



# Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu

Ilpo Kouhia | Jyri Nieminen | Riikka Holopainen





# **Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu**

---

Ilpo Kouhia, Jyri Nieminen & Riikka Holopainen

ISBN 978-951-38-7915-0 (nid.)  
ISBN 978-951-38-7916-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

VTT Technology 78

ISSN-L 2242-1211  
ISSN 2242-1211 (nid.)  
ISSN 2242-122X (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2013

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT  
PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)  
02044 VTT  
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

VTT  
PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)  
FI-02044 VTT  
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland  
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)  
FI-02044 VTT, Finland  
Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Kansikuvat Paroc Oy Ab

Kopijyvä Oy, Kuopio 2013

## Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu

Paroc passive house – Cold climate energy solution. Ilpo Kouhia, Jyri Nieminen & Riikka Holopainen. Espoo 2013. VTT Technology 78. 57 s.

### Tiivistelmä

Energiankäytön tavoitteet ovat passiivitalossa hyvin tiukat. Suunnittelulta edellytetään tiukkoihin reunaehtoihin sitoutumista jo hankesuunnittelusta lähtien. Eri suunnittelu-alojen välinen vuorovaikutus ja yhteistyö on välttämätöntä. Talotekniikkalaitteilta edellytetään oikeaa, mittauksiin perustuvaa tietoa laitteiden toimivuudesta. Tämän tiedon tulee olla suunnittelijoiden käytössä.

Passiivitalo Paroc osoittaa, että passiivitalon ja sen järjestelmien viimeistely ja järjestelmien säätöjen toimivuus ovat suunnittelun ja rakennuksen toimivuuden edellytys. Paroc-talossa säätötoimenpiteitä tehtiin vielä vuosi rakennuksen valmistamisen jälkeen. Säätötarve on seurausta laitteiden toimivuusparametrien puutteellisesta dokumentoinnista. Seurantamittausten tulokset eivät näin ollen anna täyttä kuvaa rakennuksen energiateknisestä toimivuudesta, mutta asetettu tavoite-taso saavutetaan rakennuksen säätöjen tarkennusten jälkeen. Asunnon A primääri-energian kulutus on keskimäärin noin 130 kWh/m<sup>2</sup> ja asunnon B 96 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa. Asunnon A ilmapuotoluukuksi saatiin 0,28 1/h ja asunnon B 0,37 1/h.

Passiivitalo Paroc Lupauksen primäärienergian kulutus on 130 kWh vuodessa. Rakennuksen ulkovaipan ilmapuotoluku on 0,5 1/h. Sen sijaan tilojen lämmityksen energiankäyttö on hieman tavoitetta suurempi. Rakennuksen haluttu sisälämpötila on kuitenkin oletettua sisäilman keskimääräistä lämpötilaa korkeampi. Seuranta-mittauksista voidaan päätellä, että rakennuksen talotekniset järjestelmät eivät toimi optimaalisella tavalla. Tarkastus ja säätötarpeita on sekä ilmanvaihtokoneessa että ilmalämpöpumpussa.

Yleisesti voidaan todeta, että talotekniikkalaitteiden toimivuusparametrit eivät vastaa passiivitalojen toimivuuden edellyttämää tarkkuutta.

**Avainsanat** buildings, energy-efficiency, passive house

## Paroc passive house – Cold climate energy solution

Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu. Ilpo Kouhia, Jyri Nieminen & Riikka Holopainen. Espoo 2013. VTT Technology 78. 57 p.

### Abstract

The energy requirements for a passive house are quite strict. These requirements need to be adopted already in early phase of project planning. Collaboration between different design domains is a necessity. System design requires accurate information on the performance parameters of equipment. This information has to be available for the designers.

Paroc passive house shows that HVAC system settings and trimming are a condition of the required performance. System adjustments and trimming were carried out almost for one year after the building was finished. The need for adjustments comes from poor documentation of the performance parameters of the equipment. Accurate monitoring results are available for less than one year; however, the results show that the building meets the requirements set on the delivered energy and primary energy. The primary energy use in the two apartments is 96 and 130 kWh/m<sup>2</sup>. The airtightness of the building envelope were  $n_{50} = 0.37$  1/h and  $n_{50} = 0.25$  1/h correspondingly.

The primary energy use in the passive house Paroc Lupaus is 130 kWh/m<sup>2</sup> and the airtightness of the building envelope  $n_{50} = 0.5$  1/h. The energy used for space heating 30 kWh/m<sup>2</sup> exceeds the set requirement of 25 kWh/m<sup>2</sup>. The indoor temperature has been higher than assumed in the design. The monitoring shows that the technical systems do not perform as expected. There is still need for adjustments and trimming both for the ventilation system and heat pump.

In general, the performance parameters of the HVAC systems are not accurate enough for passive house design.

**Keywords** buildings, energy-efficiency, passive house

## Esipuhe

Paroc Passiivitalot -projektin tavoitteena oli selvittää passiivitalokonseptin toimivuutta Suomen ilmastossa. Passiivitalo määriteltiin Keski-Euroopassa käytössä olevan määrittelyn pohjalta ottamalla huomioon ilmastojen erot. Valittu vaatimustaso on saavutettavissa varsin kohtuullisin lisäkustannuksin. Vantaalle rakennetun passiivitalon lisäkustannukset olivat 85 €/m<sup>2</sup>. Tyypillinen lisäkustannus pientalossa on 5–7 % verrattuna tavanomaisen talon kustannuksiin.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi edellyttää asuinrakennuksilta lähes nollaenergiatalon ostoenergian käyttöä. Passiivitalo on yksi vaihtoehto lähes nollaenergiatalon ratkaisuksi. Passiivitalolle asetettuja energiatehokkuustavoitteita tärkeämpää on kuitenkin kokonaisuuden hallinta ja oikea tieto laitejärjestelmien toimivuusparametreista.

Tekijät

# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Esipuhe</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Johdanto</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Paroc Passiivitalo</b> .....	<b>9</b>
2.1 Paroc Passiivitalo -pilottikohteen konsepti .....	9
2.2 Paroc Passiivitalo -pilottikohteen simulointi .....	10
2.3 Rakennusaikana tehdyt mittaukset ja tarkastukset .....	14
2.4 Seurantamittauksen järjestelyt .....	15
2.5 Seurantamittausten tuloksia .....	15
2.6 Sisäolosuhteet.....	23
2.7 Päätelmät.....	30
<b>3. Paroc Lupaus</b> .....	<b>32</b>
3.1 Paroc Lupaus -pilottikohteen konsepti .....	32
3.2 Paroc Lupauksen simulointi .....	33
3.2.1 Lämpöenergian tarpeen simulointitulokset .....	36
3.3 Rakennusaikana tehdyt mittaukset ja tarkastukset .....	37
3.4 Seurantamittauksen järjestelyt .....	37
3.5 Seurantamittausten tuloksia .....	38
3.6 Sisäolosuhteet.....	43
3.7 Päätelmät.....	48
<b>4. Passiivitalon ulkovaipparakenteiden kosteustekninen toimivuus</b> .....	<b>50</b>
4.1 Kosteusteknisen toimivuuden arviointi .....	50
4.2 Rakenteiden toimivuus.....	52
<b>5. Yhteenvedo</b> .....	<b>55</b>



# 1. Johdanto

Rakennusten energiankulutus muodostaa Suomen koko energiankulutuksesta merkittävän osan. Rakennuksissa käytettävä energia on noin 40 % Suomen koko primäärienergian kulutuksesta. Viime vuosikymmenen lopulla tutkimuspanoksia suunnattiin rakennusten energiankäytön tehostamiseen merkittävästi koko maailmanlaajuisesti. 1980-luvulta lähtien rakennusten lämmitysenergian käytön pienentämismahdollisuuksia tutkittiin ja saatuja tuloksia demonstroitiin lukuisissa koerakennuskohteissa, joita kutsuttiin silloin matalaenergiataloiksi. Suomessa matalaenergiatalo määriteltiin siten, että sen lämmitysenergian kulutus tuli olla alle puolet 1980–90-lukujen rakennusmääräykset täyttävän talon kulutuksesta. Rakentamismääräykset ovat kehittyneet siten, että vuoden 2010 lämmöneristysmääräykset edellyttävät miltei 1990-luvun matalaenergiatalojen tasoa.

Jatkuva tarve energian entistä tehokkaampaan käyttöön sekä tekniikan kehittyminen on tehnyt mahdolliseksi rakennusten ominaiskulutuksen pienentämisen. Passiivitalo määritellään Suomen ilmasto-olosuhteisiin siten, että etelärannikolla lämmitysenergian tarve saa olla enintään  $20 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ , keskeisessä Suomessa  $25 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$  ja lapissa  $30 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$  (kuva 1). Tutkimuksissa on todettu rakennuksen vaipan ilmatiiviydellä olevan ratkaiseva merkitys lämmitysenergian tarpeelle ja näin ollen passiivitalon suurimmaksi sallituksi ilmavuotoluvuksi ( $n_{50}$ ) on määritetty  $0,6 \text{ 1/h}$ . Lisäksi passiivitalon primäärienergian kulutukselle on annettu rajat alueittain  $130$ ,  $135$  ja  $140 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ .

## 1. Johdanto

	Saksa	Suomi		
		Etelä-	Keski-	Pohjois-
Lämmitystarve, kWh/m <sup>2</sup>	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30
Lämmitystehon tarve, W/m <sup>2</sup>	10		-	
Primäärienergian käyttö, kWh/m <sup>2</sup>	≤ 120	≤ 130	≤ 135	≤ 140
Yliämpötunnit vuodessa sisälämpötila > 25°C, %	10		-	
Ilmavuotoluku, n <sub>50</sub> 1/h	0,6		≤ 0,6	
Toiminnallinen yksikkö, m <sup>2</sup>	Treated floor area	Bruttoala		
Laskentamenetelmä	PHPP	Valinnainen		

**Kuva 1.** Passiivitalon määritelmä Saksassa ja VTT:n määrittelemä passiivitalo Suomessa.

Paroc Passiivitalo -projektin tavoitteena on osoittaa passiivitalon toimivuus Etelä-Suomen ilmasto-olosuhteissa. Rakennus on ensimmäisiä Suomeen rakennettuja passiivitaloja, ja hankkeella pyritään osoittamaan, että Suomen olosuhteissa voidaan saavuttaa passiivitalolle asetetut varsin tiukat energiantarvetavoitteet. Paritalon eri asuntojen erilaisilla laitevalinnoilla sekä varsin kattavalla energiamittauksella pyritään todentamaan erilaisten laitevalintojen ja käyttötottumusten vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen. Hankkeessa oli myös taloudellisia reunaehtoja, joten rakennuksessa ei käytetty ratkaisuja, jotka olisivat kohottaneet rakennuskustannuksia merkittävästi. Rakennuksen vaipan hyvä lämmöneristystaso kasvattaa luonnollisesti rakennepaksuuksia, ja hankkeen tavoitteena oli myös demonstroida sitä, ettei ammattitaidolla suunniteltu passiivitalo eroa ulkonäöltään olennaisesti tavanomaisista rakennuksista. Rakennus on betonirakenteinen, lukuun ottamatta puurakenteista yläpohjarakennetta.

Paroc Lupaus -projektin tavoitteena on puolestaan demonstroida passiivitalo keskisen Suomen ilmasto-olosuhteissa. Myös tämä rakennus on ensimmäisiä Suomeen rakennettuja passiivitaloja. Rakennuksen tavoitteena on osoittaa, että Suomen olosuhteissa voidaan saavuttaa passiivitalolle asetetut varsin tiukat energiantarvetavoitteet. Kattavalla energiamittauksella pyritään todentamaan asetettujen tavoitteiden täyttyminen käytännössä. Rakennus on puurakenteinen. Suunnittelun lähtökohtana on ollut asukkaiden tarpeiden toteuttaminen unohtamatta passiivitalolle asetettuja vaatimuksia.

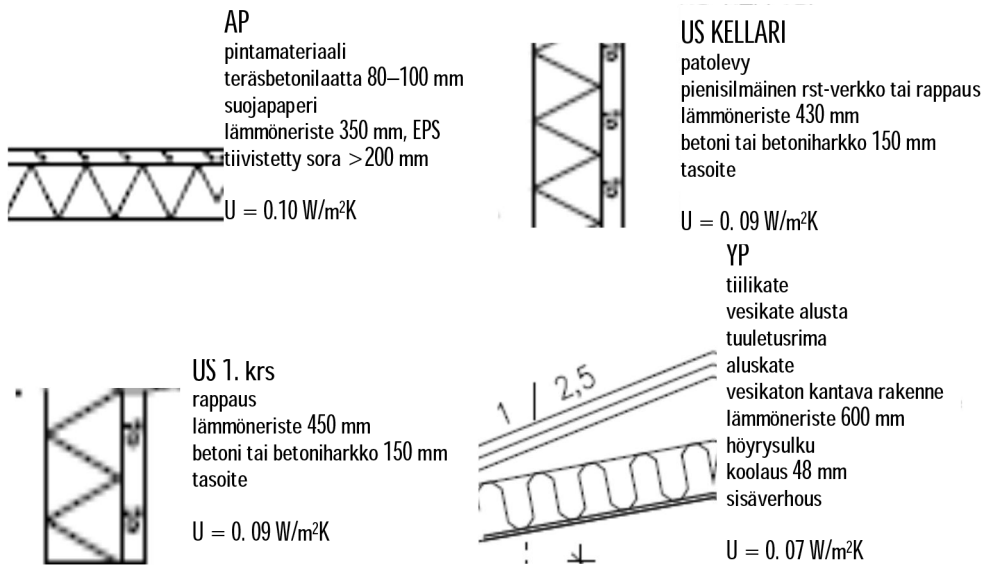
## 2. Paroc Passiivitalo

### 2.1 Paroc Passiivitalo -pilottikohteen konsepti

Pilottikohteen konseptikehityksen lähtökohta oli varsin tavanomainen. Rakennuttajat olivat laatineet tulevasta rakennuksesta suunnitelmia, ja mm. pohjaratkaisuista oli jo tehty päätöksiä. Konseptikehityksessä tuotettiin vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja, joita käyttämällä asetetut tavoitteet arvioitiin saavutettavan. Samoin talotekniikkaratkaisuiksi hahmoteltiin useampia vaihtoehtoja. Vaihtoehtoiset ratkaisukonseptit simuloitiin VTT-talo-ohjelmistoa käyttäen ja tulosten perusteella arvioitiin eri ratkaisuvaihtoehtojen toimivuutta ja eri tekijöiden herkkyyttä energiatekniseltä kannalta.

Rakennus on kaksikerroksinen paritalo, jossa molempien huoneistojen kerrosala on 194 m<sup>2</sup>. Perustamisolosuhteet olivat hyvät, kallion ollessa lähellä perustamistasoa siten, että rakennusalueella jouduttiin tekemään louhintaa. Alemman kerroksen lattiarakenne on maanvarainen betonilaatta, jossa on lattialämmityskaapelit ja jonka alapuolella on 300 mm:n kerros polystyreenilämmöneristyslevyä. Alemman kerroksen seinät ovat betonisia kuorielementtejä, jotka eristettiin 450 mm:n paksuisella lamellivillalla (kivivilla) ulkopuolelta. Ulkopinta rapattiin. Välipohja on rakennettu ontelolaatoista. Ylemmän kerroksen seinät ovat betonielementtejä, joissa 450 mm:n eristeen sisäpuolella on betoninen sisäkuori ja joiden ulkopintaan oli elementtitehtaalla asennettu alusrappaus. Rakennuksen ulkopintojen lopullinen pintarappaus asennettiin rakennuspaikalla. Ulkoseinäratkaisulla vältettiin seinärakenteiden kylmäsilat ja ulkopinnasta saatiin saumaton. Rakennuksen yläpohjarakenne on puurakenteinen ja kannattajina ovat naulalevyristikot. Yläpohjan lämmöneristys on 100 mm:n mineraalivillalevy, jonka päällä on noin 600 mm puhallusvillaa (kivivillaa). Rakennuksessa on sekä kiinteitä että avattavia ikkunoita. Kiinteät ikkunat ovat kolmilasisia umpiolasielementtejä ja avattavat ovat MSE-tyyppisiä ikkunoita, joissa sisäpuiteen umpiolasielementti on kaksilasinen. – Rakenteita havainnollistetaan kuvassa 2.

## 2. Paroc Passiivitalo



**Kuva 2.** Passiivitalon rakennetyypit.

Asunnossa A ilmanvaihdosta huolehtii levylämmönvaihtimella varustettu Vallox-ilmanvaihtokone ja asunnossa B pyörivällä lämmönvaihtimella ja lämpöpumpulla varustettu Enerventin ilmanvaihtokone. Molemmissa asunnoissa on ilmanvaihdon sisäänpuhalluksen pääte-elimissä sähköiset RC-linjan pääte-elinlämmittimet. Lämmitysyksiköt on ohjattu huoneilmatermostaatein. Lisäksi raitisilmakanaviin on asennettu molempiin huoneistoihin nestekiertoiset patterit, jotka on liitetty noin 100 m:n pituisiin maalämpökiertoihin. Toisin sanoen ilmanvaihdon raitisilmaa esilämmitetään tai jäähdytetään maalämmöllä.

Passiivitalon konseptiratkaisu perustuu siis seuraavaan:

- vaipan erinomainen lämmöneristystaso
- vaipan hyvä ilmatiiviyys
- lämpöteknisesti korkeatasoiset ikkunat ja ovet
- tehokas lämmön talteenotto ilmanvaihdon poistoilmasta
- lämmön talteenotto poistoilmasta lämpöpumpulla (asunto B)
- raitisilman esilämmitys maalämmöllä.

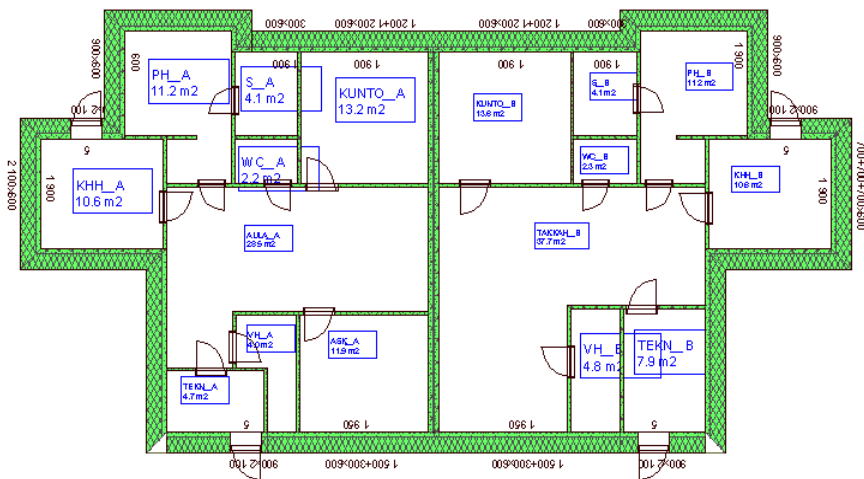
### 2.2 Paroc Passiivitalo -pilottikohteen simulointi

Passiivitalokonseptia sovelletaan Vantaan Tikkurilaan rakennettavassa passiivitalossa. Rakennus on paritalo, jonka pinta-ala ulkomittojen mukaan on  $469 \text{ m}^2$ . Passiivitalon rakenteiden U-arvot ovat seuraavat:

- ulkoseinät  $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$

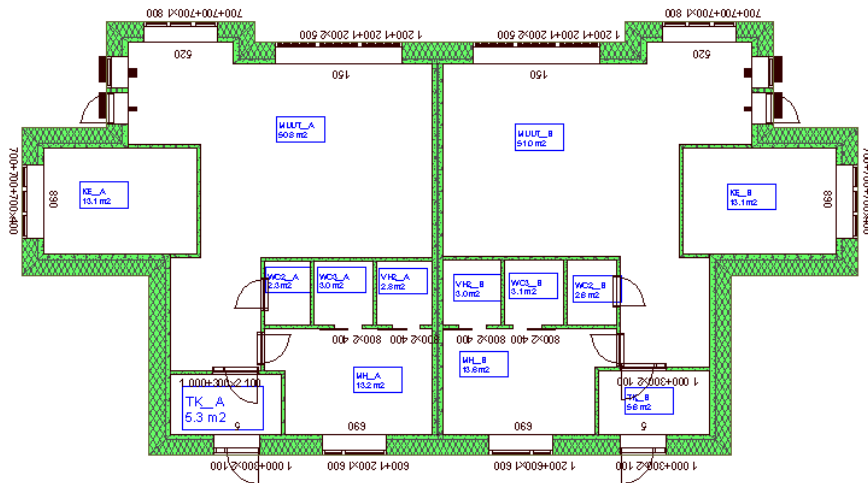
- yläpohja  $0,07 \text{ W/m}^2\text{K}$
- alapohja  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ikkunat  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ovet  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Lämpöteknisten simulointien tavoitteena oli tarkastella etukäteen Tikkurilassa sijaitsevan pilottikohteen lämpöteknistä toimivuutta. Rakennuksen lämpöenergian tarve laskettiin VTT Talo -ohjelmalla. VTT:ssä kehitetty ei-kaupallinen simulointiohjelma VTT Talo simuloi ilmavuotoja, ilmanvaihtoa ja lämmönsiirtoprosesseja. Simulointi perustuu solmupistemalliin, jossa massatase, liikemäärä ja lämpötaseet on määritelty diskreetisti. Simuloitavaa prosessia kuvataan termisellä solmuverkolla, joka muodostuu solmupisteiden kapasitansseista ja solmujen välisistä konduktansseista. Lämpötaseyhtälöt ja sitä kautta solmujen lämpötilat ratkaistaan differentiaalimenetelmällä (finite difference heat balance method). Pilottitalosta tehtiin IFC-mallit (Industrial Foundation Classes) ArchiCad-ohjelmalla ja IFC-tiedostosta VTT Talo -ohjelmalla xml-pohjainen dynaaminen simulointimalli lämpöteknistä laskentaa varten, kuvat 3 ja 4.



Kuva 3. Alakerroksen pohjapiirustus.

## 2. Paroc Passiivitalo



Kuva 4. Yläkerroksen pohjapiirustus.

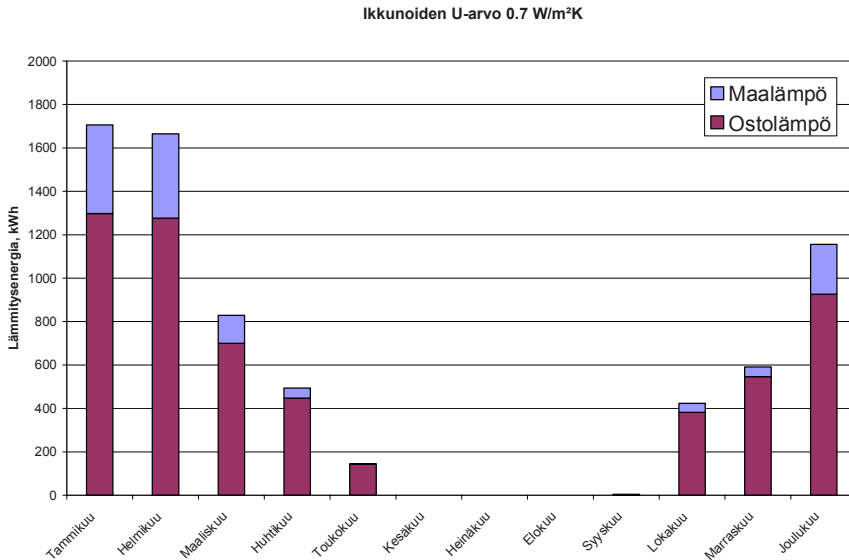
Talon kellarikerros sijaitsee puoliiksi maatasen alapuolella (paitsi kohdat, joissa on ulko-ovi). Koska VTT Talon -laskentaohjelma käsittelee vain suoria kulmia, talon toinen kerros mallinnettiin tasakattoisena ja ylempään kerroksen vakiohuonekorkeutena pidettiin 3,2 m.

Laskentamallille tehtiin simuloimalla painekoe. Ikkunoiden ilmarakoa muokattiin siten, että talon ilmantiiveydeksi saatiin 0,6 1/h (50 Pa). Koko rakennuksen tuloilmavirta on 146,6 dm<sup>3</sup>/s ja poistoilmavirta 153,9 dm<sup>3</sup>/s. Ilman vaihtuvuus poistoilmavirrasta laskettuna on 0,52 1/h. Tuloilma esilämmitettiin lämmityskaudella maalämpöliuospiirin avulla. Esilämmityksen asetustemperatura oli 1 °C ja lämmityspiirin maksimiteho 1 kW.

Huoneiden asetustemperatuurit ovat 21 °C, paitsi pesuhuoneiden 22 °C, vaatehuoneiden ja tuulikaappien 19 °C ja teknisen tilan 5 °C.

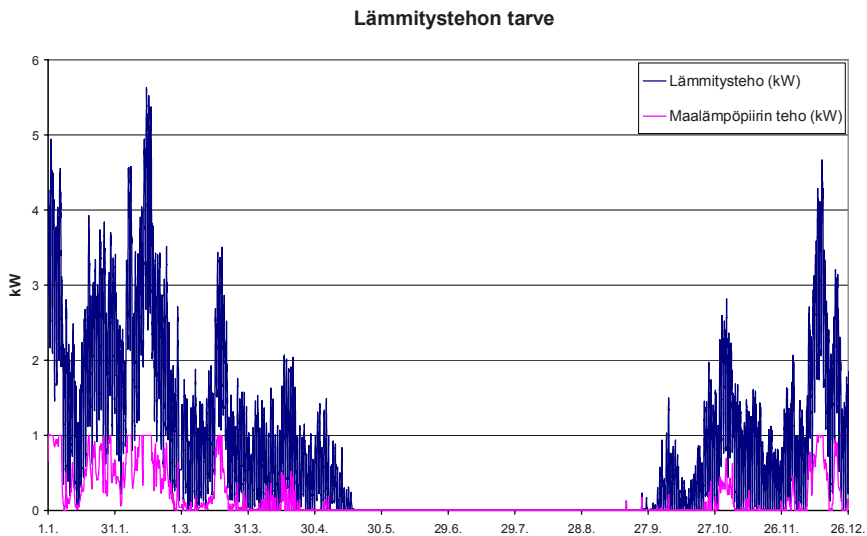
Sisäisenä kuormana oli seitsemälle hengelle muokattu LVIS 2000 -pientalon lämpökuormaprofiili. Sisäisten kuormien vuotuinen lämpöenergia oli 12 900 kWh eli 28 kWh/m<sup>2</sup>. Keskimääräinen lämpökuorma oli 1,5 kW eli 3,2 W/m<sup>2</sup>.

Talon vuotuinen lämmitysenergian tarve laskettiin säätiedostolla Suomi, Helsinki 1979. Vuotuinen tilojen ja sisäilman lämmityksen lämpöenergian tarve talolle oli 7 010 kWh/a sisäisten lämpökuormien kanssa. Tästä maalämmöllä saatava osuus oli 1 290 kWh, eli ostoennergian tarve oli siten 5 720 kWh/a. Lämmitysenergiantarpeen kuukausittainen jakauma esitetään kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kuukausittainen lämmitysenergian tarve perustapauksessa.

Maksimi lämpötehon tarve oli maalämmön avulla 4,6 kW ja ilman maalämpöä 5,6 kW, kuva 6. Lukuihin ei sisälly käyttöveden lämmitys.



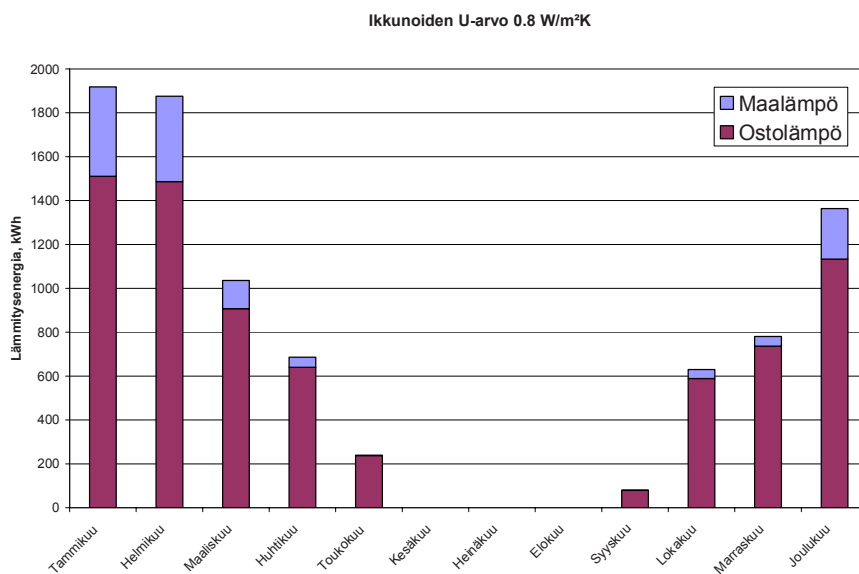
**Kuva 6.** Lämmitystehon tarve.

## 2. Paroc Passiivitalo

Paritalon pinta-ala ulkomittojen mukaan on 469 m<sup>2</sup>. Neliometriä kohti laskettu lämmitysenergian tarve oli maalämpö huomioituna 12,2 kWh/m<sup>2</sup> ja ilman maalämpöä 15,0 kWh/m<sup>2</sup>.

Ikkunoiden lämmöneristävyuden vaikutusta paritalon lämmöntarpeeseen tarkasteltiin vaihtamalla ikkunoiden U-arvoksi 0,8 W/m<sup>2</sup>K. Toimenpiteen vaikutuksesta tilojen ja sisäilman lämmityksen vuotuinen lämpöenergian tarve kasvoi 1 600 kWh ja on nyt 8 610 kWh/a. Maalämmöllä saatava osuus pysyi samana, eli 1 290 kWh, ja ostoenergian tarve oli 7 320 kWh/a. Maksimi lämpötehon tarve oli maalämmön kanssa 5,2 kW ja ilman maalämpöä 6,2 kW. Neliometriä kohti laskettu lämmitysenergian tarve oli maalämpö huomioituna 15,6 kWh/m<sup>2</sup> ja ilman maalämpöä 18,4 kWh/m<sup>2</sup>.

Vastaava lämmitysenergiantarpeen kuukausittainen jakauma esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Kuukausittainen lämmitysenergian tarve ikkunoiden U-arvolla 0,8 W/m<sup>2</sup>K.

### 2.3 Rakennusaikana tehdyt mittaukset ja tarkastukset

Rakennusvaiheen silmämääräisten tarkastuksen tarkoituksena oli varmistaa, että vaipan lämmöneristeiden asennus on tavoitteiden mukainen ja että rakennuksen vaipan tiivystavoite saavutetaan. Tiiviyys mitattiin ennen sisäpintojen viimeistelyä. Tarkastuksissa kiinnitettiin erityistä huomiota erilaisten läpivientien toteutukseen sekä eri rakenneosien, kuten ikkunoiden ja ovien, liittymiin ympäröivään rakenteeseen.

Rakennuksen vaipan valmistuttua ilmatiivyyden kannalta ilmatiiviyys mitattiin asuntokohtaisesti sekä ylipaineella että alipaineella. Mittaustulosten perusteella rakennuksen ulkovaipan ilmatiiviyys on varsin hyvä Asunnoista mitatut ilmavuotolu-  
vut ovat asunnossa A 0,28 1/h ja asunnossa B 0,37 1/h.



## 2.4 Seurantamittauksen järjestelyt

Rakennuksen ensisijainen energia tuodaan rakennukseen sähkönä. Sähköjärjestelmä on mittaussyistä jaettu asuntokohtaisesti kulutuskohteittain. Sähkämittauksen osalta erillisesti mitatut ryhmät ovat seuraavat:

- liesi
- vesivaraaja
- kiuas
- IV-kone
- liesituuletin
- takkaimuri
- lattialämmitys
- IV:n tuloilmalämmitys
- pistorasiat
- valaistus
- ulkovalaistus.

Lisäksi mitattiin molempien asuntojen maalämpöpiiristä saatavaa energiaa.

## 2.5 Seurantamittausten tuloksia

Seurantajakson aikana rakennuksen taloteknisiä järjestelmiä otettiin käyttöön vaiheittaisesti ja niitä säädettiin tehtyjen havaintojen pohjalta. Tehdyt merkittävät toimenpiteet ajankohtineen olivat seuraavat:

- 2009.06.01 Ilmastointien perussäädöt LVI-suunnitelmien mukaan. Tulo 131 l/s ja poisto 152 l/s.
- 2009.11.01 B-asunnon IV-koneen poistoilmalämpöpumppu kytkettiin päälle.
- 2009.11.13 Seurantamittausjärjestelmä käynnistettiin (päivämääräpäivitys 2009.11.19).
- 2010.01.19 Ilmanvaihdon pääte-elinlämmitykset kytkettiin B-asunnossa päälle.
- 2010.02.07 B-asunnon maalämpöpiirin asennus ja kytkentä.
- 2010.02.18 B-asunnon maalämpöpiirin lopullinen ilmaus.
- 2010.03.11 Ilmastointien uudelleensäätö tarkistettujen suunnitelmien mukaan molemmissa asunnoissa. Tulo 110 l/s ja poisto 125 l/s.
- 2010.03.31 B-asunnon alakerroksen lattialämmitykset kytketty aikaohjaukselle (6–9 ja 16–21).
- 2010.04.13 B-asunnon IV-koneen lämpöpumppukompressorin vaihto ja ohjelmiston päivitys.
- 2010.04.13 B-asunnon IV-koneen lämpöpumppu kytketty pois päältä.

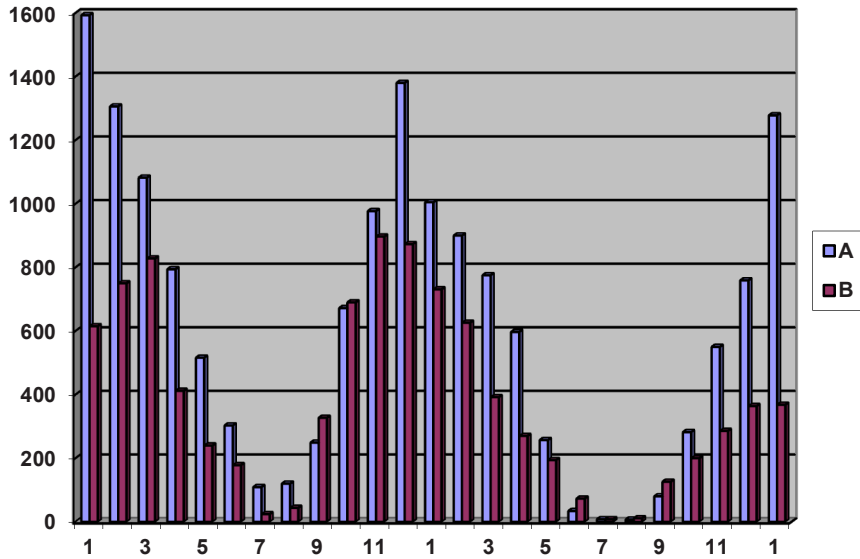
## 2. Paroc Passiivitalo

---

- 2010.11.26 B-asunnon IV-koneen lämpöpumpun ohjaukseen asennettu 1. kerrokseen sijoitettu huonetermostaatti.
- 2010.11.28 Molempien asuntojen IV-lämmityspäate-elinten kytkentävirheen korjaus.
- 2010.12.13 B-asunnon IV-koneen EDA-automaatiikan ohjelmakortin vaihto. Takkakytkin toimii KNX:llä.
- 2011.01.07 A-asunnon IV-koneeseen asennettiin kanavapatteri maalämpöpiiriin.
- 2011.01.21 B-asunnon IV-koneen EDA-automaatiikan ohjelmakortin vaihto ja CO<sub>2</sub>-anturien kytkentöjen korjaus. (Lämpöpumpun kompressori toimii muutoksen jälkeen myös 40 %:n teholla.)
- 2011.03.02 B-asunnon IV-koneen puhallinteho on alennettu 20 %:iin.
- 2011.03.06 A-asunnon lattialämmitystermostaattien vaihto ja ohjelmointi.
- 2011.03.07 B-asunnon lattialämmitystermostaattien vaihto ja ohjelmointi.
- 2011.04.26 B-asunnon poistoilmalämpöpumppu kytketty pois päältä.

Tehdyillä toimenpiteillä on ollut luonnollisesti vaikutusta energian kulutukseen, mutta talotekniikan säätöjen saaminen optimaaliseksi on edellytyksenä passiivitalon suunnitelman mukaiselle toimivuudelle. Rakennuksen varsin pienen lämmöntarpeen vuoksi pienet säätöarvojen muutokset vaikuttavat olosuhteisiin tavanomaista rakennusta enemmän.

Kuvassa 8 esitetään asuntokohtaisesti rakennuksen lämmitysenergian kulutus kuukausittain sisältäen lattialämmityksen ja ilmanvaihdon sisäänpuhallus päate-elimien energian kulutuksen.

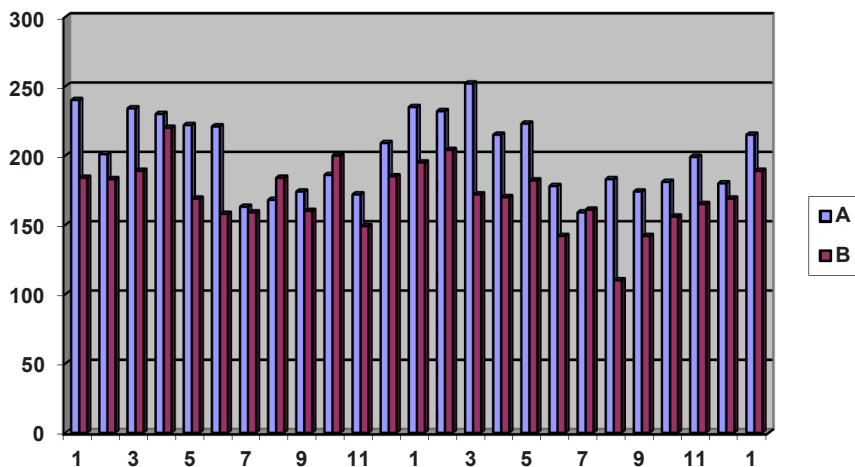


**Kuva 8.** Passiivitalon asuntojen lämmitysenergian kulutus kuukausittain 1.1.2010–31.1.2012 (kWh).

Asunnon A lämmitysenergian kokonaiskulutus kalenterivuodelta 2010 oli 9 110 kWh ja asunnon B 5 780 kWh. Vastaavat kulutukset kalenterivuoden 2011 ajalta ovat A 5 250 kWh ja B 3 280 kWh. Kalenterivuoden 2010 ajalta vuosikulutukset brutto-m<sup>2</sup> kohden olivat A asunnossa 39,1 kWh/m<sup>2</sup> A ja B asunnossa 24,8 kWh/m<sup>2</sup>. Kalenterivuodelta 2011 vastaavat kulutukset olivat 22,5 kWh/m<sup>2</sup> a ja 14,1 kWh/m<sup>2</sup>.

Lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytetty energia asuntokohtaisesti esitetään kuvassa 9.

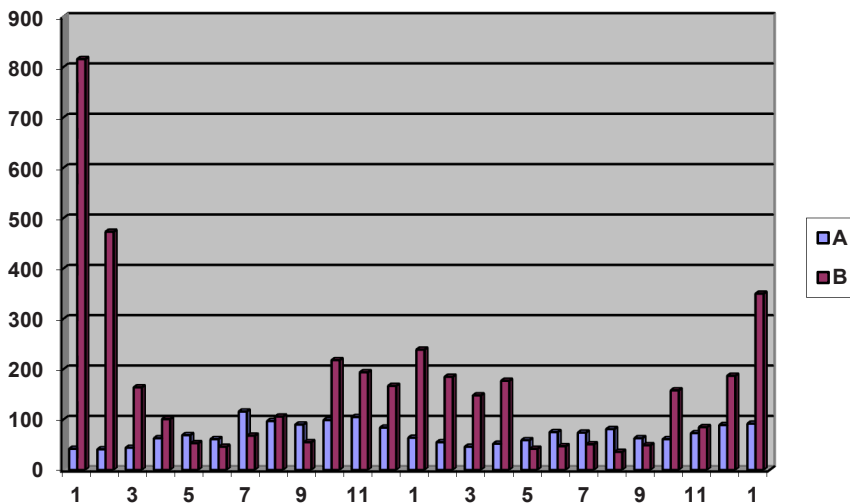
## 2. Paroc Passiivitalo



Kuva 9. Asuntojen lämpimän veden lämmitykseen kulunut energia kuukausittain (kWh).

Lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytetyn energian kulutus oli molempina kalenterivuosina 2010 ja 2011 asunnossa A 2 420 kWh. Asunnossa B kulutus oli 2010 2 140 kWh ja 2011 1 970 kWh. Kulutukset ovat brutto-m<sup>2</sup>:ä kohden laskettuna 8,5–10,3 kWh/m<sup>2</sup> a.

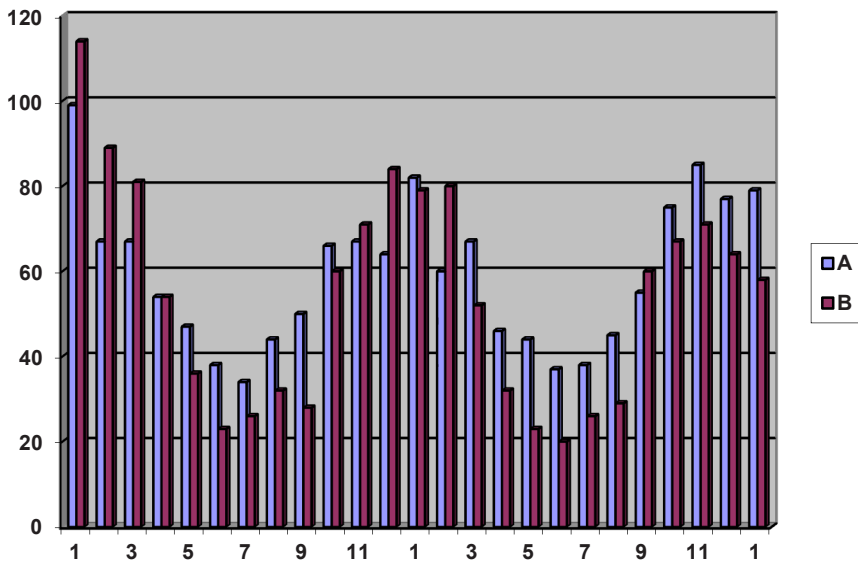
Ilmanvaihdon kuluttama energia on kuvassa 10. Ilmanvaihdon energiaan on laskettu mukaan liesituulettimien käyttämä energia.



Kuva 10. IV-koneiden kuluttama sähköenergia sisältäen liesituulettimen (kWh).

IV-koneiden kuluttama sähköenergia oli kalenterivuotena 2010 asunnon A osalta 830 kWh ja asunnon B osalta 2 405 kWh. Vastaavat vuosikulutukset vuonna 2011 olivat 710 kWh ja 1 350 kWh. Kulutukset  $m^2$ :ä kohden olivat kalenterivuonna 2010 A asunnossa  $3,6 \text{ kWh}/m^2$  a ja B asunnossa  $10,3 \text{ kWh}/m^2$  a. Vuonna 2011 vastaavat kulutukset olivat  $3,0 \text{ kWh}/m^2$  a ja  $5,8 \text{ kWh}/m^2$  a. Asunnon B osalta suuri ero eri ajanjaksojen kulutuksissa johtuu IV-laitteen lämpöpumpun virheellisistä säästöistä mittausjakson alussa.

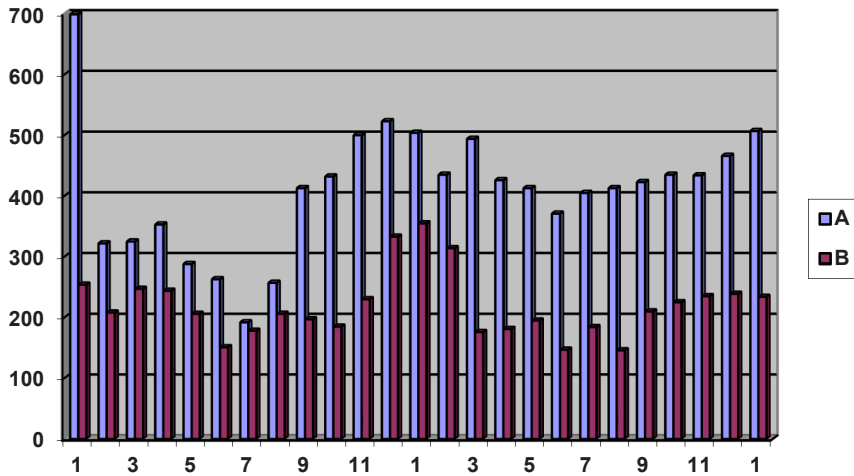
Kuvassa 11 esitetään valaistuksen kuukausittain kuluttama sähköenergia asuntokohtaisesti.



**Kuva 11.** Valaistuksen kuluttama sähköenergia kuukausittain asuntokohtaisesti (kWh).

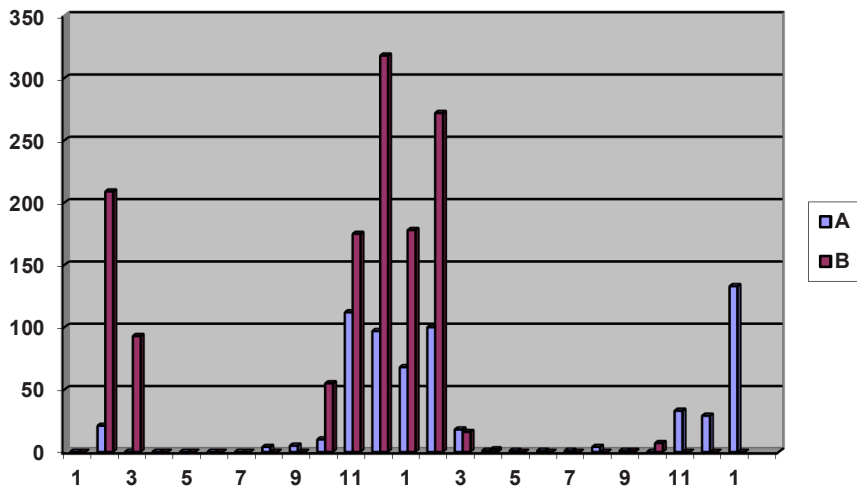
Valaistuksen kuluttama energia oli eri asunnoissa saman suuruinen eli noin  $700 \text{ kWh}/a$ , mikä vastaa noin  $3 \text{ kWh}/m^2$  a kulutusta.

Muut rakennuksen sisäiset sähkön kulutuskohteet ovat ns. käyttäjän energiaa, eli kulutus riippuu yksinomaan laitevalinnoista, laitteiden yms. käytön määrästä ja käyttötavoista. Näitä kulutuskohteita ovat mm. liesi, saunan kiuas ja erilaiset pistorasioihin liitettävät sähkölaitteet. Mitattavassa talossa keittiöiden kylmälaitteiden kulutus on sisällytetty pistorasiakulutukseen. Edellä esitetty käyttäjän kulutus on kuvassa 12.



Kuva 12. Käyttäjien kuukausittainen sähköenergian kulutus (kWh).

Rakennuksessa maalämpöä hyödynnetään ilmanvaihdon raitisilman esilämmitykseen tai jäähdytykseen. Esilämmityskäytössä maalämmön käyttö huonontaa ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhdetta, mutta kokonaisuudessa pienentää energian kulutusta. Maalämpöpiirit on kytketty mittausjärjestelmään helmikuussa 2010, ja kuvassa 13 on maalämpöpiireistä ilmanvaihtojen esilämmityksiin saadut energiat. Vuoden 2010 energiamäärä A-asunnon osalta oli 371 kWh ja B-asunnon osalta 850 kWh. Vuoden 2011 vastaavat luvut olivat 390 kWh ja 476 kWh.



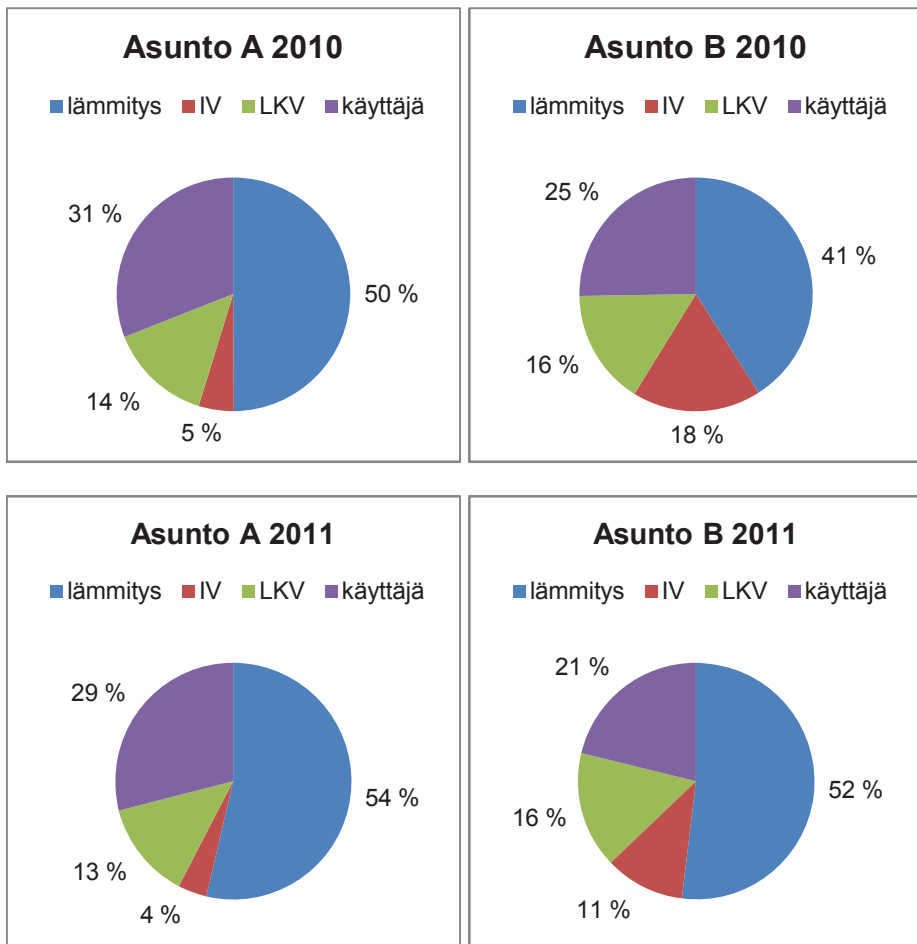
Kuva 13. Maalämpöpiireistä ilmanvaihtojen esilämmityksiin saatu energia (kWh).

Rakennuksessa käytetty kokonaissähköenergia, pois luettuna ulkovalaistus, on kalenterivuodelta 2010 A-asunnon osalta 17 600 kWh eli 75,5 kWh/brutto-m<sup>2</sup> a ja asunnon B osalta 13 700 kWh eli 58,8 kWh/brutto-m<sup>2</sup> a. Vastaavat luvut laskettuna vuodelle 2011 ovat A-asunnon osalta 14 400 kWh eli 61,8 kWh/brutto-m<sup>2</sup> a ja B-asunnon osalta 9 870 kWh eli 42,4 kWh/brutto-m<sup>2</sup> a.

Taulukossa 1 esitetään rakennuksen eri asuntojen lämmitysenergian kulutus, vuosien 1971–2000 keskimääräisiin sääoloihin normeerattu lämmitysenergian kulutus, ilmanvaihdon kuluttama energia, veden lämmitykseen käytetty energia, käyttäjän energia sekä kulutus yhteensä kalenterivuosilta 2010–2011. Kuvassa 14 on rakennuksen normeeratun energiankulutuksen jakaumat.

**Taulukko 1.** Lämmitys-, normeerattu lämmitys-, IV-koneen, lämpimän käyttöveden ja käyttäjän energiankulutukset sekä normeerattu energiankulutus yhteensä (kWh).

	2010	2010	2011	2011
	A	B	A	B
Lämmitys	9 110	5 780	5 250	3 280
Normeerattu lämmitys	8 472	5 505	9 668	6 403
Ilmanvaihtokone	829	2 404	707	1 347
Lämmin käyttövesi	2 420	2 141	2 411	1 968
Käyttäjän energia	5 253	3 389	5 229	2 607
Normeerattu kulutus yhteensä	16 974	13 439	18 015	12 325



**Kuva 14.** Asuntojen A ja B normeeratut energian kulutusjakautumat vuosina 2010 ja 2011.

Normeeratuissa lämmitysenergian kulutuksissa on vuositasolla eri asunnoilla noin 3 500–5 500 kWh:n ero. A-asunnossa on sekä lattialämmityksen että ilmanvaihtolämmityksen keskimääräiset tehot B-asuntoa suuremmat, eikä huoneiltojen lämpötilatasoissa ole eroa (kuva14.) Syytä eroon on etsittävä ilmanvaihtokoneiden toiminnasta ja käyttötiloista. Käyttäjän energiankäytöissä on noin 2 000–2 500 kWh:n ero, minkä selittää miltei kokonaan saunojen kiukaiden energiankäytön ero.

Merkittävä ero eri asuntojen kulutuksessa oli IV-koneiden sähkön kulutuksessa. Pyörivällä lämmönvaihtimella ja poistoilmalämpöpumpulla varustettu kone kulutti sähköä tarkasteluvuosien aikana 2–3-kertaisen määrän levylämmönvaihtimelliseen nähden. Osan suuresta erosta selittää seurantajakson alkupuolella ollut sää-  
tövirhe, jossa virheellisen poistoilman lämpötilan valinta johti lämpöpumpun lähes



katkeamattomaan, tarpeettomaan käyntiin. Säätvirhe korjattiin keväällä 2010, minkä vaikutus näkyy tuloksissa kulutuksen pienenemisenä. Levylämmönvaihtimellisen IV-koneen sulatus aiheutti aluksi hankaluuksia asunnossa A. Lämmönvaihtimen sulatus tapahtuu siten, että sisäänpuhalluksen puhallin pysäytetään. Koska talon lämmitys perustuu ilmanvaihdon ilman lämmittämiseen, katkesi lämmitys IV:n osalta kokonaan sulatusjakson ajaksi.

Ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelu ja säätöarvojen määrittäminen oli kohteessa tehty normaalisti suunnittelumenetelmien mukaisesti, ottamatta huomioon rakennuksen erityispiirteitä. Ilmanvaihdon kannalta rakennuksen vaipan ilmatiiviyys on erityispiirre, jolloin normaalisti suunnittelussa käytetty tulo- ja poistoilmamäärien suhde aiheuttaa rakennuksen sisälle kohtuuttoman alipaineen. Ilmanvaihdon toimintaa heikentäviä tekijöitä, edellä mainitun suunnitteluvirheen lisäksi, olivat eri kerrosten tulojen ja poistojen huomattava epätasapaino ja se, etteivät siirtoilmareiteiksi suunnitellut ovien kynnykset olleet avoimia. Olohuone- ja ruokailutilojen osalta ilmanvaihdon ilmamäärän mitoittava tekijä oli lämmitysteho, ja tämä oli jäänyt ottamatta huomioon suunnittelussa. Mittausjakson aikana järjestelmiä on säädetty paremmin vaatimuksia vastaaviksi keväällä 2010 ja vuoden 2011 alussa. Passiivitalo, erityisesti ilmanvaihtolämmityksellä varustettuna, edellyttää talotekniikan erittäin tarkkaa säätöä toimiakseen toivotulla tavalla. Lämmöntarpeen ollessa varsin vähäinen pienehköt säätövirheet saattavat aiheuttaa sisäolojen muuttumisen epäkelvoksi.

Toinen merkittävä ero oli saunan kiukaiden kulutuksissa. A-asunnossa on heti valmis kiuas ja B-asunnossa tarvittaessa lämmitettävä. Tarvittaessa lämmitettävän kiukaan vuosikulutus oli 300–400 kWh/a, mikä vastaa normaalia saunontaa noin kerran viikossa. Heti valmiin kiukaan kulutus oli tarkastelujaksoina 2 000–3 100 kWh/a. Toisin sanoen mikäli saunaa käytetään enemmän kuin neljä kertaa viikossa tai mikäli saunontajaksot ovat tavanomaisia pitempiä, eri kiuastyypin kulutukset kohtaavat.

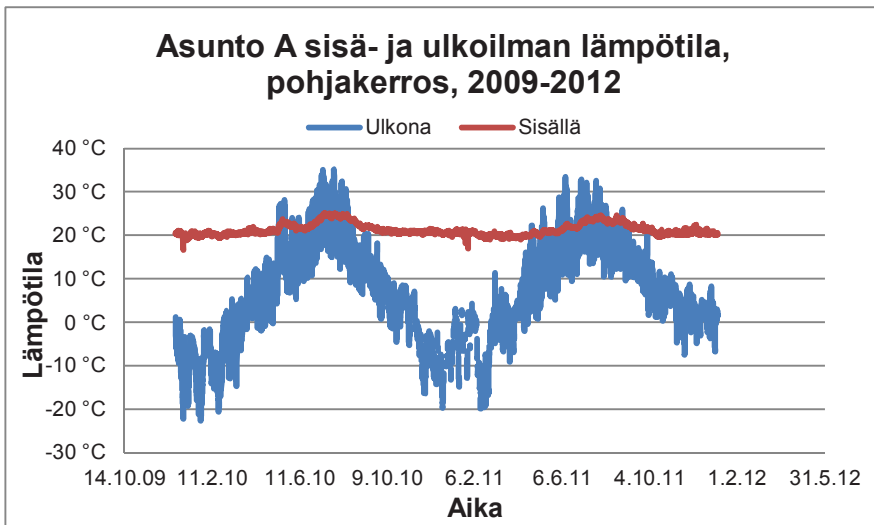
## 2.6 Sisäolosuhteet

Huoneistojen sisälämpötiloja ja kosteuksia seurattiin siten, että lämpötila- ja kosteusseurantapisteitä oli molemmissa asunnoissa neljä. Lisäksi kesäkaudella 2010 seurattiin eri asuntojen makuuhuoneiden CO<sub>2</sub>-pitoisuutta. Kuvissa 15–27 on mitatut tulokset seurantajakson ajalta.

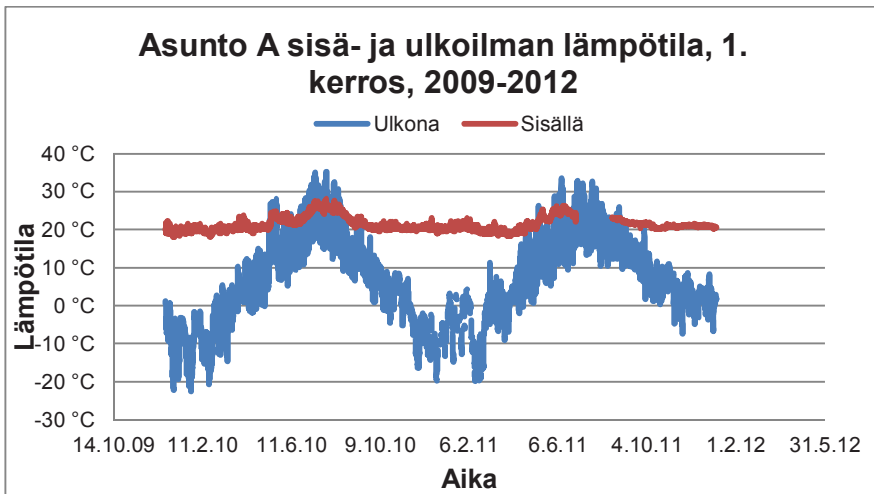
Kuvista voidaan todeta, että lämpötilaolosuhteet pysyvät sisätiloissa varsin vakaina. Kesän 2010 heinäkuu oli hyvin lämmin ja sisälämpötilat kohosivat 25 °C:n tuntumaan. Sisälämpötilan vuorokautiset vaihtelut ovat lähes olemattomat.

Sisäilman kosteus seuraa pienellä viiveellä ulkoilman lämpötila/kosteus-tilaa, eikä kerroksien eikä asuntojen välillä ole merkittäviä eroja. Talvikaudella 2010–2011 A-asunnon kosteus oli tosin hieman B-asuntoa korkeampi.

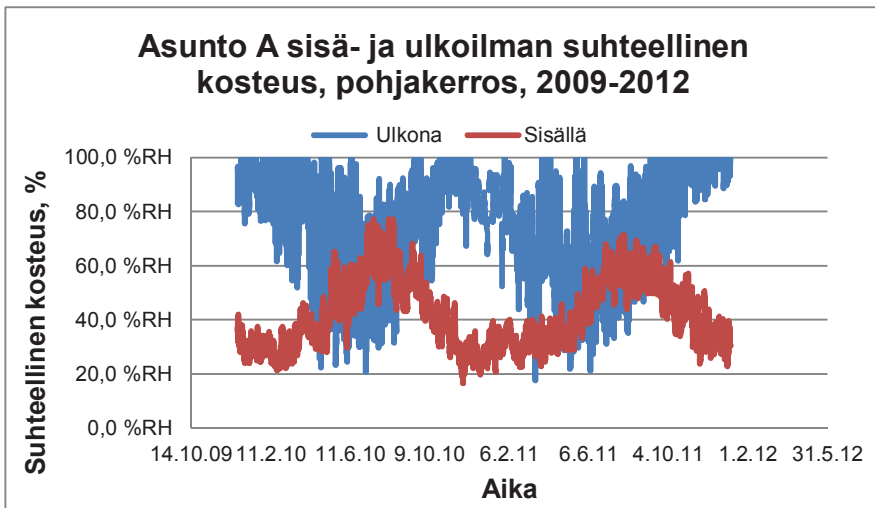
Hiilidioksidipitoisuudet molempien asuntojen makuuhuoneissa olivat hyvällä tasolla ja 1 000 ppm:n ylityksiä todettiin vähän.



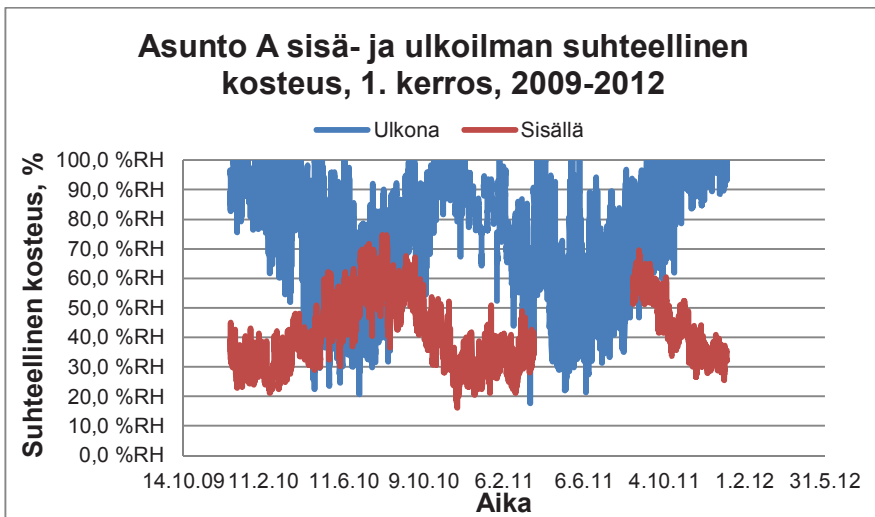
**Kuva 15.** Asunnon A pohjakerroksen sisäilman lämpötilä ja ulkoilman lämpötilä (2009–2011).



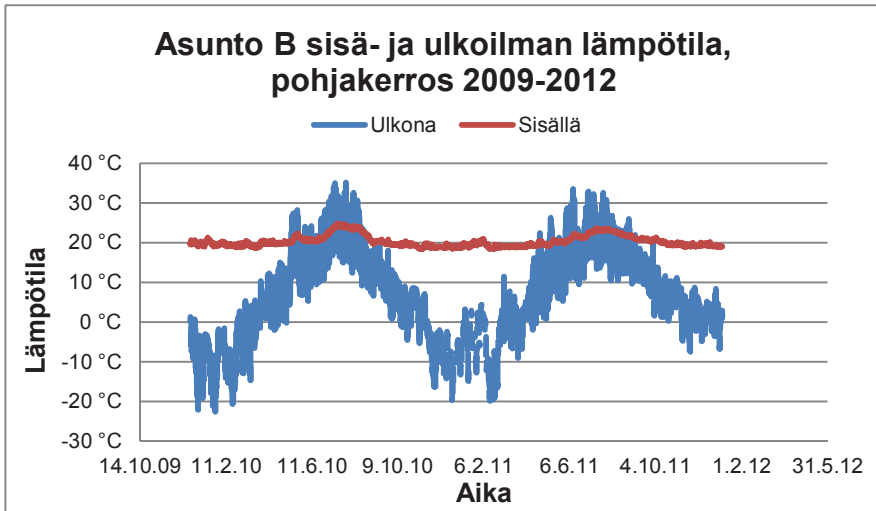
**Kuva 16.** Asunnon A 1. kerroksen sisälämpötilä ja ulkoilman lämpötilä (2009–2011).



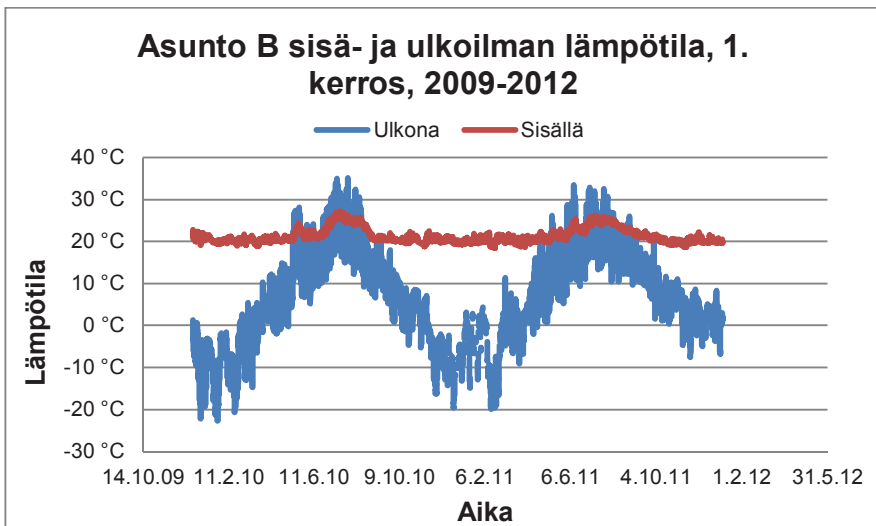
**Kuva 17.** Asunnon A pohjakerroksen sisäilman ja ulkoilman suhteellinen kosteus (2009–2011).



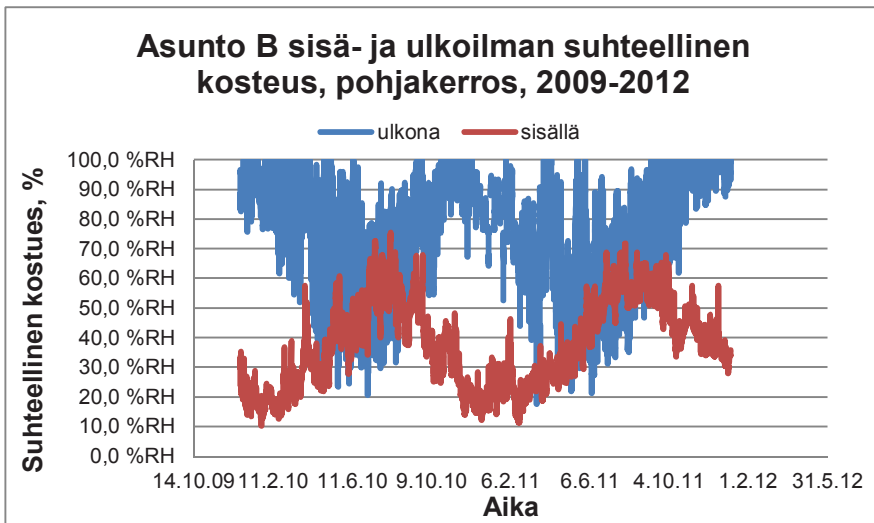
**Kuva 18.** Asunnon A 1. kerroksen sisäilman ja ulkoilman suhteellinen kosteus (2009–2011).



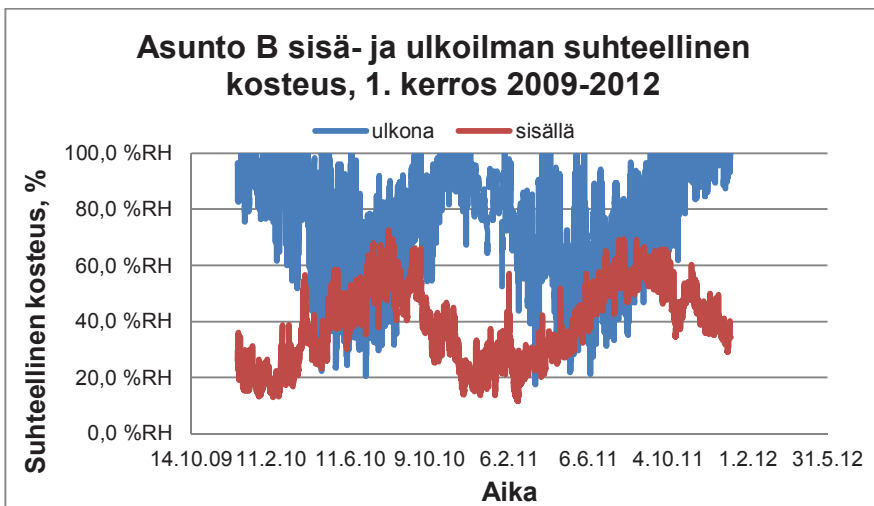
Kuva 19. Asunnon B pohjakerroksen sisäilman ja ulkoilman lämpötilä (2009–2011).



Kuva 20. Asunnon B 1. kerroksen sisäilman ja ulkoilman lämpötilä (2009–2011).



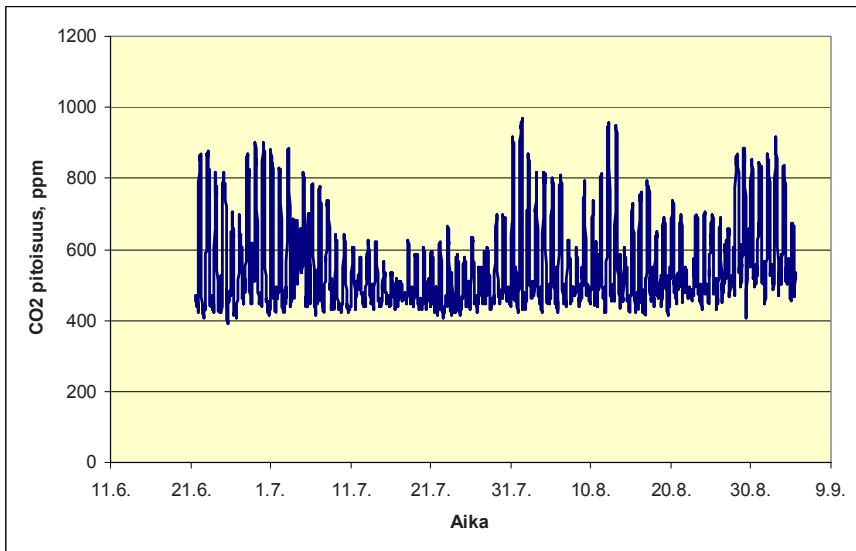
**Kuva 21.** Asunnon B pohjakerroksen sisäilman ja ulkoilman suhteellinen kosteus (2009–2011).



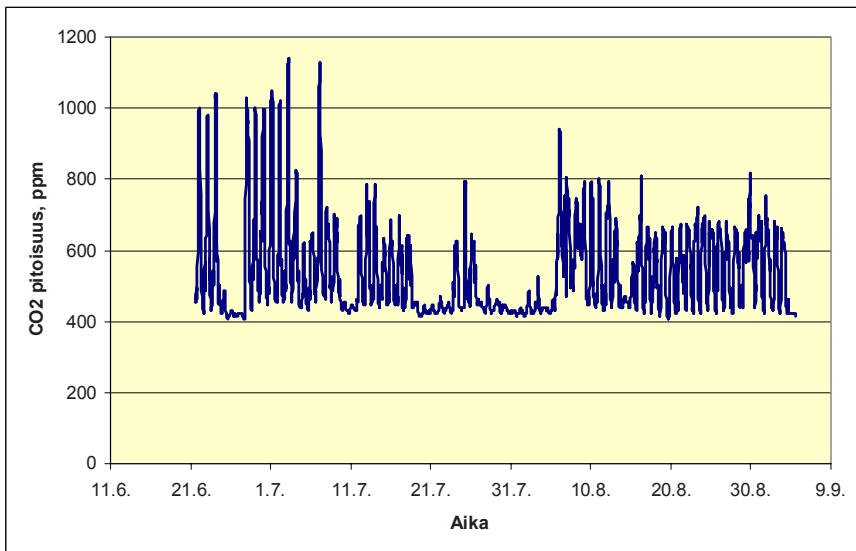
**Kuva 22.** Asunnon B 1. kerroksen sisäilman ja ulkoilman suhteellinen kosteus (2009–2011).

## 2. Paroc Passiivitalo

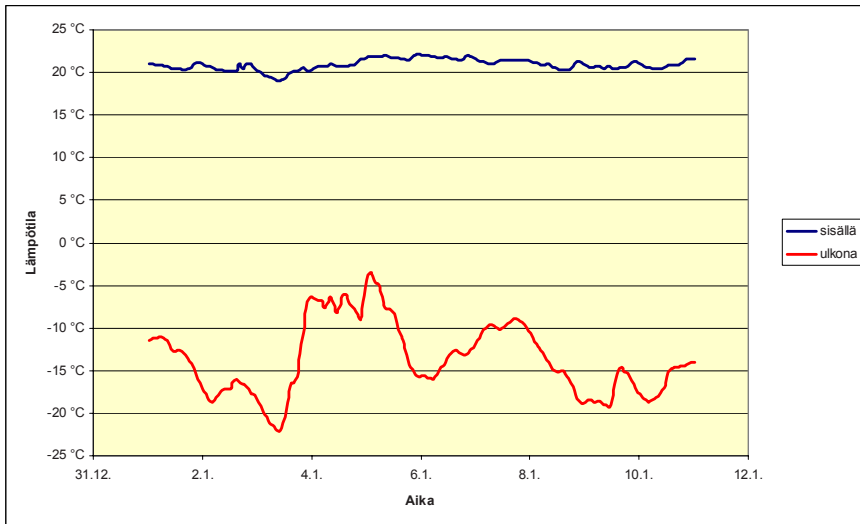
---



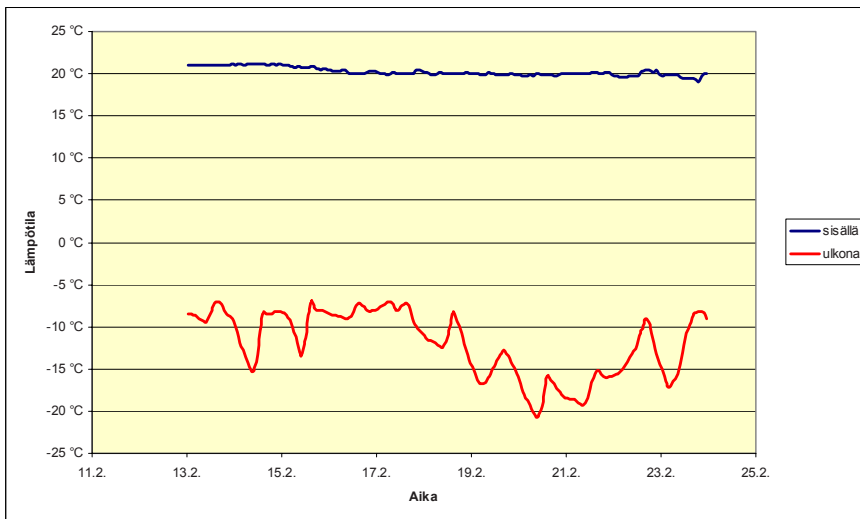
**Kuva 23.** Asunnon A makuuhuoneen CO<sub>2</sub>-pitoisuus (2010).



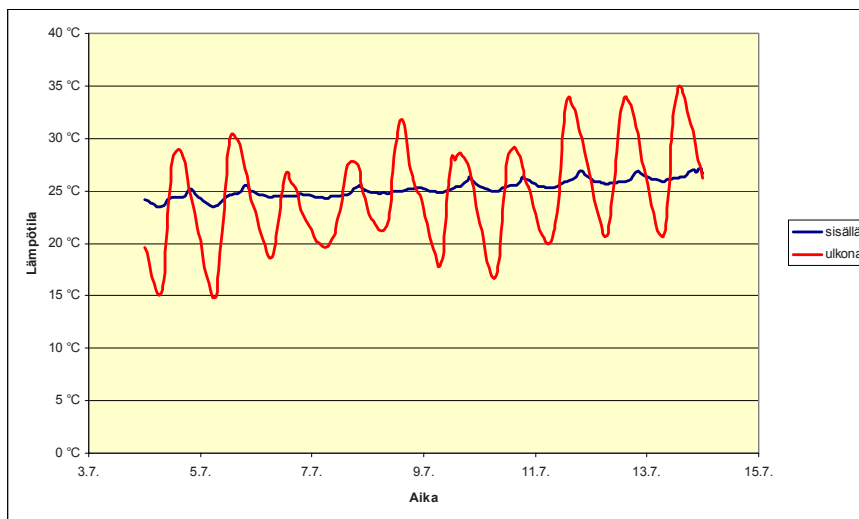
**Kuva 24.** Asunnon B makuuhuoneen CO<sub>2</sub>-pitoisuus (2010).



**Kuva 25.** Asunnon B 1. kerroksen sisälämpötila ja ulkoilman lämpötila kymmenen päivän ajalta talvella.



**Kuva 26.** Asunnon B 1. kerroksen sisälämpötila ja ulkolämpötila kymmenen päivän ajalta keväällä.



**Kuva 27.** Asunnon B 1. kerroksen sisälämpötila ja ulkolämpötila kymmenen päivän ajalta kesällä.

### 2.7 Päätelmät

Passiivitalo on ollut käytössä kaksi talvikautta. Ensimmäisen talvikauden aikana rakennusta ja sen järjestelmiä vielä viimeisteltiin ja järjestelmien säätöjä on tehty aina 2011 vuoden alkuun asti. Seurantamittausten tulokset eivät näin ollen anna täyttä kuvaa rakennuksen energiateknisestä toimivuudesta. Mitatut energiankulutukset eivät saavuta aivan passiivitalon määritelmän edellyttämää lämmöntarpeen tasoa, mutta keväällä 2011 tehdyt säätöjen tarkennukset viittaavat siihen, että asetettu taso tullaan saavuttamaan.

Tarkasteltaessa asunnon A, jonka kulutuslukemat olivat suuremmat, kokonaisenergian kulutusta todetaan normeeratuksi kulutukseksi noin 17–18 MWh/a, mikä vastaa 73–77 kWh/m<sup>2</sup> a. Rakennukseen energia tuodaan sähkönä, jonka primäärienergiakerroin E-luvun laskemista varten on 1.7. Täten asunnon A primäärienergian kulutus on noin 130 kWh/m<sup>2</sup> a, mikä täyttää juuri passiivitaloille asetetun raja-arvon (130 kWh/m<sup>2</sup> a). Asunnon B osalta kokonaiskulutus 12,5–13,5 MWh/a vastaa 54–58 kWh/m<sup>2</sup> a. Primäärienergian kulutuksena tämä on 92–99 kWh/m<sup>2</sup> a, mikä alittaa tuntuvasti passiivitalon raja-arvon.

Lämmitysenergian normeerattu kulutus A-asunnon osalta oli 8,5–9,5 MWh/a, mikä vastaa 36–41 kWh/brutto m<sup>2</sup> a ja B-asunnon osalta 5,5–6,5 MWh/a eli 23–27 kWh/brutto m<sup>2</sup> a. Lämmitysenergian osalta ei aivan saavutettu asetettua tavoitetasoa (20 kWh/m<sup>2</sup> a), mutta syy ainakin osittain on talotekniikan säätöjen virheellisydet. Asunnon A suurempi lämmitysenergian kulutus johtunee ainakin osittain IV-koneen jäätymis- ja säätöongelmista, joiden vuoksi laitteistoon tehtiin muutoksia vielä 2011 alkuvuodesta.



Rakennuksen simuloinnissa saatiin koko rakennuksen lämmitysenergian kulu-  
tukseksi, ikkunoiden U-arvolla  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , noin  $7\,300 \text{ kWh/a}$ , jossa on lisäksi maa-  
lämpöä  $1\,290 \text{ kWh/a}$ . Mittauksessa todettiin rakennuksen kuluttavan  $14\,000$ –  
 $16\,000 \text{ kWh/a}$ , johon lisäksi maalämpöä saatiin  $870$ – $1\,220 \text{ kWh/a}$ . Laskennassa  
on vuotuisiksi sisäisiksi kuormiksi arvioitu  $12\,900 \text{ kWh/a}$ . Poikkeama voi myös  
osaltaan johtua toteutuneiden ja laskennallisten sisäisten kuormien eroista ja maa-  
lämmön pienemmästä osuudesta.

## 3. Paroc Lupaus

### 3.1 Paroc Lupaus -pilottikohteen konsepti

Pilottikohteen konseptikehityksen lähtökohta oli varsin tavanomainen. Rakennuttajat olivat laatineet tulevasta rakennuksestaan suunnitelmia, ja mm. pohjaratkaisut oli löytö varsin pitkälle lukkoon. Pilottikohteeseen tuotettiin puurakenneratkaisuja, joita käyttämällä asetetut tavoitteet arvioitiin saavutettavan. Samoin talotekniikkaratkaisuihin hahmoteltiin useampia vaihtoehtoja.

Rakennus on kaksikerroksinen omakotitalo, jossa huoneiston kerrosala on 290 m<sup>2</sup>. Rakennuttaja halusi olohuoneisiin suuret ikkunat, jotka suuntautuvat pohjoiseen. Perustamisolosuhteet olivat hyvät, kallion ollessa lähellä perustamistasoa. Alemman kerroksen lattiarakenne on maanvarainen betonilaatta, jossa on lattialämmitysputket ja jonka alapuolella on noin 420 mm:n kerros polystyreenilämmöneristyslevyä. Ulkoseinät ovat kertopuurunkoisia elementtejä, jotka eristettiin 480 mm:n paksuisella mineraalivillalla (kivivilla). Ulkopinta rapattiin. Välipohja on rakennettu kertopuupalkein. Ylemmän kerroksen seinät ovat kertopuurunkoisia puuelementtejä, joissa on 480 mm:n lämmöneriste. Rakennuksen ulkopinnat rapattiin rakennuspaikalla. Rakennuksen yläpohjarakenne on puurakenteinen ja kannattajina on kertopuupalkit. Yläpohjan lämmöneristys on 650 mm mineraalivillalevyä. Rakennuksessa on sekä kiinteitä että avattavia ikkunoita. Kiinteät ikkunat ovat kolmilasisia umpiolasielementtejä ( $U = 0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ja avattavat ovat MSE-tyyppisiä ikkunoita, joissa sisäpuitteen umpiolasielementti on kaksilasin ( $U = 0,78 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Rakennuksen ilmanvaihdosta huolehtii pyörivällä lämmönvaihtimella varustettu Enerventin ilmanvaihtokone. Ilmanvaihdon sisäänpuhalluksen pääte-elimissä on sähköiset RC-linjan pääte-elinlämmittimet alakerroksen oleskelutiloissa. Lämmitysyksiköt on ohjattu huoneilmatermostaatein. Lisäksi alakerroksessa on vesikiertoinen lattialämmitys. Lattialämmityksen energia, samoin kuin lämpimän käyttöveden lämmitysenergia, otetaan varaajasta, jota ladataan ilmalämpöpumpulla.

Passiivitalon konseptiratkaisu perustuu siis seuraavaan:

- vaipan erinomainen lämmöneristystaso
- vaipan hyvä ilmatiiviyys
- lämpötekniisesti korkeatasoiset ikkunat ja ovet
- tehokas lämmön talteenotto ilmanvaihdon poistoilmasta
- lämmön tuotto ilmalämpöpumpulla.

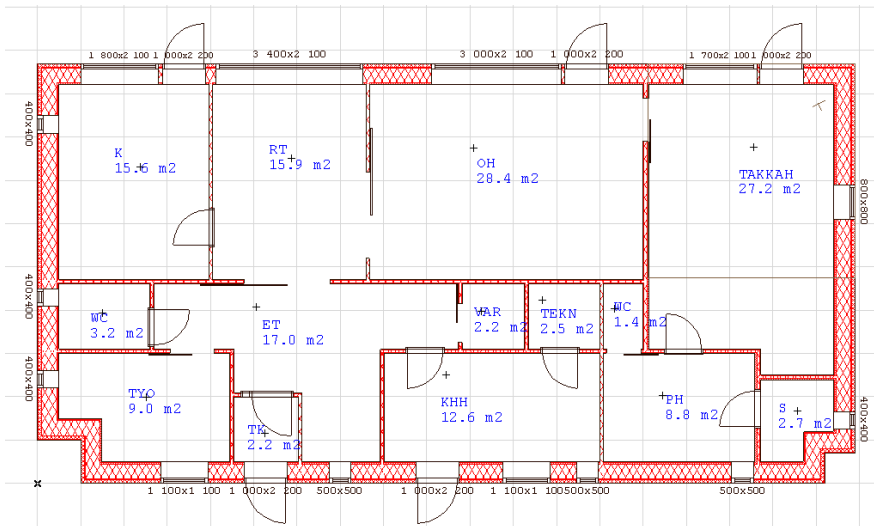
### 3.2 Paroc Lupauksen simulointi

Valkeakosken Paroc Lupaus -pilottitalon lämpötekniisten simulointien tavoitteena oli tarkastella kohteen lämpötekniistä toimivuutta.

VTT:ssä kehitetty ei-kaupallinen simulointiohjelma VTT Talo simuloi ilmavuotoja, ilmanvaihtoa ja lämmönsiirtoprosesseja. Simulointi perustuu solmupistemalliin, jossa massatase, liikemäärä ja lämpötaseet on määritelty diskreetisti. Simuloitavaa prosessia kuvataan termisellä solmuverkolla, joka muodostuu solmupisteiden kapasitansseista ja solmujen välisistä konduktansseista. Lämpötaseyhtälöt ja sitä kautta solmujen lämpötilat ratkaistaan differentiaalimenetelmällä (finite difference heat balance method).

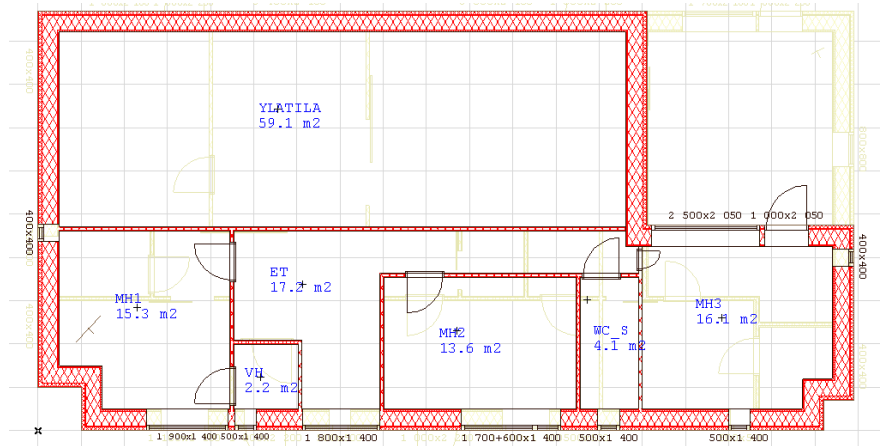
Paroc Lupaus -hankkeen Valkeakosken pilottitalon lämpötekniisten simulointien tavoitteena oli tarkastella kohteen lämpötekniistä toimivuutta.

Pilottitalosta tehtiin IFC (Industrial Foundation Classes) -mallit ArchiCad-ohjelmalla ja IFC-tiedostosta VTT Talo -ohjelmalla xml-pohjainen dynaaminen simulointimalli lämpötekniistä laskentaa varten (kuvat 28 ja 29: kerrosten pohjapiirustukset). Kuvassa 30 on rakennuksen arkkitehtipohjakuva.

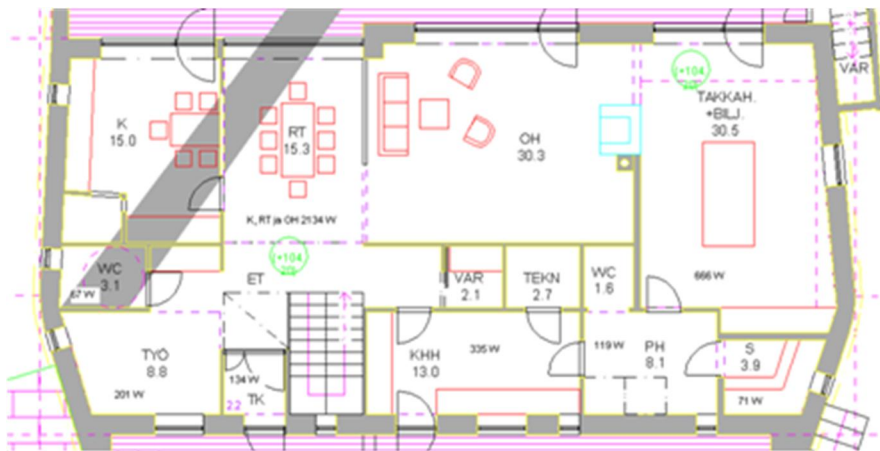


Kuva 28. Passiivitalo Paroc Lupauksen pohjapiirustus, 1. kerros.

### 3. Paroc Lupaus



Kuva 29. Passiivitalo Paroc Lupauksen pohjapiirustus, 2. kerros.



Kuva 30. Passiivitalo Paroc Lupauksen arkkitehtipohjakuva.

Passiivitalo Paroc Lupauksen rakenteet ja U-arvot esitetään taulukossa 2.

Laskentamallille tehtiin simuloimalla painekoe. Ikkunoiden ilmarakoa muokattiin siten, että talon ilmantiiveydeksi saatiin 0,6 l/h (50 Pa).

Taulukossa 3 esitetään laskennassa käytetyt tilojen pinta-alat.

Taulukko 2. Passiivitalon rakenteet.

Rakenne	Kerros, paksuus	U-arvo, W/m <sup>2</sup> K
ulkoseinä	verkotus + ohutrappaus, 10 mm kova lämmöneriste Paroc Fal1, 80 mm tuulensuojakipsilevy, 9 mm kantava puurunko ja mineraalivilla, 350 mm havuvaneri, 6,5 mm ilmansulku/höyrynsulku, 0,5 mm mineraalivilla, 48 mm kipsilevy, 13 mm	0,078
yläpohja	konesaumattu peltikate, 100 mm ruodelaudoitus 22 x 100, 22 mm korotuslauta 22 x 100, 22 mm aluskate, 0,5 mm tuulettuva ilmatila, 100 mm tuulensuojakangas, 0,5 mm kattokannattimet ja mineraalivilla, 600 mm ilmansulku/höyrynsulku, 0,5 mm asennustila/lautakoolaus, 44 mm sisäverhoulevy 12 mm	0,058
alapohja	sora 200 mm ESP-eriste 350 mm teräsbetonilaatta, 70 mm tasausvalu, 50 mm pintamateriaali, 8 mm	0,087
ikkunat		0,74
ovet	kaksoisrakenne	0,4

Taulukko 3. Passiivitalo Paroc Lupauksen tilojen pinta-alat.

Tila	Pinta-ala, m <sup>2</sup>	Asetuslämpötila, °C	Tuloilma/poistoilma, dm <sup>3</sup> /s
<b>Kerros 1</b>			
Olohuone	28,4	21	14,2/0
Takkahuone	27,2	21	13,6/0
Ruokailutila	15,9	21	8,0/0
Keittiö	15,6	21	0/9,9
Työhuone	9,0	21	4,5/0
Eteinen	17,0	17	6,8/8,4
Tuulikaappi	2,2	19	0/0
WC	3,2	21	0/8,6
Kodinhoituhuone	12,6	21	0/9,9
Varasto	2,2	5	0/0,9
Tekninen tila	2,5	5	0/1,1
Sauna	2,7	21	5,4/6,7
Pesuhuone	8,8	22	0/12,3
WC	1,4	21	0/8,6
<b>Kerros 2</b>			
Makuuhuone 1	15,3	21	7,7/0
Makuuhuone 2	13,6	21	6,8/0
Makuuhuone 3	16,1	21	8,1/0
Eteinen	17,2	17	6,9/8,5
Vaatehuone	2,2	19	0/3,7
WC, suihku	4,1	21	0/8,6
<b>Rakennus yhteensä</b>	<b>217,2</b>		<b>81,9/87,3</b>

### 3. Paroc Lupaus

Koko rakennuksen tuloilmavirta on  $81,9 \text{ dm}^3/\text{s}$  ja poistoilmavirta  $87,3 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Ilman vaihtuvuus poistoilmavirrasta laskettuna on  $0,47 \text{ 1/h}$ .

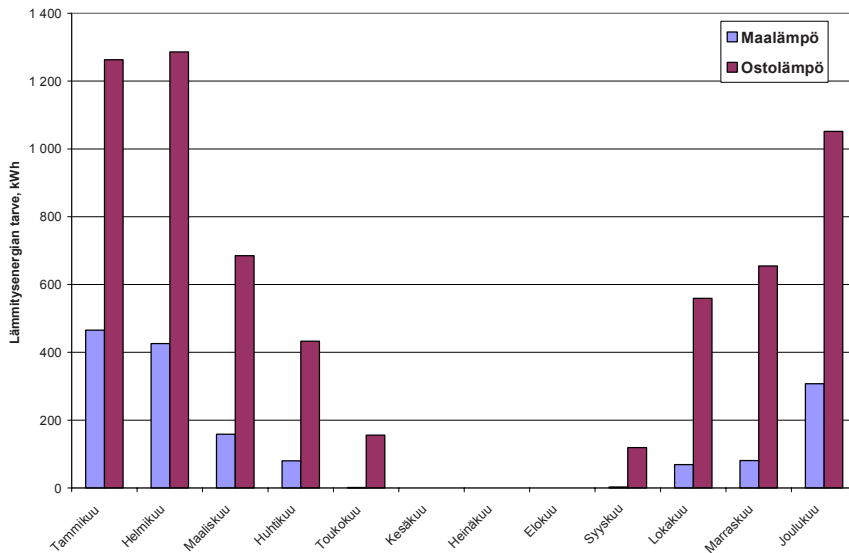
Huoneiden asetuslämpötilat ovat  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , paitsi pesuhuoneen  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , vaatehuoneiden ja tuulikaappien  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ , eteisten  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  ja teknisen tilan sekä varaston  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Sisäisenä kuormana on neljän hengen LVIS 2000- pientalon lämpökuorma. Simuloitu sisäisten lämpökuormien keskimääräinen vuosiarvo on  $3,5 \text{ W/m}^2$ .

Ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmän vuosihyötysuhde on  $0,8$ .

#### 3.2.1 Lämpöenergian tarpeen simulointitulokset

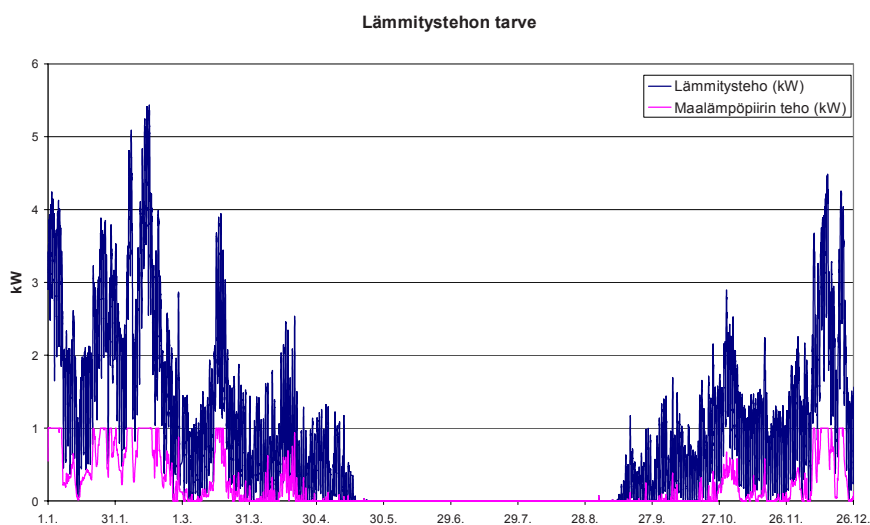
Talon vuotuinen lämmitysenergian tarve laskettiin säätiedostolla 1979. Vuotuinen tilojen ja sisäilman lämmityksen energian tarve talolle oli  $7\,900 \text{ kWh/a}$  sisäisten lämpökuormien kanssa. Tästä maalämmöllä saatava osuus oli  $1\,590 \text{ kWh}$ , eli ostoenegian tarve oli siten  $6\,210 \text{ kWh/a}$ . Kun maalämmönvaihtimen pumpun energiantarve on  $200 \text{ kWh}$  vuodessa, on maapiiristä saatava nettohyöty  $1\,390 \text{ kWh}$ . Lämmitysenergian tarpeen kuukausittainen jakauma esitetään kuvassa 31.



Kuva 31. Lämmitysenergian kuukausittainen tarve.

Neliometriä kohti laskettu lämmitysenergian tarve oli maalämpö huomioituna  $23,5 \text{ kWh/m}^2$ .

Tilojen ja ilmanvaihdon lämpötehon maksimitarve on  $5,4 \text{ kW}$ , josta maalämmön osuus on  $1,0 \text{ kW}$ . Lukuihin ei sisälly käyttöveden lämmitys. Vuotuinen lämpötehon vaihtelu esitetään kuvassa 32.



**Kuva 32.** Lämmitystehon tarve.

Huonekohtaiset tehontarpeet laskettiin ilman sisäisiä lämpökuormia mitoituslämpötilassa  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3 Rakennusaikana tehdyt mittaukset ja tarkastukset

Rakennusvaiheen silmämääräisten tarkastusten tarkoituksena oli varmistaa, että vaipan lämmöneristeiden asennus on tavoitteiden mukainen ja että rakennuksen vaipan tiivystavoite saavutetaan. Tiiviyys mitattiin ennen sisäpintojen viimeistelyä. Tarkastuksissa kiinnitettiin erityistä huomiota erilaisten läpivientien toteutukseen sekä eri rakenneosien, kuten ikkunoiden ja ovien, liittymiin ympäröivään rakenteeseen.

Rakennuksen vaipan valmistuttua ulkovaipan ilmatiiviyys mitattiin. Mittaustulosten perusteella rakennus on varsin tiivis ja täytti passiivitaloilta asetetut vaatimukset. Ilmavuotoluvuksi saatiin  $0,5\text{ }1/1/h$ .

### 3.4 Seurantamittauksen järjestelyt

Rakennuksen ensisijainen energia tuodaan rakennukseen sähköinä. Sähkömittauksen osalta erillisesti mitatut ryhmät ovat seuraavat:

- liesi
- kiuas
- kylmälaitteet
- ilmalämpöpumpun sisäyksikkö
- ilmalämpöpumpun ulkoyksikkö

### 3. Paroc Lupaus

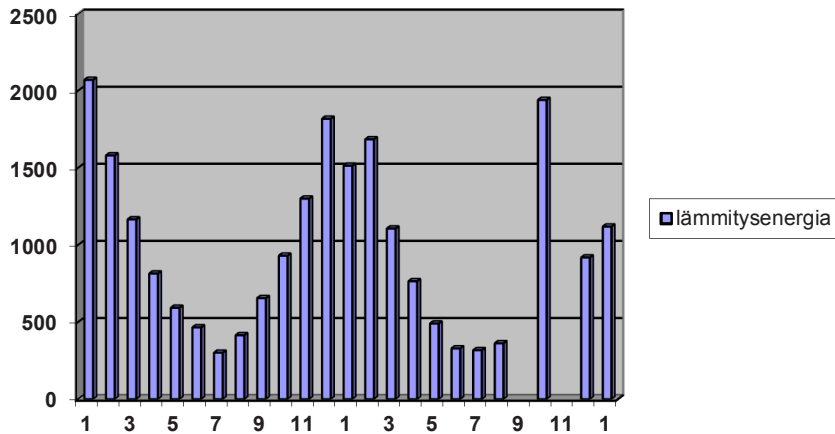
- IV-kone
- IV:n tuloilmalämmitys
- pistorasiat
- valaistus.

Lisäksi mitattiin energiat lämpöpumpun varaajasta lähteivistä lämpimästä käyttövedestä sekä lattialämmityskierrosta.

### 3.5 Seurantamittausten tuloksia

Rakennuksen valmistuttua ja seurantamittausjärjestelmää asennettaessa havaittiin, että ilmalämpöpumpuun liittyvään lattialämmityspiiriin ja lämpimän käyttöveden putkistoon ei ollut asennettu energiamittareita, joten lämpöpumpun energian käyttöä edellä mainituissa kulutuskohteissa ei voitu eritellä. Mittauslaitteet asennettiin syyskuussa 2010, minkä jälkeen eritelty tieto on saatu.

Rakennuksen tilojen lämmitys tapahtuu lämpöpumpulla sekä ilmanvaihdon sisäänpuhalluselimien sähkölämmitysvastuksilla. Koska käyttöveden ja tilojen lämmitystä ei alkuvaiheessa kyetty erottamaan toisistaan, esitetään kuvassa 33 tilojen lämmityksen ja käyttöveden lämmityksen yhteiskulutus (sähkö).



**Kuva 33.** Lämmitys- ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytetty energia (sähkö) kuukausittain (1.1.2010–31.1.2012). Syys-marraskuun 2011 välisenä aikana mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyn.

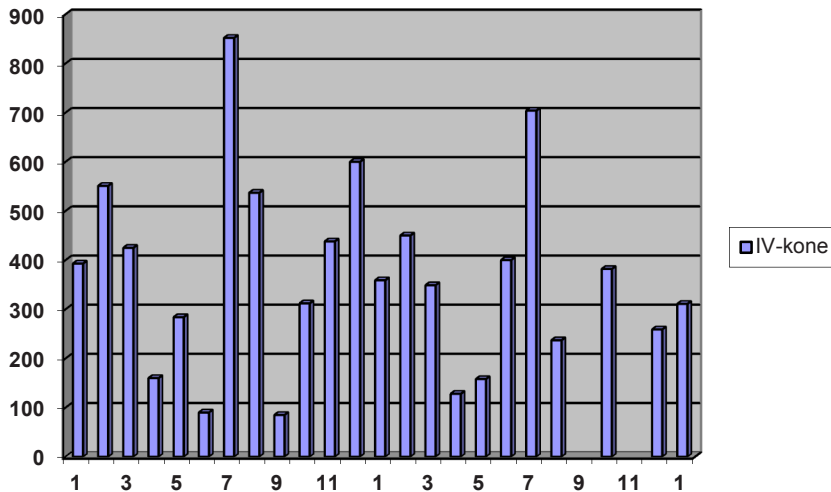
Lämmityksen ja käyttöveden lämmityksen yhteiskulutus on ollut kalenterivuodelta 2010 noin 12 100 kWh, mikä tarkoittaa 41,7 kWh/m<sup>2</sup> a kulutusta. Vastaavat luvut vuodelta 2011 ovat 9 720 kWh ja 33,5 kWh/m<sup>2</sup> a.

Mikäli käyttöveden lämmityksen hyötysuhteeksi arvioidaan 90 % ja kulutukseksi lokakuusta lähtien mitattujen kulutusten keskiarvot, saadaan tilojen lämmitysenergian kulutukseksi noin 8 740 kWh kalenterivuodelta 2010, mikä vastaa 30,2 kWh/m<sup>2</sup> a



kulutusta. Vuodelta 2011 mitatut energiat jaettuna mitattujen lattialämmityksen ja käyttöveden kulutusten suhteessa antavat kulutukseksi 6688 kWh eli 23,1 kWh/m<sup>2</sup> a.

Ilmanvaihtokoneen sähkönkulutus kuukausittain on kuvassa 34.

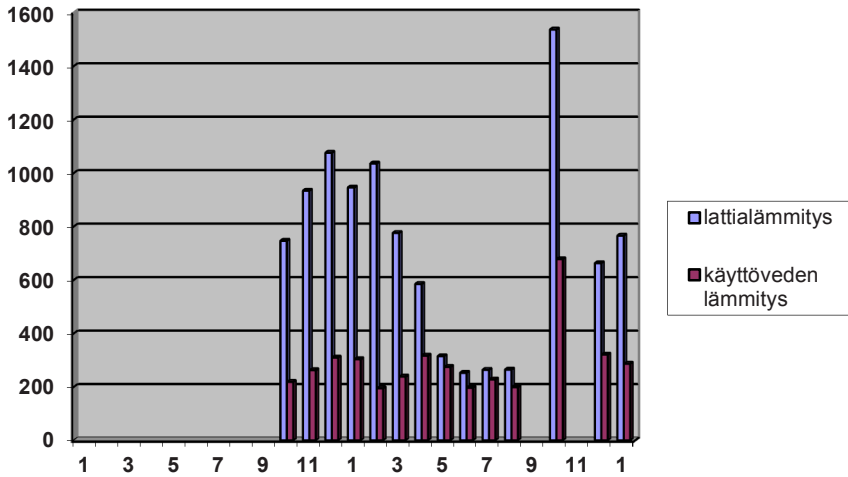


**Kuva 34.** IV-koneen energian kulutus kuukausittain, kWh (1.1.2010–31.1.2012). Syys-marraskuun 2011 välisenä aikana mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyn.

Ilmanvaihtokoneen kokonaiskulutus kalenterivuodelta 2010 on 4 727 kWh ja 2011 3 426 kWh. Kulutukset brutto-m<sup>2</sup>:ä kohden ovat siten 16,3 ja 11,8 kWh/m<sup>2</sup> a. Kulutus on suurehko, mutta sitä selittää osaltaan IV-koneen käyttö kesäaikaisessa jäähdytyksessä.

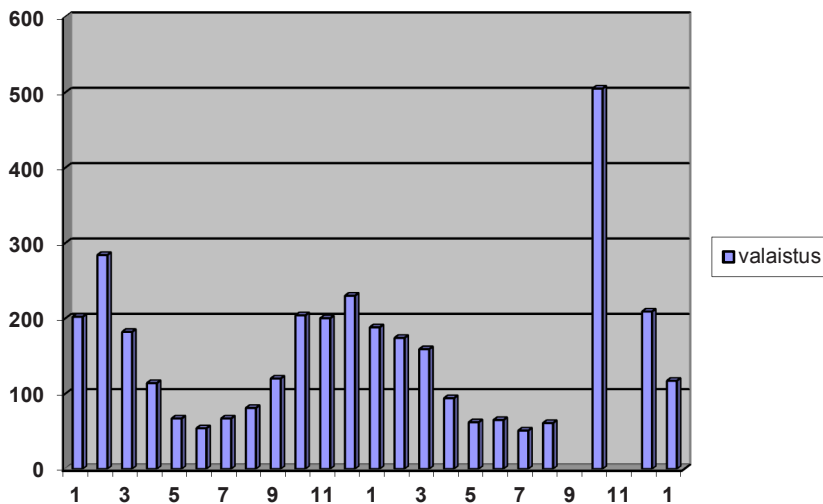
Varaajasta otettavat lattialämmityksen ja lämpimän käyttöveden lämmitysenergiat on mitattu lokakuusta 2010 lähtien, ja tulokset ovat kuvassa 35.

### 3. Paroc Lupaus



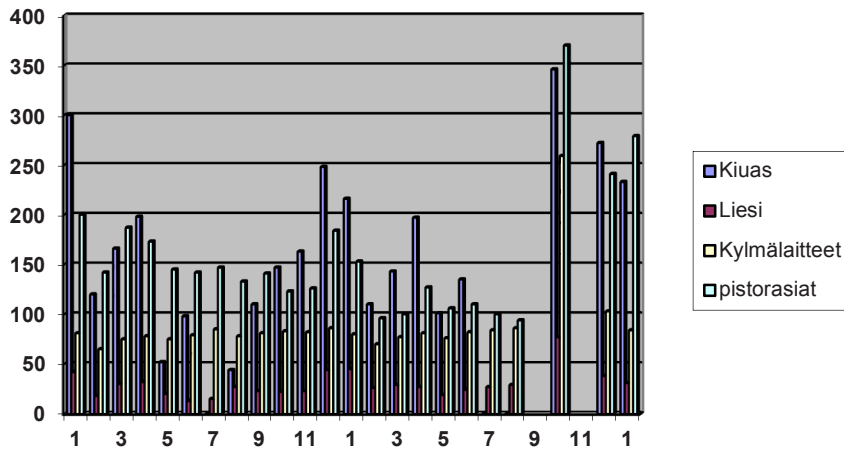
**Kuva 35.** Lattialämmitykseen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytetty energia mitatulta ajalta lokakuu 2010 – tammikuu 2012. Syys-marraskuun 2011 aikana mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyä.

Vuoden 2010 valaistukseen kulutettu energia on 1 805 kWh ja vuoden 2011 1 568 kWh. Nämä vastaavat kulutuksia brutto-m<sup>2</sup>:ä kohden 6,2 ja 5,4 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa (kuva 36).

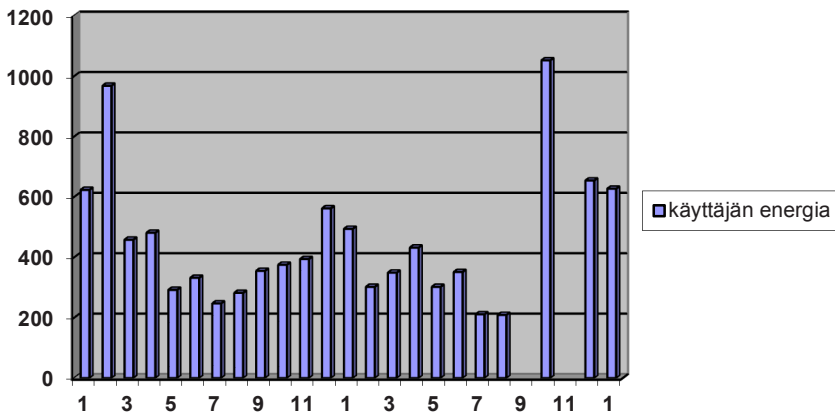


**Kuva 36.** Valaistuksen energiankulutus kuukausittain (1.1.2010–31.1.2012). Syys-marraskuun 2011 välisenä aikana mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyä.

Käyttäjistä riippuvaksi energian kulutukseksi on katsottu kiuas, liesi, kylmälaitteet ja pistorasiakäyttö. Kulutukset laiteryhmäkohtaisesti ovat kuvassa 37 ja kokonaiskäyttönä kuvassa 38.



**Kuva 37.** Käyttäjän energiankulutus kuukausittain jaettuna kiukaan, liedeen, kylmälaitteiden ja pistorasioiden energiankulutuksiin (1.1.2010–31.1.2012). Syys-marraskuun 2011 välisenä aikana mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyä.

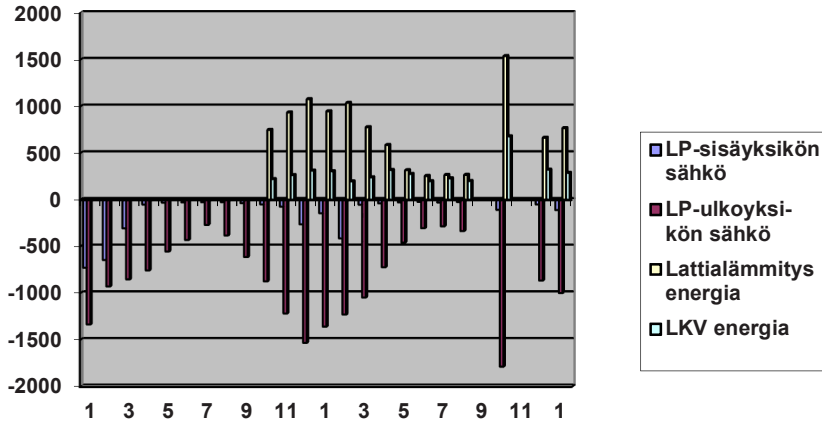


**Kuva 38.** Käyttäjän energiankäyttö yhteensä kuukausittain (1.1.2010–31.1.2012). Syys-marraskuussa 2011 mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyä.

Kulutukset kalenterivuodelta 2010 ovat olleet 4 746 kWh ja 2011 4 356 kWh. Ne vastaavat 16,4 ja 15,0 kulutusta brutto-m<sup>2</sup>:ä kohden.

### 3. Paroc Lupaus

Lämpöpumpun ottama sähköenergia ja varaajasäiliöstä otetut lattialämmityksen ja lämpimän käyttöveden lämmitysenergiat ovat kuvassa 39.



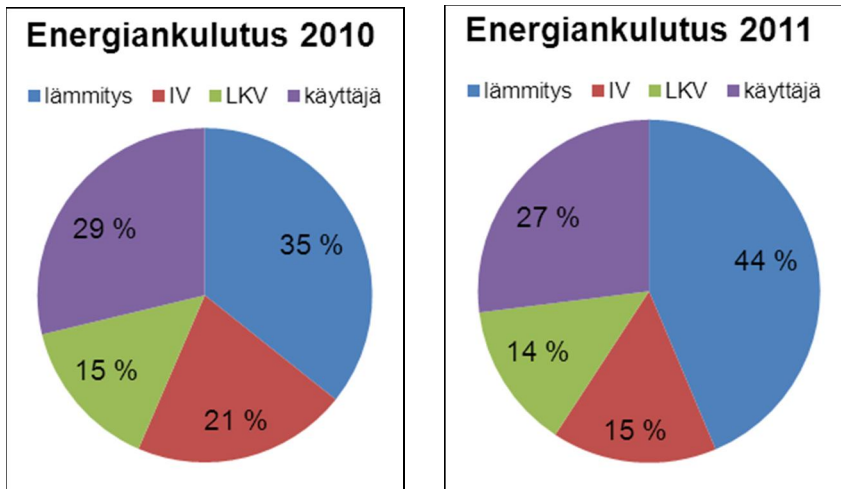
**Kuva 39.** Lämpöpumpun käyttämä sähköenergia ja varaajasta otetut lattialämmityksen ja lämpimän käyttöveden lämmityksen energiat. Lattialämmitystä ja LKV on mitattu erikseen lokakuusta 2010 lähtien. Syys-marraskuussa 2011 mittausjärjestelmässä oli vika, joka esti kuukausikohtaisten tulosten erittelyn.

Tarkasteltaessa kuvan pylväitä näyttää lämpöpumpun tarvitsema energiamäärä vuoden 2010 aikana jonkin verran suuremmalta kuin järjestelmästä hyödyksi saava energiamäärä. Tilanne on jossain määrin korjaantunut mittausvuoden 2011 aikana, joskin lämpökerroin on melko alhainen.

Taulukossa 4 esitetään rakennuksen lämmitysenergian kulutus, vuosien 1971–2000 keskimääräisiin sääoloihin normeerattu lämmitysenergian kulutus, ilmanvaihdon kuluttama energia, veden lämmitykseen käytetty energia, käyttäjän energia sekä kulutus yhteensä kalenterivuosilta 2010 ja 2011. Kuvassa 40 on rakennuksen normeeratun energiankulutuksen jakaumat.

**Taulukko 4.** Lämmitys-, normeerattu lämmitys-, IV-koneen, lämpimän käyttöveden ja käyttäjän energiankulutukset sekä normeerattu energiankulutus yhteensä (kWh). Lämpimän käyttöveden kulutus on alkuvuodelle 2010 oletettu lokakuu 2010 – maaliskuu 2011 ajalta mitatun mukaiseksi keskiarvoksi.

	2010	2011
Lämmitys	8 744	6 688
Normeerattu lämmitys	8 132	9 582
Ilmanvaihtokone	4 727	3 426
Valaistus	1 805	1 568
Lämmin käyttövesi	3 360	3 028
Käyttäjän energia	4 746	4 356
Normeerattu kulutus yhteensä	22 770	21 960



**Kuva 40.** Rakennuksen normeeratut energiankulutuksen jakautumat vuosina 2010 ja 2011.

Taulukon 4 kulutusarvoista voidaan todeta lämmitysenergian kulutuksen olevan hieman passiivitalon määrittelyn mukaista suurempi. Energian kokonaiskulutus sen sijaan alittaa passiivitalomääritelmän mukaisen primäärienergiatarpeen, olettaen sähkön primäärienergiakertoimeksi 1,7.

Lämmitysenergian kulutuksen ylitys johtuu ainakin osittain rakennuksen sisälämpötilasta, joka on säädetty jonkin verran simuloinneissa käytettyä lämpötilaa korkeammaksi. Sisälämpötilatason valinta on kuitenkin hyvin asukaskohtaista, ja rakennus on tehty asumista varten siten, että haluttuun mukavuustasoon voidaan päästä.

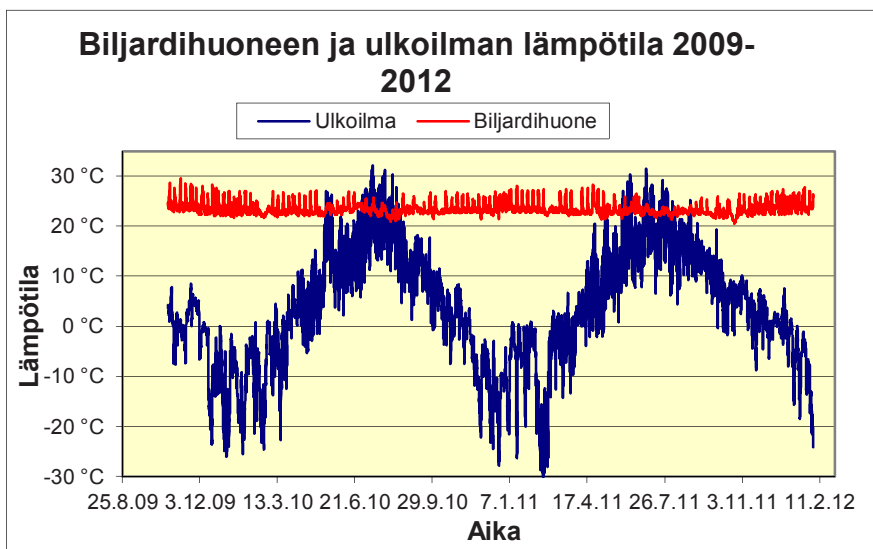
Lämpöpumppujärjestelmän lämpökerroin on jostain syystä jäänyt mittausjaksolla varsin alhaiseksi, ja näiltä osin järjestelmän toimivuutta ja säätöjä on syytä tarkastaa. Samoin ilmanvaihtokoneen kuluttama energiamäärä on varsin suuri, joten laitteiston toimivuutta ja säätöjä on hyvä tarkastella.

### 3.6 Sisäolosuhteet

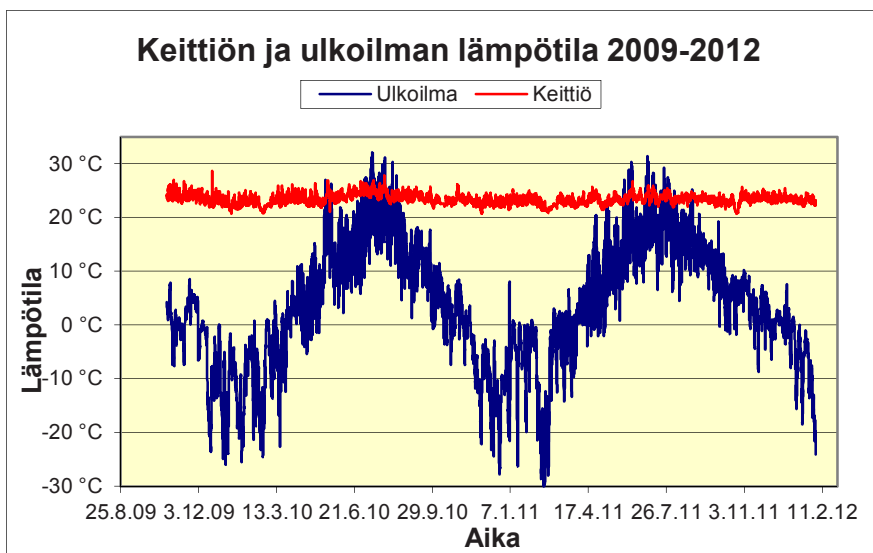
Rakennuksen sisälämpötiloja mitattiin kaikkiaan kuudesta eri tilasta. Lisäksi kosteuksia mitattiin kahdessa tilassa ja CO<sub>2</sub>-pitoisuuksia yhdestä makuuhuoneesta. Kuvissa 41–49 esitetään mitatut tulokset seurantajakson ajalta.

Kuvista voidaan todeta, että sisälämpötila on säädetty noin 23 °C:seen. Sisälämpötilataso on pysynyt samalla tasolla vuodenajasta riippumatta, huolimatta siitä, että kesällä 2010 oli hyvin lämmin ajanjakso. Mitatut huoneilman kosteudet seuraavat varsin loogisesti ulkoilmaolosuhteita.

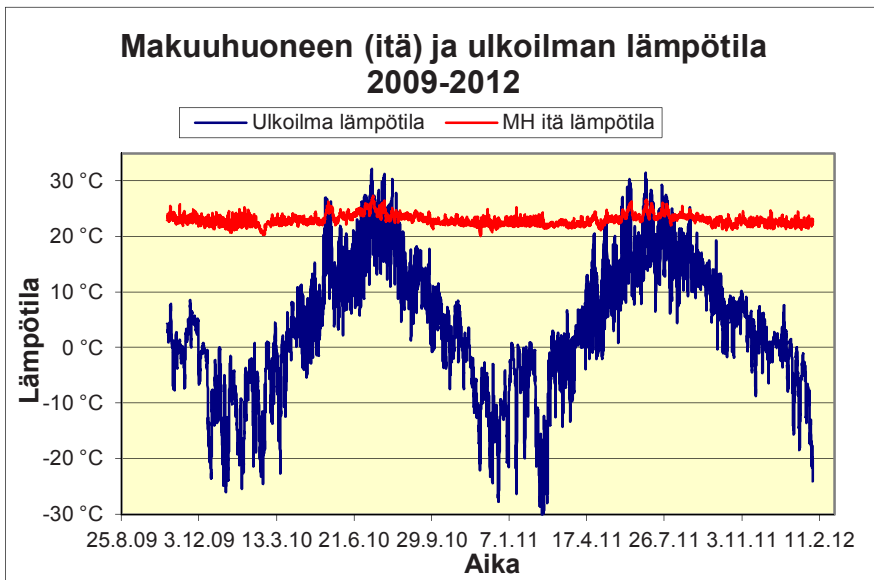
Hiilidioksidipitoisuudet makuuhuoneessa pysyvät hyvällä tasolla, ja tältä osin sisäolot ovat miltei parasta S1-sisäilmaluokkaa.



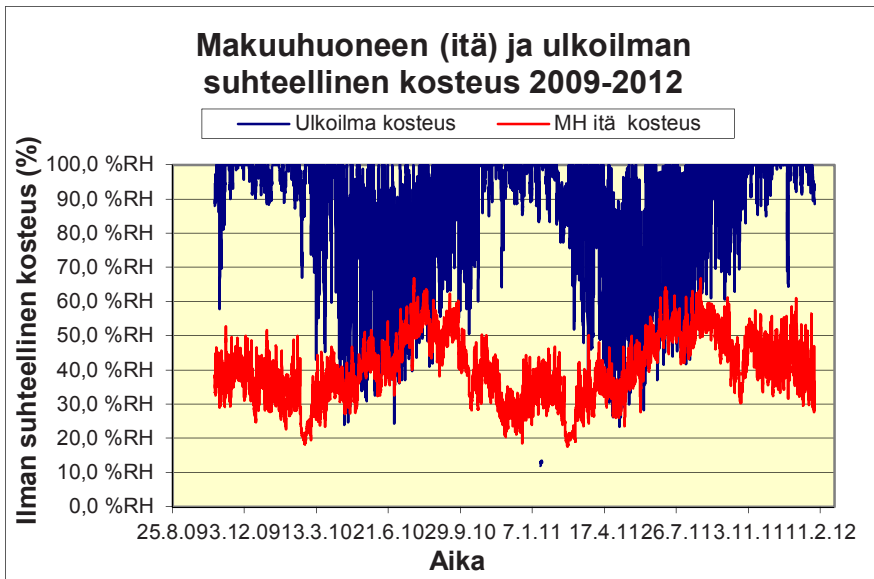
Kuva 41. Biljardihuoneen ja ulkoilman lämpötilat 2009–2012.



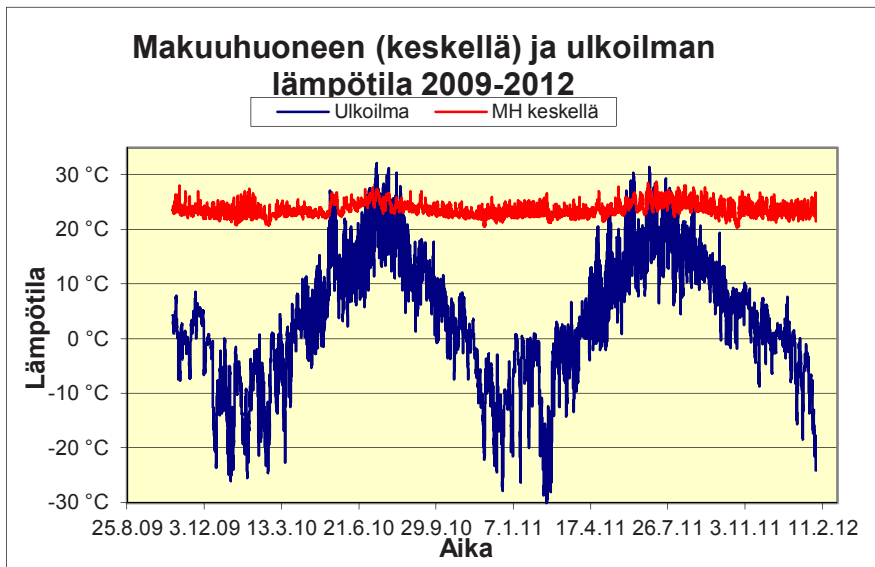
Kuva 42. Keittiön ja ulkoilman lämpötilat 2009–2012.



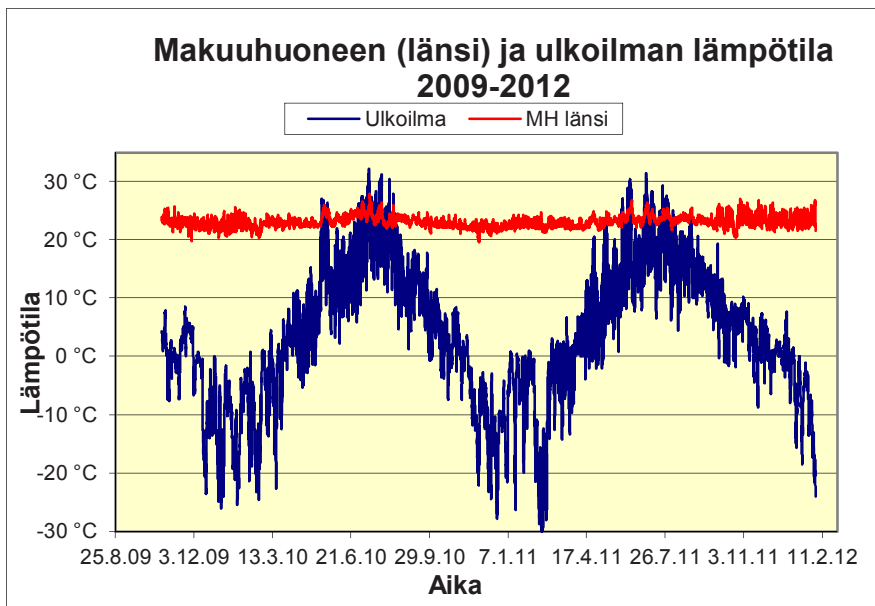
**Kuva 43.** Itämakuuhuoneen ja ulkoilman lämpötilat 2009–2012.



**Kuva 44.** Itämakuuhuoneen ja ulkoilman suhteellinen kosteus 2009–2012.

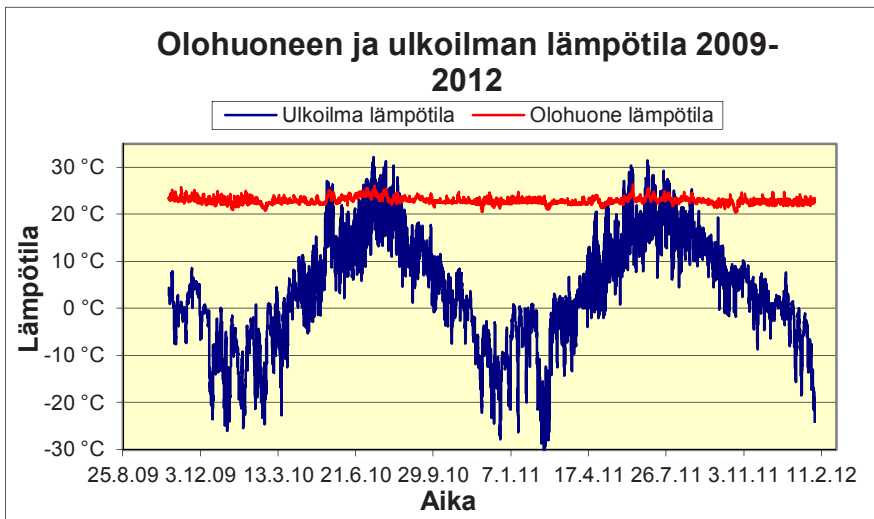


**Kuva 45.** Keskimakuuhuoneen ja ulkoilman lämpötilat 2009–2012.

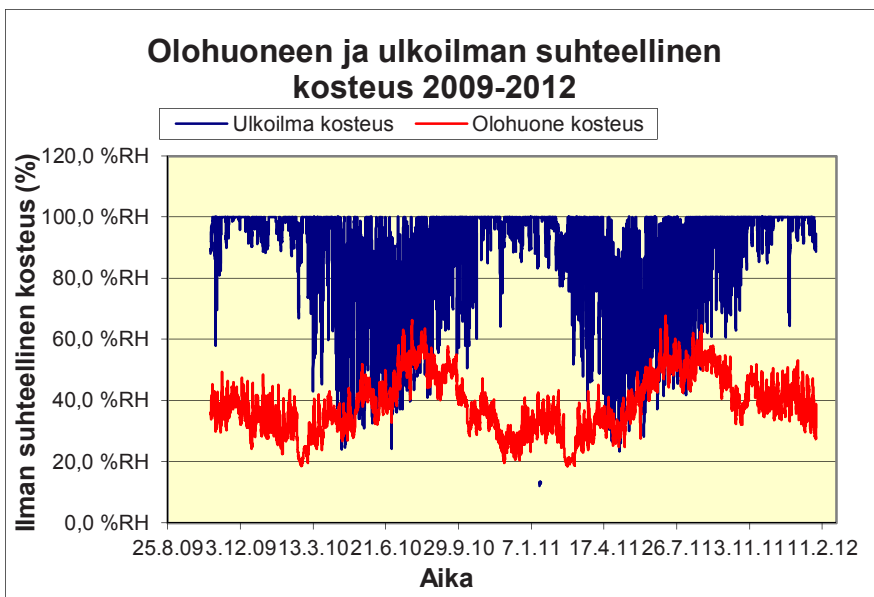


**Kuva 46.** Länsimakuuhuoneen ja ulkoilman lämpötilat 2009–2012.

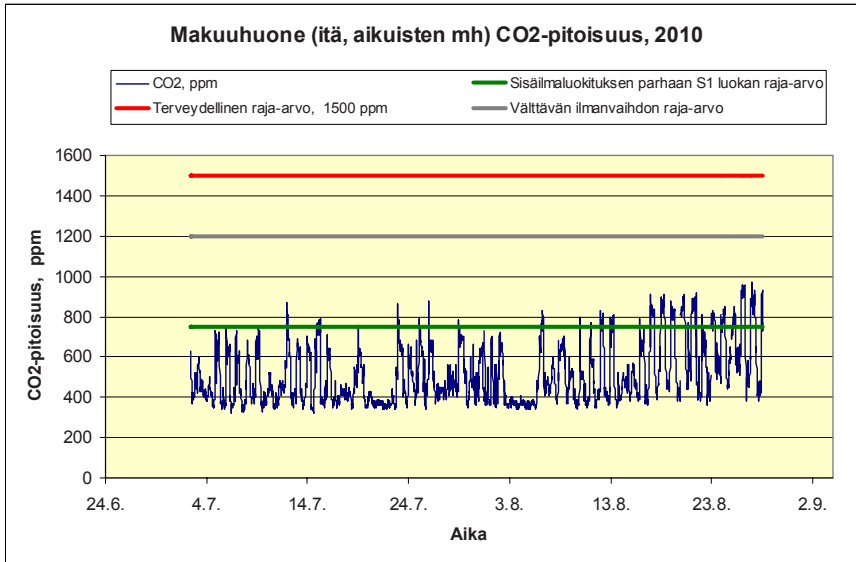




Kuva 47. Olohuoneen ja ulkoilman lämpötilat 2009–2012.



Kuva 48. Olohuoneen ja ulkoilman suhteellinen kosteus 2009–2012.



Kuva 49. Itämakuuhuoneen CO<sub>2</sub>-pitoisuus 2010.

### 3.7 Päätelmät

Passiivitalo Paroc Lupaus on ollut käytössä kaksi talvikautta. Mittausjakson tuloksista voidaan päätellä, että talo täyttää miltei passiivitalon määrittelyn mukaiset tavoitteet. Mittaustuloksista on kuitenkin nähtävissä, että rakennuksen talotekniset järjestelmät eivät toimi aivan optimaalisella tavalla. Tarkastus- ja säätötarpeita on sekä ilmanvaihtokoneessa että ilmalämpöpumpussa.

Normeerattu vuotuinen kokonaisenergian kulutus vaihtelee tarkasteluvuodesta riippuen 21 960:stä 22 770:een. Tämä vastaa 76–79 kWh/m<sup>2</sup> kokonaiskulutusta. Primäärienergiakertoimella 1,7 kulutukseksi tulee 129–133 kWh/m<sup>2</sup> a, joka täyttää passiivitalomäärittelyn arvon. Lämmitysenergian normeerattu kulutus tarkastelujaksosta riippuen vaihtelee 8 132–9 582 kWh/a, joka vastaa 28,0–33,0 kWh/m<sup>2</sup> a kulutusta. Se puolestaan ylittää passiivitalomäärittelyn mukaisen 25 kWh/m<sup>2</sup> a rajan. Rakennuksen sisälämpötilaa on kuitenkin pidetty kulutustarkasteluja korkeammalla tasolla, joten tältäkin osalta talo täyttäneen asetetut tavoitteet.

Rakennuksen simuloinnissa on lämmitysenergian kulutukseksi saatu 7 900 kWh/a ilman maalämpöä, jota toteutetussa rakennuksessa ei ole hyödynnetty. Laskettu kulutus on varsin lähellä toteutunutta. Laskennassa merkittäviä poikkeamia toteutuneisiin kulutuksiin verrattuna voi tulla sisäisten lämpökuormien arvioinnissa.

Rakennuksen taloteknisien järjestelmien toimivuudessa todettiin mittauksissa säätötarvetta. Ilmalämpöpumpun lämpökerroin on jostakin syystä varsin matala. Eräänä potentiaalisena virhetoimintona voivat olla lämpöpumpun ja sen sisäyksikön sähkövastusten käynnistymisrajojen lämpötilasäädöt. Kun lämpöpumpulle tulee

käynnistymiskäskey ja lämmön käyttöpuolella on tehotarvetta esimerkiksi lämpimän käyttöveden puolella, pumppu ei ehdi tuottamaan tarvittavaa tehoa riittävän nopeasti vaan varaajan lämpötilan laskiessa sähkövastukset menevät päälle. Toisin sanoen suurempi lämpötilaero vastusten ja lämpöpumpun termostaateissa voisi parantaa energiatehokkuutta.

Ilmanvaihtokoneessa on myös lämpöpumppu, jonka käynnistymiskäskey tulee ilmeisesti talon poistoilman lämpötilasta. Mikäli käynnistymisraja on asetettu hieman liian korkealle, käy lämpöpumppu miltei jatkuvasti ja tästä aiheutuu ilmanvaihtokoneen suuri energian kulutus. Osasyynä ilmanvaihtokoneen suurehkoon energiankulutukseen on jäähdetykskäyttö kesäkautena.

## 4. Passiivitalon ulkovaipparakenteiden kosteustekninen toimivuus

### 4.1 Kosteusteknisen toimivuuden arviointi

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arvioinnissa käytettiin apuna laskennallisia simulointiohjelmiä. Laskennallinen tarkastelu kuvaa ideaalisen rakenneleikkauksen toimintaa valituissa lämpötila- ja kosteusrasitusoloissa ja niillä materiaaliominaisuuksilla, joita rakenteen kerrokseen on asetettu. Laskennalla voidaan vertailla eri vaihtoehtojen toimivuutta samoissa oloissa ja pitkään jatkuvan sisä- ja ulkopuolisen kosteusrasituksen aikana.

Laskennallisen selvityksen täydentämiseksi tarvitaan asiantuntijanäkemyksiä arvioimaan toisaalta laskennan tulosten kriittisyyttä ja toisaalta laskennan ulkopuolelle jäävien tekijöiden vaikutusta kosteustekniseen toimivuuteen ja siihen liittyviin riskeihin.

Selvitys tehtiin laskennallisesti käyttäen lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden simulointiin WUFI 5.1 Pro -ohjelmaa [2]. Ohjelmalla voidaan ratkaista 1-ulotteisen rakenneleikkauksen kosteustekninen toimivuus tunneittain muuttuvissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa.

Laskennan ilmastotietoina käytettiin Vantaan vertailuvuoden säätietoihin perustuvia ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden, sade- ja tuulitietojen sekä auringon säteilyn tuntiarvoja. Sisäilman olosuhteet asetettiin EN15026 mukaisesti normaalia kosteuskuormaa vastaavaksi. Tässä sisäilman lämpötila on vakio +20 °C silloin, kun ulkoilman lämpötila on alle +10 °C. Kun ulkoilman lämpötila muuttuu 10 °C:sta +20 °C:een, kasvaa sisäilman lämpötila lineaarisesti +10 °C:sta +25 °C:een. Tätä korkeammilla ulkoilman lämpötiloilla sisäilman lämpötila on vakio +25 °C.

Kun ulkoilman lämpötila on alle -10 °C, on sisäilman suhteellinen kosteus 30 % RH. Sisäilman suhteellinen kosteus kasvaa tästä lineaarisesti RH 60 %:iin ulkoilman lämpötilan kasvaessa -10 °C:sta +20 °C:een. Sisäilman suhteellinen kosteus on maksimissaan 60 % RH. Esitetty kosteuskuormitus vastaa kuivien asuintilojen sisäilman kosteutta.

Kaikkien materiaalikerrosten alkukosteus oletettiin 80 % RH suhteellista kosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen.

Rakenteille oletettiin tarkasteluissa passiivitalon ilmapuotolukua vastaava ilmatuivisuus, jolloin rakenteiden kautta tai niiden läpi ilmavirtausten mukana kuljettu kosteus ei aiheuta kosteusriskiä. Lisäksi oletettiin, että rakenteiden sisään ei pääse tunkeutumaan nestemäistä vettä tai lunta. Kuormittavia tekijöitä ovat sisä- ja ulkoilman kosteus, ulkopintaan kohdistuva viistosade ja rakenteen alkukosteus.

Tyypillisesti pahin kosteuskuormitus on varjossa olevalla rakenteella, johon kohdistuu viistosade vuotuisen voimakkaimman sateen suunnasta. Seinärakenteet suunnattiin suurimman viistosateen suuntaan eli Vantaan ilmastossa etelään. Viistosateen aiheuttama kuormitus riippuu erityisesti rakenteen korkeudesta. WUFI-ohjelmassa voidaan viistosateen aiheuttama raskaus määrätä rakennuksen korkeuden perusteella.

#### **Materiaaliominaisuudet**

Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet ovat laskentaohjelmassa /1/ annettuja. Ne on koottu kattavasti mm. kansainvälisessä yhteistyössä tehdyissä hankkeissa /3/.

Laskennallinen tarkastelu tehtiin 1-dimensioiselle rakenneleikkaukselle. Rakenteen simulointilaskenta alkaa lokakuun 1. päivästä ja jatkuu valitun tarkastelujakson ajan saman mitoitusvuoden sääoloja käyttäen kolme vuotta.

Homeen kasvu on ensimmäisiä merkkejä, joita liika kosteus aiheuttaa rakenteissa. Homeen kasvua voidaan arvioida laskennallisesti käyttämällä tulosten jälkikäsitteilyssä VTT:ssä kehitettyä homemallia /4/ (kuva 50), johon on yhdistetty tyypillisten rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyttä kuvaava luokitus /5/.

Homemallin avulla homeen kasvua voidaan arvioida laskennallisesti. Kriittiseksi kohdiksi valittujen pintojen olosuhteiden perusteella voitiin laskea näille kohdille homeen kasvua kuvaava homeindeksi (0–6).

Homeindeksin arvo 1 kuvaa ensimmäistä mikroskoopilla havaittavaa alkavaa homekasvua ja taso 3 ensimmäistä paljain silmin havaittavaa kasvua tai kun mikroskooppihavainnoissa yli 50 % homepeittoa pinnalla. Rakenteiden sisäpinnan ja sisäilmaan kosketuksissa olevien osien kriteerinä käytetään tasoa 1, ts. mitään kasvua ei sallita.

Ulkopinnan lähellä olevien kerrosten rajana on usein taso 3, koska ulkoilman olosuhteet johtavat herkästi homeen kasvumahdollisuuteen näissä rakenneleikkauksissa, mutta ne eivät pääse suoraan kosketuksiin sisäilman kanssa. Rakenteen ulko-osien lievän homekasvun aiheuttama riski sisäilmalle on siten huomattavasti pienempi kuin sisäilmaan rajoittuvien rakenneosien. Tätä riskiä voidaan verrata ulkoilman aiheuttamaan riskiin sisäilmalle.

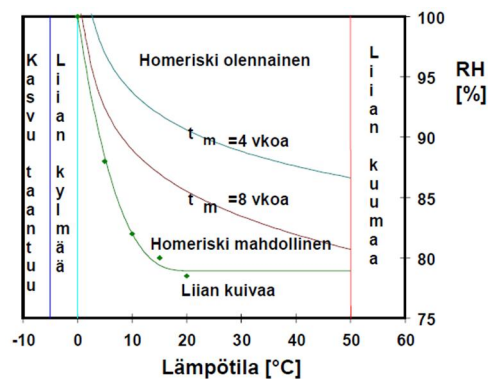
Homeen kasvu riippuu kasvualustan homehtumisherkkyydestä. Materiaaleja on luokiteltu neljään eri ryhmään niiden homehtumisherkkyyden mukaan:

1. **Erittäin herkkä.** Herkin taso vastaa käsittelemätöntä männyn pintapuuta.
2. **Herkkä.** Homehtumisherkkyyden luokka *herkkä* vastaa tyypillisesti puupohjaisia tai paperipintaisia tuotteita, höylättyä kuusta ja kipsilevyä.

#### 4. Passiivitalon ulkovaipparakenteiden kosteustekninen toimivuus

3. **Kohtalaisen kestävä** (*medium resistant*) vastaa sementti- ja muovipohjaisten materiaalien sekä mineraalivillatuotteiden homeutumisherkkyyttä.
4. **Kestävä**. Homeetta vastustava taso 4 (*kestävä, resistant*) vastaa lasi-, metalli- yms. pintoja sekä materiaaleja, jotka on käsitelty homeen kasvua estävillä tuotteilla.

Laskennallinen homeindeksi alenee kuivien ja kylmien jaksojen aikana, mikä kuvaa homeen taantumaa. Homeindeksin laskennallisen taantumisen kertoimena käytettiin laskennassa kerrointa 0,25. Tämä kuvaa homeindeksin laskennallista alentumisnopeutta kasvuille epäedullisissa oloissa verrattuna erittäin herkän puun vastaavaan arvoon.



Homeindeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (alkavaa itiöiden muodostusta) TAI Mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10–50 % alasta TAI Mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava kasvu, paikoin runsas tai rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Kuva 50. VTT:n homemalli /3/.

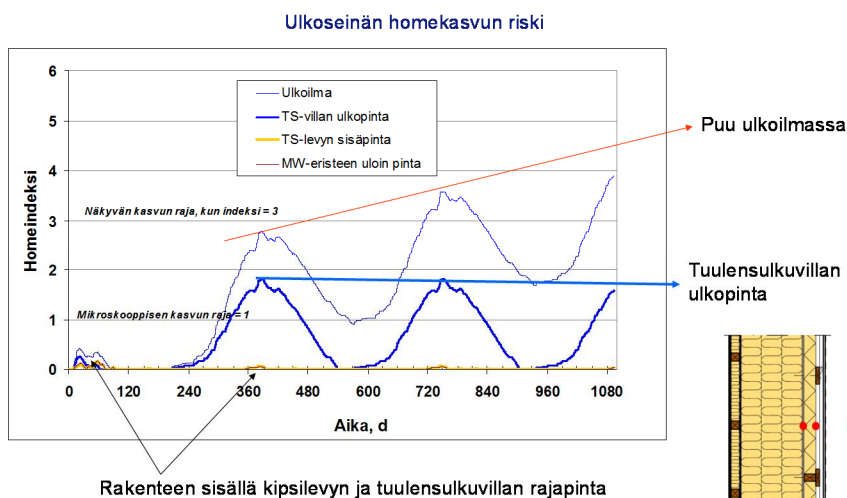
## 4.2 Rakenteiden toimivuus

Laskennassa tarkasteltiin Paroc Lupauksen ulkoseinän ja yläpohjan toimivuutta. Rakenteiden toimivuuden kannalta kriittisiksi pinnoiksi arvioitiin ulkoseinän kipsilevyn

ja tuulensulkuvillan rajapintaa ja yläpohjan lämmöneristyskerroksen ja kipsilevyn rajapintaa.

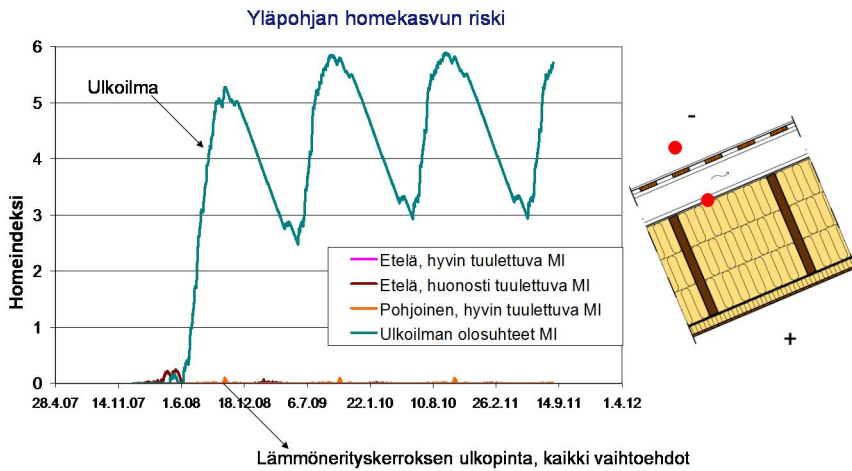
Rakenteiden homeriskien arvioinnin tulokset ovat kuvissa 51 ja 52. Vertailuna on käytetty suojaamatonta puuta ulkoilman olosuhteissa. Saadut tulokset osoittavat, että passiivitalon vaatiman laatutason puurakenteissa ei ole homeriskejä. Tämä edellyttää kuitenkin huolellista rakenteiden suunnittelua ja toteutusta. Erityisen tärkeää on varmistaa julkisivujen sateenpitävyys.

Rakennuksen huollolla ja ylläpidolla varmistetaan, että julkisivujen kunto pysyy hyvänä, ja että rakennuksen käytön aikana ei synny rakenteita vaurioittavia vesivuotoja. Samoin rakennuksen sisäpuolisten vesivahinkojen ja kosteusvaurioiden välttämiseksi on syytä huolehtia märkätilojen vedeneristysten oikeasta toteutuksesta sekä vettä käyttävien laitteiden aiheuttamien vesivahinkojen ennakoinnista tarvittavien suojaus- ja viemärointi toimenpiteiden avulla. Nämä ohjeet eivät koske ainoastaan passiivitaloja vaan kaikkea rakentamista. Ohjeita ja suosituksia vesivahinkojen välttämiseksi on mm. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C2 Kosteus /6/.



**Kuva 51.** Paroc Lupauksen ulkoseinän homehtumisriskin arviointi. Laskennan alku on tammikuun alku. Rakenteen tuulensulkuvillan ulkopinnalla on tuuletusraon olosuhteista johtuva homeen kasvun riski. Tällä ei ole vaikutusta rakennuksen sisäilmastoon. Rakenteen sisällä oleva alkuvaiheen pieni riskitason nousu johtuu lähtöoletuksesta, jonka mukaan rakenteen alkukosteus vastaa tasapainotilaa 80 % suhteellisessa kosteudessa. Tämä rakennuskosteus kuivuu alkukeväästä.

#### 4. Passiivitalon ulkovaipparakenteiden kosteustekninen toimivuus



**Kuva 52.** Paroc Lupauksen yläpohjarakenteen homehtumisriskin arviointi. Laskennan alku on tammikuun alku. Rakenteessa ei ole rakenteen toimivuuteen vaikuttavia homeriskejä.



## 5. Yhteenveto

Passiivitaloissa energiankäytön tavoitteet ovat nykytekniikkaan verrattuna hyvin tiukat. Suunnittelusta edellytetäänkin tiukkoihin reunaehtoihin sitoutumista jo hankesuunnittelusta lähtien. Eri suunnittelualojen välinen vuorovaikutus on ensiarvoisen tärkeää, ja arkkitehti-, rakenne- ja LVISA-suunnittelun osapuolien nykyistä tiiviimpi yhteistyö on välttämätöntä passiivitalojen tuotteistamiseksi. Passiivitalojen vaatimusten ja toimivuusedellytysten tiedostaminen on tärkeää erityisesti talotekniikkalaitteiden tuotekehityksen suuntaamisessa. Passiivitaloihin sopivat talotekniset järjestelmät ovat kehitysvaiheessa, ja valmistajien sekä suunnittelijoiden tulee tiedostaa tämän uuden tuotteen vaatimukset.

Passiivitaloille asetettiin energiatehokkuusvaatimukset Suomen ilmastoon soveltuvan määritelmän mukaisesti. Vaatimukset koskevat talon kokonaisprimäärienergian kulutusta, tilojen lämmityksen energiantarvetta sekä rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyttä. Paroc Passiivitalot -projektissa rakennettiin kaksi passiivitaloa. Rakennukset valmistuivat 2009. Vantaalle rakennettu passiivitalo on betonirakenteinen ja Valkeakoskelle rakennettu puurakenteinen. Toteutetut rakennuskonseptit perustuvat rakenteiden hyvään lämmöneristävyyteen ja ilmatiivyyteen, lämpötekniisesti tehokkaisiin ikkunoihin ja oviin sekä tehokkaaseen lämmön talteenottoon poistoilmasta.

Hyvin lämmöneristetyt rakenteet sekä rakennusten terminen massa pitävät sisätilojen lämpötiloja varsin stabiileina, mikä mahdollistaisi hitaiden säätöjärjestelmien käytön lämmönjakelussa. Rakenteiden osalta konsepti on onnistunut, koska rakenneratkaisut eivät sisällä systemaattisia kylmäsiltoja. Laitesennusten sijoittaminen pääosin rakennuksen sisätiloihin on vähentänyt läpivientien määrää ja näin ollen potentiaalisia ilmavuotopaikkoja.

Hyvin lämmöneristetyn rakenteen kosteusteknisen toimivuuden edellytyksenä on, että rakenteeseen ei pääse vettä. Hyvin lämmöneristetyissä rakenteissa lämpövirta rakenteen läpi on paljon vähäisempi kuin perinteisissä rakenteissa, jolloin mahdollisesti kastuneen rakenteen kuivuminen on hitaampaa. Passiivitalon rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa tulee noudattaa huolellisuutta ja mm. rakennusaikaisesta suojauksista on pidettävä huolta.

Molemmat rakennukset täyttivät primäärienergian käytölle ja rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyydelle asetetut tavoitteet. Samalla osoitettiin, että ulkovaipparakenteiden lämpötekniisen laadun mittariksi soveltuvan ilmanpitävyytason saavuttaminen on mahdollista, eikä se aiheuta rakentamiseen lisäkustannuksia. Sen sijaan

tilojen lämmityksen energiankäytön vaatimuksen täyttämisen osoittautui hankalammaksi. Osaksi tämä johtuu huoneilman halutusta, suunnittelussa käytettyä tasoa korkeammasta lämpötilasta. Lisäksi rakennusten talotekniikkajärjestelmien toimivuus ei vastannut haluttua tasoa. Esimerkiksi passiivitalo Paroc Lupauksen ilmalämpöpumpun lämpökerroin on ollut huomattavan alhainen.

Hyvin lämmöneristetyn rakenteen kosteusteknisen toimivuuden edellytyksenä on, että rakenteeseen ei pääse vettä. Hyvin lämmöneristetyissä rakenteissa lämpövirta rakenteen läpi on paljon vähäisempi kuin perinteisissä rakenteissa, jolloin mahdollisesti kastuneen rakenteen kuivuminen on hitaampaa. Passiivitalon rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa tulee noudattaa huolellisuutta ja mm. rakennusaikaisesta suojauksista on pidettävä huolta.

Rakennusten talotekniikkajärjestelmissä on ollut huomattavia säätötarpeita. Yleisesti voidaan todeta, että talotekniikkalaitteiden toimintaparametrit ovat puutteellisia tai ne eivät ole suunnittelijoiden tiedossa. Tämä vaikeuttaa järjestelmäsunnittelua.

Ilmanvaihtojärjestelmien kehitys on viime vuosikymmeninä ollut merkittävää. Lämmön talteenottolaitteiden lämpötilahyötysuhteet ovat parantuneet, ja tästä syystä ilmanvaihdon lämpöhäviöitä on kyetty vähentämään. Kuitenkin passiivitalossa lämmön tarve on niin pieni, että vähäisetkin puutteet toimivuudessa tai säädöissä voivat johtaa epätoivottaviin sisäolosuhteisiin. Kun järjestelmät tulevat monimutkaisemmiksi, mahdollisuus virhetoimintoihin kasvaa. Toisaalta toimivuusoptimin löytäminen ei ole välttämättä helppoa. Erityisesti ilmanvaihdon ja lämmitysjärjestelmien säätäminen optimiin osoittautui ennakoitua työläämmäksi. Säädetty ilmanvaihto tosin takaa sisäilmaston laadun, ja esimerkkirakennuksissa on sisäilman laatuun oltu tyytyväisiä.

Suomen rakentamismääräykset ohjaavat pientalojen lämmitystaparatkaisuja. Suoralla sähkölämmityksellä varustetun talon määräystenmukaisuus edellyttää varsin hyvää energiatehokkuutta. Passiivitalossa lämmitysenergian kulutus on vähennetty vertailukohdasta riippuen ainakin kolmannekseen. Tämä tarkoittaa sitä, että kulutukset olisivat tavanomaisessa maalämpötalossa samaa suuruusluokkaa kuin passiivitalossa suoralla sähkölämmityksellä. Muun sähkönkäytön ja lämpimän käyttöveden osalta ratkaisut tehdään usein erillisinä, ja tämä kulutus voi olla suurempi kuin lämmitys.

## Lähteet

1. Nieminen, J., Lylykangas, K. Passiivitalon määritelmä. [http://www.passiivi.info/download/passiivitalon\\_maaritelma.pdf](http://www.passiivi.info/download/passiivitalon_maaritelma.pdf).
2. WUFI (Wärme und Feuchte instationär – Transient Heat and Moisture) 5.1 Pro software, The Fraunhofer Institute for Building Physics IBP. 2009.
3. Kumaran, M. K. IEA Annex 24 Final Report. Task 3: Material Properties. Leuven, 1996. 135 p.
4. Viitanen, H. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. The Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 1996.
5. Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K. Classification of material sensitivity. New approach for mould growth modeling. 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, Tampere, Finland, 29 May – 2 June 2011. Proceedings pp. 867–874.
6. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa C2 Kosteus, määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö, Helsinki, 1998.



Nimeke	<b>Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu</b>
Tekijä(t)	Ilpo Kouhia, Jyri Nieminen & Riikka Holopainen
Tiivistelmä	<p>Energiankäytön tavoitteet ovat passiivitalossa hyvin tiukat. Suunnittelulta edellytetään tiukoihin reunaehtoihin sitoutumista jo hankesuunnittelusta lähtien. Eri suunnittelualojen välinen vuorovaikutus ja yhteistyö on välttämätöntä. Talotekniikkalaitteilta edellytetään oikeaa, mittauksiin perustuvaa tietoa laitteiden toimivuudesta. Tämän tiedon tulee olla suunnittelijoiden käytössä.</p> <p>Passiivitalo Paroc osoittaa, että passiivitalon ja sen järjestelmien viimeistely ja järjestelmien säätöjen toimivuus ovat suunnittelun ja rakennuksen toimivuuden edellytys. Paroc-talossa säätötoimenpiteitä tehtiin vielä vuosi rakennuksen valmistumisen jälkeen. Säätötarve on seurausta laitteiden toimivuusparametrien puutteellisesta dokumentoinnista. Seurantamittausten tulokset eivät näin ollen anna täyttä kuvaa rakennuksen energiateknisestä toimivuudesta, mutta asetettu tavoitetaso saavutetaan rakennuksen säätöjen tarkennusten jälkeen. Asunnon A primäärienergian kulutus on keskimäärin noin 130 kWh/m<sup>2</sup> ja asunnon B 96 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa. Asunnon A ilmavuotoluvuksi saatiin 0,28 1/h ja asunnon B 0,37 1/h.</p> <p>Passiivitalo Paroc Lupauksen primäärienergian kulutus on 130 kWh vuodessa. Rakennuksen ulkovaipan ilmavuotoluku on 0,5 1/h. Sen sijaan tilojen lämmityksen energiankäyttö on hieman tavoitetta suurempi. Rakennuksen haluttu sisälämpötila on kuitenkin oletettua sisäilman keskimääräistä lämpötilaa korkeampi. Seurantamittauksista voidaan päätellä, että rakennuksen talotekniset järjestelmät eivät toimi optimaalisella tavalla. Tarkastus ja säätötarpeita on sekä ilmanvaihtokoneessa että ilmalämpöpumpussa.</p> <p>Yleisesti voidaan todeta, että talotekniikkalaitteiden toimivuusparametrit eivät vastaa passiivitalojen toimivuuden edellyttämää tarkkuutta.</p>
ISBN, ISSN	<p>ISBN 978-951-38-7915-0 (nid.)</p> <p>ISBN 978-951-38-7916-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a>)</p> <p>ISSN-L 2242-1211</p> <p>ISSN 2242-1211 (painettu)</p> <p>ISSN 2242-122X (verkkójulkaisu)</p>
Julkaisu aika	Tammikuu 2013
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	57 s.
Projektin nimi	Paroc Passive
Toimeksiantajat	
Avainsanat	Buildings, energy-efficiency, passive house
Julkaisija	VTT PL 1000, 02044 VTT, Puh. 020 722 111

Title	<b>Paroc passive house – Cold climate energy solution</b>
Author(s)	Ilpo Kouhia, Jyri Nieminen & Riikka Holopainen
Abstract	<p>The energy requirements for a passive house are quite strict. These requirements need to be adopted already in early phase of project planning. Collaboration between different design domains is a necessity. System design requires accurate information on the performance parameters of equipment. This information has to be available for the designers.</p> <p>Paroc passive house shows that HVAC system settings and trimming are a condition of the required performance. System adjustments and trimming were carried out almost for one year after the building was finished. The need for adjustments comes from poor documentation of the performance parameters of the equipment. Accurate monitoring results are available for less than one year; however, the results show that the building meets the requirements set on the delivered energy and primary energy. The primary energy use in the two apartments is 96 and 130 kWh/m<sup>2</sup>. The airtightness of the building envelope were <math>n_{50} = 0.37</math> 1/h and <math>n_{50} = 0.25</math> 1/h correspondingly.</p> <p>The primary energy use in the passive house Paroc Lupaus is 130 kWh/m<sup>2</sup> and the airtightness of the building envelope <math>n_{50} = 0.5</math> 1/h. The energy used for space heating 30 kWh/m<sup>2</sup> exceeds the set requirement of 25 kWh/m<sup>2</sup>. The indoor temperature has been higher than assumed in the design. The monitoring shows that the technical systems do not perform as expected. There is still need for adjustments and trimming both for the ventilation system and heat pump.</p> <p>In general, the performance parameters of the HVAC systems are not accurate enough for passive house design.</p>
ISBN, ISSN	ISBN 978-951-38-7915-0 (Soft back ed.) ISBN 978-951-38-7916-7 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> ) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (Print) ISSN 2242-122X (Online)
Date	January 2013
Language	Finnish, English abstract
Pages	57 p.
Name of the project	Paroc Passive
Commissioned by	
Keywords	Buildings, energy-efficiency, passive house
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

**VTT** on puolueeton, moniteknologinen tutkimusorganisaatio. VTT tuottaa yhdessä kotimaisten ja kansainvälisten asiakkaidensa ja yhteistyökumppaneidensa kanssa tieteelliseen tutkimukseen pohjautuvia innovaatioita ja luo näin edellytyksiä yhteiskunnan kestäväälle kehitykselle ja hyvinvoinnille.

Liikevaihto: 300 milj. euroa

Henkilöstö: 3 200

## **VTT:n julkaisut**

VTT:läiset julkaisevat tutkimustuloksia ulkomaisissa ja kotimaisissa tieteellisissä lehdissä, ammattilehdissä ja julkaisusarjoissa, kirjoina, konferenssisitelmänä, patenteina sekä VTT:n omissa sarjoissa. VTT:n julkaisusarjat ovat VTT Visions, VTT Science, VTT Technology ja VTT Research Highlights. Sarjoissa ilmestyy vuosittain noin sata korkeatasoista tiede- ja ammattijulkaisua. Julkaisut ilmestyvät verkossa ja suurin osa myös painettuna.

### **VTT Visions**

Sarja sisältää tulevaisuudennäkymiä ja ennakoiteja VTT:n näkemyksen mukaan merkittävistä teknologisista, yhteiskunnallisista ja liiketoiminnallisista teemoista. Sarja on suunnattu erityisesti yritysten ja julkishallinnon päättäjille ja asiantuntijoille.

### **VTT Science**

Sarja tuo esille VTT:n tieteellistä osaamista. Siinä ilmestyy väitöskirjoja ja muita vertaisarvioituja julkaisuja. Sarja on suunnattu erityisesti tutkijoille ja tiedeyhteisölle.

### **VTT Technology**

Sarja sisältää julkisten tutkimusprojektien tuloksia, teknologia- ja markkinakatsauksia, kirjallisuustutkimuksia, oppaita ja VTT:n järjestämien konferenssien esitelmää. Sarja on suunnattu ammattipiireille, kehittäjille ja soveltajille.

### **VTT Research Highlights**

Sarjassa esitellään tiiviissä muodossa VTT:n valittujen tutkimusalueiden uusimpia tuloksia, ratkaisuja ja vaikuttavuutta. Kohderyhmänä ovat asiakkaat, päättäjät ja yhteistyökumppanit.

## Paroc-passiivitalo – kylmän ilmaston energiaratkaisu

Paroc Passiivitalot -projektin tavoitteena oli selvittää, miten passiivitalo-konsepti toimii Suomen ilmastossa. Passiivitalo määriteltiin Keski-Euroopassa käytössä olevan määrittelyn pohjalta, mutta ilmastojen erot otettiin huomioon. Valittu vaatimustaso on saavutettavissa varsin kohtuullisin lisäkustannuksin: tyypillinen lisäkustannus pientalossa on 5–7 % verrattuna tavanomaisen talon kustannuksiin.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi edellyttää asuinrakennuksilta lähes nollaenergiatalon ostoenergian käyttöä. Passiivitalo on yksi vaihtoehto lähes nollaenergiatalon ratkaisuksi. Passiivitalolle asetettuja energiatehokkuustavoitteita tärkeämpää on kuitenkin kokonaisuuden hallinta ja oikea tieto laitejärjestelmien toimivuusparametreista.

ISBN 978-951-38-7915-0 (nid.)  
ISBN 978-951-38-7916-7 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN-L 2242-1211  
ISSN 2242-1211 (painettu)  
ISSN 2242-122X (verkkajulkaisu)

