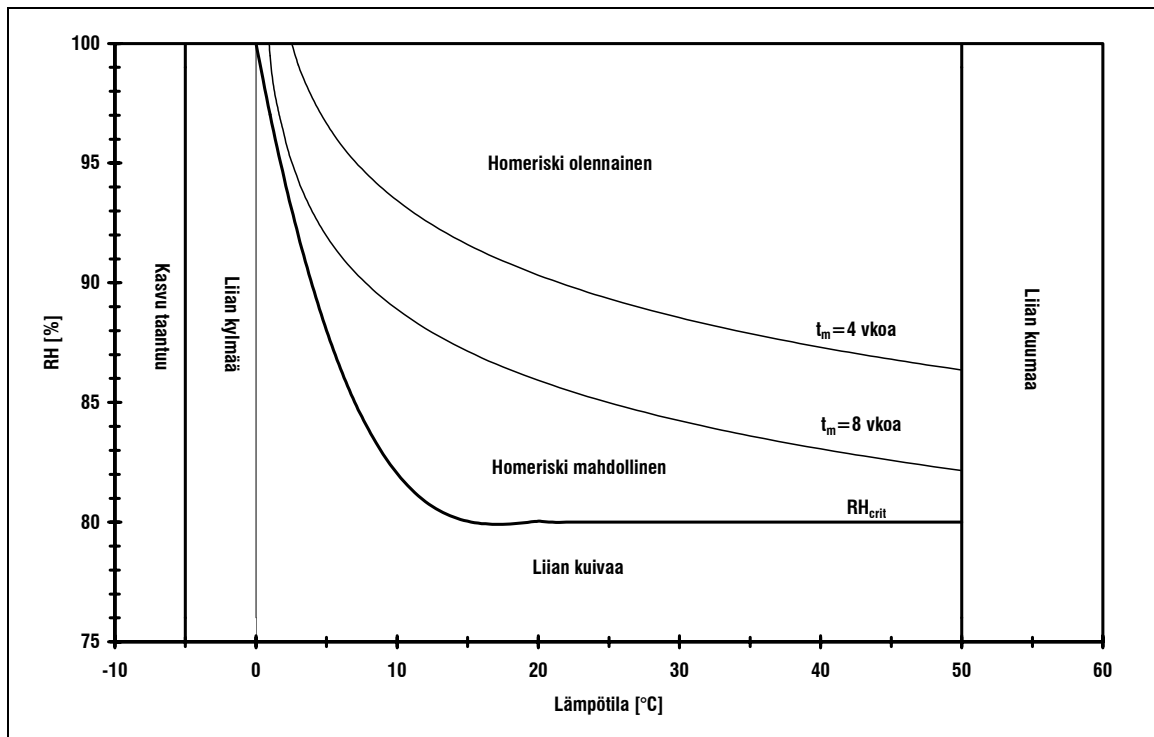
Kokeen aikana mitataan mm. seuraavia suureita:

- lämpötilat sisällä, ulkona, rakenteessa ja pinnoilla (T) [$^{\circ}\text{C}$]
- ilman suhteellinen kosteus sisällä, ulkona, tuuletusraossa ja rakenteen huokostilassa (ϕ) [%]
- paine-ero rakenteen yli koe-elementin ylä- ja alaosasta (Δp) [Pa]
- ilman vesihöyrypitoisuus sisällä, ulkona ja rakenteen huokostilassa (ν) [g/m^3]
- ilman virtausnopeus tuuletusraossa (r) [m/s]

Rakennenäytteiden avulla saadaan lisäksi mm. seuraavat tiedot:

- rakennusmateriaalien kosteuspitoisuus (u) [paino-%]
- rakennusmateriaalien sisältämä kosteus (m) [g]
- kondensoitumisen voimakkuus tuulensuojalevyn takana

Kenttäkokeessa voidaan myös selvittää onko rakenteessa homeen kasvulle suotuisia lämpötila- ja RH -olosuhteita. Homeriskin suuruutta puupohjaisille materiaaleille voidaan arvioida kuvassa 2.2 esitettyjen käyrien perusteella /3/. Lämpötilan ollessa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä homeen kasvu on mahdollinen, kun $\text{RH} > \text{RH}_{\text{crit}}$. Tämän lämpötila-alueen ulkopuolella homeet eivät merkittävästi kasva. Homeen kasvu on sitä nopeampaa mitä lämpimämpää ja kosteampaa on. Kuvassa esitetyt käyrät $t_m = 4$ vkoa ja $t_m = 8$ vkoa kuvaavat sitä aikaa, jolloin näkyvä home kehittyy puumateriaalin pintaan ko. lämpötila- ja RH-olosuhteissa.



Kuva 2.2. Homeen kasvulle suotuisat lämpötila- ja RH-olosuhteet. /3/

2.6 Laitteiston mittausepävarmuus

Mittaustulosten ja laskenta-arvojen mittausepävarmuus määritetään lähteessä /1/ esitetyillä laskentakaavoilla. Osalle mitattavista suureista mittausepävarmuus on annettu valmistajan tekemän kalibroinnin perusteella.

Mitattavien ja laskettavien suureiden epävarmuudet olivat seuraavat:

- yksittäiset lämpötilat $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$
- lämpötilakeskiarvot $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$
- ilman suhteellinen kosteus (Vaisala) $\pm 2,0 \text{ RH } \%$ (0...90 RH %)
- ilman suhteellinen kosteus (Vaisala) $\pm 3,0 \text{ RH } \%$ (90...100 RH %)
- ilman suhteellinen kosteus (TTY) $\pm 5,0 \text{ RH } \%$
- ilman vesihöyrypitoisuus $\pm 0,05 \dots 0,55 \text{ g/m}^3$ (-20...+20 °C)
- paine-ero rakenteen yli $\pm 1,0 \text{ Pa}$
- ilman virtausnopeus $\pm 0,1 \text{ m/s}$
- materiaalien kosteuspitoisuus $\pm 2,0 \text{ paino-}\%$

3 Mittausjärjestelyt

3.1 Koetalon sijainti ja rakennuspaikka

Koetalo sijaitsee Liedossa Teijulan asuntoalueella. Teijulan asuntoalue on melko uusi ja se on rakennettu vanhalle peltoalueelle. Talo sijaitsee hyvin avoimella paikalla, puita tai korkeita rakennuksia ei lähetyvillä ole. Näin ollen seinille ei pääse syntymään katveja tuulen eikä auringon suhteen. Maasto koetalon ympärillä on muutoinkin melko tasaista, tyyppillistä Lounais-Suomalaista maastoa.

3.2 Koetalon perustiedot

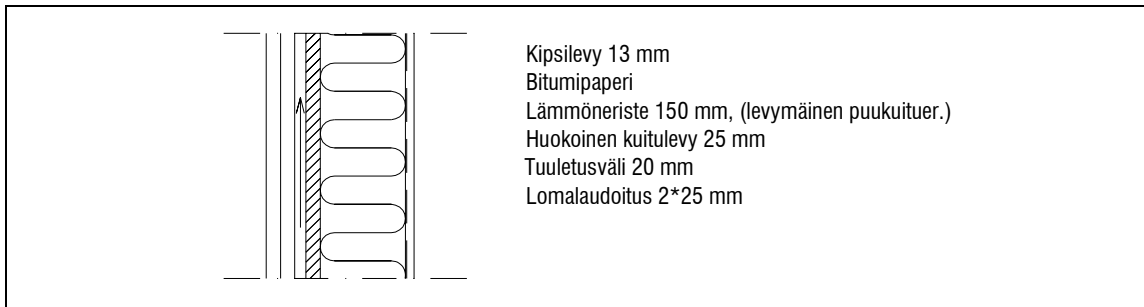
Koetalon rakennusala on 107 m² ja yläkertaan on mahdollisuus tehdä lisätilaa 54 m². Mittausjakson aikana yläkerta ei ollut asumiskäytössä. Liitteessä I on esitetty koetalon pohjapiirros, leikkauspiirros ja julkisivukuva. Talossa on koneellinen poistoilmanvaihto. Kuvassa 3.1 on esitetty valokuva koetalon eteläseinältä, johon anturit on kiinnitetty.



Kuva 3.1. Koetalon eteläseinä, johon anturit on asennettu.

Talo on rakennettu tehdasvalmisteisista suurelementeistä (mittaelementeistä). Elementteissä on puurunko (50 × 150). Koetalossa lämmöneristeenä on käytetty levymäistä puukuitueristettä (150 mm). Tuulensuojana on käytetty huokoista kuitulevyä (25 mm). Sisäpinnassa on bitumipaperi ja kipsilevy (13 mm). Yläpohjassa höyryn- ja ilmansulkuna on käytetty rakennusmuovia. Ulkoverhouksena on lomalauta (25 mm). Tuuletusvälin

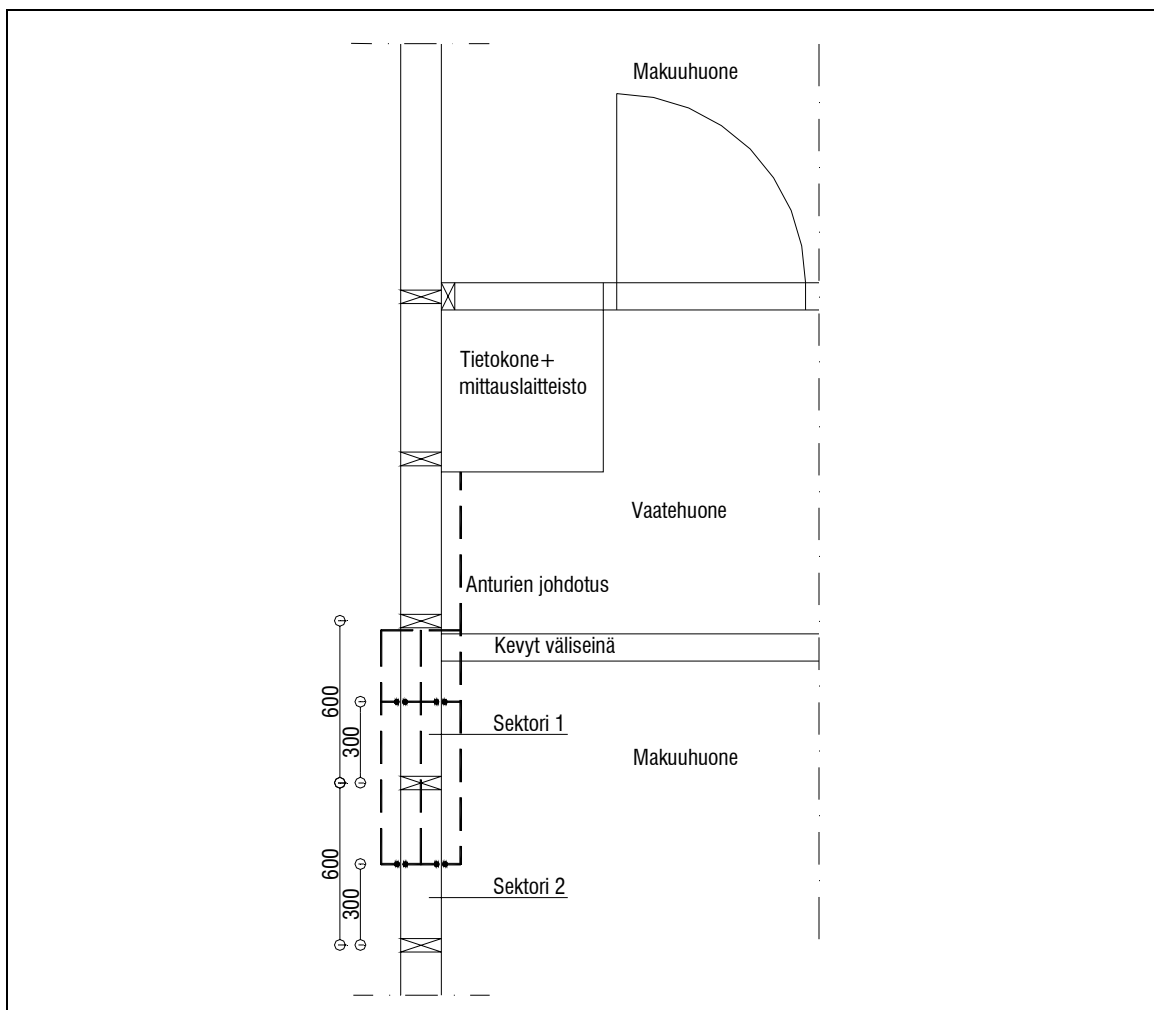
paksuus on 20 mm. Koetalon alapohjarakenteena on teräsbetonilaatta. Kuvassa 3.2 on esitetty poikkileikkaus seinärakenteesta.



Kuva 3.2. Seinäelementtien poikkileikkaus.

3.3 Mittausjärjestelyt koetalossa ja anturien asentaminen

Mittauskalusto sijoitettiin koetalon vaatehuoneeseen. Anturit tuotiin seinän läpi makuuhuoneeseen, jossa mitattavat seinäsektorit olivat. Vastaavasti anturit vietiin eristetilaan ja ulos kuvassa 3.3 esitetyllä tavalla. Kuvassa 3.4 on esitetty mittauslaitteisto vaatehuoneeseen sijoitettuna.



Kuva 3.3. Mittauslaitteiston sijainti koetalossa ja anturien sijainti ulkoseinässä (vrt. liite I).



Kuva 3.4. Mittauslaitteisto vaatehuoneeseen sijoitettuna.

Anturien asennuksen yhteydessä sektoriin 1 vaihdettiin lämmöneristeeksi mineraalivilla ja höyrynsulukuksi rakennusmuovi (PE 0,2 mm). Sektoriin 2 jätettiin levymäinen puukuitueristelevy ja ilmansulukuksi bitumipaperi (kts. kuva 3.5). Höyryn- ja ilmansulkukalvojen saumat teipattiin ilmastointiteipillä mahdollisimman tiiviisti, jottei rakenteeseen olisi jäänyt konvektiovuotokohtia. Myös tuulensuojalevy katkaistiin sektoreiden väliltä, jottei kosteutta siirtyisi kapillaarisesti sektorista toiseen. Lisäksi antureiden läpiviennit tiivistettiin silikonilla.



Kuva 3.5. Anturien asennuksen aikaisia kuvia 10.11.-98. Vasemman puoleisessa kuvassa näkyy anturien läpiviennit ulos ja sektoriin 2. Oikean puoleisessa kuvassa näkyy sektoriin 1 asennettu mineraalivilla ja höyrynsulkumuovi. Bitumipaperissa olleet reiät paikattiin teippaamalla. Taustalla näkyy hieman myös vaatehuonetta (väliseinä puuttuu), jonne mittauskalusto sijoitettiin. Mittauksen päätyttyä höyrynsulkumuovin ja mineraalivillan tilalle vaihdettiin takaisin bitumipaperi ja levymäinen puukuitueriste.

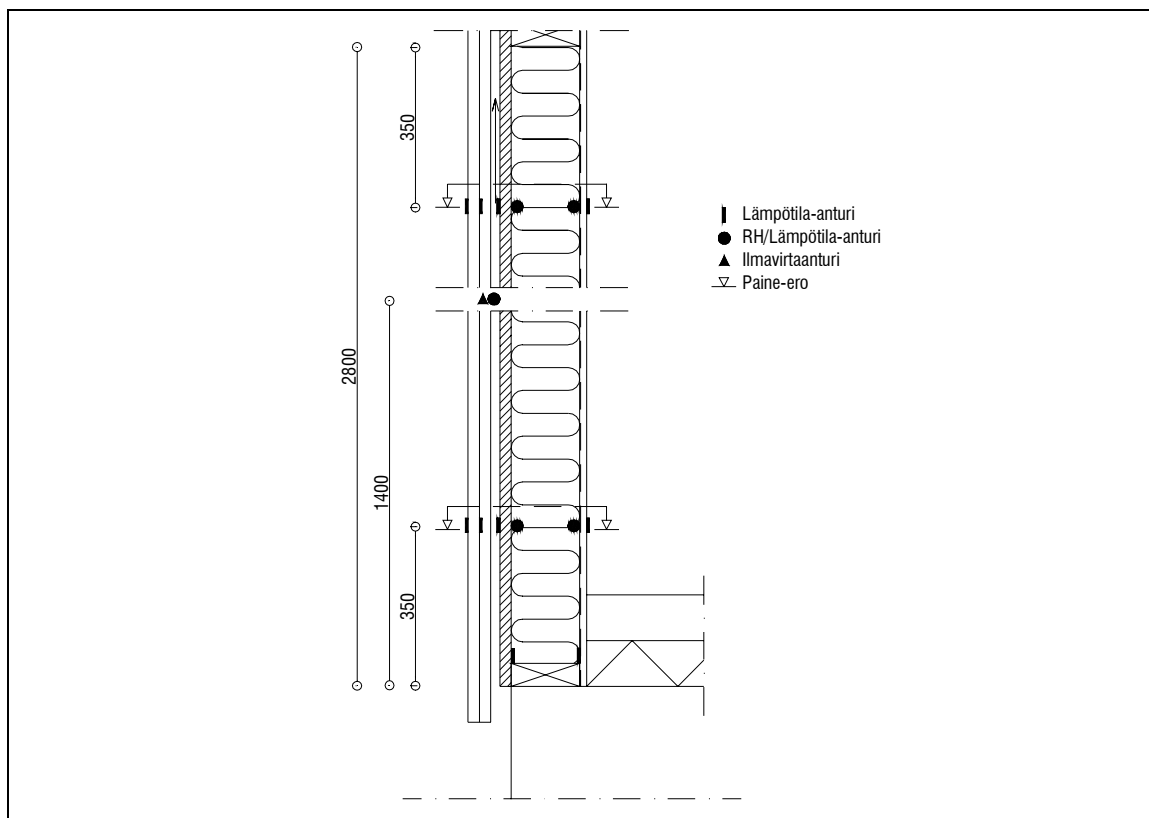
3.4 Mittausanturien sijainti

Mittauksessa oli mukana erilaisia lämpötila-antureita seuraavasti:

- pinta-antureita sisällä kipsilevyssä 4 kpl
- ilma-antureita sisällä 2 kpl
- pinta-antureita tuulensuojalevyn ulkopinnassa 4 kpl
- pinta-antureita ulkoverhouksen sisäpinnassa 4 kpl
- pinta-antureita ulkoverhouksen ulkopinnassa 4 kpl
- ilma-antureita ulkona 2 kpl
- metallivaippa-antureita muualla rakenteessa 5 – 6 kpl

Sisäpinnan pinta-anturit kiinnitettiin kipsilevyyn paperitapetin alle. Pinta-anturit sijoitettiin koolausvälin keskelle siten, että kaksi anturia tuli ylös ja kaksi alas (yksi kumpaankin mitattavaan sektoriin ylös ja alas). Anturien etäisyys ala- ja yläjuoksusta oli 350 mm. Tuulensuojalevyyn sekä ulkoverhouksen molemmin puolin anturit kiinnitettiin vastaviin kohtiin. Ilma-antureita oli sisä- ja ulkoilmassa ylhäällä ja alhaalla yksi kappale. Li-

säksi alajuoksun ja betonilaatan rajakohtaan asennettiin kaksi anturia. Kuvassa 3.6 on esitetty anturien sijainti korkeussuunnassa.



Kuva 3.6. Mittausanturien sijainti korkeussuunnassa.

Muita mittausantureita ja -laitteita oli seuraavasti:

- ilmanvirtausantureita tuuletusraossa 2 kpl
- kosteusantureita sisällä ja ulkona, kummassakin 1 kpl
- kosteusantureita eristetilassa 4 kpl
- kosteusantureita tuuletusvälissä 2 kpl
- paine-ero lähettimiä 2 kpl (paine-ero sisältä ulos)

Sisäilman kosteusanturi ja toinen paine-eron mittauspiste sijoitettiin huoneen yläosaan noin 200 mm:ä sisäkatosta alaspäin. Vastaavasti toinen paine-eron mittauspiste oli noin 200 mm:ä lattiapinnan yläpuolella.

Ulkoilman kosteusanturi asennettiin huonekorkeuden puoliväliin noin 50 mm:ä irti ulkoseinästä. Anturi suojattiin vesisateelta ja suoralta auringon säteilyltä niin, että ilmavirtaus kotelon sisällä oli mahdollista. Myös tuuletusvälin kosteus- ja ilmavirta-anturit asennettiin (molempiin sektoreihin) huonekorkeuden puoliväliin (kuva 3.7). Paineerolähettimeiden toiset mittauspisteet olivat vastaavalla korkeudella ulkoseinällä kuin sisällä.



Kuva 3.7. Tuuletusvälin mittausanturit.

Koeseinän sisään asennettiin kosteusantureita, joista mitattiin sekä lämpötila että suhteellinen kosteus (RH). Anturit sijoitettiin eristetilän lämpimälle ja kylmälle puolelle vastaaviin kohtiin kuin pintalämpötila-anturit.

Ulkoilman ja lämmöneristeiden ulkopintojen mittaamisessa käytettiin Vaisalan kosteusantureita ja vastaavasti lämmöneristeiden sisäpinnassa ja sisäilmassa TTY:n kosteusantureita.

3.5 Rakennenäytteiden ottaminen ja visuaaliset havainnot

Mittauksen alussa ja datan keruun yhteydessä (noin 3 kk:n välein) seinärakenteista otettiin rakennenäytteitä tuulensuojalevystä ja sen takana olevasta eristekerroksesta. Näytteiden ottoa varten porattiin ulkolevyyn \varnothing 75 mm reiät. Reiät tiivistettiin tulpilla, jotka valmistettiin tuulensuojalevynä käytettävästä materiaalista, joten ne eivät muuttaneet rakenteen tiivyyttä näytteenottokohdassa.

Rakennenäytteistä mitattiin kosteuspitoisuudet punnitus-kuivaus-punnitus – menetelmällä. Tuloksia verrattiin RH –antureilta saatuihin kosteusprosentteihin. Näytteenoton yhteydessä tehtiin lisäksi visuaalisia havaintoja tuulensuojan taakse mahdollisesti kerääntyneestä jäädästä ja kondenssivedestä.

3.6 Aikataulu

Koetalon rakentaminen ja seinäelementtien valmistus alkoivat kesällä –98. Lokakuussa –98 rakennus oli vesikatossa (elementit asennettu, lattiat valettu jne). Marraskuun puolivälissä asennettiin mittausanturit, jolloin talossa oli rakennusaikainen sähköistys ja lämmitys tapahtui rakennuslämmittimillä. Rakennuksen sisätyöt olivat parhaillaan käynnissä. Talon lopullinen valmistuminen ajoittui tammikuuhun –99. Rakennus oli tyhjillään aina toukokuun –99 alkuun asti. Siitä lähtien talossa asui kolmehenkinen perhe.

Ensimmäiset lähtöarvot seinästä mitattiin 16. – 17.11. –98. Varsinainen mittaus alkoi 21.12. –98. Tämän jälkeen seinästä otettiin näytteitä ja mittausdata kerättiin talteen noin 3 kk:n välein. Mittaus loppui ja anturit otettiin pois 29.03.2000. Anturien poisto suoritettiin ulkokautta.

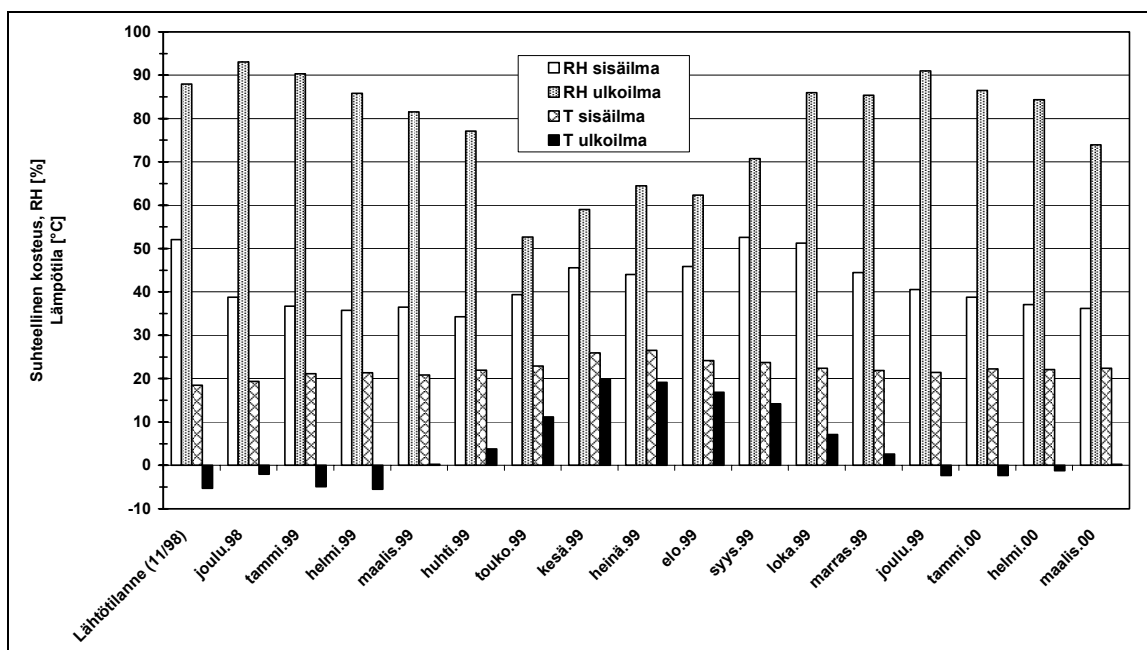
Mittauksen loputtua mineraalivillan ja höyrynsulkumuovin tilalle vaihdettiin takaisin levymäinen puukuitueriste ja bitumipaperi. Myös vanhan tuulensuojalevyn tilalle vaihdettiin uusi huokoinen kuitulevy.

4 Koetulokset

Saaduista koetuloksista on esitetty tässä yhteydessä ne arvot, jotka ovat rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta oleellisia. Yksinkertaistuksen vuoksi tuloksia on pääsääntöisesti käsitelty kuukausittaisina keskiarvoina tai liukuvina vuorokausikeskiarvoina. Keskiarvojen perustana on 5 min välein mitatut tai lasketut arvot. Yhden kuukauden keskiarvossa on siis lähes 9000 mittausarvoa. Liukuvassa vuorokausikeskiarvossa on 288 mittausarvoa, joista on laskettu keskiarvot tunnin välein. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että huhtikuussa –99 ja heinä-elokuussa –99 laitteistovika sotki mittauksia. Näiden kuukausien keskiarvolaskennassa on vähemmän dataa kuin muiden kuukausien keskiarvoissa. Liitteessä II on esitetty lähes kaikkien mitattujen ja laskennallisten suureiden kuukausittaiset keskiarvot.

4.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet

Sekä ulkoa että sisältä mitattiin yhdellä anturilla ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Ulkoilman anturilla pyrittiin mittaamaan ulkoseinän vieressä olevia olosuhteita (mikroilmastoa). Kuvassa 4.1 on esitetty koko mittausjakson aikana vallinneet ulko- ja sisäilman olosuhteet kuukausittaisina keskiarvoina.



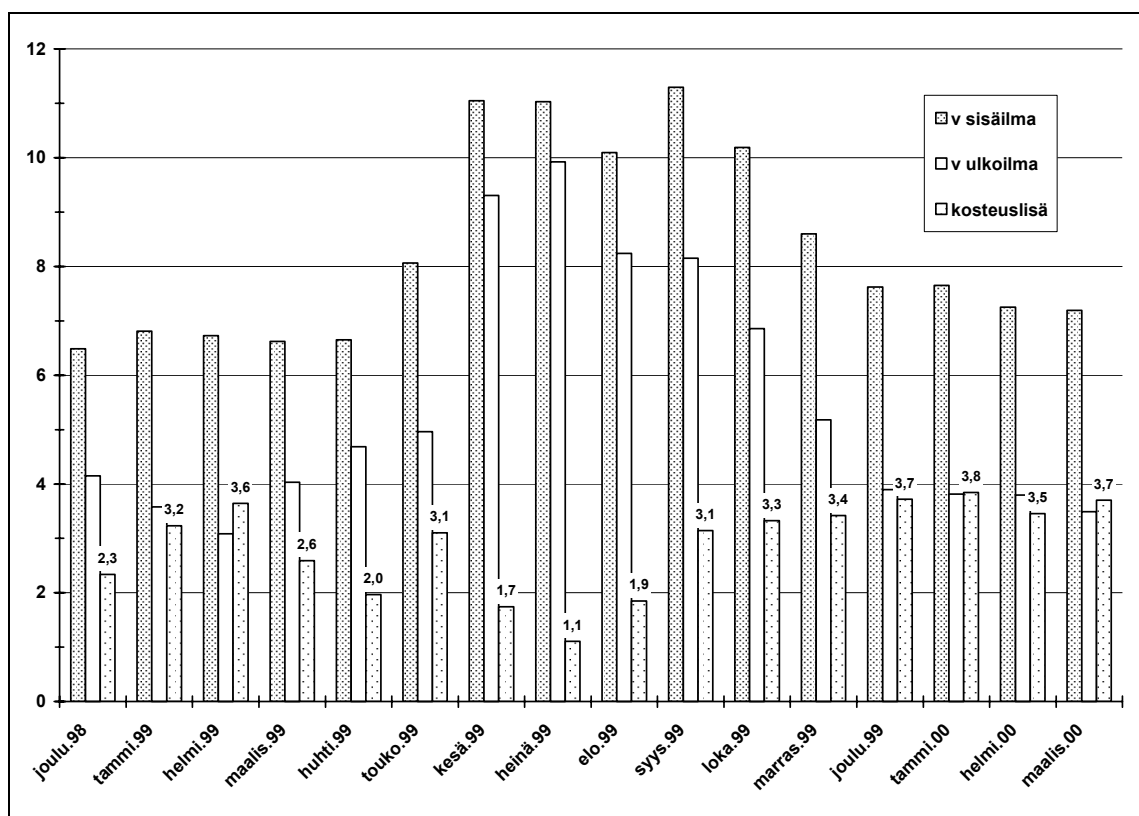
Kuva 4.1. Ulko- ja sisäilman RH:n ja lämpötilan kuukausittaiset keskiarvot. (Alkutilanteen keskiarvot on laskettu 16. – 17.11. –98 väliseltä ajalta.)

Vuosi –99 oli ulkoilman olosuhteiden suhteen kaksijakoinen: talvella oli runsaasti kovia pakkasia ja kesä oli erittäin kuiva ja kuuma. Kuumasta kesästä johtuen myös sisäilman lämpötila oli korkea kesällä: huoneen alaosassa > 25 °C ja yläosassa jopa > 27 °C. Joulukuun –98 ja tammikuun –99 alku olivat puolestaan keskimääräistä lämpimämpiä ja

sateisempia. Liitteessä III on esitetty ulko- ja sisäilman olosuhteet kuvaajina koko mittausjakson ajalta liukuvina vuorokausikeskiarvoina.

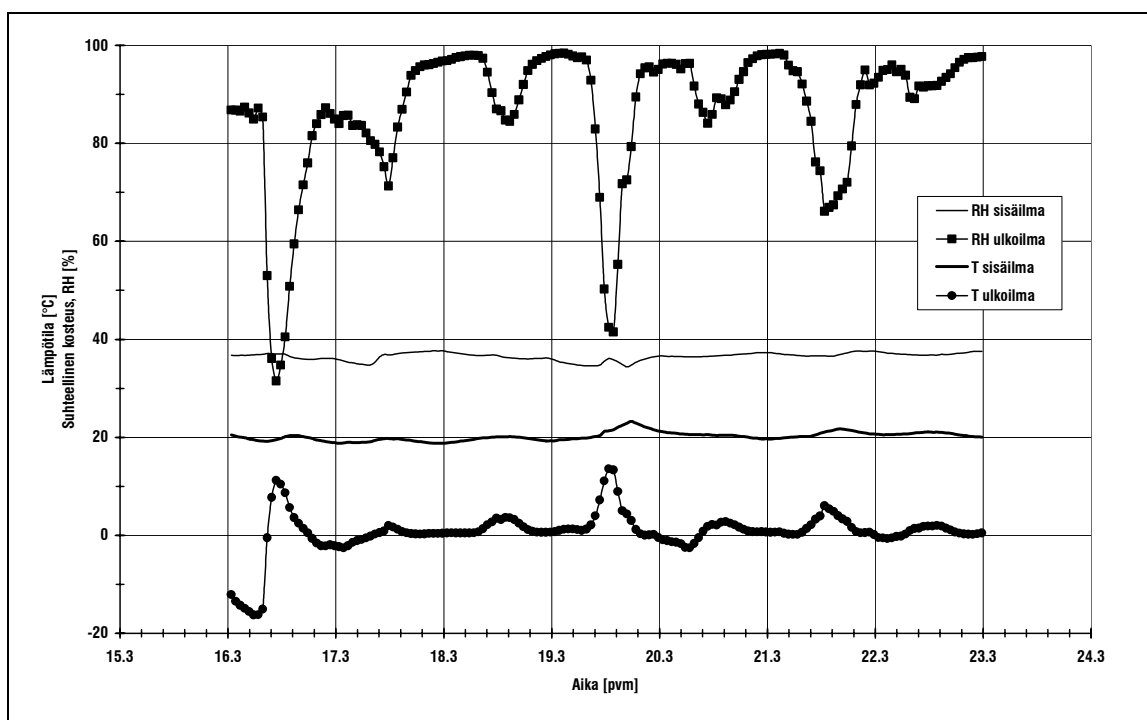
Sisäilman RH:n vaihtelu noudatti muodoltaan ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien vaihteluita. Kesällä huoneita on tuuletettu ja ilmeisesti myös kosteuden tuotto on ollut vähäisempää, jolloin olosuhteet sisällä ja ulkona ovat muuttuneet lähes samanlaisiksi. Luonnollisesti olosuhteet alkavat poiketa toisistaan, kun ulkoilman lämpötila laskee. Kosteuslisä sisällä on ollut alimmillaan kesällä 1,1 g/m³ (heinäkuu 1999), kun taas talvikausina (talvi 2000) se on vaihdellut välillä 3,3 – 3,8 g/m³. Sisäilman vesihöyrypitoisuus on ollut noin 1 g/m³ pienempi talvella 1999 kuin talvella 2000, jolloin rakennuksessa oli asukkaita.

Mittausjakson alussa sisäilman vesihöyrypitoisuutta lisäsi rakennusaikaisen kosteuden poistuminen rakenteista. Luonnollisesti kosteuden tuotto väheni ajan funktiona johtuen rakenteiden kuivumisesta. Asukkaiden muutettua (huhtikuun lopussa) kosteustuotto lisääntyi, mikä lisäsi sisäilman vesihöyrypitoisuutta ja kosteuslisää (kuva 4.2).



Kuva 4.2. Sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet sekä sisäilman kosteuslisä laskettuna kuukausittaisina keskiarvoina.

Vuorokautiset vaihtelut ulko- ja sisäilman olosuhteissa olivat suurimmillaan keväällä ja syksyllä. Kuvassa 4.3 on esitetty tyypillinen viikon jakso maaliskuussa –99. Jaksoon mahtuu sekä pilvisiä että aurinkoisia päiviä. Kuvasta nähdään, että ulkopinnan olosuhteet vaihtelevat auringon säteilystä johtuen varsin paljon kevätaikaan. Voimakas säteily nostaa myös sisäilman lämpötilaa.



Kuva 4.3. Esimerkki olosuhteiden tyypillisestä vuorokautisesta vaihtelusta (maaliskuu –99).

4.2 Suhteelliset kosteudet rakenteessa

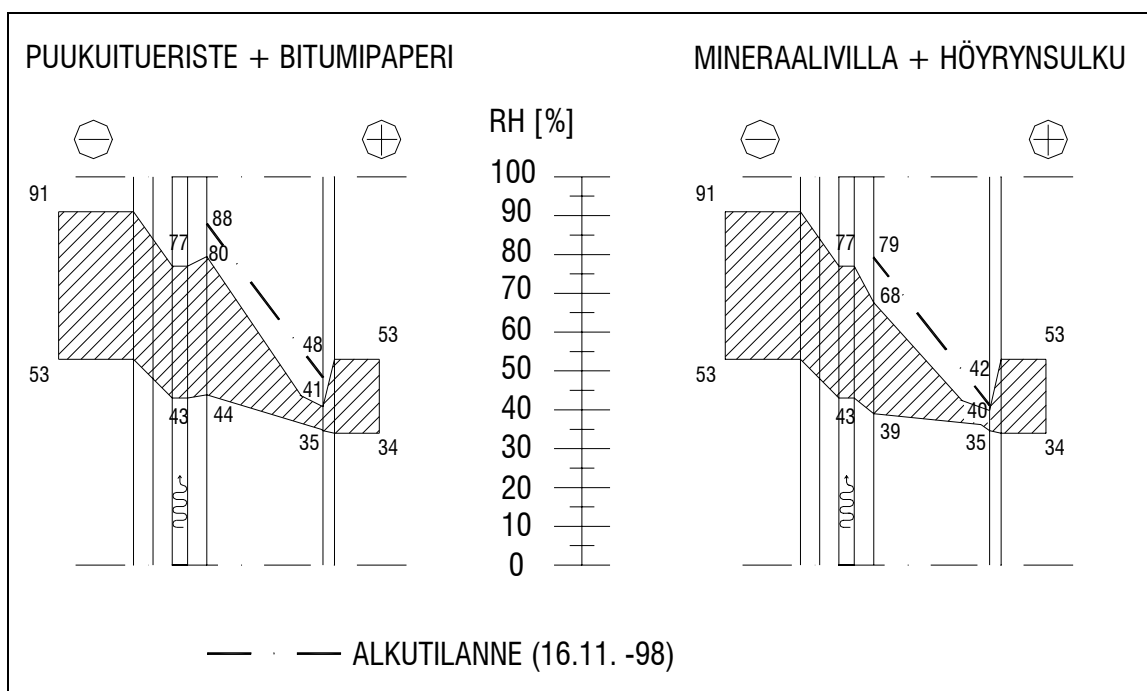
Tutkitut lämmöneristeet eroavat materiaaliominaisuuksiltaan huomattavasti toisistaan. Puukuitueristeen hygroskooppinen tasapainokosteus on huomattavasti suurempi kuin mineraalivillalla, joten niiden sitomat kosteusmäärät poikkeavat toisistaan paljon. On kuitenkin muistettava, että sisäpinnan vesihöyrynvastuksella on suurempi merkitys eristetilan suhteellisiin kosteuksiin kuin itse eristetyypillä. Mittauskohteessa käytettyjen ilman- ja höyrynsulkukerrostien (bitumipaperi ja höyrynsulkumuovi) vesihöyrynvastukset olivat suuruusluokaltaan täysin erilaiset.

Eristetilan ulko-osan suhteellisiin kosteuksiin vaikuttaa suuresti myös käytetty tuulensuojamateriaali. Tuulensuojalevyn lämmönvastuksen pieneneminen nostaa eristeen ulkopinnan suhteellista kosteutta. Kosteutta läpäisevissä rakenteissa myös tuulensuojan vesihöyrynvastuksen kasvu nostaa ulkopinnan kosteuspitoisuuksia. Tutkituissa seinärakenteissa mukana olleiden materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet on esitetty liitteessä V. Materiaaliominaisuudet perustuvat suurelta osin TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa tehtyihin mittauksiin.

Kuvassa 4.4 on esitetty suhteellisen kosteuden vaihteluvälit sisä- ja ulkoilmassa sekä rakenteissa mittausjakson aikana. Kuvassa esitetyt arvot ovat kuukausittaisia keskiarvoja, jotka on lisäksi laskettu rakenteen ala- ja yläosan anturien keskiarvoina. Ensimmäinen mittauskuukausi (joulukuu 1998) on kuitenkin poistettu raja-arvoista, koska silloin rakenteissa oli vielä huomattavasti rakennusaikaista kosteutta. On huomattava, että eristetilan sisä- ja ulkopinnan maksimi- ja minimiarvot eivät esiinny yhtä aikaa. Eristetilan

sisäpinnan maksimiarvo saavutettiin syksyllä ja minimiarvo keväällä. Eristetilan ulkopinnan maksimiarvo saavutettiin talvella ja minimiarvo aikaisin keväällä. Lyhytaikaiset (1-7 vrk) maksimiarvot olivat noin 5 RH % korkeampia.

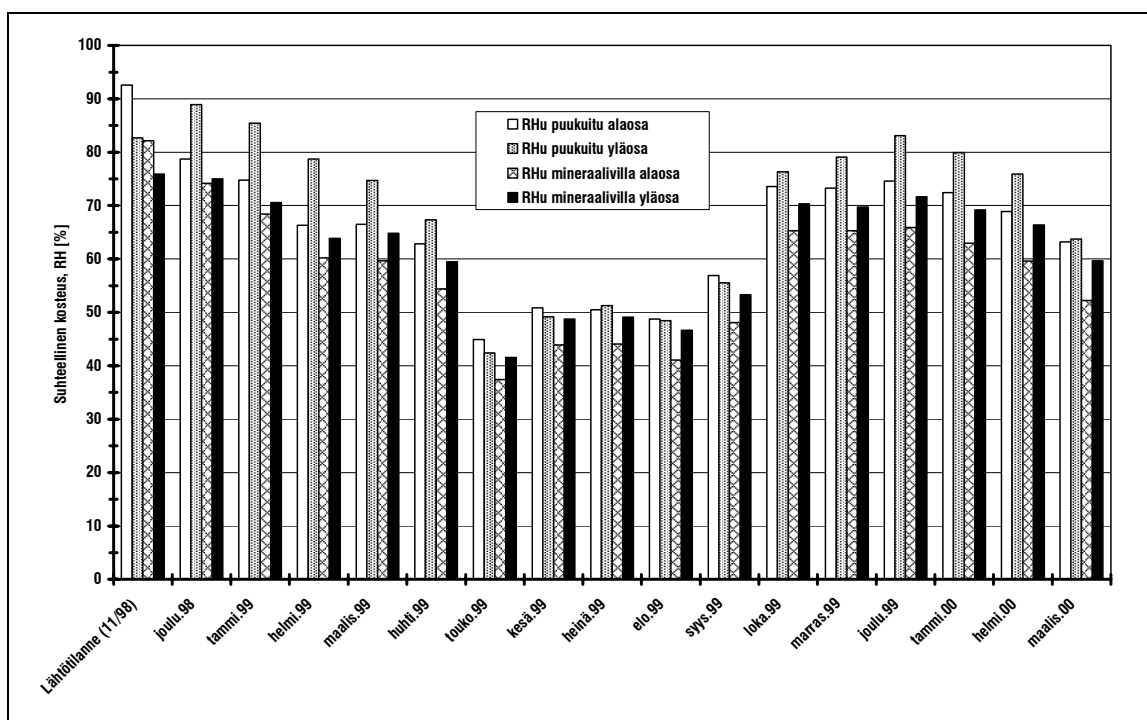
Rakenteen suhteellisissa kosteuksissa erot tulevat selkeimmin esille eri sektoreiden välillä eristetilojen ulko-osissa. Mineraalivillaeristeessä RH:n maksimiarvot olivat noin 10-15 RH % alempia kuin puukuitueristeessä. Minimiarvoissa ero oli noin puolet tästä.



Kuva 4.4. Suhteellisen kosteuden vaihteluvälit mittausjakson aikana. Eristetilan sisä- ja ulkopuolen minimi- ja maksimiarvot eivät esiinny samaan aikaan. Arvot on laskettu kuukausittaisina keskiarvoina (kukin arvo kahdesta anturista). Lisäksi eri pisteistä lasketut arvot on yhdistetty suorilla viivoilla toisiinsa (todellisuudessa RH:n muutokset eivät ole aivan lineaarisia).

Puukuitueristeisessä sektorissa koko vaihtelualueen suuruus oli 29 % isompi kuin mineraalivillalla. On kuitenkin huomattava, että eristetilan sisäosassa vaihtelualueiden suuruuksilla ei ollut juurikaan eroa. Suurin osa kosteuden muutoksista tapahtui siis eristetilan ulko-osassa. Eristetilan olosuhteet koko mittausjakson ajalta laskettuna on esitetty liitteessä IV.

Tarkasteltaessa rakenteiden homehtumisriskiä on suhteellisen kosteuden arvojen suuruuden ohella merkitystä korkean RH:n vaikutusajalla ns. kriittisen raja-arvon (RH_{crit}) yläpuolella (ks. kuva 2.2). Toinen merkittävä seikka on mahdollisen kondensoitumisen voimakkuus. Tutkituilla rakenteilla ei kondensoitumista havaittu näytteenottojen yhteydessä.



Kuva 4.5. Suhteellisen kosteuden kuukausittaiset keskiarvot eristetilän ulko-osassa.

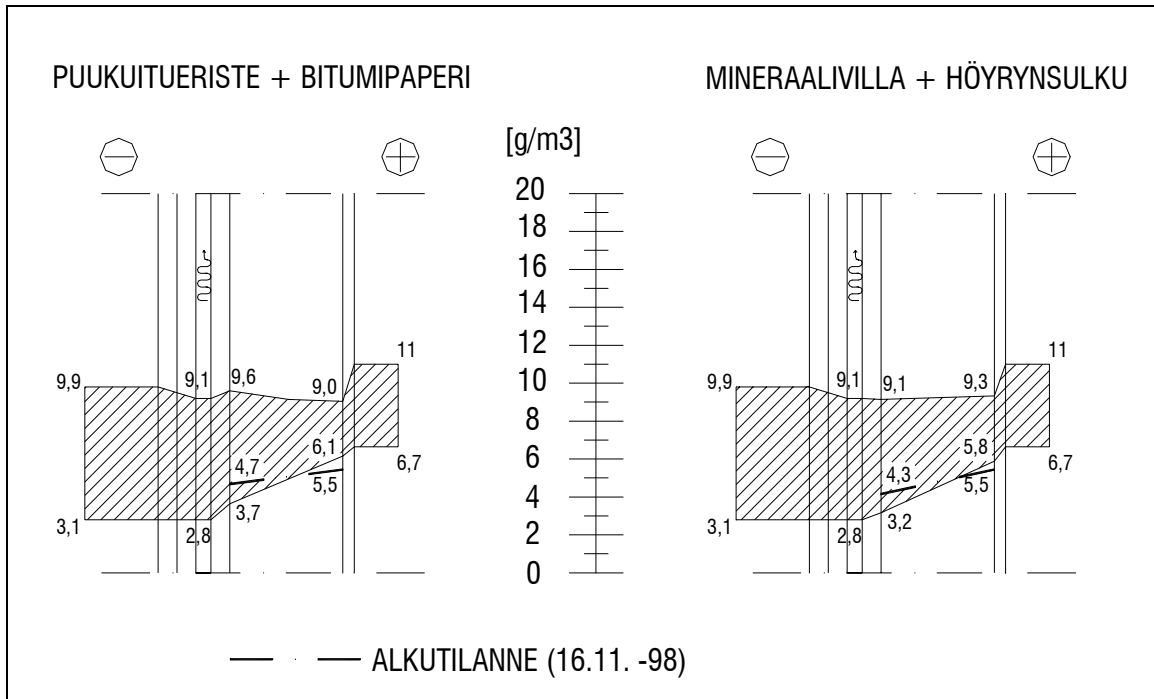
Eristetilän ulko-osissa suhteelliset kosteudet seinän ylä- ja alaosien välillä olivat erisuuruiset (kuva 4.5). Lähtötilanteessa lämmöneristeiden alaosissa oli korkeampi suhteellinen kosteus kuin yläosissa (puukuitueristeen alaosassa jopa $> 90\%$). Syynä tähän oli rakennusaikainen kosteus (mm. lattiavalusta haihtuva kosteus). Tilanne muuttui kuitenkin jo kuukauden kuluessa päinvastaiseksi (rakennuksen valmistuessa) ja tällaisena tilanne pysyi lähes koko mittausjakson ajan. Ainoastaan kesäkuukausina tapahtui ylä- ja alaosien välillä tasoittumista, koska sisä- ja ulkoilman olosuhteet lähestyivät toisiaan.

Lämmöneristeen ylä- ja alaosan erilaisiin suhteellisiin kosteuksiin vaikuttaa mm. seuraavat seikat:

- Lämmöneristekerroksessa tapahtuu sisäistä konvektiota lämpötilaerojen vaikutuksesta
- Vesihöyry nousee ilmaa kevyempänä kaasuna ylöspäin
- Rakenteen läpi voi tapahtua ilmavuotoja paine-eron vaikutuksesta
- Rakennusaikainen kosteus kuivuu rakenteesta

4.3 Vesihöyrypitoisuudet rakenteessa

Toisin kuin suhteellista kosteutta tarkasteltaessa, vesihöyrypitoisuudet saavuttivat maksimi- ja minimiarvonsa eristetilän sisä- ja ulko-osassa yhtä aikaa. Maksimiarvot saavutettiin kesällä ja minimiarvot talvella. Kuvassa 4.6 on esitetty sisä- ja ulkoilman sekä rakenteiden huokosilman vesihöyrypitoisuuksien vaihteluvälit mittausjakson aikana.



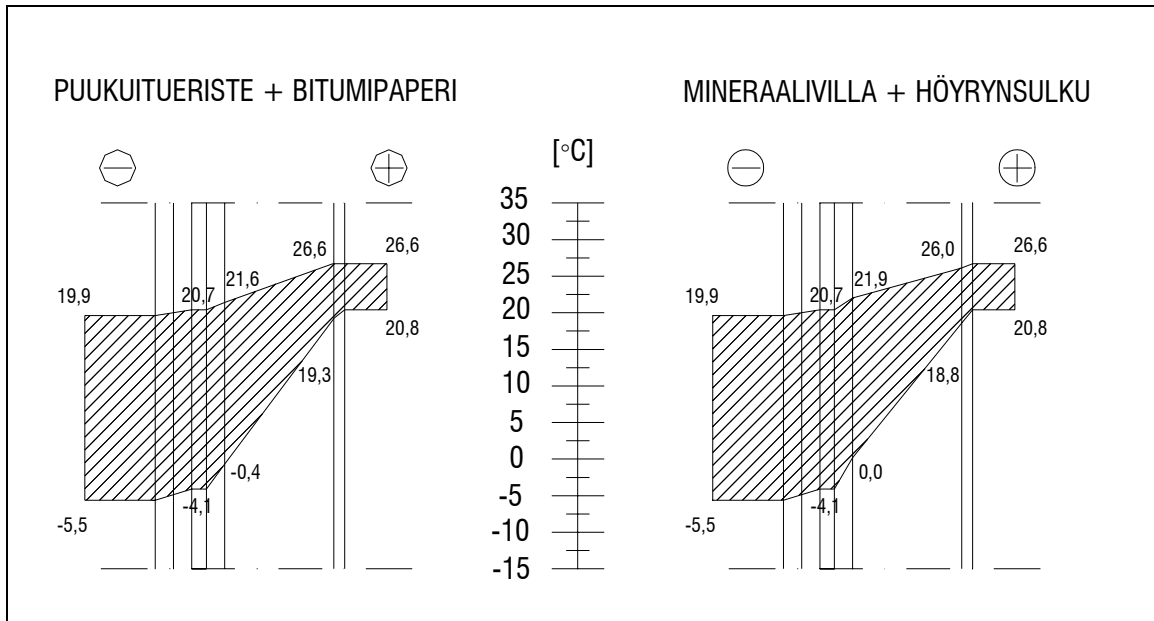
Kuva 4.6. Vesihöyrypitoisuuksien vaihteluvälit mittaajakson aikana. Eristetilan sisä- ja ulkopuolen minimi- ja maksimi-arvot esiintyvät samaan aikaan. Arvot on laskettu kuukausittaisina keskiarvoina (kukin arvo kahdesta anturista).

Puukuitueristeellä eristetilan ulko-osissa oli suuremmat vesihöyrypitoisuudet ($3,7 \text{ g/m}^3$ talvella ja $9,6 \text{ g/m}^3$ kesällä) kuin mineraalivillaeristeisessä seinäsektorissa ($3,2 \text{ g/m}^3$ talvella ja $9,1 \text{ g/m}^3$ kesällä). Talvikuukausien alimmat arvot saatiin, kun rakennus oli tyhjillään (helmikuu 1999).

Mittaussektoreiden yläosissa vesihöyrypitoisuudet olivat korkeammat kuin alaosissa: mineraalivillalla noin $0,1 - 0,5 \text{ g/m}^3$ sekä eristetilan ulko- että sisäosassa ja vastaavasti puukuitueristeellä $0,1 - 1,0 \text{ g/m}^3$. Eron suuruus riippui vuodenajasta siten, että se oli suurimmillaan talviaikaan (lämmitysjaksolla).

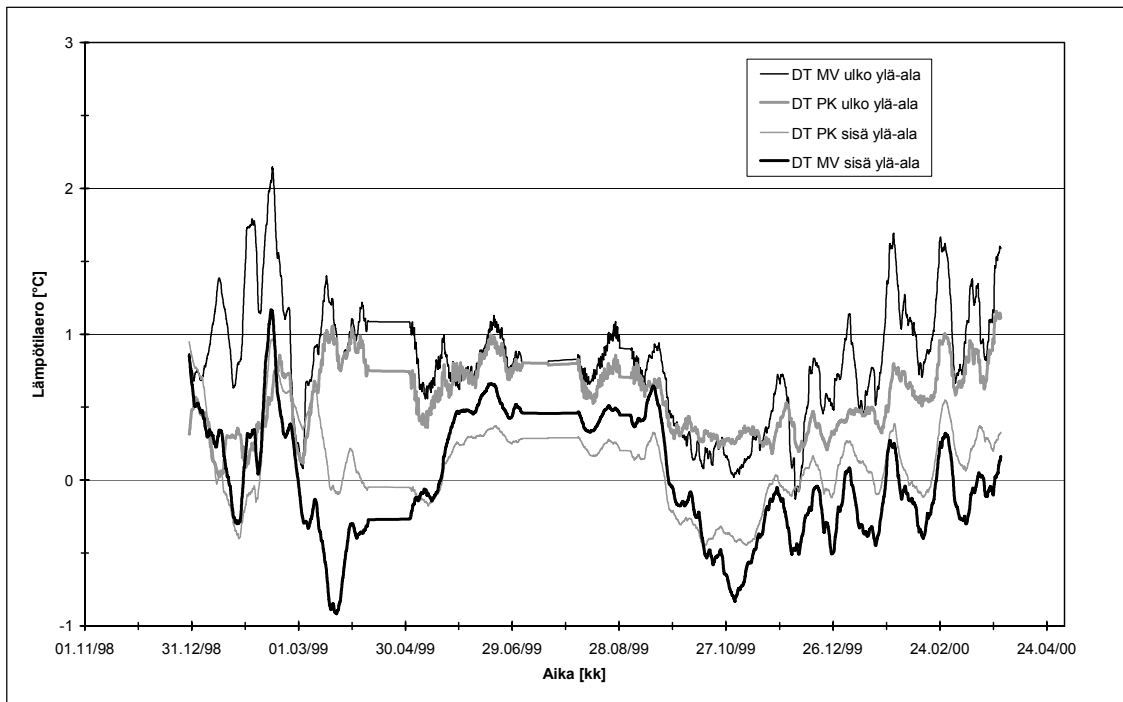
4.4 Lämpötilat rakenteessa

Lämpötilojen maksimi- ja minimiarvot eristetilan sisä- ja ulko-osassa esiintyivät luonnollisesti yhtä aikaa. Minimiarvot saavutettiin tammikuussa 2000 ja maksimi-arvot heinäkuussa -99 (kuva 4.7). Erot eristeiden lämpötiloissa toisiinsa verrattuna olivat hyvin pienet. Sen perusteella voitaneen otaksua, että eristeiden lämmönjohtavuuksissa ei ole mainittavaa eroa. Se, että mineraalivillassa oli hivenen korkeammat lämpötilat, johtui osittain ko. mittaussektorin sijainnista. Mineraalivillarakenne oli lähempänä vaatehuonetta, jossa mittauskalusto sijaitsi. Mittauskaluston, lähinnä jännitelähteiden ja tietokoneen, tuottama lämmitysteho riitti pitämään melko pienen vaatehuoneen lämpötilan noin $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa koko mittausjakson ajan.



Kuva 4.7. Lämpötilojen vaihteluvälit mittausjakson aikana. Eristetilan sisä- ja ulkopuolen minimi- ja maksimiarvot esiintyvät samaan aikaan. Arvot on laskettu kuukausittaisina keskiarvoina.

Sisäisen konvektion vaikutusta eristetilassa on tarkasteltu kuvassa 4.8. Kuvaajat esittävät, miten paljon lämpimämpää tai kylmempää rakenteen yläosissa oli verrattuna rakenteen alaosaan. Lämpötilaero on laskettu eristekerroksen sisä- ja ulkopinnoilta koko mittausjaksolta liukuvana keskiarvona. Mineraalivillaeristeessä erot ja vaihtelut olivat hie- man suurempia kuin puukuitueristeessä. Lämpötilaerot kasvoivat kummassakin raken- teessa lämmityskaudella.

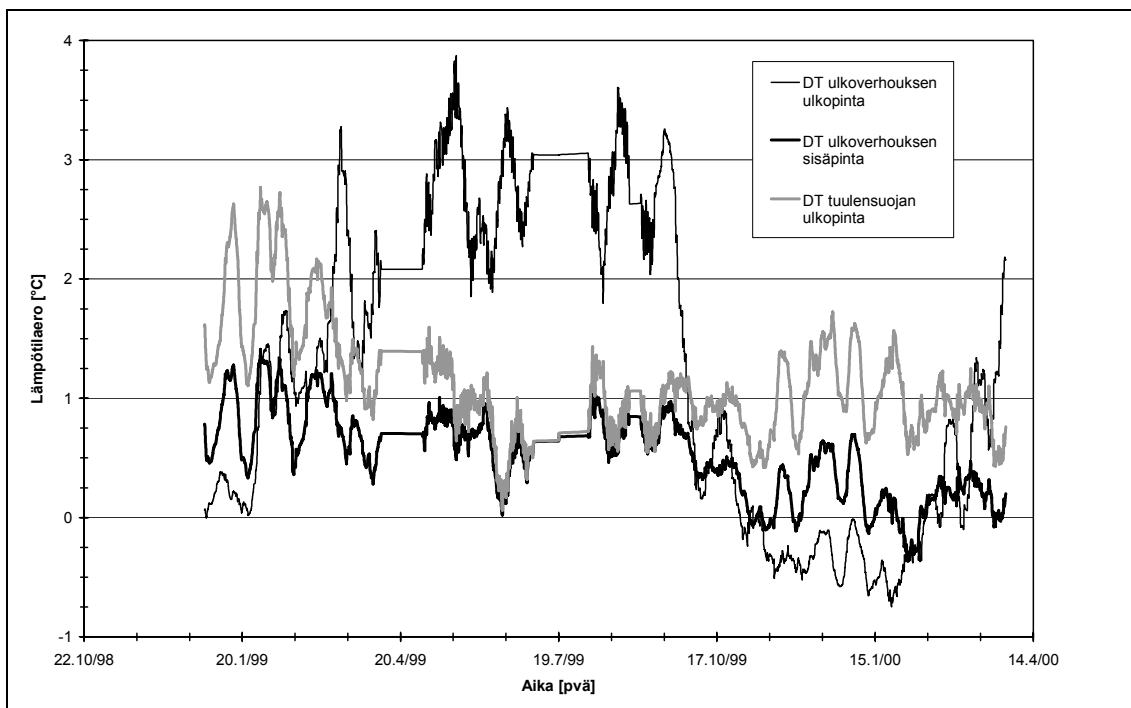


Kuva 4.8. Lämpötilaerot eristetilan sisä- ja ulkopinnoilta. Yläosan anturin lukemista on vähennetty alaosan anturin lukema. Kuvaajat on piirretty 24 tunnin liukuvana keskiarvona.

Kuvasta 4.8 nähdään, että eristeen lämpimällä puolella lämpötilaero pystysuunnassa oli pienempi (tyypillisesti alle 0,5 °C) kuin kylmällä puolella, jossa lämpötilaero saattoi talvikautena olla n. 1 °C. Mineraalivillaeristeessä lämpötilaerot olivat hieman suurempia kuin puukuitueristeessä. Lämpötilaerot kertovat siitä, että rakenteiden sisällä tapahtui sisäistä konvektiota jonkin verran. Kuvia 4.5 ja 4.8 vertaamalla voidaan todeta, että suhteellinen kosteus eritetilan yläosassa oli suurempi kuin alaosassa, vaikka myös lämpötila oli korkeampi eristetilan yläosassa. Näin ollen homeen kasvun kannalta kriittisimmät olosuhteet olivat rakenteiden yläosissa eristeen ulkopinnalla.

4.5 Lämpötilat ja vesihöyrypitoisuudet rakenteen ulkopinnalla ja tuuletusvälissä

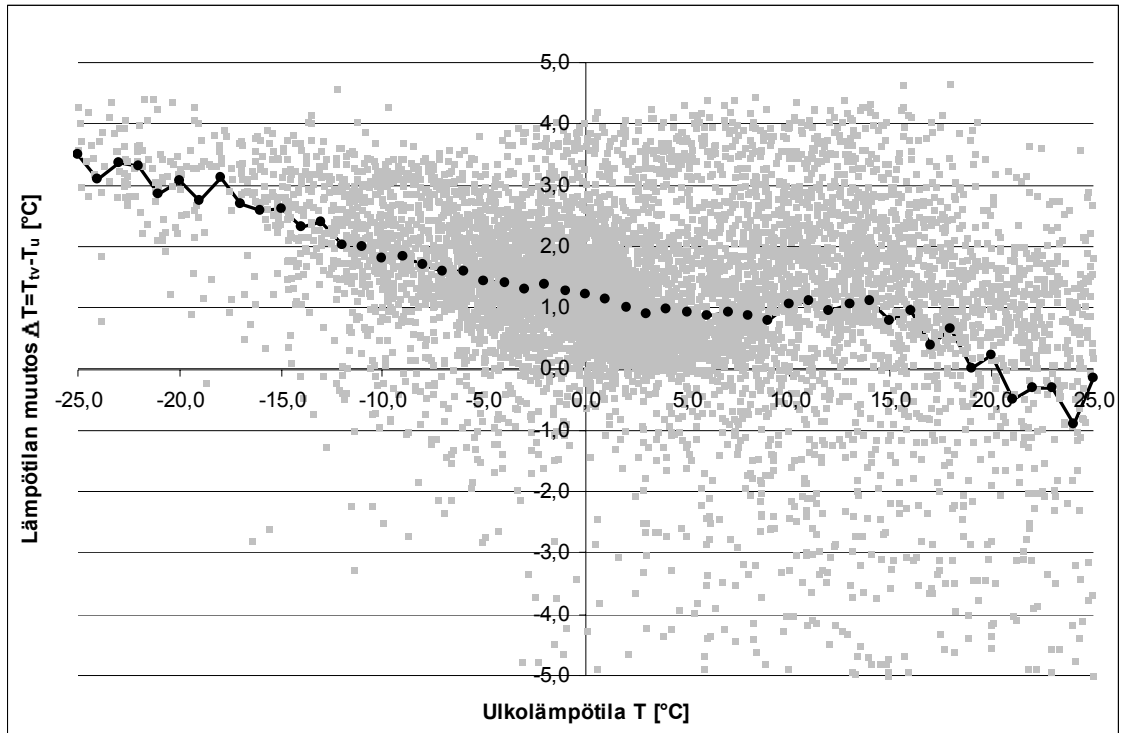
Auringon säteilyn vaikutusta on tarkasteltu vertailemalla lämpötilaeroja ulkoverhouksen ulko- ja sisäpinnan sekä tuulensuojan ulkopinnan välillä (kuva 4.9). Kuvaajista nähdään, kuinka paljon pintojen lämpötilat olivat ulkoilman lämpötiloja korkeammalla. Aurinko vaikutti ulkopintaan selvästi ja vuorokautiset vaihtelut olivat suuria (vrt. esim. kuva 4.3). Auringon säteilyn vaikutus oli luonnollisesti suurimmillaan kesäaikana ja tätä korosti vielä se, että mitattavana seinänä oli eteläseinä. Talvella mitatuista arvoista puolestaan nähdään, että ulkoverhouksen ulkopinta oli ajoittain jopa viileämpi kuin ulkoilma johtuen mm. ulkopinnan vastasäteilystä avaruuteen.



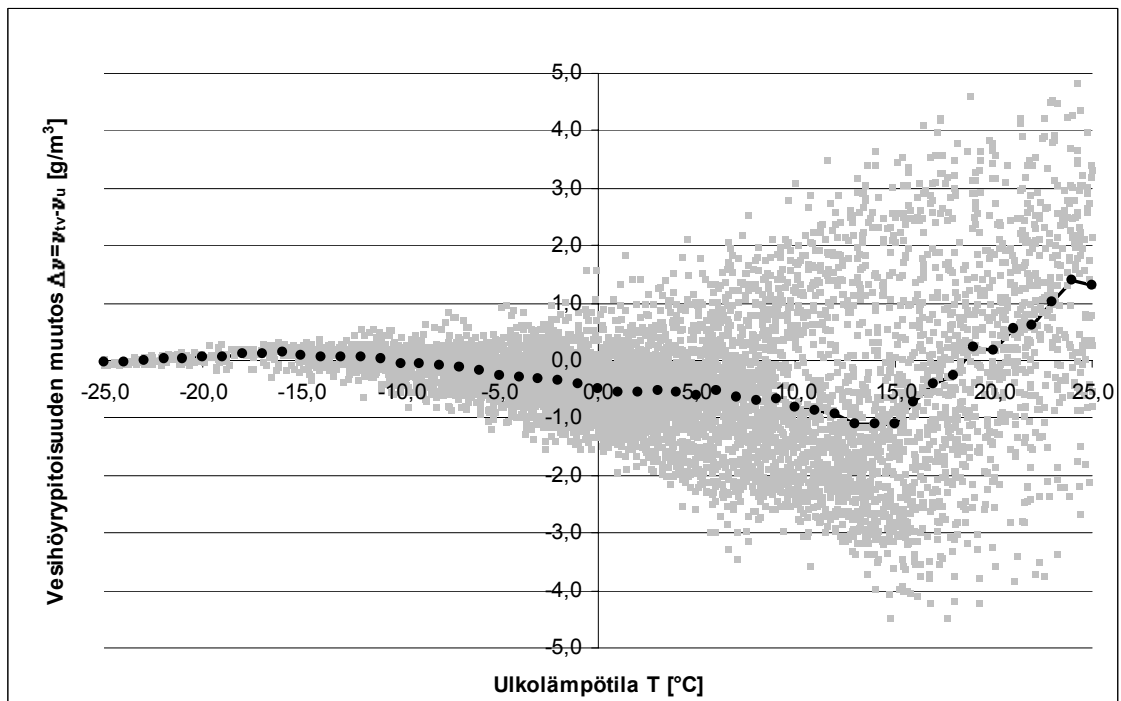
Kuva 4.9. Ulkoverhouksen ulko- ja sisäpinnan sekä tuulensuojan ulkopinnan lämpötilaero ulkoilmaan nähden. Kuvaajat on piirretty 24 tunnin liukuvana keskiarvona.

Kuvassa 4.10 on esitetty tuuletusvälin lämpötilan muutokset ulkolämpötilaan nähden eri ulkolämpötilan arvoilla yksittäisinä pisteinä sekä lisäksi näistä mittaustuloksista laskettu

keskiarvokäyrä. Kuvassa 4.11 on esitetty tuuletusvälin vesihöyrypitoisuuden muutos ulkolämpötilan funktiona vastaavalla tavalla.



Kuva 4.10. Tuuletusvälin lämpötilan muutokset ulkolämpötilaan nähden ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 4.11. Tuuletusvälin vesihöyrypitoisuuden muutokset ulkoilman vesihöyrypitoisuuteen nähden ulkolämpötilan funktiona.

Kuvasta 4.10 nähdään, että ulkolämpötilan laskiessa lämpötilaero tuuletusvälin ja ulkoilman välillä kasvoi, kun oltiin normaalin sisälämpötilan +20 °C alapuolella. Mittaus-

tulokset osoittavat, että tuuletusraon lämpötila oli lämmityskaudella korkeampi kuin ulkoilmassa ja ero riippui lähes lineaarisesti ulkolämpötilasta. Ero johtui sekä auringonsäteilystä että sisäpuolelta johtumalla siirtyvästä lämpövirrasta.

Tuuletusvälin ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet olivat sen sijaan samalla tasolla riippumatta ulkoilman lämpötilasta (kuva 4.11). Näin ollen voidaan todeta, että tuuletusväliässä tapahtuva ilmapvirtaus pystyi poistamaan sisältä ja ulkoa tulevan kosteuden ja kuivattamaan rakennetta hyvin.

Edellä olevat kuvat osoittavat, että tuuletusväli parantaa rakenteen lämmöneristystä ja kuivumiskykyä. Näiden lisäksi se alentaa merkittävästi rakenteen homehtumisriskiä ja kosteuden kondensoitumisriskiä rakenteeseen, koska lämpötilan nousu alentaa tuuletusvälin ilman RH:ta ulkoilmaan nähden. Seinäpintaan kohdistuva auringon säteily parantaa tilannetta vielä entisestään. Kriittisin tilanne seinärakenteiden homehtumisen ja kosteuden kondensoitumisen kannalta on kuitenkin rakennuksen pohjoissivulla, missä auringon säteilyn merkitys on vähäinen.

Kuvissa 4.12 ja 4.13 on tarkasteltu kummankin seinärakenteen pintavastuksen muuttamista tuulensuojalevyn ulkopinnalla. Laskentaa varten on määritetty rakenteiden lämmönvastukset (R_{rak}), jotka on laskettu materiaalikerrosten lämmönjohtavuuksien ja paksuuksien avulla. Koska rakenteen läpi menevä lämpövirta on sama sisältä ulos mentäessä, saadaan rakenteen lämmönvastuksen ja lämpötilojen avulla laskettua myös ulkopinnan pintavastus (R_u). Ulkoilman lämpötiloina laskennassa on käytetty tuuletusvälin lämpötilaa (kaava 2.2).

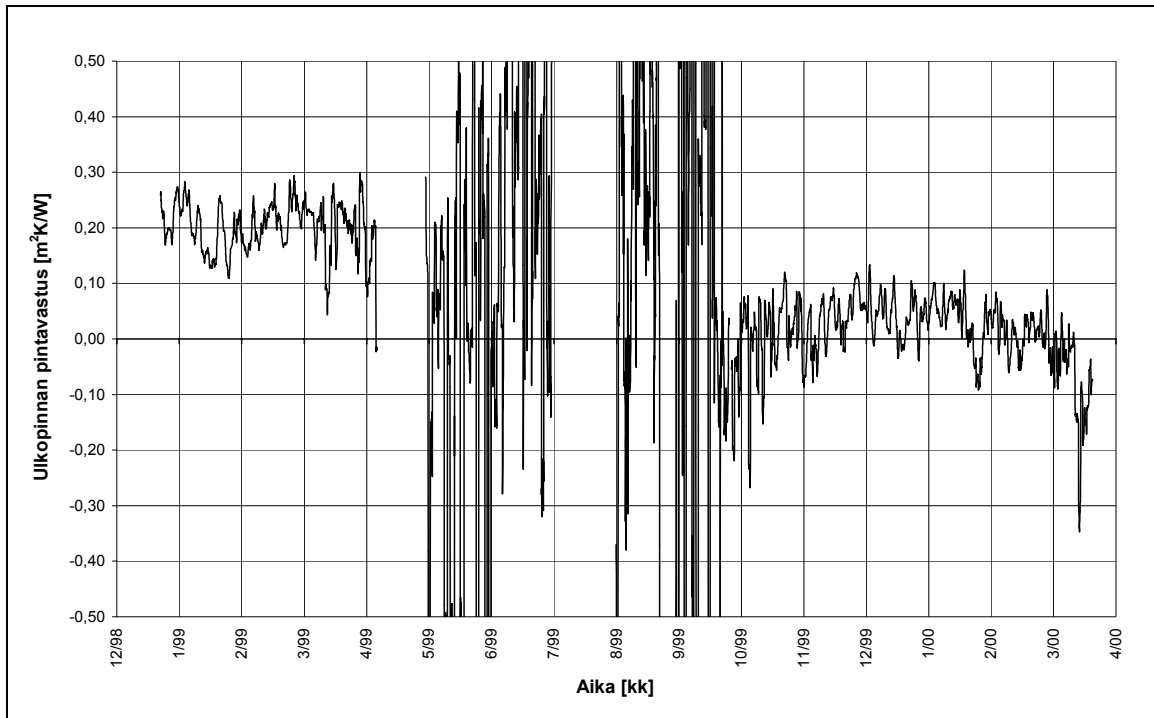
$$R_u = R_{rak} \frac{T_{up} - T_{tv}}{T_{sp} - T_{up}} \quad (2.2)$$

missä T_{up} on tuulensuojan ulkopinnan lämpötila, T_{sp} rakenteen sisäpinnan lämpötila ja T_{tv} tuuletusvälin lämpötila.

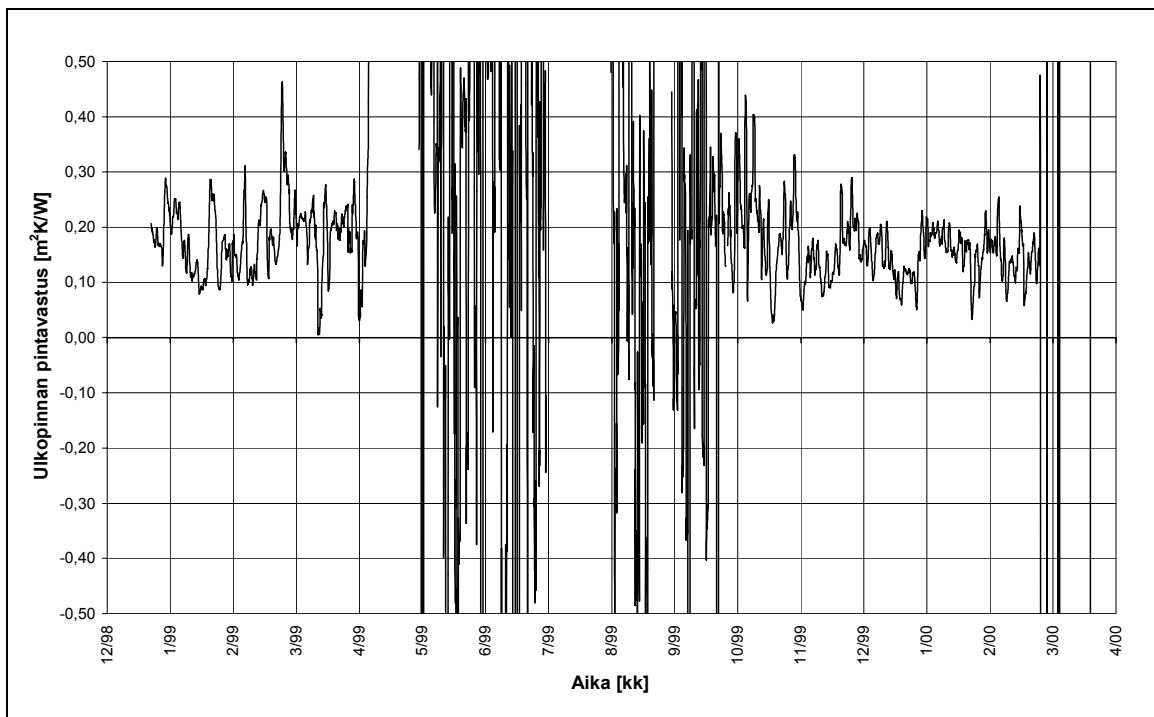
Kuvista nähdään, että tuuletusvälin pintavastus vaihtelee huomattavasti sekä vuorokausivaihtelusta että vuodenaikojen vaihtelusta johtuen. Kesällä auringon säteily muuttaa pintavastuksia niin paljon, että luotettavan arvon määrittäminen on mahdotonta.

Parhaat arviot ulkopinnan pintavastuksesta saadaan jälkimmäisen talven tuloksista, jolloin rakenteet olivat jo asettuneet normaaleihin kosteusolosuhteisiin. Mineraalivillaseinän ulkopinnan pintavastus oli tällöin keskimäärin n. $0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$. Puukuitueristeisessä seinässä ulkopinnan pintavastus oli selvästi pienempi keskiarvon ollessa n. $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Laskennan tarkkuuteen vaikuttaa sekä mitatut lämpötilat että rakenteelle arvioitu lämmönvastus, joka riippuu eniten lämmöneristeen lämmönjohtavuudesta. Ulkopin-

nan pintavastus voi myös olla jonkin verran pienempi pohjoisseinällä, jossa auringon säteilyn merkitys on pienempi kuin eteläseinällä.



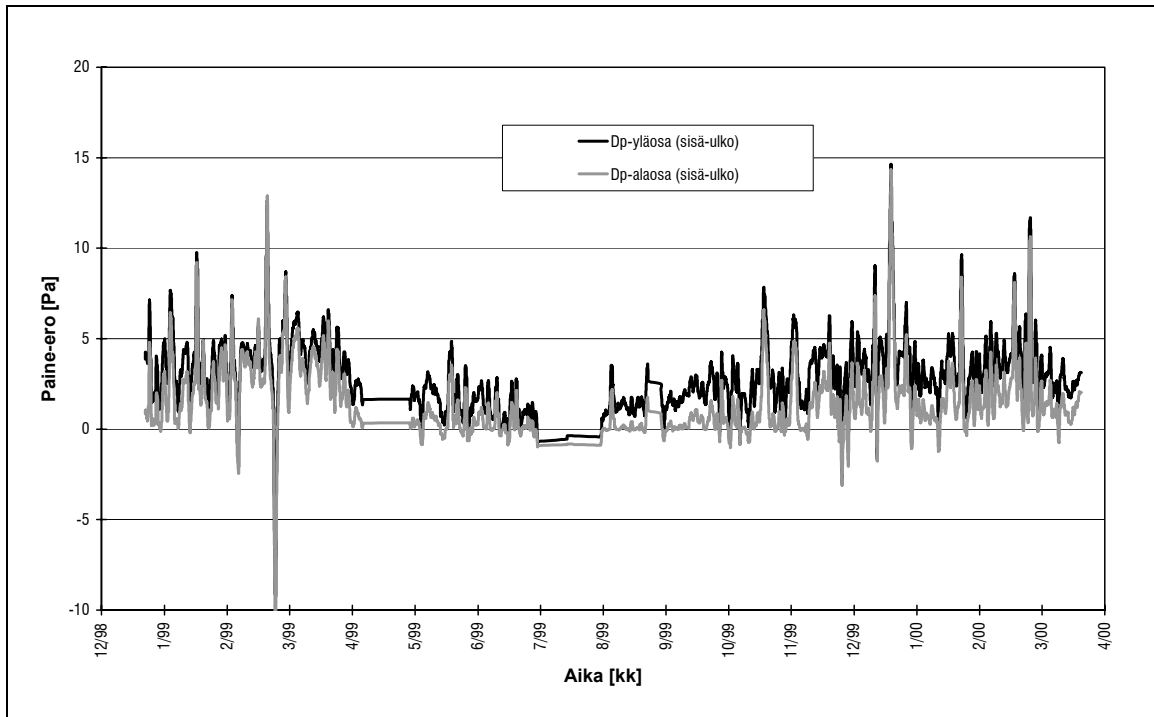
Kuva 4.12. Tuulensuojalevyn ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen puukuitueristeisessä seinässä kokeen aikana. Puukuitueristeisen rakenteen lämmönvastuksena on laskennassa käytetty arvoa $4,45 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja ulkoilman lämpötilana tuuletusvälistä mitattua lämpötilaa. Kuvaaaja on piirretty 24 tunnin liukuvana keskiarvona.



Kuva 4.13. Tuulensuojalevyn ulkopinnan pintavastuksen muuttuminen mineraalivillaeristeisessä seinässä kokeen aikana. Mineraalivillaeristeisen rakenteen lämmönvastuksena on laskennassa käytetty arvoa $4,79 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja ulkoilman lämpötilana tuuletusvälistä mitattua lämpötilaa. Kuvaaaja on piirretty 24 tunnin liukuvana keskiarvona.

4.6 Paineolosuhteet

Paine-eroa seinärakenteen yli mitattiin huoneen ylä- ja alaosasta. Kuvassa 4.14 on esitetty koko mittausjakson aikaiset paine-ero-olosuhteet. Kuvaajat esittävät paine-eroa sisä- ja ulkopuolen välillä (ylipaine sisällä on merkitty positiiviseksi).



Kuva 4.14. Mittausjakson aikana vallinneet paine-ero-olosuhteet. Kuvaajat on piirretty 24 tunnin liukuvana keskiarvona.

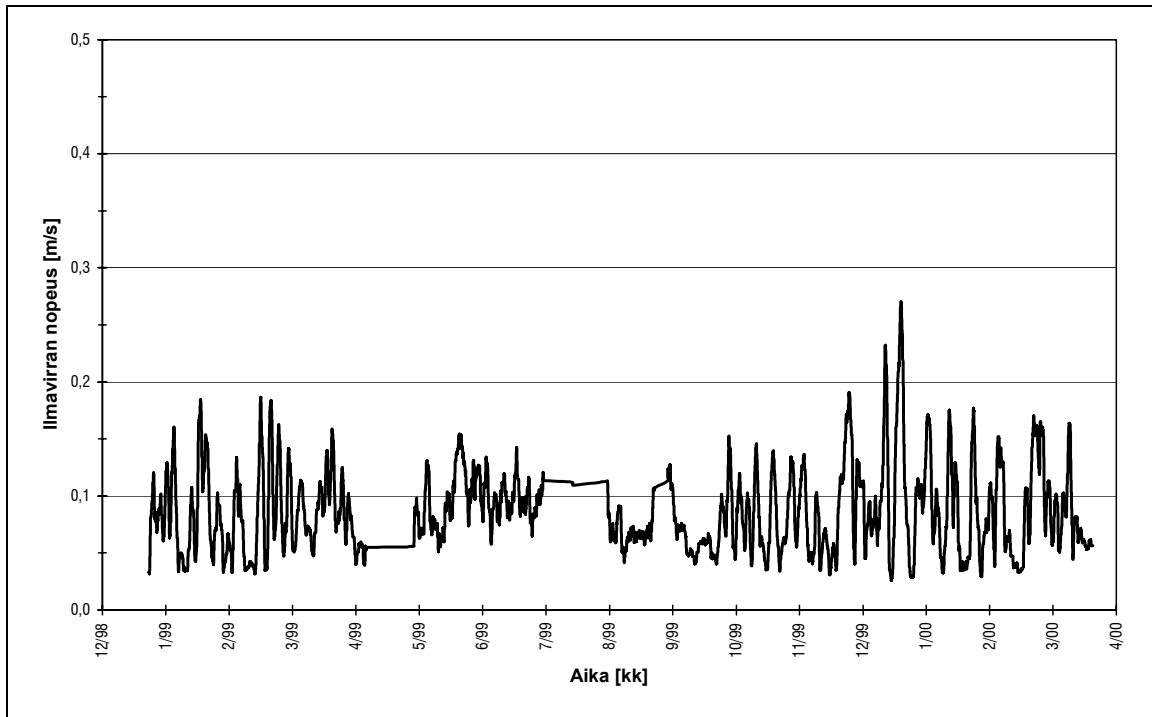
Mitattu huone oli lähes koko mittausjakson ajan ylipaineinen. Kuvan perusteella on havaittavissa myös, että huoneen yläosassa oli suurempi ylipaine kuin alaosassa. Ylipaine oli kuitenkin melko pieni lukuun ottamatta muutamia piikkejä, joita voi syntyä esim. ovien sulkemisesta, äkillisistä tuulenpaineen muutoksista, tuuletuksesta jne. Paineipiikkien kesto ja mittarien tasaantumisaika piikin jälkeen oli noin 1-1½ tuntia.

Koko mittausjakson ajalta laskettuna keskiarvona paine-ero oli huoneen yläosassa 3,0 Pa ja alaosassa 1,6 Pa. Yläosassa oli siis 1,4 Pa enemmän ylipainetta kuin alaosassa. Paine-ero vaihteli vuodenaikojen mukaan siten, että ylipaine oli suurimmillaan talvella (lämmityskaudella) ja pienimmillään kesällä. Ylipaine oli suurimmillaan silloin, kun myös kosteuslisä sisällä oli suurimmillaan.

Rakennuksen tulisi olla lievästi alipaineinen ulkoilmaan nähden, jotta sisäilman kosteus ei siirtyisi rakenteisiin konvektion avulla. Koetalon makuuhuoneessa tilanne oli kuitenkin päinvastainen. Tutkituissa rakennesektoreissa ei kuitenkaan havaittu konvektion aiheuttamaa kosteuden kondensoitumista rakenteisiin, joten se osoitti ilmansulkujen olleen riittävän tiiviitä ainakin näissä kohdissa.

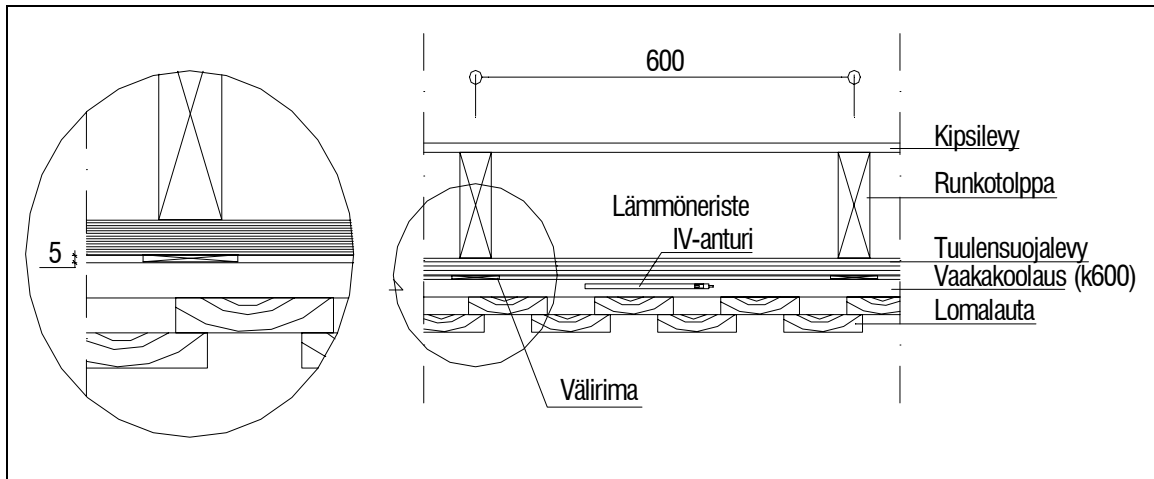
4.7 Ilmavirran nopeus tuuletusraossa

Tuuletusvälistä mitattiin ilmavirran nopeutta kahdella anturilla. Kuvassa 4.15 on esitetty ilmavirran nopeus näiden anturien keskiarvona. Koko mittausjakson keskiarvo on noin 0,1 m/s.



Kuva 4.15. Ilmavirran nopeus tuuletusraossa mittausjakson aikana. Kuvaajat on piirretty kahden anturin 24 tunnin liukuvana keskiarvona.

Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä oli melko pieni ja yhtenä syynä tähän oli tuuletusvälin rakenne (kuva 4.16). Vaakakoolauspuita oli 600 mm välein lomalautojen kiinnitystä varten. Niiden alla on käytetty noin 5 mm vahvaa rimaa, jotta pystysuora ilmavirtaus olisi mahdollinen (samalla rima myös tiivistää tuulensuojalevyjen väliset pystysaumot). Todellisuudessa rima oli kuitenkin painunut naulauskohdistaan tuulensuojalevyn sisään siten, että rako oli pienentynyt. Näin ollen vaakakoolauspuu toimi ilmavirtauksen kannalta 'esteenä' tuuletusvälissä. Pystysuoraa ilmavirtausta tapahtui kuitenkin lomalautojen väliin jäävien aukkojen kautta. Lisäksi ulkoverhouslautojen yläpäässä ilmankiertoa varten jätetty rako oli melko pieni. Anturit olivat noin 1 cm etäisyydellä tuulensuojalevystä.



Kuva 4.16. Ilmanvirtausanturien sijoitus tuuletusväliin.

4.8 Rakennenäytteistä mitatut kosteuspitoisuudet

Rakennenäytteistä mitattuja kosteuspitoisuuksia on esitetty taulukossa 4.1. On huomattava, että tällaisessa kohteessa näytteiden otto on melko altista virheille. Virheitä aiheuttavat ulkoilmaolosuhteet, näytteen ottoon kuluva aika, näytekappaleen porauksen kiihittävä vaikutus jne. Tuloksia voidaan tarkastella kuitenkin suuntaa antavina.

Taulukko 4.1. Rakennenäytteistä mitatut kosteuspitoisuudet (paino-%).

NÄYTTEEN- OTTOPÄIVÄ	MINERAALIVILLA (sektori 1)				PUUKUITU (sektori 2)			
	YLÄOSA		ALAOSA		YLÄOSA		ALAOSA	
	Tuulen- suoja	Eriste	Tuulen- suoja	Eriste	Tuulen- suoja	Eriste	Tuulen- suoja	Eriste
16.11.1998	19,5	1,3	19	1,2	19,0	19,0	20,0	20,1
07.04.1999	16,0	1,0	16,4	1,0	14,1	11,8	16,4	14,1
12.08.1999	12,0	0,7	11,8	0,7	12,2	12,0	12,2	11,9
25.11.1999	13,7	0,8	13,7	0,9	13,4	11,7	15,0	11,3
30.03.2000	13,3	0,8	13,5	0,8	13,6	12,5	13,5	12,6

Mittauksen alussa kosteudet ovat melko korkeat. Rakenteissa oli vielä rakennusaikaista kosteutta, erityisesti mitatuissa sektoreissa, koska sisäpuolen bitumipaperi oli pois anturien asennuksen vuoksi. Tuulensuojalevy on selvästi tasoittumassa molemmissa sektoreissa välille 12 –15 paino-% ja puukuitueriste puolestaan tasolle 11 – 13 paino-%. Mineraalivillojen tasapainokosteudet olivat pieniä, koska materiaali ei ole hygroskooppinen. Mineraalivillan kosteuspitoisuuksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomattava, että kosteuspitoisuuksien suhde mittausepävarmuuteen on suuri.

Anturien poisottamisen yhteydessä havaittiin puukuitueristeen laskeutuneen noin 50 mm. Muualta kuin mittaussektorista tilannetta ei tarkastettu. Syynä tähän on luultavimmin eristeen tasapainokosteuden muutoksista johtuvat muodonmuutokset (vrt. puun turpoaminen). Näytteenoton yhteydessä ei havaittu kosteuden kondensoitumista tuulensuojalevyn sisäpintaan kummassakaan seinärakenteessa.

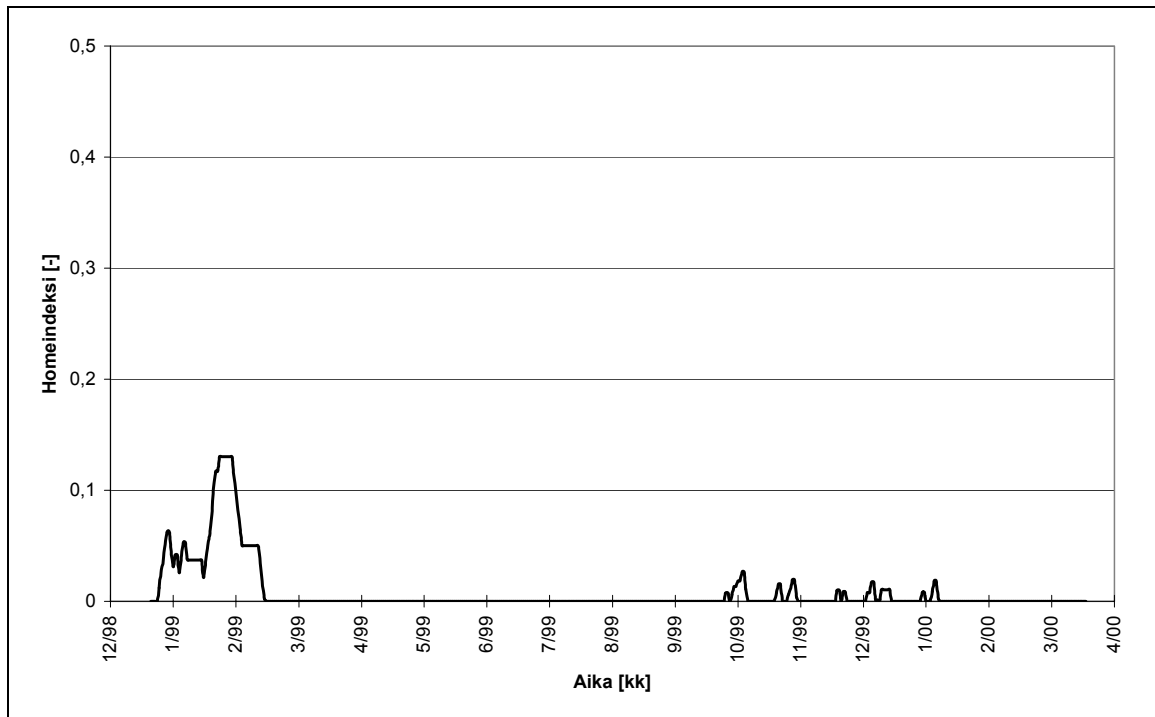
4.9 Seinärakenteiden homeriskitarkastelu

Tässä yhteydessä esitetyt homeriskitarkastelut perustuvat lähteissä /2/ ja /5/ esitettyihin kaavoihin ja raja-arvoihin. Laskentamallissa käytettävät homeen kasvun mahdollistavat kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden raja-arvot lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 2.2. Homeen kasvua voidaan kuvata ns. homeindeksillä M (0-6) (taulukko 4.2). Indeksissä huomioidaan homehduttavien olosuhteiden kesto ja vastaavasti kuivan ajan vaikutus ($RH < RH_{crit}$). Kuiva jakso vaikuttaa homehtumisen alkamiseen hidastavasti ja homehtumisaste pienenee kuivana kautena.

Taulukko 4.2. Homeriskitarkasteluissa käytetty homeindeksi (M) /3/.

HOMEINDEKSI	HAVAITU 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 tutkittavasta alasta
5	Runsas silmin havaittava kasvu	> 50 % peitto tutkittavasta alasta
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Tutkituissa rakenteissa homeen kasvulle suotuisat olosuhteet ylitettiin merkittävämmiin ainoastaan puukuitueristeen ulko-osassa seinän yläosassa. Tässäkään tapauksessa homeindeksin arvo ei noussut yli 1, joten rakenteessa ei ollut homeenkasvua mittausaikana (kuva 4.17). Mineraalivillarakenteessa ja puukuitueristeen alaosassa homeindeksi ei käytännöllisesti katsoen noussut lainkaan.



Kuva 4.17. Homeindeksin kehittyminen puukuitueristeen ulkopinnassa seinän yläosassa. Homeindeksi on laskettu mittaustuloksista käyttäen vuorokauden lämpötila- ja RH -keskiarvoja.

Ajallisesti tarkasteltuna lämmöneristeen ulko-osassa suhteellinen kosteus oli sektorin 2 (puukuitueriste + bitumipaperi) yläosassa kriittisen homerajan yläpuolella (RH_{crit}) mittausjakson aikana yhteensä 40 vrk, kun ko. aika sektorissa 1 (mineraalivilla + höyrynsulkumuovi) vastaavassa kohdassa oli $< \frac{1}{2}$ vrk. Edellä mainittu 40 vrk jakautuu osiin seuraavasti: 17 vrk aikavälille 21.12.1999 – 31.05.1999 ja 23 vrk 01.-06.1999 – 30.03.2000. Ensin mainitulla aikavälillä rakenteissa oli rakennusaikaista kosteutta.

Ulkoilman olosuhteet olivat mittausjakson aikana homehduttavat yhteensä 62 vrk ajan. Sen sijaan tuuletusvälin ilman olosuhteet olivat homeen kasvulle suotuisat ainoastaan n. 20 vrk ajan. Nämä ajat kuvaavat hyvin tuuletusvälin vaikutusta rakenteen homehtumisriskin vähentämisessä, mikä todettiin aiemmin myös luvussa 4.5.

Eri seinärakenteiden homehtumisriskiä tarkasteltaessa on muistettava, että rasittavin tilanne rakenteen toiminnan kannalta on rakennuksen pohjoissivulla, missä auringon säteily ei vaikuta oleellisesti olosuhteisiin. Ulkoilman olosuhteet vaihtelevat myös vuosittain, jolloin laskentatarkastelu on tehtävä kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisissä ulkoilman olosuhteissa. Luonnollisesti myös sisäilman kosteuslisä vaikuttaa lopputulokseen.

4.10 Mittaustulosten vertailu laboriokoe tuloksiin

Laboriokokeiden periaate

Suurelementeissä käytettyä rakennetta, levymäinen puukuitueriste ja bitumipaperi, on testattu myös laboriokokeissa TTY:n uudella rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla /8/. Laboriokoe tulosten tarkempi käsittely tälle seinärakenteelle on esitetty läheteessä /8/ (koeseinät 1 ja 2). Peruserona kenttämittauksen ja laboriokokeiden välillä oli se, että laboratoriossa pyrittiin saavuttamaan stationääritila, jota harvoin käytännön olosuhteissa saavutetaan.

Laboriokokeet tehtiin talviolosuhteissa. Olosuhteiden tavoitearvot olivat:

- lämpötila sisällä +20 °C
- suhteellinen kosteus sisällä 50 % (RH)
- lämpötila ulkona -10 °C
- suhteellinen kosteus ulkona 90 % (RH)

Seinärakenteita tutkittiin kolmessa erilaisessa paine-erotilanteessa. Ensimmäisessä jaksossa paine-ero rakenteen yli oli -10 Pa (sisällä alipaine), toisessa jaksossa 0 Pa ja kolmannessa jaksossa +10 Pa (sisällä ylipaine). Kunkin paine-erojakson pituus oli n. 9 vrk, jolloin kokonaiskoeaika oli n. 27 vrk.

Laboratoriossa tehtiin kaksi rakennekoetta, jotka vastasivat materiaalivalinnoiltaan koetalossa käytettyä puukuitueristeistä seinärakennetta (huokoinen kuitulevy, puukuitueriste ja bitumipaperi). Erona näissä kokeissa oli materiaalien (lämmöneristeiden ja tuulensuojalevyjen) lähtökosteudet. Tuulensuojan ja lämmöneristeen säilytysolosuhteet ennen koetta olivat 35 % (RH) ja 85 % (RH). Lähteen /8/ kokeissa ei testattu koetalossa vertailuna käytettyä seinärakennetta (huokoinen kuitulevy, mineraalivilla ja höyrinsulkumuovi).

Laboratoriokokeiden tulokset

Tässä yhteydessä laboratoriokokeista on koottu taulukkoon 4.2 vain ne arvot, jotka ovat mielenkiintoisia mittaustulosten kannalta. Mittaustuloksista vertailuksi on otettu tammi-kuun 2000 keskiarvot, jotka ovat olosuhteiltaan parhaiten vertailukelpoisia. Tällöin koetalon rakenteessa ei ollut enää myöskään ylimääräistä rakennekosteutta jäljellä.

Taulukko 4.3. Laboratoriokokeiden tuloksia (paine-erottomista tilanteista) /8/ verrattuna koetalon mittaustuloksiin. Rakenteena on käytetty yhdistelmä: huokoinen kuitulevy (25 mm), puukuitueriste (150 mm) ja bitumipaperi.

	KOESINÄ 1 alkutilanne 35 % (RH)	KOESINÄ 2 alkutilanne 85 % (RH)	MITTAUS 01/00
T sisäilma [°C]	20,0	20,0	22,3
RH sisäilma [%]	50	51	39
T ulkoilma [°C]	-10,0	-9,9	-2,3
RH ulkoilma [%]	90,0	90,0	87
T tuuletusväli [°C]	-8,8	-9,1	-1,5
RH tuuletusväli [%]	82	82	77
T tuulensuojan pinta [°C]	-8,5	-7,8	-1,1
v sisäilma [g/m³]	8,6	8,8	7,7
v ulkoilma [g/m³]	2,0	2,0	3,8
v tuuletusväli [g/m³]	2,0	2,0	3,6
RH eristetilan ulko-osa [%]	82	92	72/80 (ala-/yläosa)
T eristetilan ulko-osa [°C]	-3,0	-4,0	1,7/2,2 (ala-/yläosa)
v eristetilan ulko-osa [g/m³]	3,2	3,3	4,1/4,8 (ala-/yläosa)
r tuuletusväli [m/s]	0,19	0,07	0,1

Koeseinä 1 ei ehtinyt saavuttaa stationääritilaa koeaikana eikä siihen myöskään kondensoitunut kosteutta kokeen kuluessa. Kokeen alkuosan perusteella voitiin kuitenkin esittää arvio, että eristetilan ulko-osan RH on n. 87 % stationääritilanteessa. Koeseinä 2 tuulensuojalevyn sisäpintaan kondensoitui ja jäätty vettä kokeen aikana. Kondensoituminen alkoi n. 3 vrk:n kokeen aloittamisesta. Tämä johtui lämmöneristeen ja tuulensuojan korkeammasta alkukosteudesta. Koetalon seinärakenteen kosteuspuitoisuudet olivat alkutilanteessa laboratoriokokeissa tutkittujen rakenteiden välissä.

Laboratoriokokeissa sisäilman kosteuslisä ($6,6 \text{ g/m}^3$) oli huomattavasti suurempi kuin koetalossa ($3,8 \text{ g/m}^3$). Tämän perusteella diffuusiolla rakenteeseen siirtyvä kosteus määrä oli lähes kaksinkertainen laboratoriokokeissa.

Eristetilan ulko-osan suhteelliset kosteudet olivat koetalossa noin 10 RH % pienempiä kuin laboratoriokokeissa saaduissa tuloksissa. Vastaavasti lämpötila oli ko. aikana korkeampi koetalon seinän ulko-osassa. Koetalossa eristetilan huokosilman vesihöyrypitoisuudet olivat suurempia kuin laboratoriokokeissa mitatut arvot. Tämä johtui siitä, että vesihöyrypitoisuuden arvot olivat myös ulkoilmassa korkeampia. Ilmavirtauksen nopeus tuuletusraossa oli lähes samalla tasolla koetalossa ja laboratoriokokeissa.

Laboratoriokoetulokset osoittavat, että kosteutta läpäisevän seinärakenteen toiminta heikkenee, mikäli sisä- ja ulkoilman aiheuttama kosteusrasitus kasvaa rakenteessa.

4.11 Laskennallinen tarkastelu

Koetulosten laskennallisen mallinnuksen tavoitteena oli tarkastella, kuinka hyvin laskentatulokset vastaavat koetuloksia. Mallinnusta tehtiin WUFI 2D V2.1 ja 1D-HAM 2.0 laskentaohjelmilla. Laskentaa varten mitattiin myös materiaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa (liite V). 1D-HAM ohjelmaa varten annettiin vakioarvot vesihöyrynläpäisevyydelle/ -vastukselle ja lämmönjoh-tavuudelle, koska ohjelmaan ei voida syöttää muuttuvia arvoja. 1D-HAM ohjelmassa myös tasapainokosteuskäyrä annettiin kolmen lineaarisen suoran avulla.

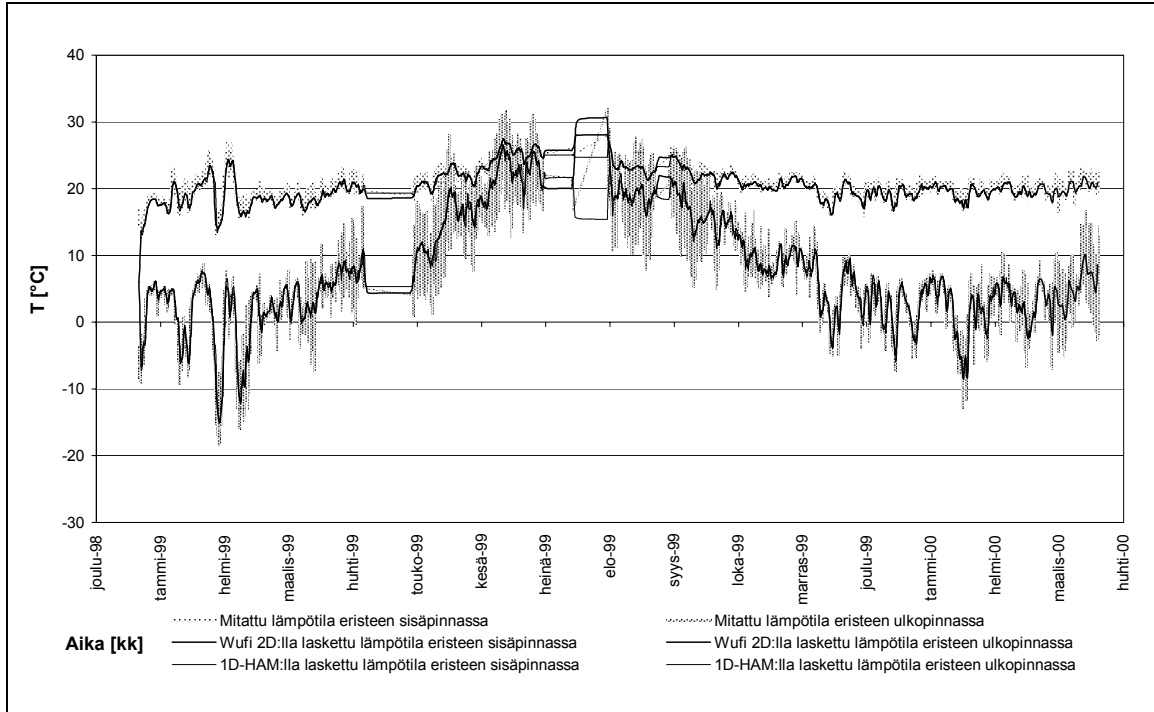
Laskennassa käytettiin rakenteen sisäpinnan ja tuulensuojan ulkopinnan lämpötila- ja RH -arvoja, jolloin rakenteen pintavastukset voitiin asettaa nolliksi. Tällä tavalla eliminoitiin pintavastusten vaihteluiden aiheuttamia virheitä (ks. kuvat 4.12 ja 4.13). Sisä- ja ulkopinnan lämpötiloina käytettiin mitattuja arvoja ja RH -arvoina sisäilmasta ja tuuletusvälistä mitattujen RH -arvojen perusteella laskettuja arvoja. Pintojen suhteellinen kosteus saatiin, kun pintojen läheltä mitatut ilman vesihöyrypitoisuudet muutettiin pintalämpötiloja vastaaviksi RH -arvoiksi. Laskennan lähtötietoina käytettiin mitattujen arvojen tunnin keskiarvoja, joista laskettiin vuorokauden laskennalliset keskiarvot. Kuvissa 4.18 - 4.21 on esitetty laskenta- ja mittaustulokset lämmöneristeen sisä- ja ulkopinnan lämpötiloista ja suhteellisista kosteuksista.

Rakenteen ulko-osan materiaaleille annettiin laskennan alussa korkeammat kosteuspi-toisuudet, jotta ne vastasivat paremmin todellista alkutilannetta. Tästä syystä myös lämmöneristekerros jaettiin laskennassa kahteen yhtä paksuun osaan. Lähtötilanteessa materiaalien kosteuspi-toisuudet vastasivat seuraavia ilman suhteellisen kosteuden arvoja:

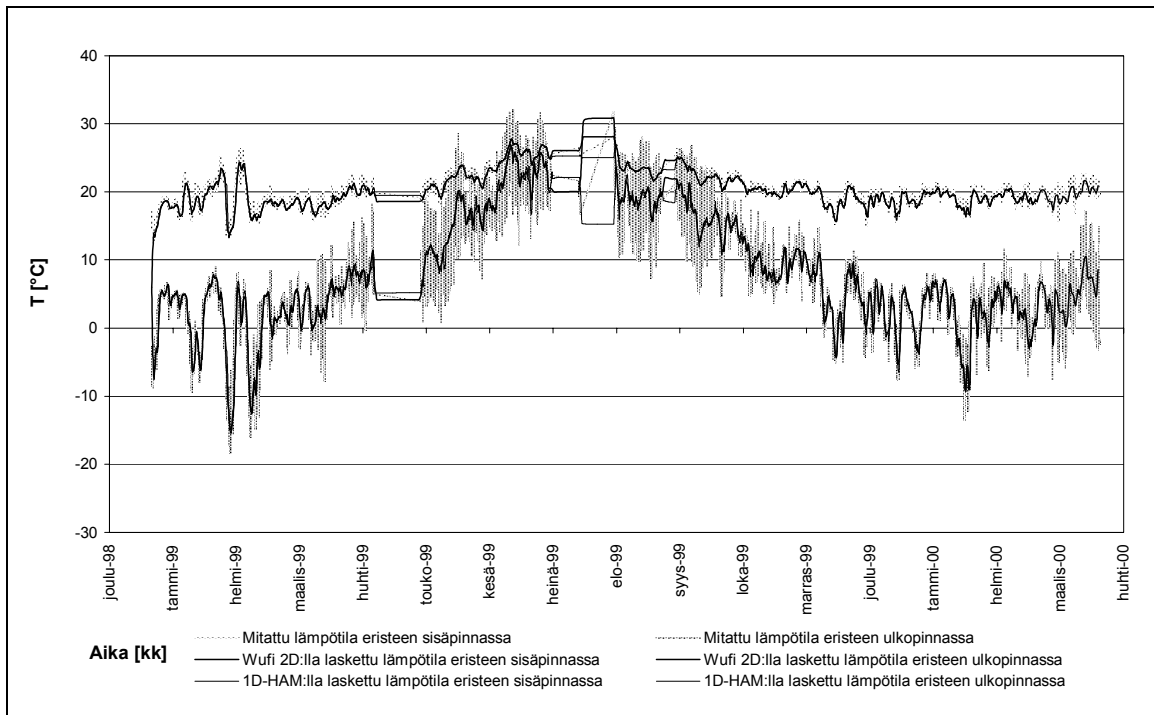
- kipsilevy

47 RH %

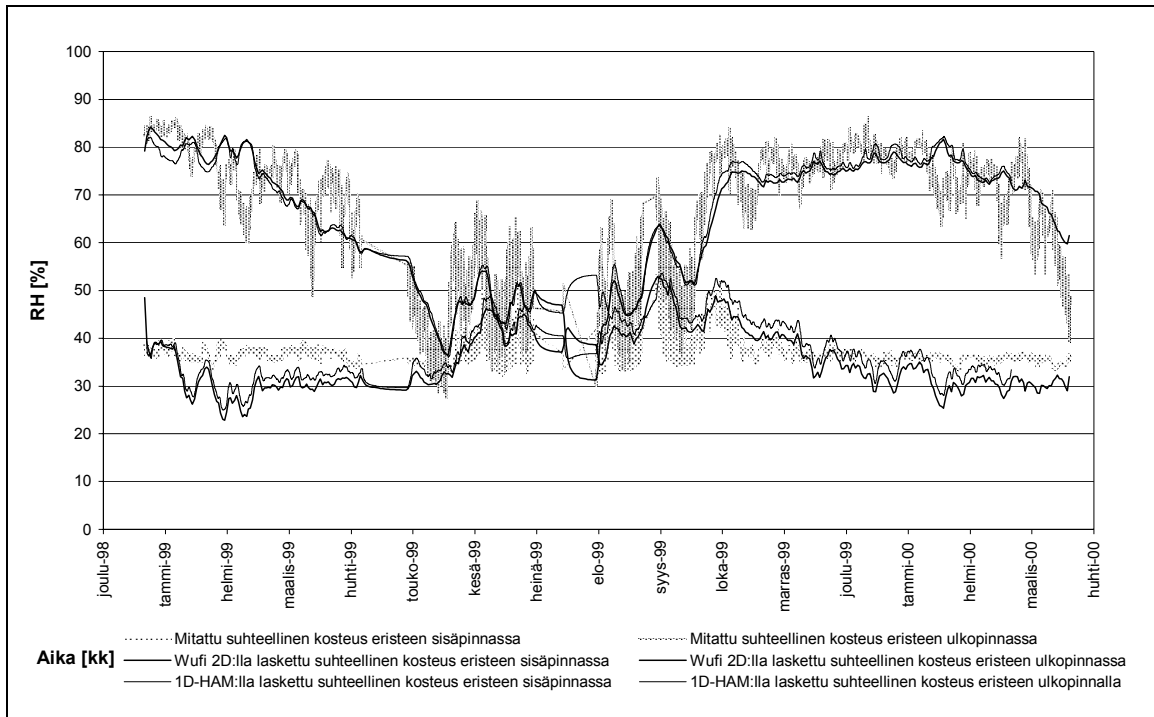
- mineraalivilla ja puukuitueriste, sisäosa 47 RH %
- mineraalivilla ja puukuitueriste, ulko-osa 79 RH %
- huokoinen kuitulevy 79 RH %
- puurunko 73 RH %



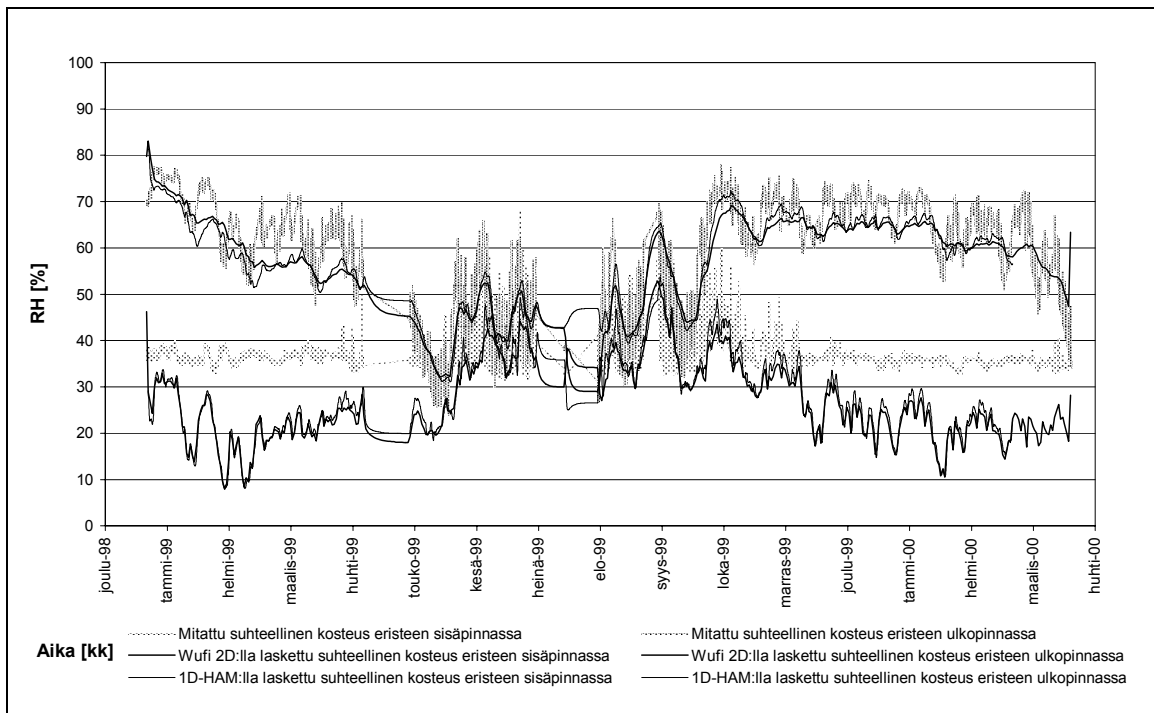
Kuva 4.18. Lämpötila puukuitueristeen ulko- ja sisäpinnassa, mitattu ja laskennallinen tilanne. Mitatut arvot ovat tunnin keskiarvoja ja lasketut arvot vuorokauden keskiarvoja.



Kuva 4.19. Lämpötila mineraalivillaeristeen ulko- ja sisäpinnassa, mitattu ja laskennallinen tilanne. Mitatut arvot ovat tunnin keskiarvoja ja lasketut arvot vuorokauden keskiarvoja.



Kuva 4.20. Suhteellinen kosteus puukuitueristeen ulko- ja sisäpinnassa, mitattu ja laskennallinen tilanne. Mitatut arvot ovat tunnin keskiarvoja ja lasketut arvot vuorokauden keskiarvoja.



Kuva 4.21. Suhteellinen kosteus mineraalivillaeristeen ulko- ja sisäpinnassa, mitattu ja laskennallinen tilanne. Mitatut arvot ovat tunnin keskiarvoja ja lasketut arvot vuorokauden keskiarvoja.

Lämpötilojen osalta laskenta- ja mittaustulokset vastasivat hyvin toisiaan. Myös ulkopinnan laskennalliset RH -arvot vastasivat melko hyvin koetuloksia. Eroja syntyi eniten mittauksen alkuvaiheessa, mikä saattoi osittain johtua siitä, että laskennassa käytetyt rakennusmateriaalien alkukosteudet eivät kaikin osin vastanneet todellisen tilanteen mukaisia arvoja. Rakenteen sisällä ja rakenteen läpi tapahtuvilla konvektiovirtauksilla voi myös olla vaikutusta mittaus- ja koetulosten välisiin eroihin.

Suurimmat erot laskennan ja koetulosten välillä olivat eristetilan sisäpuolen RH luke-
missa. Syynä tähän oli ilmeisesti sisäpuolen mittauksissa käytetty toisenlainen kosteus-
anturityyppi, jonka suojuus oli niin tiivis, että anturi ei riittävässä määrin reagoanut RH:n
muutoksiin rakenteen sisällä. Suhteellisen kosteuden mittaustuloksia tarkasteltaessa on
myös muistettava, että RH –anturien mittauserävarmuus rakenteiden ulko-osissa oli 2 –
3 RH % ja sisäosissa 5 RH % (ks. luku 2.6).

Mittaus- ja laskentatuloksia vertailemalla voidaan myös todeta, että lämmöneristeiden
huokosilman suhteelliset kosteudet muuttuivat laskennassa hitaammin kuin todellisuus-
dessa. Tämä ilmiö oli nähtävissä varsinkin puukuitueristeisessä seinärakenteessa. Ero
johtunee suurelta osin ohjelmien toiminnasta, koska laskennallisesti on hankalampaa
seurata hyvin nopeasti tapahtuvia olosuhteiden muutoksia. Hetkittäisiä eroja syntyy li-
säksi siitä, että mittaustulokset ovat tunnin välein laskettuja keskiarvoja ja laskentatu-
lokset vuorokauden välein laskettuja keskiarvoja.

WUFI 2D ja 1D-HAM ohjelmien välillä ei ollut laskentatuloksissa merkittävää eroa.
Lämpötilojen osalta ei havaittu eroja juuri lainkaan. Suhteellisen kosteudenkin erot oli-
vat suurimmillaan ainoastaan n. 2 - 3 RH %. Mineraalivillaseinässä RH –prosenttien
erot olivat hieman suurempia kuin puukuitueristeseinässä. 1D-HAM ohjelmaan hieman
epätarkemmin annetut materiaaliominaisuudetkaan eivät vaikuttaneet lopputulokseen
merkittävästi ainakaan näissä rakenteissa.

Mittaus- ja laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että laskenta- ja koetulokset vas-
taavat riittävän hyvin toisiaan ja WUFI 2D ja 1D-HAM -ohjelmia voidaan käyttää ra-
kenteiden kosteusteknisen toiminnan vuosittaiseen arvioimiseen.

5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

5.1 Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden merkitys

Suomessa ilmasto vaihtuu huomattavasti siirryttäessä etelästä pohjoiseen tai lännestä itään. Lieto sijaitsee Lounais-Suomessa, jossa talvet ovat leudompia kuin sisämaassa. Korkeammista ulkolämpötiloista johtuen seinärakenteen kondensoitumisriski pienenee talvella. Toisaalta pidemmät kosteiden ja lämpimien olosuhteiden vaikutusajat luovat ajoittain homeen kasvulle otollisemmat olosuhteet. Lisäksi meren läheisyys lisää myös tuulen voimakkuutta ja viistosateiden määrää. Nämä lisäävät ulkoseinän kosteusrasitusta, joten ulkoverhouksen ja tuuletusvälin toiminta korostuu. Koetalossa ulkoverhouksen ja tuuletusvälin toiminnassa ei havaittu puutteita.

Koetalon rakennuspaikan sijainti oli hyvä ajatellen rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta: avoin, hyvin tuulettuva paikka mahdollisti rakenteiden nopean kuivumisen. Lisäksi auringon säteily pääsi vaikuttamaan esteettä seinien pintaan.

Teknisistä syistä johtuen kenttämittauksessa olleet anturit sijaitsivat koetalon eteläseinällä, joten mittaustuloksiksi saatiin kaikkein edullisimmat ulkoilman olosuhteet. On selvää, että varsinkin talviaikaan pohjoisseinältä mitatut lämpötilat olisivat olleet alhaisempia ja sitä kautta myös ilman suhteellinen kosteus rakenteen ulkopinnan lähellä olisi ollut korkeampi.

Mittausjaksolle sattui hyvin vähäsateinen ja kuuma kesä, mikä loi erittäin hyvät olosuhteet seinärakenteiden kuivumiselle. Mittaustuloksista voidaan päätellä rakennusaikaisen kosteuden poistuminen rakenteista kevään ja kesän 1999 aikana. Näin ollen alkuvaiheen korkeista kosteuspitoisuuksista ei aiheutunut haittaa rakenteille. Toisaalta mittausjaksolle sattui myös kylmä talviaika melkein heti valmistumisen jälkeen.

Rakennusaikaisen kosteuden kuivumiselle loi hyvät edellytykset myös se, ettei koetalossa ollut alkuvaiheessa kosteustuottoa. Seinärakenteiden kuivuminen olisi ollut hitaampaa, jos asukkaat olisivat muuttaneet heti talon valmistumisen jälkeen. Rakenteiden kuivumisen kannalta on kuitenkin suositeltavaa tehdä esim. valutyöt keväällä ja kesällä, jos se suinkin on mahdollista.

Lämmöneristeiden ulko-osissa suhteellinen kosteus nousi ylimmillään 83 %:iin puukuitueristeisessä sektorissa syksyllä 1999. Alkutalvesta 1999, kun rakennusaikaista kosteutta vielä oli rakenteissa, suhteellinen kosteus nousi em. sektorissa 89 %:iin. Höyrynsulutomassa seinärakenteessa huokosilman suhteelliset kosteudet olivat talvikaudella n. 10 – 15 RH % korkeampia eristetilan ulko-osassa kuin höyrynsulullisessa rakenteessa. Ero oli suurimmillaan talvikaudella sisäilman kosteuslisän kasvaessa, joten sisäilman koste-

uslisä vaikutti eristeen ulko-osan RH -prosenttiin höyrinsuluttomassa seinärakenteessa. Mittausjakson alussa puukuitueristeen kosteudet olivat korkeammalla tasolla myös rakennusaikaisen kosteuden vuoksi.

Syksyn 1999 lämpötila- ja RH-olosuhteet eivät olleet erityisen kriittiset homeen kasvun kannalta tarkasteltuna. Puukuitueristeen seinän yläosassa ulkopinnan suhteellinen kosteus oli homeen kasvun kannalta kriittisen alarajan yläpuolella yhteensä 23 vrk ajan. Mineraalivillaseinässä homeraja ylitettiin vain muutamana yksittäisenä hetkenä mittauksen aikana. Kummassakin rakenteessa laskennallinen homeindeksi pysyi selvästi alle 1, joten rakenteissa ei ollut homeenkasvua. Pitkät kuivat jaksot takasivat rakenteiden hyvän toiminnan syksyllä.

Anturit sijaitsivat koetalon toisessa makuuhuoneessa. Kosteissa tiloissa, keittiössä, kodinhoituhuoneissa tai niiden välittömässä läheisyydessä sisäilman kosteus voi olla korkeampi kuin mitatussa makuuhuoneessa, mutta toisaalta yöaikaan makuuhuoneen RH nousee varsinkin, jos ovea pidetään kiinni. Makuuhuoneesta mitattu sisäilman kosteusli- sä ($< 4 \text{ g/m}^3$) on jotakuinkin keskiarvoa vastaava arvo puurakenteisissa omakotitaloissa. Kosteusli- sään todellisen vaihtelun määrittäminen pientaloissa edellyttää kuitenkin laajempaa mittausotosta.

Sisäilman olosuhteissa ylipaineen maksimiarvot esiintyivät talvisaikaan, jolloin myös sisäilman kosteusli- sä oli suurimmillaan. Kosteudensiirtymismuodot, diffuusio ja konvektio, ovat näin ollen voimakkaimmillaan yhtä aikaa. Tämä korostaa rakenteen sisäpinnan ilmatiivi- yden ja riittävän vesihöyrytiivi- yden merkitystä. Pienetkin raot tai reiät ilman-/höyrinsulussa, ylipaine ja sisäilman kosteusli- sä saattavat aiheuttaa paikallisesti suuriakin kosteuskertymiä. Ainakin mittaussektoreissa ilman-/ höyrinsulkukalvojen tiivi- ydet olivat hyviä, koska edes paikallisia kondenssikohtia ei havaittu.

Samalla höyrinsuluttomalla seinärakenteella (bitumipaperi + puukuitueriste) tehdyissä laboratoriokokeissa olosuhteet olivat selvästi rasittavammat: sisäilman kosteusli- sä n. $6,6 \text{ g/m}^3$ ja ulkoilman lämpötila oli alhaisempi kuin koetalosta mitatut olosuhteet. Laboratoriokokeissa havaittiin kondenssia talviolosuhteissa jo 3 vrk:n jälkeen kosteasta alkutilanteesta (RH 85 %) lähteneessä koe-elementissä. Voidaankin sanoa, että tutkimuksessa tarkastellun höyrinsuluttoman rakenteen toimivuuden tai toimimattomuuden raja kulkee koetalon olosuhteiden ja laboratoriokoeolosuhteiden välimaastossa.

Sisä- ja ulkoilman olosuhteiden muutokset vaikuttavat vesihöyryä läpäisevän seinärakenteen toimintaan ja mittauskohteessa olosuhteiden voidaan katsoa olleen keskimääräistä suotuisimmat. Läpäisevän seinärakenteen toimintaa heikentää asukkaiden tuottaman sisäilman kosteusli- sään kasvaminen nyt mitattuihin arvoihin verrattuna. Ulkoilman olosuhteet puolestaan muuttuvat epäedullisimmiksi, mikäli rakennus sijaitsee pohjoisempana, tarkastellaan varjoisan pohjoisseinän toimintaa ja kesä ja syksy ovat sateisem-

pia kuin mittausjakson aikana. Tällöin on mahdollista, että rakenteeseen syntyy syksyllä homeen kasvulle suotuisat olosuhteet tai että tuulensuojan sisäpintaan kondensoituu kosteutta talvella.

5.2 Materiaalien ja rakenteiden merkitys

Ulkoseinärakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat olosuhteiden lisäksi käytettävät materiaalit ja rakenneratkaisut. Sisäpinnan hyvä ilmatiiviys ja riittävä vesihöyrynvastus on tullut jo aikaisemmin esille. Muovikalvo toimi koetalossa tässä suhteessa moitteettomasti. Bitumipaperinkin ilmatiiviys oli mittaussektorilla hyvä - tosin ennen kokeen alkua paperissa olleita reikiä jouduttiin paikkaamaan teipillä. Paperipohjaisten ilmansulkujen asennus onkin tehtävä erityisen huolellisesti, koska ne ovat muovikalvoa herkempiä repeytymään ja reikiintymään. Mitatuissa olosuhteissa bitumipaperin + kipsilevyn (+ paperitapetti) vesihöyrynvastuskin oli riittävä, mutta rakenne ei salli kovin suuria sisä- ja ulkoilman olosuhteiden muutoksia. Toisin sanoen höyrynsuluttoman seinärakenteen varmuus voimakkaampaa kosteusrasitusta vastaan on varsin pieni ja riski kosteusongelmien syntymiselle on suurempi. Tässä mielessä sisäpinnan vesihöyrynvastusta on syytä lisätä seinärakenteen kosteusteknisen toimivuuden takaamiseksi. Sisäpinnan tiiviyttä voidaan lisätä monella eri materiaalilla, joista muovikalvo on yksi vaihtoehto.

Suomen rakentamismääräyksissä annetaan kaksi ohjetta rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastukselle. RakMk osassa C2 todetaan, että avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen /5/. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeissa (RIL 107) mainitaan, että mikäli laskelmin tai muilla selvityksillä ei tarkemmin muuta osoiteta, tulee höyrynsulun vesihöyrynvastuksen normaalihuonetiloissa olla vähintään $15 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ /4/.

TTY:n materiaalikoikeissa mitattujen vesihöyrynvastusten perusteella (ks. liite V) saadaan puukuitueristeisen seinärakenteen sisä- ja ulkopinnan väliseksi vesihöyrynvastussuhteeksi n. 3,3:1 ja sisäpinnan vesihöyrynvastukseksi n. $2,0 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$. Mineraalivillaeristeiselle seinärakenteelle vastussuhteeksi saadaan 760:1 ja sisäpinnan vastukseksi n. $450 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$. Laskelmissa ei ole otettu sisäpinnoitteen vesihöyrynvastusta huomioon, mutta tutkituissa rakenteissa sen merkitys ei ole suuri, koska pinnoitteena käytettiin paperitapettia. Tämän perusteella voidaan todeta, että tutkimuksessa mitattu puukuitueristeinen seinärakenne ei täyttänyt rakentamismääräyksissä annettuja ohjeita sisäpinnan vesihöyrynvastuksen osalta.

Mikäli rakenteen sisäpinta tehdään riittävän tiiviiksi, lämmöneristeenä voidaan käyttää sekä puukuitueristettä että mineraalivillaa. Lämmöneristeiden kosteustekninen toiminta eroaa toisistaan siten, että puukuitueriste sitoo kosteutta huomattavasti enemmän kuin

mineraalivilla. Tästä syystä myös puukuitueristeen kostuminen ja kuivuminen kulloinkin vallitsevaan tasapainokosteustilanteeseen kestää pidempään kuin mineraalivillalla. Koetalon seinissä oli kuitenkin nähtävissä, että tuulensuojalevyn takana RH –prosentit vaihtelivat vuorokauden aikana samassa syklissä ja lähes yhtä paljon kummallakin eristetyypillä. Toisin sanoen puukuitueriste ei merkittävästi tasannut RH –prosentin vaihteluita mineraalivillaan verrattuna rakenteen ulkopinnassa. Tämä johtui siitä, että RH –prosentin vaihtelu aiheutui vuorokausisyklissä lähinnä lämpötilan muutoksesta eikä puukuitueristeen kosteuspitoisuus ehtinyt vaikuttaa huokosilman suhteellisen kosteuden muutosnopeuteen merkittävästi.

Avohuokoisella lämmöneristeellä eristetyssä seinärakenteessa kosteusteknisesti kriittisin kohta on tuulensuojalevyn sisäpinnassa. Tuulensuojan sisäpinnan olosuhteita voidaan parantaa mm. nostamalla lämpötilaa tuulensuojan takana. Tämä saadaan aikaan tuuletusraon lisäksi joko lämmöneristekerrosta ohentamalla tai tuulensuojan lämmönvastusta lisäämällä. Nykyiset energiansäästövaatimukset pyrkivät kuitenkin käytännössä paksuntamaan lämmöneristekerrosta, jolloin vaihtoehdoksi jää tuulensuojan lämmöneristävyysparantaminen. Koetalon seinärakenteissa käytettiin tuulensuojana paksua 25 mm huokoista kuitulevyä, joka parantaa rakenteen toimintaa esim. ohuempaan 12 mm kuitulevyyn tai 9 mm kipsilevyyn verrattuna. Toisaalta esim. 30 mm mineraalivillalevyllä saadaan aikaan vieläkin parempi tuulensuojakerroksen lämmöneristävyys.

Varsinkin kosteutta läpäisevissä rakenteissa tuulensuojan sisäpinnan suhteelliseen kosteuteen vaikuttaa myös mm. tuulensuojalevyn vesihöyrynläpäisevyys. Mitä läpäisevämpi tuulensuoja on sitä alhaisempi on suhteellinen kosteus tuulensuojan sisäpinnassa.

Tuulensuojalevyn ulkopinnan pintavastus vaihtelee huomattavasti vuorokauden ja vuodenaikojen mukaan. Tehdyt mittaukset ja laskelmat osoittavat, että jos rakenteen toimintaa tarkastellaan tuuletusvälin lämpötila- ja RH-olosuhteilla, tuulensuojan ulkopinnan pintavastuksena voidaan käyttää samaa arvoa kuin varsinaisella ulkopinnallakin eli $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Rakenteen ulkoverhouksen takana oleva tuuletusväli parantaa rakenteen lämmöneristystä ja kuivumiskykyä. Lisäksi se alentaa merkittävästi rakenteen homehtumisriskiä ja kosteuden kondensoitumisriskiä rakenteeseen, koska tuuletusvälissä tapahtuva lämpötilan nousu alentaa tuuletusvälin ilman suhteellista kosteutta ulkoilmaan nähden. Seinäpintaan kohdistuva auringon säteily parantaa tilannetta vielä entisestään. Aiemmin todettiin, että tutkittujen seinärakenteiden ulkoverhous suojasi niitä hyvin viistosateen vaikutuksilta ja verhouksen takana oleva tuuletusväli toimi myös riittävän hyvin. Paksummilla rimoilla tehty ristikoolaus varmistaisi kuitenkin ilman esteettömän kulun tuuletusvälissä vielä toteutettua ratkaisua paremmin.

Tutkittujen seinärakenteiden kosteusprosentteista voidaan yhteenvedona sanoa, että mineraalivillaseinän ulko-osan RH –prosentit kertovat kosteustason, joka syntyy rakenteeseen pelkästään ulkoilman kosteuden vaikutuksesta ja puukuitueristeen ulko-osan kosteusprosentteissa on mukana sisäilman kosteuslisän vaikutus, kun seinän sisäpinnan vesihöyrynvastus ja sisäilman kosteuslisä on mittauksissa olleen tilanteen mukainen.

6 Yhteenveto

Tutkimuksessa seurattiin Lietoon rakennetun omakotitalon ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa jatkuvatoimisella mittauksella joulukuun 1998 ja maaliskuun 2000 välisenä aikana. Mitattavia suureita olivat lämpötila, suhteellinen kosteus (RH), paineero ja ilman virtausnopeus. Tutkittavista seinärakenteista otettiin lisäksi rakennenäytteitä kosteuspitoisuuden määrittystä varten n. 3 kk välein. Mittaukset tehtiin TTY:llä kehitetyllä kenttämittauslaitteistolla, jonka toimintaa ohjataan tietokoneen avulla.

Tutkimuksessa verrattiin ilmansulullisen, puukuitueristeisen seinän ja höyrynsulullisen, mineraalivillaeristeisen seinän toimintaa vierekkäin samalla seinällä. Ilmansulkuna käytettiin bitumipaperia ja höyrynsulkuna muovikalvoa. Tuulensuojalevynä käytettiin kummassakin seinässä huokoista kuitulevyä.

Puukuitueristeen ulkopinnassa huokosilman suhteellinen kosteus oli talvijakson ajan n. 10 – 15 % korkeammalla tasolla kuin mineraalivillaeristeisessä seinässä. Ero oli suurimmillaan talvikaudella sisäilman kosteuslisän kasvaessa, joten sisäilman kosteuslisä vaikutti eristeen ulko-osan RH -prosenttiin höyrynsuluttomassa seinärakenteessa. Mittausjakson alussa puukuitueristeen kosteudet olivat korkeammalla tasolla myös rakennusaikaisen kosteuden vuoksi.

Mittausten perusteella voitiin todeta, että rakenteen ulkoverhouksen takana oleva tuuletusväli parantaa merkittävästi rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Tuuletusvälin lämpötilan ero ulkoilman lämpötilaan kasvoi lineaarisesti ulkoilman lämpötilan laskiessa. Lämpötilan nousu tuuletusvälissä alentaa tuuletusvälin RH:ta ja pienentää samalla rakenteen homehtumisriskiä sekä kosteuden kondensoitumisriskiä rakenteeseen. Lisäksi tuuletusväli parantaa rakenteen lämmöneristävyttä ja kuivumiskykyä.

Mittausjakson aikana tarkasteltiin rakenteen homehtumisriskiä fil.tri. Hannu Viitasen kehittämän homeindeksiluokituksen avulla. Homeindeksi oli kummassakin rakenteessa koko mittausjakson ajan < 1 , mikä tarkoittaa sitä, että rakenteissa ei ollut homeenkasvua. Homeen kasvulle suotuisia lämpötila- ja RH -olosuhteita mitattiin lähinnä puukuitueristeisen seinärakenteen yläosasta, eristetilan ulkopinnasta, mutta tässäkin tapauksessa suotuisat olosuhteet esiintyivät vain hetkittäin ja homeindeksi palautui takaisin 0:aan varsin nopeasti pitkien kuivumisjaksojen ansiosta. Eteläseinän suotuisat lämpötilaolosuhteet alensivat rakenteiden homehtumisriskiä merkittävästi ja rakennusaikainen kosteus puolestaan lisäsi homehtumisriskiä talon valmistumisen jälkeen.

Tutkimuksessa verrattiin höyrynsuluttoman puukuitueristeisen seinärakenteen toimintaa myös aikaisemmin laboratoriokokeissa olleisiin vastaaviin seinärakenteisiin. Laboratoriokokeissa höyrynsuluton seinärakenne ei toiminut tyydyttävästi, mutta näissä kokeissa rakenteelle kohdistunut kosteusrasituskin oli suurempi kuin koetalossa.

rakenteelle kohdistunut kosteusrasituskin oli suurempi kuin koetalossa. Tutkimuksessa tarkasteltavana olleen höyrynsuluttoman seinärakenteen toimintakyvyn yläraja onkin koetalossa mitattujen ja laboratoriossa olleiden olosuhteiden välimaastossa.

Mittaustuloksia verrattiin myös laskennallisella tarkasteluilla saatuihin tuloksiin, kun tarkasteltavana oli samat rakenteet tutkimuksessa mitatuissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa. Laskennassa käytettiin saksalaista WUFI 2D ja ruotsalaista 1D-HAM laskentaohjelmaa. Materiaaliominaisuuksina käytettiin pääosin TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa mitattuja materiaaliarvoja. Laskentatulosten perusteella voitiin todeta, että puurunkoisten seinärakenteiden toimintaa voidaan mallintaa riittäväällä tarkkuudella myös laskennallisesti. Kokeissa mitatut eristetilan ulko-osan RH -arvot erosivat laskentatuloksista eniten kokeen alkuvaiheessa. Laskennallisessa tarkastelussa suhteelliset kosteudet muuttuivat vuorokausivaihteluissa myös hitaammin kuin kokeessa mitatut arvot. Lämpötilojen osalta koetulosten ja laskennan välillä ei ollut merkittäviä eroja.

Seinärakenteiden kosteusprosentista voidaan yhteenvetona sanoa, että mineraalivilla-seinän ulko-osan RH -prosentit kertovat kosteustason, joka syntyy rakenteeseen pelkästään ulkoilman kosteuden vaikutuksesta ja puukuitueristeen ulko-osan kosteusprosentissa on mukana sisäilman kosteuslisän vaikutus, kun seinän sisäpinnan vesihöyrynvastus on mittauksissa olleen seinän mukainen.

Mittauksen perusteella sekä höyrynsulullinen että höyrynsuluton seinärakenne toimi kosteusteknisesti hyvin. Sisä- ja ulkoilman olosuhteet olivat kuitenkin mitatuilla seinillä keskimääräisiä olosuhteita suotuisimmat, joten kriittisemmissä kosteusolosuhteissa höyrynsuluttomassa seinärakenteessa homehtumis- ja kondensoitumisriski kasvavat. Höyrynsuluttoman seinän sisäpinnan vesihöyrynvastusta onkin syytä lisätä, jotta varmistetaan rakenteen toiminta myös kosteusrasituksen kasvaessa.

Lähdeluettelo

1. FINAS S12. 1992. Suositus kalibroinnin mittausepävarmuuden määrittämisestä. Helsinki, Mittatekniikan keskus. 23 s.
2. Hukka, A., Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33 (1999), p. 475 – 485.
3. Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A., Viitanen, H. 1999. Moisture Physical Behaviour of Wooden Structures. Espoo, Technical Research Centre of Finland (VTT), VTT Research Notes 1991. 160 p. [in Finnish]
4. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet RIL 107, 2000. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien liitto, 211 s.
5. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa C2. 1998. Kosteus, Määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki, Ympäristöministeriö. 11 s.
6. Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. Doctoral Dissertation. Uppsala, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products.
7. Vinha, J. 1998. Measuring Thermal Insulation Properties of Structures with Calibrated Hot Box Apparatus. Licentiate's Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, Department of Civil Engineering. 106 p. + 17 app. [in Finnish]
8. Vinha, J., Käkälä, P. 1999. Water Vapour Transmission in Wall Structures Due to Diffusion and Convection. Tampere, Tampere University of Technology, Structural Engineering, Publication 103. 110 p.

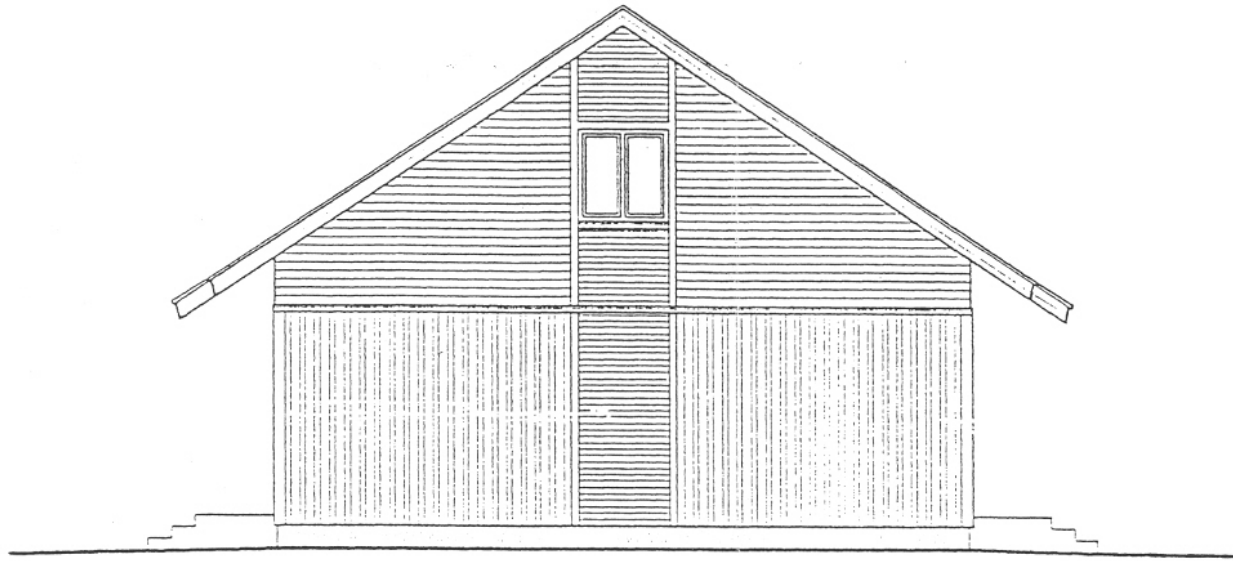
Muuta kirjallisuutta

1. Björkholtz, D. 1987. Lämpö ja kosteus - Rakennusfysiikka. Helsinki, Rakennustieto Oy. 150 s.
2. Kauriinvaaha, E., Viljanen, M., Pasila, A., Kymäläinen H.-R., Pehkonen, A. 2001. Bio-fiber from Field to Thermal Insulation of Building. Espoo, Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Publication 117. 100 p. [in Finnish]

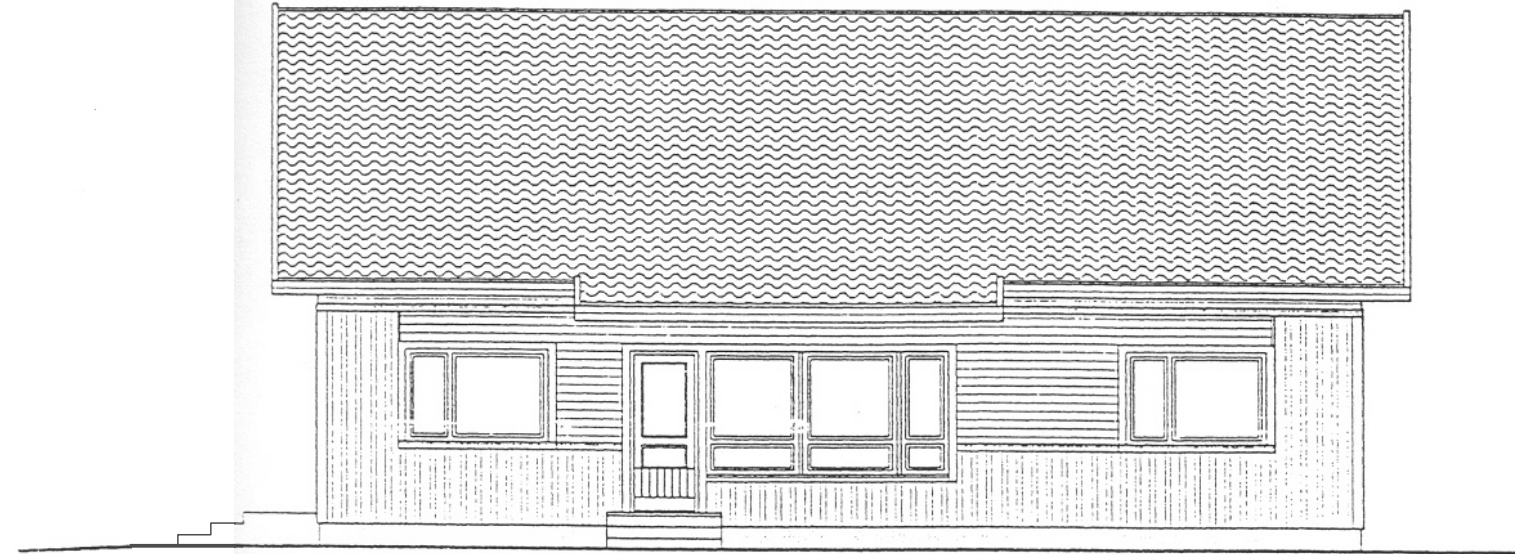
3. Kaurinvaha, E., Sutela, R., Yrjölä, R., Viljanen, M. 2001. Sawdust as Thermal Insulation in a Small House. Espoo, Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Publication 118. 87 p. [in Finnish]
4. Kosteus rakentamisessa, RakMK C2 opas.1999. Tampere, Ympäristöministeriö, Ympäristöopas 51. 53 s.
5. Lehtinen, T., Lehtonen, H. 1997. Safety Factor Based Moisture Physical Design Procedures – Framework and New Method for Timber Frame Wall Structures. Espoo, Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Publication 68. 84 p. + 4 app. [in Finnish]
6. Lämmön- ja kosteudeneristys RIL 155. 1984. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto ry. 389 s.
7. Nevander, L. E., Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 s.
8. Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R. 2000. Carbon Dioxide Permeability of Cellulose-Insulated Wall Structures. Tampere, Tampere University of Technology, Structural Engineering, Publication 104. 55 p.
9. Ojanen, T., Kokko, E., Pallari, M-L. 1993. Criteria for Hygrothermal Performance of Wind Barriers. Espoo, Technical Research Centre of Finland (VTT), VTT Research Notes 1478. 125 p. + 24 app. [in Finnish]
10. Simonson, C. 2000. Moisture, Thermal and Ventilation Performance of Tapanila Ecological House. Espoo, Technical Research Centre of Finland (VTT), VTT Research Notes 2069. 141 p. + 5 app.

Liitteet

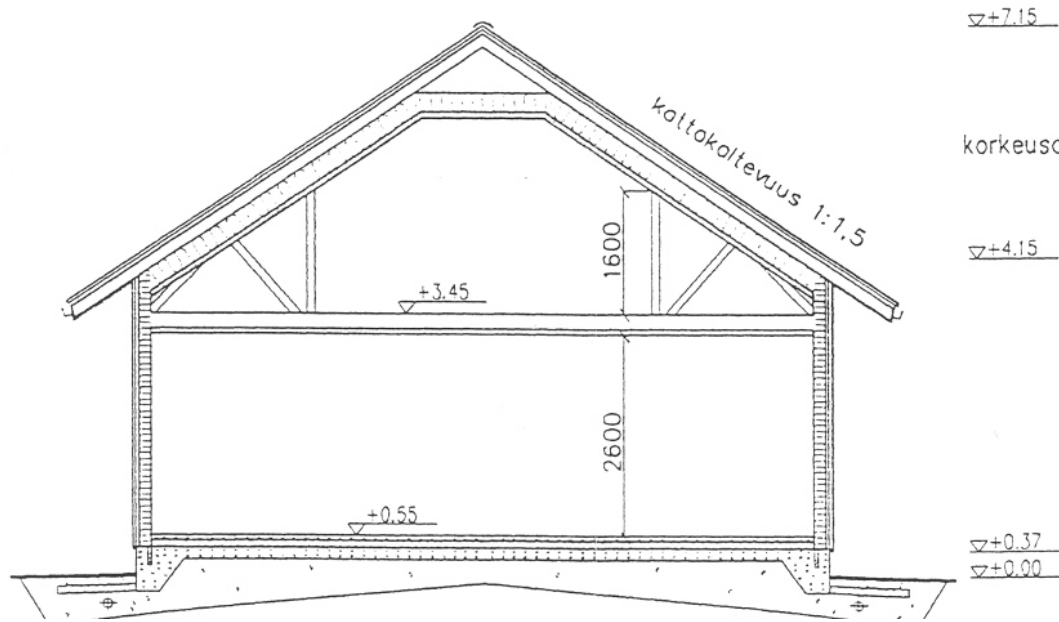
Liite I	Koetalon pohjapiirros, leikkauspiirros ja julkisivukuva	1 s.
Liite II	Mittaustuloksista lasketut kuukausittaiset keskiarvot	3 s.
Liite III	Sisä- ja ulkoilman olosuhteet mittausjakson ajalta	2 s.
Liite IV	Eristetilan ulko- ja sisäosien olosuhteet mittausjakson ajalta	4 s.
Liite V	Seinärakenteissa käytettyjen rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet	1 s.



PÄÄTYJULKISIVU



PIHAJULKISIVU



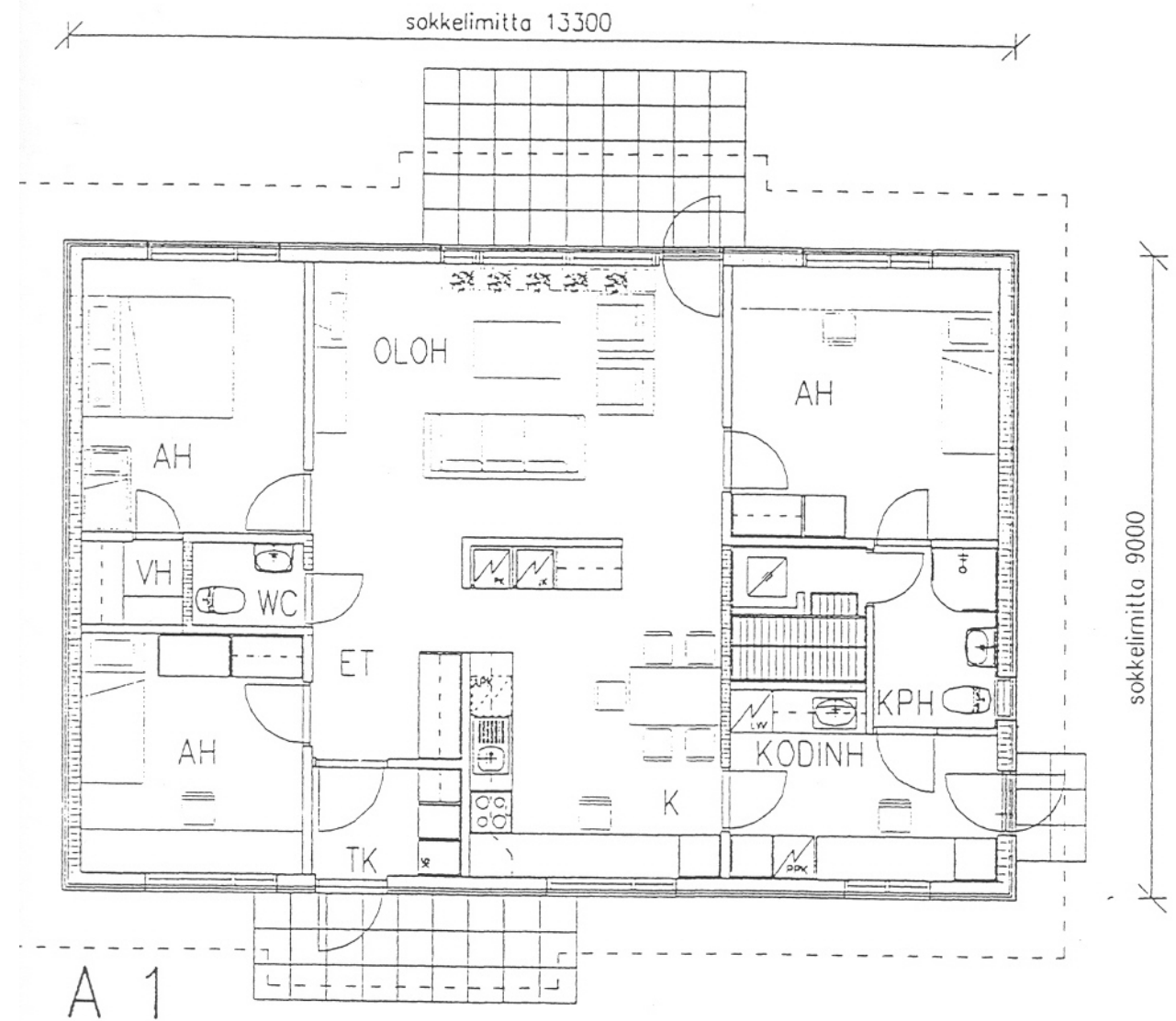
▽+7.15

korkeusasetmat ovat suhteellisia

▽+4.15

▽+0.37

▽+0.00



sokkelimitta 13300

sokkelimitta 9000

A 1

Mittausjakson ajalta lasketut kuukausittaiset keskiarvot

Lämpötilat [°C]

	11/98	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
Tstv yläosa puukuitu	-2,5	-0,2	-2,5	-3,0	2,6	6,1	12,9	21,3	21,1	18,5	15,6	8,3	3,7	-0,6	-0,9	0,3	2,0
Tstv alaosa puukuitu	-3,0	-0,5	-2,9	-3,6	1,6	5,2	12,2	20,5	20,5	17,8	15,1	8,0	3,4	-0,9	-1,4	-0,4	1,1
Tutv yläosa puukuitu	-3,6	-1,3	-3,6	-3,7	2,4	6,0	13,0	21,5	21,1	18,6	15,5	7,7	2,9	-1,8	-2,0	-0,7	1,4
Tutv alaosa puukuitu	-3,8	-1,4	-3,9	-4,6	1,0	4,5	11,9	20,4	20,4	17,6	14,9	7,5	2,7	-1,8	-2,3	-1,1	0,5
Tupinta yläosa puukuitu	-4,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tupinta alaosa puukuitu	-4,5	-2,0	-4,4	-4,3	2,2	5,9	14,2	22,6	22,1	19,6	16,3	7,5	2,3	-2,6	-2,8	-1,1	1,4
Tstv yläosa mineraalivilla	-2,5	0,0	-2,2	-2,6	2,8	6,4	13,1	21,4	21,4	18,7	15,8	8,5	3,9	-0,5	-0,7	0,5	2,2
Tstv alaosa mineraalivilla	-2,8	-0,4	-2,8	-3,4	1,7	5,4	12,3	20,5	20,5	17,8	15,2	8,3	3,6	-0,8	-1,3	-0,3	-
Tutv yläosa mineraalivilla	-3,6	-1,1	-3,5	-3,5	2,5	6,1	12,8	21,3	21,0	18,5	15,5	7,9	3,0	-1,6	-1,8	-0,4	1,4
Tutv alaosa mineraalivilla	-4,0	-1,5	-4,1	-4,7	0,9	4,5	11,6	20,1	19,9	17,2	14,8	7,4	2,6	-2,2	-2,5	-1,4	0,1
Tupinta yläosa mineraalivilla	-4,4	-1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tupinta alaosa mineraalivilla	-4,4	-1,9	-4,4	-4,4	2,0	5,8	14,1	22,5	22,0	19,4	15,9	7,5	2,3	-2,7	-2,9	-1,2	1,2
Tspinta alaosa mineraalivilla	16,0	17,2	19,8	19,4	19,4	20,8	21,6	24,6	25,5	23,1	22,5	21,1	20,1	19,3	20,0	20,0	20,3
Tspinta alaosa puukuitu	15,6	17,2	20,1	19,7	19,6	20,9	21,7	24,6	25,3	23,1	22,6	21,4	20,6	20,0	20,5	20,6	20,8
Tspinta yläosa puukuitu	17,8	18,6	20,4	20,7	20,2	21,3	22,3	25,5	26,1	23,8	23,1	21,5	20,9	20,5	21,1	21,2	21,5
Tspinta yläosa mineraalivilla	18,6	18,8	20,7	20,7	20,0	21,3	22,4	25,9	26,4	24,2	23,4	21,3	20,6	20,0	20,7	20,8	21,2

Suhteelliset kosteudet [%]

	11/98	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
RHs puukuitu yläosa	47,0	36,8	36,1	35,9	36,7	34,3	33,7	37,1	35,2	35,7	40,0	39,6	36,6	35,7	35,3	35,1	36,2
RHs puukuitu alaosa	48,1	38,0	37,2	37,0	37,8	35,6	36,2	40,9	39,1	39,2	41,8	40,8	37,3	36,7	36,3	36,1	34,7
RHs ilma	52,1	38,8	36,7	35,8	36,5	34,3	39,4	45,6	44,0	45,9	52,6	51,2	44,5	40,5	38,8	37,1	35,5
RHs mineraalivilla yläosa	41,8	36,7	36,0	35,9	36,8	35,3	36,3	38,9	37,4	38,1	38,7	38,3	36,1	35,5	35,1	34,9	73,9
RHs mineraalivilla alaosa	42,0	37,9	37,0	36,5	37,2	35,5	35,7	40,1	39,1	38,9	41,9	41,1	37,6	36,7	36,0	35,7	58,4
Rhu ilma	87,9	93,1	90,4	85,8	81,5	77,1	52,7	59,0	64,5	62,3	70,8	85,9	85,4	91,0	86,5	84,3	63,2
RH tv1	90,2	77,2	73,2	63,6	61,3	56,2	41,2	46,2	45,5	43,7	52,0	69,6	70,8	72,1	70,6	65,8	69,3
RHu puukuitu alaosa	92,6	78,7	74,7	66,3	66,5	62,8	44,9	50,8	50,5	48,7	56,9	73,6	73,3	74,6	72,4	68,9	63,7
RH tv2	81,4	87,1	83,3	76,4	72,4	65,7	46,3	53,2	55,4	53,6	60,5	79,8	81,6	86,2	83,0	79,6	52,2
RHu puukuitu yläosa	82,7	88,9	85,4	78,7	74,7	67,3	42,4	49,2	51,3	48,4	55,5	76,3	79,1	83,1	79,9	75,9	59,7
RHu mineraalivilla alaosa	82,1	74,2	68,4	60,2	59,7	54,4	37,4	43,9	44,1	41,1	48,1	65,3	65,3	65,9	63,0	59,6	63,7
RHu mineraalivilla yläosa	75,9	75,0	70,6	63,9	64,8	59,5	41,5	48,7	49,1	46,7	53,3	70,3	69,7	71,6	69,2	66,4	63,5

Suhteellisia kosteuksia vastaavat lämpötilat [°C]

	11/98	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
Ts puukuitu yläosa	16,6	17,8	19,5	19,5	19,3	20,5	21,7	25,1	25,7	23,4	22,6	20,9	20,0	19,5	20,1	20,2	26,6
Ts puukuitu alaosa	15,3	16,9	19,4	19,0	19,1	20,5	21,7	24,8	25,5	23,2	22,6	21,2	20,2	19,4	20,0	20,1	20,3
Ts ilma	18,5	19,4	21,2	21,4	20,8	22,0	22,9	25,9	26,5	24,2	23,7	22,4	21,9	21,4	22,3	22,1	22,4
Ts mineraalivilla yläosa	17,0	17,6	19,3	19,2	18,5	20,3	21,8	25,5	26,1	23,9	22,9	20,4	19,5	18,7	19,3	19,5	19,9
Ts mineraalivilla alaosa	15,5	16,9	19,1	18,8	19,0	20,6	21,6	25,0	25,8	23,4	22,7	20,9	19,8	18,9	19,5	19,6	19,9
Tu ilma	-5,3	-2,1	-4,9	-5,5	0,3	3,8	11,2	19,9	19,2	16,9	14,2	7,1	2,6	-2,3	-2,3	-1,3	0,2
T tv1	-4,1	-1,3	-3,7	-4,4	1,2	5,0	12,2	20,8	20,9	18,2	15,4	8,1	3,4	-1,0	-1,3	-0,1	1,6
Tu puukuitu alaosa	-1,3	1,5	0,0	-0,6	3,6	7,1	13,1	20,8	21,3	18,7	16,3	10,0	5,9	2,0	1,7	2,6	3,9
T tv2	-3,8	-0,9	-3,3	-3,9	1,6	5,3	11,8	20,4	20,6	17,8	15,2	7,9	3,3	-1,3	-1,7	-0,5	1
Tu puukuitu yläosa	-0,7	1,8	0,2	-0,1	4,4	7,8	13,8	21,6	21,9	19,4	16,8	10,3	6,2	2,3	2,2	3,3	4,8
Tu mineraalivilla alaosa	-1,3	1,5	-0,2	-0,6	3,5	7,2	13,2	20,9	21,6	18,7	16,3	10,2	5,9	1,9	1,5	2,4	3,8
Tu mineraalivilla yläosa	-0,4	2,3	0,9	0,5	4,5	8,3	14,0	21,8	22,1	19,6	17,0	10,3	6,3	2,5	2,5	3,5	4,9

Vesihöyrypitoisuudet [g/m³]

		12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
vs puukuitu yläosa		5,6	6,1	6,1	6,1	6,1	6,4	8,6	8,4	7,5	8,1	7,2	6,4	6,0	6,2	6,1	6,2
vs puukuitu alaosa		5,5	6,3	6,1	6,2	6,3	6,9	9,3	9,2	8,2	8,5	7,6	6,6	6,1	6,3	6,3	6,3
vs ilma		6,5	6,8	6,7	6,6	6,7	8,1	11,0	11,0	10,1	11,3	10,2	8,6	7,6	7,7	7,3	7,2
vs mineraalivilla yläosa		5,5	6,0	5,9	5,8	6,2	7,0	9,3	9,2	8,2	8,0	6,8	6,1	5,7	5,8	5,9	6,0
vs mineraalivilla alaosa		5,5	6,1	5,9	6,1	6,4	6,8	9,3	9,4	8,2	8,5	7,5	6,5	6,0	6,1	6,0	6,1
vu ilma		4,2	3,6	3,1	4,0	4,7	5,0	9,3	9,9	8,2	8,2	6,9	5,2	3,9	3,8	3,8	3,5
vtv		3,6	3,0	2,5	3,4	4,1	4,9	8,9	8,6	7,3	7,5	6,0	4,6	3,4	3,3	3,3	3,4
vu puukuitu alaosa		4,4	3,9	3,3	4,2	5,0	5,4	9,3	9,5	8,0	8,2	7,1	5,5	4,3	4,1	4,1	4,1
vtv		4,2	3,6	3,1	4,0	4,7	4,9	9,1	9,6	8,0	7,9	6,8	5,2	4,0	3,9	3,9	3,7
vu puukuitu yläosa		5,1	4,6	4,1	5,0	5,6	5,1	9,1	9,7	7,9	8,0	7,5	6,1	4,9	4,8	4,8	4,3
vu mineraalivilla alaosa		4,4	3,9	3,2	4,1	4,8	4,9	8,7	8,8	7,3	7,4	6,5	5,1	3,9	3,8	3,8	3,7
vu mineraalivilla yläosa		4,2	3,7	3,2	4,1	4,8	5,1	9,1	9,4	7,7	7,8	6,9	5,3	4,1	4,0	3,9	3,9
kosteuslisä (vs ilma - vu ilma)		2,3	3,2	3,6	2,6	2,0	3,1	1,7	1,1	1,9	3,1	3,3	3,4	3,7	3,8	3,5	3,7

Homeraja-arvot (RH_{crit}) [%]

	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
RHs (crit) puukuitu yläosa	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
RHs (crit) puukuitu alaosa	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
RHs ilma (crit)	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
RHs (crit) mineraalivilla yläosa	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
RHs (crit) mineraalivilla alaosa	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
Rhu ilma (crit)	97,3	98,2	99,1	95,6	91,6	85,0	80,5	80,1	81,4	82,8	86,6	91,8	98,0	97,1	96,7	95,2
RH tv1 (crit)	96,3	97,2	98,7	94,3	89,9	84,0	80,2	80,0	80,7	81,7	85,2	90,9	96,9	96,2	95,7	93,8
RHu (crit) puukuitu alaosa	92,8	93,8	95,6	91,1	85,9	81,8	80,0	80,0	80,1	80,5	82,7	87,9	93,3	92,7	92,5	90,7
RH tv2 (crit)	95,8	96,8	98,4	93,9	89,4	83,8	80,2	80,0	80,6	81,5	85,2	91,1	97,2	96,6	96,2	94,5
RHu (crit) puukuitu yläosa	92,1	93,4	94,9	89,9	85,5	82,0	80,0	80,0	80,2	80,6	82,6	87,4	92,8	91,9	91,4	89,7
RHu (crit) mineraalivilla yläosa	91,6	92,8	94,3	89,8	85,0	81,9	80,0	80,0	80,2	80,6	82,6	87,3	92,7	91,7	91,1	89,5
RHu (crit) mineraalivilla alaosa	92,5	93,9	95,3	91,0	85,9	82,0	80,0	80,0	80,2	80,6	82,7	87,8	93,4	92,7	92,8	90,9

Paine-ero [Pa]

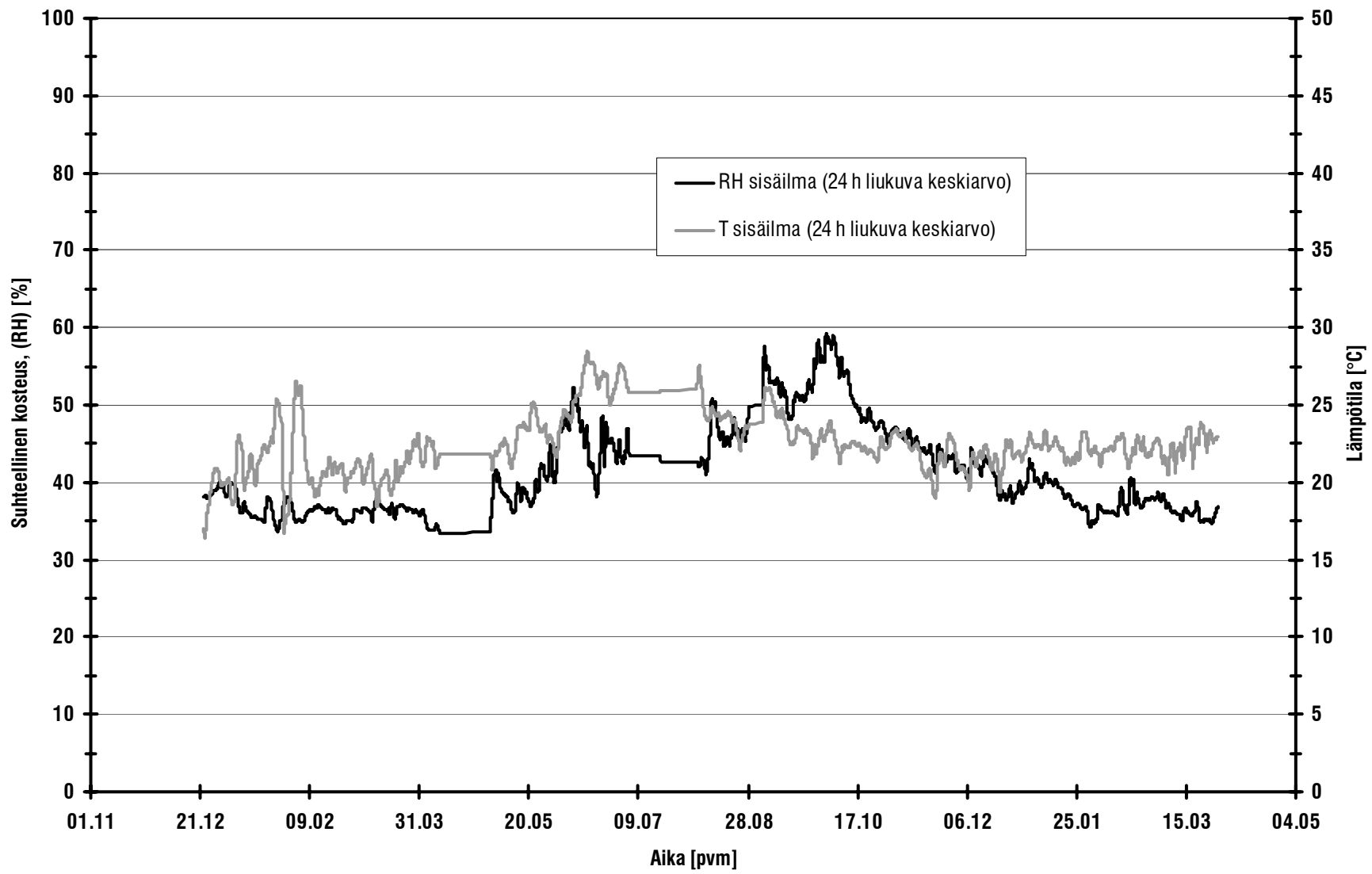
	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
Δp-Alaosa (sisä-ulko)	1,3	2,4	2,8	3,5	0,8	0,6	0,4	-0,2	0,2	0,3	0,8	1,4	2,3	1,5	2,1	1,7
Δp-yläosa (sisä-ulko)	3,3	3,7	3,5	4,6	2,4	1,8	1,2	0,5	1,4	2,0	2,6	3,1	3,9	3,3	3,7	3,2

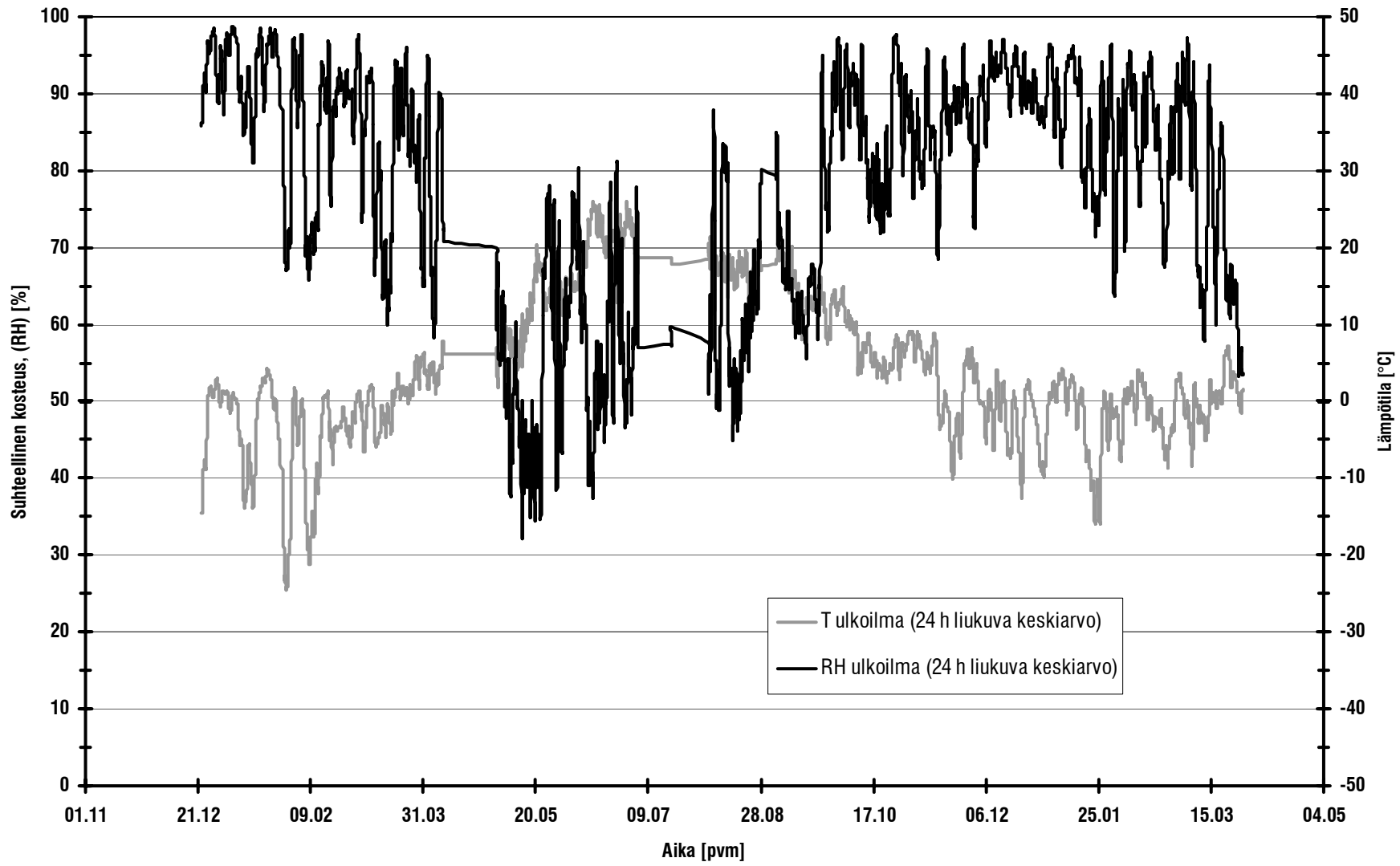
Ilmavirran nopeus [m/s]

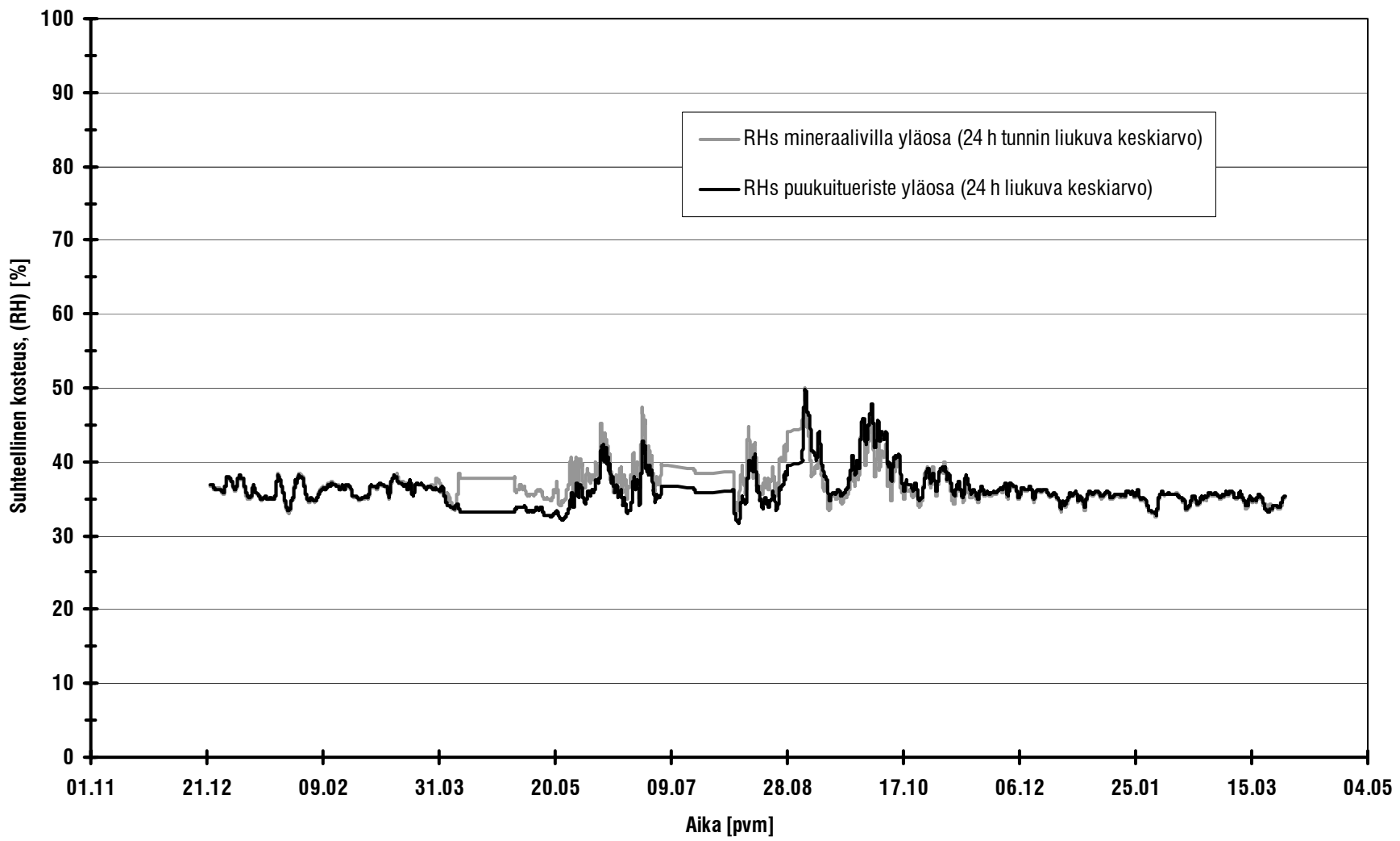
	11/98	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
Ilmavirta 1	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,09	0,09	0,09	0,08	0,06	0,06	0,05	0,07	0,06	0,05	0,07
Ilmavirta 2	0,05	0,12	0,11	0,12	0,12	0,06	0,11	0,10	0,12	0,06	0,07	0,11	0,12	0,14	0,12	0,11	0,11

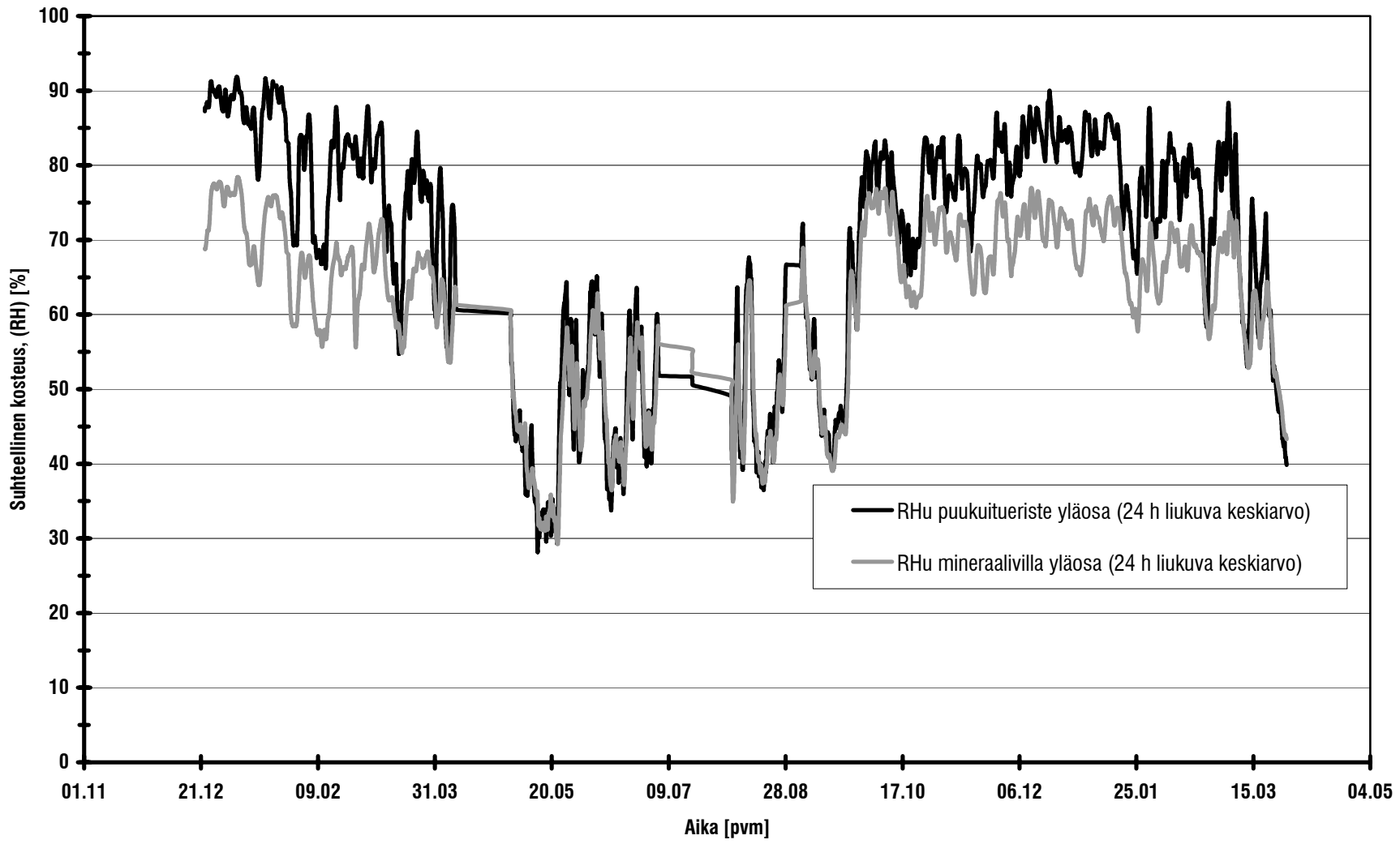
Muita lämpötilojen mittaustuloksia [°C]

	11/98	12/98	01/99	02/99	03/99	04/99	05/99	06/99	07/99	08/99	09/99	10/99	11/99	12/99	01/00	02/00	03/00
Alajuoksu sisä	5,5	8,0	8,0	7,1	9,4	13,3	17,3	22,8	24,6	21,7	19,8	15,4	12,2	9,3	9,4	9,7	10,9
Yläjuoksu sisä	13,8	14,1	15,9	16,3	15,5	18,0	20,2	25,0	25,7	23,3	21,9	18,2	16,6	14,9	15,4	15,9	16,4
Alajuoksu ulko	-1,2	1,0	-0,6	-1,3	3,0	6,9	13,3	21,1	22,3	19,4	16,7	9,8	5,3	1,3	0,8	1,6	3,1
Mittaus/vaatehuone	20,5	25,5	25,6	25,0	23,8	28,4	28,9	32,4	32,9	31,1	29,2	26,5	26,0	25,0	25,3	25,4	25,8

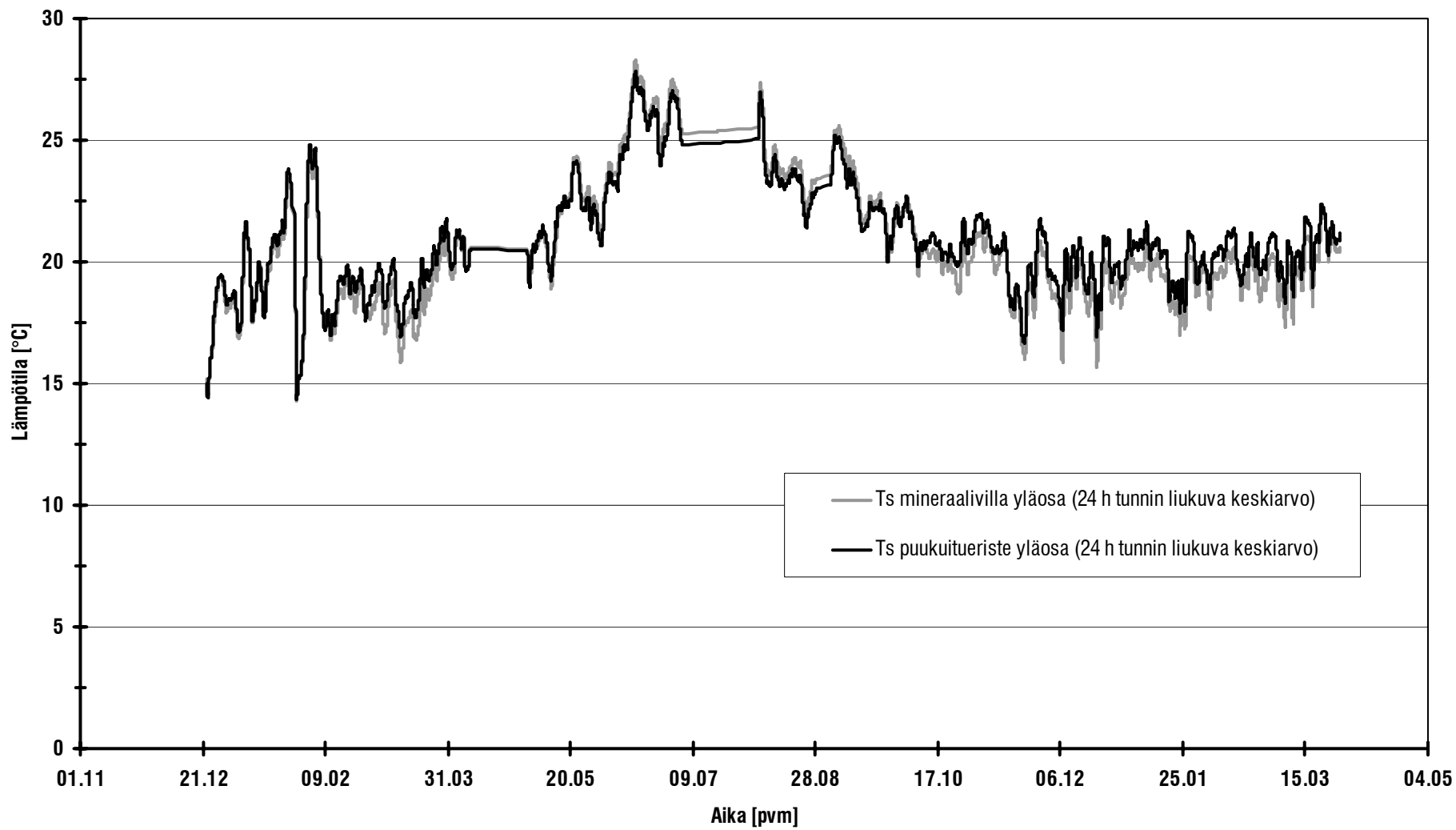


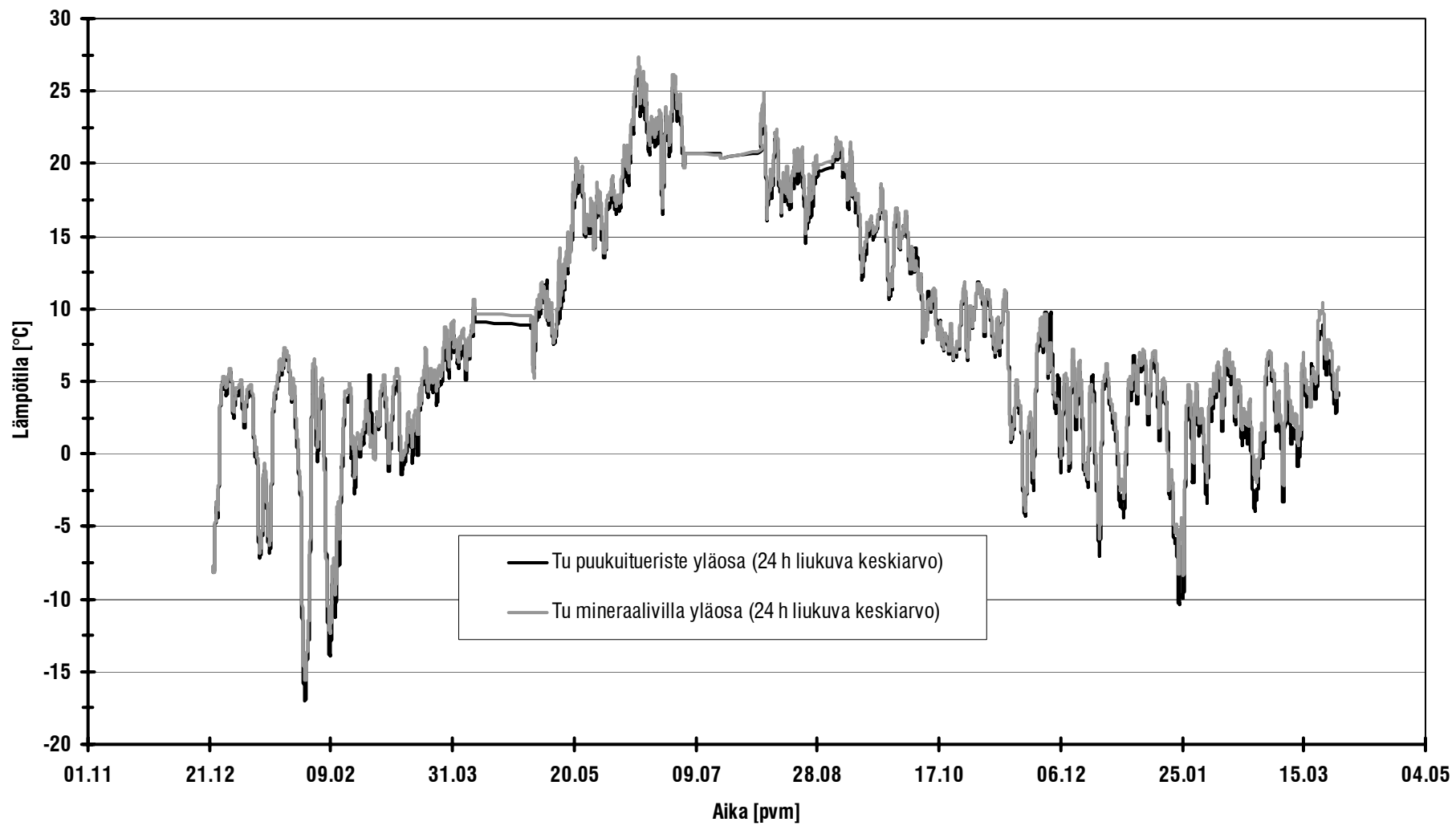






Liite IV Eristetilan ulko-osien suhteelliset kosteudet mittaussektorien yläosissa 2 (4)





Seinärakenteissa käytettyjen rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet

WUFI-2D - ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

Materiaali	Tiheys ρ kg/m ³	Ominaislämpö c J/kgK	Sorptiokäyrä w, (RH %, kg/m ³)								Vesihöyrynläpäisevyys δ_p , (RH %, x10 ⁻¹² kgms/Pa)								Lämmönjohtavuus λ , (RH %, W/mK)					Huokoisuus m ³ /m ³	
			Lineaaristen suorien leikkauspiste								Vesihöyrynvastus Z_p , (RH %, x10 ⁹ m ² sPa/kg), kalvot														
			0	33	55	75	83	93	100	0	35	45	55	65	75	85	95	100	0	33	65	75	100		
Huok. kuitulevy	280	1500	0,0	12,0	18,5	29,9	40,2	64,8	68,6	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	42,2	0,049	0,050	0,052	0,054	0,068	0,8	
Puukuitueriste, Vital	51	2000	0,0	2,2	3,9	5,7	8,2	18,5	21,2	145	145	145	145	145	145	145	145	145	0,036	0,038	0,038	0,038	0,039	0,95	
Lasivilla, Isover KI-C	22	850	0,0	0,1	0,6	0,8	1,05	1,9	2,2	160	160	160	160	160	160	160	160	160	0,033	0,035	0,035	0,035	0,037	0,98	
Bitumipaperi	740	1500									1,50	1,50	1,50	1,50 (57%)	1,14	0,70	0,45	0,29	0,23	0,10					0,6
Höyrynsulkumuovi	950	2300									450								0,10					0,001	
Kipsilevy GN	574	850	0,0	2,4	4,6	7,2	8,5	13,5	16,7	25,8	25,8	26,9	28,1	29,3	30,4	31,5	32,8	33,4	0,15	0,15	0,17	0,17	0,18	0,77	

1D-HAM - ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

Materiaali	Tiheys ρ kg/m ³	Ominaislämpö c J/kgK	Sorptiokäyrä w, (RH %, kg/m ³)					Vesihöyrynläpäisevyys δ_p , (RH %, x10 ⁻¹² kgms/Pa)								Lämmönjohtavuus λ , (RH %, W/mK)				
			Lineaaristen suorien leikkauspiste					Vesihöyrynvastus Z_p , (RH %, x10 ⁹ m ² sPa/kg), kalvot												
			0	76	80	82	100	0	35	45	55	65	75	85	95	100	0	33	65	75
Huok. kuitulevy	280	1500	0,0	30,0			85	42,2								0,054				
Puukuitueriste, Vital	51	2000	0,0		6		110	145								0,038				
Lasivilla, Isover KI-C	22	850	0,0		0,84		2,2	160								0,035				
Bitumipaperi	740	1500	0,0		0,10		0,15	0,97								0,10				
Höyrynsulkumuovi	950	2300	0,0		0,10		0,15	450								0,10				
Kipsilevy GN	574	850	0,0			8,0	60	28,6								0,15				

TTKK:n talonrakennustekniikan laboratoriossa on mitattu Wufi 2D -ohjelmassa käytetyistä arvoista rakennusmateriaalien sorptiokäyrä ja vesihöyrynläpäisevyys/ -vastus sekä osa lämmönjohtavuuksista (kalvojen ja 100 RH% lämmönjohtavuudet on arvioitu).

1D-HAM -ohjelmassa käytetyistä arvoista on mitattu TTKK:lla vesihöyrynläpäisevyys/ -vastus ja osa lämmönjohtavuuksista.

1D-HAM -ohjelmassa käytetty sorptiokäyrä on tehty WUFI 2D -ohjelmassa käytettyjen sorptioarvojen perusteella.

PUURUNKOISTEN SEINÄRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN VERTAILU OMAKOTITALOSSA

Tutkimuksessa on selvitetty kahden puurankarakenteisen ulkoseinärakenteen kosteusteknistä toimintaa. Tutkitut seinärakenteet olivat mineraalivillaeristeinen muovihöyrynsululla varustettu seinä sekä puukuitueristeellä eristetty seinä, jossa on bitumipaperi ilmansulkuna. Seinärakenteita tutkittiin kenttäolosuhteissa Lietoon rakennetussa omakotitalossa. Rakenteiden toimintaa seurattiin mittauksilla runsaan vuoden ajan joulukuusta 1999 maaliskuuhun 2001.

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella kahden tutkitun rakennetyypin kosteusteknisen toiminnan eroja. Tavoitteena oli myös selvittää, missä määrin rakenteissa voi esiintyä vesihöyryn kondensoitumista sekä homeen kasvulle suotuisia olosuhteita. Kenttämittausten tuloksia on lisäksi verrattu laboratoriokokeissa sekä tietokonemallinnuksella saatuihin tuloksiin.

Julkaisun hinta: 34 € + alv 8 %
Myynti: Tietokirjakauppa Juvenes/Julkaisumyynti, PL 527,
33101 Tampere, puh. (03) 3115 2351, faksi (03) 3115 2191



**TALONRAKENNUS-
TEKNIikka**

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Korkeakoulunkatu 5, PL 600, 33101 Tampere

Puh. (03) 3115 4804

Faksi (03) 3115 2811

S.posti terttu.makipaa@tut.fi

<http://www.tut.fi>