

# PUURUNKOISEN MATALAENERGIATALON EPS-ERISTETTY ULKOSEINÄRAKENNE

Kari Roviola

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2010

Rakennustekniikka  
Teknologia





Tekijä ROVIOLA, Kari	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 10.05.2010
	Sivumäärä 122	Julkaisun kieli suomi
	Luottamuksellisuus ( X ) 10.05.2010 saakka	Verkojulkaisulupa myönnetty ( X )
Työn nimi PUURUNKOISEN MATALAENERGIATALON EPS-ERISTETTY ULKOSEINÄRAKENNE		
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja KONTTINEN, Jukka, lehtori		
Toimeksiantaja SOKLEX OY TOIVONEN, Arto, toimitusjohtaja		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön aiheena oli EPS-eristetyn, puurunkoisen ulkoseinärakenteen suunnittelu ja tutkiminen. Työn tarkoituksena oli etsiä pientaloihin uusia lämmöneristys- ja rakenneratkaisuja. Taustalla olivat rakennusten kiristyvät energiatehokkuusvaatimukset sekä viranomaisten tavoitteet siirtyä matalaenergiarakentamiseen myös normitasolla. Työn toimeksiantajana toimi EPS-eristeitä ja perustusmuotteja valmistava Soklex Oy.</p> <p>Suunnittelussa huomioon otettavia kriteerejä olivat rakenteen kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus, käytännön toteutettavuus, ääneneristävyys sekä matalaenergiarakentamiseen liittyvä ohjeistus. Suunnittelutehtävien lisäksi rakenteen kosteusteknistä toimivuutta sekä käytännön toteutettavuutta tutkittiin kokeellisesti.</p> <p>Suunnittelun apuvälineinä käytettiin muun muassa diffuusio- ja U-arvolaskelmia, rakennepiirustuksia, koerakenteita sekä asiantuntijalausuntoja. Suunnittelun tuloksena syntyneen ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toimivuuden arvioimista varten rakennettiin laitteisto, jonka avulla tutkittiin rakenteen kahden eri version toimivuutta rakennuksen normaaleissa käytönaikaisissa sekä rakennusaikaisissa olosuhteissa. Lisäksi tutkittiin rakenteiden kuivumiskykyä.</p> <p>Tutkimustulosten perusteella rakenne on höyrynsululla varustettuna kosteusteknisesti toimiva ja täyttää matalaenergiarakennuksille asetetut lämmöneristysvaatimukset. Koerakenteiden ja rakenteen työmaatoteutuksen arvioinnin perusteella rakenne on toteutuskelpoinen myös käytännössä. Kaikkia aihepiiriin liittyviä tekijöitä, kuten rakenteen ilmastäneristävyyttä ja ilmatiiviyyttä ei ollut mahdollista opinnäytetyön puitteissa tutkia. Muita jatkotutkimusaiheita olivat rakenteen kosteus- ja lämpötekniisen toimivuuden tietomallipohjainen tarkastelu sekä koerakennuksen rakentaminen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) EPS-eristeet, matalaenergiarakentaminen, rakennusfysiikka, Soklex Oy		
Muut tiedot		



Author ROVIOLA, Kari	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 10052010
	Pages 122	Language Finnish
	Confidential ( X ) Until 10.05.2010	Permission for web publication ( X )
Title EPS-INSULATED EXTERNAL WALL STRUCTURE OF A TIMBER-FRAMED LOW ENERGY HOUSE		
Degree Programme Degree Programme in Civil Engineering		
Tutor KONTTINEN, Jukka, Senior Lecturer		
Assigned by SOKLEX Ltd TOIVONEN, Arto, Managing Director		
Abstract <p>The aim of this study was to develop a new type of a timber-framed external wall structure by using EPS as a thermal insulation. The combination has certain advantages but earlier there have appeared some problems with installation, for example. The structure to be developed was also supposed to meet the tightening requirements of energy efficiency which have been set on low energy houses. The commissioner of the thesis was an EPS manufacturer, Soklex Ltd, from Saarijärvi.</p> <p>The goal was to plan an EPS-insulated external wall structure which meets the criteria of improved hygrothermal performance, sound insulation, practicability and requirements set on low energy houses. In addition, there was an intention to examine the structure's practicability and moisture performance experimentally.</p> <p>When the external wall structure was planned, experimental structures and structural drawings were made to estimate its practicability and other properties. The dew point method was used to estimate the structures moisture performance as well. The structure's thermal transmittance was also determined by a calculation method. At the research stage, the moisture performance of two versions of the wall structure was examined with the laboratory tests in different climatic conditions. The equipment was built especially for this research.</p> <p>According to the results, the external wall structure with a vapour barrier in the interior wall lining has a very good moisture performance. It also meets the criteria of low energy houses and practicability as far as the properties could be ascertained. Sound resistance, air tightness and effects of thermal bridges on the structure could not be examined. For these reasons, an experimental building and additional laboratory tests were suggested for the subjects of further researches.</p>		
Keywords EPS-insulated, low energy house		
Miscellaneous		

# SISÄLTÖ

<b>KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT .....</b>	<b>4</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>8</b>
1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet .....	8
1.2 Soklex Oy .....	9
<b>2 RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT .....</b>	<b>11</b>
2.1 Ilmanpaineet ja ilmavirtaukset .....	11
2.2 Kosteuden siirtyminen rakenteissa .....	13
2.3 Lämmön siirtymismuodot .....	15
2.4 Rakenteiden ilmaääneneristävyys .....	16
<b>3 ULKOSEINÄRAKENTEEN SUUNNITTELUPERUSTEET .....</b>	<b>18</b>
3.1 Ulkoseinärakenteen kosteustekniset suunnitteluperusteet .....	18
3.2 Lämpötekniinen suunnittelu .....	21
3.3 Rakennuksen ulkovaipan ääneneristysvaatimukset .....	23
3.4 Matalaenergiarakentaminen .....	25
3.5 EPS-eristeet .....	29
<b>4 ULKOSEINÄRAKENTEEN SUUNNITTELU .....</b>	<b>31</b>
4.1 Opinnäytetyön tavoitteet .....	31
4.2 Suunnitteluvaihe .....	32
4.3 Suunniteltu ulkoseinärakenne .....	34
4.4 Suunnittelutavoitteiden huomioon ottaminen .....	37
4.5 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen .....	44
4.6 Diffuusiokosteustarkastelut .....	47
<b>5 RAKENNUSFYSIKAALISET TUTKIMUKSET .....</b>	<b>50</b>
5.1 Tutkimuslaitteisto .....	50
5.2 Laitteistolla tehdyt kokeet .....	54

	2
<b>6 TUTKIMUSTEN TULOKSET .....</b>	<b>56</b>
6.1 Koe 1 .....	56
6.2 Koe 2 .....	60
6.3 Koe 3 .....	63
6.4 Koe-elementtien purkaminen .....	66
6.5 Yhteenveto .....	67
<b>7 OPINNÄYTETYÖN ARVIOINTI JA KEHITTÄMINEN .....</b>	<b>68</b>
7.1 Tutkimuslaitteiston toiminta ja mittaustarkkuus .....	68
7.2 Tulokset ja tavoitteiden toteutuminen .....	70
7.3 Rakenteen kosteusteknisen toimivuuden parantaminen .....	75
7.4 Jatkotutkimukset .....	76
7.5 Matalaenergiarakenteet .....	77
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>79</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>82</b>
Liite 1. Diffuusiolaskelma 1 .....	82
Liite 2. Diffuusiolaskelma 2 .....	83
Liite 3. Diffuusiolaskelma 3 .....	84
Liite 4. Diffuusiolaskelma 4 .....	85
Liite 5. Diffuusiolaskelma 5 .....	86
Liite 6. Diffuusiolaskelma 6 .....	87
Liite 7. Koerakenteet .....	88
Liite 8. Rakenteen periaatepiirustus Soklex-perustuksilla .....	93
Liite 9. Lämmönläpäisykertoimen laskenta 1 .....	94
Liite 10. Lämmönläpäisykertoimen laskenta 2 .....	95
Liite 11. Tutkimuslaitteiston ja koe-elementtien rakentaminen .....	96
Liite 12. Kokeiden mittaustulokset .....	104
Liite 13. Koe-elementtien purkaminen .....	120

## KUVIOT

KUVIO 1. Soklex Oy:n toimitilat Saarijärvellä .....	10
KUVIO 2. Luonnollinen konvektio .....	11
KUVIO 3. Pakotettu konvektio .....	13
KUVIO 4. Vesihöyryn diffuusio .....	14
KUVIO 5. Kylmäsilta vaikutus puurunkorakenteessa .....	15
KUVIO 6. Ääneneristys ja äänen absorptio .....	17
KUVIO 7. Tyypillinen puurunkoinen ulkoseinärakenne .....	19
KUVIO 8. Esimerkkejä ulkoseinärakenteiden ilmaääneneristävyksistä .....	25
KUVIO 9. Lämpötilaerot tuulensuojien sisäpinnoissa .....	28
KUVIO 10. Rakenteen kehitysvaiheita .....	32
KUVIO 11. Suunniteltu ulkoseinärakenne .....	34
KUVIO 12. Lämmönläpäisykertoimen laskentaperiaate .....	41
KUVIO 13. Diffuusiolaskelmien tarkastelupisteet .....	49
KUVIO 14. Tutkimuslaitteiston periaatepiirros .....	50
KUVIO 15. Mittauspisteet rakenteessa 1 .....	53
KUVIO 16. Mittauspisteet rakenteessa 2 .....	54
KUVIO 17. Kosteus- ja lämpötilajakaumat kokeen 1 lopussa .....	57
KUVIO 18. Olosuhde-eroja rakenteessa 1 .....	59
KUVIO 19. Kosteus- ja lämpötilajakaumat kokeen 2 lopussa .....	61
KUVIO 20. Olosuhde-eroja rakenteessa 2 .....	62
KUVIO 21. Kosteus- ja lämpötilajakaumat kokeen 3 lopussa .....	64
KUVIO 22. Akustiikkalaboratorion kaiuntahuoneet .....	73

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Esimerkki mittaustuloksista .....	52
TAULUKKO 2. Kokeen 1 mittaustuloksia .....	56
TAULUKKO 3. Kokeen 2 mittaustuloksia .....	60
TAULUKKO 4. Kokeen 3 mittaustuloksia .....	63

# KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

## **Alipaine**

Kun tietyn ilmatilan absoluuttinen paine on pienempi kuin ympäröivä ilmanpaine, tilassa vallitsee alipaine.

## **A-painotettu keskiäänitaso**

Keskiäänitaso tarkoittaa jatkuvaa äänitasoa, joka on yhtä suuri kuin vaihtelevan äänitason logaritminen keskiarvo jollakin tietyllä mittausaikavälillä. Kuuloaistin herkkyys otetaan huomioon A-painotuksella, joka lisätään keskitaajuuksittain äänenpainetasoihin.

## **Diffuusio**

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta (osapaineesta) alempaan pitoisuuteen (osapaineeseen).

## **Hygroskooppisuus**

Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.

## **Ilmanläpäisevyys**

Ilmanläpäisevyys (I) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien tilojen paine-ero on yksikön suuruinen.

## **Ilmanvuotoluku**

Ilmanvuotoluku ( $n_{50}$ ) ilmoittaa, kuinka monta kertaa tunnissa rakennuksen ilma vaihtuu 50 Pa:n yli- tai alipaineella.

**Ilmaääneneristysluku**

Ilmaääneneristysluku ( $R_w$ ) on rakenteen ilmaääneneristävyyttä kuvaava luku, joka saadaan vertaamalla eri taajuuksilla mitattuja ilmaääneneristävyyden arvoja standardoituun vertailukäyrään.

**Ilmaääneneristävyys**

Ilmaääneneristävyys ( $R$ ) on rakenteeseen kohdistuvan äänitehon ja rakenteen välityksellä sen toiselle puolelle siirtyvän äänitehon suhde.

**Ilmaääni**

Ilmaääni on äänilähteestä ilman välityksellä ympäristöön leviävä ääni.

**Kapillaarivirtaus**

Kapillaarivirtaus tarkoittaa huokosalipaineen paikallisten erojen aiheuttamaa nesteen siirtymistä huokoisessa aineessa.

**Kastepiste**

Vrt. kondensoituminen.

**Kondensoituminen**

Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteiden pintoihin vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut pinnan lähellä kyllästyskosteuden (suhteellinen kosteus = 100 %).

**Konvektio**

Konvektio syntyy kaasun tai nesteen virratessa ulkopuolisen voiman tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vaikutuksesta.

**Kyllästyskosteus**

Kyllästyskosteus ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa.

**Kyllästyspaine**

Kyllästyspaine on suurin vesihöyryn aikaansaama paine tietyssä lämpötilassa. Mitä suurempi lämpötila on, sitä suurempi on kyllästyspaine.



### **Kylmäsilta**

Kylmäsilta on rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta tehty rakenneos, jonka kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta rakennusosan pintojen läpi kulkevan lämpövirran tiheys on jatkuvuus-tilassa viereiseen alueeseen verrattuna suurempi.

### **Lämmönjohtavuus**

Lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) 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.

### **Lämmönvastus**

Termisessä jatkuvuus-tilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastus (R) ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isothermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen.

### **Lämpökonduktanssi**

Lämpökonduktanssi (G) ilmoittaa rakennusosan tai sen tietyn osa-alueen läpi jatkuvuus-tilassa siirtyvän lämpövirran, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen välillä on yksikön suuruinen.

### **Rakennuskosteus**

Rakennuskosteus tarkoittaa rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusaineisiin joutunutta rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka tulee poistua.

### **Stationääritila**

Stationääritilassa (jatkuvuustila) olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.

### **Suhteellinen kosteus**

Ilman suhteellinen kosteus (RH) ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa.

### **U-arvo**

Ks. lämmönläpäisykerroin.

### **Vesihöyrynläpäisevyys**

Vesihöyrynläpäisevyys ( $\delta$ ) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero tai vesihöyryn osapaine-ero on yksikön suuruinen.

### **Vesihöyryn osapaine**

Vesihöyryn osapaineella tarkoitetaan sitä osaa ilmanpaineesta, jonka ilman sisältämä vesihöyry aiheuttaa.

### **Vesihöyrynvastus**

Vesihöyrynvastus (Z) ilmoittaa tasapaksun ainekerroksen tai tällaisista muodostuvan tasapaksun kerroksellisen rakenteen pinnoilla eri puolilla vallitsevien vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden eron ja ainekerroksen tai rakenteen läpi jatkuvuustilassa pinta-alayksikköä kohti diffusoituvan vesihöyryvirran suhteen.

### **Ylipaine**

Kun tietyn ilmatilan absoluuttinen paine on suurempi kuin ympäröivä ilmanpaine, tilassa vallitsee ylipaine.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet

Globaalit energiansäästöavoitteet ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tähtäävät päästörajoitukset ovat aiheuttaneet tarpeen rakennusten energiankulutuksen vähentämiseksi. Rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi on otettu käyttöön Keski-Euroopasta lähtöisin olevat matalaenergiarakentamisen periaatteet, joita on tarkoitus soveltaa myös normitason rakentamisessa.

Matalaenergiarakennusten energiatehokkuus perustuu rakenteellisesti pääosin rakennuksen ulkovaipan tiivyyteen ja lämmöneristävyyteen sekä kylmäsiltaikutusten poistamiseen. Vaadittavien ominaisuuksien saavuttaminen edellyttää muutoksia nykyisiin rakennetyyppeihin sekä uudenlaisten rakenteiden kehittämistä. Muutokset on lisäksi tehtävä nopeasti, sillä viranomaistavoitteiden mukaan normitason matalaenergiarakentamiseen siirrytään jo noin kahden vuoden kuluttua. Lyhyt siirtymäaika asettaa huomattavia haasteita toimivien rakenteiden suunnittelulle ja kehittämiselle.

Esiin ovat nousseet myös matalaenergiarakentamiseen Suomen ilmasto-olosuhteissa liittyvät riskit. Kasvavien eriste- ja rakennepaksuuksien on epäilty aiheuttavan muun muassa kosteus- ja asennusteknisiä ongelmia rakenteissa ja niiden toteuttamisessa. Esillä ovat jälleen olleet myös ulkoseinärakenteet, jotka ovat jo vuosikymmeniä olleet kiistojen kohteina erityisesti kosteusteknisien ominaisuuksiensa osalta. Ongelmien välttäminen on aiheuttanut tarpeen etsiä toimintavarmempia ratkaisuja esimerkiksi käyttämällä rakenteissa lämmöneristävyydeltään ja kosteusteknisiltä ominaisuuksiltaan parempia eristeitä.

Solumuovieristeiden käyttöä puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa ovat rajoittaneet muun muassa sopivien asennustekniikoiden puuttuminen sekä eristeiden korkeampi hinta puurakenteissa yleisesti käytettyihin huokosiin lämmöneristeisiin verrattuna. Matalaenergiarakenteisiin siirtymisen ja rakennusmateriaalien kehittymisen myötä solumuovieristeille on kuitenkin syntynyt tila-

us, sillä hyvän lämmöneristävyyden ja ilmatiiviyyden ansiosta niillä on mahdollista saavuttaa vaadittavat lämmöneristysvaatimukset pienemmällä eristepaksuudella. Lisäksi solumuovieristeitä käyttämällä voidaan vähentää matalaenergiarakenteisiin liittyviä kosteusteknisiä riskejä, sillä ne sietävät kosteutta huomattavasti paremmin kuin useimmat huokoiset eristeet.

Matalaenergiarakentamiseen siirtyminen asettaa uusia vaatimuksia myös rakentajille ja suunnittelijoille erityisesti rakennusfysiikan osaamisen muodossa. Tähän asti erityisesti uudisrakentamisessa on käytetty lähes poikkeuksetta rakenteiden perustyyppisiä, joiden kosteus- ja lämpötekniiseen suunnitteluun ei ole tarvinnut kiinnittää erityistä huomiota. Myös korjausrakentamisessa rakennusfysiikan osaaminen nousee arvoonsa, sillä energiakorjausten yhteydessä vanhojen rakennetyyppien ja nykyaikaisten rakennusmateriaalien yhdistäminen toimivalla tavalla edellyttää syvällistä rakennusfysiikan ymmärtämistä. Rakenteiden muuttuminen ja teknisen vaatimustason nousu lisäävät myös alan tutkijoiden ja tuotekehittäjien tarvetta.

Opinnäytetyön lähtökohtaiseksi tavoitteeksi asetettiin EPS-eristetyn, puurunkoisen ulkoseinärakenteen suunnittelu erityisesti pientalokäyttöön. Suunnittelun yhteydessä tuli ottaa huomioon erityisesti rakenteen kosteus- ja lämpötekniiset ominaisuudet, käytännön toteutettavuus, ääneneristävyys sekä matalaenergiarakenteille asetettujen ohjearvojen ja rakenteellisten vaatimusten täyttyminen. Aiheesta oli saatavilla rajoitetusti aikaisempaa tutkimusaineistoa johdettua EPS-eristeiden vähäisestä käytöstä puurunkoisissa seinärakenteissa.

## **1.2 Soklex Oy**

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli vuonna 1989 perustettu Soklex Oy, jonka toimialaan kuuluvat EPS-valmisteisten perustusmuottien sekä EPS-eristelevyjen valmistus. Yhtiö on täysin kotimaisessa omistuksessa ja sen kotipaikka on Saarijärvi, jossa myös tuotantolaitos sijaitsee (ks. kuvio 1). Myyntikonttorit ovat lisäksi Nummelassa sekä Nokiolla. Soklex Oy:n liikevaihto on noin 2,3 M€ ja yhtiön palveluksessa on tällä hetkellä 18 henkilöä.

Soklex Oy on Elinkeinoelämän Keskusliiton, Suomen Muoviteollisuus ry:n sekä Pakkausalan Ympäristörekisteri Oy:n jäsenyritys. Yhtiö on osallisena myös EPS-rakennuseristeteollisuus ry:n toiminnassa. Yrityksen tuotannon laadunhallinnassa noudatetaan ISO 9002:n mukaista laatujärjestelmää. Lisäksi yritys on sitoutunut Responsible Care - Vastuu Huomisesta-ohjelmaan.

Yhtiön alkuperäisen liikeidean ja päätuotantoartikkelin muodostavat VTT:n testaamat, valmiiksi raudoitettut ja lämpöeristetyt perustusmuotit, joilla valetaan sekä perustus että antura samanaikaisesti. Lämmöneristyksen johdosta valutyöt voidaan suorittaa myös talviolosuhteissa. Saatavilla on kymmeniä muottimalleja käytössä oleviin ulkoseinätyyppeihin soveltuena.



KUVIO 1. Soklex Oy:n toimitilat Saarijärvellä.

Soklex Oy:n tytäryhtiönä toimii vuonna 1992 perustettu Soklex-Urakointi Oy, joka on Rakennusteollisuus RT ry:n jäsenyritys. Yrityksen toimialana on Soklex-valmismuottiperustusten asentaminen, josta yhtiöllä on myös Rakentamisen laatu RALA ry:n pätevyystodistus. Myös Soklex-Urakointi Oy:n kotipaikka on Saarijärvi.

(Soklex Oy 2010.)

## 2 RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT

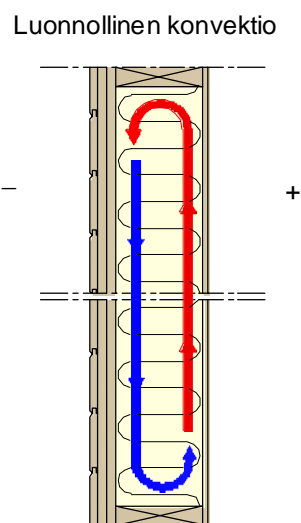
### 2.1 Ilmanpaineet ja ilmavirtaukset

Rakenteiden kosteus- ja lämpötekniiseen toimintaan vaikuttavat kosteuden ja lämmön lisäksi myös ilmanpaineet ja niiden vaihtelut. Ilmanpainesuhteiden merkitys rakenteiden toiminnan kannalta on huomattavin kylmänä vuodenaikana, jolloin sisä- ja ulkoilman välillä vallitsevat kosteus- ja lämpötilaerot ovat suuret. (Siikanen 1996, 31.)

#### Luonnollinen konvektio

Luonnollisella konvektiolla tarkoitetaan ilman tiheyseroista johtuvia ilmanpaineen vaihteluita sekä ilman kiertoliikettä. Esimerkiksi ulkoseinärakenteessa luonnollinen konvektio syntyy, kun huokoisessa lämmöneristeessä oleva ilma lämpenee lähellä seinän sisäpintaa ja lähtee virtaamaan ylöspäin. Kylmän ulkopinnan lähellä ilma puolestaan jäähtyy ja virtaa alaspäin. (Ks. kuvio 2.)

Luonnollinen konvektio lisää kondensoitumisriskiä rakenteen yläosassa, sillä ylöspäin virtaava lämmin ilma kuljettaa mukanaan kosteutta. Alaspäin virtaava jäähtynyt ilma puolestaan viilentää rakenteen alaosaa. (Siikanen 1996, 31.)



KUVIO 2. Luonnollinen konvektio

Luonnollisella konvektiolla on myös rakenteen lämmöneristävyttä heikentävä vaikutus, jonka voimakkuus riippuu lämmöneristeen ilmanläpäisevyydestä, eristekerroksen paksuudesta sekä rakenteen eri puolilla vallitsevista lämpötilaeroista. Mitä suuremmat lämpötilaerot ovat ja mitä paksumpi ja ilmaa läpäisevämpi eristekerros on, sitä suuremmat ovat luonnollisen konvektion aiheuttamat lämpöhäviöt. (Matalaenergiarakenteiden toimivuus 2008, 14.) Ilmiötä kutsutaan myös rakenteen *sisäiseksi konvektioksi*.

### **Pakotettu konvektio**

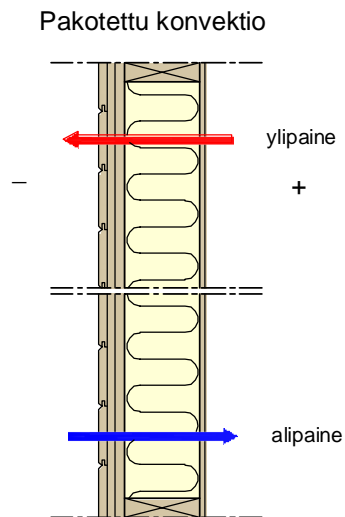
Pakotetuksi konvektioksi kutsutaan tuulen, ilmanvaihtolaitteiden sekä termisen nosteen aiheuttamien paine-erojen vaikutuksesta rakenteiden läpi tapahtuvaa ilmavirtausta. Pakotetun konvektion esiintyminen edellyttää paine-erojen lisäksi ilmavirtauksen mahdollistavaa epätiiviyttä rakennuksen vaipassa. (Siikanen 2008, 130.)

Tuulen aiheuttamien paine-erojen suunnat ja suuruudet ovat vaihtelevia ja riippuvat muun muassa tuulen voimakkuudesta ja rakennuksen korkeudesta. Puuskainen ja voimakas tuuli saattaa aiheuttaa lyhytaikaisesti suuria paine-eroja, mutta niistä aiheutuvat ilmavuodot ja kosteuden rakenteisiin kertyminen eivät yleensä muodostu haitallisiksi. Pitkäaikaisesti samasta suunnasta puhal-tavan tuulen aiheuttamat paine-erot sen sijaan vaikuttavat huomattavasti seinärakenteiden läpi tapahtuvaan kosteuden ja lämmön siirtymiseen. (Siikanen 1996, 33; Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet 2000, 27.)

Koneellinen ilmanvaihto aiheuttaa rakennuksen sisätiloihin joko yli- tai alipai-neen. Ylipainetilanteessa paine-erot pyrkivät tasoittumaan sisätiloista kohti ulkoilmaa aiheuttaen lämmön ja kosteuden siirtymistä rakenteisiin, mikäli vaipan ilmatiiviys ei ole riittävä. (Siikanen 1996, 34.) Alipainetilanne on rakenteiden kannalta suotuisampi, sillä sisäänpäin pyrkivällä ulkoilmalla on rakenteita kui-vattava vaikutus, koska se on yleensä viileämpää ja vähemmän kosteutta si-sältävää kuin sisäilma.

Terminen noste syntyy, kun rakennuksessa oleva lämpenevä ilma nousee ylöspäin aiheuttaen huonetilan yläosaan ylipainetta ja samanaikaisesti huoneti-lan alaosaan muodostuu alipaine (ks. kuvio 3). Ilmiön aiheuttamat paine-erot

ovat suhteellisen pieniä, mutta pitkäaikaisesti vaikuttaessaan niillä on merkitystä rakenteiden kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan kannalta. (Siikanen 1996, 32 - 33.) Pitkäaikainen lämpötilaerojen perusteella rakenteisiin tapahtuva ilmapuoto johtaa lämmityskaudella aina haitalliseen kosteuskertymään (Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet 2000, 27).



KUVIO 3. Pakotettu konvektio

## 2.2 Kosteuden siirtyminen rakenteissa

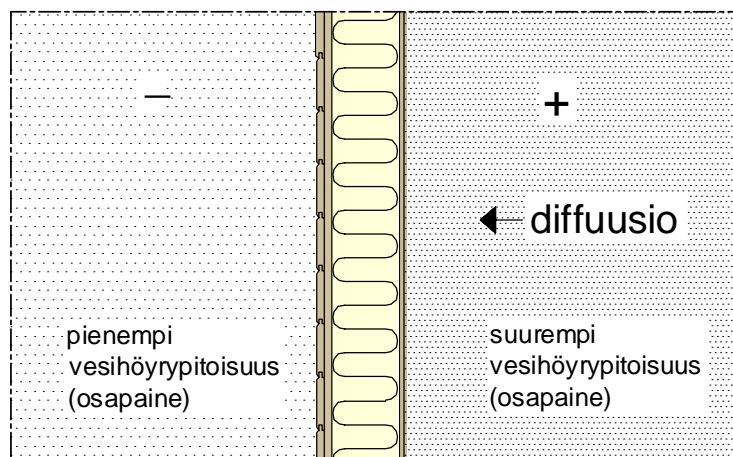
Kosteuden siirtyminen rakenteissa ja niiden läpi tapahtuu usein eri mekanismien samanaikaisesta vaikutuksesta. Kosteutta siirtyy pääasiassa vesihöyrynä ja vetenä, mutta myös lumen kulkeutuminen ilmapvirtausten mukana on syytä ottaa huomioon. Vesihöyryn oleellimmat siirtymismuodot ovat diffuusio ja konvektio. Veden siirtymismuotoja ovat muun muassa kapillaarivirtaus sekä ulkoisen paineen aiheuttama virtaus. (Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet 2000, 26 - 27.)

### Vesihöyryn diffuusio

Vesihöyryn diffuusio aiheutuu rakenteen eri puolilla sekä rakenteessa olevan ilman sisältämän vesihöyryn osapaine-eroista, jotka pyrkivät tasoittumaan rakenteen läpi suuremmasta osapaineesta kohti pienempää osapainetta (Ra-



kennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet 2000, 28). Diffuusion suunta on yleensä rakennuksen sisältä ulospäin (ks. kuvio 4), koska sisäilma on suuremman osan vuodesta lämpimämpää kuin ulkoilma ja sisältää useimmiten enemmän kosteutta (Rakenteiden elinkaarittekniikka 2001, 161). Lämpimänä vuodenaikana diffuusio voi tapahtua myös ulkoa sisäänpäin, mikäli ulkoilman lämpötila on sisäilman lämpötilaa korkeampi esimerkiksi rakennuksen sisäilman jäähtymisen takia. Mikäli vesihöyry pääsee siirtymään rakenteisiin haitallisessa määrin ilman poistumismahdollisuutta, on seurauksena muun muassa rakenteiden biologisena turmeltumisena ilmeneviä kosteusvaurioita.



KUVIO 4. Vesihöyryn diffuusio

### Vesihöyryn konvektio

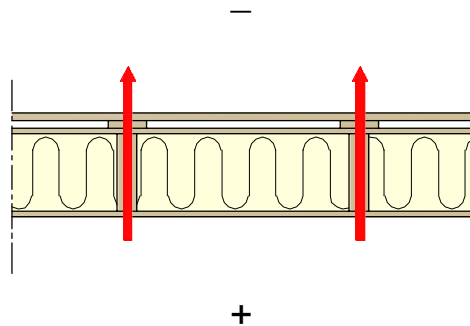
Vesihöyryn konvektiolla tarkoitetaan ilmanpaine-erojen aiheuttaman ilmavirtauksen mukana tapahtuvaa vesihöyryn siirtymistä. Konvektiovirtausten mukana siirtyvä kosteus määrä saattaa olla paikallisesti huomattavasti diffuusiolla siirtyvää kosteus määrää suurempi. Vesihöyryn konvektion aiheuttamat haitat ovat pääosin paikallisia kosteusvaurioita, jotka liittyvät rakenteiden epäjatkuuskohtiin, kuten saumoihin, läpivienteihin, rakoihin ja reikiin, joista sisäilma pääsee vuotamaan rakenteisiin puutteellisen tiivistyksen takia. (Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet 2000, 27.) Vesihöyryä siirtyy rakenteissa myös luonnollisen konvektion vaikutuksesta.

## 2.3 Lämmön siirtymismuodot

### Johtuminen

Lämmön johtuminen on molekyylien liike-energian siirtymistä molekyylistä toiseen. Koska johtuminen siirtää energiaa, voidaan puhua lämmön virtauksesta, vaikkei sellaista todellisuudessa tapahdukaan. Johtumisen suunta on suuremmasta lämpötilasta kohti pienempää lämpötilaa. (Lämmön- ja kosteuden-eristys 1984, 42).

Rakennuksessa lämpö pyrkii siis johtumaan rakennusosien välityksellä kohti ulkoilmaa pääosan vuodesta. Johtuva lämpömäärä riippuu muun muassa rakennusosien lämmönjohtavuudesta ja lämpötilaeroista niiden eri puolilla. Johtumisesta aiheutuvia lämpöhäviöitä lisäävät esimerkiksi lämmöneristeiden korkea kosteuspitoisuus sekä eristekerrosta läpäisevät kylmäsillat (Björkholtz 1997, 19, 35). Esimerkiksi puurunkorakenteissa saattaa kylmäsiltavaikutus syntyä runkotolppien kohdalla (ks. kuvio 5), koska puun lämmönjohtavuus on huomattavasti nykyaikaisten eristeiden lämmönjohtavuutta suurempi.



KUVIO 5. Kylmäsiltavaikutus puurunkorakenteessa

### Säteily

Säteilyssä energiaa siirtyy valon nopeudella sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä ilman väliainetta. Rakennustekniikassa lämpösäteilyä ilmenee esimerkiksi lämmitysjärjestelmissä sekä auringon lyhytaaltoisen säteilyn muodossa, joka aiheuttaa muun muassa lämpöliikkeitä rakennusten julkisivuissa ja vesikatteissa. (Björkholtz 1997, 12, 38.)

## **Konvektio**

Konvektio on lämmön siirtymistä nesteen tai kaasun virtauksen mukana. Kun kiinteän pinnan ja sen ohi virtaavan väliaineen välillä on lämpötilaero, lämpöä siirtyy konvektiolla pintaan tai siitä pois. Myös lämpöä, kuten kosteuttakin, siirtyy rakenteissa sekä pakotetun että luonnollisen konvektion vaikutuksesta. Käytännössä puhdasta luonnollista konvektiota esiintyy rakenteissa harvoin, sillä virtaukset ovat yleensä molempien konvektiomuotojen yhdistelmiä. (Lämmön- ja kosteudeneristys 1984, 43.)

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että lämmön ja kosteuden siirtyminen ovat samanaikaisesti tapahtuvia ilmiöitä, jotka vaikuttavat toisiinsa. Erityisesti rakenteen eri osien lämpötekniset ominaisuudet kuten myös ilmavirtaukset vaikuttavat voimakkaasti rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. (Rakenteiden elinkaaritekniikka 2001, 161.)

## **2.4 Rakenteiden ilmaääneneristävyys**

### **Ääneneristys ja äänen absorptio**

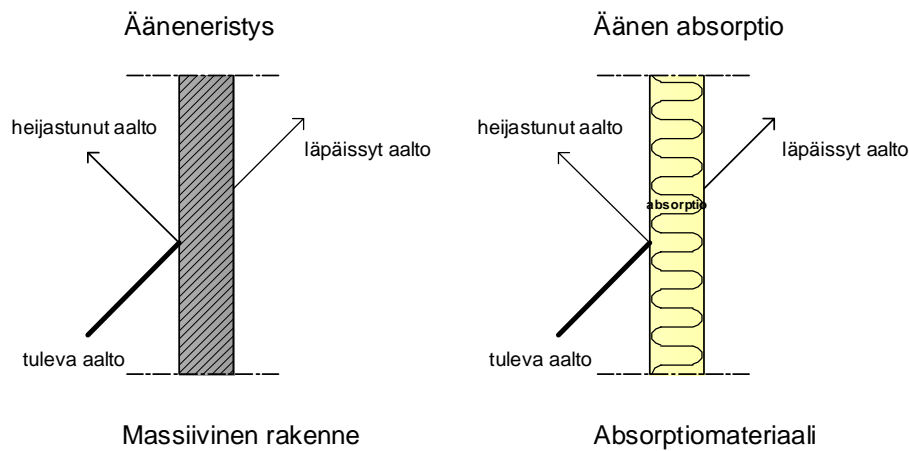
Rakenteiden ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat kaksi toisistaan erotettavaa tekijää, jotka ovat

- ääneneristys
- äänen absorptio.

Ääneneristys estää äänen kuulumista tilasta toiseen. Ääntä eristävien rakenteiden ja rakenneosien toiminta perustuu äänen heijastumiseen takaisin niiden pinnasta (ks. kuvio 6), ja niiden materiaaliominaisuuksia ovat tiiviys, kova pinta sekä suuri massa. Tyypillisiä esimerkkejä ovat tiili- ja betonirakenteet sekä kipsikartonkilevyt. (Rakennusten akustinen suunnittelu 2007, 46 - 49.)

Äänen absorptio vaimentaa ääntä. Osa absorboivaan materiaaliin osuvista ääniaalloista heijastuu ja osa muuttuu aineen sisäisen kitkan vaikutuksesta lämmöksi (ks. kuvio 6). Vaimennusteho riippuu materiaalin virtausvastuksesta, tiheydestä sekä ainekerroksen paksuudesta. Absorptiomateriaaleina käytetään

pääosin huokoisia eristeitä sekä huokoisia rakennuslevyjä korkeiden äänitaajuuksien vaimentamiseksi. (Siikanen 1996, 147.)



KUVIO 6. Ääneneristys ja äänen absorptio

### Resonanssi-ilmio

Ilmääni on pitkittäisaaltolina ilmassa etenevää aaltoliikettä eli ilmanpaineen vaihtelua, jolla on tietty värähtelytaajuus. Myös rakenteilla on niille ominainen taajuus, jolla ne värähtelevät. Rakenteen ilmaaneneristävyys on heikko, mikäli siihen osuvan äänen ja rakenteen värähtelyt ovat resonanssissa keskenään vahvistaen toisiaan. Tästä syystä rakenteen ominaistajuus ei saa olla äänen yleisimmällä taajuusalueella, 125 - 3000 Hz. (Siikanen 1996, 115 - 116.) Rakenteiden ominaistajuuteen vaikuttavat muun muassa rangon joustavuus ja rankajako.

### Ilmaaneneristykseen käytettäviä rakenteita

Rakenteen ilmaaneneristävyteen vaikuttavat lisäksi rakennusosan paino, kerroksellisuus, tiiviys, reiät, kytkennät sekä liittyminen muihin rakenteisiin. Ääneneristykseen käytetään toiminnallisilta ominaisuuksiltaan erityyppisiä rakenteita, joita ovat *yksinkertaiset massiiviset rakenteet*, joiden ääneneristävyys riippuu pääasiassa niiden massasta ja tiiviydestä, sekä *kaksi- tai useampikerroksiset rakenteet*, joiden ääneneristävyteen vaikuttavat lisäksi myös kerrosten jäykkyys ja keskinäinen etäisyys, väliaine sekä kytkennät. Lisäksi ääneneristykseen on käytetty massiivisia rakenteita, joihin on lisätty absorboiva kerros. (Siikanen 1996, 124.)

## 3 ULKOSEINÄRAKENTEEN SUUNNITTELUPERUSTEET

### 3.1 Ulkoseinärakenteen kosteustekniset suunnitteluperusteet

Rakentamistoimintaa ohjataan lainsäädännöllisin keinoin. Rakennuslainsäädännön perustana on Maankäyttö- ja rakennuslaki sekä tätä täydentävä asetus. Uudisrakentamista koskevat velvoittavat määräykset ja ohjeet on annettu Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Rakennusten kosteusteknistä toimintaa koskevat määräykset ja ohjeet on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa *C2 Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998*, jota täydentää *Ympäristöopas 51, Kosteus rakentamisessa*.

#### **Vesihöyryn diffuusion ja konvektion haittavaikutusten estäminen**

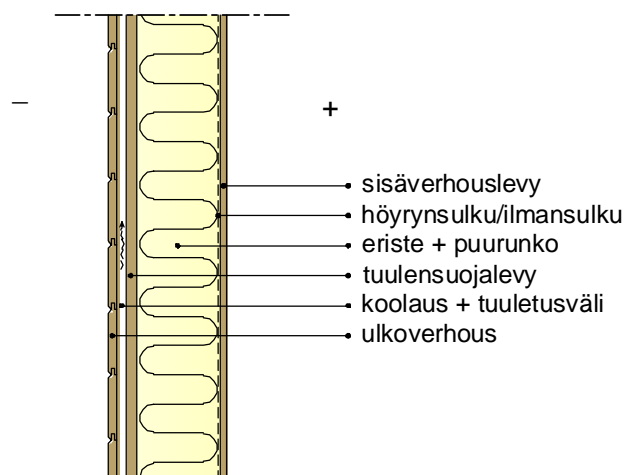
Ulkoseinän ja sen eri kerrosten vesihöyrynvastusten ja ilmatiiviyden on oltava riittävät, jottei seinän kosteuspitoisuus nouse liian korkeaksi sisäilman vesihöyryn diffuusion tai konvektion vaikutuksesta. Mikäli seinärakenne voi läpäistä haitallisessa määrin sisäilman vesihöyryä tai ilmaa, asennetaan rakenteeseen tarkoituksenmukaisiin kohtiin seuraavat rakennekerrokset:

- höyrynsulku
- ilmansulku
- tuulensuoja.

Höyrynsulun tehtävä on estää diffuusion vaikutuksesta siirtyvän vesihöyryn haitallinen pääsy rakenteeseen. Vesihöyryn konvektion haittavaikutukset estetään tiiviillä ilmansululla sekä rakennuksen painesuhteiden hallinnalla, joiden avulla rakennus voidaan pitää pääosan ajasta alipaineisena. Höyrynsulku ja ilmansulku asennetaan yleensä rakenteen lämpimään osaan lähelle sisäpintaa. Höyrynsulku voidaan asentaa myös lämmöneristekerrokseen, mutta ratkaisu on suunniteltava erikseen ottaen huomioon rakennetta ympäröivät olosuhteet ja erityisesti rakennusaikaisen kosteuden poistuminen. (Kosteus rakentamisessa 1999, 30 - 31.)

Lämmöneristekerroksen ulkopintaan tai tarkoituksenmukaiseen kohtaan eristyksen sisään asennettavan tuulensuojan tehtävä on suojata lämmöneristys ulkopuolelta tulevilta tuulen ja lämpötilaerojen aiheuttamilta ilmavirtauksilta. Tuulensuojan vesihöyrynvastuksen tulee olla riittävän pieni rakennuksen sisältä siirtyvän vesihöyryn, rakennuskosteuden sekä satunnaisten kosteuskuormien kuivumisen varmistamiseksi. (Kosteus rakentamisessa 1999, 30 - 31.)

Seinärakenne on suunniteltava ja toteutettava niin, että ulkoverhouksen taakse ei joudu vettä, tai siten, että ulkoverhouksen taakse tunkeutuva vesi ja kosteus pääsevät poistumaan rakenteita vahingoittamatta. Mikäli ulkoseinärakenteessa on lauta- tai levyverhous, tuuletetaan verhouksen taakse joutuva kosteus ulkoilmaan yhtenäisen tuuletusvälin kautta (ks. kuvio 7). Myös rungon aluspuun kuivumismahdollisuudesta on huolehdittava. (RakMK C2 1998, 10 - 11.)



KUVIO 7. Tyypillinen puurunkoinen ulkoseinärakenne

Rakennesuunnittelussa on otettava huomioon vesihöyryn diffuusion ja ilmavirtausten aiheuttamat riskit rakenteiden kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan kannalta. Rakenne saattaa olla toimintavarma ilman erillistä höyrinsulkua, ilmansulkua ja tuulensuojaa, sillä myös jotkut muut ainekerrokset tai rakenneosat voivat hoitaa näiden tehtävät. Toimivuus voi perustua rakenteen tasa-aineisuuteen, pintakerroksen suureen vesihöyrynvastukseen tai siihen, että pitkällä aikavälillä rakenteeseen ei kerry haitallista määrää kosteutta. Mikäli toimivuudesta ei kuitenkaan ole riittävää kokemusperäistä varmuutta, on asias-

ta esitettävä selvitys, joka voi olla laskennallinen, kokeellinen tai näiden yhdistelmä. (Kosteus rakentamisessa 1999, 16, 30 - 31.)

Suunnittelussa käytetyt laskentamenetelmät soveltuvat kuitenkin rajoitetusti kosteusteknisiin tarkasteluihin. Esimerkiksi niin sanottu kastepistetarkastelu ei ota huomioon kosteuden hygroskooppista sitoutumista rakenteeseen eikä muuttuvissa olosuhteissa tapahtuvaa kosteuden siirtymistä. Menetelmää voidaan kuitenkin käyttää esimerkiksi höyrynsulun karkeaan mitoitukseen asettamalla lähtöarvot varmalle puolelle. (Kosteus rakentamisessa 1999, 16.)

### **Rakenteiden kosteustekninen mitoitus**

Kosteusteknisen mitoituksen lähtökohtana on, että rakenteet suunnitellaan siten, ettei niiden kosteuspitoisuus missään vaiheessa aiheuta oleellista haittaa rakenteiden toiminnalle ja rakennuksen käytölle. Lisäksi suunnittelussa varaudutaan siihen, että rakenteet saattavat kastua satunnaisesta syystä ja niillä tulee olla kyky kuivua riittävän nopeasti. Teknisiä ratkaisuja suunniteltaessa tulee ottaa huomioon seuraavat kosteustekniseltä toiminnaltaan erilaiset jaksot rakennuksen elinkaareissa:

- rakentamisvaihe, jolloin ulkoinen sekä materiaaleista vapautuva kosteusrasitus on korkeimmillaan
- rakennuksen kuivumisvaihe, jolloin rakenteisiin kohdistuva kosteusrasitus saattaa olla olennaisesti käytönaikaista räsitus suurempi
- rakennuksen normaali käyttövaihe, jolloin rakennuskosteus on kuivunut ja rakenteiden kosteustekninen toiminta seuraa sääolosuhteiden ja sisäilmaston muutoksia.

Kosteusteknisen toiminnan suunnittelussa rakennusaikaisen kosteuden kuivumismahdollisuus on usein määräävä tekijä. Normaaleissa käyttöoloissa voidaan tiettyinä aikavälinä sallia kosteuden kertyminen rakenteisiin, mikäli sillä on mahdollisuus poistua rakenteista myöhemmin kuivumisjakson aikana. (Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet 2000, 41.)

Kastepistelaskelmien lisäksi rakenteiden kosteusteknisessä mitoituksessa käytetään muun muassa epästationäärisen kosteudensiirtymisen hallitsevia tieto-

koneohjelmia, joista monipuolisimmat laskevat kosteuden, lämmön ja ilmavirtausten samanaikaiset vaikutukset rakenteissa. Kosteusteknistä toimintaa on mahdollista tutkia myös laboratoriokokein erikseen tätä varten rakennettujen laitteistojen avulla. Luotettavin menetelmä on tutkia rakenteiden toimivuutta todellisissa olosuhteissa, mutta tämä edellyttää usein koerakennuksen rakentamista. Pääsääntöisesti rakennustuotannossa on kuitenkin käytetty rakenteiden perusratkaisuja, joiden kosteustekninen toiminta on ollut tiedossa, eikä niitä näin ollen ole tarvinnut erikseen tutkia tai mitoitaa.

### 3.2 Lämpötekniinen suunnittelu

Rakennusten lämpötekniisen suunnittelun ja toteutuksen lainsäädännölliset perusteet on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa *C3 Rakennusten lämmöneristys, määräykset 2010* sekä osassa *C4 Lämmöneristys, ohjeet 2003*. Rakennusten energiankulutusta koskevien vaatimusten täyttämistä on esitetty lisäksi ohjeita Ympäristöministeriön julkaisussa *Tasauslaskentaopas 2007, Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen*.

#### Lämmönläpäisykerroin

Rakenteiden lämpötekniisen suunnittelun perustana on rakennusosien lämmönläpäisykertoimien määrittäminen. Lämmönläpäisykertoimen eli U-arvon avulla voidaan arvioida laskennallisesti rakenteiden läpi siirtyvää lämpömäärää. Lämmönläpäisykerroin lasketaan materiaalien lämmönjohtavuuksien sekä kerrospaksuuksien avulla. Lisäksi laskennassa otetaan huomioon seuraavien tekijöiden vaikutus rakenteen lämmöneristävyteen:

- rakennusosan epätasa-aineisuus
- lämmöneristyksen ilmavirtaukset
- kylmäsillat.

Lämmönläpäisykerroin määritetään käyttäen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 esitettyä laskentamenetelmää tai vaihtoehtoisesti vastaavaa SFS-EN-standardissa esitettyä laskentamallia. Tarvittaessa rakenteen lämmönlä-



päisykerroin voidaan määrittää myös muulla hyväksyttävällä menetelmällä tai kokeellisesti. (RakMK C4 2003, 4 - 6.)

### **Lämmöneristysvaatimukset**

Lämmönläpäisykertoimien avulla arvioidaan rakennuksen lämmöneristyksen vaatimustenmukaisuutta. Vuoden 2010 alusta voimaan tulleiden määräysten mukaan esimerkiksi lämpimän rakennuksen ulkoseinän lämmönläpäisykerroimen vertailuarvo on  $0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$  (RakMK C3 2010, 3.2). Vertailuarvoilla tarkoitetaan rakennusosille asetettuja enimmäisarvoja, joiden avulla osoitetaan rakennuksen lämmöneristysvaatimusten täyttyminen. Mikäli vertailuarvoilla laskettu vaipan lämpöhäviö ylittyy, voidaan määräystenmukaisuus saavuttaa esimerkiksi parantamalla ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhdetta tai pienentämällä rakennuksen vuotoilman lämpöhäviötä (RakMK C3 2010, 3.1).

### **Lämmöneristyksen suunnittelu ja toteutus**

Ulkoseinärakenteiden osalta lämmöneristyksen suunnittelussa ja toteutuksessa erityisiä tekijöitä ovat seuraavat:

- Lämmöneristeiden tulee olla asetettujen vaatimusten mukaisia ja käyttötarkoituksiin soveltuvia. Suunnitelmissa esitetään vaatimusten täyttymisen kannalta riittävät tiedot käytettävistä lämmöneristeistä ja tarvittaessa eristystyön suorittamisen yksityiskohdista.
- Lämmöneristeen tulee täyttää eristetila kokonaan ja olla kauttaaltaan kiinni lämpimässä pinnassa.
- Useassa kerroksessa ladotun eristyksen saumat limitetään ja eristykseen jäävät raot ja ontelot täytetään samalla tai vastaavalla eristeellä.
- Eristeet suojataan kastumiselta ja vaurioilta. Eristystyö ajoitetaan siten, että lämmöneristystä suojaavat rakenteet ovat valmiina tai ne tehdään viiveettä eristämisen jälkeen. Tarvittaessa käytetään tilapäissuojauksia.
- Tuulensuoja on lämmöneristyksessä kiinni oleva ja sen kauttaaltaan peittävä kerros, jonka tiivyydestä on huolehdittava. Levyistä tehtävän tuulensuojan saumat pyritään sovittamaan jäykkää pintaa vasten.
- Tuulensuojan yläreuna on usein tarkoituksenmukaista nostaa yläpohjan lämmöneristyksen yläpinnan yläpuolelle eristyksen reunapintojen suojaamiseksi.

- Jos rakenteessa ei ole erillistä ilmansulkua, on huolehdittava, että ainakin yksi lämmöneristyksessä kiinni oleva kerros on ilmanpitävyydeltään riittävä toimiakseen ilmansulkuna.

(RakMK C4 2003, 7 - 8).

### 3.3 Rakennuksen ulkovaipan ääneneristysvaatimukset

#### Meluntorjunta rakentamisessa

Lainsäädännölliset perusteet uudisrakennusten ääniteknistä toteutusta varten on esitetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa *C1 Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet 1998*. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyydelle ei kuitenkaan ole annettu yleisiä määräyksiä, sillä ulkopuolisen melun torjunta on ensisijaisesti yhdyskuntasuunnitteluun kuuluva tehtävä. Rakennusten ulkopuolella vallitseva äänitaso tulisi saada riittävän alhaiseksi kaavoituksellisin keinoin esimerkiksi sijoittamalla rakennukset riittävän etäälle melulähteistä tai rakentamalla melusteitä. Valtioneuvoston antamien ohjearvojen mukaan ulkopuolinen melutaso ei saisi asuntoalueilla ylittää seuraavia arvoja:

- päivällä 55 dBA
- yöllä 50 dBA.

Rakennuksen sisällä vallitsevan melutason ohjearvot ovat

- päivällä 35 dBA
- yöllä 30 dBA.

Rakennusten ulkopuolella melutaso on kuitenkin usein kohonnut tai tulee kohtaan ohjearvoja korkeammalle. Tästä syystä rakennussuunnittelun yhteydessä on usein tarpeellista selvittää ulkovaipan ääneneristävyiden tarve, vaikka sellaista ei erikseen vaadittaisikaan. (Ääneneristuksen toteuttaminen 2003, 150 - 154.)

### **Kaavamääräykset**

Alueilla, joissa ulkopuolinen melutaso ylittää annetut ohjearvot, asetetaan rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyysvaatimukset kaavamääräyksin. Kaavamääräys tarkoittaa ulkona vallitsevan ja sisällä sallitun A-painotetun keskiäänitason eroa. Jos ulkona vallitsee esimerkiksi 65 dB:n keskiäänitaso ja sisällä sallittava keskiäänitaso on 35 dB, saadaan rakennuksen ulkovaipan ääneneristystä koskevan kaavamääräyksen lukuarvoksi  $65 \text{ dB} - 35 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$ . Ulkovaipan ääneneristystä koskeva kaavamääräys tarkoittaa vaipan kaikkien rakennusosien, kuten ulkoseinärakenteen, ikkunoiden, ikkunaovien ja korvausilmaventtiilien muodostaman kokonaisuuden ääneneristävyttä. (Rakennusten akustinen suunnittelu 2007, 141 - 143.)

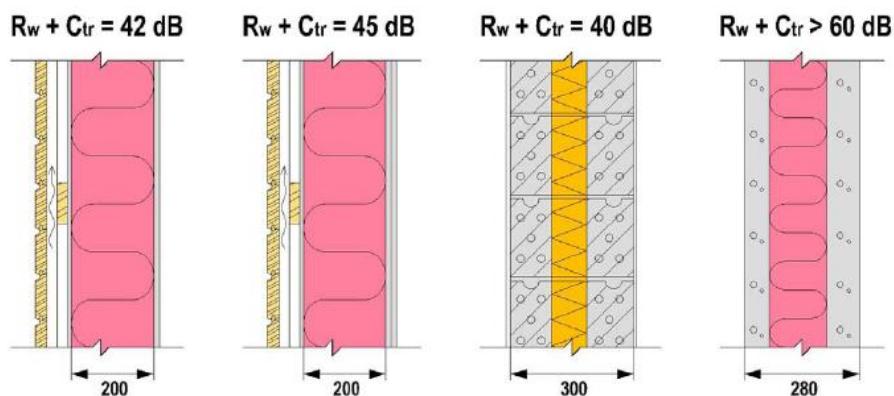
Kaavamääräyksiä ei yleensä anneta, jos ulkona vallitsevan ja sisällä sallittavan äänitason ero on alle 30 dB. Kaavamääräyksen ollessa 30 - 35 dB voidaan tarvittava ääneneristävyys yleensä toteuttaa käyttämällä normaaleja rakenteita. Jos äänitasoerovaatimus on huomattavan korkea (40 dB), johtaa määräys usein tilanteeseen, jossa normaalituotannossa olevia ikkunoita ja ikkunaovia ei voida käyttää. Tavallisesti asuinrakennuksia ei rakenneta näin korkeata vaatimusta edellyttäville alueille. (Rakennusten akustinen suunnittelu 2007, 142.)

### **Ilmaääneneristysluvut**

Rakennuksen sisällä tilojen välisen ilmaääneneristävyyden ilmoittamiseen käytetään ilmaääneneristyslukua  $R_w$ , joka ei kuitenkaan sovellu käytettäväksi rakennuksen ulkovaipan ääneneristävyyden ilmoittamiseen, sillä esimerkiksi tieliikennemelu muodostuu erilaisista äänilähteistä ja sisältää kaikkia äänentaajuuksia. Totuudenmukaisemman arvon ilmoittamiseksi ulkovaipan ilmaääneneristyslukuun lisätään spektripainotusermi. Näissä tapauksissa ilmaääneneristysluvut ovat seuraavat:

- $R_w + C_{tr}$ , jota käytetään ulkopuolisen melun ollessa tyypillistä tieliikennemelua (ks. kuvio 8)
- $R_w + C$ , joka soveltuu käytettäväksi esimerkiksi raide- ja lentoliikennemelun yhteydessä.

(Ääneneristyksen toteuttaminen 2003, 151 - 152.)



KUVIO 8. Esimerkkejä ulkoseinärakenteiden ilmajääneristävyksistä (Lahtela 2008)

### Ulkovaipan ääneneristyksen suunnittelu ja mitoitus

Rakennuksen ulkovaipan ääneneristyksen suunnittelusta ei ole olemassa viranomaismääräyksiä. Ympäristöoppaassa 108/2003 on esitetty taulukkomuotoinen mitoitusmenetelmä, jolla saadaan kaavamääräyksen mukaisesta äänitasoerosta ilmajääneristysvaatimus rakennusosalle. Käytössä on ollut myös niin sanottu tasoeromenetelmä, joka johtaa useimmissa tapauksissa samaan lopputulokseen. Yksittäisten rakennusosien ilmajääneristysluvat voidaan määrittää laboratoriokokein tai laskennallisin menetelmin. (Rakennusten akustinen suunnittelu 2007, 144 - 147.)

## 3.4 Matalaenergiarakentaminen

Keski-Euroopasta lähtöisin olevia matalaenergiarakentamisen periaatteita on kehitetty Suomessa jo pitkään niiden kuitenkin saamatta laajempaa suosiota. Parin vuoden aikana aihe on kuitenkin saanut runsaasti julkisuutta tiedotusvälineissä. Asian taustalla ovat rakennusten kiristyvät energiatehokkuusvaatimukset sekä viranomaisten tavoitteet siirtyä matalaenergiarakentamiseen myös normitasolla. Aihepiirin käsittely tiedotusvälineissä on kuitenkin ollut varsin hajanaista ja osittain puutteellista. Epäselvyyttä ovat aiheuttaneet erityisesti matalaenergiarakentamiseen liittyvä terminologia sekä rakennusten tekniseen tasoon liittyvät vaatimukset. Loppuvuodesta 2009 ilmestyneessä julkaisussa

*RIL 249 - 2009 Matalaenergiarakentaminen* aihetta on käsitelty perusteellisesti yksissä kansissa.

### **Tausta ja tavoitteet**

Matalaenergiarakentamisen taustalla ovat yleiskansalliset päästörajoitukset ja energiansäästötavoitteet sekä kohoavat energian hinnat, jotka edellyttävät energian käytön rajoittamista sekä rakennusten energiankulutuksen vähentämistä. Matalaenergiarakentamisen tavoitteina ovat kestävä kehitys ja ilmastomuutoksen hillitseminen rakennusten energiatehokkuutta parantamalla. Rakennusten energiatehokkuusvaatimuksia kiristettiin vuoden 2010 alussa noin 30 - 40 % ja seuraava tiukennus on tulossa noin kahden vuoden kuluttua, jolloin on tarkoitus siirtyä matalaenergiarakentamiseen myös normitasolla. Tavoitteena on myös lisätä kiinteistöjen omaenergiantuotantoa uusiutuvilla energiamuodoilla, kuten maalämmöllä ja aurinkoenergialla (Matalaenergiarakentaminen 2009, 255 - 256.)

### **Matalaenergiakonseptit**

Matalaenergiarakentamisessa voidaan erottaa kaksi energiatehokkuuden tavoitetasoa eli kaksi erilaista rakennuskonseptia. Rakennukset jaetaan kahteen luokkaan, jotka määrittävät tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen nettoenergian ominaistarpeen sekä ostoenergian ominaiskulutuksen perusteella seuraavasti:

- matalaenergiatalo (enintään 50 kWh/(m<sup>2</sup>a))
- passiivitalo (enintään 25 kWh/(m<sup>2</sup>a)).

Luokitukseen liittyy olennaisesti myös rakennusvaipan ja ilmanvaihdon teknisiä ohjearvoja, kuten rakennusosien lämmönläpäisykertoimet sekä vaipan ilmanvuotoluku. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 28 - 34.)

### **Energiatehokkuuden tekninen perusta**

Matalaenergiarakentaminen perustuu kokonaisvaltaiseen rakennuskonseptin energiatehokkuuteen, joka on tarkoitus saavuttaa rakennuksen arkkitehtuurin sekä rakenne- ja talotekniikkajärjestelmien yhteistoiminnan tuloksena. Energiatehokkuuden teknisenä perustana ovat ensi sijassa

- rakennuksen vaipan tiiviys
- ulkovaipan lämmöneristävyys ja kylmäsiltojen poistaminen
- riittävän tehokas koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä, joka on varustettu lämmön talteenotolla.

Suunnittelun keskeisinä periaatteina ovat yksinkertaisuus ja varmatoimisuus. Lisäksi matalaenergiarakentaminen edellyttää laadukasta suunnittelu- ja toteutusprosessia sekä tehokasta laadunvarmistusta. Esimerkiksi ulkovaipan ilmanpitävyys varmistetaan mittaamalla kohteen ilmanvuotoluku jo rakennusvaiheessa, jolloin tiiviyttä voidaan vielä parantaa. Vuotokohtia etsitään tarvittaessa myös lämpökuvauksen avulla. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 17, 168.)

### **Rakennesuunnittelu**

Suurten eristepaksuuksien ja teknisten vaatimuksien vuoksi kosteus- ja lämpötekninen toimivuus on keskeisessä asemassa matalaenergiarakenteiden suunnittelussa. Rakenteiden toimivuuden ja suunnittelun oleellisia tekijöitä ovat esimerkiksi rakenteiden kuivumiskyvyn varmistaminen sekä konvektiovirtausten lämmöneristävyttä heikentävien vaikutusten huomiointi. Erityistä huomiota tulee lisäksi kiinnittää muun muassa rakenteiden työmaatoteutukseen, rakenteiden yksinkertaisuuteen, ovi- ja ikkunaratkaisuihin sekä perustusten eristämiseen. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 146 - 160.)

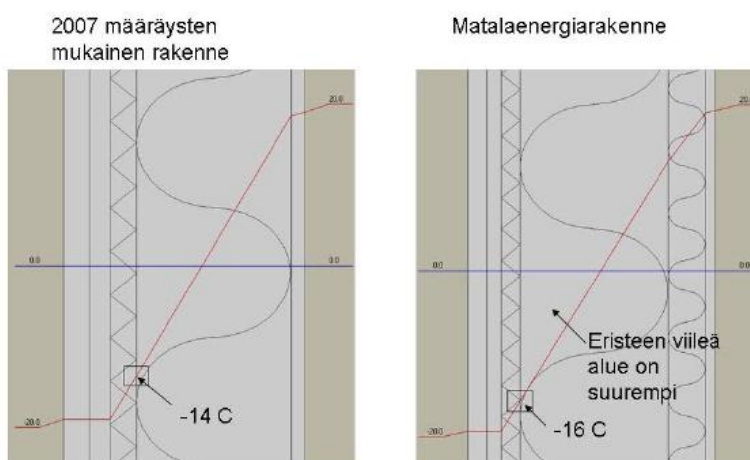
### **Matalaenergiarakenteiden toimivuus**

Matalaenergiarakenteiden toimivuus on herättänyt keskustelua ja epäilyjä erityisesti rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden osalta. Epävarmuutta ovat osaltaan aiheuttaneet myös eri asiantuntijatahojen aiheesta esittämät keskenään ristiriitaiset lausunnot. Ympäristöministeriön vuonna 2008 Tampereen teknillisellä yliopistolla aiheesta teettämässä selvityksessä on esitetty erityisesti ulkoseinärakenteiden osalta muun muassa seuraavia epävarmuustekijöitä:

- Rakenteiden paksunemisen välttäminen saattaa aiheuttaa alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavien eristeiden käyttöönoton ”uusissa” paikoissa. Tämä saattaa johtaa rakenteiden ääneneristävyden merkittävään heikkenemiseen sekä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan hallitsemattomuuteen.

- Suurten eristepaksuuksien takia puurakenteisissa ulkoseinissä rungon toteutustapa muuttunee joko levyuuma- tai ristikkoratkaisuksi, jolloin rakenteen sisäpuolinen lisäkoolaus ja sen mukanaan tuomat kosteus- ja lämpötekniset edut menetetään. Yksitolpparungon tilalle saattaa tulla myös eriytetty kaksoisrunko, jolloin rakennuksen jäykistämisessä voi ilmetä ongelmia.
- Tähän asti rakenteita on kehitetty pienin askelin, jolloin kehityksen tuomat epäkohdat ovat olleet suhteellisen vähäisiä. Kaavailtujen suurten muutosten seurauksena rakenteisiin joudutaan tekemään kerralla suuria muutoksia, jonka johdosta monet rakentamisen onnistumisen kannalta välttämättömät rutiinit katoavat. Seurauksena on todennäköisesti joukko epäonnistuneita rakenneratkaisuja.
- Kosteusteknisten haittavaikutusten lisäksi huokoisessa lämmöneristeessä tapahtuva sisäinen konvektio heikentää rakenteen eristyskykyä suhteellisesti enemmän eristepaksuuden kasvaessa. Heikennyksen vaikutus ulkoseinärakenteen U-arvoon saattaa olla jopa useita kymmeniä prosentteja epäideaalisesti asennetussa lämmöneristeessä.
- Ulkoseinän eristepaksuutta lisättäessä riski kosteuden kondensoitumiselle ja mikrobien kasvulle tuulensuojan sisäpinnassa kasvaa, koska pinnan lämpötila laskee lähemmäs ulkoilman lämpötilaa (ks. kuvio 9).

(Matalaenergiarakenteiden toimivuus 2008.)



KUVIO 9. Lämpötilaerot tuulensuojien sisäpinnissa (Matalaenergiarakentaminen 2009, 159)

### 3.5 EPS-eristeet

#### Valmistus ja käyttökohteet

EPS-eristeet ovat muottimenetelmällä tai jatkuvatoimisella linjalla valmistettuja solumuovieristeitä, joiden raaka-aineena käytetään öljypohjaista polystyreeniä. Polystyreenihelmet paisutetaan valmistusprosessissa vesihöyryn avulla (expanded polystyrene). EPS-eristeen suljettu solurakenne saadaan aikaan käyttämällä ponneaineena pentaania, joka korvautuu ilmalla valmistuksen yhteydessä. Lopullisessa tuotteessa muoviraaka-aineen määrä on 2 - 5 tilavuusprosenttia. (RT 36 - 10690 1999, 1.)

EPS-eristeitä käytetään talonrakentamisessa yleisesti lattia- ja routaeristeinä, mutta ne soveltuvat myös esimerkiksi seinä- ja kattorakenteisiin, joissa käytetään mittapysyvämpiä ja palonestokäsiteltyjä S-laadun eristeitä, joiden jälkikutistumista on ehkäisty tehdasvarastoinnin tai lämpökäsittelyn avulla. Muita käyttökohteita ovat esimerkiksi lämpöharkot, sandwich-elementit, tekniset eristykset sekä keventeet. (RT 36 - 10690 1999, 1 - 3.)

#### Materiaaliominaisuudet

EPS-eristeet ovat kevyitä, jäykkiä ja kuormitusta kestäviä eristelevyjä, joiden hyvä lämmöneristyskyky perustuu solurakenteessa paikallaan pysyvän ilman alhaiseen lämmönjohtavuuteen. Eristeiden ilmanläpäisevyys on pieni ja niitä voidaan näin ollen käyttää myös tuulensuojaeristeinä. Vesihöyrynläpäisevyydeltään EPS on muita solumuovieristeitä läpäisevämpi, mutta kuitenkin huomattavasti tiiviimpi kuin huokoiset lämmöneristeet. EPS-eristeet eivät myöskään ime itseensä vettä kapillaarisesti eivätkä ne lahoa tai mätäne, eivätkä sisällä homesienien tarvitsemia ravintoaineita. Kemiallisen kestäväytensä puolesta EPS-eristeet kestävät tavallisia happoja ja emäksiä, mutta eivät orgaanisia liuottimia, kuten bensiiniä tai mineraaliöljyä. EPS luokitellaan palavaksi rakennusmateriaaliksi ja sen ominaisuuksiin kuuluvat myös valmistuksen jälkeinen kutistuminen sekä lämpölaajeneminen. (RT 36 - 10690 1999, 2.)

#### EPS-eristeiden käyttö puurunkorakenteissa

EPS-eristeiden käyttö puurunkorakenteissa on tähän asti ollut vähäistä johtuen muun muassa eristeen jäykkyydestä, joka on vaikeuttanut levyjen asentamista



tiivisti runkoon. Myös eristeiden jälkikutistuminen sekä lämpöliikkeet yhdessä puurungon kosteuselämisen kanssa ovat aiheuttaneet polyuretaanivaahdolla toteutettujen saumojen aukeamisia, jolloin rakenteen ilmatiiviyys ja lämmöneristävyyys on heikentynyt oleellisesti. Lisäksi EPS:n ääneneristys- ja absorptio-ominaisuudet ovat muun muassa sen keveydestä ja suljetusta solurakenteesta johtuen heikot, joten eristeiden käyttö saattaa olla rajoitettua kohteissa, joissa vaipalle on asetettu ääneneristävyyksivaatimuksia. Myös palomääräykset saattavat joissain tapauksissa asettaa esteitä EPS-eristeiden käytölle puurakenteissa. (Lahdensivu 2009b, 471.)

### **EPS-eristeiden etuja**

EPS-eristeiden käytöllä puurakenteissa on kuitenkin myös selkeitä etuja, jotka nousevat merkittäviksi erityisesti matalaenergiarakenteiden yhteydessä:

- EPS-eristeiden alhaisen lämmönjohtavuuden ansiosta niiden käytöllä on mahdollisuus saavuttaa suhteellisen hoikkia rakenteita, jolloin voidaan välttää muun muassa tarpeetonta puutavaran käyttöä sekä nousevia kuljetuskustannuksia.
- EPS-eristeet eivät ole yhtä herkkiä kosteusvaurioille kuin puurakenteissa yleisesti käytetyt huokoiset eristeet.
- Solumuovieristeillä on mahdollista toteuttaa hyvin ilma- ja vesihöyrytiivitä rakenteita.
- Paksuissa eristekerroksissa saattaa tapahtua painumista, joka voidaan välttää jäykkiä eristeitä käyttämällä.
- EPS-eristeiden ilmatiiviyden takia niissä ei tapahdu eristeen sisäistä konvektiota.

(Lahdensivu 2009b, 472.)

## 4 ULKOSEINÄRAKENTEEN SUUNNITTELU

### 4.1 Opinnäytetyön tavoitteet

Opinnäytetyön lähtökohtaisena tavoitteena oli EPS-eristetyin, puurunkoisen ulkoseinärakenteen suunnittelu. Suunnittelun yhteydessä tuli ottaa huomioon rakenteen kosteus- ja lämpötekniiset ominaisuudet, matalaenergiarakentamiseen liittyvä ohjeistus, käytännön toteutettavuus sekä ääneneristävyys. Koska tiedossa oli myös se, että uuden rakennetyypin ominaisuuksien selvittämiseen ja arvioimiseen eivät pelkät teoreettiset tarkastelut riitä, tuli ottaa käyttöön myös kokeelliset menetelmät. Koska opinnäytetyö sisälsi sekä suunnittelu- että tutkimustehtäviä, jaettiin tavoitteet kahteen eri osa-alueeseen seuraavasti:

#### 1. Suunnittelutavoitteet

Tavoitteena oli suunnitella EPS-eristetty puurunkoinen ulkoseinärakenne huomioon ottaen seuraavat kriteerit:

- kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus
- matalaenergiavaatimusten täyttyminen
- käytännön toteutettavuus
- ääneneristävyys.

#### 2. Tutkimustavoitteet

Tavoitteena oli tutkia ulkoseinärakenteen seuraavia ominaisuuksia:

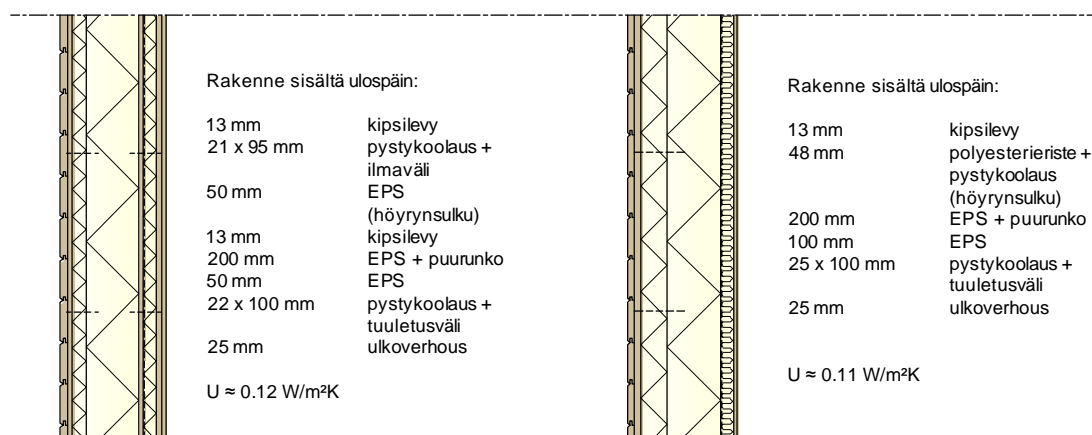
- kosteustekniinen toimivuus
- käytännön toteutettavuus.

Lisäksi tavoitteena oli selvittää ulkoseinärakenteen ääneneristävyyttä mahdollisuuksien ja käytettävissä olevien menetelmien mukaan.

## 4.2 Suunnitteluvaihe

Ulkoseinärakenteen suunnitteluvaihe alkoi marraskuussa 2009 ja kesti alkuvuoteen 2010. Tuona aikana tehtiin alustavia U-arvolaskelmia, rakennepiirustuksia sekä diffuusiotarkasteluja rakenteen kosteusteknisen toimivuuden ja tarvittavan eristepaksuuden arvioimiseksi. Laskentaperusteet on esitetty luvuissa 4.5 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen ja 4.6 Diffuusiokosteustarkastelut. Suunnittelussa hyödynnettiin lisäksi lähdeaineistoa sekä asiantuntijalausuntoja. Tässä vaiheessa hankittiin myös koerakenteita ja tutkimuslaitteistoja varten tarvittavat rakennusmateriaalit. EPS-eristeet valmistettiin mittatilaustyönä Soklex Oy:n tehtaalla.

Suunnittelun lähtökohtana oli noin vuotta aiemmin saatu idea EPS-eristetystä ulkoseinärakenteesta, jonka perustana oli 200 mm:n LVL-runko ja pehmeällä polypropeenieristeellä runkoon tiivistetty 200 mm:n EPS-eriste sekä 50 mm:n EPS-eristeet rungon molemmin puolin (ks. kuvio 10). Tavoitteena oli lisäksi arvioida rakenteen toteuttamista ilman erillistä höyrynsulkua. Tehdyt diffuusiolaskelmat osoittivat kuitenkin, että rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta olisi edullisempaa sijoittaa suurempi osa eristeestä rungon ulkopintaan (ks. liitteet 1 - 2). Lisäksi rakenne kaipasi yksinkertaistamista.



KUVIO 10. Rakenteen kehitysvaiheita

Seuraavassa vaiheessa rakenteen sisäpinnasta siirrettiin 50 mm:n EPS-kerros rungon ulkopintaan ja sisäpintaan suunniteltiin 48 mm:n koolaus sekä polyes-

terikuitueriste (ks. kuvio 10). Rakenteen lämmön- ja ääneneristävyyys paranivat, mutta laskelmien mukaan ääriolosuhteissa syntyy edelleen kastepiste EPS-eristeiden väliseen rajapintaan (ks. liitteet 3 - 4).

### **Koerakenteet**

Rakenteen käytännön toteutettavuutta arvioitiin rakentamalla tammikuun 2010 alussa 1245 mm x 2620 mm:n koeseinä. Ensimmäisessä vaiheessa kokeiltiin 200 mm:n EPS-eristeen asentamista runkoon polypropeenikaistan avulla. Menetelmä arvioitiin kuitenkin riskialttiiksi asennusvirheille sekä rakennusaikaisen kosteuden aiheuttamille haittavaikutuksille. Lisäksi pehmeä eriste heikentäisi rakenteen ilmatiiviyttä, mikäli erillistä ilman- tai höyrynsulkua ei käytettäisi (Lahdensivu 2009a). Ideasta päätettiin luopua.

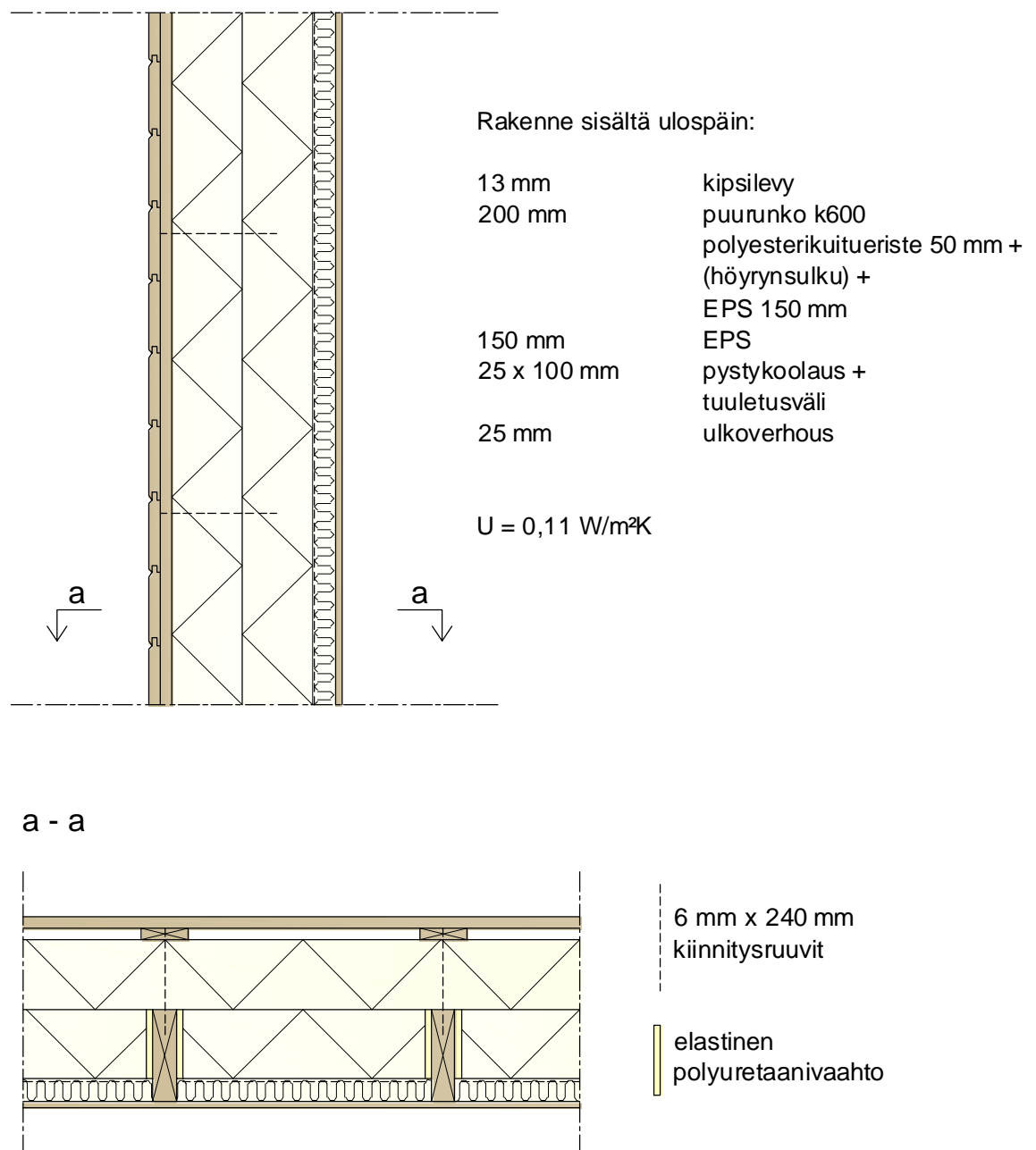
Toisessa koevaiheessa kokeiltiin 150 mm:n EPS-eristeen asentamista runkoon polyuretaanivaahdolla (vrt. Lahdensivu 2009c). Rakenteen koko oli 1245 mm x 2420 mm. Rungon ulkopintaan asennettiin toinen 150 mm:n EPS-kerros ja sisäpintaan 50 mm:n polyesterikuitueriste. Ulkopuoliset 25 mm x 100 mm:n pystykoolaukset kiinnitettiin runkoon eristekerroksen läpi 6 mm x 240 mm:n uppokantaruuveilla. Ulkoverhoukseksi asennettiin 20 mm x 120 mm:n paneeli ja sisäpintaan 13 mm:n erikoiskova kipsilevy.

Ideana oli edelleen parantaa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta siirtämällä eristettä rungon ulkopuolelle, jolloin myös sisäpuolisista lisäkoolauksista voitiin luopua rakenteen samalla yksinkertaistuessa. (vrt. Lahdensivu 2009c; Käkelä & Jormalainen 2009, 479.) Mahdollinen höyrynsulku jouduttaisiin kuitenkin asentamaan rungon sisäpintaan, jolloin se jouduttaisiin puhkaisemaan sähköasennusten takia. Höyrynsulun asentaminen rungon sisäpintaan ei myöskään ole matalaenergiaohjeistuksen mukaista. Tässä vaiheessa saatiin kuitenkin idea höyrynsulun asentamisesta EPS-eristeen sisäpintaan (ks. kuvio 11). Asiaa päätettiin testata myöhemmin tehtävissä tutkimuksissa.

Koerakenteen yhteydessä ei ilmennyt mitään esteitä rakenteen käytännön toteutettavuudelle. Lisäksi diffuusiolaskelmat osoittivat kosteusteknisen toimivuuden parantuneen (ks. liitteet 5 - 6). Koerakenteiden rakentamista on kuvattu ja selostettu myös liitteessä 7.

### 4.3 Suunniteltu ulkoseinärakenne

Suunnittelun ja koerakenteiden tuloksena syntyneestä ulkoseinärakenteesta piirrettiin rakennepiirustus sekä leikkaus ylhäältä katsottuna, jossa näkyvät myös eristeiden polyuretaanisauamat ja koolausten kiinnitykset (ks. kuvio 11). Liitteessä 8 on lisäksi esitetty rakenteen periaatepiirustus Soklex-perustuksilla varustettuna.



KUVIO 11. Suunniteltu ulkoseinärakenne

## **Kipsilevy**

Rakenteen sisäverhouksena on 13 mm:n erikoiskova kipsilevy, joka toimii samalla runkoa jäykistävänä rakenteena. Myös muita käyttötarkoitukseen soveltuvia rakennuslevyjä voidaan käyttää, kun niiden riittävästä lujuusominaisuuksista varmistutaan. Levyjen kiinnitys mitoitetaan tapauskohtaisesti. Mikäli rakenteen yhteydessä halutaan käyttää sisäverhouspaneelia tai muuta materiaalia, jolla ei ole riittäviä jäykistysominaisuuksia, on ratkaisu toteutettava esimerkiksi asentamalla jäykistävän levyrakenteen päälle tarvittavat koolaukset, joihin sisäverhous kiinnitetään.

## **Puurunko**

Koerakenteiden yhteydessä kantavana rakenteena oli 45 mm x 200 mm:n LVL-runko k600-jaolla. Runkomateriaalina voidaan käyttää myös hyvälaatuista mitallistettua tai höylättyä puutavaraa, jolloin on erikseen tarkistettava eristeiden sopivuus ja rakenteen lämmönläpäisykerroin, sillä näiden materiaalien mitat poikkeavat hieman LVL:n mitoista. Runkotolppien ja eristeiden loveamisen välttämiseksi rakenteessa käytetään rungon yläpuolista LVL- tai liimapuupalkkia ja kainalokannatteisia kattoristikoida (ks. liite 8). Myös muiden ratkaisujen käyttö on mahdollista, kun niiden toimivuus varmistetaan. Palkki ja kiinnikkeet mitoitetaan tapauskohtaisesti käytettävään asennusmenetelmään soveltuen. Alaohjauspuun kiinnitysmenetelmä riippuu myös perusratkaisusta.

## **Polyesterikuitueriste**

Rakenteen lämpimässä pinnassa kiinni on allergialiiton suosittelema 50 mm:n polyesterikuitueriste, joka toimii lämmöneristeen lisäksi myös ääntä absorboivana rakennekerroksena ja mahdollistaa sähköasennusten helpomman toteuttamisen. Periaatteessa polyesterikuitueriste voidaan korvata myös muulla vastaavalla eristeellä, jolloin rakenteen lämmönläpäisykerroin ja kosteustekninen toimivuus on kuitenkin erikseen tarkistettava. Rakenteen sisäpinnassa ei kuitenkaan tule käyttää eristeitä, jotka saattavat aiheuttaa terveystahaittoja.

## **Höyrynsulku**

Asennustyön kannalta yksinkertaisinta on käyttää tehtaalla EPS-eristeen sisäpintaan asennettua höyrynsulkuna toimivaa ainekerrosta. Periaatteessa höyrynsulku voidaan toteuttaa myös asentamalla rungon sisäpintaan normaalisti

käytettävä 0,2 mm:n polyeteenikalvo, jolloin läpivientien tiivistykseen on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota.

### **EPS-eristeet**

Sekä runkotolppien väleissä että rungon ulkopinnassa on EPS 100S Seinälaadun 150 mm:n eristeet. S-merkintä tarkoittaa HBCD-bromiyhdisteellä palonsuojakäsitteltyä eristelaatua. Seinäeristeiden jälkikutistumista koskeva mittapysyvyysvaatimus on enintään 0,2 %, joka varmistetaan valmistuksen yhteydessä lämpökäsittelyllä (+60 - +80 °C) tai vähintään kuuden viikon varastoinnilla lämpimässä tilassa (EPS 2000-tuoteluokitus 2008, 22). Rakenteeseen soveltuvat myös vastaavanlaatuiset, mutta paremman lämmöneristävyuden omaavat EPS-eristeet. Eristeet kiinnitetään ja tiivistetään runkotolppien väleihin elastisella polyuretaanivaahdolla jälkikutistumisen ja lämpöliikkeiden haittavaikutusten estämiseksi.

Solumuovien lämpölaajenemista koskeva lämpötilakerroin on noin 0,07 mm/m°C. Runkotolppien väleihin asennettavien eristeiden korkeus on perusrakenteessa noin 2500 mm ja lämpötilavaihteluksi voidaan arvioida noin 20 °C, jolloin lämpöliikkeiden ja jälkikutistuman samanaikaisesta tapahtumisesta aiheutuva muutos eristeen korkeussuunnassa on enintään

$$2,5 \text{ m} \times 0,07 \text{ mm/m}^\circ\text{C} \times 20 \text{ }^\circ\text{C} + 2500 \text{ mm} \times 0,002 = 8,5 \text{ mm}$$

Eriste siis lyhenee molemmista päistään noin 4,3 mm, joka esimerkiksi 25 mm:n saumassa edellyttää polyuretaanilta noin 17 % muodonmuutoskykyä. Markkinoilla oleville elastisille polyuretaanivaahdoille luvataan parhaimmillaan jopa 35 % muodonmuutoskykyä, mutta noin 20 % lienee realistisempi arvo. Mikäli eristeet toteutetaan kahdessa osassa, päästään hieman pienemmillä saumaleveyksillä. Eristeen sivuilla sopiva saumaleveys on 10 - 15 mm. Eristeet mitoitetaan käytettävästä runkomateriaalista riippuen siten, että edellä mainitut mittaehdot täyttyvät.

Rungon ulkopuolisten eristeiden vaakasaumat tulee mitoitaa muun muassa käytettävien eristekokojen, perustusratkaisun ja rakenteen korkeuden edellyttämien ehtojen mukaisesti. Sopiva eristeleveys on 1200 mm ja lämpötilamuu-

tokseksi voidaan arvioida 50 °C. Leveys suunnassa lämpöliikkeiden ja jälkikutistuman samanaikaisesta tapahtumisesta aiheutuva muutos on enintään

$$1,2 \text{ m} \times 0,07 \text{ mm/m}^\circ\text{C} \times 50 \text{ }^\circ\text{C} + 1200 \text{ mm} \times 0,002 = 6,6 \text{ mm.}$$

Ponttaamattomia eristelevyjä käytettäessä muutos edellyttää noin 20 mm:n saumaleveyttä eristeen molemmilla reunoilla, joka saattaa kuitenkin aiheuttaa ongelmia, sillä myös viereisille eristeille pitää varata sama saumaleveys. Sauman kokonaisleveyden tulee olla siis noin 40 mm, joka aiheuttaa huomattavan menekin polyuretaanivaahdolle. Rungon ulkopuolisessa eristekerroksessa on suositeltavampaa käyttää pontattuja eristelevyjä, jolloin myös saumojen tiiviys saadaan helpommin varmistettua.

### **Pystykoolaus ja tuuletusväli**

Ulkoverhouksen taakse joutuvan kosteuden poistamiseksi tarvittava tuuletusväli on rakenteessa toteutettu 25 mm x 100 mm:n pystykoolauksella. Mikäli ulkoverhouksena tai sen osana halutaan käyttää pystypaneelia, asennetaan tarvittava vaakakoolaus normaalisti pystykoolausten päälle.

### **Ulkoverhous**

Koerakenteissa ulkoverhouksena käytettiin 20 mm x 120 mm:n paneelia. Verhouksen käyttöään pidentämiseksi on kuitenkin suositeltavaa käyttää paksumpaa materiaalia. Leveys ja tyyppi valitaan tarpeen mukaan. Rakenteen yhteydessä voidaan soveltaa myös muita verhouksmateriaaleja, kun toimivuus varmistetaan erityisesti kosteusteknisen toiminnan kannalta.

## **4.4 Suunnittelutavoitteiden huomioon ottaminen**

### **Kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus**

Ulkoseinärakenteen kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta arvioitiin ja parannettiin suunnitteluvaiheessa alustavien U-arvolaskelmien sekä kastepistelaskelmien avulla. Lämmöneristyksen toteutusta koskevaan viranomaisohjeistukseen liittyen (ks. Lämpötekniinen suunnittelu, luku 3.2) riittävät tiedot käytettävistä eristeistä on annettu ja asennusohjeet esitetään tässä luvussa. EPS- ja



polyesterikuitueriste täyttävät rakenteessa eristetilan kokonaan ja lisäksi polyesterikuitueriste on kiinni kipsilevyn sisäpinnassa. EPS-eristeiden saumat on limitetty ja eristeeseen jäävät raot on täytetty vastaavalla materiaalilla eli polyuretaanivaahdolla. Rungon ulkopuolisten EPS-eristeiden saumat voidaan käytettävistä eristeistä ja tapauksesta riippuen sovittaa runkotolppien kohdille ja eristeet ulotetaan yläpohjan lämmöneristeen yläpinnan yläpuolelle.

Rakenteen ilmanpitävyyttä sekä matalaenergiaohjeistuksessa esitettyjä kosteus- lämpötekniiseen toimivuuteen liittyviä tekijöitä ja ohjearvoja käsitellään kyseisen ohjeistuksen puitteissa.

### **Matalaenergiaohjeistus**

Rakennetta lähinnä koskevat matalaenergiaohjeistukseen liittyvät tekijät ovat

- rakenteen ilmatiiviys
- kylmäsilta vaikutusten poistaminen
- kosteustekninen toimivuus
- rakenteen lämmöneristävyys.

**Rakenteiden ilmatiiviys** on eräs matalaenergiarakennuksen tärkeimpiä ominaisuuksia. Ilmatiiviyden varmistamisen kannalta ovat avainasemassa erityisesti ulkovaipan liitoskohdat, joita ovat esimerkiksi ikkunoiden ja elementtien liitokset sekä LVIS-läpiviennit. Läpiviennit tulee tiivistää huolellisesti ja niitä tulee olla mahdollisimman vähän. Sähköasennukset ja ilmanvaihtokanavat asennetaan ilman- ja höyrynsulun sisäpuolelle. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 167.)

Puurakenteissa ilman- ja höyrynsulkukerros sijoitetaan 50 - 75 mm:n etäisyydelle rakenteen sisäpinnasta edellyttäen, että kerroksen sisäpuolelle jää enintään 1/4 koko eristepaksuudesta. Ilman- ja höyrynsulkukalvot limitetään riittävästi ja niiden saumat asennetaan kahden jäykän kappaleen väliin. Tiiviys varmistetaan lisäksi esimerkiksi akrylaattiliimalla tai muulla soveltuvalla kitillä. Ilman- ja höyrynsulku on täysin yhtenäinen kerros, jonka ilmanläpäisevyys on korkeintaan  $1 \times 10^{-6}$  m/sPa. Myös tuulensuojan ilmanläpäisevyydelle on annet-

tu enimmäisarvo, joka on  $10 \times 10^{-6}$  m/sPa. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 152 - 167.)

Lisäksi rakenteiden ilmatiiviys varmistetaan mittaamalla rakennuksen ilmanvuotoluku, jolle annetut ohjearvot pientaloja koskien ovat

- matalaenergiatalo M-50 < 0,8
- passiivitalo P-25 < 0,6.

Arvot pätevät Jyväskylän ilmastotiedoilla. Lopulliset arvot määritetään tapauskohtaisesti energiankulutuslaskelmien perusteella. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 34.)

Ulkovaipan liitosten ja LVIS-läpivientien ilmatiiviys riippuu oleellisesti käytettävistä menetelmistä ja toteutuksen laadusta, joita ei voida arvioida pelkän rakennetyypin yhteydessä. Suunnitellussa rakenteessa höyrynsulku on 63 mm etäisyydellä rakenteen sisäpinnasta ja sen sisäpuolella on noin 1/7 kokonaiseristepaksuudesta. Yhtenäistä ja limitettyä ilman- ja höyrynsulkua rakenteessa ei ole, mutta sellaista ei voida myöskään katsoa edellytettävän, mikäli rakenne voidaan muuten osoittaa toimivaksi. EPS-eristeillä voidaan peruslähtökohtaisesti toteuttaa hyvin tiiviitä rakenteita ja vaadittava ilmatiiviys on mahdollista saavuttaa elastisella polyuretaanilla tiivistetyssä puurakenteessa käyttämättä erillistä ilman- tai höyrynsulkua ja tuulensuojaa (Lahdensivu 2009).

**Kylmäsilta vaikutusten poistamisella** on olennainen merkitys matalaenergiarakennuksissa, sillä rakenteiden lämmöneristävyyden parantuessa kylmäsiltojen suhteellinen vaikutus lämpöhäviöihin suurenee. Kylmäsilta vaikutus ilmenee puurakenteissa tyypillisesti rakenteiden nurkkien ja ikkunoiden piilien alhaisina pintalämpötiloina ja saattaa haitata oleellisesti rakenteen toimintaa. Erityisesti näiden detaljien suunnittelussa on tärkeätä välttää kylmäsiltoja. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 150 - 151.)

Kylmäsilta vaikutukset on rakenteen suunnittelussa pyritty poistamaan rungon ulkopuolisen 150 mm:n EPS-kerroksen avulla. Eristekerros peittää rungon kauttaaltaan ja sitä läpäisevät ainoastaan koolausten 6 mm:n kiinnitysruuvit.

**Matalaenergiarakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen** liittyvät suunnitteluohjeet ovat pääsisällöltään samoja kuin tavanomaisille rakenteille asetetut toimivuusehdot (ks. Ulkoseinärakenteen kosteustekniset suunnitteluperusteet, luku 3.1). Kosteustekniseen suunnitteluun liittyvät oleellisesti myös erikseen käsiteltävät tekijät, kuten vaipan ilmatiiviys ja kylmäsiltojen poistaminen. Erityistä huomioita tulee lisäksi kiinnittää muun muassa kosteusteknisiin riskikohtiin, työnaikaiseen kosteudenhallintaan, laadunvarmistukseen sekä rakenteiden kuivumiskykyyn (Matalaenergiarakentaminen 2009, 155 - 159).

Kosteusteknisen toimivuuden osalta on lisäksi erityisesti varmistettava, ettei höyrynsulun sisäpintaan tiivisty missään vaiheessa haitallisessa määrin kosteutta. Erityisen riskialtis on rakennusaika kylmänä vuodenaikana, jolloin rakennuksen sisäilman kosteuspitoisuus on tyypillisesti hyvin korkea. Tällöin on vaarana kosteuden tiivistyminen höyrynsulun tiiviille pinnalle, vaikka rakenne muuten olisi normaalissa käytönaikaisessa tilanteessa täysin toimiva. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 154.)

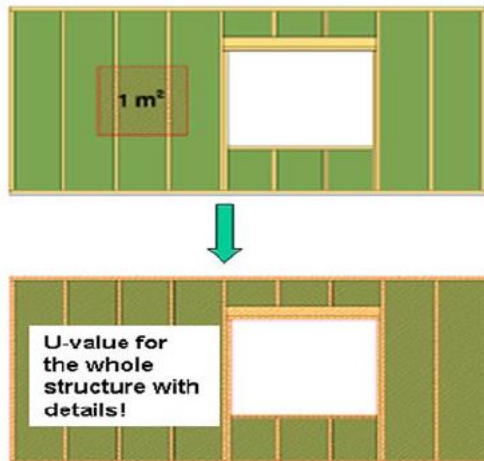
Ulkoseinärakenteen tuuletusraon toiminta varmistetaan muun muassa suunnitteleamalla rakenne siten, että tuuletusvälin vähimmäisleveys on 25 mm (Matalaenergiarakentaminen 2009, 156). Tämä on toteutettu suunnitellussa ulkoseinärakenteessa 25 mm x 100 mm:n pystykoolauksella. Rakenteen kosteusteknistä toimivuutta arvioidaan lisäksi tutkimustavoitteiden puitteissa.

**Rakenteiden lämmöneristävyys** osalta matalaenergiaohjeistuksessa pientaloille annetut ohjeelliset ulkoseinien lämmönläpäisykertoimet energiantarveluokissa M-50 ja P-25 ovat

- matalaenergiatalo M-50      0,12 W/m<sup>2</sup>K.
- passiivitalo P-25          0,08 - 0,10 W/m<sup>2</sup>K.

Arvot pätevät Jyväskylän ilmastotiedoilla. Lopulliset arvot määritetään tapauskohtaisesti energiankulutuslaskelmien perusteella. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 34.)

Lämmönläpäisykerroin lasketaan rakennekokonaisuudelle, eikä ainoastaan erillisille rakenneosille (ks. kuvio 12). Laskennassa huomioidaan lisäksi kantavien rakenteiden erityisesti nurkissa sekä aukkojen reunoissa aiheuttamat lisäkonduktanssit, jotka muussa tapauksessa aiheuttavat virheitä laskelmiin. Peruseriaatteena on laskennan tarkentaminen lämmöneristävyuden lisääntyessä. (Matalaenergiarakentaminen 2009, 148.)



KUVIO 12. Lämmönläpäisykerroimen laskentaperiaate (Matalaenergiarakentaminen 2009,149)

SFS-EN -standardiin perustuvalla laskentamenetelmällä suunnitellun rakenteen lämmönläpäisykerroimen arvoksi saatiin  $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Käyttämällä rakenteessa alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavia EPS-eristeitä voidaan saavuttaa parempia lämmönläpäisykerroimen arvoja. (Ks. liitteet 9 - 10.) Lämmönläpäisykerrointa ei ole pelkän rakennetyypin suunnittelussa mahdollista laskea rakennekokonaisuudelle.

Matalaenergiarakenteisiin liittyvien riskitekijöiden (ks. Matalaenergiarakenteiden toimivuus, luku 3.4) osalta voidaan lisäksi todeta, että

- Suunnitellussa rakenteessa on perinteinen ja käyttökelpoiseksi todettu kantava runko, jonka jäykistäminen ei aiheuta ongelmia.
- Rakenteessa ei periaatteessa ole suuria muutoksia tai entisistä poikkeavia työmenetelmiä edellyttäviä ratkaisuja.

- Rakenteessa ei ole erillistä tuulensuojaa, jonka sisäpinnassa saattaisi esiintyä kosteusongelmia.
- EPS-eristeissä ei tapahdu lämmöneristävyyttä heikentävää sisäistä konvektiota.

### **Käytännön toteutettavuus**

Rakenteen käytännön toteutettavuutta arvioitiin jo koerakenteiden yhteydessä. Seuraavassa on lisäksi esitetty rakenteen työmaatoteutuksen periaatteet, joita voidaan soveltaa myös elementtituotannossa:

#### *1. Rungon asennus*

Kantava runko asennetaan normaalisti juoksevaa mitoitusta ja haluttua menetelmää käyttäen. Runkomateriaalin suoruudesta on erityisesti huolehdittava, sillä kieroja runkotolppia ei sallita. Runko reivataan sisäpuolelta seuraavan työvaiheen mahdollistamiseksi. Seuraavaksi asennetaan rungon yläpuolinen palkki, kattorakenteet sekä vähintään aluskate tarkoituksenmukaisia työmenetelmiä käyttäen, jotta rakenteet saadaan suojaan sateelta.

#### *2. Rungon ulkopuolisten EPS- eristeiden asennus*

Olosuhteista ja käytettävistä eristeistä riippuen asennetaan rungon ulkopuoliset EPS-eristeet ennen sisäpuolisia, jotta runkorakenteet saadaan paremmin säältä suojaan. Pontattuja levyjä käytettäessä saumat voidaan sovittaa runkotolppien kohdille. Koolaukset asennetaan siten, että levyn keskelle tuleva koolaus asennetaan ensin. Näin varmistetaan, että saumat eivät aukea asennuksen yhteydessä. Ponttaamattomia eristeitä käytettäessä tulee huolehtia, että vaahdotettavien saumojen leveydet ovat riittävät.

Asennustyö tehdään täysin levyin ja nurkkiin tulevat levyt sahataan sopivan mittaisiksi. Nurkissa jätetään levyjen väliin vaahdotettava sauma. Kun levyt on asennettu, sahataan ikkuna- ja oviaukot ja asennetaan ulkoverhous tarkoituksenmukaisessa vaiheessa.

### 3. *Sisäpuolisten EPS-eristeiden asennus*

Seuraavassa vaiheessa asennetaan 150 mm:n eristeet sisäpuolelta runkotolppien väleihin. Eristetila puhdistetaan huolellisesti ennen asennustyötä vaahdon kiinnityksen ja sauman ilmatiivyyden varmistamiseksi. Eristelevyt painetaan tiiviisti rungon ulkopuolista eristekerrosta vasten, jotta väliin ei jää eristävyttä heikentäviä ilmarakoja ja kiilataan paikoilleen EPS-kiilojen avulla. Lisäksi huolehditaan, että rungon ja eristeen väliin jää jokaiselle sivulle riittävä saumavara. Kapeampiin ja matalampiin eristetiloihin sahataan sopivat eristeet ja reivauksia siirretään työn etenemisen mukaan.

Saumat vaahdotetaan elastisella polyuretaanivaahdolla ja huolehditaan, että raot täyttyvät kokonaan. Vaahdotus on suositeltavaa tehdä pistoolivaahdolla tarkemman työn laadun saavuttamiseksi. Työ pyritään tekemään niin, että vaahtopurseita ei synny, jolloin purseita ei tarvitse leikata ja lisäksi sauman pinta jää tiiviimmäksi. Kun uretaanisaumat ovat kuivuneet, voidaan reivaukset olosuhteista riippuen poistaa ennen seuraavaa työvaihetta.

### 4. *Polyesterikuitueristeen ja sisäverhouksen asennus*

Seuraavaksi asennetaan polyesterikuitueriste normaaleja huokoisen eristeen asennusmenetelmiä käyttäen. Lopuksi asennetaan sisäverhoukslevy, joka kiinnitetään lujuslaskelmien edellyttämällä tavalla. Kaikkien asennusvaiheiden yhteydessä otetaan huomioon talotekniikka-asennukset sekä vuodenaikoihin liittyvät olosuhteet ja toimitaan niiden edellyttämällä tavalla.

## **Rakenteen ääneneristävyys**

Koska useimmissa tapauksissa rakennuksen ulkovaipalle ei ole asetettu ääneneristävyysvaatimuksia, ei ole tarkoituksenmukaista mitoittaa perusrakennustyyppiin erillisiä ääneneristysrakenteita, vaan ne mitoitetetaan tapauskohtaisesti asetettujen vaatimusten mukaisesti (Hongisto 2010). Tarpeettomat lisärakenteet eivät ole tarkoituksenmukaisia taloudellisistakaan syistä.

Rakenteeseen suunniteltu polyesterikuitueriste toimii ääntä absorboivana kerroksena ja sisäpinnassa oleva kipsilevy ääntä eristävänä rakenneosana. Rakenteen ilmaääneneristävyyttä voidaan helpoimmin parantaa asentamalla sisäpintaan toinen kipsilevykerros tai käyttämällä paremman ääneneristävyyden omaavia rakennuslevyjä.

## 4.5 Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen

Suunnitellun rakenteen lämmönläpäisykerroin määritettiin standardiin SFS-EN ISO 6946 perustuvalla laskentamenetelmällä, jonka periaate homogeenisista ja epähomogeenisista materiaalikerroksista koostuvan seinärakenteen osalta on seuraava:

### 1. Lasketaan rakennekerrosten lämmönvastukset (R) kaavalla

$$R = d / \lambda_D$$

$d$  = kerrospaksuus (m)

$\lambda_D$  = lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (W/mK)

Mikäli lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja ei ole suoraan saatavilla, ne lasketaan ilmoitetuista lämmönjohtavuuden arvoista standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisesti. Lämmönvastuksien laskennassa on lisäksi huomioitava rakenteen pintavastukset sekä ilmakerrosten lämmönvastukset. Välituloksina käytettävät lämmönvastusten arvot lasketaan vähintään kolmen desimaalin tarkkuudella.

### 2. Lasketaan rakenteen kokonaislämmönvastus ( $R_T$ ) kaavalla

$$R_T = (R_T^{\text{y}} + R_T^{\text{al}}) / 2$$

$R_T^{\text{y}}$  = kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo

$R_T^{\text{al}}$  = kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo

Kokonaislämmönvastus  $R_T$  saadaan kokonaislämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvojen keskiarvona.

### 3. Lasketaan rakenteen lämmönläpäisykerroin (U) kaavalla

$$U = 1 / R_T \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

Lämmönläpäisykerroin saadaan kokonaislämmönvastuksen käänteisarvona. Lopputuloksena annettava lämmönläpäisykerroin pyöristetään kahteen merkitsevään numeroon.

(SFS-EN ISO 6946 2007, 3 - 11.)

### 4. Lasketaan korjattu lämmönläpäisykerroin (U<sub>c</sub>) kaavalla

$$U_c = U + \Delta U$$

U = lämmönläpäisykerroin, jossa ei ole huomioitu korjaustekijöitä

$$\Delta U = \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_{\psi X} + \Delta U_a$$

$\Delta U_f$  = mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijä

$\Delta U_g$  = lämmöneristyksen ilmarakojen korjaustekijä

$\Delta U_{\psi X}$  = kylmäsiltojen korjaustekijä

$\Delta U_a$  = lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden korjaustekijä

Korjatun lämmönläpäisykerroimen laskemiseksi määritetään lämmöneristyksen ilmarakojen ja ilmanläpäisevyyden korjaustaso sekä lämmöneristyksen ilmanläpäisevyyden suojaustapa korjaustekijöiden kertoimien saamiseksi ja lasketaan tarvittavat korjaustekijät tapauskohtaisesti.

(Rakennusosien lämmönläpäisykerroimien laskenta 2004, 28 - 40.)

#### Lämmönläpäisykerroimen laskenta

Lämmönläpäisykerroimen laskennan lähtöarvoina käytettiin tuotevalmistajien ilmoittamia ja laskentaesimerkeissä käytettyjä lämmönjohtavuuden suunniteluarvoja sekä standardissa SFS-EN ISO 6946 taulukoituja pintavastuksia.

Standardissa SFS-EN ISO 10456 esitettyjä muunnoslaskelmia ei siis tarvinnut tehdä. Itse laskenta tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla.



### **Lämmöneristyksen korjaustason ja suojaustavan määrittäminen**

Suunnitellun rakenteen *lämmöneristyksen ilmarakojen ja ilmanläpäisevyyden korjaustaso* on 0, sillä rakenteessa on hyvin huonosti ilmaa läpäisevistä eristelevyistä tehty lämmöneristys, jossa levyjen väliset puskusaumamat ja levyjen ja rungon väliset saumat on tiivistetty PUR-saumaeristeellä (ks. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta 2004, 29). Lisäksi lämmöneristys on tehty kahdesta eristekerroksesta, joista toinen on asennettu runkotolppien väliin ja toinen jatkuvana kerroksena edellisen päälle (ks. SFS-EN ISO 6946 2007, 24).

Rakenteen *lämmöneristyksen ilmanläpäisevyyden suojaustapa* on a, sillä lämmöneristys on ilmansulun ja tuulensuojan muodostamassa kotelossa, joka rajoittaa olennaisesti lämpöhäviöitä lisäävää ilmavirtausta ympäristön ja lämmöneristyksen välillä (ks. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta 2004, 34). EPS-eristeen voidaan katsoa toimivan rakenteessa tuulensuojan lisäksi myös ilmansulkuna, vaikkei sisäpinnassa olisikaan polyeteenikalvoa. Polyesterikuitueriste sijaitsee EPS-eristeiden lämpimällä puolella, joten myös sen osalta voidaan soveltaa suojaustapaa a.

### **Korjaustekijöiden huomioon ottaminen**

*Mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijän* avulla lasketaan rakenteen lämmöneristekerrosta läpäisevien kiinnikkeiden pistemäinen kylmäsilta-vaikutus (SFS-EN ISO 6946 2007, 24 - 25). Suunnitellussa rakenteessa rungon ulkopuolella olevan 150 mm:n EPS-kerroksen läpäisevät 6 mm x 240 mm:n kiinnikkeet eivät kuitenkaan läpäise rakenteen koko eristekerrosta, joten korjaustekijää ei tässä tapauksessa otettu huomioon.

*Lämmöneristyksen ilmarakojen korjaustekijän* avulla otetaan huomioon eristekerroksessa olevien ilmarakojen mahdollistamien pysty- ja vaakasuuntaisten ilmavirtausten heikentävä vaikutus lämmöneristyksen toiminnan kannalta. Rakenteen ilmarakojen korjaustaso ja korjauskerroin ovat kuitenkin molemmat 0, joten korjaustekijää ei tarvinnut tässä tapauksessa laskea (ks. SFS-EN ISO 6946 2007, 23).

*Kylmäsiltojen korjaustekijän* tarkoitus on ottaa huomioon rakenteessa olevat ja sille ominaiset säännöllisesti toistuvat kylmäsilat, kuten siteet, kannakset sekä

tuki- ja runkorakenteet, jotka ovat rakenteelle tyypillisiä koko sen edustamalla vaipan alueella. Mikäli kylmäsillan aineen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo poikkeaa viereisen vastaavasta suunnitteluarvosta enemmän kuin viisinkertaisesti, on kylmäsilloista aiheutuva rakenneosan lämmönläpäisykertoimen lisäys laskettava. (RakMK C4 2003, 5 - 6.) Puun lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo ei kuitenkaan poikkeakaan EPS:n suunnitteluarvosta viisinkertaisesti. Lisäksi rungon ulkopuolinen EPS-eristekerros vähentää kylmäsiltavaikutusta oleellisesti.

*Lämmöneristeen Ilmanläpäisevyyden korjaustekijän* tarkoitus on ottaa huomioon lämpötilaeron vaikutuksesta aiheutuvan luonnollisen konvektion sekä tuulen vaikutuksesta aiheutuvan pakotetun konvektion vaikutukset lämmöneristeessä. EPS-eristeen osalta korjaustekijää ei tarvinnut laskea eristeen pienen ilmanläpäisevyyden takia. (vrt. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta 2004, 36 - 39.) Polyesterikuitueristeen osalta korjaustekijä olisi pitänyt lisätä lämmönläpäisykertoimen arvoon, mutta kokonaiskorjauksen osuus oli kuitenkin alle 3 % U:sta, joten tätäkään korjaustekijää ei tarvinnut ottaa huomioon (vrt. SFS-EN ISO 6946 2007, 11).

## 4.6 Diffuusiokosteustarkastelut

Kosteuden tiivistymistä rakenteiden sisään arvioitiin suunnitteluvaiheessa diffuusiolaskelmien avulla. Menetelmässä tarkastellaan rakenteen kosteustilannetta sillä perusteella, että rakenteen kosteus määräytyy sen läpi tapahtuvan vesihöyryn diffuusion vaikutuksesta. Tarkastelu pätee ainoastaan stationääriolosuhteissa ja se tehdään seuraavin toimenpitein:

### 1. Määritetään laskentaolosuhteet

Lämpötilat, suhteelliset kosteudet sekä lämpötiloja vastaavat vesihöyryn kyllästyspaineen arvot sisällä ja ulkona.

### 2. Määritetään rakenteen vesihöyrynvastus kaavalla

$$Z = d / \delta_p$$

$Z$  = vesihöyrynvastus ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

$d$  = kerroksen paksuus (m)

$\delta_p$  = vesihöyrynläpäisevyys ( $\text{kgm/m}^2\text{sPa}$ )

### 3. Lasketaan tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat kaavalla

$$t_x = t_s - \Sigma R_x / R_t (t_s - t_u)$$

$t_u$  = ulkoilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_s$  = sisäilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_t$  = rakenteen kokonaislämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

$\Sigma R_x$  = rakenteen lämmönvastus sisäpinnasta kohtaan x ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

### 4. Määritetään rajapintojen lämpötiloja vastaavat vesihöyryn kyllästyspainearvot taulukkoarvojen perusteella

### 5. Lasketaan vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa kaavalla

$$p_x = p_s - \Sigma Z_x / Z (p_s - p_u)$$

$p_u$  = ulkoilman vesihöyryn osapaine ( $\text{RH} \times p_k$ ) (Pa)

$p_s$  = sisäilman vesihöyryn osapaine ( $\text{RH} \times p_k$ ) (Pa)

$Z$  = koko laskettavan rakenteen vesihöyrynvastuksien summa ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

$\Sigma Z_x$  = sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyrynvastuksien summa ( $\text{m}^2\text{sPa/kg}$ )

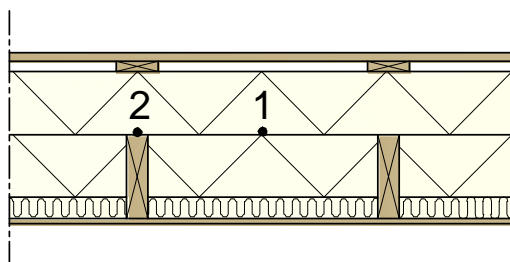
### 6. Verrataan saatuja vesihöyryn osapaineen arvoja kyllästyspainearvoihin

Mikäli kyllästyspainearvot ovat suurempia kuin saadut arvot, kosteuden tiivistymistä ei tapahdu.

(Lämmön- ja kosteudeneristys 1984, 123.)

## Diffuusiolaskelmat

Diffuusiolaskelmien tarkastelupisteiksi valittiin EPS-kerrosten välinen rajapinta eristekerroksen kohdalla sekä runkotolpan ja rungon ulkopuolisen EPS-kerroksen rajapinta (ks. kuvio 13). Tarkastelupisteitä valittiin kaksi, koska puun ja EPS:n lämmönjohtavuuden ja vesihöyrynläpäisevyyden arvot ovat erilaisia ja näin ollen pisteissä vallitsevat erilaiset olosuhteet, vaikka niiden etäisyydet rakenteen sisäpinnasta ovat samat.



KUVIO 13. Diffuusiolaskelmien tarkastelupisteet

Laskentaolosuhteet asetettiin varmalle puolelle ja lisäksi laskenta tehtiin ilman höyrynsulkua oleville rakenteille varmuuden lisäämiseksi. Laskentaolosuhteet olivat

### sisällä

- lämpötila + 21 °C
- suhteellinen kosteus 40 %.

### ulkona

- lämpötila -20 °C
- suhteellinen kosteus 85 %.

Vertailun vuoksi laskelmia tehtiin myös olosuhteissa, joissa ulkolämpötilana oli -10 °C. Materiaalien lähtöarvoina käytettiin samoja lämmönjohtavuuden arvoja kuin lämmönläpäisykertoimen laskennassa sekä materiaalivalmistajien ilmoittamia ja taulukoituja vesihöyrynläpäisevyyden arvoja. Polyesterikuitueristeelle käytettiin huokoisille eristeille tyypillistä vesihöyrynläpäisevyyden arvoa  $100 \times 10^{-12}$  kg/msPa. Laskenta tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla.

## 5 RAKENNUSFYSIKAALISET TUTKIMUKSET

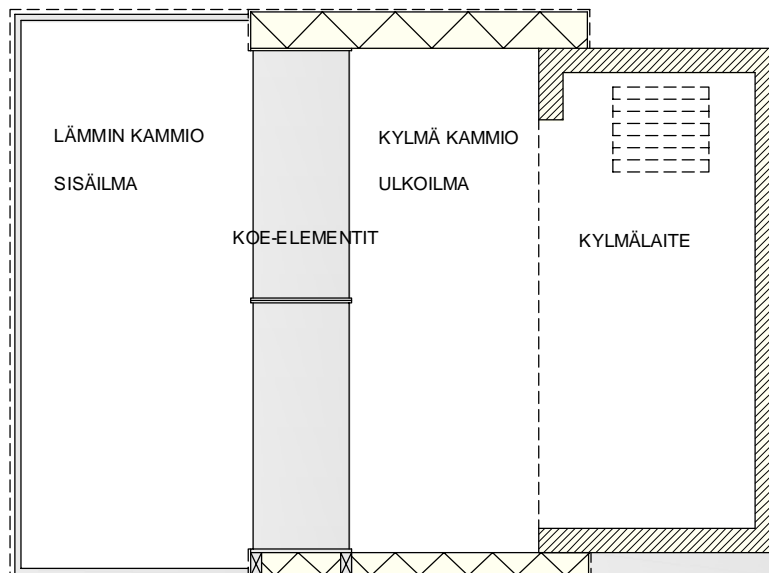
### 5.1 Tutkimuslaitteisto

Suunnitellun ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toimivuuden tutkimista varten rakennettiin rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto tammikuussa 2010.

Laitteiston perusosat olivat

- kylmälaite
- kylmä ja lämmin kammio
- koe-elementit
- säätölaitteisto
- mittauslaitteisto.

(vrt. Vinha & Käkelä 1999, 17 - 21.)



KUVIO 14. Tutkimuslaitteiston periaatepiirros

#### Laitteiston toimintaperiaate

Laitteiston toimintaperiaatteena oli, että lämpimään kammioon säädettiin tutkimuksen tavoitteiden mukaiset sisäilman kosteus- ja lämpötilaolosuhteet ja

kylmään kammioon puolestaan säädettiin tarkoituksenmukaiset ulkoilman olosuhteet. Kammioiden välille säädettyjen ilman vesihöyrypitoisuus- ja lämpötilaerojen takia koe-elementtien sisään asennettujen rakenteiden läpi tapahtui lämmön johtumista ja vesihöyryn diffuusiota, joiden aiheuttamia olosuhtemuutoksia rakenteissa voitiin mitata erillisen laitteiston avulla. (vrt. Vinha & Käkelä 1999, 16.)

### **Kylmä ja lämmin kammio**

Kylmälaitteen pakastinosaa laajennettiin rakentamalla 100 mm - 150 mm:n EPS-levyistä kylmä kammio varsinaisen laitteen ulkopuolelle. Kammion ulkomitat ovat 1000 mm x 1300 mm x 2100 mm. Sivuseinälle tehtiin lisäksi noin 450 mm x 140 mm:n aukko, jotta muun muassa mittausantureiden johdot päästiin asentamaan. Eristelevyjen saumat tiivistettiin polyuretaanivaahdolla. Kammion ja kylmälaitteen väliin asennettiin polypropeenieriste. Lisäksi kammio päällystettiin 0,2 mm:n polyeteenikalvolla kosteusolosuhteiden tasaamiseksi. Kammion yhden seinämän paikalle asennettiin tutkittavista rakenteista kootut kaksi koe-elementtiä, jotka tiivistettiin polypropeenieristeellä sekä polyuretaanivaahdolla EPS-kehykseen.

Lämmin kammio muodostui 750 mm x 1300 mm x 2100 mm:n lautakehikosta, joka päällystettiin myös 0,2 mm:n polyeteenikalvolla. Kammion yksi sivu leikattiin auki, jotta sen sisälle päästiin tekemään tarvittavia säätötoimenpiteitä.

### **Koe-elementit**

Koe-elementit perustuivat säänkestävästä vanerista koottuihin, kooltaan 420 mm x 1000 mm x 1000 mm:n kehyksiin, joiden sisään asennettiin tutkittavat rakenteet. Rakenteisiin asennettiin runkotolpat elementtien molemmille reunoille sekä yksi tolppa keskelle siten, että sen ja toisen reunalla olevan tolpan väliin jäi normaalilevyinen eristetila. (vrt. Vinha & Käkelä 1999, 39.) Kokeissa tutkittiin suunnitellun rakenteen kahta eri versiota:

- *rakenne 1*, jossa ei ollut erillistä ilman- tai höyrynsulkukerrosta
- *rakenne 2*, johon asennettiin 0,2 mm:n polyeteenikalvo EPS-kerroksen sisäpintaan 63 mm:n etäisyydelle rakenteen sisäpinnasta.

## Säätölaitteet

Lämpimän kammion suhteellista kosteutta voitiin säätää portaattomasti Bio-naire BU1300W -ultraäänihöyrystimellä, joka ei tuota lämpöä höyryn tuottamisessa. Lämpimän kammion lämpötilaa ei tehdyissä tutkimuksissa tarvinnut erikseen säätää, sillä laboratoriossa vallitsi normaali sisälämpötila. Kylmän kammion lämpötilaa voitiin säätää kylmälaitteen omalla laitteistolla. Kylmän kammion suhteellisen kosteuden arvioitiin nousevan ympäröivien olosuhteiden perusteella lähelle tavoitearvoa lämpötilaa laskettaessa. Paine-eroa kammioiden välillä ei laitteistolla pystytty säätämään, joten tutkimusten lähtöoletuksena oli paine-eroton tilanne.

## Mittauslaitteisto

Mittauslaitteisto oli IP-pohjainen *FERCS - Finembe Remote Control and Monitoring System*, jonka selainpohjainen käyttöliittymä mahdollistaa mittaustulosten valvonnan internetin välityksellä. Mittaustuloksia voidaan seurata lukuarvoina (ks. taulukko 1) sekä 24 h:n ja 30 vrk:n keskiarvokäyrinä. Järjestelmään kuuluivat seuraavat komponentit:

- Fercs 20 -loggeri, 2 kpl
- HTS 10 - lämpötila- ja kosteusanturi, 14 kpl
- TS 10 -lämpötila-anturi, 2 kpl.

Paine-eroa kylmän ja lämpimän kammion välillä mitattiin The Energy Conservatory DG-700 - paine- ja virtausmittarilla, johon liitettiin kumpaankin kammiioon johdetut muoviletkut.

TAULUKKO 1. Esimerkki mittaustuloksista

### Sensor diagnostics

Name	Unit	Hist	Value	Min	Max	Alarms
<u>1 sisäilma (HTST)</u>	C	<a href="#">chart</a>	22.72	22.64	22.72	disabled
<u>1 sisäilma (HTSH)</u>	%	<a href="#">chart</a>	45.86	45.33	45.86	disabled
<u>2 ulkoilma (HTST)</u>	C	<a href="#">chart</a>	-9.72	-11.04	-9.60	disabled
<u>2 ulkoilma (HTSH)</u>	%	<a href="#">chart</a>	87.21	77.38	91.44	disabled

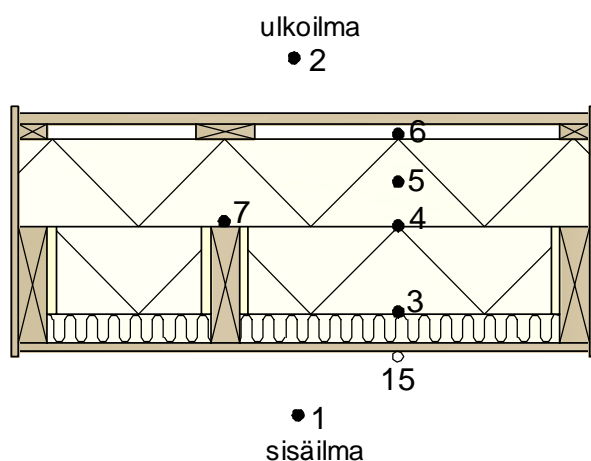
### Mittausantureiden kalibrointi

Mittausanturit kalibroitiin vertaamalla niiden osoittamia lukemia kalibroidun Vaisala Probe HMP44 - lämpötila- ja kosteusanturin lukemiin vastaavissa olosuhteissa. Saadut poikkeamat otettiin huomioon tulosten arvioinnissa.

### Mittausantureiden sijainnit

Kylmässä ja lämpimässä kammiossa oli kummassakin yksi mittausanturi. Rakenteiden sisään asennettiin anturit kosteuden tiivistymisen kannalta kriittisimpiin kohtiin eli rakennekerrosten rajapintoihin. Lisäksi mitattiin olosuhteita rungon ulkopuolisten EPS-eristeiden sisällä sekä rakenteiden sisäpinnoissa ja tuuletusväleissä. (Ks. kuvat 15 - 16.)

### Mittauspisteet rakenteessa 1



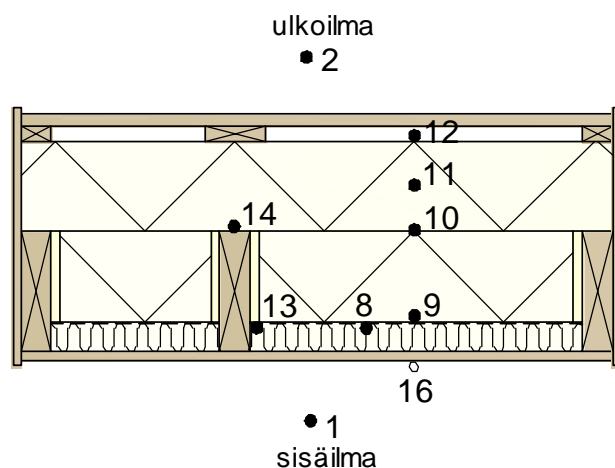
- kosteus- ja lämpötila-anturi
- lämpötila-anturi

1. lämmin kammio
2. kylmä kammio
3. polyesterikuitueristeen ja EPS-eristeen välinen rajapinta
4. EPS-eristeiden välinen rajapinta
5. rungon ulkopuolisen EPS-eristeen sisällä
6. tuuletusväli
7. rungon ulkopuolisen EPS-eristeen ja runkotolpan välinen rajapinta
15. kipsilevyn sisäpinta

KUVIO 15. Mittauspisteet rakenteessa 1



## Mittauspisteet rakenteessa 2



- kosteus- ja lämpötila-anturi
- lämpötila-anturi

1. lämmin kammio
2. kylmä kammio
8. höyrynsulun sisäpinta
9. höyrynsulun ulkopinta
10. EPS-eristeiden välinen rajapinta
11. rungon ulkopuolisen EPS-eristeen sisällä
12. tuuletusväli
13. polyesterikuitueristeen ja polyuretaanisauaman välinen rajapinta
14. rungon ulkopuolisen EPS-eristeen ja runkotolpan välinen rajapinta
16. kipsilevyn sisäpinta

KUVIO 16. Mittauspisteet rakenteessa 2

Laitteiston ja koe-elementtien rakentamista on kuvattu ja selostettu myös liitteessä 11 .

## 5.2 Laitteistolla tehdyt kokeet

Rakennetulla tutkimuslaitteistolla tehtiin helmikuun ja maaliskuun 2010 aikana koesarja, jossa tutkittiin rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta rakennuksen normaalin käyttövaiheen, rakentamisvaiheen sekä rakennuksen kuivumisvai-

heen aikaisissa olosuhteissa (ks. Rakenteiden kosteustekninen mitoitus, luku 3.1).

### **Koe 1**

Kokeessa 1 tutkittiin rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta normaaleissa käytönaikaisissa talviolosuhteissa. Kokeen tavoiteolosuhteet olivat

- **sisäilma**  
lämpötila +22 °C  
suhteellinen kosteus 45 %
- **ulkoilma**  
lämpötila -10 °C  
suhteellinen kosteus 85 %.

### **Koe 2**

Kokeessa 2 tutkittiin rakenteiden toimivuutta työnaikaisissa olosuhteissa, jolloin sisäilman kosteuspitoisuus saattaa esimerkiksi lattiavalun yhteydessä olla hyvin suuri. Tarkastelun kohteena oli erityisesti kosteuden mahdollinen tiivistyminen mittauspisteissä 3 ja 8, eli EPS-kerroksen sisäpinnassa rakenteessa 1 sekä höyrynsulun sisäpinnassa rakenteessa 2 (ks. Matalaenergiaohjeistus, luku 4.4). Tavoiteolosuhteet olivat

- **sisäilma**  
lämpötila +22 °C  
suhteellinen kosteus 85 - 90 %
- **ulkoilma**  
lämpötila -10 °C  
suhteellinen kosteus 85 %.

### **Koe 3**

Kokeen 3 tarkoituksena oli tutkia rakennusaikaisen kosteuden poistumista rakenteista kokeen 2 jälkeen. Olosuhteet palautettiin vaiheittain samoiksi kuin kokeessa 1. Tavoitteena oli arvioida rakenteiden kuivumiskykyä. Kokeiden päätyttyä koe-elementit avattiin niissä tapahtuneiden muutosten arvioimiseksi.

## 6 TUTKIMUSTEN TULOKSET

### 6.1 Koe 1

#### Kokeen vaiheet

Kokeen 1 kahdeksan ensimmäisen vuorokauden aikana olosuhteet pysyivät tavoitearvoissa ja suhteellisen vakioina sekä kylmässä että lämpimässä kammiossa. Lämpötilat rakenteiden kaikissa mittauspisteissä asettuivat tasapainotilaan kahdessa vuorokaudessa. Rakenne 1 oli jo saavuttamassa stationääritilaa rungon ulkopinnassa olevaa mittauspistettä 7 lukuun ottamatta. Yhdeksäntenä koepäivänä höyrystimessä tapahtui toimintahäiriöitä ja lämpimän kammion kosteudet vaihtelivat muutamana päivänä nousten yli 50 prosenttiin. Tilanne saatiin kuitenkin hallintaan, vaikka kokeen kolmena viimeisenä päivänä lämpimän kammion kosteus laski hieman tavoitearvoista. Myös kylmän kammion kosteus laski kokeen loppua kohden 80 prosenttiin. Kokeen lopussa rakenteet eivät olleet täysin stationääritilassa, mutta kosteuskäyrien vaihtelut olivat suhteellisen pieniä eikä mikään niistä enää ollut nousussa. Kokeen lopputilanne on esitetty kuviossa 17.

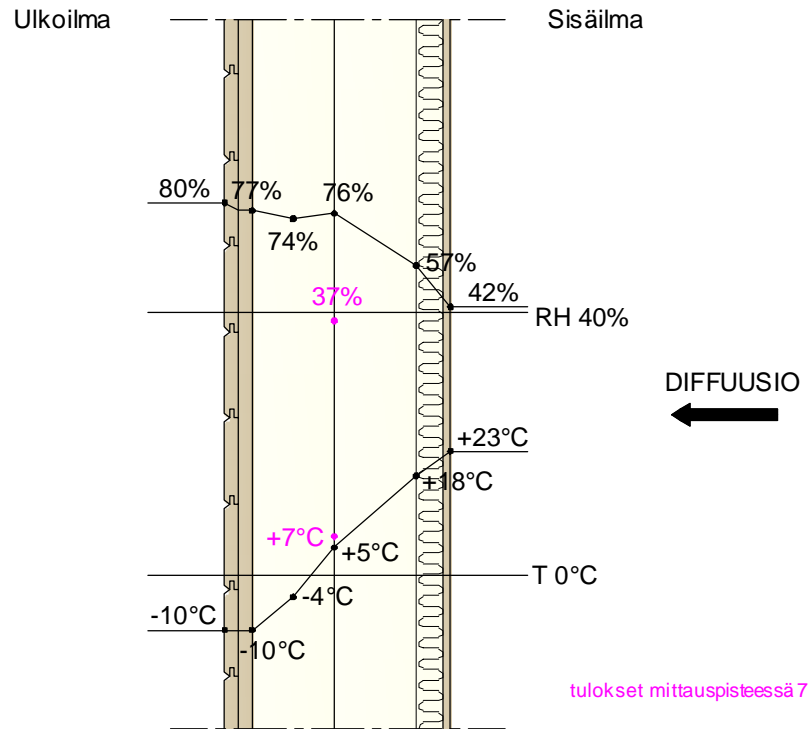
#### Paine-eron mittaaminen

Paine-eroa ei kokeiden aikana mitattu jatkuvasti. Mittauksia tehtiin tarkistusluontoisesti kokeen 1 alussa 4 - 5 kertaa päivässä ja sen jälkeen 1 - 3 päivän välein. Mittaustulokset pysyivät ilmoitetuissa rajoissa (ks. taulukko 2) hetkellisiä ja kylmälaitteen käyntijaksojen aikaisia poikkeamia lukuun ottamatta.

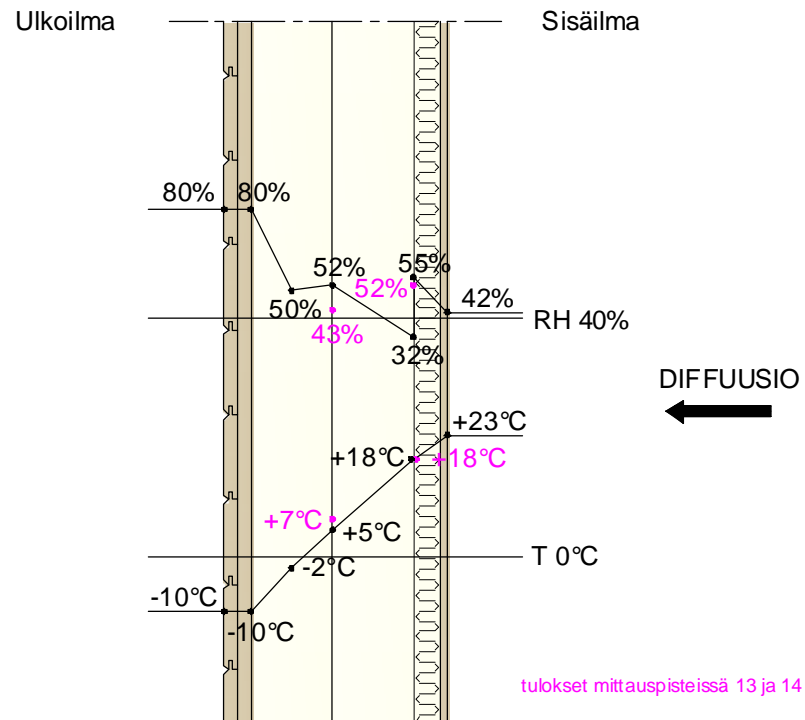
TAULUKKO 2. Kokeen 1 mittaustuloksia

rakenteiden alkukosteudet	RH 17 - 27 %
kokeen kesto	20 vrk
paine-ero kylmässä kammiossa	0 - 1,0 Pa:n ylipaine
kosteuserot lämpimässä kammiossa	2 - 3 RH-%
sisäilman lämpötila	22 - 24 °C

## Rakenne 1



## Rakenne 2



KUVIO 17. Kosteus- ja lämpötilajakaumat kokeen 1 lopussa

### **Mittaustulosten tulkinta**

Olosuhteet kokeen 1 aikana eivät pysyneet täysin tavoitearvoissa. Sisäilman lämpötila oli suurimman ajan koetta hieman tavoitetta korkeampi ja samoin suhteellinen kosteus nousi tavoitetta korkeammalle. Nämä tekijät aiheuttavat kuitenkin varmuutta koetuloksiin ja rakenteet toimivat kosteusteknisesti myös tavoiteolosuhteita korkeammassa sisäilman kosteuspitoisuuksissa. Ulkoilman lämpötila pysyi tavoitearvoissa ja myös suhteellinen kosteus noin kokeen puoliväliin asti laskien kuitenkin kokeen loppua kohti arvoon RH 80 %. Tällä ei kuitenkaan voida katsoa olevan oleellista merkitystä kokeen lopputulosten kannalta.

Paine-erotilanne kylmän ja lämpimän kammion välillä oli samansuuntainen kuin matalaenergiarakennuksille asetetuissa tavoitteissa, joiden mukaan rakennukset säädetään vain hieman alipaineisiksi (ks. Matalaenergiarakentaminen 2009, 159). Sisäilman alipaineisuudella on rakenteiden kosteusteknistä toimivuutta parantava vaikutus, mutta kokeessa mitatut paine-erot olivat kuitenkin pieniä, joten niiden vaikutusta koetuloksiin ei voida pitää merkittävänä.

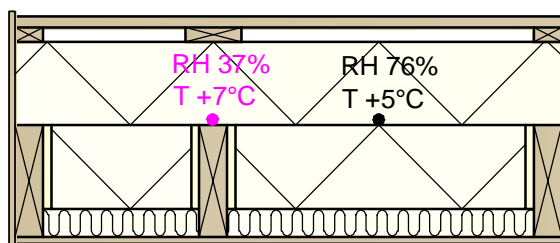
Lämpötilaerojen suhteellisen nopea muuttuminen rakenteissa johtuu muun muassa rakenneosien pienestä lämpökapasiteetista. Lämpötilat rakenteiden mittauspisteissä ovat yhteneväiset lukuun ottamatta anturien 5 ja 11 lukemia. Mittaustuloksista ilmenee selkeästi höyrynsulkukerroksen edullinen vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Kosteuspitoisuudet höyrynsulun ulkopuolella rakenteessa 2 ovat selkeästi matalampia kuin rakenteessa 1.

Yllättävää mittaustuloksissa oli se, että rungon ulkopuolisten EPS-eristeiden sisällä olevien anturien 5 ja 11 ilmoittamat kosteuslukemat olivat matalampia kuin EPS-eristeiden välisissä rajapinnoissa olleiden anturien 4 ja 10. Tilanteen olisi pitänyt olla päinvastoin, sillä suhteellisen kosteus on yleensä matalampi lähempänä rakenteen sisäpintaa. Ilmiön arveltiin johtuvan siitä, että EPS-eristeen pinta on muuta eristettä tiiviimpi ja näin ollen pinnan vesihöyrynvastus on suurempi. Asia sai vahvistuksen, kun eristettä tarkasteltiin mikroskoopilla. Kuumalangalla leikkaamalla valmistettujen EPS-eristeiden pinta muodostuu tiiviiksi lämpenemisen seurauksena. Sama ilmiö on havaittavissa myös kokeiden 2 ja 3 mittaustuloksissa.

Kuviosta 18 ilmenevät mittaustulosten eroavaisuudet samalla etäisyydellä rakenteen 1 sisäpinnasta. Runkotolpan ulkopinnassa lämpötila on 2 °C EPS-eristeiden välisessä rajapinnassa olevaa lämpötilaa korkeampi. Lämpötilaero johtuu runkokuun EPS-eristeeseen verrattuna suuremmasta lämmönjohtavuudesta. Mittaustulosten perusteella voidaan arvioida myös diffuusiolaskelmien tarkkuutta, sillä laskennallinen lämpötilaero tarkastelupisteiden välillä lähes vastaavissa olosuhteissa on noin 8 °C (ks. liite 6).

Suhteellinen kosteus rungon ulkopinnassa on EPS-eristeiden rajapinnassa olevaa suhteellista kosteutta matalampi, koska muun muassa puun vesihöyrynvastus on huomattavasti EPS:n vesihöyrynvastusta suurempi. Myös puun hygroskooppisuus ja korkeampi lämpötila vaikuttavat tarkastelupisteen suhteelliseen kosteuteen ja sen muutokseen. Rakenteessa 2 kyseisten pisteiden lämpötilaerot ovat samat, mutta kosteuserot ovat ainoastaan 9 RH-% johdettujen höyrynsulun vaikutuksesta (ks. kuvio 17).

Rakenne 1



KUVIO 18. Olosuhde-eroja rakenteessa 1

Mittaustulosten perusteella molemmat rakenteet ovat kosteusteknisesti toimivia normaaleissa käyttöolosuhteissa. Rakenteessa 1 on kuitenkin kondensoitumisvaara pakkasjaksojen aikana, mikäli sisäilman suhteellinen kosteus on normaalia korkeampi. EPS-eristeiden välisessä rajapinnassa mittauspisteessä 4 RH oli kokeen aikana niinkin korkea kuin 86 % sisäilman RH:n ollessa 52 %. Rakenteen 2 mittaustulokset ovat huomattavasti varmallalla puolella. Kosteusongelmien syntyminen rakenteessa edellyttää virheitä suunnittelussa, toteutuksessa tai rakennuksen käytössä.

## 6.2 Koe 2

### Kokeen vaiheet

Koetta 2 jatkettiin suoraan edellisestä kokeesta laitteistoa pysäyttämättä. Lämpimän kammion suhteellista kosteutta nostettiin vaiheittain kahdeksan päivän aikana. Kokeen lopussa lämpimän kammion RH oli 96 %. Kylmän kammion RH oli koko kokeen ajan noin 80 %. Lämpötilat kylmässä ja lämpimässä kammiossa (ks. taulukko 3) sekä rakenteissa pysyivät lähes samoina kuin kokeessa 1. Paine-eron mittausta jatkettiin 1 - 3 vuorokauden välein.

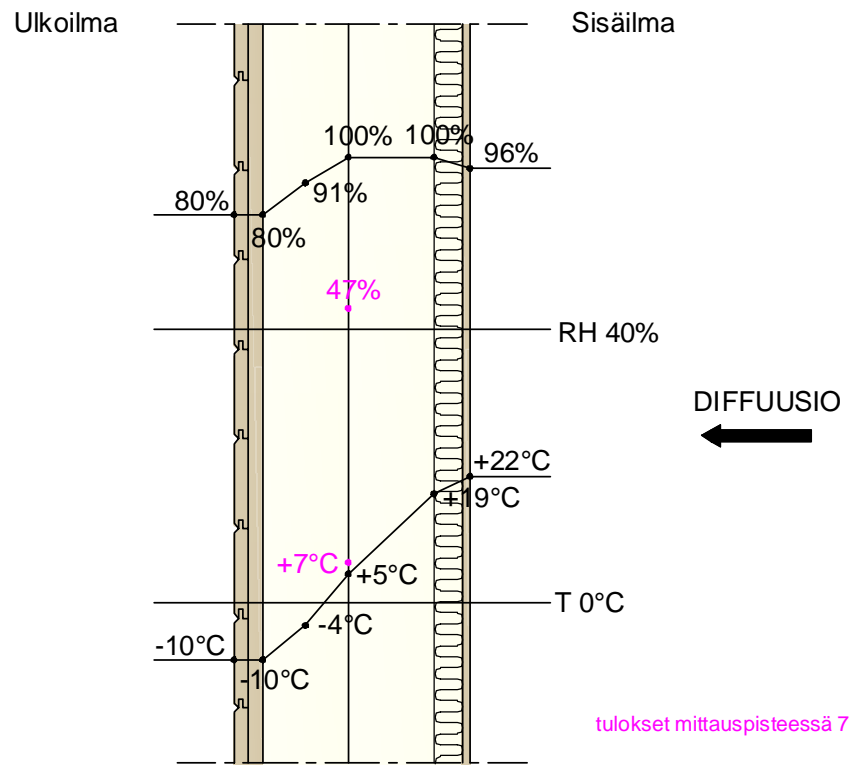
*Rakenteessa 1* alkoi tiivistyä kosteutta mittauspisteessä 4 eli EPS-eristeiden rajapinnassa kokeen neljäntenä päivänä lämpimän kammion RH:n ollessa noin 70 %. Mittauskäyrässä 1 näkyy tosin kosteuden aleneminen tuona päivänä (ks. liite 12). Höyrystimen säädöissä oli jälleen ongelmia ja lämpimän kammion kosteuden hallinta oli yleensäkin haasteellisempaa korkeilla kosteuspitoisuuksilla. Myös ympäröivien tilojen olosuhteiden muutokset vaikuttivat ajoittain laitteiston toimintaan. Kondensoituminen mittauspisteessä 4 jatkui kokeen loppuun asti. Mittauspisteessä 3 eli EPS-eristeen sisäpinnassa alkoi kondensoituminen kokeen viimeisenä päivänä kun lämpimän kammion RH oli noin 95 %.

*Rakenteessa 2* alkoi kosteuden tiivistyminen mittauspisteessä 8 eli höyrönsulun sisäpinnassa kokeen viimeisenä päivänä lähes samanaikaisesti kuin rakenteen 1 mittauspisteessä 3. Polyuretaanisauman kohdalla, samalla etäisyydellä rakenteen sisäpinnasta olevassa mittauspisteessä 13 RH ei noussut yhtä korkealle, vaan oli korkeimmillaan 93 % (ks. kuvio 19).

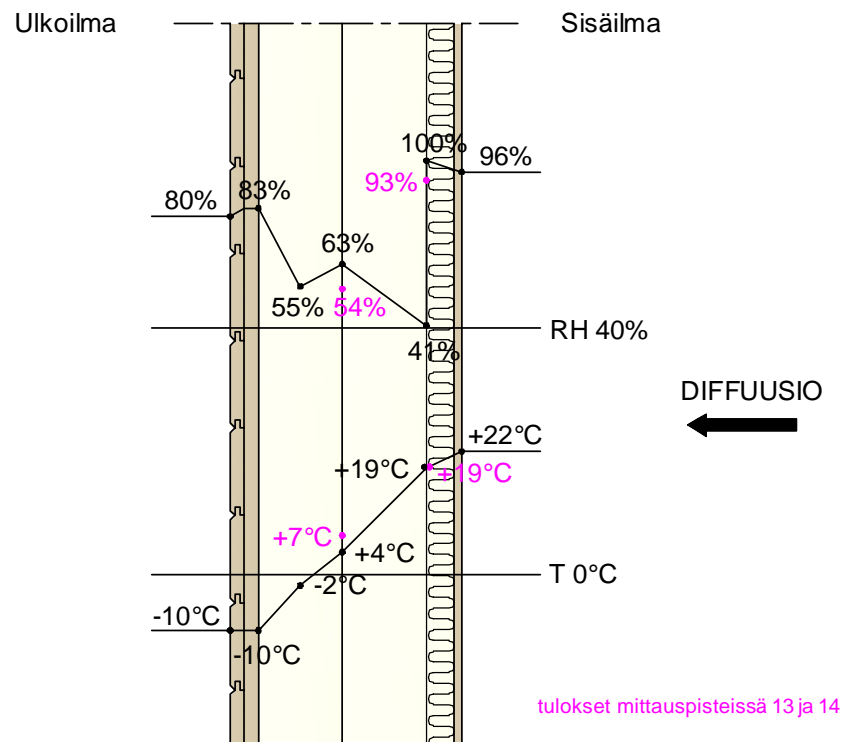
TAULUKKO 3. Kokeen 2 mittaustuloksia

rakenteiden alkukosteudet	≈ kokeen 1 lopputilanne
kokeen kesto	8 vrk
paine-ero kylmässä kammiossa	0,5 - 1,7 Pa:n ylipaine
kosteuserot lämpimässä kammiossa	2 - 3 RH-%
sisäilman lämpötila	22 - 23 °C

## Rakenne 1



## Rakenne 2



KUVIO 19. Kosteus- ja lämpötilajakaumat kokeen 2 lopussa

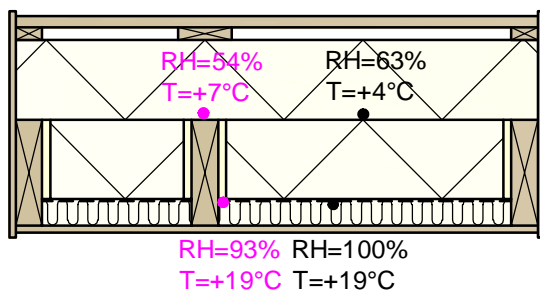


### Mittaustulosten tulkinta

Sisäilman RH nousi kokeen lopussa tavoitearvoa korkeammalle, mutta toisaalta alle 90 prosentin kosteuksissa mittauspisteissä 3 ja 8 ei ehkä olisi tapahtunut kondensoitumista, jolloin rakenteiden kuivumiskyvystä kyseisen tilanteen jälkeen ei olisi saatu tuloksia kokeessa 3. Kondenssi mittauspisteissä 3 ja 8 alkoi vasta yllättävän korkeissa kosteuspitoisuuksissa, kun taas mittauspisteessä 4 kondenssi alkoi yllättävän varhain. Vertaamalla RH-käyriä 3 ja 8 sisäilman RH-käyrään voidaan todeta EPS-eristeen ja höyrynsulun sisäpinnan kosteusolosuhteiden seuraavan hyvin pienellä viiveellä sisäilman kosteusolosuhteiden muutoksia (ks. liite 12). Paine-erot olivat hieman korkeampia kuin kokeessa 1, mutta eivät edelleenkään merkittäviä kokeen tulosten kannalta.

Kuviosta 20 voidaan havaita, että runkotolpan ulkopinnan ja EPS-eristeiden välisen rajapinnan kosteuserot jäävät höyrynsulullisessa rakenteessa huomattavasti höyrynsuluttoman rakenteen kosteuseroja pienemmiksi myös korkeissa sisäilman kosteuspitoisuuksissa (vrt. kuvio 19). Lisäksi nähdään, että polyuretaanisauman kohdalla kondenssia ei tapahtunut.

Rakenne 2



KUVIO 20. Olosuhde-eroja rakenteessa 2

Tulosten perusteella rakenteeseen 1 saattaa työnaikaisissa olosuhteissa kertyä helpohkosti kosteutta EPS-eristeiden väliseen rajapintaan. Rakenne 2 on toimintavarmempi. Rakenteiden sisäpinnat toimivat kosteusteknisesti melko korkeissakin sisäilman kosteuspitoisuuksissa, mutta kondensoitumisriski on olemassa. Riski voidaan kuitenkin välttää asentamalla polyesterikuitueriste ja kipsilevy vasta sisäilman kosteuspitoisuutta nostavien työvaiheiden jälkeen, jolloin rakenteiden sisäpintojen lämpötilat pysyvät lähellä sisäilman lämpötilaa.

## 6.3 Koe 3

### Kokeen vaiheet

Myös koetta 3 jatkettiin suoraan edellisestä kokeesta laitteistoa pysäyttämättä. Lämpimän kammion suhteellista kosteutta alennettiin vaiheittain kohti tavoitearvoja, jotka olivat samat kuin kokeessa 1. Lämpötilat pysyttelivät edelleen melko vakioina. Kolmantena koepäivänä höyrystimessä ilmeni jälleen häiriöitä, jotka saatiin hallintaan vasta kolmen päivän kuluttua. Ympäröivien olosuhteiden muutokset sekä korkeat kosteuspitoisuudet vaikuttivat edelleen laitteiston hallintaan. Kokeen loppuvaiheessa lämpimän kammion RH laski tavoitearvoja matalammalle ollen kokeen päättyessä 38 % (ks. kuvio 21). Kylmän kammion RH oli kokeen ajan noin 80 %. Paine-erot laskivat kokeen loppua kohden ollen kokeen päättyessä lähes samalla tasolla kuin kokeessa 1 (ks. taulukko 4).

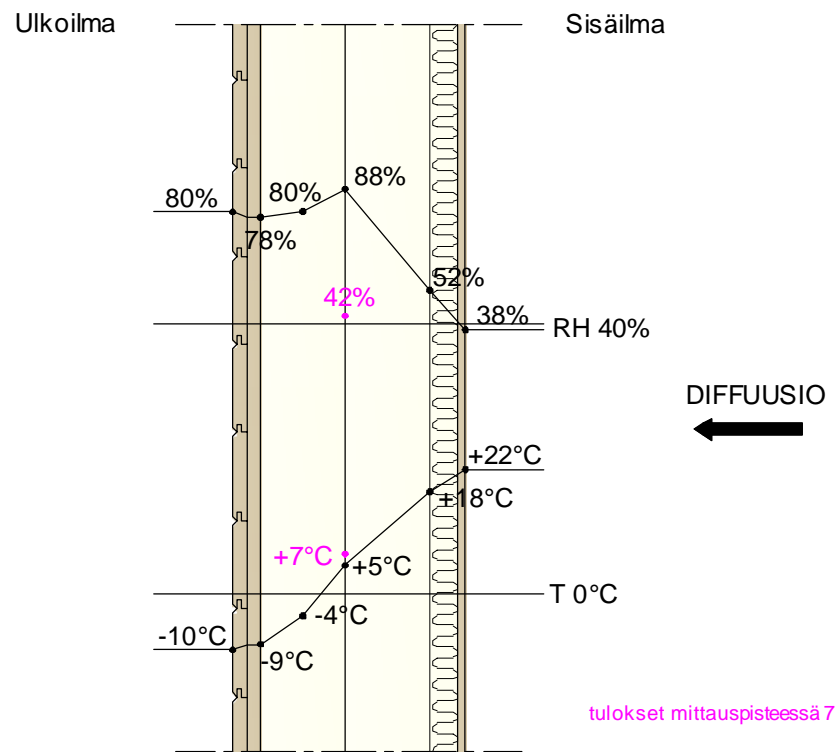
*Rakenteessa 1* kondensoituminen loppui mittauspisteessä 3 jo ensimmäisen koepäivän jälkeen. Mittauspisteen kosteuskokemat seurasivat sisäilman muutoksia noin 1 vuorokauden viiveellä. Mittauspisteessä 4 RH pysyi arvossa 100 % vielä 9 vuorokautta, jonka jälkeen lukemat alkoivat laskea jyrkästi lämpimän kammion RH:n ollessa noin 43 %.

*Rakenteessa 2* kondensoituminen mittauspisteessä 8 loppui lähes samanaikaisesti kuin rakenteessa 1 eli jo ensimmäisen koepäivän jälkeen. Myös tämän mittauspisteen kosteuskokemat seurasivat sisäilman muutoksia yhden päivän aikavälillä.

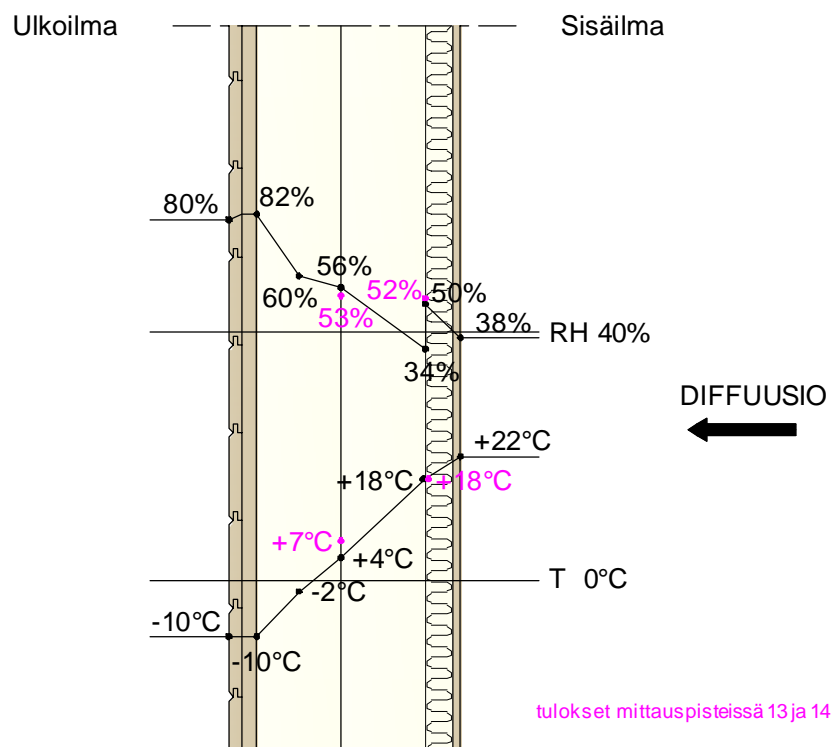
### TAULUKKO 4. Kokeen 3 mittaustuloksia

rakenteiden alkukosteudet	= kokeen 2 lopputilanne
kokeen kesto	11 vrk
paine-ero kylmässä kammiossa	0,2 - 1,7 Pa:n ylipaine
kosteuserot lämpimässä kammiossa	2 - 3 RH-%
sisäilman lämpötila	22 - 23 °C

## Rakenne 1



## Rakenne 2



KUVIO 21. Kosteus- ja lämpötilajakaumat kokeen 3 lopussa

### **Mittaustulosten tulkinta**

Mittauspisteissä 3 ja 8 kondensoituminen loppui nopeasti sisäilman RH:n laskemisen jälkeen. Höyrynsulun ja EPS-eristeen sisäpinnoissa ollut kosteus siirtyi diffuusiolla takaisin sisäilmaan, jonka absoluuttinen kosteuspitoisuus laski kyseisten pintojen absoluuttista kosteuspitoisuutta matalammalle. Myös mittauspisteiden 3 ja 8 jo kokeessa 2 havaittu nopea reagointi sisäilman olosuhteiden muutoksiin kertoo rakenteiden hyvästä kuivumiskyvystä sisäänpäin sisäpinnoissa olevan polyesterikuitueristeen vesihöyrynläpäisevyyden ansiosta.

Mittauspisteessä 4 kondensoitumisen loppuminen kesti huomattavasti pidempään, sillä pisteen molemmin puolin on 150 mm:n EPS-kerros, joiden vesihöyrynläpäisevyys on oleellisesti polyesterikuitueristeen vesihöyrynläpäisevyyttä pienempi. Kokeen lopussa tavoitearvoa matalammalle laskenut sisäilman RH nopeutti kuivumista jonkin verran, mutta kuivuminen alkoi kuitenkin jo RH:n ollessa noin 43 %.

Rakenteen 1 lähempänä ulkoilmaa olevissa osissa tapahtui kosteuspitoisuuksien alenemista kokeen 2 tuloksiin verrattuna, joka kertoo rakenteen kuivumiskyvystä myös ulospäin. Myös runkotolpan ulkopinnassa mittauspisteessä 7 tapahtui selvää kuivumista. Rakenteen 2 vastaavissa osissa kosteuspitoisuudet laskivat myös hieman kokeen 2 arvoista. Tosin rakenteen höyrynsulun ulkopuolisten osien kosteuspitoisuudet eivät nousseet kokeen 2 aikana oleellisesti. Erikoisena ilmiönä kokeessa oli, että rakenteen 2 rungon ulkopuolisen EPS-kerroksen sisällä suhteellinen kosteus nousi 5 RH-% kokeen 2 tuloksiin verrattuna.

Tulosten perusteella molempien rakenteiden kuivumiskyky sisäänpäin on hyvä. Mikäli sisäilman kosteuspitoisuus on pitkäaikaisesti hyvin korkea, saattaa tosin syntyä kosteusongelmia höyrynsulun ja EPS-eristeen sisäpinnoissa. Rakenteet ovat kuivumiskykyisiä myös ulospäin, mutta mikäli rakenteeseen 1 kertyy pitkäaikaisesti kosteutta, saattaa sen kuivumiskyky olla olosuhteista riippuen riittämätön.

## 6.4 Koe-elementtien purkaminen

Kokeiden päätyttyä laitteisto purettiin ja koe-elementit avattiin. Koerakenteista ei löydetty silmin havaittavia muutoksia ulkopuolisten koolausten sisäpinnoissa olleita tummuneita alueita lukuun ottamatta. Koolausten sisäpinnat tuntuivat lisäksi kosteilta. Rakenteiden muut puuosat sekä eristeet näyttivät ja tuntuivat kosketeltaessa kuivilta. Myöskään polyuretaanisaumoissa ei havaittu mitään kosteuden kertymiseen tai saumojen aukeamiseen viittaavaa. (Ks. liite 13.)

Mittausantureita eristekerroksista poistettaessa havaittiin, että rungon ulkopuolisten EPS-eristeiden sisään asennettujen mittausantureiden 5 ja 11 asennusreikien tiivistämiseen käytetty polyuretaanivaaho ei ollut kunnolla turvonnut (ks. liite 13, kuvat 9 - 10). Antureiden ympärillä oli näin ollen ylimääräistä ilmalaa. Lisäksi rakenteessa 1 oli asennusreiästä tapahtunut ilmeisesti lämpövuotoa. Asia voidaan havaita myös koetuloksista, sillä mittausanturin 5 osoittamat lämpötilalukemat olivat kokeissa 2 astetta anturin 11 osoittamia lukemia matalampia, vaikka niiden olisi sijaintinsa puolesta pitänyt ilmoittaa samoja lukemia. Lämpötilan mittausvirhe aiheuttaa virhettä myös kosteuslukemiin.

Tekijällä lienee ollut jotain vaikutusta myös kokeen 3 mittaustuloksiin, joiden mukaan pisteessä 11 kosteuspitoisuus nousi, vaikka muissa mittauspisteissä kosteudet olivat laskussa. Tosin mittauspiste on lähellä rakenteen ulkopintaa, jolloin ulkoilmaa kohti siirtyvä kosteus saattoi olla vielä siirtymisvaiheessa.

Homogeenisessa ainekerroksessa olevat olosuhteet eivät kuitenkaan nouse kosteusteknisesti määrääviksi, sillä kondensoitumisen syntymiseen vaaditaan kylmä pinta. Näin ollen mittausvirheillä ei voida katsoa olevan oleellista vaikutusta lopputulosten kannalta. Mittaustulosten perusteella rakenteiden kosteusteknisesti kriittisimmät alueet ovat EPS-eristeiden välisissä rajapinnoissa.

## 6.5 Yhteenveto

### Tutkittujen rakenteiden kosteustekninen toimivuus

Kokeista saatujen tulosten sekä koe-elementtien purkamisessa havaittujen tekijöiden perusteella *rakenteen 1* kosteusteknisestä toimivuudesta voidaan todeta, että

- Rakenne on normaaleissa käytönaikaisissa olosuhteissa kosteusteknisesti toimiva, joskin siihen saattaa kovien pakkasjaksojen aikana kertyä kosteutta sisäilman suhteellisen kosteuden ollessa tavanomaista korkeampi.
- Rakenteeseen saattaa kertyä helposti kosteutta rakennusaikaisissa olosuhteissa. Kosteudenhallintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota lämmityskaudella.
- Rakenne on kuivumiskykyinen molempiin suuntiin.

*Rakenteen 2* osalta voidaan puolestaan todeta seuraavaa:

- Rakenne osoittaa kosteusteknistä toimintavarmuutta normaaleissa käytönaikaisissa olosuhteissa.
- Rakenne on kosteusteknisesti toimiva myös työnaikaisissa olosuhteissa, mutta höyrynsulun sisäpintaan saattaa tiivistyä kosteutta lämmityskaudella rakennettaessa. Riski voidaan kuitenkin välttää asennusteknisin toimenpitein.
- Rakenne on kuivumiskykyinen molempiin suuntiin.

## 7 OPINNÄYTETYÖN ARVIOINTI JA KEHITTÄMINEN

### 7.1 Tutkimuslaitteiston toiminta ja mittaustarkkuus

#### Ympäröivien olosuhteiden vaikutus laitteiston toimintaan

Kokeiden aikana tapahtuneet ympäröivien tilojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden muutokset vaikuttivat laitteiston toimintaan, sillä kammioiden ympärillä ollut 0,2 mm:n polyeteenikalvo läpäisee vesihöyryä ja lämpöä. Olosuhteiden muutokset vaikeuttivat jonkin verran laitteiston säätöjen ylläpitoa. Tilannetta olisi helpottanut alkuperäiseen suunnitelmaan kuulunut automatisoitu kosteudensäätö sekä kylmässä että lämpimässä kammiossa, mutta näitä ei kuitenkaan saatu toteutettua. Myös etäluettava paine-erolähetin kuului suunnitelmaan.

Ympäröivien tilojen kosteusvaihtelut koko tutkimusjakson aikana olivat noin  $\pm 10$  RH-% ja lämpötilavaihtelut noin  $\pm 1,5$  °C. Ajoittain sisä- ja ulkoilman 24 h:n mittauskäyristä voitiin havaita aivan säännönmukaista vaihtelua vuorokaudenaikojen mukaan. Laitteistoa ympäröivien olosuhteiden muutokset vaikuttivat siten, että esimerkiksi lämpimän kammion RH:n vaihteluväli kokeen 1 aikana saattoi olla ajoittain noin  $\pm 7 - 8$  RH-% ja lämpötilavaihtelu noin  $\pm 1$  °C, joka tietysti vaikutti myös suhteelliseen kosteuteen. Liitteinä olevista mittauskäyristä voidaan kuitenkin lukea vuorokautiset keskiarvot. Myös höyrystimen toiminnassa ilmeni häiriöitä, joilla oli ajoittain suuria vaikutuksia lämpimän kammion suhteelliseen kosteuteen.

#### Mittaustulosten lukeminen

Liitteessä 12 olevissa mittaus tuloksissa ilmenevät lukuarvoina käyrien minimi- ja maksimiarvot. Peak- ja latest-arvot ovat hetkellisiä, muutaman minuutin välein päivittyviä tuloksia, jotka eivät välttämättä täsmää käyrien tuloksiin. Ilmiö voidaan havaita erityisesti kokeen 3 RH-käyristä (ks. esim. anturit 4 ja 5), joissa rakenteiden kuivumisesta johtuen latest-arvot ovat huomattavasti matalampia kuin käyristä luettavat arvot, jotka eivät ole vielä päivittyneet. Koe oli tuossa vaiheessa kuitenkin jo päättynyt ja lopputuloksina ilmoitetut arvot on luettu käy-

ristä. Myös sisäilman suhteellinen kosteus (anturi 1) on tuossa vaiheessa jo alhainen.

### **Lämpötilojen mittaustarkkuus**

HTS 10 - kosteus- ja lämpötila-anturien kalibroinnissa osoittamien lämpötilalukemien keskinäiset poikkeamat olivat yhden asteen sisällä. TS 10 -lämpötila-anturit saatiin muita antureita myöhemmin ja ne jouduttiin kalibroimaan jo kiinni laitteistossa ollessaan, jolloin olosuhteiden tasaantumisessa ilmeni ongelmia. Pientä virhettä kokeiden lämpötilalukemiin aiheuttaa lisäksi se, että HTS 10 -anturit ilmoittavat mittaustulokset kahdella desimaalilla, kun taas TS 10 -anturit 0,5 asteen tarkkuudella. Lämpötilalukemien kokonaisvirheet ovat ehkä noin  $\pm 1,5 - 2$  °C lukuun ottamatta mittauspistettä 5, jossa virhe saattaa olla suurempi (ks. Koe-elementtien purkaminen, luku 6.4).

### **Kosteuslukemien mittaustarkkuus**

Kalibroinnissa HTS 10 - kosteus- ja lämpötila-anturien osoittamien RH-lukemien poikkeamat olivat pieniä. Kaikki lukemat olivat noin 1 RH-% matalampia suhteessa vertailukohtana käytetyn mittausanturin lukemiin. Lämpimästä kammioista mitattiin kokeiden aikana korkeussuunnassa 2 - 3 RH-% eroja (ks. esim. taulukko 2). Kammion yläosassa RH oli hieman korkeampi kuin alaosassa. Ylempänä olleeseen rakenteeseen 2 kohdistui siis hieman suurempi kosteusrasitus kuin rakenteeseen 1. Sisä- ja ulkoilman mittausanturit sijoitettiin kumpaankin kammioon vaakasuunnassa rakenteiden keskelle ja korkeussuunnassa niiden väliin noin 150 mm:n etäisyydelle rakenteiden pinnoista, joten poikkeamat eivät näy tuloksissa.

Edellä mainittujen tekijöiden sekä myös lämpötilojen mittausrvirheiden perusteella rakenteista mitattuihin kosteuslukemiin aiheutuneiden virheiden suuruudeksi voidaan arvioida ehkä noin  $\pm 7 - 8$  RH-% lukuun ottamatta mittauspisteiden 5 ja 11 lukemia, joissa virhe on todennäköisesti suurempi.

### **Yhteenveto**

Laitteiston yksinkertaisuudesta ja säätömahdollisuuksien vähyydestä huolimatta tehdyt kokeet onnistuivat yllättävän hyvin. Mittausvirheet olisivat saattaneet olla huomattavasti suurempiakin. Ennen kokeiden aloittamista varauduttiin



myös siihen, että arviointikelpoisia tuloksia ei välttämättä saada. Tehdyt kokeet osoittavat, että periaatteessa hyvin yksinkertaisella laitteistolla on mahdollista saada aivan vertailukelpoisia mittaustuloksia.

## 7.2 Tulokset ja tavoitteiden toteutuminen

### Diffuusiolaskelmat

Suunnitteluvaiheessa rakenteen kosteusteknisen toiminnan arviointiin käytetty tarkastelumenetelmä on peruslähtökohtaisesti yksinkertaistettu laskentamalli, joka ei ota huomioon muun muassa rakennusmateriaalien hygroskooppisuutta, muuttuvissa olosuhteissa tapahtuvaa kosteuden siirtymistä, kosteuden ja lämmön siirtymisen vaikutusta toisiinsa tai muita siirtymismuotoja. Asia voidaan havaita laskelmien ja tehtyjen kokeiden toisistaan poikkeavissa tuloksissa, joihin vaikuttivat myös EPS-eristeiden pintojen tiiviys. Tässä tapauksessa diffuusiolaskelmia ei alun perinkään ollut tarkoitus käyttää muuhun kuin pelkkään arviointiin suunnitteluvaiheessa, eikä laskelmien luotettavuudella näin ollen ollut kovin oleellista merkitystä. Laskentamenetelmä osoittautui kuitenkin käytökelpoiseksi apuvälineeksi ulkoseinärakenteen suunnittelussa.

### Lämmönläpäisykerroimen laskenta

Rakenteen lämmönläpäisykerroin määritettiin suunnitteluvaiheessa SFS-EN-standardin mukaisella laskentamenetelmällä. Vaihtoehtoisesti olisi ollut mahdollista käyttää myös rakentamismääräyskokoelman osassa C4 esitettyä laskentamallia. Kumpikaan edellä mainituista menetelmistä ei ota huomioon muun muassa rakennusosien läpi puolelta toiselle vuotavan ilman, rakennusosiin kohdistuvan auringon säteilyn eikä muiden ajan funktiona vaihtelevien rakenteisiin kohdistuvien lämpökuormien vaikutusta (RakMK C4, 4). Tämä aiheuttaa laskelmiin virhettä erityisesti suuren lämpökapasiteetin omaavien rakenteiden yhteydessä. Suunnitellun ulkoseinärakenteen lämmönläpäisykerroimen laskennassa itse laskentamenetelmän aiheuttamat virheet eivät lähtökohtaisesti liene kovin suuria EPS-eristeiden ilmatiiviiden ja pienen lämpökapasiteetin johdosta.

SFS-EN -standardin mukainen laskentamenetelmä ei myöskään ota huomioon lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden heikentävää vaikutusta rakenteen lämmöneristävytyteen. Puute saattaa johtaa eristeiden sisäisen konvektion vuoksi huomattavaan virheeseen erityisesti olosuhteissa, joissa lämpötilaerot rakenteiden eri puolilla ovat suuret (ks. Luonnollinen konvektio, luku 2.1). Suomen olosuhteissa oleellinen lämmöneristeiden ilmanläpäisevyyden korjaustekijä on lisätty laskentamenetelmään Rakennusinsinööriunionin ohjeessa Rakennusosien lämmönläpäisykerrotoimien laskenta. Suunnitellun rakenteen osalta korjaustekijää ei kuitenkaan tarvinnut laskea EPS-eristeiden alhaisen ilmanläpäisevyyden takia.

Edellä mainittujen tekijöiden vuoksi rakenteelle laskettua lämmönläpäisykerrotoimen arvoa  $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$  ei voida pitää täysin totuudenmukaisena, mutta käytetty laskentamenetelmä on kuitenkin lainsäädännöllisesti hyväksytty ja sitä käytetään yleisesti. Lisäksi lämmönläpäisykerroin on huomattavasti varmalla puolella, sillä sen neljällä desimaalilla ilmoitettu arvo on  $0,1055 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Hyvin pienellä lämmöneristävytyden lisäyksellä rakenteella päästään passiivitaloille esitettyyn lämmöneristävyystasoon.

### **Rakenteen käytännön toteutettavuus**

Rakenteen käytännön toteutettavuutta arvioitiin suunnitteluvaiheessa tekemällä koerakenteita. Tarkastelukohteina olivat erityisesti EPS-eristeiden asennettavuus puurunkoon sekä koolausten kiinnittäminen rungon ulkopuolisen eriste-kerroksen läpi. Koerakenteiden yhteydessä ei ilmennyt käytännön esteitä rakenteen toteutettavuudelle. Lisäksi rakenteen työmaatoteutuksen periaatteet esitettiin luvussa 4.4 Suunnittelutavoitteiden huomioon ottaminen.

Rakennukset ovat kuitenkin laajoja kokonaisuuksia, joiden toteuttamisessa tulevat huomioon otaviksi myös muun muassa lukuisat detaljit, eri rakennevaihtoehdot sekä muut rakennusosat ja niiden liitokset, joiden arviointi ei opinnäytetyön puitteissa ollut mahdollista. Todellisen varmuuden saaminen edellyttää useampien koerakenteiden tai koerakennuksen rakentamista. Rakenteessa on kuitenkin täysin perinteinen ja yksinkertainen kantava runko, eikä sen asennuksessa tarvita periaatteessa mitään uusia menetelmiä. Rakenteen yksinker-

taisuudesta johtuen käyttökelpoiset ratkaisut tulevat hyvin todennäköisesti löytymään helposti.

### **Matalaenergiaohjeistus**

Suunnitellun rakenteen matalaenergiaohjeistukseen liittyviä ominaisuuksia käsiteltiin luvussa 4.4 Suunnittelutavoitteiden huomioon ottaminen. Rakenteen voidaan todeta olevan matalaenergiaohjeistuksen mukainen niiltä ominaisuuksiltaan, joita oli mahdollista arvioida opinnäytetyön puitteissa. Yhtenäistä höyryn- ja ilmansulkua rakenteessa ei tosin ole, mutta tehdyissä tutkimuksissa ei myöskään ilmennyt missään olosuhteissa kosteus- ja lämpötekniisiä ongelmia asiaan liittyen. Rakenteen seuraavia ominaisuuksia ei ollut mahdollista opinnäytetyön yhteydessä tutkia:

- rakenteen ilmatiiviyys
- kylmäsilta vaikutusten poistaminen.

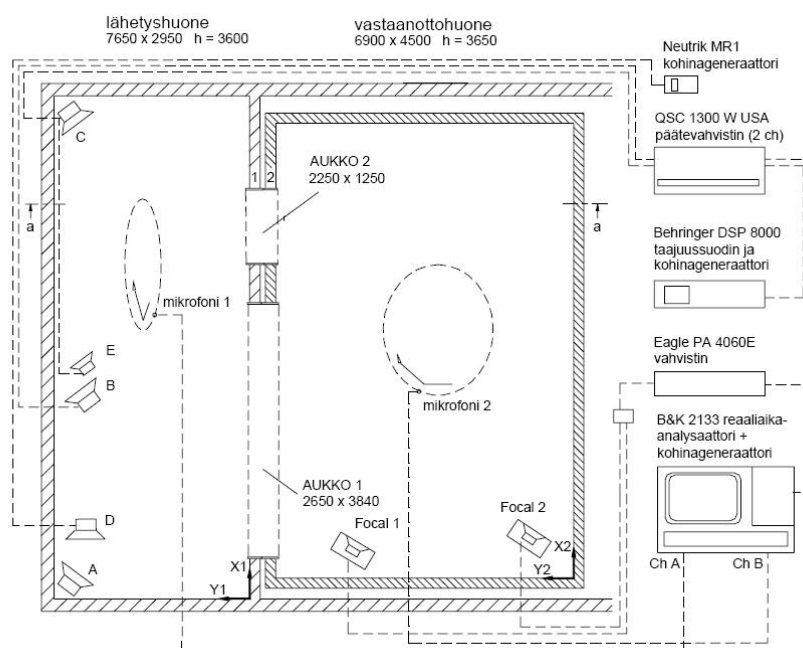
Asiatuntijalausunnon ja EPS-eristeiden hyvän ilmanpitävyyden perusteella rakenteen ilmatiiviyys tuskin aiheuttaa ongelmia, mikäli saumojen tiivistys hoidetaan asianmukaisesti. Liitokset ja läpiviennit eivät todennäköisesti aiheuta sen suurempia ongelmia kuin muissakaan ulkoseinärakenteissa.

Rungon kylmäsilta vaikutusta voidaan arvioida kokeiden mittaustulosten perusteella. Esimerkiksi kuvioista 18 ja 20 havaitaan, että runkotolpan ulkopinnassa ja eristekerroksen kohdalla samalla etäisyydellä rakenteiden sisäpinnoista olevissa mittauspisteissä lämpötilaerot ovat ainoastaan 2 - 3 °C. Vastaavissa kohdissa rakenteiden sisäpinnoissa olevat lämpötilaerot ovat näin ollen todennäköisesti hyvin pienet. Jo lähtökohtaisesti rungon ulkopinnassa oleva 150 mm:n EPS-eriste vähentää tehokkaasti rungon kylmäsilta vaikutusta.

### **Rakenteen ääneneristävyys**

Rakennuksen ulkovaipan rakenteiden ääneneristävyys tulisi perustua ensisijaisesti laboratorio-olosuhteissa suoritettuihin mittauksiin (Ääneneristyksen toteuttaminen 2003, 283). Normaalisti rakennusosan ilmaääneneristävyys R määritetään laboratoriossa standardin ISO 140-3 mukaisella menetelmällä, joka perustuu äänenpainetason mittauksiin.

Laboratorio käsittää kaksi vierekkäistä huonetta, joiden välissä on aukko tutkitavaa rakennusosaa varten (ks. kuvio 22). Aukon koko on noin 10 m<sup>2</sup>. Järjestelyn tavoitteena on tilanne, jossa voidaan luotettavasti mitata yksinomaan tutkitavan rakenteen välityksellä lähetyshuoneesta vastaanottohuoneeseen siirtyvää ääntä. Tästä syystä sivutiesiirtymät huoneiden välillä on estetty mahdollisimman hyvin. Mittaushuoneet ovat yleensä massiivisia ja runkoääneneristettyjä, eikä huoneiden välisissä rakenteissa ole äänivuotoja. (Rakennusten akustinen suunnittelu 2007, 58.)



KUVIO 22. Akustiikkalaboratorion kaiuntahuoneet (Hongisto, Helenius & Lindgren 2002, 19)

Tutkimusaukon on oltava korkeudeltaan normaalin seinärakenteen korkuinen varsinkin rankarakenteisten seinien tapauksissa, jotta rakenteen värähtelytaajuus vastaa totuudenmukaista tilannetta (ks. Resonanssi-ilmiö, luku 2.4). Myös aukon leveyden on oltava riittävä, sillä rakenteen reunimmaisat pystyrangat ovat sivukiinnityksen takia jäykemmät kuin keskellä sijaitsevat.

Rakenteiden ilmaääneneristävyyden määrittämiseen on olemassa lisäksi laskentamalleja sekä tietokoneohjelmia. EPS-eristetyin seinärakenteen ääneneristävyyden laskennallinen määrittäminen ei kuitenkaan tällä hetkellä ole mahdol-

lista, koska EPS:lle ei ole saatavissa tarvittavia lähtöarvoja johtuen materiaalin vähäisestä ääniteknisestä tutkimuksesta (Hongisto 2010).

Seinärakenteiden ääneneristävyyden kokeellinen mittaaminen vaatii siis erikoislaitteistot ja erityisesti tarkoitusta varten olevat tilat, eikä suunnitellun rakenteen ääneneristävyyden määrittäminen ollut näin ollen tämän tutkimuksen osalta mahdollista. Rakenteeseen olisi tietysti voitu suunnitella periaatteellisia ääneneristystä parantavia rakenneosia, mutta tätä ei koettu tarkoituksenmukaiseksi, sillä tulosten arviointia ei vertailukohteiden puuttuessa olisi käytännössä voitu tehdä.

Rakenteeseen suunniteltu polyesterikuitueriste sekä kipsilevy toimivat ääntä absorboivana ja ääntä eristävänä ainekerroksena. Lisäksi rakenteen ilmaääneneristävyyden parantamiskeinoksi esitetty toisen kipsilevyn lisääminen rakenteen sisäpintaan ovat käytännössä ne tekijät, joilla rakenteen ääneneristävyys on tämän tutkimuksen puitteissa voitu ottaa huomioon.

### **Rakenteen kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus**

Peruslähtökohtaisesti voidaan todeta, että laboratoriotutkimukset ja laskennalliset tarkastelut eivät milloinkaan vastaa täysin rakennuksen käytön aikaisia, todellisia olosuhteita. Huomiotta jäävät usein esimerkiksi käyttövirheiden, poikkeuksellisten olosuhteiden sekä uusien ratkaisujen osalta ennalta arvaamattomien tekijöiden vaikutukset rakenteiden toimintaan. Tutkimusten ja laskennallisten tarkastelujen avulla pystytään kuitenkin arvioimaan rakenteiden toimivuutta menetelmistä riippuen suhteellisen luotettavasti varsinkin, jos tulokset ovat huomattavasti varmallalla puolella.

Tutkimuslaitteistolla saatujen mittaustulosten melko suuresta virhemarginaalista huolimatta tulokset ovat kuitenkin täysin tulkittavia ja antavat selkeän kuvan tutkittujen rakenteiden kosteusteknisestä käyttäytymisestä eri olosuhteissa. Lisäksi tulokset ovat erityisesti höyrynsulullisen rakenteen 2 osalta selkeästi varmallalla puolella. Työnaikaisissa olosuhteissa kondenssi höyrynsulun sisäpinnassa saattaa tosin mittaustoleranssit huomioon ottaen alkaa kokeen 2 tuloksissa ilmoitettua suhteellista kosteutta matalammissa arvoissa, mutta kokeessa 3 molemmat rakenteet osoittavat kuitenkin selkeätä kuivumiskykyä. Näin

ollen arvioitujen virhetekijöiden ei voida katsoa oleellisesti vaikuttavan mittaus-tulosten perusteella rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta tehtyihin joh-topäätöksiin (ks. Yhteenveto, luku 6.5).

Tässä yhteydessä pitää kuitenkin huomata, että saadut tulokset koskevat ai-noastaan rakenteiden tutkittuja ominaisuuksia. Rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta ei voida saada todellista varmuutta ennen kuin esimerkiksi elas-tisella polyuretaanivaahdolla toteutettujen eristesaumojen toimivuutta on tutkit-tu tarkemmin. Lisäksi rakenteen toiminnasta ja toteutettavuudesta on saatava kokemuksia myös todellisissa olosuhteissa.

Eristeiden saumat ja erityisesti niiden tiiviys ovat avainasemassa myös raken-teen lämpötekni- sen toimivuuden kannalta. Vuotojen ja kylmäsiltavaikutuksen estämiseksi saumojen on kestettävä kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden aiheut-tamat sekä muut rasitukset koko rakennuksen käyttöiän ajan. Mikäli saumat voidaan osoittaa toimiviksi, ei rakenteen lämpötekni- sel- le toimivuudelle liene estettä nykyisen tiedon ja kokemuksen puitteissa.

### **7.3 Rakenteen kosteustekni- sen toimivuuden parantaminen**

Rakenteiden kosteustekni- stä toimivuutta voidaan parantaa poistamalla käytet- tävistä EPS-eristeistä muuta eristettä tiiviimpi pintakerros tai käyttämällä mah- dollisuuksien mukaan eristeiden valmistuksessa menetelmää, jossa tiiviimpää pintakerrosta ei synny. Tällöin rakenteisiin ei pitäisi syntyä kosteutta kerääviä rajapintoja höyrynsulkua tietysti lukuun ottamatta. Eristekerroksen sisäpin- nas- sa EPS-eristeiden pinnan tiiviydestä ei kuitenkaan voida katsoa olevan oleellis- ta haittaa nykyisissä ilmasto-olosuhteissa.

Edellä mainitut toimenpiteet parantavat erityisesti rakenteen 1 kosteustekni- stä toimivuutta, jota ei ehkä ole syytä unohtaa, vaikka rakenne 2 oli tehdyissä ko- keissa toimintavarmempi. Rakenne 1 on nimittäin kosteustekni- sestä toimivampi ratkaisu olosuhteissa, joissa vesihöyryn diffuusion suunta on ulkoilmasta kohti rakennuksen sisätiloja (ks. Vesihöyryn diffuusio, luku 2.2). Tällöin rakenteen

sisäpinnassa oleva höyrynsulku on tilanteeseen nähden väärällä puolella ja sen ulkopintaan saattaa kertyä kosteutta.

Rakenteessa 1 on etuna, että sen sisäpinnassa ei ole erillistä höyrynsulkukerrostoa, johon kosteus saattaisi tiivistyä. Itse asiassa rakenne on ainakin teorias-  
sa kosteusteknisesti toimivampi kyseisessä tilanteessa, sillä sen sisäpinta on ulkopintaan nähden vesihöyryä läpäisevämpi. Tässä tilanteessa saattaa tosin EPS-eristeen tiiviistä sisäpinnasta olla haittaa. Vesihöyryn rakennuksen ulkoa sisäänpäin tapahtuvan siirtymisen ei kuitenkaan vielä nykyään katsota olevan riskitekijä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta, mutta ilmaston lämmetessä tilanne saattaa muuttua (Matalaenergiarakenteiden toimivuus 2008, 49).

## **7.4 Jatkotutkimukset**

### **Laskennallinen tarkastelu muuttuvissa olosuhteissa**

Ehkä tarkoituksenmukaisin jatkotutkimusaihe on suunnitellun ulkoseinärakenteen kosteus- ja lämpöteknisen toimivuuden laskennallinen tarkastelu muuttuvissa olosuhteissa. Tarkastelu voidaan tehdä rakennusfysiikkaohjelmalla, jonka avulla on mahdollista ottaa huomioon olosuhteiden vaihtelun ja rakennusmateriaalien kosteus- ja lämpökapasiteetin lisäksi esimerkiksi vesisateen, auringon säteilyn ja kosteuden faasimuutoslämmön vaikutukset rakenteissa (Huttunen 2003).

Dynaamiset olosuhteet hallitsevilla laskentaohjelmilla tehtyjä tarkasteluja pidetään suhteellisen luotettavina tutkimusmenetelminä. Tietomallipohjainen tarkastelu on lisäksi suhteellisen nopea tapa arvioida rakenteiden kosteus- ja lämpöteknistä toimintaa. Laskenta on tarpeen tehdä vähintään 2 - 3 vuoden ajanjaksolle, jolloin voidaan arvioida rakennuskosteuden poistumista ja rakenteen siirtymistä normaaliin käytönaikaiseen toimintaan.

### **Koerakennus**

Luotettavin menetelmä suunnitellun rakenteen toimivuuden ja toteutettavuuden selvittämiseksi on rakentaa koerakennus, jonka yhteydessä on mahdollista

arvioida muun muassa seuraavien tekijöiden toimivuutta ja soveltuvuutta todellisissa olosuhteissa:

- rakennedetailjit ja liitokset
- kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus
- rakennusvaipan ilmanpitävyys
- ovi- ja ikkunaratkaisut
- ulkoverhousvaihtoehdot
- ylä- ja alapohja- sekä perustusratkaisut
- LVIS-asennukset.

Lisäksi on tarpeen tutkia olosuhteita koolausten ja EPS-eristeiden välisissä rajapinnoissa (ks. Koe-elementtien purkaminen, luku 6.4) sekä polyuretaanisaumojen toimivuutta pidemmällä ajanjaksolla. Kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta voidaan tutkia vastaavin menetelmin kuin tutkimuslaitteistossa. Mittauksia on tarpeen suorittaa 2 - 3 vuoden ajan, jotta rakennuskosteuden poistumisesta voidaan varmistua.

### **Rakenteen ilmaääneneristysluvun määrittäminen**

Tarpeellinen jatkotutkimusaihe ennen rakenteen käyttöönottoa on rakenteen ja sen eri variaatioiden ilmaääneneristyslukujen  $R_w + C_{tr}$  ja  $R_w + C$  määrittäminen laboratoriomittausten avulla. Ilmaääneneristyslukujen riittävän luotettavaksi määrittämiseksi mittaukset on suositeltavaa tehdä erityisesti ääniteknisiin tutkimuksiin erikoistuneessa laboratoriossa. Eräs jatkotutkimusaihe saattaisi olla lisäksi tutkia rakennusalalla vielä käyttämättömien ääneneristysmateriaalien soveltuvuutta ulkoseinärakenteisiin.

## **7.5 Matalaenergiarakenteet**

Matalaenergiaohjeistuksessa korostetaan eri suunnittelijaosapuolten välistä yhteistyötä kohteiden toteuttamisessa. Suuntaus on hyvä ja varmasti tarpeen, sillä nykyinen eriytynyt suunnittelupolitiikka ei antane riittävästi mahdollisuuksia haasteellisten matalaenergiaprojektien onnistuneeseen toteuttamiseen laajas-



sa mittakaavassa. Yhteistyömalli on kuitenkin edelleen puutteellinen, sillä vihdoin olisi jo aika saada suunnitteluun mukaan myös rakennuksen toteuttava osapuoli, jolloin monilta kalliiksi tulevilta ja tarpeettoman monimutkaisilta ratkaisuilta vältytään. Hyvin suurella todennäköisyydellä voidaan todeta, että parhaan teknisen ja myös taloudellisen tuloksen matalaenergiaprojekteissa tulee saavuttamaan organisaatio, joka kyseisen yhteistyömallin kykenee onnistuneesti toteuttamaan.

Suomessa tähän mennessä rakennetut matalaenergiarakennukset ovat erityisesti passiivitalojen osalta olleet suurelta osin tietynlaisia pilottikohteita, joiden suunnitteluun ja toteutukseen on erityisesti panostettu. Matalaenergiarakennusten laajamittaisessa tuotannossa mukaan tulevat myös vähemmän pätevöityneet alan toimijat, jolloin riskit rakenteiden toimivuuden kannalta suurenevat, vaikka ne muuten olisivat periaatteessa toimivia. Matalaenergiarakenteet ovat muun muassa suurten eristepaksuuksien ja toimivuusvaatimusten takia herkempiä virheille kuin perinteiset rakenteet. Tämä saattaa osoittautua ongelmaksi ammattitaidottoman halpatyövoiman ja erityisesti harmaiden urakoitsijoiden jäljiltä, joiden työlle ei tunnetusti takuumiestä löydy.

Paljon kritiikkiä on aiheuttanut myös matalaenergiarakentamiseen siirtymisen tarkoituksenmukaisuus ja järkevyyt, sillä esimerkiksi rakennuksen ulkovaipan läpi tapahtuvien lämpöhäviöiden määrä on suhteellisen pieni rakennuksen ilmanvaihtoon ja käyttöveden lämmitykseen tarvittavaan energiamäärään verrattuna. Matalaenergiarakentamiseen siirtyminen on kuitenkin ennen kaikkea poliittinen päätös. Tarkoituksenmukaisuus, järkevyyt ja poliittinen päätös eivät aina välttämättä tarkoita samaa asiaa, mutta oli matalaenergiarakentamiseen siirtyminen tarkoituksenmukaista ja järkevää tai ei, toimivat rakenneratkaisut ja konseptit on kuitenkin löydettävä, jotta tulevaisuudessa rakennuksissa voidaan asua ja elää terveinä.

Teknistyvä rakentaminen asettaa haasteita myös rakennusten käyttäjille. Monimutkaistuvat talotekniikkajärjestelmät ja mahdollinen rakenteiden toiminnallinen riippuvuus sähköisistä järjestelmistä lisäävät käyttö- ja huoltovirheiden todennäköisyyttä oleellisesti. Monet tekniset ratkaisut saattavat olla teoreettisesti täysin toimivia, mutta arviointiperusteet eivät välttämättä vastaa todellisia käyt-

töolosuhteita, eikä kaikkia ratkaisujen toimivuuteen liittyviä tekijöitä todennäköisesti pystytä etukäteen arvioimaan. Todellisen varmuuden matalaenergiarakenteiden laajamittaisesta toimivuudesta Suomen ilmasto- ja käyttöolosuhteissa tulemme saamaan vasta ehkä noin 10 - 20 vuoden kuluttua.

EPS-eristeiden käyttö puurunkorakenteissa tulee todennäköisesti lisääntymään huomattavasti matalaenergiarakentamiseen siirtymisen myötä. EPS-eristeiden hyvän lämmöneristävyuden ja ilmatiiviyden ansiosta niillä saavutetaan hoikempia rakenteita kuin huokoisilla eristeillä, jolloin myös taloudelliset tekijät saattavat nousta merkittäviksi. EPS-eristeiden etuna on myös muihin solumuovieristeisiin verrattuna huomattavasti edullisempi hinta. EPS-eristeiden materiaaliominaisuuksiin kuuluvat jäykkyys ja hyvä puristuskestävyys antavat lisäksi uusia mahdollisuuksia kehittää myös puurunkorakennetta. Raakaöljyvarojen ehtymisen ja globaalien ekologisuustavoitteiden myötä saattaa syntyä haasteita myös itse eristemateriaalin kehittämiseksi.

## LÄHTEET

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus. 3. p. Helsinki: Rakennustieto.

EPS 2000-tuoteluokitus. 2008. EPS-tuotteiden toiminnallisten ominaisuuksien vaatimukset. EPS-rakennuseristeteollisuus ry:n www-sivusto. Viitattu 2.2.2010. [Http://www.eps-eriste.fi/fin/tuoteluokitus](http://www.eps-eriste.fi/fin/tuoteluokitus).

Hongisto, V. 2010. Tutkija. Työterveyslaitos. Haastattelu 5.1.2010.

Hongisto, V., Helenius, R. & Lindgren, M. 2002. Kaksinkertaisen seinärakenteen ääneneristävyys - laboratoriotutkimus. Työympäristötutkimuksen raportti-sarja 1. Työterveyslaitos.

Huttunen, J. 2003. Rakennusfysiikkaohjelmat. Rakennustekniikka 5, 67 - 68.

Kosteus rakentamisessa. 1999. RakMK C2 opas. Ympäristöopas 51. Helsinki: Ympäristöministeriö ja Rakennustieto.

Käkelä, P. & Jormalainen, J. 2009. Kosteusteknisesti turvallinen matalaenergi- ja passiivirakentaminen. Teoksessa Rakennusfysiikka 2009. Toim. J. Vinha & K. Lähdesmäki. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, 475 - 484.

Lahdensivu, J. 2009a. Erikoistutkija. Tampereen teknillinen yliopisto. Haastattelu 21.12.2009.

Lahdensivu, J. 2009b. Lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia rakenteiden käytännön toteutukseen. Teoksessa Rakennusfysiikka 2009. Toim. J. Vinha & K. Lähdesmäki. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, 465 - 474.

Lahdensivu, J. 2009c. Lämmöneristyksen lisäys tuo muutoksia rakennetyyppeihin. Rakennustaito 10, 14 - 16.

Lahtela, T. 2008. Myytti - ääneneristys on puutalon ongelma. Luentomateriaali. Puuinfo.

Lämmön- ja kosteudeneristys. 1984. RIL 155. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto.

Matalaenergiarakentaminen. 2009. Asuinrakennukset. RIL 249 - 2009. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Matalaenergiarakenteiden toimivuus. 2008. Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja - ohjeisiin, loppuraportti. Tutkimusselostus NRO TRT/1706/2008. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Talonrakennustekniikka.

Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta. 2004. RIL 225 - 2004. Ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Rakennusten akustinen suunnittelu. 2007. Akustiikan perusteet. RIL 243-1-2007. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2000. RIL 107 - 2000. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Rakenteiden elinkaaritekniikka. 2001. RIL 216 - 2001. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

RakMK C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.

RakMK C3. 2010. Rakennusten lämmöneristys, määräykset. Helsinki: Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto.

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö. Asunto- ja rakennusosasto.

RT 36 - 10690. 1999. EPS-eristeet. Lämmöneristystarvikkeet. RT-kortti. Helsinki: Rakennustieto.

SFS-EN ISO 6946. 2007. Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Helsinki: Rakennustieto.

Soklex Oy. 2010. Yhtiön www-sivusto. Viitattu 14.3.2010. [Http://www.soklex.fi](http://www.soklex.fi).

Vinha, J. & Käkelä, P. 1999. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Julkaisu 96. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka.

Ääneneristyksen toteuttaminen. 2003. RIL 129. Toim. A. Halme. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

## LIITTEET

### Liite 1. Diffuusiolaskelma 1

#### Rakennekerrosten lämmönvastukset ja vesihöyrynvastukset

Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\delta$ (kg/msPa)	Z (m <sup>2</sup> sPa/kg)
R <sub>se</sub> ulkopinta			0,130		
R <sub>1</sub> EPS	0,050	0,036	1,389	5,0E-12	1,0E+10
R <sub>2a</sub> EPS	0,200	0,036	5,556	5,0E-12	4,0E+10
R <sub>3b</sub> puurunko	0,200	0,120	1,667	2,0E-12	1,0E+11
R <sub>5</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
R <sub>7</sub> EPS	0,050	0,036	1,389	5,0E-12	1,0E+10
R <sub>9b</sub> pystykoolaus	0,021	0,120	0,175	2,0E-12	1,1E+10
R <sub>10</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
R <sub>si</sub> sisäpinta			0,130		

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> eristekerroksen kohdalla 8,697

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> rungon kohdalla 4,983

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 7,178

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 3,465

<b>Laskentaolosuhteet</b>	RH sisä %	0,40	T sisä (°C)	21
	RH ulko %	0,85	T ulko (°C)	-20

#### Tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat

1. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa eristeen kohdalla -12,8

2. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa rungon kohdalla -7,5

<b>Rajapintojen lämpötiloja vastaavat</b>	1. p <sub>k</sub>	204
<b>vesihöyryn kyllästyspainearvot</b>	2. p <sub>k</sub>	334

Kokonaisvesihöyrynvastus Z eristekerroksen kohdalla 6,9E+10

Kokonaisvesihöyrynvastus Z rungon kohdalla 1,4E+11

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 5,9E+10

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 1,3E+11

sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>s</sub>	2484	994
ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>u</sub>	102	87

#### Vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa

1. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinta eristeen kohdalla **219** > 204 EI OK

2. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinta rungon kohdalla **152** < 334 OK

## Liite 2. Diffuusiolaskelma 2

### Rakennekerrosten lämmönvastukset ja vesihöyrynvastukset

Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\delta$ (kg/msPa)	Z (m <sup>2</sup> sPa/kg)
R <sub>se</sub> ulkopinta			0,130		
R <sub>1</sub> EPS	0,050	0,036	1,389	5,0E-12	1,0E+10
R <sub>2a</sub> EPS	0,200	0,036	5,556	5,0E-12	4,0E+10
R <sub>3b</sub> puurunko	0,200	0,120	1,667	2,0E-12	1,0E+11
R <sub>5</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
R <sub>7</sub> EPS	0,050	0,036	1,389	5,0E-12	1,0E+10
R <sub>9b</sub> pystykoolaus	0,021	0,120	0,175	2,0E-12	1,1E+10
R <sub>10</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
R <sub>si</sub> sisäpinta			0,130		

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> eristekerroksen kohdalla 8,697

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> rungon kohdalla 4,983

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 7,178

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 3,465

<b>Laskentaolosuhteet</b>	RH sisä %	0,40	T sisä (°C)	21
	RH ulko %	0,85	T ulko (°C)	-10

### Tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat

1. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa eristeen kohdalla -4,6

2. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa rungon kohdalla -0,6

<b>Rajapintojen lämpötiloja vastaavat</b>	1. p <sub>k</sub>	426
<b>vesihöyryn kyllästyspainearvot</b>	2. p <sub>k</sub>	584

Kokonaisvesihöyrynvastus Z eristekerroksen kohdalla 6,9E+10

Kokonaisvesihöyrynvastus Z rungon kohdalla 1,4E+11

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 5,9E+10

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 1,3E+11

sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>s</sub>	2484	994
ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>u</sub>	266	226

### Vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa

1. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> tuulensuojan sisäpinta (eriste) 338 < 426 OK

2. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> tuulensuojan sisäpinta (runko) 281 < 584 OK

### Liite 3. Diffuusiolaskelma 3

#### Rakennekerrosten lämmönvastukset ja vesihöyrynvastukset

Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\delta$ (kg/msPa)	Z (m <sup>2</sup> sPa/kg)
R <sub>se</sub> ulkopinta			0,130		
R <sub>1</sub> EPS	0,100	0,036	2,778	5,0E-12	2,0E+10
R <sub>2a</sub> EPS	0,200	0,036	5,556	5,0E-12	4,0E+10
R <sub>3b</sub> puurunko	0,200	0,120	1,667	2,0E-12	1,0E+11
R <sub>4b</sub> polyesteri	0,048	0,040	1,200	1,0E-10	4,8E+08
R <sub>5b</sub> pystykoolaus	0,048	0,120	0,400	2,0E-12	2,4E+10
R <sub>6</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
R <sub>si</sub> sisäpinta			0,130		

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> eristekerroksen kohdalla 9,845

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> rungon kohdalla 5,156

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 6,938

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 2,249

<b>Laskentaolosuhteet</b>	RH sisä %	0,40	T sisä (°C)	21
	RH ulko %	0,85	T ulko (°C)	-20

#### Tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat

1. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa eristeen kohdalla -7,9

2. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa rungon kohdalla 3,1

<b>Rajapintojen lämpötiloja vastaavat</b>	1. p <sub>k</sub>	322
<b>vesihöyryn kyllästyspaine arvot</b>	2. p <sub>k</sub>	768

Kokonaisvesihöyrynvastus Z eristekerroksen kohdalla 6,5E+10

Kokonaisvesihöyrynvastus Z rungon kohdalla 1,5E+11

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 4,5E+10

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 1,3E+11

sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>s</sub>	2484	994
ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>u</sub>	102	87

#### Vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa

1. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinta eristeen kohdalla 367 > 322 EI OK

2. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinta rungon kohdalla 209 < 768 OK

## Liite 4. Diffuusiolaskelma 4

### Rakennekerrosten lämmönvastukset ja vesihöyrynvastukset

Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\delta$ (kg/msPa)	Z (m <sup>2</sup> sPa/kg)
R <sub>se</sub> ulkopinta			0,130		
R <sub>1</sub> EPS	0,100	0,036	2,778	5,0E-12	2,0E+10
R <sub>2a</sub> EPS	0,200	0,036	5,556	5,0E-12	4,0E+10
R <sub>3b</sub> puurunko	0,200	0,120	1,667	2,0E-12	1,0E+11
R <sub>4b</sub> polyesteri	0,048	0,040	1,200	1,0E-10	4,8E+08
R <sub>5b</sub> pystykoolaus	0,048	0,120	0,400	2,0E-12	2,4E+10
R <sub>6</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
R <sub>si</sub> sisäpinta			0,130		

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> eristekerroksen kohdalla 9,845

Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> rungon kohdalla 5,156

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 6,938

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 2,249

<b>Laskentaolosuhteet</b>	RH sisä %	0,40	T sisä (°C)	21
	RH ulko %	0,85	T ulko (°C)	-10

### Tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat

1. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa eristeen kohdalla -0,8

2. lämpötila t<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinnassa rungon kohdalla 7,5

<b>Rajapintojen lämpötiloja vastaavat</b>	1. p <sub>k</sub>	575
<b>vesihöyryn kyllästyspaine arvot</b>	2. p <sub>k</sub>	1043

Kokonaisvesihöyrynvastus Z eristekerroksen kohdalla 6,5E+10

Kokonaisvesihöyrynvastus Z rungon kohdalla 1,5E+11

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan eristeen kohdalla 4,5E+10

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta R<sub>1</sub> sisäpintaan rungon kohdalla 1,3E+11

sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>s</sub>	2484	994
ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)	p <sub>u</sub>	266	226

### Vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa

1. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinta eristeen kohdalla **463** < 575 OK

2. vesihöyryn osapaine p<sub>x</sub> R<sub>1</sub> sisäpinta rungon kohdalla **330** < 1043 OK



## Liite 5. Diffuusiolaskelma 5

### Rakennekerrosten lämmönvastukset ja vesihöyrynvastukset

	Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\delta$ (kg/msPa)	Z (m <sup>2</sup> sPa/kg)
<b>R<sub>se</sub></b>	ulkopinta			0,130		
<b>R<sub>1</sub></b>	EPS	0,150	0,036	4,167	5,0E-12	3,0E+10
<b>R<sub>2a</sub></b>	EPS	0,150	0,036	4,167	5,0E-12	3,0E+10
<b>R<sub>3ab</sub></b>	puurunko	0,200	0,120	1,667	2,0E-12	1,0E+11
<b>R<sub>4b</sub></b>	polyesteri	0,050	0,040	1,250	1,0E-10	5,0E+08
<b>R<sub>5</sub></b>	kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
<b>R<sub>si</sub></b>	sisäpinta			0,130		

Kokonaislämmönvastus  $R_T$  eristekerroksen kohdalla 9,895

Kokonaislämmönvastus  $R_T$  rungon kohdalla 6,145

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan eristeen kohdalla 5,599

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan rungon kohdalla 1,849

<b>Laskentaolosuhteet</b>	RH sisä %	0,40	T sisä (°C)	21
	RH ulko %	0,85	T ulko (°C)	-20

### Tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat

1. lämpötila  $t_x$   $R_1$  sisäpinnassa eristeen kohdalla -2,2

2. lämpötila  $t_x$   $R_1$  sisäpinnassa rungon kohdalla 8,7

<b>Rajapintojen lämpötiloja vastaavat</b>	1. $p_k$	516
<b>vesihöyryn kyllästyspainearvot</b>	2. $p_k$	1131

Kokonaisvesihöyrynvastus Z eristekerroksen kohdalla 6,5E+10

Kokonaisvesihöyrynvastus Z rungon kohdalla 1,3E+11

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan eristeen kohdalla 3,5E+10

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan rungon kohdalla 1,0E+11

sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)	$p_s$	2484	994
ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)	$p_u$	102	87

### Vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa

1. vesihöyryn osapaine  $p_x$   $R_1$  sisäpinta eristeen kohdalla **506** < 516 OK

2. vesihöyryn osapaine  $p_x$   $R_1$  sisäpinta rungon kohdalla **289** < 1131 OK

## Liite 6. Diffuusiolaskelma 6

### Rakennekerrosten lämmönvastukset ja vesihöyrynvastukset

	Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	$\delta$ (kg/msPa)	Z (m <sup>2</sup> sPa/kg)
$R_{se}$	ulkopinta			0,130		
$R_1$	EPS	0,150	0,036	4,167	5,0E-12	3,0E+10
$R_{2a}$	EPS	0,150	0,036	4,167	5,0E-12	3,0E+10
$R_{3ab}$	puurunko	0,200	0,120	1,667	2,0E-12	1,0E+11
$R_{4b}$	polyesteri	0,050	0,040	1,250	1,0E-10	5,0E+08
$R_5$	kipsilevy	0,013	0,250	0,052	3,0E-12	4,3E+09
$R_{si}$	sisäpinta			0,130		

Kokonaislämmönvastus  $R_T$  eristekerroksen kohdalla 9,895

Kokonaislämmönvastus  $R_T$  rungon kohdalla 6,145

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan eristeen kohdalla 5,599

Lämmönvastus  $\Sigma R_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan rungon kohdalla 1,849

Laskentaolosuhteet	RH sisä %	0,40	T sisä (°C)	21
	RH ulko %	0,85	T ulko (°C)	-10

### Tarkasteltavien rajapintojen lämpötilat

1. lämpötila  $t_x$   $R_1$  sisäpinnassa eristeen kohdalla 3,5

2. lämpötila  $t_x$   $R_1$  sisäpinnassa rungon kohdalla 11,7

Rajapintojen lämpötiloja vastaavat	1. $p_k$	790
vesihöyryn kyllästyspaine-arvot	2. $p_k$	1381

Kokonaisvesihöyrynvastus Z eristekerroksen kohdalla 6,5E+10

Kokonaisvesihöyrynvastus Z rungon kohdalla 1,3E+11

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan eristeen kohdalla 3,5E+10

Vesihöyrynvastus  $\Sigma Z_x$  sisäpinnasta  $R_1$  sisäpintaan rungon kohdalla 1,0E+11

sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)	$p_s$	2484	994
ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)	$p_u$	266	226

### Vesihöyryn osapaineet rajapinnoissa

1. vesihöyryn osapaine  $p_x$   $R_1$  sisäpinta eristeen kohdalla 581 < 790 OK

2. vesihöyryn osapaine  $p_x$   $R_1$  sisäpinta rungon kohdalla 398 < 1381 OK

## Liite 7. Koerakenteet



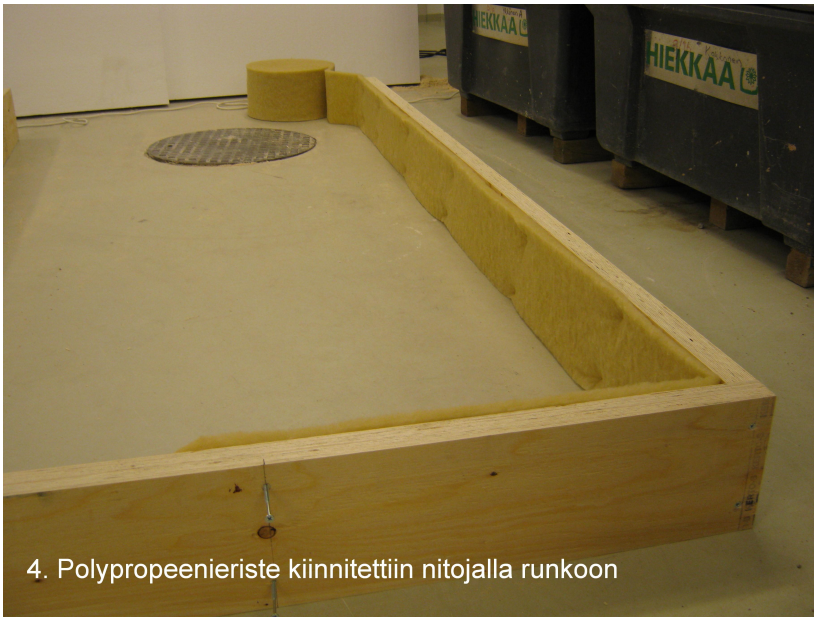
1. Koerakenteissa käytettyjä tarvikkeita määrämittaan sahattuna



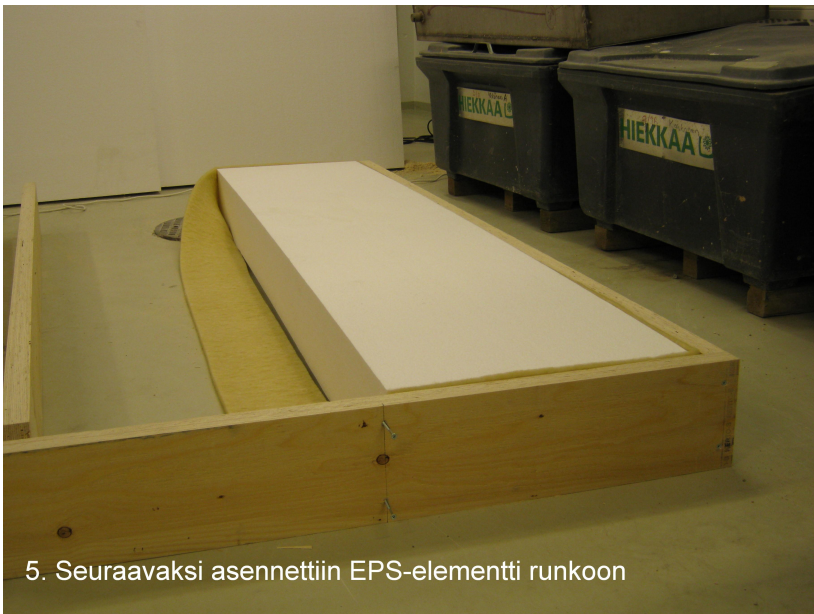
2. Runko koottiin ruuveilla purkamisen helpottamiseksi



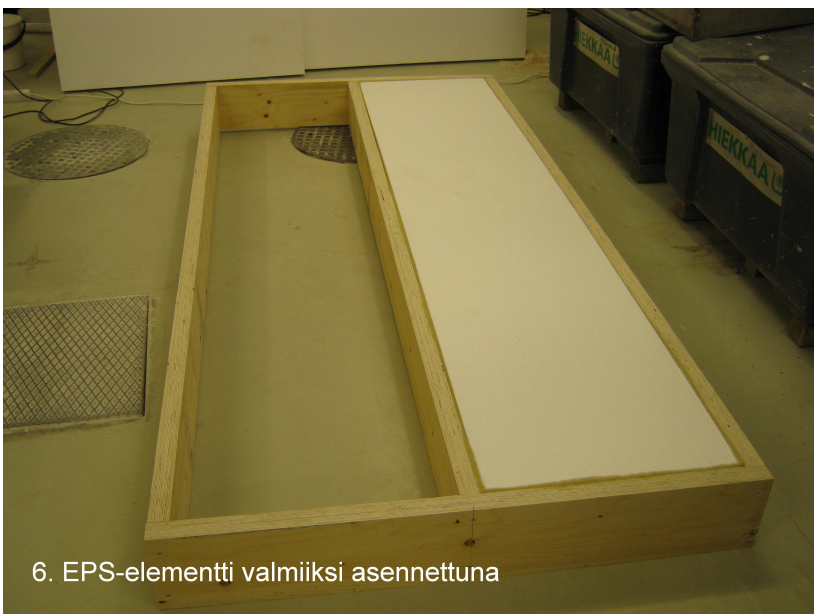
3. Polypropeenieriste



4. Polypropeenieriste kiinnitettiin nitojalla runkoon



5. Seuraavaksi asennettiin EPS-elementti runkoon



6. EPS-elementti valmiiksi asennettuna





9. Eristeiden asentamisessa käytettiin EPS-kiiloja



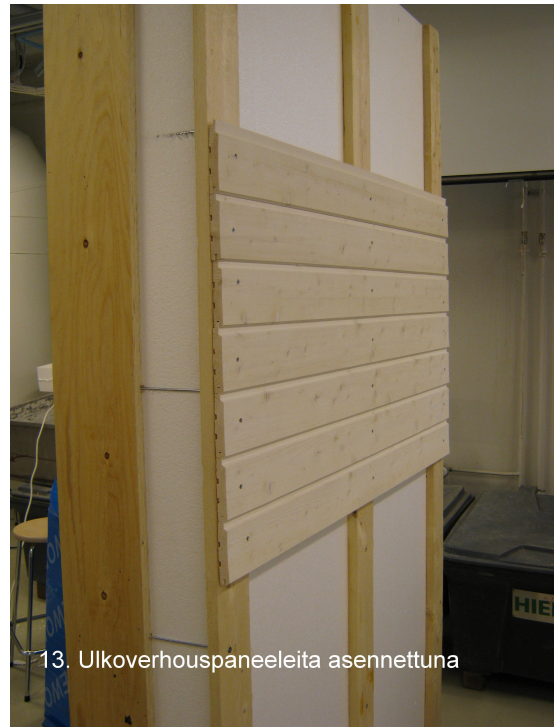
10. Saumat täytettiin polyuretaanivaahdolla. Rakenteen sisäpintaan jäi 50 mm:n tila polyesterikuitueristeelle



11. Rakenteen yläosa saumattuna



12. Seuraavaksi asennettiin koolaukset ja 150 mm:n EPS rungon ulkopintaan



13. Ulkoverhouspaneelleita asennettuna

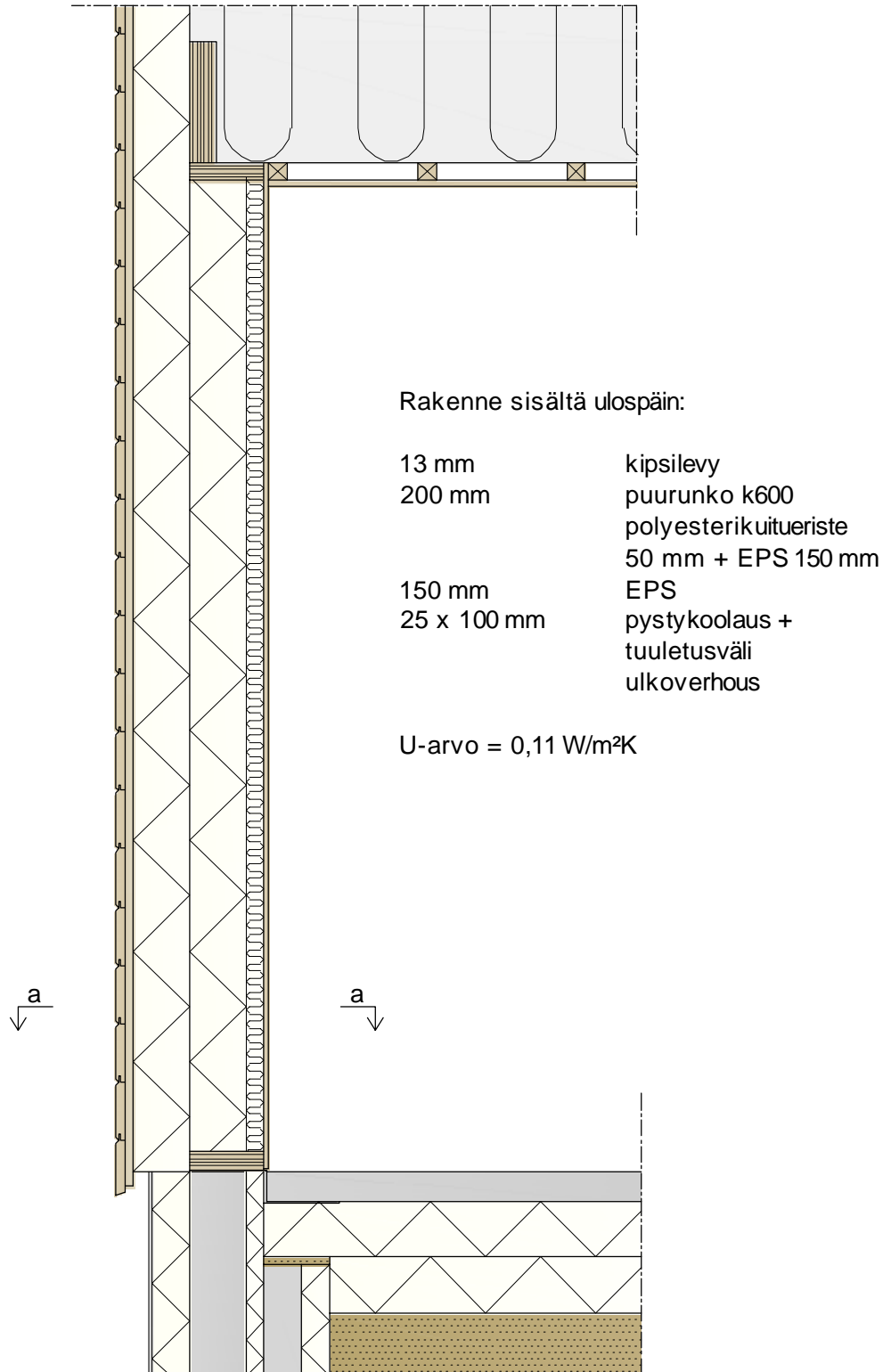


14. Polyesterikuitueristeet asennettuina



15. Sisäverhoukseksi asennettiin 13 mm:n erikoiskova kipsilevy

## Liite 8. Rakenteen periaatepiirustus Soklex-perustuksilla





## Liite 9. Lämmönläpäisykertoimen laskenta 1

### Lämmönläpäisykertoimen laskenta 1

#### Lämpövirran suuntaisten leikkausten kokonaislämmönvastukset

	Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>a</sub> (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>b</sub> (m <sup>2</sup> K/W)	
R <sub>se</sub>	ulkopinta			0,130	0,130	0,130	
R <sub>1</sub>	EPS	0,150	0,036	4,167	4,167	4,167	
R <sub>2a</sub>	EPS	0,150	0,036	4,167	4,167		
R <sub>3b</sub>	puurunko	0,200	0,120	1,667		1,667	
R <sub>4a</sub>	polyesteri	0,050	0,040	1,250	1,250		
R <sub>5</sub>	kipsilevy	0,013	0,250	0,052	0,052	0,052	
R <sub>si</sub>	sisäpinta			0,130	0,130	0,130	
R <sub>Ti</sub>					9,895	6,145	
	Leikkauksen a pinta-alan osuus kokonaispinta-alasta						0,925
	Leikkauksen b pinta-alan osuus kokonaispinta-alasta						0,075
<b>Kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo R<sub>T</sub>' (m<sup>2</sup>K/W)</b>					<b>1/R<sub>T</sub>'</b>		0,106
					<b>R<sub>T</sub>'</b>		9,462
<b>Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo R<sub>T</sub>'' (m<sup>2</sup>K/W)</b>							
R <sub>2a</sub> + R <sub>3b</sub>					1/R <sub>j</sub>		0,267
					R <sub>j</sub>		3,745
R <sub>4a</sub> + R <sub>3b</sub>					1/R <sub>k</sub>		0,785
					R <sub>k</sub>		1,274
					R <sub>T</sub> ''		9,498
<b>Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> (m<sup>2</sup>K/W)</b>					<b>R<sub>T</sub></b>		9,480
<b>Lämmönläpäisykerroin U (W/m<sup>2</sup>K)</b>					<b>U</b>		<b>0,11</b>

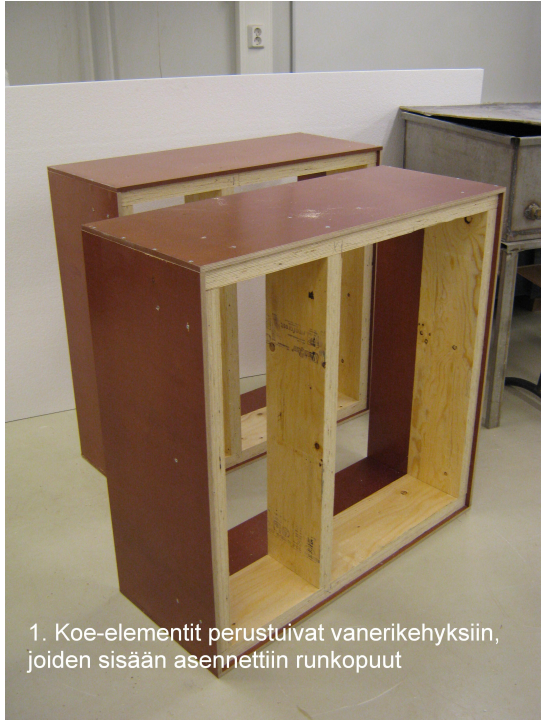
## Liite 10. Lämmönläpäisykertoimen laskenta 2

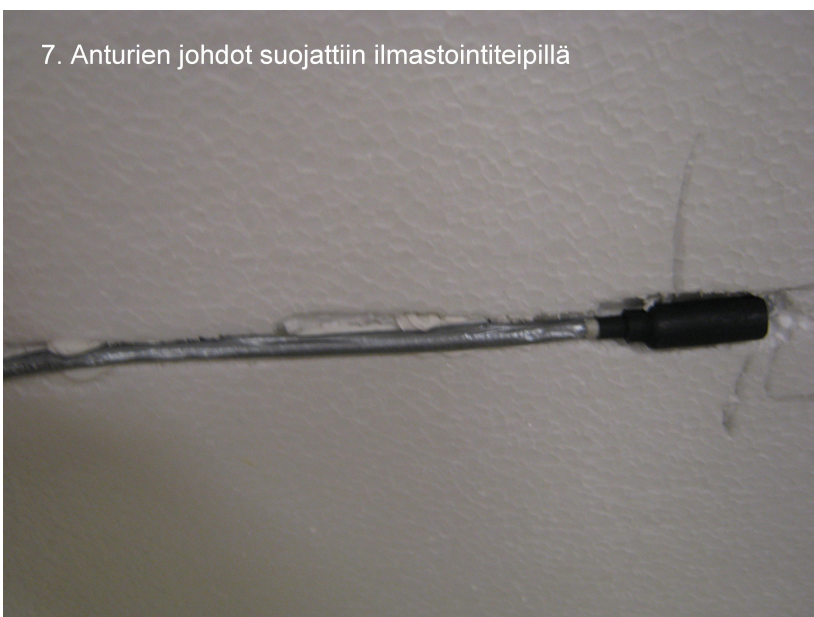
### Lämmönläpäisykertoimen laskenta 2

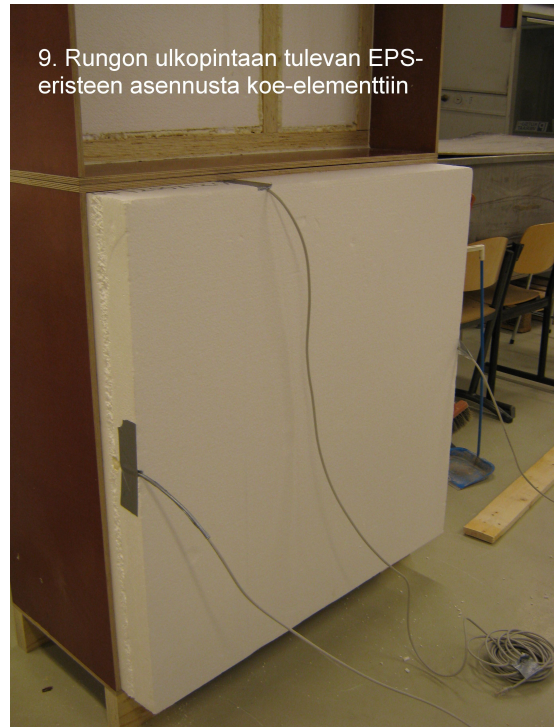
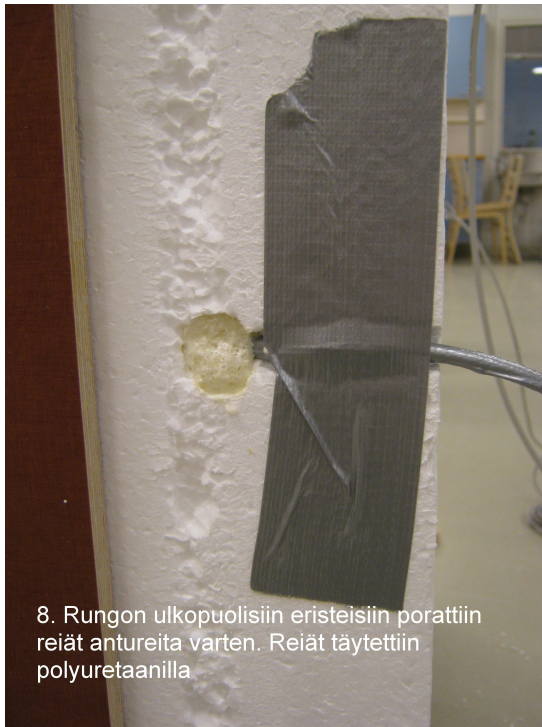
#### Lämpövirran suuntaisten leikkausten kokonaislämmönvastukset

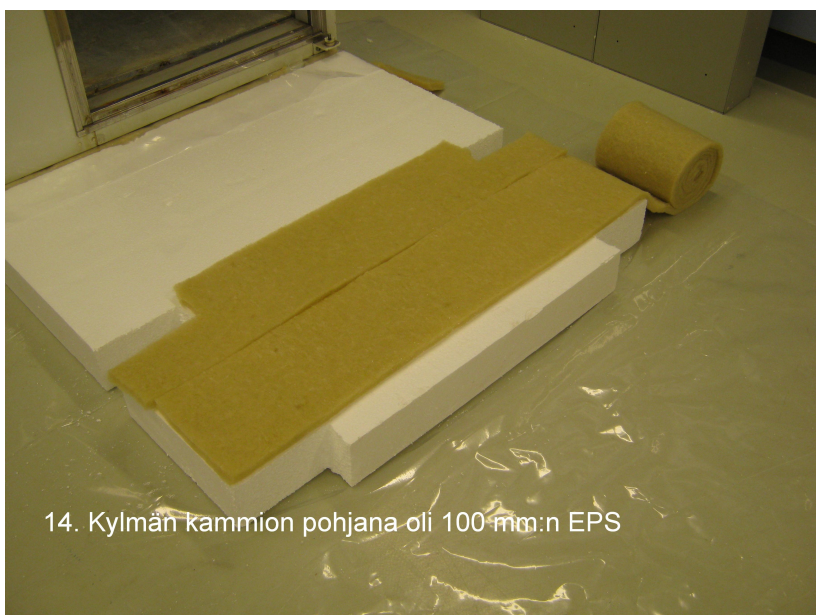
Rakenne	d (m)	$\lambda_D$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>a</sub> (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>b</sub> (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub> ulkopinta			0,130	0,130	0,130
R <sub>1</sub> EPS	0,150	0,033	4,545	4,545	4,545
R <sub>2a</sub> EPS	0,150	0,033	4,545	4,545	
R <sub>3b</sub> puurunko	0,200	0,120	1,667		1,667
R <sub>4a</sub> polyesteri	0,050	0,040	1,250	1,250	
R <sub>5</sub> kipsilevy	0,013	0,250	0,052	0,052	0,052
R <sub>si</sub> sisäpinta			0,130	0,130	0,130
R <sub>Ti</sub>				10,653	6,524
Leikkauksen a pinta-alan osuus kokonaispinta-alasta					0,925
Leikkauksen b pinta-alan osuus kokonaispinta-alasta					0,075
<b>Kokonaislämmönvastuksen yläikiarvo R<sub>T</sub>' (m<sup>2</sup>K/W)</b>				<b>1/R<sub>T</sub>'</b>	0,098
				<b>R<sub>T</sub>'</b>	10,170
<b>Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo R<sub>T</sub>'' (m<sup>2</sup>K/W)</b>					
R <sub>2a</sub> + R <sub>3b</sub>				1/R <sub>j</sub>	0,249
				R <sub>j</sub>	4,024
R <sub>4a</sub> + R <sub>3b</sub>				1/R <sub>k</sub>	0,785
				R <sub>k</sub>	1,274
				R <sub>T</sub> ''	10,155
<b>Kokonaislämmönvastus R<sub>T</sub> (m<sup>2</sup>K/W)</b>				<b>R<sub>T</sub></b>	10,163
<b>Lämmönläpäisykerroin U (W/m<sup>2</sup>K)</b>				<b>U</b>	<b>0,10</b>

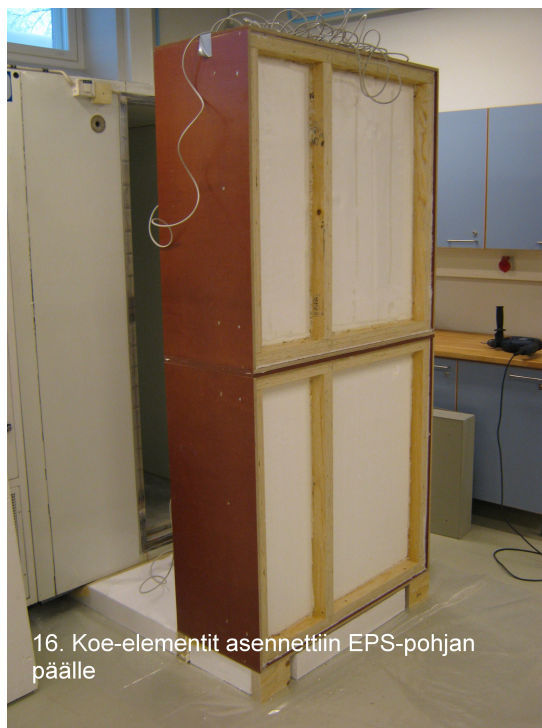
## Liite 11. Tutkimuslaitteiston ja koe-elementtien rakentaminen

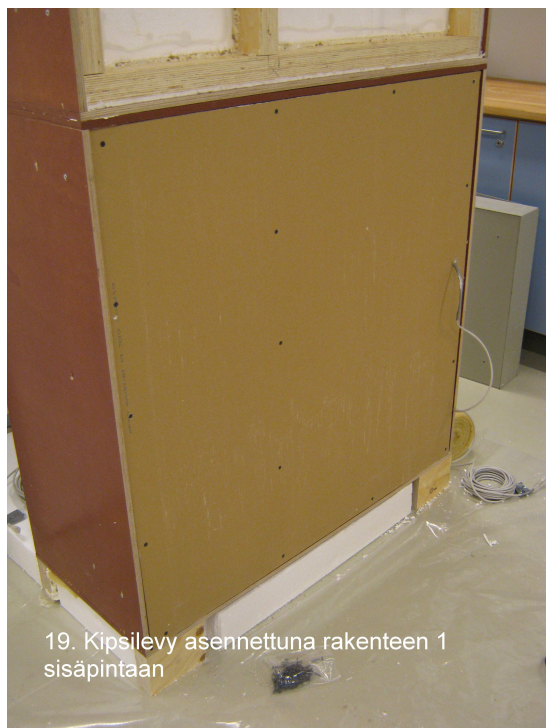












19. Kipsilevy asennettuna rakenteen 1 sisäpintaan



20. Höyrinsulkuna toiminut 0,2 mm:n polyeteenikalvo kiinnitettiin akryylimassalla EPS-eristeen sisäpintaan rakenteessa 2. Kuvassa näkyy lisäksi mittausanturi 9.

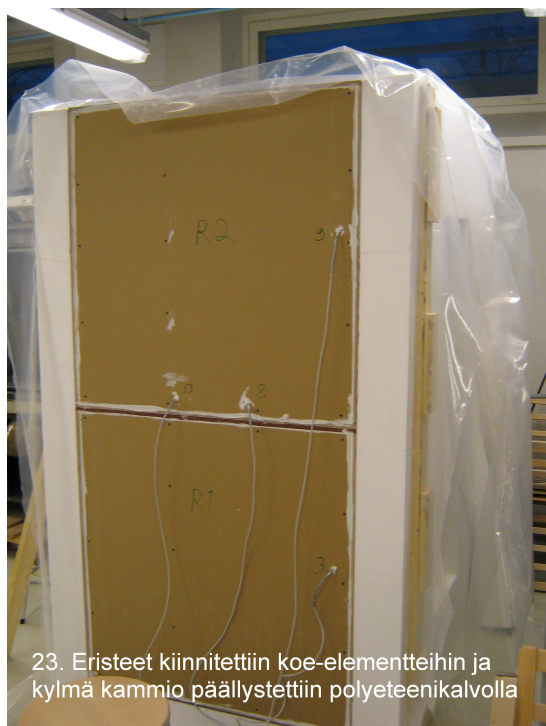


21. Koe-elementit valmiina. Myös kipsilevyjen reunat ja anturien läpiviennit tiivistettiin.



22. Kylmän kammion ja kylmälaitteen väliin asennettiin polypropeenieriste





23. Eristeet kiinnitettiin koe-elementteihin ja kylmä kammio päällystettiin polyeteenikalvolla



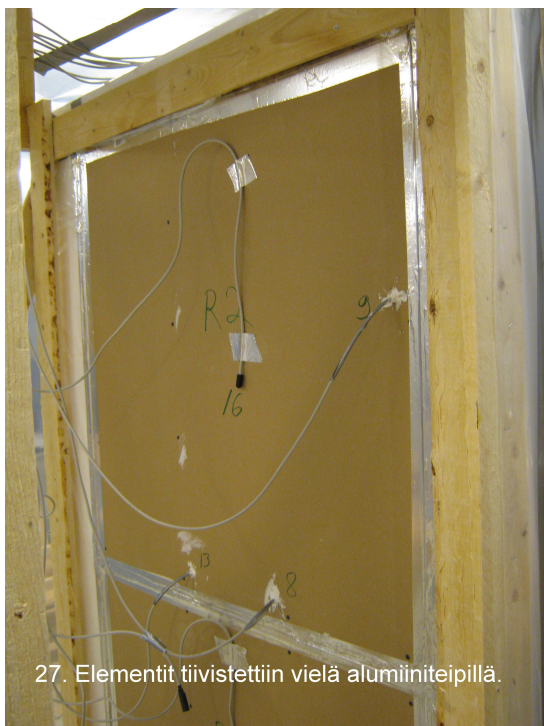
24. Kylmän kammion sisäpuoli sivuseinään tehdystä aukosta katsottuna



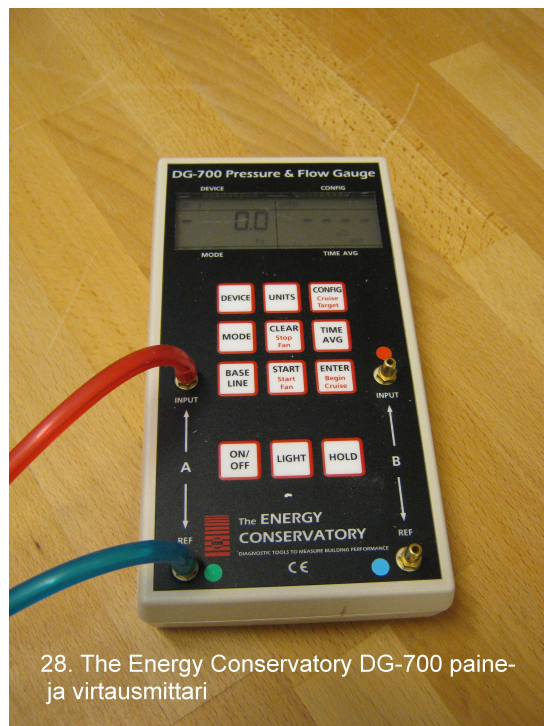
25. Kylmä kammio valmiiksi koottuna



26. Lautakehikosta muodostunut lämmin kammio kiinnitettiin koe-elementteihin



27. Elementit tiivistettiin vielä alumiiniteipillä.



28. The Energy Conservatory DG-700 paine- ja virtausmittari



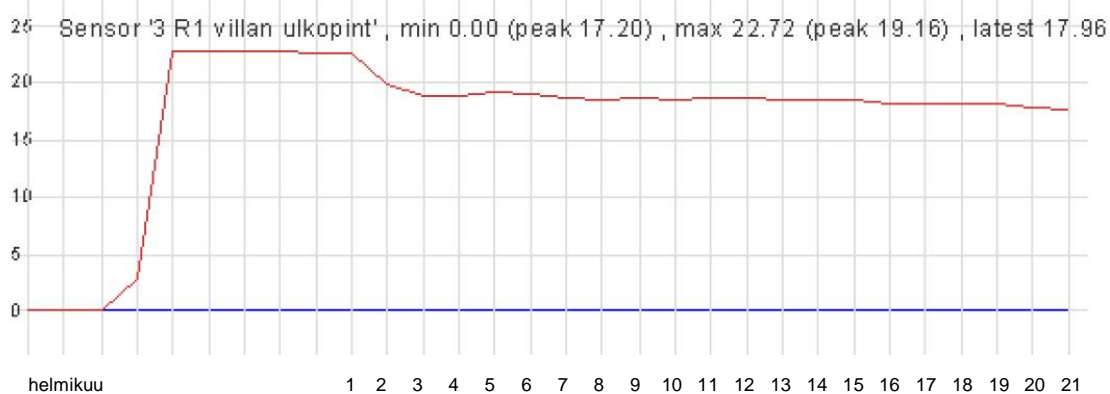
29. Antureiden johdot johdettiin kylmän kammion päälle, jossa ne kytkettiin loggereihin

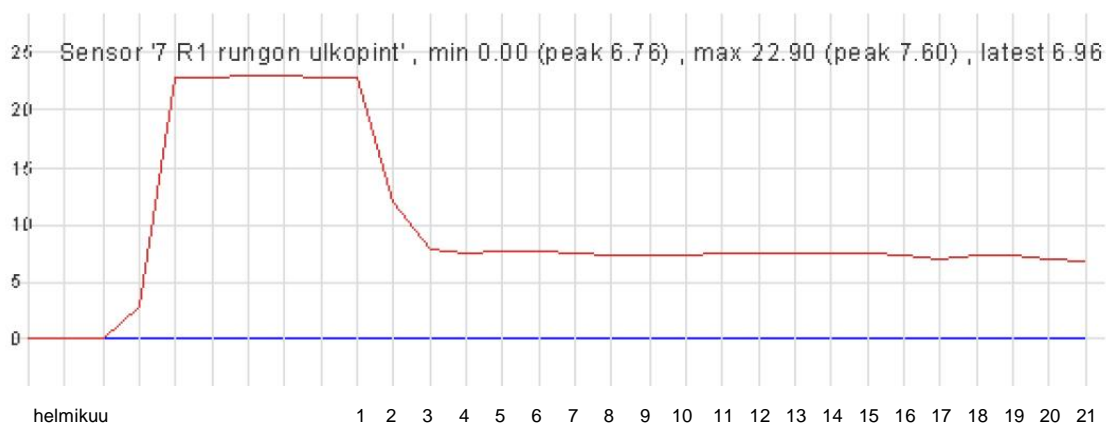
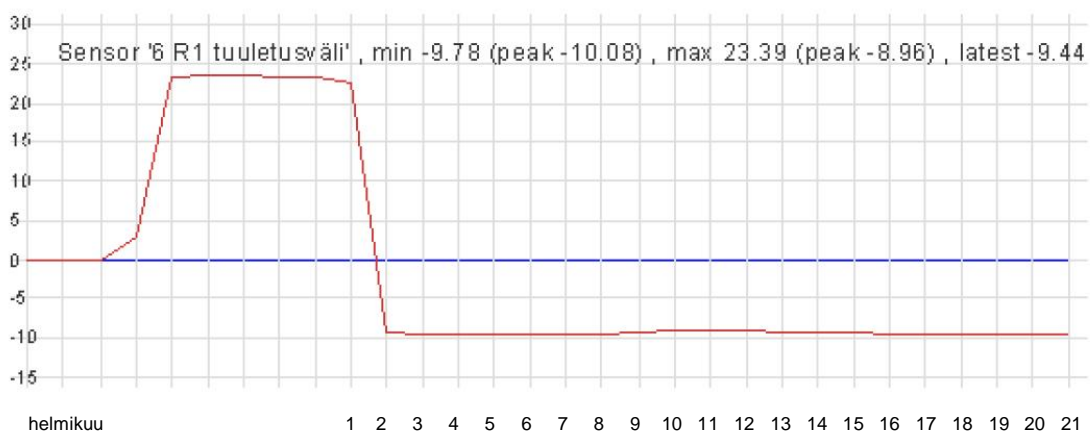
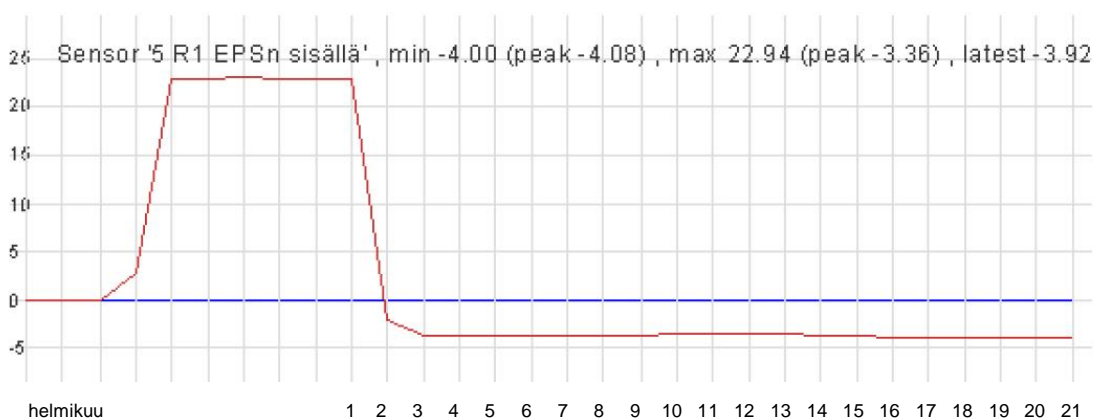
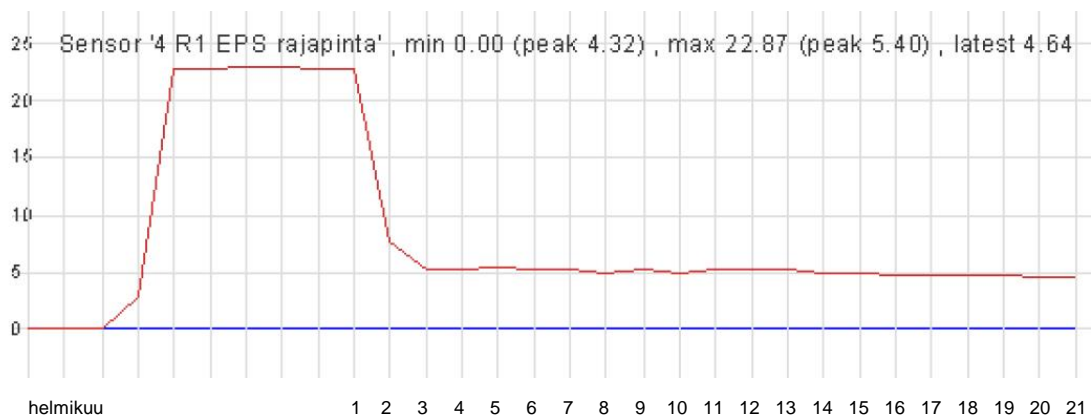
## Liite 12. Kokeiden mittaustulokset

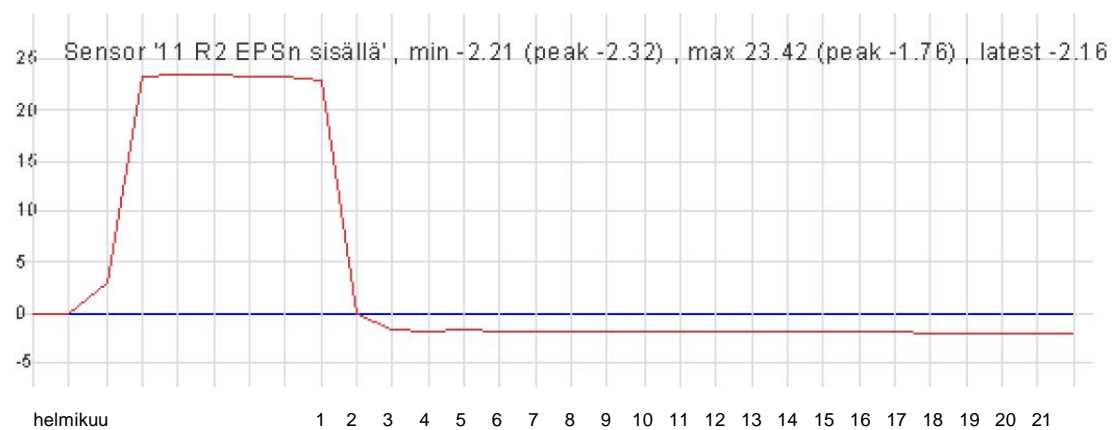
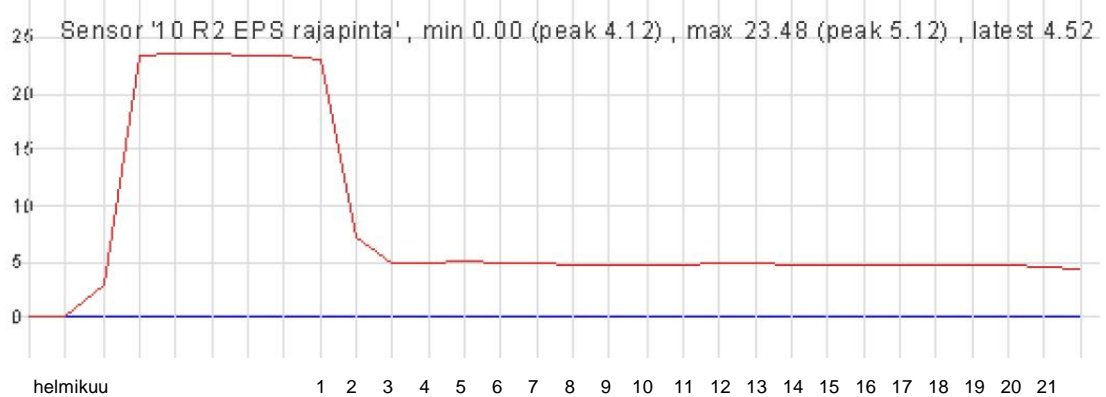
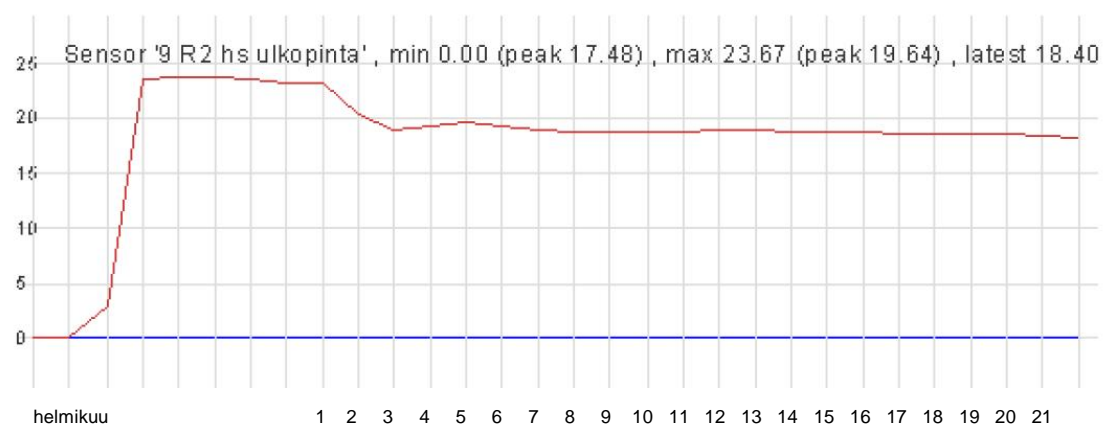
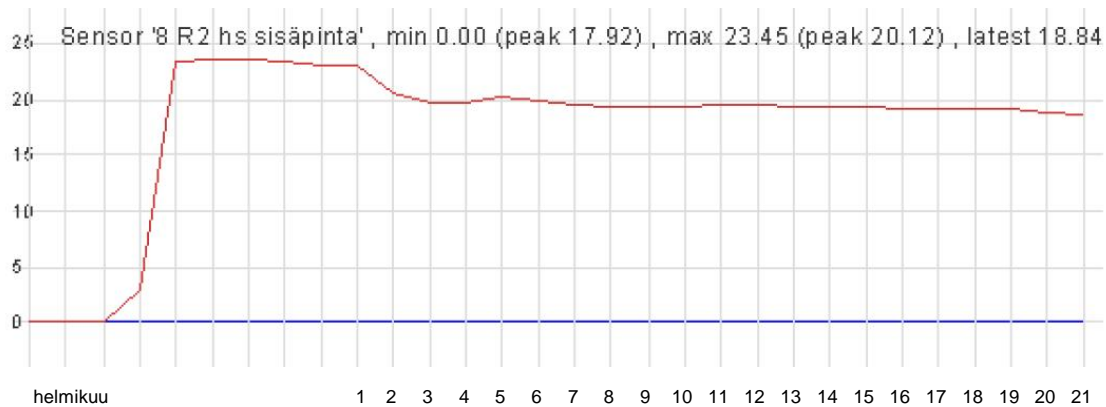
### Koe 1

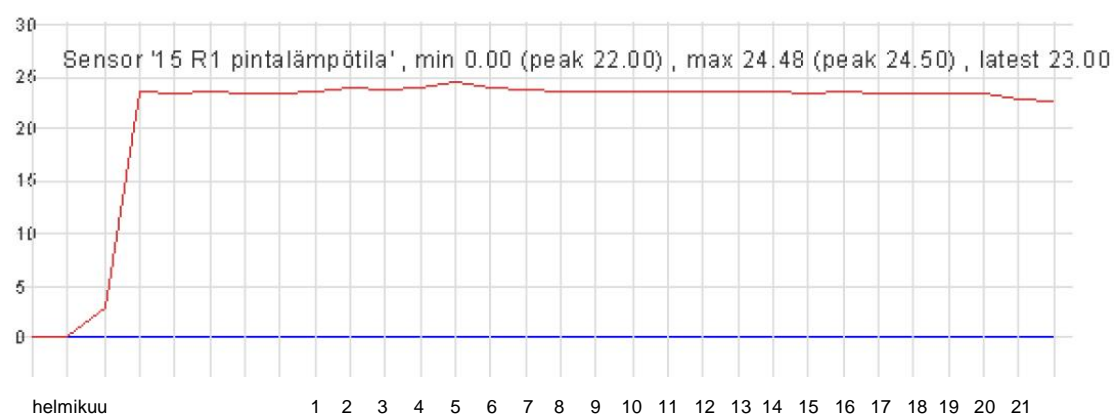
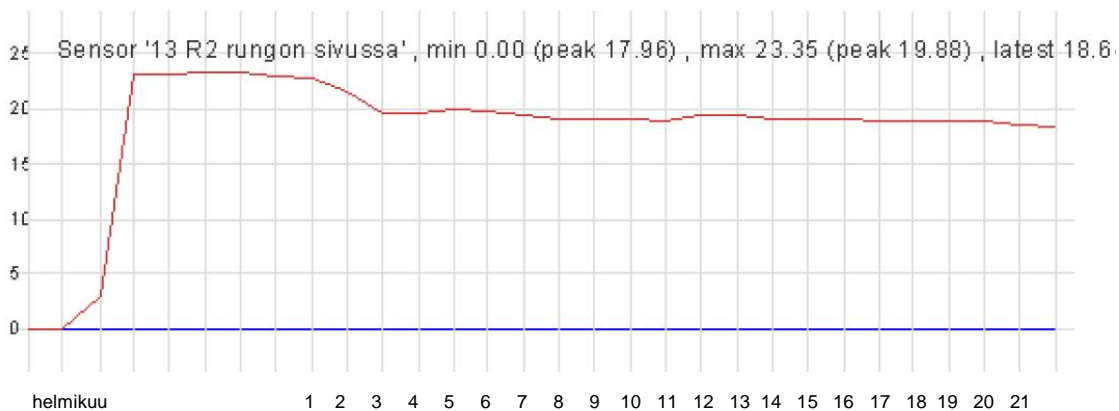
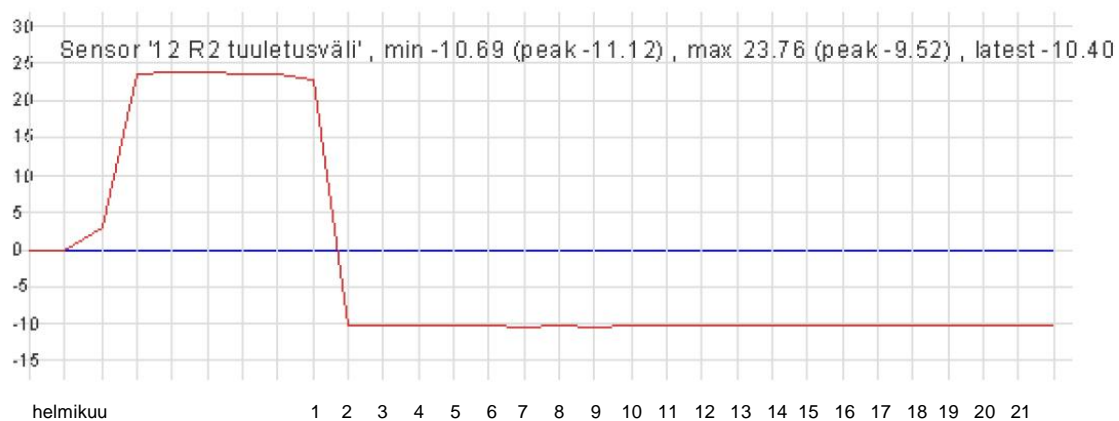
1.2.2010 - 21.2.2010

### Lämpötilat







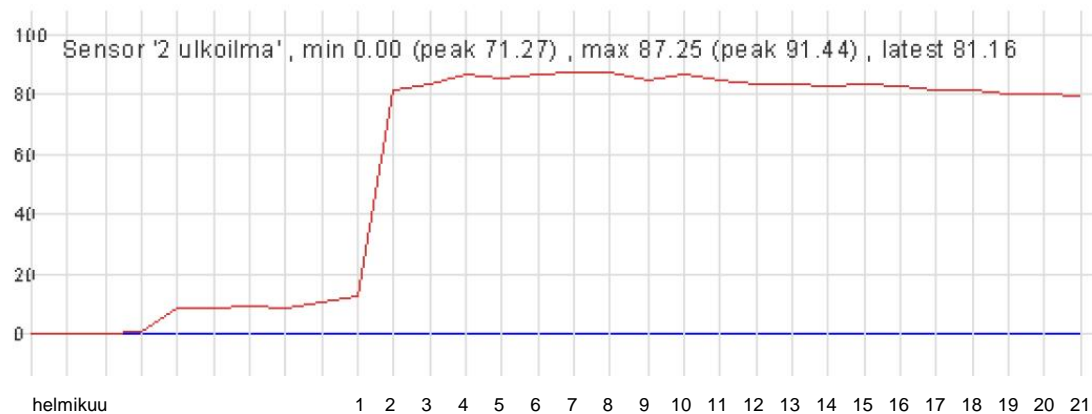
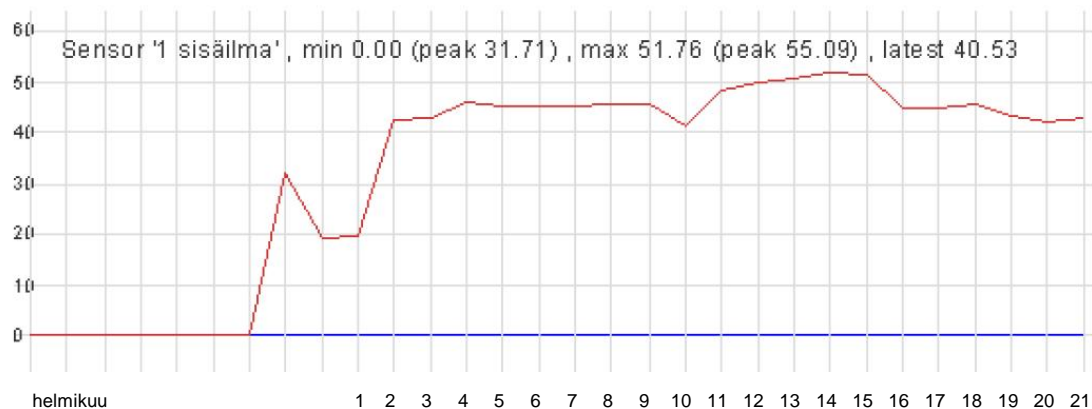


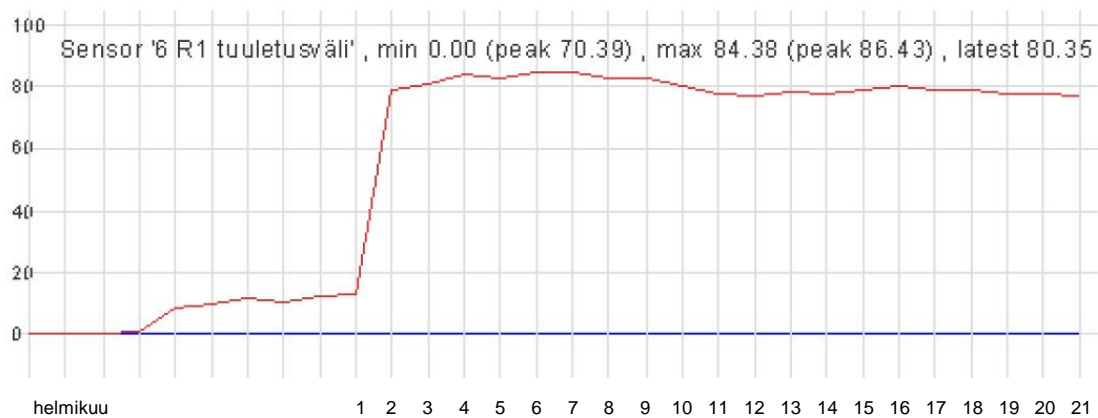
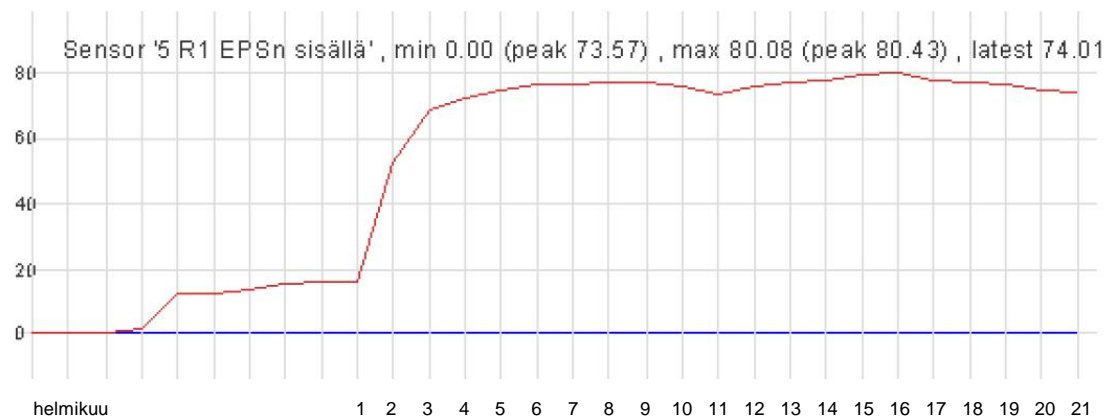
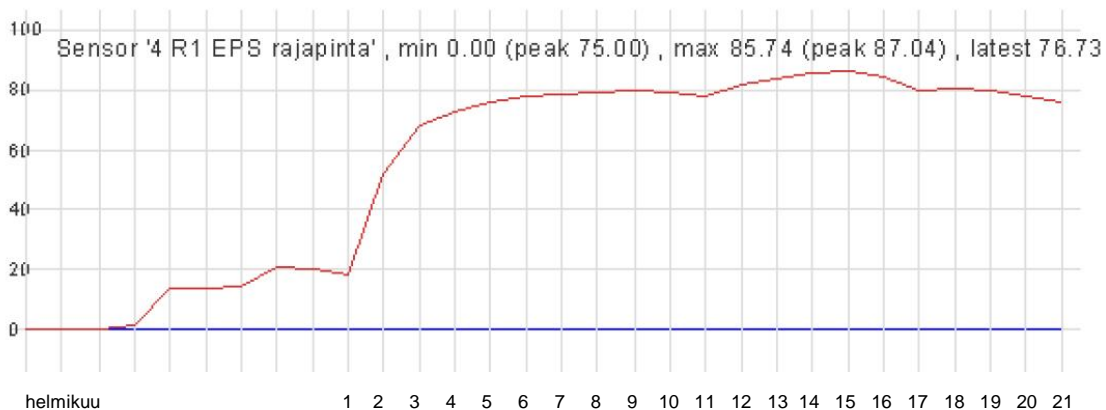
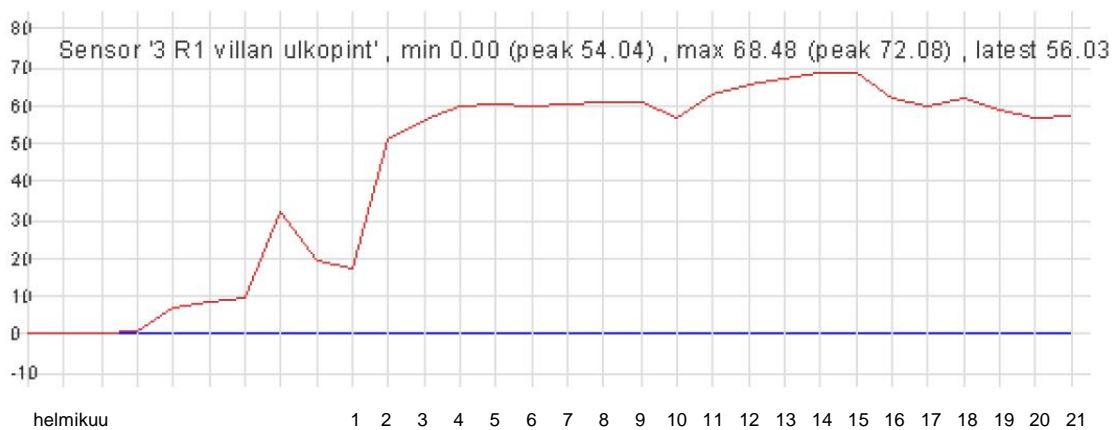


## Koe 1

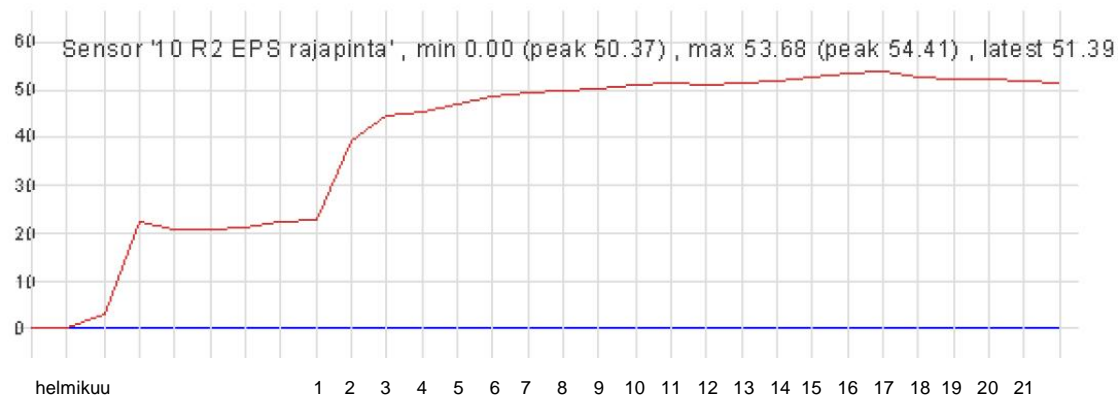
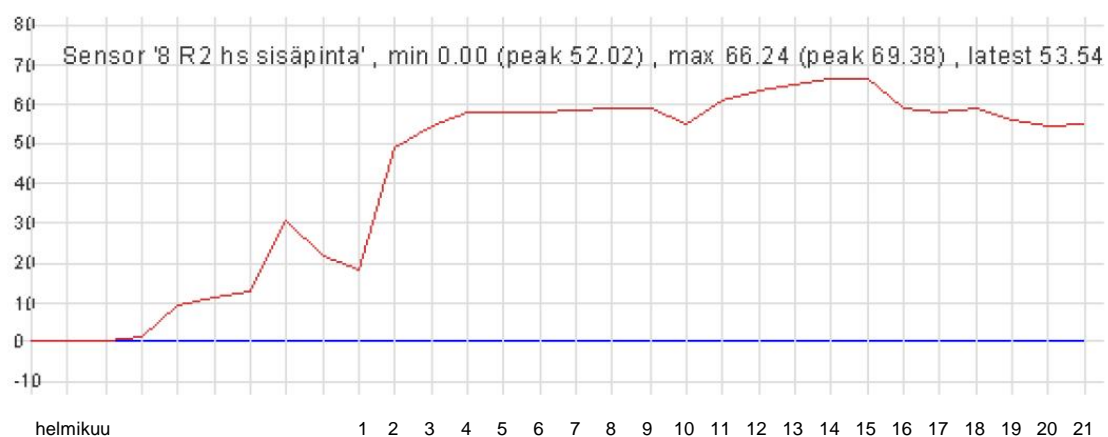
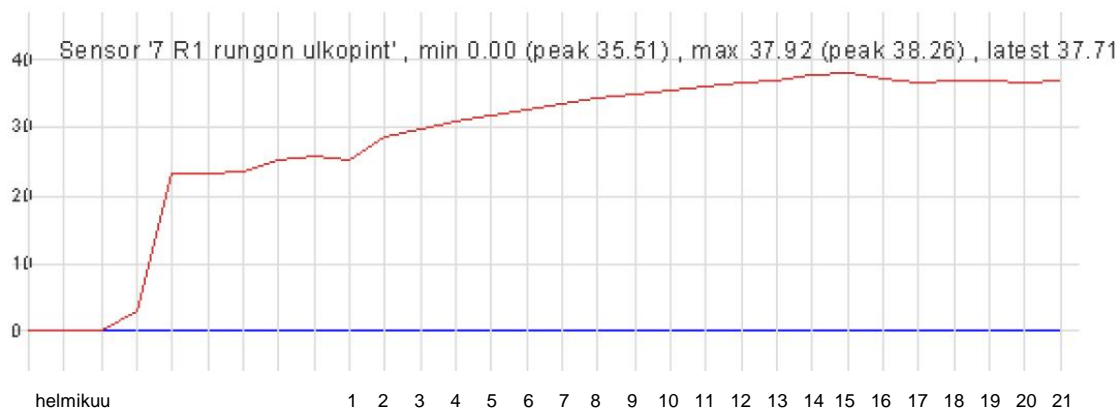
1.2.2010 - 21.2.2010

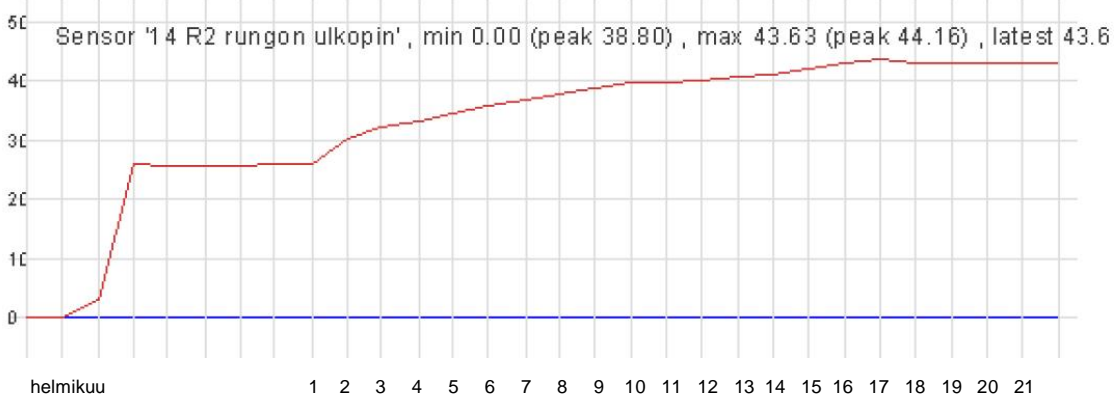
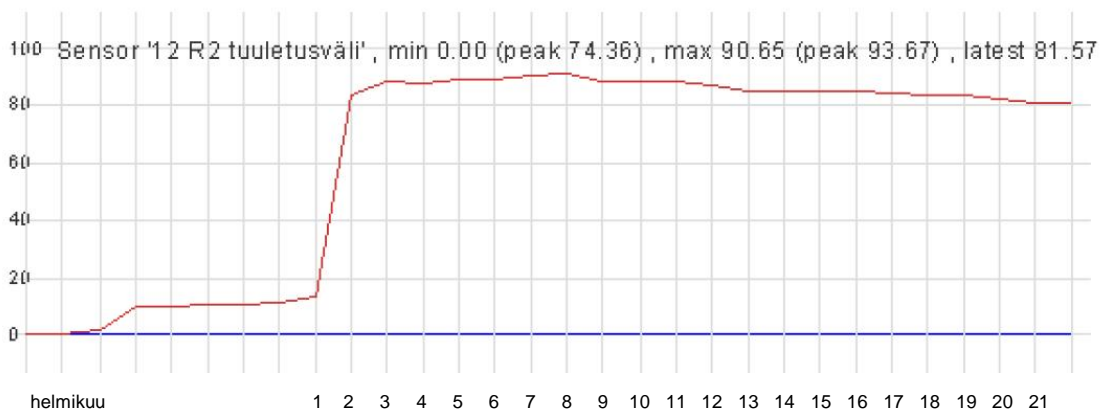
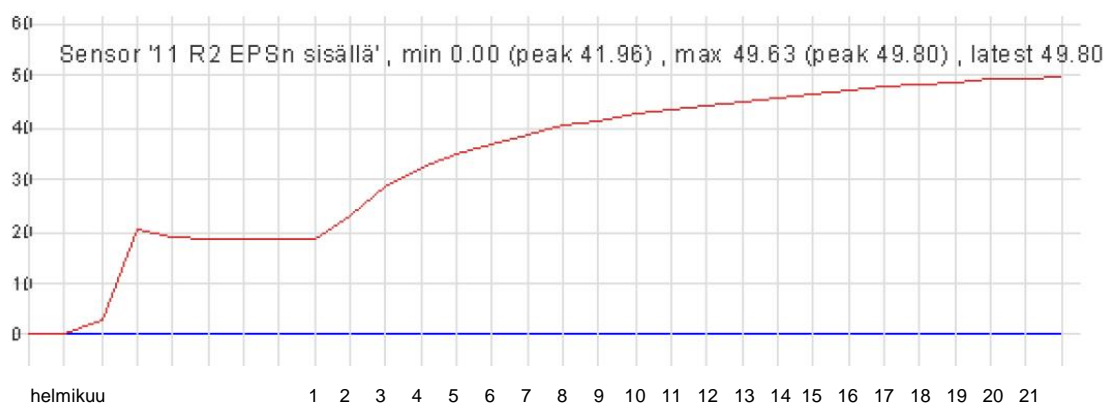
### Suhteelliset kosteudet











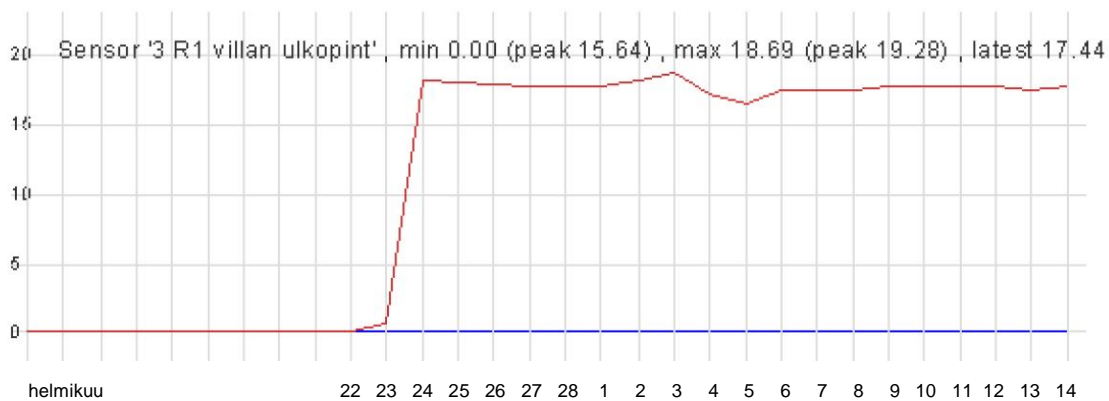
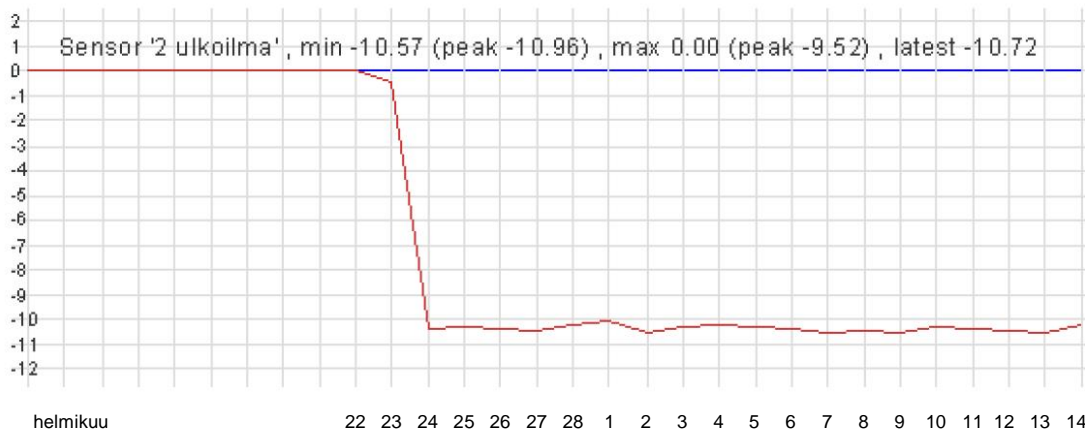
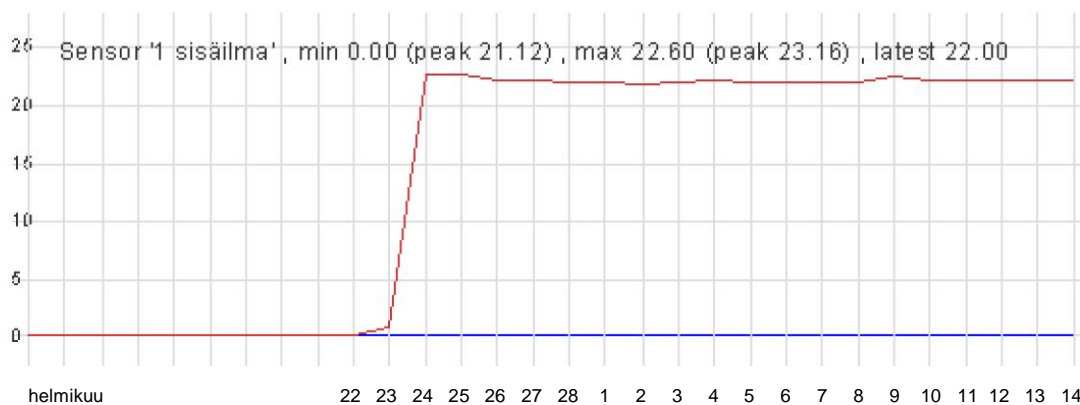
**Koe 2**

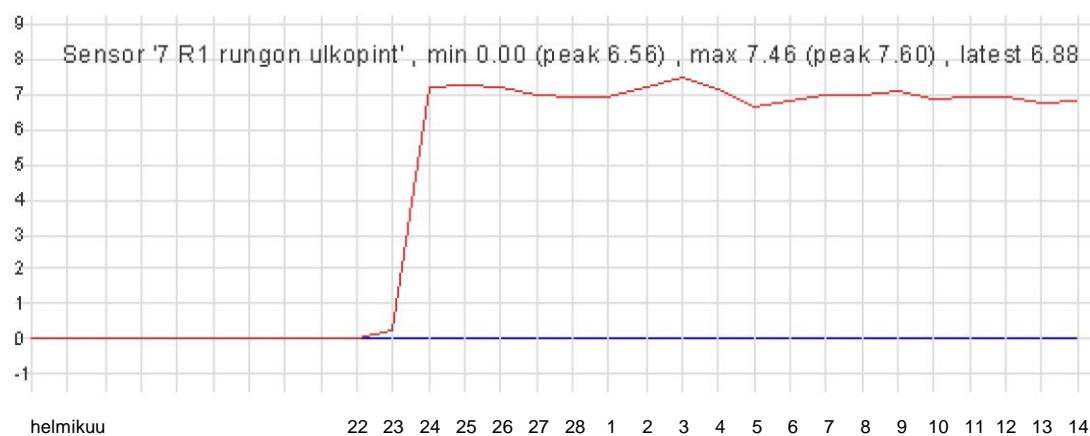
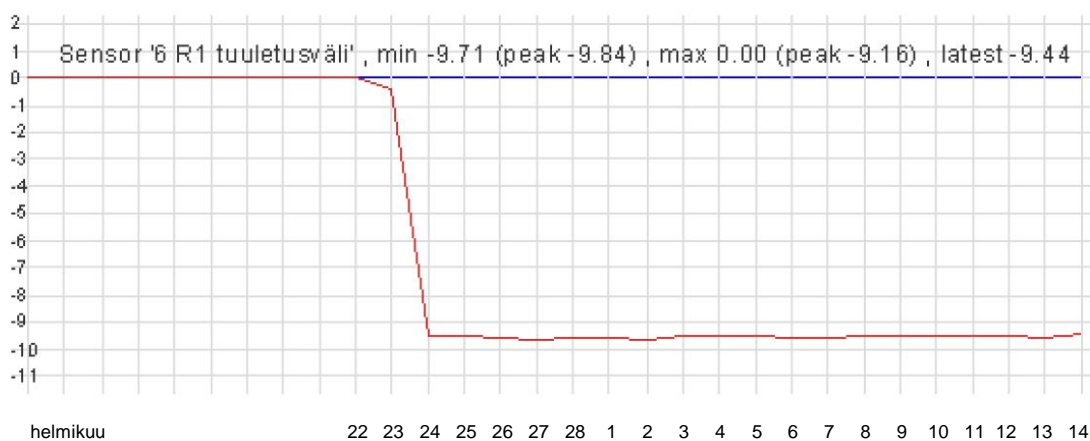
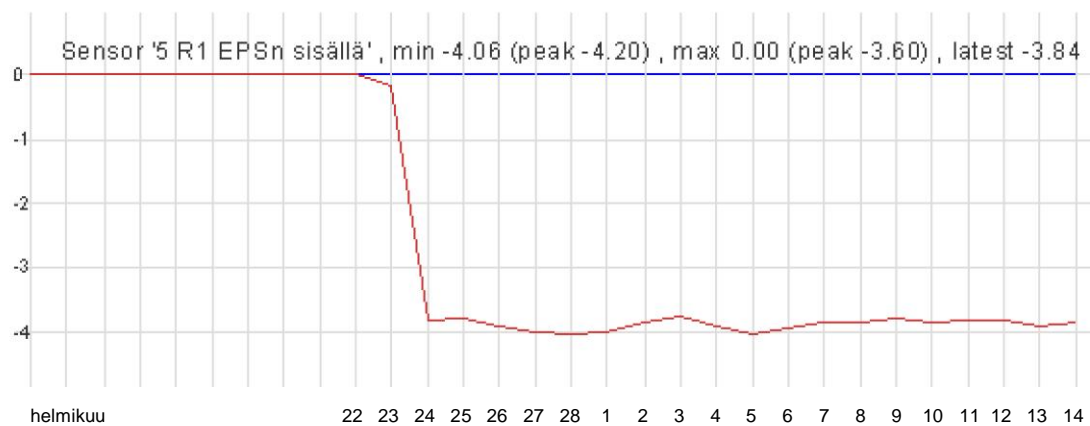
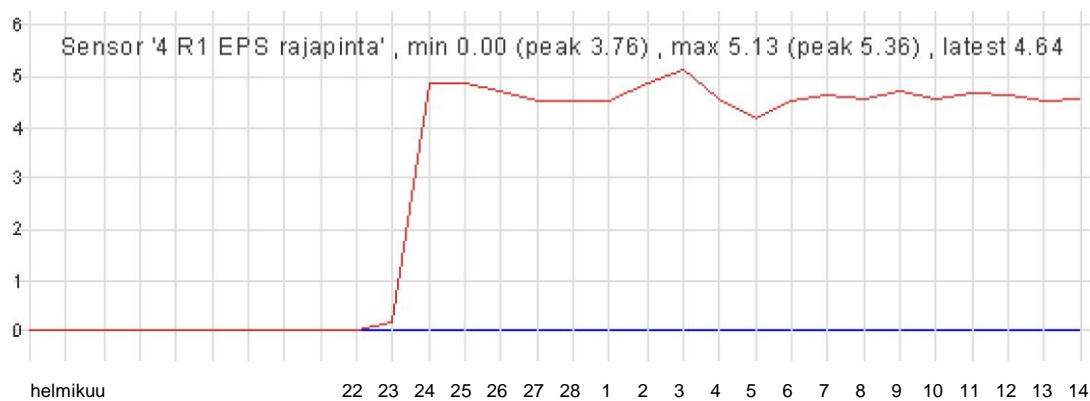
23.2.2010 - 3.3.2010

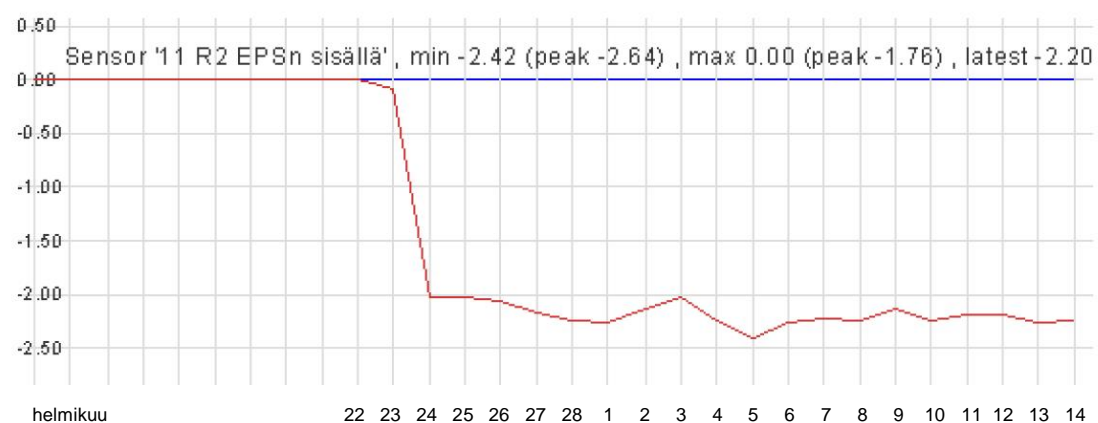
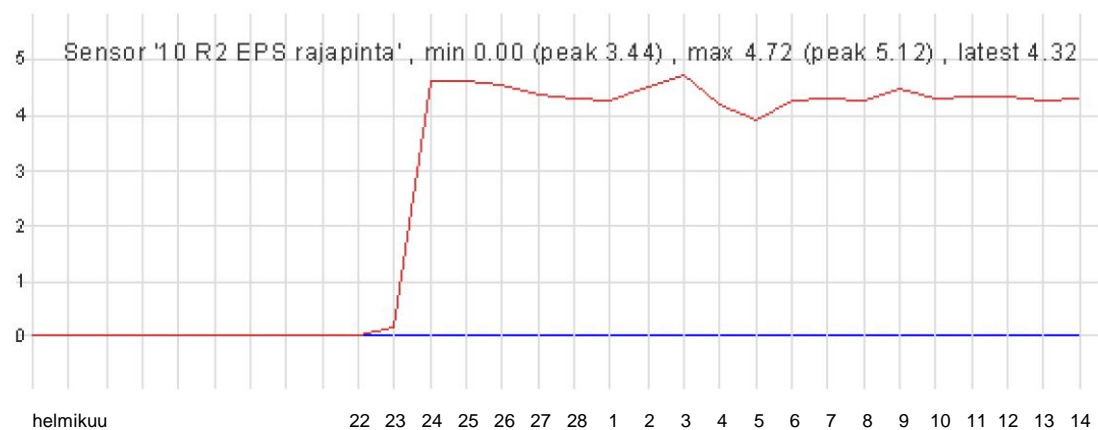
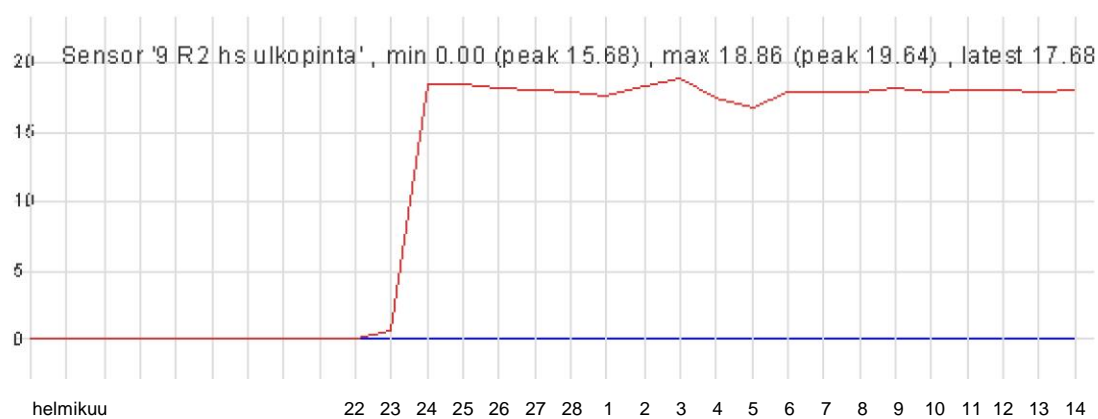
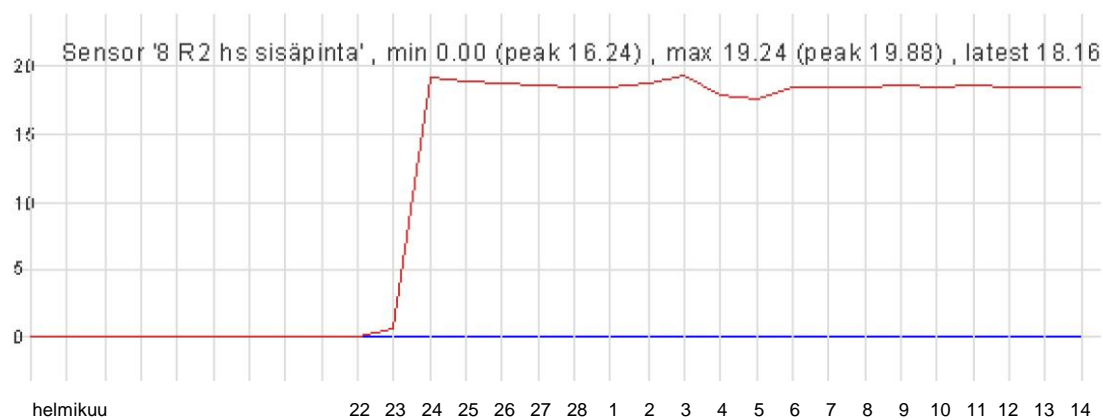
**Koe 3**

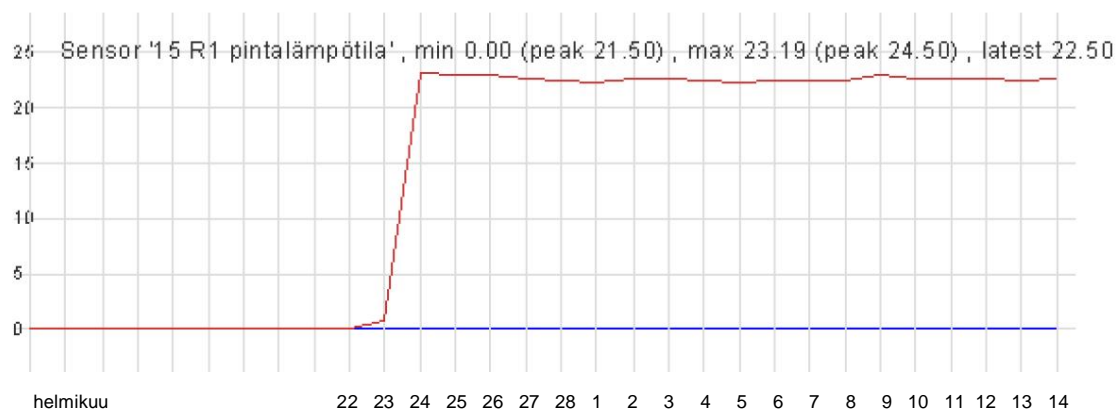
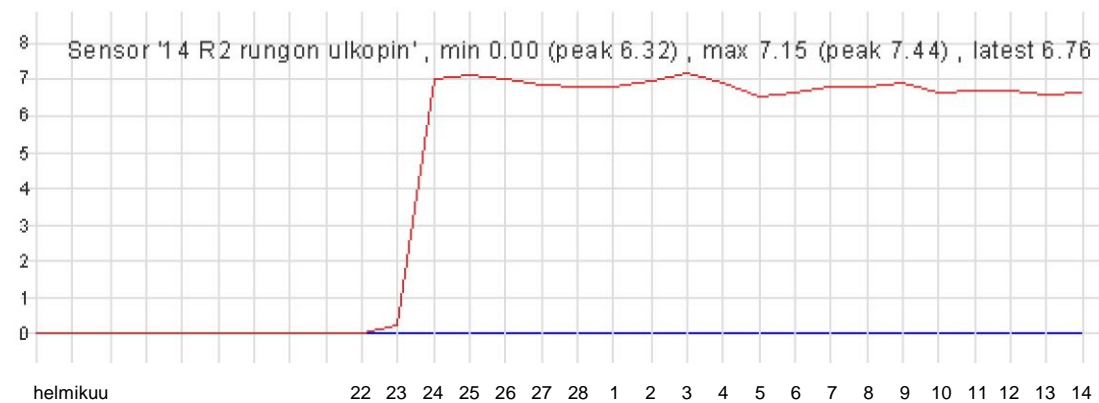
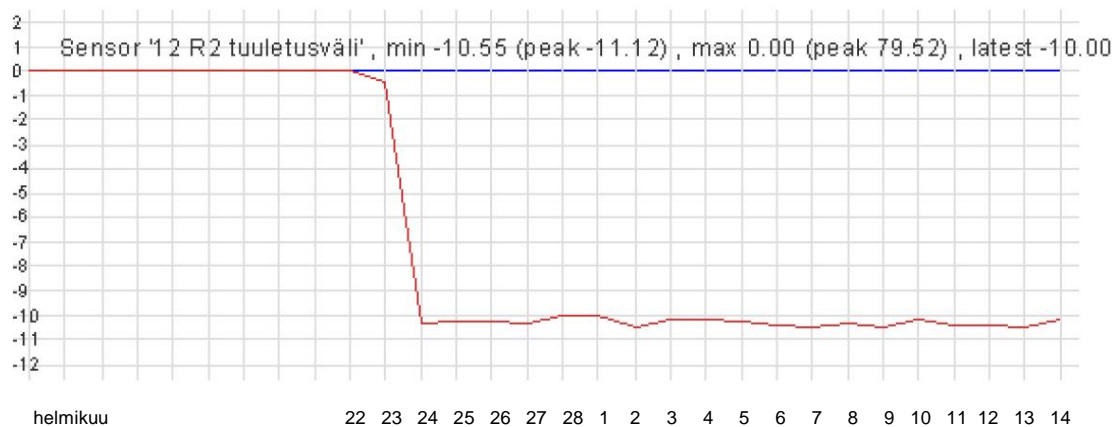
3.3.2010 – 14.3.2010

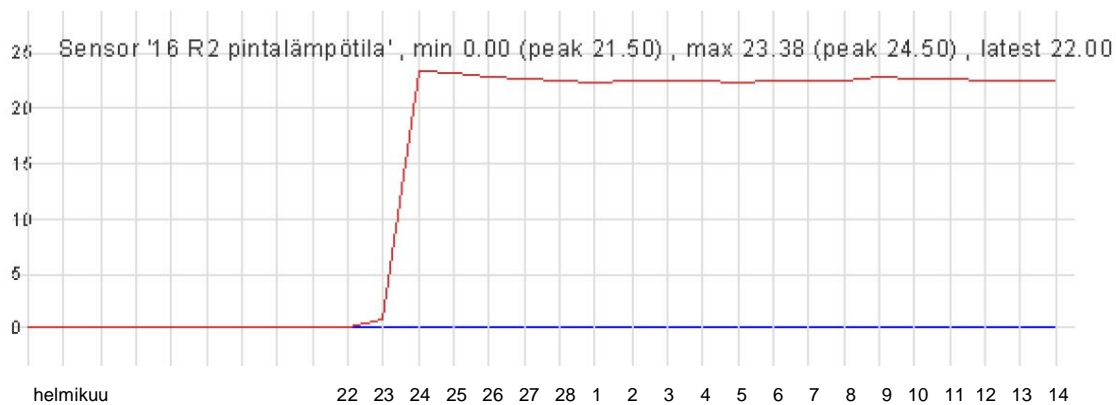
Koetta 2 jatkettiin suoraan kokeesta 1. Mittauskäyrien resetoinnin takia tulokset näkyvät todenmukaisina vasta toisesta koepäivästä alkaen.

**Lämpötilat**









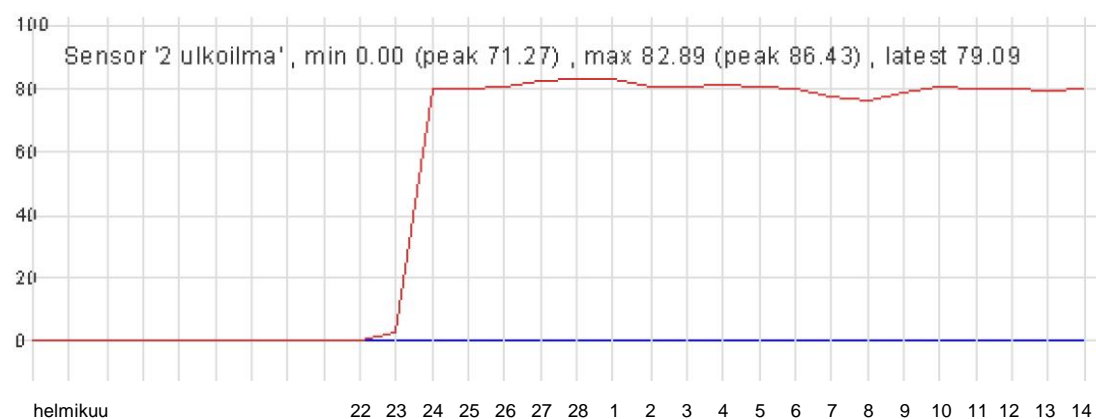
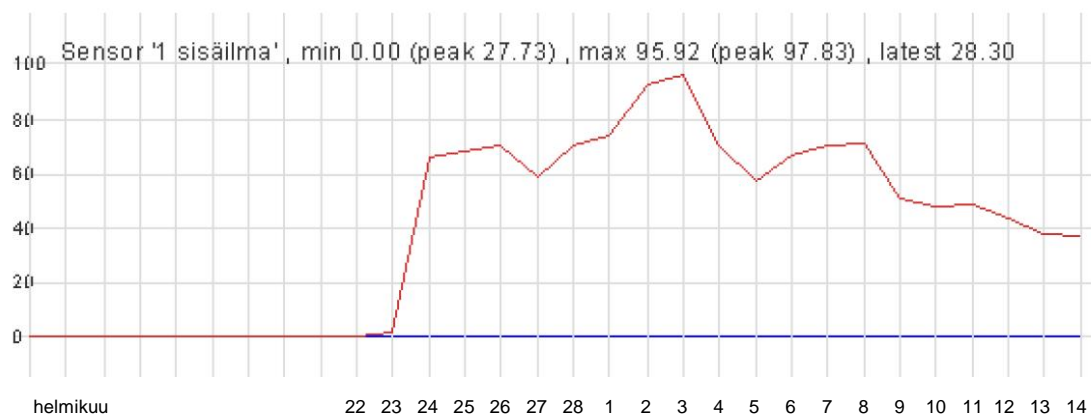
## Koe 2

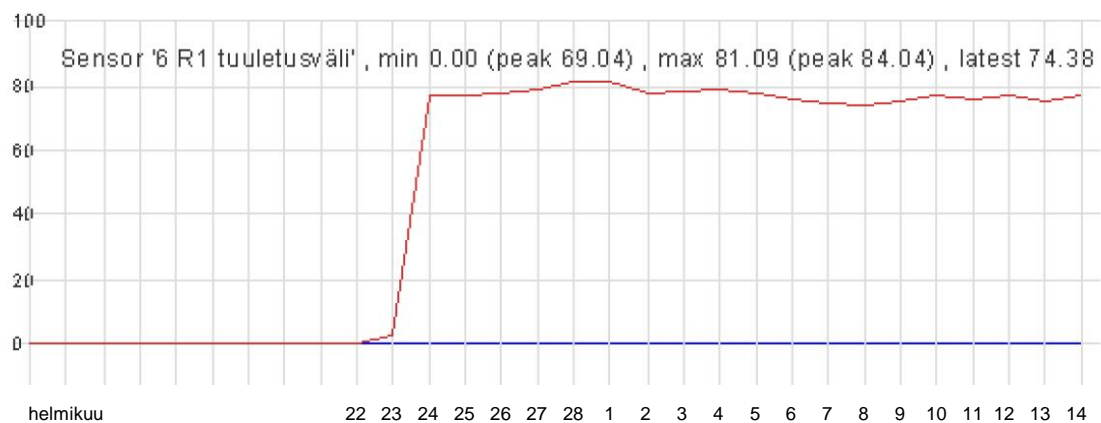
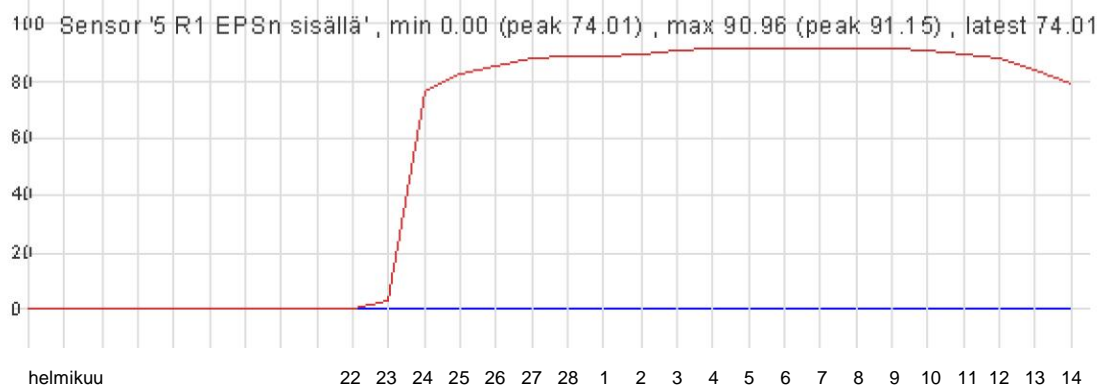
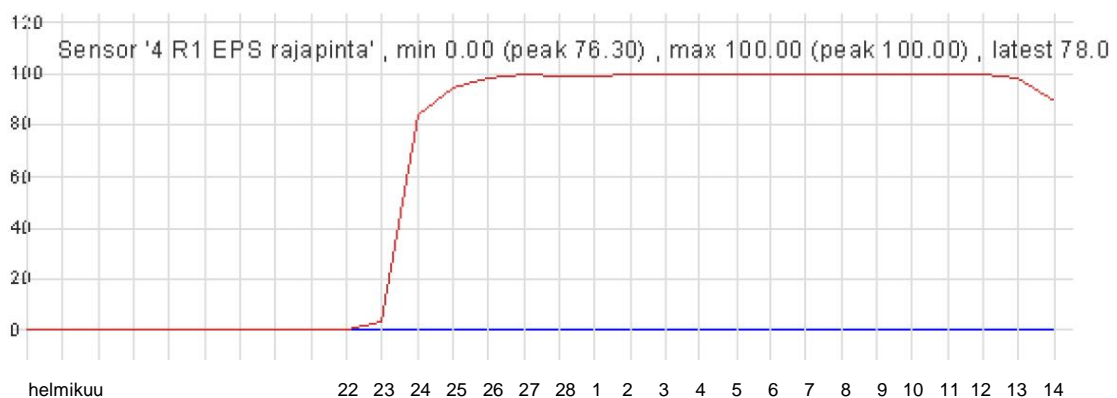
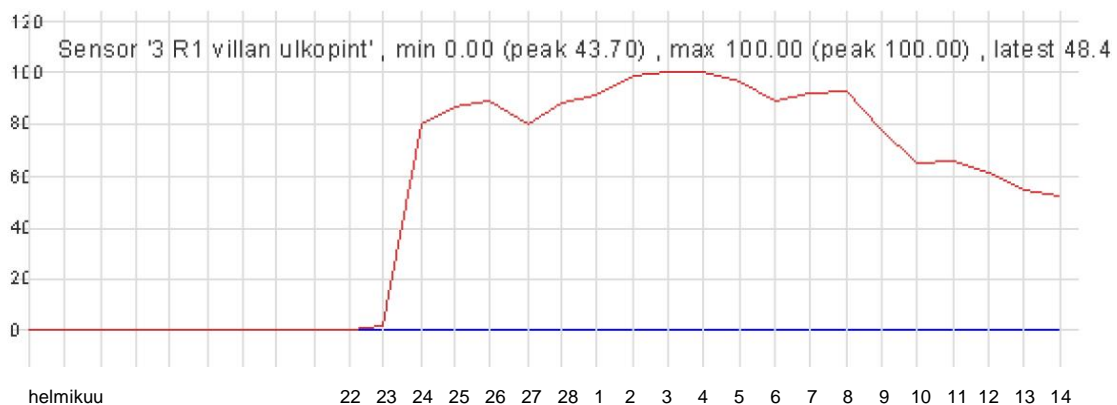
23.2.2010 - 3.3.2010

## Koe 3

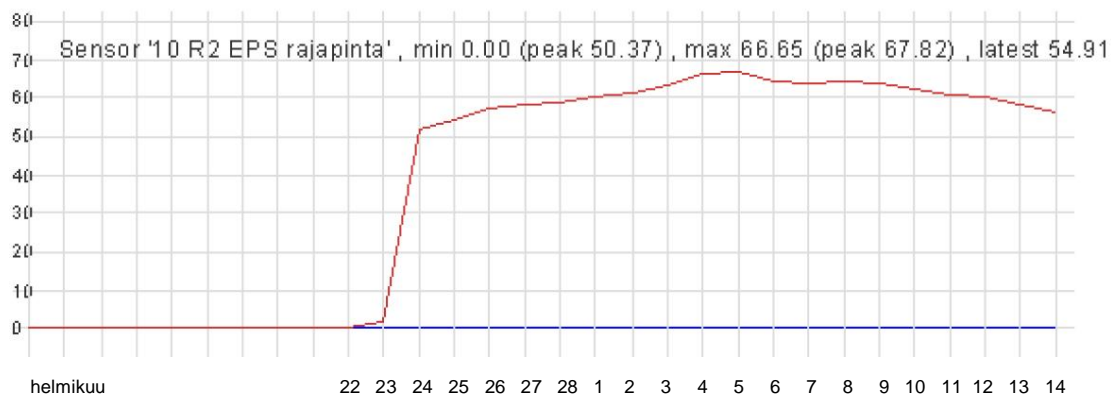
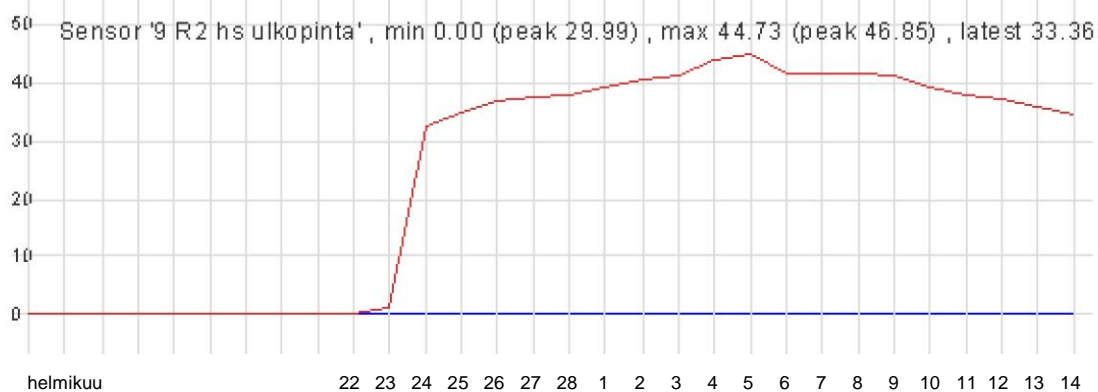
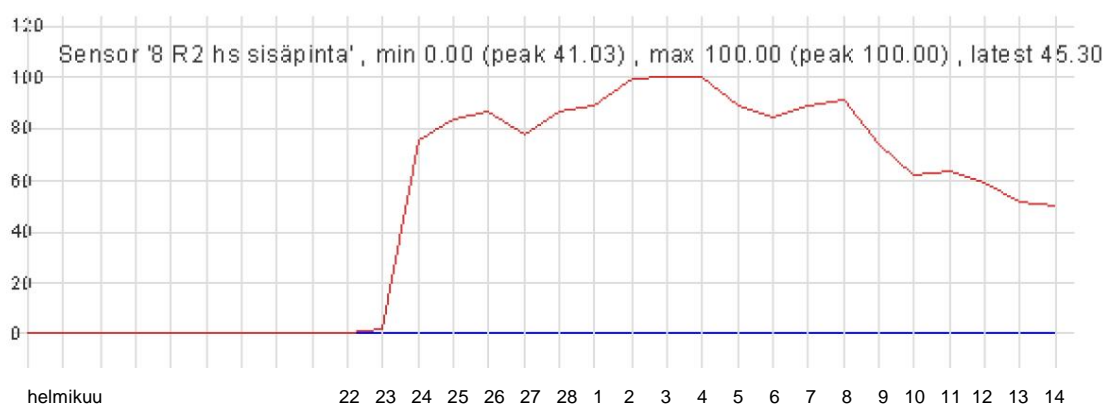
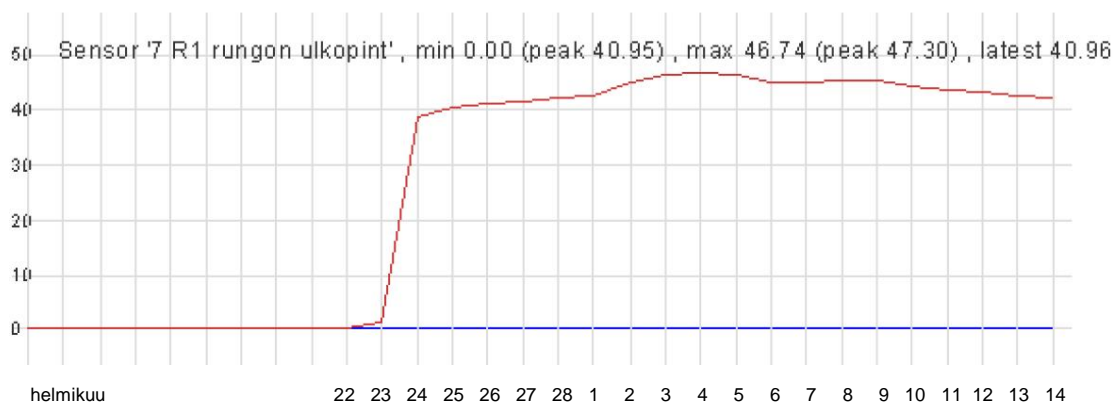
3.3.2010 – 14.3.2010

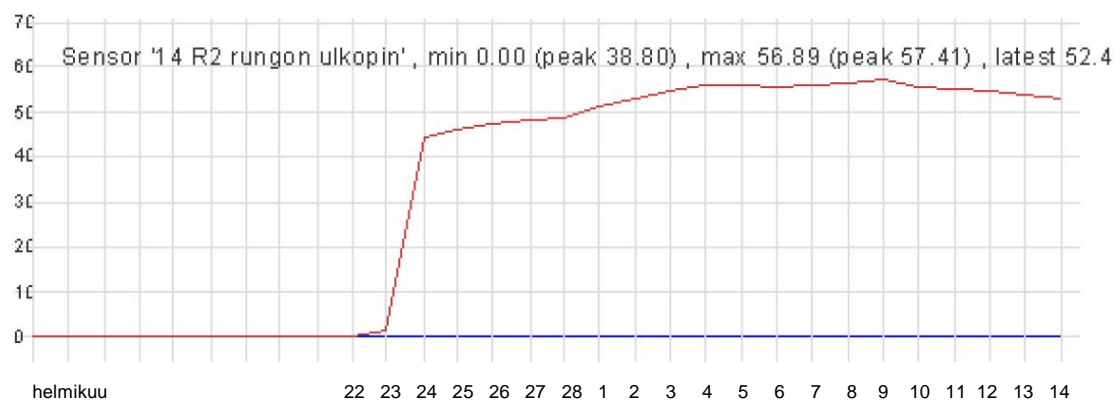
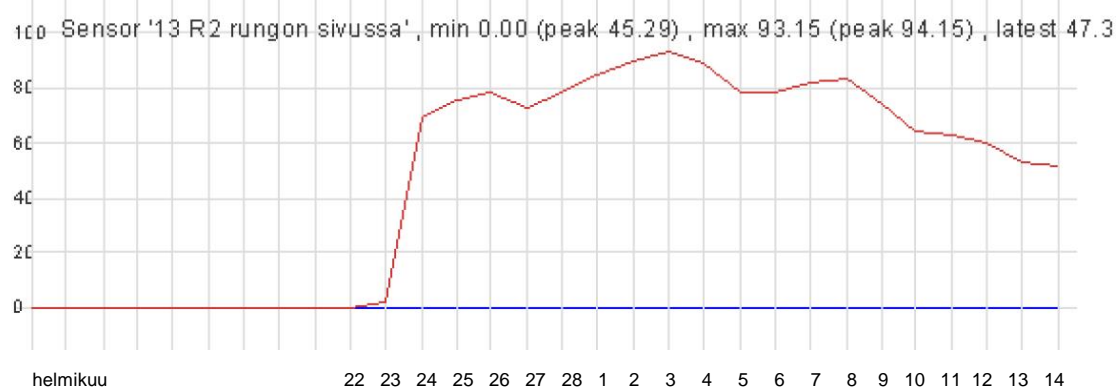
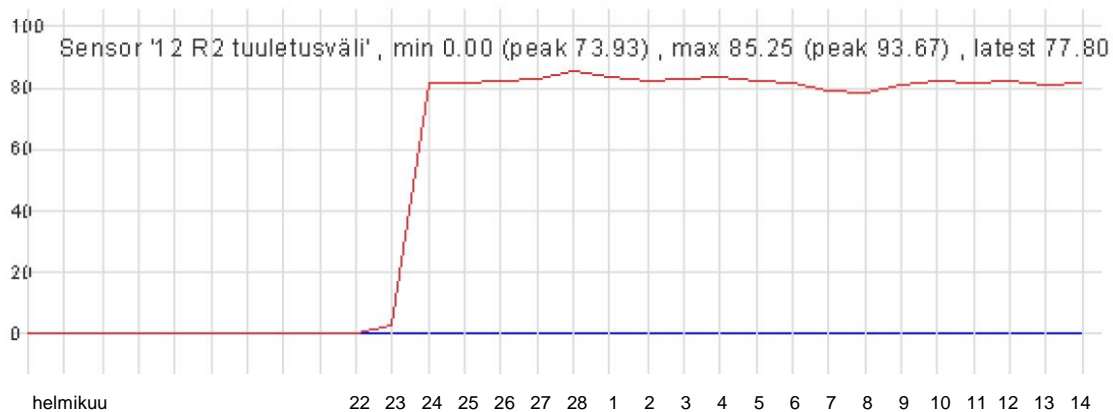
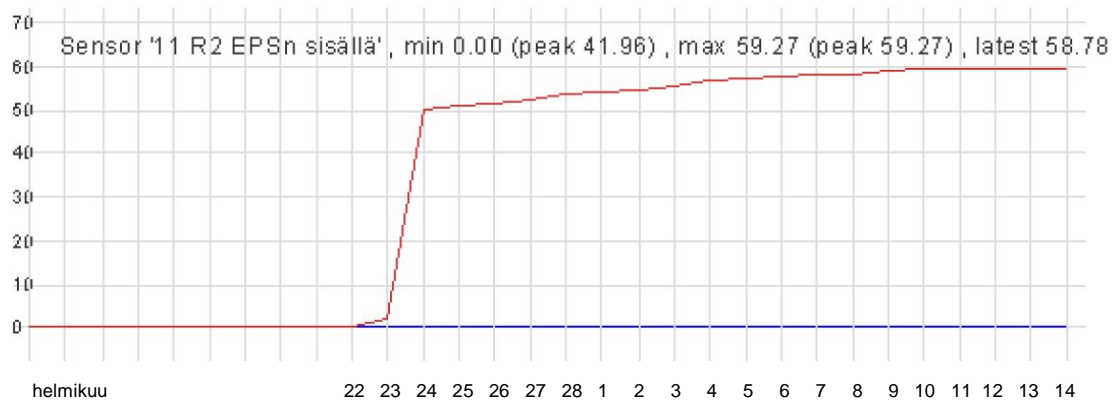
## Suhteelliset kosteudet



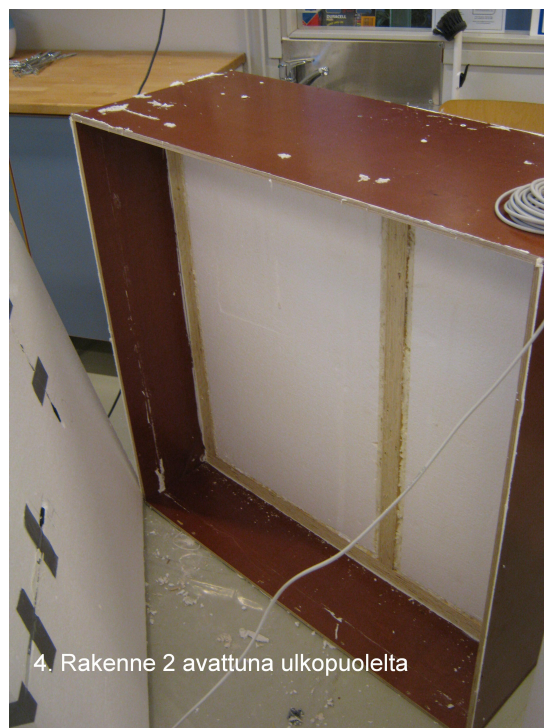
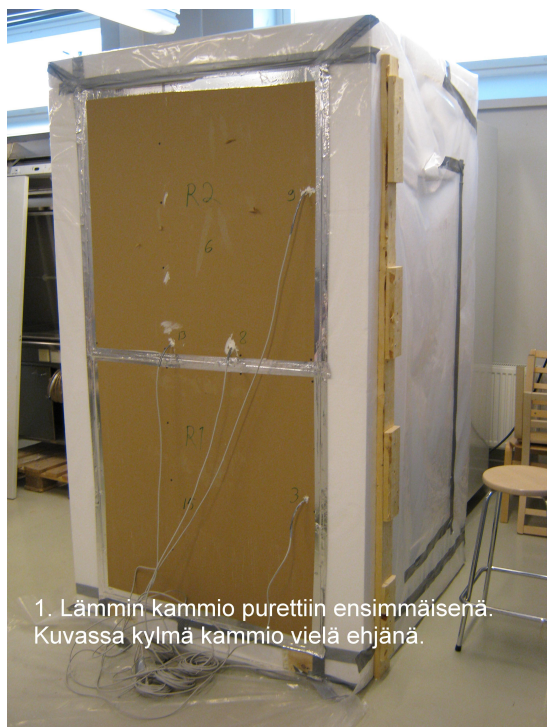








### Liite 13. Koe-elementtien purkaminen





5. Rakenne 1 sisäpuolelta



6. Rakenteen 1 koolaukset



8. Rakenteen 1 rungon ulkopuolinen eriste



7. Rakenteen 1 ulkopuoli

