



Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka,
Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä

Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut

Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut

Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari SHEMEIKKA,
Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä

ISBN 978-951-38-7541-1 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2009

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

Toimitus Mirjami Pullinen

Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka, Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä. Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut [District Heating Solution for Very-Low-Energy Residential Building]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2513. 68 s.

Avainsanat very low energy building, district heating, heat distribution, domestic hot water heat recovery, ventilation integrated heating

Tiivistelmä

Viimeisen 35 vuoden aikana kaukolämmitettyjen rakennusten ominaislämmönkulutus on lähes puolittunut. Niin sanotuissa matalaenergiataloissa on muun energiankulutuksen ohella pienennetty rakennusten lämmitykseen tarvittavan energian osuutta merkittävästi, nykyisillä ratkaisuilla jopa noin 70 % tämänhetkisestä normaalitasosta. Matalaenergiatalojen osuuden oletetaan kasvavan siten, että vuoteen 2030 mennessä yli 50 % uusista rakennettavista asuinrakennuksista on matalaenergiataloja. Edelleen vuoteen 2050 mennessä osuuden ennustetaan kasvavan 70 %:iin. Energiatehokkuusvaatimusten oletetaan lisäksi johtavan teknologiseen kehitykseen, jonka myötä koko rakennuskannan ominaislämmönkulutus pienenee hieman yli prosentin vuosivauhdilla. Tähän oletetaan sisältyvän sekä uudistuotannon että korjausrakentamisen tuomat parannukset. Kaukolämmitysratkaisujen pitää kehittyä vähintäänkin samaa tahtia muiden megatrendien kanssa, jotta tämä ympäristöystävällinen teknologia soveltuisi myös tulevaisuuden rakennuksiin.

EU-komission niin kutsuttu energiapaketti tulee vauhdittamaan energiansäästöön liittyviä ponnisteluja koko Euroopassa. Suomen rakentamismääräyksiin tullaan jo lähiaikoina tekemään tuntuvia energiankulutuksen vähentämiseen tähtäviä päivityksiä. Vuoden 2010 alussa voimaan astuvat uudet rakennusmääräykset pienentävät tilojen lämmöntarvetta noin 25–30 % nykyisestä tasosta. Vuonna 2012 on tulossa lisätiukennuksia, joita ympäristöministeriö ei ole toistaiseksi tarkemmin eritellyt.

Tässä projektissa tutkittiin nykyistä tasoa 75 % vähemmän lämpöä kuluttavan talon kaukolämmön (KL) ratkaisumalleja. Lähestymistapa oli kokonaisvaltainen, eli projektissa tarkasteltiin koko lämmitysjärjestelmää huonetilasta aina kaukolämpökytkentään ja kaukolämpöverkkovaikutuksiin asti. Tuloksena esitetään kaukolämpöratkaisu, joka sopii matalaenergia-asuintaloon. Elinkeuhkustannuksiltaan edullisin kaukolämpöratkaisu oli ilmanvaihtolämmitys, jossa lämmin vesi tuotetaan varaajakytkennällä.

Tehdyn tarkastelun valossa voidaan esittää, että kaukolämpöjärjestelmän kilpailukyky nykyisen kaltaisella hinnoittelurakenteella ja perinteisellä patteriverkkojakelulla saattaa olla heikko korkeiden investointikustannusten vuoksi. Tutkittujen vaihtoehtojen 30 vuoden tarkastelujaksojen nykyarvot (sis. energian ja investoinnit) olivat 0,23–0,33 €/asuin-m² kuukaudessa. Täydelle teholle mitoitettu lämpöpumppu oli kallein; sähköllä toimiva ilmanvaihtolämmitys ja käyttöveden tuotto lämpöpumpulla edullisin vaihtoehto. Kustannusten ero euroina oli melko pieni, ja järjestelmävalinnassa tulisikin ottaa huomioon kustannusten lisäksi myös muita tekijöitä, kuten palvelukyky. Näitä ovat esimerkiksi eri lämmitysjärjestelmillä saatavat lämpöolot ja käytettävyyttä, lämpimän käyttöveden riittävyys, lämmityslaitteiden ulkonäkö sekä huoneen sisustettavuus.

Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka, Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä. Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut [District Heating Solution for Very-Low-Energy Residential Building]. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2513. 68 p.

Keywords very low energy building, district heating, heat distribution, domestic hot water heat recovery, ventilation integrated heating

Abstract

According to the statistics, specific energy consumption of buildings heated by district heating decreased by 50 % in Finland during the last 35 years. Energy consumption in low-energy houses, and consequently the heat demand, is even more reduced, for example by 70 % compared to standard level in current regulations. It is envisaged that in new constructions the share of low-energy houses will increase to 50 % by the year 2030 and to 70 % by the year 2050. Tightening energy efficiency requirements are expected to impact technological development. This will lead to a gradual drop exceeding 1 % per annum of specific energy consumption of building stock, including both new constructions and refurbishment.

District heating solutions for buildings must be developed at least at the same pace with other megatrends in order for this environment friendly technology to be applicable in the buildings also in the future. The Action Plan for Energy Efficiency published by the European Commission supports efforts to reduce energy consumption in Europe. Building regulations in Finland will soon include considerable cuts of energy consumption. Since year 2010 reduction of 25–30 % of heating load will be required when compared with current regulations. In the year 2012 further cuts will be announced by the Ministry of Environment.

In this project, a number of prospective district heating solutions were investigated in the context of buildings needing 75 % less energy as compared with standard solution today. Holistic approach was used, covering the entire system from room space, through the distribution piping, district heating substation to the district heating network. A district heating solution was proposed that fits very low-energy house. A number of different solutions were analysed from the life cycle cost point of view. The most cost-effective district heating solution was based on ventilation integrated heating and domestic hot water system equipped with a storage tank connected through heat exchanger.

Conducted analysis suggests that district heating with traditional room heaters and current billing tariff structure may not be cost effective due to high investment costs. Present values (of energy and investments) of all investigated solutions projected over 30 years span remained within the range 0.23–0.33 €/m² per month. The full load heat pump system was the most expensive and the ventilation integrated heating system using electricity with domestic hot water prepared by heat pump was the least expensive. The apparently narrow range band indicates that in addition to costs also other features should be considered when selecting the energy system. These could be e.g. achievability of high indoor comfort level, functionality, outlook of heating terminals.

Alkusanat

Projekti kesti noin vuoden, ja se toteutettiin vuosien 2008–2009 aikana. Projektia rahoittivat Energiateollisuus ry, Fortum Power and Heat Oy, Oy Danfoss Ab, VVO-yhtymä Oyj ja VTT (Valtion teknillinen tutkimuskeskus).

Hankkeen johtoryhmän puheenjohtajana toimi Jarmo Jokisalo (Fortum). Johtoryhmässä jäseninä olivat Mirja Tiitinen (Energiateollisuus), Pertti Ruotsalainen (Danfoss), Kimmo Rintala (VVO), Jari Shemeikka (VTT), Kari Sipilä (VTT) sekä sihteerinä projektipäällikkö Krzysztof Klobut (VTT). Johtoryhmä kokoontui viisi kertaa ja osallistui aktiivisesti projektin ohjaamiseen ja tukemiseen.

Haluamme kiittää kaikkia työhön osallistuneita merkittävästä panoksesta ja saavuttamastamme lopputuloksesta, jota toivomme hyödynnettävän mahdollisimman laajasti.

Espoossa, 27.11.2009

Krzysztof Klobut
Erikoistutkija

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Johdanto.....	7
1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen.....	8
1.1 Tarkastelun yleiskuvaus.....	8
1.1.1 Nykymääräysten mukainen rakennus.....	8
1.1.2 Huippuenergiatehokkaan rakennuksen tekninen määritelmä.....	12
1.1.3 Tilojen lämmitystarve mallihuoneistossa.....	18
1.2 Tarkasteltavat lämmitysjärjestelmäkoneptit.....	20
1.2.1 Keskitetty huoneistokohtainen ilmanvaihtolämmitys.....	20
1.2.2 Huonekohtainen ilmanvaihtolämmitys.....	28
1.2.3 Radiaattorilämmitys.....	29
1.2.4 Kaukolämmön lämmönsiirtimen jäätymisen esto.....	34
1.3 Käyttöveden lämmitys.....	35
1.3.1 Tehon tarkastelu.....	35
1.3.2 Käyttöveden varaaja.....	37
2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky.....	41
2.1 Energiansäästön kannattavuus.....	41
2.1.1 Inducon-projektin kustannuslaskelmat.....	41
2.1.2 -75 % -talon energiansäästön kannattavuus.....	43
2.2 Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailu.....	45
3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon.....	53
3.1 Suurpellon kaukolämpöverkko ja käytetyt lähtötiedot.....	53
3.2 Kaukolämpöverkon laskennalliset tarkastelut.....	55
3.2.1 Kulutus.....	55
3.2.2 Lämpöhäviöt ja jäähtymä.....	57
3.2.3 Pumppaus ja lämpöhäviöt.....	59
3.2.4 Kaukolämpöverkon toiminta.....	60
3.3 Putkikustannukset ja kannattavuus.....	61
3.4 Johtopäätöksiä.....	64
4. Yhteenveto.....	65
Lähdeluettelo.....	67

Johdanto

Projektin suunnitteluvaiheessa, vuoden 2008 alussa, tuoreinta tietoa edustivat vuonna 2007 julkaistun raportin ennusteet (Vehviläinen et al. 2007) ja EU-komission ns. energiapaketti (European Strategies 2008). Nämä lähteet viestittivät suoraan ja epäsuorasti, että suuressa mittakaavassa energiansäästöön liittyvät ponnistelut saattavat konkretisoitua jo lähitulevaisuudessa. Jotkut esitetyistä kehitysskenaarioista sisälsivät kaukolämpömarkkinoiden supistumista ennustavia näkymiä (Vehviläinen et al. 2007). Syyskuussa 2008 Energiateollisuus ry julkaisi kaukolämpöalan strategian, jossa esiteltiin myös pidemmän aikavälin näkymiä. Strategia sisälsi niin sanotun SWOT-analyysin, jossa todettiin, että muun muassa matalaenergiarakentaminen tulee vaikuttamaan kaukolämpöalan kehitykseen jo lähiaikoina. (Energiateollisuus ry 2008.)

Projektin kuluessa vuonna 2009 julkaistiin tieto, jonka mukaan Suomen rakentamismääräyksiin tullaan lähiaikoina tekemään tuntuvia energiankulutuksen vähentämiseen tähtäviä päivityksiä. Vuoden 2010 alusta astuvatkin voimaan uudet määräykset, jotka tähtäävät rakennusten lämmitysenergian leikkaamiseen 25–30 %:lla nykyisistä vaatimuksista (RakMk C3/2007/2010). Vaatimusten odotetaan kiristyvän entisestään vuoden 2012 alusta.

Lokakuussa 2009 julkaistu hallituksen tulevaisuusselonteko tekee haasteesta erittäin kunnianhimoisen: vuonna 2050 Suomen kasvihuonekaasujen päästöjen pitäisi olla 80 % pienemmät kuin vuonna 1990 (Valtioneuvosto 2009). Tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että rakennuskanta, joka vastaa nyt noin 40 % Suomen energiankulutuksesta, tulee läpikäymään mullistavan muodonmuutoksen. Matalaenergiarakentaminen tulisi aloittaa heti. Selonteossa käsiteltyjen neljän laajapohjaisen skenaarion mukaan asuin- ja palvelurakennuksissa kaukolämpö säilyy suurimpana lämmitysmuotona, mutta sillä toimitettava vuotuinen energiamäärä supistuu noin puoleen nykyisestä.

Kaikki edellä kerrottu osoittaa, että projekti ei voisi olla ajankohtaisempi. Projektissa tarkastellaan ensimmäistä kertaa kaukolämpötekniikan ja matalaenergiarakentamisen yhdistämistä tavoitellen tehokasta kokonaisuutta. Lähestymistapa on kokonaisvaltainen, ja tarkastelun kohteena ovat sekä kaukolämpöverkko että asukkaiden termisen viihtyvyyden ja talotekniikka. Työkaluina käytetään VTT:n kehittämiä tietokoneohjelmistoja. Dynaamisten simulointien avulla varmistetaan, että tarkasteluissa mukana olevat konseptiratkaisut takaavat lähtökohtaisesti termisen viihtyvyyden sisätiloissa ja muodostavat teknisesti toimivia ja kustannustehokkaita kokonaisuuksia.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

1.1 Tarkastelun yleiskuvaus

Tässä tutkimuksessa haetaan kaukolämmön ratkaisumalleja nykyistä huomattavasti vähemmän lämpöä kuluttavalle talolle. Lähestymistapa on kokonaisvaltainen, eli työssä tarkastellaan koko lämmitysjärjestelmää huonetilasta aina kaukolämpökytkentään asti. Rakennustasolla tavoitteena on 75 % nykyisiä rakennusmääräyksiä pienempi kaukolämpöenergian kulutus. Energian säästön lähtökohtana on todellinen matalaenergiatalo, josta on tutkimusta varten generoitu vuoden 2008 alusta voimaan tulleiden määräysten mukainen normaalitalo sekä 75 % kaukolämpöenergiaa säästävä talo.

Energian säästö saavutetaan entistä tehokkaampien lämmöneristys- ja ilmanvaihtoratkaisujen sekä käyttöveden energiankulutuksen vähentämisen avulla. Talotekniikan kytkentöjen ja mitoitusten tavoitteena on hyvä jäähtymä kaukolämpövedelle sekä pieni lämpimän käyttöveden teho.

1.1.1 Nykymääräysten mukainen rakennus

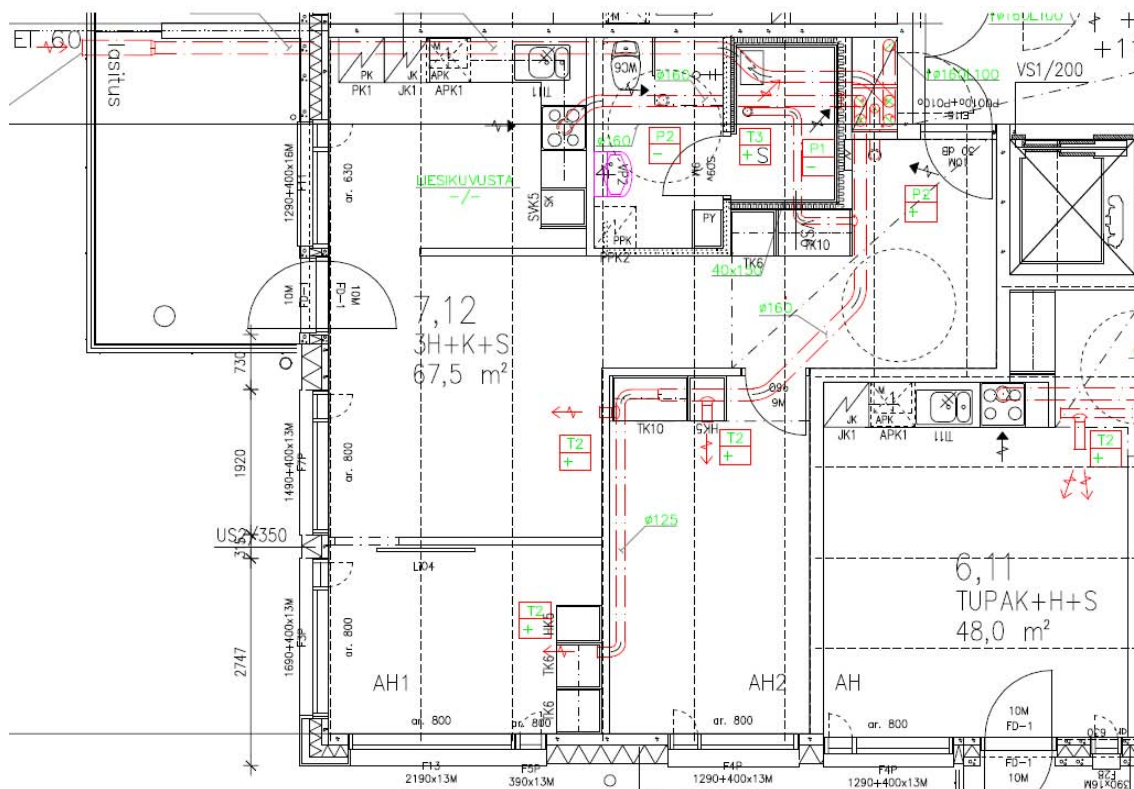
Tutkimuksen rakennusteknisenä mallikohteena on VVO:n rakennuttama As Oy Helsingin Koskikartano, joka on talo- ja rakennustekniikaltaan edistyksellinen matalaenergiatalo. Talon kuluttaa 70 % vähemmän tilojen lämmitysenergiaa kuin tavallinen kerrostalo. Se on vaipaltaan tiivis ja hyvin eristetty. Kaikissa asunnoissa on poistoilman lämmön talteenotolla (LTO) varustettu ilmanvaihtokone, joka huolehtii asunnon ilmanvaihdon lisäksi lämmityksestä. Ilmanvaihtolämmityksen patteri on ilmanvaihtokoneessa, ja se toimii sähköllä.

VVO:n matalaenergiatalot ovat osa kehitysprosessia, jossa pyritään selvittämään, millaiset rakennuksen, talotekniikan, energiamuodon, lämmityksen ja viilennyksen piirteet ovat sekä kustannus- että ekotehokkaita vaihtoehtoja 5–50 vuoden aikavälillä. Espoon Suurpeltoon rakennettavat vastaavat VVO:n matalaenergiatasunnot ovat mukana Nokian kehittämässä älykoti-hankkeessa.

Talossa on neljä kerrosta ja 18 asuntoa, joiden huoneistot ovat kooltaan 46,5–85 m². Koko talon yhteenlaskettu huoneistoala on 1 149 m² ja bruttoala 1 530 m². Kolmen huoneen ja keittiön mal-

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

lihuoneisto on esitetty kuvassa 1. Mallihuoneiston mittoja on käytetty kuvaamaan koko rakennusta tunnittaisen lämmitystehontarpeen dynamisessa laskennassa.



Kuva 1. Kolmen huoneen ja keittiön mallihuoneiston pohjapiirros ja ilmanvaihtolämmityksen kanavointi.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka 75 % nykyisiä rakennusmääräyksiä pienempi kaukolämpöenergian kulutus on saavutettavissa. Siksi mallirakennuksesta on generoitu vuoden 2008 alusta voimaan tulleiden määräysten mukainen normaalitalo käyttämällä mallirakennuksen mittoja mutta määräysten mukaisia, todellista heikompia rakenteiden lämmönläpäisykertoimia. Nämä on esitetty taulukossa 1.

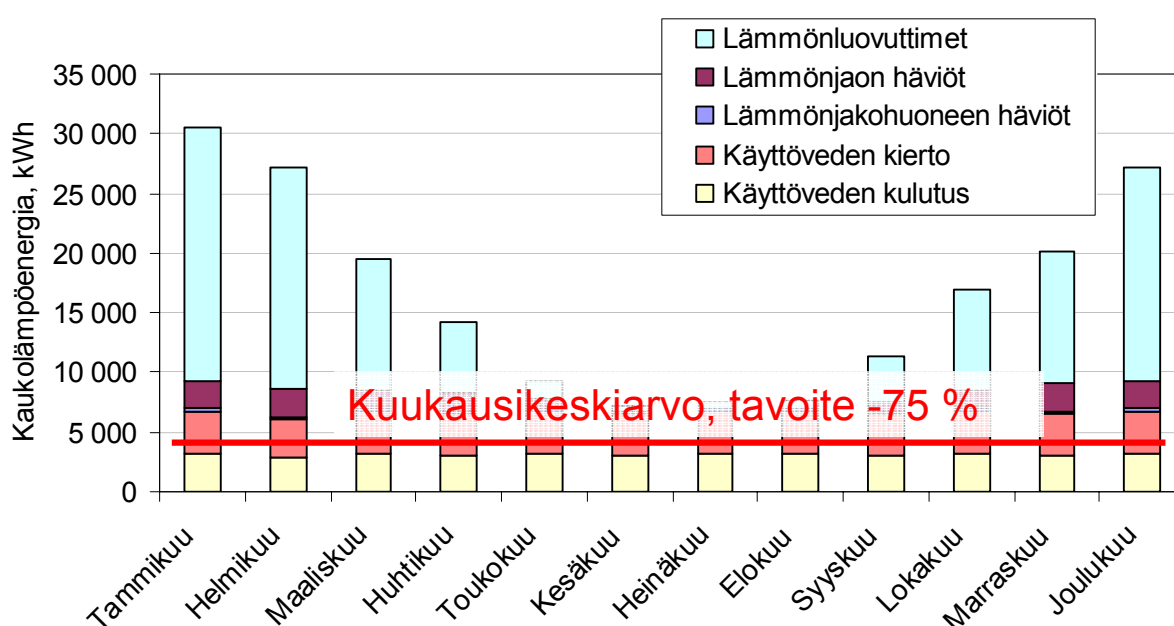
Taulukko 1. Rakennuksen ulkovaipan pinta-alat ja nykymääräysten mukaiselle normaalitalolle käytetyt lämmönläpäisykertoimet (RakMk C3/2007, tasauslaskennan vertailuarvot).

Rakennusosa	Pinta-ala, m ²	U-arvo, W/m ² K
Ulkoseinät	670	0,24
Ikkunat ja ovet	260	1,4
Alapohja, maanvarainen	383	0,24
Yläpohja	383	0,15

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Energialaskennassa on käytetty ilmanvaihtokertoimena 0,6:ta vaihtoa tunnissa ja asukasmääränä 29:ää, mikä vastaa 40 m²:ä asukasta kohti. Asumisväljyys on hieman suurempi kuin pääkaupunki-seudulla nykyään (noin 35 m²/asukas) mutta vastaa vuodelle 2026 laadittua ennustetta (Lankinen et al. 2005). Asukasmäärän kasvu kasvattaisi käyttöveden energiankulutusta mutta pienentäisi lämmitysenergian kulutusta ihmisten tuottaman lämmön ansiosta.

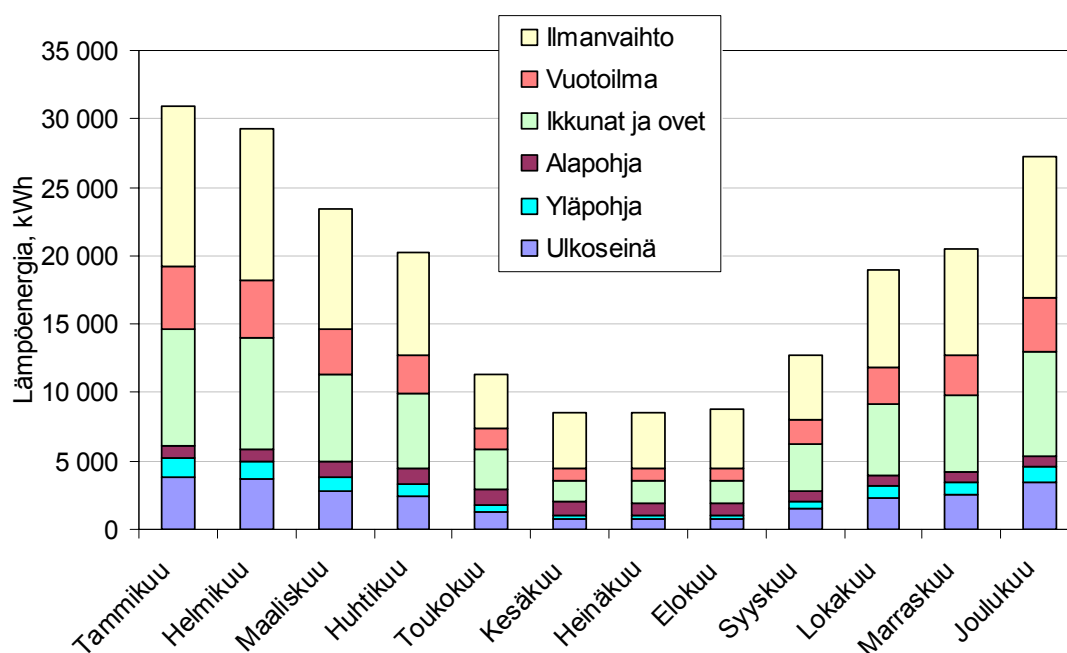
Kaukolämmön kulutus normaalitalossa eri tarkoituksiin on esitetty kuukausittain kuvassa 2. Kulutuksen laskemisessa on käytetty rakentamismääräyskokoelman Jyväskylän mallivuoden 1979 säätietoja ja muun muassa lämpökuormien ja käyttöveden kulutuksen oletusarvoja (60 l lämmintä vettä vuorokaudessa / asukas) (RakMk, D5/2007).



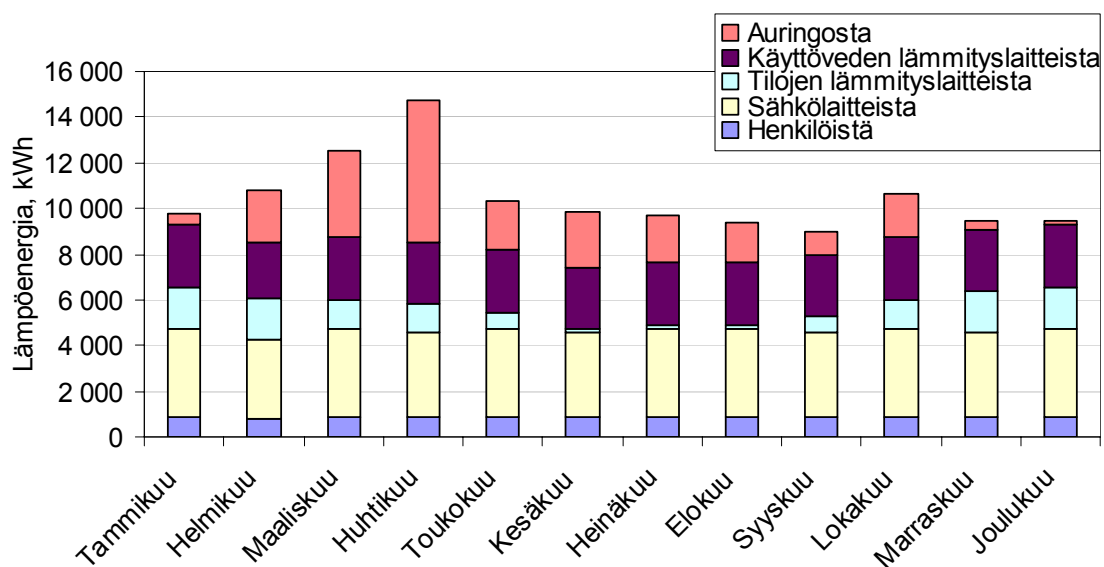
Kuva 2. Nykymääräysten mukaisen talon kaukolämpöenergian käyttö eri kulutuskohteisiin verrattuna tavoitteeseen.

Koko vuodelle laskettu kaukolämpöenergian kulutus on 198 MWh/a, mikä on 130 kWh/a bruttoneliometriä kohti. Kuvassa 3 on esitetty tilojen lämpöenergian tarve. Eniten energiaa kuluu ilmanvaihtoon ja likimain saman verran ikkunoiden lämpöhäviöihin. Vuotoilman ja ulkoseinien energiankulutus ovat näitä pienempiä. Lämmönluovuttimen tarvitsema energia kuvassa 2 muodostuu tilojen lämpöenergian tarpeesta vähennettynä tilojen lämpökuormalla (kuva 4), kuitenkin vain siltä osin kuin lämpökuormat pystytään hyödyntämään lämmityksessä. Lämpökuormien hyödyntämisaste on suurimmillaan talvella, kun kuormat ovat pieniä verrattuna lämmön tarpeeseen. Lämpökuormaa (kuva 4) tulee eniten sähkölaitteista ja käyttöveden lämmityslaitteista, muun muassa kylpyhuoneiden kuivauspattereista. Auringonsäteilyn lämpökuorma on merkittävä kevättalvella.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 3. Tilojen lämpöenergian tarve nykymääräysten mukaisessa talossa.



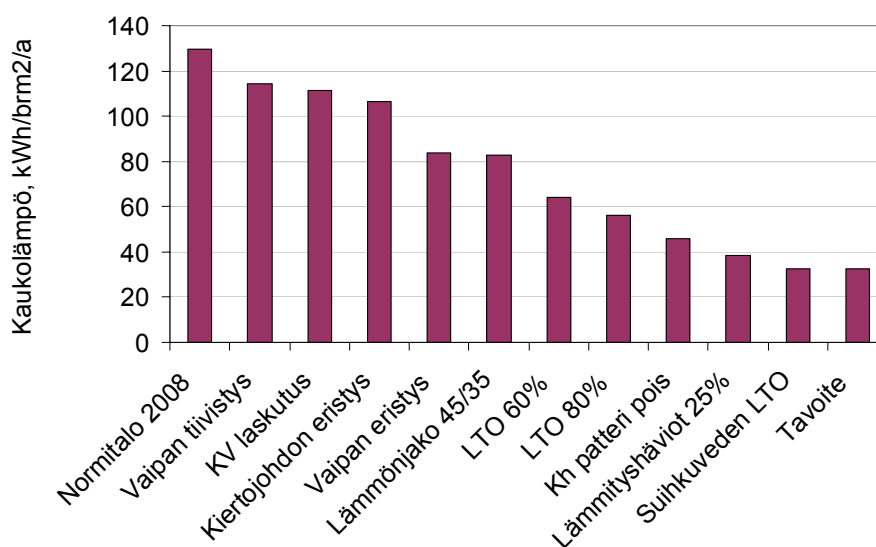
Kuva 4. Tilojen lämpökuormat nykymääräysten mukaisessa talossa.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

1.1.2 Huippuenergiatehokkaan rakennuksen tekninen määritelmä

Huippuenergiatehokas kerrostalo määritellään tässä tutkimuksessa siten, että rakennus kuluttaa kaukolämpöenergiaa 75 % vähemmän kuin nykymääräysten mukaan rakennettu talo. Tavoite on hyvin haastava. Kaukolämmön kulutus normaalitalossa eri tarkoituksiin esitettiin kuukausittain kuvassa 2. Siitä näkyy, että tavoitteen saavuttamiseksi on ilmeisesti puututtava myös käyttöveden energiankulutukseen, koska yksin käyttöveden lämmitys vie lähes 20 % nykyrakennuksen kaukolämpöenergiasta.

Kuvassa 5 esitetään, miten 75 %:n vähennystavoite on saavutettu laskennallisesti. Rakentamismääräyskokoelman mukaisessa laskennassa on muutettu yksi kerrallaan jotakin energiankulutukseen vaikuttavaa ominaisuutta (RakMk, D5/2007). Toimenpiteet on lueteltu taulukossa 2.



Kuva 5. Toimenpiteet, joilla saavutetaan 75 %:n vähennys kaukolämpöenergian kulutuksessa.

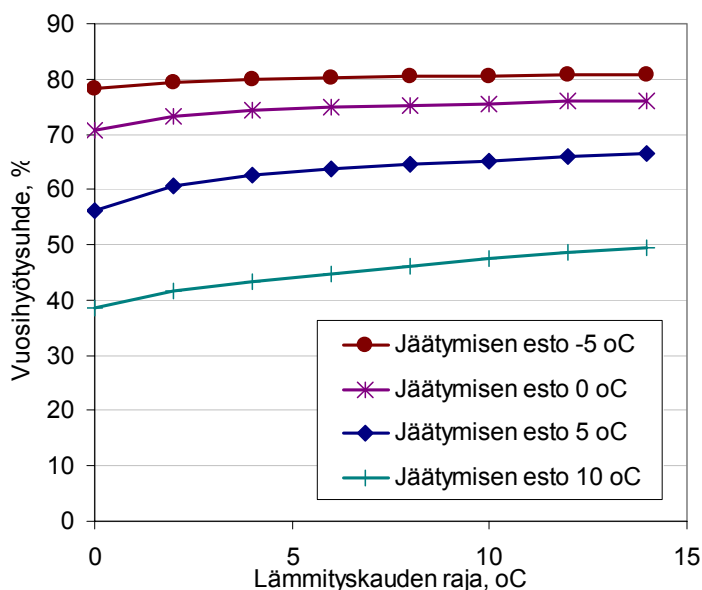
Taulukko 2. Toimenpiteet, joilla kaukolämpöenergian kulutus pienenee 75 %.

	Normitalo	-75 % -talo
Vaipan ilmavuotoluku n50	4,0 l/h	0,5 l/h
Ilmanvaihtokerroin	0,6 l/h	0,6 l/h
Poistoilman lämmön talteenoton vuosihyötysuhde	30 %	80 %
Ulkoseinän U-arvo	0,24 W/m ² K	0,1 W/m ² K
Ikkunoiden ja ovien U-arvo	1,4 W/m ² K	0,8 W/m ² K
Yläpohjan U-arvo	0,24 W/m ² K	0,07 W/m ² K
Alapohjan U-arvo	0,15 W/m ² K	0,1 W/m ² K
Tilojen lämmityksen häviöt	11 W/brm ²	2,3 W/brm ²
Lämpimän veden kiertojohtoon kulutus (ml. kuivauspatteri)	30 W/brm ²	7,5 W/brm ²
Kylpyhuoneen kuivauspatteri	on	ei
Käyttöveden kulutus	60 l/henk/vrk	50 l/henk/vrk
Suihkuveden lämmön talteenoton hyötysuhde	0 %	34 %

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Valittu ulkoseinän U-arvo vastaa noin 450 mm:n eristyspaksuutta mineraalivillalla. Ulkovaipan tiiviyyden parannus ilmavuotoluvusta 4 l/h ilmavuotolukuun 0,5 l/h vähentää energiankulutusta merkittävästi (kuva 5) eikä tuota nykytekniikalla ongelmia. Betonikerrostalossa on mitattu jo 1980-luvulla ilmavuotoluku 0,64 l/h (Haka 1985).

Kuvassa 5 ensimmäisenä esiintyvä lämmön talteenoton vuosihyötysuhde 60 % vastaa asunton ilmanvaihdon VTT-sertifikaatissa B-luokkaa, johon useat markkinoilla oleva laitteet ovat ylittäneet. Tavoitteena oleva kaukolämpöenergian säästö on -75%-talossa kuitenkin niin suuri, että lämmön talteenotossakin on saavutettava parempi hyötysuhde. Tällä hetkellä (2009) paras VTT-sertifikaatin saanut laite ylittää muutamalla prosenttiyksiköllä A-luokan rajan 70 %. Tässä lopulta tavoiteltu 80 %:n vuosihyötysuhde (taulukko 2 ja kuva 5) vaatii vielä laitteiden tuotekehitystä etenkin LTO-lämmönsiirtimen huurtumisen eston osalta. Kuvasta 6 näkyy, että laitteen pitää pystyä jäädyttämään poistoilma noin -5 asteeseen jäätymättä, jotta 80 %:n vuosihyötysuhde saavutetaan. Kuvassa itse lämmönsiirtimen hyötysuhde tasasuurilla ilmavirroilla on 90 %, mikä lienee lähellä käytännöllistä maksimia ilman, että siirtimen koko kasvaa kohtuuttomasti. Kuvassa on käytetty ilmavirtasuhdetta (tuloilma/jäteilma) 0,9, jota voitaisiin tiiviissä talossa vielä kasvattaa ja parantaa siten vuosihyötysuhdetta hieman. Joka tapauksessa 80 %:n vuosihyötysuhde on haastava tekninen tavoite.



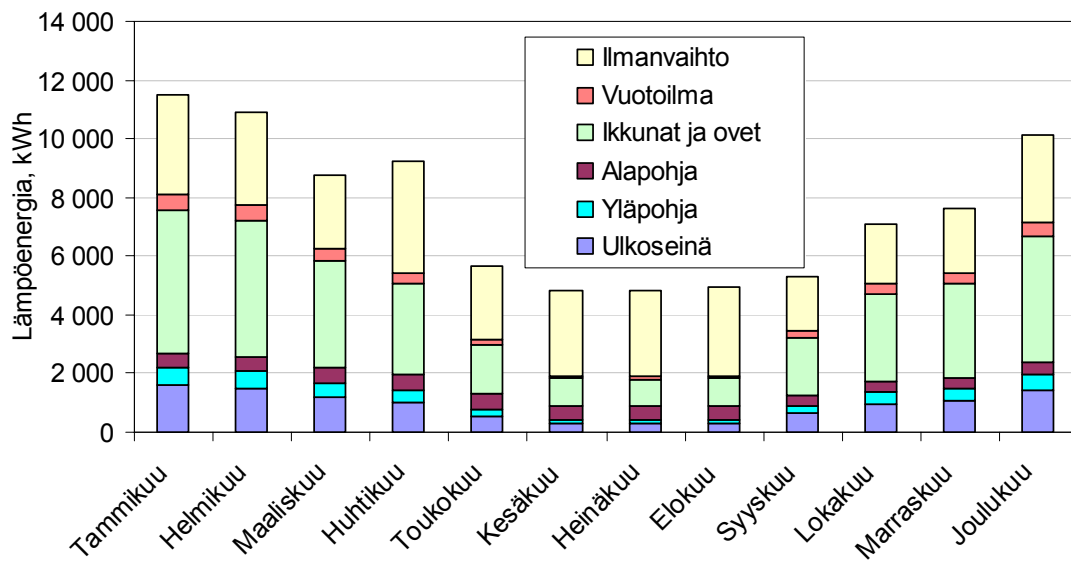
Kuva 6. Lämmön talteenoton vuosihyötysuhde Jyväskylän sääoloissa eri lämmityskauden ja jäätymisen eston rajalämpötiloilla. Huurtumista estetään lämmön talteenoton jälkeisen jäteilman lämpötilan perusteella. Lämmönsiirtimen lämpötilahyötysuhde on 90 %, yhtä suurilla tulo- ja jäteilmavirroilla. Käyttötilanteessa tuloilmavirta on 90 % jäteilmavirrasta.

Rakennuksen ulkovaipan lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) vastaavat pääosin Inducon-kerrostalokonseptin (Sarja et al. 2003) minimienergiataloa, joka osoittautui elinkaarikustannuksiltaan edullisimmaksi, kun tarkasteltiin hankinta- ja käyttökustannusten nykyarvoja 50 ja 100

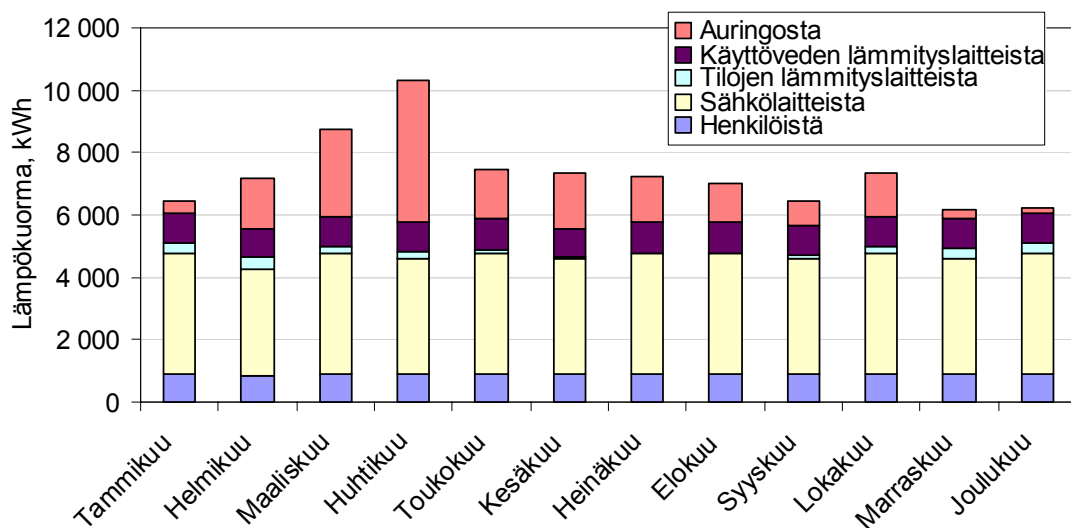
1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

vuoden jaksoilla. Seinän U-arvo on tässä valittu paremmaksi kuin Inducon-minimienergiatalossa ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$), mutta se kompensoituu sillä, että vastaavasti ikkunan U-arvo ($0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$) on heikompi kuin minimienergiatalon ikkunalalla ($0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Kuvassa 7 on esitetty tilojen lämpöenergian tarve kuukausittain. Ilmanvaihdon lämpöhäviöt ovat suuret keväällä ja kesällä, koska ilmapirtaa joudutaan lisäämään ja lämmön talteenotto ohittamaan, jotta ylimääräiset lämpökuormat (kuva 8) voidaan tuulettaa ulos.



Kuva 7. Tilojen lämpöenergian tarve huippuenergiatehokkaassa talossa.



Kuva 8. Lämpökuormat kuukausittain huippuenergiatehokkaassa talossa.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Tilojen lämmönjakojärjestelmän lämpöhäviö 11 W/brm² normirakennuksessa (taulukko 2) vastaa vesiradiaattorilämmitystä lämpötilatasolla 70/40 °C silloin, kun jakojohdot ovat lämpöeristettyjä. Huippuenergiatalossa lämpöhäviö on pienennetty neljäsosaan (2,3 W/brm²), ja se saavutetaan tyypillisesti käyttämällä sähköistä ilmanvaihtolämmitystä, jossa tuloilma lämmitetään huonekohtaisesti. Vesijärjestelmissä vastaavan lämpöhäviötason saavuttaminen on haasteellista.

Käyttövesijärjestelmään kytketty kylpyhuoneen kuivauspatteri on jätetty huippuenergiatalkaassa talossa kokonaan pois (taulukko 2), ja kylpyhuoneen kuivatuksen vaatima muita huonetiloja noin kaksi astetta korkeampi lämpötila hoidetaan valitulla lämmitysjärjestelmällä. Käyttöveden kiertojohto on säilytetty, mutta sen tyypillinen lämpöhäviö 15 W/brm² on huippuenergiatalossa puolitetty hyvän eristyksen avulla.

Lämpimän käyttöveden kulutus saadaan pienennettyä 60 litrasta 50 litraan henkilöä kohti päivässä (taulukko 2) tyypillisesti veden kulutuksen mittauksella ja laskutuksella. Viimeinen säästötoimenpide kuvassa 5 on lämmön talteenotto suihkun jätevedestä, mihin on olemassa kaupallisia laitteita (kuva 9). Kuvassa on esitetty jätevedellä esilämmitetyn veden johtaminen vedenlämmittimelle, mutta esilämmitetty vesi voidaan johtaa myös suoraan suihkusekoittajaan. Taulukossa 2 esitetty 34 %:n hyötysuhde vastaa esimerkiksi itse laitteen hyötysuhdetta 50 % ja suihkun 68 %:n osuutta lämpimän veden käytöstä.



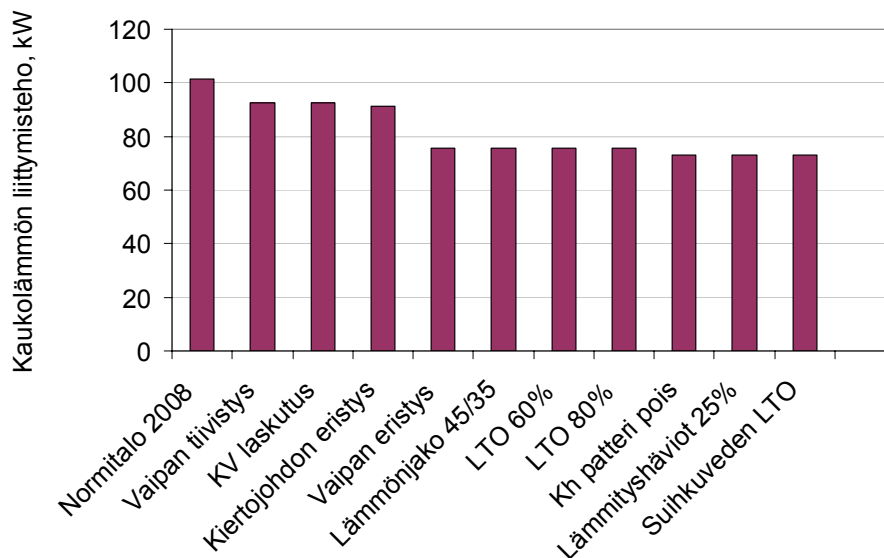
Kuva 9. Esimerkki kaupallisesta suihkuveden lämmöntalteenottolaitteesta (ReTherm, Kanada). Valmistaja esittää laitteelle jopa 60 %:n hyötysuhdearvoja. Hintaluokka 500 €.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Kaukolämmön liittymisteho pienenee lämmitysenergian säästötoimilla vain 30 % (kuva 10) arvoon 73 kW, josta käyttöveden osuus on 31 kW. Käyttöveden tuntinen teho on tässä laskettu Suomen Kaukolämpö ry:n suosituksen K15/1998 mukaisesti asuntojen määrän perustella, joten käyttöveden kulutuksen pienentämistoimenpiteillä ei ole vaikutusta liittymistehoon. Jäljempänä luvussa 1.3 esitettävän käyttöveden kulutusprofiilin mukaan tuntinen käyttövesiteho on pienen asukasmäärän ja suihkuveden lämmön talteenoton johdosta selvästi pienempi (17,3 kW). Kuvassa on esitetty myös tätä vastaava kaukolämmön liittymisteho 59 kW. Käyttämällä yhden kuutiometrin käyttövesivesivaraajaa (ks. luku 1.3.2), tuntinen käyttövesiteho pienenee edelleen arvoon 4,4 kW ja vastaa tällöin liittymistehoa 46 kW (kuva 10).

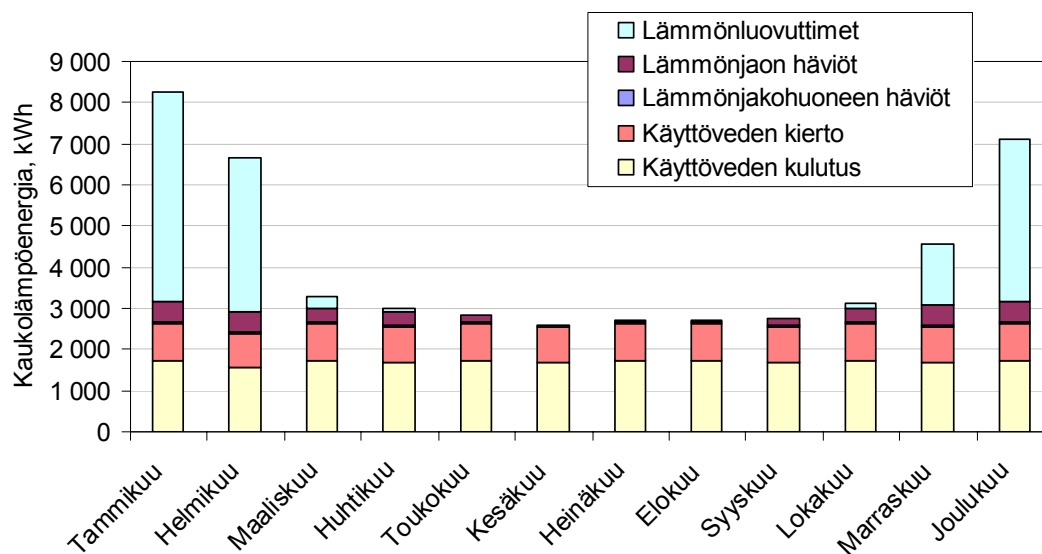
Ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhteen parantaminen ei juuri pienennä liittymistehoa, koska lämmön talteenoton tehoa joudutaan rajoittamaan mitoituspakkasilla lämmönsiirtimen jäätymissuojauksen takia.

Kaukolämpöenergiaa kuluu tilojen lämmönluovuttimissa mainittavasti vain neljänä talvikukautena, joten lämmityskausi on huippuenergiatalossa hyvin lyhyt (kuva 11). Kuvassa 12 esitetään, miten lämmönluovuttimien energiankulutus pienenee säästötoimenpiteiden vaikutuksesta. Kylpyhuoneen patterin puuttuminen lisää lämmönluovuttimien mutta vastaavasti pienentää käyttövesijärjestelmän energiankulutusta. Kaikkien säästötoimenpiteiden seurauksena tilojen lämmitykseen kuluu energiaa 85 % vähemmän kuin normitalossa.

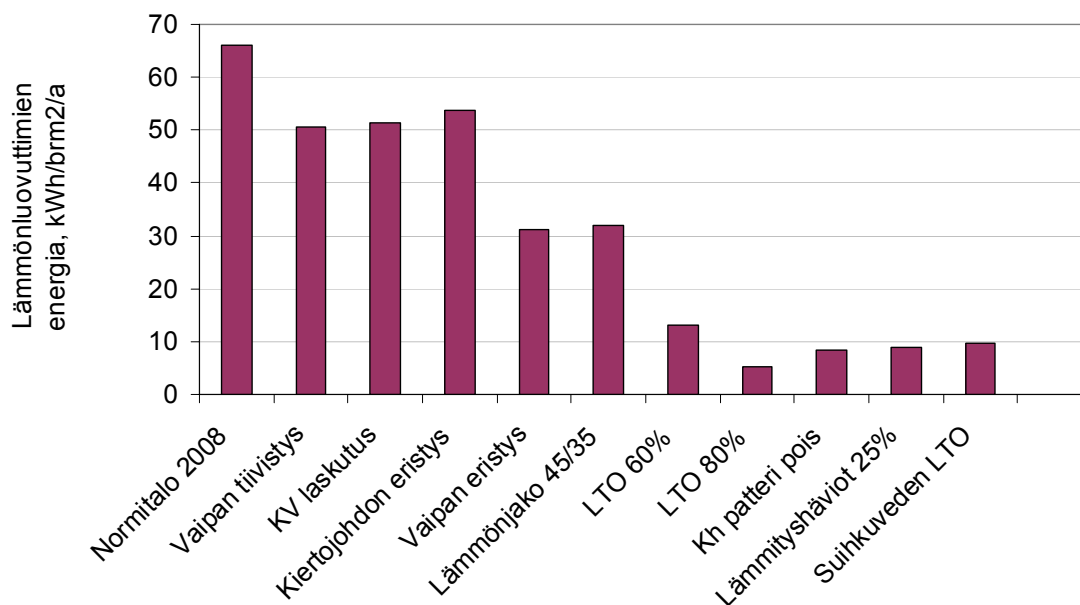


Kuva 10. Kaukolämmön tuntisen tilaustehon muutos säästötoimenpiteiden ansiosta. Käyttövesiteho on laskettu Suomen Kaukolämpö ry:n suosituksen K15/1998 mukaan asuntojen määrän perusteella muissa paitsi kahdessa oikeanpuoleisessa vaihtoehdossa. Niissä tilausteho on laskettu käyttöveden todellisen tuntitehon perusteella suihkuveden lämmön talteenotto ja lämpimän veden varaajakytkentä huomioiden.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 11. Kaukolämpöenergian kulutuskohteet huippuenergiatehokkaassa talossa. Lämmityskausi on noin neljän kuukauden pituinen.

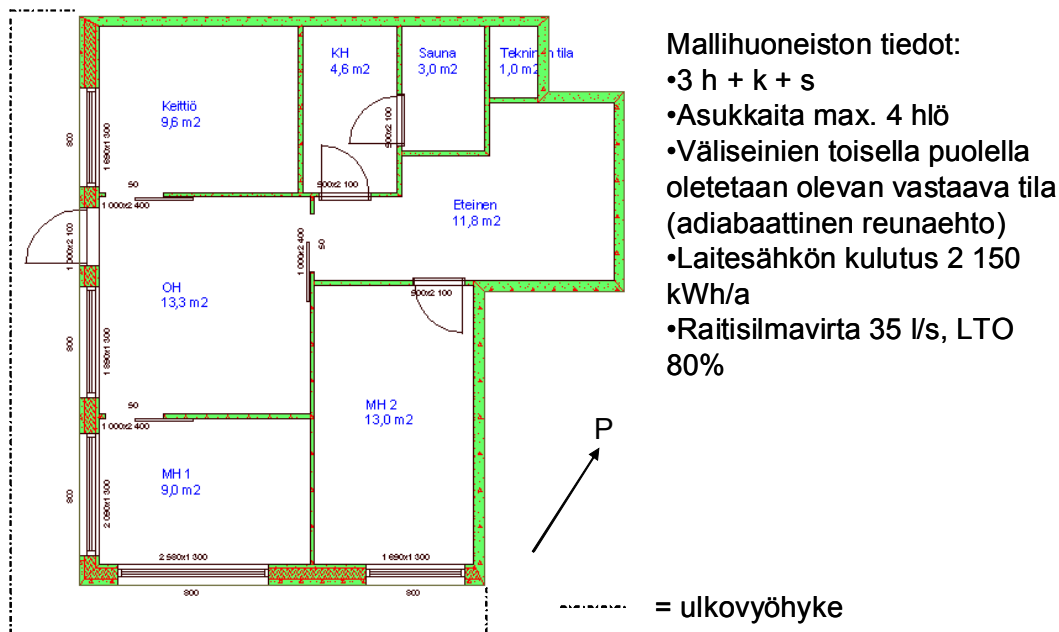


Kuva 12. Tilojen lämmönluovuttimien (esim. radiaattorit) luovuttama energia vuodessa brutto-neliometriä kohti peräkkäisten energiansäästötoimenpiteiden jälkeen.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

1.1.3 Tilojen lämmitystarve mallihuoneistossa

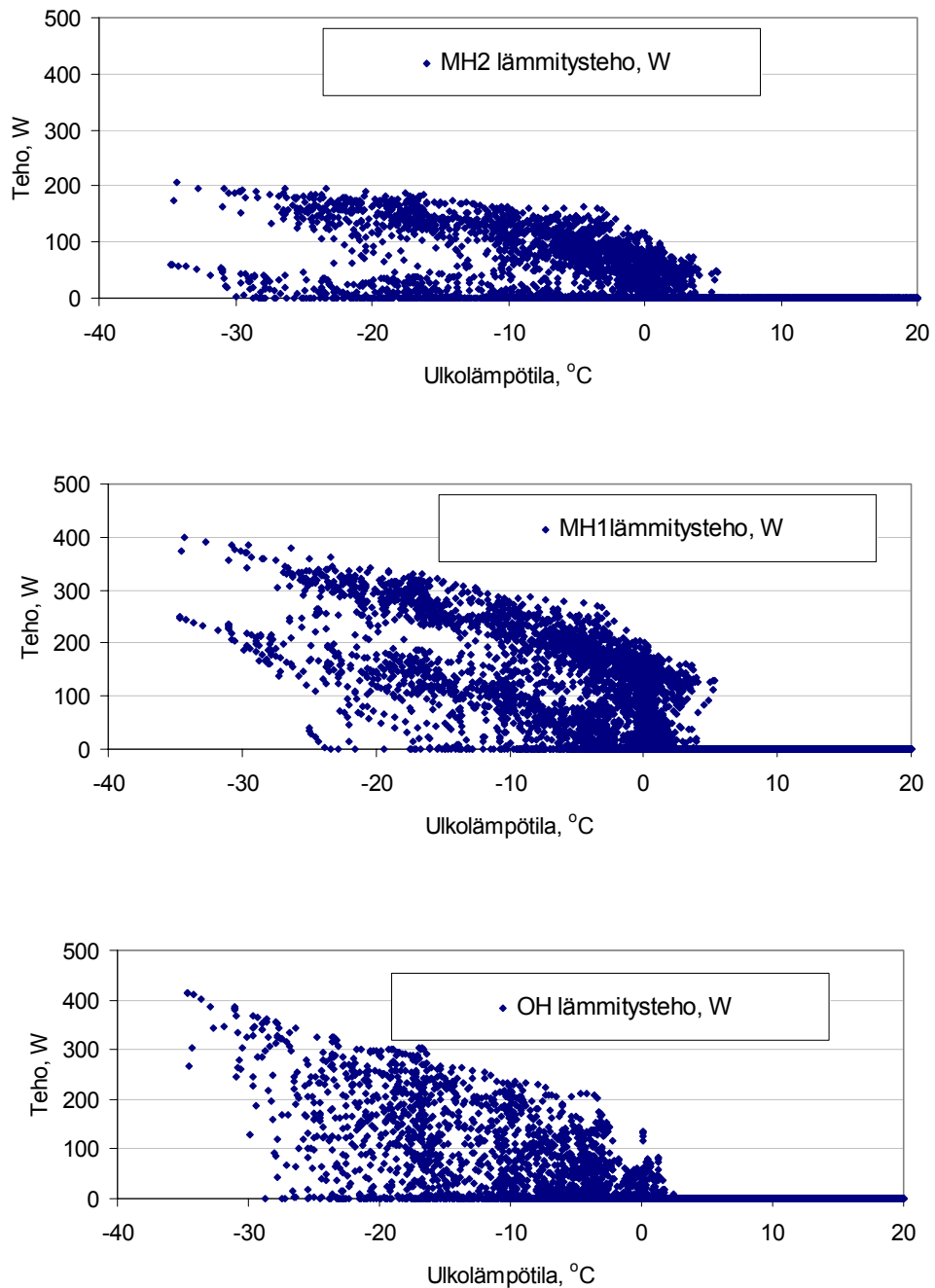
Huoneiden lämmitystarpeen yksityiskohtainen käyttäytyminen mallinnettiin ottamalla aiemmin tarkastellun kerrostalon yksi huoneisto (3 h + k + s) simulointien lähtökohdaksi (kuva 13). Huoneisto mallinnettiin monivyöhykemallilla, jotta saataisiin esiin tilan käyttöprofiilista ja auringosta aiheutuva huoneiden lämmöntarpeen ja sisälämpötilan vaihtelun eriaikaisuus. Laskelmat on tehty VTT-Talo-ohjelmistolla (Tuomaala 2002), joka on tarkoitettu rakennusten lämpödynamiikan sekä ilmanvaihdon mallintamiseen. Lämmitystarve laskettiin Jyväskylän testivuoden 1979 säätiedoilla. Olohuoneen pääilmansuunta oli lounaaseen. Tilojen lämmityksen asetusarvo asuin-tiloissa oli 21 °C ja kylpyhuoneessa 23 °C. Ilmanvaihdon mitoitus oli 35 l/s tai 42 l/s. Suurempaa ilmavirtaa käytettiin ilmanvaihtolämmitysratkaisussa; muissa lämmitysratkaisussa käytettiin pienempää ilmavirtaa.



Kuva 13. Simuloidun mallihuoneiston tiedot.

Hyvin lämpöeristetyin talon lämmönjakojärjestelmästä vaaditaan nopeaa reagointia kuormitustilanteiden muutoksiin, koska huoneiden lämmitystehon tarve ei riipu suoraviivaisesti ulkolämpötilasta vaan vaihtelee voimakkaasti huoneen sisäisten lämpökuormien ja auringonsäteilyn mukaan. Kuvassa 14 esitetään kahden makuuhuoneen ja olohuoneen tehon tarve eri ulkolämpötiloilla, kun lämmityksen säätö toimii ideaalisesti, ts. huoneen lämpötila pysyy 21 asteessa silloin, kun lämmitystarvetta on.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 14. Makuuhuoneiden ja olohuoneen lämmitystehon tarve vuoden jokaisena tuntina. Huoneisto on talon välikerroksissa.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Makuuhuoneiden tehon pisteparvista erottuvat selvästi yön tunnit, jolloin tehon tarve on noin 150 W päiväsaikaa pienempi kahden henkilön tuottaman lämmön takia. Erityisesti makuuhuoneessa 2, jossa on vähän ulkoseinää, ei lämmitystä juuri tarvita, jos siellä on kaksi ihmistä. Makuuhuoneessa 1 lämmitystehon tarve on paljon suurempi, koska siinä on kaksi ikkunaa ja paljon ulkoseinää.

1.2 Tarkasteltavat lämmitysjärjestelmäkoneptit

Hyvä lämmönjakojärjestelmä ylläpitää hyvää termistä viihtyvyyttä kuluttamatta tarpeettomasti energiaa. On myös toivottavaa, että lämpötilaa voidaan säätää huonekohtaisesti. Nämä tavoitteet täyttää hyvin esimerkiksi suora sähkölämmitys tai ilmanvaihtolämmitys, jossa on huonekohtaiset sähköllä toimivat jälkilämmityspatterit. Myös perinteinen vesiradiaattorilämmitys tai huonekohtaisilla vesipattereilla toteutettu ilmanvaihtolämmitys voi toimia hyvin, jos jakajohtojen lämpöhäviöt eliminoidaan lämmitysveden alhaisella lämpötilalla ja jakajohtojen eristyksellä. Ilmavaihtolämmityksen etuna on se, että huoneen samanaikainen lämmitys ja jäädytys voidaan helpommin estää.

Seuraavassa tarkastellaan ilmanvaihtolämmitystä sekä radiaattorilämmitystä. Lattialämmitysjärjestelmät jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Perusteluna on, että kaukolämmön kannalta tutkimuksessa tarkastellut vesikiertoiset radiaattorijärjestelmät tuottavat lämpötilatasoltaan lähes saman tuloksen kuin lattialämmityksen yhteydessäkin. Täten lattialämmityksen tarkastelu ei toisi merkittävää lisäarvoa johtopäätöksiin. Toisaalta alustavissa simuloinneissa havaittiin, että hyvin lämpöeristetyssä rakennuksessa esiintyvät nopeat lämmitystehontarpeen muutokset asettavat haasteita kerrostaloissa yleisesti betoniin asennetun lattialämmityksen säätöjärjestelmille ja termisten olosuhteiden hallinnalle. Tätä ei kuitenkaan voitu tutkia tässä projektissa tarkemmin.

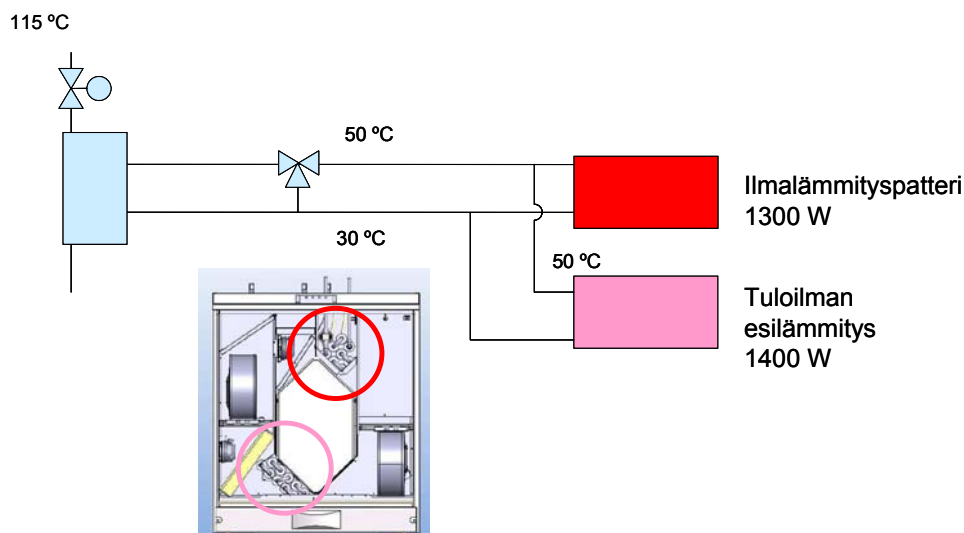
1.2.1 Keskitetty huoneistokohtainen ilmanvaihtolämmitys

Hankintakustannuksiltaan edullisin on keskitetty huoneistokohtainen ilmanvaihtolämmitys, jossa koko huoneistoa varten on vain yksi, ilmanvaihtokoneessa sijaitseva lämmityspatteri. Kuvassa 15 on ilmalämmityspatterin kytkentäkaavio. Kuvassa näkyy myös tuloilman esilämmityspatteri, joka huolehtii, ettei lämmön talteenoton lämmönsiirrin huurru lämmittämällä kylmän tuloilman vähintään -5 -asteiseksi. Pattereissa käytetään vesipuolella kaksiputkikytkentää, jossa molemmat patterit saavat 50-asteista vettä ulkolämpötilasta riippumatta. Myös menoveden lämpötilan ohjaus olisi mahdollista. Sen vaikutuksia käsitellään patterilämmityksen yhteydessä luvussa 1.2.3.

Jäätymisvaaran takia lämmönsiirtonesteeksi on valittu -34 asteen alapuolella jäätyvä vesiglykoliseos. Laskelmissa käytetyn ilmalämmityspatterin mitoituksessa käytettiin seuraavia arvoja: tuloilman lämpötila $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, meno/paluuveden lämpötila $50/30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ilmavirta 50 l/s , ilmapuolen painehäviö 11 Pa ja nestepuolen painehäviö 4 kPa . lämpötiloille lämpötilaksi $50/30\text{ }^{\circ}\text{C}$, ilmavirralla ilmavirraksi 50 l/s , ilmapuolen painehäviölle painehäviöksi 11 Pa ja nestepuolen painehäviölle. Nämä toteutuvat esimerkiksi nelirivisellä lamellipatterilla, jonka otsapinta on $330\text{ x }300\text{ mm}$.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Vastaavasti tuloilman esilämmityspatteri on kaksirivinen, ja sen otsapinta on 330 x 150 mm. Painehäviö mitoitustilanteessa ilmapuolella on 7 Pa ja nestepuolella 1 kPa.



Kuva 15. Ilmanvaihtolämmityksen ja tuloilman esilämmityksen kytkentä kaukolämpöön kaksi-putkikytkennällä. Tulevan nesteen lämpötila on vakio 50 °C.

Lämpö siirretään eristetyn tuloilmakanaviston (kuva 1) kautta huoneisiin. Lämmityksen toimintalaskelmissa huonekohtaiset tuloilmavirrat (taulukko 3) valittiin siten, että huoneiden väliset lämpötilaerot jäisivät mahdollisimman pieniksi. Ilmavirrat poikkeavat tämän takia ilmanvaihdon tarpeen mukaisista ilmavirroista siten, että vähemmän tehoa tarvitsevaan makuuhuoneeseen 2 tuodaan vain noin yhden henkilön ilmanvaihdon tarvetta vastaava määrä tuloilmaa.

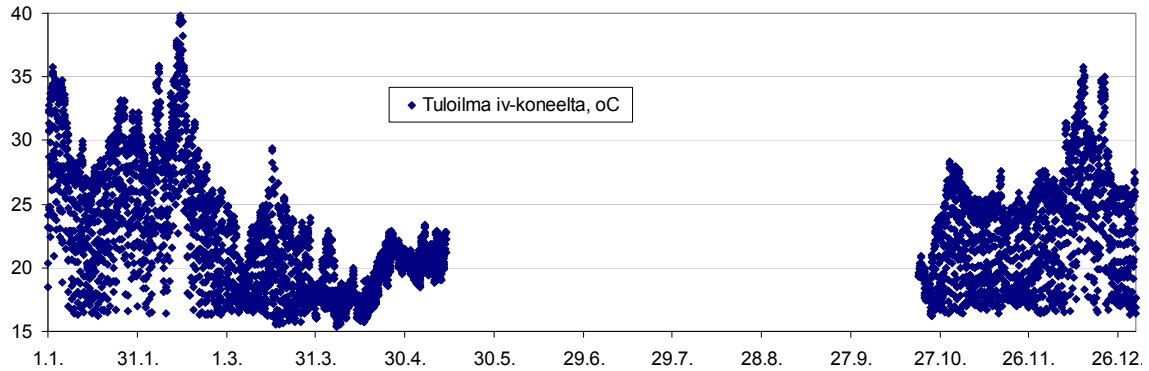
Taulukko 3. Ilmanvaihtolämmityksen laskelmissa on käytetty huoneiden lämmitystarpeen mukaan mitoitettuja huonekohtaisia tuloilmavirtoja, jotka poikkeavat ulkoilmanvaihdon tarpeen mukaisista ilmavirroista.

	Mitoitusteho, W	Mitoitusteho, W/m ²	Tuloilmavirta, dm ³ /s	Ulkoilman tarve, dm ³ /s
Olohuone	406	31	18	12
Makuuhuone 1	411	46	15	12
Makuuhuone 2	226	17	7	12
Keittiö	158	17	siirtoilma	siirtoilma
Kylpyhuone	102	13	siirtoilma	siirtoilma
Sauna	17	6	2	6
Yhteensä	1304	19	42	42

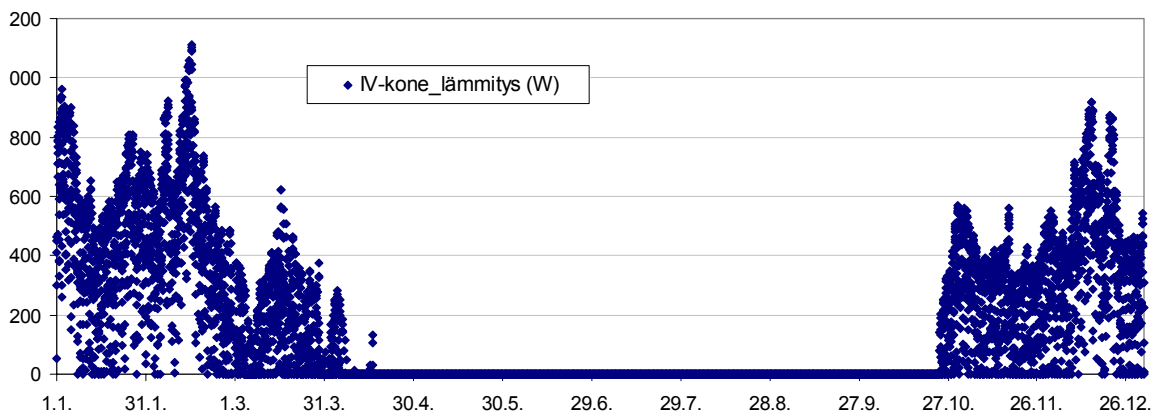
Kuvassa 16 näkyy ilmalämmityspatterilta lähtevän tuloilman lämpötila tunti tunnilta koko vuoden ajalta. Tuloilman lämpötila on harvoin yli 35 astetta ja usein talvellakin alle 20 asteen, kun lämmitystarvetta ei ole. Silloin tuloilman lämpötila on sama kuin lämmön talteenoton jälkeen.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

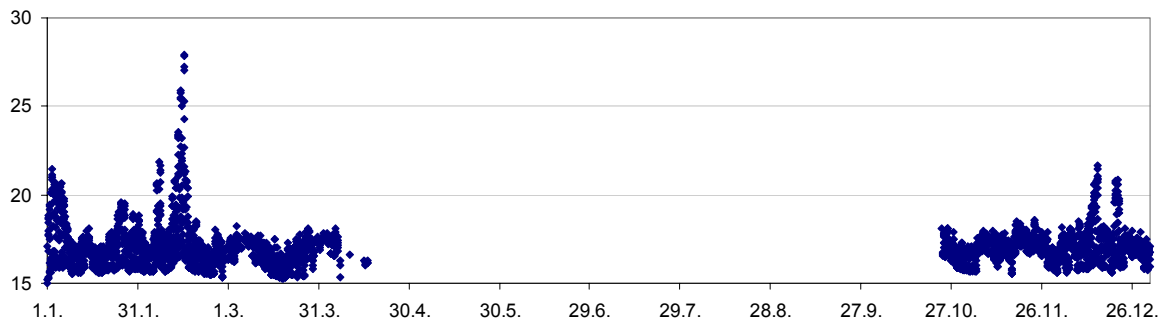
Vastaava patteriteho näkyy kuvassa 17 ja nesteen paluulämpötila kuvassa 18. Paluulämpötila jää yleensä alle 20 asteen, joten lämmitysveden jäähtymä on hyvä.



Kuva 16. Tuloilman lämpötila ilmanvaihtolämmityksessä tunneittain koko vuoden aikana.



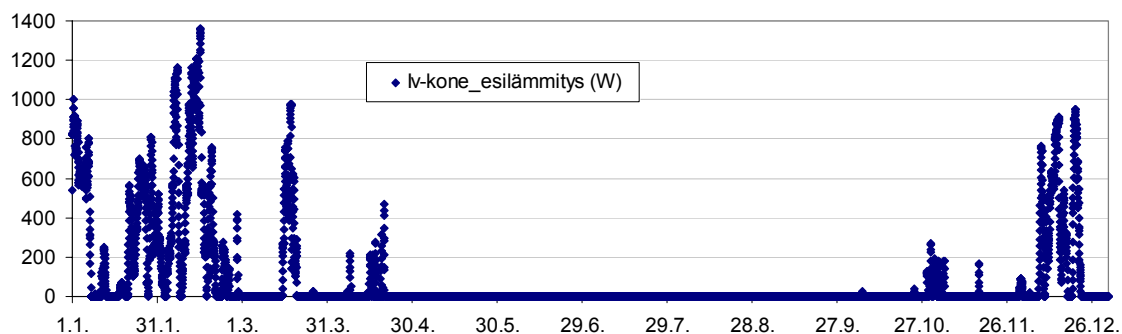
Kuva 17. Tuloilmapatterin teho ilmanvaihtolämmityksessä tunneittain.



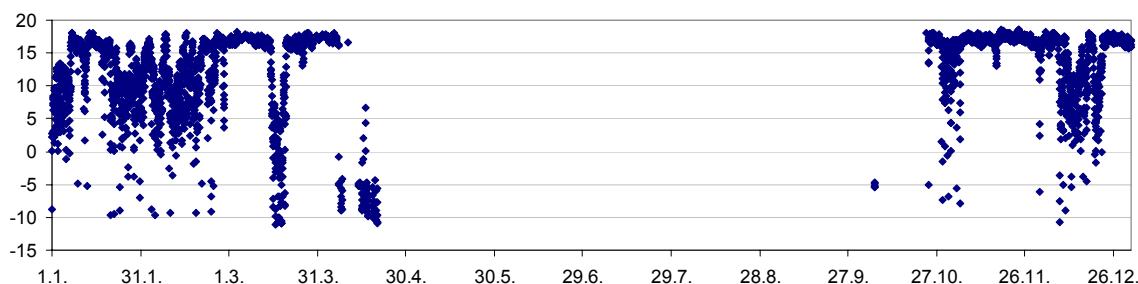
Kuva 18. Ilmalämmityspattereilta palaavan nesteen lämpötila lämmityskaudella. Ilmalämmityspattereille menevän nesteen lämpötila on 50 °C.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Tuloilman esilämmityspatterin huipputeho (kuva 19) on hieman suurempi kuin ilmalämmityspatterin (kuva 17), mutta tehoa tarvitaan vain silloin, kun ulkolämpötila on alle $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tehon vaihtelu näkyy pattereiden yhteisen paluuveden lämpötilassa (kuva 20), joka laskee ajoittain alle nollan. Tästä syystä kaukolämmön lämmönsiirtimen jäätyminen estosta on huolehdittava. Asiaan palataan luvussa 1.2.4.



Kuva 19. Ilmanvaihdon esilämmityspatterin tehontarve tunneittain.

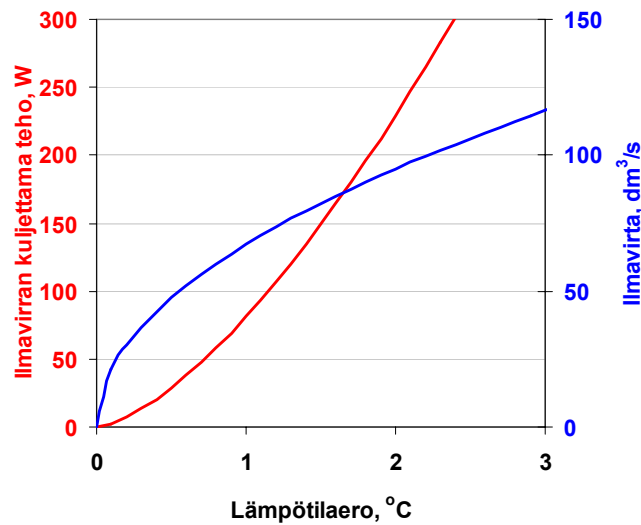


Kuva 20. Ilmalämmityspatterin ja esilämmityspatterin yhdistetty paluulämpötila lämmityskaudella. Ilmalämmityspattereille menevän nesteen lämpötila on $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötilataso kaukolämpöveden hyvän jäähtymän saavuttamiseksi on riittävän alhainen.

Huonelämpötilat väliovien ollessa auki

VTT-Talo-laskentamallissa asuinhuoneiden ovet voivat olla joko kiinni tai auki. Edellä esitetyissä ilmanvaihtolämmityksen toimintalaskelmissa ovet olivat auki. Jo pienetkin lämpötilaerot huoneiden välillä saavat avoimissa oviaukoissa aikaan ilmavirtauksia, jotka ovat paljon ilmanvaihdon ilmavirtoja suurempia. Kuvan 21 mukaan esimerkiksi $1,3$ asteen lämpötilaero aiheuttaa kahden nukkuvan ihmisen lämpötehon (120 W) siirtymistä oviaukkojen välityksellä huoneesta toiseen. Vastaavasti ovesta ulos (ja myös sisään) ilmaa virtaa kuvan mukaan 77 litraa sekunnissa. Määrä on suuri verrattuna kahden henkilön ilmanvaihtotarpeeseen (suuruusluokkaa $12\text{--}20\text{ l/s}$). Avoimien ovien kautta tapahtuvilla virtauksilla on siten suuri merkitys sekä huoneiden välisten lämpötilaerojen että epäpuhtauserojen tasoittumisessa.

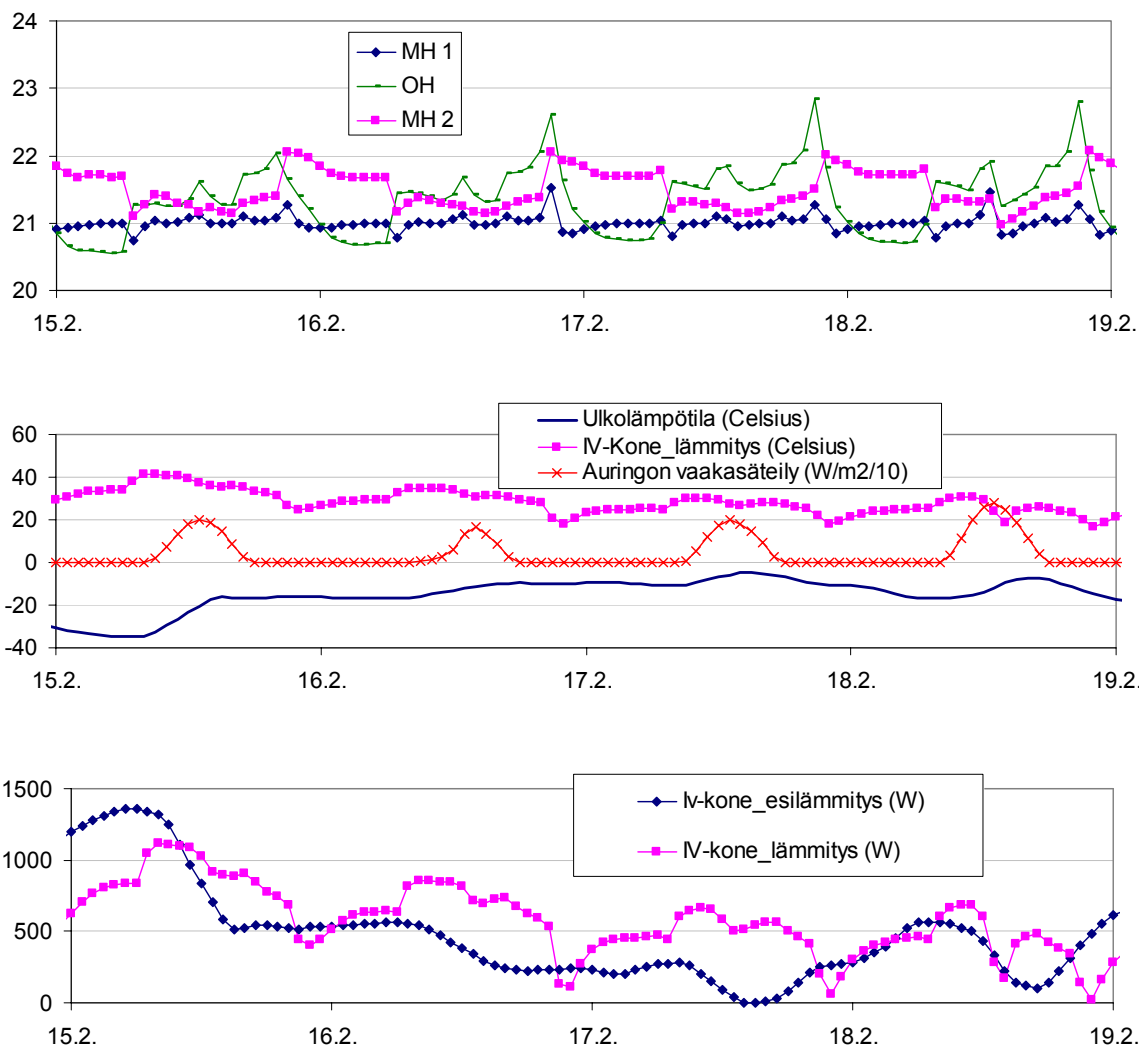
1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 21. Avoimen oven kautta virtaava ilma ja virtauksen mukana siirtyvä lämpöteho, kun huoneet ovat eri lämpöiset. Oven korkeus on 2,04 m ja leveys 0,84 m. Kuva perustuu Etheridge & Sandbergin suositteluun laskentakaavaan (1996).

Keskitetysti ohjatussa ilmanvaihtolämmityksessä huonelämpötiloja ei voida säätää huonekohtaisesti, vaan ne vaihtelevat käyttötilanteen mukaan. Erot huonelämpötilojen välillä ovat kuitenkin tyypillisesti alle yhden asteen silloin, kun ovet ovat auki. Kuvassa 22 esitetään laskentatuloksia neljän päivän pakkasjaksolta, jolloin ulkolämpötila vaihtelee -35 ja -5 asteen välillä (ulkolämpötilan käyrä on kuvan 22 toisessa kaaviossa).

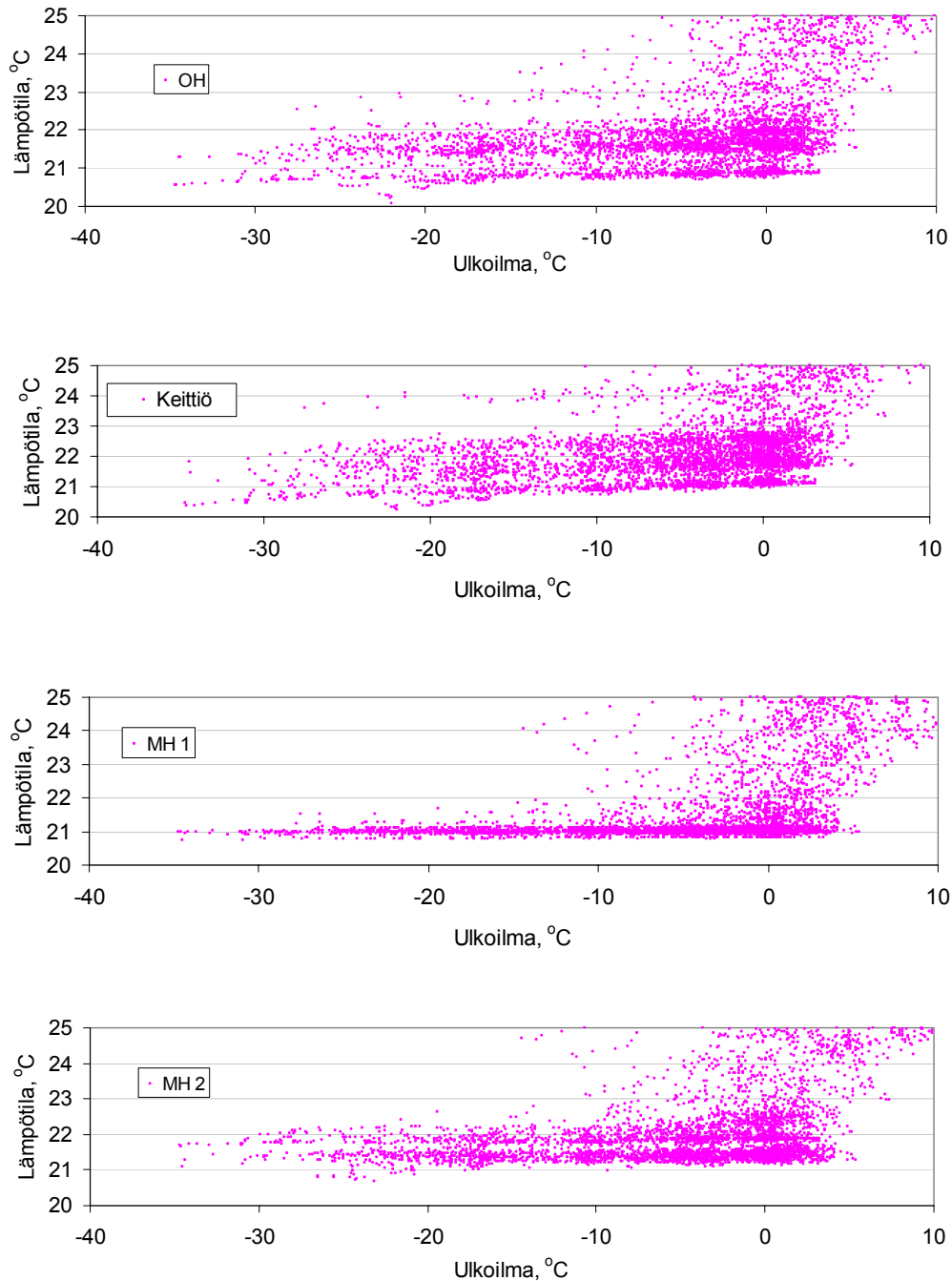
1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 22. Huonelämpötilat (ensimmäinen kuva), säätä ja tuloilman lämpötila (toinen kuva) sekä ilmanvaihtokoneen patteritehot (kolmas kuva) neljän päivän pakkasjaksolla. Ilmavirrat on valittu lämmitystarpeen perusteella, ja huoneiden ovet ovat auki.

Kuvasta 22 näkyy (ensimmäinen kuva), että makuuhuoneessa 1 lämpötila pysyy lähellä tavoitearvoa (21 °C), koska ilmalämmityspatteria ja siten tuloilman lämpötilaa (toinen kuva) ohjataan juuri tämän huoneen lämpötilan perusteella. Sama tuloilman lämpötila johtaa makuuhuoneessa 2 hieman korkeampaan huonelämpötilaan (ensimmäinen kuva), koska huoneen lämmitystehon tarve on pienempi kuin makuuhuoneessa 1 ja lisäksi makuuhuoneiden käyttöprofiilit on oletettu samanlaisiksi. Makuuhuoneen 2 lämpötila ei nouse kuitenkaan 22 astetta korkeammalle, koska lämpöä siirtyy toisiin huoneisiin avoimien ovien kautta virtaavan ilman välityksellä sekä johtumalla väliseinien läpi. Olohuoneessa lämpötila pyrkii nousemaan päivällä sisäisten lämpökuormien ja auringonsäteilyn takia. Yöllä lämpötila olohuoneessa hieman laskee, kun lämpökuormia ei ole.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 23. Olohuoneen, keittiön ja makuuhuoneiden lämpötilat ilmanvaihtolämmityksessä esitettyinä tunneittain. Ilmalämmityspatteria ohjataan makuuhuoneen 1 lämpötilan perusteella: tavoitearvo on 21 °C. Väliovet ovat auki.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

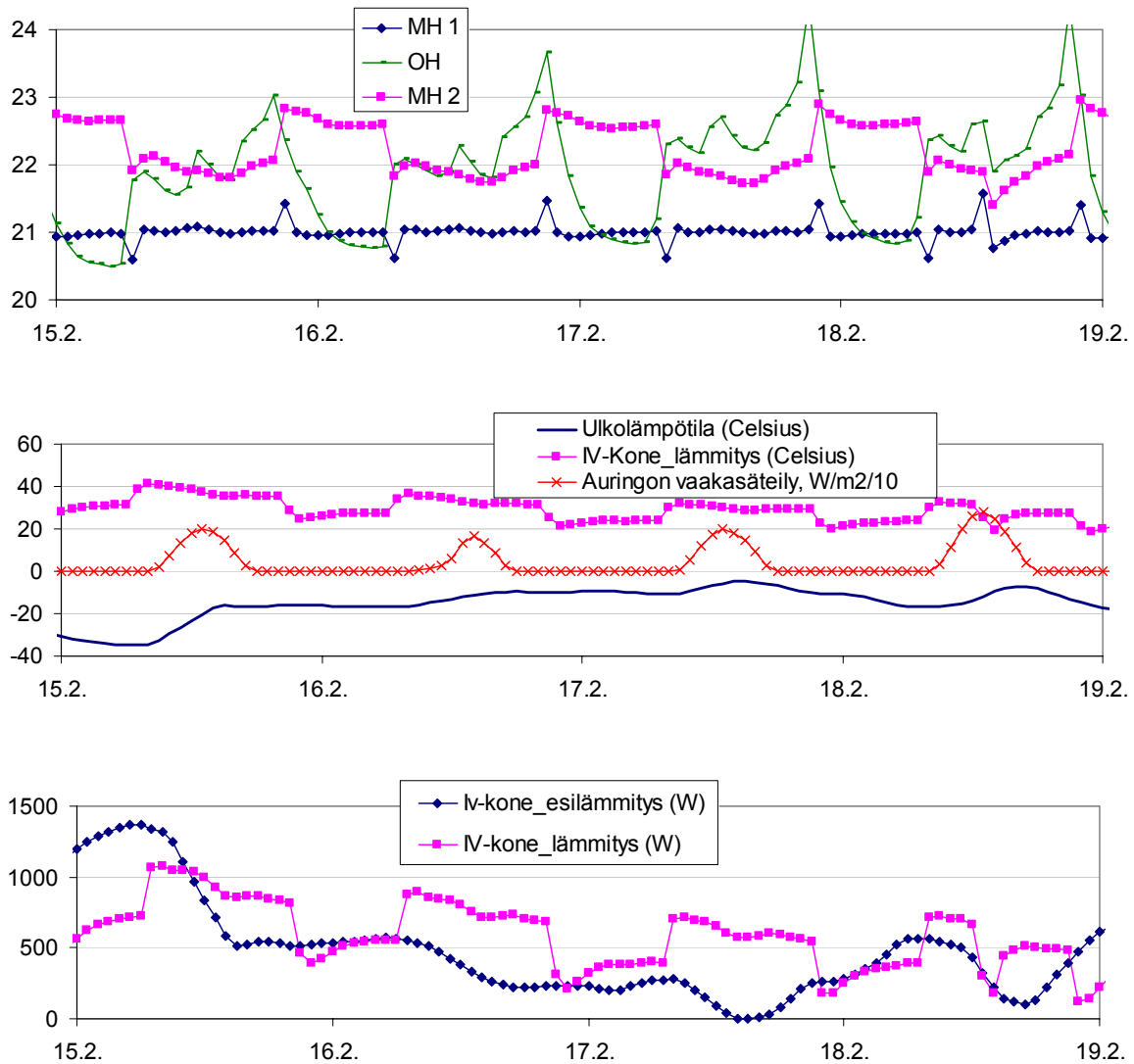
Huonelämpötilat koko vuodelta eri ulkolämpötiloilla on esitetty kuvassa 23. Makuuhuoneessa 1 lämpötila pysyy suurimman osan vuotta lähellä tavoitearvoa 21 °C, koska tuloilman lämpötilaa ohjataan juuri tämän huoneen lämpötilan perusteella. Sama tuloilman lämpötila johtaa makuuhuoneessa 2 hieman korkeampaan huonelämpötilaan ja olohuoneessa korkeampaan tai alhaisempaan huonelämpötilaan riippuen lämpökuormien sijainnista.

Korkeat huonelämpötilat lämpimällä säällä kuvassa 23 johtuvat siitä, että laskennassa ilmanvaihdon lämmön talteenottoa ei ohitettu silloin, kun sisälämpötilat pyrkivät nousemaan liian korkeiksi. Käytännössä lämmön talteenoton automaattinen ohitus ja lisäksi ilmanvaihdon tehostus ovat tarpeen yllämpöjen estämiseksi. Laskennassa esiintyvät yllämpötilat eivät liity erityisesti ilmanvaihtolämmitykseen vaan esiintyvät myös muita lämmönjakotapoja käytettäessä.

Huonelämpötilat väliovien ollessa kiinni

Vertailun vuoksi ilmanvaihtolämmityksen toimintaa on tarkasteltu myös tilanteessa, jossa makuuhuoneiden ja keittiön ovet ovat suljettuina. Kuvan 24 mukaan olohuoneen ja makuuhuoneen 2 lämpötilojen ylitykset tavoiteltuun 21 asteeseen nähden likimain kaksinkertaistuvat, kun ovet olivat kiinni (vertaa kuvaan 22). Makuuhuoneen 2 tilannetta helpottaa se, että molempiin makuuhuoneisiin on laskettu yötunteina kahden henkilön samanaikainen lämpökuorma. Olohuoneen lämpötila vaihtelee enemmän: illan lämpökuormat nostavat sen lämpötilaa, mutta aamu-yöllä kuormien poistuttua lämpötila laskee hieman 21 asteen alapuolelle.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 24. Huonelämpötilat (ensimmäinen kuva), säätötila ja tuloilman lämpötila (toinen kuva) sekä ilmanvaihtokoneen patteritehot (kolmas kuva) neljän päivän pakkasjaksolla. Makuuhuoneiden ja keittiön ovet ovat kiinni. Vertaa kuvaan 22, jossa ovet ovat auki.

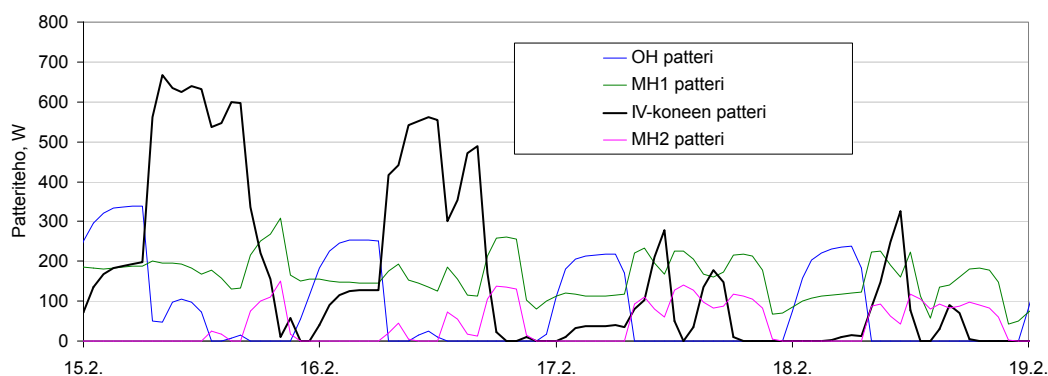
1.2.2 Huonekohtainen ilmanvaihtolämmitys

Huonekohtainen lämpötilansäätö voidaan ilmanvaihtolämmityksessä periaatteessa toteuttaa huoneen tuloilmalaitteeseen sijoitetulla lämmityspatterilla, esimerkiksi pienellä lamellipatterilla. Lämmitysvesiputkisto voidaan vetää samaa reittiä tuloilmakanavien kanssa, kuitenkin siten, että putkiston ilmaus toimii. Luontevaa olisi mitoittaa patterit siten, että ilmanvaihtokoneessa oleva keskitetty patteri huolehtii lämmitystehon pääosasta ja huonekohtaiset patterit tehon hienosäädöstä. Tehojen jakautuma pattereiden kesken riippuu säädön toteutusperiaatteesta.

Eräs vaihtoehto on lämmittää tuloilma ilmanvaihtokoneella vain alimpaan huonekohtaiseen tuloilman lämpötilaan. Tällöin vältetään huoneiden yllilämmitys. Kuvassa 25 esitetään tällaisen

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

säätöjärjestelmän toiminta pakkasjaksolla, jolloin ulkolämpötila vaihtelee -35 ja -5 °C:n välillä (sama jakso kuin kuvassa 22). Ensimmäisenä, kylmimpänä päivänä ilmanvaihtokoneen patteri kattaa pääosan lämmitystehosta. Ulkoilman lämmitessä lämpökuormat alkavat kuitenkin hallita tehontarpeen vaihtelua eri huoneissa siten, että vähäisimmän lämmöntarpeen huone ei juuri tarvitse lämmitystä, jolloin ilmanvaihtokoneen patteri ei lämmitä. Lämmitys siirtyy ulkoilman lämmitessä yhä enemmän huonekohtaisten pattereiden vastuulle. Koko vuoden lämpöenergian kulutuksen kannalta tämä tarkoittaa sitä, että vain pieni osa lämmitysenergiasta (tässä tapauksessa 23 %) katetaan ilmanvaihtokoneen patterilla.



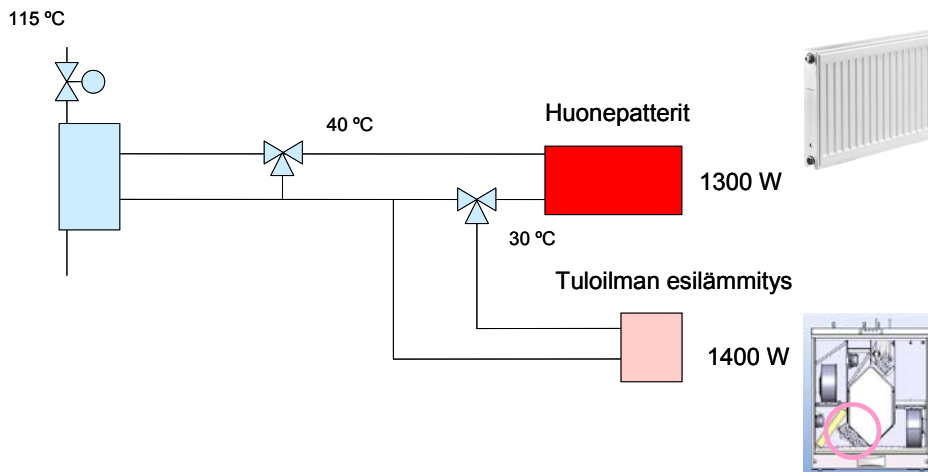
Kuva 25. Lämmitystehon jakautuminen pakkasjaksoilla ilmanvaihtokoneen lämmityspatterille ja huonekohtaisille pattereille huonekohtaisessa ilmanvaihtolämmityksessä.

Edellä kuvattu huonekohtainen ilmanvaihtolämmitys on hankintakustannuksiltaan verrattavissa radiaattorilämmitykseen. Onkin syytä etsiä edullisempia vaihtoehtoja huonekohtaisen lämpötilan säädön toteuttamiseksi.

1.2.3 Radiaattorilämmitys

Radiaattorilämmityksessä käytettiin nesteenä -34 -asteista vesiglykoliseosta, koska paluuvesi haluttiin johtaa tuloilman esilämmitykseen. Radiaattoriverkostossa on kaksiputkikytkentä ja patterit on mitoitettu menolämpötilalle 40 °C ja paluulämpötilalle 30 °C (Kuva 26). Patterit on valittu Purmon Compact -sarjasta 14–30 %:n ylimitoituksella (taulukko 4). Tuloilman esilämmityspatterissa on kaksi riviä, ja patterin otsapinta on 330 x 150 mm. Tuloilman jälkilämmitystä ei tarvita lämmön tehokkaan talteenoton takia.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



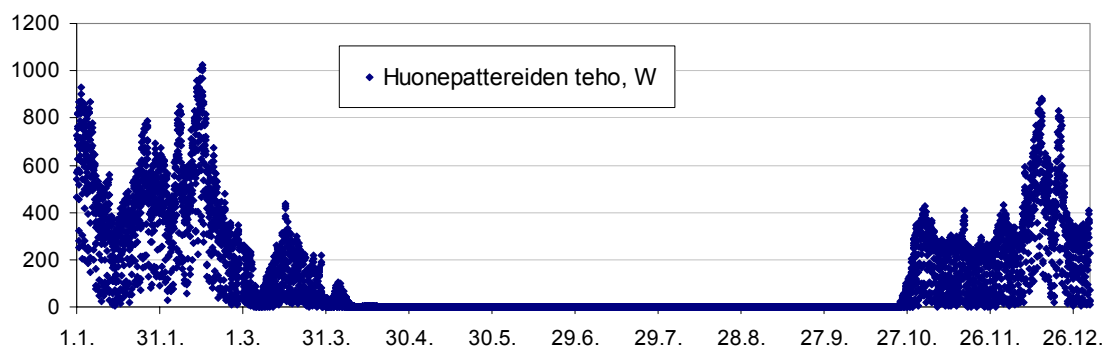
Kuva 26. Radiaattorilämmityksen ja tuloilman esilämmityksen kytkentä kaukolämpöön. Radiaattoriverkosto toimii kaksiputkikytkennällä, ja sen paluuneste ohjataan tuloilman esilämmitykseen.

Taulukko 4. Pattereiden valinta välikerroksiin. Mitoitusulkolämpötila -29 °C .

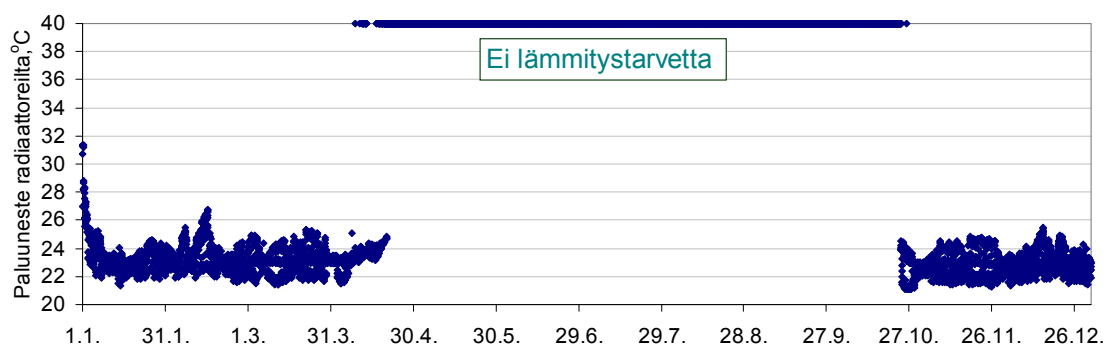
	Huonelämpötila	Tehon tarve	Tehon tarve	Patteriteho 40/30	Ylimitoitus
	°C	W	W/m ²	W	%
Olohuone	21	406	31	462	14
Makuuhuone 1	21	411	46	477	16
Makuuhuone 2	21	226	17	249	10
Keittiö	21	158	17	205	30
Kylpyhuone	23	102	13	127	24
Yhteensä	21	1 304		1 520	17

Mallihuoneiston radiaattoreiden yhteinen tehontarve esitetään tunti tunnilta koko vuoden ajalta kuvassa 27. Vastaava nesteen paluulämpötila näkyy kuvassa 28. Koska pattereiden paluuneste johdetaan kylmimpinä pakkaspäivänä tuloilman esilämmityspatteriin, laskee kaukolämmön lämmönsiirtimelle palaavan nesteen lämpötila ajoittain selvästi alle nollan (ks. kuva 29). Tästä syystä on huolehdittava, ettei kaukolämmön lämmönsiirrin jäädy (ks. luku 1.2.4).

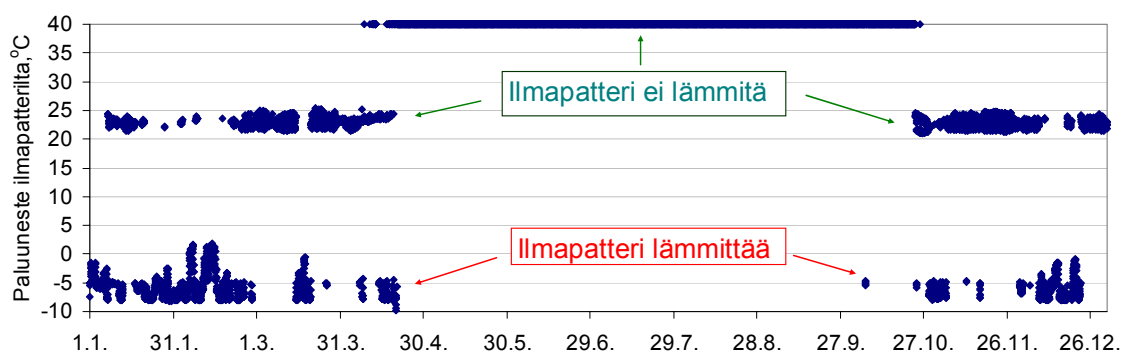
1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 27. Radiaattoreiden yhteinen tehontarve kaikkina vuoden tunteina.



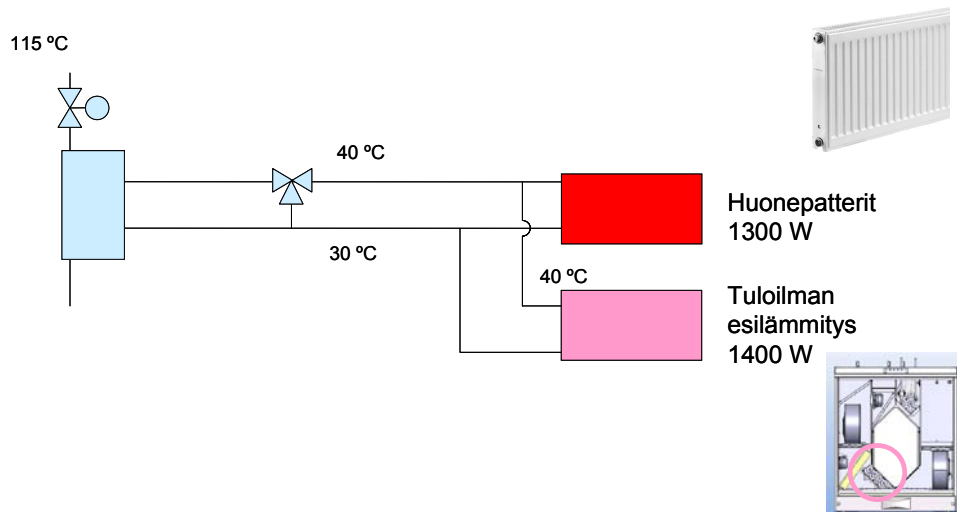
Kuva 28. Paluuneste huonepattereilta. Menoveden lämpötila on vakio, 40 °C.



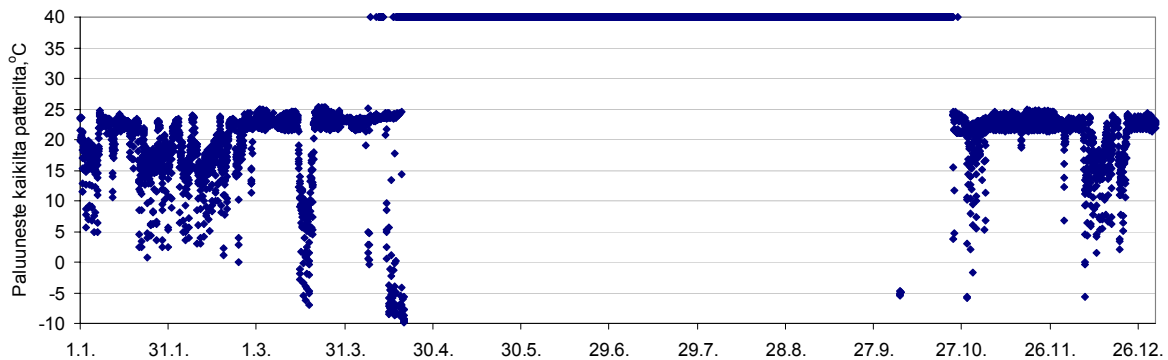
Kuva 29. Paluuneste tuloilman esilämmityspattereilta. Menovesi = huonepattereiden paluu, ilmanvaihdon tuloilman esilämmitys -5 °C:seen.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Toinen vaihtoehto tuloilman lämmityspatterin kytkentään esitetään kuvassa 30. Vastaava huonepattereiden ja esilämmityspatterin yhteinen paluuveden lämpötila näkyy kuvassa 31. Tässäkin tapauksessa paluuveden lämpötila jää ajoittain nollian alapuolelle. Näin tapahtuu kevätpäivinä, kun huonepattereissa ei aurinkokuorman takia tarvita vesivirtausta, vaikka alhaisen ulkolämpötilan vuoksi tuloilman esilämmitys olisikin tarpeen.



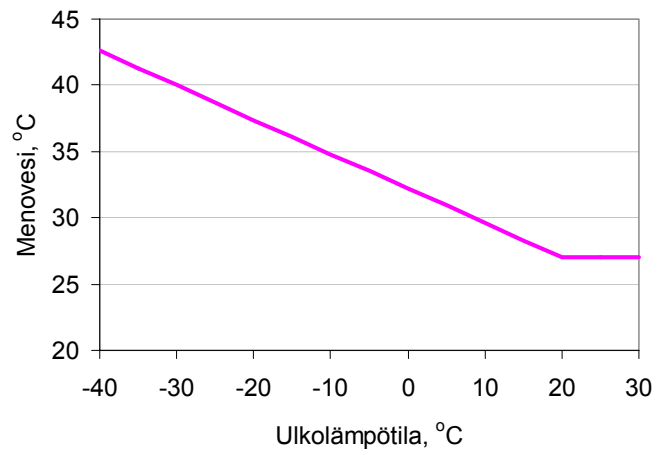
Kuva 30. Radiaattorilämmityksen ja tuloilman esilämmityksen kytkentä kaukolämpöön kaksiputkikytkennällä. Myös tuloilman esilämmitys on mukana kaksiputkikytkennässä.



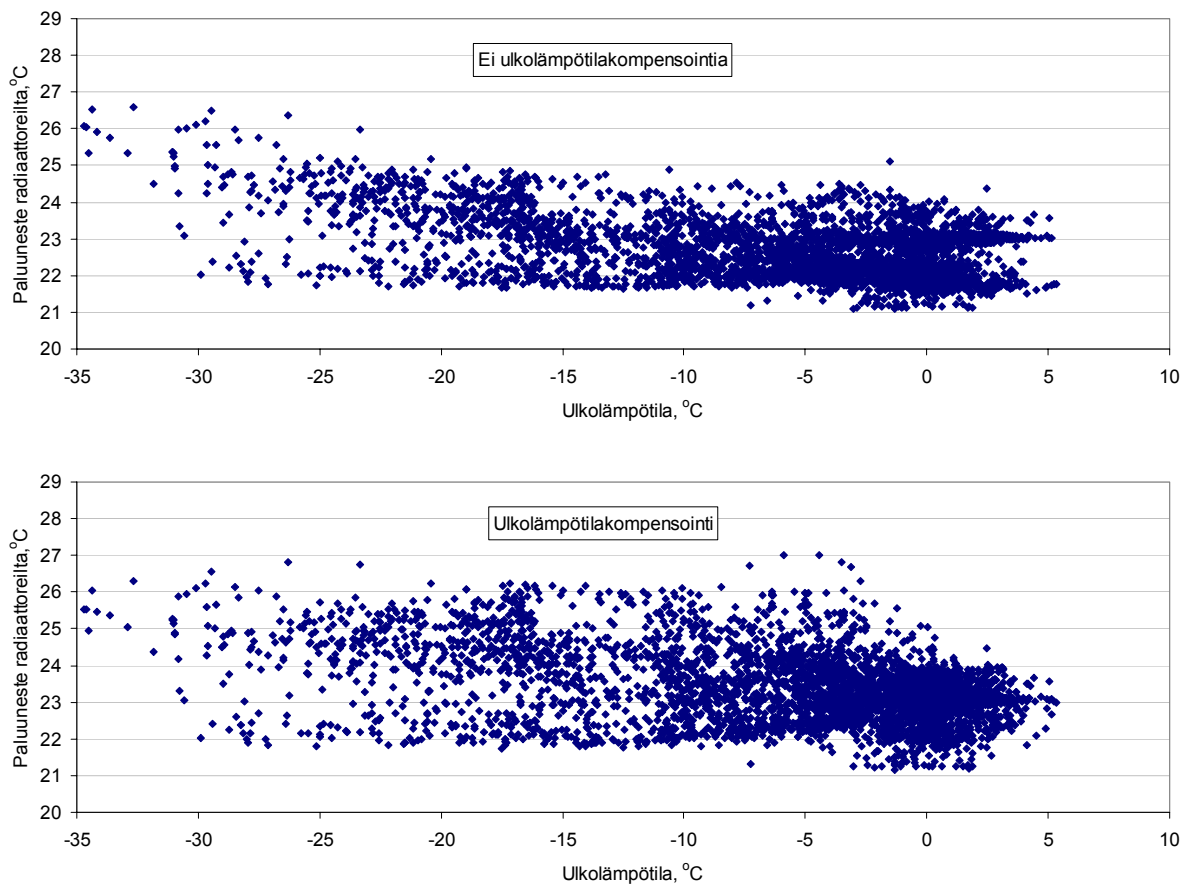
Kuva 31. Yhdistetty huonepattereiden ja esilämmityspatterin paluuvesi, kun myös esilämmityspatteri on kaksiputkikytkennässä. Menovesi 40 °C.

Laskelmilla tarkasteltiin myös menoveden lämpötilan ohjausta ulkolämpötilan perusteella (Kuva 32). Asuinhuoneiden lämmitystarve loppuu, kun ulkolämpötila kohoaa noin 5 °C:seen, mutta kylpyhuoneessa tarvitaan lämmitystä vielä silloinkin. Tämän takia menoveden minimilämpötilaksi asetettiin 27 °C, mikä sopii myös lattialämmitykseen. Menoveden lämpötilakompensoinnin vaikutus paluuveden lämpötilaan on pieni (kuva 33), mutta se tasoittaa radiaattoreiden nestevirtaa (kuva 34). Tämä on säädön kannalta edullista. Lisäksi menoveden alhainen lämpötila vähentää lämmitysverkoston lämpöhäviöitä ja siten energian kulutusta sekä rakennuksen ylikäynnemistä.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

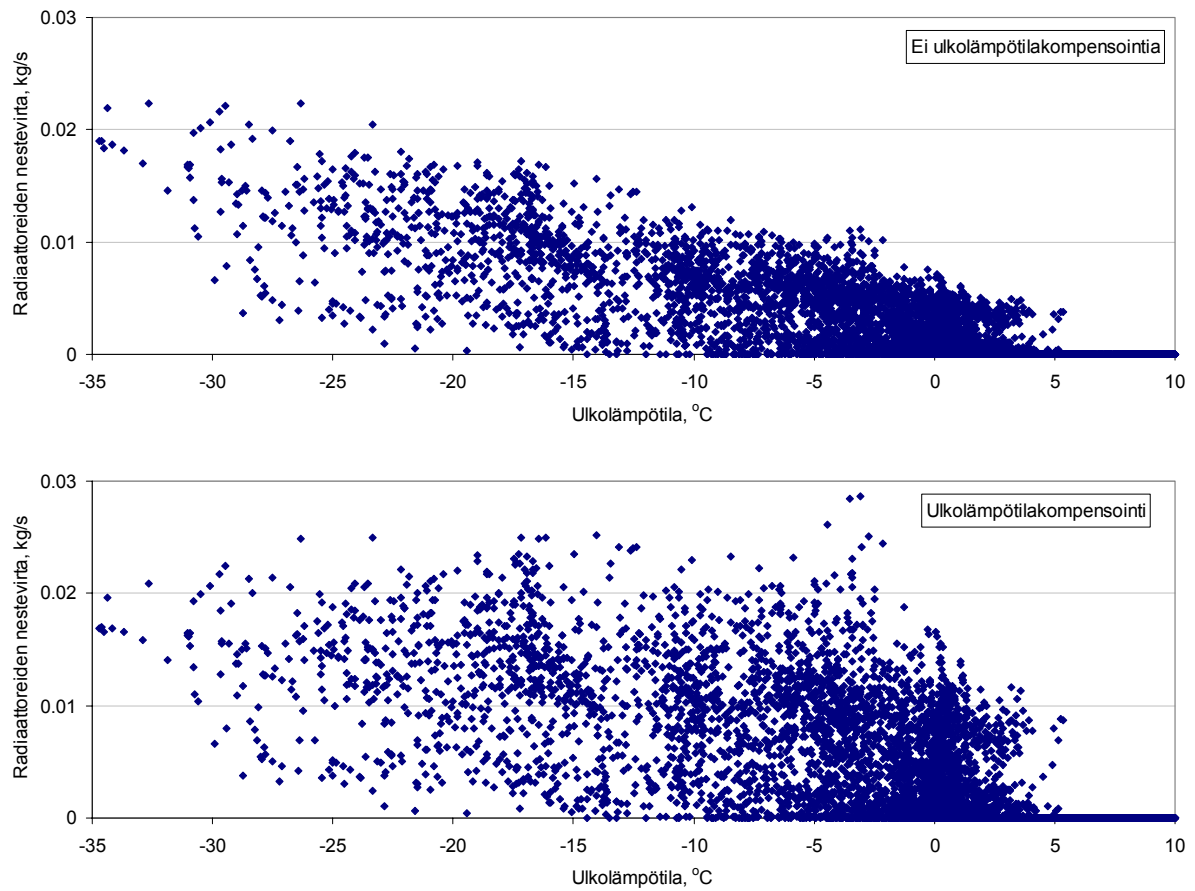


Kuva 32. Laskelmissa käytetty menoveden lämpötilan säätökäyrä.



Kuva 33. Menoveden ulkolämpötilakompensoinnin vaikutus radiaattoreiden paluuneste lämpötilaan.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

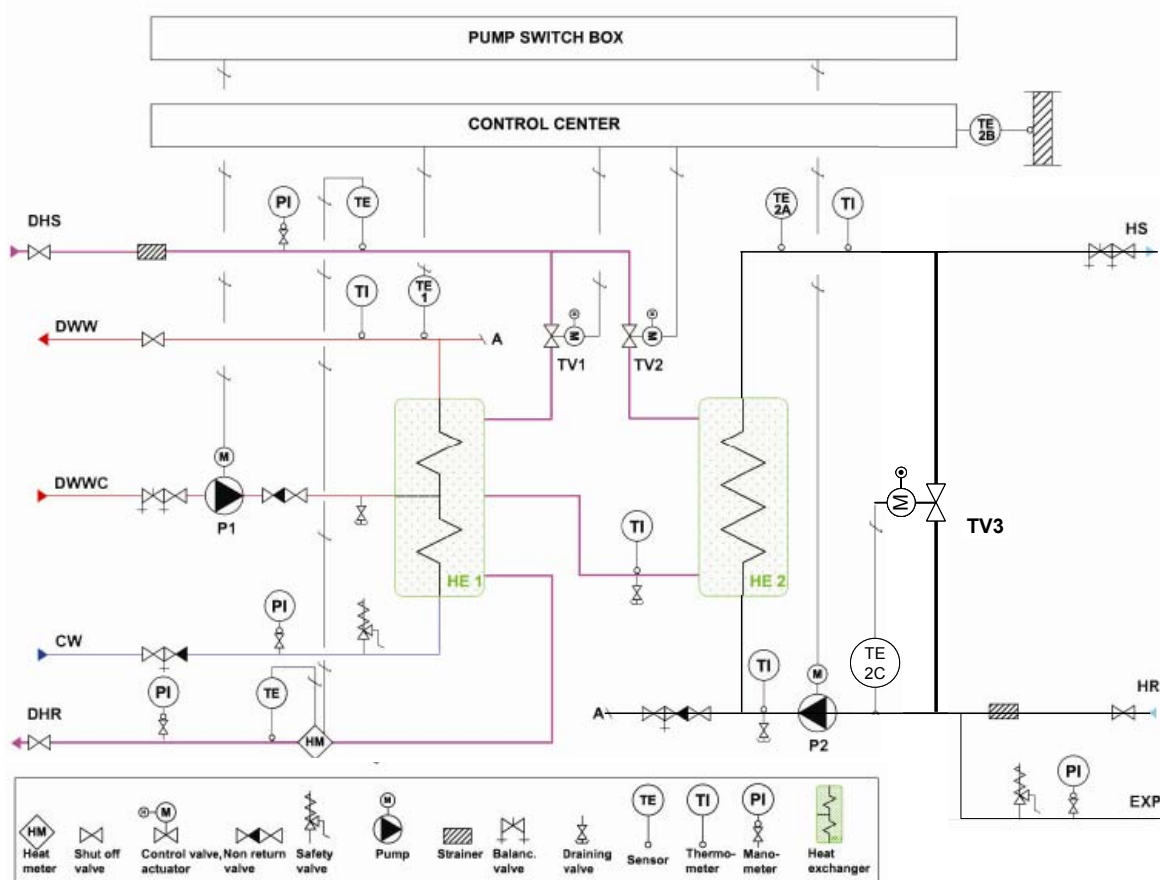


Kuva 34. Menoveden ulkolämpötilakompensoinnin vaikutus radiaattoreiden yhteiseen nestevirtaan.

1.2.4 Kaukolämmön lämmönsiirtimen jäätyksen esto

Simuloinnit osoittavat, että energian tehokas hyödyntäminen huipputehokkaassa järjestelmässä voi johtaa siihen, että paluueden (glykoli-vesiseos) lämpötila laskee pakkasen puolelle vuoden kylmimpinä jaksoina (kuvat 29 ja 31). Siirtimen jäätyksen estämiseksi ehdotetaan toisiopuolelle ohitushaaraa, johon asennetaan säätöventtiili (ks. kuva 35).

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



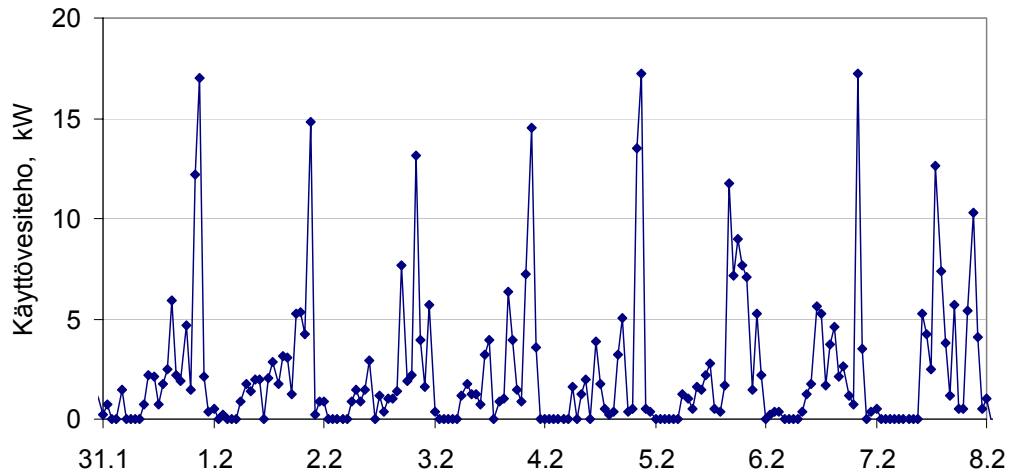
Kuva 35. Ohitushaaralla varustettu toisiopuolen kytkentäehdotus. Säätoventtiili TV3 avautuu, kun paluuveden lämpötila (sensori TE2C) alittaa esisäädetyin arvon, esimerkiksi +5 °C. (Muokattu lähteestä Guidelines for District Heating Substations, 2008.)

1.3 Käyttöveden lämmitys

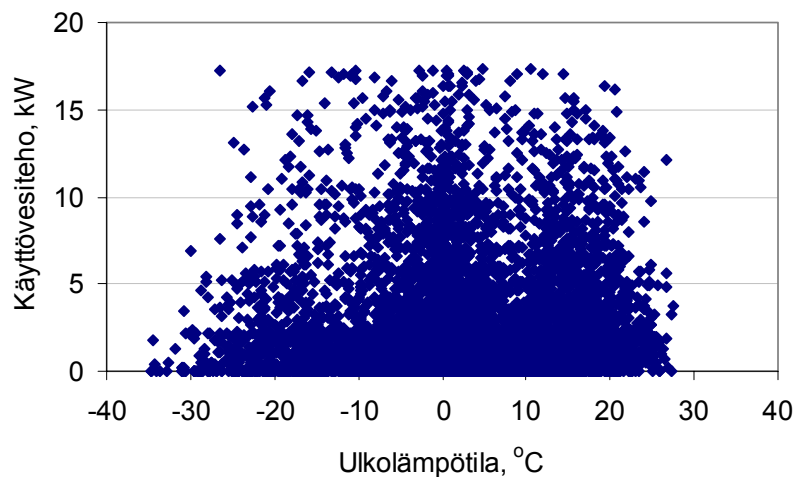
1.3.1 Tehon tarkastelu

Rakennuksen ja kaukolämpöverkoston toimintalaskelmiin tarvitaan käyttöveden kulutusprofiili tunti tunnilta koko vuoden ajalle. Kuvassa 36 on viikon mittainen jakso käyttöveden lämmitystehosta. Vuoden kattava kulutusprofiili perustuu neljän asunnon rivitalossa tehtyihin mittauksiin, mutta profiilia on tasoitettu käyttämällä Suomen Kaukolämpö ry:n suosituksen K15/1998 mukaista tuntitehoa 18 asunnolle (31 kW) ja ottamalla huomioon huippuenergiatehokkaan talon normaalia pienemmän veden kulutuksen ja suihkuveden lämmön talteenoton. Tuntin huipputehoksi muodostuu näin 17,3 kW, joka on 7,8-kertainen vuoden vedenkulutusta vastaavaan keskitettiin 2,22 kW verrattuna. Kuvassa 37 on vielä vuoden kaikkien tuntien käyttövesiteho eri ulkolämpötiloilla. Kuvasta näkyy, että yli 16 kW:n tuntitehoja esiintyy mallirakennuksessa vuoden aikana noin 40 kertaa.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 36. Laskelmissa käytetty käyttövesiteho kahdeksan päivän jaksolta.



Kuva 37. Ukolämpötilasta riippuva käyttövesiteho koko vuoden ajalta.

Käyttöveden tuntiteho on määrittelyperusteena myös kaukolämmön tilausteholle, jonka avulla määritellään asiakkaan liittymis- ja perusmaksut. Kaukolämpöverkostossa tuntia lyhyemmät tehohiiput tasoittuvat risteilyn takia, ja siten käyttövesitarpeen tehohiipuilla ei ole suurta merkitystä kaukolämmön tuotannon ja jakeluverkoston kannalta (Suomen Kaukolämpö ry, K15/1998).

Käyttöveden lämmönsiirrin on kuitenkin mitoitettava hetkellisen tehontarpeen perusteella, jotta lämmintä vettä saadaan aina riittävästi. Minuutin tehonmääritysjakson käyttövesiteho on VTT:n ja Ekonon tekemän selvityksen mukaan asuinkerrostaloissa tyypillisesti 4,3-kertainen tuntitehoon verrattuna (Nuorkivi et al. 1989). Todella hetkellinen, vielä lyhyemmän jakson teho on Koivuniemen diplomityön (2005) seurantamittausten mukaan vielä 15–20 % minuuttitehoa suurempi, joten hetkellinen keskitteho on noin viisinkertainen tuntitehoon nähden.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen

Lämmönsiirtimen mitoitustehoksi 18 asunnon talolle saadaan 175 kW, kun käytetään kaukolämmityksen mitoitusohjetta (Suomen Kaukolämpö ry, K1/2003/2007). Tämä vastaa käyttöveden mitoitusvirtaamaa 0,836 dm³/s. Huippuenergiatalon käyttöveden lämmönsiirrin on laskelmissa kuitenkin mitoitettu 34 % pienemmälle teholle (116 kW) suihkuveden lämmön talteenoton ansiosta. Mitoitusteho vaikuttaa käytössä saatavaan kaukolämpöveden jäähdytykseen. Kaukolämpövesi tulee jäähtymään hyvin lähelle kylmän veden lämpötilaa, koska mitoitustehot ovat suuria verrattuna tuntilaskelmien käyttötehoon. Näin ainakin lämmityskauden ulkopuolella, jolloin käyttövesisiirtimelle ei voi ohjata lämmityksen lämmönsiirtimeltä palaavaa kaukolämpövedtä ja kaukolämpöveden virtaama jää hyvin pieneksi (kuva 43).

1.3.2 Käyttöveden varaaja

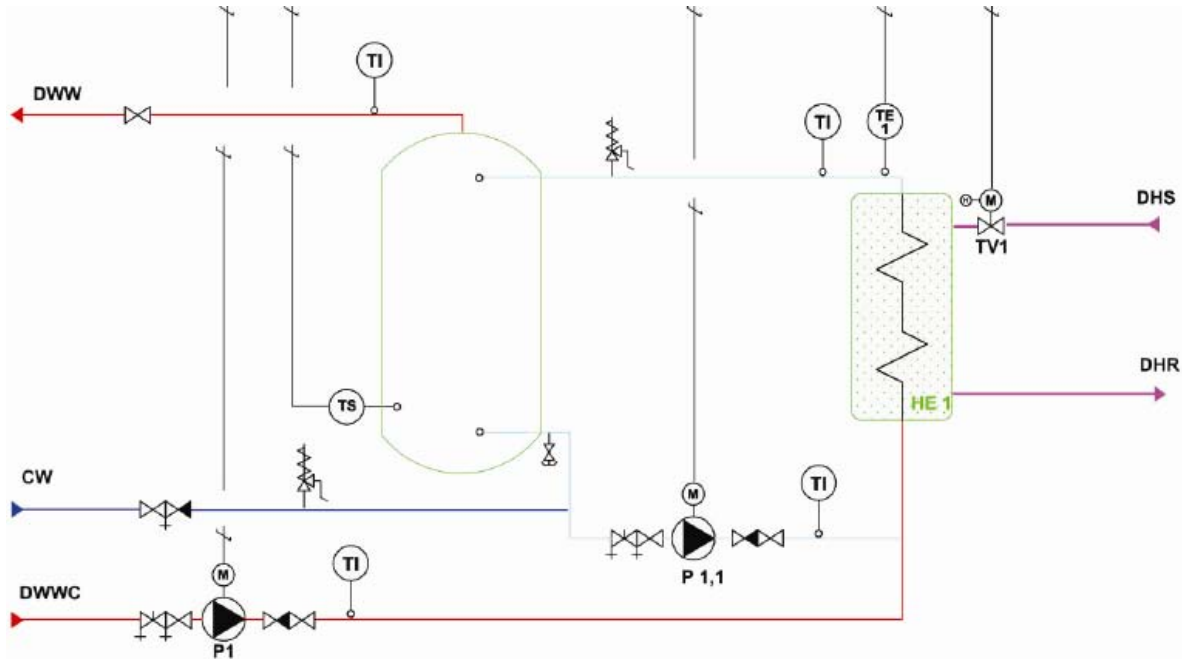
Lämpimän käyttöveden varaajalla voidaan leikata lämmityksen kulutushuippuja ja siten pienentää kaukolämmön tilaustehoa, joka määrittää kuluttajan liittymis- ja perusmaksut. Mikäli kaukolämmön toimittaja suostuu alentamaan maksuja varaajan perusteella, voidaan säästö käyttää varaajan vaatimiin investointeihin. Varaajakytkennän tarvitsemasta pienemmästä kaukolämpövirtauksesta on se hyöty, että uusia kaukolämmön jakeluverkostoja rakennettaessa voidaan käyttää pienempiä kaukolämpökanavia. Varaajien käyttö on ollut Suomessa vähäistä ilmeisesti lämpimän käyttöveden varastointiin liittyvän legionellariskin takia.

Tunnin sisällä esiintyvät tehopiikit voidaan vaimentaa pienellä käyttövesivaraajalla. Tuntitason laskelmissa sen tarve ei tule esiin, mutta pitemmän ajan varaajassa on otettava huomioon lyhyen jakson energiantarve kasvattamalla varaajan tilavuutta. Varaaja mitoitetaan samalla periaatteella kuin lähteessä Ahonen et al. (1992, s. 44) eli siten, että varaaja kattaa yksittäisen tehonmääritysjakson tehontarpeen tuntitehon 17,3 kW ylittävältä osalta. Taulukon 5 mukaisilla tehonmääritysjaksoilla 15 minuutin jakso vaatii suurimman varaajan, joten tuntitason varaaja on syytä mitoittaa sen mukaisesti.

Taulukko 5. Tuntia lyhyemmän jakson huipputehoon tarvittava käyttövesivaraajan koko, kun käyttöveden lämmönsiirrin on mitoitettu 17,3 kW:n tuntitehon mukaan. Eri tehonmääritysjaksojen tehot on otettu VTT:n ja Ekonon 1989 tekemästä selvityksestä. Varaajan tehollinen lämpötilaero on 40 °C. Mitoitus vesimassalle: $(\text{Teho}-17,3 \text{ kW}) \cdot \text{tehonmääritysjakso(s)} / \text{cp}/\text{deltaT}$.

Tehonmääritysjakso, minuuttia	Teho/tuntiteho	Teho, kW	Varaajan tilavuus, litraa
1	4,3	73,9	20
4	2,9	49,7	46
5	2,6	45,8	51
15	1,9	32,4	81
60	1,0	17,3	0

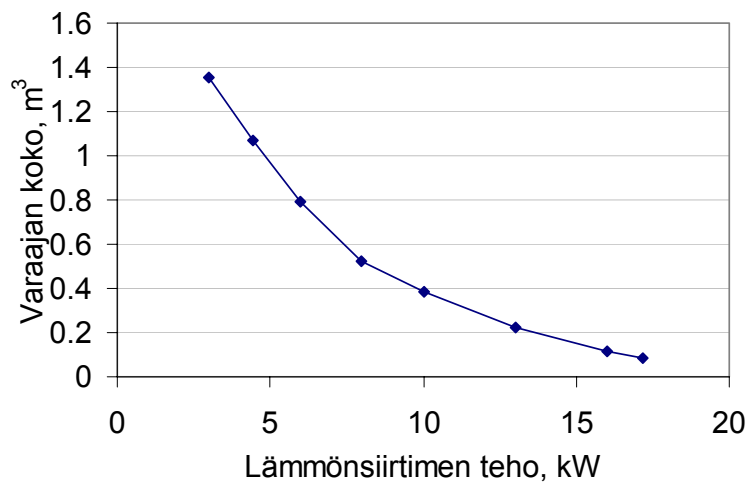
1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 38. Käyttövesivaraajan kytkentä (Guidelines for District Heating Substations, 2008).

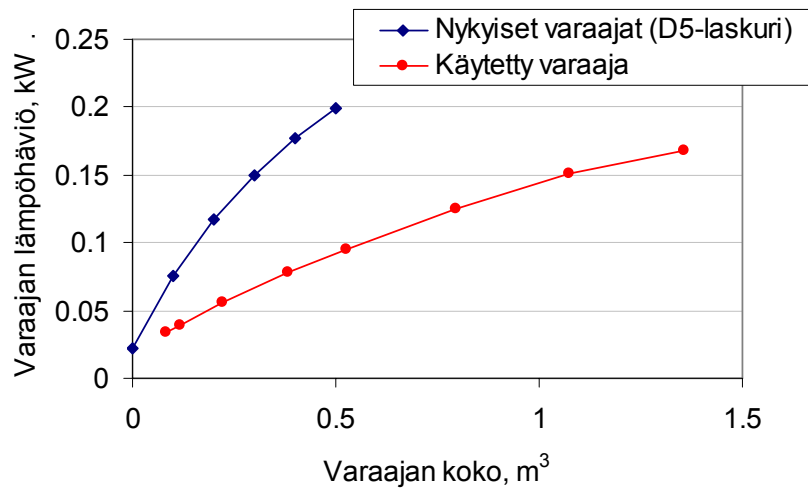
Kuvassa 38 esitetään eräs mahdollinen varaajan kytkentä. Kylmävesijohdossa on erillinen pumppu varaston veden kierrättämiseen lataustilanteessa.

Tuntia pidemmän ajan varastolla voidaan käyttöveden lämmönsiirtimen teho rajoittaa tuntitehoa pienemmäksi. Varaajan koko riippuu lämmönsiirtimen tehosta kuvan 39 mukaisesti. Varaajan lämpöhäviöt on laskettu 80 mm:n eristeellä, jonka lämmönjohtavuus on 0,04 W/mK. Lämpöhäviö on noin puolet nykyisin käytössä olevien varaajien lämpöhäviöstä (kuva 40).



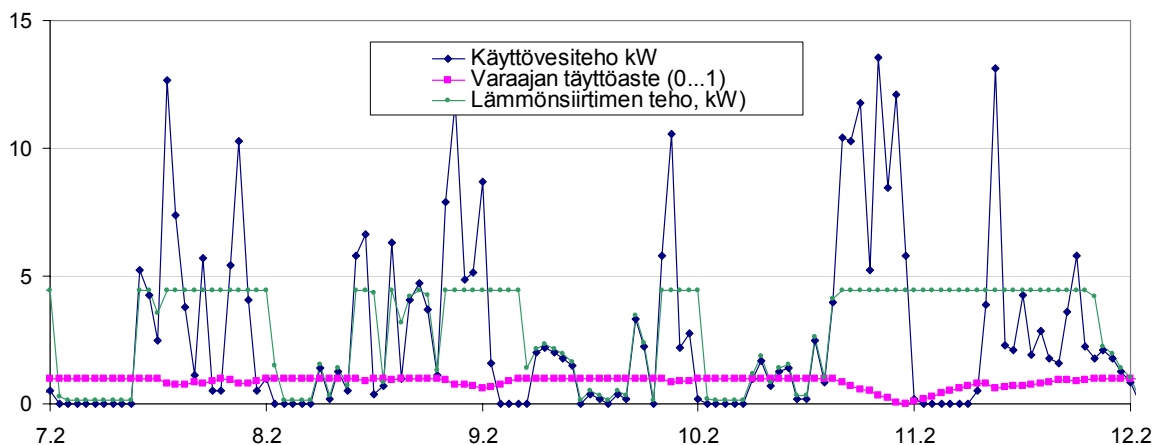
Kuva 39. Käyttövesivaraajan koko lämmönsiirtimen eri tehoilla esimerkkitalossa.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



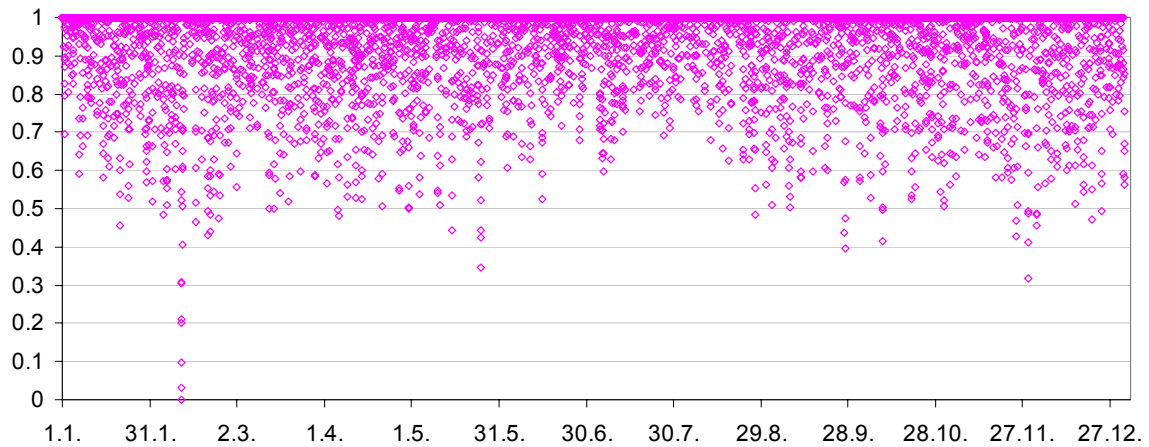
Kuva 40. Varaajan lämpöhäviöt 80 mm:n eristepaksuudella verrattuna nykyisiin varaajiin.

Kuvassa 41 esitetään 4,4 kW lämmönsiirrinteholle mitoitettun varaajan toiminta esimerkkitilanteessa tuntitasolla. Varaajaa tarvitaan silloin, kun käyttövesiteho ylittää lämmönsiirtimen 4,4 kW:n tehon. Normaalisti suuret tehontarpeet ovat niin lyhytaikaisia, että varaaja ei merkittävästi purkaannu, eli varaajan täyttöaste pysyy lähellä ykköstä. Poikkeuksena on 10.2. illalla esiintyvä pitkäaikainen tehontarve, jolloin varasto lähes tyhjenee mutta ehtii kuitenkin latautua ennen seuraavan aamun kulutusta. Varaaja mitoitetaan kyseisen päivän kulutusprofiilin mukaan. Varaajan lämpöhäviöiden takia lämmönsiirtimen teho on hieman käyttövesitehoa suurempi. Kuvassa 42 näkyy varaajan täyttöaste koko vuoden ajalta.



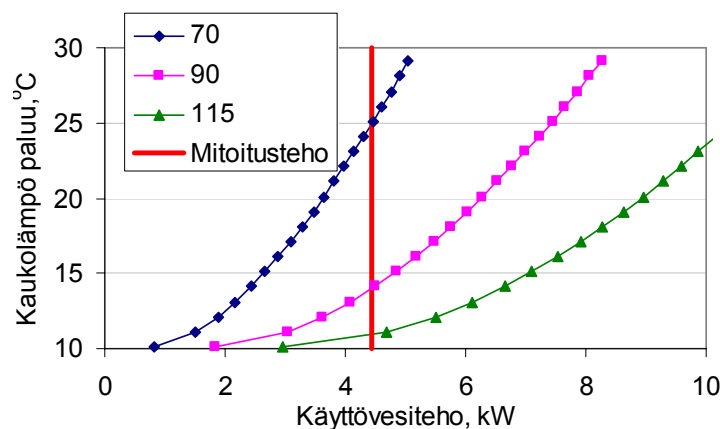
Kuva 41. Yhden kuutiometrin varaajan toiminta tuntitasolla, kun lämmönsiirtimen tehoa rajoitetaan enintään 4,4 kW:n suuriseksi. Varaajan täyttöaste kuvaa varastossa olevan veden energiasisältöä verrattuna täyteen varaajaan.

1. Kaukolämpöratkaisun mitoitusperusteiden kehittäminen



Kuva 42. Varaajan täyttöaste vuoden jokaisena tuntina. Mitoittava päivä on 10.2., jolloin varaaja menee tyhjäksi.

Kuvassa 41 on oletettu, että käyttöveden lämmönsiirtimen tehoa leikataan enintään mitoitusasteen 4,4 kW suuruiseksi. Tämä voi tapahtua esimerkiksi toisiopuolen vesivirtaa rajoittamalla. Varaajatapauksessa lämmönsiirtimen mitoituslämpötilojen pitää mahdollisesti olla erilaiset kuin normaalisti (KL-vesi tulo / KL-vesi paluu / kylmä käyttövesi / lämmin käyttövesi = 70/25/5/58), koska varaajaa ladattaessa sen alaosasta saadaan lämmönsiirtimelle käytännössä lämpimämpää vettä kuin kylmä vesi (10 °C). Idealisessa varastosäiliössä (täydellinen lämpötilakerrostuma tai muu ratkaisu, jossa kylmä ja lämmin vesi eivät sekoitu) lämmönsiirtimelle saataisiin 10-asteista vettä. Kuvasta 43 näkyy, että ideaalisella varastosäiliöllä (varastosta lämmönsiirtimelle palaavan veden lämpötila 10 °C) ja lämmönsiirtimen 4,4 kW:n mitoitusasteella paluuv veden lämpötila on 10–25 °C riippuen menoveden lämpötilasta. Näin ainakin lämmityskauden ulkopuolella, kun käyttövesisiirtimelle ei voi ohjata lämmönsiirtimeltä palaavaa kaukolämpövedtä ja kaukolämpöveden virtaama jää hyvin pieneksi.



Kuva 43. Kaukolämmön paluuv veden lämpötila käyttövesisiirtimeltä siirtimen eri tehoilla. Luvut on laskettu kolmella eri kaukolämpöveden menolämpötilalla lämmönsiirtimelle.

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky

2.1 Energiansäästön kannattavuus

Projektissa asetettiin tavoitteeksi 75 % nykyistä pienempi kaukolämmön energiankulutus. Tavoite on hyvin haastava, ja siihen pääsemiseksi vaaditaan rakenteiden ja ilmanvaihdon energiankulutuksen pienentämisen lisäksi myös käyttöveden energiankulutukseen puuttumista. Näin suuren energiansäästön tavoittelu ei ole välttämättä taloudellisesti kannattavaa tai ainakin vaatii hyvin pitkän aikavälin kustannustarkastelun. Energiankulutuksen kustannustarkasteluissa on hyödynnetty Inducon-projektissa (Sarja et al. 2003) kerättyjä rakentamisen kustannustietoja ja elinkaaren kustannuslaskelmia, joita seuraavassa esitellään.

2.1.1 Inducon-projektin kustannuslaskelmat

Inducon-projektissa tarkastelun kohteena olivat minimienergiatalo (tilojen lämmitysenergian kulutus 25 kWh asuntoneliometriä kohti vuodessa), matalaenergiatalo (75 kWh/asuin-m²/a) ja vuoden 2003 normitalo (100 kWh/asuin-m²/a). Näiden kustannuksia verrattiin vuoden 2000 normitaloon (150 kWh/asuin-m²/a). Taulukkoon 6 on koottu näiden rakennuskonseptien ominaisuuksia ja kustannustietoja.

Talotekniikan osalta taulukosta 6 näkyy, että siirryttäessä normitalo 2003:sta matalaenergiataloon patteriverkoston puuttumisesta syntyvät säästöt (16,7 €/brm²) kattavat lähes kokonaan huoneistokohtaiseen ilmanvaihtolämmitykseen siirtymisen (18 €/brm²) ja samanaikaisen lämmön talteenoton hyötysuhteen parantamisen.

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky

Taulukko 6. Inducon-projektissa tarkastellut rakenne- ja talotekniikkakonseptit (Sarja et al. 2003).

	Normitalo 2000	Normitalo 2003	Matalaenergiatalo	Minimienergiatalo
Tilojen lämmitysenergiankulutus, %	100	79	53	40
Alapohjat				
U-arvo, W/m ² K	0,22	0,16	0,16	0,10
Ratkaisu	160 mm EPS	260 mm EPS	260 mm EPS	250 mm SPU
Kustannusero, €/seinä m ²	0	10	10	27
Ulkoseinät				
U-arvo, W/m ² K	0,28	0,25	0,20	0,15
Ratkaisu	145 mm mineraalivilla	165 mm mineraalivilla	220 mm mineraalivilla	300 mm mineraalivilla
Kustannusero, €/seinä m ²	0	2,5	8,5	17
Yläpohjat				
U-arvo, W/m ² K	0,22	0,16	0,08	0,08
Ratkaisu	220 mm puhallusvilla	300 mm puhallusvilla	600 mm puhallusvilla	600 mm puhallusvilla
Kustannusero, €/seinä m ²	0	2,5	10	10
Ikkunat				
U-arvo, W/m ² K	2,1	1,4	1,0	0,6
Ratkaisu	MSE	MSE	MSE	4-lasinen selektiivi
Kustannusero, €/seinä m ²	0	14	35	42
Ulko-ovet				
U-arvo, W/m ² K	0,7	0,5	0,4	0,2
Kustannusero, €/seinä m ²	0	14	18	25
Talotekniikka	Patterilämmitys, yhteiskanavoitu koneellinen poisto-ilmanvaihto	Patterilämmitys, yhteiskanavoitu tulo- ja poisto-ilmanvaihto, lämmöntalteenotto 25 %:n hyötysuhteella.	Huoneistokohtainen ilmanvaihtolämmitys, lämmöntalteenotto 40 %:n hyötysuhteella.	Huoneistokohtainen ilmanvaihtolämmitys, lämmöntalteenotto 60 %:n hyötysuhteella.
Kustannuserot €/brm ²				
Ilmanvaihto-osat	0	+20	+38	+40
Putkiosat	0	+1,7	-15	-15
Sähköosat	0	+1,2	+1,3	+1,3

Kun tarkastellaan rakennuksen elinkaarta esimerkiksi 50 vuoden ajalta, tulee ottaa huomioon alkuperäisten hankintakustannusten lisäksi uushankinnat, korkokanta, huoltokustannukset sekä energiakustannukset. Taulukossa 7 esitetään nykyarvot eri Inducon-konseptien kustannuseroille vuoden 2000 normitaloon verrattuna. Lisäinvestointi vertailutaloon vähemmän energiaa kuluttavaan taloon kannattaa, jos kustannusten yhteenlaskettu nykyarvoero on negatiivinen. Nähdään, että talotekniikan kustannusten nykyarvot ovat käytännössä samoja eri ratkaisuissa. Rakennusteknisten hankintojen kustannukset kasvavat selvästi siirryttäessä parempiin U-arvoihin. Kuitenkin 50 vuoden jaksolla energiakustannukset ovat hallitsevia, ja siksi minimienergiakonsepti näyttää edullisimmalta.

Taulukko 7. Inducon-projektin normitalo 2003:n, matalaenergiatalon ja minimienergiatalon hankinta- ja elinkaarikustannusten nykyarvoerot asuntoneliometriä kohti (€/asuin-m²) 50 vuoden suunnitteluajanjaksolla normitalo 2000:een verrattuna. Reaalikorkokanta 2 % (Sarja et al. 2003).

Kustannuslaji	Nykyarvoerot, €/asuin-m ²		
	Normitalo 2003	Matalaenergiatalo	Minimienergiatalo
Rakennustekniset hankinnat	+14	+27	+40
Talotekniset hankinnat	+23	+23	+25
Uushankinnat	+29	+30	+30
Huolto	+6	+4	+4
Energia	-55	-190	-250
Rahoitus	+20	+23	+28
Tilapäismajoitus		-7	-7
Yhteensä	+37	-90	-130

2.1.2 -75 % -talon energiansäästön kannattavuus

Tämän projektin 75 % kaukolämpöenergiaa säästävissä talossa rakenteiden U-arvot (taulukko 2) vastaavat suunnilleen Inducon-minimienergiataloa (taulukko 6), joten rakenteiden osalta kustannusten arvioinnissa on käytetty Inducon-projektin kustannustietoja. Kustannukset on tässä kuitenkin päivitetty vuoden 2002 tasosta vuoden 2008 tasoon käyttäen rakennuskustannusindeksin 26 %:n nousua.

Energiakustannusten laskennassa käytetyt kaukolämmön liittymis-, energia- ja perusmaksut koskevat Espoon hintoja (Fortum 21.10.2009), koska liittymis- ja perusmaksuja koko maan keskiarvona ei ollut saatavissa liittymistehon funktiona. Espoon energiamaksu (42,7 €/MWh) on kuitenkin lähellä koko maan painotettua keskiarvoa (44,2 €/MWh, Energiateollisuus ry. 10.9.2009). Energiakustannusten säästöksi normitaloon verrattuna muodostuu näin 7 753 euroa vuodessa (taulukko 8).

Taulukko 8. Kaukolämmön kustannusten säästö normitaloon verrattuna.

	Normitalo 2008	-75 % -talo	Ero
Energiankulutus, MWh/vuosi	199	50	149
Sopimusteho, kW	105	59	46
Sopimustehoon liittyvä liittymismaksu, €	14 885	9 250	5 635
Perusmaksu, €/vuosi	3 422	2 033	1 389
Energiamaksu, €/vuosi	8 484	2 120	6 364
Vuosimaksu yhteensä, €/vuosi	11 906	4 153	7 753

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky

Koko 50 vuoden tarkastelujaksolle energiakustannusten nykyarvo (P) on laskettu vuosittaisista samansuuruisista energiakustannuksista (A) seuraavalla annuiteettikaavalla:

$$P = A \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \quad (1)$$

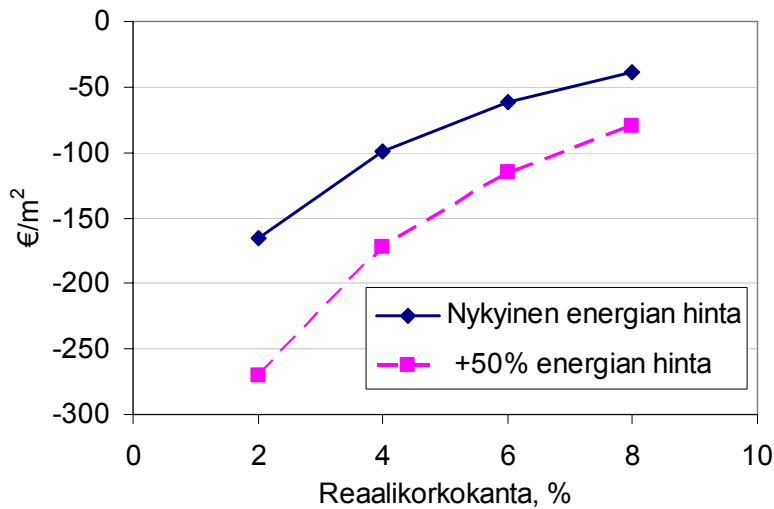
missä i on korkokanta (0,02) ja n aika (50 vuotta). Suihkuveden lämmön talteenoton uushankinta on diskontattu nykyhetken korkoa korolle -kaavalla.

Taulukossa 9 on kustannusten nykyarvoerolaskelma –75 % -talolle, kun lämmönjakojärjestelmänä on ilmanvaihtolämmitys. Negatiivinen nykyarvoero osoittaa, että lisäinvestointi vähemmän energiaa kuluttavaan rakennukseen on kannattavaa. Energiakustannus on määräävä tekijä 50 vuoden elinkaarikustannuksissa, aivan samoin kuin Inducon-projektissa (taulukko 7).

Taulukko 9. –75 % -talon hankinta- ja elinkaarikustannusten nykyarvoerot asuntoneliometriä kohti 50 vuoden suunnittelujaksolla vuoden 2008 normitaloon verrattuna, kun käytetään ilmanvaihtolämmitystä. Reaalikorkokanta 2 %.

Kustannuslaji	Yksikkö m ² (tai kpl)	Yksikkö- kust.	Hankinta	Nykyarvo
		€/yksikkö	€	€
Ulkoseinä	679	18	12 390	12 390
Yläpohja	383	9	3 620	3 620
Alapohja	383	21	8 205	8 205
Ikkunat	260	35	9 163	9 163
Ilmanvaihto-osat (€/brm²)	1 530	25	38 531	38 531
Putkiosat (€/brm²)	1 530	-21	-32 173	-32 173
Suihkuveden LTO	18	500	9 000	9 000
Suihkuveden LTO uushankinta 25 v.	18	500	9 000	5 486
Kaukolämpömaksun ero, €/vuosi			-7 753	
Kaukolämpömaksun ero, €/ 50 vuotta				-243 631
Nykyarvoero yhteensä, €				-189 409
Nykyarvoero yhteensä, €/asuin-m²				-165

Kuvassa 44 esitetään elinkaarikustannusten herkkyytarkastelu laskentakorkokannan sekä energian hinnan suhteen. Nämä molemmat vaikuttavat voimakkaasti investoinnin kannattavuuteen. Korkeampi energian hinta lisää luonnollisesti energian säästön kannattavuutta. Korkea korkokanta heikentää energiansäästön kannattavuutta, koska tulevaisuudessa maksuun tulevien energiakustannusten painoarvo heikkenee investointeihin nähden.



Kuva 44. Laskentakoron ja energian hinnan vaikutus elinkaarikustannuksiin. Kuvassa on –75 % -talon hankinta- ja elinkaarikustannusten nykyarvojen ero asuntoneliömetriä kohti 50 vuoden suunnittelujaksolla vuoden 2008 normitaloon verrattuna.

Yksityishenkilön ollessa omistajana ja kansantalouden laskelmissa elinkaarikustannusten korkokantana (= nimelliskorkokannan ja inflaation erotus) käytetään yleensä reaalikorkokantaa eli yleistä pitkäaikaisen pankkilainan korkokantaa vähennettynä inflaatiolla. Reaalikorkokanta vaihtelee yleensä 2–3%:iin. Pitkäjänteiset sijoittajaorganisaatiot ja yksityiset sijoittajat käyttävät sijoitustensa reaalituottovaatimuksen mukaista reaalikorkokantaa, joka on yleensä noin 3–5 %. Yritykset käyttävät omien toimi- ja tuotantotilojensa investoinneille tavallisesti sidotun pääoman tuotolle määriteltyä korkotuottovaatimusta, mikä on usein huomattavastikin edellä esitetyjä arvoja suurempi ja vaihtelee yrityksittäin (Sarja et al. 2003).

2.2 Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailu

Kaukolämmön hintakilpailukykyä huippuenergiatehokkaassa talossa verrataan seuraavassa muihin lämmitysvaihtoehtoihin laskemalla elinkaarikustannusten nykyarvo. Oletetaan Motivan pientalolaskurin tapaan, että kaikkien lämmitysjärjestelmien käyttöikä on 30 vuotta ja ettei järjestelmillä ole sen jälkeen jäännösarvoa (Motiva Oy 2009). Tarkemmassa analyysissä esimerkiksi kaukolämmön liittymismaksulle voisi laskea jäännösarvon: esimerkiksi 2 %:n korkokannalla nykyhetken diskontattu 100 %:n jäännösarvo voisi alentaa liittymisinvestoinnin nykyarvoa 45 %. Itse rakennuksen elinkaari on selvästi pidempi kuin 30 vuotta, mutta sillä ei ole vaikutusta lämmitysjärjestelmien vertailuun.

Kaukolämpöä verrataan sähkölämmitykseen ja porakaivolämpöpumppuun. Eri järjestelmävaihtoehdot ja kustannusvertailun lähtötiedot esitetään taulukossa 10. Lämmönjakotapoina ovat huonekohtaiset lämmityspatterit sekä ilmanvaihtolämmitys, jossa on pelkästään asuntokohtainen lämmityksen säätö. Lämpöpumpulle on tarkasteltu täysehomoitusta sekä osatehomoitusta,

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky

jolloin lämpöpumpulla lämmitetään vain lämmin käyttövesi kiertojohtoineen. Myös kaukolämmölle on laskettu vaihtoehto, jossa kaukolämpöä käytetään vastaavalla tavalla vain käyttöveden ja sen kiertojohtojen lämmitykseen.

Ilmanvaihtojärjestelmä on kaikissa lämmitysvaihtoehtoissa asuntokohtainen, koska -75 % -taloon valittiin perusvaihtoehtoksi asuntokohtainen ilmanvaihto ja ilmanvaihtolämmitys. Keskitetyn ilmanvaihdon ja eri lämmitysjärjestelmien yhdistelmiä ei käsitellä. Näistä voi kuitenkin löytyä kustannuksiltaan ja käyttöominaisuuksiltaan varteenotettavia vaihtoehtoja nyt esillä oleville järjestelmille.

Sähkön energiamaksuna on käytetty 1.8.2009 voimassa ollutta koko maan painotettua energiamaksua sähkölämmitykselle pientalolle. Kaukolämmön energia-, liittymis- ja perusmaksut ovat samat kuin edellä kohdassa 2.1.2.

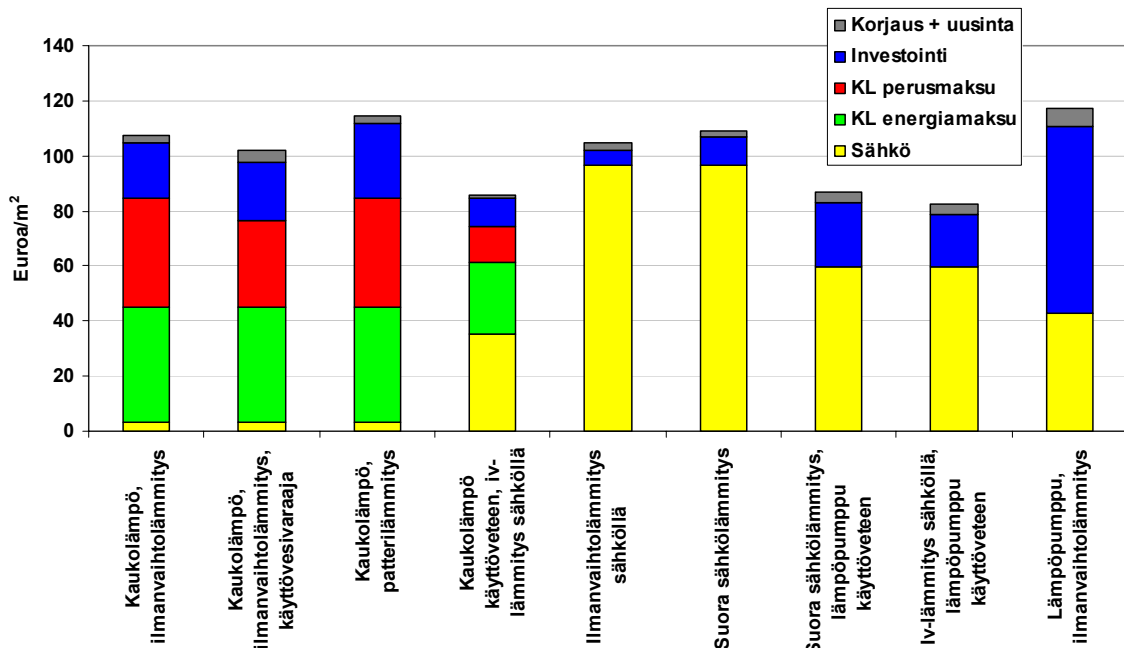
Lämpöpumpun hinta on saatu kahden toimittajan antamien tietojen keskiarvona. Se sisältää porakaivon sekä 1 200 litran varaajan asennuksineen. Ilmanvaihtolämmityksen yhteydessä pattereiden hinta tarkoittaa siitä kertyvää lisähintaa, kun sähköiset ilmanvaihtokoneen patterit korvataan sähköisillä tai nestekiertoisilla lämmityspattereilla säätölaitteineen. Patterilämmityksen kustannusten perusteena on käytetty Inducon-projektin kustannuksia (taulukko 6) asuntoneliömetriä kohti. Korjaus- ja huoltokustannukset on arvioitu Motivan pientalolaskurin perusteella soveltamalla niitä kerrostaloon. Lämpöpumpun lämpökertoimena on käytetty rakentamismääräyskokoelma D5/2007:n mukaista arvoa 2,5.

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky

Taulukko 10. Lämmityksen kustannusvertailun lähtötiedot –75 % -energiatehokkuustasolla.

	Kaukolämpö, ilmanvaihtolämmitys	Kaukolämpö, iv-lämmitys, käyttövesivaraaja	Kaukolämpö, patterilämmitys	Kaukolämpö käyttöveteen, iv-lämmitys sähköllä	Ilmanvaihtolämmitys sähköllä	Suora sähkölämmitys	Suora sähkölämmitys, lämpöpumppu käyttöveteen	Iv-lämmitys sähköllä, lämpöpumppu käyttöveteen	Lämpöpumppu, ilmanvaihtolämmitys
Käyttövesienergia, MWh/vuosi	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Lämmitysenergia, MWh/vuosi	19	19	19	18	18	18	18	18	19
Kaukolämpöenergia, MWh/vuosi	50	50	50	31					
Sähköenergia, MWh/vuosi	2	2	2	18	49	49	30	30	22
Perusmaksu, €/vuosi	2 033	1 615	2 033	683					
Kaukol. energiamaksu, €/MWh	42,7	42,7	42,7	42,7					
Sähkön energiamaksu, €/MWh	101	101	101	101	101	101	101	101	101
Energiakustannukset, €/vuosi	4 342	3 924	4 342	3 827	4 954	4 954	3 073	3 073	2 196
Kaukolämmön liittymismaksu, €	9 250	7 326	9 250	3 210					
Lämmönjakokeskus asennettuna, €	6 000	6 000	6 000	5 000					
Lämpöpumppu , sis. varaajan, €							17 950	17 950	70 000
Käyttövesivaraaja asennettuna, €		2 919			2 919	2 919			
Ilmanvaihtokoneen patterit, €	4 500	4 500		3 600	3 600			3 600	4 500
Patteriverkosto ja asennus, €	3 566	3 566	16 063			8 765	8 765		3 566
Investointi yhteensä, €	23 316	24 311	31 313	11 810	6 519	11 684	26 715	21 550	78 066
Käyttöveden säätöventtiilin uusinta, €	479	479	479	479					479
Patteriverkoston pumpun uusinta, €	438	438	438						438
Linjasäätö, term.venttiilien uusinta, €	2 899	2 899	2 899	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	2 899
Lämminvesivaraajan uusiminen, €		2 700			2 700	2 700	2 700	2 700	2 700
Kompressorin uusiminen, €							2 139	2 139	3 404
Korjaus- ja uusinta yhteensä, €	3 816	6 516	3 816	1 479	3 700	3 700	5 839	5 839	9 920

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky



Kuva 45. Eri lämmitysjärjestelmien kustannusten nykyarvo 30 vuoden laskentajaksolta ja kustannusrakenne asuntoneliometriä kohti –75 % -talossa. Korkokanta 2 %.

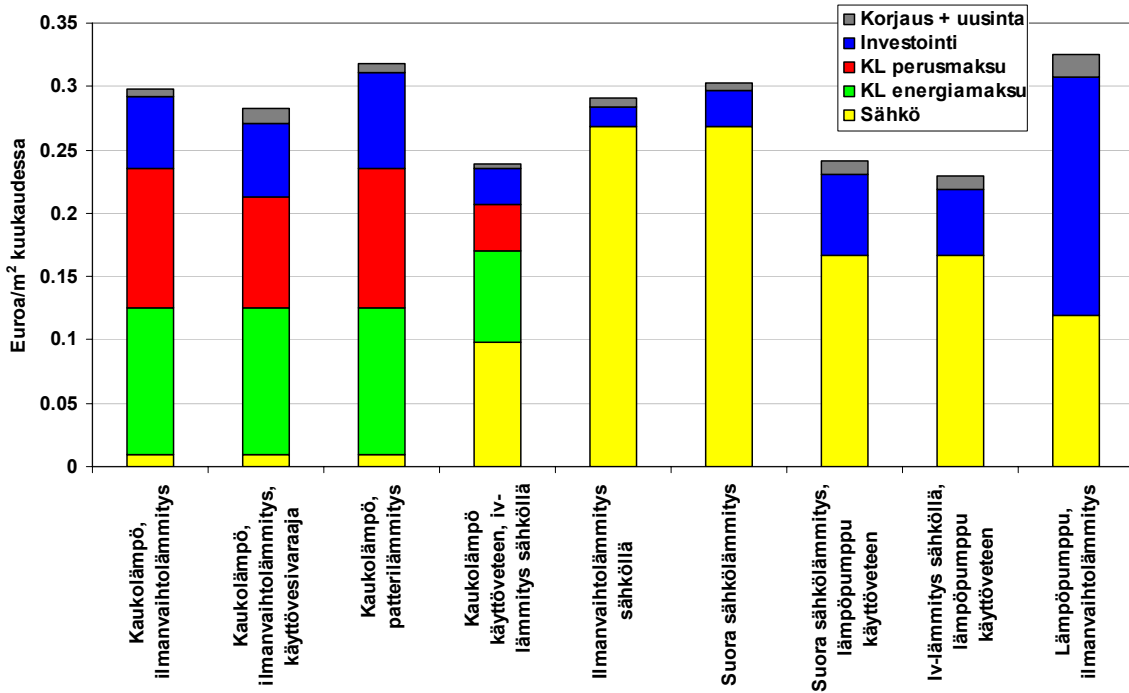
Kuvassa 45 on eri lämmitysjärjestelmien kustannusten nykyarvot asuntoneliometriä kohti koko 30 vuoden jaksolta ja kuvassa 46 jaettuna 30 vuoden kuukausimäärällä. Kustannukset sisältävät investoinnin, korjaukset sekä lämmityksestä ja lämpimän käyttöveden tuottamisesta syntyvät energiakustannukset.

Kuvasta 46 nähdään, että huippuenergiatehokkaan talon lämmityskustannukset nykyrahassa ovat 0,23–0,33 euroa neliometriä kohti kuukaudessa. Tämä on 16–22 euroa 67,5 neliometrin esimerkiasunnolle laskettuna. Kustannusten ero euroina on siis varsin pieni, ja järjestelmävaiennassa onkin syytä ottaa huomioon kustannusten lisäksi myös muita tekijöitä. Näitä ovat esimerkiksi eri lämmitysjärjestelmillä saatavat lämpöolot (terminen viihtyvyys), käytettävyys (mahdollisuus säätää lämpötilaa huonekohtaisesti), luotettavuus, lämmityslaitteiden ulkonäkö, huoneen sisutettavuus.

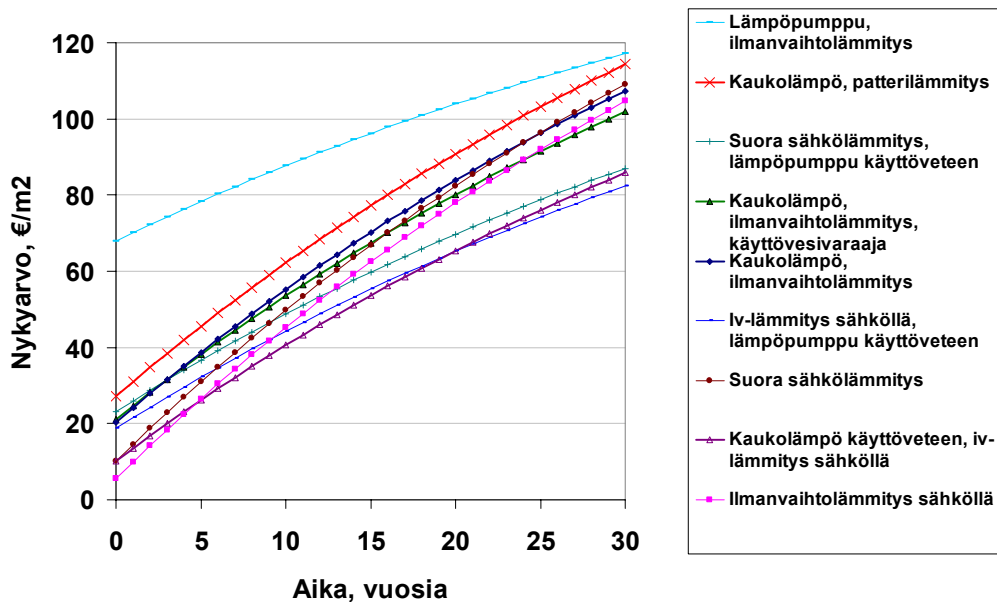
Pienimmät kustannukset 30 vuoden jaksolla ovat järjestelmillä, joissa lämmin käyttövesi tuotetaan lämpöpumpulla tai kaukolämmöllä ja vähäinen huoneiden lämmitys hoidetaan sähköllä. Kalleimpia ovat huonekohtaiset lämmitykset kaukolämmöllä ja sähköllä. Myös täydelle lämmitysteholle mitoitettu lämpöpumppu tulee kalliiksi, koska suuri investointi on täydessä käytössä vain lyhyen aikaa.

Kuvassa 47 esitetään, miten kustannusten nykyarvo kertyy vuosi vuodelta 30 vuoden aikana. Investointikustannukset näkyvät kuvassa vuoden 0 kohdalta.

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky



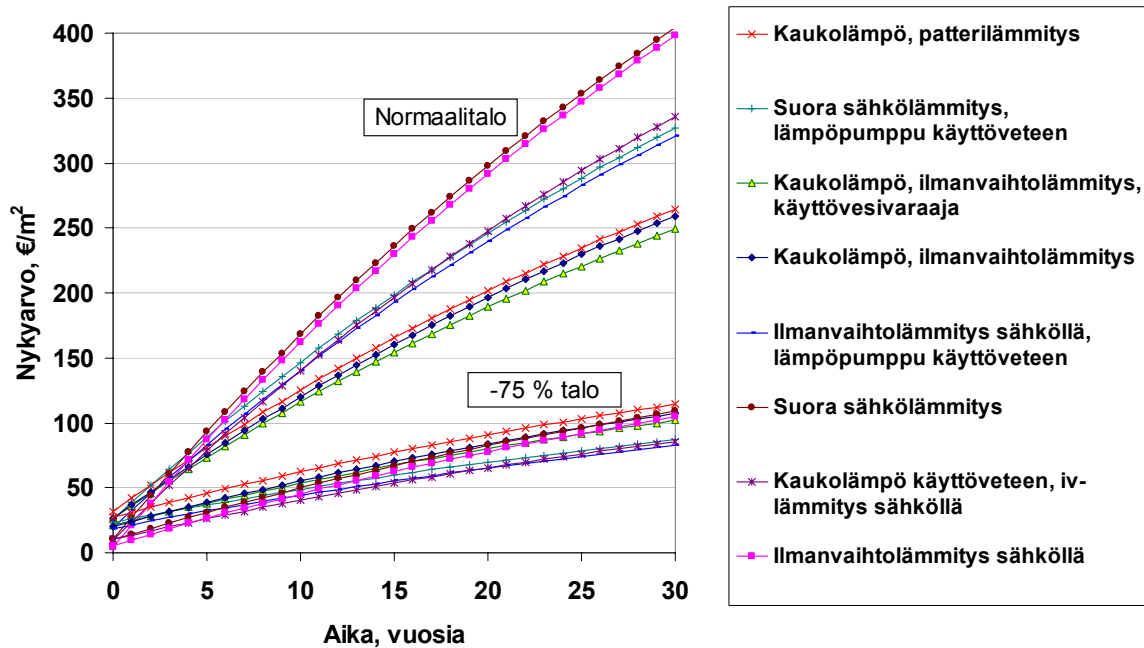
Kuva 46. Eri lämmitysjärjestelmien kustannusten nykyarvo 30 vuoden laskentajaksolta ja kustannusrakenne asuntoneliometriä kohti kuukaudessa –75 % -talossa. Korkokanta 2 %.



Kuva 47. Eri lämmitysjärjestelmien elinkaarikustannusten kertyminen 30 vuoden aikana –75 % -talossa. Korkokanta 2 %.

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky

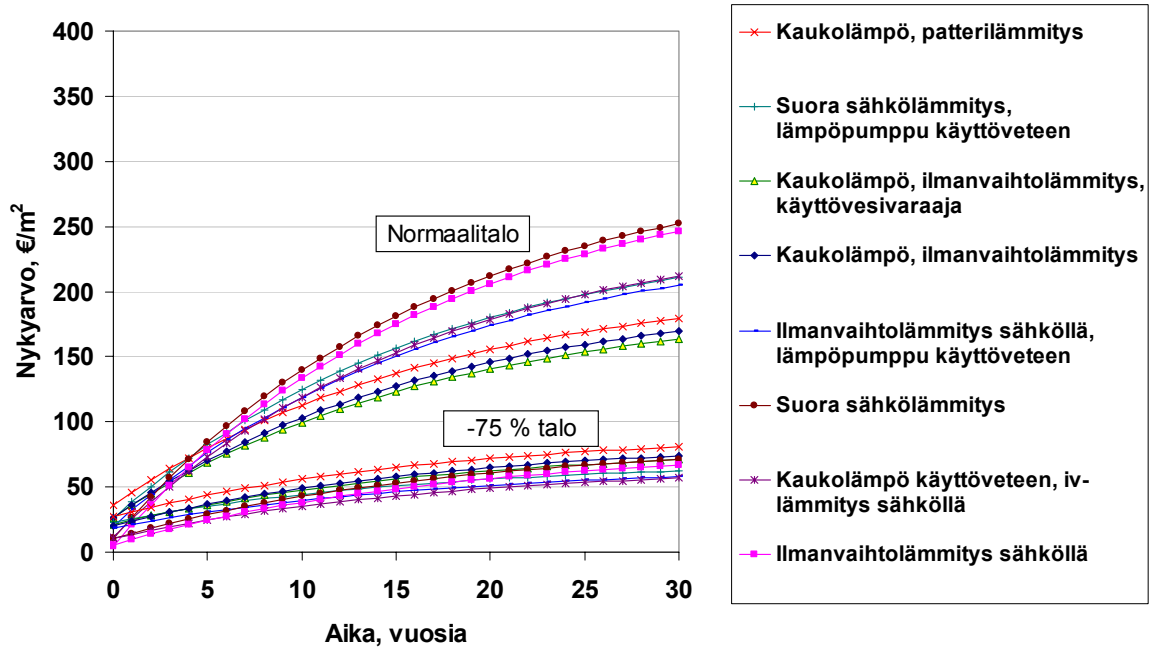
Kuvassa 48 kustannuksia on verrattu nykymääräysten mukaisen normaalitalon vastaaviin lämmityskustannuksiin. Normaalitalossa kaukolämpö on 30 vuoden jaksolla edullisin, mutta se menettää täysin asemansa huippuenergiatehokkaassa talossa, jossa investointikustannusten painoarvo on suhteellisesti suurempi.



Kuva 48. Normaalitalon ja –75 % -talon lämmitysjärjestelmän kustannusten nykyarvon kertyminen 30 vuoden aikana. Korkokanta 2 %.

Korkokannan kasvattaminen kuuteen prosenttiin pienentää merkittävästi kustannusten nykyarvoa, (ks. kuva 49). Tämä selittyy sillä, että tulevaisuudessa maksuun tulevien energiakustannusten hoitamiseen tarvitsee nyt tallettaa pienempi nykypääoma paremman korkotuoton vuoksi.

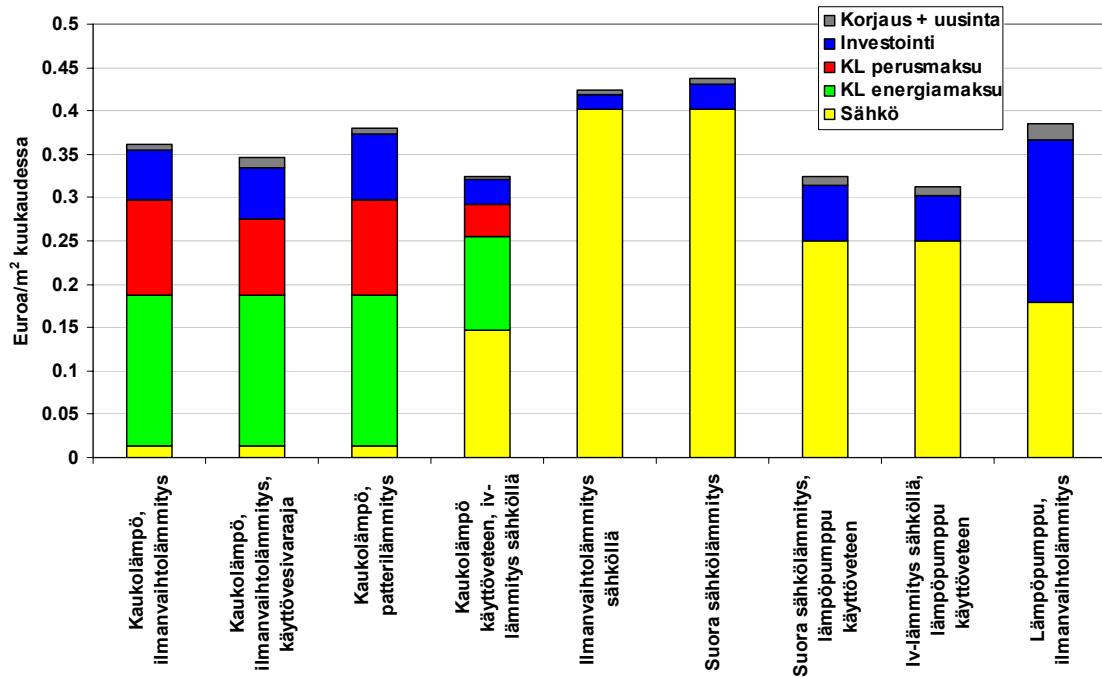
2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky



Kuva 49. Normaalitalon ja -75 % -talon lämmitysjärjestelmän kustannusten nykyarvon kertyminen 30 vuoden aikana. Korkokanta 6 %.

Jos energian reaalihintaa nousee 30 vuoden jaksolla keskimäärin 50 %, tulee pelkän sähkölämmityksen vaihtoehtoista kalleimpia (kuva 50). Tämä johtuu siitä, että suoran sähkölämmityksen kustannusrakenne on eniten sidoksissa energian hintaan. Tässä on oletettu, että kaukolämmön perusmaksu ei muutu energian hinnan noustessa.

2. Kaukolämpöratkaisun kilpailukyky



Kuva 50. Eri lämmitysjärjestelmien kustannusten nykyarvo 30 vuoden laskentajaksolta –75 % -talossa asuntoneliometriä kohti kuukaudessa tapauksessa, jossa kaukolämpö- ja sähköenergian hinta nousee keskimäärin 50 %. Korkokanta 2 %. Pylväissä näkyy myös kustannusrakenne. Vertaa kuvaan 46, jossa energian hinta ei nouse.

3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon

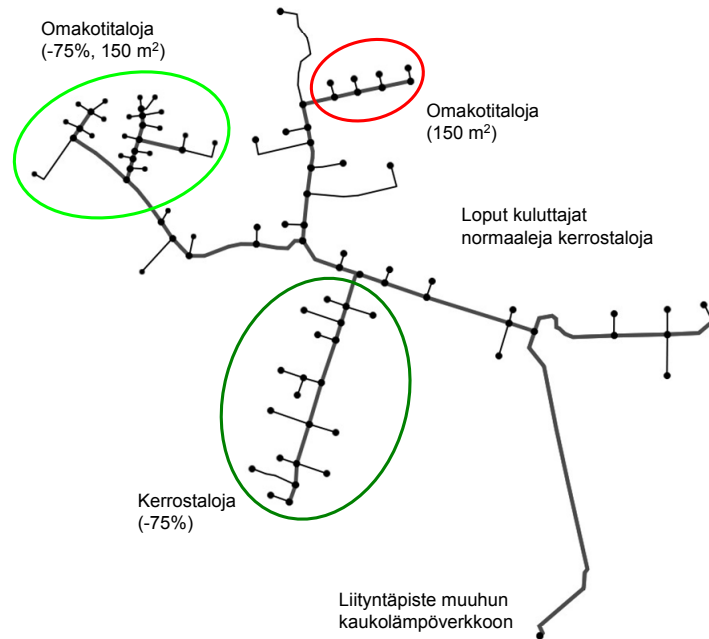
Huippuenergiatehokkaan rakentamisen merkitystä kaukolämpöverkolle arvioidaan siten, että verkon toimintaa tarkastellaan erilaisissa tapauksissa, joissa verkkoon on liitetty -75% - ja normitaloja mallinnetuin tuntitason kulutustiedoin.

3.1 Suurpellon kaukolämpöverkko ja käytetyt lähtötiedot

Kaukolämpöverkon toiminnan tarkastelussa käytettiin tietoja Suurpellon alueen olemassa olevasta runkoverkosta, jota täydennettiin liittämällä verkkoon yleisosakaavan perusteella erityyppisiä rakennuksia. Rakennukset keskitettiin omille alueilleen verkon eri osien toiminnan vertailun helpottamiseksi. Kulutustiedot saatiin rakennusmallilla suoritettujen simulointien tuloksina, joiden perusteella määritellyn alueen huipputehon tarpeeksi muodostui noin 1 900 kW, jolloin teho putkilinjametriä kohden on 450 W/m. Tämä tehontarve on pieni verrattuna olemassa olevien runkoputkien kapasiteettiin, joka suositelluilla virtausnopeuksilla ja normaalilla 40 °C:n jäähtymällä on 25–50 MW. Tällä ylimääräisellä putkikapasiteetilla on varauduttu alueen kasvuun tulevaisuudessa. Suoritetuissa simuloinneissa putkikokoja on kuitenkin muutettu suositeltujen virtausnopeuksien perusteella (painehäviö 1,0–2,0 bar/km) vastaamaan paremmin määriteltyä aluetta sellaisenaan. Putkityypiksi tarkasteltavassa verkossa on oletettu kiinnivaahdotettu kaksiputkinen kaukolämpöjohto (Mpuk). Kuvassa 51 esitetään tarkasteltava kaukolämpöverkko ja siihen alueittain kytketyt rakennustyypit.

Verkon toimintaa tutkittiin simuloimalla kaukolämpöverkkoa verkkomallilla (Ikäheimo et al. 2005), jolle annettiin lähtötietoina rakennusten kulutuslukemat, lämmönsiirtimien sekundääripuolen lämpötilat sekä ulkolämpötilan mukaan vaihteleva alueelle virtaavan kaukolämpöveden lämpötila tuntiaikasarjoina vuoden ajan. Käytetyt kulutustiedot perustuvat luvussa 1 esiteltyyn -75% -taloon sekä vastaavan kokoiseen nykyiset rakennusmääräykset täyttävään taloon. Kuluttajien lämmönsiirtimet mallinnettiin logaritmisena lämpötilaperiaatteen mukaisesti ja käytetyt mitoitussarvot esitetään taulukoissa 11 ja 12. Näin lasketut konduktanssit oletettiin vakioiksi. Lämmönsiirtimien mitoitustehot on määritelty tuntitason huipputehontarpeen mukaisesti.

3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon



Kuva 51. Tarkasteltava Suurpellon alueen kaukolämpöverkko.

Taulukko 11. Mitoituslämpötilat lämmönsiirtimien primääri- ja sekundääripuolille.

	Meno	Paluu
Kaukolämpö	90 °C	50 °C
Kaukolämpö, matalalämpötila	60 °C	30 °C
Lämmitys, normitalo	70 °C	40 °C
Lämmitys, -75 % -talo	40 °C	25 °C
Käyttövesi	55 °C	10 °C

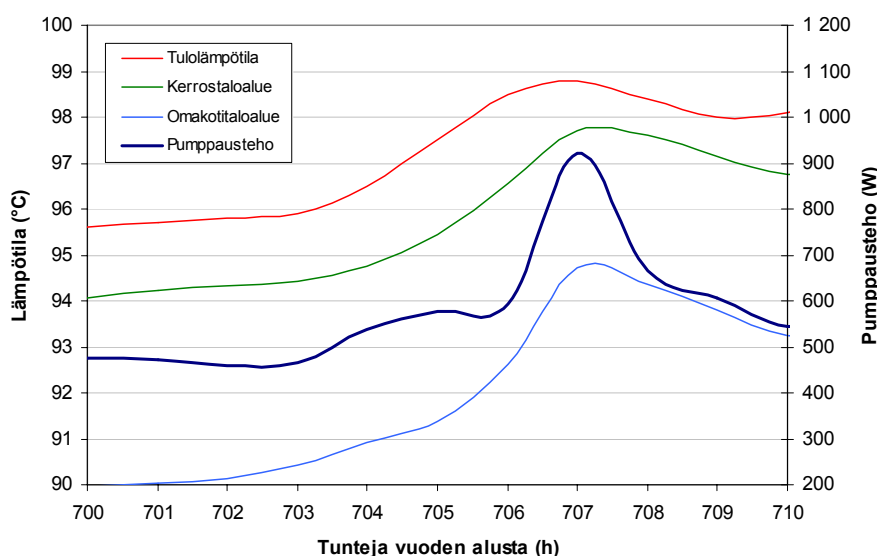
Taulukko 12. Lämmönsiirtimien tuntitehoihin perustuvat mitoitustehöt simulointimallissa.

Kerrostalo	Lämmitys		Käyttövesi	
	Normitalo	-75 % -talo		
Normitalo	62 000 W	47,0 W/m ²	35 000 W	
-75 % -talo	35 000 W	26,5 W/m ²	17 300 W	
Omakotitalo	Normitalo	8 000 W	53,3 W/m ²	3 500 W
-75 % -talo	4 500 W	30,0 W/m ²	1 730 W	

Simuloinneissa käytettiin lämpöhäviöiden laskennassa maaperälle ja kylmälle käyttövedelle vakiolämpötiloja 5 °C ja 10 °C. Ulkolämpötilan funktiona määritelty kaukolämpöveden syöttölämpötila on alimmillaan 75 °C, josta se nousee lineaarisesti maksimiarvoonsa 115 °C ulkolämpötilan laskiessa +5 °C:sta -26 °C:seen.

3. Ratkaisun vaikutus kaukolämpöverkkoon

Tulostietoina verkkomalli antaa paineet ja lämpötilat solmupisteissä sekä virtaukset ja lämpöhäviöt putkissa. Näistä lasketaan lisäksi tarvittava laskennallinen pumppausteho liityntäpisteessä muuhun kaukolämpöverkkoon sekä virtausnopeudet putkissa. Pumppaustehon laskennassa pumpulle on käytetty vakiohyötysuhdetta 50 %. Lämpötilat on laskettu dynaamisesti, joten syöttölämpötilan muutoksien etenemistä voi seurata veden virratessa verkon lävitse. Tämä ilmiö on nähtävissä kuvassa 52, jossa esitetään pumppausteho yhdessä verkon kolmen eri pisteen syöttöpuolen lämpötilan kanssa. Pisteet on valittu liityntäpisteistä kummankin huippuenergiatehokkaan alueen reunalta sekä koko tarkasteltavan alueen ja muun kaukolämpöverkon liityntäkohdasta.



Kuva 52. Pumppausteho ja kaukolämpöverkon syöttöpuolen lämpötilat kolmessa eri pisteessä.

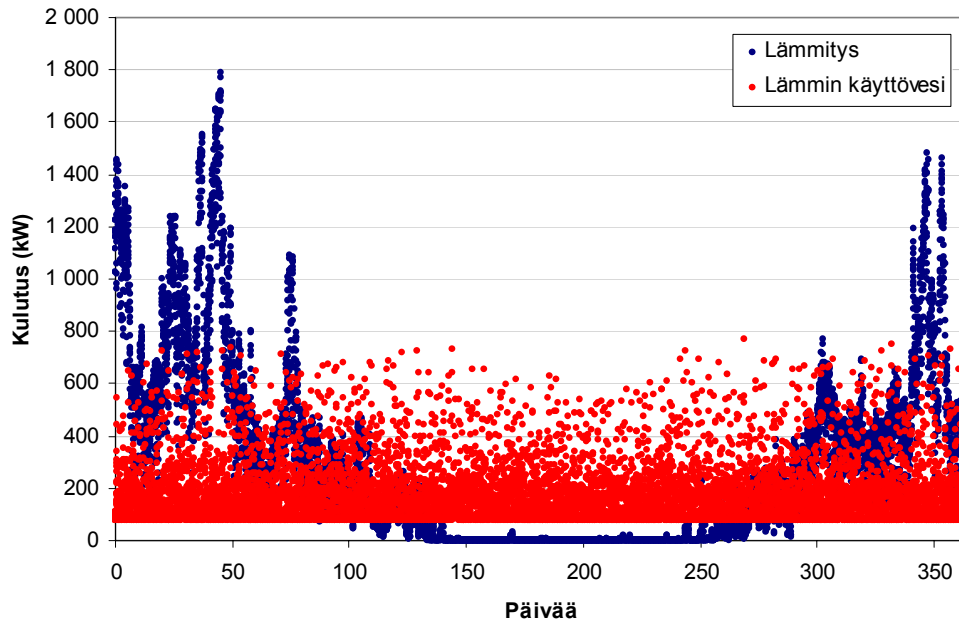
3.2 Kaukolämpöverkon laskennalliset tarkastelut

Kaukolämpöverkon laskennallisissa tarkasteluissa käydään läpi lähtötietoja erityisesti kulutuksen osalta. Simulointien tuloksista tarkastellaan erityisesti lämpöhäviöitä, pumppaustarvetta ja verkon jäähtymää sekä kuvataan yleisellä tasolla verkon toimintaa ja sen mahdollisia ongelmakohtia.

3.2.1 Kulutus

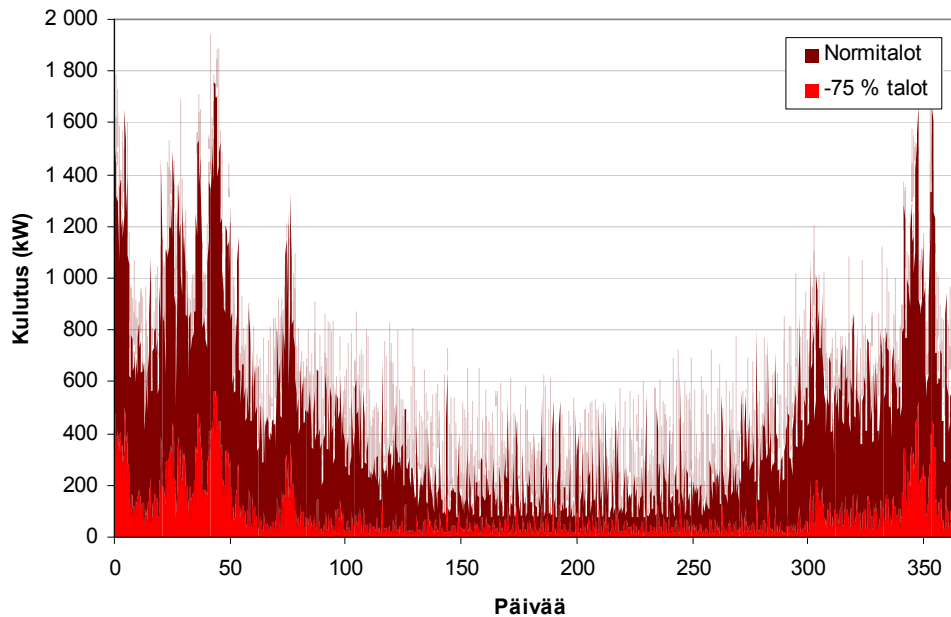
Kuvassa 53 on esitetty koko alueen tehontarve, joka on jaettu lämmitykseen ja lämpimään käyttövedeen. Kuvasta nähdään selvästi yli puolen vuoden jakso, jolloin käyttöveden osuus kokonaiskulutuksesta on merkittävä. Kesäkuukausina lämmitystä ei tarvita lainkaan tai vain hyvin vähän. Vuosittaisesta energiankulutuksesta lämmityksen osuus on 2 500 MWh (61 %) ja lämpimän käyttöveden 1 600 MWh (39 %) eli linjametriä kohden 930 kWh/m.

3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon



Kuva 53. Alueen tehontarve jaettuna lämmitykseen ja lämpimään käyttöveteen.

Kuvassa 54 on esitetty -75% -talojen ja normitalojen tehontarpeet tunneittain tarkasteluvuoden ajalta. Hetkittäin matalaenergiarakennukset vastaavat merkittävästä osasta tehontarvetta, mutta vuosienergiämääriä tarkasteltaessa normitalojen 3 250 MWh on selvästi suurempi kuin matalaenergiatalojen 860 MWh:n kulutus.

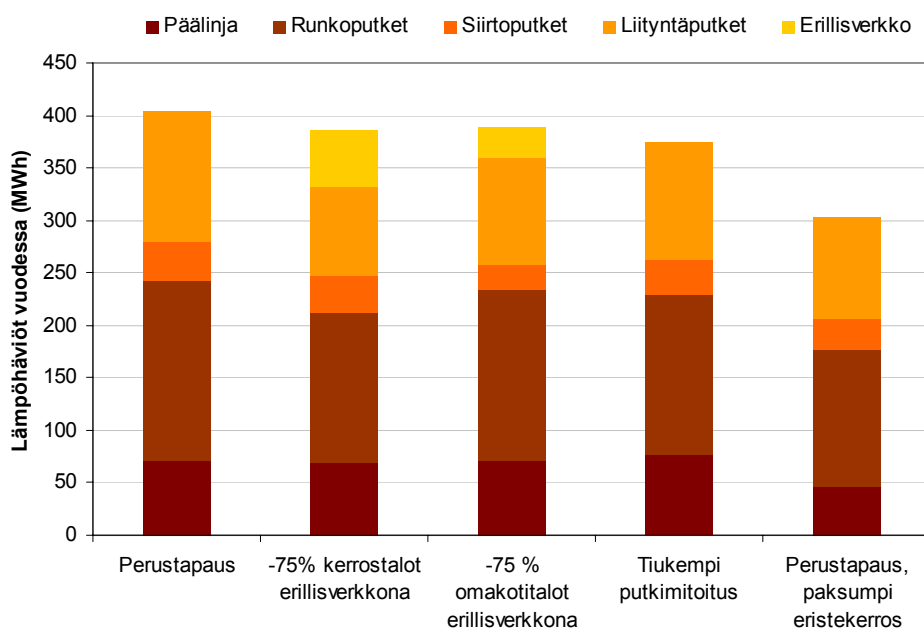


Kuva 54. Alueen -75% -talojen ja normirakennusten tehontarve vuoden ajan tarkasteltuna.

3.2.2 Lämpöhäviöt ja jäähtymä

Tarkasteltavaa verkkoa simuloitiin viidessä eri tapauksessa, joissa kaikissa rakennukset oli sijoitettu alueittain kuten kuvassa 51. Ensimmäisessä tapauksessa verkko oli määritelty perinteiseen tapaan; toisessa ja kolmannessa tapauksessa -75 % -kerrostaloalueella ja -omakotitaloalueella oli oma kiertopumppu sekä muuhun verkkoon lämmönsiirtimen välityksellä kytketty alhaisen lämpötilan (60 °C) erillisverkko. Neljännessä tapauksessa verkko vastasi rakenteeltaan ensimmäisen tapauksen verkkoa, mutta siihen oli suunniteltu tiukempi putkimitoitus (painehäviö 2,0–3,0 bar/km). Viidennessä tapauksessa rakenne vastasi perustapausta, mutta eristeluokkaa oli korotettu yhdellä.

Kuvasta 55 löytyvät alueen kaukolämpöverkon lämpöhäviöt eri tapauksissa putkityypeittäin. Erillisverkkoja sisältävässä simuloinnissa näkyvät lisäksi erillisverkon lämpöhäviöt. Perinteisen verkon kokonaislämpöhäviöt olivat 403,8 MWh, ja erillisverkkoratkaisuilla häviöistä leikkautui 4,4 % (kerrostaloalue) ja 3,7 % (omakotitaloalue). Tiukemmalla putkimitoituksella lämpöhäviöt pienenevät perustapaukseen nähden 7,2 % ja eristeluokkaa nostamalla 25 %.

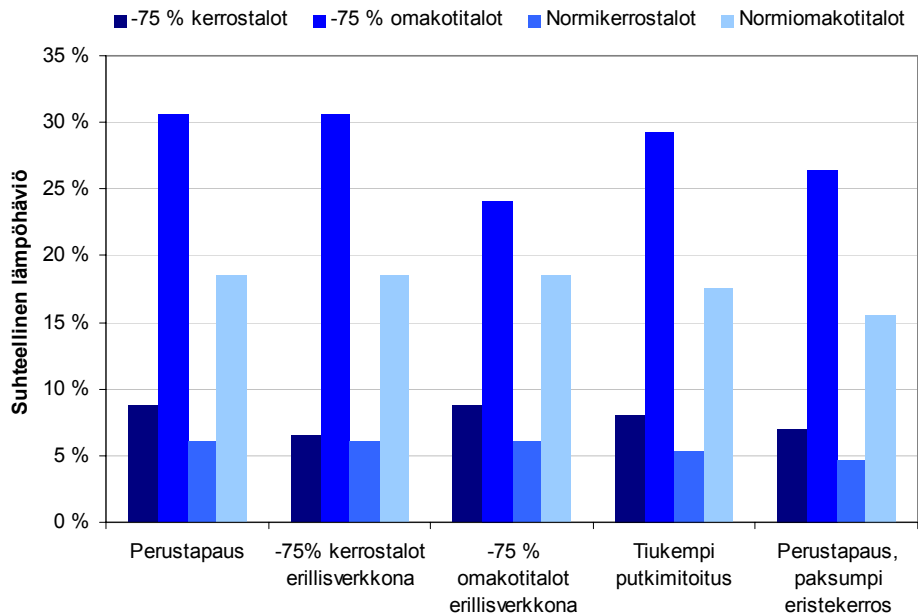


Kuva 55. Alueen kaukolämpöverkon lämpöhäviöt putkityypeittäin.

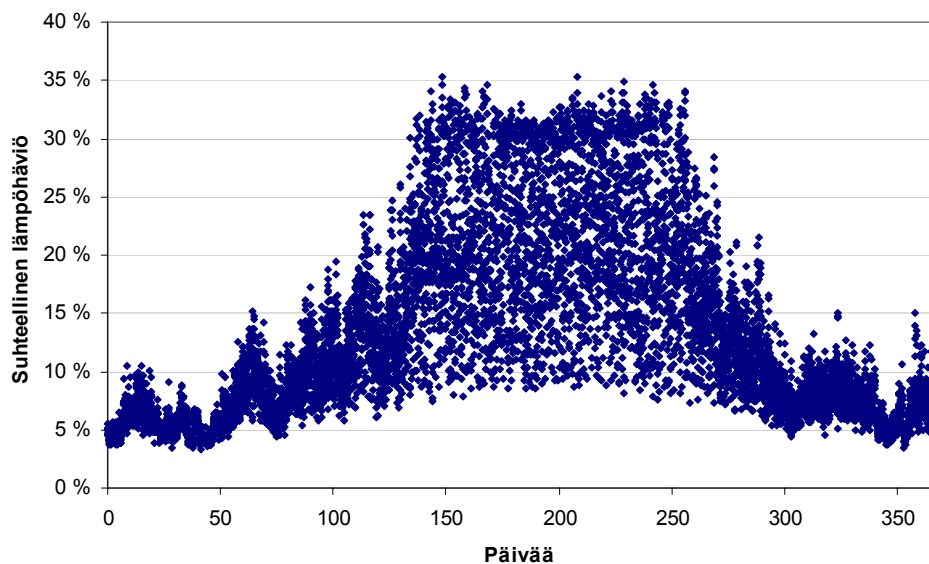
Kuvassa 56 on laskettu alueittain suhteelliset lämpöhäviöt eli alueen lämpöhäviöiden suhde häviöiden ja kokonaiskulutuksen summaan. Normikerrostalojen osalta luku olisi hieman pienempi, ellei suuri osa näistä taloista olisi suoraan runkoverkossa kiinni. Koko verkon alueelle laskettuna suhde on noin 9 %. Lämmönsiirtimillä erotettujen alhaisten lämpötilojen verkkojen käyttö näkyy selvänä näiden alueiden lämpöhäviöiden pienenemisenä: -75 % -kerrostaloalueen ja -omakotitaloalueen lämpöhäviöt pienenevät noin 28 %. Mielenkiintoisena yksityiskohtana eristyksen parantaminen kasvattaa suhteellisia lämpöhäviöitä huippuenergiatehokkaiden omakotitalojen alueella. Syynä tähän on lämpötilatason pysyminen perustapausta korkeammalla.

3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon

Kuvassa 57 on esitetty suhteellinen lämpöhäviö tunneittain yhtenäisen kaukolämpöverkon tapauksessa. Suhteelliset lämpöhäviöt ovat korkeimmillaan lämmityskauden ulkopuolella, jolloin absoluuttiset lämpöhäviöt ja erityisesti kulutus ovat pienimmillään. Hetkittäin suhteellinen lämpöhäviö nousee yli 35 %:n.

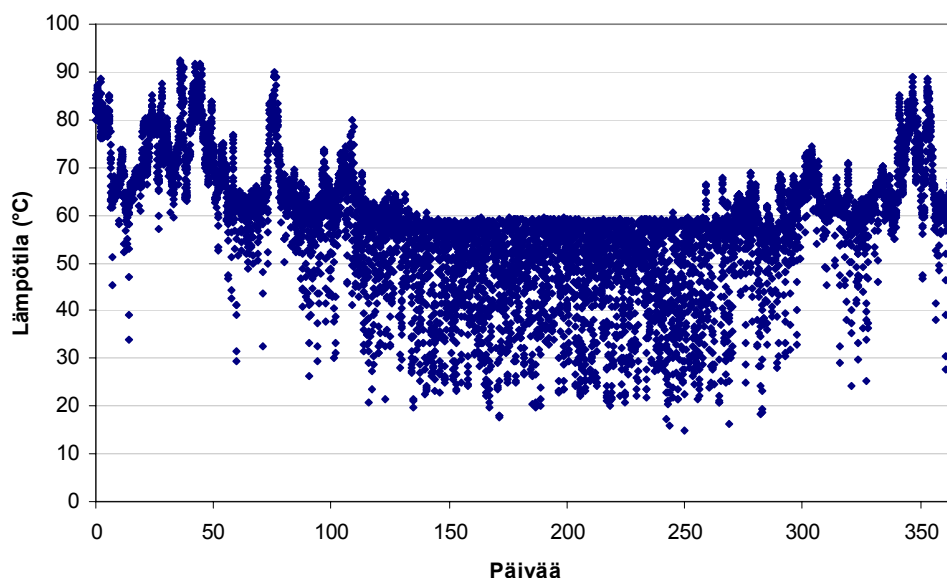


Kuva 56. Suhteelliset lämpöhäviöt alueittain.



Kuva 57. Suhteellinen lämpöhäviö, yhtenäinen verkko.

Jäähdytys alueen kaukolämpöverkon alueella ilman erillisverkkoja on esitetty kuvassa 58. Jäähdytys on pääasiassa hyvä vuoden ympäri, joskin kesäkaudella se vaihtelee voimakkaammin lämpimän käyttöveden hallitessa kulutusta. Kahdessa alhaisen lämpötilan erillisverkon sisältävässä tapauksessa jäähdytys on pääosin ± 1 °C:n päässä kuvan 58 arvoista, tosin -75 % -kerrostaloalueen erillisverkko aiheuttaa lämmityskauden ulkopuolella suurempia heittoja hetkittäin. Keskimääräinen ero on kuitenkin molemmissa tapauksissa selkeästi alle yhden asteen.

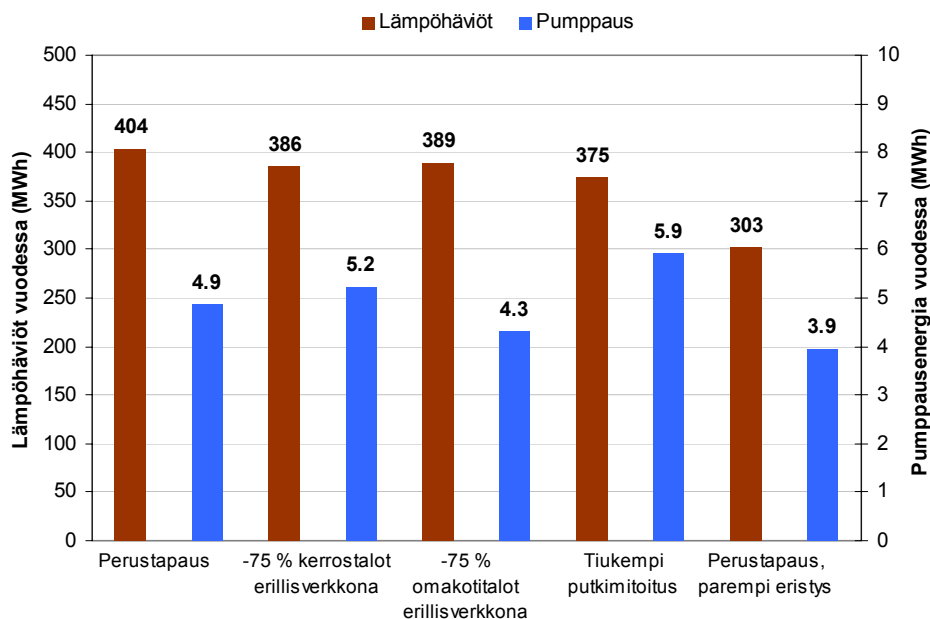


Kuva 58. Jäähdytys (meno-paluu) alueen kaukolämpöverkossa.

3.2.3 Pumppaus ja lämpöhäviöt

Kuvassa 59 on vertailtu kokonaislämpöhäviöitä ja pumppaukseen kuluva sähköä eri tapauksissa. Kuvasta on selvästi luettavissa, että erillisverkko tuottaa pienempiä lämpöhäviöitä mutta suuremman pumppauksen tarpeen. Erillisverkkojen putkimitoitus on tehty samoin kuin yhtenäisessä verkossa eli suositeltujen virtausnopeuksien perusteella. Hetkelliset pumppaustehot vaihtelevat pääosin 0,1–3 kW:n välillä, ja keskiarvo on noin 550 W.

3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon



Kuva 59. Lämpöhäviöt ja pumppausenergia vuodessa eri tapauksissa.

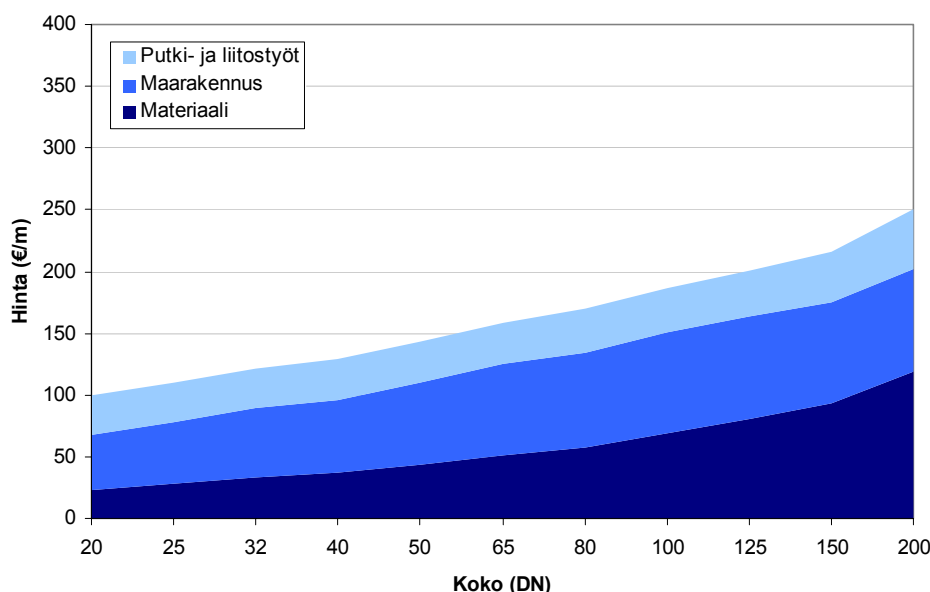
3.2.4 Kaukolämpöverkon toiminta

Pääpiirteissään huippuenergiatehokkaiden rakennusten liittäminen ei tuottanut kaukolämpöverkon käytön kannalta suuria ongelmia, mutta jotain haasteita tulosten käsittely paljasti. Tällainen oli kaukolämmön tulo puolen liian alhainen lämpötila hetkittäin lämmityskauden ulkopuolella (maalis–lokakuu). Lämpötila putosi paikoitellen huippuenergiatehokkailla kerros- ja omakotitaloalueilla alle vaaditun lämpimän käyttöveden lämpötilan, eikä käyttövetä kyetty näin ollen tuottamaan. Alhainen lämpötilataso näkyi myös pumppaustehontarpeen piikkeinä, joissa tarvittava massavirta kasvoi voimakkaasti. Yleisesti vähintään osalla näistä alueista lämpötila pysytteli koko kesäkauden hyvin lähellä käyttöveden tavoitelämpötilaa. Ongelma näkyi erityisesti verkoston latvaosissa, joissa lämpimän käyttöveden kulutukset eivät päässeet risteämään ja virtaus verkostossa oli huomattavan pieni. Ongelma olisi korjattavissa kasvattamalla virtausta ja tyytymällä pienempään jäähtymään, mutta se tarkoittaisi myös pumppaustehon tarpeen kasvua. Erityisesti omakotitaloalueella tämäkin järjestely ei välttämättä toimisi ongelmitta. Käytännössä tällaisen –75 % -omakotitaloista koostuvan alueen liittäminen kaukolämpöverkkoon on kuitenkin kustannussyistä epätodennäköistä, juuri alhaisen teho- ja kulutustason takia.

Itse lämpöhäviöt ovat koko verkon alueella kesäaikaan alhaisesta lämpötilatasosta johtuen pienemmät, mutta vähäisempi ja voimakkaasti lämpimään käyttöveteen painottuva kulutus näkyy pienempinä virtauksina, jolloin putkivirtauksen lämpötila laskee voimakkaasti. Suhteellisen lämpöhäviöt kasvavat kesäisin hetkittäin aina 35 %:iin saakka.

3.3 Putkikustannukset ja kannattavuus

Alueen kaukolämpöverkon käyttö- ja investointikustannukset on laskettu käyttämällä tasoitettuja kokonaiskustannuksia, jotka on muodostettu Energiateollisuus ry:n raportoimien kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen kustannusten perusteella (Energiateollisuus 2007). Lämpöhäviöiden ja pumppaustarpeen käsittelyyn on valittu lämmön hinnaksi 42,7 €/MWh ja sähkön 75 €/MWh. Kustannukset yksiputkisille kaukolämpöjohdoille (eristeluokka 3) on esitetty putkikoon mukaan jaoteltuina kuvassa 60. Kustannukset kasvavat kuvan tilanteessa lähes lineaarisesti – tosin kuvan esittämiä putkia suuremmilla putkilla kustannukset lähtevät jyrkempään kasvuun.

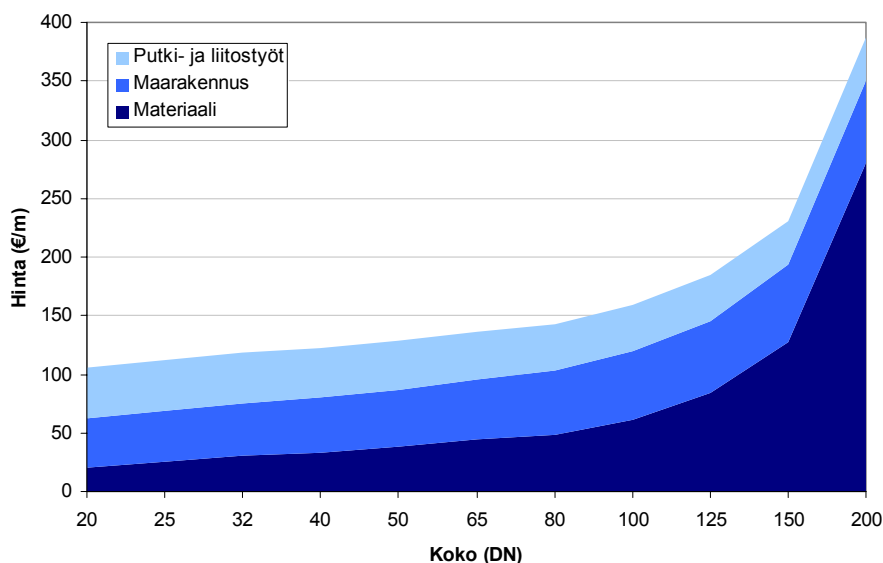


Kuva 60. Putkikustannukset kiinnivaahdotetuille yksiputkisille (2Mpuk) kaukolämpöjohdoille jaettuna koon mukaan materiaali-, maarakennus- sekä putki- ja liitostöihin.

Vastaavien kaksiputkisten kaukolämpöjohtojen (eristeluokka 3) kustannukset on koottu kuvaan 61. Käytettävissä olevien tietojen perusteella nähdään, että koot DN 32–DN 150 ovat edullisempia kaksiputkisina. Ero tällä välillä on 3 %–18 %, keskimäärin 10 % kaksiputkisten hyväksi. Pienten ja suurempien putkien hintaerot ovat 2 %–10 % yksiputkisten ollessa edullisempia. Putkikoossa DN 200 yksiputkiset ovat tilastojen mukaan jo 35 % edullisempia. Putkikustannuksista puhuttaessa on kuitenkin syytä tuoda esille suuret vaihtelut taulukoiduissa kokonaiskustannuksissa. Erot suurimman ja pienimmän kustannuksen välillä voivat olla kymmenistä euroista satoihin euroihin metriä kohden. Syinä tähän voivat olla esimerkiksi putkierä, maaperä ja rakennusympäristö. Tässä raportissa on käytetty toteutuneiden kustannusten keskiarvoja.

Kustannukset eristyksen parantamisesta (eristeluokasta 3 luokkaan 4) perustuvat Energiateollisuus ry:n julkaisemaan raporttiin ja ovat tarkasteltavilla kokoluokilla 5–8 % (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2009). Putkia valittaessa on otettava huomioon myös lämpöhäviöt. Ne ovat pienemmät kaksiputkisella putkityypillä, joten valinta kokoluokassa DN 32–DN 150 vaikuttaa selvältä.

3. Ratkaisun vaikuttavuus kaukolämpöverkkoon



Kuva 61. Putkikustannukset kiinnivaahdotetuille kaksiputkisille (M-puk) kaukolämpöjohdoille jaettuna koon mukaan materiaali-, maarakennus- sekä putki- ja liitostöihin.

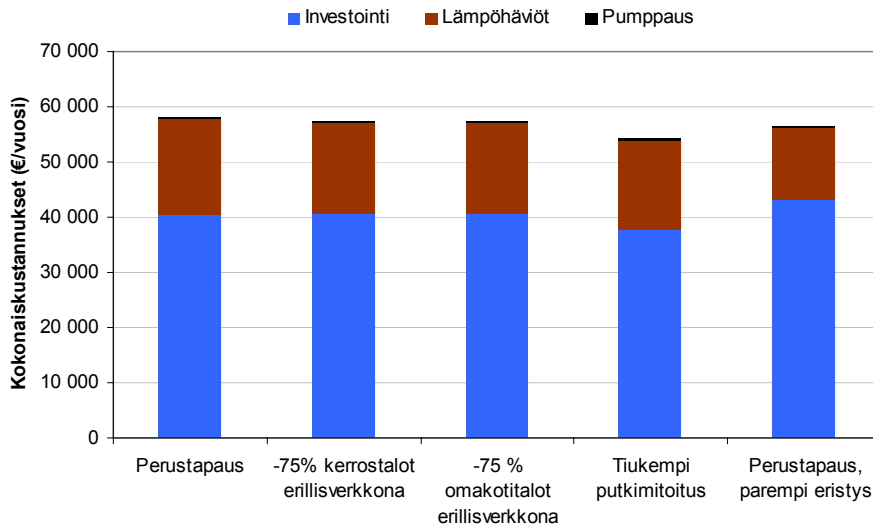
Kuvaan 62 on laskettu vuosikustannukset neljälle simuloitulle tapaukselle. Tuloksista nähdään selvästi verkkoinvestoinnin hallitseva rooli kuten myös se, ettei lämpöhäviöiden nipistämällä lämpötilatasoa alueellisesti laskemalla ole ratkaisevaa vaikutusta kokonaiskustannuksiin. Pumpauskulut jäävät myös tiukemmalla mitoituksella vähäisiksi. Simuloidussa tilanteessa näyttää siltä, että hetkellisesti liian suuret painehäviöt muodostuvat ongelmaksi selvästi ennen kuin pumpauskulut muodostavat merkittävän osuuden kokonaiskustannuksista. Putkimitoitusta tiukentamalla kustannussäästöjä syntyy myös lämpöhäviöissä; vain pumpauskustannukset kasvavat. Investointia laskettaessa on putkikustannuksille käytetty kaksiputkisten kaukolämpöjohtojen kustannuksia. Tehokkaampaa eristystä käytettäessä (eristeluokka 4) kokonaiskustannuksia on korotettu lähteenä käytetyn tutkimusraportin mukaisesti 5–8 %. Investointi on esitetty annuiteettina, jossa korkokannaksi on oletettu 6 % ja pitoajaksi 30 vuotta.

Kuvassa 63 on esitetty yhdestä käsitellyn kaukolämpöverkon osasta (kuvassa 51 näkyvä –75 % -kerrostaloalue) syntyviä kumulatiivisia kustannuksia siten, että alueelle olisi sijoitettu erityyppisiä rakennuksia. Käyttökulujen (lämpöhäviöt ja pumpaus) ja maksujen (perusmaksu) nykyarvon laskemiseen on käytetty korkokantaa 6 %. Verkon vaatimasta alkuinvestoinnista on vähennetty liittymismaksu.

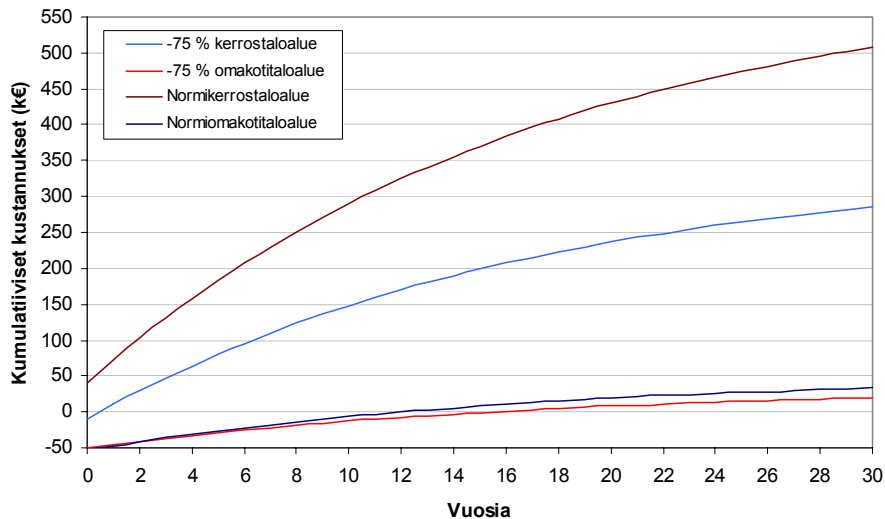
Liittymis- ja perusmaksuina on käytetty Fortumin voimassa olevia hintoja. Energimaksu on jätetty laskennassa huomioimatta, sillä sen oletetaan peittävän laitosten muuttuvia kustannuksia, pääasiassa polttoainekustannuksia. Takaisinmaksuaikoja tarkasteltaessa on syytä muistaa, että verkkoinvestointiin on laskelmissa otettu mukaan ainoastaan kyseisten alueiden sisältämä verkko – ei kaukolämmön alueille toimittavaa runkoverkkoa tai itse tuotantoyksiköitä, jotka todellisuudessa ovat taloudellisia rasitteita investointeja mietittäessä. Myös huoltokulut on jätetty laskelmissa huomioimatta. Kuvan tarkoituksena onkin vertailla erityyppisiä rakennuksia sisältäviä alueita

3. Ratkaisun vaikutus kaukolämpöverkkoon

keskenään. Kuvasta käy selvästi ilmi molempien kerrostaloalueiden nopeat takaisinmaksuajat sekä omakotitaloalueiden heikko kannattavuus.



Kuva 62. Kaukolämpöverkon kokonaiskustannukset vuodessa viidessä tarkastellussa tapauksessa, investointi katetaan annuiteettilainana (6 %, 30 vuotta).



Kuva 63. Kumulatiiviset kustannukset kaukolämmölle neljällä eri alueella ilman runkoverkon, tuotantolaitosten ja huoltokulujen tuomaa kustannusrasitetta. Käytetty korkokanta 6 %.

3.4 Johtopäätöksiä

Kaukolämpöverkon kustannustehokkuutta etsittäessä lämpöhäviöitä voidaan leikata esimerkiksi tiukemmalla putkimitoituksella ja alhaisen lämpötilatason erillisverkoilla. Erillisverkko voidaan myös rakentaa normaalia alemmalle painetasolle (PN6). Muita keinoja ovat lisäeristys ja nykyisen kaukolämpöverkon syöttölämpötilan pitäminen alhaisempana silloin, kun kulutus sen sallii. Kokonaisinvestoinnin kannattavuutta tarkasteltaessa näiden merkitys on kuitenkin melko vähäinen. Energiatehokkaamman rakennuskannan yleistyessä merkitys voi silti alueellisesti kasvaa, kun suhteelliset lämpöhäviöt lisääntyvät. Koska näillä alueilla kulutus on vähäistä, kaukolämpöverkon vaatiman investoinnin takaisinmaksuajat pitenevät ja myös lämpöhäviöiden merkitys korostuu.

Kaukolämpöverkon merkittävimmän kustannustekijän eli rakentamiskustannusten minimoimiseksi on entistä tärkeämpää suunnitella alueet kokonaisuuksina, jolloin päästään mitoittamaan verkko mahdollisimman tarkkaan kulutusta vastaavaksi. Tämä tarve korostuu erityisesti alhaisen kulutustason kohteissa, joissa investoinnilla on selkeitä kustannuspaineita.

Energiatehokkaammat rakennukset laskevat erityisesti lämmitysenergian tarvetta, mutta tässä raportissa esitetyssä huippuenergiatehokkaassa –75 % -talossa myös käyttöveden lämmitystarve pienenee. Varmaa on, että käyttöveden osuus näiden kahden yhteenlasketusta energiankulutuksesta kasvaa.

Kaukolämpöverkon toiminnan kannalta huippuenergiatehokkaiden alueiden suunnittelussa riittävän korkean lämpötilatason ylläpitäminen voi tuottaa ongelmia lämmityskauden ulkopuolella. Virtausnopeudet tällaisilla alueilla ovat pieniä kuten putkikootkin, joten lämpötila voi ehtiä laskemaan liian alhaiseksi ennen kuluttajalle päätymistä. Ongelma on kuitenkin ratkaistavissa säätöteknisin keinoin jäähtymästä tinkimällä.

Verkon tiukemmat mitoitusvaatimukset edellyttävät todennäköisesti myös pumppauskapasiteetin hajauttamista verkkoon, jolloin verkkoa voidaan hallita paremmin eri ajotilanteissa. Verkon tehokas käyttö edellyttää myös nopeaa mukautumista eri ajotilanteisiin. Verkon tehokas ja optimaalinen käyttö johtanee ns. älykkäiden kaukolämpöverkoston luomiseen. Älyverkolla on kyky mukautua muuttuviin tilanteisiin verkon lämpötilatason ja hydraulisen tasapainon suhteen sekä minimoida verkon ”tyhjäkäynti”. Nämä kaikki vaatimukset pitäisi toteuttaa kilpailukykyisin kustannuksin.

4. Yhteenveto

Rakennusten energiatehokkuuden merkittävä paraneminen johtaa lämmitysjärjestelmän uudelleen arviointiin, jossa investoiminen perinteiseen tilojen lämmityksen jakeluun ei todennäköisesti ole kannattavaa suhteessa energiakustannuksiin. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli esittää kaukolämmön ratkaisumalli energiatehokkuudeltaan 75 % nykytasoa paremmalle asuinkerrostalolle. Hankkeessa vertailtiin eri lämmönjakotapojen soveltuvuutta kaukolämmitteiseen –75 % -asungerrostaloon. Lisäksi tarkasteltiin kaukolämmön kilpailukykyä muihin lämmitysmuotoihin verrattuna sekä tutkittiin energiatehokkaan asuinalueen kaukolämpöverkon toimintaa ja kustannustehokkuutta.

Vertailtavina lämmönjakojärjestelminä olivat perinteinen radiaattorilämmitys, asuntokohtainen ilmanvaihtolämmitys ja huonekohtainen ilmanvaihtolämmitys. Kaikilla jakelumodoilla voidaan toteuttaa toimiva kaukolämpöratkaisu. Tulosten perusteella kustannustehokkain puhtaasti kaukolämpöä hyödyntävä ratkaisumalli on kaukolämmitys yhdistettynä keskitettyyn ilmanvaihtolämmitykseen (ilman huonekohtaisia pattereita). Lisäksi ratkaisuun kuului lämmintä käyttövetä tuottava erillinen varaaja, joka pienentää tilaustehoa ja sitä kautta perus- ja liittymismaksua. Ilmanvaihtokoneessa lämmön talteenoton huurtumisen esto hoidetaan kaukolämpöön kytketyllä esilämmityspatterilla, joka samalla huolehtii lämmitysverkoston paluuveden alhaisesta lämpötilasta. Tehdyissä laskentatarkasteluissa havaittiin, että tällainen kytkentäratkaisu mahdollistaa hyvän jäähtymän kaukolämpöverkon puolelle – jopa niin hyvän, että ratkaisu vaatii lämmitysverkoston paluuseen jäätymisvahdin ja suntauksen, jotta lämmityspiirin siirrin ei pääse jäätymään missään olosuhteissa. Tilojen lämmityspiirin paluulämpötila oli lämmityskaudella (marras–helmikuu) aina alle 20 °C. Keskitetyn säädön haittapuolena on monivöhykkeisissä asunnoissa huonekohtaisen säätömahdollisuuden heikkeneminen verrattuna huonekohtaiseen säätöön ja jakeluun.

Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailun (9 eri lämmitysjärjestelmää) valossa voidaan todeta, että kaukolämpöjärjestelmän kilpailukyky nykyisen kaltaisella kaukolämmön hinnoittelurakenteella ja perinteisellä patteriverkkojakelulla on haasteellinen korkeiden investointikustannusten vuoksi. Tutkittujen vaihtoehtojen 30 vuoden tarkastelujaksojen nykyarvot (energia ja investoinnit) olivat kuukautta kohti laskettuna 0,23–0,33 €/asuin-m². Vaihtoehtoista kallein oli täydelle teholle mitoitettu lämpöpumppu ja edullisin sähköllä toimiva ilmanvaihtolämmitys yhdistettynä lämpöpumpulla lämmitettävään käyttöveteen. Kustannusten ero euroina on melko pieni, ja järjestelmävalinnassa tulisikin ottaa huomioon kustannusten lisäksi myös muita tekijöitä, kuten palvelukyky. Näitä ovat esimerkiksi lämpimän käyttöveden riittävyys, eri lämmitysjärjestelmillä saatavat lämpöolot sekä järjestelmien käytettävyys, luotettavuus, ulkonäkö ja huoneen sisustettavuus. Primäärienergiavertailussa kaukolämmön kilpailukyky muihin lämmöntuottomuotoihin

4. Yhteenveto

verrattuna olisi luultavasti hyvä. Primäärienergiatarkastelu on kuitenkin rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska virallisia kertoimia eri energiamuodoille ei ole vielä käytettävissä.

Kaukolämpöjärjestelmän kustannuspaineet ovat selkeät, kun energiaa kulutetaan vähän. Valtaosa kustannuksista syntyy kaukolämmön jakeluverkkoon investoimisesta. Jakeluverkoston lämpöhäviöillä on kustannuksista osuutensa, mutta merkittäviä säästöjä niitä leikkaamalla ei voida saavuttaa. Huippuenergiatehokkaita rakennuksia kaukolämpöverkkoon liitettäessä korostuu alueiden suunnittelu kokonaisuuksina, jolloin verkon mitoittaminen voidaan tehdä mahdollisimman tarkasti kulutustasoa vastaavaksi. Pienemmät putkikoot tarkoittavat paitsi pienempiä investointikustannuksia, myös pienempiä lämpöhäviöitä. Pumppaus vastaa hyvin pientä osaa käyttökustannuksista myös tiukemmalla putkimitoituksella. Huippuenergiatehokkailla kaukolämpöverkkoon liitetyillä alueilla lämpöhäviöiden merkitys toki korostuu perinteisiin alueisiin nähden: suhteellinen lämpöhäviö kasvoi vuosisimuloinneissa noin 5 prosenttiyksikköä. Alhaisen lämpötilatason verkkoratkaisun avulla tämä on mahdollista laskea samalle tasolle kuin perinteisillä alueilla. Energiatehokkuuden parantuessa käyttövesi vastaa kaukolämmön kulutuksesta entistä suurempaa osaa.

Tehtyjen kilpailukykykalkelmien valossa voitaisiin toisaalta ehdottaa myös jonkinlaista kaukolämpötuotteiden hinnoitteluun liittyvää kehitystä, jolloin perusmaksun painoarvoa asiakkaan kaukolämpölaskussa muutettaisiin pienemmäksi ja energian osuutta suuremmaksi. Tällainen hinnoittelun muutos voisi lisätä kaukolämmön houkuttelevuutta energiatehokkaiden talojen omistajien näkökulmasta. Toki hinnoittelumuutos pitää sisällään ajatuksen siitä, että osa infrastruktuurin rakentamisen kustannuksista siirtyisi energiatehottomampien talojen kannettavaksi. Toisaalta huipputehokkaat talot pystyvät esitetyillä talotekniikan mitoitusratkaisulla tuottamaan hyvän kaukolämpöveden jäähtymisen talven mitoituspisteessä. Tällöin verkostomitoitukseen vaikuttavat kaukolämpöveden virtaamat ovat pienemmät perinteisiin ratkaisuihin verrattuna ja vähentävät näin infrakustannuksia kaukolämpöverkossa.

Jatkossa haasteet vain kasvavat, kun rakennuskantaa kehitetään uudisrakentamisessa ns. nollaenergiasuuntaan ja olemassa olevan kannan korjausrakentamisessa tullaan vaatimaan energiakulutusta leikkaavia toimenpiteitä. Kaukolämpöratkaisuja kehitettäessä joudutaan siis etsimään joustavuutta myös jo olemassa olevan kaukolämpöverkon puitteissa rakennuskannan korjausrakentamisen yhteydessä. Eikä kovin kaukaisessa tulevaisuudessa ole sekään visio, että rakennusten energiankulutuksen leikkaamisessa mennään jopa yli nollaenergiatason. Tällöin puhutaan plusenergiataloista eli rakennuksista, jotka tuottavat itse energiaa yli oman tarpeen. Kaukolämpöverkko voisi silloin toimia jakelukanavana plusenergiarakennuksissa ja/tai hajautetussa pienen mittakaavan CHP-tuotannossa tuotetulle lämpöenergialle.

EU-tasoisten tutkimusohjelmien suunnitelmissa siirretään energiakulutuksen tehostamiskeinojen yhteydessä tarkastelun painopiste ensimmäistä kertaa yhdestä rakennuksesta aluetasolle (*neighbourhood level*). Samalla kaukolämmön status aluetason ratkaisuna kasvaa, ja se saattaa muuttua houkuttelevaksi vaihtoehdoksi myös uusissa maissa.

Lähdeluettelo

- Ahonen, M., Xu, M., Virtanen, M. 1992. Uudentyyppisten kaukolämmönjakokeskusten teknista-loudellinen analyysi. VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1363. ISBN 951-38-4176-6. VTT, Espoo. 105 s. + liitt. 22 s.
- Energiateollisuus ry 2007. Maanalaisten kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen rakentamis-kustannukset. Kaukolämpökansio 2/8.
- Energiateollisuus ry 2008. Kaukolämpöalan strategia. ISBN (pdf) 978-952-5615-23-4.
- Energiateollisuus ry 10.9.2009. <http://www.energia.fi>
- Etheridge, D, Sandberg, M. 1996. Building Ventilation: Theory and Measurement, John Wiley & Sons. 724 s. ISBN 0 471 96087 X.
- European Strategies 2008. Climate Action – Energy for a Changing world. January 2008. http://ec.europa.eu/energy/strategies/2008/2008_01_climate_change_en.htm.
- Fortum 21.10.2009. <http://www.fortum.fi>.
- Guidelines for District Heating Substations. 2008. Approved by Euroheat & Power Board, pre-pared by Task Force Customer Installations. October 2008.
- Haka. 1985. Rakennuskunta. Asuinkerrostalon lämmön talteenoton seurantatutkimus VVO/ Jampankuusi. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto. Sarja D:77. 84 s. + liitt. 18 s. ISBN 951-46-8715-9.
- Ikäheimo, J., Söderman, J., Petterson, F., Ahtila, P., Keppo, I., Nuorkivi, A., Sipilä, K. 2005. DO²DES – Design of Optimal Distributed Energy Systems, Design of district heating network. Åbo Akademi. Report 2005-1.
- Kaukolämpöjohtojen optimaalisen eristyspaksuuden tarkastelu. Lappeenrannan teknillinen yli-opisto. Raportti 4.9.2009. <http://www.energia.fi/fi/kaukolampo/kirjasto/tutkimusraportit>
- Koivuniemi, J. 2005. Lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama ja lämpötilakriteerit veden mikro-biologisen laadun kannalta kaukolämmitetyissä asuinrakennuksissa. Diplomityö. Tek-nillinen korkeakoulu 29.4.2005.
- Lankinen, E., Lönnqvist, H., Niska, A., Schulman, H. 2005. Asumisväljyys Helsingissä 1950–2050. Helsinki: Helsingin kaupungin tietokeskus.
- Lämmitysjärjestelmien vertailu tyyppitalossa. Motiva Oy 2009. <http://lammitysjarjestelmat.hosting.ambientia.fi/tyyppitalovertailu.php>.
- Nuorkivi, A., Ranne, A. 1989. Kaukolämpökuluttajan käyttäytyminen: verkon dynamiikka ja LKV:n tehontarve. KTM, energiaosasto. 71 s. Sarja D: 168.

4. Yhteenveto

- RakMk, D5/2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki 2007. <http://www.finlex.fi/data/normit/29520-D5-190607-suomi.pdf>.
- RakMk, C3/2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen lämmöneristys; Määräykset 2007. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki 19.6.2007. http://www.finlex.fi/data/normit/29517-C3_2007.pdf.
- RakMk, C3/2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen lämmöneristys; Määräykset 2010. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto Helsinki 22.12.2008. http://www.finlex.fi/data/normit/34163-C3-2010_suomi_221208.pdf.
- Sarja, A., Laine, J., Pulakka, S., Saari, M. 2003. INDUCON rakennuskonsepti. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka. VTT Tiedotteita 2206. 66 s. + liitt. 35 s. ISBN 951-38-6163-5. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2206.pdf>.
- Suomen Kaukolämpö ry, K1/2003/2007. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. (Päivitys 7.5.2007 / Energiategollisuus ry). ISBN 951-96973-8-1.
- Suomen Kaukolämpö ry, K15/1998. Tilausteho ja -vesivirta. Määrittäminen ja tarkistaminen. ISSN 1238-9250.
- Tuomaala, P. 2002. Implementation and evaluation of air flow and heat transfer routines for building simulation tools, VTT Publications 471. Espoo. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2002/P471.pdf>.
- Valtioneuvosto 2009. Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta: kohti vähäpäästöistä Suomea. Valtioneuvoston kanslian julkaisusarja 28/2009. Helsinki 15.10.2009. ISBN (PDF) 978-952-5807-66-0.
- Vehviläinen I., Hiltunen J., Vanhanen J. 2007. Lämmön ja sähkön yhteistuotannon potentiaali sekä kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen tulevaisuus Suomessa. Tutkimusraportti, Gaia Group Oy.



Julkaisun sarja, numero ja
raporttikoodi

VTT Tiedotteita 2513
VTT-TIED-2513

Tekijä(t) Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka, Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä		
Nimeke Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut		
Tiivistelmä Tässä projektissa tutkittiin nykyistä tasoa 75 % vähemmän lämpöä kuluttavan talon kaukolämmön (KL) ratkaisumalleja. Lähestymistapa oli kokonaisvaltainen, eli projektissa tarkasteltiin koko lämmitysjärjestelmää huonetilasta aina kaukolämpökytkentään ja kaukolämpöverkko vaikutuksiin asti. Tuloksena esitettiin kaukolämpöratkaisu, joka sopii matalaenergia-asuintaloon. Elinkaarikustannuksiltaan edullisin kaukolämpöratkaisu oli ilmanvaihtolämmitys. Ratkaisussa lämmin vesi tuotetaan varaajakytkennällä. Tehdyn tarkastelun valossa voidaan esittää, että kaukolämpöjärjestelmän kilpailukyky nykyisen kaltaisella hinnoittelurakenteella ja perinteisellä patteriverkkojaketulla saattaa olla heikko korkeiden investointikustannusten vuoksi. Tutkittujen vaihtoehtojen 30 vuoden tarkastelujaksojen nykyarvot (sis. energian ja investoinnit) olivat 0,23–0,33 €/asuin-m ² kuu-kaudessa. Täydelle teholle mitoitettu lämpöpumppu oli kallein; sähköllä toimiva ilmanvaihtolämmitys ja käyttöveden tuotto lämpöpumpulla edullisin vaihtoehto. Kustannusten ero euroina oli melko pieni, ja järjestelmävalinnassa tulisikin ottaa huomioon kustannusten lisäksi myös muita tekijöitä, kuten palvelukyky. Näitä ovat esimerkiksi eri lämmitysjärjestelmillä saatavat lämpöolot ja käytettävyys, lämpimän käyttöveden riittävyys, lämmityslaitteiden ulkonäkö sekä huoneen sisustettavuus.		
ISBN 978-951-38-7541-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinnumero 27138
Julkaisuaika Marraskuu 2009	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 68 s.
Projektin nimi Hetakar	Toimeksiantaja(t) Energiateollisuus ry, Fortum Power and Heat Oy, Oy Danfoss Ab, VVO-yhtymä Oyj	
Avainsanat Very low energy building, district heating, heat distribution, domestic hot water heat recovery, ventilation integrated heating	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	



Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2513
VTT-TIED-2513

Author(s) Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka, Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä		
Title District Heating Solution for Very-Low-Energy Residential Building		
Abstract A number of prospective district heating solutions were investigated in the context of buildings needing 75% less energy as compared with standard solution today. Holistic approach was used, covering the entire system from room space, through the distribution piping, district heating substation to the district heating network. A district heating solution was proposed that fits very low-energy house. A number of different solutions were analysed from the life cycle cost point of view. The most cost-effective district heating solution was based on ventilation integrated heating. The solution included domestic hot water system equipped with a storage tank connected through heat exchanger. Conducted analysis suggests that district heating with traditional room heaters and current billing tariff structure may not be cost effective due to high investment costs. Present values (of energy and investments) of all investigated solutions projected over 30 years span remained within the range 0.23–0.33 €/m ² per month. The full load heat pump system was the most expensive and the ventilation integrated heating system using electricity with domestic hot water prepared by heat pump was the least expensive. The apparently narrow range band indicates that in addition to costs also other features should be considered when selecting the energy system. These could be e.g. achievability of high indoor comfort level, functionality, outlook of heating terminals.		
ISBN 978-951-38-7541-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 27138
Date November 2009	Language Finnish, English abstr.	Pages 68 p.
Name of project Hetakar		Commissioned by Finnish Energy Industries, Fortum Power and Heat, Danfoss, VVO Group plc.
Keywords Very low energy building, district heating, heat distribution, domestic hot water heat recovery, ventilation integrated heating		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374

VTT Tiedotteita - Research Notes

- 2498 Eveliina Saari, Heli Riikonen, Sirkku Kivisaari & Annika Heikkilä. Jyväskylän uudet päivähoitoratkaisut. 2009. 37 s. + liitt. 2 s.
- 2499 Kirsi Korpijärvi, Ulla-Maija Mroueh, Elina Merta, Jutta Laine-Ylijoki, Harri Kivikoski, Eliisa Järvelä, Margareta Wahlström & Esa Mäkelä. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. 2009. 75 s. + liitt. 19 s.
- 2500 Esa Sipilä, Jürgen Vehlow, Pasi Vainikka, Carl Wilén & Kai Sipilä. 2009. Market potential of high efficiency CHP and waste based ethanol in European pulp and paper industry. 2009. 73 p.
- 2501 Jari Konttinen, Nina Suvinen & Mika Nieminen. Välittäjäorganisaatiot tutkimuslähtöisen yritystoiminnan edistäjänä. 2009. 74 s.
- 2502 Tommi Kaartinen, Paula Eskola, Elina Vestola, Elina Merta & Ulla-Maija Mroueh. Uudet jätteenkäsittely-keskusten vesienhallintatekniikat. 2009. 94 s. + liitt. 11 s.
- 2503 Sebastian Teir, Eemeli Tsupari, Tiina Koljonen, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Antti Arasto, Antti Tourunen, Janne Kärki, Matti Nieminen & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). 2009. 61 s.
- 2504 Sirkku Kivisaari, Lauri Kokkinen, Juhani Lehto & Eveliina Saari. Sosiaali- ja terveydenhuollon systeemisen innovaation johtaminen – kahden tapaustutkimuksen opetuksia. 2009. 69 s. + liitt. 16 s.
- 2505 Annele Eerola & Torsti Loikkanen. Governance and Research of Nordic Energy System Transition. Summary Report of the GoReNEST project. 2009. 45 p. + app. 3 p.
- 2506 Pertti Koukkari (ed.). Advanced Gibbs Energy Methods for Functional Materials and Processes. ChemSheet 1999–2009. 2009. 145 p.
- 2507 Kati Koponen, Sampo Soimakallio & Esa Sipilä. Assessing the greenhouse gas emissions of waste-derived ethanol in accordance with the EU RED methodology for biofuels. 2009. 42 p. + app. 7 p.
- 2508 Pentti Vähä, Jari Kettunen, Tapani Ryyänen, Minna Halonen, Jouko Myllyoja, Matti Kokkala, Maria Antikainen & Jari Kaikkonen. Palvelut muokkaavat kaikkia toimialoja. Palveluliiketoiminnan toimialakohtaiset tiekartat. 2009. 128 s.
- 2509 Maija Ruska & Göran Koreneff. Ydinvoimalaitoshankkeiden vaikutukset kilpailuun sähkömarkkinoilla. 2009. 57 s. + liitt. 12 s.
- 2510 Jyrki Poikkimäki, Katri Valkokari & Juha-Pekka Anttila. Teräspalvelutoiminnan tulevaisuus Suomessa. 2009. 48 s. + liitt. 21 s.
- 2511 Minna Kurkela (ed.). Advanced Biomass Gasification for High-Efficiency Power. Publishable Final Activity Report of BiGPower Project. 2009. 53 p.
- 2513 Krzysztof Klobut, Jorma Heikkinen, Jari Shemeikka, Ari Laitinen, Miika Rämä & Kari Sipilä. Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut. 2009. 68 s.