

**Vaasan ammattikorkeakoulu,  
University of Applied Sciences Publications  
OTHER PUBLICATIONS C15**

**MAA- JA AURINKOENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN  
MATALAENERGIAKERROSTALORAKENTAMISESSA**

**Tapani Hahtokari**

**Vaasa 2013**



**Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto**

**Vipuvoimaa  
EU:lta**  
2007–2013

**VASEK**  
Vaasanseudun Kehitys Oy  
Vasaregionens Utveckling Ab



**Österbottens förbund  
Pohjanmaan liitto**





## TIIVISTELMÄ

Hankkeen, Maa- ja aurinkoenergian hyödyntäminen matalaenergiakerrostalorakentamisessa, lähtökohtana oli selvittää minkälaiseen kokonaisenergiatasoon kerrostalotuotannossa päästään silloin, kun energiatuotossa hyödynnetään maa- ja aurinkoenergiaa. Sysäyksen hankkeelle antoi uudistuvat energiamääräykset, joissa rakennusten energiatehokkuutta parannetaan kuluvan vuosikymmenen aikana siten, että vuoden 2020 lopussa uudisrakentamisessa puhutaan lähes nolla energiarakennuksista.

Voimassa olevat määräykset astuivat voimaan vuoden 2012 heinäkuussa ja seuraavat energiatehokkuutta parantavat ohjeet tulevat voimaan vuonna 2015. Tällöin myös voimakkaammin tullaan ohjaamaan rakentajia uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämiseen. Kun puhutaan lähes nollaenergiaratkaisista, rakennukseen on kuitenkin ostettava tietty määrä ostoenergiaa, pumppujen, laitteiden, kodinkoneiden jne toimimiseksi ja tämä kulutettu energia on kompensoitava uusiutuvalla energialla.

Vaasan Suvilahteen Lakea Oy rakennuttaa yhteensä 4 täysin samanlaista 8-kerroksista kerrostaloa. Kaksi ensimmäistä kerrostaloa ovat hankkeen kohteita, ensimmäinen valmistui syksyllä 2010 ja toinen syksyllä 2011. Rakennusten erona on eri lämmöneristystaso, ensimmäinen vuoden 2007- ja toinen vuoden 2010-ohjeiden mukaan rakennettu.

Rakennusten energiatuotto on toteutettu hyödyntäen maa- ja aurinkoenergiaa. Ensimmäisen rakennuksen alueelle on porattu yhteensä 14 200 m:n syvyistä porakairoa ja toisen rakennuksen alueelle 10 porakairoa. Lisäksi rakennusten katolla on tyhjiöputkikerääjät, joiden kummankin pinta-ala on 36.6 m<sup>2</sup>. Hankkeessa on seurattu kummankin rakennuksen energiakulutusta sekä mikä vaikutus maa- ja aurinkoenergialla on rakennusten ostoenergiiaan. Toteutunut ostoenergian määrä ensimmäisessä rakennuksessa on 54 % laskennallisesta kokonaiskulutuksesta ja toisessa rakennuksessa 64 % laskennallisesta kokonaiskulutuksesta. Eristepaksuuden lisäämisen vaikutus lämmitysenergian kulutukseen jää suhteellisen pieneksi, jolloin käyttäjien kulutustottumusten vaikutus suhteessa kasvaa. Rakennuksessa 1A asukkaiden kulutus mukaan lukien lämmin käyttövesi vuonna 2012 oli 79 % rakennuksen toteutuneesta ostoenergiasta sekä rakennuksessa 1B vastaavasti 84 %.

Siirryttäessä parempiin energiatehokkaisiin rakennuksiin on julkiseen keskusteluun noussut kysymys rakennuksen vaipan eristekerroksen paksuntamisen vaikutus rakenteen kosteustekniikkaan, onko riskiä eristekerroksen paksuntamisessa kosteuden tiivistymiseen. Tätä ongelmaa on hankkeessa tarkasteltu seuraamalla rakennusten seinärakenteessa eristekerroksen sisäpinnan ja ulkopinnan lämpö- ja kosteusolosuhteita sekä teoreettisesti mallinnettu FEM-pohjaisella, Comsol Multiphysics-ohjelmistolla. Ohjelman antamat tulokset vastaavat hyvin mitattuja lämpö- kosteusolosuhteita. Riskiä kosteuden tiivistymiseen ei ole edellyttäen, että rakennusaikana rakentamisen laadusta ja rakenteiden tiiveydestä huolehditaan. Myös paksujen kerroksellisten rakenteiden suunnittelu edellyttää toimivuuden huolellista tarkastelua.

Rakentamisen laatuun on pyritty vaikuttamaan pitämällä rakentamisen alussa kummasakin kohteessa työntekijöille koulutuspäivä. Päivässä on kerrottu hankkeelle asetetut

tavoitteet sekä yleensä laadukkaan rakentamisen merkitys kosteustekniikkaan ja tiiveyteen ja sen kautta energiatehokkuuteen. Rakentamisen aikana tehtiin huoneistokohtaisia tiiveysmittauksia sekä selvitettiin mahdollisia vuotoja merkkisavujen ja lämpökameran avulla. Rakennusten valmistuttua tehtiin koko rakennuksen tiiveysmittaus.

## ABSTRACT

The start point of the research project, *The Usage of the Geothermal and Solarenergy in the Low Energy Building of the Block Houses*, was to find out what is the total energy consumption in the multi-storey building when geothermal and solarenergy are used. The basis of the project were the new energy codes, according of which at the end of this decade the energy consumption of the buildings is near the zero level. When it is talked about the zero energy consumption of the buildings certain amount of energy must be purchased to run pumps, domestic appliances, facilities etc. and this consumption must be compensated with the renewable energy.

In Suvilahti, the area of Vaasa city, Lakea Ltd will construct 4 similar multi-storey Buildings with 8 floors. The first two buildings are the targets of the research. The residents occupied the first building at autumn 2010 and the second at autumn 2011. The only difference of the buildings is the level of thermal insulation. The first building is built according to the codes of the year 2007 and the second according to the codes of the year 2010.

The energy production is carried out using the geothermal and solar energy. Around the first building is drilled altogether 14 boreholes and around the second building ten boreholes. On the roof of the buildings there are solar collectors the area of each is 36.6 m<sup>2</sup>. In the research is followed the energy consumption and the effect of the renewable energy to the total purchased energy of the buildings. The amount of the purchased energy of the first building is 54 % from the calculated total energy need and 64 % of the second building respectively. The thicker insulation layer effects however relative little while the consumption habits of the residents have much greater influence in relation to the energy used.

In public discussions there has been arguments about the effects of the thicker insulation layer of the building envelope, is there any risks to the moisture condensation. This problem has been monitored with heat and moisture sensors inside the wall, in inner and outer surface of the insulation layer. Also the problem has been modelled with Comsol Multiphysics software. The results obtained with the software correspond well the monitored values. As a result there is not any risks to the moisture condensation if the quality of the construction and the air tightness of the structures are taking care. Also the design of the thick layered structures requires careful attention.

At the beginning of each building process we had the training day. On the training day to the workers were told the aims of the project and the effects of the quality to the energy efficiency. On the building site the air tightness of the selected apartments was done and the possible air leaks were identified with sign smoke and infrared thermal camera. After the buildings were finished the air tightness tests of the whole building were done.

---

Keywords: Energy efficiency, Renewable energy sources, The heat and moisture function of the building envelope

## ALKUSANAT

Rakennusten energiakulutus on noin 40 % koko Suomen energian käytöstä sekä rakennusten osuus kasvihuonepäästöistä on noin 30 % CO<sub>2</sub>-ekvivalenttina. Vuoden 2020 loppuun mennessä Suomi on sitoutunut lisäämään uusiutuvien energiamuotojen käyttöä 38 % ja vähentämään kasvihuonepäästöjä vähintään 20 % Kioton sopimuksen tasosta. Vuoden 2020 loppuun mennessä uudisrakennusten energiakäyttö on lähes nolla-tasolla.

Tulevat energiatehokkuuden parannukset asettavat rakentajille suuret haasteet. 1970 – 1980 öljykriisien jälkeen rakennusten energiatehokkuutta parannettiin siten, että rakennusten käyttäjät alkoivat oireilla. Rakenteisiin pääsi syystä tai toisesta tiivistymään kosteutta ja tämän seurauksena syntyi mikrobivaurioita ja sisäilmaongelmia. Määräysten parantaminen lähes nollaenergiatasoon vuosikymmenen aikana edellyttää laajaa tutkimustietoa, etteivät samat virheet toistu.

Jotta rakennuksen energiakulutuksen tase olisi lähes nolla, tämä edellyttää rakennuksen ostoenergian kompensoimista uusiutuvalla energialla. Tässä hankkeessa on seurattu kahden kerrostalon toteutunutta energian tuottoa ja -kulutusta, kun rakennusten lämmitys ja lämmin käyttövesi tuotetaan geotermisesti sekä aurinkokerääjiä hyödyntäen. Samoin on seurattu mittauksin ja laskentamallien avulla seinärakenteen lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä erilaisilla eristepaksuuksilla ja -tyypeillä

Hanke on toteutettu Pohjanmaan Liiton rahoittamana sekä lisäksi rahoittajina ovat olleet kohteiden rakennuttaja Lakea Oy, urakoitsija PEAB Oy, Vaasan kaupunki sekä Vaasan seudun kehitys, Vasek Oy. Hankkeen toteuttajina haluamme esittää parhaimmat kiitoksemme rahoittajille. Hankkeen johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut energiatekniikan professori Timo Kalema Tampereen teknillisestä yliopistosta ja jäsenenä toimitusjohtaja Keijo Ullakko ja projekti-insinööri Ari Nyman Lakea Oy, aluejohtaja Esko Korpi Peab Oy, erikoissuunnittelija Johanna Leppänen ja myöhemmin hankesihteeri Karita Beijar Pohjanmaan Liitto, teknisen toimen johtaja Markku Järvelä Vaasan kaupunki, projektipäällikkö Tuulia Taanila ja myöhemmin Mauritz Knuts Vaasan seudun kehitys Oy, tutkimusjohtaja Kristian Blomqvist ammattikorkeakoulu Novia, osastonjohtaja Martti Laaja Vaasan ammattikorkeakoulu. Hankkeen koordinaattorina on toiminut hankekoordinaattori Minna Reipas Vaasan ammattikorkeakoulu. Raportin taitosta on vastannut julkaisusihteeri Eva Sundell Vaasan ammattikorkeakoulu. Johtoryhmälle ja hankkeeseen osallistuneille esitän parhaimmat kiitokset.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
1 JOHDANTO	9
2 TAVOITTEET	11
3 MITTAUSJÄRJESTELMÄ	13
4 ENERGIAKULUTUS	17
4.1 U-arvo laskenta	17
4.2 Rakennusten energian kulutus	19
5 ULKOSEINÄN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMINTA	27
5.1 Teoreettisen tarkastelun lähtökohdat	27
5.2 Lämpötekkinen tarkastelu	29
5.2.1 Seinärakenteiden mitatut lämpötilat	30
5.2.2 Lasketut lämpötilajakaumat	33
5.3 Kosteustekkinen tarkastelu	37
5.3.1 Mitatut kosteuspitoisuudet	37
5.3.2 Lasketut kosteuspitoisuuden	40
5.4 Matalaenergiarakenteiden lämpö- ja kosteustekkinen tarkastelu	46
6 ILMANVAIHDON ENERGIAKULUTUS	53
7 PORAKAIVOJEN MITTAUSLÄMPÖTILAT	59
8 RAKENTAMISEN LAATU	63
9 LASKENTAMALLI	69
10 YHTEENVETO	73
LÄHTEET	75
LIITTEET	77





# 1 JOHDANTO

Vaasassa asuntomessualueen viereen Suvilahdessa Lakea Oy rakennuttaa neljä 8-kerroksista kerrostaloa, jotka ovat muodoltaan ja tilasuunnittelultaan sekä rakenteiltaan täysin samanlaiset. Kaksi ensimmäistä kerrostaloa ovat tämän hankkeen kohteita. Ensimmäinen kerrostalo valmistui 31.8.2010 ja toinen seuraavana syksynä 24.8.2011. Kummassakin kerrostaloissa on 51 huoneistoa. Rakennusten lämmöneristäminen on toteutettu siten, että ensimmäinen rakennus on toteutettu vuoden 2007 ohjeiden mukaisesti ja toinen vuoden 2010 ohjeiden mukaan.



**Kuvio 1.1** Teirinkatu 1A ja 1B

Kummankin rakennuksen lämmöntuotto toteutetaan maalämmöllä porakaivoista lämpöpumpuilla. Ensimmäisen rakennuksen lähialueella on yhteensä 14 200 m:n syvyistä porakaivoa ja toisen rakennuksen lähialueella sijaitsee yhteensä 10 samansyvyistä porakaivoa. Lisäksi kummankin rakennuksen katolla on 36.6 m<sup>2</sup>:n tyhjiöputkiaurinkokerääjät alkuperäisen suunnitelman mukaan kesäajan lämpimän käyttöveden tuottamiseksi. Kesäaikana aurinkokerääjien mahdollinen ylijäämlämpö varastoidaan porakaivojen kautta kalliopohjaan. Alkuperäinen suunnitelma ei kuitenkaan kohteissa toteutunut, vaan kerääjien kautta saatu lisäenergia on johdettu porakaivojen kautta kalliopohjaan ja myös kesäaikaan lämmin käyttövesi on tuotettu lämpöpumpun avulla.

Rakennusten energian kulutusta on seurattu rakennuksista sekä laskettu Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta Ohjeet 2012, D5:n mukaan. Toteutunutta kulutusta ja laskettua energian kulutusta sekä rakennusten kulutusta on verrattu keskenään. Tulosten perusteella on arvioitu kohteissa hyödynnetyn uusiutuvan energian kokonaismäärää. Ilmanvaihdon kautta kulunutta energiamäärää on arvioitu mittaamalla 2.-rakennuksen osan huoneistojen poistoilmamääriä decay-menetelmällä ja tulosten perusteella lasketun keskimääräisen poistoilmamäärän avulla.

Matalaenergiarakentamisessa on julkiseen keskusteluun noussut mahdolliset kosteus- ja homeongelmat. Matalaenergiarakentaminen edellyttää parempaa eristämisen tasoa sekä rakenteiden tiiveyttä. Tiivis rakentaminen taas toisaalta edellyttää suunnitteluvaiheessa pitkälle mietittyjä detaljiratkaisuja sekä viime kädessä työntekijöiltä rakentamisen aikana detaljien toteutuksessa suurta huolellisuutta, matalaenergiarakentaminen edellyttää korkeaa rakentamisen laatua. Hankkeen aikana on pidetty työntekijöille kummankin rakennuksen rakentamisen alussa koulutuspäivä, jossa on käsitelty hankkeelle asetetut energiatehokkuus tavoitteet sekä tiiviin rakentamisen merkitys. Rakentamisen aikana huoneistokohtaisten tiiveysmittausten ja lämpökuvausten avulla tarkistettiin mahdolliset ilmavuodot. Koko rakennuksen tiiveysmittaus tehtiin ennen asukkaiden sisään muuttoa.

Seinärakenteen sisästä monitoroitua lämpö- kosteusolosuhdetietoa ei ole olemassa ja sen vuoksi kumpaankin rakennukseen asennettiin rakennusaikana eristekerroksen sisä- ja ulkopintaan lämpö- ja kosteusanturit. Kumpaankin rakennukseen asennettiin jokaiseen neljään ilmansuuntaan 2.-, 4.- ja 8-kerrokseen ko anturit, yhteensä 2\*12 kpl/rakennus. Monitoroitujen tulosten perusteella mallinnettiin teoreettista tarkastelua varten rakennetyypit, jotka ratkaistiin Comsol Multiphysics-ohjelmistolla. Ko ohjelmistolla tarkastellaan myös matalaenergiarakenteiden toimintaa.

## 2 TAVOITTEET

Suvilahden kerrostalot ovat Suomessa ensimmäisiä rakennuksia, joissa lämmitys- ja käyttöveden energiantarve tuotetaan uusiutuvien energiamuotojen (maa- ja aurinkoenergia) avulla. Alueelle valmistuu kaikkiaan 4 samanlaista kerrostaloa, joista kaksi ensimmäistä ovat vuokrataloja ja kaksi viimeistä omistusasuntoja. Rakennuttajana on Lakea Oy sekä urakoitsijana PEAB Oy:n Pohjanmaa alueyksikkö. Kaksi ensimmäistä vuokrataloa ovat tämän hankkeen kohteita.

Rakennukset ovat tilasuunnittelultaan ja kantavilta rakenteiltaan täysin identtiset, ainut ero rakennuksissa on lämmöneristämisen taso. Ensimmäinen on toteutettu vuoden 2007 määräysten ja toinen vuoden 2010 määräysten mukaisesti.

Koska eristämisen taso on erilainen, asetettiin hankkeen yhdeksi lähtökohdaksi selvittää, mikä vaikutus eristämisen tasolla on rakennusten kokonaisenergian kulutukseen. Tavoitteena on myös selvittää kuinka suuri maasta ja auringosta saatavan energian osuus on rakennuksen ostoenergian tarpeesta ja mikä on rakennusten kokonaisenergian tarve. Lisäksi tavoitteeksi asetettiin selvittää, mikä osuus kokonaiskulutuksesta kuluu ilmanvaihdon kautta.

Lähtökohdaksi rakennusten suunnittelussa ja toteutuksessa asetettiin rakentamisen korkea laatu ja erityisenä tavoitteena päästä mahdollisimman tiiviiseen lopputulokseen. Kummassakin kohteessa rakentamisen alussa pidettiin työntekijöille koulutuspäivä, missä korostettiin hankkeelle asetettuja tavoitteita ja motivoitiin työntekijät laadukkaaseen ja tiiviiseen rakentamiseen.

Julkisessa keskustelussa on noussut matalaenergiarakentamisesta esille, mikä vaikutus eristepaksuudella on ulkoseinän lämpö- ja kosteusolosuhteisiin vaihtuvissa olosuhteissa eri vuoden aikoina. Samoin myös monitoroinnin avulla selvittää onko eri kerrosten välillä lämpötiloissa ja kosteuspitoisuudessa eroja. Tätä varten rakennusten ulkoseiniin eristeen sisä- ja ulkopintaan asetettiin 2.-, 4.- ja 8.-kerrokseen jokaiseen ilmansuuntaan lämpö- ja kosteusanturit monitorointia varten. Näiden tulosten ja teoreettisen laskennan avulla tavoitteena oli selvittää, onko olemassa riskiä eristerokoksen paksuuntuessa kosteuden tiivistymiseen rakenteeseen sekä tutkia erilaisia toimivia matalaenergiarakenteita.

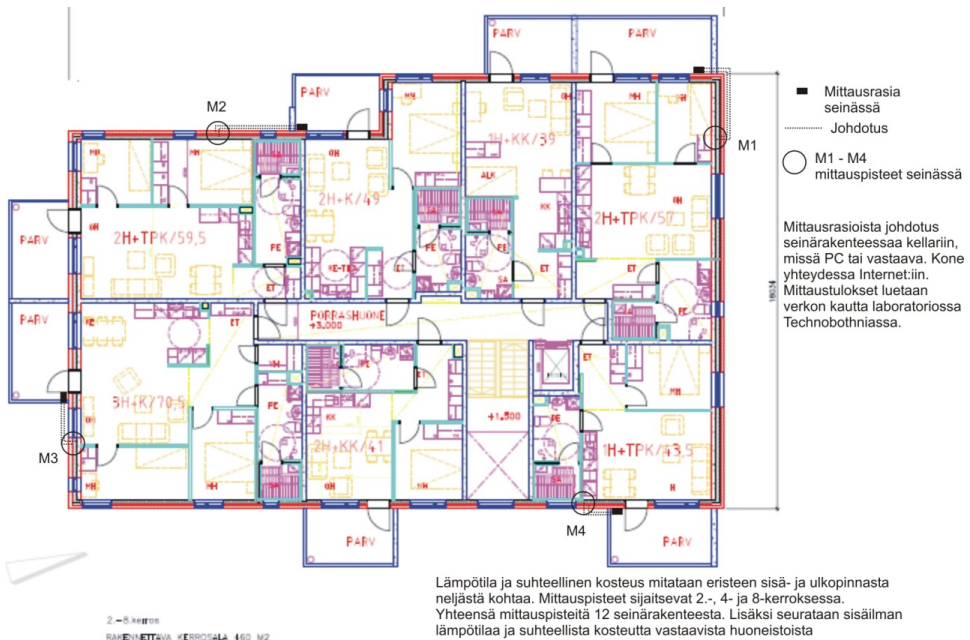
Hankkeen tavoitteena on myös kehittää yksinkertainen Excel-pohjainen laskentaohjelma, jonka avulla voidaan arvioida uusiutuvien energialähteiden tarve, rakennuksen oikea, optimaalinen eristämisen taso sekä vaadittava ilmanvaihdon lämmön-talteenoton hyötysuhde asetettujen rakennusten energiatehokkuusvaatimusten saavuttamiseksi.



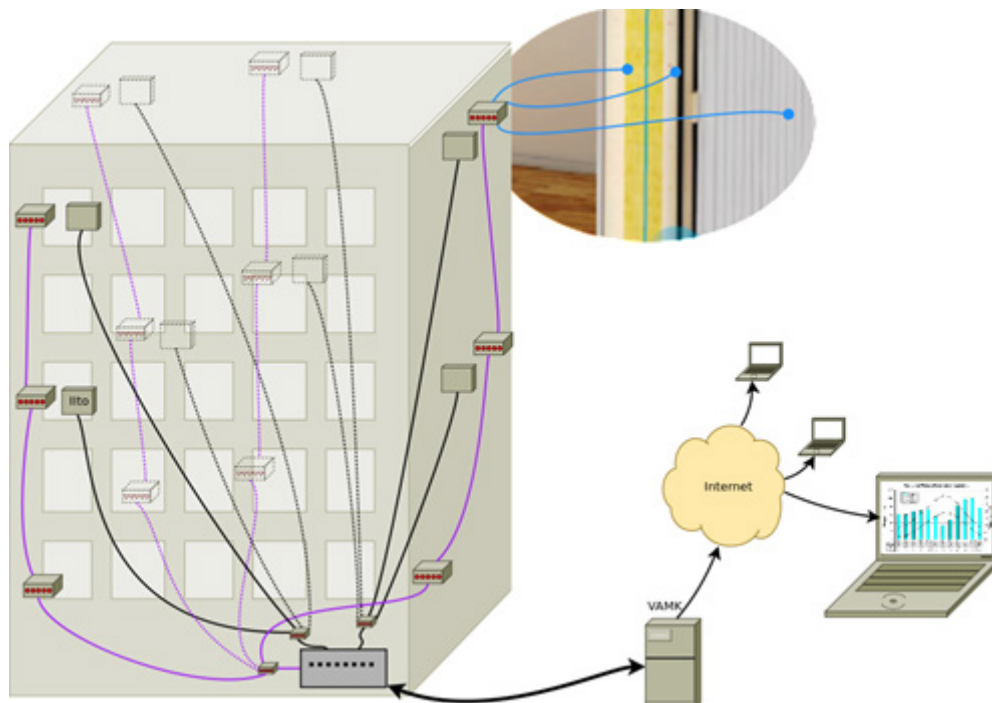
### 3 MITTAUSJÄRJESTELMÄ

Hankkeen aikana on kumpaankin rakennukseen rakennettu ulkoseinän lämpö- ja kosteuspitoisuuden seurantaan etäluettava mittausjärjestelmä. Mittauspisteistä tieto siirretään rakennusten I-kerroksessa sijaitsevaan sähköpääkeskuksesta olevaan tiedonkeruu-järjestelmään, mistä tulokset ovat reaaliaikaisesti luettavissa osoitteesta [www.puv.fi](http://www.puv.fi), matalaenergiaprojekti. Vaipparakenteen seurantapisteen sijaitsevat 2-, 4- ja 8-kerroksessa ja kussakin kerroksessa on neljä eri ilmansuunnissa olevaa mittauspistettä. Tällöin pystytään seuraamaan vaipan olosuhteiden vaihtelua sekä rakennuksen korkeussuunnissa että eri ilmansuunnissa. kts. kuvat 3.1 ja 3.2.

Rakennusten IV-koneiden kanavien lämpötilaseuranta varten koneiden valmistaja toimitti Modbus-modeemit, jotka liitettiin tiedonkeruu-järjestelmään. Järjestelmästä saadaan seurantadataa IV-koneiden kanavien lämpötiloista sekä millä nopeudella kulloinkin ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmamooottoreita käytetään. modbus - modeemit ovat sijoitetut 4- ja 8- kerroksen vaipan mittauspisteitä vastaavien huoneistojen IV-koneisiin.



**Kuvio 3.1** Lämpö- ja kosteusantureiden mittauspisteet 2-, 4- ja 8-kerroksessa



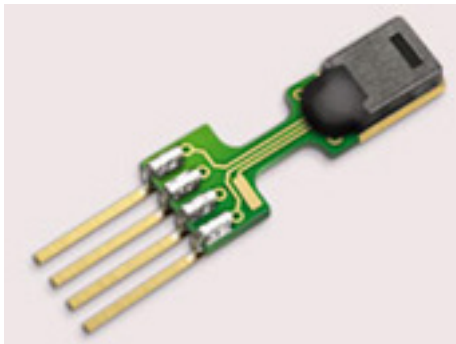
**Kuvio 3.2 Mittausjärjestelmän toimintaperiaate**

Jokaisessa mittauspisteessä on eristekerroksen sisä- ja ulkopuolella lämpö- ja kosteusanturit. Antureiden rakenne on suunniteltu Vaasan ammattikorkeakoulussa. Anturit ovat rakennetut suojaputkiin, jolloin ne ovat vaihdettavissa.



**Kuvio 3.3 Mittausanturin suojaputki**

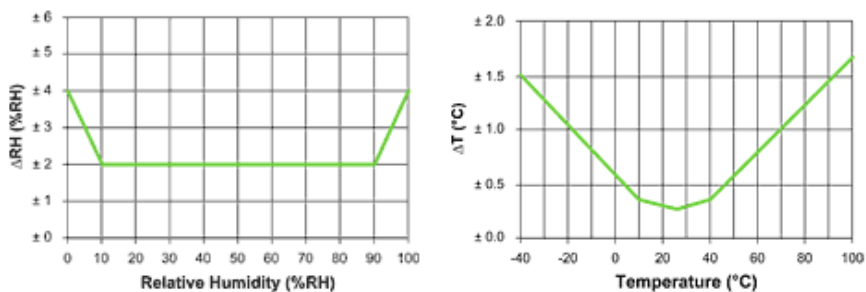
Anturielementteinä käytetään digitaalista Sensirion -lämpötila- ja kosteusanturia SHT-75.



**Kuvio 3.4 Anturielementin lämpötila- kosteusanturi**

Alla on esitettyä anturielementin ominaisuudet sekä kuvassa 3.5 anturielementin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan tarkkuusrajat eri mittausalueilla valmistajan antamien tietojen mukaan:

- Energiankulutus: 80uW ( 12bit, 3V, 1 mittaus / s)
- Suhteellisen kosteuden mitta-alue: 0 – 100% RH
- Lämpötilan mitta-alue: -40 – +125°C (-40 – +257°F)
- Suhteellisen kosteuden mittaussnopeus: 8 sec (tau63%)
- Anturilähtö: digitaalinen (2-wire interface)



**Kuvio 3.5 Anturielementin RH:n ja lämpötilan tarkkuusrajat eri alueilla**

Rakennuksen B kolmeen porakaivoon asennettiin kaivojen lämpötilaseurantaan varten 100 m:n ja 200m:n syvyyteen liuoksen kiertoputkien asennuksen yhteydessä PT100 lämpötila-anturit. Lämpötila-anturit liitettiin rakennuksen tiedonkeruujärjestelmään. 200 m:n syvyyteen tulevien antureiden johdon toimittaja joutui jatkamaan.

Jatkoskohta aiheuttaa lisävastuksen ja myös 20 bar'in paine muuttaa mittaustulosta, jolloin saatu lämpötila ei vastaa todellista, mutta näyttää kuitenkin sen, mitä muutoksia lämpötilassa tapahtuu talvi- kesäaikaan.



## 4 ENERGIAN KULUTUS

### 4.1 U-arvon laskenta

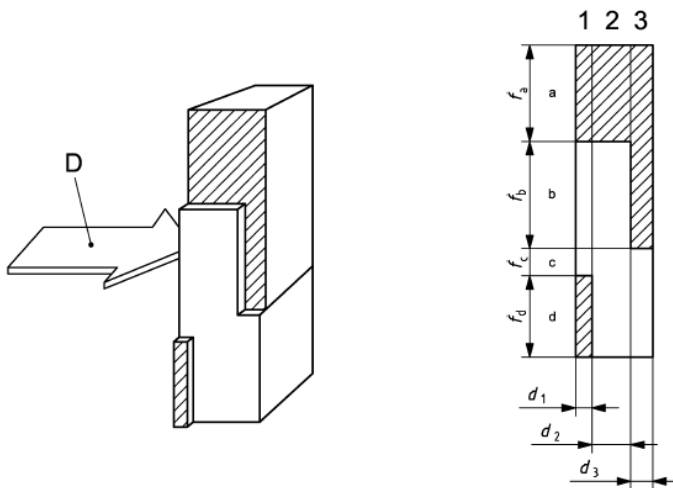
Tarkastellaan aluksi lyhyesti SFS EN 6946 standardin /18/ mukaista rakenteen U-arvon laskentaa. Standardin ohjeet poikkeavat Rakentamismääräyskokoelman C3:n laskentaperusteista. Standardin myötä suunnittelijakunta joutuu miettimään eristevalintoja ja olevia olosuhteita, jotka lisäksi vaikuttavat lopulliseen rakenteen laskettuun U-arvoon. Käytettyjen rakennetyyppien U-arvot on määritetyt ko standardiin perustuen. Ohjeen mukaan kokonaislämmönvastus  $R_T$  lasketaan yläliikiarvon ja alaliikiarvon keskiarvona

$$R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2}$$

Lämmönvastuksen yläliikiarvo  $R_T'$  saadaan lausekeesta

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}}$$

missä  $f_a, f_b, \dots, f_q$  ovat tarkasteltavan seinän erilaisten rakennekerrosten pinta-alaosuudet ja  $R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$  ovat tarkasteltavan seinän erilaisten rakennekerrosten lämmönvastukset. Rakenteen U-arvo on lämmönvastuksen  $R_T$  käänteisluku. Lisäksi U-arvoon tulee lisätekijöinä ilmarakojen, kiinnikkeiden ilmanläpäisevyyden, kylmäsiltojen korjaustekijät.



Lämmönvastuksen alalikiarvo  $R_T''$  lasketaan lausekkeesta

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}}$$

Jokaiselle epähomogeeniselle materiaalikerrokselle lasketaan ekvivalentti lämmönvastus  $R_j$ . Alalikiarvo on homogeenisten ja epähomogeenisten materiaalikerrosten summa

$$R_T'' = R_{si} + R_1 + R_2 + R_j + R_n + R_{se}$$

Vaihtoehtoisesti lämmönvastus voidaan laskea käyttäen epähomogeenisen kerroksen lämmönjohtavuutta  $\lambda''_j$ .

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda''_j}$$

$$\lambda''_j = \lambda_{aj} f_a + \lambda_{bj} f_b + \dots + \lambda_{qj} f_q$$

$f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_q$  ovat epähomogeenisen kerroksen materiaalien pinta-alaosuudet.

## 4.2 Rakennusten energian kulutus

Rakennusten energian kulutusta on hankkeen aikana seurattu sekä kulutuslukemia verrattu laskettuun kulutukseen. Rakennusten kokonaisenergian kulutuksen laskenta perustuu Ympäristöministeriön ohjeeseen D5, Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta, Ohjeet 2012.

**Taulukko 4.1 Rakennusten energiakulutus D5:n mukaan laskettuna**

<b>Rakennuksen energian kokonaiskulutus:</b>	<b>Teirinkatu 1A</b>	<b>525 950</b>	[kWh/a]
Rakennuksen energian kulutus lämmityspinta-alaa kohden	$Rak_{ek} =$	<b>263</b>	[kWh/m <sup>2</sup> ]
Tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve	$Q_{lämmitys, tilat} =$	88 084	[kWh/a]
- Lämpöpumpun osuus lämmityksen energiatarpeesta	$Q_{LP, lämmitys, tilat} =$	116 376	[kWh/a]
- Sähkövastusten energiakulutus lämmityksen energiatarpeesta	$Q_{lisälämmitys, tilat} =$	2 375	kWh/a
Ilmanvaihdon lämmityksen lämpöenergian tarve	$Q_{lämmitys, iv} =$	30 668	[kWh/a]
$Q_{lämmitys, tilat} + Q_{lämmitys, iv} =$		118 751	kWh/a
Lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve	$Q_{lämmitys, lkv} =$	145 969	[kWh/a]
- Lämpöpumpun osuus LKV:n energiatarpeesta	$Q_{LP, lämmitys, LKV} =$	143 049	[kWh/a]
- Sähkövastusten energiakulutus LKV:n energiatarpeesta	$Q_{lisälämmitys, LKV} =$	2 919	[kWh/a]
- Lämpöpumpun kattama osuus tilojen lämmityksen ja LKV:n energiatarpeesta	$Q_{LP}/Q_{lämmitys, tilat, LKV} =$	0,98	
Jäähdytysjärjestelmällä tuotettu vuotuinen jäähdytyenergia	$Q_{jk} =$		[kWh/a]
Aurinkokerääjien tuotto	$Q_{lämmitys, aurinko} = -$	5 710	[kWh/a]
Lämmönjakojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus	$W_{tilat} =$	8 975	[kWh/a]
Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus	$W_{ilmanvaihto} =$	4 389	[kWh/a]
Lämpimän käyttöveden kiertopumpun sähköenergian kulutus	$W_{lkv, pumppu} =$	1 752	[kWh/a]
Jäähdytysjärjestelmän apulaitteiden sähkönkulutus	$W_{jäähdytys, apu} =$		[kWh/a]
Asukkaiden kuluttajalaitteiden sähköenergian kulutus	$W_{kuluttajalaitteet} =$	116 841	[kWh/a]
Asukkaiden valaistuksen sähköenergian kulutus	$W_{valaistus} =$	17 033	[kWh/a]
Lämpöpumpun sähköenergian kulutus	$E_{lämpöpumppu, lämmitys} =$	97 461	[kWh/a]
Kiinteistökulutus, valaistus+laitteet (hissi, autopaikat jne)	$W_{kiinteistökulutus} =$	20 487	[kWh/a]
Rakennuksen lämmityspinta-ala	$A_{netto} =$	3 380	m <sup>2</sup>
$W_{verkkosähkö} = W_{ilmanvaihto} + W_{laitteet} + W_{valaistus} + W_{kiinteistosähkö} + Q_{lisälämmitys, tilat} + Q_{lisälämmitys, LKV}$			
	$W_{verkkosähkö} =$	174 772	[kWh/a]
<b>Ostoenergia <math>E_{osto} = W_{verkkosähkö} + E_{lämpöpumppu, lämmitys}</math></b>			
	$E_{osto} =$	272 233	[kWh/a]

Rakennuksen energian kokonaiskulutus:		Teirinkatu 1B	472 052	[kWh/a]
Rakennuksen energian kulutus lämmityspinta-alaa kohden		Rak <sub>ek</sub> =	222	[kWh/m <sup>2</sup> ]
Tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve		Q <sub>lämmitys, tilat</sub> =	45 194	[kWh/a]
- Lämpöpumpun osuus lämmityksen energiatarpeesta		Q <sub>LP, lämmitys, tilat</sub> =	75 862	[kWh/a]
- Sähkövastusten energiakulutus lämmityksen energiatarpeesta		Q <sub>isälämmitys, tilat</sub> =	-	kWh/a
Ilmanvaihdon lämmityksen lämpöenergian tarve		Q <sub>lämmitys, iv</sub> =	30 668	[kWh/a]
Q <sub>lämmitys, tilat</sub> + Q <sub>lämmitys, iv</sub> =			75 862	kWh/a
Lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve		Q <sub>lämmitys, lkv</sub> =	145 969	[kWh/a]
- Lämpöpumpun osuus LKV:n energiatarpeesta		Q <sub>LP, lämmitys, LKV</sub> =	145 969	[kWh/a]
- Sähkövastusten energiakulutus LKV:n energiatarpeesta		Q <sub>isälämmitysLKV</sub> =	-	[kWh/a]
- Lämpöpumpun kattama osuus tilojen lämmityksen ja LKV:n energiatarpeesta		Q <sub>LP</sub> /Q <sub>lämmitys, tilat, LKV</sub> =	1,00	
Jäähdytysjärjestelmällä tuotettu vuotuinen jäähdytysenergia		Q <sub>jk</sub> =		[kWh/a]
Aurinkokerääjien tuotto		Q <sub>lämmitys, aurinko</sub> =	- 5 710	[kWh/a]
Lämmönjakojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus		W <sub>tilat</sub> =	8 975	[kWh/a]
Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus		W <sub>ilmanvaihto</sub> =	4 389	[kWh/a]
Lämpimän käyttöveden kiertopumpun sähköenergian kulutus		W <sub>lkv, pumppu</sub> =	1 752	[kWh/a]
Jäähdytysjärjestelmän apulaitteiden sähkökulutus		W <sub>jäähdytys, apu</sub> =		[kWh/a]
Asukkaiden kuluttajalaitteiden sähköenergian kulutus		W <sub>kuluttajalaitteet</sub> =	116 841	[kWh/a]
Asukkaiden valaistuksen sähköenergian kulutus		W <sub>valaistus</sub> =	17 033	[kWh/a]
Lämpöpumpun sähköenergian kulutus		E <sub>lämpöpumppu, lämmitys</sub> =	86 453	[kWh/a]
Kiinteistökulutus, valaistus+laitteet (hissi, autopaikat jne)		W <sub>kiinteistökulutus</sub> =	20 487	[kWh/a]
Rakennuksen lämmityspinta-ala		A <sub>netto</sub> =	3 380	m <sup>2</sup>
W <sub>verkkosähkö</sub> = W <sub>ilmanvaihto</sub> + W <sub>laitteet</sub> + W <sub>valaistus</sub> + W <sub>kiinteistösähkö</sub> + Q <sub>isälämmitys, tilat</sub> + Q <sub>isälämmitys, LKV</sub>				
		W <sub>verkkosähkö</sub> =	169 477	[kWh/a]
Ostoenergia E <sub>osto</sub> = W <sub>verkkosähkö</sub> + E <sub>lämpöpumppu, lämmitys</sub>				
		E <sub>osto</sub> =	255 930	[kWh/a]

Taulukossa 4.1 on esitetty rakennusten D5 mukaan lasketut energian kulutuseritykset. Rakennuksen 1A laskennallinen energian kokonaiskulutus on 53.9 MWh suurempi ja ostoenergia 16.3 MWh suurempi kuin rakennuksen 1B. Laskennassa lämpöpumpun vuoden keskimääräisenä lämpökertoimena, SPF-lukuna on käytetty tilojen lämmitykselle 3.3 ja lämpimälle käyttövedelle 2.3. Lämpimän käyttöveden kulutuksena on laskennassa käytetty 72 litraa/hlö, mikä on ollut asukkaiden keskimääräinen kulutus ensimmäisen vuoden aikana rakennuksessa 1A.

Ilmanvaihdon osalta laskennassa ilmanvaihtuvuutena on käytetty 0.5 l/h sekä lämmön talteenoton hyötysuhteena 0.56. Tällöin ilmanvaihdon lämmityksen lämpöenergian tarve, IV-koneissa tapahtunut tuloilman lämmitysenergian tarve, on laskennallisesti 30.7 MWh ja, kun tähän lukuun huomioidaan tulo- ja korvausilman lämmitysenergia, tarve on 73,9 MWh. Laskennassa on mukana kaksi poistoilmakonetta, joiden ilmavirta on 30 l/s sekä vaunuhuoneessa oleva tulo-poistoilmakone. Ilmamäärä vastaa rakennuksessa 1B mitattuja keskimääräisiä poistoilmamääriä. Jäljempänä kappaleessa 6 rakennuksessa 1B mitattujen poistoilmamäärien avulla huoneistojen laskettu keskimääräinen ilmanvaihdon energiakulutus on 69.3 MWh.

Lämpöpumpun kattama osuus rakennuksen tilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energiatarpeesta on rakennuksessa 1A Q<sub>LP, lämmitys, tilat, LKV</sub> = 98 %, loppuosa energiatarpeesta tuotetaan suoralla sähköllä lämminvesivaraajissa olevilla vastuksilla.

Vastaavasti rakennuksessa 1B QLP, Lämmitys tilat, LKV = 100 % eli lämpöpumput tyydyttävät rakennuksen energiatarpeen. Rakennusten lämmöntuottojärjestelmät ovat samat, mutta paremman lämmöneristyksen vuoksi rakennuksen 1B tilojen mitoitusteho on pienempi ja sen vuoksi myös pumpun kattama osuus energiatarpeesta on suurempi.

Aurinkokerääjien energiantuotto on laskettu käyttäen vuosituottoarvona kerääjäneiliötä kohden 156 kWh/(m<sup>2</sup> a). Tämä D5:n arvio on jossain määrin varovainen. Todennäköisesti tuotto on suurempi, mutta kuinka paljon ei hankkeessa selvinnyt johtuen siitä, ettei kerääjien energiatuottoa saatu hyödynnettyä käyttöveden lämmitykseen.

Rakennuksissa toteutuneessa energian kulutuksessa voidaan seurata erikseen lämmitysjärjestelmän energian kulutusta, asukkaiden kulutusta, missä on mukana huoneistokohtaisten IV-koneiden kulutus, sekä päämittarilta rakennusten kokonaiskulutusta. Lämmitysjärjestelmän, missä on mukana maalämpöpumppu kierto-vesipumppuineen, mittaus on alamittauksena päämittarille. Asukkaiden kulutusta voidaan seurata suoraan kunkin huoneiston omalta kulutusmittarilta. Taulukossa 4.2 on ostoenergia-sarakkeessa esitettyä rakennusten toteutunut kokonaiskulutus ajanjaksolla 31.08.2012 – 26.08.2011. Lämpöpumppuja järjestelmissä on kaksi Nibe F1330-60 ja F1330-40. Jälkimmäinen 40 kW:n pumppu on ensimmäiselle nk. ”slave”, mikä on käytössä silloin kun 60 kW:n pumppu ei riitä lämmitysjärjestelmän ja lämpimän käyttöveden tuottoon.

**Taulukko 4.2 Rakennusten toteutunut energiakulutus**

	<b>Toteutunut energiakulutus jaksolla 31.08.2012 - 26.08.2011 [kWh], suluissa D5:n mukaan laskettu kulutus</b>	<b>Toteutunut energiakulutus jaksolla 31.08.2012 - 26.08.2011 [kWh], suluissa D5:n mukaan laskettu kulutus</b>
	<b>Teirinkatu 1 A</b>	<b>Teirinkatu 1 B</b>
Asukasmäärä	82	82
Lämmityspinta-ala [m <sup>2</sup> ]	3380	3380
Lämmitysjärjestelmä:	$W_{\text{lämmitys}} + W_{\text{lämmitys, LKV}} + Q_{\text{lisäläm, tilat}} + Q_{\text{lisäläm, LKV}} +$ apulaitteiden kulutus+LKV:n kierto : [kWh]	$W_{\text{lämmitys}} + W_{\text{lämmitys, LKV}} + Q_{\text{lisäläm, tilat}} + Q_{\text{lisäläm, LKV}} +$ apulaitteiden kulutus+LKV:n kierto : [kWh]
	<b>145280 (138890)</b>	<b>150120 (99287)</b>
Asukkaiden kulutus, Huoneistokohtaiset IV-koneet, laitteet, valaistus: [kWh]	<b>104130 (133874)</b>	<b>120597 (133874)</b>
$W_{\text{kiinteistö sähkö}} =$	<b>23640</b>	<b>23640</b>
<b>Ostoenergia <math>E_{\text{osto}} =</math></b>	<b>273050 (272233)</b>	<b>294357 (255930)</b>
$E_{\text{osto}} / (\text{Lämmityspinta-ala vuosi})$	<b>81 kWh / (m<sup>2</sup> a)</b>	<b>87 kWh / (m<sup>2</sup> a)</b>
Rakennuksen maksimi tehotarve $\Phi_{\text{lämmmax}} =$	<b>116 kW</b>	<b>96 kW</b>
Pumpun nimellisteho $\Phi_{\text{lpn}} =$	<b>60 kW + 40 kW</b>	<b>60 kW + 40 kW</b>

Toteutunut energian kulutus on ollut rakennuksessa 1B 21 MWh suurempi kuin rakennuksessa 1A. Kirjattuja syitä suurempaan kulutukseen oli, että seurantajaksolla loppuvuodesta 2011 1B:n järjestelmässä oli jouduttu käyttämään lyhytaikaisesti sähkövastuksia lämpöpumpun korttivan vuoksi sekä lisäksi lattialämmityksen lähtölämpötila on ollut seurantajaksolla 1 asteen korkeampi. Myös asukkaiden kulutus on 16 MWh suurempi kuin rakennuksessa 1A.

D5:n mukaiseksi laskennalliseksi kulutukseksi summaamalla lämpöpumpun energiakulutus, tilojen lisä- ja lämpimän käyttöveden lisälämmitysenergia sekä lämmityslaitteiden apulaitteiden ja kiertopumpun kulutus saadaan rakennukselle 1A 139 MWh. Vastaavasti rakennuksen 1B laskettu kulutus on 99 MWh.

Rakennuksen 1A uusiutuvan energian osuus E-luvun laskennassa rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen energian nettotarpeesta on 246 % sekä rakennuksen 1B 321 %. Jälkimmäisen rakennuksen suurempi uusiutuvan energian osuus johtuu rakennuksen 1B paremmasta eristystasosta. Uusiutuvan energian laskennallinen suuruus rakennuksessa 1A on 265.1 MWh ja vastaavasti 1B 227.5 MWh, kts. Taulukko 4.6, missä on esitettyä rakennusten E-luku erittely. Koska rakennusten lämpimän käyttöveden energian tarpeet ovat samat, ei ero uusiutuvan energian tuotossa ole suuri vaikka eristämisen taso rakennuksessa 1B on parempi. Tämä näkyy alla olevasta taulukosta 4.3, missä on esitettyä rakennusten tilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energian tarpeet sekä lämpöpumpun tilojen ja LKV:n tuotto QLP.

**Taulukko 4.3 Tilojen ja lämpimän käyttöveden laskennallinen, D5:n mukainen energian tarve sekä lämpöpumpun energian tuotto QLP**

	$Q_{\text{lämmitys, tilat}}$ [kWh]	$Q_{\text{lämmitys, LKV}}$ [kWh]	$Q_{\text{LP, Lämmitys, tilat}}$ [kWh]	$Q_{\text{LP, Lämmitys LKV}}$ [kWh]
Rakennus 1A	118751	145969	116376	143049
Rakennus 1B	75862	145969	75862	145969

Maalämpöjärjestelmässä uusiutuvalla energialla kompensoidaan rakennuksen tilojen ja lämpimän käyttöveden energian kulutusta. Rakennuksessa 1B ostoenergian ja uusiutuvan energian erotus on 28.4 MWh. Ostoenergian suurimpana tekijänä on kuluttajalaitteiden sähköenergian kulutus 117 MWh. Jos kuluttajien energiakulutus pienenee 20 %, on ko rakennuksessa uusiutuvan energian suuruus yhtä suuri kuin tarvittava ostoenergiämäärä.

Taulukossa 4.4 on esitettyä rakennusten lämmöntarveluvulla korjatut toteutuneet kulutuslukemat vuositasona. Ostoenergian lukemassa on mukana lämmitysjärjestelmä, asukkaiden kulutus sekä kiinteistösähkö. Kiinteistösähkön suuruus on rakennuksissa vaihdellut vuosittain 20 – 25 MWh. Lämmitysjärjestelmän kulutuslukemassa on mukana lämmin käyttövesi sekä tilojen lämmitys, joille ei ole erikseen mittausta. Tilojen lämmityksen osuudeksi lämmitysjärjestelmän kulutuksesta kulutuslaskennan perusteella on valittu rakennuksessa 1A 40 % ja rakennuksessa

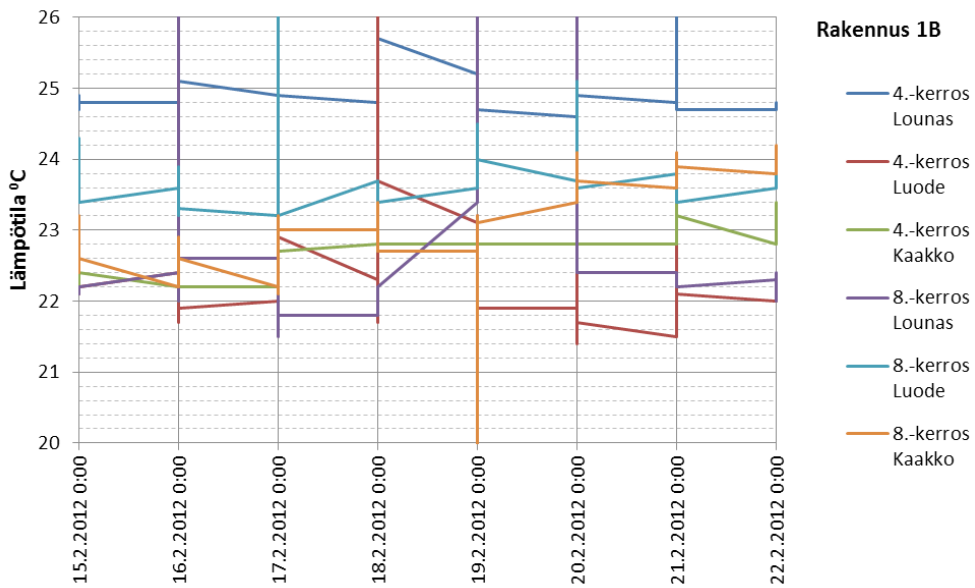
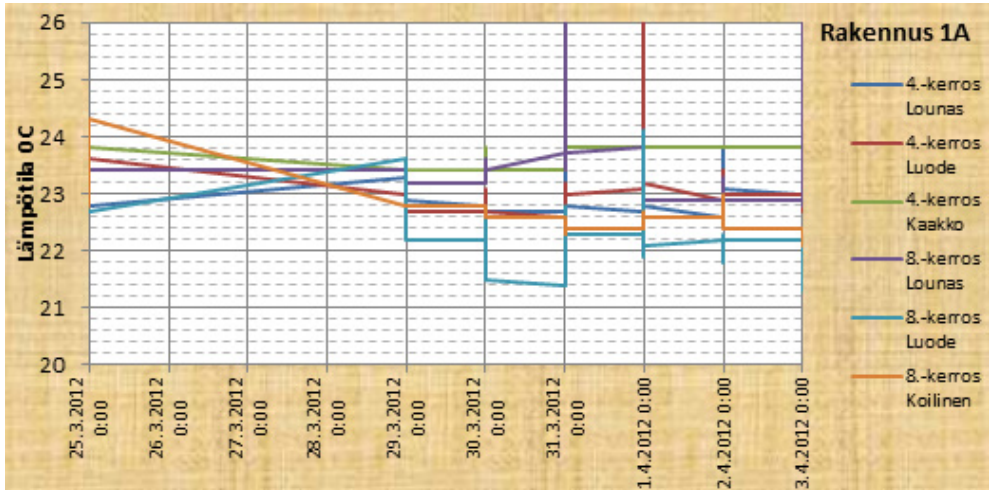
1B 30 % ja tämä osuus on korjattu tarkastelujaksojen lämmitystarveluvuilla vertailtavuuden mahdollistamiseksi.

**Taulukko 4.4 Rakennuksen 1A ja 1B kulutuslukemat vuositasoilla lämmitystarveluvulla korjattuna**

		Lämmitysjärjestelmä [kWh]	Asukkaiden kulutus [kWh]	E <sub>osto</sub> [kWh]	Lämmitystarveluvulla korjattu E <sub>Osto</sub> [kWh]
Rakennus 1A	26.08.2011 - 30.08.2010	178619	103789	306048	303640
	31.08.2012 - 26.08.2011	145280	104130	273050	283442
	06.06.2013 - 19.06.2012	176999	101023	296840	300185
	31.08.2012 - 26.08.2011	150120	120597	294357	302411
Rakennus 1B	06.06.2013 - 20.06.2012	146368	114966	291761	293836

Vaikka rakennuksen 1B eristystaso on parempi, vuoden 2010 vaatimusten mukainen, kuin rakennuksen 1A, tämä ei näy ostoenergian määrissä. Rakennuksen 1B ostoenergian määrä on ensimmäisen käyttöönottovuoden aikana ollut suurempi kuin vastaavana aikana rakennuksessa 1A.

Rakennusten kokonaisenergian kulutukseen vaikuttaa myös asukkaiden kulutustavat ja tottumukset. Kuvassa 4.1 on esitettyä rakennusten kuuden huoneiston IV-koneelta mitatut poistoilman lämpötilat. IV-koneisiin liitettyjä modbus-modeemeja oli kaikkiaan 8 kpl/rakennus. Modeemit ovat kohteissa ensi käytössä (nk. kehitysversioita) ja siksi osa modeemeista eivät toimineet. Suuria eroja huonelämpötiloissa ei ole. Mittausjaksoilta laskettu keskimääräinen lämpötila rakennuksessa 1B on 0.6 °C korkeampi kuin rakennuksen 1A. Kuten aikaisemmin on todettu, sivu 22, rakennuksessa 1B lattialämmityksen lähtölämpötila on säädetty asteen korkeammaksi kuin rakennuksessa 1A.



**Kuvio 4.1 Rakennusten IV-koneista mitatut poistoilman lämpötilat**

Alla taulukossa 4.5 on rakennusten vedenkulutus vuositasolla. Rakennuksessa 1A ensimmäisen vuoden aikana 2011 on seurattu erikseen lämpimän ja kylmän käyttöveden kulutusta. Lämpimän käyttöveden osuus kokonaiskulutuksesta oli 50.2 %. Vuoden 2012 osalta on seurattu kokonaiskulutusta ja taulukossa lämmin- ja kylmä käyttövesi on jaettu samassa 50.2 %:n suhteessa. Rakennuksen 1B lämpimän käyttöveden kulutus vuonna 2012 oli 221 m<sup>3</sup> suurempi kuin rakennuksessa 1A. Tällöin lämpimän käyttöveden erotusta vastaava energian kulutus on 13.1 MWh.



**Taulukko 4.5 Rakennuksen 1A ja 1B vedenkulutus vuositasoilla**

	Vuosi	Lämmin käyttövesi [m <sup>3</sup> ]	LKV:n energian tarve [kWh]	Kokonaisve- den kulutus [m <sup>3</sup> ]	Lämpimän käyttöveden osuus kokonaiskulutuksest a
Rakennus 1A	2011	2142	125700	4268	0,502
	2012	1930	112600	3846	
Rakennus 1B	2012	2151	125700	4286	

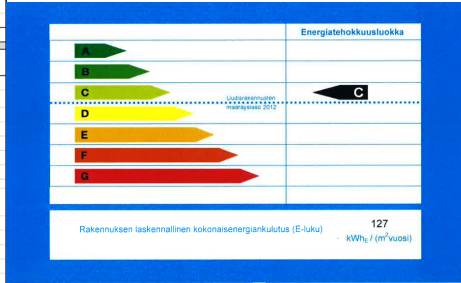
Asukkaiden kulutustottumuksilla on huomattava vaikutus energian kulutukseen. Tällä lämmöntuottojärjestelmällä lämpimän käyttöveden osuus rakennusten kokonaisostoenergiasta vuonna 2012 oli rakennuksessa 1A 41 % sekä rakennuksessa 1B 43 %. Asukkaiden kulutus mukaan lukien lämmin käyttövesi oli rakennuksessa 1B yhteensä 29.6 MWh suurempi kuin rakennuksessa 1A. Vuonna 2012 asukkaiden kulutus mukaan lukien lämmin käyttövesi rakennuksessa 1A oli 79 % rakennuksen ostoenergiamäärästä sekä rakennuksessa 1B 84 %.

Rakennusten kokonaisenergian kulutus on kaikkien osatekijöiden summa, missä ovat mukana tilojen lämmitysenergian tarve, ilmanvaihdon energian tarve, lämpimän käyttöveden energiatarve sekä asukkaiden kulutus ja käyttötottumukset. Tilojen lämmitysenergian tarpeeseen vaikuttaa lämmönjohtuminen seinä-, ylä- ja alapohjarakenteiden läpi, rakenteiden tiiveys ja tilassa tapahtuva tulo- ja korvausilman lämpeneminen. Rakentamisen aikana on kiinnitetty erityistä huomiota rakentamisen laatuun, huolelliseen eristämiseen ja rakenteiden tiiveyteen. Tilojen lämmitysenergian laskennallinen tarve rakennuksessa 1A on 88.1 MWh (26.1 kWh/m<sup>2</sup>/vuosi) ja rakennuksessa 1B vastaavasti 45.2 MWh (13.4 kWh/m<sup>2</sup>/vuosi) (kts. Taulukko 4.6 alla), jolloin erotus on 42.9 MWh. Rakennuksen 1B paremmalla eristämisen tasolla saavutettu säästö on lähestulkoon kulunut asukkaiden käyttö- ja kulutustottumuksissa.

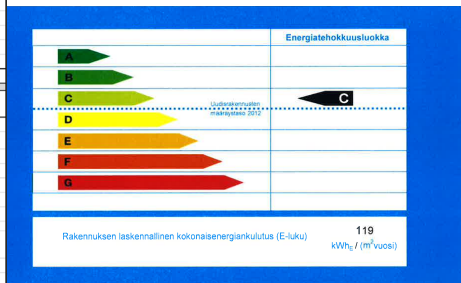
Kummankin rakennuksen energiatehokkuus on luokassa C. Luokan C rajat asteikolla ovat 101 kWh/(m<sup>2</sup> a) – 130 kWh/(m<sup>2</sup> a). Rakennuksen 1A energialuku, E-luku on 127 kWh/(m<sup>2</sup> vuosi) ja rakennuksen 1B 118 kWh/(m<sup>2</sup> vuosi).

## Taulukko 4.6 Rakennusten E-luvun D3:n mukainen tulostussivu kulutuserittelyineen sekä energiatehokkuusluvut

<b>Rakennuksen käyttötarkoitus</b>	Asuinkerstalo			
<b>Osoite</b>	Teininkatu 1A			
<b>Rakennusvuosi</b>	2010			
<b>Lämmitetty nettoala [m<sup>2</sup>]</b>	3380			
<b>Energialuku (E-Luku)</b>	<b>127</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup> a)</b>	<b>(kWh lämmitettyä nettopinta-ala kohti)</b>	
Uusiutuvan omavaraisen energian tai uusiutuvilla polttoaineilla tuotetun energian määrä rakennuksen tilojen- ja ilmanvaihdon lämmityksen energian nettotarpeesta	246	%		
<b>Energialuvun erittely</b>	<b>Netto-ostoenergia [kWh/a]</b>	<b>Painokerroin</b>	<b>Painotettu energiakulutus [kWh/a]</b>	<b>Painotettu energiakulutus [kWh/(a m<sup>2</sup>)]</b>
Sähkö	272 233	1,7	462 795	137
Kaukolämpö		0,7		
Kaukojäähdytys		0,4		
Polttoaine 1				
Polttoaine 2				
<b>Yhteensä</b>	<b>272 233</b>	<b>-</b>	<b>462 795</b>	<b>137</b>
<b>Paikalla tuotettu uusiutuva energia, Uusiutuva omavarainen energia</b>	<b>kWh/a</b>	<b>kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Aurinkosähkö				
Aurinkolämpö	5 710	2		
Tuulisähkö				
Lämpöpumpun lämmönlähteestä otama energia	259 426	77		
<b>Uusiutuvat polttoaineet:</b>	<b>265 135</b>	<b>78</b>		
Polttoaine 1				
Polttoaine 2				
<b>Rakennuksen teknisten järjestelmien energian kulutus</b>	<b>Sähkö kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>	<b>Lämpö kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Lämmitysjärjestelmä				
Tilojen lämmitys	26			
Tuloilman lämmitys	13			
Lämpimän käyttöveden valmistus	43			
Ilmanvaihtojärjestelmä <sup>3</sup>	9			
Jäähdytysjärjestelmä				
Laitteet ja valaistus	40			
<b>Yhteensä</b>	<b>131</b>	<b>-</b>		
<sup>3</sup> Ilmanvaihdon tulo- ja korvausilman lämmitys kuuluu lämmitysjärjestelmään				
<b>Energian nettotarve</b>	<b>kWh/a</b>	<b>kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Tilojen lämmitys <sup>4</sup>	217 631	64		
Ilmanvaihdon lämmitys <sup>5</sup>	30 668	9		
Lämpimän käyttöveden valmistus	145 969	43		
Jäähdytys				
<sup>4</sup> sisältää vuotilman, korvausilman ja tuloilman lämpenemisen tilassa				
<sup>5</sup> laskettu lämmönlähteenon kanssa				
<b>Lämpökuormat</b>	<b>kWh/a</b>	<b>kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Aurinko	19 013	6		
Ihmiset	12 495	4		
Valaistus + Laitteet	133 874	40		
Lämpimän käyttöveden kiertä ja varastointi	7 311	2		
<b>Lämpökuormat yhteensä:</b>	<b>172 694</b>	<b>51</b>		



<b>Rakennuksen käyttötarkoitus</b>	Asuinkerstalo			
<b>Osoite</b>	Teininkatu 1B			
<b>Rakennusvuosi</b>	2011			
<b>Lämmitetty nettoala [m<sup>2</sup>]</b>	3380			
<b>Energialuku (E-Luku)</b>	<b>118</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup> a)</b>	<b>(kWh lämmitettyä nettopinta-ala kohti)</b>	
Uusiutuvan omavaraisen energian tai uusiutuvilla polttoaineilla tuotetun energian määrä rakennuksen tilojen- ja ilmanvaihdon lämmityksen energian nettotarpeesta	321	%		
<b>Energialuvun erittely</b>	<b>Netto-ostoenergia [kWh/a]</b>	<b>Painokerroin</b>	<b>Painotettu energiakulutus [kWh/a]</b>	<b>Painotettu energiakulutus [kWh/(a m<sup>2</sup>)]</b>
Sähkö	255 930	1,7	435 081	129
Kaukolämpö		0,7		
Kaukojäähdytys		0,4		
Polttoaine 1				
Polttoaine 2				
<b>Yhteensä</b>	<b>255 930</b>	<b>-</b>	<b>435 081</b>	<b>129</b>
<b>Paikalla tuotettu uusiutuva energia, Uusiutuva omavarainen energia</b>	<b>kWh/a</b>	<b>kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Aurinkosähkö				
Aurinkolämpö	5 710	2		
Tuulisähkö				
Lämpöpumpun lämmönlähteestä otama energia	221 830	66		
<b>Uusiutuvat polttoaineet:</b>	<b>227 540</b>	<b>67</b>		
Polttoaine 1				
Polttoaine 2				
<b>Rakennuksen teknisten järjestelmien energian kulutus</b>	<b>Sähkö kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>	<b>Lämpö kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Lämmitysjärjestelmä				
Tilojen lämmitys	13			
Tuloilman lämmitys	13			
Lämpimän käyttöveden valmistus	43			
Ilmanvaihtojärjestelmä <sup>3</sup>	9			
Jäähdytysjärjestelmä				
Laitteet ja valaistus	40			
<b>Yhteensä</b>	<b>118</b>	<b>-</b>		
<sup>3</sup> Ilmanvaihdon tulo- ja korvausilman lämmitys kuuluu lämmitysjärjestelmään				
<b>Energian nettotarve</b>	<b>kWh/a</b>	<b>kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Tilojen lämmitys <sup>4</sup>	171 794	51		
Ilmanvaihdon lämmitys <sup>5</sup>	73 915	22		
Lämpimän käyttöveden valmistus	125 706	37		
Jäähdytys				
<sup>4</sup> sisältää vuotilman, korvausilman ja tuloilman lämpenemisen tilassa				
<sup>5</sup> laskettu lämmönlähteenon kanssa				
<b>Lämpökuormat</b>	<b>kWh/a</b>	<b>kWh/(a m<sup>2</sup>)</b>		
Aurinko	19 013	6		
Ihmiset	12 495	4		
Valaistus + Laitteet	133 874	40		
Lämpimän käyttöveden kiertä ja varastointi	7 311	2		
<b>Lämpökuormat yhteensä:</b>	<b>172 694</b>	<b>51</b>		



## 5 ULKOSEINÄN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMINTA

### 5.1 Teoreettisen tarkastelun lähtökohdat

Ulkoseinän lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa teoreettisesti on tarkasteltu Comsol Multiphysics-ohjelmistolla. Ohjelma perustuu FEM-laskentaan (Finite Element Method), missä fysikaalisen ilmiön matemaattinen malli, osittaisdifferentiaaliyhtälö, ratkaistaan numeerisesti. Laskennassa on yhdistettynä lämmön-, vesi-höyryn- ja kosteudensiirtymisen laskentamoduulit. Laskennan alkutilana on ohjelmalle syötetty rakenteen alkulämpötila ja -vesihöyrypitoisuus, josta laskenta konvergoi ajan funktiona lämmön-, vesihöyryn- ja kosteuden tasaantumisen seinärakenteessa annettuihin reunaehtoihin. Reunaehtoina laskentaan annetaan sisäilman ja ulkoilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus, RH.

Laskennassa on yhdistettynä Comsol-Multiphysics-ohjelmiston laskentamoduulit, Heat Transfer in Solids, Transport of Diluted Species ja Solute Transport.

Lämmönsiirtyminen rakenteessa johtumalla laskennassa kuvataan Fourier'in lausekkeella

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T)$$

missä  $\rho$  on materiaalin tiheys,  $C_p$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti ja  $\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus. Konvektion osuutta laskennassa ei ole otettu mukaan.

Vesihöyryn ja kosteuden siirtyminen tapahtuu diffuusiota mallintavien reaktiolausekkeiden mukaisesti (Fick's Law).

$$\mathbf{g} = -\frac{D}{\mu} \frac{\partial v}{\partial x} = -\delta_{\text{mat}} \frac{\partial v}{\partial x}$$

Huokoisen materiaalin vesihöyrynläpäisevyys  $\delta_{\text{mat}}$  voidaan mallintaa ilman vesihöyrynläpäisevyyskerroin  $D$  ja diffuusiovastuskertoimen  $\mu$  avulla

$$\delta_{\text{mat}} = \frac{D}{\mu}$$

$D$  on vesihöyryn diffuusiokerroin ilmassa normaali ilmanpaineessa, Ilmalle vesihöyryn vastuskerroin  $\mu = 1$ . Ilman vesihöyrynläpäisevyys voidaan laskea kaavalla (Künzel)

$$\delta_{v,ilma} = D = 2.0e^{-7} * \frac{T^{0.81}}{p_{ymp}} * \frac{R T}{M_w}, \text{missä}$$

T on lämpötila [K]

$p_{ymp}$  on ilmanpaine [Pa]

R on yleinen kaasuvakio [8.3143 J/(mol K)]

$M_w$  on vesihöyryn molekyylipaino [18.016 g/mol]

Normaali ilmanpaineessa ja 20 °C lämpötilassa  $\delta_{v,ilma} = 26.6 * 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s].

Vesihöyryn läpäisevyydelle  $\delta_p$  ja  $\delta_v$  sekä diffuusiovastuskertoimelle  $\mu$  on mallintamisessa käytetty seuraavia arvoja:

	$\delta_p$ [*10 <sup>-12</sup> kg/(m s Pa)]	$\delta_v$ [*10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	$\mu$
Betoni	2	0.2706	100
Puu	3	0.407	65
Mineraalivilla	100	13.53	2.0
Cyproc	30	4.059	7
Uretaani	0.1	0.01353	320

Laskentamallissa on materiaalin sorptiokäyrän,  $Mat\_W(RH)$ :n avulla määritetty suhteellisen kosteuden funktiona materiaalien kosteuspitoisuus sekä materiaalin kosteuspitoisuuden funktiona tiivistyvä kosteusmäärä, mitä verrataan edelliseen laskentakierrokseen.

$$R_{haih} = - R [Mat\_W(RH) - c2] \quad \text{ja}$$

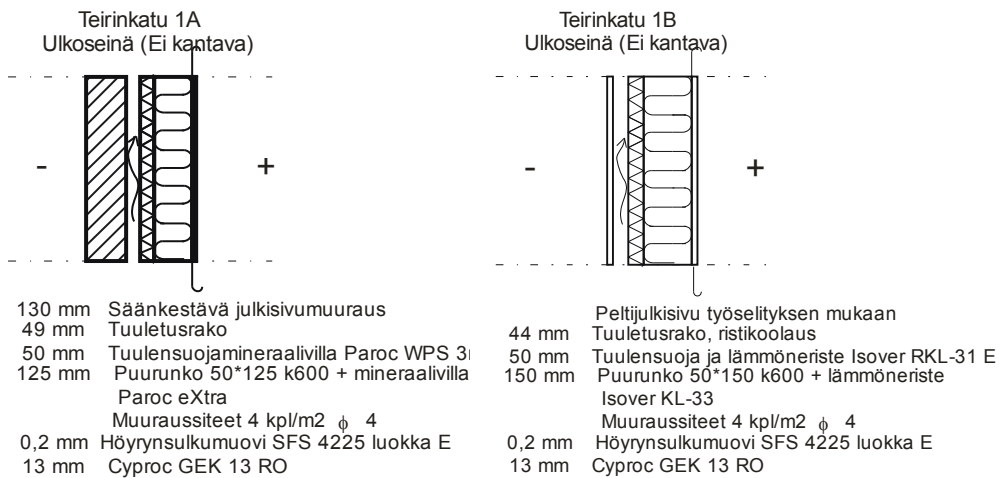
$$R_{tiiv} = R [MatW\_ (RH) - c2],$$

missä R on kokeellisesti määritetty reaktiovakio,  $R = 10^{-3} 1/^\circ C$ , ja c2 on laskenta-kierroksella saatu kosteuspitoisuus. Haihtumista tapahtuu silloin, kun mallin las-kema kosteuspitoisuus  $c2 >$  materiaalin sorptiokäyrän kosteuspitoisuus  $Mat\_W(RH)$  ja tiivistymistä tapahtuu, jos  $c2 < Mat\_W(RH)$ . Jokaisen laskentakierroksen jälkeen ohjelma laskee mahdollisen vesihöyryn kosteudeksi tiivistyvän pitoisuuden.

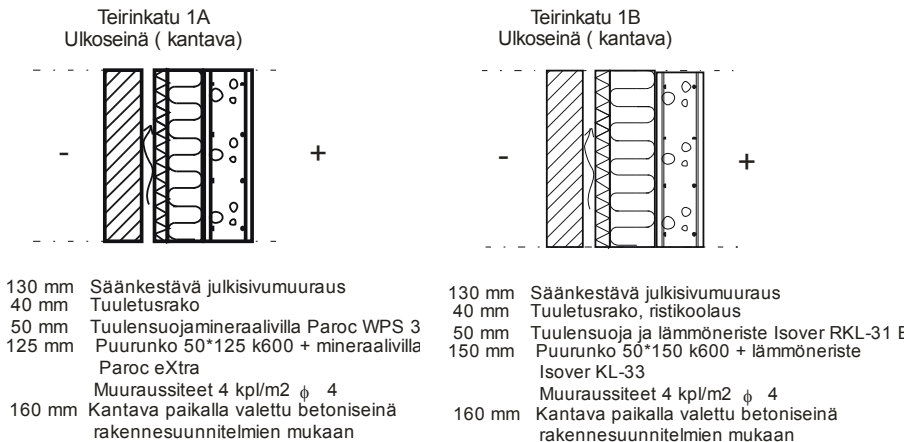
Lämmönvirtaus rakenteeseen, sisäpinnassa, ja rakenteesta pois, ulkopinnasta, mallissa huomioituu kertomalla pintojen lämmönläpäisykertoimet pintojen ja ympäröivän ilman lämpötilaerolla jokaisessa laskentakierroksessa. Vastaavasti vesihöyryvirtaus rakenteeseen ja rakenteesta pois määräytyy (tasapainottuu) rakenteen pinnan ja ympäröivän ilman vesihöyrypitoisuuden erotuksena.

## 5.2 Lämpötekkinen tarkastelu

Seuraavassa tarkastellaan lämpötilojen jakaantumista seinässä mittaus- ja laskentatulosten valossa. Kummankin rakennuksen Teirinkatu 1A ja 1B ulkoseinien rakennetyypit ovat tuuletettuja seinärakenteita. Julkisivuverhous on eri, rakennuksen 1B julkisivuverhouksena on peltiprofiili kun taas 1A:n verhouksena on tiilimuuraus. Rakennuksen 1B eristepaksuus on 200 mm ja rakennuksen 1A 175 mm. Rakennuksen 1B lämmöneristeinä on käytetty eristettä, jonka lämmönjohtavuus  $\lambda$  on pienempi ja tällä on saatu seinän U-arvo täyttämään vuoden 2010 vaatimukset. Alla kuvissa 5.2.1 ja 5.2.2 on esitettyä rakennusten ei-kantavat ja kantavat rakennetyypit.



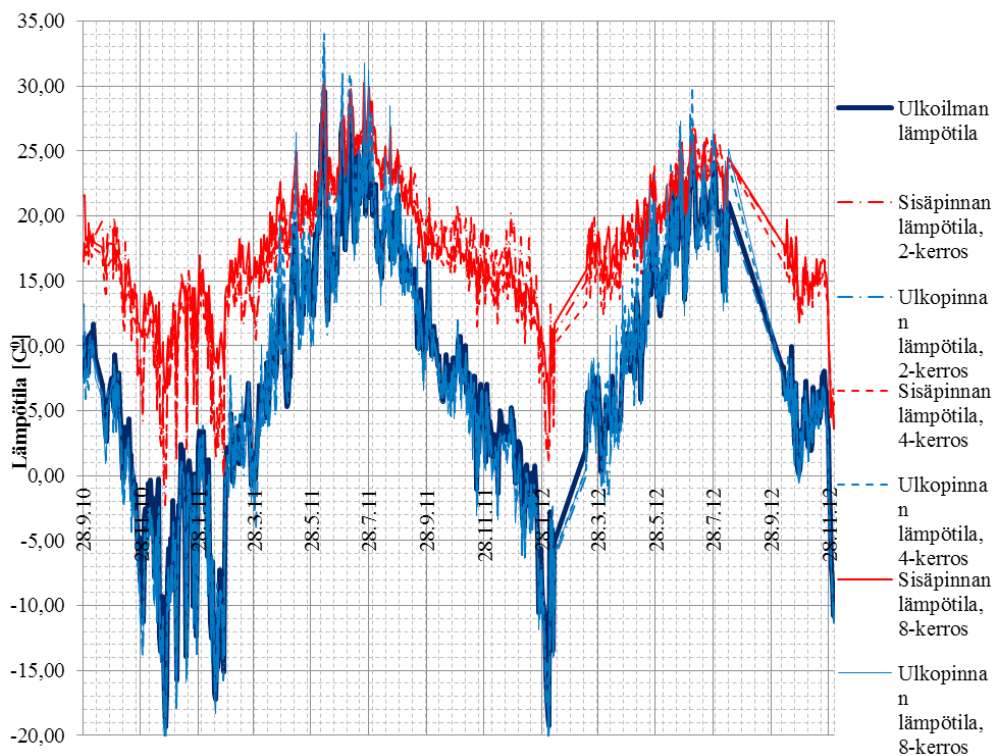
**Kuvio 5.2.1 Rakennusten ulkoseinien ei-kantavat rakennetyypit**



**Kuvio 5.2.2 Rakennusten ulkoseinien kantavat rakennetyypit**

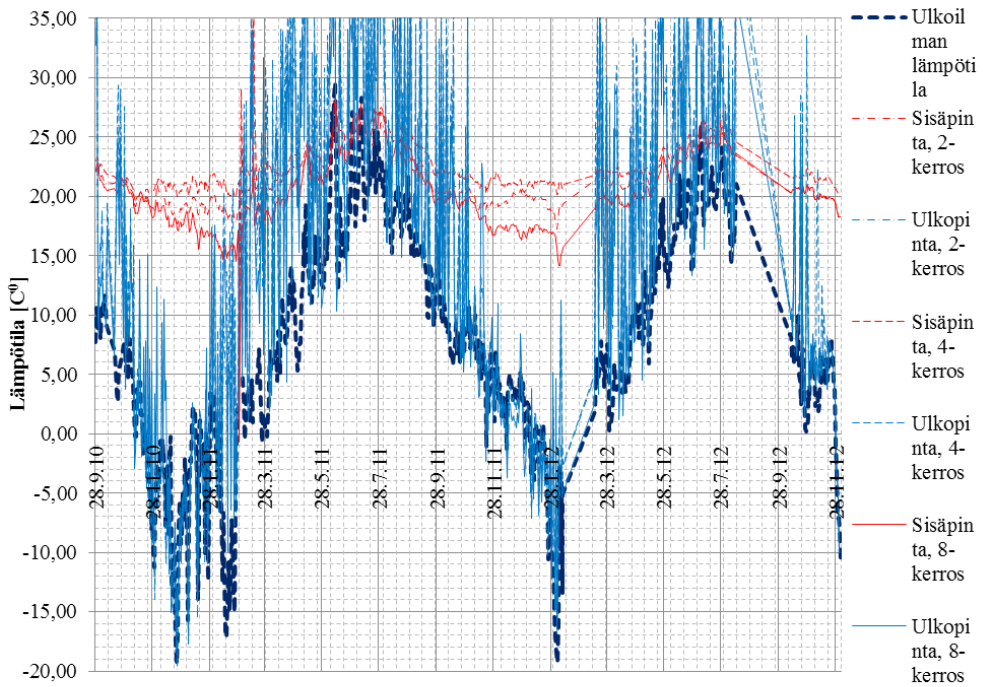
### 5.2.1 Seinärakenteiden mitatut lämpötilat

Mittaus tulosten perusteella voidaan todeta, että tuuletustilalla varustetulla seinärakenteessa ulkopinnan lämpötila seuraa suoraan ulkoilman lämpötilää, tämä näkyy alla olevista kuvioista 5.2.3 – 5.2.4, missä on esitetty rakennuksen 1A ei-kantavan ja kantavan rakennetyypin lämpötilan mittausdata eristeen sisä- ja ulkopinnassa ajanjaksolla 28.09.2010–29.11.2012, mittauspiste M4, Kaakko. Kesä- ja talviajan sisäpinnan lämpötilavaihtelu johtuu siitä, ettei anturi ole asennuksesta johtuen välittömästi ei-kantavassa rakennetyypissä Cyproc'in ulkopinnassa, kuvio 5.2.3. Anturit on asennettu eristämisen yhteydessä ja jouduttu työntämään eristeen sisäpintaan. Anturit sijaitsevat runkopuiden keskellä. Myös kesäaikaan eristetilan lämpötilaan vaikuttaa auringonpaiste.



**Kuvio 5.2.3 Rakennus 1A, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut lämpötilat ajanjaksolla 28.9.2010 – 28.11.2012, ei-kantava rakennetyyppi**

Kuviossa 5.2.4 on esitetty vastaava mittausdata kantavalle seinärakennetyypille, mittauspiste M3, Lounas. Lämpötilan mittausaika on ollut klo 12.00 ja siksi kuvassa näkyy ulkopinnan korkea lämpötila johtuen auringon paisteesta. Talviaikaan ulkopinnan lämpötila seuraa ulkoilman lämpötilää.

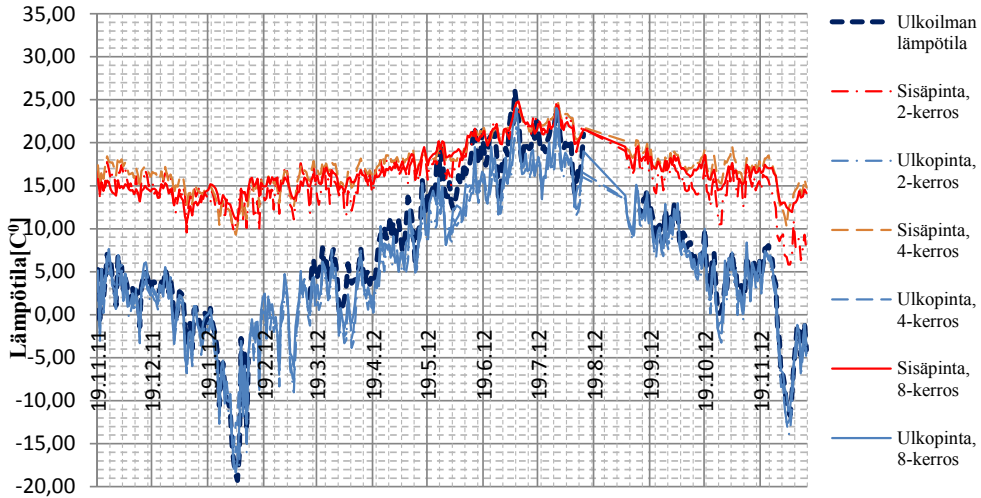


**Kuvio 5.2.4 Rakennus 1A, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut lämpötilat ajanjaksolla 28.9.2010 – 28.11.2012, kantava rakennetyyppi**

Alla on esitettyä vastaavat lämpötilajakaumat rakennukselle 1B, rakennus valmistui syksyllä 2011. Antureiden asennuksessa kiinnitettiin huomiota siihen, että myös ei-kantavassa rakennetyypissä anturit sijaitsevat eristeen sisäpinnassa eristeen ja Cyproc'in välissä.

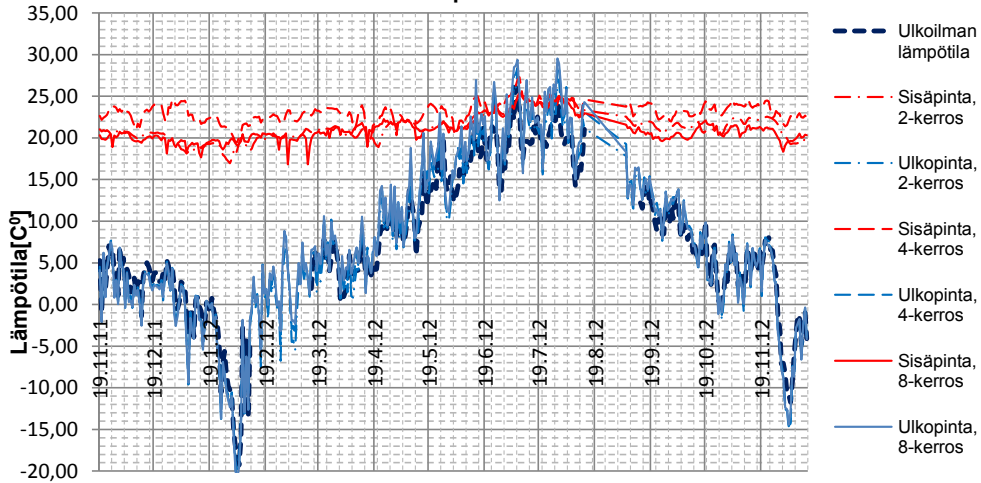
Ulkoilman lämpötilamittaus on tapahtunut rakennuksen 1 jokaiseen ilmansuuntaan asennetuilla lämpötila- RH-antureilla. Tuloksiin on laskettu antureitten tulosten keskiarvo pois lukien maksimi lämpötila ja sitä vastaava suhteellinen kosteuden lukema. Näin menetellen on eliminoitu auringon vaikutus lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen.

**Eristeen sisä- ja ulkopinnan lämpötila, 2-, 4- ja 8-kerros Luode, mittauspiste M2**



**Kuvio 5.2.5 Rakennus 1B, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut lämpötilat ajanjaksolla 19.11.2011 – 19.11.2012**

**Eristeen sisä- ja ulkopinnan lämpötila, 2-, 4- ja 8-kerros Koilinen, mittauspiste M1**



**Kuvio 5.2.6 Rakennus 1B, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut lämpötilat ajanjaksolla 19.11.2011 – 19.11.2012**



Eristekerroksen sisäpinnan lämpötila-jakaumaan vaikuttaa myös rakennetyypin sisäpinnan massiivisuus. Lämpötila-jakauma pysyy kantavassa rakennetyypissä tasaisena, kun taas ei-kantavan rakenteen lämpötilajakauma kesä- ja talviaikaan vaihtelee voimakkaammin. Kesäaikaan aurinko lämmittää eristetilan, mikä näkyy mittaustuloksissa myös sisäpinnan korkeampina lämpötiloina. Massiivinen betonikuori sitoo lämpöä ja tasaa eristetilan sisäpinnan sekä myös koko eristetilan lämpötilaa. Eristeen ulkopinnan ja ulkoilman lämpötilaero vaihtelee noin 3 – 4 °C, puurunkorakenteessa eristeen ulkopinnan lämpötila on kylmempi kuin ulkoilman ja massiivisessa rakenteessa toisinpäin.

Rakennuksen korkeussuunnassa eri kerroksissa mittauspisteissä lämpötiloissa ei ole vaihtelua. Sisäpinnassa on pientä vaihtelua, mikä johtuu huoneistojen sisälämpötilaeroista. Kun rakennuksen vaipan tiiveys on hyvä, pysyy paine-ero alimmassa ja ylimmässä kerroksessa ulkoilman ja sisäilman välillä samana, IV-koneilla säädetyn paine-eron suuruisena. Tällöin ei myöskään ole eroja kerrosten välillä eristekerroksen lämpötiloissa. Tämä voitiin todeta koko rakennuksen tiiveysmittausta suoritettaessa. Alipainepumppu kiinnitettiin 4.-kerroksen parvekeoveen ja mittauksen aikana seurattiin sisä- ja ulkoilman paine-eroa 1.- ja 8.-kerroksessa. Mitattu paine-ero alhaalla ja ylhäällä seurasi 2 – 3 Pa:n tarkkuudella 4.-kerroksessa säädettyä alipainetta (kts. Liite 2, Tiiveysmittausraportit).

### 5.2.2 Lasketut lämpötilajakaumat

Comsol-laskennassa seinän lämpö- ja kosteustarkastelun lähtöarvoina on käytetty kummassakin rakennuksessa seuraavia arvoja:

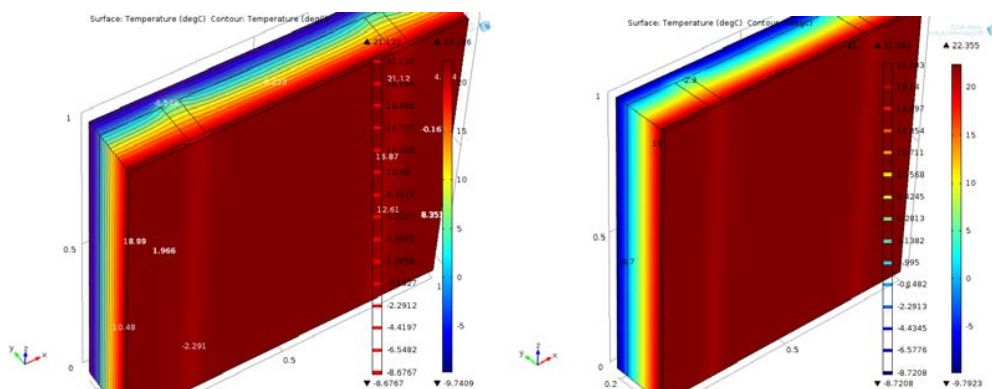
Alkulämpötila, T_init	+ 23 °C
Alku RH, RH_init	80 %
Sisäilman lämpötila	+ 23 0C
Sisäilman RH	50 %
Ulkoilman lämpötila	- 10 °C
Ulkoilman RH	80 %

Vaasan seudulla tammi-, helmikuun pitkänajan tilastollinen keskimääräinen lämpötila on noin -10 °C. Laskentamalli on ajasta riippuvainen, aika-askeleena on 1 h ja laskenta-aika 14 – 28 vuorokautta. Rakennetyypeistä on mallinnettu 1 \* 1 m<sup>2</sup> seinäelementti sekä laskentatuloksissa kuvaajissa on esitetty lämpö- ja kosteusjakaumat rakenteen läpi, y-suunnassa, seinäelementin keskellä sekä runkotolpan ja eristeen rajapinnassa elementin korkeussuunnassa keskellä. Lämpötila ja kosteuspitoisuus kuvaajissa on tulostettuna sisäpinnassa, Cyproc'in tai betonikuoren ja eristekerroksen rajapinnassa, eristeen keskellä, eristeen ja lisäeristeen rajapinnassa sekä eristeen ulkopinnassa. Kantavassa betonirakenteessa pitoisuudet on esitetty lisäksi betonikuoren keskellä.

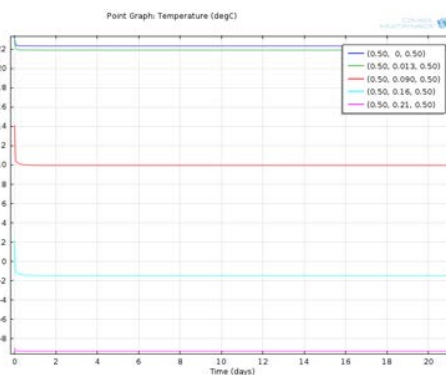
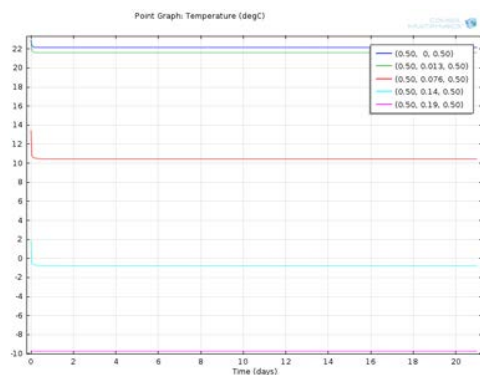
Alla olevassa kuviossa 5.2.7 a - c on esitettyä rakennusten 1A ja 1B ei-kantavan puurunkoisen rakennetyypin lämpötilajakaumat.

*Rakennetyyppi 1A*

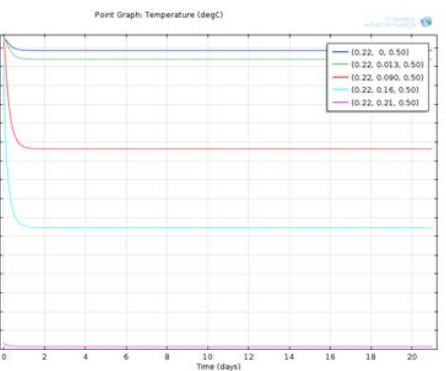
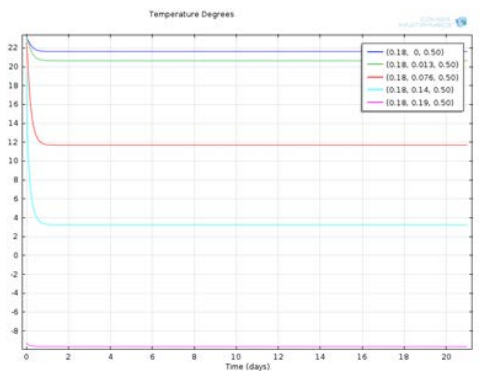
*Rakennetyyppi 1B*



**Kuvio 5.2.7 a Rakennetyyppien 1A ja 1B lämpötilajakaumat(ei kantava)**



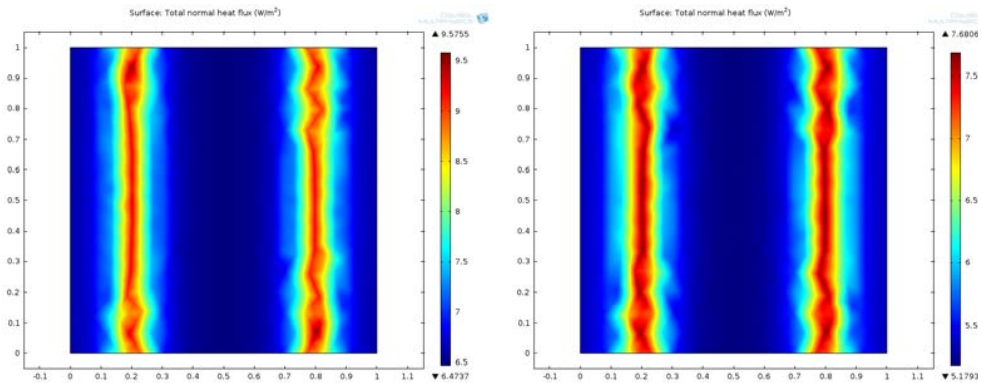
**Kuvio 5.2.7 b Rakennetyyppien 1A ja 1B lämpötilajakaumatelementin elentin keskipisteessä (ei kantava)**



**Kuvio 5.2.7 c Rakennetyyppien 1A ja 1B lämpötilajakaumatelementin runkotolpan kohdalla (ei kantava)**

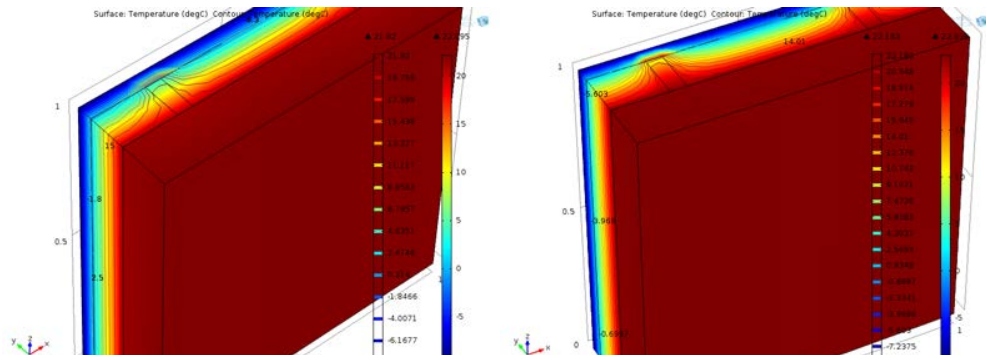
Lämpötiloissa rakennetyyppien välillä ei eri kerrosten rajapinnoissa ole eroa vaikka eristämisen taso on eri. Puun paremman lämmönjohtavuuden vuoksi eristeeseen verrattuna puun ulkopinnan lämpötila on korkeampi kuin elementin keskipisteessä lisäeristeen ja eristeen välissä. Ero kummassakin rakennetyypissä on noin 4 °C. Elementin sisäpinnassa lämpötila kylmäsiltaan olevan puun kohdalla on asteen pienempi verrattuna muuhun sisäpintaan.

Kevytrunkoisessa rakenteessa kylmäsiltaan toimivan puurungon lämpövirta rakennetyypissä 1A on jonkin verran suurempi, kuin paremmin eristetyn rakennetyypin 1 B. Tämä näkyy myös alla olevassa kuviossa 5.2.8, missä on esitettyinä lämpövirta eristeen ulkopinnassa rakenteen läpi molemmille rakennetyypeille. Rakennetyypin 1B lämpövirta puurungon kohdalla on noin 2 W/m<sup>2</sup> pienempi kuin rakennetyypin 1A.

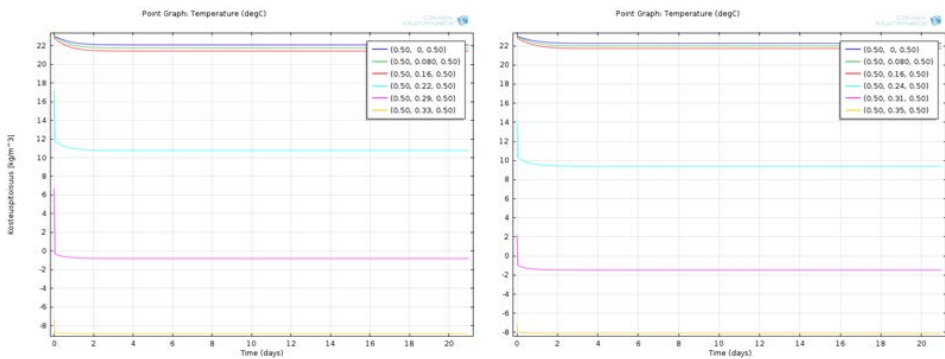


**Kuvio 5.2.8 Lämpövirta rakennetyypeissä ei-kantava 1 A ja 1 B, yksikkö W/m<sup>2</sup>**

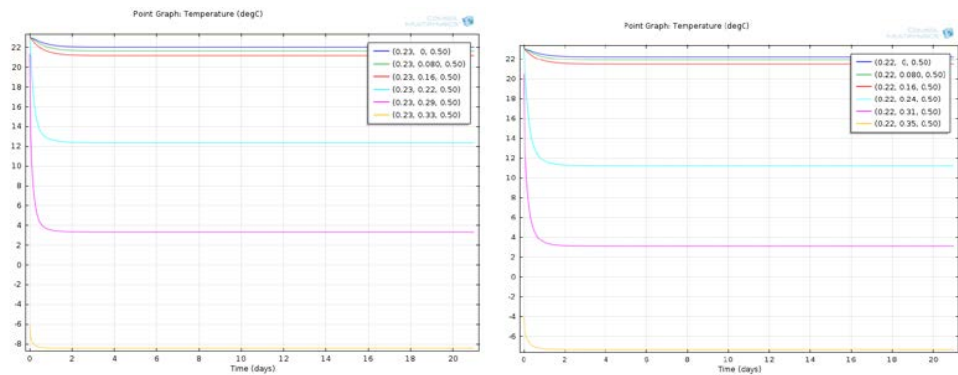
Kuviossa 5.2.9 a - c on esitettyinä vastaavasti rakennusten kantavien ulkoseinärakenteiden lämpötilajakaumat. Laskentatulosten perusteella elementin keskellä lisäeristeen ja eristeen rajapinnassa kummassakin tyypissä lämpötila on - 1 °C. Rakennetyypissä 1 A puurungon ulkopinnan lämpötila on + 4 °C ja rakennetyypissä 1 B vastaavasti + 9 °C. Lämpötilajakauma eristekerroksessa on kummassakin rakennetyypissä samanlainen johtuen massiivisen betoniseinän lämpökapasiteetista. Lämpövirta eristeen ulkopinnassa, kuvio 5.2.10, on vastaava kuin ei-kantavassa rakenteessa, koska eristystasot ovat samat.



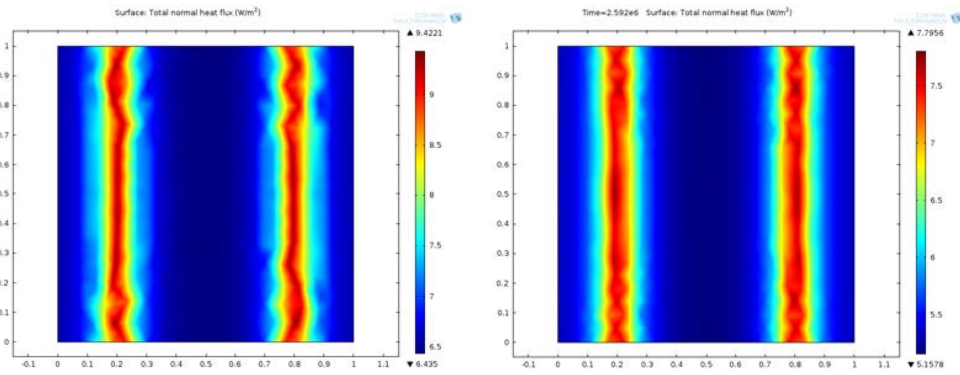
**Kuvio 5.2.9 a Rakennetyyppien 1A ja 1B lämpötilajakaumat (kantava)**



**Kuvio 5.2.9 b Rakennetyyppien 1A ja 1B lämpötilajakaumatelementin elentin keskipisteessä (kantava)**



**Kuvio 5.2.9 c Rakennetyyppien 1A ja 1B lämpötilajakaumatelementin runkotolpan kohdalla (kantava)**

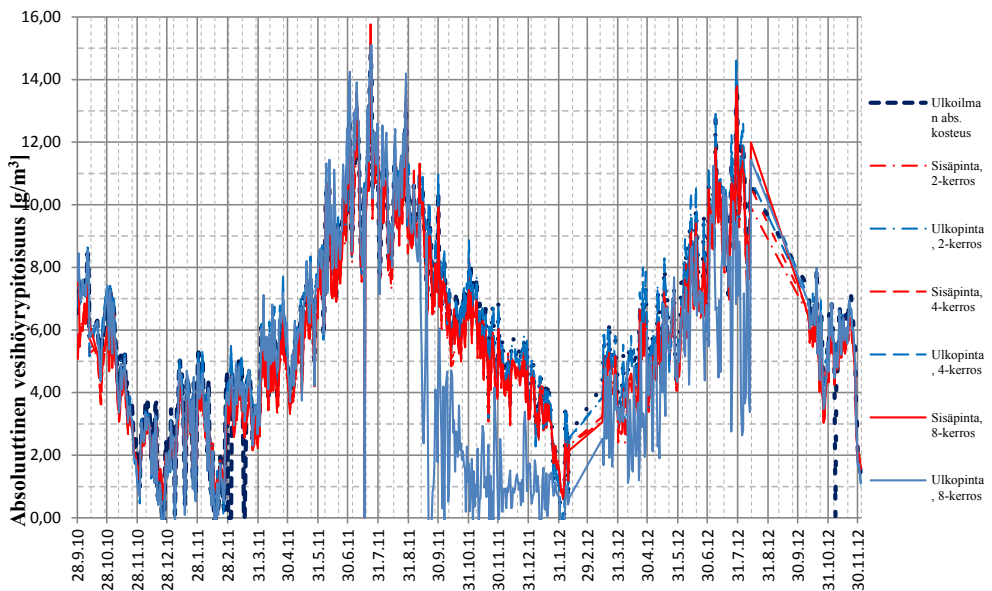


Kuvio 5.2.10 Lämpövirta rakennetyypeissä kantava 1 A ja 1 B, yksikkö W/m<sup>2</sup>

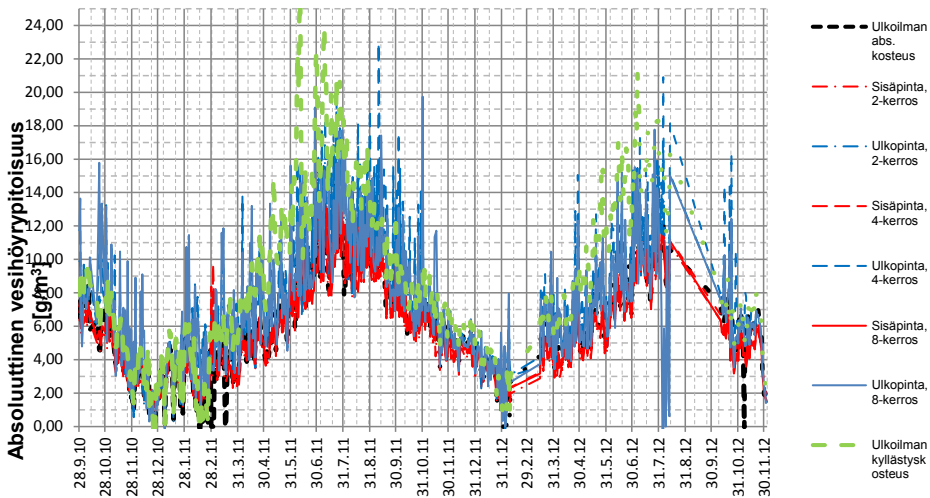
### 5.3 Kosteustekninen tarkastelu

#### 5.3.1 Mitatut kosteuspitoisuudet

Seuraavassa tarkastellaan edellä olevien lämpötilojen mittauspisteiden vastaavia mitattuja vesihöyrypitoisuuksia. Kuviossa 5.3.1 on rakennuksessa 1A monitoroidut mittauspisteen M4 (Kaakko) 2-, 4- ja 8-kerroksen absoluuttiset kosteuspitoisuudet. Elokuun 2011 jälkeen kosteusanturi 8-kerroksessa ei ole toiminut. Tuloksista voidaan todeta, että koko eristetilan vesihöyrypitoisuus kaikissa kerroksissa seuraa ulkoilman vesihöyrypitoisuutta ja eri kerroksissa vaihteluväli on ulkoilman pitoisuudesta 1 g/m<sup>3</sup>.



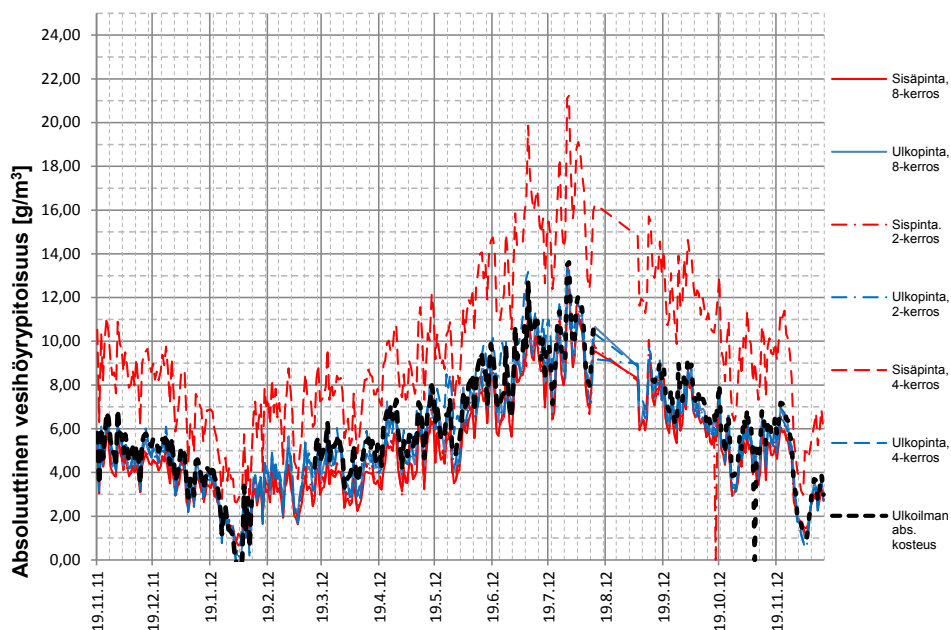
Kuvio 5.3.1, Rakennus 1A, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut absoluuttiset kosteuspitoisuudet, ei-kantava rakennetyyppi



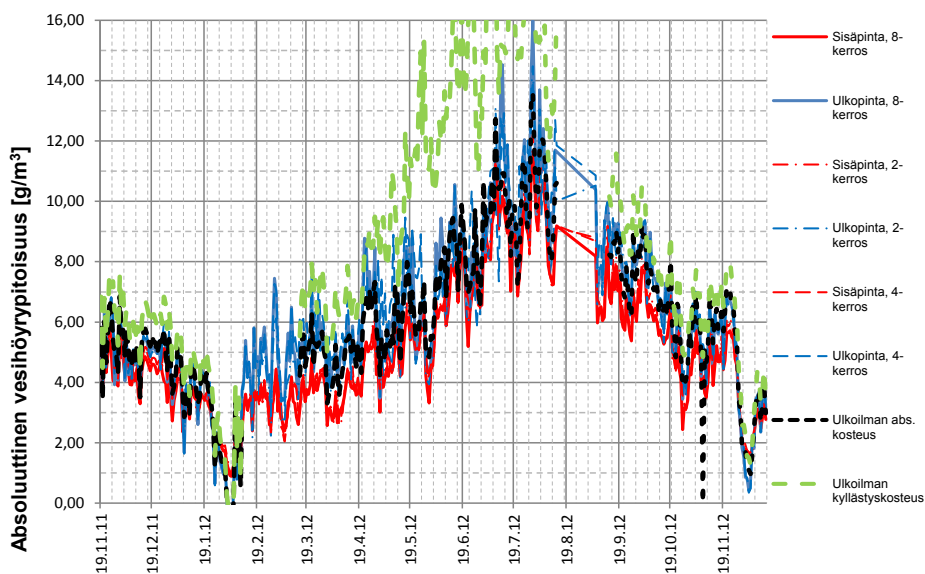
**Kuvio 5.3.2 Rakennus 1A, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut absoluuttiset kosteuspitoisuudet, kantava rakennetyyppi**

Yllä kuviossa 5.3.2 on rakennuksen 1A mittauspisteen M3 (Lounas) mitatut vesihöyrypitoisuudet. Kesäaikaan eristeen ulkopinnan pitoisuus on ulkoilman pitoisuutta korkeampi. Kosteuden tiivistymistä rakenteeseen ei kuitenkaan tapahdu, koska myös mitattu lämpötila eristeen ulkopinnassa on korkea ja tällöin kyllästyspitoisuus on suuri (vrt kuvio 5.2.4 Lämpötilajakauma). Kuvassa vihreä katkoviiva kuvaa ulkoilman kyllästyskosteuspitoisuutta. Syksyllä ja keväällä johtuen auringon vaikutuksesta esiintyy ”piikkejä”, jolloin eristekerroksen kosteuspitoisuus on mittaushetkellä korkeampi kuin ulkoilman kyllästyskosteus. Kuitenkin eristekerroksen kyllästyskosteus on kaikissa tapauksissa suurempi kuin absoluuttinen kosteuspitoisuus johtuen auringon vaikutuksesta. Luenta-ajankohta mittaustuloksille oli keskipäivä klo 12.00.

Kuvioissa 5.3.3 ja 5.3.4 ovat vastaavat tulokset rakennukselle 1B.



**Kuvio 5.3.3 Rakennus 1B, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut absoluuttiset kosteuspitoisuudet, ei-kantava rakennetyyppi, luode**



**Kuvio 5.3.4 Rakennus 1B, Eristeen sisä- ja ulkopinnan mitatut absoluuttiset kosteuspitoisuudet, kantava rakennetyyppi, koillinen**

Talvella ulkoilman suhteellinen kosteus vaihtelee 80 – 90 %:n välillä. Koska eristeen ulkopinnan lämpötila ja eristetilan vesihöyrypitoisuus seuraa ulkoilman olosuhteita, rakenteeseen ei saa tulla ylimääräistä kosteustuottoa kosteuden tiivistymisen välttämiseksi.

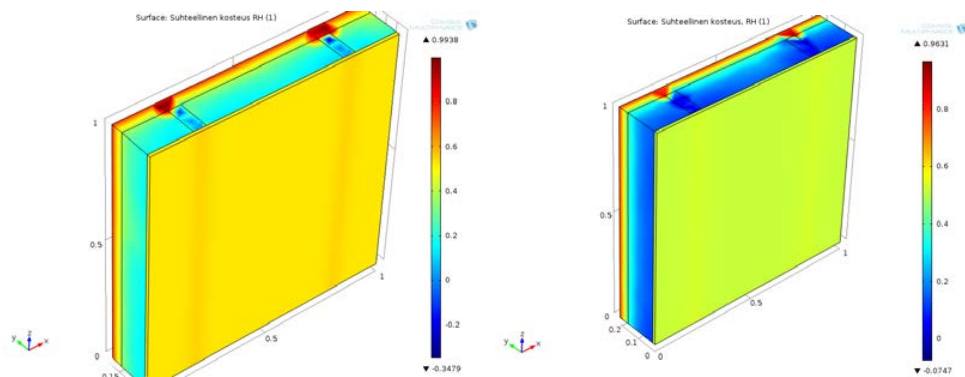
### 5.3.2 Lasketut kosteuspitoisuudet

Mallintaminen on tehty rakennusten rakennetyypeille ja tuloksia verrattu mitattuihin arvoihin. Näin on saatu tietty varmuustaso sille, että laskentaan syötetyt lähtöarvot antavat tuloksia, jotka vastaavat todellisuutta.

Seuraavassa tarkastellaan Comsol-laskentatuloksia kosteuden siirtymisestä seinäelementin läpi. Laskennan lähtötilanteena, alkuarvona on koko rakenteen  $RH = 80\%$ , josta laskenta konvergoi annettuihin reunaehtoihin, sisäpuolen  $RH = 50\%$  ja lämpötila  $T_s = 23\text{ }^\circ\text{C}$  sekä ulkopuolen  $RH = 80\%$  ja lämpötila  $T_u = -10\text{ }^\circ\text{C}$ . Laskentaväli on 1 h ja laskenta-aika 14 - 28 vuorokautta. Alla kuvissa 5.3.5 a - f on esitettyä rakennetyyppien suhteellinen kosteus RH ja vesihöyrypitoisuus sekä käyrästön muodossa RH:n ja vesihöyrypitoisuuden konvergoituminen reunaehtoihin ajan funktiona. Kuvien vasemman puoleiset kuvat esittävät rakennetyyppiä 1A ja oikean puoleiset kuvat tyyppiä 1B.

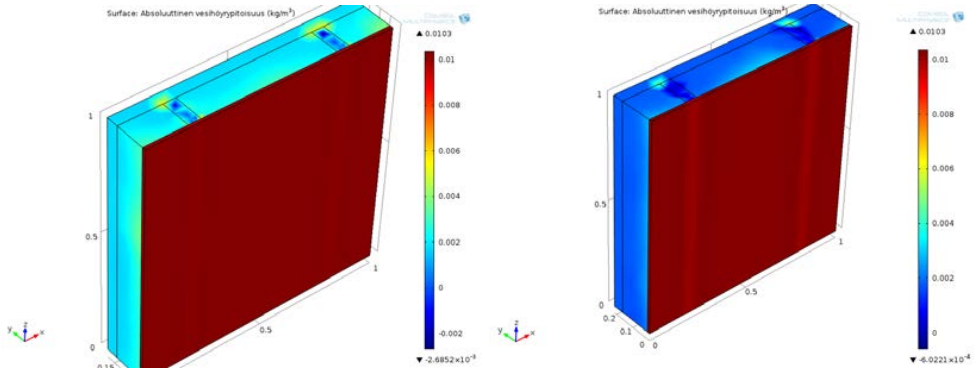
*Rakennetyyppi 1 A, ei-kantava*

*Rakennetyyppi 1 B, ei-kantava*

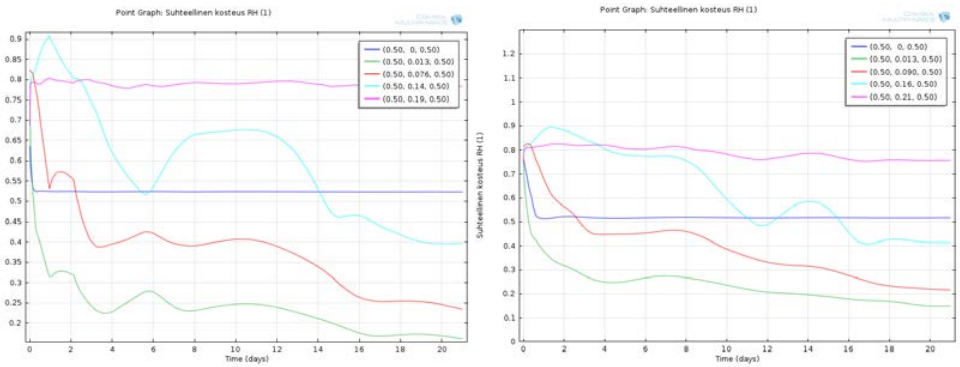


**Kuvio 5.3.5a Rakennetyyppien 1A ja 1B suhteellinen kosteus**

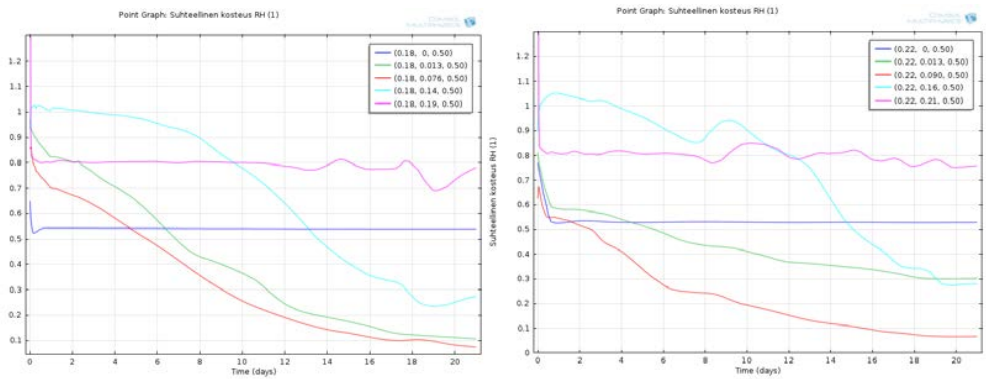




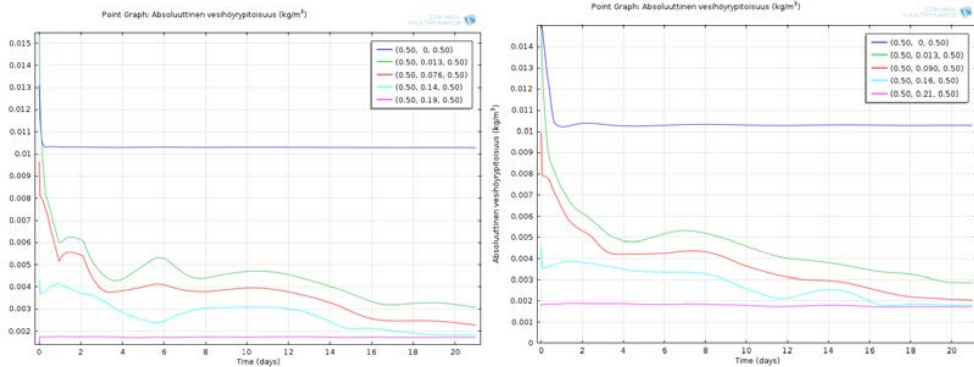
**Kuvio 5.3.5b Rakennetyyppien 1A ja 1B absoluuttinen vesihöyrypitoisuus**



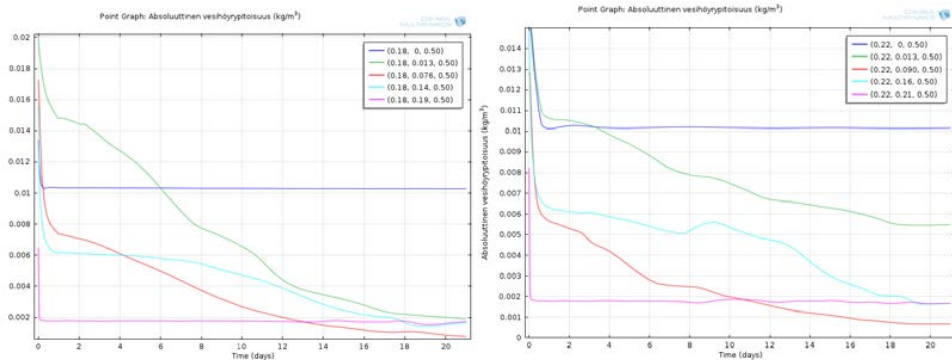
**Kuvio 5.3.5c Rakennetyyppien 1A ja 1B suhteellinen kosteus elementin keskipesteessä**



**Kuvio 5.3.5d Rakennetyyppien 1A ja 1B suhteellinen kosteus runkopuun ja eristeen rajapinnassa elementin korkeuden keskellä**



**Kuvio 5.3.5e Rakennetyyppien 1A ja 1B absoluuttinen vesihöyrypitoisuus elementin keskiosissa**



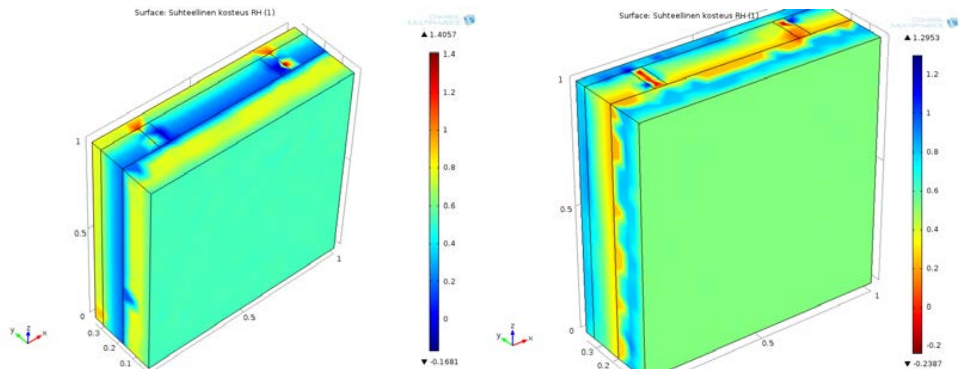
**Kuvio 5.3.5f Rakennetyyppien 1A ja 1B absoluuttinen vesihöyrypitoisuus runkotolpan ja eristeen rajapinnassa elementin korkeuden keskellä**

Eristetilan suhteellinen kosteus RH laskennan mukaan tasoittuu arvoon 0.1 ... 0.2 ja absoluuttinen vesihöyrypitoisuus tasapainottuu tilaan 2 – 3 g/m<sup>3</sup>, mikä vastaa talviolosuhteissa eristetilasta mitattuja pitoisuuksia (vrt kuvat 5.3.1 – 5.3.4).

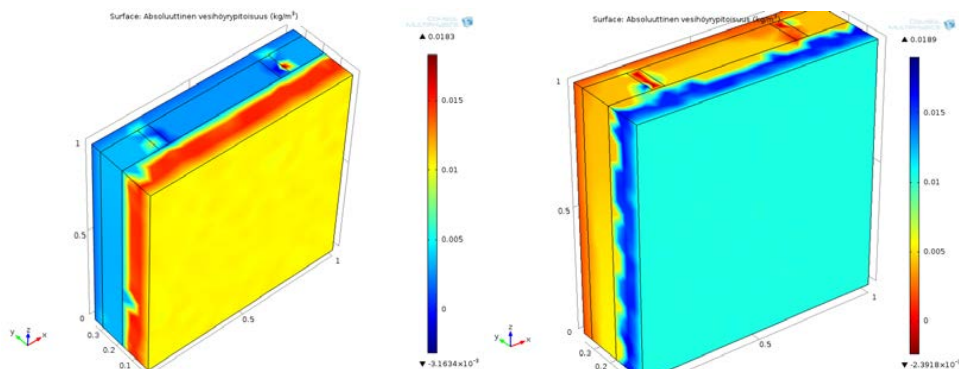
Alla kuvioissa 5.3.6 a – f ovat esitettyinä vastaavat laskentatulokset kantavalla betoni-kuorella oleville rakennetyypeille.

*Rakennetyyppi 1 A, kantava*

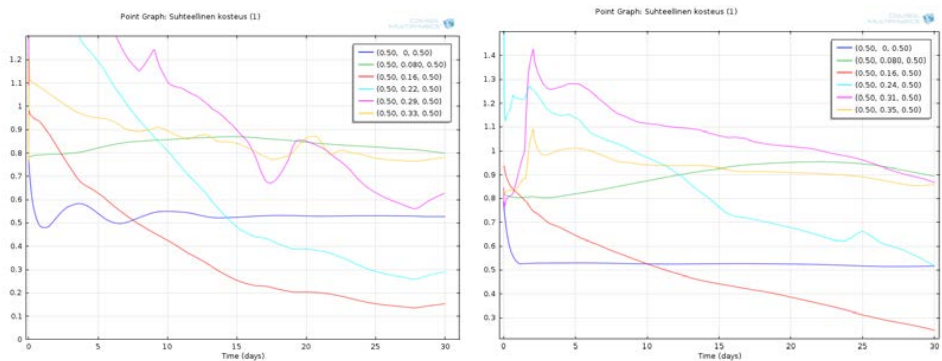
*Rakennetyyppi 1 B, kantava*



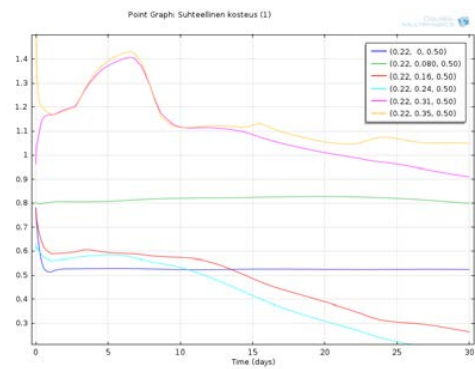
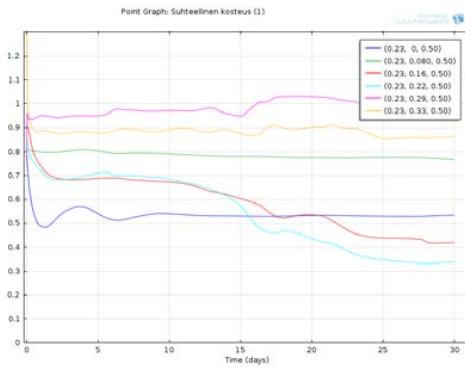
**Kuvio 5.3.6 a Rakennettyypien, 1A ja 1B (kantava) suhteellinen kosteus RH**



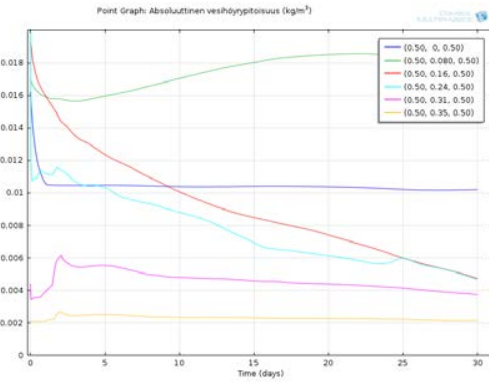
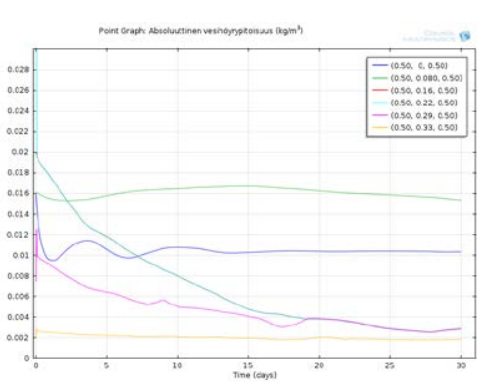
**Kuvio 5.3.6 b Rakennettyypien 1A ja 1B, (kantava) absoluuttinen vesihöyrypitoisuus**



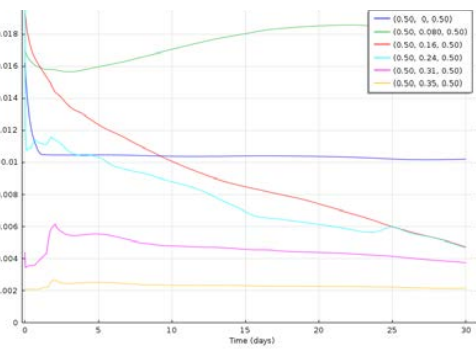
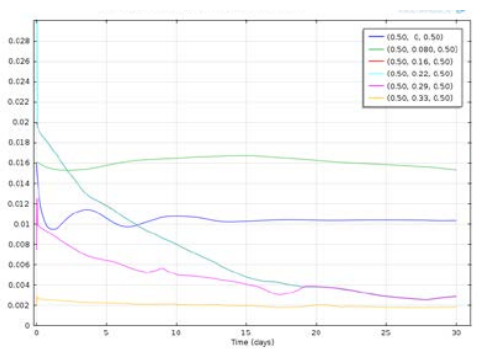
**Kuvio 5.3.6 c Rakennettyypien 1A ja 1B suhteellinen kosteus elementin keskellä**



**Kuvio 5.3.6 d Rakennetyyppien 1A ja 1B suhteellinen kosteus runkopuun kohdalla elementin korkeuden keskellä**



**Kuvio 5.3.6 e Rakennetyyppien 1A ja 1B absoluuttinen vesihöyrypitoisuus elementin keskellä**

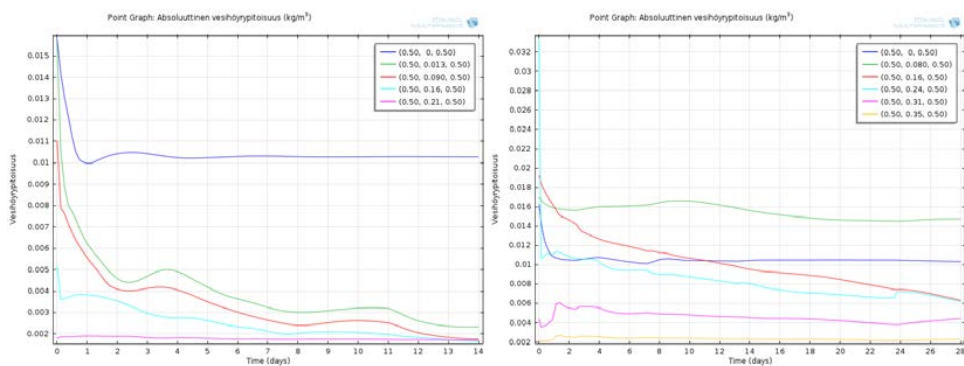


**Kuvio 5.3.6 e Rakennetyyppien 1A ja 1B absoluuttinen vesihöyrypitoisuus elementin keskellä**

Tulosten mukaan eristetilän kriittisin kohta on eristeen ja lisäeristeen rajapinta, missä suhteellinen kosteus hitaasti konvergoi alle yhden, absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on noin  $6 \text{ g/m}^3$  (violetti kuvaaja). Laskenta-aika oli 30 vrk eli yhteensä laskentakierroksia oli 720, kun laskennan ”step” on 1 h. Laskentatulokset osoittavat, miten

vesihöyrypitoisuus konvergoi sisä- ja ulkoilman annettuihin pitoisuuksiin. Laskentaan valitut reunaehdot vastaavat pitkänaajan Vaasan alueella esiintyviä keskiarvoja ja tulosten perusteella kaikissa tapauksissa vesihöyry- ja kosteuspitoisuus osoittavat ajan funktiona laskevaa pitoisuutta, jolloin rakenteet myös teoreettisen tarkastelun perusteella toimivat lämpö- ja kosteusteknisesti.

Kun verrataan mitattuja absoluuttisia vesihöyrypitoisuuksia laskentamallin antamiin tuloksiin, voidaan todeta näiden vastaavan toisiaan. Tämä näkyy alla olevassa kuvassa, kuvio 5.3.7, missä on esitettyä 1B:n ei-kantavan ja kantavan rakennetyypin absoluuttinen vesihöyrypitoisuus. Mallinnettu vesihöyrypitoisuus eristetilassa vastaa mitattuja arvoja. Talvisaikaan rakennetyyppien mitattu vesihöyrypitoisuus vaihtelee välillä 2-4 g/m<sup>3</sup> ja 3-5 g/m<sup>3</sup>.



**Kuvio 5.3.7 Rakennetyypin, 1B kantava, laskettu absoluuttinen vesihöyrypitoisuus**

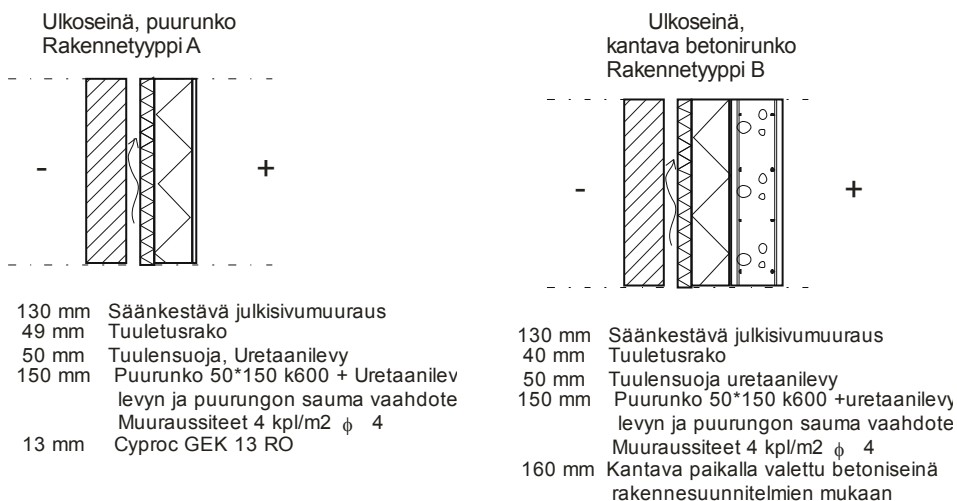
Laskentatuloksia tarkasteltaessa on huomioitavaa, että laskenta konvergoi lähtöarvoista annettuihin reunaehtoihin. Tuloksia arvioitaessa täytyy tarkastella lopputuloksia. Laskenta etenee annetulla ”step’illä” laskennan loppuajaksi. Jokaisella step’illä ohjelma iteroi laskentaa niin kauan kunnes määritetty tarkkuus iteraatiokierrosten välillä saavutetaan. Esimerkiksi kuviossa 5.3.6.d suhteellinen kosteus laskennan alkuvaiheessa ylittää arvon yksi, mikä ei tietenkään ole mahdollista. Tällöin ei voi tehdä johtopäätöstä, että 7, 8 vrk:n kohdalla rakenteeseen tapahtuisi tiivistymistä.

## 5.4 Matalaenergiarakenteiden lämpö- kosteustekninen tarkastelu

Seuraavassa tarkastellaan edellä olevien rakennusten vastaavia rakennetyyppejä, joissa pehmeä eriste on korvattu uretaanieristeellä, kuva 5.4.1 Laskennassa uretaanille on käytetty seuraavia ominaisuuksia:

Lämmönjohtavuus	$\lambda = 0.023 \text{ W}/(\text{m K}),$
Lämpökapasiteetti	$C_p = 1000 \text{ J}/(\text{kg K})$ sekä
Diffuusiovastuskerroin	$\mu = 320$

Rakenteen U-arvo on tällöin  $0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Rakenteen alkuarvoina, joista laskenta alkaa, on ollut alkulämpötilana  $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  ja uretaanin  $\text{RH} = 30 \%$  sekä puun ja Cyproc'in  $\text{RH} = 80 \%$ . Reunaehtoina, joihin laskenta konvergoi, on käytetty sisäilmassa  $T_s = +23 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $\text{RH} = 50 \%$  sekä ulkoilmassa  $T_u = -10 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $\text{RH} = 80 \%$ . Uretaanilevyn valittu suhteellinen kosteus  $30 \%$  perustuu tehtyyn  $\text{RH}$ -mittaukseen. Ulkoverastossa säilytetyissä folio-pintaisissa uretaanilevyissä mitattu suhteellinen kosteus levyn keskellä oli  $46.2 \%$  ja ulkoilman  $79.5 \%$  lämpötilassa  $+5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

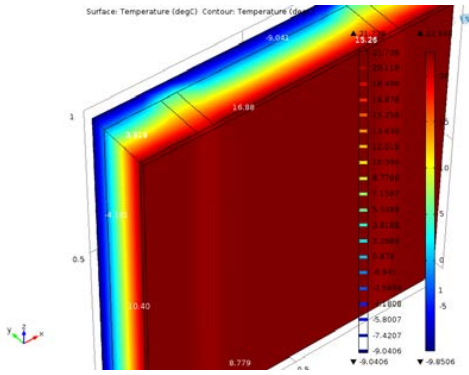


**Kuvio 5.4.1 Uretaanieristeiset rakennetyypit**

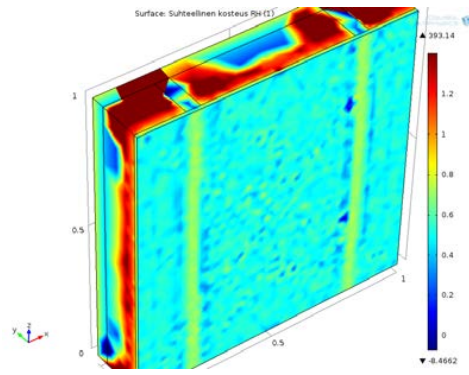
Alla olevaan kuvioon 5.4.2 on kerättyä rakennetyypin A laskennan tulokset, elementin lämpötilajakauma, suhteellinen kosteus, absoluuttinen vesihöyrypitoisuus sekä kosteuspuiteisuus. Lisäksi on kuvaajien avulla tarkasteltu lämpö- ja kosteuspuiteisuutta seinäelementin paksuussuunnassa. Vasemmanpuoleiset kuvaajat esittävät lämpö- ja kosteuspuiteisuutta rakenteessa elementin keskellä sekä oikean puoleiset kuvaajat esittävät lämpö- ja kosteuspuiteisuutta puurungon ja uretaanin rajapinnassa elementin korkeuden keskellä. Elementin keskellä uretaanieristeen ja lisäuretaanieristeen rajapinnassa lämpötila on  $-2 \text{ }^\circ\text{C}$  sekä runkopuun ja uretaanin rajapinnassa vastaavasti  $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Toisaalta suhteellinen kosteus runkotolpan alueella on korkea, laskennallisesti yli yhden, absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on  $8 \text{ g}/\text{m}^3$ . Runkopuun sisäpinnassa

absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on  $14 \text{ g/m}^3$ . Elementin keskipisteessä uretaanin sisäpinnassa korkein suhteellinen kosteus tasapainottuu arvoon  $\text{RH} = 0.9$ , jolloin vastaava absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on  $18 \text{ g/m}^3$ .

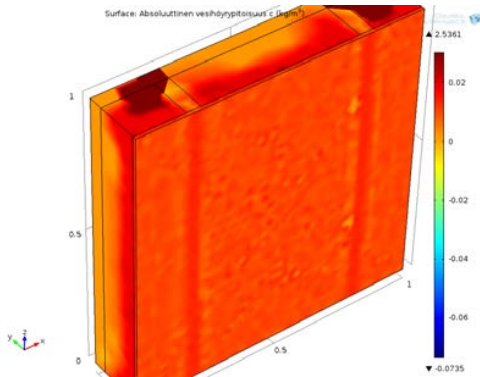
Rakenteen sisällä lämpötila putoaa eristekerroksessa, vaalean sininen vyöhyke,  $0 - +5 \text{ }^\circ\text{C}$  välille. Laskennan lähtötilanteessa puun suhteellinen kosteus on  $80 \%$  eli kosteuspitoisuus  $w = 18 \%$ . Runkopuun ulkopinnassa suhteellinen kosteus pysyy laskennan ajan korkeana (vaalean sininen kuvaaja) korkeana ja tällöin olosuhteet mikrobikasvustolle ovat olemassa. Mikrobikasvustolle riittää nolla asteen yläpuolella oleva lämpötila.



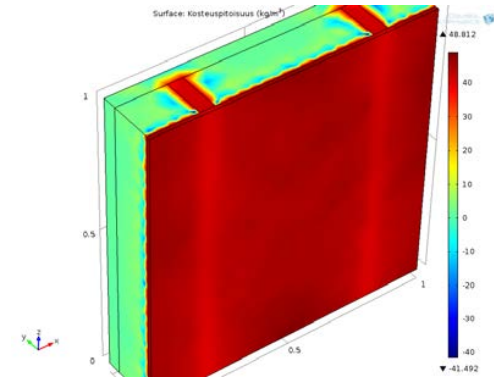
*Lämpötila*



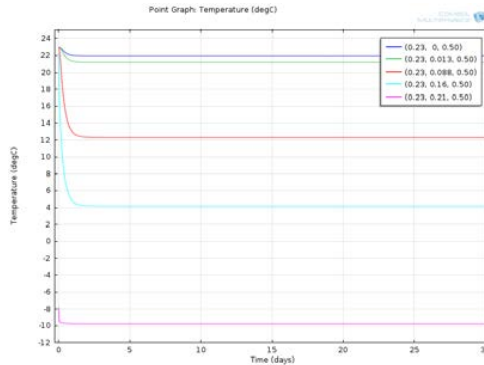
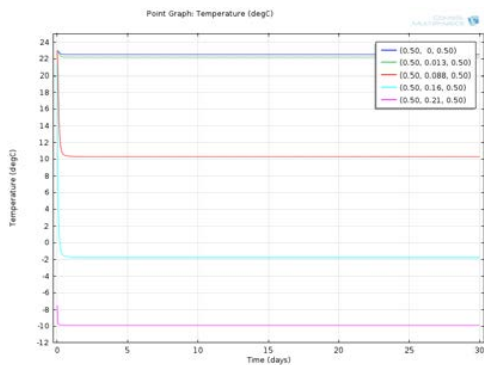
*Suhteellinen kosteus*



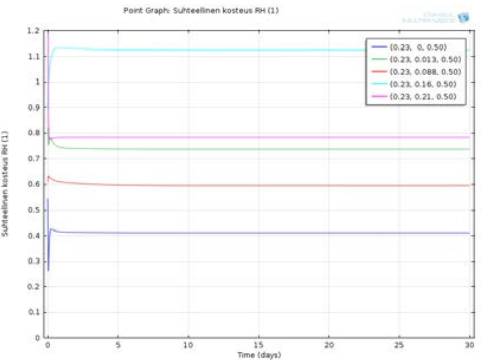
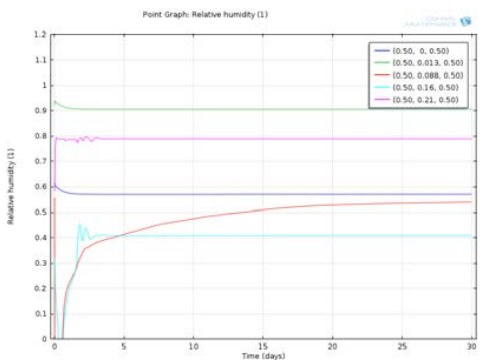
*Absoluuttinen vesihöyrypitoisuus*



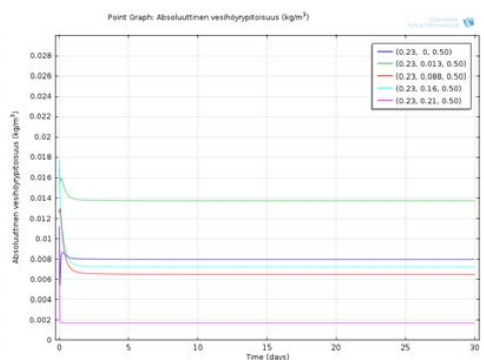
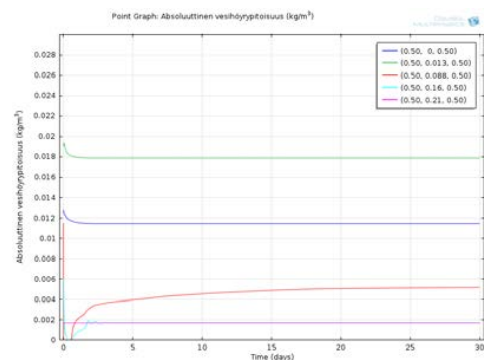
*Kosteuspitoisuus*



Lämpötilajakauma elementin keskipisteessä vasen sekä runkokuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä



Suhteellinen kosteus elementin keskipisteessä vasen sekä runkokuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä

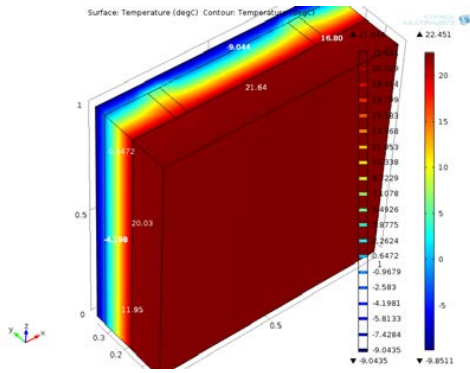


Absoluuttinen vesihöyrypitoisuus elementin keskipisteessä vasen sekä runkokuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä

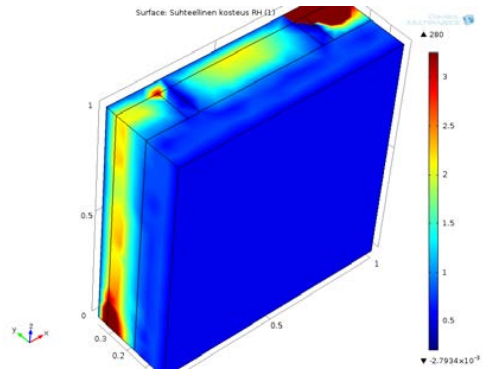
**Kuvio 5.4.2 Uretaanieristeisen kevyen, puurunkoseinän lämpö- ja kosteustekninen toiminta**



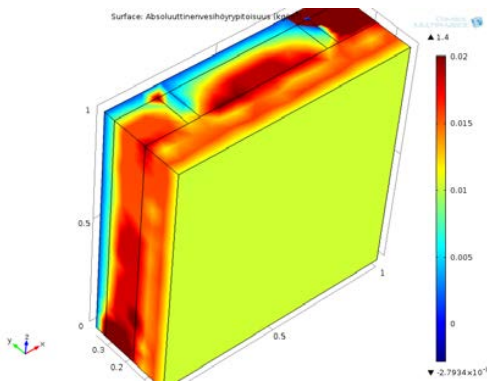
Alla kuviossa 5.4.3 on esitettyjä vastaavat tulokset rakennetyypille B, jonka sisäpinnassa on kantava betonikuori. Kuvaajat vasemmalla esittävät olosuhteita elementin keskipisteessä ja oikealla puun ja uretaanin rajapinnassa elementin korkeuden keskellä.



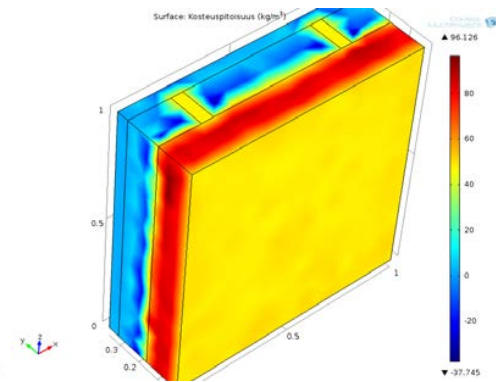
Lämpötila



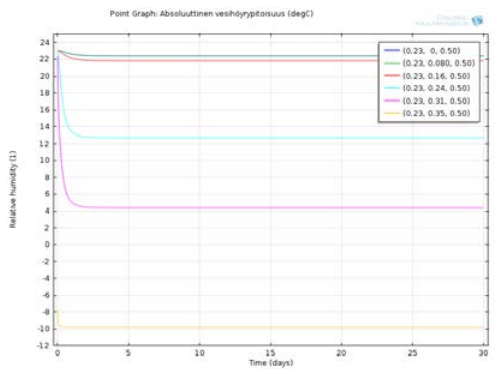
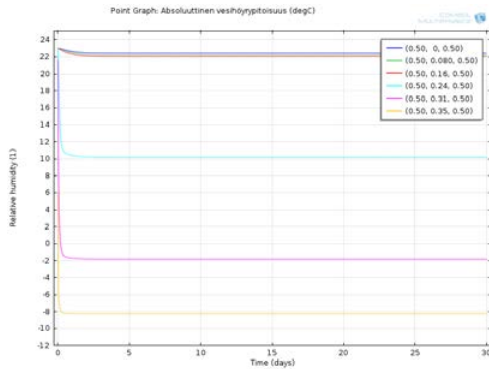
Suhteellinen kosteus



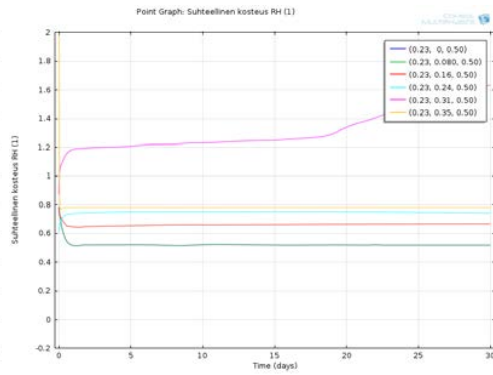
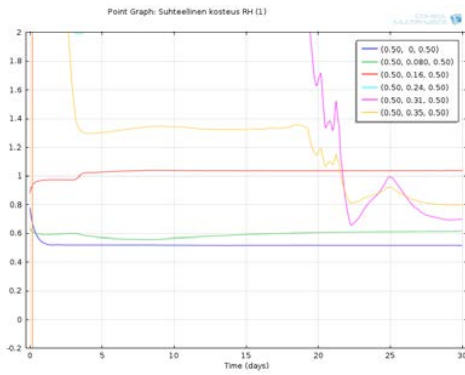
Absoluuttinen vesihöyrypitoisuus



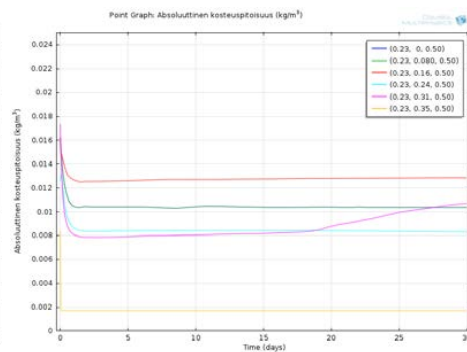
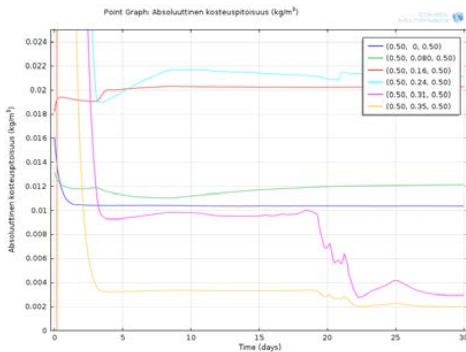
Kosteuspitoisuus



Lämpötilajakauma elementin keskipisteessä vasen sekä runkokuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä



*Suhteellinen kosteus elementin keskipisteessä vasen sekä runkopuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä*



*Absoluuttinen vesihöyrypitoisuus elementin keskipisteessä vasen sekä runkopuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä*

**Kuvio 5.4.3 Uretaanieristeen kantavan betoniseinän lämpö- ja kosteustekninen toiminta**

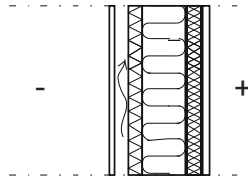
Lämpötila puun kohdalla puun ulkopinnassa on noin 6 °C korkeampi kuin elementin keskellä kummassakin rakennetyypissä. Elementin keskellä uretaanin ja betonikuoren rajapinnassa suhteellinen kosteus pysyy laskentajakson ajan noin yhdessä ja absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on noin 20 g/m<sup>3</sup>. Samoin puun kohdalla puun ulkopinnassa laskentajakson ajan RH > 1 ja absoluuttinen vesihöyrypitoisuus on noin 10 g/m<sup>3</sup>.

Koska uretaanin vesihöyrynläpäisevyys on huono, diffuusiovastuskerroin  $\mu = 320$ , laskentamallin tulokset osoittavat, että käytettäessä uretaania eristeenä mallinnettujen rakennetyyppien mukaisesti, on rakenteessa olevien muiden materiaalien oltava todella kuivia. Jotta betonikuoren suhteellinen kosteus putoaa 80 %:iin ja alle, edellyttää tämä työmaaolosuhteissa useamman kuukauden kuivatusjakson. Betonin suhteellinen kosteus ajan saatossa tasapainottuu noin 50 – 60 %:iin.'

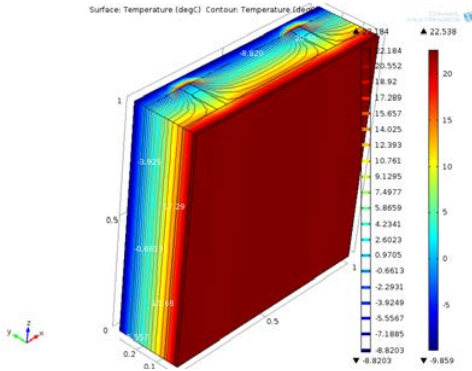
Tarkastellaan vielä rakennetyyppejä, missä uretaanilevy sijoitetaan sisäpuolelle, kuvio 5.4.4. Rakenteen U-arvo on 0.12 W/(m<sup>2</sup> K) standardin SFS EN ISO 6946 mukaisesti.

Lähtötilanteena laskentaan on annettu seuraavat: uretaanin  $RH_{init} = 0.3$  ja muiden materiaalikerrosten  $RH_{init} = 0.8$ . Lähtölämpötila on  $T_{init} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Reunaehtoina sisä- ja ulkopinnan RH ja lämpötila ovat samat kuin edellä.

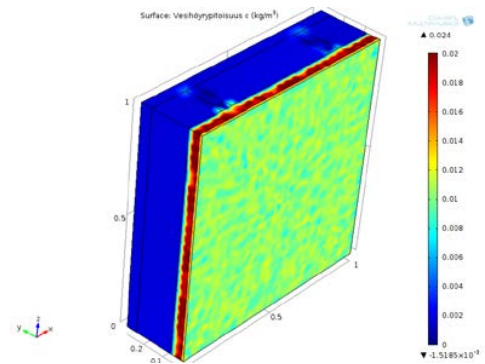
**Ulkoseinä (Ei kantava)**



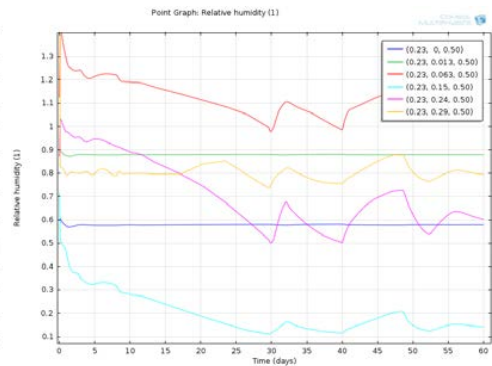
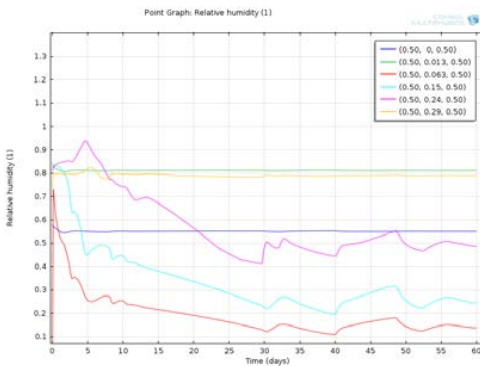
- 44 mm Julkisivu työselityksen mukaan
- 50 mm Tuuletusrako, ristikkolaus
- 175 mm Tuulensuoja ja lämmöneriste Isover RKL-31 E
- 175 mm Puurunko 50\*175 k600 + lämmöneriste Isover KL-33
- 50 mm Muuraussiteet 4 kpl/m<sup>2</sup>  $\phi$  4
- 50 mm Uretaanilevy
- 13 mm Cyproc GEK 13 RO



*Lämpötila*



*Vesihöyrypitoisuus*



*Suhteellinen kosteus elementin keskipisteessä vasen sekä runkopuun ja uretaanin rajapinnassa oikea korkeussuunnassa elementin keskellä*

**Kuvio 5.4.4 Ei-kantavan rakennetyypin lämpö- ja kosteustekninen toiminta**

Kuvion 5.4.4 rakennetyyppi laskennan mukaan toimii, mutta toisaalta uretaanilevyn hyvä lämmöneristävyys kylmentää uretaanilevyn ulkopuoliset rakenteet ja kondenssiriski konvektion seurauksena kasvaa. Kastepiste rakenteessa siirtyy syvälle lähemmäs sisäpintaa mihin myös mahdollinen kosteus tiivistyy ja tällöin rakenteen kuivuminen hidastuu.

Matalaenergiarakentamisessa tiiviin, vesihöyryä huonosti läpäisevän myös homogeenisen eristekerroksen sijoittaminen syvälle rakenteeseen tai jopa lähelle ulkopintaa on riski. Kuvion 5.4.1 mukainen rakennetyyppi, jossa on epähomogeenisia kerroksia, edellyttää, että muut liittyvät materiaalit ovat täysin kuivia. Se miten työmaaolosuhteissa esim betonirakentamisessa saadaan rakenteen suhteellinen kosteus alhaiseksi edellyttää pitkiä kuivumisaikoja. Tämä on aikataulullisista syistä usein mahdoton ja siksi uretaanieristeiden käyttöä kannattaa tarkoin tutkia toteutettavissa kohteissa. Myöskään ympäristön kosteusrasitus rakenteelle ei saa olla suurta.

Vastaava tilanne on paksuissa rakennetyypeissä, joissa on useita eristekerroksia, kastepiste siirtyy lähelle rakenteen sisäpintaa. Tällöin mahdollisen konvektion seurauksena kosteus tiivistyy rajapintoihin ja kuivuminen pitkittyy sekä sen seurauksena materiaalien homehtumisriski kasvaa. Matalaenergiarakentamisessa pätee vanhat opit, tiiviiden kerrosten on sijaittava sisäpinnassa ja rakenteiden on oltava tiiviitä, konvektiovirtausta ei saa esiintyä. Matalaenergiarakentamisessa on kiinnitettävä erityistä huomiota rakentamisen laatuun ja tiiviiseen rakentamiseen.

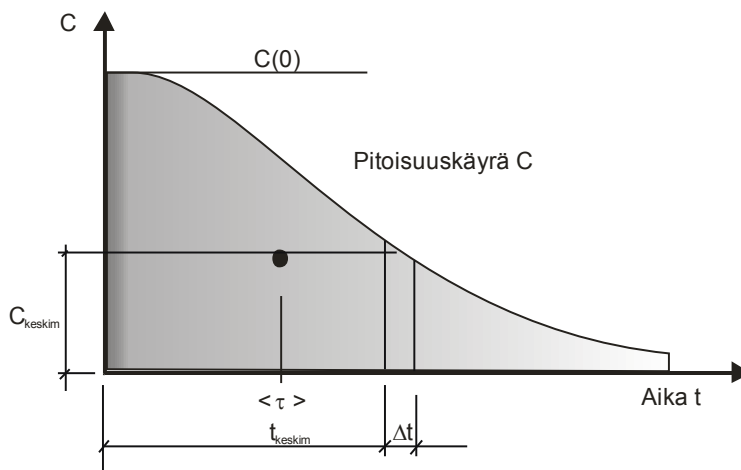
## 6 ILMANVAIHDON ENERGIAKULUTUS

Rakennusten ilmanvaihto on toteutettu huoneistokohtaisilla IV-koneilla, ILTO W80. Rakennuksessa on erikseen kaksi poistoilmakonetta, joiden tilavuusvirta on 30 litraa/sek sekä vaunuhuoneessa Ilto W130 tulo- poistoilmakone. Ilmanvaihtokoneissa on sisäänrakennettuna kanavien lämpötila-anturit. Koneisiin on liitettyä Modbus-modeemit, joiden avulla antureiden lämpötiloja voidaan seurata Internet-verkon kautta. Modbus-modeemit saatiin koneiden valmistajan kautta. Kanavien lämpötilaseuranta tapahtuu koneen sisällä, jolloin lämpötilan mittaustuloksiin saattaa aiheuttaa pientä virhettä ilman pyörteisyys ja siten ilman sekoittuminen koneessa. Mittausseuranta ei saatu kaikista koneista yhtäjaksoisesti koko vuoden ajalta, koska huoneistojen asukkaat irrottivat modeemit koneiden käyttöongelmien vuoksi. Seuranta kuitenkin saatiin eri vuoden ajanjaksoilta, jolloin vuositasolla saadaan keskimääräiset tulokset. IV-koneiden lämpötiloja seurattiin kahdeksasta huoneistosta, neljästä huoneistosta 4 – ja 8 - kerroksesta. Lämpötilojen lisäksi koneista saatiin tieto siitä, millä vaiheella, nopeudella kone kulloinkin kävi. Mittausdataa kerätään puolen tunnin välein.

Ennen asukkaiden sisään muuttoa IV-koneiden säädön jälkeen mitattiin tiettyjen huoneistojen poistoilmavirrat Decay-menetelmällä käyttäen seurantakaasuna rikkiheksafloridia SF<sub>6</sub>

Ilmanvaihdon mittaus Decay-menetelmällä perustuu seurantakaasun käyttöön. Seurantakaasu sekoitetaan tasaisesti huoneilmaan käyttäen tehokkaita tuulettimia. Sen jälkeen kun seurantakaasu on sekoittunut täysin huoneilmaan alkupitoisuuteen  $C(0)$  suljetaan tuulettimet ja laitetaan huoneiston ilmanvaihto päälle minkä jälkeen seurataan seurantakaasun pitoisuuden vaimenemista. Seurantakaasun pitoisuutta seurataan jokaisesta huoneiston poistovenntiilistä.

Ilmanvaihdon mittaus toteutettiin ohjeiden Nordtest Method NT VVS 019 /10/ ja NT VVS 047 /11/ mukaisesti

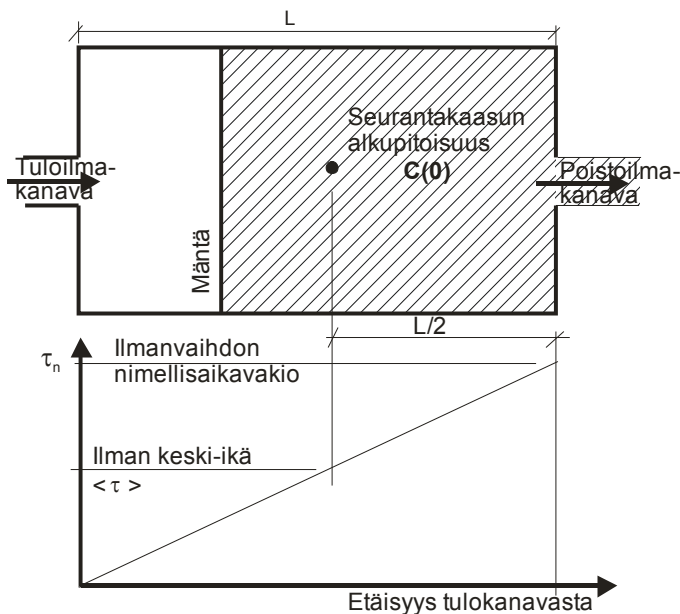


Kuvio 6.1 Huoneilmaan sekoitetun seurantakaasun vaimeneminen

Pitoisuus vaimenee eksponentiaalisesti kuvan 6.1 mukaisesti. Käyrän loppuosa voidaan logaritmisessa asteikossa extrapoloida nolla-pitoisuuteen. Logaritmisessa asteikossa ajan suhteen käyrä on suoraviivainen ja viivan kulmakertoimen avulla voidaan määrittää nollapitoisuus ja sitä vastaava aika sekä extrapoloida käyrän alapuolinen pinta-ala. Pitoisuuden monitorointi voidaan lopettaa silloin kun vaimeneminen tapahtuu eksponentiaalisesti. Huoneilman keski-ikä  $\langle \tau \rangle$  on sama kuin käyrän alapuolella olevan pinta-alan painopiste määritettynä ajan suhteen. Jakamalla käyrän alapuolinen pinta-ala osapintoihin, ilman keski-ikä saadaan lausekkeesta

$$\langle \tau \rangle = \frac{\sum (\Delta t * C_{\text{keskim}}) * t_{\text{keskim}}}{\sum (\Delta t * C_{\text{keskim}})}$$

Alla oleva kuva esittää tilaa nk. mäntävirtauksessa. Tällöin tila ajatellaan siten, että tilan toisessa päässä on tuloilmakanava ja toisessa päässä poistoilmakanava. Tilan yli kulkee mäntä, mikä työntää vanhan ilman edellään poistoilmakanavaan. Tällöin tilan keskipiste, eli vaihtuvan ilman painopiste vastaa tilan ilman keski-ikä.



**Kuvio 6.2 Ilman keski-ikä nk. mäntävirtauksessa**

Mittalaitteena käytettiin Bruel&Kjaer'in Multigas-monitor'ia 1302 siihen liitettynä Sampler&Doser 1303. Seurantakaasuna käytettiin rikkiheksafloridia SF<sub>6</sub>. Pitoisuuden mittaus suoritettiin jokaisesta poistokanavasta. Laitteisto mittaa pitoisuuden vuorokauden kerran kuusi minuutin välein kustakin kanavasta.



**Kuvio 6.3 Käytetty mittauslaitteisto**

Kun tilassa on useita poistokanavia, ilman keskimääräinen ikä saadaan lausekkeesta

$$\langle \tau \rangle = \frac{q_1 \mu_1^1 + q_2 \mu_2^1 + \dots + q_n \mu_n^1}{q_1 \mu_1^0 + q_2 \mu_2^0 + \dots + q_n \mu_n^0}$$

missä

$q_i$  on mitattu ilmavirtaus kussakin poistokanavassa [m/s]

$i = 1 \dots n$ , missä  $n$  on poistoilmakanavien lukumäärä

$\mu_i^0$  on kanavasta  $i$  mitatun pitoisuuskäyrän alapuolella merkkiainepitoisuuden pinta-ala  $[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} * \text{s}^2]$ ,

$$\mu_1^0 = \left( \sum (\Delta t * C_{\text{keskim}}) \right)_i$$

$\mu_i^1$  on kanavasta  $i$  mitatun pitoisuuden ensimmäinen momentti ajan suhteen

$$\left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} * \text{s}^2 \right], \quad \mu_i^1 = \left( \sum (\Delta t * C_{\text{keskim}}) * t_{\text{keskim}} \right)_i$$

Ilman keski-ikä

$$\langle \tau \rangle = \frac{\tau_n}{2},$$

missä  $\tau_n$  on ilmanvaihdon nimellisaikavakio. Tilan ilmanvaihtokerroin  $n$  on nimellisaikavakion käänteisluku

$$n = \frac{V}{q_v} = \frac{1}{\tau_n}$$

Huoneistojen IV-koneet on säädetty siten, että vaihe 1 vastaa perusilmanvaihtoa, jolloin huoneistossa ei oleskella, vaihe 2 vastaa ilmanvaihtoa, jolloin huoneistossa oleskellaan ja vaihe 3 tehostettua ilmanvaihtoa. Ilmanvaihtuvuus ja vastaavat ilmamäärät mitattiin erikseen kullakin koneen vaiheella. Alla olevassa taulukossa 6.1 on esitettyinä mittaustulokset, huoneistojen B46 ja B50 vaihe 3 ei mittausajankohtana toiminut.

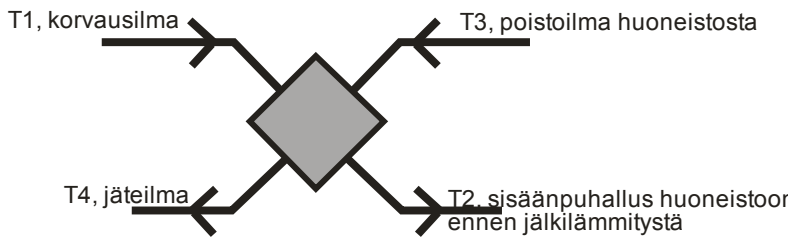
**Taulukko 6.1 Huoneistojen ilmavirrat liesituulettimen eri nopeusvaiheilla**

Huoneisto	Ilmavirrat [ litra/sekunti, suluisa 1/h ]		
	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3
B8 (2-kerros)	19.66 (0.48)	23.87 (0.58)	29.33 (0.73)
B18 (4-kerros)	17.71 (0.35)	23.46 (0.46)	30.10 (0.59)
B20 (4-kerros)	17.75 (0.51)	22.74 (0.65)	25.10 (0.72)
B22 (4-kerros)	19.01 (0.46)	23.24 (0.56)	27.93 (0.68)
B46 (8-kerros)	16.70 (0.33)	23.94 (0.47)	
B50 (8-kerros)	18.06 (0.44)	23.37 (0.57)	
<b>Keskiarvo</b>	<b>18.15 (0.43)</b>	<b>23.44 (0.55)</b>	<b>28.12 (0.68)</b>

IV-koneesta mitattujen lämpötilojen ja käyttäen keskimääräisiä ilmavirtoja voidaan ilmanvaihdon kautta kulunut lämpöenergia laskea seuraavasti

$$Q_{iv} = \rho_i * c_{pi} * t_d * t_v * q_{v, tulotulo} * \left( T_2 - \left( T_1 + \frac{1}{0.9} (T_3 - T_4) \right) \right) * \Delta t / 1000 \quad [\text{kWh/h}]$$





**Kuvio 6.4 IV-koneen kanavien lämpötilamittaus**

Lausekkeessa:  $\rho_i$  on ilman tiheys,  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti,  $1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $q_{v, \text{tulo}}$  on tuloilmavirta,  $q_{v, \text{tulo}} = 0.9 q_{v, \text{poisto}}$ ,  $t_d$  ja  $t_v$  ovat päivittäinen ja viikottainen IV-koneen käyntiaikasuhte. Käyntiaikasuhteet ovat yksi, koska koneet ovat jatkuvasti käynnissä.  $\Delta t$  on tarkasteltavan ajanjakson pituus, mittausdataa on kerätty puolen tunnin välein.

Alla olevissa taulukoissa 6.2 a - b on esitetty kahden huoneiston ilmanvaihdon kautta kulunut energia. Huoneiston B18 tulokset on otettu ajanjaksoilta, jolloin IV-koneisiin liitetyt modbus-modeemit ovat toimineet. Vuositason energiakulutus on laskettu kertomalla tarkastelujakson keskimääräinen kulutus tuntia kohden vuosituntimäärällä. Huoneiston B48 lämpötila-anturit toimivat läpi vuoden. Vastaavasti on myös muista seuratuista antureista keskimääräiset energiakulutukset laskettu. Rakennuksen keskimääräinen kulutus on mitattujen IV-koneiden keskiarvo.

Ilmanvaihdon keskimääräinen energiakulutus koko rakennukselle on 69100 kWh.

**Taulukko 6.2 Huoneiston B48 ilmanvaihdon vuositason energiakulutus**

Aikajakso 30.1.2012 10:27 - 30.1.2013 10:40				8784,21 h, kokonaiskäyntiaika tunteina				
[kWh]				[kWh/h]				
Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä	
12,92	2107,97	0,00	2120,89	0,001	0,240	0,000	0,242	
				0,2414	[kWh/h]	2121	kWh/vuosi	

**Taulukko 6.2.2b Huoneiston B18 ilmanvaihdon vuositason energiakulutus**

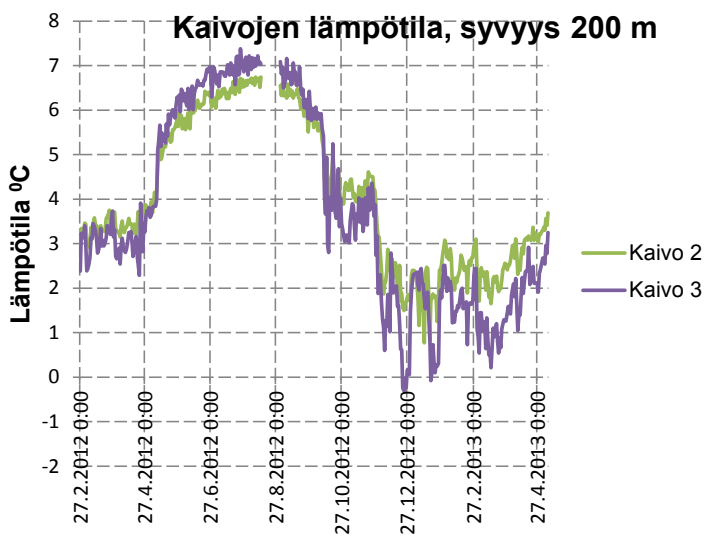
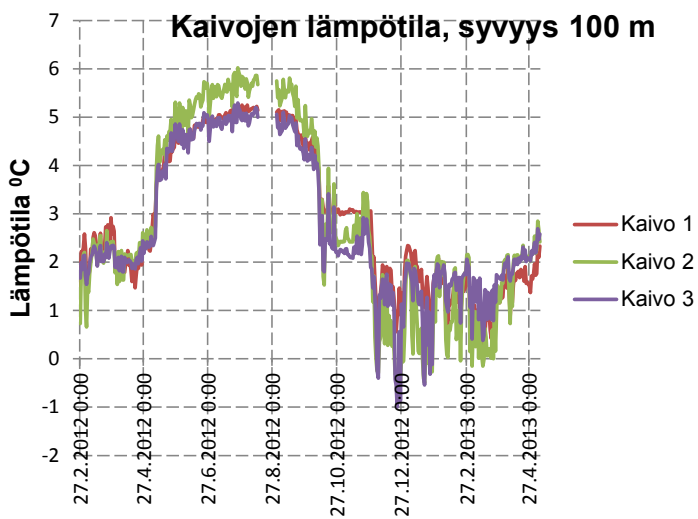
<b>Aikajakso 30.1.2012 10:27 - 31.1.2012 19:40</b>				33,21	h, käyntiaika tunteina		
<b>[kWh]</b>				<b>[kWh/h]</b>			
Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä
0,00	10,01	0,00	10,01	0,000	0,302	0,000	0,302
<b>Aikajakso 15.2.2012 15:10 - 25.3.2012 20:40</b>				942	h, käyntiaika tunteina		
<b>[kWh]</b>				<b>[kWh/h]</b>			
Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä
0,27	128,84	0,43	129,54	0,000	0,137	0,000	0,138
<b>Aikajakso 5.7.2012 20:40 - 17.7.2012 19:10</b>				287,00	h, käyntiaika tunteina		
<b>[kWh]</b>				<b>[kWh/h]</b>			
Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä
0,01	9,65	0,02	9,68	0,000	0,034	0,000	0,034
<b>Aikajakso 21.9.2012 01:40 - 2.11.2012 19:40</b>				1027,00	h, käyntiaika tunteina		
<b>[kWh]</b>				<b>[kWh/h]</b>			
Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	Yhteensä
0,21	112,83	0,33	113,37	0,000	0,110	0,000	0,110
K-arvo =				0,1147	[kWh/h]	1008	<b>kWh/vuosi</b>

## 7 PORAKAIVOJEN MITTAUSLÄMPÖTILAT

Rakennuksen 1B kolmeen kaivoon asennettiin liuosputkien asentamisen yhteydessä 100 m:n ja 200 m:n syvyyteen lämpötila-anturit PT100. Kohteessa aurinkokerääjien lämpöenergia on syötetty maalämpöliuokseen. Suunnitelmissa tavoitteena oli, että ylimääräinen auringon tuottama lämpöenergia hyödynnetään porakaivoihin. Aurinkokerääjillä oli suunniteltu lämmitettävän käyttövedtä. Jos aurinkokerääjien vesivaraajan lämpötila on alle 60 °C tai yli 75 °C, silloin tämä ylimääräinen lämpöenergia syötetään suoraan maalämpöliuokseen, jolloin ikään kuin aurinkoenergialla ladataan kalliopohjaa. Suunnitelma ei kuitenkaan toteutunut, vaan aurinkokerääjien tuottama lämpöenergia on syötetty kokonaisuudessaan lämmittämään porakaivojen liuoksen lämpötilaa.

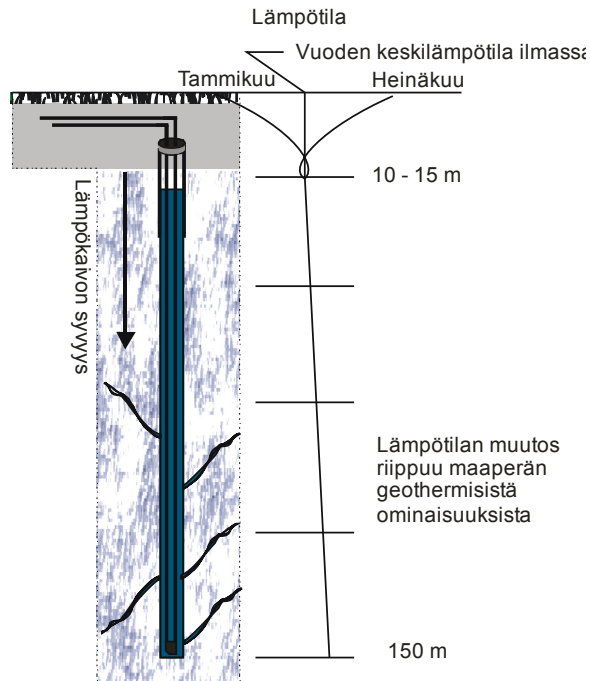
Lämpötila-antureilta tuleva johto jouduttiin 200 m:n syvyyteen jatkamaan kahdesta 100 m:n johdosta ja jatkoskohta on aiheuttanut lisävastuksen ja sen myötä tuloksiin virheen. Virhettä ei ennen asennusta ehditty tarkistamaan työmaan aikataulun vuoksi, koska anturit välittömästi saatuaamme valmistajalta jouduttiin upottamaan yhdessä liuosputkien kanssa maahan. Lämpötila 200 m:n syvyydessä ei ole luotettava, mutta mittaustuloksista voidaan kuitenkin todeta lämpötiloissa tapahtuneet muutokset eri vuoden aikoina. 200 m:n syvyydessä kaivon 1 lämpötila-anturi ei toiminut.

Kuviossa 7.1 alla on esitettyinä mitatut porakaivojen lämpötilat seurantajaksoilta 27.2.2012 – 27.4.2013.. Kesäaikaan aurinkokerääjien vaikutus porakaivon liuoksen lämpötilaan on ollut noin 4 – 5 °C. Kylmällä kaudella kaivojen lämpötila on palautunut aikaisemmalle tasolle. Tällöin johtopäätöksenä voidaan todeta, ettei kerääjien lämpöenergialla voida vaikuttaa pysyvästi maan lämpötilaan. Kerääjien pinta-ala on niin pieni, ettei saatavalla lämpöenergialla pystytä lataamaan kalliopohjaa. Toki korkeampi liuoksen lämpötila kesäaikaan parantaa maalämpöpumpun hyötysuhdetta ja sen kautta sillä on vaikutus lämpimän käyttöveden energiakulutukseen. Mittausajanjakso on kuitenkin lyhyt, vuoden mittainen, ja siksi seurantaa tullaan jatkamaan tulevien lähivuosien aikana. Tällöin voidaan tarkemmin analysoida latautuuko kalliopohja vai tapahtuuko kylmenemistä.



**Kuvio 7.1** Porakaivojen mitatut lämpötilat

Maan lämpötilaan 10-15 m:n syvyydessä ei vuodenajan vaihteluilla ole merkitystä /12/. Lämpötila on suurin piirtein sama kuin ilman keskilämpötila, mikä Vaasan alueella on + 4 °C. Ahlström'in mukaan /12/ kalliopohjan lämpötilassa alkuvuosina viiden ensimmäisen vuoden aikana tapahtuu muutaman asteen kylmeneminen, mutta tämän jälkeen lämpötila asettuu tasapainotilaansa.



**Kuvio 7.1 7.2 Periaatekuva kallioperän lämpötilan muuttumisesta**

Peruskalliossa lämpötila nousee noin 1 -2 astetta jokaista syvyyden 100 metriä kohden, muutokseen toki vaikuttaa myös kalliiossa olevien vesivirtausten määrä. Peruskallion lämpötila 5 vuoden kuluttua on stabiloitunut noin 1 – 2 astella alemmaksi kuin pumppauksen alussa.



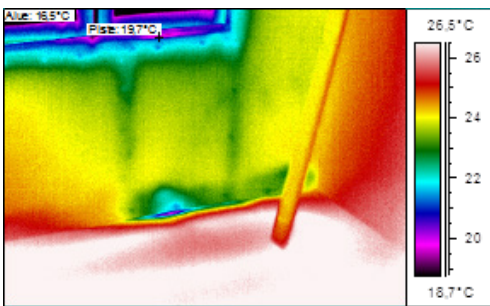
## 8 RAKENTAMISEN LAATU

Rakentamisen laatua seurattiin kummassakin kohteessa rakentamisen aikana työmaakokousten yhteydessä sekä rakennusaikana tehtiin huoneistokohtaisia tiiveysmittauksia ja lämpökamerakuvauksia. Rakennusaikaisten tiiveysmittausten avulla tarkistettiin ennen pintojen viimeistelyä mahdolliset vaipan vuotokohdat. Rakennusten valmistumisen jälkeen ennen asukkaiden sisään muutttoa tehtiin koko rakennuksen tiiveysmittaus.

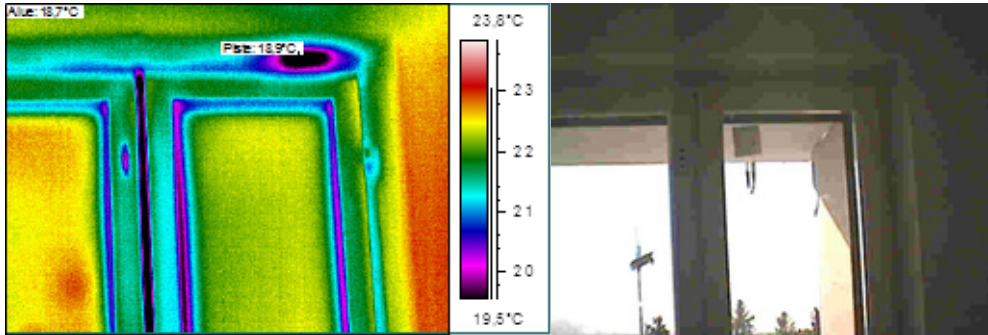
Rakentamiseen osallistuville työntekijöille järjestettiin kummassakin kohteessa päivän koulutus. Koulutuksen sisältönä oli selvittää työntekijöille tavoitteet, mitkä energiatehokkuuden kannalta ovat oleellisia huomioida rakennusaikana. Koulutuspäivässä käytiin läpi tutkimushankkeen tavoitteet ja sisältö. Tämän tarkoituksena oli sitouttaa myös työntekijät hankkeeseen.

Koulutuksessa korostettiin tiiveyden merkitystä energiakulutukseen sekä sisäilman laatuun. Käytiin läpi taustoja sille, miksi myös kosteusteknisesti on tärkeää kiinnittää huomiota läpivientien sekä märkätilojen oikeaan tekoon. Lisäksi tarkasteltiin suunnitelmien pohjalta rakennusten detalleja, joihin erityisesti rakennustyön aikana on kiinnitettävä erityistä huomiota.

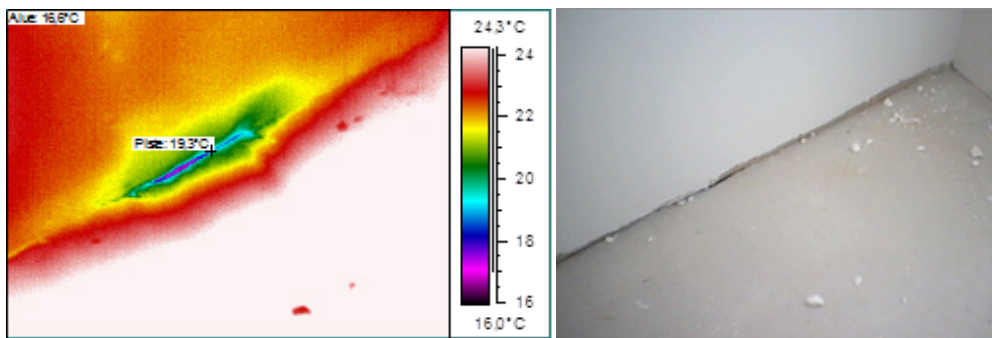
Huoneistokohtaisten tiiveysmittausten aikana tutkitut huoneistot alipaineistettiin 50 Pa:n alipaineeseen ja alipaineistuksen aikana lämpökameralla selvitettiin mahdolliset vaipan vuotokohdat. Huoneistoista mitattiin noin 1/3-osa, selkeitä vuotokohtia ulkoseinistä ei havaittu. Suurimmat lämpötilaerot ja kameralla löydetty vuodot esiintyivät ikkunoitten tiivisteitten kohdalla. Rakennuksen 1A:n kuvaushetkellä ulkolämpötila oli  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja rakennuksen 1B  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Mittauspiste 1  $19,7^{\circ}\text{C}$ , Mittausalue min  $16,5^{\circ}\text{C}$ , Mittausalue max  $27,8^{\circ}\text{C}$ , Huoneisto A45, puurunkoisen ulkoseinän ja ontelolaatta välipohjan liitos

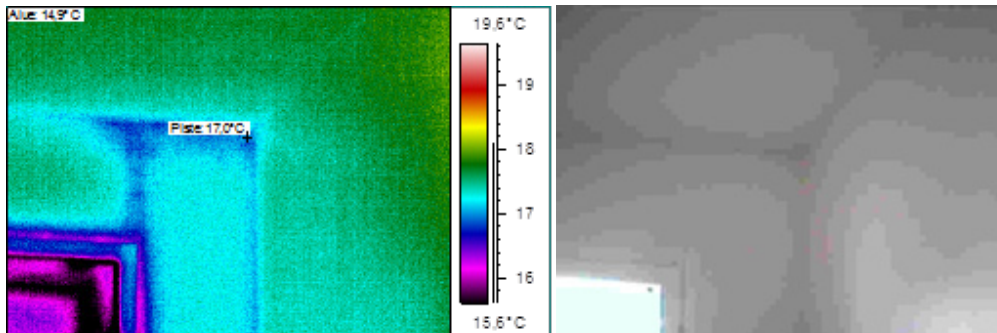


Mittauspiste 1 18,9°C, Mittausalue min 18,7°C, Mittausalue max 23,1°C, Huoneisto A46, kantava betoniseinän - ikkunaliitos



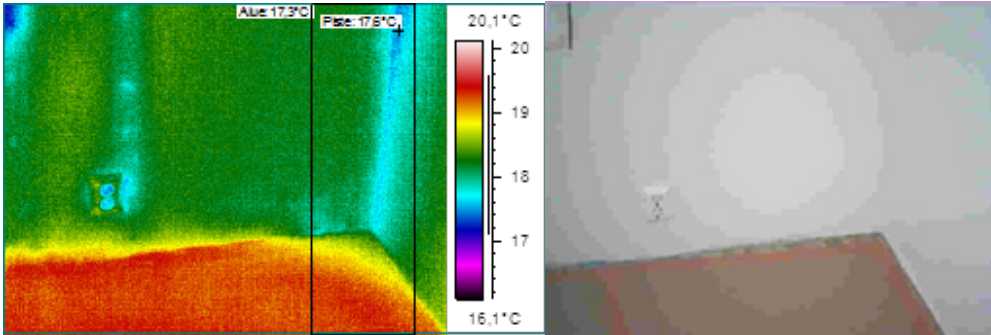
Mittauspiste 1 19,3°C, Mittausalue min 16,6°C, Mittausalue max 26,7°C, Huoneisto A49, puurunkoisen ulkoseinän ja ontelolaatan sekä väliseinän liitos

**Kuvio 8.1 Rakennus 1A, Lämpökuvauksessa havaitut huoneistojen vaipan lämpötilajakaumat**



Mittauspiste 1 17,0°C, Mittausalue min 14,9°C, Mittausalue max 18,2°C, Huoneisto B50 Puurunkoisen ulkoseinän kantavan betonipäätyseinän ja yläpohja ontelolaatan liitos





Mittauspiste 1 17,6°C, Mittausalue min 17,3°C, Mittausalue max 19,6°C, Huoneisto B43, puurunkoisen ulkoseinän, kantavan betonielementtiseinän ja välipohjaontelolaatan liitos

**Kuvio 8.2 Rakennus 1B, Lämpökuvauksessa havaitut huoneistojen vaipan lämpötilajakaumat**

Yllä oleviin kuviin on kerätty lämpökameralla kohdat, joissa kameralla löytyy suurimmat lämpötilaerot. Huoneiston B50 laskettu pistemäinen lämpötilaindeksi -50 Pa:n paine-erossa on 88 % ja huoneiston B43 98 %. Lämpötilaindeksi TI > 70 % täyttää hyvän tason vaatimukset. Indeksillä voidaan arvioida rakenteen lämpöteknistä toimivuutta silloin kun mittauksia ei voida tehdä ulkoilman lämpötilassa -5 °C.

Lämpötilaindeksi määritellään seuraavasti

$$TI = \frac{T_p - T_u}{T_s - T_u} * 100 \%, \text{ missä}$$

$T_p$  on mitattu pintalämpötila,

$T_s$  on sisälämpötila ja

$T_u$  on ulkolämpötila

Lämpötilaindeksi TI = 61 pistemäisille vioille vastaa olosuhteita, joissa kosteuden tiivistyminen on mahdollista sisäpintaan. Tällöin rakenne ei toimi oikein rakennusfysiikkaalisesti ja on mahdollista mikrobivaurion ja sen kautta terveyshaitan syntyminen.

Rakennusten tiiveysmittaus suoritettiin Minneapolis BlowerDoor model 4.1 puhallin- ja mittausyksiköllä. Puhallin asennettiin 4-kerroksen huoneiston parvekeoveen ja lisäksi 1.- ja 8.-kerroksessa seurattiin ulko- ja sisäilman paine-eroa. Mittauksissa voitiin todeta paine-eron seuraavan hyvin 4-kerroksen paine-eroa. Ennen mittauksia kaikkien huoneistojen ilmanvaihtokanavat teipattiin huolellisesti. Ilmanvuotoluku n50 kuvaa kuinka monta kertaa ilmatilavuus vaihtuu tunnissa – 50 Pa:n paine-erolla ja q50 on ilmanvuotoluku vaippapinta-alaa kohti.

**Taulukko 8.1 Rakennusten tiiveysmittaustulokset**

	$n_{50}$ [1/h]	$q_{50}$ [m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> ]
Rakennus 1A	0.7	2,30
Rakennus 1B	0.6	1,98

Alla olevaan taulukkoon on kerättyä myös rakennuksen 1B huoneistokohtaisten tiiveysmittausten tulokset.  $V^*$  on ilmatilavuusvirtaus 50 Pa:n paine-eron aiheuttamiseksi,  $V$  [m<sup>3</sup>] on huoneiston ilmatilavuus ja  $A_E$  [m<sup>2</sup>] on vaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna. Huoneistokohtaiset mittaukset eivät anna oikeaa kuvaa kerrostalon tiiveydestä. Suositeltavaa on kerrostalon tiiveysmittaus tehdä kerralla tai, mikäli rakennuksen tilavuus on suuri, pyrkiä osastoimaan rakennus esim. porrashuoneistoittain.

**Taulukko 8.2 Rakennuksen 1B huoneistokohtaisten tiiveysmittausten tulokset**

Huoneisto	$V^*$	$V$	$n_{50}$	$A_E$	$q_{50}$
B50	264	150	1,8	200	1,3
B43	158	150	1,1	200	0,8
B40	229	157	1,5	202	1,1
B42	196	109	1,8	151	1,3
B39	335	190	1,8	233	1,4
B37	169	116	1,5	158	1,1
B34	194	129	1,5	177	1,1

Kerrostaloille ilmanvuotoluku  $q_{50}$  saa olla enintään 3 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>. Rakennus 1B on tiiveysmittausluokituksen mukaan luokassa A.

Suoritettujen lämpökuvausten ja tiiveysmittausten mukaan rakentamisen laatu on hyvä ja voidaan todeta, että laatu myös jonkin verran parani toisen kerrostalon rakentamisen aikana.

Rakentamisen laatuun vaikutti suurelta osin työntekijöiden koulutustilaisuudet. Koulutuksessa saadaan työntekijät motivoitua asetettuihin tavoitteisiin ja kun työntekijät tietävät, että laatua seurataan sekä myös testataan tiiveysmittauksin, voidaan rakentamisen laatuun myös vaikuttaa.

Energiatehokas rakentaminen edellyttää rakennusaikana huolellista ja laadukasta rakentamista. Jo tämän päivän energiamääräysten 2012 mukaisella rakentamisella päästään laadukkaalla rakentamisella kerrostaloissa uusiutuvia energialähteitä hyödyntämällä jo lähes nk. nollaenergiatasoon. Toki tämä edellyttää pientä kehitystä teknisissä järjestelmissä sekä myös käyttäjien asenteissa tiedostamista miten energiaa kulutetaan.

Rakentamisen laadun merkitys kosteus- ja homeongelmiin on tiedostettu vuosikymmeniä mutta helposti rakennusaikana unohdettu. Pienillä rakennusvirheillä on saatu aikaan sisäilmaongelmia, joista käyttäjät kärsivät. Vanhat asenteet ja rakennustavat eivät vastaa energiatehokkaan rakentamisen vaatimuksia ja näiden asenteiden muuttaminen edellyttää jatkuvaa kouluttamista. Myös tiiveysmittaukset yhdistettynä lämpökuvauksilla on määräystasolla saatava käytänteeksi jokaisessa uudis- ja korjausrakennuskohteessa.



## 9 LASKENTAMALLI

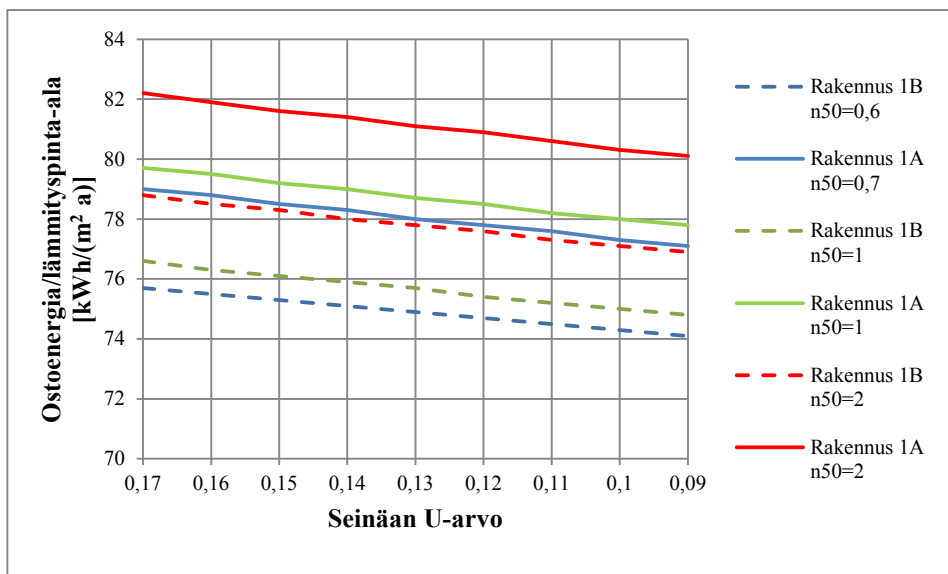
Hankkeen aikana on kehitetty Excel-pohjainen laskentaohjelma energian kulutuksen ja –tuoton arvioinniksi. Pohjalla voidaan arvioida, mikä vaikutus rakennusten osto-energiatarpeeseen on rakenteiden U-arvojen parantamisella, IV-koneen hyötysuhteen parantamisella, tiiveyden parantamisella, lämpöpumpun tehon parantamisella. Pohjaan voidaan syöttää eri lähtöarvoja sekä sen jälkeen arvioida mikä vaikutus kulakin muuttujalla on energian kulutukseen. Alkuaan tavoitteena oli pohjaan saada mukaan myös eri tekijöiden kustannustietous, mutta tämä osoittautui hankalaksi joh-tuen liian monesta muuttujasta. Pohja antaa vertailtavuuden energiakulutuksen, kilowattituntien suhteen. Pohjassa on mukana rakenteen U-arvon laskentasisivü, U-arvon laskenta perustuu standardiin SFS EN ISO 6946 /18/.

Lähtötietosisivulla syötetään asetetut suunnittelun tavoitearvot: vaipan U-arvot pinta-aloineen, Rakennusta koskevat tiedot, Rakennukselle asetettu tiiveysvaatimus, IV-koneen LTO:n vuosihyötysuhde, lämpöpumpun tehotavoite. Tulosteena saadaan kulutuserittely sekä D3:n mallipohjan mukainen E-lukutuloste

Pinta-ali tiedot:			
Rakennusosat			
	Pintala m <sup>2</sup>	Uarvo	Ominaislämpöhäviö Hjoht
Ulkoseinät	2046	0,17	347,82
Yläpohja	421	0,09	37,89
Alapohja maanvast.	421	0,24	101,04
Ikkunat	379	1	379
Ulko-ovet	19,5	1	19,5
KOHDETIEDOT: Teirinkatu 1B		Ilmanvaihdon hyötysuhde $\eta = 0,56$	
Paikkakunta	Vaasa	Lämpöpumpun teho, tuotto-osuus tilojen ja LKV:n energiantarpeesta	
Rakennusvuosi	2011	$Q_{Lp}/Q_{\text{lämmitys,tilat,LKV}} =$	1
Bruttoala (brm2)	3631	Tilojen mitoistusteho $\Phi_{\text{lämmax}} = 96$ kWh	
Huoneistoala (htm2)	2646,5	Maalämpöpumpun lämpötehotuotto $\Phi_{\text{lpn}} = 100$ kWh	
Lämmityspinta-ala [m <sup>2</sup> ]	3380	SPF <sub>tilat</sub> = 3,3	
Kosteat tilat (m2)		SPF <sub>LKV</sub> = 2,3	
Huoneistoja (kpl)	51		
Rakennustyyppi	Asuinkerrostalo		
Rakennuksen ilmatilavuus [m <sup>3</sup> ]:	8643		
Henkilömäärä	82		
Ilmanvaihto [kertaa/tunti]	0,5		
Ilmanvuotoluku n <sub>50</sub>	0,6		
IV-koneen vuorokautinen käyntiaikasuhde [h/24 h]		1	
IV-koneen viikottainen käyntiaikasuhde [vrk/7 vrk]		1	

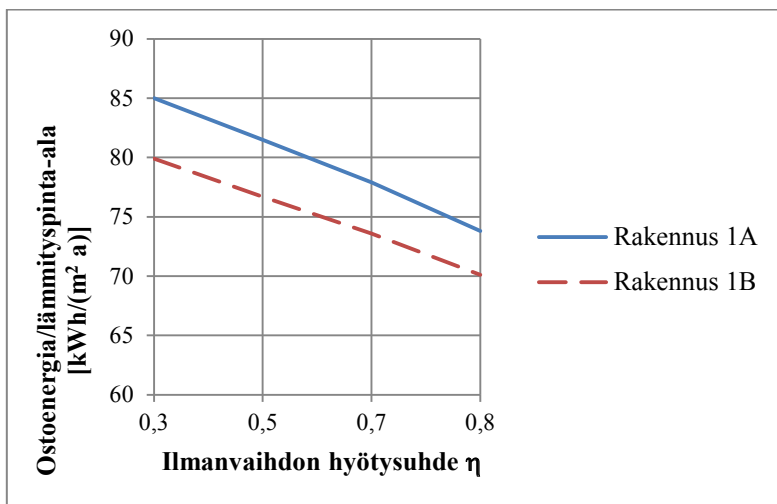
Kuvio 9.1 Laskentapohjan lähtötietosisivü

Seuraavassa on tarkasteltuna laskentamallilla eristepaksuuden ja tiiveyden vaikutus rakennusten ostoenergiatarpeeseen. Kuviossa 9.2 on annettu ei-kantavan seinän U-arvon ja ilmatiiveysluvun  $n_{50}$  vaikutus rakennusten ostoenergiatarpeeseen. U-arvon laskennassa eristeenä on käytetty Isover KL33 eristettä ja 50 mm:n lisäeristeenä Isover RKL31. Eristepaksuus 150 mm+50 mm vastaa U-arvoltaan 0,17 W/(m<sup>2</sup> K) ja eristepaksuus 250 mm+50 mm vastaa U-arvoltaan 0,12 W/(m<sup>2</sup> K). U-arvo 0,09 vastaa eristepaksuutta 400 mm+50 mm. Rakennuksessa 1A muiden rakenneosien, yläpohja, alapohja, ikunat ja ovet, eristämisen taso vastaa 2007 määräysten mukaista tasoa sekä rakennuksen 1B vuoden 2010 määräyksiä. Rakennuksessa 1B seinän eristekerroksen paksuntaminen 200 mm:stä 300 mm:iin säästää vuositasolla energiaa 3,5 MWh eli euroissa 530 €, kun kilowattitunnin kustannus siirtomaksuineen on 0,15 €. Eristekerroksen paksuntamisesta aiheutuva lisäkustannus tämän päivän nettihinnaston mukaan on 18946 €. Kerrostaloissa pelkästään seinän eristekerroksen paksuntaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Huomattavampi taloudellinen merkitys on työn laadulla ja sen kautta rakenteiden tiiveydellä, mistä ei aiheudu lisäkustannuksia.



**Kuvio 9.2** Seinän U-arvon ja tiiveysluvun  $n_{50}$  vaikutus rakennusten ostoenergiamäärään

Alla kuvassa 9.3 on annettu myös IV-koneen LTO:n hyötysuhteen  $\eta$  vaikutus rakennusten ostoenergiamäärään. LTO:n hyötysuhteen parantamisen vaikutus 0,3:sta 0,8:aan rakennuksessa 1A säästää ostoenergiaa 37,9 MWh ja vastaavasti rakennuksessa 1B 33,1 MWh vuositasolla.



Kuvio 9.3 Ilmanvaihtokoneen hyötysuhteen vaikutus rakennusten ostoenergiamäärään





## 10 YHTEENVETO

Kuluvan vuosikymmenen aikana rakennusten energiatehokkuutta tullaan parantamaan siten, että vuoden 2020 lopussa tavoitteena on lähes nollaenergiatalo. Suomen olosuhteissa tavoitteeseen pääseminen asettaa rakentajille suuria haasteita niin talotekniikassa kuin myös rakentamisessa. Energiatehokkuuden parantuessa on löydettävä oikea, optimaalinen eristämisen taso, panostettava rakentamisen laatuun, on kehitettävä uusia tehokkaita taloteknisiä järjestelmiä sekä ennen kaikkea rakennusten käyttäjien on tiedostettava oikea asenne energian käyttötottumuksille.

Lakea Oy:n rakennuttamat kaksi vuokratilaa Teirinkatu 1A ja 1B ovat tilasuunnitultaan identtiset, mutta eristämisen taso on eri. Ensimmäinen vastaa vuoden 2007 määräyksiä ja jälkimmäinen vuoden 2010 ohjeita. Energiatuoton osalta rakennukset ovat omavaraisia, tilojen lämmitysenergia ja lämmin käyttövesi tuotetaan maalämpöpumppujen ja aurinkokerääjien avulla. Rakennuksen 1A ympärillä on 14 porakaivoa sekä rakennuksen 1B 10 kaivoa, joiden syvyys on 200 metriä.

Rakennuksen 1B kolmeen kaivoon on asennettuna lämpötila-anturit 100 m:n ja 200 m:n syvyyteen, joista on seurattu ja jatkossa seurataan kalliopohjassa tapahtuvia lämpötilan muutoksia. Seuranta on tehty vasta vuoden ja näin lyhyen jakson perusteella ei voi tehdä johtopäätöksiä kallioperässä tapahtuvista muutoksista, vaikka aurinkokerääjien energiatuotto on kokonaisuudessaan syötetty porakaivoihin. Jatkossa kerääjien tuotto hyödynnetään myös käyttöveden lämmittämiseen. Mikäli aurinkokerääjien varaajan lämpötila ei riitä lämpimän käyttöveden tuottoon, syötetään lämpö porakaivoihin. Riittääkö tämä lämpö pitämään kalliopohjan lämpötilan alkuperäisen suuruisena, tätä tullaan myös jatkossa seuraamaan.

Vaikka rakennusten eristämisen taso on erilainen, on paremmin eristetyin rakennuksen, rakennus 1B, energiakulutus ollut suurempi. Matalaenergiarakennuksessa tarvittavasta ostoenergiämäärästä suurin osuus on asukkaiden kulutus mukaan lukien lämmin käyttövesi. Rakennuksen 1B asukkaiden kulutus mukaan lukien lämmin käyttövesi vuonna 2012 oli 30 MWh suurempi kuin asukkaiden kulutus rakennuksessa 1A. Toisaalta tilojen lämmitysenergian laskennallinen tarve rakennuksessa 1B on 43 MWh pienempi kuin rakennuksessa 1A. Paremmalla eristyksen tasolla saavutettu energian säästö on lähes tulkoon kulunut asukkaiden käyttö- ja kulutustottumuksissa. Matalaenergiarakennuksissa ja jatkossa lähes nollaenergiarakennuksissa käyttäjien energiankulutus suhteessa rakennuksen toteutuneeseen kokonaiskulutukseen kasvaa. Tällöin asukkaiden käyttö- ja kulutustottumuksiin voidaan parhaiten vaikuttaa huomioimalla kulutus suoraan vuokrassa tai hoitovastikkeessa.

Kerrostaloissa voimassaolevat rakennusten U-arvovaatimukset matalaenergiarakentamisessa ovat riittävät silloin kun lämmöntuotossa hyödynnetään maalämpöä lisätynä aurinkokerääjillä. Energiatehokas rakentaminen edellyttää suunnitteluvaiheessa kokonaisuuden hallintaa. Suunnittelun alussa asetetaan tavoite rakennuksen energiatehokkuudelle ja tavoitteen saavuttamiseksi suunnittelun aikana on tehtävä eri vaihtoehtoisia tarkasteluja optimaalisen eristepaksuuden, rakennuksen lämmöntuoton, taloteknisten järjestelmien löytämiseksi.

Riippumatta eristepaksuudesta tuuletusraolla olevassa seinässä eristeen ulkopinnan lämpötila on sama kuin ulkoilman ja sisäpinnan lämpötila sama kuin sisäilman, toki pieni vaikutus sisäpinnan lämpötilaan on sisäpuolen pintamateriaalilla. Lämpötilan muutos tapahtuu eristekerroksessa. Paksuissa eristekerroksissa nk. kastepiste siirtyy syvälle, lähelle sisäpintaa. Mikäli konvektion seurauksena tapahtuu ilmavuotoja kosteus tiivistyy ja jää syvälle paksuun eristekerrokseen, mistä sen poistuminen on ajan suhteen hidasta. Paksujen eristeiden käyttö edellyttää rakenteilta tiiveyttä, kosteus-konvektiota ei saa olla. Mikäli ei tapahdu ilmavuotoja paksuissa eristekerroksissa ei myöskään ole riskiä kosteuden tiivistymiseen.

Tiiviiden uretaanipohjaisten eristeiden käyttö eristeenä edellyttää tarkkaa harkintaa. Jos käytetään uretaania koko eristekerroksessa, on kantavien puurakenteiden tai betonirakenteiden oltava todella kuivia. Jo runkokuun 18 % kosteuspitoisuus ja betonisen sisäkuoren 80 % suhteellinen kosteus, kun sisäilman RH on 50 % ja lämpötila 23 °C sekä ulkoilman RH on 80 % ja lämpötila – 10 °C, laskentamallin antamien tulosten mukaan pitää rakenteen suhteellisen kosteuden korkeana. Uudisrakentamisessa rakenteiden yo kosteuspitoisuuksiin pääseminen ei kuitenkaan aikataulullisista syistä ole aina mahdollista ja tällöin riski kosteus- homevaurioon on olemassa. Jos käytetään uretaanin ohella normaali eristeitä, tiivis korkeintaan 50 mm paksu uretanikerros on asennettava tunnetusti sisäpintaan ja vesihöyryä läpäisevät eristeet ulkopintaan.

Matalaenergiarakentamisessa on erityisen tärkeää rakentamisen laatu ja sen seurauksena rakenteiden tiiveys. Kosteus- ja homeongelmia ei synny, mikäli nämä asiat on huomioitu suunnitteluvaiheessa detaljeissa sekä suunnitelmat rakennustyömaalla toteutettu huolellisesti. Toki ensisijaisen tärkeää on työmaalla huolehtia materiaalien säilytyksestä, ettei käytetä kastuneita materiaaleja, ja huomioidaan myös rakennusai-kataulussa eri työvaiheissa tarvittava materiaalien kuivumisaika.

## LÄHTEET

- /1/ D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö, Määräykset ja ohjeet 2012
- /2/ D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö, Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta, Ohjeet 2012
- /3/ Dick Bjökholz, Lämpö ja kosteus, Rakennusfysiikka, Rakennustieto 1997
- /4/ Carl-Eric Hagentoft, Introduction to Building Physics, Student Litteratur, Lund 2001
- /5/ Adrian Bejan, Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc. 1992
- /6/ Sakari Lukkarinen, Heat, Air and Moisture Transport in Building Physics Applications, Theory Background, PowerPoint-esitys 2010
- /7/ Sakari Lukkarinen, Comsol Multiphysics Heat and Moisture Calculations, PowerPoint-esitys 2010
- /8/ Hartwig M. Künzl, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 1995
- /9/ Technical Note AIVC 28, A guide to air change efficiency, February 1990
- /10/ Nordtest Method, NT VVS 019, Edition 2, Buildings – Ventilation Air: Local Mean Age, 1988
- /11/ Nordtest Method, NT VVS 047, Buildings – Ventilating Air: Mean Age of Air, 1985
- /12/ Anna-Karin Ahlström, Bergvärmeanläggningar där frysning i borrhål orsakar hopklämda kollektorslangar, Luleå Tekniska Universitet, examensarbete 2004
- /13/ Lämpökaivojen käyttö rakennuksen lämmityksessä, Opinnäytetyö Ammattikorkeakoulu Metropolia 2012
- /14/ Juha Pitkäranta, Maalämmön kehittäminen kaivamattomalla tekniikalla, Opinnäytetyö Satakunnan ammattikorkeakoulu 2012
- /15/ Mika Korpi, Kerrostalon tiiveysmittaus, Opinnäytetyö Yamk, Vaasan ammattikorkeakoulu, 2011
- /16/ Tomi Honkala, Parvekekannattimen aiheuttama kylmäsilta, Opinnäytetyö Vaasan ammattikorkeakoulu 2013

/17/Nibe, Maalämpöpumppuopas, NIBE MLP-Opas 1135 – 4

/18/SFS-EN ISO 6946, Rakenne ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä

/19/ SFS EN ISO 10456, Rakennusaineet ja -tuotteet, Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet, Taulikoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi

/20/ Jussi Pöllä, Tilaelementtien energiatehokkuuden tutkiminen, Opinnäytetyö Vaasan ammattikorkeakoulu 2011

/21/ Tapani Hahtokari, Rakennusfysiikan opetusmoniste Lämpö Kosteus Akustiikka, Vaasan ammattikorkeakoulu

## **LIITTEET**

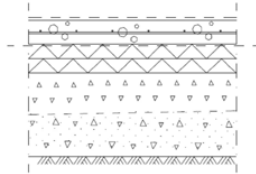
Liite 1, Rakennusten 1A ja 1B rakennetyypit

Liite 2, Rakennusten tiiveysmittausraportit

Rakennetyypit:

Rakennus 1A

MAANVARAINEN ALAPOHJA

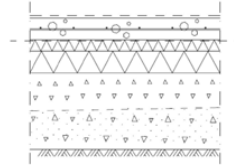


- 100 mm Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselityksen mukaan Teräsbetonilaatta 100 mm, BY 45 mukaan, luokka A-4-30, Rauditus 6-150 kesk. verkko, laatan yläpinta teräshierrettään, osittain tasoitetaan ja kevythiotaan Suodatinkangas
- 120 mm Lämmöneristyslevy, umpisoluiinen paisutettu polystyreeni EPS 100 Lattia, 60+60 mm. Levyt asennetaan huolellisesti saumat limittäin, limitys > 300 mm. Eristelevylt kannakoidaan laatasta syöpymättömillä kannakkeilla > 4 kpl/m<sup>2</sup>
- 200 mm Koneellisesti tiivistetty, salaojitettu sepelitäyttö, raekoko raekoko 8-16 mm (yläpinta 0-32 mm). Tiivistys enintään 300 mm:n kerroksin. Tiivey luokka 2 (RIL 132 mukkan) Kaivettu perusmaa HUOM!  
- Irrotuskaista betonilaatan ja pystyrakenteiden välissä-  
- Tiiliseinän kohdalla laatasta vahvistus H=50 mm, B=300 mm. Rauditus 2T12 jp 600 mm

U-arvo: 0.24 W/m<sup>2</sup>/K (reuna)  
0.21 W/m<sup>2</sup>/K (muualla)

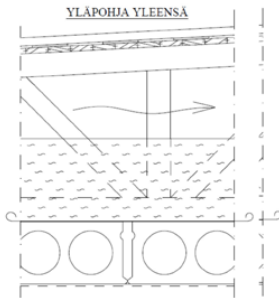
Rakennus 1B

MAANVARAINEN ALAPOHJA



- 100 mm Pintamateriaali ja -käsittely rakennusselityksen mukaan Teräsbetonilaatta 100 mm, BY 45 mukaan, luokka A-4-30, Rauditus 6-150 kesk. verkko, laatan yläpinta teräshierrettään, osittain tasoitetaan ja kevythiotaan Suodatinkangas
- 150 mm Lämmöneristyslevy, umpisoluiinen paisutettu polystyreeni EPS 100 Lattia, 100+50 mm. Levyt asennetaan huolellisesti saumat limittäin, limitys > 300 mm. Reuna-alueilla +50 mm (yhteensä 200 mm) 1 m:n kaistalla
- 200 mm Koneellisesti tiivistetty, salaojitettu sepelitäyttö, raekoko raekoko 8-16 mm . Koneellisesti tiivistetty murskesoratäyttö 0-65 mm, (yläpinta 0-32 mm) Tiivistys enintään 300 mm:n kerroksin. Tiivey luokka 2 (RIL 132 mukkan) Kaivettu perusmaa HUOM!  
- Irrotuskaista betonilaatan ja pystyrakenteiden välissä-  
- Tiiliseinän kohdalla laatasta vahvistus H=50 mm, B=300 mm. Rauditus 2T12 jp 600 mm

U-arvo: 0.16 W/m<sup>2</sup>/K (reuna)  
0.16 W/m<sup>2</sup>/K (muualla)

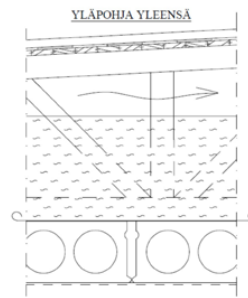


Pintamateriaali ja -käsittely, kts rakennusselitys Vesieristys katon käyttöluokan Ve40 mukaan Kermeinä kumbitumikermi K-PL 80/4000+K-MS 170/3000

- 23 mm Raakaponttilauditus 23\*95, Puurakenteiset kattokannattajat k900, sijoitus ja puurakenteiden koot rakennepiirustusten mukaisesti, Tuuletettu ullakotila jaettuna rakennusmääräysten mukaisiin osastoihin EI30luokan rakentien
- 350 mm Puhallusvillaeriste vähintään 300 mm. Puhallus suoritettava huolellisesti noudattaen materiaalitöimittäjän ja suunnittelijoiden antamia ohjeita. Katon reuna-alueilla asennetaan tuulenohjaimet Höyrynsulkumuovi SFS 4224 luokka E, saumat 200 mm limitettyinä ja teipattuina

- 265 mm Ontelolaatta rakennepiirustusten mukaan Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan HUOM!  
Yläpohjan ontelotilan huoltoluukut arkkitehtisuunnitelmien mukaan

U-arvo 0.15 W/m<sup>2</sup>/K



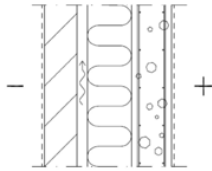
Pintamateriaali ja -käsittely, kts rakennusselitys Vesieristys katon käyttöluokan Ve40 mukaan Kermeinä kumbitumikermi K-PL 80/4000+K-MS 170/3000

- 23 mm Raakaponttilauditus 23\*95, Puurakenteiset kattokannattajat k900, sijoitus ja puurakenteiden koot rakennepiirustusten mukaisesti, Tuuletettu ullakotila jaettuna rakennusmääräysten mukaisiin osastoihin EI30 luokan rakentien
- 350 mm Puhallusvillaeriste vähintään 450 mm. Puhallus suoritettava huolellisesti noudattaen materiaalitöimittäjän ja suunnittelijoiden antamia ohjeita. Katon reuna-alueilla asennetaan tuulenohjaimet Höyrynsulkumuovi SFS 4224 luokka E, saumat 200 mm limitettyinä ja teipattuina

- 265 mm Ontelolaatta rakennepiirustusten mukaan Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan HUOM!  
Yläpohjan ontelotilan huoltoluukut arkkitehtisuunnitelmien mukaan

U-arvo 0.09 W/m<sup>2</sup>/K

ULKOSEINÄ (KANTAVA)



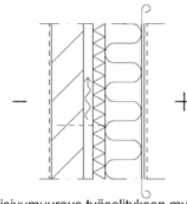
- 130 mm Säänkestävä julkisivumuuraus työselityksen mukaan, laasti M100/600
- 40 mm Tuuletusrako
- 175 mm Tuulensuojamateriaalilla Paroc WPS 1n tai vastaava Muuraussiteet ruostumatonta terästä D4, vähintään 4 kpl/ m2
- 160 mm Kantava paikallavalettu betoniseinä rakennepiirustusten mukaan

**HUOM!**

- Sokkeliosuuden ulkokuoren päälle tulevan ensimmäisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi tiilikuoren taustan tuuletuksen varmistamiseksi. Samoin aukkojen yläpuolella toisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi.
- Tiiliverhoukseen T8 kuumasinkitty harjateräs tai E9 rst-harjateräs k900 ellei suunnitelmassa muuta mainita
- Tiiliverhoukseen elastisella kitillä saumatut liikuntasaumut enintään k12 m
- Aukkojen ympärille apukarmit

U-arvo 0.22 W/m2/K

ULKOSEINÄ (EI KANTAVA)



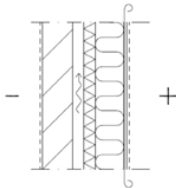
- 130 mm Säänkestävä julkisivumuuraus työselityksen mukaan, laasti M100/600
- 40 mm Tuuletusrako
- 50 mm Tuulensuoja ja lämmöneriste Isover RKL-31 Facade 50 mm tai vastaava Puurunko 50\*150 k600+Lämmöneriste Isover KL33-150 mm tai vastaava Muuraussiteet ruostumatonta terästä D4, vähintään 4 kpl/ m2
- 150 mm
- 160 mm Kantava elementtibetonibetoniseinä rakennepiirustusten mukaan Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan

**HUOM!**

- Sokkeliosuuden ulkokuoren päälle tulevan ensimmäisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi tiilikuoren taustan tuuletuksen varmistamiseksi. Samoin aukkojen yläpuolella toisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi.
- Tiiliverhoukseen T8 kuumasinkitty harjateräs tai E9 rst-harjateräs k900 ellei suunnitelmassa muuta mainita
- Tiiliverhoukseen elastisella kitillä saumatut liikuntasaumut enintään k12 m
- Aukkojen ympärille apukarmit

U-arvo 0.17 W/m2/K

ULKOSEINÄ (EI KANTAVA)



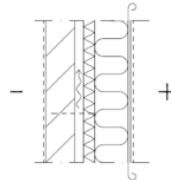
- 130 mm Säänkestävä julkisivumuuraus työselityksen mukaan, laasti M100/600
- 49 mm Tuuletusrako
- 50 mm Tuulensuojamateriaalilla Paroc WPS 3n 50 mm tai vastaava
- 125 mm Puurunko 50\*125 k600 + mineraalivilla Paroc eXtra 125 mm tai vastaava Muuraussiteet ruostumatonta terästä D4, vähintään 4 kpl/ m2
- 0.2 mm Höyrynsulkumuovi SFS 4225 luokka E, saumat 200 mm limitettyä ja teipattuna
- 13 mm Kipsilevy Gyproc GEK 13 RO, kiinnitys valmistajan ohjeiden mukaan

**HUOM!**

- Rungon alajuoksu painekyllästetty
- Sokkeliosuuden ulkokuoren päälle tulevan ensimmäisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi tiilikuoren taustan tuuletuksen varmistamiseksi. Samoin aukkojen yläpuolella toisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi.
- Tiiliverhoukseen T8 kuumasinkitty harjateräs tai E9 rst-harjateräs k900 ellei suunnitelmassa muuta mainita
- Tiiliverhoukseen elastisella kitillä saumatut liikuntasaumut enintään k12 m

U-arvo 0.23 W/m2/K

ULKOSEINÄ (EI KANTAVA)



- 130 mm Säänkestävä julkisivumuuraus työselityksen mukaan, laasti M100/600
- 40 mm Tuuletusrako
- 50 mm Tuulensuoja ja lämmöneriste Isover RKL-31 Facade 50 mm tai vastaava
- 150 mm Puurunko 50\*150 k600 + lämmöneriste Isover KL33-150 mm tai vastaava Muuraussiteet ruostumatonta terästä D4, vähintään 4 kpl/ m2
- 0.2 mm Höyrynsulkumuovi SFS 4225 luokka E, saumat 200 mm limitettyä ja teipattuna
- 13 mm Kipsilevy Gyproc GEK 13 RO, kiinnitys valmistajan ohjeiden mukaan

Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan

**HUOM!**

- Rungon alajuoksu painekyllästetty
- Sokkeliosuuden ulkokuoren päälle tulevan ensimmäisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi tiilikuoren taustan tuuletuksen varmistamiseksi. Samoin aukkojen yläpuolella toisen tiilikerroksen joka kolmas pystysauma jätetään avoimeksi.
- Tiiliverhoukseen T8 kuumasinkitty harjateräs tai E9 rst-harjateräs k900 ellei suunnitelmassa muuta mainita
- Tiiliverhoukseen elastisella kitillä saumatut liikuntasaumut enintään k12 m

U-arvo 0.17 W/m2/K



LIITE 2

Raportti No: TA2010-136, Rakennus 1A

Pvm: 17.8.2010

Tilaaja: Matalaenergia rakentaminen kerrostalotuotannossa - projekti

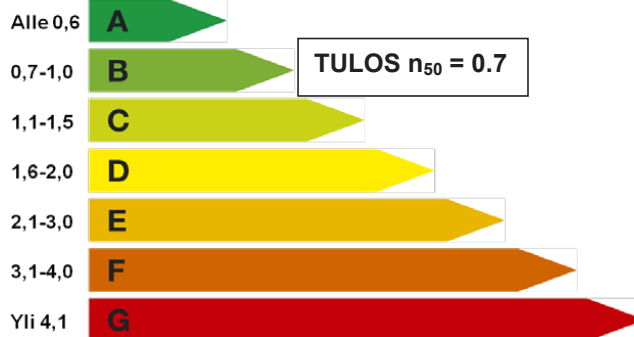
Kohde: Kiinteistö Oy Vaasan Kustaanportti, Teirinkatu 2, 65350 Vaasa

Tekijä: Mika Korpi

## Tiiviysmittausraportti



### TIIVIYSMITTAUSLUOKITUS



Mika Korpi  
Laboratorioinsinööri





---

LIITE 2

TIIVIYSMITTAUSRAPORTIN SISÄLLYSLUETTELO:

1. KOHTEEN YLEISTIEDOT	
1.1 Rakennuksen tunniste- ja laajuustiedot	3
1.2 Tutkimuksen tilaaja	3
1.3 Tutkimuksen tavoite	3
1.4 Tutkimuksen tekijä	3
1.5 Tutkimusajankohta	3
2. LÄHTÖÄRVOT	
2.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet	3
2.2 Rakennuksen ilmatilavuus	5
2.3 Rakennuksen vaipan ala	5
2.4 Tiivysmittauksen kattavuus	5
2.5 Käytetyt mittalaitteet ja koejärjestelyt	5
3. TULOKSET	
3.1 Mittaustulokset	6
3.2 Tulos ja sen arviointi	6
3.3 Ilmavuotopaikat	6
4. MITTAUSPÖYTÄKIRJA	7

Liitteet:

LIITE 1 pohjapiirustus 1 krs.  
LIITE 2 pohjapiirustus 4 krs.  
LIITE 3 pohjapiirustus 8 krs.  
LIITE 4 valokuvia kohteesta

**1. Kohteen yleistiedot**

---



---

LIITE 2

**1.1 Rakennuksen tunnist- ja laajuustiedot**

Osoite: Kiinteistö Oy Vaasan Kustaanportti, Teirinkatu 2, 65350 Vaasa

Kohde: Loppusiivousta vailla oleva 8-kerroksinen kerrostalo. Talossa yhteensä 51 asuntoa. Rakennus on betonielementtirakenteinen. Välipohjat ontelolaatoista. Päätyseinät betonielementeistä, pitkittäissivut puurunkoiset, joissa höyrünsulkuna muovi. Alakerroksen lattiarakenteena maanvarainen betonilaatta.

**1.2 Tutkimuksen tilaaja** Matalaenergia rakentaminen kerrostalotuotannossa - projekti

**1.3 Tutkimuksen tavoite** Rakennuksen ilmapuotoluvun määrittäminen

**1.4 Tutkimuksen tekijä** Laboratorioinsinööri Mika Korpi  
Vaasan Ammattikorkeakoulu  
Technobothnia  
Puuwillakuja 3  
65200 Vaasa  
mko@puv.fi  
040-5223462

**1.5 Tutkimusajankohta** 13.8.2010 klo 16 – 17.00. Tutkimuksessa läsnä Tapani Hahtokari.

**2. Lähtöarvot**

**2.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet**

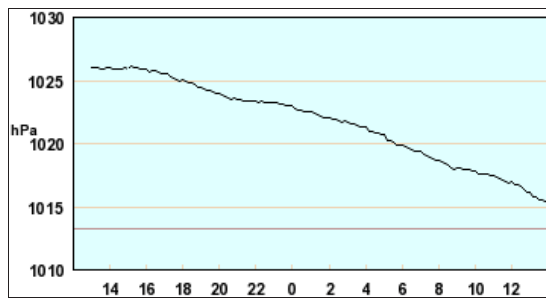
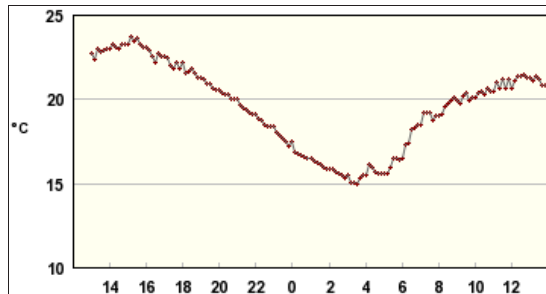
Ulkolämpötila mittaushetkellä oli +24 °C. Sisälämpötila +24 °C (Waisala HMI41).

Tuulennopeudeksi mittauskohdeessa arvioitiin 1-3 m/s. Rakennus on tuulelle altis.

Painesuhteet rakennuksessa ennen mittausta: 1. krs 0 Pa, 4. krs 0 Pa, 8. krs -1... -2 Pa.



LIITE 2



Ukolämpötila +24 °C Tuulen nopeus 1-3 m/s, suunta pohjoinen. Ilmanpaine ~1026 hPa,  
(<http://www.ilmatieteenlaitos.fi>) Vaasa, lentokenttä.



---

LIITE 2

### 2.2 Rakennuksen ilmatilavuus

Rakennuksen ilmatilavuudeksi mitattiin 8643 m<sup>3</sup>.

### 2.3 Rakennuksen vaipan ala

Rakennuksen vaipan alaksi sisämittojen mukaan mitattiin 2624 m<sup>2</sup>.

### 2.4 Tiiviysmittauksen kattavuus

Rakennuksen koko ulkovaippa. Tekniset tilat, porraskäytävä, hissikuilu, väestönsuoja ja varastotilat kuuluivat mitta-alueeseen.

### 2.5 Käytetyt mittalaitteet ja koejärjestelyt

Kohteessa tehtiin lämpötilamittaukset Waisala HMI41-mittarilla ja HMP 42 - mittapäällä (sarjanumero E2530001, kalibroitu kesäkuu 2009) Tiiviysmittauslaitteistona käytettiin Minneapolis BlowerDoor model 4.1 puhallin- ja mittaussyksikköä. Kalibroitu 13.8.2009. Paine-ero mittaukset rakennuksen ala- ja yläkerrassa suoritettiin TSI DPCALC-8710-mittarilla.

Ennen tiiviysmittausta huoneistojen liesituulettimet, koneelliset tulo- ja poistokanavat teipattiin / tukittiin. Viemäriputket / lattiakaivot täytettiin vedellä. Lisäksi vielä sälekaihtimia varten poratut reiät ikkunoissa teipattiin. Rakennuksen kaikki väli ovet olivat auki mittauksen ajan. Porraskäytävän ja hissikuilun huippumurit säkitettiin rakennuksen katolla. Varasto- ja teknistentilojen IV-koneesta tukittiin tulo- ja poistokanava. Puhallin asennettiin neljännen kerroksen huoneiston nro: 20 parveke-oveen.

Mittaus suoritettiin standardin SFS-EN 13829 B-menetelmän mukaisesti. Mittaus suoritettiin alipainekokein.

## 3. Tulokset

### 3.1 Mittaustulokset

Rakennuksen ilmavuotoluku  $n_{50} = V^* / V$ ,  
missä,



LIITE 2

$V^*$  = ilmantilavuusvirta, joka tarvitaan 50 Pa:n paine-eron aiheuttamiseksi rakennuksen vaipan yli ( $m^3 / h$ )

$V$  = rakennuksen sisätilavuus ( $m^3$ )

$n_{50} = 6975 / 8643 = 0.7 \text{ 1/h}$ .

Rakennuksen ilmavuotoluku vaipan alaa kohti

$Q_{50} = n_{50} \times V / A_E$

missä,

$A_E$  = rakennuksen vaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna ( $m^2$ )

$q_{50} = 0.7 \times 8643 / 2624 = 2.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$

**3.2 Tulos ja sen arviointi** Mitattu ilmavuotoluku 0.7 1/h sijoittuu tiiviysluokituksen B-luokkaan. Mittaustarkkuus käytetyllä menetelmällä on noin  $\pm 10\%$ .

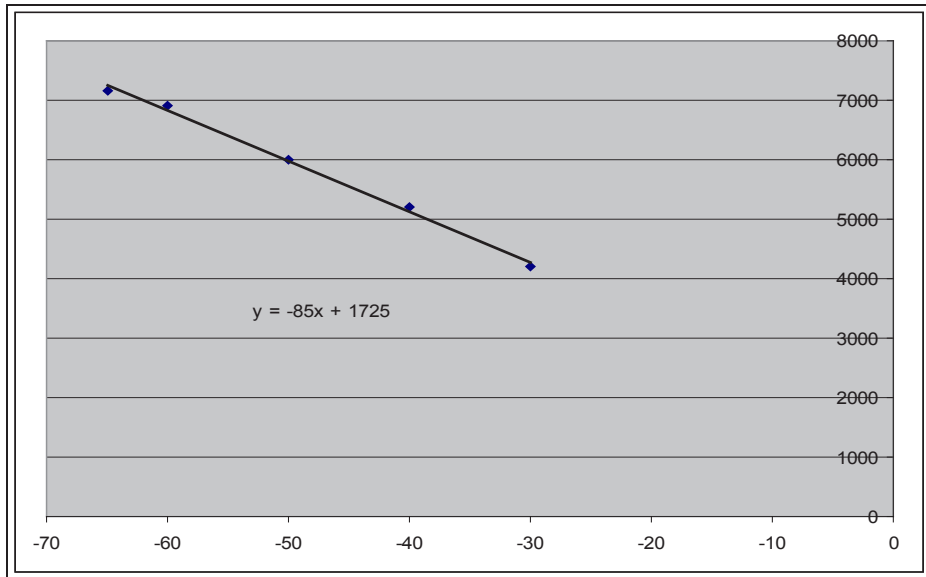
**3.3 Ilmavuotopaikat** Ilmavuotopaikkoja ei selvitetty.

**4. Mittauspöytäkirja**

	<b>Pa</b>	<b><math>m^3 / h</math></b>	<b><math>m^3 / h</math></b>
<b>1.</b>	1.krs -30 <b>-30</b> 8.krs - 28	<b>4100-4300</b>	<b>~4200</b>
<b>2.</b>	1.krs -41 <b>-40</b> 8.krs - 38	<b>5100-5300</b>	<b>~5200</b>
<b>3.</b>	1.krs -50 <b>-50</b> 8.krs - 47	<b>5900-6100</b>	<b>~6000</b>
<b>4.</b>	1.krs -60 <b>-60</b> 8.krs - 57	<b>6800-7000</b>	<b>~6900</b>
<b>5.</b>	1.krs -65 <b>-65</b> 8.krs - 63	<b>7100-7200</b>	<b>~7150</b>



LIITE 2



Ilmavirtaus -50 Pa:n paine-erolla  $5975 \text{ m}^3 / \text{h}$ .

$6975 \text{ m}^3 / \text{h} / 8643 \text{ m}^3 = 0,691 \text{ 1/h}$ .

Eli rakennuksen ilmapuotoluku  $n_{50}$  on  $0.7 \text{ 1/h}$



---

LIITE 2

Raportti No: TA2011-313, Rakennus 1B

Pvm: 9.8.2011

Tilaaaja: Matalaenergia rakentaminen kerrostalotuotannossa - projekti

Kohde: Kiinteistö Oy Vaasan Kustaanportti 2, Teirinkatu 1 B, 65350 Vaasa

Tekijä: Mika Korpi

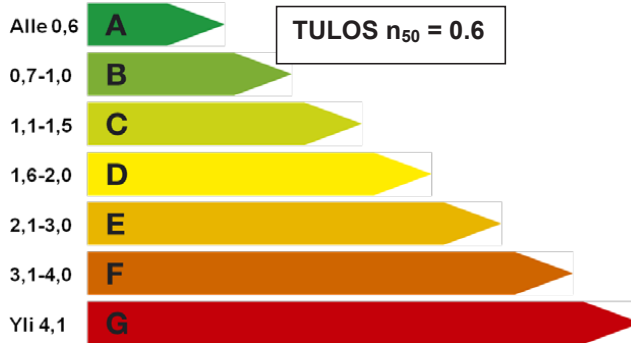
## Tiivysmittausraportti





LIITE 2

TIIVIYSMITTAUSLUOKITUS



Mika Korpi  
Laboratorioinsinööri

1. KOHTEEN YLEISTIEDOT

1.1 Rakennuksen tunniste- ja laajuustiedot	3
1.2 Tutkimuksen tilaaja	3
1.3 Tutkimuksen tavoite	3
1.4 Tutkimuksen tekijä	3
1.5 Tutkimusajankohta	3

2. LÄHTÖARVOT

2.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet	3
2.2 Rakennuksen ilmatilavuus	5
2.3 Rakennuksen vaipan ala	5
2.4 Tiiviysmittauksen kattavuus	5
2.5 Käytetyt mittalaitteet ja koejärjestelyt	5

3. TULOKSET

3.1 Mittaustulokset	6
3.2 Tulos ja sen arviointi	6
3.3 Ilmavuotopaikat	6

4. MITTAUSPÖYTÄKIRJA

7





---

LIITE 2

**1. Kohteen yleistiedot**

**1.1 Rakennuksen tunnistetiedot ja laajuustiedot**

Osoite: Kiinteistö Oy Vaasan Kustaanportti, Teirinkatu 1 B,  
65350 Vaasa

Kohde: Loppusiivousta vaille oleva 8-kerroksinen kerrostalo.  
Talossa yhteensä 51 asuntoa. Rakennus on  
betonielementtirakenteinen. Välipohjat ontelolaatoista.  
Päätöseinät betonielementeistä, pitkittäissivut puurunkoiset,  
joissa höyrynsulkuna muovi. Alakerroksen lattiarakenteena  
maanvarainen betonilaatta.

**1.2 Tutkimuksen tilaaja** Matalaenergia rakentaminen kerrostalotuotannossa - projekti

**1.3 Tutkimuksen tavoite** Rakennuksen ilmavuotoluvun määrittäminen

**1.4 Tutkimuksen tekijä** Laboratorioinsinööri Mika Korpi  
Vaasan Ammattikorkeakoulu  
Technobothnia  
Puuvillakuja 3  
65200 Vaasa  
mko@puv.fi  
040-5223462

**1.5 Tutkimusajankohta** 9.8.2011 klo 11 – 12.30. Tutkimuksessa läsnä Tapani  
Hahtokari.

**2. Lähtöarvot**

**2.1 Ulko- ja sisäilman olosuhteet**

Ulkolämpötila mittaushetkellä oli +16 °C. Sisälämpötila +22 °C  
(Waisala HMI41).

Tuulennopeudeksi mittauskohteessa arvioitiin 3-5 m/s.  
Rakennus on tuulelle altis.

Painesuhteet rakennuksessa ennen mittauksia: 1. krs -2 Pa,  
4. krs -2 Pa, 8. krs -2 Pa.



LIITE 2



Ulkolämpötila +15 °C Tuulen nopeus 4-5 m/s, suunta länsi.  
Ilmanpaine ~996 hPa,  
(<http://www.ilmatieteenlaitos.fi>) Vaasa, Klemetilä.



---

## LIITE 2

### 2.2 Rakennuksen ilmatilavuus

Rakennuksen ilmatilavuudeksi mitattiin 8643 m<sup>3</sup>.

### 2.3 Rakennuksen vaipan ala

Rakennuksen vaipan alaksi sisämittojen mukaan mitattiin 2624 m<sup>2</sup>.

### 2.4 Tiiviysmittauksen kattavuus

Rakennuksen koko ulkovaippa. Tekniset tilat, porraskäytävä, hissikuilu, väestönsuoja ja varastotilat kuuluivat mittausalueeseen.

### 2.5 Käytetyt mittalaitteet ja koejärjestelyt

Kohteessa tehtiin lämpötilamittaukset Waisala HMI41-mittarilla ja HMP 42 - mittapöydällä (sarjanumero E2530001, kalibroitu kesäkuu 2009) Tiiviysmittauslaitteistona käytettiin Minneapolis BlowerDoor model 4.1 puhallin- ja mittaussyksikköä. Kalibroitu 13.8.2009. Paine-ero mittaukset rakennuksen ala- ja yläkerrassa suoritettiin TSI DPCALC-8710-mittarilla.

Ennen tiiviysmittausta huoneistojen liesituulettimet, koneelliset tulo- ja poistokanavat teipattiin / tukittiin. Viemäriputket / lattiakaivot täytettiin vedellä. Rakennuksen kaikki väli ovet olivat auki mittauksen ajan. Porraskäytävän ja hissikuilun huippumurit säkitettiin rakennuksen katolla. Varasto- ja teknistentilojen IV-koneesta tukittiin tulo- ja poistokanava. Puhallin asennettiin neljännen kerroksen huoneiston nro: 20 parveke-oveen.

Mittaus suoritettiin standardin SFS-EN 13829 B-menetelmän mukaisesti. Mittaus suoritettiin alipainekokein.

## 3. Tulokset

### 3.1 Mittaustulokset

Rakennuksen ilmavuotoluku  $n_{50} = V^* / V$ ,

missä,

$V^*$  = ilmantilavuusvirta, joka tarvitaan 50 Pa:n paine-eron aiheuttamiseksi rakennuksen vaipan yli (m<sup>3</sup> / h)



LIITE 2

$V = \text{rakennuksen sisätilavuus (m}^3\text{)}$

$n_{50} = 5615,85 / 8643 = 0,6 \text{ 1/h.}$

Rakennuksen ilmavuotoluku vaipan alaa kohti

$q_{50} = n_{50} \times V / A_E$

missä,

$A_E = \text{rakennuksen vaipan pinta-ala sisämittojen mukaan laskettuna (m}^2\text{)}$

$q_{50} = 0,6 \times 8643 / 2624 = 1,98 \text{ m}^3/\text{hm}^2$

**3.2 Tulos ja sen arviointi** Mitattu ilmavuotoluku 0.6 1/h sijoittuu tiiviysluokituksen A - luokkaan. Mittaustarkkuus käytetyllä menetelmällä on noin  $\pm 10\%$ .

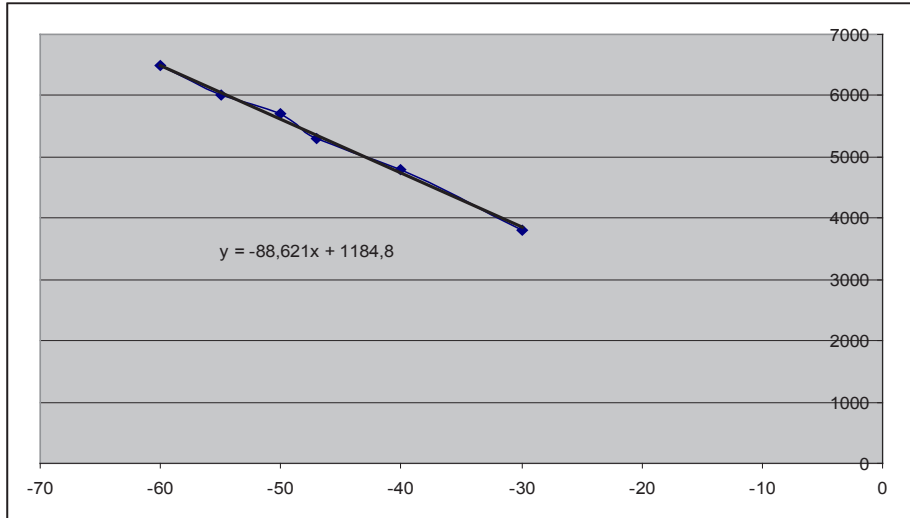
**3.3 Ilmavuotopaikat** Ilmavuotopaikkoja ei selvitetty.

**4. Mittauspöytäkirja**

	Pa	m <sup>3</sup> / h	m <sup>3</sup> / h
1.	1.krs -30 <b>-30</b> 8.krs - 27	<b>3700-3900</b>	<b>~3800</b>
2.	1.krs -40 <b>-40</b> 8.krs - 35	<b>4700-4900</b>	<b>~4800</b>
3.	1.krs -47 <b>-47</b> 8.krs - 44	<b>5200-5400</b>	<b>~5300</b>
4.	1.krs -50 <b>-50</b> 8.krs - 45	<b>5600-5800</b>	<b>~5700</b>
5.	1.krs -55 <b>-55</b> 8.krs - 51	<b>5900-6100</b>	<b>~6000</b>
6.	1.krs -60 <b>-60</b> 8.krs - 56	<b>6400-6600</b>	<b>~6500</b>



LIITE 2



Ilmavirtaus -50 Pa:n paine-erolla  $5615,85 \text{ m}^3 / \text{h}$ .

$5615,85 \text{ m}^3 / \text{h} / 8643 \text{ m}^3 = 0,6 \text{ 1/h}$ .

Eli rakennuksen ilmavuotoluku  $n_{50}$  on  $0,6 \text{ 1/h}$